2021年10月14日(木)

A会場 | 特別セッション：S21. 震源物理・地下構造推定・強震動評価のための地震波スペクトル解析

9:00 ~ 10:00 | A会場 A会場

AM-1

座長:内出 崇彦(国立研究開発法人 産業技術総合研究所)、染井 一寛(地域 地盤 環境 研究所)

9:00 ~ 9:15

[S21-01] [Invited] Introduction to the SCEC Community Stress Drop Validation Study

Baltay Annemarie[2]、Abercrombie Rachel[3]、○平 貴昭[1] (1.Berkeley Seismological Laboratory、2.U.S. Geological Survey、3.Boston University)

9:15 ~ 9:30

[S21-02] 多重スペクトル解析による小地震の震源過程の複雑性の定量化

○内出 崇彦[1] (1.国立研究開発法人 産業技術総合研究所　地質調査総合センター)

9:30 ~ 9:45

[S21-03] 九州東方沖のフィリピン海プレート上における摩擦特性の空間分布：小地震の応力降下量による推定

○山田 卓司[1] (1.茨城大学)

9:45 ~ 10:00

[S21-04] S波部と全波の分離サイト増幅特性と水平上下比一異なる補正係数の必要性

○川瀬 博[1]、伊藤 恵理[1]、仲野 健一[2] (1.京都大学防災研究所、2.安藤・ハザマ技術研究所)

A会場 | 一般セッション：S19. 地震一般・その他

10:00 ~ 10:30 | A会場 A会場

AM-1

座長:山田 真澄(京都大学防災研究所)

10:00 ~ 10:15

[S19-01] **点過程モデルが推定する背景地震活動の時間変動から見た長野県中部の群発地震活動の特徴**

○熊澤 貴雄[1]、尾形 良彦[2] (1.東京大学　地震研究所、2.統計数理研究所)

10:15 ~ 10:30

[S19-02] 2021年4月26日北海道謎の爆発音の震源推定

○山田 真澄[1] (1.京都大学防災研究所)

A会場 | 一般セッション：S15. 強震動・地震災害

11:00 ~ 12:15 | A会場 A会場

AM-2

座長:伊藤 恵理(京都大学防災研究所)、森川 信之(防災科学技術研究所)

11:00 ~ 11:15

[S15-01] 観測できていない強烈な衝撃的鉛直地震波動について - その３ -
- 地震計で捉え難い威力波 -

○前原 博[1] (1.（一財）地球システム総合研究所)

11:15 ~ 11:30

[S15-02] 強震動データベース試作版に基づく地震動予測式の拡張

○森川 信之[1]、藤原 広行[1]、岩城 麻子[1]、前田 宜浩[1] (1.防災科学技術研究所)

11:30 ~ 11:45

[S15-03] 成層構造における直達S波の透過率を考慮した地震動距離減衰特性の検討

○池浦 友則[1] (1.鹿島技術研究所)

11:45 ~ 12:00

[S15-04] 近地地震波形に見られるsPL波とPL波の生成・伝播特性：震源深さの即時推定への活用可能性

○大須賀 啓士[1]、古村 孝志[1] (1.東京大学地震研究所)

12:00 ~ 12:15

[S15-05] 地震波逆伝播計算を用いた大地震の断層すべり即時推定の高解像度化

○柴田 勇吾[1]、古村 孝志[1]、前田 拓人[2] (1.東京大学地震研究所、2.弘前大学大学院理工学研究科)

A会場 | 一般セッション：S15. 強震動・地震災害

13:30 ~ 15:00 | A会場 A会場

PM-1

座長:野津 厚(港湾空港技術研究所)、吉田 昌平(大崎総合研究所)

13:30 ~ 13:45

[S15-06] 1896年陸羽地震における動力学的検討に基づく分岐断層の破壊過程を考慮した運動学的震源モデルによる地震動評価

○熊谷 周治[1]、松川 滉明[2]、三橋 祐太[2]、西條 裕介[2] (1.東北電力株式会社、2.株式会社構造計画研究所)

13:45 ~ 14:00

[S15-07] 1944年東南海地震の木造倒壊率に基づく不均質震源像の推定

○伊藤 恵理[1]、仲野 健一[2]、関口 春子[1]、川瀬 博[1] (1.京都大学　防災研究所、2.安藤・間　技術研究所)

14:00 ~ 14:15

[S15-08] **Estimate of the rupture process of the 2021 off-Fukushima earthquake based on the finite-fault source inversion Inferred from strong motion records**

○吉田 昌平[1]、津田 健一[2]、Chen Ji[3]、Ralph Archuleta[3,4]、佐藤 俊明[1] (1.大崎総合研究所、2.清水建設、3.カリフォルニア大学サンタバーバラ校、4.RJA Ground Motion Analysis, Inc.)

14:15 ~ 14:30

[S15-09] 女川原子力発電所を対象としたSPGAモデルによる強震動シミュレーション

○野津 厚[1] (1.港湾空港技術研究所)

14:30 ~ 14:45

[S15-10] MeSO-net観測記録を用いた東京湾直下M7級スラブ内地震の強震動シミュレーション

○鈴木 亘[1]、木村 武志[1]、久保 久彦[1]、先名 重樹[1] (1.防災科学技術研究所)

14:45 ~ 15:00

[S15-11] 経験的グリーン関数法に用いる要素地震の破壊伝播効果の補正に関する検討

○金田 惇平[1]、田中 信也[1]、久田 嘉章[2] (1.東電設計株式会社、2.工学院大学建築学部　教授)

B会場 | 特別セッション：S23. ベイズ統計学による地震データの解析と数理モデリングの深化

9:00 ~ 10:30 | B会場 B会場

AM-1

座長:加藤 愛太郎(東京大学地震研究所)、長尾 大道(東京大学地震研究所)

9:00 ~ 9:15

[S23-01] 豊後水道長期的スロースリップにおけるすべり分布のベイズマルチモデル推定：先験的拘束条件の推定結果に対する影響

○縣 亮一郎[1]、中田 令子[2]、笠原 天人[3]、八木 勇治[4]、瀬下 幸成[5]、吉岡 祥一[5]、飯沼 卓史[1] (1.海洋研究開発機構、2.東北大学大学院理学研究科、3.所属なし、4.筑波大学大学院 生命環境系、5.神戸大学大学院理学研究科)

9:15 ~ 9:30

[S23-02] シンプレクティックアジョイント法に基づく超高精度不確実性定量化法と地震学への応用

○伊藤 伸一[1] (1.東京大学地震研究所)

9:30 ~ 9:45

[S23-03] ハミルトニアンモンテカルロ法を活用した断層モデル推定とメトロポリス・ヘイスティング法との比較

○山田 太介[1]、太田 雄策[1]、大野 圭太郎[2] (1.東北大学大学院理学研究科附属 地震・噴火予知研究観測センター、2.国土交通省国土地理院)

9:45 ~ 10:00

[S23-04] 構造正則化を応用した地震波トモグラフィ法による速度不連続面の検出

○倉田 澄人[1]、山中 遥太[1]、矢野 恵佑[2]、駒木 文保[1]、椎名 高裕[3]、加藤 愛太郎[1] (1.東京大、2.統計数理研究所、3.産業技術総合研究所)

10:00 ~ 10:15

[S23-05] 相互情報量と相関係数の積を用いたマッチドフィルタ法による深部低周波地震の検出

○栗原 亮[1]、加藤 愛太郎[1]、倉田 澄人[2]、長尾 大道[1,2] (1.東京大学地震研究所、2.東京大学大学院情報理工学研究科)

10:15 ~ 10:30

[S23-06] l_1トレンドフィルタリングによる西南日本GNSSアレイからの短期スロースリップ現象の検出

○矢野 恵佑[1]、加納 将行[2] (1.統計数理研究所、2.東北大学)

B会場 | 特別セッション：S23. ベイズ統計学による地震データの解析と数理モデリングの深化

11:00 ~ 12:15 | B会場 B会場

AM-2

座長:長尾 大道(東京大学地震研究所)、加藤 愛太郎(東京大学地震研究所)

11:00 ~ 11:20

[S23-07] [招待講演] ベイズインバージョンにまつわるいくつかの問題について

○深畑 幸俊[1] (1.京都大学防災研究所 地震予知研究センター)

11:20 ~ 11:40

[S23-08] [招待講演] ベイズ統計学による測地データの非線形逆解析

○福田 淳一[1]、Johnson Kaj[2] (1.東京大学地震研究所、2.Department of Earth and Atmospheric Sciences, Indiana University)

11:40 ~ 12:00

[S23-09] [Invited] A Bayesian framework for Earthquake Early Warning

○Stephen Wu[1] (1.統計数理研究所)

12:00 ~ 12:15

[S23-10] 連続地震計記録の極値統計解析に基づく大地震後の平常時に対する揺れやすさの予測

○澤崎 郁[1] (1.防災科学技術研究所　地震津波防災研究部門)

B会場 | 特別セッション：S23. ベイズ統計学による地震データの解析と数理モデリングの深化

13:30 ~ 14:00 | B会場 B会場

PM-1

座長:矢野 恵佑(統計数理研究所)、久保 久彦(防災科学技術研究所)

13:30 ~ 13:45

[S23-11] The research of spherical time-space ETAS model

〇熊 子瑶[1]、庄 建倉[1] (1.統計数理研究所)

13:45 ~ 14:00

[S23-12] ガウス過程回帰を用いた本震直後における余震分布の推定

〇森川 耕輔[1]、長尾 大道[2]、伊藤 伸一[2]、寺田 吉壱[1,3]、酒井 慎一[2]、平田 直[2,4] (1.大阪大学、2.東京大学、3.理研、4.防災科学技術研究所)

B会場 | 特別セッション：S22. AIによる地震学の発展

14:00 ~ 15:00 | B会場 B会場

PM-1

座長:久保 久彦(防災科学技術研究所)、矢野 恵佑(統計数理研究所)

14:00 ~ 14:15

[S22-01] 地震連続波形画像からの深部低周波微動検出に向けた畳み込みニューラルネットワークの構築

〇金子 亮介[1,2]、長尾 大道[2,1]、伊藤 伸一[2,1]、小原 一成[2]、鶴岡 弘[2] (1.東京大学大学院情報理工学系研究科、2.東京大学地震研究所)

14:15 ~ 14:30

[S22-02] 動的モード分解による地震時系列データの特徴抽出

〇菊地 亮太[1]、久保 久彦[2] (1.京都大学、2.防災科学技術研究所)

14:30 ~ 14:45

[S22-03] 地震学分野におけるブラックボックス最適化問題へのベイズ最適化の適用：セントロイドモーメントテンソルインバージョンでの例

〇久保 久彦[1]、吉田 圭佑[2]、木村 武志[1] (1.防災科学技術研究所、2.東北大学理学研究科附属地震噴火予知研究観測センター)

14:45 ~ 15:00

[S22-04] **ガウス過程によるCMTデータインバージョンの試み**

〇岡崎 智久[1]、深畑 幸俊[2] (1.国研）理化学研究所　革新知能総合研究センター、2.京都大学 防災研究所)

C会場 | 一般セッション：S09. 地震活動とその物理

9:00 ~ 10:30 | C会場 C会場

AM-1

座長:麻生 尚文(東京工業大学)、上田 拓(東京大学)

9:00 ~ 9:15

[S09-01] **Spatio-temporal clustering of successive earthquakes: analyses of global CMT and F-net catalogs**

○Thystere Matondo Bantidi[1]、Takeshi Nishimura[1] (1.TOHOKU UNVERSITY)

9:15 ~ 9:30

[S09-02] Long-term probability earthquake forecasts based on the ETAS model

○庄 建倉[1] (1.統計数理研究所)

9:30 ~ 9:45

[S09-03] マイグレーションの見えない点クラスターから拡散的な特徴を抽出する

○麻生 尚文[1] (1.東京工業大学)

9:45 ~ 10:00

[S09-04] 地殻内地震活動とGNSS変位から推定される表層荷重の季節変動性

○上田 拓[1]、加藤 愛太郎[1]、Johnson Christopher[2]、寺川 寿子[3] (1.東京大学地震研究所、2.ロスアラモス国立研究所、3.名古屋大学, 大学院環境学研究科, 附属地震火山研究センター)

10:00 ~ 10:15

[S09-05] スロースリップイベントによる地震活動誘発効果を陽に組み込んだETASモデルの開発

○西川 友章[1]、西村 卓也[1] (1.京都大学防災研究所)

10:15 ~ 10:30

[S09-06] 南海トラフのプレート内地震活動度と長期的スロースリップイベントの時空間的関係

○三井 雄太[1]、上原 啓嗣[1]、小杉 一誠[2]、松尾 功二[3] (1.静岡大学理学部、2.静岡大学総合科学技術研究科、3.国土地理院)

C会場 | 一般セッション：S09. 地震活動とその物理

11:00 ~ 12:15 | C会場 C会場

AM-2

座長:遠田 晋次(東北大学)、福田 孔達(東京大学)

11:00 ~ 11:15

[S09-07] ETASモデルの時系列におけるイベント間間隔についてのベイズ更新に基づいて推定されたイベント発生時刻の統計的評価

○田中 宏樹[1]、梅野 健[1] (1.京都大学大学院　情報学研究科)

11:15 ~ 11:30

[S09-08] 東北地方太平洋沖地震の長期余震活動　−震源域の静穏化と周辺部の継続的活発化

○遠田 晋次[1]、スタイン ロス[2] (1.東北大学災害科学国際研究所　災害評価・低減研究部門、2.テンブラー)

11:30 ~ 11:45

[S09-09] 混合分布による南海トラフ深部低周波微動の規模分布

○岩田 貴樹[1]、平松 良浩[2] (1.県立広島大学、2.金沢大学)

11:45 ~ 12:00

[S09-10] モーメント比を用いた強度情報抽出の試み

○松本 聡[1]、光岡 郁穂[2]、飯尾 能久[3]、酒井 慎一[4]、加藤 愛太郎[5] (1.九州大学大学院理学研究院地震火山観測研究センター、2.九州大学大学院理学府、3.京都大学防災研究所、4.東京大学大学院情報学環・学際情報学府、5.東京大学地震研究所)

12:00 ~ 12:15

[S09-11] セルオートマトンを用いた時定数の競合による地震モデル

○福田 孔達[1]、波多野 恭弘[2]、望月 公廣[1] (1.東京大学地震研究所地震予知研究センター、2.大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻)

C会場 | 一般セッション：S09. 地震活動とその物理

13:30 ~ 15:00 | C会場 C会場

PM-1

座長:野田 雄貴(京都大学)、中野 優(海洋研究開発機構)

13:30 ~ 13:45

[S09-12] 龍神湖（大町ダム）付近の地震活動

○酒井 慎一[1,2]、秋山 峻寛[2] (1.東京大学大学院　情報学環・学際情報学府、2.東京大学地震研究所)

13:45 ~ 14:00

[S09-13] 長野県西部地域で発生したM3.7の地震の前震活動とその発生要因について

○野田 雄貴[1]、片尾 浩[2]、飯尾 能久[2] (1.京都大学大学院理学研究科、2.京都大学防災研究所)

14:00 ~ 14:15

[S09-14] 森吉山の群発地震における地震活動および波形相関の時空間変化

○雨澤 勇太[1]、前田 拓人[1]、小菅 正裕[1]、高野 智也[1] (1.弘前大学大学院理工学研究科)

14:15 ~ 14:30

[S09-15] 2011年東北沖地震後から福島-茨城県境周辺で活発化した地震活動に見られる内陸の繰り返し地震とその原因

○池田 里奈[1]、吉田 圭佑[1]、高橋 諒[3]、福島 洋[2]、松澤 暢[1]、長谷川 昭[1] (1.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2.東北大学災害科学国際研究所、3.気象庁)

14:30 ~ 14:45

[S09-16] 鬼界カルデラにおけるDASを用いた地震動、エアガン観測

○中野 優[1]、杉岡 裕子[2]、荒木 英一郎[1]、中島 倫也[1]、伊藤 亜妃[1]、松本 浩幸[1]、横引 貴史[1]、利根川 貴志[1]、山本 揚二朗[1]、木村 俊則[1]、藤江 剛[1]、田中 聡[1] (1.海洋研究開発機構海域地震火山部門、2.神戸大学海洋底探査センター)

14:45 ~ 15:00

[S09-17] 噴火や群発活動の誘因かもしれない御嶽山山頂周辺のやや深い地震活動　その1

○山中 佳子[1] (1.名古屋大学)

D会場 | 一般セッション：S06. 地殻構造

9:00 ~ 10:30 | D会場 D会場

AM-1

座長:仲西 理子(海洋研究開発機構)

9:00 ~ 9:15

[S06-01] 三陸沖光ケーブル観測システムのDistributed Acoustic Sensingデータを用いたレイリー波位相速度の計測

〇福島 駿[1]、篠原 雅尚[2]、山田 知朗[2]、西田 究[2]、竹尾 明子[2]、蓬田 清[3] (1.東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2.東京大学地震研究所、3.北海道大学 理学院 自然史科学専攻 地球惑星ダイナミクス分野)

9:15 ~ 9:30

[S06-02] S-net連続記録で捉えた東北沖における上盤浅部構造の時間変化

〇利根川 貴志[1]、高木 涼太[2]、澤崎 郁[3]、汐見 勝彦[3] (1.海洋研究開発機構、2.東北大学、3.防災科学技術研究所)

9:30 ~ 9:45

[S06-03] 2019年海陸統合地震探査による東北日本弧中部の地殻・上部マントル構造

〇岩崎 貴哉[1]、佐藤 比呂志[2,3]、蔵下 英司[2]、石毛 宏和[4]、清水 英彦[4]、石山 達也[2]、飯高 隆[2]、篠原 雅尚[2]、川崎 慎治[4]、阿部 進[4]、平田 直[5,2] (1.地震予知総合研究振興会、2.東京大学地震研究所、3.静岡大学防災総合センター、4.（株）地球科学総合研究所、5.国立研究開発法人防災科学技術研究所)

9:45 ~ 10:00

[S06-04] S波レシーバ関数解析から推測される日本海下のリソスフェアーアセノスフェア境界

〇悪原 岳[1]、中東 和夫[2]、篠原 雅尚[1]、山田 知朗[1]、塩原 肇[1]、山下 裕亮[3]、望月 公廣[1]、植平 賢司[4] (1.東京大学地震研究所、2.東京海洋大学、3.京都大学防災研究所、4.防災科学技術研究所)

10:00 ~ 10:15

[S06-05] 地震波異方性に基づく首都圏下のPHSスラブ構造についての新たな解釈

〇石瀬 素子[1]、加藤 愛太郎[1]、酒井 慎一[1]、中川 茂樹[1]、平田 直[2] (1.東京大学地震研究所、2.防災科学技術研究所)

10:15 ~ 10:30

[S06-06] 駿河トラフから東海地域に沈み込むフィリピン海プレート形状

〇松原 誠[1]、汐見 勝彦[1]、馬塲 久紀[2]、佐藤 比呂志[3]、西宮 隆仁[4] (1.防災科学技術研究所、2.東海大学海洋学部海洋地球科学科、3.東京大学地震研究所、4.気象庁気象研究所)

D会場 | 一般セッション：S06. 地殻構造

11:00 ~ 12:15 | D会場 D会場

AM-2

座長:石瀬 素子(東京大学地震研究所)

11:00 ~ 11:15

[S06-07] 伊豆衝突帯とその周辺におけるフィリピン海プレートおよびスラブの地殻の厚さ

○本多 亮[1]、安部 祐希[1]、石瀬 素子[2]、酒井 慎一[3,2]、行竹 洋平[2]、道家 涼介[1] (1.神奈川県温泉地学研究所、2.東京大学地震研究所、3.東京大学大学院情報学環・学際情報学府)

11:15 ~ 11:30

[S06-08] 南海トラフ域の3次元地震波速度・密度構造の構築

○仲西 理子[1]、Qin Yanfang[1]、Liu Xin[1]、藤江 剛[1]、汐見 勝彦[2]、小平 秀一[1]、高橋 成実[1,2]、中村 武史[3]、富士原 敏也[1] (1.海洋研究開発機構　海域地震火山部門、2.防災科学技術研究所、3.電力中央研究所)

11:30 ~ 11:45

[S06-09] 南海トラフ室戸沖における詳細な地震波速度構造：稠密OBS探査データを用いた波形解析

○藤江 剛[1]、新井 隆太[1]、白石 和也[1]、中村 恭之[1]、小平 秀一[1]、海宝 由佳[1]、尾鼻 浩一郎[1]、三浦 誠一[1] (1.海洋研究開発機構)

11:45 ~ 12:00

[S06-10] 日向灘における稠密地殻構造探査に基づくプレート沈み込み構造とスロー地震活動の関係

○新井 隆太[1]、三浦 誠一[1]、中村 恭之[1]、藤江 剛[1]、海宝 由佳[1]、小平 秀一[1]、望月 公廣[2]、仲田 理映[2]、沖野 郷子[3] (1.海洋研究開発機構、2.東京大学地震研究所、3.東京大学大気海洋研究所)

12:00 ~ 12:15

[S06-11] High-Resolution Seismic Imaging of the subducting Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-Nada in relation to the 2013 and 2015 tectonic tremor distributions

○馬 妍雪[1]、仲田 理映[1]、望月 公廣[1]、三浦 誠一[2]、中村 恭之[2]、新井 隆太[2]、藤江 剛[2]、海宝 由佳[2]、小平 秀一[2] (1.東京大学地震研究所、2.海洋研究開発機構)

D会場 | 一般セッション：S06. 地殻構造

13:30 ~ 14:00 | D会場 D会場

PM-1

座長:田中 優作(東京大学地震研究所)

13:30 ~ 13:45

[S06-12] Three-Dimensional Seismic Attenuation Models for Central Nepal

○Chintan Timsina[1]、James Mori[2]、Masumi Yamada[2] (1.Graduate School of Science, Kyoto University、2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

13:45 ~ 14:00

[S06-13] Extinction in genetic algorithms: application to receiver functions inversion

○Admore Phindani MPUANG[1,2]、Takuo SHIBUTANI[2] (1.Graduate School of Science, Kyoto University 、2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

D会場 | 一般セッション：S03. 地殻変動・GNSS・重力

14:00 ~ 15:00 | D会場 D会場

PM-1

座長:小林 知勝(国土地理院)、田中 優作(東京大学地震研究所)

14:00 ~ 14:15

[S03-01] 東北地方太平洋沖地震の余効変動予測モデルを利用した広域の微小な地殻変動検出

○藤原 智[1] (1.国土地理院)

14:15 ~ 14:30

[S03-02] 能登半島で発生した群発地震と、それに伴ってゆっくりと進行する地殻変動

○田中 優作[1]、鷺谷 威[1] (1.名古屋大学)

14:30 ~ 14:45

[S03-03] 陸上ボアホール歪観測による紀伊半島沖浅部SSEの検出

○板場 智史[1]、太田 和晃[2]、長谷川 浩[3] (1.産業技術総合研究所、2.防災科学技術研究所、3.気象庁)

14:45 ~ 15:00

[S03-04] 継続時間1時間のスロースリップイベント

○勝間田 明男[1]、宮岡 一樹[3]、露木 貴裕[5]、板場 智史[4]、田中 昌之[5]、伊藤 武男[6]、高森 昭光[2]、新谷 昌人[2] (1.富山大学、2.東大地震研究所、3.気象庁、4.産総研、5.気象研究所、6.名古屋大学)

ポスター会場（1日目）| 一般セッション：S03. 地殻変動・GNSS・重力

15:30 ~ 17:00 | P1会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S03P-01] PTS解析による地震時の動的な破壊過程から初期余効すべりまでの連続的な推定　～2011年東北地方太平洋沖地震の事例～

○田中 優介[1]、太田 雄策[2]、宮崎 真一[3] (1.東北大学大学院理学研究科、2.東北大学大学院理学研究科、3.京都大学大学院理学研究科)

15:30 ~ 17:00

[S03P-02] 2016年熊本地震の断層終端部における地殻変動と重力データから推定した地下の密度構造の詳細

○小林 知勝[1]、松尾 功二[1]、安藤 亮輔[2]、中埜 貴元[1] (1.国土地理院、2.東京大学)

15:30 ~ 17:00

[S03P-03] 長期的スロースリップ客観検出手法の日向灘への適用

○小林 昭夫[1] (1.気象研究所地震津波研究部)

15:30 ~ 17:00

[S03P-04] アラスカ沈み込み帯における短期的スロースリップイベントの系統的検出

○岡田 悠太郎[1]、西村 卓也[2] (1.京都大学大学院 理学研究科、2.京都大学防災研究所)

15:30 ~ 17:00

[S03P-05] 2018年以降GEONETで検出された南海トラフ沿いの長期的SSE

○小沢 慎三郎[1]、水藤 尚[1]、宗包 浩志[1] (1.国土交通省国土地理院地理地殻活動研究センター)

15:30 ~ 17:00

[S03P-06] GNSS-A海底地殻変動観測アレイ「SGO-A」で捉えた東北地方太平洋沖地震後10年間の地震後海底地殻変動

○渡邉 俊一[1]、石川 直史[1]、中村 優斗[1]、横田 裕輔[2] (1.海上保安庁海洋情報部、2.東京大学生産技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S03P-07] GNSS-A海底地殻変動観測アレイSGO-Aによる南海トラフプレート境界のすべり欠損レートの変動モニタリング

○石川 直史[1]、渡邉 俊一[1]、中村 優斗[1]、横田 裕輔[2] (1.海上保安庁海洋情報部、2.東京大学生産技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S03P-08] 数値シミュレーションを用いたGNSS-A海底地殻変動観測における海中音速場の影響評価

○中村 優斗[1]、横田 裕輔[2]、石川 直史[1]、渡邉 俊一[1] (1.海上保安庁海洋情報部、2.東京大学生産技術研究所)

ポスター会場（1日目）| 一般セッション：S06. 地殻構造

15:30 ~ 17:00 | P2会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S06P-01] 北海道南東沖・千島海溝周辺での反射法地震探査

○野 徹雄[1]、小平 秀一[1]、藤江 剛[1]、中村 恭之[1]、白石 和也[1]、三浦 亮[1]、山口 寛登[2,1]、海宝 由佳[1]、朴 進午[3]、孫 岳[3]、于 凡[3]、中西 正男[4]、藤本 萌[5,6]、小林 稜弥[5] (1.海洋研究開発機構、2.神戸大、3.東京大大気海洋研究所、4.千葉大院理学、5.千葉大院融合、6.ハワイ大)

15:30 ~ 17:00

[S06P-02] S波スプリッティング解析による東北地方の地震波速度異方性測定（４）

○水田 達也[1]、岡田 知己[1]、Savage Martha[2]、高木 涼太[1]、吉田 圭佑[1]、酒井 慎一[3]、勝俣 啓[4]、大園 真子[3,4]、小菅 正裕[5]、前田 拓人[5]、山中 佳子[6]、片尾 浩[7]、松島 健[8]、八木原 寛[9]、中山 貴史[1]、平原 聡[1]、河野 俊夫[1]、松澤 暢[1]、2011年東北地方太平洋沖地震 緊急観測グループ (1.東北大学大学院　理学研究科　地震・噴火予知研究観測センター、2.Victoria University of Wellington、3.東大地震研、4.北大・理、5.弘前大・理工、6.名古屋大・環境、7.京大防災研、8.九州大・理、9.鹿児島大学)

15:30 ~ 17:00

[S06P-03] 深発地震のSP変換波から推定される首都圏下のフィリピン海プレート構造：丹沢山地から関東平野西域を対象とした予備解析

○吉本 和生[1] (1.横浜市立大学)

15:30 ~ 17:00

[S06P-04] Double-Difference Tomography法を用いた白山火山下の三次元速度構造推定

○三浦 凜[1]、平松 良浩[2] (1.金沢大学大学院自然科学研究科、2.金沢大学理工学域地球社会基盤学系大学院自然科学研究科)

15:30 ~ 17:00

[S06P-05] 潮岬－足摺岬沖南海トラフにおける稠密反射法探査による構造マッピング

○中村 恭之[1]、海宝 由佳[1]、野 徹雄[1]、白石 和也[1]、藤江 剛[1]、小平 秀一[1]、木村 学[1]、尾鼻 浩一郎[1]、三浦 誠一[1]、仲西 理子[1] (1.海洋研究開発機構)

15:30 ~ 17:00

[S06P-06] 南海トラフ海側で沈み込むフィリピン海プレート上に発達する微小正断層群の特徴

○山下 幹也[1,2]、仲西 理子[2]、三浦 誠一[2]、小平 秀一[2]、金田 義行[3,2] (1.国立研究開発法人　産業技術総合研究所　地質調査総合センター　地質情報研究部門、2.国立研究開発法人　海洋研究開発機構　海域地震火山部門、3.香川大学)

15:30 ~ 17:00

[S06P-07] 地震波到来方向の偏りが傾斜する地震波速度不連続面の推定に与える影響

○汐見 勝彦[1] (1.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S06P-08] 南海トラフ西部周辺におけるランダム速度不均質構造

○高橋 努[1]、尾鼻 浩一郎[1]、石原 靖[1]、三浦 誠一[1]、小平 秀一[1]、金田 義行[2] (1.海洋研究開発機構、2.香川大学)

ポスター会場（1日目）| 一般セッション：S09. 地震活動とその物理

15:30 ~ 17:00 | P3会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S09P-01] 琉球海溝ー南海トラフのすべり速度欠損分布と繰り返し地震活動の関係

〇橋間 昭徳[1]、佐藤 比呂志[2]、石山 達也[2]、五十嵐 俊博[2] (1.海洋研究開発機構、2.東京大学地震研究所)

15:30 ~ 17:00

[S09P-02] 能登半島北東部の群発地震活動

〇平松 良浩[1] (1.金沢大学)

15:30 ~ 17:00

[S09P-03] 日本の内陸地震の余震数とその継続時間

〇本多 泰知[1]、山田 卓司[1] (1.茨城大学)

15:30 ~ 17:00

[S09P-04] 和歌山市付近の地震活動と地球潮汐の関連性

〇飯塚 ふうな[1]、吉田 康宏[2] (1.札幌管区気象台、2.気象研究所)

15:30 ~ 17:00

[S09P-05] 微動解析に向けた関東東海地殻活動観測網アナログ地震計記録の自動デジタル化とスペクトル解析の試み

〇松澤 孝紀[1]、武田 哲也[1] (1.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S09P-06] 日本海溝沿いの地震活動の規模別頻度分布に関する指標値の地域特性とプレート間のすべり現象との比較

〇永田 広平[1]、溜渕 功史[1]、弘瀬 冬樹[1]、野田 朱美[1] (1.気象庁気象研究所)

15:30 ~ 17:00

[S09P-07] 2021年4月トカラ列島近海の群発地震に伴う緊急海底地震観測

〇仲谷 幸浩[1]、八木原 寛[1]、山下 裕亮[2]、平野 舟一郎[1]、中尾 茂[1] (1.鹿児島大学南西島弧地震火山観測所、2.京都大学防災研究所宮崎観測所)

15:30 ~ 17:00

[S09P-08] 2016年熊本地震前後の地震活動のパターンについて

〇楠城 一嘉[1,2,3]、井筒 潤[4]、織原 義明[5]、鴨川 仁[1] (1.静岡県立大学、2.静岡大学、3.統計数理研究所、4.中部大学、5.東京学芸大学)

15:30 ~ 17:00

[S09P-09] 富士山直下で起きる低周波地震の研究の序報：Matched Filter法を用いた地震カタログの作成とカタログの性能評価

〇楠城 一嘉[1,2,3]、行竹 洋平[4] (1.静岡県立大学、2.統計数理研究所、3.静岡大学、4.東京大学)

15:30 ~ 17:00

[S09P-10] 函館市付近の浅部低周波地震と通常地震が混在する地震活動：稠密地震観測による震源分布と波形の特徴

〇野口 科子[1]、笠原 敬司[1]、小菅 正裕[2]、前田 拓人[2] (1.（公財）地震予知総合研究振興会　地震防災調査研究部、2.弘前大学　理工学研究科)

15:30 ~ 17:00

[S09P-11] 東北地方の応力場と発生した地震の断層面との関係（３）

〇田上 綾香[1]、松野 愛弥[1]、岡田 知己[1]、酒井 慎一[2]、大園 真子[2,3]、勝俣 啓[3]、小菅 正裕[4]、山中 佳子[5]、片尾 浩[6]、松島 健[7]、八木原 寛[8]、中山 貴史[1]、平原 聡[1]、河野 俊夫[1]、堀 修一郎[1]、松澤 暢[1]、2011年東北地方太平洋沖地震緊急観測グループ . (1.東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター、2.東京大学地震研究所、3.北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター、4.弘前大学理工学研究科、5.名古屋大学大学院環境学研究科、6.京都大学防災研究所地震予知研究センター、7.九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター、8.鹿児島大学・南西島弧地震火山観測所)

15:30 ~ 17:00
[S09P-12] ハッシュ法を用いた類似波形検出手法の性能比較
○高山 裕紀[1]、平野 史朗[1]、川方 裕則[1] (1.立命館大学)

15:30 ~ 17:00
[S09P-13] 南海トラフで発生する浅部超低周波地震活動の走向方向の変化の定量解析
○武村 俊介[1]、馬場 慧[1]、矢部 優[2]、江本 賢太郎[3]、汐見 勝彦[4]、松澤 孝紀[4] (1.東京大学地震研究所、2.産業総合技術研究所、3.東北大学、4.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00
[S09P-14] エンベロープ相関と振幅に基づく浅部低周波地震モニタリングシステム
○溜渕 功史[1]、小木曽 仁[1] (1.気象研究所)

15:30 ~ 17:00
[S09P-15] 内陸地震の余震活動と剪断歪みエネルギー変化
○田中 佐千子[1] (1.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00
[S09P-16] 直接的先験情報を考慮した長期間地震データによるテクトニック応力場の推定
○寺川 寿子[1]、松浦 充宏[2] (1.名古屋大学大学院環境学研究科　附属地震火山研究センター、2.統計数理研究所)

15:30 ~ 17:00
[S09P-17] 熊野灘における超低周波地震の時空間分布 ―2020年12月から2021年1月の活動―
○山本 揚二朗[1]、有吉 慶介[1]、矢田 修一郎[1]、中野 優[1]、堀 高峰[1] (1.海洋研究開発機構海域地震火山部門)

15:30 ~ 17:00
[S09P-18] 沈み込み帯の超巨大地震のalong-dipセグメントの要因
○蓬田 清[1] (1.北海道大学大学院理学研究院　地球惑星科学部門・地球惑星ダイナミクス分野)

15:30 ~ 17:00
[S09P-19] 地震活動異常の視覚化ー複数手法による比較
○吉川 澄夫[1] (1.所属なし（元・気象庁）)

15:30 ~ 17:00
[S09P-20] スラブ内地震のモーメントマグニチュードと断層面積のスケーリング則
○張 学磊[1]、根本 信[1]、森川 信之[2]、土肥 裕史[2]、平田 賢治[2]、藤原 広行[2] (1.応用地質株式会社、2.防災科学技術研究所)

ポスター会場（1日目）| 一般セッション：S13. 地殻流体と地震

15:30 ~ 17:00 | P4会場 P会場
P

15:30 ~ 17:00
[S13P-01] 福島県いわき地方を対象としたS波スプリッティング解析
○渡部 豪[1]、平塚 晋也[1]、島田 耕史[1] (1.日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター)

15:30 ~ 17:00
[S13P-02] S波スプリッティング解析による御嶽山周辺の異方性構造
○村上 理[1]、渡部 豪[1] (1.日本原子力研究開発機構　東濃地科学センター)

ポスター会場（1日目）| 一般セッション：S15. 強震動・地震災害

15:30 ~ 17:00 | P5会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S15P-01] S-netを用いたブロックインバージョン解析に基づく福島県周辺で発生する地震の距離減衰特性の推定

○友澤 裕介[1]、引田 智樹[1]、池浦 友則[1]、笠松 健太郎[1] (1.鹿島技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S15P-02] **Features of horizontal-to-vertical spectral ratios of ambient noises and earthquake motions at the S-net sites**

○Yadab Prasad DHAKAL[1]、Atsushi Wakai[1]、Hiroaki Yamanaka[2]、Takashi Kunugi[1]、Shin Aoi[1] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience、2.Tokyo Institute of Technology)

15:30 ~ 17:00

[S15P-03] 多数の微動アレイによる浅部３次元S波速度構造のモデル化：愛知県西尾市周辺の場合

○長 郁夫[1] (1.産業技術総合研究所　地質情報研究部門)

15:30 ~ 17:00

[S15P-04] 2016年熊本地震の地表断層ごく近傍の強震動について

○岩城 麻子[1]、藤原 広行[1] (1.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S15P-05] 2021年2月福島県沖で発生したスラブ内地震の震源過程解析－３次元地下構造モデルを考慮した検討－

○引間 和人[1] (1.東京電力ホールディングス株式会社 経営技術戦略研究所　技術開発部　環境・エネルギーエリア)

15:30 ~ 17:00

[S15P-06] 2021年福島県沖の地震（Mj7.3）の強震動評価に基づいた強震動予測手法の適用性評価

○入江 紀嘉[1]、吉田 昌平[1]、岡田 康男[1]、宮腰 研[2]、染井 一寛[2]、鳥田 晴彦[1] (1.（株）大崎総合研究所、2.（一財）地域地盤 環境 研究所)

15:30 ~ 17:00

[S15P-07] 国内のプレート間地震を対象にした震源スケーリング則の再検討

○宮腰 研[1]、郭 雨佳[1]、吉田 邦一[1]、入江 紀嘉[2] (1.(一財) 地域 地盤 環境 研究所　地震解析グループ、2.（株）大崎総合研究所)

15:30 ~ 17:00

[S15P-08] 南海トラフ巨大地震の発生の多様性を考慮した地震防災基盤シミュレータの構想

○中村 洋光[1]、藤原 広行[1]、前田 宜浩[1]、土肥 裕史[1]、時実 良典[2]、石丸 晴海[3] (1.防災科学技術研究所　マルチハザードリスク評価研究部門、2.応用アール・エム・エス、3.三菱スペース・ソフトウエア)

15:30 ~ 17:00

[S15P-09] 南海トラフ巨大地震による長継続時間・広帯域強震動のシミュレーション

○前田 宜浩[1]、岩城 麻子[1]、青井 真[1]、中村 洋光[1]、藤原 広行[1]、関 航佑[2]、今井 隆太[3] (1.防災科学技術研究所、2.三菱スペース・ソフトウエア株式会社、3.みずほリサーチ＆テクノロジーズ株式会社)

15:30 ~ 17:00

[S15P-10] 南海トラフ巨大地震の発生の多様性を考慮した津波遡上計算とその利活用に向けて－概要と利活用事例の紹介－

○土肥 裕史[1]、中村 洋光[1]、藤原 広行[1]、矢守 克也[2]、杉山 高志[2] (1.国立研究開発法人防災科学技術研究所、2.京都大学防災研究所)

15:30 ~ 17:00

[S15P-11] 南海トラフ巨大地震の多様性を踏まえた条件付きハザード評価の試行

中村 洋光[1]、○時実 良典[2]、藤原 広行[1]、清水 智[2]、麻生 未季[2] (1.防災科学技術研究所　マルチハザードリスク評価研究部門、2.応用アール・エム・エス株式会社)

15:30 ~ 17:00

[S15P-12] 確率論的地震動予測地図(2020年版)の地震活動モデルで表現される地震発生数

○宮腰 淳一[1]、森川 信之[2]、藤原 広行[2] (1.大崎総合研究所、2.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S15P-13] **ニューラル・ネットワークによる非エルゴード地震動予測式**

○岡崎 智久[1]、森川 信之[2]、岩城 麻子[2]、藤原 広行[2]、上田 修功[1] (1.国研）理化学研究所　革新知能総合研究センター、2.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S15P-14] AN-netで得られた近地地震記録の解析と数値モデリング

○中原 恒[1]、関根 秀太郎[2] (1.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2.地震予知総合研究振興会)

ポスター会場（1日目）| 一般セッション：S19. 地震一般・その他

15:30 ~ 17:00 | P6会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S19P-01] 2016年熊本地震で誘発された大分県中部の地震の初動読み取りと震源決定

○髙崎 雄大[1]、小松 正直[2]、渡邉 禎貢[2]、竹中 博士[3]、大島 光貴[4] (1.岡山大学理学部地球科学科（現所属：気象庁）、2.岡山大学大学院自然科学研究科、3.岡山大学学術研究院自然科学学域、4.清水建設)

15:30 ~ 17:00

[S19P-02] 「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」：これまでの成果と今後の計画

○小平 秀一[1]、藤原 広行[2]、高橋 成実[1,2] (1.海洋研究開発機構、2.防災科学技術研究所)

ポスター会場（1日目）| 特別セッション：S21. 震源物理・地下構造推定・強震動評価のための地震波スペクトル解析

15:30 ~ 17:00 | P7会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S21P-01] 自己回帰モデルによるスペクトル解析を用いた地盤増幅率の周波数特性評価の試行

○鎌谷 紀子[1]、小木曽 仁[1] (1.気象研究所)

15:30 ~ 17:00

[S21P-02] 福島県沖の中規模地震の震源スペクトルに基づく破壊伝播効果

○佐藤 智美[1] (1.清水建設㈱技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S21P-03] 茨城県・千葉県東方沖における小地震の応力降下量解析：太平洋プレート上の摩擦特性の空間不均質性の推定

○増田 掌[1]、山田 卓司[1] (1.茨城大学)

ポスター会場（1日目） | 特別セッション：S22. AIによる地震学の発展

15:30 ~ 17:00 | P8会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S22P-01] 箱根火山における機械学習を用いた地震波検測の性能評価

〇金 亜伊[1]、中村 勇士[1]、畠山 海[1]、上松 大輝[1]、行竹 洋平[2]、安倍 祐希[3] (1.横浜市立大学、2.東京大学地震研究所、3.神奈川県温泉地学研究所)

15:30 ~ 17:00

[S22P-02] 室内水圧破砕実験で誘発された微小破壊のモーメントテンソル解析を目的とした深層学習によるP波初動振幅読み取り

〇直井 誠[1]、陳 友晴[1]、田中 塁[1]、有馬 雄太郎[2] (1.京都大学、2.独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構)

15:30 ~ 17:00

[S22P-03] 機械学習法による早期地震警報における単独観測点処理の改良

〇野田 俊太[1]、鵜飼 正人[1] (1.鉄道総合技術研究所)

ポスター会場（1日目） | 特別セッション：S23. ベイズ統計学による地震データの解析と数理モデリングの深化

15:30 ~ 17:00 | P9会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S23P-01] アジョイント法に基づく2003年十勝沖地震の余効すべりの現状把握と短期推移予測

〇加納 将行[1]、宮崎 真一[2]、石川 洋一[3]、平原 和朗[4,5] (1.東北大学大学院理学研究科　地球物理学専攻　固体地球物理学講座、2.京都大学理学研究科、3.海洋研究開発機構、4.理化学研究所、5.香川大学)

15:30 ~ 17:00

[S23P-02] MCMC法を用いた2004年新潟県中越地震震源域周辺の地震波速度分布の推定

〇椎名 高裕[1]、加納 将行[2]、倉田 澄人[3]、加藤 愛太郎[4] (1.産業技術総合研究所地質調査総合センター、2.東北大学大学院理学研究科、3.東京大学大学院情報理工系研究科、4.東京大学地震研究所)

ポスター会場（1日目） | 委員会活動紹介：S24.社会に対する委員会の活動

15:30 ~ 17:00 | 委員会活動紹介 P会場

S24

[S24P-01] 広報委員会

○佐藤 利典[1] (1.日本地震学会)

[S24P-02] 学会情報誌編集委員会

○豊国 源知[1] (1.日本地震学会)

[S24P-03] 強震動委員会

○干場 充之[1] (1.日本地震学会)

[S24P-04] 学校教育委員会

○加納 靖之[1] (1.日本地震学会)

[S24P-05] 災害調査委員会

○吾妻 崇[1] (1.日本地震学会)

[S24P-06] 普及行事委員会

○佐藤 明子[1] (1.日本地震学会)

[S24P-07] ジオパーク支援委員会

○松原 誠[1] (1.日本地震学会)

[S24P-08] 地震学を社会に伝える連絡会議

○久田 嘉章[1] (1.日本地震学会)

A会場 | 特別セッション：S21. 震源物理・地下構造推定・強震動評価のための地震波スペクトル解析

2021年10月14日(木) 9:00 ~ 10:00 | A会場 A会場

AM-1

座長:内出 崇彦(国立研究開発法人 産業技術総合研究所)、染井 一寛(地域 地盤 環境 研究所)

9:00 ~ 9:15

[S21-01] [Invited] Introduction to the SCEC Community Stress Drop Validation Study

Baltay Annemarie[2]、Abercrombie Rachel[3]、〇平 貴昭[1] (1.Berkeley Seismological Laboratory、2.U.S. Geological Survey、3.Boston University)

9:15 ~ 9:30

[S21-02] 多重スペクトル解析による小地震の震源過程の複雑性の定量化

〇内出 崇彦[1] (1.国立研究開発法人 産業技術総合研究所　地質調査総合センター)

9:30 ~ 9:45

[S21-03] 九州東方沖のフィリピン海プレート上における摩擦特性の空間分布：小地震の応力降下量による推定

〇山田 卓司[1] (1.茨城大学)

9:45 ~ 10:00

[S21-04] S波部と全波の分離サイト増幅特性と水平上下比ー異なる補正係数の必要性

〇川瀬 博[1]、伊藤 恵理[1]、仲野 健一[2] (1.京都大学防災研究所、2.安藤・ハザマ技術研究所)

[Invited] Introduction to the SCEC Community Stress Drop Validation Study

Baltay Annemarie[2]、Abercrombie Rachel[3]、*平 貴昭[1]
Annemarie Baltay[2], Rachel Abercrombie[3], *Taka'aki Taira[1]

1. Berkeley Seismological Laboratory、2. U.S. Geological Survey、3. Boston University
1. Berkeley Seismological Laboratory, 2. U.S. Geological Survey, 3. Boston University

We introduce a community stress drop validation study using the 2019 Ridgecrest earthquake sequence, in which researchers are invited to use a common dataset to estimate earthquake stress drop. Earthquake stress drop is a key parameter in many ground motion, rupture simulation, and source physics problems in earthquake science. In theory stress drop relates the average slip on a fault to rupture area, and, in practice, it quantifies the higher frequency ground motions of an earthquake. We seek to understand the physical controls and methodological reasons for similarity or differences in stress drop estimates, so that they can be used more reliably by the earthquake science community. The common dataset consists of 2 weeks of earthquakes following the 2019 Ridgecrest M6.4 earthquake, including nearly 13,000 earthquakes of M1 and greater, recorded on stations within 100 km. This dataset and related information are available from the Southern California Earthquake Center (SCEC) Web site: https://www.scec.org/research/stress-drop-validation. We are soliciting stress drop estimates from community participants on any subset of these events, using a variety of methods. We are correlating and comparing these resulting stress drops as they are made available in a meta-analysis, to understand why similarities or differences arise. We will examine which earthquakes or methods generate grossly similar or different results in the first round of analyses. We will then share the findings and encourage individuals and groups to revisit their analyses and investigate the principal sources of discrepancies and uncertainties. We will present an overview of the study, and preliminary results. As a community study, all are invited to join!

© 日本地震学会

多重スペクトル解析による小地震の震源過程の複雑性の定量化

Quantification of the Complexities in Rupture Processes of Small Earthquakes by Multiple Spectral Ratio Analyses

*内出 崇彦[1]
*Takahiko UCHIDE[1]

1. 国立研究開発法人 産業技術総合研究所　地質調査総合センター
1. Geological Survey of Japan, AIST

震源過程は、解像度に限界はあるものの、断層すべりインバージョン解析やバックプロジェクション解析といった地震学的なデータ解析によって、その特徴が明らかにされてきている。主に一方向に破壊が伝播する場合もあれば、逆方向の明瞭な破壊伝播を伴う場合もある。破壊が始まってから、一度収まるとそのまま終わって、単一の破壊域を持つというものもあれば、複数の場所を次々に破壊するという場合もある。このような多様性を生む原因として、破壊される断層にかかる応力や摩擦特性などが考えられるが、それらを直接知ることは容易ではない。破壊過程の複雑性は、そのような断層の物理的条件を知る手掛かりとなりうるものと考えられる。

多数の地震の破壊過程の特徴を定量化する方法として地震波スペクトル解析がある。観測波形のスペクトルから伝播特性やサイト特性を除去して、オメガ2乗モデルなどのスペクトルモデルに合わせることで、震源過程の特徴を地震モーメントやコーナー周波数といったパラメータに落とし込む。円形クラックモデル（e.g., Brune, 1970）を仮定することで、地震モーメントとコーナー周波数を応力降下量に変換する。

伝播特性とサイト特性を除去する方法として、解析対象の地震のスペクトルと、その近傍で発生したより小さい地震のスペクトル（経験的グリーン関数（EGF））との比を取るスペクトル比法がある。解析対象地震とEGF地震との伝播経路が似通っていることを利用したものであるが、伝播経路のわずかな違いが誤差の要因となってしまう。そこで、EGF地震として選ぶことができる地震が多数存在する場合、それらの結果を統合すれば、EGF地震の選択に伴う誤差を低減させることができると考えられる。Uchide and Imanishi (2016)が提案した多重スペクトル比法はそのような考え方で開発された解析法である。各EGF地震について、解析対象地震との間のスペクトル比をオメガ2乗モデルで合わせた際の残差を求める。その残差スペクトルを中央値スタッキングすることで、EGFの選択に依らない残差スペクトルが得られる。この残差スペクトルは解析対象地震の震源スペクトルに起因すると考える。そのため、残差スペクトルをオメガ2乗モデルに重ね合わせたものが解析対象地震の震源スペクトルであると考える。

多重スペクトル比法を日本各地の内陸の20 km以浅で発生した地震に適用する。残差スペクトルがほぼ平坦で、オメガ2乗モデルがよく成り立つ例もあれば、残差スペクトルが起伏に富んでいて、震源スペクトルがオメガ2乗モデルから大きく外れて、コーナー周波数が2つあるように見えるような場合もある。同様の傾向は2019年米国カリフォルニア州リッジクレスト地震の余震でも見られる。このような複雑性の地域性が、その原因を知るための手掛かりの一つになると考えられる。

The earthquake source processes have been characterized by seismological data analysis such as finite-fault slip inversion analyses and back-projection analyses, although the resolution is limited. Some earthquakes are unilateral, while some others are bilateral. Some have single rupture patches, while some others multiple ones. Such diversity may be due to the stress and frictional properties of the fault being

© 日本地震学会

ruptured, but it is not easy to measure them directly. Nevertheless, the complexity of the rupture process may provide a clue to the physical properties of such faults.

Seismic spectral analyses quantify characteristics of the rupture process of many earthquakes. By removing propagation and site effects from the observed spectra and fitting them to a spectral model (e.g., the omega-square model), the characteristics of the earthquake source process are reduced to parameters such as seismic moment and corner frequency, which can be converted into stress drops by assuming a circular crack model (e.g., Brune, 1970).

The spectral ratio method removes propagation and site effects by taking the ratio of the spectrum of the target event to that of a nearby smaller earthquake (empirical Green's function (EGF)). This method takes advantage of the fact that the propagation paths of the target event and the EGF event are similar. However, slight differences in the propagation paths produce errors. The errors cause by the selection of EGF event will be reduced by integrating such errors in analyses using different EGF events. The multiple spectral ratio method proposed by Uchide and Imanishi (2016) was developed based on this idea. We fit the EGF and target events' spectral ratios by the omega-square model and then obtain the residuals. By median-stacking the residual spectra, we can obtain the residual spectra independent of the choice of EGF. We consider that this residual spectrum is due to the source spectrum of the target event. Therefore, the residual spectrum superimposed on the omega-square model is considered the source spectrum of the earthquake to be analyzed.

We applied the multiple spectral ratio method to inland earthquakes that occurred at depths greater than 20 km in Japan. In some cases, the residual spectra are almost flat, and the omega-square model holds well. In contrast, in other cases, the residual spectra are undulating, and the source spectra deviate from the omega-square model so much that they appear to have two corner frequencies. A similar trend is seen in the aftershocks of the 2019 Ridgecrest earthquake. The regional variety will be a clue to the earthquake source complexity.

© 日本地震学会

九州東方沖のフィリピン海プレート上における摩擦特性の空間分布：小地震の応力降下量による推定

Spatial pattern in frictional properties on the subducting Philippine Sea Plate off the east of Kyushu Island

*山田 卓司[1]
*Takuji YAMADA[1]

1. 茨城大学
1. Ibaraki University

1. はじめに

九州東方沖では、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う地震が繰り返し発生している。本研究では、2003年1月から2020年12月に九州東方沖で発生した小地震（4.0 <= Mw <= 5.0）のうち、2.で説明するとおり、プレート境界面の摩擦特性を反映していると考えられる140地震を選び出し、応力降下量の解析を行った。

2. 解析地震の選択基準

本研究では深さ方向の震源決定精度を考慮して、Baba *et al.* (2002), Hirose *et al.* (2008), Nakajima and Hasegawa (2007) の推定したフィリピン海プレート境界面から±15 km の深さで起きた小地震（4.0 <= Mw <= 5.0）を選び、解析対象とした。

解析対象の地震の規模の下限と上限は、以下の理由から設定した。マグニチュードが3.5を下回る地震では、特に低周波数帯の信号-ノイズ比が悪かった。そこで、経験的グリーン関数（EGF）として用いる地震をMw3.5とし、コーナー周波数の決定精度を確保するため、解析対象地震はEGFと0.5以上のマグニチュードの開きをもつ地震（Mw >= 4.0）とした。また、応力降下量は各地震の断層面の大きさに応じた平均的値として求められるため、解析対象地震の断層面が大きすぎると、空間不均質性の議論に不適である。よって、解析対象地震の規模の上限はMw5.0とした。

なお本研究では、気象庁によって決定されたマグニチュードMjmaがモーメントマグニチュードMwに等しいと仮定しているが、この仮定の妥当性についても検討済みである。また、解析対象地震のうち、防災科学技術研究所によってメカニズム解が求められている地震については、フィリピン海プレートの沈み込みと調和的な節面を持つことを確認済みである。

3. 応力降下量解析

Yamada *et al.* (2021) の手法を用いて、応力降下量の解析を行った。まず、2003年から2020年に発生したMw3.5の地震のうち、解析対象の小地震（4.0 <= Mw <= 5.0）の震源から最短距離にある地震の観測波形をEGFとした。次に、解析対象の地震の観測波形スペクトルをEGFのスペクトルでデコンボリューションし、震源スペクトルがオメガ2乗モデルに従うとの仮定のもと、解析対象地震のコーナー周波数を求めた。最後に、断層面が円形であり、かつ破壊伝播速度がS波速度の90%であると仮定して、Madariaga (1976) のモデルを用いてコーナー周波数から応力降下量を計算した。

4. 結果および考察

小地震の応力降下量の解析結果から、プレート境界の摩擦特性、特に剪断強度の空間不均質分布を推定することができる（Yamada *et al.*, 2021）。各地震の応力降下量の解析結果をもとに、緯度・経度それぞれ0.1度ごとに平滑化した応力降下量分布を図1.に示す。

© 日本地震学会

北海道南東沖（Yamada *et al.*, 2017）や東北地方東方沖（Yamada *et al.*, 2021）の太平洋プレートの沈み込みに伴う小地震の解析結果と比べると、全体的に応力降下量が小さい。これは、九州東方沖のフィリピン海プレート上の摩擦強度が相対的に低いことを示唆していると考えられる。また、より小さな空間スケールでの結果に着目すると、1996年日向灘地震の震源域（図1.の赤枠A）の南隣に、応力降下量が大きい領域が見られる。すなわち、この領域では剪断強度が高く、日向灘地震の際にバリアとして働いたのかもしれない。
小地震の応力降下量の解析結果から推定される摩擦特性の空間分布は、動的破壊シミュレーションの剪断強度分布として使用することを通して、強震動予測の精度向上にも貢献できると考えられる。

参考文献：
- Baba *et al.* (2002), PEPI, https://doi.org/10.1016/S0031-9201(02)00044-4
- Hirose *et al.* (2008), JGR, https://doi.org/10.1029/2007JB005274
- Madariaga (1976), BSSA, 66 (3): 639–666
- Nakajima and Hasegawa (2007), JGR, https://doi.org/10.1029/2006JB004770
- Yagi *et al.* (1999), GRL, https://doi.org/10.1029/1999GL005340
- Yamada *et al.* (2017), PEPS, https://doi.org/10.1186/s40645-017-0152-7
- Yamada *et al.* (2021), EPS, https://doi.org/10.1186/s40623-020-01326-8

謝辞：本研究では、Hi-net（防災科学技術研究所）、気象庁、鹿児島大学、九州大学、高知大学の観測点の地震波形データと、気象庁の一元化震源およびP, S検測値を使用しました。記して感謝いたします。

© 日本地震学会

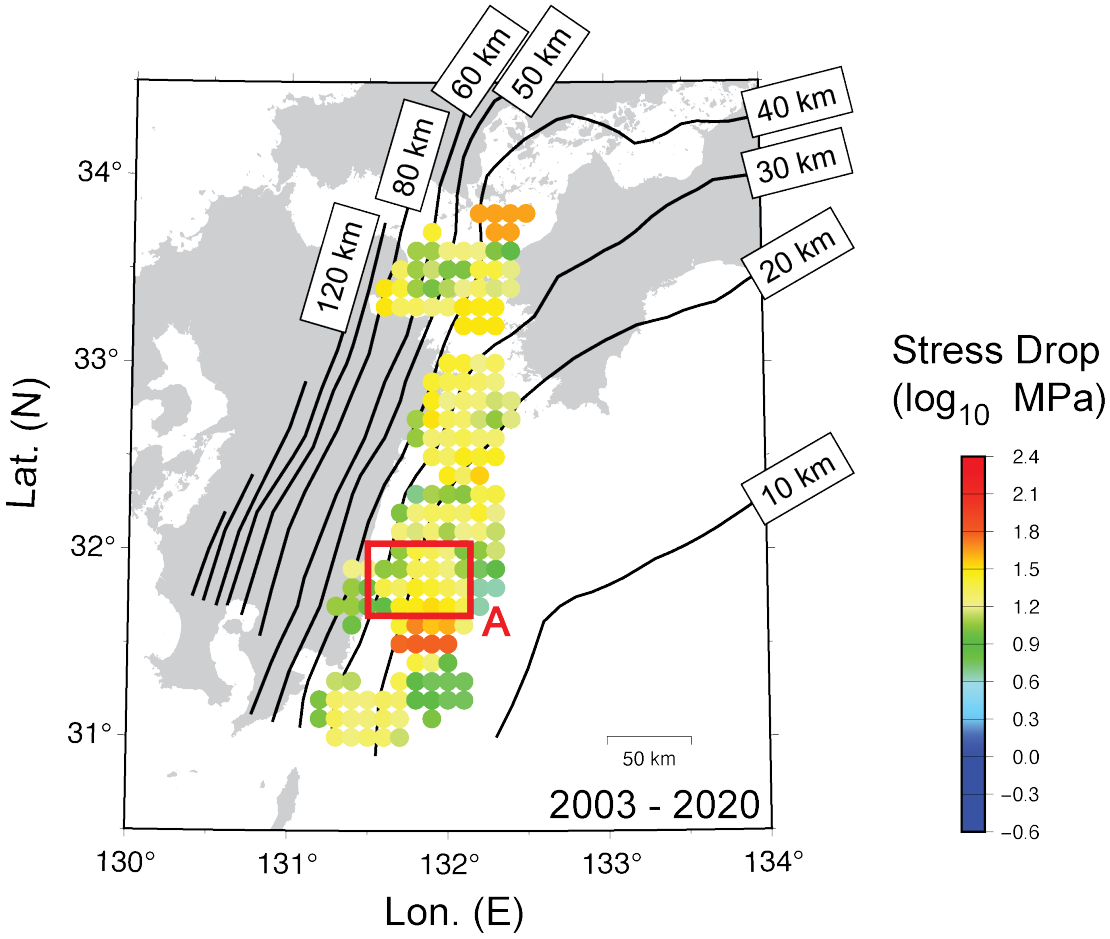


図1. 応力降下量の空間分布。黒線はフィリピン海プレート上面の深さを表す（Baba *et al.*, 2002; Hirose *et al.*, 2008; Nakajima and Hasegawa, 2007）。赤枠で示された領域Aは、1996年日向灘地震の震源域を示す（Yagi *et al.*, 1999）。

© 日本地震学会

S波部と全波の分離サイト増幅特性と水平上下比ー異なる補正係数の必要性

Horizontal Site Amplification Factors and Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of S-wave Part and Whole Duration: Needs of Different Correction Function

*川瀬 博[1]、伊藤 恵理[1]、仲野 健一[2]
*Hiroshi KAWASE[1], Eri Ito[1], Kenichi Nakano[2]

1. 京都大学防災研究所、2. 安藤・ハザマ技術研究所
1. Disaster Prevention Research Institute, 2. HAZAMA ANDO CORPORATION

観測地震動の水平サイト増幅特性(HSAF)をサイト固有の値として求めることは強震動予測のためには必要不可欠である。本研究では、まず一般化スペクトル・インバージョン法(GIT, 仲野・他, 2019)を用いて、K-NET，KiK-net，気象庁, およびCEORKAの観測データを対象に、露頭地震基盤相当の基準サイトの地震動に対する各地点のHSAFを求めた。さらにHSAFだけでなく、観測上下動を用いて同じ基準サイト地震動に対する上下動増幅特性VSAFも求めた。その分離したHSAF・VSAFに基づいて、水平／上下スペクトル比(EHVR)を求め、Ito et al. (2021)の方法を拡張する形で、HSAFを直接推定する上下動補正関数(VACF)を提案した。

まず、主要なS波部分（マグニチュードに応じて5～15秒間）についてのみ切り出し、そのHSAFとVSAFを抽出した。それをsHSAF・sVSAFと表す。観測地震動のS波部スペクトルをFs_ij（水平動）・Gs_ij（上下動）とし、その震源スペクトルをSs_i、伝播経路特性をPs_ijとすると、後者の2つは共通なので

sHSAF=<Fs_ij/(Ss_i*Ps_ij)> (1)

sVSAF=<Gs_ij/(Ss_i*Ps_ij)> (2)

と表すことができる。ここで< >は平均操作を表す。またこのS波部の水平／上下スペクトル比sEHVRは

sEHVR=<Fs_ij/Gs_ij> (3)

と得られるので結局

sHSAF= sEHVR * sVSAF (4)

となる。このsVSAFの平均値が補正関数sVACFである。ここまでは既にIto et al. (2021)に示された通りである。

次に、全く同様にS波到達以降の全継続時間（以下「S波部」に対応させて「全波」と呼びwを前に付ける）のHSAFとVSAF（wHSAFとwVSAF）を求める。その際、重要なことは震源特性と伝播経路特性はそのままS波部のものを参照することである。すなわち観測地震動の全波スペクトルをFw_ij（水平動）・Gw_ij（上下動）とすると

wHSAF=<Fw_ij/(Ss_i*Ps_ij)> (5)

wVSAF=<Gw_ij/(Ss_i*Ps_ij)> (6)

が得られ、全波の水平／上下スペクトル比wEHVRは

wEHVR=<Fw_ij/Gw_ij> (7)

と得られる。S波部と同様に

wHSAF= wEHVR * wVSAF (8)

となるのでwVSAFの平均値が全波用の補正関数wVACFに相当する。ここでS波部に対して分離解析をしたのと同様に全波に対して独立した分離解析をしないでS波部から求めた震源スペクトルと伝播経路特性を使う理由は、概念として、基盤が露頭している盆地端部まではS波として伝播し、そこで盆地生成表面波に変換された波動の寄与がS波部サイト特性に追加的増幅として付加されると考えたからに他ならない。伝播経路間のS波の

© 日本地震学会

散乱によって基盤入射波の後続動を形成したS-Coda波は、理論的にS波あるいはP波の増幅特性で増幅し、sHSAF・sVSAFに一致するので全波サイト特性との差の原因とはなり得ない。

以上の2つの時間区間の分離サイト特性を比較したところ、wHSAFとwVSAFは、2Hz以下の低周波数領域において、盆地生成表面波の寄与により、sHSAF・sVSAFに比べてはるかに大きい（3倍から10倍の）付加的増幅を示すことがわかった。全波サイト特性とS波部サイト特性の比WSRを水平成分・上下成分について

WSRh=wHSAF/sHSAF (9)

WSRv=wVSAF/sVSAF (10)

のように求めると、水平動から求めたWSRhも上下動から求めたWSRvも非常によく一致しており、ほぼ１：１の関係にあることがわかった。全2593地点の平均値を求めると、0.3Hzで最大値2.5倍を取り、1Hzで2倍、3Hzで1.5倍となる滑らかな関数が得られた。標準偏差は約倍／半分である。このことは、WSRが盆地生成表面波の寄与を含んだ全波サイト特性をS波やP波の増幅特性によって規準化したものであることを考えると驚くべきことである。

上記のことから、EHVRの全波とS波部の比、すなわちWSRhvを求めればほぼ1になることが期待される。求めてみると0.3Hzで1.0、1Hzで0.8、3Hzで0.7となり、広い周波数範囲で1.5倍／0.7倍の範囲に収まった。これは過去EHVRを求める際に、地震動の継続時間に対して注意を払って来ずとも安定して求められてきたことと符合する。 しかし、このことは同時に式(8)で得られるwVSAFの平均値を用いないと正しいwHSAFが得られないことを意味する。そこで本研究では全波の水平動サイト特性を全波の水平上下比から簡便に求めるための新しいVACF、すなわちwVACFを提案した。それはすなわち

wVACF=sVACF*WSRv (11)

で求められる。直接的に式(8)に示されたwVSAFの平均値から求めるよりも式(11)から求めた方が安定性が高かった。その妥当性を検証した事例をFig.1に示した。

© 日本地震学会

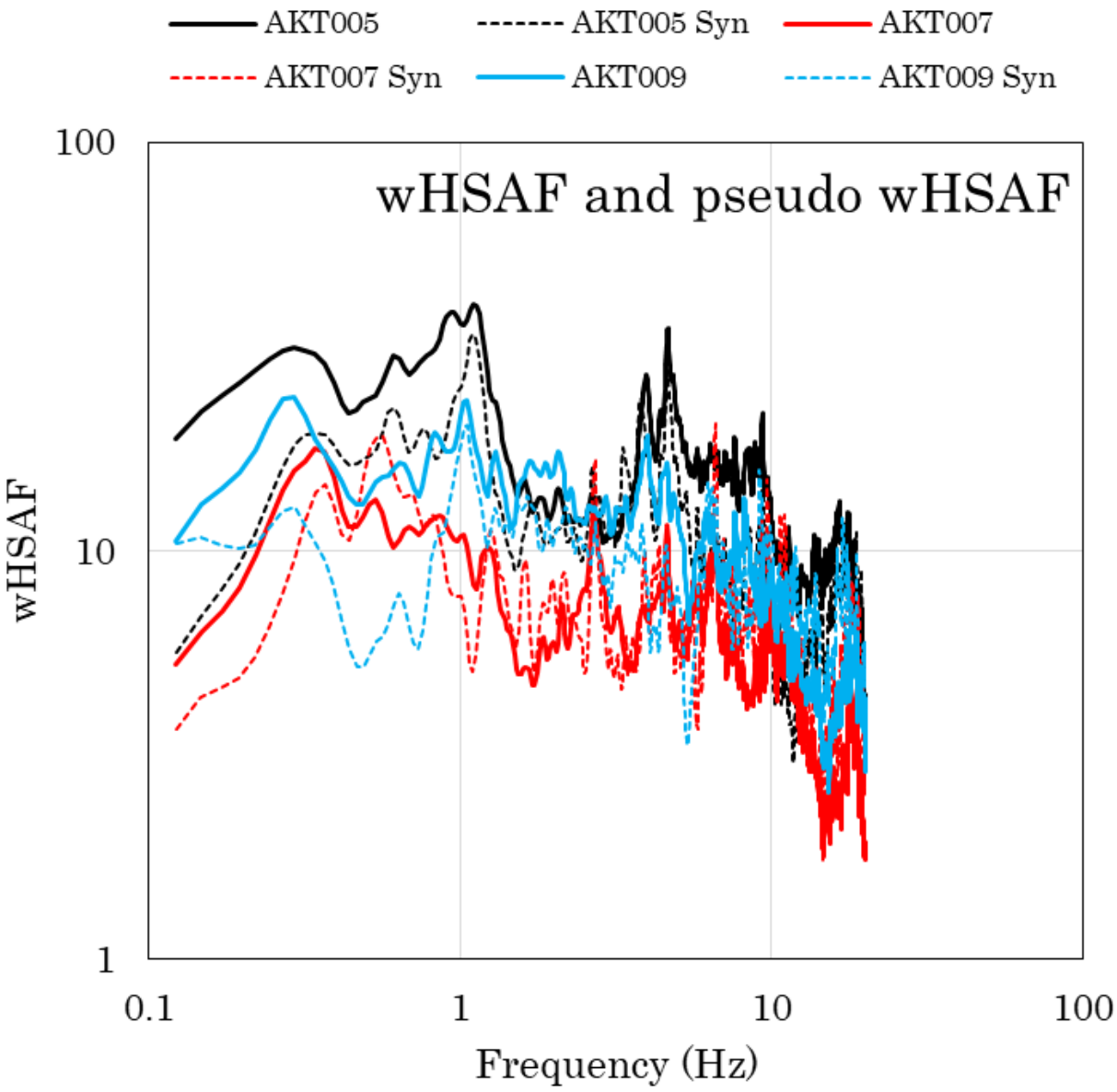


Fig.1 Examples of the comparison between observed wHSAF (solid) and synthetic pseudo-wHSAF=wEHVR*sVACF*WSRv (dotted).

© 日本地震学会

A会場 | 一般セッション：S19. 地震一般・その他

2021年10月14日(木) 10:00 ~ 10:30 | A会場 A会場

AM-1

座長:山田 真澄(京都大学防災研究所)

10:00 ~ 10:15

[S19-01] **点過程モデルが推定する背景地震活動の時間変動から見た長野県中部の群発地震活動の特徴**

○熊澤 貴雄[1]、尾形 良彦[2] (1.東京大学　地震研究所、2.統計数理研究所)

10:15 ~ 10:30

[S19-02] 2021年4月26日北海道謎の爆発音の震源推定

○山田 真澄[1] (1.京都大学防災研究所)

点過程モデルが推定する背景地震活動の時間変動から見た長野県中部の群発地震活動の特徴

Characteristics of earthquake swarm activity in central Nagano prefecture as seen from the time variation of background seismic activity estimated by the point process model

*熊澤 貴雄[1]、尾形 良彦[2]
*Takao KUMAZAWA[1], Yosihiko Ogata[2]

1. 東京大学　地震研究所、2. 統計数理研究所
1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. The Institute of Statistical Mathematics

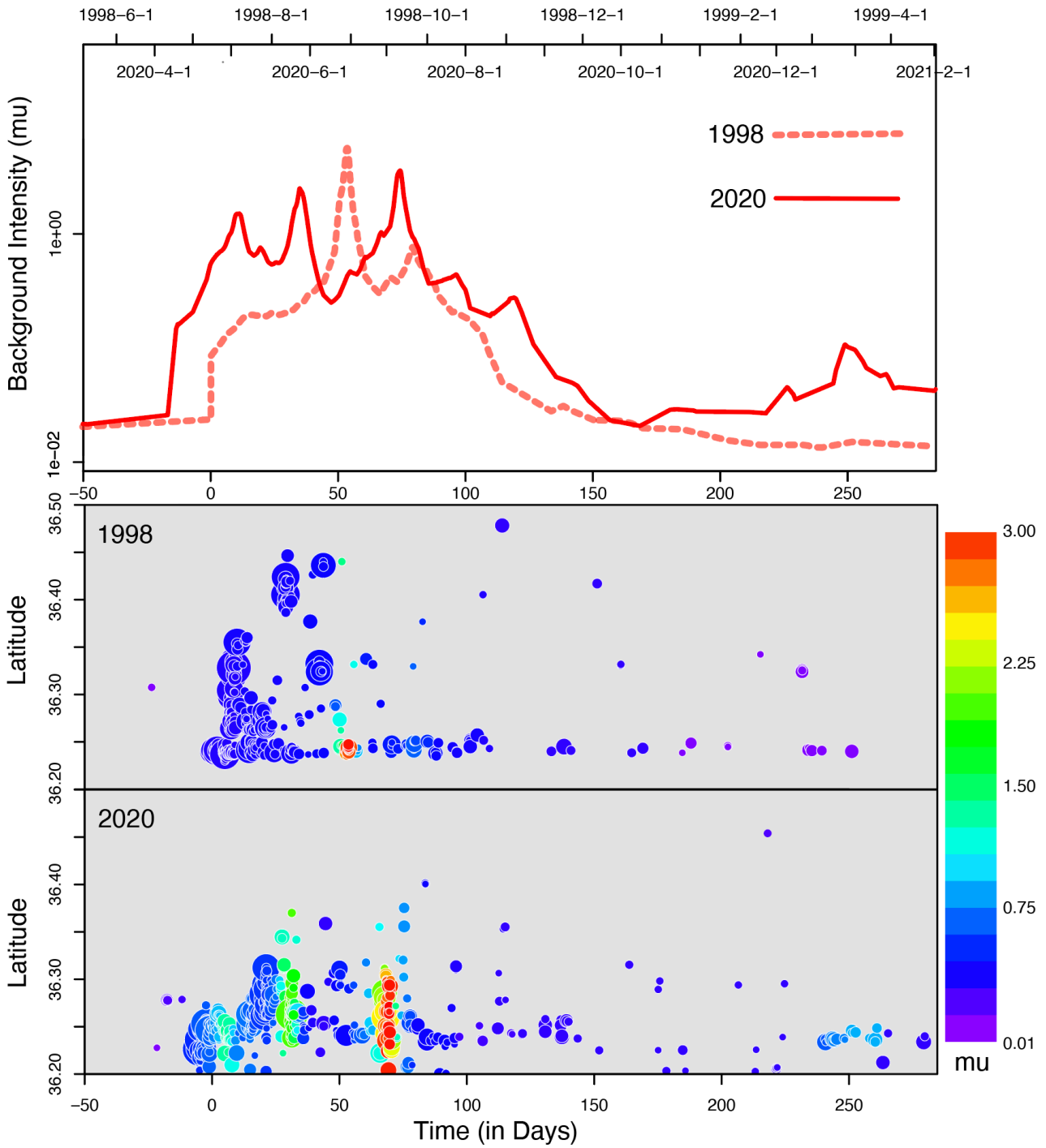
地震時系列データからは様々な統計量を抽出できるが、中でも背景地震活動強度は地震活動の予測の観点からも重要な意味を持つ。我々の研究ではETASモデルの背景地震活動度の時間変動をベイズ法で推定する点過程モデルを用い、長野県中部の群発地震活動に適用して、その地震活動の特徴を調べた。

1998年 8 月から長野県中部・上高地において始まった群発地震活動は10月にかけて長野・岐阜県境付近を北上しつつ活動域が拡大して多くの地震が観測された。その活動の時空間分布、マグニチュード分布、メカニズム、 b値などが予知連会報で報告されている。2020年の活動は7月から始まり同地域の南部で起きた。

2020年の群発地震も1998年の場合と同様に、地震のメカニズムはストレス場を反映した、北西－南東方向を圧縮軸に持つ、横ずれ断層型が多いが、これらは飛騨山脈（北アルプス）に連なる火山地帯の付近の群発地震なので、熱水やマグマ流体の移動や間隙圧の拡散に関連していることも考えられる。 これらの群発地震は時空間的には両期間とも初期には南端地域から北に推移している。1998年の群発活動はより浅い方向への広がりも見えるが、これは北方にも延びたためである。

背景地震活動度の時間方向への推移は、1998年では群発開始後50日頃に背景活動度が常時より数十倍～数百倍のピークに達している。これは南端領域で深部に活動が集中しているが、これらは全てM3.5 以下の小地震である。2020年には同様なピークが3度あった。深さ方向には広く分布している。2020年末からの背景活動度の増加も見られたが、小さな活動で収まった。

© 日本地震学会



(上段) 背景地震活動度 (mu) の時間変化 . 赤点線は 1998 年、赤実線は 2020 年の活動時 .
(中下段) 地震活動の時空間分布 .
半径はマグニチュード、色は対応する時刻の背景地震活動度に対応する .

© 日本地震学会

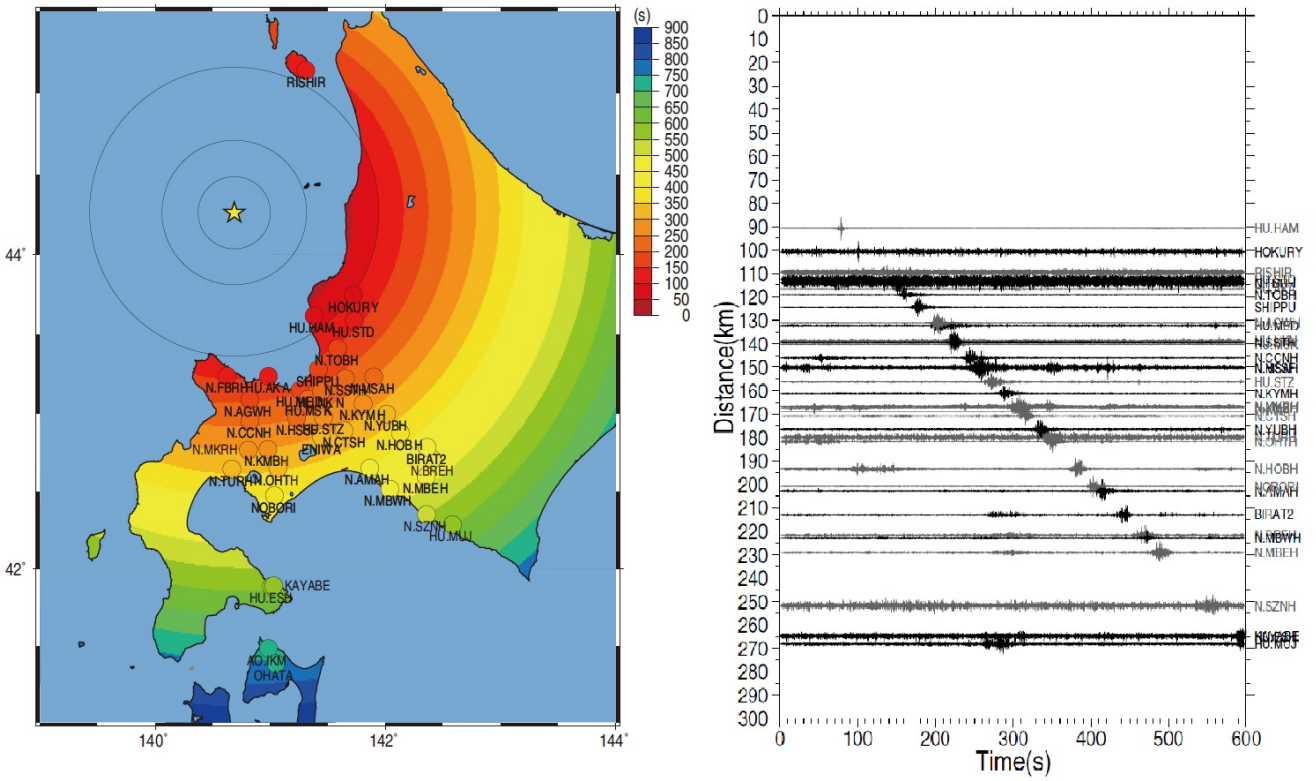
2021年4月26日北海道謎の爆発音の震源推定

Estimation of the source of the explosive sound on April 26, 2021 in Hokkaido, Japan

*山田 真澄[1]
*Masumi YAMADA[1]

1. 京都大学防災研究所
1. DPRI Kyoto University

An explosive sound was heard over a wide area of Sapporo city, Hokkaido, Japan on April 26, 2021. It was accompanied by minor shaking and was considered likely to be a sonic boom produced by a fireball. However, no luminous phenomenon was observed. We analyzed seismic data to identify the source of the sonic boom, and estimated the trajectory of the object from the associated signal arrival times. The source was located approximately 100 km off the west coast of Hokkaido, at an altitude of 50 km. The elevation angle was higher than 66 degrees and the estimated velocity was higher than that of a fighter plane.
We compared trajectory models estimated from optical and seismic observations for past sonic boom events, and they were found to be in good agreement. Although our trajectory model is simplified and assumes that sound and the fireball have a constant speed, the model is highly accurate. The results show that seismic data can be used to estimate the trajectory of objects producing sonic booms, even when visual observations are unavailable.



© 日本地震学会

A会場 | 一般セッション：S15. 強震動・地震災害

2021年10月14日(木) 11:00 ~ 12:15 | A会場 A会場

AM-2

座長:伊藤 恵理(京都大学防災研究所)、森川 信之(防災科学技術研究所)

11:00 ~ 11:15

[S15-01] 観測できていない強烈な衝撃的鉛直地震波動について - その３ -
- 地震計で捉え難い威力波 -

○前原 博[1] (1.（一財）地球システム総合研究所)

11:15 ~ 11:30

[S15-02] 強震動データベース試作版に基づく地震動予測式の拡張

○森川 信之[1]、藤原 広行[1]、岩城 麻子[1]、前田 宜浩[1] (1.防災科学技術研究所)

11:30 ~ 11:45

[S15-03] 成層構造における直達S波の透過率を考慮した地震動距離減衰特性の検討

○池浦 友則[1] (1.鹿島技術研究所)

11:45 ~ 12:00

[S15-04] 近地地震波形に見られるsPL波とPL波の生成・伝播特性：震源深さの即時推定への活用可能性

○大須賀 啓士[1]、古村 孝志[1] (1.東京大学地震研究所)

12:00 ~ 12:15

[S15-05] 地震波逆伝播計算を用いた大地震の断層すべり即時推定の高解像度化

○柴田 勇吾[1]、古村 孝志[1]、前田 拓人[2] (1.東京大学地震研究所、2.弘前大学大学院理工学研究科)

観測できていない強烈な衝撃的鉛直地震波動について - その３ -
- 地震計で捉え難い威力波 -

Non-recorded Strong Impulsive Vertical Seismic Waves - Part 3 -
- Powerful seismic difficult waves to record by a seismograph -

*前原 博[1]
*Hiroshi MAEHARA[1]

1.（一財）地球システム総合研究所
1. Geosystem Research Institute

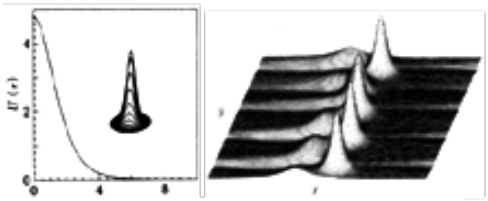
地震計でこれまで正確に観測できていない，強烈な衝撃的鉛直地震波動が働き，構造物に多大な被害を起こしたことが，土木学会関西支部の調査研究委員会活動で明らかになり，その報告書を一昨年春に同支部より公開しました[1>]．この報告書では橋脚の被害事例を中心に，100年余り前に作られた海震の震度階表 <ルドルフの表,1898年-10段階，シーベルグの表,1923年-6段階> と，船舶工学者から指摘の語句 "海震で船舶が損壊する時の地震波は，疎密波である事は常識である" を交え，問題の波とその被害の存在を説明しています．その後，耐震基準にこの問題の波が考慮されていない欠陥の改善を目指し，この研究成果に関する発表や広報活動を進めているが [2>]，この問題の波が地震計で観測できていないため，この現象の理解が進展しにくい状況があります．そこで今年は，なぜ地震計で観測できていないのかの課題に焦点を当てることにしました．
この問題の波は通常の地震波とは異なり，1.高周波，2.局在波，3.威力波である3種類の性質を持つため，従来の地震計では観測できない訳です．しかし，この点の理解も広まっていないので，3種類の性質に視点を置き3回に分けて発表することにしました <土木-関西，土木-全国，地震-秋季>．本稿はこのシリーズの <その３> で副題を “地震計で捉え難い威力波” としています．

問題の強烈な衝撃的鉛直地震波動はどのような波かは，まだ正確には観測できていないのと， 発生状態に多様性を持つことや，その発生原因が未解明なこともこの波の状態を理解し難くしています．最近になり重要な資料の確認ができ，その資料の要点を急遽，今年の地盤工学会の第56回発表会 <7.13> で先に紹介しました．そこでは発生源因について説明していませんが，地殻ブロックの動きを予想さす資料が別途得られていたので，地殻ブロックの動きに伴う境界部の圧力変化が物質の相変化を促し，それが問題の波の発生原因と考えれば，多様な発生形態や前述の3種類の特性を持つことも説明できるようになると考えられます[2>]．
こうした展望を背景に，本稿では “地震計で捉え難い威力波” として以下に3番目の論点を述べます．

次頁の図1.a,は単独で生じる衝撃的鉛直地震波のイメージで，それが連成した場合が図1.b,です．釣鐘型をしていますが，頭部が平坦な場合で，さらに断面が長円や長楕円形の場合も予想されます．図2は岩<約5tf>が跳出した写真<長野県西部地震>で，図3は石碑<約3tf>が慰霊碑の台上から5.8m程跳ばされた写真<熊本地震>です．広域地震観測網の観測点では，地面に埋め込まれた長さ1mで80cm角のコンクリート台<約1.5tf>の上に地震計が装着されています．問題の地震波は 5tfや3tf の物体を簡単に跳び出さす威力を持ちますので， 観測台<約1.5tf>は簡単に浮き上がらすことが予想されます．図4<地表，熊本地震>，図5<胆振東部地震>および図6.a,<岩手・宮城内陸地震>に示すUD波形は，突き上げ加速度が1400gal程度以上になると，波形の上向きと下向きで極端な非対称な形が記録されることを示します．すなわち観測台が突上げられて周面摩擦抵抗が働き，浮き上がる状態の加速度と，下向き加速度<１Ｇ相当>の状態を反映していると見られます．この傾向は図7.a,b,のクリストチャーチ地震<余震, 2011>の記録にも顕著に見られます．周面摩擦を考慮すると1.5Ｇ以上の上向き加速度の威力を持つ地震波が作用すると，観測台が浮き，正確な地震波動は観測できなくなることを意味します．

© 日本地震学会

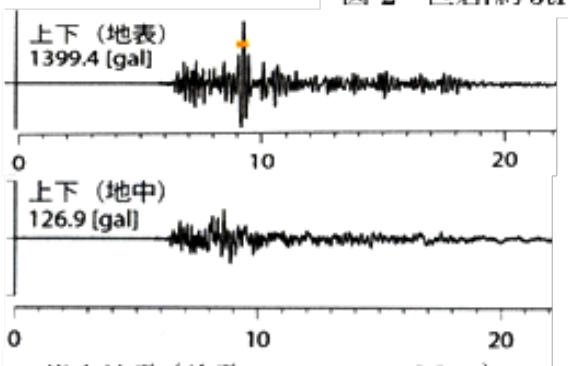
また，図4<益城>，図6.b,c,<東成瀬>の地上と地中の記録を見ると，地表での最大加速度時に対応する波は地中の記録に見られません．すなわち地中では素通りした波が観測台を動かす状況が，記録されたことを表しています．地震計による地震波の観測は，地震学の発展だけでなく，国家的な課題の重要施設の耐震および安全対策の根幹に係る観測ですので，このような欠陥は早急に改善しなくてはなりません．



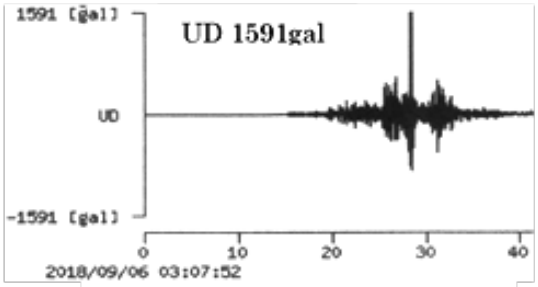
(a)切断図と立体図 (b)連成する波
図 1　釣鐘型孤立波の例 (ソリトン)

長野県西部地震 (1984, M6.8)
図 2　巨岩[約 5tf] の跳出し

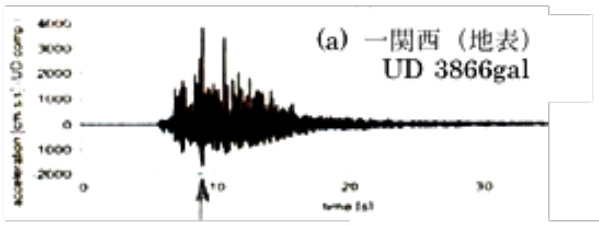
熊本地震 (2016, M6.5, M7.3),
石碑 [約 3tf] は 5.8m 程飛翔
図 3　慰霊塔施設　飛散状況

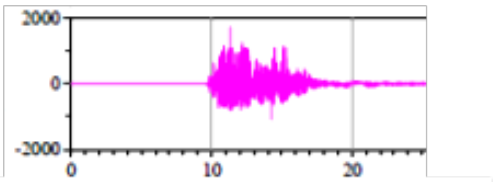


熊本地震 (前震, 2016.4.14. M6.5)
図 4　KiK-net 益城の UD 波形

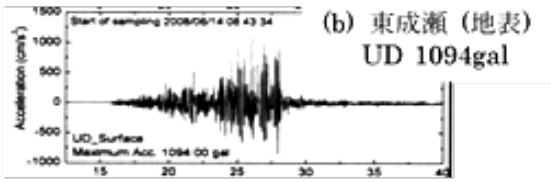


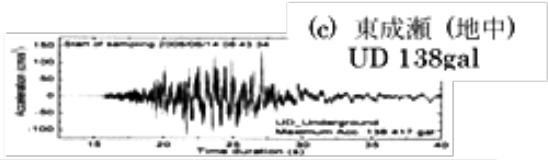
胆振東部地震 (2018.M6.7)
図 5 K-NET 追分の UD 波形



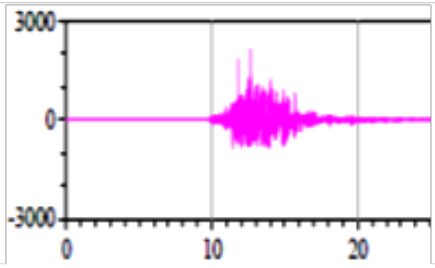


(a) PRPC ;　UD 1851gal　(震央 8km)





岩手・宮城内陸地震 (2008. M7.2)
図 6　一関西と東成瀬の UD 波形



(b) HVSC ; UD 2161gal (震央 3km)

Christchurch 地震　[逆断層+右横ｽﾞﾚ]
(余震 2011.2.21. M6.3, D5km)
図 7　上下動波形の代表例

参考文献

1) 土木学会関西支部，都市直下地震での鉛直方向の免震構造に関する調査研究委員会報告書，平成 31 年 3 月．
https://www.jsce-kansai.net/wp-content/uploads/2019/06/chosa_chokka_2017-2018.pdf

2) 前原博：海震と強烈な衝撃的鉛直地震動に関する考察,－新しい地震観の構築に向けて－，日本船長協会 [船長] 第 138 号，p48-86，2021.1.

© 日本地震学会

強震動データベース試作版に基づく地震動予測式の拡張

Expansion of Ground Motion Prediction Equation Based on Prototype Strong-Motion Database

*森川 信之[1]、藤原 広行[1]、岩城 麻子[1]、前田 宜浩[1]
*Nobuyuki MORIKAWA[1], Hiroyuki Fujiwara[1], Asako Iwaki[1], Takahiro Maeda[1]

1. 防災科学技術研究所
1. NIED

観測記録に基づく地震動予測式（以下、GMPE）については、観測記録の蓄積とともに多くの研究が行われるようになり、近年では機械学習などにより式の形が明確でない地震動予測モデル（GMM）の構築も行われつつある。日本においても、様々な目的に応じてそれぞれの研究者（グループ）によりGMPEやGMMが提案されているが、強震動予測に用いるという観点から、ほとんどがモーメントマグニチュード（以下、Mw）5程度以上の地震が対象となっている。

我々は、これまでに日本全国を対象とした地震ハザード評価に適用することを目的としたGMPEを構築してきた。さらに、K-NETおよびKiK-net観測記録に関して、気象庁、F-netおよびSRCMOD（Mai and Thingbaijam, 2014）による震源パラメータ、観測点のPS検層データおよび地震ハザードステーションJ-SHISの地下構造モデルと紐づけた新たな強震動データベース試作版を構築し（森川・他，2020；JpGU）、さらに既往のGMPE（MF13; 司・翠川，1999）に対する残差のデータベースも作成してきた（森川・他，2020；2020年度秋季大会）。データベースは100万を超える記録（注：3成分で1記録、KiK-netの地表と地中は別記録としている）から成るが、日本の多くのGMPEの適用範囲となっているMw5.0以上、断層最短距離200km以内の記録の数は約1/7にすぎない。しかしながら、観測点ごとの揺れやすさや限定した地域内での地震動の減衰特性をより精度よく評価するためには、規模の小さい地震や遠距離など振幅が小さいながらも多数存在する観測記録を活用することが有効である。

本検討では、この「残差データ」を用いて、Morikawa and Fujiwara (2013) の GMPE について小振幅域まで適用できる拡張を行う。具体的には規模の小さな地震（Mw3.5以上）および遠距離（断層最短距離500km以内）に適用できる補正項を求める。また、重要構造物等を対象とした強震動予測において必要とされてきている上下動についても、水平動に対する「残差データ」を用いて水平動に対する比のGMPEとあわせて同様の補正項を導出する。なお、本検討では、地表の観測記録のみを用い、KiK-netの地中記録は用いていない。

Mw5.5未満の規模の小さな地震については、Mwの二次式でモデル化されている元の式に対して、Mwの一次式のモデルに変化するようにモデル化する。ただし、周期2秒程度以上の長周期成分では、Mw4.0程度とそれ未満で残差の傾向が変わる様子が見られ、観測記録にノイズが含まれている影響を受けているようである。断層最短距離200km超については、森川・他（2003）と同様の補正を行う。このとき、地震タイプ（地殻内地震、海溝型プレート間地震、海溝型プレート内地震）による違いはほとんど見られなかった。なお、長周期成分では遠方の補正に関する効果が小さい。上下動については、Morikawa and Fujiwara (2013) の適用範囲においてはおおむね定数の補正項として表されることが確認された。一方で、今回の検討対象となる拡張領域に対しては、水平動（RotD100）に対して求められる係数と若干の違いが見られた。

今後、小振幅データにおける長周期成分のデータの扱いや海溝型プレート間地震とプレート（スラブ）内地震の分類に関するデータベースの改修を行うとともに、観測点ごとの揺れやすさである「サイト係数」の導出、ばらつきの分布形状についての検討を進める予定である。

© 日本地震学会

成層構造における直達S波の透過率を考慮した地震動距離減衰特性の検討

An attenuation model of strong motions considering transmission coefficient of S-waves in the layered structur

*池浦 友則[1]
*Tomonori IKEURA[1]

1. 鹿島技術研究所
1. Kajima Technical Research Institute

【1. はじめに】内陸地震の震源近傍では震源から放射されそのまま上昇伝播して観測点に到達する直達S波が最大の入射成分となる可能性がある．ただし，直達S波は，三次元の幾何減衰効果，Q値減衰効果の他に成層構造中の透過率の影響により震源深さhの数倍程度以上の震央距離Δで消失する．実際に，直達SH波の透過率は，例えば我が国の陸域の平均的な速度構造モデルであるJMA2001[上野他(2002)]では，Δ=3h～4h付近で0となる[池浦(2019)]．一方，この付近から遠方では，直達S波以外の，震源から様々な射出角で放射され反射・屈折・散乱を経て観測点に到達したS波群のみで地震動が構成され，強震動の主体となる波動成分は距離レンジで異なる．そこで，本研究では直達S波とそれ以外の間接的なS波群の距離減衰特性の違いを考慮して地震動の距離減衰モデルを設定し，近畿～中国地方における内陸地震の地震動への適用を試みた．

【2. 内陸地震による地震動の距離減衰モデル】震源距離rにおける周波数fの地震動振幅A(f)を直達S波の振幅DS(f)と間接的なS波群の振幅IS(f)のベクトル和で表し，DS(f)とIS(f)をそれぞれ以下のように表す．

・$A(f) = \{DS^2(f) + IS^2(f)\}^{0.5}$ …(1)

・$DS(f) = S(f) \times r^{-1}\, CTR(h, \Delta) \exp[-b_{DS}(f)\, r] \times G(f)$ …(2)

・$IS(f) = S(f)\, CIS \times r^{-0.5} \exp[-b_{IS}(f) r] \times G(f)$ …(3)

ただし，S(f)とG(f)はそれぞれ震源特性とサイト特性，CTR(h, Δ)はJMA2001を仮定した場合の直達S波の透過率，CISは間接的なS波群の生成効率，$b_{DS}(f)$と$b_{IS}(f)$はそれぞれ直達S波と間接的なS波群のQ値効果による距離減衰係数である．

なお，(3)式で表される間接的なS波群としては，震源から様々な射出角で放出され地殻内にトラップされて伝播する様々なS波成分の混在状態を想定している．その場合，波動エネルギーの拡散は三次元的な実体波よりもむしろ二次元的な表面波に近づくので幾何減衰効果を$r^{-0.5}$とした．また，そのQ値減衰効果も直達S波とは区別して距離減衰係数$b_{IS}(f)$を考えた．さらに，そういったS波群の起源となる震源特性は明らかでないため，震源スペクトルに乗じる係数としてS波群の生成効率CISを設けた．

以上のモデルを観測データに当てはめる際には，個々の観測地震動を各々の地点の相対サイトファクターで割り算して得られる基盤換算地震動 [例えば，池浦(2018)]を用いることで，G(f)を未知数から除外することができる．その場合，残る未知数は各地震の震源特性S(f)とS波群の生成効率CIS，および直達S波と間接的なS波群の距離減衰係数$b_{DS}(f)$，$b_{IS}(f)$である．これらの推定は，対数をとって線形化する方式が適用できず，非線形最適化問題となる．ここでは微分を用いない共役勾配法(PARTAN)[コワリック・オズボーン (1970)]を適用する．

【3. 近畿～中国地方の6地震への適用結果】本研究では，近畿～中国地方の内陸地震の基盤換算地震動[池浦(2018)]を用いて上記のモデルの有効性を調べることとし，表1の地震のΔ≦10hの地点を対象に上記の距離減衰モデルを当てはめた．震央と観測地点の分布は図1のとおりである．また，上記のモデルを当てはめた結果を検討するにあたり，従来法による結果として，同じデータで地震層別回帰分析を行い，震源特性の地震項と距離減衰係数を参照することとした．

まず，地震項から#6) 2018/06/18大阪府北部の地震(M6.1)を基準とした各地震の震源スペクトル比を求め，従来法の結果（LSQ）と比較して図2に示す．小規模地震の低周波数側でやや違いが見られるものの従来法とほぼ同じ結果が得られている．また，図3では距離減衰項から一律にS波速度3.5kmを仮定して求めたQ値

© 日本地震学会

を比較している．これによると，従来法のQ値（Q_{LSQ}）は1.3Hzで発散気味であり，同じ周波数で直達S波のQ値（Q_{DS}）は発散している．しかし，それを除けば，Q値の大小関係は，概ね従来法（Q_{LSQ}）＞間接的なS波群（Q_{IS}）＞直達S波（Q_{DS}）である．図4はS波群の生成効率CISの評価結果であり，全周波数帯域で0.1をやや下回る程度の結果であるが，数値としては，地震項とのトレードオフがあるため，決定精度に課題を残している．図5では，全データにわたって求めた誤差の対数標準偏差σにつき，その倍率exp[σ]で従来法による結果と比較している．本検討のモデル（DS+IS）による誤差のばらつきは，従来法（LSQ）のそれと大差ない．最後に図6では震源距離30km以内のデータで観測／計算の倍率を比較した．本研究のモデル（DS+IS）はばらつきの幅は従来法（LSQ）と大差ないものの，平均値が全帯域で概ね1倍であり，従来法に比べて良い推定となっている．

【4. まとめ】直達S波と間接的なS波群について異なる距離減衰特性を仮定し，両者の和で観測地震動を説明する距離減衰モデルを設定した．また，それを近畿～中国地方の内陸地震に適用し，震源近傍における地震動の再現性が従来法に比べて向上する結果を得た．今後も改良を加えつつ，他地域での検討を試みる．

【参考文献】池浦(2018)日本地震工学シンポジウム，池浦(2019)日本地震学会2019年秋季大会，コワリック・オズボーン(1970)非線形最適化問題（培風館），上野他(2002)験震時報．

© 日本地震学会

表 1 地震諸元

	Date	Origin Time	North Lat. (degN)	East Long. (degE)	Depth (km)	M_{JMA}
#1	2001/01/12	08:00:04.25	35.4660	134.4900	10.59	5.6
#2	2001/08/25	22:21:25.12	35.1518	135.6600	8.18	5.4
#3	2011/07/05	19:18:43.44	33.9905	135.2342	7.33	5.5
#4	2013/04/13	05:33:17.75	34.4188	134.8290	14.85	6.3
#5	2016/10/21	14:07:22.57	35.3805	133.8562	10.61	6.6
#6	2018/06/18	07:58:34.14	34.8443	135.6217	12.98	6.1

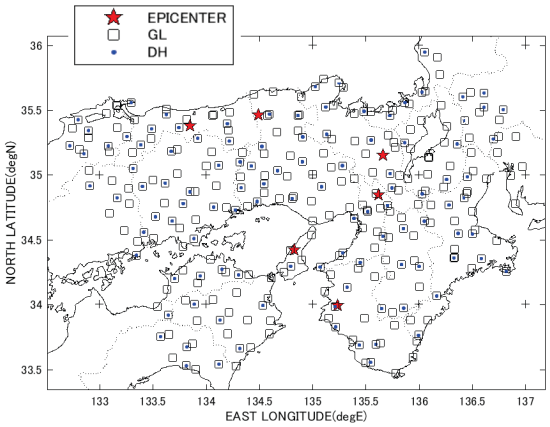


図 1 震央と観測地点の分布

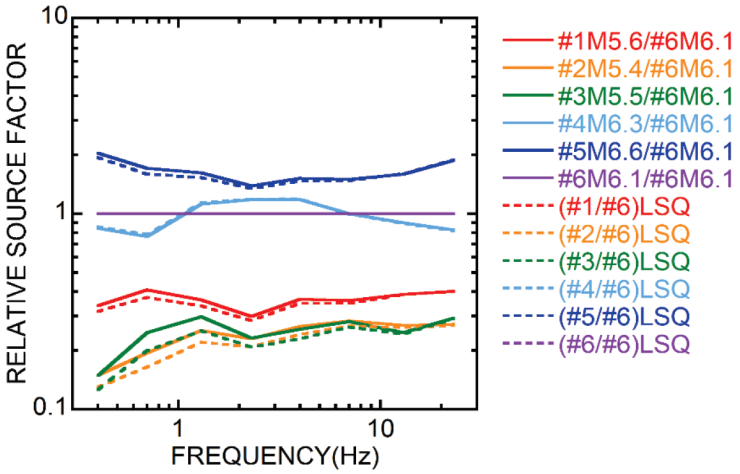


図 2 震源スペクトル比

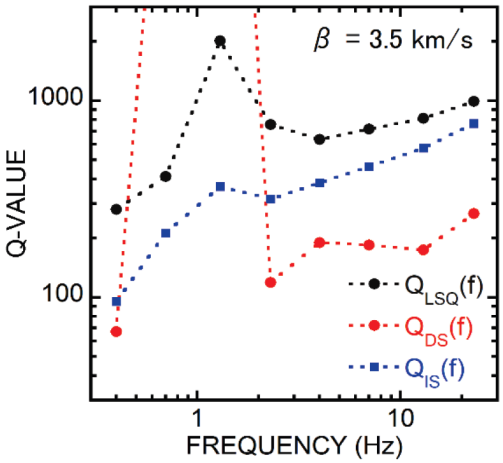


図 3 Q 値

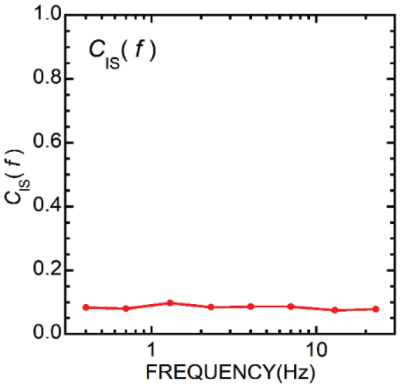


図 4 CIS

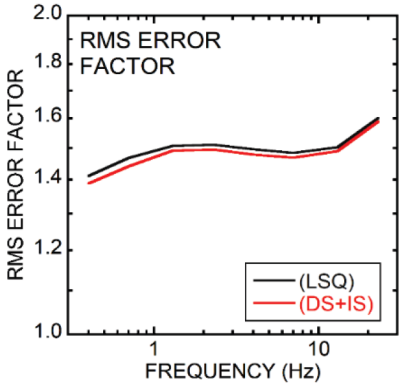


図 5 誤差の対数標準偏差の倍率

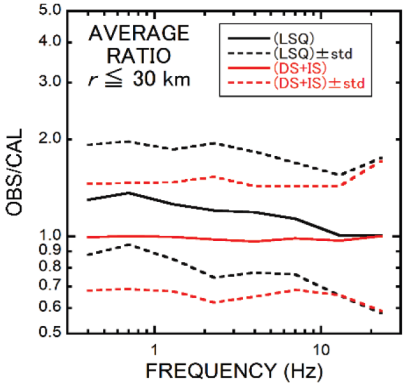


図 6 震源近傍の観測／計算の倍率

© 日本地震学会

近地地震波形に見られるsPL波とPL波の生成・伝播特性：震源深さの即時推定への活用可能性

Characteristics of sPL and PL phase: Applicability to real-time source depth estimation

*大須賀 啓士[1]、古村 孝志[1]
*Keishi OSUGA[1], Takashi Furumura[1]

1. 東京大学地震研究所
1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

1.近地地震波形に見られるsPL とPL相　地殻内または海域のプレート境界で発生する浅発地震において、P波とS波の間に周期数秒～数十秒の、やや長周期の相の発生が顕著に認められる。図１は、2005年11月15日に三陸沖のプレート境界で発生した、深さ14 km、M7.0の地震の、F-net強震観測記録のZ成分のレコードセクションである。震源距離300 km付近においてP波の直後に周期20秒程度の大振幅の相が見られる様子がわかる。この相は、伝播距離とともに震幅が急激に減衰し、震源距離600 km以遠では、より長周期（周期30～50秒）の相に置き換わる様子もわかる。これらの相は、いずれも弱い正分散性を示し、粒子軌跡がPrograde（反時計回り）することから、表面波に分類されるsPL波とPL波と判断できる（図2）。sPLとPL波は、浅い震源から放射されたS波が地表でsP変換し、あるいは震源から放射されたP波が地殻内を多重広角反射しながら伝播する過程で干渉により生成したものと解釈できる。 sPLとPL波は、Leaking modeの波と解釈することができ（Oliver and　Major, 1960）、伝播の過程で地表において強いPS変換を起こすために、エネルギーがマントルにLeakingすることで一般に距離減衰が大きい。しかし、地表下に低速度層（堆積層）が存在すると、PS変換効率が低下するために遠地までP波が保存されるため（Leakingが抑えられるため）、数百km以上にわたって大きな振幅を保つことができる(Furumura & Kennett, 2018)。なお、巨大地震の際に、遠地（震源距離1000 ～10000 km）において上部マントルを広角反射により伝わるP波が同様のメカニズムにより超長周期（100～1000秒）の相を形成するが、これはW-phase(Kanamori, 1993)として知られている。 本研究では、近地地震波形に見られるsPLとPL波を用いて、震源メカニズム、特に震源の深さを早期推定することを目的として、sPLとPL波の生成メカニズムと波形の震源深さ依存性を、観測データ解析と地震波伝播シミュレーションにより検討した。 2. 地震波伝播シミュレーション 近地地震波形に顕著に見られたsPLとPL波の生成と伝播特性を確認するために、３次元差分法（OpenSWPC; Maeda et al., 2017）を用いて地震波伝播シミュレーションを行った。 宮城県沖～東北日本にかけての2300 km ×2300 kmの領域（図1a）を1 kmの格子間隔で離散化し、JIVSM（Koketsu et al., 2012）に基づき堆積層、地殻、マントル、プレート構造を設定した。前述の2005年11月15日の宮城県沖の地震の震源は、GCMT解析結果に基づきパルス幅6秒の三角型の震源時間関数により点震源で近似した。 図３に、地震発生から65秒、75秒、85秒後の北西–南東方向の２次元断面の波動場（赤がP波、緑がS波を表す）を示す。震源から放射されたP波が地殻内において広角反射をしながら先行し、震源から放射されたS波が地表に臨界角で入射して大振幅のsP変換波を生成したものがこれに後続する様子が分かる。地殻を伝わるP波は、伝播とともに地表でPS変換を起こしてマントルへとSエネルギーがleakingするため、P波の減衰が大きい。そして、伝播距離が500 kmを超えるとsPLの振幅は急激に弱まり、先行するPL波に続く長い波群を持つPL波へと置き換わる様子もわかる。PL波はsPLより長い周期30～50秒の卓越周期を持ち、1000 km 以上遠地まで伝播する。 ３．sPLとPL振幅の深さ依存性 表面波の一種であるsPL及びPL相の振幅は、震源の深さに敏感であると考えられる。また、地表でSP変換により生じるsPLは、震源深さを反映したdepth phaseとして震源決定に特に有効であると期待される（Chong et al., 2010; Bao et al., 2013; Kim et al., 2017）。震源の深さとsPL及びPL相の振幅、そしてP～S初動付近の波形変化を見るために、深さの異なる震源に対する地震波形の差分法シミュレーションを行った。震源は、先の地震と同様の45度の逆断層型

© 日本地震学会

の点震源を仮定し、深さ６km～深さ100 km までの震源深さに対する震央距離430 km（図３a）と1080 km（図３b）でのZ成分速度波形について相反定理を用いて計算した。 震源の深さを関数とするレコードセクションを見ると、深さとともにsPLの波形と振幅が大きく変化し、また、深さとともにP～S間の到着時刻が直線的に遅れる（深いほどP～sPL時間が長くなる）ことから、P～S間の波形全体を用いたCMTインバージョンは、震源深さの拘束に有効と期待できる。一方、PL波は、表面波（Rayleigh 波）と同様に震源深さとともに振幅が急激に小さくなるが、その波形変化はsPLほど顕著ではない。しかし、P波直後に到着することや、表面波より振幅が小さく巨大地震でも記録が振り切れにくい特性を活かして、大地震の震源メカニズムの早期推定に活用できると考えられる。近年、W-phaseによる大地震のCMT解析（e.g. Kanamori & Rivera, 2008）を、M6～7クラスの近地地震に適用する研究が進められており（引用）、これらの研究ではここで議論するsPLやPL波を含めた近地地震波形を解析対象としているものと考えられる。

© 日本地震学会

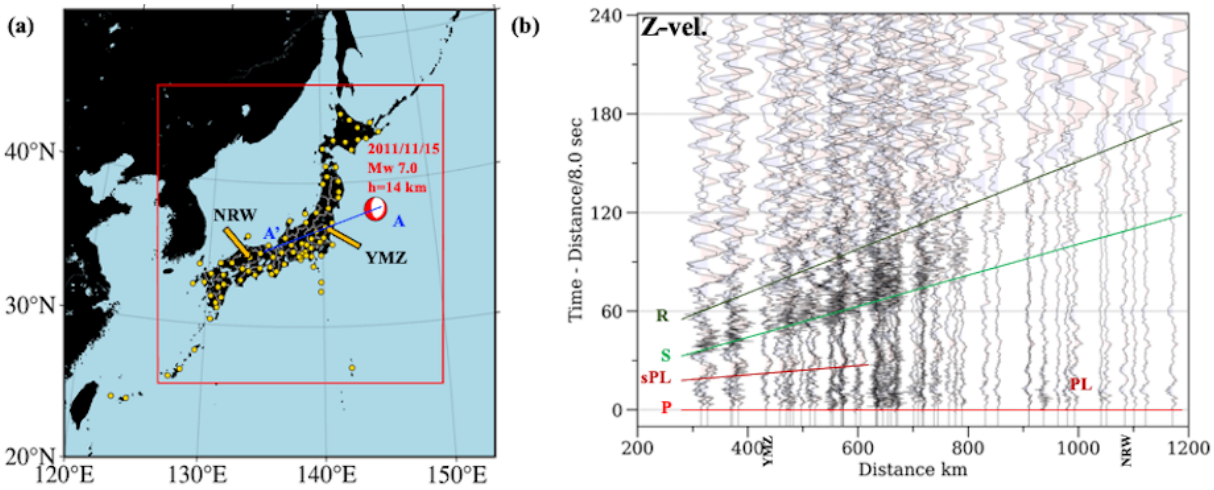


図1 (a) 2005年11月15日に発生した、三陸沖地震(M7.0, 深さ14 km)とF-net観測点、(b) F-netのZ成分のレコードセクション。３次元地震波伝播シミュレーションの範囲とスナップショット断面の側線を表す。

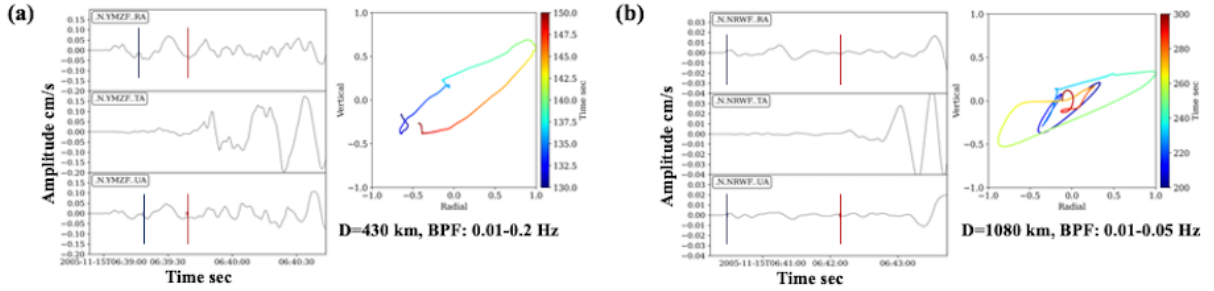


図2 (a) F-net YMZ（八溝）観測点（D=430 km）および、(b) F-net NRW（成羽）観測点（D=1080 km)での３成分速度波形および、sPLとPL波の粒子軌跡。

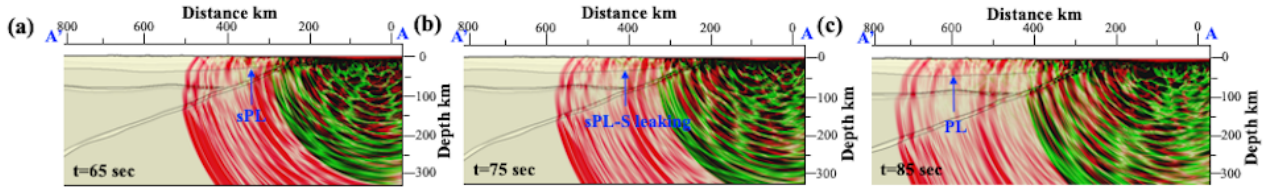


図3 ３次元地震波伝播シミュレーションによる、北西−南東断面（図１a）の地震波伝播のスナップショット(赤はP波、緑はS波動場を表す)。地震発生から65秒、75秒、85秒後。

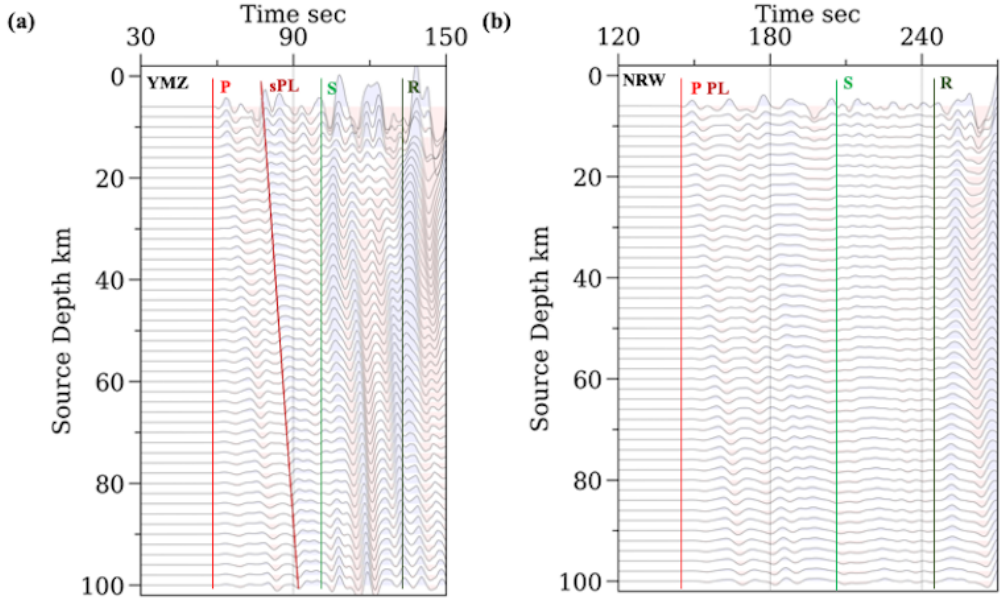


図4 震源の深さとZ成分速度波形。(a) 震源距離D=430 km、(b) D=1080 km。sPL波とPL波の最大振幅、及びS波の最大振幅の深さ変化を右に示す。

© 日本地震学会

地震波逆伝播計算を用いた大地震の断層すべり即時推定の高解像度化

High-Resolution Immediate Fault Slip Estimation of Large Earthquakes Using Seismic Backpropagation

*柴田 勇吾[1]、古村 孝志[1]、前田 拓人[2]
*Yugo SHIBATA[1], Takashi Furumura[1], Takuto Maeda[2]

1. 東京大学地震研究所、2. 弘前大学大学院理工学研究科
1. Earth Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hirosaki University

１．はじめに 我々はこれまで、高密度地震観測データを用いた大地震の震源断層すべりの即時推定に向けて、地震波逆伝播による震源イメージング（Time Reversal Imaging；TRI）手法の利用を数値実験及びKiK-net観測データ用いて検討を進めてきた（柴田・古村・前田、2020；2021）。TRIでは観測点から震源に向けて逆伝播させた波動場が、一旦アスペリティに収束した後に、再び広がる問題（Fink et. al., 2001）があり、特に複数のアスペリティを持つ大地震の断層滑りイメージングにおいて問題となっていた。また、地震波の位相が時間振動するために、震源イメージングの結果も時間振動を伴い移動することもイメージングの解像度を下げる問題があった。 これらの問題に対し、本研究では従来の弾性エネルギーを用いた震源イメージングに対してP波とS波エネルギーの積を用いたイメージング（Artman et. al., 2010）を用いることで、時間解像度を高めることを試みた。また、逆伝播に用いる地震波形のヒルベルト変換を用いた、時間分解能の向上可能性についても理論地震波形を用いた数値実験により検討した。
２．TRIの数値実験 (1) 理論地震波形の計算 数値実験に用いる理論地震波形データを、図１aで与えた断層すべりモデルに基づき、3次元差分法計算により準備した。計算では、中部日本の水平460.8 x 460.8 km、深さ57.6 kmの範囲に、堆積層、地殻、マントル、太平洋／フィリピン海プレートの速度・減衰構造をJIVSM（Koketsu et al., 2012）に基づき設定した。太平洋プレート上面に、120 x 60 km の断層面を設定し、3つのアスペリティを置いた。断層面は3 x 3の小断層に分割し、断層面中央の震源から2.8 km/sの破壊伝播速度で震源時間関数３秒、滑り量2.0 m（背景領域はそれぞれ８秒と0.1 m）に対応する地震波を放射させた。以上のモデルを用いて、領域内の271点のKiK-net、S-net観測点での理論地震波形を用意した（図1b）。(2) 震源断層滑りイメージング TRI計算では、時間を反転した130秒間の理論地震波形をKiK-netとS-net観測点から震源に向けて逆伝播させ、与えた断層すべりモデルの再現を試みた。このとき、地震波形には0.05ー0.2 Hz のバンドパスフイルタをかけ、さらに観測点間の波動場を相関距離10 kmのガウス分布関数で補間して地表の全格子点から逆伝播させることで、スムーズな逆伝播波動場を合成した。震源断層滑りのイメージングは、３成分速度場の振幅から計算した弾性エネルギーの総和と、速度場の発散と回転から求めたPとS波動場のエネルギーの積（PSエネルギー重合）の総和の二つを用いて行い、両者を比較した。図２は、TRI結果から求めた太平洋プレート上面全体の弾性エネルギー総和の時間変化、図3は、TRIは全時間にわたり太平洋プレート上面に集まったエネルギーの分布である。弾性エネルギーを用いたイメージング結果（図２b）は、発震時にアスペリティに収束した地震波が時間を遡ってさらに伝播するためにイメージがぼやけるが、PSエネルギー重合を用いたイメージングでは、観測点から逆伝播したP波とS波が同着する地点と時刻にのみイメージングが行われるためこの問題が解消し、３つのアスペリティの解像度を高めることができた（図2a）。 なお、DATRIにより得られた震源断層滑りイメージングでは、地震波の振幅が時間振動して2π（絶対値を取る場合はπ）の任意性があるために、イメージングの解像度を下げる問題があった。これは、地震波形に狭域のフイルタをかけた場合に特に問題となる。これを解決するために、本研究ではヒルベルト変換（π/2だけ位相をずらした）地震波形についてもイメージングに用い、位相ずれあり／なしの結果の2乗平均平方根（RMS）を取ることで、時間振動の影響を取り除くことができた。この2つの技法の組み合わせにより今後実データでもイメージングを試みる。

© 日本地震学会

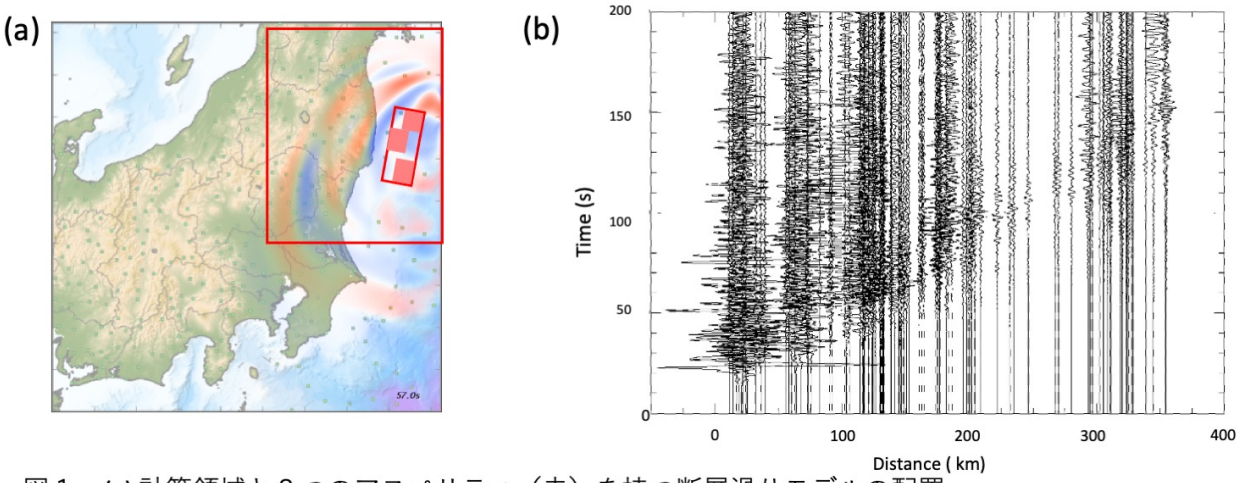


図１　(a) 計算領域と３つのアスペリティ（赤）を持つ断層滑りモデルの配置。
(b) 計算から求められたKiK-net観測点での理論波形（NS成分速度波形）。

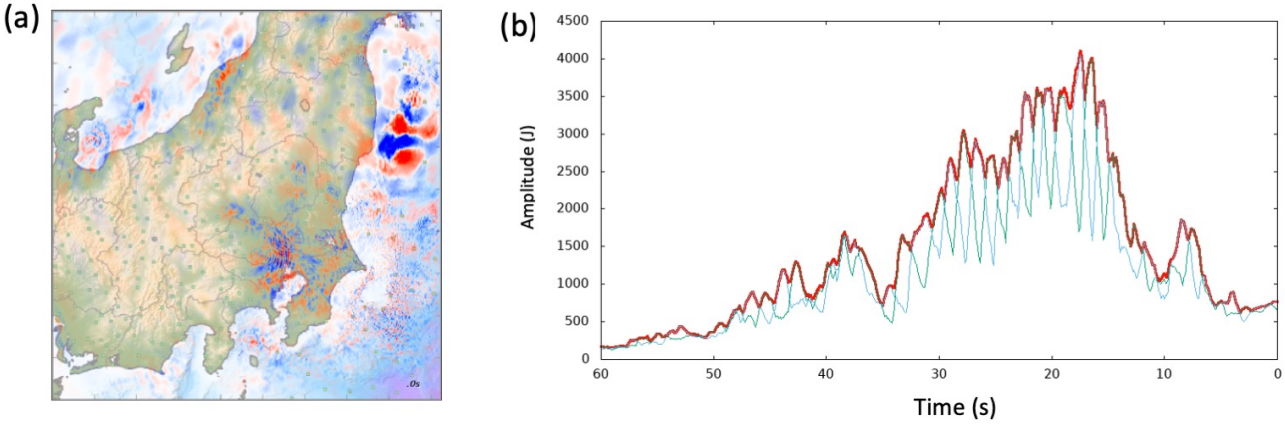


図２ (a) TRI計算における地表の地震波伝播のスナップショット。赤と青はNS, EW方向の揺れの強さを表す。
(b) 太平洋プレート上面の弾性エネルギー最大値の時間変化（青線）、
ヒルベルト変換を行った地震波形の逆伝播に用いた場合（緑線）、二つのRMSをとったもの（赤線）。

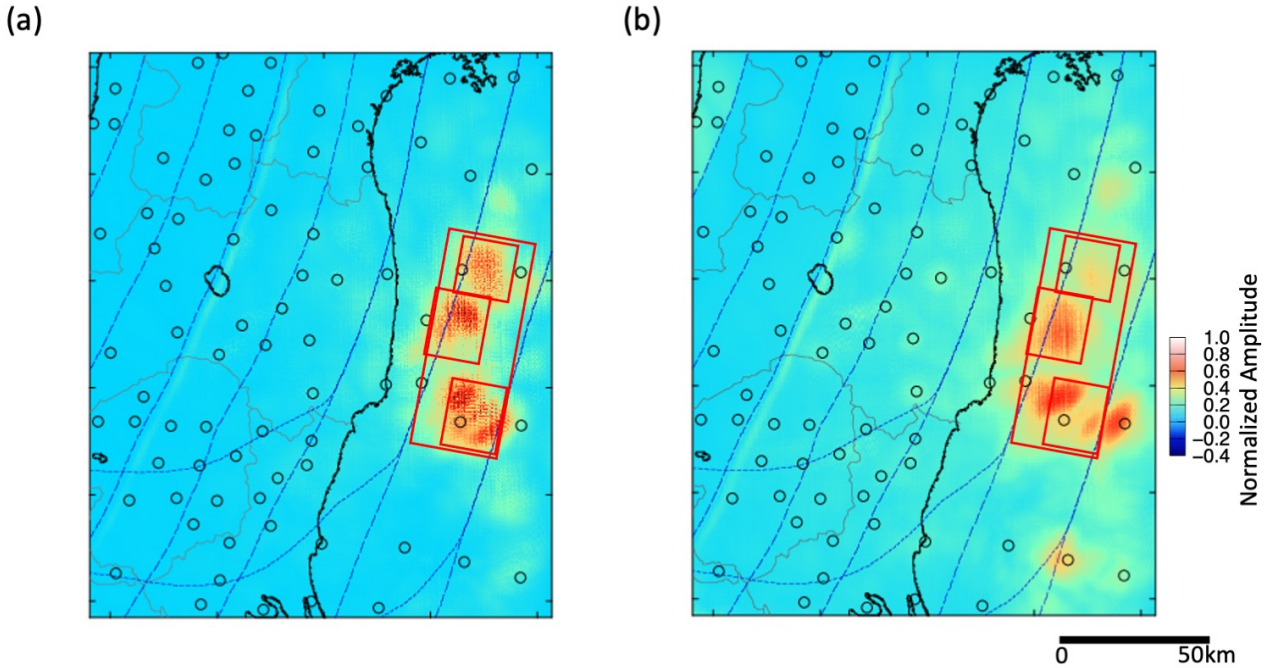


図3 TRI計算により得られた太平洋プレート上面での震源滑りイメージング結果（図1の赤枠の範囲を拡大）。
(a) PSエネルギー重合を用いた場合。(b)弾性エネルギーを用いた場合。
赤枠は、数値実験で与えた断層とアスペリティの位置を表す。白丸はKiK-netとS-net観測点を表す。

© 日本地震学会

A会場 | 一般セッション：S15. 強震動・地震災害

2021年10月14日(木) 13:30 ~ 15:00 | A会場 A会場

PM-1

座長:野津 厚(港湾空港技術研究所)、吉田 昌平(大崎総合研究所)

13:30 ~ 13:45

[S15-06] 1896年陸羽地震における動力学的検討に基づく分岐断層の破壊過程を考慮した運動学的震源モデルによる地震動評価

○熊谷 周治[1]、松川 滉明[2]、三橋 祐太[2]、西條 裕介[2] (1.東北電力株式会社、2.株式会社構造計画研究所)

13:45 ~ 14:00

[S15-07] 1944年東南海地震の木造倒壊率に基づく不均質震源像の推定

○伊藤 恵理[1]、仲野 健一[2]、関口 春子[1]、川瀬 博[1] (1.京都大学　防災研究所、2.安藤・間　技術研究所)

14:00 ~ 14:15

[S15-08] **Estimate of the rupture process of the 2021 off-Fukushima earthquake based on the finite-fault source inversion Inferred from strong motion records**

○吉田 昌平[1]、津田 健一[2]、Chen Ji[3]、Ralph Archuleta[3,4]、佐藤 俊明[1] (1.大崎総合研究所、2.清水建設、3.カリフォルニア大学サンタバーバラ校、4.RJA Ground Motion Analysis, Inc.)

14:15 ~ 14:30

[S15-09] 女川原子力発電所を対象としたSPGAモデルによる強震動シミュレーション

○野津 厚[1] (1.港湾空港技術研究所)

14:30 ~ 14:45

[S15-10] MeSO-net観測記録を用いた東京湾直下M7級スラブ内地震の強震動シミュレーション

○鈴木 亘[1]、木村 武志[1]、久保 久彦[1]、先名 重樹[1] (1.防災科学技術研究所)

14:45 ~ 15:00

[S15-11] 経験的グリーン関数法に用いる要素地震の破壊伝播効果の補正に関する検討

○金田 惇平[1]、田中 信也[1]、久田 嘉章[2] (1.東電設計株式会社、2.工学院大学建築学部　教授)

1896年陸羽地震における動力学的検討に基づく分岐断層の破壊過程を考慮した運動学的震源モデルによる地震動評価

Evaluation of ground motion by kinematic source model considering dynamic rupture process of branch fault for 1896 Rikuu earthquake

*熊谷 周治[1]、松川 滉明[2]、三橋 祐太[2]、西條 裕介[2]
*Shuji KUMAGAI[1], Hiroaki MATSUKAWA[2], Yuta MITSUHASHI[2], Yusuke SAIJO[2]

1. 東北電力株式会社、2. 株式会社構造計画研究所
1. Tohoku Electric Power Co.,Inc., 2. Kozo Keikaku Engineering Inc.

1896年陸羽地震では、東傾斜の主断層とそれに共役な西傾斜の分岐断層（川舟断層）で地表地震断層が認められた（松田・他、1980）(1)。この様に分岐断層が認められる場合、主断層と分岐断層が同時に活動した際の地震動評価は、特に分岐断層近傍を含めた領域の地震動予測を行う上で重要である。しかし、主断層と分岐断層を併せた特性化震源モデルの作成、及び特性化震源モデルを用いた地震動評価はこれまでにあまり行われておらず、モデル化に関する知見も十分に得られていない。

分岐断層のモデル化に必要な情報を得る事を目的とした研究例である熊谷・他(2020) (2)では、主断層と分岐断層を含めた断層運動の評価を動力学的アプローチにより行っている。具体的には、陸羽地震を対象に地表地震断層の変位量（松田・他、1980）を評価できるような2次元FEM解析により動力学モデルを構築し、主断層と分岐断層から放出されるエネルギーの比率や両断層の破壊伝播速度の違い等を評価している。

本研究では、特性化震源モデルの作成で従来行われてきた地震調査研究推進本部による、震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)に基づく手順により作成された特性化震源モデルに、熊谷・他(2020)の動力学的なアプローチによる断層運動の評価結果を加味した運動学的な震源モデルを作成し地震動評価を行うことで、分岐断層のモデル化に資する知見を得ることを試みた。また、住家の全潰率・半潰率に基づき推定された地震動強さ（武村・他, 2010、神田・武村, 2011）(3)，(4)との比較も行った。

まず、「レシピ」を参考に、主断層と分岐断層を対象にスケーリングモデルの考え方に則って、主断層及び分岐断層の運動学的な特性化震源モデル（図1、図2）を作成した。次に、熊谷・他(2020)を参考に、2次元FEM解析結果より得られた分岐断層の破壊過程に関する知見を、運動学的な特性化震源モデルに加味した震源モデルを別途作成した。震源モデルに加味した知見は、具体的には以下の2点である。①分岐断層の破壊伝播速度は主断層よりも遅い ②主断層の破壊が断層上端に到達した後に分岐断層の破壊が開始する。

続いて、「レシピ」に基づいて作成した特性化震源モデルと、2次元FEM解析結果の知見を加味して作成したモデルを用いて、統計的グリーン関数法による面的な地震動評価を行い、武村・他 (2010)、神田・武村 (2011)の震度分布より概算した陸羽地震時の工学的基盤上のPGV分布と比較を行った（図3、図4）。その結果、分岐断層周辺に着目すると、「レシピ」に基づいた特性化震源モデルによる地震動評価結果（図3）は過大評価となったが、2次元FEM解析結果の知見を加味した震源モデルによる地震動評価結果（図4）は分岐断層の破壊伝播速度を遅くさせた影響により地震動強さが小さくなり、PGV分布に近づく傾向となった。なお、主断層近傍では地震動強さに対する分岐断層の寄与は限定的であり、主断層由来の地震動が支配的であった。

本検討では2次元FEM解析結果から得られた分岐断層の破壊過程のうち、破壊伝播速度や破壊開始時刻に着目して運動学的な分岐断層の震源モデルの与条件としたが、分岐断層のモデル化に関する課題として、例えばより詳細な動力学的アプローチを実施し、その解析結果を運動学的な震源モデルの与条件とすることが挙げられる。一方、断層モデル全体の説明性向上に関する課題として、主断層に起因する地震動の再現性向上も必要である。そのために、例えば主断層のアスペリティの配置等の運動学的な特性化震源モデルの検討が挙げられる。また、本検討で用いた住家の全潰率・半潰率に基づき推定された地震動強さ（PGV）は情報として幅を含み、地震動評価結果との比較の際には留意が必要と考えられるため、地震動評価の妥当性確認方法の検討も課

© 日本地震学会

題である。

参考文献：(1)松田時彦・山崎晴雄・中田高・今泉俊文：1896年陸羽地震の地震断層, 地震研究所彙報, 55, 1980.，(2)熊谷周治・広谷浄・三橋祐太・西條裕介：1896年陸羽地震の分岐断層から生じた地震動の評価（動力学的破壊シミュレーションによる予備的検討）, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS15-P20, 2020.，(3)武村雅之・高橋裕幸・津村建四朗：1914（大正3）年秋田仙北地震の被害データと震度分布, 歴史地震, 25, pp.1-27, 2010.，(4)神田克久・武村雅之：震度データによる1914年秋田仙北地震の短周期地震波発生域と地震規模の推定および1896年陸羽地震との比較, 地震, 第2輯, Vol63, pp.207-221, 2011.

© 日本地震学会

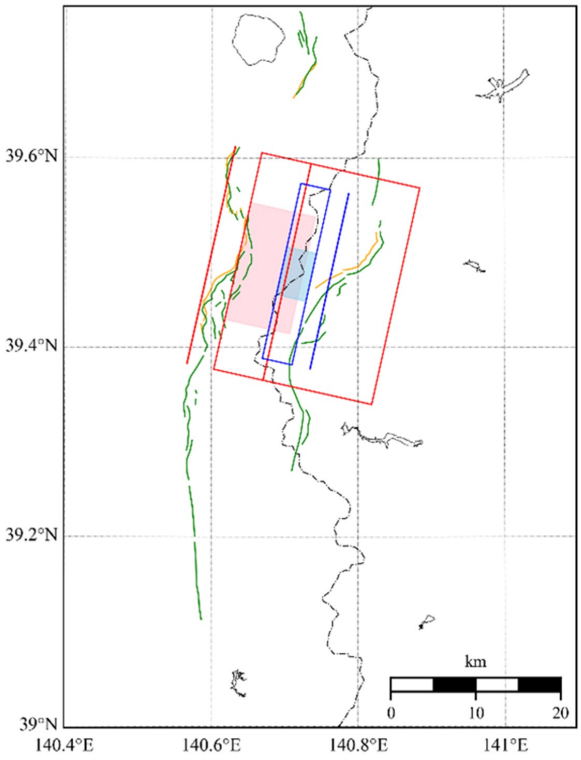


図 1　統計的グリーン関数法による地震動評価に用いた断層モデルの配置
赤線は主断層、ピンク色の領域は主断層のアスペリティ、青線は分岐断層を、水色の領域は分岐断層のアスペリティ

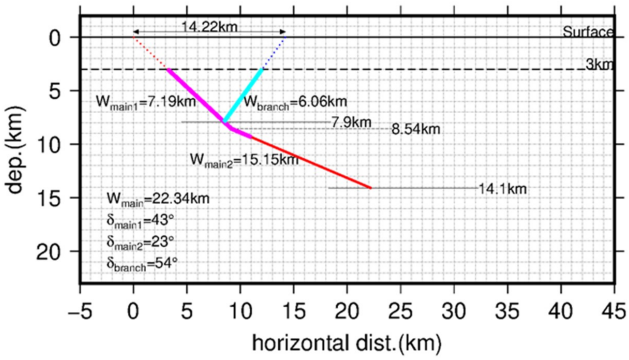


図 2　統計的グリーン関数法による地震動評価に用いた断層モデル断面図
赤線は主断層、ピンク色は主断層のアスペリティ、青線は分岐断層を、水色は分岐断層のアスペリティ

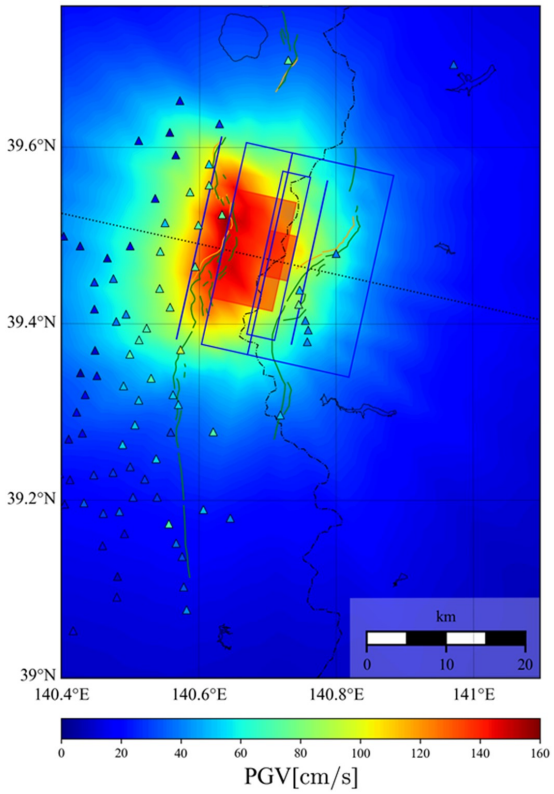


図 3　FEM 解析結果を加味しない特性化震源モデルによる PGV の面的分布図

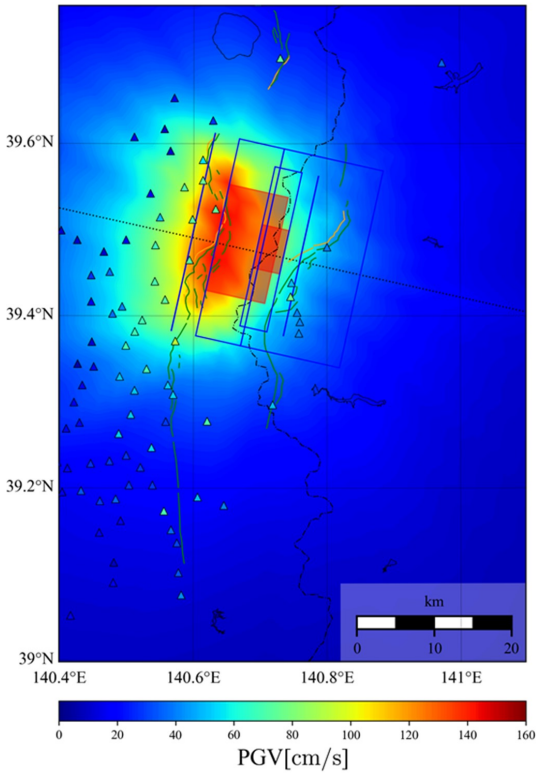


図 4　FEM 解析結果（分岐断層の破壊伝播速度）を加味した特性化震源モデルによる PGV の面的分布図

© 日本地震学会

1944年東南海地震の木造倒壊率に基づく不均質震源像の推定

Complex Source Characterization of the 1944 Tonankai Earthquake from Simulated Collapse Ratios of Wooden Houses

*伊藤 恵理[1]、仲野 健一[2]、関口 春子[1]、川瀬 博[1]
*Eri Ito[1], Kenichi Nakano[2], Haruko Sekiguchi[1], Hiroshi Kawase[1]

1. 京都大学　防災研究所、2. 安藤・間　技術研究所
1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. HAZAMA ANDO CORPORATION

2011年東北地方太平洋沖地震では、それまで十分に解明されてこなかった海溝型地震の震源特性（震源像）に関し、津波の発生に関係する周期20秒以上の長周期地震動生成域と、建物被害に直結する周期２秒以下のやや短周期地震動生成域が棲み分けられているという事実が得られた。今後さらに海溝型巨大地震を理解し、将来発生しうる被害を軽減するためには、基礎情報として過去の地震の詳細な震源破壊過程の物理モデルによる再現が重要である。しかしながら昭和の海溝型巨大地震である1923 年関東地震、1944 年東南海地震、1946 年南海地震に関しては、長周期地震動生成域についてはある程度解明されている一方で、やや短周期地震動生成域に関しては十分に検討されていない。そこで本研究では、1944 年東南海地震を対象に、滑り量・破壊伝播速度に不均質性を付与した震源モデル(不均質震源モデル)と分離手法による統計的グリーン関数による強震動作成手法を確立する。そして、新たに構築した1930年以前の建物被害モデルに強震動を入力して得られる建物被害分布と観測記録に残る被害分布を比較することで1944年東南海地震のSMGAの特徴を抽出する。 まず、内閣府 (2015) に基づくSMGA の配置と、不均質な滑り量・破壊伝播速度を有する震源モデルを標準モデルとして、破壊開始点(3 種類)、強震動生成域(SMGA1～4)の位置(4 種類)、SMGA の応力降下量(3 種類)の異なる合計36 ケースの不均質震源モデルを構築した。その上で、構築した震源モデルと仲野 (2020) の統計的グリーン関数を用いて、武村・虎谷 (2015)に記載されている被害観測地点のうち、建物倒壊率が１％以上の５３地点において強震動を作成した。得られた強震動の最大加速度・最大速度はMorikawa and Fujiwara (2013)の経験式に概ね一致した。 その後、1930年以前の建物被害評価モデルである戦前モデルを、吉田・他(2004)の建物被害予測モデルの各建築年代の耐力比と八木・他(2020)の常時微動結果から得られた各建築年代と固有振動数の関係式に基づき構築した。作成した強震動を入力して対象地点における倒壊率を算出し（計算倒壊率とする）、武村・虎谷(2015)の観測倒壊率と比較した。回帰直線の傾きと決定係数R^2 を両者の一致度の指標としたところ、破壊開始点・４つのSMGAの位置が陸側に深く、応力降下量が大きいケース3-2-3 が、36ケースの中では最も観測事実を説明する震源モデルであることが分かった。しかしながら、ケース3-2-3 では、静岡県東部に広がる倒壊率40%以上の地点では計算倒壊率が過小評価となった。このことを受け、破壊開始点とSMGA の配置は同じで、SMGA1 と2 の面積と応力降下量を変更した不均質震源モデルを5ケース追加し比較した。その結果、SMGA2 の応力降下量のみを60MPa に変更したケース3-2-5 が新たに最も観測事実を説明するモデルとなることが分かった。このケースでは観測倒壊率40%以上の地点での一致度はケース3-2-3 より改善されたが、依然過小評価となった。今回の結果から、40%以上の建物倒壊率を説明するためには、より強力なフォワードディレクティビティを静岡県東部に生じせしめるような震源破壊プロセスを考えていく必要があることが分かった。

© 日本地震学会

Estimate of the rupture process of the 2021 off-Fukushima earthquake based on the finite-fault source inversion Inferred from strong motion records

*吉田 昌平[1]、津田 健一[2]、Chen Ji[3]、Ralph Archuleta[3,4]、佐藤 俊明[1]
*Shohei Yoshida[1], Kenichi Tsuda[2], Chen Ji[3], Ralph Archuleta[3,4], Toshiaki Sato[1]

1. 大崎総合研究所、2. 清水建設、3. カリフォルニア大学サンタバーバラ校、4. RJA Ground Motion Analysis, Inc.
1. Ohsaki Research Institute, Inc. , 2. Shimizu Corporation, 3. University of California, Santa Barbara, 4. RJA Ground Motion Analysis, Inc.

A Mw 7.1 intra-slab earthquake occurred off the coast of the　Fukushima prefecture, northeastern Japan, at 23:07 on 13th February 2021 (JST). This earthquake generated strong shaking (the seismic intensity 6+ and 6- in JMA scale) along the coast of the Fukushima and Miyagi prefecture. In this study, we have estimated the rupture process of this event by the waveform finite-fault inversion method developed by Ji *et al.* (2002).We use three-components strong-motion records at 16 K-NET and KiK-net surface stations in the Fukushima and Miyagi prefecture. To improve the quality of the inversion results, we have introduced an individual 1D velocity structure model for each station in calculating Green’ s functions. First, we have constructed the 1D velocity model for each station. We interpolate the Japan Integrated Velocity Structure Model [JIVSM] (Koketsu *et al.*,2012) for its subsurface, the seismic tomography model of Matsubara *et al.*(2019) for crust, and the PREM (e.g., Shearer, 2018) for mantle. Then, we calibrate these models by forward simulation for the record of a Mw 5 aftershock occurring in March 17, 2021. Consequently, we got good agreements in both arrival time and amplitude for the frequency range between 0.05~0.5Hz. For the inversion of the mainshock, we assumed one fault plane dipping 33 degrees to the east based on the aftershock distribution and F-net focal mechanism (Fukuyama *et al.*, 1998). The fault plane was divided into 2km by 2km sub-faults. We optimized five fault parameters (e.g. slip amplitude, rupture time, rake angle, starting and ending time of an assumed analytical slip-rate functions) for each individual sub-fault by minimizing an objective function defined in wavelet domain using simulated annealing (SA) inversion procedure. Our inverted results shown in the figure suggest that the fault rupture mainly propagated towards to the south-west. The area with large slip was detected on this side. The centroid time of the rupture of this asperity was about 10 sec from rupture initiation. Also, the area with large slip velocity is coincide with the area with large slip.

© 日本地震学会

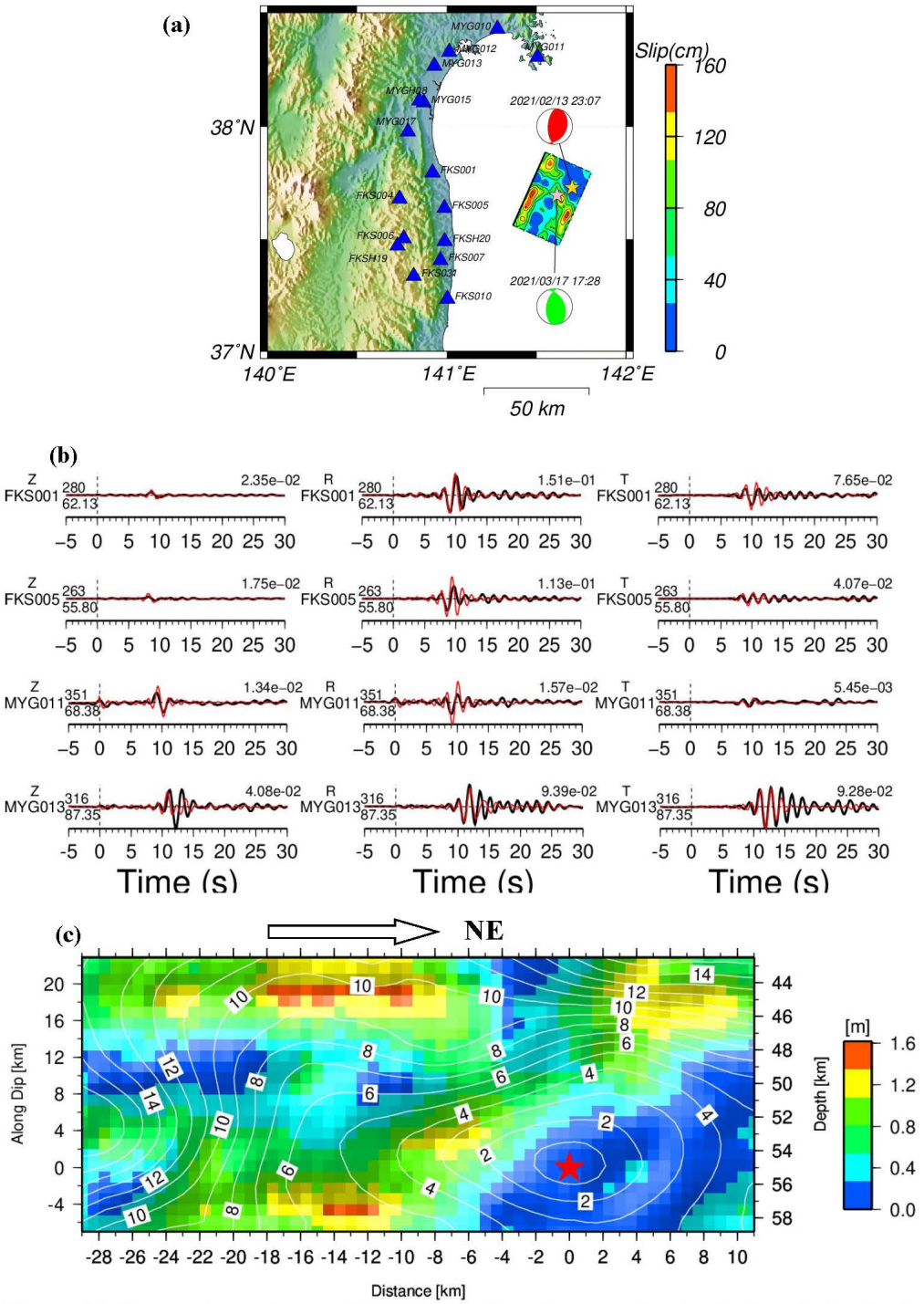


Figure: (a) Observation points used in our analysis, epicenters of main-shock and aftershock, and slip distribution of our inversion result. (b) Comparison of the observations (black line) and theoretical seismograms (red line) of the aftershock. (c) Slip distribution of Our inversion result. The contour lines in (c) denote the rupture time

© 日本地震学会

女川原子力発電所を対象としたSPGAモデルによる強震動シミュレーション

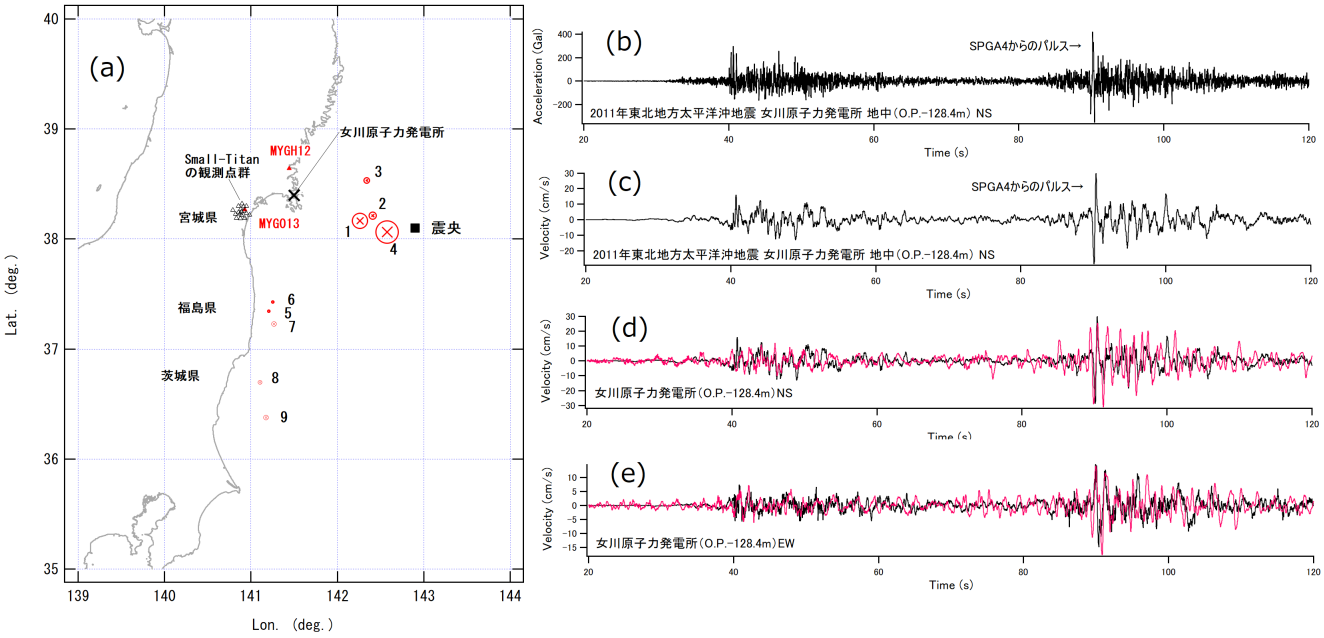
Strong motion simulation with the SPGA model for the Onagawa Nuclear Power Plant

*野津 厚[1]
*Atsushi NOZU[1]

1. 港湾空港技術研究所
1. Port and Airport Research Institute

東北地方太平洋沖地震による強震動の特性としては，継続時間が長かったこと，遠方でも長周期地震動が観測されたことなどが語られることが多いが，仙台市内など震源近傍の多くの地点で周期1-2秒程度のパルス的な地震動が支配的であったことも，東北地方太平洋沖地震の強震動の重要な一側面である．これらのパルスの時定数の短さは，それらが一般にSMGAと呼ばれる一辺が数10km程度の領域ではなく，筆者がSPGAと呼ぶ一辺が数km程度の領域で生成されたことを物語っている（野津，2018，日本地震工学シンポジウム）．このうち最大のパルスは，筆者がSPGA4と呼ぶ領域（図(a)）で生成されたと考えられるが，この領域は仙台市から見て150kmも沖合である．それにも関わらず，仙台市内ではSPGA4に起因するパルスは地盤条件によっては100 cm/s以上あるいは震度7相当となった．すなわち，海溝型巨大地震のSPGAは150km離れた地点に震度7や100 cm/sの地震動を作りだすだけの力があるということであり，この点で内陸地殻内地震のアスペリティとは異なっている．東北地方太平洋沖地震の際，より陸域に近い場所でもSPGAの破壊は見られたが，それらは相対的に弱いものであった．SPGA4のような強いSPGAの破壊が陸域の近傍で生じなかったことは不幸中の幸いであった（野津，2015，科学）． SPGA4に起因するパルス波は女川原子力発電所でも観測されている．図(b)(c)は地中（-128m）でのNS成分（設置方位の補正は行っていない）の加速度波形と速度波形（周期10s以上をカットして周波数領域で積分）を示している．ここでの時間軸の原点は記録開始時刻で，記録開始の約90秒後にSPGA4からのパルスが到来し，そのときに加速度波形，速度波形とも最大値を示している．すなわち，SPGA4の破壊が女川原子力発電所に基準地震動を超える地震動をもたらしたと言える． 筆者は，東北地方太平洋沖地震によるパルスを含む強震動を精度良く再現できる震源モデルとしてSPGAモデルを提案しているが（野津他，2012），同モデルによる女川原子力発電所での地震動の再現性については確認していなかったので，確認を行った．地震動の計算には修正経験的グリーン関数法（https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/tutorial_jpn/tutorial_049.pdf）を用いた．経験的サイト増幅特性は，女川原子力発電所地中（-128m）とK-NET北上における中小地震記録のスペクトル比と，K-NET北上における既存の経験的サイト増幅特性（野津・長尾，2005）をもとに算定した．位相特性としては2011年3月10日3:45の地震の記録を用いた．結果を図(d)(e)に示す（周期10s以上をカットして周波数領域で積分した速度波形，赤が計算結果）．約90秒付近のパルスの振幅・周期をはじめとして波形全体が比較的良好に再現されている．したがって東北地方太平洋沖地震によるパルスを含む強震動を精度良く再現するための震源モデルとしてのSPGAモデルの有効性が改めて確認できた． 謝　辞 東北電力および防災科学技術研究所が取得した強震記録を利用しました．ここに記して謝意を表します．

© 日本地震学会


(a)
Small-Titan
の観測点群
MYGH12
MYG013
女川原子力発電所
震央
宮城県
福島県
茨城県
1
2
3
4
5
6
7
8
9
Lat. (deg.)
Lon. (deg.)
(b)
SPGA4からのパルス→
2011年東北地方太平洋沖地震 女川原子力発電所 地中(O.P.-128.4m) NS
Acceleration (Gal)
Time (s)
(c)
SPGA4からのパルス→
2011年東北地方太平洋沖地震 女川原子力発電所 地中(O.P.-128.4m) NS
Velocity (cm/s)
Time (s)
(d)
女川原子力発電所(O.P.-128.4m)NS
Velocity (cm/s)
(e)
女川原子力発電所(O.P.-128.4m)EW
Velocity (cm/s)
Time (s)

© 日本地震学会

MeSO-net観測記録を用いた東京湾直下M7級スラブ内地震の強震動シミュレーション

Strong motion simulation of a hypothetical M7-class intraslab earthquake in the Tokyo Bay region using MeSO-net observation data

*鈴木 亘[1]、木村 武志[1]、久保 久彦[1]、先名 重樹[1]
*Wataru SUZUKI[1], Takeshi KIMURA[1], Hisahiko KUBO[1], Shigeki SENNA[1]

1. 防災科学技術研究所
1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

首都圏に被害をもたらし、かつ発生頻度の高い地震として、関東直下のM7級の地震が懸念されている。中央防災会議（2004）ではそのようなM7級地震として「東京湾北部地震」や「多摩地震」といったフィリピン海プレート上面で発生するプレート間地震を想定していた。その後、中央防災会議（2013）は「東京湾北部地震」や「多摩地震」を想定していたプレート境界域では1923年関東地震により応力解放されていて、フィリピン海プレート内部の地震の方が蓋然性が高いとして、想定する地震のタイプをスラブ内地震に変更している。全国を均質にカバーする強震観測網K-NET及びKiK-netが構築されて以降、トリガによる強震記録の得られた東京湾を震央とする地震はいくつか発生している。2015年9月12日にはM_{JMA}5.2、深さ57 kmの地震が発生し、南関東地域を中心に加速度計が展開されているMeSO-net（首都圏地震観測網）により高密度の強震動データが得られている。F-netメカニズム解によればこの地震は北西ー南東方向に伸張軸をもつ正断層型であり、震源深さを考慮するとフィリピン海プレート内のスラブ内地震と考えられる。この地震の近傍、震源間の距離10 km未満で、2004年8月25日に同様のメカニズム解を持つM_{JMA}4.4の地震が発生している。フィリピン海プレート内部に正断層構造が発達している可能性が示唆され、この震源メカニズムによる大規模地震を想定することは防災対策上必要と考えられる。本研究では関東直下の複雑な地下構造の影響やスラブ内地震特有の震源特性を適切に取り込んだ強震動評価を図るため、MeSO-net観測記録を用いた経験的グリーン関数（EGF）法による強震動シミュレーションを実施した。
2015年の地震の強震記録をEGFに用いるため、始めにその断層サイズとライズタイムを仮定する必要がある。鈴木・他（2021、連合大会）ではスケーリング則に基づきそれらのパラメータを仮定したが、本研究では2004年の地震の強震記録のEGFシミュレーションから、2015年の強震記録を再現するパラメータをグリッドサーチにより推定した。2004年にはMeSO-netが構築されていないため、K-NET及びKiK-netの強震記録を用いた。推定された断層サイズは1.0 km×1.8 km、ライズタイムは0.04秒であり、断層サイズはスラブ内地震のスケーリング則（岩田・浅野、2010）を外挿して想定される大きさ（7.5 km^2程度）と比べて有意に小さかった。
続くM7級スラブ内地震の強震動シミュレーションについては中央防災会議（2013）が設定した強震動生成領域のサイズ（150 km^2）と応力降下量（62 MPa）を参考に強震動生成領域を設定した。EGFの足し合わせ個数は強震動生成領域と2015年の地震のサイズの比より決定し、EGFの振幅の増幅倍率（応力降下量比）は強震動生成領域の地震モーメントと振幅を調整せずにEGFを足し合わせた場合の地震モーメントの比より決定した。始めの2015年の強震記録の再現も含め、Irikura （1986）によるEGF法を用いた。2015年の地震の南北走向と東西走向の2つの節面それぞれについて強震動シミュレーションを行い、それぞれ北方向と西方向に、断層の深部から浅部に向けて破壊が伝播すると仮定した。MeSO-netでは地震計が地中20 mに設置されており、強震動評価のためには地表相当に変換する必要がある。本研究ではMeSO-net観測点の地表における臨時観測により地表と地中で同時に観測した地震記録から推定した震度増分を用いて、地表相当の計測震度分布を推定した。
MeSO-net観測点におけるシミュレーション結果では地中20 mにおいても1,000 galを超えるような最大加速

© 日本地震学会

度が得られた。東京都西部から神奈川県北部や埼玉県南部にかけての地域や東京都の東部から埼玉県南部の地域に最大加速度の大きい領域が広がる様子が見られる。東西走向の断層モデルでは特に東京都西部の最大加速度が大きい領域が広くなり、地下構造特性に加えて破壊伝播の効果が影響したと考えられる。加速度応答スペクトルを見ると、周期0.2～0.3秒にピークを持つ観測点が多いが、1秒前後にピークを持つ観測点や0.2～0.3秒と1秒前後の2つのピークを持つ観測点も散見される。また、地表相当の計測震度分布では震度7となる点もみられ、南北走向の断層モデルでは千葉県や茨城県でも大きな計測震度が推定された。このように稠密なMeSO-netの観測記録を用いたEGFシミュレーションにより、想定される東京湾直下地震の地震動の様々な特性を面的に評価することができた。

© 日本地震学会

経験的グリーン関数法に用いる要素地震の破壊伝播効果の補正に関する検討

Study on correction of the rupture propagation effect of elemental earthquakes used in the empirical Green's function method.

*金田 惇平[1]、田中 信也[1]、久田 嘉章[2]
*Junpei KANEDA[1], Shinya TANAKA[1], Yoshiaki HISADA[2]

1. 東電設計株式会社、2. 工学院大学建築学部　教授
1. Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., 2. Prof.,Kogakuin Univ.

1.　はじめに

経験的グリーン関数法（以下，EGF）は過去に発生した地震の観測記録の再現に関しては実績もあり広く用いられている地震動評価手法の一つである。しかしながら，要素地震に含まれる破壊伝播効果の影響や補正等については十分な検討が行われていないと考えられる。金田・他（2020，地震学会秋季大会）では2004年新潟県中越地震の余震（2004.10.27.10:40，Mw5.9）について破壊伝播効果の影響がある程度大きいことを確認したうえで，本震（2004.10.23.17:56，Mw6.6）の要素地震として用いた波形合成を行った。その結果、1Hz周辺で本震の観測記録に対して要素地震の破壊が近づく地点では過大評価，破壊が遠ざかる地点では過小評価する傾向を示した。これは本震と要素地震の破壊伝播特性が異なることが要因と考えられる。

本稿では本震と異なる破壊伝播特性の地震を要素地震として用いる場合を想定し、要素地震に含まれる破壊伝播効果の補正を行う。なお、対象周波数は工学的に重要とされる1Hz程度とする。

2.　検討方法

本検討ではHikima and Koketsu（2005）による2004年新潟県中越地震の本震と余震に加え、一回り規模の小さい小地震（2004.10.27.17:15，Mw3.7）を用いる。初めに，観測記録を用いて小地震に対する本震，余震のフーリエ振幅スペクトル比から震源からの方位に依存する破壊伝播特性の違いを整理する。最後に，要素地震に含まれる破壊伝播効果の補正とEGFを用いた波形合成による本震の観測記録の再現解析を行う。

3.　検討結果

3.1　本震と余震の破壊伝播特性の違い

本震と余震の破壊伝播特性について整理する。検討に用いる地震と観測地点を図1，表1に示す。小地震と震源位置・発震機構が近い場合，フーリエ振幅スペクトル比を算出することで伝播特性・サイト特性・震源放射特性が除去されると仮定すると，観測点間の違いは震源破壊過程による破壊伝播効果の影響として現れると考えられる。破壊伝播効果による方位依存性の評価には理論震源スペクトル比（本震，余震及び小地震をω^{-2}モデルに基づく理論的な震源スペクトルでモデル化した時の小地震に対する比率）と観測スペクトル比（観測記録における小地震に対する比率）との比を算出し，0.5Hz～2.0Hzの幾何平均をディレクティビティ係数として評価する。本震と余震のディレクティビティ係数の分布を図2に示す。本震は北東側と南西側で振幅が大きくなるのに対して，余震では南西側で振幅が大きく，破壊伝播特性が異なることがわかる。また，図には小山（1987）による理論的な短周期の方位依存性を併せて示しており，2地震ともに理論的な方位依存性と整合していることが確認できる。なお，図中の数値は小山（1987）による方位依存性の算出に用いた方位角である。

3.2　要素地震の破壊伝播効果の補正検討

余震を要素地震として用いたときの破壊伝播効果の補正を試みる。要素地震の補正方法とEGFによる波形合成

© 日本地震学会

結果を図3に示す。図3(a)はHikima and Koketsu(2005)の震源逆解析結果に基づく特性化震源モデル（SMGAのみを考慮する）で，要素地震の規模が大きいため要素断層は一辺4kmに再分割している。また，図3(b)は震源逆解析結果に基づいて設定した余震の特性化震源モデルであり，小地震を要素地震としたEGFで観測記録の再現解析を行い震源モデルの妥当性を確認している。ここで、EGFにおいて余震は要素断層に対してすべり方向の重ね合わせ数を1とすると、要素断層と余震が1対1で対応するため，本震のSMGAの要素断層内の破壊過程は図3(c)で表わせる。図より要素断層の主要なすべりの破壊方向は南西側であることがわかる。一方，本震の本来の破壊過程が破壊開始点から同心円状に広がるとすると図3(d)に示すようバイラテラル破壊となり，図3(c)とは乖離する。

本検討では要素断層内の破壊過程を図3(d)の破壊形状へ補正する。図3(e)に補正のイメージを示す。初めに図3(c)の震源逆解析結果に基づく破壊開始点（基本ケース）を設定し，余震を対象としたEGF（小地震を要素地震とする）を行う。次に破壊開始点を図3(d)の仮想破壊開始点とし，余震を対象としたEGFを行う。これらの波形合成結果のフーリエスペクトル比を算出し補正係数とする。この補正係数を余震の観測記録のフーリエスペクトルに乗じることで位相と振幅を補正する。この作業を全ての要素断層（sub_Fault_No1～5）で行った後，波形合成を行う。

余震において破壊が近づく地点のNIGH19と遠ざかる地点のNIGH08における波形合成結果（速度波形、観測記録とのフーリエ振幅スペクトル比）を図3(f)に示す。なお，補正係数の高周波数側にノイズが含まれていたため、速度波形は6Hz以下を示す。図には比較のため要素地震波の補正を行っていない場合も併せて示している。速度波形では両者とも観測記録の位相はおおむね再現できていることがわかる。次に観測記録とのフーリエ振幅スペクトル比では補正を行うことで2地点ともに1Hz周辺の残差が1に近づいていることが分かる。一方、より低周波数帯では過小評価、過大評価の傾向があり，今後の課題である。

謝辞
防災科学技術研究所による地震記録を使用させていただきました。図の作成にあたっては国土地理院の地理院地図とGMTを使用しました。ここに記して、お礼を申し上げます。

© 日本地震学会

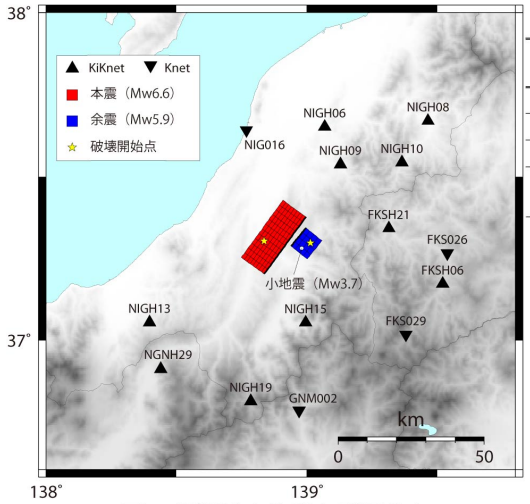


図 1 観測地点位置と震源分布

表 1 地震諸元

Name	date	Mw	Dep※1 [km]	M_0※1 [dyne・cm]	σ_{spec}※2 [MPa]	σ_{grid}※3 [MPa]	fc [Hz]	発震機構※1
本震	2004.10.23.17:56	6.6	5	7.53×10^{25}	-	9.4	0.18	
余震	2004.10.27.10:40	5.9	11	6.34×10^{24}	12.5	-	0.45	
小地震	2004.10.27.17:15	3.7	11	4.50×10^{21}	3.2	-	3.20	

※1：F-net より設定.
※2：田中（2016）に小地震を追加したデータセットを用いたスペクトルインバージョン解析より推定.
※3：小地震との観測スペクトル比と理論スペクトル比の対応が良い値を推定.

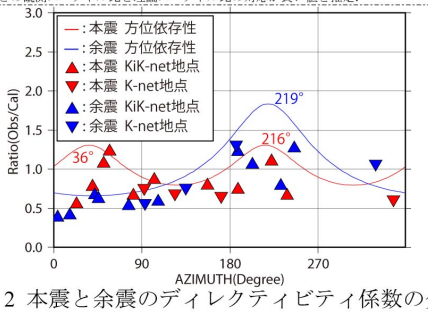
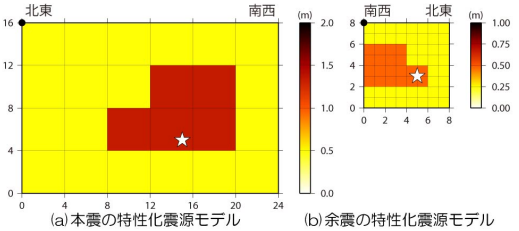
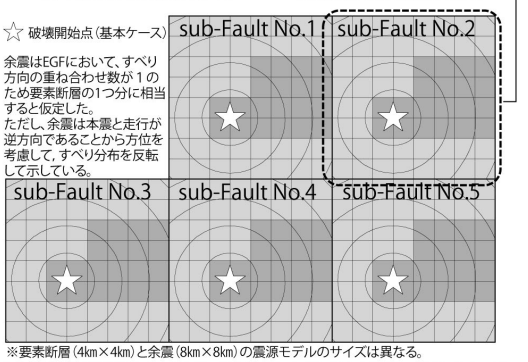


図 2 本震と余震のディレクティビティ係数の分布



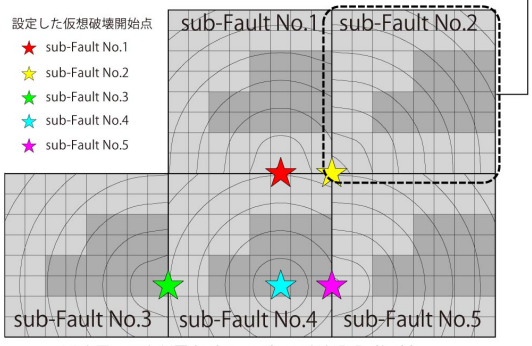
(a)本震の特性化震源モデル

(b)余震の特性化震源モデル

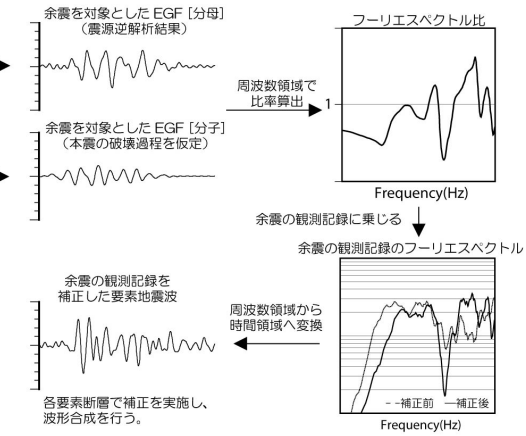


※要素断層（4km×4km）と余震（8km×8km）の震源モデルのサイズは異なる。

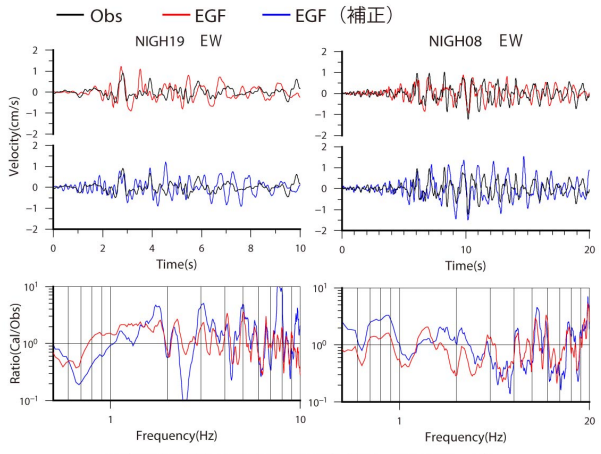
(c)余震を要素地震として本震（SMAG）に当てはめた時の破壊イメージ



(d)本震の要素断層内（SMGA）の破壊過程（仮定）



(e)要素地震に含まれる破壊伝播効果の補正イメージ



(f)波形合成結果と観測記録の比較（6Hz 以上をカット）

図 3 要素地震の補正と EGF による波形合成結果

© 日本地震学会

B会場 | 特別セッション：S23. ベイズ統計学による地震データの解析と数理モデリングの深化

2021年10月14日(木) 9:00 ~ 10:30 | B会場 B会場

AM-1

座長:加藤 愛太郎(東京大学地震研究所)、長尾 大道(東京大学地震研究所)

9:00 ~ 9:15

[S23-01] 豊後水道長期的スロースリップにおけるすべり分布のベイズマルチモデル推定：先験的拘束条件の推定結果に対する影響

○縣 亮一郎[1]、中田 令子[2]、笠原 天人[3]、八木 勇治[4]、瀬下 幸成[5]、吉岡 祥一[5]、飯沼 卓史[1] (1.海洋研究開発機構、2.東北大学大学院理学研究科、3.所属なし、4.筑波大学大学院 生命環境系、5.神戸大学大学院理学研究科)

9:15 ~ 9:30

[S23-02] シンプレクティックアジョイント法に基づく超高精度不確実性定量化法と地震学への応用

○伊藤 伸一[1] (1.東京大学地震研究所)

9:30 ~ 9:45

[S23-03] ハミルトニアンモンテカルロ法を活用した断層モデル推定とメトロポリス・ヘイスティング法との比較

○山田 太介[1]、太田 雄策[1]、大野 圭太郎[2] (1.東北大学大学院理学研究科附属 地震・噴火予知研究観測センター、2.国土交通省国土地理院)

9:45 ~ 10:00

[S23-04] 構造正則化を応用した地震波トモグラフィ法による速度不連続面の検出

○倉田 澄人[1]、山中 遥太[1]、矢野 恵佑[2]、駒木 文保[1]、椎名 高裕[3]、加藤 愛太郎[1] (1.東京大、2.統計数理研究所、3.産業技術総合研究所)

10:00 ~ 10:15

[S23-05] 相互情報量と相関係数の積を用いたマッチドフィルタ法による深部低周波地震の検出

○栗原 亮[1]、加藤 愛太郎[1]、倉田 澄人[2]、長尾 大道[1,2] (1.東京大学地震研究所、2.東京大学大学院情報理工学研究科)

10:15 ~ 10:30

[S23-06] l_1トレンドフィルタリングによる西南日本GNSSアレイからの短期スロースリップ現象の検出

○矢野 恵佑[1]、加納 将行[2] (1.統計数理研究所、2.東北大学)

豊後水道長期的スロースリップにおけるすべり分布のベイズマルチモデル推定：先験的拘束条件の推定結果に対する影響

A Bayesian multi-model inference for slip distribution in slow slip events beneath the Bungo Channel: the effect of prior constraints

*縣 亮一郎[1]、中田 令子[2]、笠原 天人[3]、八木 勇治[4]、瀬下 幸成[5]、吉岡 祥一[5]、飯沼 卓史[1]
*Ryoichiro AGATA[1], Ryoko Nakata[2], Amato Kasahara[3], Yuji Yagi[4], Yukinari Seshimo[5], Shoichi Yoshioka[5], Takeshi Iinuma[1]

1. 海洋研究開発機構、2. 東北大学大学院理学研究科、3. 所属なし、4. 筑波大学大学院 生命環境系、5. 神戸大学大学院理学研究科
1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Independent researcher, 4. Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 5. Graduate School of Science, Kobe University

地震波形・測地データを用いた断層すべり分布推定においては、1. 断層面形状と弾性構造よりなる地下構造のモデルを一つ設定し、2. 設定した地下構造モデルに基づきデータからのすべり分布のインバージョンを行う、という二つの段階からなる推定方法が一般的である。この方法は、すべり分布推定を単純な線形逆問題として定式化することを可能とするため、広く用いられている。しかし、地下構造に関して不確実な情報しかない状況下で、すべり分布推定の前に他の地下構造モデルを選択する可能性を捨ててしまうことは、その不確実性に起因するモデルによる予測誤差の大きさを過小評価することになり、推定におけるオーバーフィットを招く一因となる。
本研究では、モデルの不確実性に起因する予測誤差を適切に取り扱うために、事前確率分布関数で特徴付けられる地下構造モデルの多数の候補を保持して、すべり分布のフルベイズ推定を行う手法について検討する。この手法の基本的な考え方は、Agata et al. （2021, GJI）によって示されたものであり、モデル予測誤差の統計的性質をデータ誤差共分散行列の共分散成分により表現したYagi & Fukahata (2011, GJI)やDuputel et al. (2014, GJI)などによる手法を、モデル予測誤差のガウス性を仮定しない形に拡張したものと捉えることができる。また、多数のモデル候補をベイズ推定の枠組みの中で同時に考慮するという意味で、ベイズマルチモデル推定あるいはベイズモデル平均化（例えばRaftery et al., 1997）の一種と考えることもできる。そのため、本稿では本手法をBMMSE（Bayesian Multi-model slip estimation：ベイズマルチモデルすべり推定）と呼ぶ。Agata et al. （2021, GJI）では、BMMSEの簡単な数値実験への適用のみが示された。本研究では、BMMSEを豊後水道の地下で2010年と2018年頃に発生した長期的スロースリップイベント（L-SSE）の観測変位データ（Seshimo & Yoshioka, 2021, JpGU）に適用し、すべり分布を推定する。その際、BMMSEをすべり推定に導入することによる2つの利点に着目する。第一に、BMMSEを用いてモデルの不確実性に起因する予測誤差の確率的特性を精度よく考慮したフルベイズ推定を行うことは、すべり分布の滑らかさなどに対する強い先験的拘束を含めないすべり推定をより容易にするという点、第二に、L-SSEのように同じ場所で繰り返し発生するイベントのすべり分布推定において、地下構造を特徴づける事前確率分布関数をイベントごとに逐次更新することができる、という点である。
提案した手法を用いて得られた結果は、すべりがプレート境界面のdip方向にかなり狭い範囲で分布していることを示唆するものであった。すべり分布の推定結果から計算したイベント前後でのクーロン破壊応力変化量の空間分布を、L-SSEの期間中に発生したdown dip側の深部低周波微動の分布と比較したところ、すべり分布の滑らかさによる先験的拘束に基づいた結果と比べ、よりよく一致していた。このことは、L-SSEと周辺地域において同期して発生したスロー地震との力学的な関係をより明確に示している。このように、得られたすべり分布と他のイベントとの関係を議論する上で、物理的な根拠のはっきりしない拘束条件を導入せずにすべり分布を推定することがより効果的であることが示唆される。また、2010年のイベントに対する推定で更新さ

© 日本地震学会

れた地下構造を特徴づける事前確率分布関数を、2018年のイベントを解析する際の入力として使用したところ、2018年のイベントを独立に解析した場合よりもWBIC（Widely Applicable Bayesian Information Criterion (Watanabe 2013, JMLR): 負の対数周辺尤度の近似値）がより小さくなり、より適切なベイズモデルが推定されていることが示された。このことから、事前確率分布関数をイベントごとに逐次更新することで、より適切なベイズ推論によるすべり分布推定が行えることが示された。

© 日本地震学会

シンプレクティックアジョイント法に基づく超高精度不確実性定量化法と地震学への応用

Symplectic-adjoint-based exact uncertainty quantification method and its applications to seismology

*伊藤 伸一[1]
*Shin-ichi ITO[1]

1. 東京大学地震研究所
1. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo

説明変数が何らかの微分方程式で拘束されている目的関数の微分計算は、ニューラルネットワーク・４次元変分法データ同化など、大規模な固体地球科学の問題を解析するための統計関連手法において必須の技術である。特にそのような目的関数の２階微分行列であるヘッセ行列は、その逆行列要素が推定量の不確実性の評価に直結するため重要であるが、計算コストが大きいため、大規模系に対してもヘッセ行列を高速かつ高精度に計算する枠組みが希求されている。これまでに我々は、ヘッセ行列およびその逆行列要素の高速・高精度計算を目的として、４次元変分法データ同化で用いられる 2nd-order adjoint (SOA) 法に基づくアルゴリズム開発およびその応用研究を推進してきた[1]。SOA 法で利用される SOA モデルは一般に常微分方程式の形式で与えられ、ヘッセ行列評価には SOA モデルの数値積分が必要になるが、その数値積分法の選び方によっては必要なメモリが増大するだけでなく、ヘッセ行列の計算精度が著しく低下し、それに基づいて計算される不確実性などの結果が信頼できないものになる可能性があるなどの問題があった。そこで本研究で我々はSOA法に内在するシンプレクティック性に着目することで、必要なメモリを最低限に抑え、さらにヘッセ行列の数値誤差を計算機誤差まで抑えることを可能にする SOA モデルの最適な数値積分法の選択法を提案した[2]。この方法では SOA 法に登場する微分方程式群に存在する保存量を離散化後も保存するような数値積分法を構築することで高精度なヘッセ行列計算を可能にしている。簡単な波動方程式を用いたデータ同化問題を通じて本手法を検証したところ、本手法から提案される数値積分法は従来用いられてきた数値積分法に比べて、ヘッセ行列に含まれる数値誤差を劇的に抑えることが確認できた。講演では、本手法の大規模地震シミュレーションモデルへの適用した結果[3]も紹介する。

[1] S. Ito, H. Nagao, A. Yamanaka, Y. Tsukada, T. Koyama, M. Kano and J. Inoue, Physical Review E 94, 043307, 2016.
[2] S. Ito, T. Matsuda, and Y. Miyatake, BIT Numerical Mathematics, 61, 503—522, 2021.
[3] S. Ito, M. Kano, and H. Nagao, in preparation.

© 日本地震学会

ハミルトニアンモンテカルロ法を活用した断層モデル推定とメトロポリス・ヘイスティング法との比較

Coseismic fault model estimation using the Hamiltonian Monte Carlo method and its comparison with the Metropolis-Hastings method

*山田 太介[1]、太田 雄策[1]、大野 圭太郎[2]
*Taisuke Yamada[1], Yusaku Ohta[1], Keitaro Ohno[2]

1. 東北大学大学院理学研究科附属 地震・噴火予知研究観測センター、2. 国土交通省国土地理院
1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Geospatial Information Authority of Japan

限られた観測データから推定される断層モデルの推定不確実性を定量把握することは、得られた結果を解釈する上できわめて重要である。Ohno et al. (EPS, 2021)は、リアルタイムGNSSから矩形断層モデルを、その推定誤差とともに即時推定する手法をマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC法)に基づいて開発した。同手法ではMCMC法の代表的な手法の一つであるメトロポリス・ヘイスティング法 (M-H法) を採用している。しかしM-H法では約20～30%の採択率が理想とされ、結果として長いマルコフ連鎖が必要となる。すなわち、高次元の問題について非常に長い混合時間が必要であり、より効率的な探索手法の活用が必要とされている。そのような課題を克服するため、本発表では、ハミルトニアンモンテカルロ法 (HMC法) にもとづく断層モデル推定手法を開発した。

HMC法はMCMC法の一種であり、目標となる事後分布の微分 (勾配) を利用した効率的な遷移を行う。具体的にはleapfrog法による数値積分を用いたハミルトン力学のシミュレーションを行うことで、詳細釣り合いを満足した高速な混合を実現する。leapfrog法ではハイパーパラメータとしてステップサイズeとステップ数Lを事前に仮定する必要がある。それらについて、Lに関してはNo-U-Turn Sampler (NUTS) を用いることで最適化を行い、eに関しては試行錯誤的に10^{-3}と仮定した。

本研究では、Okada (1992) による単一矩形断層モデルの断層パラメータを未知数とした。各未知パラメータについてステップサイズを最適化するため、緯度と経度を除くすべての未知パラメーターにlogもしくはlogit変換による変数変換を適用した。開発した手法を2016年熊本地震に適用した結果、burn-inの1000連鎖を含む20000連鎖程度で収束が確認された。また，推定結果は先行研究と極めてよく一致した。また本研究ではM-H法によるサンプリングと比較して議論を行った。その結果、HMC法を用いることで， M-H法の5%程度の連鎖数で十分な精度の事後確率分布を推定可能であることが明らかになった。これより、連鎖数の観点からHMC法はM-H法に対して優位性があり、より長い連鎖数を必要とする高次元の問題や1連鎖の計算コストが大きい問題において効率の良い推定が可能であると考えられる。

© 日本地震学会

構造正則化を応用した地震波トモグラフィ法による速度不連続面の検出

An earthquake tomography method for detecting of velocity discontinuities via structured regularization

*倉田 澄人[1]、山中 遥太[1]、矢野 恵佑[2]、駒木 文保[1]、椎名 高裕[3]、加藤 愛太郎[1]
*Sumito Kurata[1], Yohta Yamanaka[1], Keisuke Yano[2], Fumiyasu Komaki[1], Takahiro Shiina[3], Aitaro Kato[1]

1. 東京大、2. 統計数理研究所、3. 産業技術総合研究所
1. The University of Tokyo, 2. The Institute of Statistical Mathematics, 3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

地震波トモグラフィは、地表面の観測網で記録された地震の到達時間から地球内部の地震波速度構造を推定する手法である。従来手法ではスムージングに伴う拘束条件のため、地震波速度が急峻に変化する速度不連続面(velocity discontinuity)の存在を検出することが困難であった 。したがって、モホ面、コンラッド面に代表される速度不連続面を扱う場合、変換波などの速度不連続面の存在に敏感な波群から推定された形状を事前に与える、というアプローチがとられてきた。しかしながら、そのような波群が観測される地域は限られていることが多く、またデータ数も不十分な場合が多い。このため、速度不連続面の詳細な形状が同定されているとは限らず、普遍的に観測される得るP波やS波の初動走時データからその位置や分布を検出することは、地球内部構造を理解する上で大きな意義がある。そこで本発表では、構造正則化を応用することで、限られた走時データから未知の不連続面を検出しつつ、速度構造を推定するインバージョン法を提案する。
速度構造の推定にあたっては、まずグリッドポイントを地球内部に仮定し、それら個々に速度パラメータを設定する。震源から観測点に到達するまでの予測時間を算出する際には、これらのグリッドポイントの補間により得られる速度を用いて経路積分を行う。多くの従来法では、この予測到達時間と観測到達時間との残差に基づいて、各グリッドポイントの速度パラメータを推定している。
提案手法の最適化関数は、従来手法で用いられている残差項に、グリッドポイントの空間的位置関係を考慮した罰則項を加えることで定義される。罰則項は水平方向に課すものと深さ方向に課すものとに分かれており、水平方向には隣接グリッドの速度差に関するl2ノルムに基づいた罰則を定義することで滑らかな速度構造を表現する。この罰則項はスムージング項として地震波トモグラフィで広く用いられている罰則の形である。そして深さ方向に対してはスパース正則化を応用し、深さについて見た平均速度勾配にl2ノルムのl1和に基づいた形の罰則を与える。この罰則は深さの速度変化に区分線形的な傾向を与え、急峻な速度変化に対応することで不連続面の検出を図るものである。
本発表では、防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-netで観測された初動走時データ(気象庁一元化処理震源)から、静岡県近郊の地下速度構造を推定する地震波トモグラフィの実例を紹介する。本実験を通して、従来法やスパース正則化を用いない場合と比較し、少ないデータ数で不連続面を自動的に検出出来るという提案手法の特長が確認される。

© 日本地震学会

相互情報量と相関係数の積を用いたマッチドフィルタ法による深部低周波地震の検出

Detection of deep low-frequency earthquakes by matched filter technique using the product of mutual information and correlation coefficient

*栗原 亮[1]、加藤 愛太郎[1]、倉田 澄人[2]、長尾 大道[1,2]
*Ryo KURIHARA[1], Aitaro Kato[1], Sumito Kurata[2], HIromichi Nagao[1,2]

1. 東京大学地震研究所、2. 東京大学大学院情報理工学研究科
1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Graduate School of Information Science and Technology, the University of Tokyo

マッチドフィルター法は、深部低周波地震のような微小地震の検出によく用いられる手法である。従来の手法では、テンプレート地震の波形と観測データの間の相関係数を計算し、その総和を基準として、閾値を超えた場合に検出となる。しかし、従来の方法では地震観測点が少ない場合には検出精度が大幅に低下するという欠点があった。本研究では、テンプレート波形とターゲット波形の類似性を測定するために、CCに加えて相互情報量を採用し、その積を基準とすることにより、1つの地震観測点のみでも深部低周波地震を精度よく検出することに成功した。まず、人工ノイズと深部低周波地震の波形からなる合成データセットに対して、相互情報量と相関係数の積を計算し、その時間推移を調べた。その結果、ノイズデータとして非周期的なノイズであるガウシアンノイズを利用した場合、周期的なノイズである正弦波ノイズを利用した場合の両方のケースについて、ノイズ部分には高い値を示さず、地震信号に対応する明確なピークを示すことがわかった。次にこの手法を日本で最も活発な火山の一つである霧島火山の観測データに適用したところ，2010年12月のデータから354の深部低周波地震が検出された。利用した観測点は防災科学技術研究所Hi-netのN.SUKH観測点である。この期間には気象庁のカタログの深部低周波地震はわずか2つしか検出されていない。今回構築した深部低周波地震のカタログは、従来のマッチドフィルター法（火山近傍の6観測点の相関係数の和を用いる方法）で得られたものと同様の時間的挙動を示している。提案された手法は、従来の方法で構築されたカタログに含まれる地震の約80%を識別することに成功した。相関係数と相互情報量の積を用いて検出した結果では、1観測点で相関係数のみ、相互情報量のみを用いて検出を行なった場合に比べても一致度が高い。これらの結果は、提案した手法が1つの地震観測点のみを用いて、深部低周波地震の正確なカタログ作成に大きく貢献できることを示唆しており、強い信号が少数の観測点でしか観測されない微小な地震の検出や観測網の網羅性が低い地域などでの検出に利用できると考えられる。

© 日本地震学会

l_1トレンドフィルタリングによる西南日本GNSSアレイからの短期スロースリップ現象の検出

l_1 trend filtering based detection of short-term slow slip events from a GNSS array in southwest Japan

*矢野 恵佑[1]、加納 将行[2]
*Keisuke YANO[1], Masayuki Kano[2]

1. 統計数理研究所、2. 東北大学
1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Tohoku University

1. 概要
高密度の測地学的観測の拡充により様々な沈み込み帯においてスロースリップイベント（SSE）が発見された。これらのSSEは、沈み込み帯における応力の解放と蓄積を理解するための重要な手がかりである。しかし、継続時間が短い短期SSE（S-SSE）は、目視できるほどの変位を伴わないことが多く、S-SSEの発生をできるだけ正確に把握するためには、高精度の自動検出法が必要となる。本研究では，スパース推定の一種であるl1トレンドフィルタリングとp-値の統合を用いて、Global Navigation Satellite System(GNSS)アレイの観測データからS-SSEを自動検出する手法を提案する。提案手法は，S-SSEの開始候補点を見つけるためにl1トレンドフィルタリングを利用し、検出の信頼値を得るためにp-値の統合を利用する．人工データによる双子実験では、赤池情報量規準(AIC)に基づく自動検出法と比較し、本手法が誤検出をほとんど起こさずにほぼすべてのイベントを検出できることを示した。さらに，提案手法を、西南日本四国西部の39のGNSS観測点の日次変位に適用し、提案手法によりすべての既知のS-SSEを検出するだけでなく、新たなイベントも発見した。これらの新検知イベントについて低周波微動との共起性やベイズ的逆解析の結果を議論する。
2. 提案手法
提案手法は、トレンドフィルタリング・隣接観測点を用いた検定・検定結果の統合を段階的に行う．図1は提案手法の概要図を表している。まず、l1トレンドフィルタリング(Kim, et al., 2009)により観測系列に区分線形関数を当てはめる。当てはめた関数の節点情報を集めて検定を行う。最後に複数の観測点での検知の疑わしさを表す検定のp-値を統合する．l1トレンドフィルタリングは、高次全変動正則化とも呼ばれるスパース推定の手法であり、与えられた入力の中に潜む区分多項式関数を精度良く推定することができる。正則化の度合いを表すハイパーパラメータはMallowsのCp規準を用いてデータから決定することができる。後続する検定では，l1トレンドフィルタリングで得られた区分点を利用する。提案手法の精度検証のため、2004年4月1日からの2年間における四国西部のGNSSデータとこのデータから生成した人工データを利用し、解析においては二次元の変位データをアムール海プレートのフィリピン海プレートへの沈み込み方向に射影して利用した。
3. 結果
人工データを利用した比較によって，以下のことが分かった．AICの空間平均は窓幅によってイベント見逃し率・ノイズ誤検知率が変化する一方，提案手法は誤検出をほとんど起こさずにほぼすべてのイベントを検出できることが確認された。提案手法を実データに利用し、全ての既知のS-SSEを検出できるだけでなく新たな検知をいくつか発見した。これらの検知についてKato and Nakagawa (2020)のカタログを用いた低周波微動との共起性 (図２) およびMCMCを用いた逆解析の結果(図３)について報告する。

© 日本地震学会

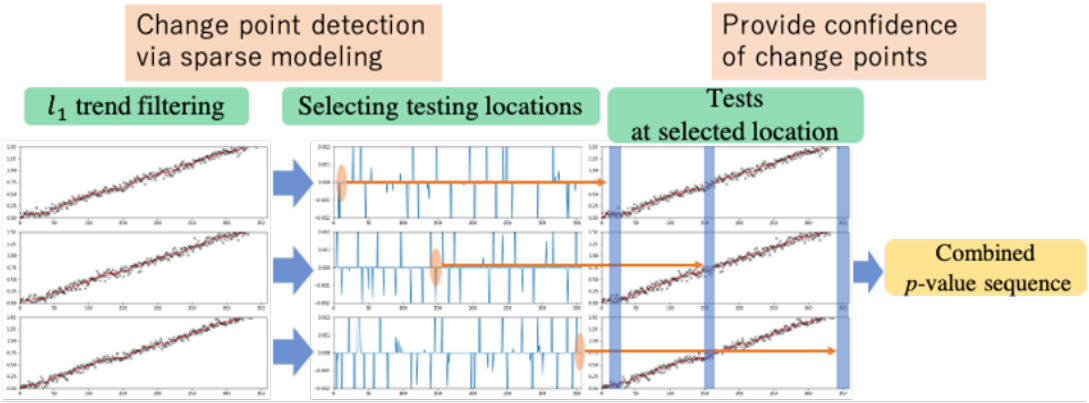


図 1：提案手法の概要図

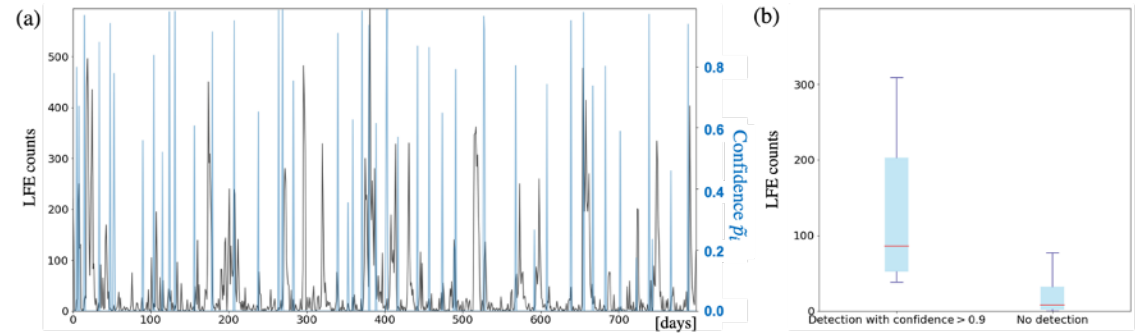


図 2： (a) 提案手法の検知確からしさ(青線)とKato & Nakagawa (2020)カタログの低周波微動の日次平均(黒線)。(b) 検知日±3日と検知なし日の低周波微動数の箱ひげ図。

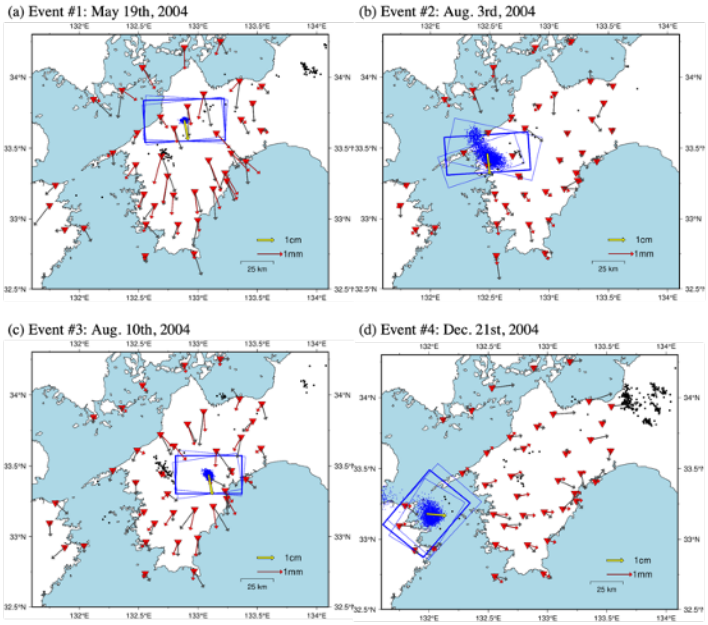


図 3：新検知の逆解析例：観測点(赤逆三角)、断層位置の事後標本(青点)、断層の大きさ(青四角)、観測すべりベクトル(黒矢印)、事後平均に基づくすべりベクトル(赤矢印)、微動震源(黒点)。

© 日本地震学会

B会場 | 特別セッション：S23. ベイズ統計学による地震データの解析と数理モデリングの深化

2021年10月14日(木) 11:00 ~ 12:15 | B会場 B会場

AM-2

座長:長尾 大道(東京大学地震研究所)、加藤 愛太郎(東京大学地震研究所)

11:00 ~ 11:20

[S23-07] [招待講演] ベイズインバージョンにまつわるいくつかの問題について

〇深畑 幸俊[1] (1.京都大学防災研究所 地震予知研究センター)

11:20 ~ 11:40

[S23-08] [招待講演] ベイズ統計学による測地データの非線形逆解析

〇福田 淳一[1]、Johnson Kaj[2] (1.東京大学地震研究所、2.Department of Earth and Atmospheric Sciences, Indiana University)

11:40 ~ 12:00

[S23-09] [Invited] A Bayesian framework for Earthquake Early Warning

〇Stephen Wu[1] (1.統計数理研究所)

12:00 ~ 12:15

[S23-10] 連続地震計記録の極値統計解析に基づく大地震後の平常時に対する揺れやすさの予測

〇澤崎 郁[1] (1.防災科学技術研究所　地震津波防災研究部門)

[招待講演] ベイズインバージョンにまつわるいくつかの問題について

[Invited] Some problems associated with Bayesian inversion

*深畑 幸俊[1]
*Yukitoshi FUKAHATA[1]

1. 京都大学防災研究所 地震予知研究センター
1. RCEP, DPRI, Kyoto University

ABICを用いたインバージョンは難しいと言われる。解析者の直感に反する過大あるいは過小な超パラメタの値、即ち不適切な解が、ABIC最小の規準によってしばしば選ばれてしまうためである。しかし、そのような解析者の直感に反する解が得られる原因は、不適切なモデル化に起因することが普通である。そのため最近は、"Bad modelling leads to a bad result. A bad result suggests bad modelling." という標語を掲げている。この不適切なモデル化の問題ついて、モデル誤差に起因する共分散 (Yagi & Fukahata, 2008, 2011, GJI) など誤差の取り扱いの重要性については広く認識されてきたと思う。そこで、本講演では、それ以外のベイズインバージョンにまつわるモデル設定の問題について取り上げる。
例えば、解空間の設定は一般に難しい問題である。狭く取ってしまうと適切な解が選べなくなる一方、過大に取ってしまうとモデルの自由度が高くなり過ぎて、これまた適切に解を構成することが難しくなってしまうからである。先験情報は、”主観確率”とも呼ばれるくらいだから、解析者が主観に基づいて自由に選んで構わないという考えがあるようだが、そうではない。先験情報にもやはり適切なものと不適切なものとがあり、不適切な先験情報を用いると、解が歪められるなどといった問題が生じる。基底関数や境界条件の選択も軽視されることが多いが、適切に解を推定するためには見過ごすことができない要因である。こういった内容について、具体的な解析事例も交えて説明する。

© 日本地震学会

[招待講演] ベイズ統計学による測地データの非線形逆解析

[Invited] Nonlinear inversion of geodetic data based on Bayesian statistics

*福田 淳一[1]、Johnson Kaj[2]
*Junichi Fukuda[1], Kaj M. Johnson[2]

1. 東京大学地震研究所、2. Department of Earth and Atmospheric Sciences, Indiana University
1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Department of Earth and Atmospheric Sciences, Indiana University

GNSSやInSAR等の測地データを用いて地震現象に関連した地殻変動の変動源を研究するためには、フォワードモデルのパラメータを推定する逆（インバージョン）解析を行う必要がある。測地データに対する逆解析の方法は、目的関数の最小化により最良のパラメータを推定する最適化と、ベイズ統計学に基づきパラメータの事後確率分布を推定するベイズ推定に大別できる。ベイズ推定の枠組みでは、ベイズの定理に基づき、逆問題の解である事後確率分布を推定する。ベイズ推定の利点として、パラメータの不確実性やトレードオフを事後確率分布に基づき定量化できることや、事前情報を解にどの程度反映させるかを決めるハイパーパラメータを客観的に決定できることが挙げられる。しかし、ベイズ推定は最適化に比べて一般に計算コストが高いことが欠点として挙げられる。

断層すべり分布を推定するインバージョンなどの線形の逆問題では、事後確率分布がガウス分布であれば、最小二乗法を用いて事後確率分布を解析的に得ることができる。このような問題は取り扱いが容易で計算コストも低いため、ベイズ推定は広く使用されてきた。一方、非線形の逆問題に対するベイズ推定では、事後確率分布を得るためにマルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法などの数値的な手法が必要となる。MCMC法は近年、測地データの逆解析に広く用いられるようになりつつあるが、この手法は多数回のフォワード計算を必要とするため、計算コストの高いフォワードモデルに適用することは困難である。

近年の地殻変動のモデリング研究では、断層面上の応力・摩擦やマントルの粘弾性応力緩和などを考慮した物理モデルを導入する動きが加速している。このようなモデルのパラメータを観測データから推定する問題は非線形の逆問題となり、フォワードモデルの計算コストが高いため、一般にMCMC法によるベイズ推定は困難である。このような例として、本講演では余効すべりと粘弾性緩和を組み合わせた余効変動の物理モデルのパラメータを測地データ基づきベイズ推定した結果（Fukuda and Johnson, 2021）を示す。フォワードモデルでは、地震時の応力変化により余効すべりと粘弾性緩和が駆動され、余効すべりは速度依存の摩擦則、粘弾性緩和はBurgersレオロジーに従うと仮定した。また、余効すべりと粘弾性緩和の相互作用を考慮した。地震時のすべり分布、これに対する平滑化パラメータ、断層の摩擦パラメータ、海洋マントルとマントルウェッジのMaxwell及びKelvin粘性率を未知パラメータとし、これらをベイズ推定した。計算コストの高いモデルに対してベイズ推定を行うために、(1) 既存のフォワード計算の結果からVoronoi cellを用いて近似的な事後確率分布を構築し、(2) これをGibbs samplerでサンプリングし、(3) (2)で生成されたサンプルに対してフォワード計算を実施するというプロセスを反復して事後確率分布の推定を逐次的に改良するアルゴリズムを構築した。この手法を2011年東北沖地震の地震時及び地震後7年間の測地データに適用しパラメータのベイズ推定を行った。この結果から、比較的単純な物理モデルに対して測地データに基づくベイズ推定が可能であることが示された。今後、より現実的なモデルに対するベイズ推定を行うためには、できる限り少ない回数のフォワード計算で高次元の事後確率分布を推定できる手法の開発が重要となる。

© 日本地震学会

[Invited] A Bayesian framework for Earthquake Early Warning

*Stephen Wu[1]

1. 統計数理研究所
1. The Institute of Statistical Mathematics

Earthquake early warning (EEW) systems are designed to rapidly analyze real-time seismic data and report occurrence of earthquakes before strong shaking is felt at a site. EEW has been implemented in many seismically active regions around the world, yet there are still many challenges to be solve in order to achieve faster and more accurate strong shaking warning. Two of the key challenges of EEW include: (1) prediction of fault rupture using only the first few seconds of seismic wave data is highly uncertain, and (2) existing ground motion prediction equations that are computationally fast enough for EEW are highly uncertain. A natural solution to handle these uncertainties is to apply a fully Bayesian framework to EEW, but the typically high computational demand in Bayesian inference has been a bottleneck. In this presentation, I will introduce multiple attempts to design efficient EEW algorithms based on a Bayesian framework, including the seismic source inversion problem, ground motion prediction problem, and decision-making of emergency response under different source of uncertainties.

© 日本地震学会

連続地震計記録の極値統計解析に基づく大地震後の平常時に対する揺れやすさの予測

Relative probability of ground motion level revealed from the extreme value statistics applied to a continuous seismogram obtained before and after a mainshock.

*澤崎 郁[1]
*Kaoru SAWAZAKI[1]

1. 防災科学技術研究所　地震津波防災研究部門
1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

大地震の直後には地震カタログの品質が低下し、地震カタログに基づく地震活動予測が困難となる。そのため、カタログによらず、地震計記録を直接解析することにより余震による最大振幅を予測する手法が近年提案されている。この手法では、連続地震動記録の区間最大振幅（等時間間隔ごとの最大振幅）が極値分布の一種である非定常Frechet分布にしたがうことを利用し、極値統計解析を用いて揺れの超過確率を予測する。区間最大振幅は地震波の重なり合いの影響をほとんど受けないため、本震発生から数時間以内でロバストな予測が可能となる。さらに、この手法は大地震後に限らず普段の地震動記録にも適用できると考えられ、対象観測点における揺れやすさの「平常時からの倍率」を予測することもできる。平常時からの倍率は発生確率よりも体感的にわかりやすい指標であるため、地震情報を提供する際に有用と考えられる。本研究では、極値統計解析に基づく予測手法を2008年岩手・宮城内陸地震（M_J7.2）2018年大阪府北部の地震（M_J6.1）、2021年福島県沖の地震（M_J7.3）の前後におけるHi-netの連続地震動記録（強震動については併設のKiK-net記録を使用）に適用し、本震後に任意の値以上の揺れが生じる確率が平常時と比較してどれくらい増加したかを調査した。

適用した極値統計解析の手法は主にSawazaki (2021)に基づく。本震後1時間ごとに24時間後までの期間について、非定常Frechet分布を1分毎の区間最大振幅に適用し、分布を規定するパラメータA（地震の活動度、震源距離、サイト増幅率などを反映）、p（地震活動の時間減衰を反映。大森一宇津式のp値に相当）、m（最大振幅の規模別頻度分布を反映）を推定した。推定したパラメータを用いて、本震の4日後までの最大振幅の超過確率を計算した。このとき、パラメータの推定値だけではなく、その不確定性を予測に反映させるベイズ予測を採用した。平常時については、本震前半年間の連続地震計記録について半日ごとの区間最大振幅を計算し、同様の解析を行った。ただし、平常時には地震発生頻度が時間変化しないと仮定し、p値を0に固定した。また、Sawazaki (2021)では雑微動レベルを反映するパラメータx_{min}も同時に推定していたが、今回はこの値を本震前の雑微動レベルに基づきあらかじめ固定した上で解析を行った。

解析の結果、3つの本震はそれぞれ規模やメカニズムが異なり、観測点ごとに震源距離やサイト増幅率などが異なるにもかかわらず、いずれの地震、観測点でも、本震発生後数時間以内にロバストな予測を示した。例として図1aに、10^{-2}m/s以上の最大振幅（震度２から3相当。ただしHi-netは地中に設置されているため、地表ではこれを上回る揺れが生じる）が起こる超過確率の推移を、岩手・宮城内陸地震の3時間後時点で予測した結果を示す。本震後は大森一宇津則にしたがい地震活動が減衰するので超過確率曲線は次第に緩やかになるが、それでも4日後までに10^{-2}m/s以上の揺れが起こる確率は36－91%と高い。実際には、N.ICEHとN.KGSH観測点で本震の4時間後に10^{-2}m/s以上の最大振幅を観測した。図1bは、本震が起こらなかった場合についての超過確率の推移予測である。本震前の期間については地震活動の定常性を仮定したため、超過確率はほぼ直線的に増加する。4日後までに10^{-2}m/s以上の最大振幅が起こる確率はいずれの観測点でも0.8%未満である。図1aと1bの確率の比を示した図1cは、超過確率の平常時に対する倍率の予測を表す。平常時からの倍率は、4日後時点でも90－220倍と高い水準を維持している。震源距離やサイト増幅率などを反映して、観

© 日本地震学会

測点によっても値の差が大きい。

同様の解析結果を大阪府北部の地震と福島県沖の地震についてそれぞれ図2、3に示す。大阪府北部の地震の規模は他の二つの地震より小さいため、超過確率の絶対値は3－16%と低い（図2a）が、近畿地方の普段の地震活動も0.14%未満と低い（図2b）ため、平常時からの倍率は20－200倍と高めに推定された（図2c）。福島県沖の地震は規模が大きく超過確率の絶対値は20－70%と高い（図3a）が、東北地方の普段の地震活動が0.2－2.2%と活発であるため（図3b）、平常時に対する倍率は10－110倍と今回の解析例の中では低く推定された（図3c）。なお、図2、3で使用した８観測点のうち、福島県沖の地震におけるN.NMEH観測点以外では、10^{-2}m/s以上の最大振幅は4日後までに生じなかった。

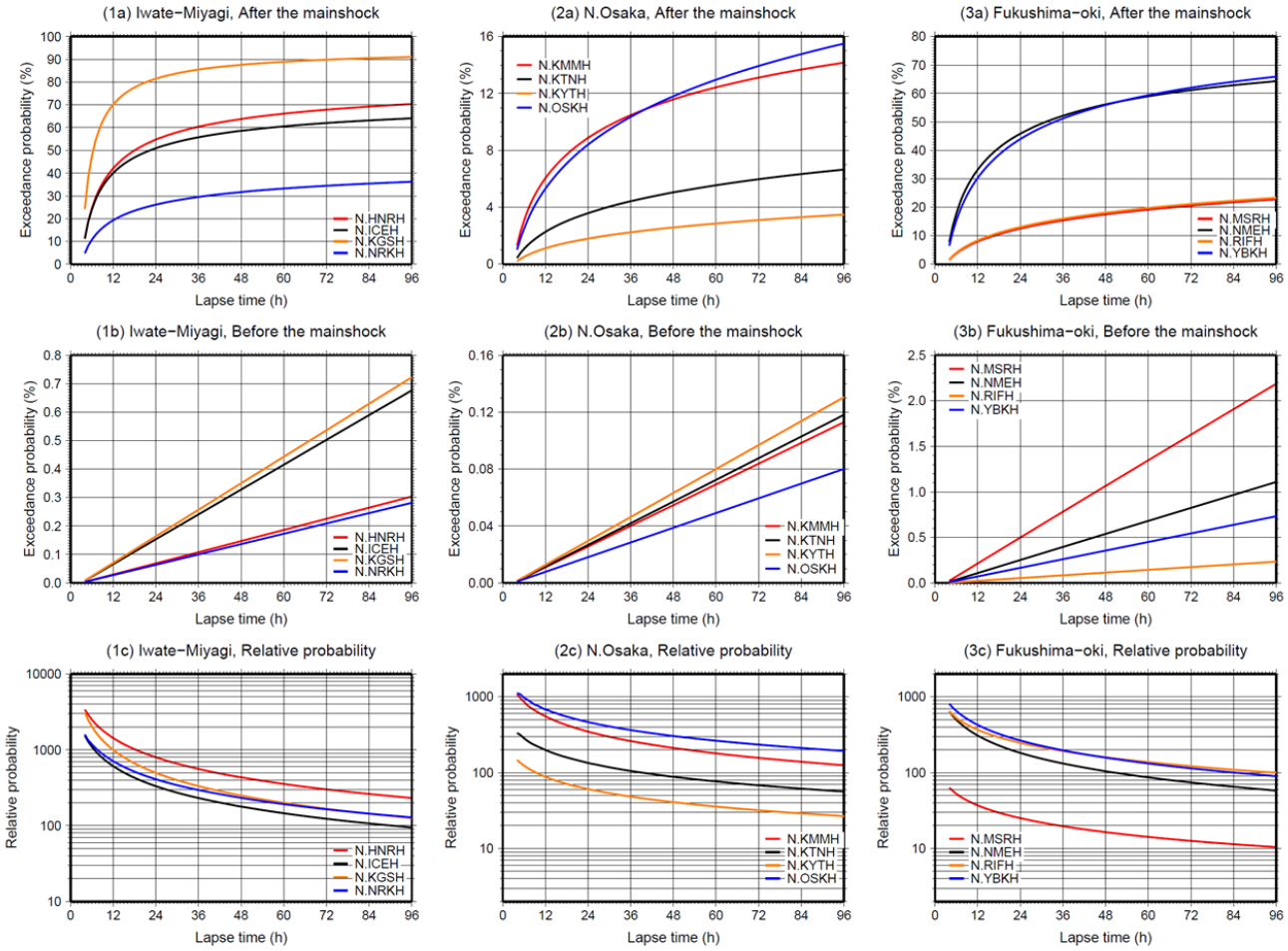


図1：(a)岩手・宮城内陸地震発生後４日間での最大振幅10^{-2}m/sを超える確率。予測時点は本震から3時間後。(b) 岩手・宮城内陸地震発生前半年間の地震動記録に基づく、本震が起こらなかった場合の4日間での最大振幅10^{-2}m/sを超える確率。(c)最大振幅10^{-2}m/sを超える確率の本震前に対する本震後の倍率。1aの曲線を1bの曲線で除して算出。異なる色の曲線は異なるHi-net観測点名（図中凡例）を表す。
図2：大阪府北部の地震における、図1a～1cと同様の図。
図3：福島県沖の地震における、図1a～1cと同様の図。

© 日本地震学会

B会場 | 特別セッション：S23. ベイズ統計学による地震データの解析と数理モデリングの深化

2021年10月14日(木) 13:30 ~ 14:00 | B会場 B会場

PM-1

座長:矢野 恵佑(統計数理研究所)、久保 久彦(防災科学技術研究所)

13:30 ~ 13:45

[S23-11] The research of spherical time-space ETAS model

○熊 子瑶[1]、庄 建倉[1] (1.統計数理研究所)

13:45 ~ 14:00

[S23-12] ガウス過程回帰を用いた本震直後における余震分布の推定

○森川 耕輔[1]、長尾 大道[2]、伊藤 伸一[2]、寺田 吉壱[1,3]、酒井 慎一[2]、平田 直[2,4] (1.大阪大学、2.東京大学、3.理研、4.防災科学技術研究所)

The research of spherical time-space ETAS model

*熊 子瑶[1]、庄 建倉[1]
*Ziyao Xiong[1], Jiancang Zhuang[1]

1. 統計数理研究所
1. The Institute of Statistical Mathematics

The widely used space-time ETAS (epidemic-type aftershock sequence) model was developed by Ogata (1998). This model successfully explains foreshocks and high order aftershocks in earthquake sequences and provides a very effective tool for seismic activity analysis. However, this space-time ETAS model is only suitable for the study within a small space range. When the space range is large, since the earth is a sphere, the simulation results of the model will produce errors. In this study, we reformulate the model from its planar version to a spherical version, to analyze and forecast global seismicity or seismicity in high latitude regions. The new model is verified by applying it to the global CMT catalogue. The results show that the new model can simulate the global seismicity variation well. It provides support for better modeling of seismic activities and seismic interactions in global regions.

© 日本地震学会

ガウス過程回帰を用いた本震直後における余震分布の推定

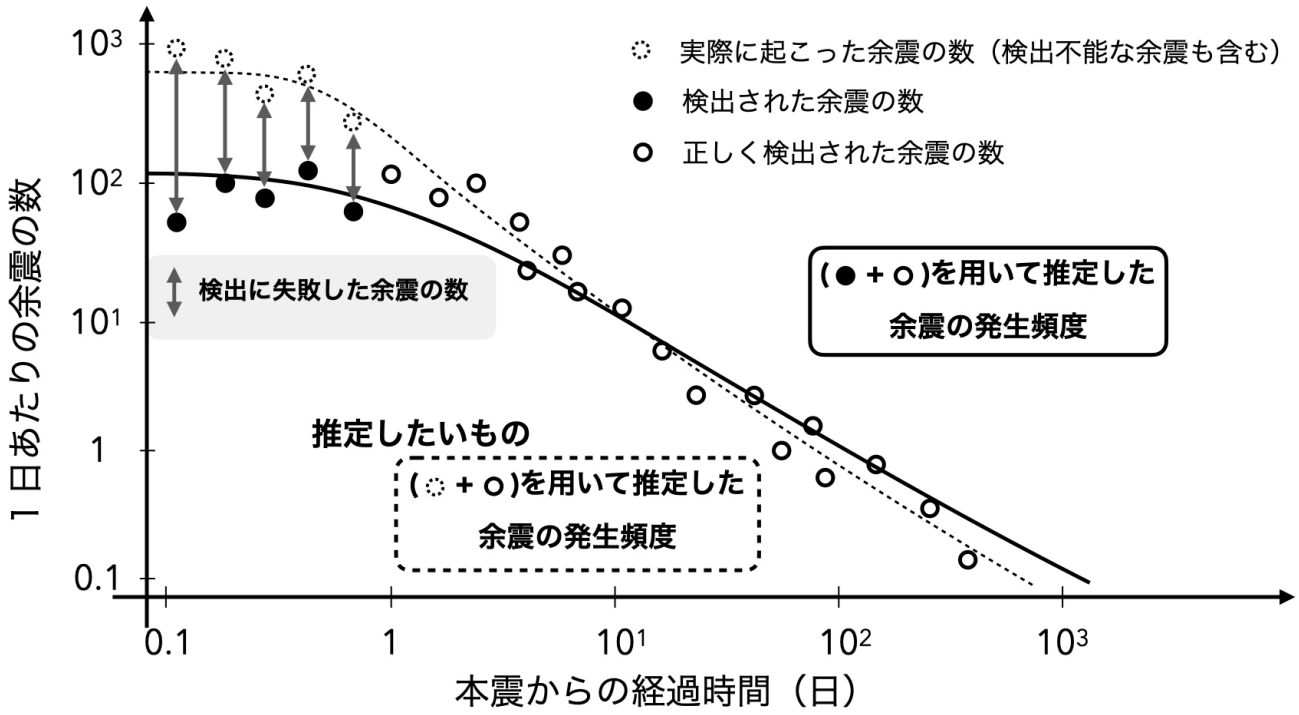
Forecasting temporal variation of aftershocks immediately after a main shock using Gaussian process regression

*森川 耕輔[1]、長尾 大道[2]、伊藤 伸一[2]、寺田 吉壱[1,3]、酒井 慎一[2]、平田 直[2,4]
*Kosuke Morikawa[1], Hiromichi Nagao[2], Shin-ichi Ito[2], Yoshikazu Terada[1,3], Shin'ichi Sakai[2], Naoshi Hirata[2,4]

1. 大阪大学、2. 東京大学、3. 理研、4. 防災科学技術研究所
1. Osaka Univ., 2. Univ. of Tokyo, 3. RIKEN, 4. NIED

本震発生直後は非常に多くの余震が発生する．余震の時間に関する統計則として，大森・宇津則やETASモデル，規模に関する統計則として，Gutenberg-Richter則が知られている．これらの統計則を規定するパラメータをデータからいち早く推定することで，余震発生の時間・規模に関する情報を迅速に把握し，今後の防災へ生かすことが可能となる．
しかし，本震発生直後は地震計のSN（信号対雑音）比が著しく悪化するため，すべての余震を検出することは難しい．また，検出された余震データのみから余震分布を推定すると，図のように推定される余震分布に大きなバイアスが生じる．
そこで余震検出確率をモデル化し導入することで，検出された余震データから正しい余震分布の推定を行う．``未検出の余震"は実際には観測されないため，検出された余震に対する条件付き分布から尤度関数を構成する．その際，検出確率を構成する未知関数に対しガウス過程回帰のアイディアを応用し，事前分布としてガウス過程を用いることで，従来手法よりも表現力が高い余震分布のノンパラメトリックベイズ推定手法を開発した．ガウス過程回帰は表現力が非常に高いことが知られており，ある条件下では実際深層学習と同等の性能を持つことが知られている．さらに点推定だけでなく，従来推定が困難であった余震検出確率及びパラメータの不確実性および予測分布まで推定可能となる．また，データ拡大法とギブスサンプリングを組み合わせることで，近似を必要とする複雑な最適化を避け，サンプリングによるパラメータの推定手法を確立した．実際の地震データに対する本手法の適用結果は当日報告する．

© 日本地震学会


実際に起こった余震の数（検出不能な余震も含む）
検出された余震の数
正しく検出された余震の数
検出に失敗した余震の数
(● + ○)を用いて推定した
余震の発生頻度
推定したいもの
(◌ + ○)を用いて推定した
余震の発生頻度
1日あたりの余震の数
本震からの経過時間（日）
10³
10²
10¹
1
0.1
0.1
1
10¹
10²
10³

© 日本地震学会

B会場 | 特別セッション：S22. AIによる地震学の発展

2021年10月14日(木) 14:00 ~ 15:00 | B会場 B会場

PM-1

座長:久保 久彦(防災科学技術研究所)、矢野 恵佑(統計数理研究所)

14:00 ~ 14:15

[S22-01] 地震連続波形画像からの深部低周波微動検出に向けた畳み込みニューラルネットワークの構築

○金子 亮介[1,2]、長尾 大道[2,1]、伊藤 伸一[2,1]、小原 一成[2]、鶴岡 弘[2] (1.東京大学大学院情報理工学系研究科、2.東京大学地震研究所)

14:15 ~ 14:30

[S22-02] 動的モード分解による地震時系列データの特徴抽出

○菊地 亮太[1]、久保 久彦[2] (1.京都大学、2.防災科学技術研究所)

14:30 ~ 14:45

[S22-03] 地震学分野におけるブラックボックス最適化問題へのベイズ最適化の適用：セントロイドモーメントテンソルインバージョンでの例

○久保 久彦[1]、吉田 圭佑[2]、木村 武志[1] (1.防災科学技術研究所、2.東北大学理学研究科附属地震噴火予知研究観測センター)

14:45 ~ 15:00

[S22-04] **ガウス過程によるCMTデータインバージョンの試み**

○岡崎 智久[1]、深畑 幸俊[2] (1.国研）理化学研究所　革新知能総合研究センター、2.京都大学 防災研究所)

地震連続波形画像からの深部低周波微動検出に向けた畳み込みニューラルネットワークの構築

Construction of Convolutional Neural Network to Detect Deep Low-Frequency Tremors from Seismic Waveform Images

*金子 亮介[1,2]、長尾 大道[2,1]、伊藤 伸一[2,1]、小原 一成[2]、鶴岡 弘[2]
*Ryosuke KANEKO[1,2], Hiromichi NAGAO[2,1], Shin-ichi ITO[2,1], Kazushige OBARA[2], Hiroshi TSURUOKA[2]

1. 東京大学大学院情報理工学系研究科、2. 東京大学地震研究所
1. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

深部低周波微動は高感度地震観測網（Hi-net）の整備をきっかけに初めて観測的に見出された現象[1]であり，発見以降多くの研究によって通常の地震との関係性が示唆されている．一方で，微動に関するデータは直近の約20年分しか存在せず，その特性をより深く理解し数十年～数百年周期で発生する巨大地震の予測などへ活用するためには，さらに過去まで遡ってデータを収集することが重要である．

現在は地震計で観測された振動を高精度なデジタルデータとして記録するシステムが用いられているが，約50年前は振動に応じて動くペンによって波形を記録紙に連続的に書き記していた．このような古記録は，過去に発生した地球内部起源の振動現象を研究する上での貴重な情報源であり，東京大学地震研究所では和歌山地域に展開されている観測点の古記録をスキャンし画像データとして保存する研究が行われている[2]．古記録画像から微動検出を行う場合，微小な微動波形をデジタイズすることは非常に困難であるため，現在のデジタルデータに対して用いられている検出手法を直接適用することはできない．また，古記録の数は膨大であるため，専門家の目視によって個々に検出することは非現実的である．そのため，古記録画像から効率的に微動検出を行う画像処理手法が必要である．

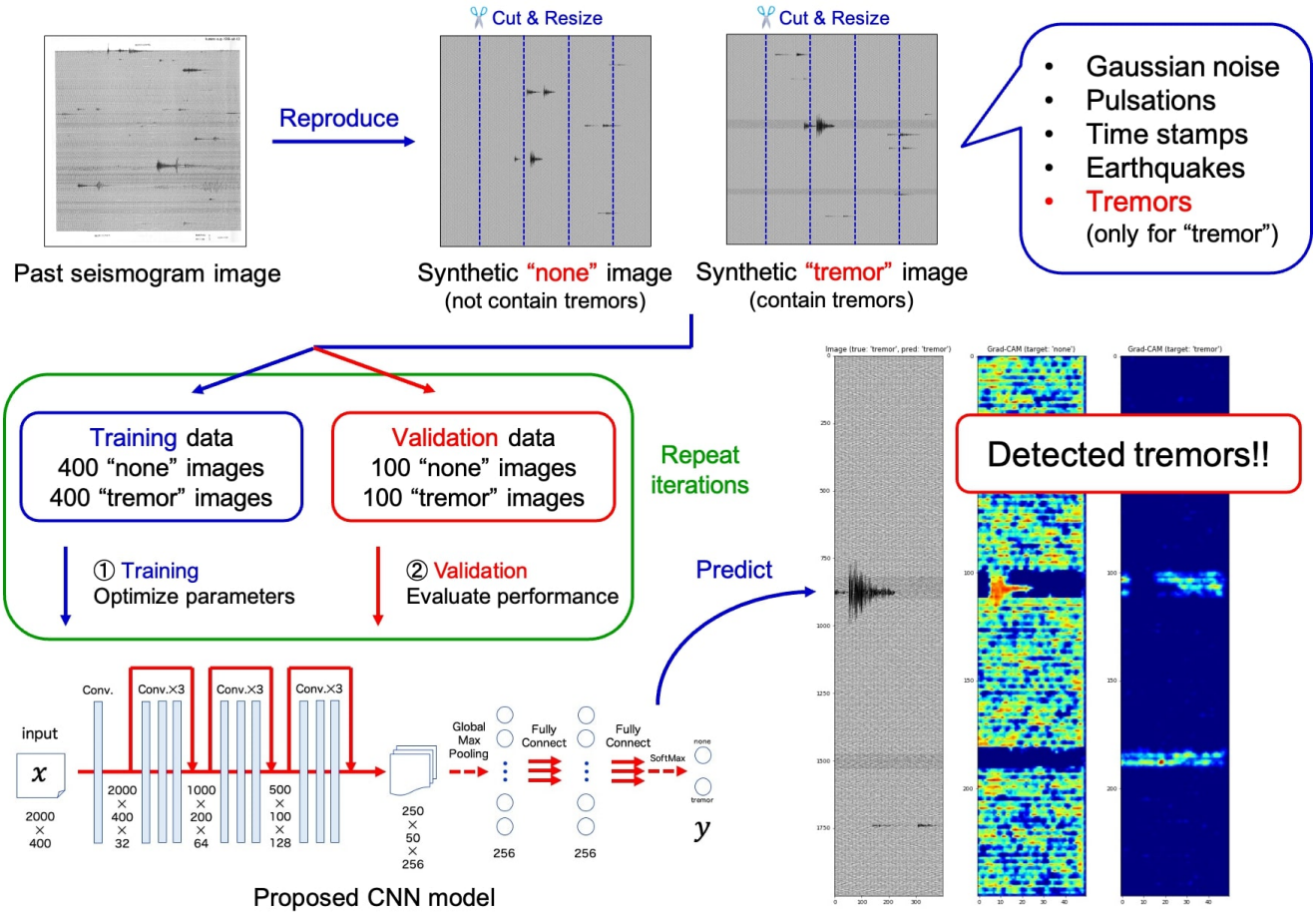
本研究では，画像認識に特化した深層学習手法の一つである畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を用いた手法開発に取り組む．CNNモデルは，予め正解が分かっている教師データを学習することによって，モデル内部のパラメータを自動で調整し対象の識別が可能になる．今回の場合，微動カタログ[3–5]をもとにHi-netの記録を教師データとして用いることができるが，実データに含まれる多くのノイズが妨げとなって学習が上手く進行しない可能性がある．そこで，これまでの研究[6]では，古記録画像をもとにした波形画像を人工的に作成しモデルを学習させる数値実験を行ってきた（画像参照）．その結果，学習済みモデルは地震や脈動とは区別して微動を認識できることが可能になった．また，教師データには各画像に微動が含まれるか否かのみを正解として与えたのにもかかわらず，モデルは画像内のどの領域に微動が含まれるかも正しく検出することができた．

本講演では，この数値実験の結果をもとにHi-netの実データを用いてモデルの学習を行った結果を紹介する．人工波形画像による学習済みモデルをファインチューニングに活用しモデルの構造にも改良を加えることで，ノイズを多く含む実データに対しても人工波形画像に対する結果と遜色ない性能を示した．

[1] K. Obara, Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, Science, 296, 1679-1681, 2002.
[2] K. Satake, H. Tsuruoka, S. Murotani and K. Tsumura, Analog seismogram archivesat the Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Seismological ResearchLetters, 91(3), 1384–1393, 2020.
[3] T. Maeda and K. Obara, Spatio-temporal distribution of seismic energy radiation from low-frequency tremor in western Shikoku, Japan, Journal of Geophysical Research, 114(B10), 2009.

© 日本地震学会

[4] K. Obara, S. Tanaka, T. Maeda and T. Matsuzawa, Depth-dependent activityof non-volcanic tremor in southwest Japan, Geophysical Research Letters, 37(13), 2010.
[5] National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Activity of deep low-frequency tremor in southwest Japan (May, 2020 –October, 2020), Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction, 105, 397–401, 2021.
[6] R. Kaneko, H. Nagao, S. Ito, K. Obara and H. Tsuruoka, Convolutional neural network todetect deep low-frequency tremors from seismic waveform images, Trends andApplications in Knowledge Discovery and Data Mining (Lecture Notes in Computer Science,vol. 12705), 31-43, 2021.



© 日本地震学会

動的モード分解による地震時系列データの特徴抽出

Feature Extraction of Earthquake Time-Series Data by Dynamic Mode Decomposition

*菊地 亮太[1]、久保 久彦[2]
*Ryota Kikuchi[1], Hisahiko Kubo[2]

1. 京都大学、2. 防災科学技術研究所
1. Kyoto University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

計測技術の発展およびコンピュータによる演算能力向上により、高密度な観測や多数回のシミュレーションデータを得ることが可能になった。得られた多次元時系列データは、現象を精密に再現する一方で、データ解析をする際に解釈や現象理解が困難になる可能性がある。高密度な観測や多数回のシミュレーションデータを活かすためには、データの背後に潜むダイナミクスや特徴構造を抽出するアルゴリズムが必要となる。 防災科学技術研究所では全国に約2100ヶ所の地震観測点を設置・運用しており、そのうち陸域の約1700ヶ所において強震計による観測を実施している。これらによる地震動データは，被害の原因の究明や震源過程解析など事後検証的に活用され，耐震工学や地震ハザード評価などを通じて将来の震災軽減に役立てられてきた。この情報より、高密度な観測点ごとのリアルタイムな震度情報を得ることができる。複数の観測点による空間的な特徴と時系列データによる時間的な特徴があり、地震現象を高度に理解するためには両者を適切に取り扱う必要がある。 多次元時系列データを解析する方法として、動的モード分解(Dynamic Mode Decompostion: DMD)が挙げられる。DMDは、流体解析の分野において、実験およびシミュレーションで得られた多次元時系列データの中から時空間的な特徴構造を抽出する方法として提案された。一般的に用いられる主成分分析(Principal Component Analysis: PCA)や固有直交分解(Proper Orthogonal Decomposition: POD)は、静的な情報に対する特徴抽出を対象としており、動的な特徴抽出には適さない。また、高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform: FFT)は、個々の観測点において動的な時間スペクトルを得ることができるが、空間全体の時間的な特徴構造を把握することには適用できない。DMDは、静的な空間モードだけではなく時間発展を考慮した動的モードの両方を抽出することができる。地震動データにおいても、時空間的な特徴を考慮した空間および動的モードを抽出することは、多次元時系列データからの現象理解の促進に貢献できる可能性がある。 本研究では、DMDを地震動の時系列データに適用し、地震イベントごとのケーススタディを実施することで、DMDの有用性を評価することを目的とする。

© 日本地震学会

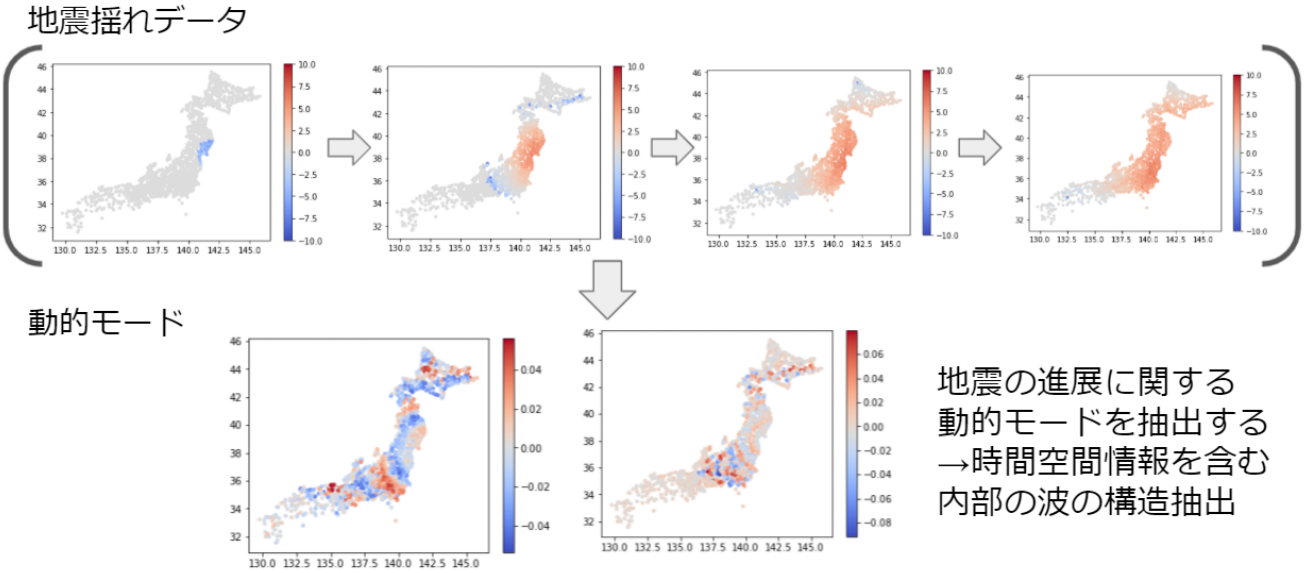


Figure: 地震揺れ時系列データから動的モード抽出の例

© 日本地震学会

地震学分野におけるブラックボックス最適化問題へのベイズ最適化の適用：セントロイドモーメントテンソルインバージョンでの例

Application of Bayesian Optimization to Black-Box Optimization Problem in Seismology: An Example of Centroid Moment Tensor Inversion

*久保 久彦[1]、吉田 圭佑[2]、木村 武志[1]
*Hisahiko KUBO[1], Keisuke YOSHIDA[2], Takeshi KIMURA[1]

1. 防災科学技術研究所、2. 東北大学理学研究科附属地震噴火予知研究観測センター
1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Tohoku University

システムfへの入力xに対して出力yが得られる状況を考える（y=f(x)）。fは往々にして数学的に陽に書き下すことができない。具体的には、ある入力に対する出力を得ることはできるが、fの全体像に関係する情報（例えば勾配など）を得ることができない状態である。その場合のf はブラックボックス関数と呼ばれる。このようなブラックボックス関数fの出力を最大化（もしくは最小化）にする入力パラメータx*を見つける問題（ブラックボックス最適化問題）を考える。機械学習の分野における代表的なブラックボックス最適化問題として、ハイパーパラメータの最適化があげられる。ハイパーパラメータはデータの学習からは決定されないパラメータのことであり、学習前に設定する必要がある。ニューラルネットワークであれば中間層の層数や各層のニューロン数、活性化関数の種類、最適化手法の種類などがそれにあたり、機械学習アルゴリズムのパフォーマンスを最大限に引きだすには最適なハイパーパラメータの組み合わせを探索する必要がある。一般的に、ブラックボックス最適化問題に関しては、考えられるパラメータ空間をしらみつぶしに調べるグリッドサーチや、パラメータ空間をランダムに調べていくランダムサーチなどによる探索が行われてきた。しかしながら、それらの手法は計算コストが高く、特にパラメータ数が大きい場合には最適値にたどり着けないことがある。そこで、効率的な探索手法として、ベイズ最適化を適用することが近年多くなっている。ベイズ最適化は、可能な限り少ない試行回数でブラックボックス関数fの性質を解明し、それを最適化することを目的とした機械学習手法である。具体的には、（１）それまでに探索した入力とその結果として得られた出力の情報から、ガウス過程などに基づいて関数fを近似する代理モデルを構築する、（２）代理モデルに基づく獲得関数を最大化する探索点の候補を求める、（３）探索候補点での試行を行い、それに対する出力を新たに得る、（４）新たに得られた情報から代理モデルを更新する、という一連の流れを繰り返す。

ブラックボックス関数最適化問題へのベイズ最適化の適用は、機械学習分野だけにとどまらず、多くの科学分野で取り入れられつつある（例えば、Shields et al. 2021）。本研究は、地震学分野におけるブラックボックス関数最適化問題へのベイズ最適化の取入れを試みるものであり、具体的な事例としてセントロイドモーメントテンソルインバージョンにおけるセントロイド位置の推定問題を取り上げる。点震源仮定が成り立つとき、ある地点で観測される地震波形は点震源におけるモーメントテンソルの組み合わせと線形の形で結びつけることができる。そのため点震源の位置（セントロイド位置）が既知の場合には、モーメントテンソルインバージョンは線形問題となり、簡単に解くことができる。しかしながらセントロイド位置も同時に求めるセントロイドモーメントテンソルインバージョンにおいて、求めたいパラメータ（モーメントテンソルとセントロイド位置）と地震波形の関係は非線形となり、これまでの研究ではグリッドサーチによるパラメータ探索が行われてきた。この非線形問題は観測波形と理論波形の残差を最小にするパラメータを推定する問題であるが、波形残差の関数を最大にするパラメータを求めるブラックボックス関数最適化問題とみなすことができる。ここではセントロイド位置に関して水平方向および深さ方向の探索を行うセントロイドモーメントテンソルインバージョンを考える。

© 日本地震学会

ベイズ最適化のツールとしてPreferred Networksによるオープンソースのハイパーパラメータ自動最適化フレームワークOptuna（Akiba et al. 2019）を用いた。Optunaはdefine-by-runスタイルのユーザAPIを有するpythonライブラリであり、各種のベイズ最適化アルゴリズムを備えているほか、様々な可視化や枝刈り、分散最適化の機能も有する。ベイズ最適化のアルゴリズムにはTree-structured Parzen Estimator (Bergstra et al. 2011, 2013)を用いた。

実解析を模擬した理論テストを試行的に行ったところ、ランダムサーチに比べてベイズ最適化の方が、同じ試行回数でより真値に近いセントロイド位置を推定することができることが確認された。

© 日本地震学会

ガウス過程によるCMTデータインバージョンの試み

CMT Data Inversion Using Gaussian Processes

*岡崎 智久[1]、深畑 幸俊[2]
*Tomohisa OKAZAKI[1], Yukitoshi FUKAHATA[2]

1. 国研）理化学研究所　革新知能総合研究センター、2. 京都大学 防災研究所
1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2. Kyoto Univ. Disaster Prevention Research Institute

地殻の応力状態を推定する応力インバージョン手法の一つであるCMTデータインバージョン(Terakawa and Matsu’ura, 2008)は、地震による応力解放が周辺の応力場に比例するという仮定の下で、CMT解から応力場の空間パターンを推定する。原論文では基底関数展開(Yabuki and Matsu’ura, 1992)によるインバージョン解析が適用された。

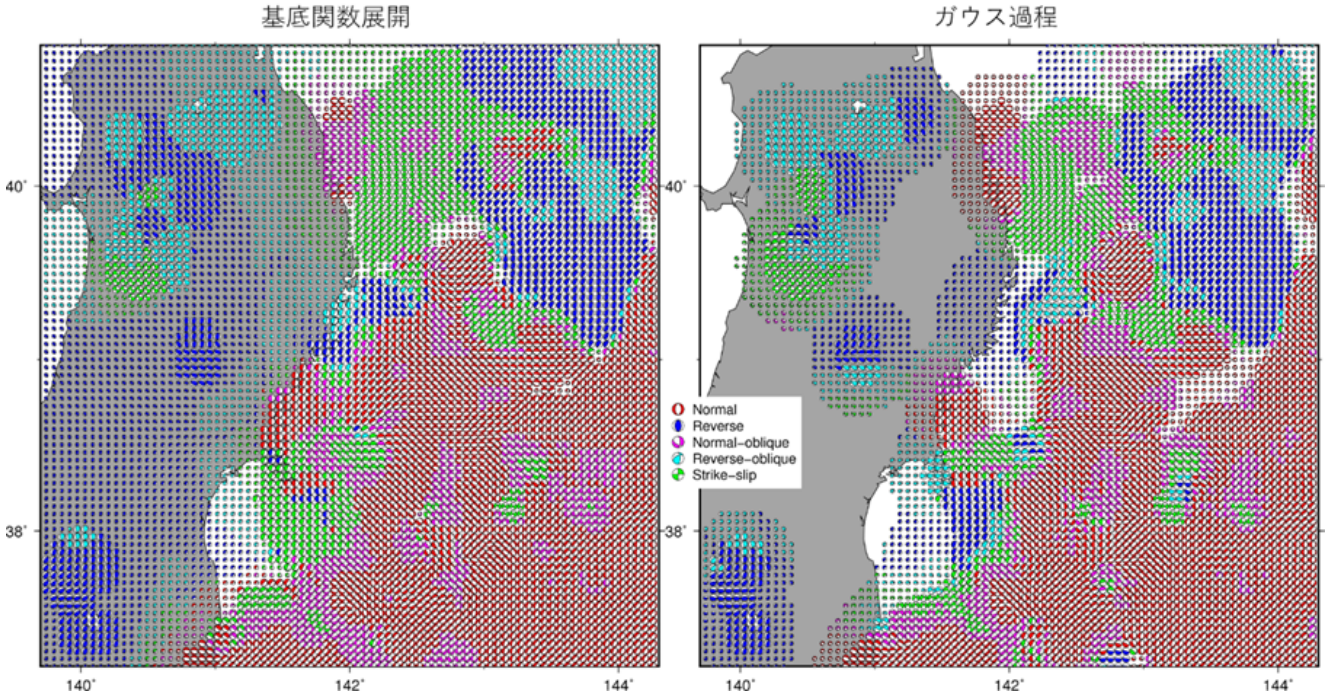
一般に基底関数展開では、モデル・パラメタ数が高次元データに対し指数的に増大し、計算量的に困難となる問題（次元の呪い）が知られている。回帰問題においては、モデル・パラメタが陽に現れないガウス過程回帰を用いることで、次元の呪いを回避できることが知られている。CMTデータは3次元空間内に分布するため、広域を解析対象とするとモデル・パラメタ数が顕著に増大し(Terakawa and Matsu’ura, 2010)、更に時間変化を取り入れた場合には、計算量的な困難が予想される。本研究では、ガウス過程によりCMTデータインバージョンを解くことで、この計算量的な困難の解決を試みた。

回帰問題ではデータと推定量が同一の物理量であるが、CMTデータインバージョンでは、データがCMT解である一方、推定量は応力場であるため、そのままではガウス過程が適用できない。そこで本研究では、(1)応力場の共分散関数からCMT解の共分散関数を導出、(2)応力場をCMT解の断層長0の極限として表現、という新たな定式化を開発することにより、この問題を解決した。

基底関数展開およびガウス過程を東北地方周辺のCMTデータに適用した。データの期間は、2011年東北沖地震後から2019年末である。その結果、(1)データのある領域では両手法は概ね調和的な結果を与えること、(2)データのない領域では、基底関数展開では周辺領域の推定値を内挿するが、ガウス過程では相関距離を超えると推定値が0に収束することを確認した（図1）。(2)の結果は、先験情報として、基底関数展開では滑らかな空間変化を課す一方、ガウス過程では平均0の事前分布を設定することに起因しており、ガウス過程を地球物理学データに適用・解釈する際の注意点といえる。さらに発表では、日本全国のCMTデータに対するガウス過程のインバージョン解析結果を示し、応力場の空間変化を概観する。

本研究では、基底関数展開を適用可能な問題設定において、ガウス過程による解析の動作確認および手法比較を行った。今後の展開としては、ガウス過程がより有効となる、時間軸を含む４次元CMTデータを解析することで、応力場の時間変化の抽出を試みる。

© 日本地震学会


基底関数展開
ガウス過程
40°
38°
140°
142°
144°
Normal
Reverse
Normal–oblique
Reverse–oblique
Strike–slip

© 日本地震学会

C会場 | 一般セッション：S09. 地震活動とその物理

2021年10月14日(木) 9:00 ~ 10:30 | C会場 C会場

AM-1

座長:麻生 尚文(東京工業大学)、上田 拓(東京大学)

9:00 ~ 9:15

[S09-01] **Spatio-temporal clustering of successive earthquakes: analyses of global CMT and F-net catalogs**

○Thystere Matondo Bantidi[1]、Takeshi Nishimura[1] (1.TOHOKU UNVERSITY)

9:15 ~ 9:30

[S09-02] Long-term probability earthquake forecasts based on the ETAS model

○庄 建倉[1] (1.統計数理研究所)

9:30 ~ 9:45

[S09-03] マイグレーションの見えない点クラスターから拡散的な特徴を抽出する

○麻生 尚文[1] (1.東京工業大学)

9:45 ~ 10:00

[S09-04] 地殻内地震活動とGNSS変位から推定される表層荷重の季節変動性

○上田 拓[1]、加藤 愛太郎[1]、Johnson Christopher[2]、寺川 寿子[3] (1.東京大学地震研究所、2.ロスアラモス国立研究所、3.名古屋大学, 大学院環境学研究科, 附属地震火山研究センター)

10:00 ~ 10:15

[S09-05] スロースリップイベントによる地震活動誘発効果を陽に組み込んだETASモデルの開発

○西川 友章[1]、西村 卓也[1] (1.京都大学防災研究所)

10:15 ~ 10:30

[S09-06] 南海トラフのプレート内地震活動度と長期的スロースリップイベントの時空間的関係

○三井 雄太[1]、上原 啓嗣[1]、小杉 一誠[2]、松尾 功二[3] (1.静岡大学理学部、2.静岡大学総合科学技術研究科、3.国土地理院)

Spatio-temporal clustering of successive earthquakes: analyses of global CMT and F-net catalogs

*Thystere Matondo Bantidi[1], Takeshi Nishimura[1]

1. TOHOKU UNVERSITY

The present study systematically examined the characteristics of successive earthquakes that are not so-called aftershocks but closely occur in space and time after the occurrence of a small, moderate or large earthquake in order to understand the triggering process. We use the Global Centroid Moment Tensor catalog for the period from 1976 to 2016. Shallow earthquakes with a moment magnitude, Mw, of larger than or equal to 5 are analyzed. We also use F-net catalog provided by NIED, Japan, for the period from 2001 to 2010 and analyze the earthquakes occurring around Japan islands with Mw<5.5. We separately analyze these two data set to clarify the characteristics of successive earthquake occurrence for a wide magnitude range of Mw>=3.5. We search the earthquakes that occur within a horizontal distance (*D*) and a lapse time (Ta) from a source event, and group them as a cluster. We then count the number of the clusters, which represents the successive earthquakes, for different *D* and Ta. To examine whether or not these successive earthquakes occur randomly, we compare the results with simulations in which earthquakes are set to randomly occur in time (but at the locations same with the estimated centroid). The results show that the number of clusters for the simulation for a given Ta and a magnitude range rapidly increase with *D* and merge with those for real data at a short distance called triggering distance. The triggering distance increases with increasing the magnitude of source event and decreases as the lapse time increases. This implies that the seismic activity turns to become the normal condition in which the occurrence time intervals of large earthquakes obey a Poisson distribution. From the analysis of both global CMT and F-net catalogs, we found that the triggering distance increases with being almost proportional to about 1/5 to 1/4 of the seismic moment of source earthquake. Such moment dependency is reconstructed from the simulated data that follow ETAS model. We further derive empirical scaling relations between the seismic moment and triggering distance from the equations in ETAS model, and the observed exponent of 1/5 to 1/4 are well predicted from the estimated ETAS parameters reported at various regions around the world. These consistencies suggest that we may evaluate the triggering probability of eartqhaukes by ETAS model.

Key words: Spatio-temporal clustering, successive occurrence, triggering distance, ETAS model.

© 日本地震学会

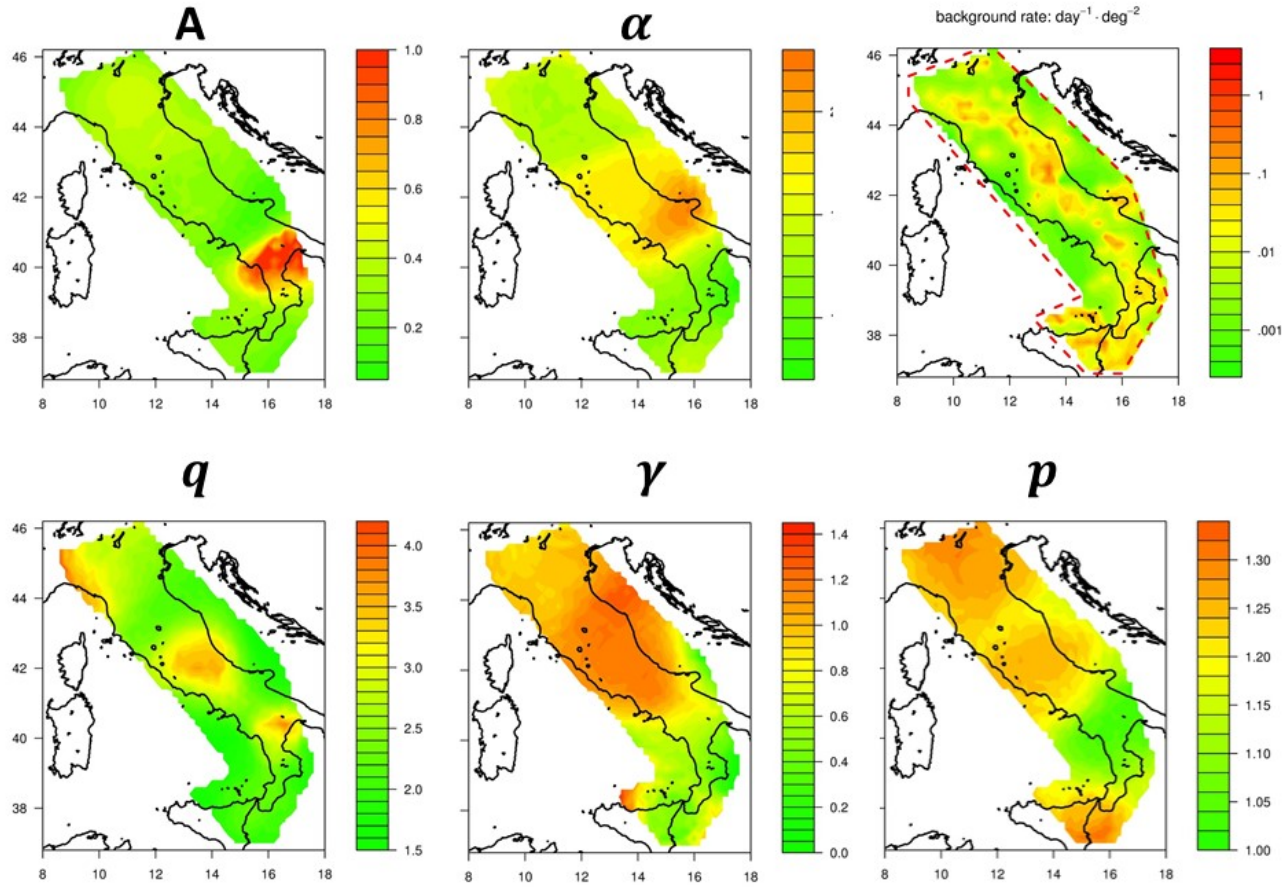
Long-term probability earthquake forecasts based on the ETAS model

*庄 建倉[1]
*Jiancang ZHUANG[1]

1. 統計数理研究所
1. The Institute of Statistical Mathematics

Based on the ETAS (epidemic-type aftershock sequence) model,
which is used for describing the features of short-term clustering of earthquake occurrence, this paper presents some theories and techniques related to evaluating the probability distribution of the maximum magnitude in a given space-time window, where the Gutenberg-Richter law for earthquake magnitude distribution cannot be directly applied. It is seen that the distribution of the maximum magnitude in a given space-time volume is determined in the long-term by the background seismicity rate and the magnitude distribution of the largest events in each earthquake cluster. The techniques introduced were applied to the seismicity in the Italy and Southern California regions.

Figure: Spatial variations of the ETAS parameters in the Italy region.



© 日本地震学会

マイグレーションの見えない点クラスターから拡散的な特徴を抽出する

Extracting Diffusional Characteristics in Stationary Clusters without Migration

*麻生 尚文[1]
*Naofumi ASO[1]

1. 東京工業大学
1. Tokyo Institute of Technology

震源分布の時空間的な特徴から、あたかも震源が移動しているように見えることをマイグレーションと呼ぶ。その物理的実体は、岩石や流体がその速度で移動しているのではなく、応力や流体圧がいわば群速度として伝わっていることによるものだと考えられる。こうしたマイグレーションは、拡散的な物理現象が背後にあることを示唆しており、地球物理学的に重要な知見を与える。しかしながら、マイグレーションの特定には、高い時空間分解能をもつ地震カタログが必要になる。本研究では、ETASモデル［Ogata, 1988］の改良を行うことにより、点状クラスターなど、マイグレーションの見られないような場合においても、拡散的な物理現象を示唆する特徴を抽出できる方法を提案する。
余震活動に関するマクロな経験則である大森則により、地震間のミクロな相互作用が与えられるという仮定のもと、地震活動を説明するモデルがETASモデルである。しかしながら、群発的な活動は、うまくETASモデルでは説明できないことが知られている。その本質的な原因は、群発的な活動に潜む拡散的な物理現象がETASモデルでは説明できないからであると考えられる。そこで、ETASモデルに指数関数的な項を加えることで、拡散的な物理現象も説明できる改良ETASモデルを提案する。実際に、群発的な活動として代表的な島根県東部の準火山型深部長周期地震に適用した。もとのETASモデルとAICを指標として比較すると、パラメータ数が増えるデメリットよりも、対数尤度が改善するメリットの方が大きく、より妥当なモデルとして示された。改良ETASモデルに基づくシミュレーションも行うことで、地震発生間隔分布などの特徴も再現することができた。
以上のように、群発的な活動も説明できるような改良ETASモデルを提案した。この方法を用いれば、時空間的なマイグレーションが見えなくても拡散的な特徴を抽出できるため、地震学や火山学においてさらなる活用が期待される。

© 日本地震学会

地殻内地震活動とGNSS変位から推定される表層荷重の季節変動性

Seasonal variations in crustal seismicity and surface load estimated from GNSS displacement

*上田 拓[1]、加藤 愛太郎[1]、Johnson Christopher[2]、寺川 寿子[3]
*Taku Ueda[1], Aitaro Kato[1], Christopher W Johnson[2], Toshiko Terakawa[3]

1. 東京大学地震研究所、2. ロスアラモス国立研究所、3. 名古屋大学, 大学院環境学研究科, 附属地震火山研究センター
1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Los Alamos National Laboratory, 3. Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

地震活動度は、降水量や灌漑などの地表や地下浅部に応力変化や強度変化をもたらす現象と相関があることが既往研究で指摘されている(e.g., Heki, 2003; Amos et al., 2014)。例えば、カリフォルニアでは地下水荷重の年変動に対応して、地震活動が季節変動を示す(e.g., Amos et al., 2014; Johnson et al., 2017)。Johnson et al. (2017)ではGPSの鉛直変位から地下水荷重が断層面に与える応力変化を計算し、カリフォルニアでの地震活動が剪断応力が増加するときに発生しやすいことを示した。日本でも地震活動の季節変動性が指摘されており、積雪荷重や降水との関係が議論されているが(e.g., Heki, 2003; Ueda and Kato, 2019)、原因として考えられる表層荷重による応力変化と直接比較した研究はほとんど行われていない。
本研究では東北地方内陸部において、地表の上下動変位データから荷重の空間分布を推定し、表層荷重による地下での応力変化と地震の発生時期との比較・検討を行った。まず、GEONETのF5解(2003/08/14-2010/12/31)の上下動成分をBedford and Bevis (2018)の手法を用いてトレンド成分、地震等による過渡的な変化、季節変動成分、残差に分離した。その後，各観測点における季節変動成分と残差を足し合わせた時系列データから，それらの中央値をcommon mode errorとして抽出した。上下動変位のデータからcommon mode errorを除いたデータに対して、再度Bedford and Bevis (2018)の手法を適用し、季節変動成分の推定を行った。推定した季節変動成分を基に、Johnson et al. (2017)の手法を用いて、月ごとの表層荷重の空間分布を推定した。その結果，積雪量の大きな日本海側の地域において冬に増加し、春に減少する荷重分布が得られた。
地殻内地震発生域の応力場(Terakawa and Matsu'ura, 2008; 2010)における最大せん断応力面をレシーバー断層として表層荷重が生み出すクーロン応力の地震発生時の変化を計算し、地震発生のタイミングと比較した。気象庁一元化処理震源カタログの1980-2010年のM3以上の地震を使用した。HIST-ETASモデル(Ogata, 2004)を用いて、各地震が背景地震活動度として発生した確率で重み付けすることで、余震活動を取り除いた背景地震活動と表層荷重による応力変化との関係を評価した。その結果、東北地方内陸部における背景地震活動はクーロン応力が高い時に発生しやすいことがわかった。

謝辞：GNSSの上下動変位のデータは国土地理院のGEONETのF5解を使用しました。上下動変位の季節変動成分の抽出にGRATSID (Bedford and Bevis, 2018)を使用しました。気象庁の一元化処理震源カタログを使用しました。HIST-ETASモデルのパラメータ推定にOgata et al. (2021)のコードを使用しました。記して感謝いたします。

© 日本地震学会

スロースリップイベントによる地震活動誘発効果を陽に組み込んだETASモデルの開発

Development of an ETAS model that explicitly incorporates the triggering effect of slow slip events on seismicity

*西川 友章[1]、西村 卓也[1]
*Tomoaki NISHIKAWA[1], Takuya Nishimura[1]

1. 京都大学防災研究所
1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

世界各地の沈み込み帯プレート境界では、スロースリップイベント（Slow slip event; SSE）と呼ばれる低速な断層滑り現象が発生する（Obara & Kato, 2016）。スロースリップイベントは、ときに大地震や群発的な地震活動を誘発することが知られており（Ozawa et al., 2003; Radiguet et al., 2016）、各地の沈み込み帯では、SSEと地震活動の因果関係の解明が進められている（Kato et al., 2012; Nishikawa et al., 2021）。

その一方、現在、世界で標準的に使用されている地震活動統計モデルであるEpidemic-type aftershock-sequence (ETAS) モデル（Ogata, 1988）には、SSEが地震活動に及ぼす影響（誘発効果等）が全く考慮されていない。そのため、プレート境界でSSEが発生した際、ETASモデルに基づく地震発生確率予測の結果と、実際に観測される地震活動が大きく乖離するという問題がある（Llenos et al., 2009）。この問題を回避するため、Okutani & Ide (2011)は、SSE発生期間と非SSE発生期間に、それぞれ異なるETASパラメータを割り当てることで、SSEに起因する地震発生レートの上昇を既存のETASモデルの枠組みの中で表現した。しかし、このモデルにはSSEの震源特性（モーメントマグニチュードやモーメントレートなど）が組み込まれていないため、SSEのモーメントレートと地震発生レートの関係や、SSEのマグニチュードと誘発される地震数の関係等に関する重要な関係式は、このモデルからは直接は得られない。つまり、「あるマグニチュードのSSEが発生した際、いくつの地震が誘発されるか？」という基本的な問いに、このモデルは答えることができない。

そこで、本研究は、既存のETASモデル（Ogata, 1988）にGlobal Navigation Satellite System (GNSS) 観測データから推定したSSEのモーメントレートを陽に組み込み、新たなモデル（SSE-informed ETAS model）を作成した。このモデルは、SSEのモーメントレートと地震発生レートに線形な関係（或いはべき乗の関係）を仮定し、SSEのモーメントレートと地震発生レートの比例定数（或いはSSEの地震モーメントと地震発生数の比例定数）を新たなETASパラメータとして直接推定する。

我々は、新たなモデルをニュージーランド・ヒクランギ海溝浅部で発生した3つのSSE（2006年8月Mw 6.8、2008年3月Mw 6.6、2011年6月Mw 6.7）とそれらの周辺で発生したM 2.5以上の地震に適用した。2006年と2011年のSSEはヒクランギ海溝中央部南より（南緯40.5度付近）に、2008年のSSEは中央部北より（南緯39度付近）に位置する。各SSEのモーメントレートはGeoNetが公開しているGNSS座標時系列データとTDEFNODE（McCaffrey, 2009）を用いて事前に推定した。

その結果、2006年と2011年のイベントでは、赤池情報量規準（Akaike information criterion; AIC）が従来のETASモデルと比べて大きく減少し、新たなモデルがより良いモデルであることが示された。また、新たに導入したパラメータ η（SSEのモーメントレートと地震発生レートの比例定数）から、ちょうど１つの地震を誘発するのに必要なSSEのマグニチュードが計算でき、2006年のSSEではMw 6.0/event（95% CI: Mw 5.8/event

© 日本地震学会

~ Mw 6.3/event）、2011年のSSEではMw 5.5/event（95% CI: Mw 5.4/event ~ Mw 5.7/event）と推定された。その一方、2008年のSSEでは、AICはむしろ増加し、従来のETASモデルのほうが良いモデルであった。

ヒクランギ海溝沿いの群発地震活動に関する先行研究（Nishikawa el al., 2021）では、SSEとそれに伴う群発地震活動に数日から1ヶ月程度の発生時間のずれがあることが報告されている。これをふまえ、SSEのモーメントレートに対する地震発生レートの時間遅れを許容したモデルと許容しないモデルを比較した。その結果、2006年のSSEでは、18日の時間遅れがあるモデルが、時間遅れのないモデルと比べてAICが2.7減少し、時間遅れを許容したモデルがより良いモデルあることが示唆された。加えて、SSEのモーメントレートと地震発生レートを結ぶ関係式のべき指数を1（線形）としたモデルと、べき指数を1以外としたモデルの比較も行なったが、べき指数1（線形）のモデルに比べ、AICが顕著に減少（2以上の減少）することはなかった。

本研究の新たなモデルによって、SSEに起因する地震発生レートの上昇を考慮した地震発生確率予測が可能となった。また、本モデルによって、SSEのモーメントレートと地震発生レートの関係や、SSEのマグニチュードと誘発される地震数の関係等に関する重要な関係式を得ることができた。加えて、本モデルは、SSEのモーメントレートに対する地震発生レートの時間遅れや、SSEのモーメントレートと地震発生レートを結ぶ関係式の関数形（べき指数等）に関する定量的な議論を可能にした。今後、本モデルを各地の沈み込み帯沿いのSSE及びそれに伴う地震活動に適用することで、各地の地震活動の予測精度向上や、SSEに伴う地震活動の特徴の定量化及びその地域差の解明につながると期待される。

© 日本地震学会

南海トラフのプレート内地震活動度と長期的スロースリップイベントの時空間的関係

Spatio-temporal relationship between intraplate seismicity and long-term slow slip events along the Nankai Trough

*三井 雄太[1]、上原 啓嗣[1]、小杉 一誠[2]、松尾 功二[3]
*Yuta MITSUI[1], Keiji UEHARA[1], Issei KOSUGI[2], Koji MATSUO[3]

1. 静岡大学理学部、2. 静岡大学総合科学技術研究科、3. 国土地理院
1. Faculty of Science, Shizuoka University, 2. Graduate School of Science, Shizuoka University, 3. Geospatial Information Authority of Japan

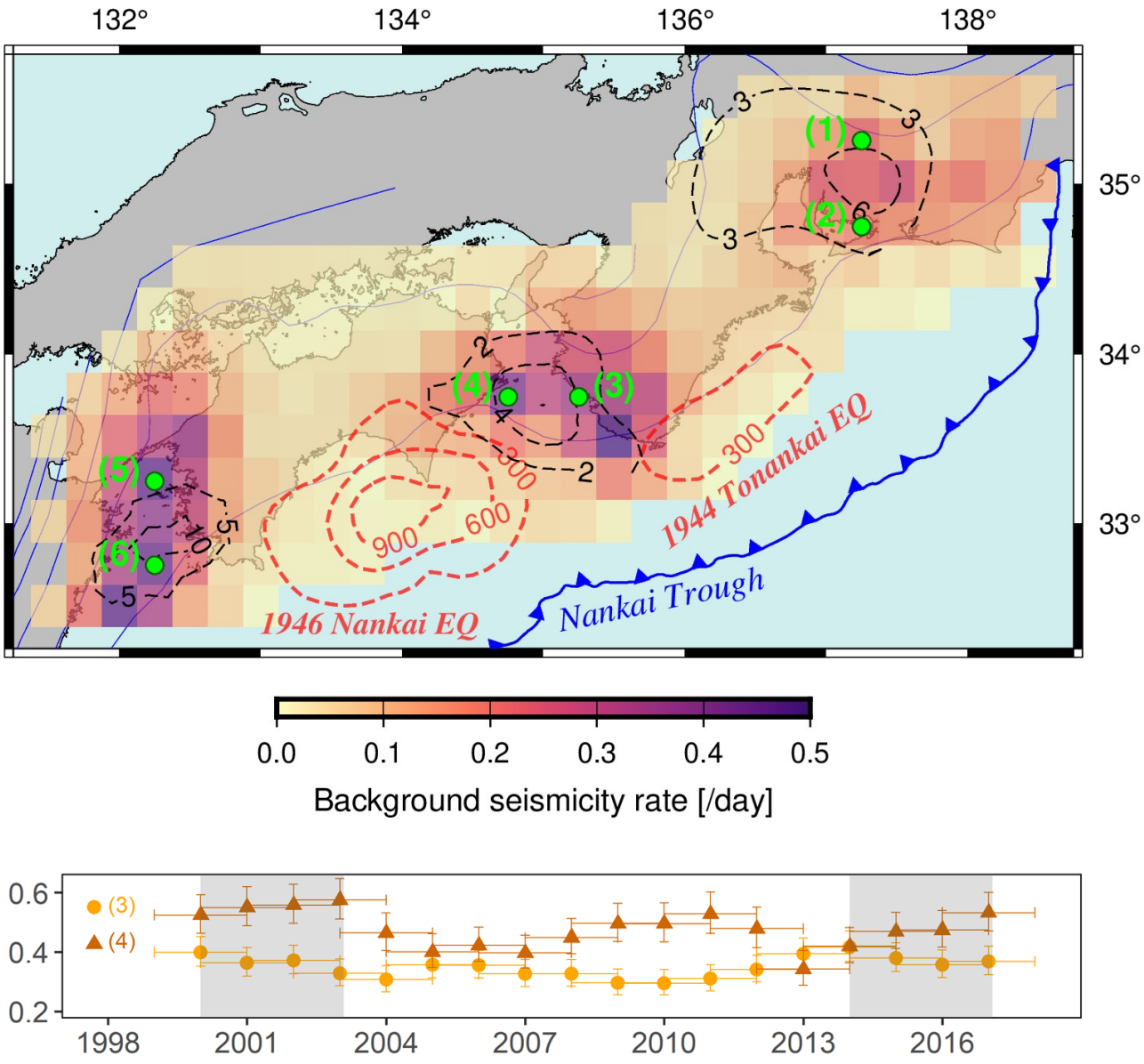
沈み込み帯でのファスト地震とスロースリップとの間には、多種類の関係があると考えられる。一例として、スロースリップ発生時に地震活動が活発化することが報告されてきた(Hirose et al., 2012; Passarelli et al., 2021)。この性質には沈み込み帯による多様性があること、また、プレート境界地震に限らずプレート内地震まで考慮すべきであることも、指摘されてきた(e.g., Nishikawa et al., 2021)。

本研究では、南海トラフ沈み込み帯を対象として、ファスト地震とスロースリップの関係を探る。まず、気象庁の震源カタログ(1998-2017年)より、沈み込むプレート境界から鉛直方向15km以内にある地震を抽出した。M1以上の地震でG-R則が成り立っていることを確認した(b値0.82)。M3以上の初動発震機構解がほとんどプレート内地震と判断できるものだったため、M1以上の地震もほぼプレート内地震と仮定できる。これらの地震に対して、ETASモデル(Ogata, 1988)に基づく背景地震活動率の推定を行った。

全期間を通しての背景地震活動率には、along-strike方向の不均質が見られた。具体的には、浜名湖から岡崎平野の下、紀伊水道から紀伊半島南端の下、豊後水道下の3箇所で、高い値となった。この3か所は、M6.5を超える長期的スロースリップイベント(L-SSE)の発生域(Ochi and Kato, 2013; Kobayashi, 2017; Yoshioka et al., 2015)と空間的に良く対応している。これらはまたフリーエア重力異常(Matsuo and Kuroishi, 2020)の低重力域とも対応している。さらに、背景地震活動率の時間変化についても推定を行ったところ、紀伊水道の西部で、2回のL-SSE期間中と2010年頃に地震活動率が増大していた。岡崎平野の北部でも若干ながら同様の傾向があった。一方で、L-SSEとの時間的対応が明確でない場所も存在し、短波長不均質が見られた。

本結果は、第一に「プレート内地震が活発な領域でL-SSEが発生する」こと、細かく見ると「L-SSE発生に伴ってプレート内地震活動が揺らぐ」場合もあることを表す。前者については、低重力異常から想定される断層荷重の減少やスラブ傾斜角変化によるせん断応力擾乱(Mitsui and Hirahara, 2006)、後者についてはスラブ流体(圧)移動の影響が考えられる。

© 日本地震学会


132°
134°
136°
138°
35°
34°
33°
(1)
(2)
(3)
(4)
(5)
(6)
3
3
3
6
2
4
2
300
300
600
900
10
5
5
1944 Tonankai EQ
1946 Nankai EQ
Nankai Trough
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
Background seismicity rate [/day]

0.6
0.4
0.2
(3)
(4)
1998
2001
2004
2007
2010
2013
2016

© 日本地震学会

C会場 | 一般セッション：S09. 地震活動とその物理

2021年10月14日(木) 11:00 ~ 12:15 | C会場 C会場

AM-2

座長:遠田 晋次(東北大学)、福田 孔達(東京大学)

11:00 ~ 11:15

[S09-07] ETASモデルの時系列におけるイベント間間隔についてのベイズ更新に基づいて推定されたイベント発生時刻の統計的評価

○田中 宏樹[1]、梅野 健[1] (1.京都大学大学院　情報学研究科)

11:15 ~ 11:30

[S09-08] 東北地方太平洋沖地震の長期余震活動　−震源域の静穏化と周辺部の継続的活発化

○遠田 晋次[1]、スタイン ロス[2] (1.東北大学災害科学国際研究所　災害評価・低減研究部門、2.テンブラー)

11:30 ~ 11:45

[S09-09] 混合分布による南海トラフ深部低周波微動の規模分布

○岩田 貴樹[1]、平松 良浩[2] (1.県立広島大学、2.金沢大学)

11:45 ~ 12:00

[S09-10] モーメント比を用いた強度情報抽出の試み

○松本 聡[1]、光岡 郁穂[2]、飯尾 能久[3]、酒井 慎一[4]、加藤 愛太郎[5] (1.九州大学大学院理学研究院地震火山観測研究センター、2.九州大学大学院理学府、3.京都大学防災研究所、4.東京大学大学院情報学環・学際情報学府、5.東京大学地震研究所)

12:00 ~ 12:15

[S09-11] セルオートマトンを用いた時定数の競合による地震モデル

○福田 孔達[1]、波多野 恭弘[2]、望月 公廣[1] (1.東京大学地震研究所地震予知研究センター、2.大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻)

ETASモデルの時系列におけるイベント間間隔についてのベイズ更新に基づいて推定されたイベント発生時刻の統計的評価

Statistical Evaluation of Occurrence Time of Forthcoming Event Estimated Based on Bayesian Updating for Inter-Event Times in Time-Series of ETAS Model

*田中 宏樹[1]、梅野 健[1]
*Hiroki TANAKA[1], Ken Umeno[1]

1. 京都大学大学院　情報学研究科
1. School of Informatics, Kyoto University

地震の時間間隔分布のマグニチュード閾値依存性を検討する上で, 異なるマグニチュード閾値での時間間隔の間の条件付き確率$p_{mM}(\tau_m|\tau_M)$を用いる方法が提案されている[1]. この条件付き確率は, マグニチュードの時系列に異なる二つの閾値(M,m(<M))を設定したとき, 上部閾値(M)における長さτ_Mの時間間隔に含まれるという条件のもとで下部閾値(m)において長さτ_mの間隔が見出される確率密度関数である.

この条件付き確率についてのベイズの定理を考えることで, 下部閾値においてある長さτ_mの間隔が見出された時に, それを含む上部閾値での間隔の長さについての逆確率密度関数$p_{Mm}(\tau_M|\tau_m)$を導ける. さらに, イベント間に相関のない重み付き点過程（ETASモデルにおけるバックグラウンドサイスミシティ）について, このベイズの定理をベイズ更新に拡張し, 複数の下部閾値での間隔$\{\tau_m^{(1)},...,\tau_m^{(n)}\}$が見出された場合の逆確率密度関数$p_{Mm}(\tau_M|\tau_m^{(1)},...,\tau_m^{(n)})$とその近似関数が導ける. 後者の近似関数は条件付き確率の積の形を含む主要な項と補正項からなり, 特に主要な項は数値計算する上で便利な形をしている[2].

本発表ではこれらの結果に基づいて, イベント間に相関のあるETASモデルの時系列にベイズ更新の方法を適用して, 下部閾値での間隔の情報から上部間隔の長さを推定する. その推定値と実際の発生時刻との比較を行い, ベイズ更新の方法が予測を行う上でどの程度有効であるかについて統計的に検討した結果について報告する.

まず生成したETASモデル[3]の時系列にベイズ更新を適用することで, 逆確率密度関数の近似関数における補正項は最頻値にあまり影響しないことを示す. このことから, 数値計算のしやすい近似関数の主要項について, その最頻値を上部間隔の推定値として用いる. この推定値と実際の発生時刻との間の相対誤差を用いて各更新時点における推定の良さを決め, 良い推定が実際の発生時刻よりも十分に前から続いていることを予測の有効性として評価を行った. その結果, 予測の有効性は時系列の定常性と関係があり, 時系列中で定常的な活動が支配的である大イベントの直後または十分時間が経過した場合により有効な予測ができることが示された.

[1] H. Tanaka and Y. Aizawa, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 024004 (2017).
[2] 田中宏樹, 梅野健, 日本地震学会秋季大会, S09-25 (2020).
[3] Y. Ogata, J. Am. Stat. Assoc. 83, 9 (1988).

© 日本地震学会

東北地方太平洋沖地震の長期余震活動　–震源域の静穏化と周辺部の継続的活発化

Long-term features of the 2011 Tohoku-oki aftershocks: Central shutdown and surrounding activation

*遠田 晋次[1]、スタイン ロス[2]
*Shinji TODA[1], Ross S Stein[2]

1. 東北大学災害科学国際研究所　災害評価・低減研究部門、2. テンブラー
1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Temblor, Inc.

2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）から10年が経過したにもかかわらず，依然として余震と考えられる地震活動が続いている．特に，２月13日には福島県沖でM7.3のスラブ内地震（深さ55km）が発生し，蔵王町，国見町などで最大震度6強を記録した（気象庁，2021）．その後も，3月20日に宮城県沖でM6.9（深さ59km），5月1日に同じく宮城県沖でM6.8（深さ51km）のプレート境界型地震が発生した．東北沖震源域周辺の今後の地震ハザード評価に資するため，本発表では余震活動の継続性について検討する．

【最近５年間（2016-2021）と東北沖地震前の比較】まず東北沖地震からの10年を５年区切りで前半（2011/3/11-2016/3/10）と後半（2016/3/11-2021/3/10）に分け，余震活動の継続性の観点から，後半の活動に注目した．特に東北沖地震前（1998/1/1-2011/3/10）を常時地震活動（background seismicity）と仮定し，後半の活動の変化を検討した．その結果を図１aに示す．常時地震活動に比べて数倍～数十倍の余震活動域が震源域を囲むようにドーナッツ状に広がる．特に，三陸沖～福島沖近海と海溝軸～その東側（アウターライズ）が顕著である．対称的に，東北沖地震の震源域でも特に大すべり域（例えば，Iinuma et al., JGR, 2012）で顕著に地震活動が低下している．この震源域での活動低下については，Kato & Igarashi (GRL, 2012)による報告もあるが，後半の活動では静穏化がより明瞭になっている．また，プレート境界だけではなく震源域のスラブ内にも広がっているようにみえる（図１c）．

【東北沖本震と大規模余震によるクーロン応力モデル】次に，これらの地震活動度変化を説明するために，クーロン応力変化と速度および状態依存摩擦則（Dieterich, JGR, 1994）を組み合わせた地震活動予測モデル（以下，クーロン応力モデル．Toda et al., JGR, 1998）を適用した．クーロン応力変化は本震直後の地震活動を概ね説明するが（Okada et al., EPS, 2011; Toda et al., EPS, 2011），今回は応力ー地震活動応答の地域性や時系列を検討するため，前段のモデルを改良したToda & Stein (BSSA, 2020)の手法を導入した．同手法の特徴は，レシーバ断層として常時地震活動時のメカニズム解（ここでは防災科研，F-net）を用い，本震だけではなく前半５年間に発生したM6.5余震による応力変化も考慮して，状態変数を時空間的に時々刻々に変化させることにある．また，実際に観測された余震発生レートから摩擦則パラメータ・常時地震レートを学習・最適化するなどの工夫を行っている．さらに，同モデルではDieterich (1994)の余震継続期間taを一定にしても（ここでは20年），多様なレシーバ断層上の応力変化の不均質分布により，地域によってこの初期値が大きく変動するのも特徴である．前半５年間までの震源データを用いて後半５年間の地震活動度変化をレトロスペクティブ（retrospective）に予測したものを図１bに示す．実際の観測結果（図１a）と概ね整合することがわかる．三次元的にみると，例えば福島県ー福島県沖を横断する断面図（図１c）では，震源域の全面的静穏化とスラブ内地震，アウターライズ地震の継続的な活発化がわかる．スラブ内地震，アウターライズ地震の活動の持続化は，応力載荷速度（secular stressing rate）の速いプレート境界に比較して，プレート内の載荷速度が遅いことによる応力伝播効果の長期化とも考えられる（Stein & Liu, Nature, 2009; Toda & Stein, BSSA, 2018）．本年２月13日のスラブ内地震もこの長期的余震域で発生した．また，1896年明治三陸地震（プ

© 日本地震学会

レート境界型）と1933年昭和三陸地震（アウターライズ型）のペアにみられるように今後長期にわたって大規模なアウターライズ地震の発生も危惧される．

謝辞：地震活動の解析・モデリングにあたっては気象庁一元化震源カタログ（暫定も含む），防災科学技術研究所F-netメカニズム解を使用した．

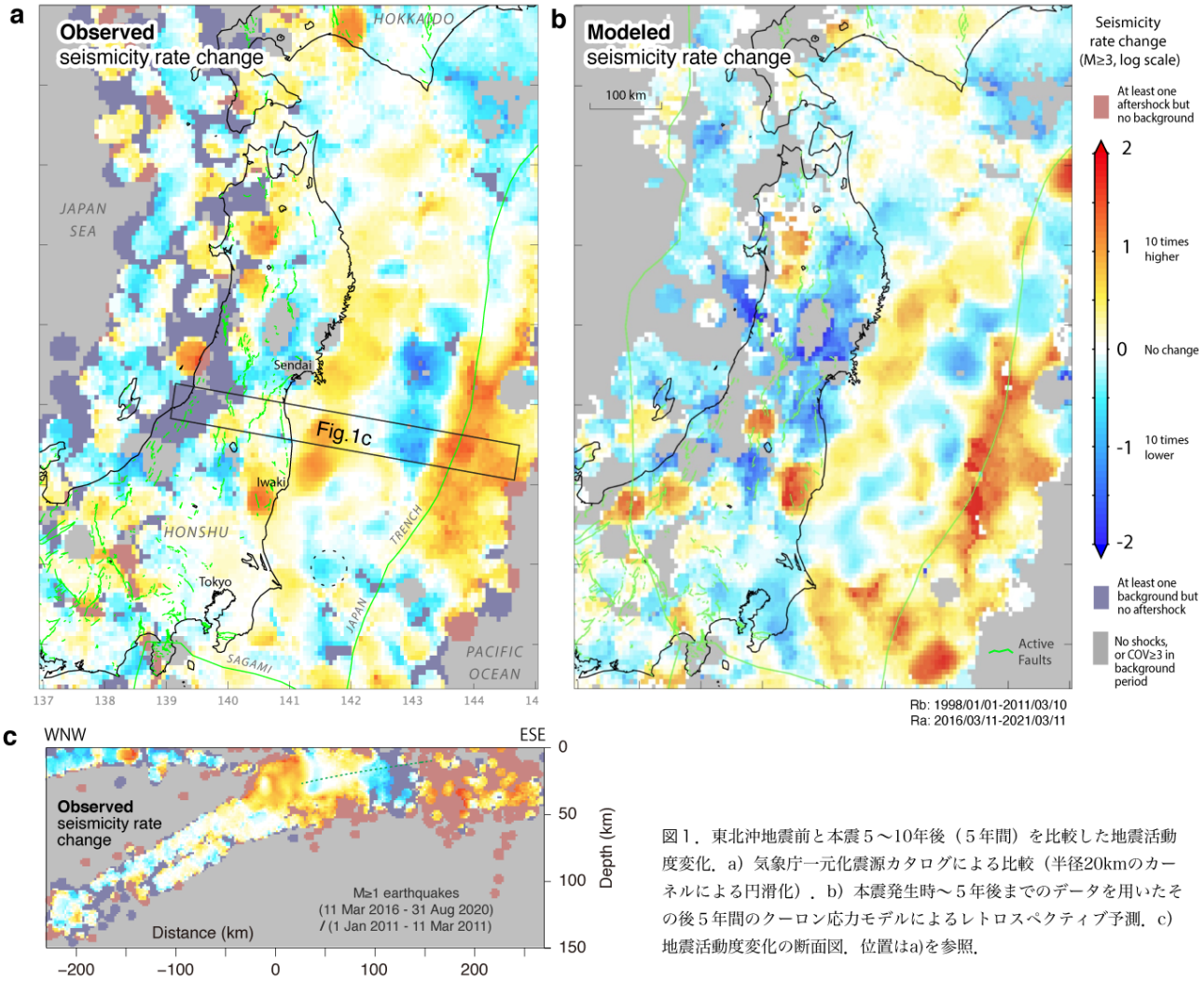


図１．東北沖地震前と本震５～10年後（５年間）を比較した地震活動度変化．a）気象庁一元化震源カタログによる比較（半径20kmのカーネルによる円滑化）．b）本震発生時～５年後までのデータを用いたその後５年間のクーロン応力モデルによるレトロスペクティブ予測．c）地震活動度変化の断面図．位置はa)を参照．

© 日本地震学会

混合分布による南海トラフ深部低周波微動の規模分布

Event size distribution of deep low-frequency tremors in the Nankai Trough modelled with a mixture distribution

*岩田 貴樹[1]、平松 良浩[2]
*Takaki IWATA[1], Yoshihiro Hiramatsu[2]

1. 県立広島大学、2. 金沢大学
1. Prefectural University of Hiroshima, 2. Kanazawa University

深部低周波微動（DLF）を含むスロー地震の規模が従う分布としてはベキ分布 [例えばBostock et al., 2015, JGR, doi:10.1002/2015JB012195] や指数分布 [例えばChestler & Creager, 2017, JGR, doi:10.1002/2016JB012717] が提案されている．さらにより複雑な分布としてベキ分布と指数分布を掛け合わせたtapered Gutenberg-Richter (GR)則 [Vere-Jones et al., 2001, GJI, doi:10.1046/j.1365-246x.2001.01348.x] を用いた研究もある [Nakano et al., 2019, GRL, doi:10.1029/2019GL083029]．これらの分布に対し，本研究では南海トラフの深部低周波微動に対して，ベキ分布と指数分布を適当な比率で足し合わせた混合分布を適用した例を示す．

適用した確率分布は以下の通りである：

（モデルA）$p_A(M_0) \propto [\gamma M_0^{-b}/C_1+(1-\gamma)\exp(-\beta M_0)/C_2]q(M_0)$

（モデルB）$p_B(M_0) \propto [\gamma(1-r(M_0))M_0^{-b}/C_1+(1-\gamma)r(M_0)\exp(-\beta M_0)/C_2]q(M_0)$

ここでM_0は地震モーメントである．C_1およびC_2は各項のγあるいは$1-\gamma$を除いた部分をM_0で積分して1になるようにするための正規化定数である．γはベキ分布と指数分布に従うイベントの個数比である．モデルAではベキおよび指数分布の混合比がM_0に依存しておらずγがそのまま混合比に相当する．これに対し，モデルBでは混合比自体がM_0に依存して変化することが仮定されている．$r(M_0)$は正規分布の累積分布関数でありM_0が小さければ0，大きければ1に近づく．これによりM_0の小さい方でベキ分布，M_0の大きい方で指数分布に近づくような確率分布を表現することが出来る．さらに$q(M_0)$はあるM_0におけるイベント検知率であり，Ogata & Katsura [1993, GJI, doi:10.1111/j.1365-246X.1993.tb04663.x] やIwata [2013, GJI, doi:10.1093/gji/ggt208]と同様，これも正規分布の累積分布関数を用いることとする．通常の解析ではSSEが完全に取れているM_0以上の範囲のみを解析するが，$q(M_0)$を導入することでSSEの記録が不完全であるM_0の小さな範囲も含めた解析が可能となる．

解析に用いたデータはDaiku et al. [2018, Tectonophys., doi:10.1016/j.tecno.2017.11.016]（以下D2018）によって得られたものに基づいた．D2018では南海トラフに沿った東海地方から四国地方を5つの領域に分け，各領域で観測されたDLFのapparent momentを求めた．期間は2002年4月から2013年7月までであり，各領域で219～663個のDLFのapparent momentが得られている（領域分けについてはD2018のFigs.2および3を参照されたい）．本研究ではNakamoto et al. [2021, JGR, doi:10.1029/2020JB021138] に倣い，D2018によるDLFのapparent momentに$4\pi\rho V_s^3$（ρは媒質密度，V_sはS波速度）を掛けS波の平均的なradiation pattern係数で割ったものをM_0として解析を行う．なお，apparent momentをM_0に変換する際に必要となる値はMaeda and Obara [2009, JGR, doi:10.1029/ 2008JB006043] のものを用いた．

各領域のデータに対して上に示した2つのモデル（確率分布）を適用した．合わせて従来研究で用いられたベキ分布・指数分布・tapered GR則も適用した．各モデルのパラメータは最尤法で推定し，得られた最大対数尤度の値からAIC（赤池情報量規準）[Akaike, 1974, IEEE Trans. Auto. Control, doi: 10.1109/TAC.1974.1100705] を求めて計5つのモデルに関するモデル比較を行った．

結果例として紀伊半島北部および中央・西四国に対する結果を図に示す．紀伊半島北部（図(a)）については従来研究の3モデル（青・水色・紫点線）および本研究のモデルA（緑実線）は観測されたM_0の（相補）累積分布関数（黒実線）全体には合っていない．それに対し，モデルB（赤実線）は観測されたM_0の累積分布関数

© 日本地震学会

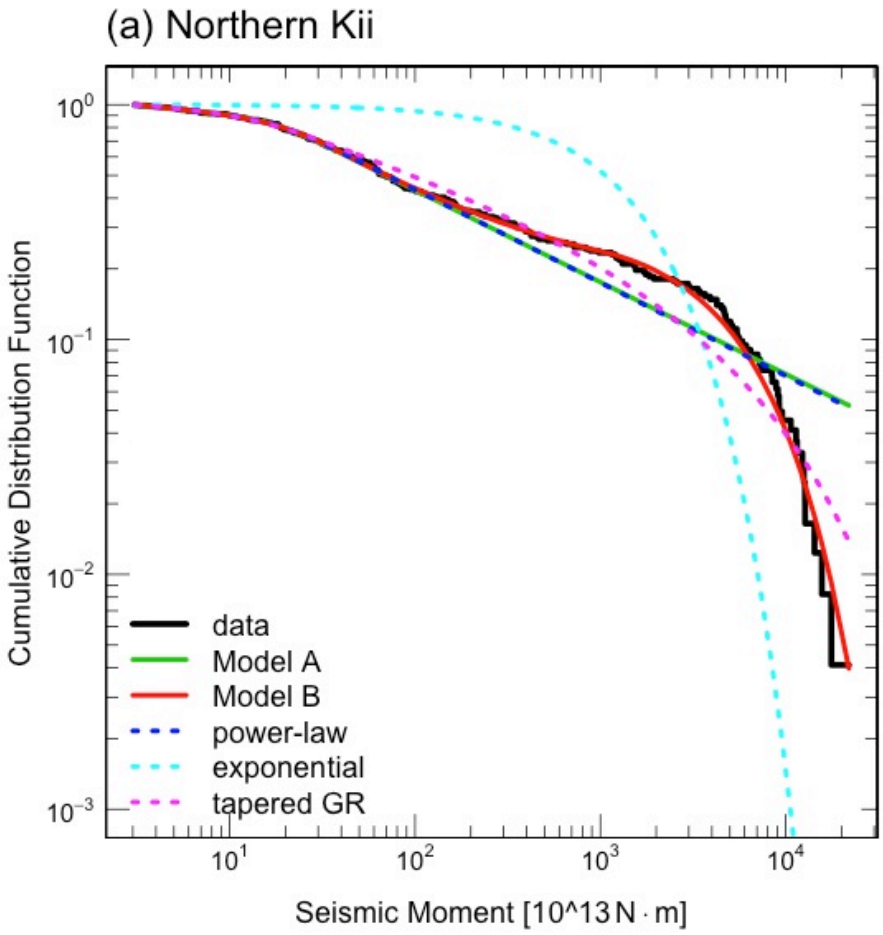
に比較的良く適合している．実際，AICの値でも2番目に良かった（小さかった）tapered GR則に比べて22.0小さく，有意に優れていると言える．中央・南紀伊および東四国でも同様の結果となった．

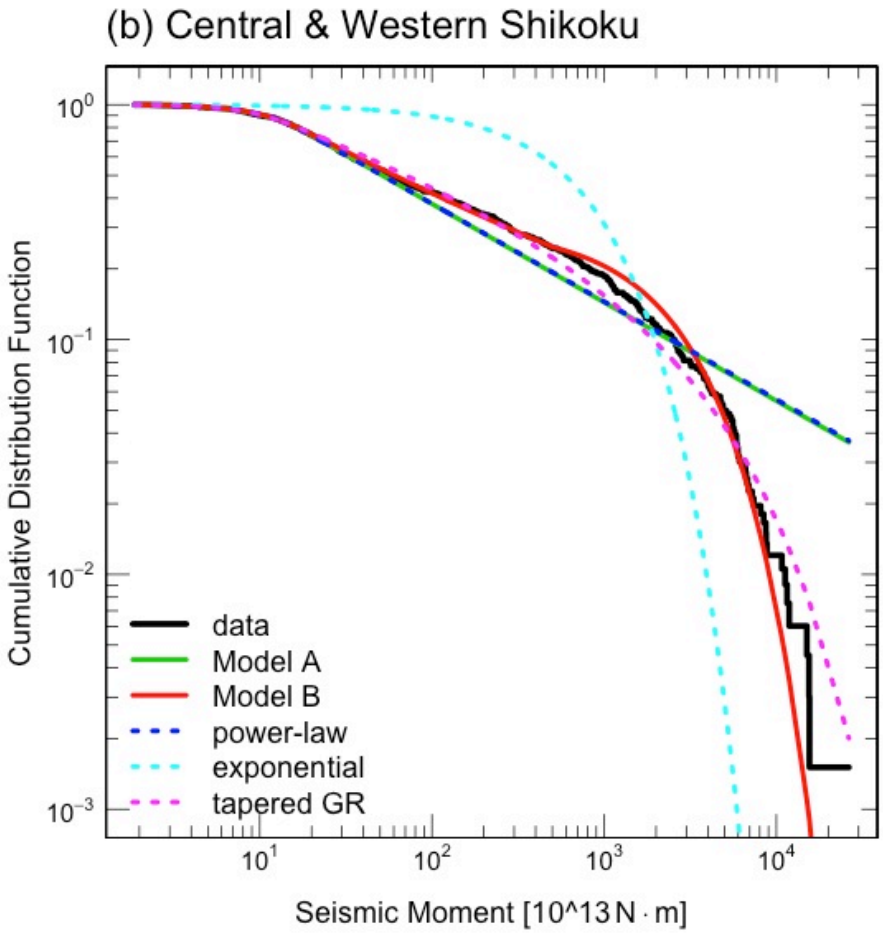
一方，中央・西四国については，モデルBが観測されたM_0の累積分布関数に対して部分的に合っていない．tapered GR則（紫点線）も同様であるが，AICの値ではtapered GR則の方が3.7小さく，こちらの方が有意によい．東海地域においてもtapered GR則のAICの値がモデルBのものよりも小さかった（但し，値の差は0.7であり「有意に差がある」とまでは言えない）．

以上のように，本研究で提案した混合分布が優れている場合とtapered GR則が優れている場合とが混在している．現段階では5領域を調べただけであり，今後は解析事例を増やすなどして差異が生じる要因を調べるといったより踏み込んだ解析が必要と考えられる．

図：観測されたM_0および最尤推定値に基づく5モデルとの比較．比べやすくするため（相補）累積分布関数に直してある．(a) 紀伊半島北部，(b) 中央・西四国に対するもの．

© 日本地震学会


(a) Northern Kii
Cumulative Distribution Function
10^0
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
data
Model A
Model B
power-law
exponential
tapered GR
10^1
10^2
10^3
10^4
Seismic Moment [10^13 N · m]


(b) Central & Western Shikoku
Cumulative Distribution Function
10^0
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
data
Model A
Model B
power-law
exponential
tapered GR
10^1
10^2
10^3
10^4
Seismic Moment [10^13 N · m]

© 日本地震学会

モーメント比を用いた強度情報抽出の試み

Evaluating the crustal strength based on seismic moment tensor ratios

*松本 聡[1]、光岡 郁穂[2]、飯尾 能久[3]、酒井 慎一[4]、加藤 愛太郎[5]
*Satoshi MATSUMOTO[1], Ayaho Mitsuoka[2], Yoshihisa Iio[3], Shinichi Sakai[4], Aitaro Kato[5]

1. 九州大学大学院理学研究院地震火山観測研究センター、2. 九州大学大学院理学府、3. 京都大学防災研究所、4. 東京大学大学院情報学環・学際情報学府、5. 東京大学地震研究所
1. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University, 2. Graduate School of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. The University of Tokyo Interfaculty Initiative in Information Studies Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, 5. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震は地殻に蓄積された弾性ひずみを解放するが，解放の仕方はさまざまであると考えられる。例えば，成熟した断層帯においては断層走向に沿ったすべりが卓越するであろう。一方，未成熟の場合は走向方向だけでなく様々な方向のすべりが発生すると考えられる。こういったすべり方向の多様性と断層の成熟度・強度には関係があることはある意味，明らかである。 媒質がある応力状態にあった時，弾性ひずみは主応力と45度をなす最大せん断方向の面で滑りが発生するとき最も“効率的”にひずみエネルギーが解放される。一方，クーロンの破壊基準によれば内部摩擦角は摩擦係数によって変化する。そのため，最適面（最大圧縮応力軸に対して±30度，ただし摩擦係数0.6のとき）で滑りを起こす。この場合，圧縮軸に対して共役な2つの面で滑りを起こすと，結果的に弾性ひずみを減少させるが，その効率は低下する。具体的には，最大せん断方向で滑った地震のメカニズム解を考えてみると，このメカニズム解をもつ地震で解放されるモーメントM0とした場合，±30度の面を持った地震2つで解放されるモーメントは，2M0となるはずであるが，和をとるとモーメントテンソルはその形は45°滑りと同じになり，その大きさは2M0より小さくなる（摩擦係数＝0.6の時，比はおよそ0.74）。これは，よりすべりやすい面で多数滑ることによって弾性ひずみを解放していくプロセスを示している。摩擦係数が小さくなると徐々に比は1に近づいてゆく。一方，既存の亀裂が非最適面でかつ流体圧が高い場合，モーメント比は徐々に低下する。このように地震で解放されるモーメントと解放される弾性ひずみの比は地殻の成熟度・強度を示していると考えられる。ここでは，このモーメント比を実際の地震データから求めてその特性について検討する。 2017年3月から2018年4月まで鳥取県西部地震震源域で行われた”0.1満点地震観測“は1000点の地震観測点をおよそ1㎞間隔で展開し，余震域を取り囲んだ地震観測である。これによって余震のメカニズム解が詳細に推定された。これらを3x3x2.5㎞のブロックごとにモーメント比を求めた。その結果，1に近いところは余震域が水平に広がる部分に対応している。一方，場所によっては0.6程度以下になるブロックも存在している。位置としては鳥取県西部地震の先駆的地震活動震源位置に対応している。これは流体圧が高い可能性を示唆している。 2016年熊本地震前後の地震活動について同様の解析をした。ここでは0.05°×0.05°×5㎞のブロックで見積もった。その結果，摩擦係数が低いような場所は見られなかった。一方で，モーメント比が0.6程度以下の場所が断層周辺に存在している。さらに，地震発生後にはその部分が広がっているように見える。これは，応力場の不均質が影響している可能性はあるものの，流体が貫入したことによる影響を見ているとも解釈できる。 以上のようにモーメント比を用いると，地殻の強度情報が抽出できる可能性がある。この比を用いることによって地殻の力学的応答をモデル化できる可能性があり，地殻活動のシミュレーションに将来的に貢献すると考えられる。

© 日本地震学会

セルオートマトンを用いた時定数の競合による地震モデル

Seismic modeling with cellular automata considering competing time constants

*福田 孔達[1]、波多野 恭弘[2]、望月 公廣[1]
*Kota FUKUDA[1], Takahiro HATANO[2], Kimihiro MOCHIZUKI[1]

1. 東京大学地震研究所地震予知研究センター、2. 大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻
1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Department of Earth and Space Science Osaka University

従来のセルオートマトンモデルを用いた地震研究では、統計性質に主眼が置かれていた為、点過程に議論が限定されてきた。本研究では、Olami et al.,(1992)によって提案された、GR則を再現するOFCモデルに対し、破壊現象を扱えるような拡張を行った。このモデルでは、最小破壊の時定数を導入することで、モーメントレートの時系列を扱うことができる。さらに、本研究では、この最小破壊の時定数に対する応力蓄積や強度回復の時定数の比をパラメターとする事で、時定数の競合によって生じる、破壊描像と統計性質の変化に注目する。

強度回復や応力蓄積に対し、破壊伝播の遅い現象を表すパラメター領域では、周波数の-1乗に比例したモーメントレートスペクトルが得られ、一方、破壊伝播の速い現象を表すパラメター領域では、自己相似的な破壊と、周波数の-2乗に比例したモーメントレートスペクトルが再現される。また、応力蓄積の時定数に対し強度回復の時定数が大きくなるにつれて、微動や群発地震のような永続的なイベントを発生させるレジームから、GR則を満たす通常地震的なレジーム、繰り返し地震的挙動のレジームへの遷移が生じる。強度回復の時定数の増加は、定性的には塑性から脆性への遷移と捉えることもできる為、脆性領域に近付くことで、通常地震的な挙動や繰り返し地震的な挙動が得られることを意味している。

これらの結果は、スロー地震、群発地震、通常地震、繰り返し地震などの多様な地震活動の特徴が、「時定数の競合」という観点である程度統一的に理解できる可能性を示唆しており、この点について議論する。

© 日本地震学会

C会場 | 一般セッション：S09. 地震活動とその物理

2021年10月14日(木) 13:30 ~ 15:00 | C会場 C会場

PM-1

座長:野田 雄貴(京都大学)、中野 優(海洋研究開発機構)

13:30 ~ 13:45

[S09-12] 龍神湖（大町ダム）付近の地震活動

〇酒井 慎一[1,2]、秋山 峻寛[2] (1.東京大学大学院　情報学環・学際情報学府、2.東京大学地震研究所)

13:45 ~ 14:00

[S09-13] 長野県西部地域で発生したM3.7の地震の前震活動とその発生要因について

〇野田 雄貴[1]、片尾 浩[2]、飯尾 能久[2] (1.京都大学大学院理学研究科、2.京都大学防災研究所)

14:00 ~ 14:15

[S09-14] 森吉山の群発地震における地震活動および波形相関の時空間変化

〇雨澤 勇太[1]、前田 拓人[1]、小菅 正裕[1]、高野 智也[1] (1.弘前大学大学院理工学研究科)

14:15 ~ 14:30

[S09-15] 2011年東北沖地震後から福島-茨城県境周辺で活発化した地震活動に見られる内陸の繰り返し地震とその原因

〇池田 里奈[1]、吉田 圭佑[1]、高橋 諒[3]、福島 洋[2]、松澤 暢[1]、長谷川 昭[1] (1.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2.東北大学災害科学国際研究所、3.気象庁)

14:30 ~ 14:45

[S09-16] 鬼界カルデラにおけるDASを用いた地震動、エアガン観測

〇中野 優[1]、杉岡 裕子[2]、荒木 英一郎[1]、中島 倫也[1]、伊藤 亜妃[1]、松本 浩幸[1]、横引 貴史[1]、利根川 貴志[1]、山本 揚二朗[1]、木村 俊則[1]、藤江 剛[1]、田中 聡[1] (1.海洋研究開発機構海域地震火山部門、2.神戸大学海洋底探査センター)

14:45 ~ 15:00

[S09-17] 噴火や群発活動の誘因かもしれない御嶽山山頂周辺のやや深い地震活動　その1

〇山中 佳子[1] (1.名古屋大学)

龍神湖（大町ダム）付近の地震活動

Seismic activity around lake of Ryujin-ko

*酒井 慎一[1,2]、秋山 峻寛[2]
*Shin'ichi SAKAI[1,2], Takahiro Akiyama[2]

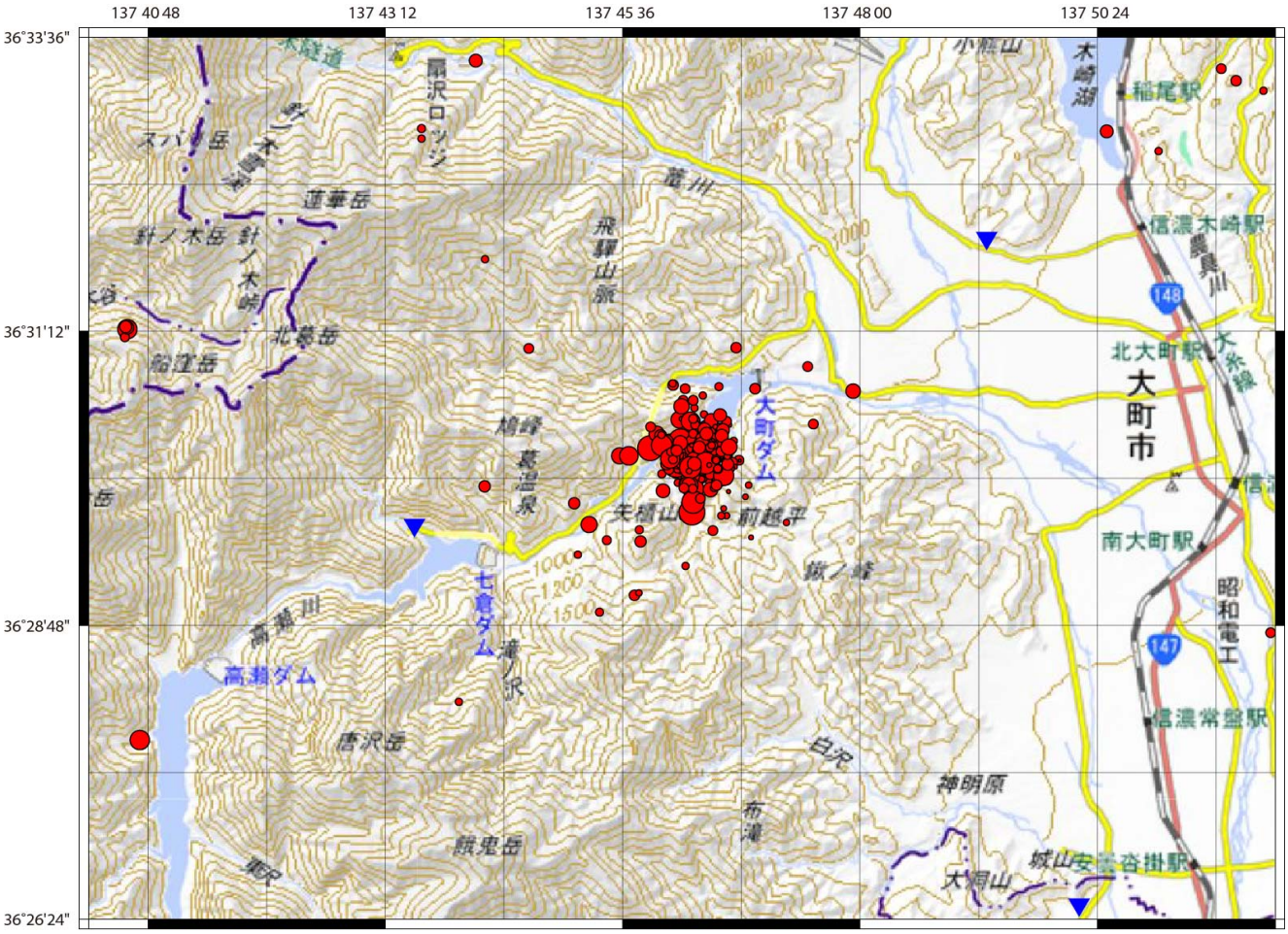
1. 東京大学大学院　情報学環・学際情報学府、2. 東京大学地震研究所
1. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The Univ. of Tokyo

長野県大町市龍神湖（大町ダム）周辺において、2021年3月下旬から、地震活動が続いている（図１）。この活動中の最大規模の地震は、4月13日22時53分に発生したM3.6の地震で、約6㎞離れた大町市役所で震度３を観測した。発震機構解は、北西ー南東方向に圧縮軸を持った横ずれ型の地震で、震源の深さが約2㎞と浅かったため、大町ダム周辺の道路や林道では、小規模な土砂崩れが確認されたが、人的な被害は報告されていない。この約5か月間（3月21日～7月31日）に、大町市役所では、23個の有感地震が観測されていて、無感も含めると約300個の地震が報告されている（気象庁の暫定解による）。
これまで、この付近に大きな活断層は知られていないが、大町市では、1918年（大正7年）11月11日に「大町地震」と呼ばれる地震が発生している。この地震では、M6.5の地震が、約13時間の間隔で続けて2回発生していた。そのときの震源地は、今回の地震活動領域から東に約10㎞離れたJR大糸線信濃大町駅付近で、家屋の全壊が6棟、半壊が2852棟の被害を生じさせていた。今回の地震活動が、大正時代の大町地震とどのように関係するのかは、不明であるが、この地震活動が続く原因は何なのか、周辺で発生した2014年11月の白馬の地震や糸魚川ー静岡構造線と関係するのか、今後の地震活動の拡大や周辺の活動への影響等、様々な疑問が生じている。
そこで、これらを解明することを目的として、震源地の直上および震源域を取り囲む数ヶ所に地震計を設置した（2021年4月21日から）。観測機器は、固有周期1秒の地震計（レナーツ社製MK-Ⅲ）とその記録を収録する装置（白山工業社製LS-8800）である。それらは、小さなボックス（約40cm程度）に収め、道路わき等に設置した。現地は携帯電話の通話圏外のため、テレメータできず、SDカードに現地収録した。単1乾電池32個で約３ヶ月稼動するため、8月に電池交換と記録媒体の交換を行った。地震活動は、何度か活発化したものの、全体としては、低調になってきた。
今回は、この3か月分の記録を用いた解析の一部を紹介する。 新たな臨時観測点の読み取り値を含めて震源を決め直したところ、震源の深さは2㎞前後に集中していた。切り出した記録の中には、規模の小さな地震波形がたくさん見られたため、臨時観測点の波形で自動処理を行ったところ、4月21日から5月31日の約40日間で841個の地震を検知した。同じ期間の気象庁一元化震源が67個であるため、10倍以上検知された。今後は、小さな地震も含めた震源分布から、この地震活動の全体像を解明することが目的である。

図１　震源分布（2021年3月21日～4月19日）国土地理院地図に加筆

謝辞：国土交通省大町ダムおよび千年の森自然学校に臨時の観測点を設置させていただきました。この観測研究では、東京海上各務記念財団から助成をいただきました。

© 日本地震学会


137 40 48
137 43 12
137 45 36
137 48 00
137 50 24
36°33'36"
36°31'12"
36°28'48"
36°26'24"
木曽道
扇沢ロッジ
スバリ岳
ダニ木曽峠
道華岳
針ノ木岳
針ノ木峠
北葛岳
船窪岳
蓮川
飛騨山脈
鳩峰高温泉
大町ダム
七倉ダム
高瀬川
高瀬ダム
唐沢岳
鹿島槍ヶ岳
白沢
布滝
神明原
大沢山
城山
小熊山
木崎湖
稲尾駅
信濃木崎駅
農具川
北大町駅
大糸線
大町市
南大町駅
昭和電工
信濃常盤駅
信濃
148
147
1000
1200
1500

© 日本地震学会

長野県西部地域で発生したM3.7の地震の前震活動とその発生要因について

Foreshock activity of a M3.7 earthquake in the western Nagano Prefecture region and the ocuurrence factor

*野田 雄貴[1]、片尾 浩[2]、飯尾 能久[2]
*Yuki NODA[1], Hiroshi KATAO[2], Yoshihisa IIO[2]

1. 京都大学大学院理学研究科、2. 京都大学防災研究所
1. Kyoto University Graduate School of Science, 2. Kyoto University Disaster Prevention Research Institute

長野県西部地域では1995年6月から稠密地震観測網が展開されていて，観測点は1984年に発生した長野県西部地震の余震域の東部を中心に設置されている．その中で10kHzのサンプリング周波数でデータを記録しているものが最大で57ヶ所に設置された．この地域で発生する地震は震源が浅いものが多く，さらに観測点の周囲が静かでノイズレベルが小さいため，多数の微小地震データが得られている．

1999年4月5日に，この観測網の内側でM3.7の地震が発生した．また，その震源付近ではその発生の10日以上前から活発な地震活動が見られた．

各地震の破壊開始点について高精度な相対震源決定を行うために，この稠密地震観測で得られた10kHz波形データを使用し，各観測点における2つの地震のP波到達時刻の差を，P波初動のみを含むような0.01秒幅のウインドウを使って相互相関により求めた．そのようにして求めたP波到達時刻の差を用いて，Ito (1985) を参考に相対震源決定を行った．

震源再決定の結果，M3.7の地震の震源に向かって地震活動が移動していく様子が確認された．また，その震源分布には空間的なギャップがあり，この地震活動は地震の発生に伴う応力変化だけでは説明できない可能性がある．さらに，これらの地震は平面的には発生しておらず，非地震性すべりがこの地震活動の原因である可能性は低い．

© 日本地震学会

森吉山の群発地震における地震活動および波形相関の時空間変化

Spatio-temporal change in seismicity and waveform correlation of an earthquake swarm at Moriyoshi volcano

*雨澤 勇太[1]、前田 拓人[1]、小菅 正裕[1]、高野 智也[1]
*Yuta Amezawa[1], Takuto Maeda[1], Masahiro Kosuga[1], Tomoya Takano[1]

1. 弘前大学大学院理工学研究科
1. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

背景と目的

群発地震は，本震と呼べる様な最大地震を持たず，非大森則的な地震活動が一定期間継続する現象である．これまでの研究で，群発地震の震源マイグレーションの拡散係数と活動継続時間の間に負の相関があることが判明した (Amezawa et al., 2021)．しかし，活動の推移に伴って地震波形がどのように変化するのか系統的に調べた研究は少ない．地震波形の時間変化は群発地震の発生メカニズムが時間的に変化したことに関係する可能性がある．ゆえに，地震活動の推移と地震波形の変化の対応を調べることは重要である．本研究では，地震活動が長期に渡っている例として，発生から10年以上継続している東北日本北部の森吉山での群発地震について，地震波形がどのように変化したかを波形相関に着目して調べた．

震源再決定

近接する地震間の波形相関の時空間変化を調べるためには，高精度に決定された震源位置が必要である．そこで，波形の相互相関データを用いたDouble-Difference法により，震源再決定を行なった．解析には気象庁一元化震源カタログに記載されている2011–2019年に発生したM≧0の地震のうち，群発地震の周囲60 km以内で比較的S/N比の良い16定常観測点の半数以上において，P・S波の観測走時が得られた7213地震を用いた．気象庁検測値に加えて，弘前大学によって実施された臨時観測記録の手動検測値も用いた．さらに，気象庁・Hi-net・東北大学の観測点で記録された地震波形の相互相関係数から相対走時データを作成して用いた．相関は 2–12 Hzの帯域通過フィルタをかけた波形に対し，P・S波の理論走時±1秒の時間窓で計算した．

震源再決定の結果，初期震源数の99%が再決定され，RMS残差は手動検測値では117 msから35 msへ，相対走時データでは 138 msから6 msへ減少した．再決定震源の空間分布から，群発地震の震源は複数の小クラスタに分かれ，水平面内では4 km程度にひろがり，厚さ1–2 kmの東傾斜の面状分布を示すことなど，これまで以上に詳細な特徴が判明した．

波形相関の時空間変化

次に，再決定された震源位置に基づき，近接する地震間の波形相関の時空間変化を調べた．ある地震を起点とし，そこから1年以内に発生した地震が震源距離0.3 km以内に10個以上ある場合，これを地震のグループとした．全ての再決定震源を起点としてグループ化を行い，得られた全てのグループについて，グループの起点とした地震とグループ内の各地震のP・S波形の相互相関係数を求め，その平均をAverage Cross Correlation (ACC) とした．ACCの計算には，S/N比が12 dB以上かつ使用観測点の半数以上でP・S波が記録された波形を使用した．

得られた全ACCの分布は，平均μ=0.39，標準偏差σ=0.11のやや左に歪んだ正規分布となった．今回は，ACC $\geqq \mu+1.5\sigma$ の地震グループを特に波形の類似性が高いグループとし，ACCの時空間変化と地震活動の対応を述べた．森吉山の群発地震はクラスタの南東深さ10 km付近（クラスタ底部）から始まり，約200日間はここから水平・深さ方向に約 1 kmの狭い領域で活動が続いた．この活動では，ACCが高いグループが特に多くみられた．その後，地震活動の中心が北東へ移動し，約500日後には複数のバースト的な活動を伴いつつ活動中心は南西へ移動した．約 1500日後になるとクラスタサイズがほぼ確定し，活動が比較的低調に

© 日本地震学会

なった．これらの活動移行期と停滞期についてのACCは活動初期に比べて全体的に低く，波形の類似性が高いグループはほとんどみられなかった．

議論

森吉山における群発地震の初期の活動が比較的狭い領域内に限られていることは既知であったが，本研究により，その初期の活動においてのみ地震波形が互いに類似していることが判明した．このことから，活動初期においては近接する位置での同じような断層運動で地震が起きたことが示唆される．しかし，その後の活動では，クラスタのほとんどの領域で，震源が近接していてもACCは低い．その理由として，近接していても断層運動の仕方が微妙に異なること，震源周辺の不均質が非常に強くて震源位置の僅かな違いにより波形が異なることの，一方または両方が考えられる．これらの原因が群発地震活動にあるのか，元々存在したのかは，今回の結果だけでは判然としないが，森吉山の群発地震の時空間発展が単純ではなかったことを考慮すると，群発地震域は群発地震以前から不均質な状態であった可能性がある．

謝辞

気象庁一元化震源カタログ，気象庁・防災科学技術研究所Hi-net・東北大学の観測点で観測された地震波形記録を使用しました．記して謝意を表します．

© 日本地震学会

2011年東北沖地震後から福島-茨城県境周辺で活発化した地震活動に見られる内陸の繰り返し地震とその原因

Intraplate repeating earthquakes in the Fukushima-Ibaraki border region following the 2011 Tohoku-Oki earthquake and their factors

*池田 里奈[1]、吉田 圭佑[1]、高橋 諒[3]、福島 洋[2]、松澤 暢[1]、長谷川 昭[1]
*Rina IKEDA[1], Keisuke Yoshida[1], Ryo Takahashi[3], Yo Fukushima[2], Toru Matsuzawa[1], Akira Hasegawa[1]

1. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2. 東北大学災害科学国際研究所、3. 気象庁
1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. Japan Meteorological Agency

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震以降、福島-茨城県境周辺では非常に活発な地震活動が続いている。特に、茨城県北部においては2011年3月19日と2016年12月28日にM6程度の地震が発生しており、2つの地震が同一の断層の同じ場所を繰り返し破壊した可能性が指摘されている(Fukushima et al., 2018; Uchide, 2017, JpGU)。内陸断層で地震がこのような短期間で繰り返し発生する事例は極めて珍しく、この事例を調べることは内陸地震の発生サイクルや応力蓄積・解放過程を理解する上で極めて重要であるといえる。本研究では，福島-茨城県境周辺の地震活動中の小中地震に含まれる繰り返し地震を検出し，更にその情報を震源分布の時空間変化および地震活動の情報と組み合わせることにより、M6地震の繰り返しの原因について調べた。
最初に、2003年から2018年10月31日までに福島-茨城県境周辺で発生した気象庁マグニチュード1以上の地震45988個を対象に、Double-Difference法 (Waldhauser & Ellsworth, 2002)を用いた震源の再決定を行った。得られた震源分布は複雑な微細断層構造を示した。ただし茨城県北部地域では地震活動が西へ傾斜する一枚の面構造に集中しており、M6地震はこの断層上で発生したと考えられる。
次に、繰り返し地震の検出を行った。多くの先行研究では繰り返し地震の検出のために、波形の相互相関を用いているが、その方法では近傍で起こった地震群を繰り返し地震と見誤る可能性がある。本研究では、精密な震源再決定位置に基づき繰り返し地震の検出を行った。具体的には、全地震ペアの震源間距離を地震の断層サイズと比較することにより、次の条件に基づいて繰り返し地震の検出を行なった。(1) 地震間距離 ＜ 平均断層半径、(2) マグニチュードの差が0.5以下となる地震ペアを繰り返し地震ペアとみなした。この際，断層サイズは、応力降下量20MPa (池田・他，2020, JpGU)の円形断層を仮定して求めた。その結果、379個の地震ペアが見つかり、その多くが茨城県北部に分布することが分かった。これらの地震ペアの地震波形は近傍の観測点で見ても非常によく似ており、断層上の同一の場所を破壊した繰り返し地震である可能性が高いと思われる。
震源再決定により得られた震源分布から、茨城県北部で2011年と2016年に発生したM6地震直後の余震の時空間分布を調べると、それぞれのM6地震の震源周辺から余震域が徐々に拡大している様子が見られた。2つのM6地震後の余効滑りに起因している可能性がある。Nadeau & Johnson (1998)による経験式に基づき、繰り返し地震間の周囲の非地震性すべり量を推定したところ、20cm前後の値が得られた。Fukushima et al. (2018)は、2011年に発生したM6地震による余効滑り量を推定し、その大きさが数十 cm程度以上と非常に大きかったことを示しているが、研究で検出された繰り返し地震は、この余効滑りの影響により発生した可能性が考えられる。
茨城県北部で繰り返し発生したことが推定されている 2つのM6地震のうち、2011年の地震の余震活動が2016年の地震のそれに比べて顕著に活発であったことが分かった。2011年の地震の余震の減衰率は通常の大森公式に比べても有意に小さかった。GPS観測点で計測された地震直後の余効変動も 2011年の M6地震の場合の方が 2016年の地震よりも大きかった。2011年の M6地震の余効滑り量が同規模の内陸地震に比べ異常に大きかったことが報告されているが (Fukushima et al., 2018)、その量は同じ場所で発生した 2016年の M6地

© 日本地震学会

震に比べても大きかったことが示唆される。同一の場所にもかかわらず余効すべり量の大きさが異なった要因として、震源域の状態の時間変化が考えられる。ひとつに2011年東北沖地震による余効変動の減衰により応力増加レートが減少したことが影響しているかもしれない。あるいは、間隙水圧の時間変化が余効すべり量に影響を与えた可能性も考えられる。群発地震の解析から、東北日本のいくつかの地域では、東北沖地震後の地殻流体の上昇により間隙水圧が時間変化したことが推定されている (Yoshida et al., 2016)。茨城北部地域においても、東北沖地震直後の2011年のM6地震の際には，上昇してきた地殻流体により地震・余効すべりが生じやすくなっていた可能性も考えられる。

© 日本地震学会

鬼界カルデラにおけるDASを用いた地震動、エアガン観測

DAS observations of earthquakes and airgun signals around Kikai caldera

*中野 優[1]、杉岡 裕子[2]、荒木 英一郎[1]、中島 倫也[1]、伊藤 亜妃[1]、松本 浩幸[1]、横引 貴史[1]、利根川 貴志[1]、山本 揚二朗[1]、木村 俊則[1]、藤江 剛[1]、田中 聡[1]
*Masaru NAKANO[1], Hiroko Sugioka[2], Eiichiro Araki[1], Tomoya Nakajima[1], Aki Ito[1], Hiroyuki Matsumoto[1], Takashi Yokobiki[1], Takashi Tonegawa[1], Yojiro Yamamoto[1], Toshinori Kimura[1], Gou Fujie[1], Satoru Tanaka[1]

1. 海洋研究開発機構海域地震火山部門、2. 神戸大学海洋底探査センター
1. IMG, JAMSTEC, 2. KOBEC, Kobe University

鬼界カルデラは130ka、95ka、そして7.3kaにカルデラ形成を伴う巨大噴火を起こした火山として知られる。鬼界カルデラは九州南方に位置し、そのほとんどが海底下にあるため、火山の構造や活動については不明な点が多い。我々はその構造調査及び現在の活動把握のための新しい観測手法開発のため、鬼界カルデラ周辺に設置された光海底ケーブルを用いた分布型音響センシング（DAS）観測を行った。DASは光ケーブルにレーザー光を入射した際に生ずる後方散乱によって、ケーブルの軸方向の歪変化を検出する技術であり、ケーブルに沿った高密度多点の振動計測が可能なことから、近年地震観測への応用が進んでいる。海域火山において光海底ケーブルを用いたDAS観測が行われたのは、我々が知る限り本研究が初めてである。 鬼界カルデラ周辺の海域には、鹿児島県三島村が保有、管理する、三島村の竹島、硫黄島、黒島と本土の枕崎を結ぶブロードバンド通信のための光海底ケーブルが設置されている。我々はこれを活用し、鬼界カルデラにおいてDASによる地震動観測を行った。測器を薩摩硫黄島および枕崎に設置し、それぞれと竹島、黒島を結ぶ光海底ケーブルでのDAS観測を行った。観測はこれまでに2021年4月と7月の二回行った。4月の観測ではトカラ列島や種子島沖で起きたマグニチュード2～4クラスの地震の記録が得られた。枕崎からの測線では地震動の振幅は比較的一様であった。一方、硫黄島から延びる鬼界カルデラに近いケーブルでは、振幅に大きな地域性が見られた。これはケーブル直下の減衰構造もしくはケーブルと海底のカップリングに大きな地域性があるためであると考えられる。7月の観測では、同時に鬼界カルデラ周辺海域で行われたエアガン探査のシグナルを観測した。エアガンのチームと協力し、鬼界カルデラを挟んでDAS測線の反対側でエアガンを発振することで、カルデラ内部を通る波線のシグナルの観測を試みた。観測が終了したのは本稿作成の直前であり、今後詳しく解析を進めていく予定である。また、観測開始からエアガンが始まるまでの期間に、種子島沖や九州西方で起きた地震を多数観測した。また気象庁一元化カタログに無いローカルと思われるイベントも複数観測した。これらのイベントの解析により、鬼界カルデラ周辺の構造や火山活動を調べていく予定である。 謝辞：本研究にあたっては鹿児島県三島村の光海底ケーブルを利用させていただきました。記して感謝いたします。

© 日本地震学会

噴火や群発活動の誘因かもしれない御嶽山山頂周辺のやや深い地震活動 その1

Seismic activity (D>10km) around the summit of Mt. Ontake (1)

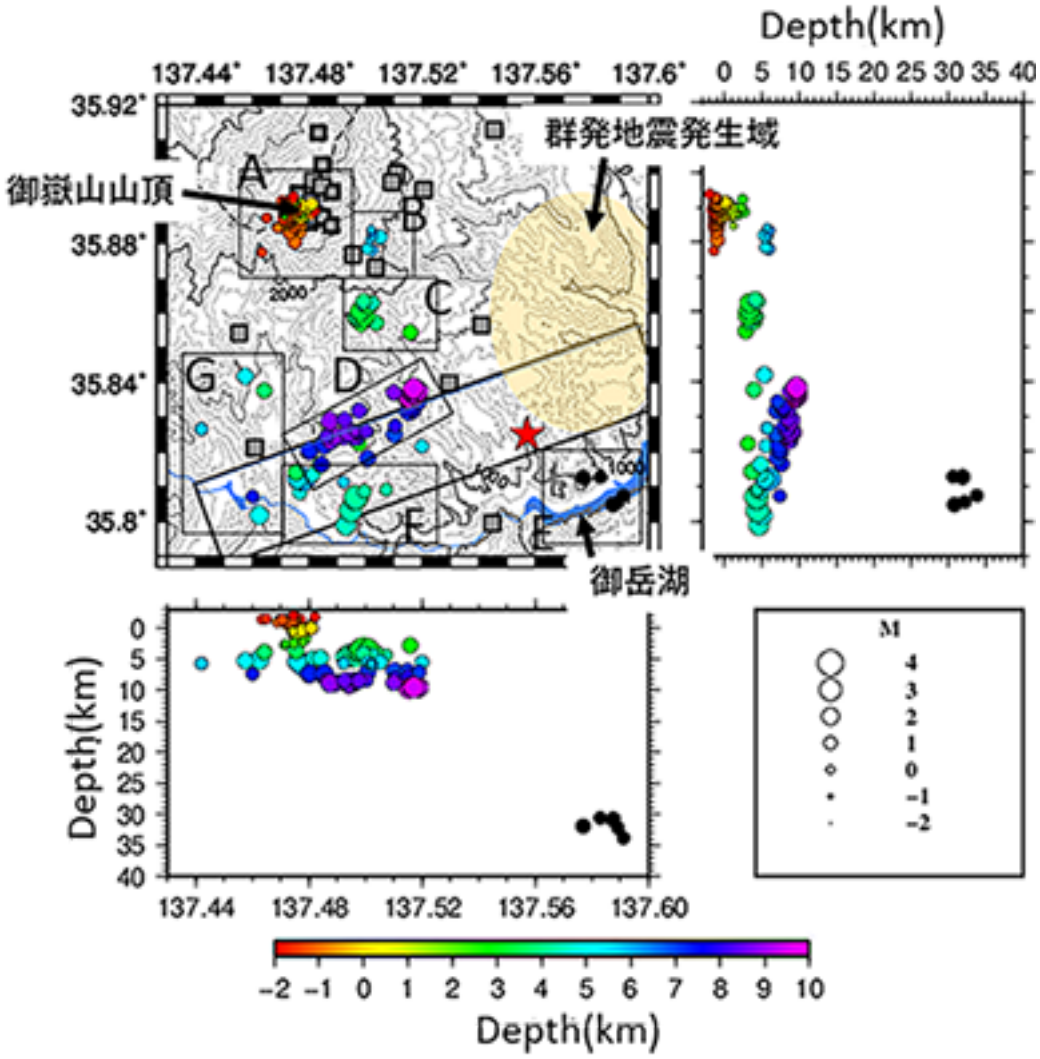
*山中 佳子[1]
*Yoshiko YAMANAKA[1]

1. 名古屋大学
1. Univ. of Nagoya

<<はじめに>>
　2007年と2014年の御嶽山噴火前後の地震活動を比較するため、御嶽山山頂周辺で発生する地震活動を調べていたところ、ある限られた領域（図1）でやや深い（深さ3-35km）地震が発生していることがわかった。御嶽山山頂周辺で発生する地震はM＜1の地震が多いが、これらの地震は比較的規模の大きい（M2-M3）ものも発生している。これらの地震の内、図1の領域Ｄはほぼ1984年長野県西部地震の断層（図1中の四角形）下限にあたる。また図1のハッチをつけた範囲では長野県西部地震以降群発的に地震が発生している。さらに御岳湖付近の深さ30-35km（領域Ｅ）では低周波地震が発生する。
　そこでMatched Filter法を用いて御嶽山山頂周辺でのやや深い地震および山頂直下の地震活動を2006年まで遡って調べた。
<<手法>>
　2014年御嶽山噴火の直前直後の地震活動を調べたKato et al. (2014)に従い、Matched Filter法を山頂周辺の観測点に適用した。解析には御嶽山周辺の名古屋大学、気象庁、Hi-net、長野県の定常観測点の連続データ3成分を用いた。年代によってかなり観測点数が異なるが、2006年頃でも最大9点（NU.KID1, NU.MKO1, NU.MUR, NU.TKN1, V.ONTA, V.ONTN, N.KADH, TKGS, ROPW）の観測点データが使えた。テンプレート地震としては図1に示した224個の地震を用いた。
<<結果>>
1. 御嶽山山頂直下での地震活動は日頃は低調であるが、時々集中的に深さ3kmより浅部で活発化することがあり、その活動が1週間以上連続したのは2007年と2014年の噴火前だけであった。
2. 2015年7月中旬から9月にかけて領域Dで深さ10km前後の活動が活発化した。このとき気象庁田の原観測点では火山性地震が38回観測、継続時間3分の火山性微動も1回観測され、傾斜計も僅かに山上がりを示すなど、火山活動との関連性を示唆する現象が観測されている。領域Ｄでの活動は2007年の噴火前の地震活動でも見られた。このときの活動も2ヶ月程度続き、その後領域ＢやＣでの群発的な活動が発生している。これらの深さは長野県西部地震の余震活動から見えた反射面の深さ(Inamori et al, 1992)ともよく一致することから、領域Ｄ付近が深部から流体上がり口で、そこから上がってきた流体がすでに流路ができているところでは地震を起こさず流路がないところでは群発的に地震を発生しながら広がっているようにも見える。2006年以前についてはデジタル記録がそろわないためMatched Filter法を用いた解析ができないが、気象庁の震源情報によると1988年や1993年頃にも活発化しているようである。ただし2000年以前のこの付近の震源決定精度はあまり良くない。
3. さらに深部の深さ30-35kmの地震については2010年2月3日19時代に極めて活発な活動があった。その他の時期についてはパラパラと活動があることはわかったが、あまり相関がよくない。現在テンプレートが2010年と2015年の活動の5イベントしかなく、毎回活動の場所が少しずつ異なっていることを意味しているのかもしれない。気象庁の震源情報をみると2002年8月にも深さは22-30kmとやや浅めであるが群発的に発生している。
今後これらの活動についても調べ、御嶽山山頂周辺のやや深い地震の活動と噴火活動、群発地震との関係を明らかにしたい。

© 日本地震学会

図1　御嶽山山頂周辺の地震活動（テンプレート地震）。赤星と太い線の長方形は1984年長野県西部地震の震央と断層の位置を示す。グレーの四角は観測点、オレンジ色のハッチは群発地震発生域を示す。



© 日本地震学会

D会場 | 一般セッション：S06. 地殻構造

2021年10月14日(木) 9:00 ~ 10:30 | D会場 D会場

AM-1

座長:仲西 理子(海洋研究開発機構)

9:00 ~ 9:15

[S06-01] 三陸沖光ケーブル観測システムのDistributed Acoustic Sensingデータを用いたレイリー波位相速度の計測

〇福島 駿[1]、篠原 雅尚[2]、山田 知朗[2]、西田 究[2]、竹尾 明子[2]、蓬田 清[3] (1.東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2.東京大学地震研究所、3.北海道大学 理学院 自然史科学専攻 地球惑星ダイナミクス分野)

9:15 ~ 9:30

[S06-02] S-net連続記録で捉えた東北沖における上盤浅部構造の時間変化

〇利根川 貴志[1]、高木 涼太[2]、澤崎 郁[3]、汐見 勝彦[3] (1.海洋研究開発機構、2.東北大学、3.防災科学技術研究所)

9:30 ~ 9:45

[S06-03] 2019年海陸統合地震探査による東北日本弧中部の地殻・上部マントル構造

〇岩崎 貴哉[1]、佐藤 比呂志[2,3]、蔵下 英司[2]、石毛 宏和[4]、清水 英彦[4]、石山 達也[2]、飯高 隆[2]、篠原 雅尚[2]、川崎 慎治[4]、阿部 進[4]、平田 直[5,2] (1.地震予知総合研究振興会、2.東京大学地震研究所、3.静岡大学防災総合センター、4.（株）地球科学総合研究所、5.国立研究開発法人防災科学技術研究所)

9:45 ~ 10:00

[S06-04] S波レシーバ関数解析から推測される日本海下のリソスフェアーアセノスフェア境界

〇悪原 岳[1]、中東 和夫[2]、篠原 雅尚[1]、山田 知朗[1]、塩原 肇[1]、山下 裕亮[3]、望月 公廣[1]、植平 賢司[4] (1.東京大学地震研究所、2.東京海洋大学、3.京都大学防災研究所、4.防災科学技術研究所)

10:00 ~ 10:15

[S06-05] 地震波異方性に基づく首都圏下のPHSスラブ構造についての新たな解釈

〇石瀬 素子[1]、加藤 愛太郎[1]、酒井 慎一[1]、中川 茂樹[1]、平田 直[2] (1.東京大学地震研究所、2.防災科学技術研究所)

10:15 ~ 10:30

[S06-06] 駿河トラフから東海地域に沈み込むフィリピン海プレート形状

〇松原 誠[1]、汐見 勝彦[1]、馬場 久紀[2]、佐藤 比呂志[3]、西宮 隆仁[4] (1.防災科学技術研究所、2.東海大学海洋学部海洋地球科学科、3.東京大学地震研究所、4.気象庁気象研究所)

三陸沖光ケーブル観測システムのDistributed Acoustic Sensingデータを用いたレイリー波位相速度の計測

Rayleigh wave phase velocity estimated from Distributed Acoustic Sensing records using seafloor optical fiber cable system off Sanriku

*福島 駿[1]、篠原 雅尚[2]、山田 知朗[2]、西田 究[2]、竹尾 明子[2]、蓬田 清[3]
*Shun FUKUSHIMA[1], Masanao SHINOHARA[2], Tomoaki YAMADA[2], Kiwamu NISHIDA[2], Akiko TAKEO[2], Kiyoshi YOMOGIDA[3]

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2. 東京大学地震研究所、3. 北海道大学 理学院 自然史科学専攻 地球惑星ダイナミクス分野
1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute,The University of Tokyo, 3. Hokkaido University,Graduate school of Science,Department of Natural History Sciences

近年，光ファイバをセンサとして，歪みを数m間隔で数十kmの長距離観測が行えるDistributed Acoustic Sensing（以下 DAS）が地球科学分野に応用されつつある（e.g., Zhan 2019）．東京大学地震研究所では，三陸沖に設置した光ケーブル式海底地震・津波観測システムを利用して，DAS観測を行なってきた．Spica et al. (2020) では，このDAS観測データから短周期（周期２秒以下）レイリー波の位相速度を計測し，深さ約3kmまでの堆積層のS波速度構造を推定している．観測システムが敷設されている三陸沖は2011年東北沖地震の震源域北部に位置し，また，深さ約50kmのプレート境界で繰り返し地震の発生が報告されいる (e.g., Matsuzawa et al., 2002)．この領域での地震発生様式の理解には，高分解能な島弧側上側プレートの構造が必要である．そこで，DAS観測データに対して地震波干渉法を適用し，プレート境界付近の深さまで感度を有する周期10秒程度までの表面波位相速度の推定を試みた．

本研究では，堆積層及び，島弧側上部地殻構造の地震波速度構造の高分解能推定を目指し，DASデータに対して地震波干渉法を用いて表面波の抽出を行い，frequency –wavenumber法（F-K法）を用いて周期10秒程度までの位相速度推定を行った．本研究で使用したデータは，2020年2月に行われた観測のうち，約12時間のDASデータである．このDASデータは観測点間隔が約5mで，最大観測距離が約100km，約20000チャンネルで構成される．

図１は，仮想震源を10000 チャンネルとし、観測点8000-15000 チャンネル ペアに対し地震波干渉法を適用し得られた２点間距離ごとの波形群を示す．DAS 観測点は非常に密に配置されているため，地震波干渉法をDAS データに適用した場合，従来の海底地震計と比較し，短時間のデータでSN 比の良い表面波が抽出できることが分かった．もっとも顕著な波群はレーリー波と考えられる．DAS はケーブル方向の歪み速度成分を記録するので，ケーブル方向に伝播するradial 成分に感度が高いため，通常の地震計よりも地震波干渉法によって，レイリー波 が選択的に検出できると考える．

図２は図1 のレイリー波に対してF-K 法を適用し得られた位相速度の分散曲線である．図２中の実線は，光ファイバ近傍で行われた制御震源探査から得られた P 波速度(Takahashi et al., 2004)のモデルに対して，Disper80（Saito 1988） により計算したレイリー波の基本モード位相速度である．ここで, 密度とS 波速度はBrocher (2005) の経験式を使用しP 波速度から計算した．また，破線は基準モデルから堆積層のみS 波速度を±20%としたモデルのレイリー波の理論分散曲線である．その結果，このモデルから得られる分散曲線が、解析した範囲で信号がもっとも大きな基本・１次モードでそれぞれ周期9秒と5 秒までよく一致する．

以上より地震波干渉法をDAS データに応用することで，12 時間の観測データで周期約9秒程度までの表面波位相速度を推定できた．DAS アレイの場合，様々な大きさのアレイサイズに対してFK 法を適用することができるので，対象となる周期・波長に合わせてアレイサイズを変えて位相速度を測定することができ，高分解能かつ高精度な測定が期待される．今後，DAS データから得られた位相速度から速度構造を求めることで，従来

© 日本地震学会

よりも空間的に分解能が高い島弧側上部地殻地震波速度の推定をめざす.

図1

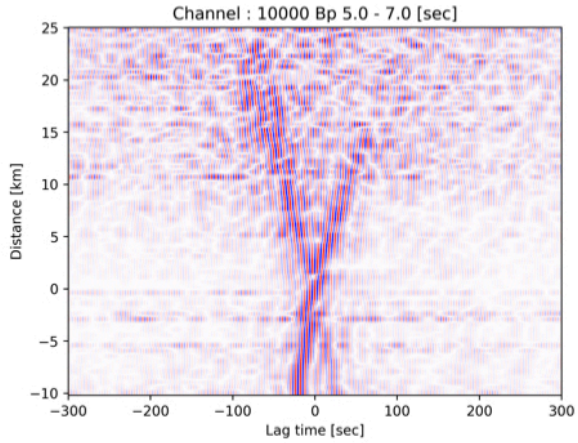


図2

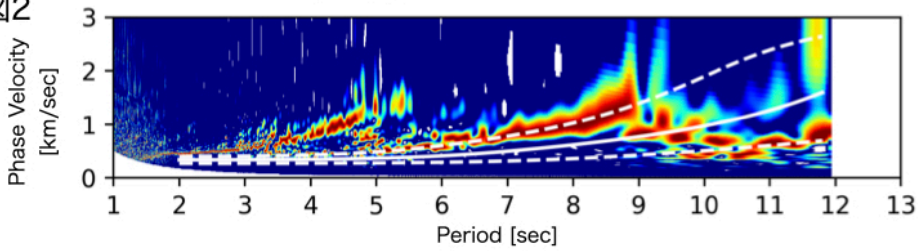


図1: 仮想震源10000と観測点8000-15000チャンネルペアに対し地震波干渉法を適用し得られた表面波. 周期5~7秒のband-pass filterを適用.

図2: 図1の表面波にF-K法を適用し得られた位相速度の分散曲線. 実線は, Takahashi et al., 2004により得られたP波速度を基準モデルとして計算したレイリー波の基本モード位相速度を示し, 破線は基準モデルから堆積層のみ+-20%したモデルの位相速度を示す.

© 日本地震学会

S-net連続記録で捉えた東北沖における上盤浅部構造の時間変化

Temporal variation of seismic velocity structure at the top of the overriding plate off Tohoku region derived from the continuous records of S-net

*利根川 貴志[1]、高木 涼太[2]、澤崎 郁[3]、汐見 勝彦[3]
*Takashi Tonegawa[1], Ryota Takagi[2], Kaoru Sawazaki[3], Katsuhiko Shiomi[3]

1. 海洋研究開発機構、2. 東北大学、3. 防災科学技術研究所
1. JAMSTEC, 2. Tohoku Univ., 3. NIED

常時ノイズ記録に地震波干渉法を適用して二点間を伝播する波動場を抽出し、その波動場の時間的な変化を抽出することで、構造の時間的な変化を調べることが可能である。このような研究を実施するためには長期間観測された連続記録が必要であるため、海域ではそれほど実施されてこなかった。しかし、近年、海域でも定常観測網が設置され、海底下の構造の時間変化を抽出する研究例が南海トラフで報告されるようになった（例えば、Ikeda and Tsuji, 2018; Tonegawa et al. 2020, JpGU）。また、日本地球惑星科学連合2021年大会ではS-net記録を用いた構造の時間変化を発表し（Tonegawa et al. 2021, JpGU）、東北沖の海溝軸付近で浅部の地震波速度が少しずつ速くなっていることを報告した（データは2020年6月末まで）。本研究では、そのデータ使用期間を2021年6月末まで延長し、2021年に東北沖で発生した3つの地震（2月福島県沖地震：Mw7.1, 3月宮城県沖地震：Mw7.0, 5月宮城県沖地震：Mw6.95）に伴う変化も抽出したので報告する。
連続記録の期間は2016年6月～2021年6月で、観測点は海溝より陸側の観測点を使用した（ただし、S6ケーブルの観測点は除く）。連続記録の3成分波形はTakagi et al. (2019)の方法を用いて合成した。相互相関関数はスペクトルホワイトニングを行い、0.5-1.0 Hzの帯域で計算した。このとき、機器ノイズを除去するため、1時間分の連続記録と次の1時間分の連続記録の差分波形を用いて相互相関関数を計算した（Takagi et al. 2021）。それらを30日間毎にスタックし、リファレンス波形は全期間スタックした波形を使用した。構造の時間変化の抽出にはストレッチング法を用いた（Wegler and Sens-Schönfelder, 2007）。
結果では、海溝軸に近い（海側）観測点では少しずつ速度が上昇することが検出され、その一方で、陸に近い（陸側）観測点ではそのような上昇はあまり顕著ではなかった。海側観測点では4.5年で0.3-0.4 %ほど速度が上昇し、その後、2021年の地震によって0.4 %ほど低下した。S-netの観測開始以来、海側観測点では、2016年福島県沖地震（M7.4、深さ25 km、正断層）のときも含めて大きな地震による速度構造の変化を検出したことがなかったため、今回が初めての観測例となる。また、もちろん陸側観測点でも、震源により近いため、この2021年のイベントによる速度減少を検出できた。

Data citation S-net: doi:10.17598/NIED.0007

© 日本地震学会

2019年海陸統合地震探査による東北日本弧中部の地殻・上部マントル構造

The crust and uppermost mantle structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling

*岩崎 貴哉[1]、佐藤 比呂志[2,3]、蔵下 英司[2]、石毛 宏和[4]、清水 英彦[4]、石山 達也[2]、飯高 隆[2]、篠原 雅尚[2]、川崎 慎治[4]、阿部 進[4]、平田 直[5,2]
*Takaya IWASAKI[1], Hiroshi Sato[2,3], Eiji Kurashimo[2], Hirokazu Ishige[4], Hidehiko Shimizu[4], Tatsuya Ishiyama [2], Takashi Iidaka[2], Masanao Shinohara[2], Shinji Kawasaki[4], Susumu Abe[4], Naoshi Hirata[5,2]

1. 地震予知総合研究振興会、2. 東京大学地震研究所、3. 静岡大学防災総合センター、4. （株）地球科学総合研究所、5. 国立研究開発法人防災科学技術研究所
1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 4. JGI, Inc., 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

In 2019, an extensive onshore-offshore seismic expedition was undertaken from the Yamato bank to the Japan Trench across the central part of the NE Japan arc (Sato et al., 2020a, b). This expedition was supported by several funds from MEXTs' projects of "Integrated Research Project on Seismic and Tsunami Hazards around the Sea of Japan" and "2nd Earthquake and Volcano Hazards Observation and Research Program", and from ERI, the University of Tokyo. The onshore seismic line in the NE Japan Arc was laid out from the Shonai Plain on the coast of the Sea of Japan to the eastern margin of the Kitakami Mountains on the Pacific coast, crossing the Dewa Hills, Shinjo Basin, Ou Backbone Range and Kitakami River Valley from west to east. The total length of the profile is about 155 km, on which 1,667 receivers were set to record 24 large energy shots. As seismic sources, we used explosives at 3 shot points and 4 vibroseis trucks with 150 stationary sweeps at the other 21 points.

The preliminary results beneath the onshore line and offshore part of the Pacific side were presented by tomography analyses (Sato et al, 2020a, b, Kurashimo et al., 2021) and ray-tracing technique (Iwasaki et al., 2021). In the present paper, we proceed to model the whole crust and uppermost mantle under the onshore profile from the combined interpretation on tomography and ray-tracing analyses. For the travel-time analysis, we carefully reconstructed the travel time data both for first arrivals and later phases. In the modelling for the crooked part of the onshore profile, "the distance correction" was applied to correct the systematic travel-time shifts arising from the inadequateness of the simple 2D ray-tracing. Deeper structures of the middle/lower crust and uppermost mantle were constructed from travel times of first arrivals and later phases both from land and air-gun shots.

The features of the obtained velocity model were summarized as follows;
(1) The uppermost part of the crust is composed of 4 layers of Vp= 1.6-2.0, 1.8-3.5, 3.7-5.0 and 4.5-5.5 km/s, respectively, representing sedimentary and volcaniclastic rocks. Their geometry shows significant change along the profile line. Actually, their total thickness is 2-5 km in the western and middle parts of the onshore profile, but only 0.5 km beneath its eastern edge. Such structural undulation is well

© 日本地震学会

correlated with fault and caldera systems developed in the surveyed region, representing successive tectonic processes in the NE Japan arc since Miocene.
(2) The crystalline part of the upper crust has a velocity of 5.8-6.1 km/s, which was underlain by the middle crust with Vp of 6.3-6.4 km/s. The thicknesses of the upper and middle crusts are 5-9 and 5-7 km, respectively.
(3) The lower crust with a velocity of 6.5-7.1 km/s is situated in a depth range of 15-30~32 km. This part is composed of 2 or 3 parts and considered to be reflective. Its reflective property, however, shows regional change both in horizontal and vertical directions. The seismic activity in the lower curst is considerably low as compared with those of the upper/middle crust. The velocity in the lowermost part may exceed 7.0 km/s.
(4) The Moho depth is around 30-32 km, beneath which the upper mantle velocity is estimated to be about 7.7 km/s. These characteristics are rather well constrained both from the onshore-offshore tomography and ray-tracing analysis of the onshore line.

References

Iwasaki et al., 2021. The upper crustal structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling, JpGU Meeting, SCG49-05.
Kurashimo et al., 2021. Seismic structure from the forearc region off Miyagi to the central part of Northern Honshu arc, Japan, revealed by onshore-offshore seismic experiment. submitted to 2021 JpGU Meeting, SCG49-04.
Sato et al., 2020a. Seismic transect across the central part of Northern Honshu, Japan, 2020 JpGU-AGU Joint Meeting, MIS03-P05.
Sato et al., 2020b. Deep seismic reflection profiling across the Shonai and Shinjo basins, northern Honshu, Japan, 2020 Spring Meeting of JAPT, 016.

© 日本地震学会

S波レシーバ関数解析から推測される日本海下のリソスフェアーアセノスフェア境界

Lithosphere–asthenosphere boundary beneath the Sea of Japan from transdimensional inversion of S receiver functions

*悪原 岳[1]、中東 和夫[2]、篠原 雅尚[1]、山田 知朗[1]、塩原 肇[1]、山下 裕亮[3]、望月 公廣[1]、植平 賢司[4]
*Takeshi AKUHARA[1], Kazuo Nakahigashi[2], Masanao Shinohara[1], Tomoaki Yamada[1], Hajime Shiobara[1], Yusuke Yamashita[3], Kimihiro Mochizuki[1], Kenji Uehira[4]

1. 東京大学地震研究所、2. 東京海洋大学、3. 京都大学防災研究所、4. 防災科学技術研究所
1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Tokyo University of Marine Science and Technology, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

The evolution history of the Sea of Japan back-arc basin remains under debate, involving the opening of sub-basins such as the Japan and Yamato Basins. Detailed knowledge of the lithospheric structure will provide the key to understanding tectonic history. This study identifies the lithosphere–asthenosphere boundary (LAB) beneath the Sea of Japan back-arc basin using S-receiver functions (S-RFs). The study area, including the Japan and Yamato Basins, has been instrumented with broadband ocean-bottom seismometers (OBSs). S-RFs from these OBSs show negative Sp phases preceding the direct S arrivals, suggesting the LAB. The S-RFs also show abnormally reduced amplitudes. For further qualitative interpretation of these findings, we conduct transdimensional Bayesian inversion for S-wave velocity models. This less-subjective Bayesian approach clarifies that the low-velocity seafloor sediments and damped deconvolution contribute to the amplitude reduction, illuminating the necessity of such considerations for similar receiver function works. Inverted velocity structures show a sharp velocity decrease at the mantle depths, which we consider the LAB. The obtained LAB depths vary among sites: ~45 km beneath the Japan and Yamato Basins and ~70 km beneath the Yamato Rise, a bathymetric high between the two basins. The thick lithosphere beneath the Yamato Rise most likely reflects its continental origin. However, the thickness is still thin compared to that of eastern Asia, suggesting lithosphere extension by rifting. Notably, the Japan and Yamato Basins show a comparable lithospheric thickness, although the crustal thickness beneath the Yamato Basin is known to be anomalously thick. This consistency in the lithospheric thickness implies that both basins undergo similar back-arc opening processes.

© 日本地震学会

地震波異方性に基づく首都圏下のPHSスラブ構造についての新たな解釈

A New PHS slab Model beneath the Tokyo Metropolitan Area Based on 3-D P-wave

*石瀬 素子[1]、加藤 愛太郎[1]、酒井 慎一[1]、中川 茂樹[1]、平田 直[2]
*Motoko ISHISE[1], Aitaro Kato[1], Shin'ichi Sakai[1], Shigeki Nakagawa[1], Naoshi Hirata[2]

1. 東京大学地震研究所、2. 防災科学技術研究所
1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

■はじめに

首都圏とその周辺域では，伊豆弧のオホーツク/北米プレートへの衝突，相模トラフからのフィリピン海プレート東端部の沈み込み，日本海溝からの太平洋プレートの沈み込み，そして相模トラフから沈み込んだフィリピン海スラブ東端部と日本海溝から沈み込んだ太平洋スラブの相互作用（近接～接触）といった，地球上まれに見る多様なテクトニクスが展開されている．この一帯では非常に活発で多様な地震活動が見られ，歴史的に様々なタイプの大地震に見舞われてきていることが知られている．また，近い将来においても，プレートの沈み込みに伴うＭ７程度の地震の発生確率が非常に高いとされている（地震調査委員会，2014）．このようなテクトニクスと地震活動を解明すべく，1980年代から地震活動と３次元地震波速度構造解析研究が精力的に進められ，複数の構造モデルが提案されてきている（中村・島崎，1981；野口，1985；笠原，1985；Ishida, 1992；Nakajima et al., 2009; 酒井，2012など）．しかし，既往研究が示すフィリピン海スラブ上面の形状・深さ，およびフィリピン海スラブの北東端の位置と形状は，モデルによって大きく異なっている．そこで本研究では，これまで注目されてこなかった「地震波異方性」の観点から，首都圏下のプレート構造を求めその解釈を行う．

■データと解析方法

解析に使用した地震は，2010年～2013年に関東地方で発生したM3以上の1877地震であり，これらの地震の初動P波到達時刻をデータとした異方性トモグラフィー解析（Ishise et al., 2015）を実施した．観測点は，高感度地震観測網および首都圏に密に配備された首都圏地震観測網（MeSO-net）であり，観測点数はそれぞれ294点と296点で，合計500点である．なお，到達時刻は，防災科研で作成されたマニュアルピックの初動P波到達時刻データ（441,170個）を使用した．

■等方性構造の特徴

異方性を考慮したトモグラフィー解析で得られた等方性構造の特徴は，概して既往の等方性トモグラフィー研究（例えばNakajima et al., 2009）によるものと調和的であった．一方で，MeSO-netのデータを用いたことで浅部の構造の分解能が格段に向上し，これまでは明らかでなかった構造を検出することができた．例えば，深さ20km以浅において，東西方向に伸びるいくつかの帯状の構造が得られた．これらは，関東平野の下に存在すると推定されている古い付加体の分布とよく対応している．帯状構造の深さ変化を追跡することで，付加体の深部構造についての知見が得られると期待される．

■異方性構造の解釈

得られた異方性の方向の特徴から，大陸地殻の異方性（Ｒ１），海洋性地殻の異方性（Ｒ２），スラブマントルの低速度異常領域の異方性（Ｒ３），大陸マントルの異方性（Ｒ４），スラブマントルの高速度異常領域の異方性（H）を定義した（Ishise et al., 2021 JGR）．

Ｒ１，Ｒ２，Ｒ３，Ｒ４，Hの異方性の方向は，それぞれWNW-ESE，NW-SE，NS，WNW-ESE, NSで特徴付け

© 日本地震学会

られ，これらは大陸プレートの縁辺部に形成された付加体の走向方向，相模トラフの走向，地震メカニズムで卓越した断層面の走向，太平洋プレートの沈み込み方向，地震メカニズムで卓越した断層面の走向と一致しており，R１は付加体の層構造，R２はプレートbendingによる亀裂の配列，R３とHはスラブマントル内の弱面の配列，マントル物質の結晶格子選択配向に起因した異方性であると推定される．

■首都圏下のフィリピン海スラブについての新たな知見

上記の解釈を用いることで，フィリピン海プレートの構造について次の新たな知見が得られた．

（１）北緯35.7-36度付近で東西方向に伸びる一連の低速度異常領域は，これまでは蛇紋岩化したマントルウェッジ（Kamiya and Kobayashi, 2000）や大陸地殻とマントルウェッジ（Nakajima et al., 2009）と解釈されてきた．しかし，本研究で得られた異方性構造から，この低速度異常領域は，大陸プレート，フィリピン海プレートの海洋性地殻，大陸プレートのマントルで構成されていることがわかった．
その結果フィリピン海プレートの北東端は，既往研究（Uchida et al., 2009）による北東端と比べて南側に位置する可能性が示された．

（２）房総半島に分布する南北方向に伸びた深さ20km以深の低速度異常領域は，これまでは大陸プレートの地殻深部構造として解釈されてきた．しかし，本研究で得られた異方性構造から，スラブマントル内の低速度異常領域であることが新たに示された．
　その結果，フィリピン海プレートの上面深さが既往のモデルと比べ浅くなった．

© 日本地震学会

駿河トラフから東海地域に沈み込むフィリピン海プレート形状

Improved configuration of subducting Philippine Sea Plate from the Suruga Trough beneath the Tokai region, central Japan

*松原 誠[1]、汐見 勝彦[1]、馬塲 久紀[2]、佐藤 比呂志[3]、西宮 隆仁[4]
*Makoto MATSUBARA[1], Katsuhiko Shiomi[1], Hsatoshi Baba[2], Hiroshi Sato[3], Takahito Nishimiya[4]

1. 防災科学技術研究所、2. 東海大学海洋学部海洋地球科学科、3. 東京大学地震研究所、4. 気象庁気象研究所
1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Department of Marine and Earth Science, School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

1. はじめに

駿河トラフから沈み込むフィリピン海プレートとユーラシアプレートとの境界では、海溝型巨大地震が繰り返し発生してきた。巨大地震に伴う強震動予測やプレート間での固着状況を解明するためには、沈み込むフィリピン海プレートの高精度な形状を明らかにしていく必要がある。本研究では、防災科学技術研究所(防災科研)の高感度地震観測網(Hi-net)や気象庁、大学等の定常観測網に加えて海底の臨時観測点で得られたデータを合わせて解析した地震波トモグラフィーの結果や、微小地震の震源分布、低角逆断層型の地震の分布等を考慮して、フィリピン海プレート上面の形状を推定するとともにレシーバー関数解析も行い、その結果と比較した。

2. データ・手法

解析領域は駿河湾や東海地域を覆う東経136˚-139˚および北緯34˚-36˚である。陸域の定常観測網のデータと東海大学や気象研究所等により駿河湾内に設置された臨時海底地震計のデータを合わせて用いた。陸域定常観測網では2000年10月から2017年12月まで97,369個の地震を捉えていた。その中から、水平0.01˚(約1km)四方、深さ1kmの領域から読取数最大の地震を1個ずつ、36,632個の地震を解析に用いた。2018年1～8月に行われた海底観測点のデータから得られた、定常観測網ではトリガーされない228個の微小地震を解析に用いた。海底地震計により捉えられた地震については定常観測網の連続データから切り出したデータと合わせて再読取りを行った。さらに、陸域で実施された4発の人工地震探査からの到達時刻データも用いた。36,632個の地震からの1,573,094個のP波、1,532,330個のS波、4発の人工地震探査からの92個のP波、228個の地震からの3,958個のP波、4,809個のS波の到達時刻データを解析に用いた。

地震波速度構造解析には、Zhao et al. (1992)の手法にスムージングや観測点補正値を導入した地震波トモグラフィー法(Matsubara et al., 2004; 2005)を用いた。水平方向に0.05˚(約5km)間隔、深さ方向に2.5～30km間隔で三次元的にグリッドを配置した。初期速度構造は防災科研Hi-netにおける震源決定に用いられている一次元速度構造(鵜川・他, 1984)を用いた。

レシーバー関数解析は、速度不連続面の検出に有効な手法である。116個の地震を解析に用いた。観測機器の方向補正を行い(汐見, 2013)、周波数領域でのレシーバー関数解析を行った(Park and Levin, 2000)。時間領域における深さ変換には、本解析で得られた三次元地震波速度構造を用いた。

3. 結果と議論

日本全体の解析では、水平方向の分解能は0.2˚であるが(Matsubara et al., 2019)、チェッカーボードテストの結果、多くの観測点が存在し多くの地震が発生する東海地域では水平方向に0.1˚の分解能があることが分かった。海域の臨時観測点のデータを活用したことにより、海域下の深さ5kmや10kmの浅い領域の解像度が向上した。

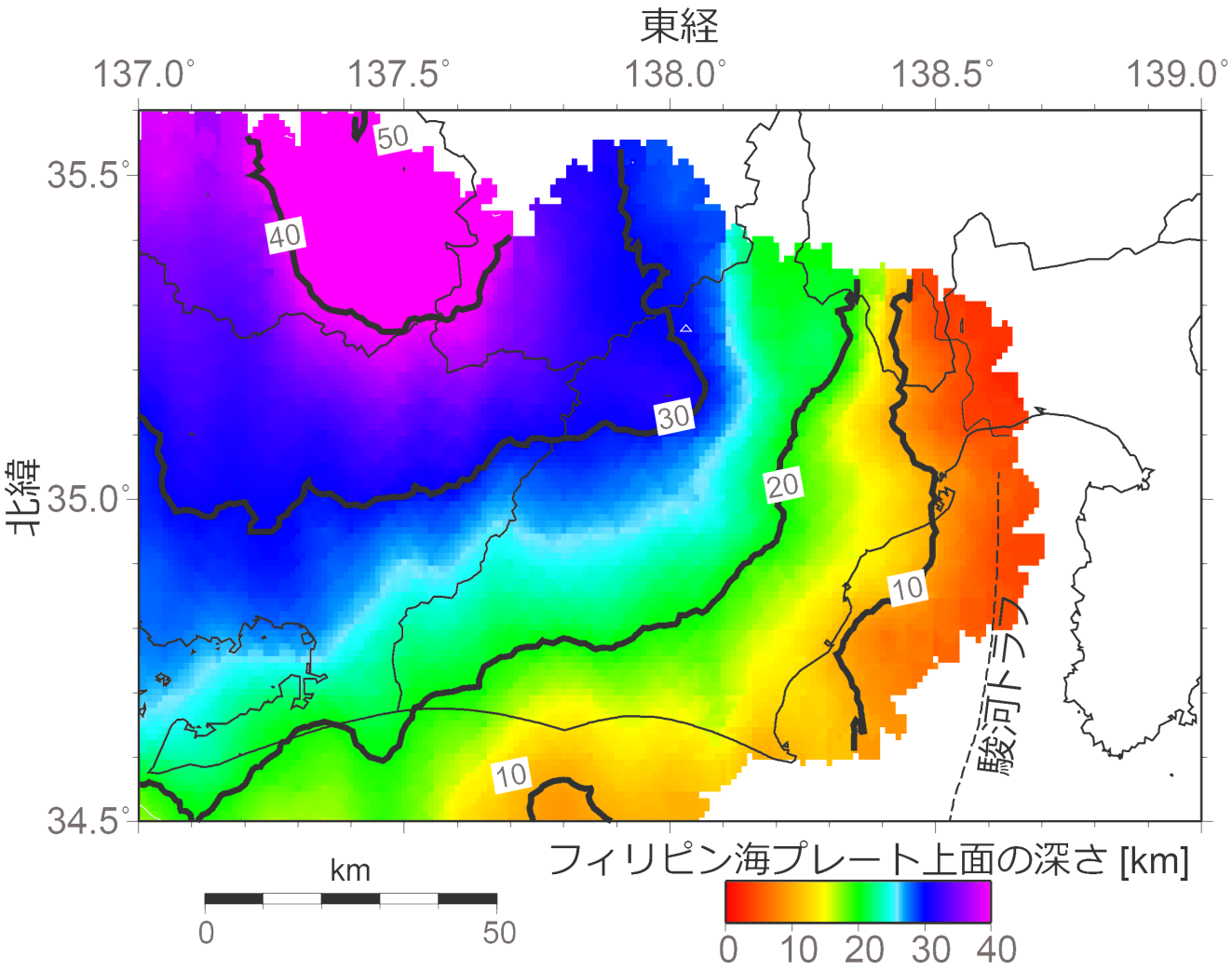
水平断面図を見ると深さ10kmや20kmでは中央構造線の北側の高速度域と南側の低速度域が明瞭にイメージ

© 日本地震学会

ングされた。西南日本では中央構造線は緩やかな北傾斜であるが、東海地域では急傾斜となっている。これは、伊豆弧衝突帯でのフィリピン海プレートの浮揚性沈み込みにより上盤側のユーラシアプレートの隆起運動を伴う短縮変形により生じたものである。Kano et al. (1990)では水平回転が議論されたが、本解析ではフィリピン海プレートの衝突による上盤のユーラシアプレートの三次元的な変形がイメージングされた。

鉛直断面図では、沈み込むフィリピン海プレートの低速度かつ高Vp/Vsな海洋地殻と低Vp/Vsな海洋マントルがイメージングされた。この海洋地殻の結果や微小地震の震源分布、プレート境界で発生していると考えられる低角逆断層型の地震の分布からフィリピン海プレート上面境界を構築した。この形状はレシーバー関数法による結果と調和的であった。駿河トラフから沈み込むフィリピン海プレートは深さ20km程度までが既往のモデルより沈み込む角度が緩やかになり、上面の深さは6-10km程度浅くなった。特に深さ10kmの等深線の位置は5～10km程度西側になった。また、深さ10kmや20kmの等深線の位置は静岡県三保半島から山梨県にかけての陸域下では5～20km程度西になった。定常観測点と臨時海底地震計を組み合わせることにより、プレート境界を交差する波線を用いた解析ができるようになり、浅い沈み込み帯の形状が明らかになった。

Matsubara, M., Shiomi, K., Baba, H., Sato, H., & Nishimiya T. (2021). Improved geometry of the subducting Philippine Sea plate beneath the Suruga Trough. Global and Planetary Change, 204, 2021, 103562, https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103562



D会場 | 一般セッション：S06. 地殻構造

2021年10月14日(木) 11:00 ~ 12:15 | D会場 D会場

AM-2

座長:石瀬 素子(東京大学地震研究所)

11:00 ~ 11:15

[S06-07] 伊豆衝突帯とその周辺におけるフィリピン海プレートおよびスラブの地殻の厚さ

○本多 亮[1]、安部 祐希[1]、石瀬 素子[2]、酒井 慎一[3,2]、行竹 洋平[2]、道家 涼介[1] (1.神奈川県温泉地学研究所、2.東京大学地震研究所、3.東京大学大学院情報学環・学際情報学府)

11:15 ~ 11:30

[S06-08] 南海トラフ域の3次元地震波速度・密度構造の構築

○仲西 理子[1]、Qin Yanfang[1]、Liu Xin[1]、藤江 剛[1]、汐見 勝彦[2]、小平 秀一[1]、高橋 成実[1,2]、中村 武史[3]、富士原 敏也[1] (1.海洋研究開発機構　海域地震火山部門、2.防災科学技術研究所、3.電力中央研究所)

11:30 ~ 11:45

[S06-09] 南海トラフ室戸沖における詳細な地震波速度構造：稠密OBS探査データを用いた波形解析

○藤江 剛[1]、新井 隆太[1]、白石 和也[1]、中村 恭之[1]、小平 秀一[1]、海宝 由佳[1]、尾鼻 浩一郎[1]、三浦 誠一[1] (1.海洋研究開発機構)

11:45 ~ 12:00

[S06-10] 日向灘における稠密地殻構造探査に基づくプレート沈み込み構造とスロー地震活動の関係

○新井 隆太[1]、三浦 誠一[1]、中村 恭之[1]、藤江 剛[1]、海宝 由佳[1]、小平 秀一[1]、望月 公廣[2]、仲田 理映[2]、沖野 郷子[3] (1.海洋研究開発機構、2.東京大学地震研究所、3.東京大学大気海洋研究所)

12:00 ~ 12:15

[S06-11] High-Resolution Seismic Imaging of the subducting Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-Nada in relation to the 2013 and 2015 tectonic tremor distributions

○馬 妍雪[1]、仲田 理映[1]、望月 公廣[1]、三浦 誠一[2]、中村 恭之[2]、新井 隆太[2]、藤江 剛[2]、海宝 由佳[2]、小平 秀一[2] (1.東京大学地震研究所、2.海洋研究開発機構)

伊豆衝突帯とその周辺におけるフィリピン海プレートおよびスラブの地殻の厚さ

Crustal thickness of the Philippine Sea plate and slab in and around the Izu collision zone, Japan

*本多 亮[1]、安部 祐希[1]、石瀬 素子[2]、酒井 慎一[3,2]、行竹 洋平[2]、道家 涼介[1]
*Ryou HONDA[1], Yuki Abe[1], Motoko Ishise[2], Shin'ichi Sakai[3,2], Yohei Yukutake[2], Ryosuke Doke[1]

1. 神奈川県温泉地学研究所、2. 東京大学地震研究所、3. 東京大学大学院情報学環・学際情報学府
1. Hot springs research institute of Kanagawa prefecture, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

はじめに

フィリピン海プレートはその北縁で大陸プレートに対し年間3 - 4 cmの速度で収束しており、南海トラフや相模トラフでは大陸プレートに対して沈み込んでいる。そのため、伊豆半島の東では関東地震が発生し、西では東海地震が発生する。一方、伊豆半島の付け根付近の伊豆衝突帯では、下部地殻は沈み込んでいるが上部地殻などは衝突し、浮揚性沈み込みが起きているため、周辺とは異なる地殻活動が生じている。伊豆衝突帯のプレートの収束様式や地震活動などは、伊豆島弧の地殻の厚さや物性によって大きく影響を受けていると考えられるが、その空間的な分布は未解明である。これまでに伊豆衝突帯を含む領域でレシーバ関数による構造解析が行われた(Kinoshita et al., 2015, J. Geophys. Res.)がフィリピン海プレート及びスラブのモホ面の3次元形状は推定されていない。そこで本研究では、レシーバ関数解析と地震波トモグラフィにより得られた結果からモホ面や地殻の形状を3次元的に捉え、この領域での地震活動との関係について考察した。

モホ面の探索

2007年から2017年までの期間に神奈川県とその周辺地域の観測点で得られた遠地地震(震央距離30–90、M6以上）の波形から、P波レシーバ関数とS波レシーバ関数を作成した。レシーバ関数は、時間拡張型マルチテーパ(Shibutani et al., 2008, Bull. Seismol. Soc. Am.)を用いて作成し、Matsubara et al. (2019, InTech Open)の3次元地震波速度分布と防災科学技術研究所の浅部・深部統合地盤モデルを仮定して深さ変換し空間的に平均した。 その結果、解析領域の広範囲の深さ20 –60 kmに不連続面の存在が示された。この不連続面は、これまでに推定されているフィリピン海スラブ上面(Hirose et al., 2008, J. Geophys. Res.; 弘瀬ほか, 2008, 地震; Nakajima et al., 2009, J. Geophys. Res.)に比べて深くモホ面と解釈するのが妥当である。ただし、原因については断定できていないが、丹沢山地付近ではモホ面に対応するレシーバ関数のピークが検出できなかった。 そこで、丹沢山地付近のモホ面深度を別のデータを用いて補完することを試みた。Kodaira et al. (2007, J. Geophys. Res.)が人工地震探査データから推定した伊豆島弧の速度構造では、地殻の底部のP波速度が7.5 km/s程度である。それを参考に、Ishise et al. (2021, J. Geophys. Res.)が地震波トモグラフィにより推定したモデルからP波速度7.5 km/sの等速度面の深度分布を抜き出したところ、その分布はレシーバ関数で検出したモホ面の分布とおおよそ一致した。このことからその等速度面がこの地域のモホ面深度の指標になると判断し、レシーバ関数でモホ面が検出できなかった領域をその等速度面で補完した。

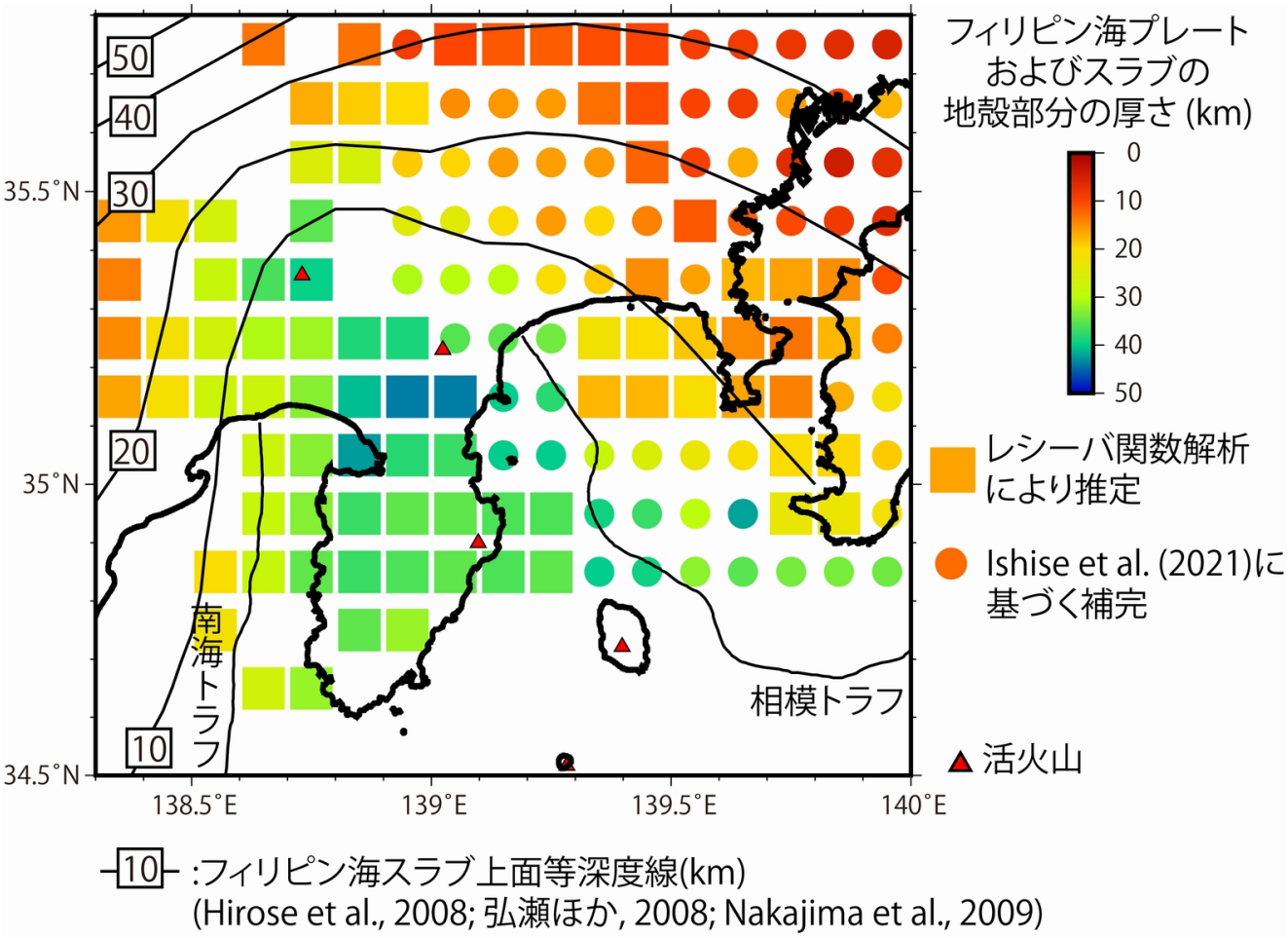
地殻の厚さ分布

上述の先行研究により推定されたフィリピン海スラブ上面の深度分布を考慮してフィリピン海スラブの地殻の厚さの分布を推定した。その結果、地殻は伊豆半島と富士山、箱根火山付近の直下では35 km以上の厚さを持ち、その領域から遠ざかるにつれて薄くなるように分布することが分かった(図)。 伊豆弧の北西延長ではスラ

© 日本地震学会

ブ内の地震活動は不活発であるが、相模トラフとその北西延長に沿う領域の周辺ではやや活発な地震活動があり、その中でも丹沢山地東部ではスラブの沈み込みと整合的なメカニズムの震源が分布する(Yukutake et al., 2012, Earth Planets Space)。またその領域は、剪断歪の集中域(Doke et al., 2020,Geol. Soc. Spec. Publ.)に近接し、さらに1923年関東地震のアスペリティの西端近傍でもある。つまり相模トラフとその北西延長に沿う領域付近では歪、応力、プレート境界のカップリング強度の空間変化が大きい。 本研究で推定した地殻の厚さには、相模トラフとその北西延長を挟んで南西側から北東側へ厚さが20 km以上減少する、という特徴がある。地殻の厚さが急変する領域には、地殻を構成する岩石の組成や密度・浮力などの空間変化の存在が示唆され、それが歪、応力、カップリング強度の分布に影響を与えて収束様式を変化させる原因になっていると考えられる。

謝辞 防災科学技術研究所、東京大学、気象庁の地震波形データを使用させていただきました。本研究の一部は、首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクトの助成を受けて実施いたしました。記して感謝いたします。



© 日本地震学会

南海トラフ域の3次元地震波速度・密度構造の構築

Constructing a 3D seismic velocity and density model of the Nankai Trough

*仲西 理子[1]、Qin Yanfang[1]、Liu Xin[1]、藤江 剛[1]、汐見 勝彦[2]、小平 秀一[1]、高橋 成実[1,2]、中村 武史[3]、富士原 敏也[1]
*Ayako NAKANISHI[1], Yanfang Qin[1], Xin Liu[1], Gou Fujie[1], Katsuhiko Shiomi[2], Shuichi Kodaira[1], Narumi Takahashi[1,2], Takeshi Nakamura[3], Toshiya Fujiwara[1]

1. 海洋研究開発機構　海域地震火山部門、2. 防災科学技術研究所、3. 電力中央研究所
1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. CRIEPI

南海トラフ巨大地震震源域における地震・津波ハザード評価、強震動予測、高精度震源決定などに用いる地下構造標準化の試みとして、沈み込むフィリピン海プレートの形状を含む3次元地震波速度構造モデルが提案された(Nakanishi et al., 2018)。このモデルは、主に、屈折法地震探査により推定された地震波速度構造に基づくものであるが、海域における震源決定、海域で発生する地震による陸域の地震動（特に長周期地震動）の予測や地震発生シミュレーションの信頼性の向上のためには、3次元構造モデルの高精細化のみならず、S波速度構造、密度構造を反映する必要がある。しかし、現時点では、地震探査においてS波を射出可能な制御震源の活用が困難であり、海域におけるS波速度構造の詳細な把握の事例は限られている（例えばTakahashi et al., 2002）。密度についても掘削調査による局所的な情報に限られており、空間的な構造は把握できていない。本研究では、屈折法地震探査に限らず、反射法地震探査や自然地震トモグラフィー、表面波の解析などから成果として得られる様々な地震波速度情報を統合した3次元地震波速度構造モデルとこれに基づく３次元密度構造モデルの構築を目指す。モデルの構築にあたってS波速度と密度の情報が現段階では十分ではないため、最初に、既存の3次元P波速度構造から、経験式（例えば、Brocher, 2005、Ludwig et al., 1970）によってS波速度や密度に変換することとした。提案されている様々な経験式の中から、南海トラフ域に適用できるものについて整理し、これまでに、地殻最浅部の堆積層とそれ以下の深部の構造について、それぞれ別の変換式を適用した構造モデルを作成した。今後、付加体と沈み込むプレート側の構造を構成する岩石の性質との関連を考慮して、各地層区分に対する変換式の適用を検討するとともに、調査観測の成果から得られたS波速度情報や地震調査および重力データとの比較等による変換式の検証方法の検討を進める。

本研究は、文部科学省による科学技術試験研究委託事業「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として実施している。また、本研究の一部は、JSPS科研費JP19H01982の助成を受けたものである。

© 日本地震学会

南海トラフ室戸沖における詳細な地震波速度構造：稠密OBS探査データを用いた波形解析

Detailed P-wave velocity structure derived from marine controlled-source seismic survey off Cape Muroto Nankai Trough

*藤江 剛[1]、新井 隆太[1]、白石 和也[1]、中村 恭之[1]、小平 秀一[1]、海宝 由佳[1]、尾鼻 浩一郎[1]、三浦 誠一[1]
*Gou FUJIE[1], Ryuta Arai[1], Kazuya Shiraishi[1], Yasuyuki Nakamura[1], Shuichi Kodaira[1], Yuka Kaiho[1], Koichiro Obana[1], Seiichi Miura[1]

1. 海洋研究開発機構
1. JAMSTEC

フィリピン海プレートが日本列島下に沈み込む南海トラフ海域は、世界でもっとも地震観測研究が充実しているプレート沈み込み帯の一つであり、M8クラスの巨大地震から、微小地震、さらには各種スロー地震(低周波微動、非地震性滑りなど)まで、さまざまなプレート境界断層すべり現象が時空間的に不均質に分布していることが知られている。スロー地震は通常の地震が発生する周辺に分布する傾向があるなど、これら多様な断層すべりは何らかの関連性を持っており、プレート境界断層で発生する現象として包括的に理解することの重要性が指摘されている。

最近の地震活動研究や地下構造研究の進展から、海山の沈み込みなどプレート境界断層形状の複雑さや断層付近の物性(低速度層)などローカルな構造不均質が、スロー地震活動分布などと興味深い相関を示すことが分かってきた。そこで、海洋研究開発機構では南海トラフ沈み込み帯全域のプレート境界断層の詳細な実態把握を目指した大規模地下構造調査研究を2018年から進めている。この一環で、2019年11月～12月、我々は室戸岬沖の土佐碆と呼ばれる海底地形の高まり付近において、制御振源(エアガン)と稠密な海底地震計アレイ(2km間隔)を用いた構造調査観測を実施した。土佐碆の下には、大きな海山が沈み込んでいると考えられており、その陸側(北側)では巨大地震が、トラフ側(南側)ではスロー地震(低周波微動)が観測されるなど、本海域は海山の沈み込みがプレート沈み込み帯の発達や断層すべり挙動の多様性に与える影響を研究する上で理想的な条件を揃える。

本研究では、プレート境界断層形状に加えてプレート境界付近の流体分布や underthrust sediment などの実態把握を進め、プレート境界断層すべり挙動の多様性を支配する構造要因を解明することを目指して、下記の手順で地震波速度構造モデルを構築している。まず、初動走時トモグラフィによって長波長地震波速度構造モデルを構築し、その結果を初期構造として波形インバージョン（周波数領域、音響場、Full-waveform Inversion, FWI）によって高解像度地震波速度構造のモデリングを行う。FWI解析は、入力データのノイズ抑制やインバージョン・パラメータの調整など、モデルの最適化に向けた課題が残っている状況ではあるが、海洋地殻上面形状やBSRのほか、デコルマを示唆するような地震波速度の逆転など、興味深い構造的な特徴が描き出されている。

特に注目すべきは、上盤内の地震波速度の不均質である。たとえば、土佐碆海盆下のプレート境界上面は顕著な低速度になっている一方、そのトラフ側(海側)には明瞭な高速度帯が形成されているなど、プレート境界断層上面の地震波速度はトラフ軸から陸側に向かって単調に上昇しているわけではないことが分かってきた。観測された構造不均質とプレート境界断層すべり挙動の関連性については、今後、さまざまな角度から検討を加えていく必要があるが、地震波速度の不均質性が強い場所で低周波微動が観測されているなど興味深い相関が見られており、我々の構造解析結果は、プレート境界断層のすべり挙動の理解には、断層形状にとどまらず断層物性の不均質性についても考慮していく必要があることを示唆している。

© 日本地震学会

日向灘における稠密地殻構造探査に基づくプレート沈み込み構造とスロー地震活動の関係

Subduction structure in the Hyuga-nada subduction zone inferred from dense active-source seismic surveys and its relation to slow earthquake activity

*新井 隆太[1]、三浦 誠一[1]、中村 恭之[1]、藤江 剛[1]、海宝 由佳[1]、小平 秀一[1]、望月 公廣[2]、仲田 理映[2]、沖野 郷子[3]
*Ryuta ARAI[1], Seiichi Miura[1], Yasuyuki Nakamura[1], Gou Fujie[1], Yuka Kaiho[1], Shuichi Kodaira[1], Kimihiro Mochizuki[2], Rie Nakata[2], Kyoko Okino[3]

1. 海洋研究開発機構、2. 東京大学地震研究所、3. 東京大学大気海洋研究所
1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

南海トラフ西端に位置する日向灘海域では低周波微動や超低周波地震などの多様なスロー地震活動が発生している（Yamashita et al., 2015; Tonegawa et al., 2020）。これらの地震活動域は九州パラウ海嶺が沈み込んでいる場所に対応しており,沈み込む海山と一連の地震活動との関係について活発な議論がなされている。例えば、微動活動は地磁気異常データ等から推定される海山の縁に分布し、またプレート境界の等深度線に沿って震央が移動することが知られている。こうした活動場所や移動を支配する要因を理解するためには、活動が発生する場所の断層形状や物性、摩擦特性を詳細に把握する必要がある。

海洋研究開発機構では南海トラフ域全体のプレート沈み込み構造を高精細化し、スロー地震活動を含むプレート境界断層での多様なすべり現象の発生要因を包括的に理解することを目指し、2018年度から大規模かつ稠密な地震波構造探査研究を実施してきている。2020年度には新学術研究領域「スロー地震学」および「日向灘掘削計画」との共同研究として、海底地震計（OBS）を用いた稠密屈折法探査と5.6 km長のストリーマーケーブルを用いた反射法探査を日向灘海域で実施した。屈折法探査では、OBS100台を海溝に平行な測線（HYU01）と沈み込み方向の測線（HYU02）の2測線に稠密（2 km間隔）で展開し、エアガン発振による地震波データを取得した。反射法探査では、これらの測線に加えてHYU01に直交する2測線（HYU18、HYU22）でもデータを取得した。本発表では主に、海溝平行測線（HYU01）のデータ解析から明らかとなった上盤プレート内およびスラブ沈み込み構造とスロー地震活動の関係について議論する。

OBSおよびストリーマーケーブルデータを用いた走時トモグラフィ解析から、プレート境界周辺の地震波速度がプレート境界に沿って変化することがわかってきた。最も注目されるのは、九州パラウ海嶺の沈み込み域にはプレート境界に比高1～2kmほどの高まりがあり、その高まりの東縁部に周囲に比べて顕著な低速度域（Vp～4.0km/s）が存在する点である。この低速度域は低周波微動の活動度が測線の中で最も高い場所に一致することから、プレート境界断層周辺の物性の不均質性が微動活動と相関していることが示唆される。 今後は、OBSデータへ波形インバージョン解析を適用することで、特にプレート境界周辺の不均質構造をより高解像度で明らかにしていく計画である。

© 日本地震学会

High-Resolution Seismic Imaging of the subducting Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-Nada in relation to the 2013 and 2015 tectonic tremor distributions

*馬 妍雪[1]、仲田 理映[1]、望月 公廣[1]、三浦 誠一[2]、中村 恭之[2]、新井 隆太[2]、藤江 剛[2]、海宝 由佳[2]、小平 秀一[2]
*Yanxue Ma[1], Rie Nakata [1], Kimihiro Mochizuki[1], Seiichi Miura[2], Yasuyuki Nakamura[2], Ryuta Arai[2], Gou Fujie[2], Yuka Kaiho[2], Shuichi Kodaira[2]

1. 東京大学地震研究所、2. 海洋研究開発機構
1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Various types of slow earthquakes including slow slip events (SSEs), very low frequency earthquakes (VLFEs) and tectonic tremors occur around the segment boundary off the Bungo Channel located between the Kyushu and Shikoku Islands. Their distributions appear to vary along depth of the subduction of the Philippine Sea Plate. The VLFE and tremor activities have been observed to occur around a subducted seamount of the Kyushu Palau Ridge (KPR, Yamashita et al.,2017; Tonegawa et al., 2020; Nakata et al., 2020). We processed two seismic reflection profiles; one existing KR0114-8 profile (Park et al., 2008) and the other HYU-02 profile newly acquired by JAMSTEC in 2020 to investigate the relationship between the distribution of the tremor activity, the morphology and physical properties along the plate interface. The HYU-02 line is parallel to the subduction direction, and the KR0114-8 line runs along the strike of the Nankai Trough near the deformation front extending further to the west across the KPR. The HYU-02 line was processed, and a pre-stack depth migration image was obtained. We performed denoise, deghost and designature on the seismic reflection data of KR0114-8. Then, we applied pre-stack time migration to the dataset and imaged in high resolution complex geological structures, the topography of the subducting oceanic crust including the KPR, decollement and faults. The KPR is imaged as a compex topographic high. We compared these structures seen in the seismic images and distributions of the 2013 and 2015 tremor activities. During the 2015 episode, the tremor activity around the KR0114-8 profile apparently concentrates to the east of the KPR reaching near the trough axis where typical accretionary prisms are formed. On the other hand, most of 2013 tremors occurred in the west of the KPR. Tremors are considered to occur along the plate interface. The spatial relationships between the tremor distribution and the subducting KPR suggests that the geometry of the plate interface and surrounding structural disturbances induced by the KPR subduction may have a primary control on the tremor generation.

© 日本地震学会

D会場 | 一般セッション：S06. 地殻構造

2021年10月14日(木) 13:30 ~ 14:00 | D会場 D会場

PM-1

座長:田中 優作(東京大学地震研究所)

13:30 ~ 13:45

[S06-12] **Three-Dimensional Seismic Attenuation Models for Central Nepal**

○Chintan Timsina[1]、James Mori[2]、Masumi Yamada[2] (1.Graduate School of Science, Kyoto University、2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

13:45 ~ 14:00

[S06-13] **Extinction in genetic algorithms: application to receiver functions inversion**

○Admore Phindani MPUANG[1,2]、Takuo SHIBUTANI[2] (1.Graduate School of Science, Kyoto University 、2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

Three-Dimensional Seismic Attenuation Models for Central Nepal

*Chintan Timsina[1], James Mori[2], Masumi Yamada[2]

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

We imaged the three-dimensional upper crustal attenuation structure of central Nepal in the source region of the 2015 Gorkha earthquake (Mw 7.8) by analyzing more than 35000 seismic waveforms from local earthquakes. We used P- and S-wave spectra of the Gorkha earthquake sequence recorded by a temporary network of 42 stations deployed for 11 months. We modeled the amplitude spectra for the path-averaged attenuation operator (t*) using a non-linear least square technique by assuming a ω^{-2} source model for the frequency band of 1-30 Hz. This procedure depends on finding an optimal fit between observed spectra and theoretically computed spectra based on low-frequency spectral level (Ω_o), corner frequency (f_c), and t*. During the fitting, station site responses are estimated by stacking together all the residual for each station. After removing the site response, the fitting procedure is repeated and the weighting of each t* measurement is also estimated based on how well the spectrum is modeled. We obtained more than 25,000 high-quality t* measurements which are then inverted for frequency-independent Q_p and Q_s structure using SIMUL2000 (Thurber and Eberhart-Phillips, 1999) code. For the ray tracing, we used the 3D velocity models and hypocenter locations from the result of our previous velocity tomography of the region. In general, preliminary results of the attenuation structure agree with the velocity structure, where the high-velocity regions are consistent with high Q-values (low attenuation). In this presentation, we will further discuss the lateral variations on velocity and attenuation structure of the region and their implications for the 2015 Gorkha earthquake.

© 日本地震学会

Extinction in genetic algorithms: application to receiver functions inversion

*Admore Phindani MPUANG[1,2], Takuo SHIBUTANI[2]

1. Graduate School of Science, Kyoto University , 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

The use of genetic algorithms in receiver functions inversion for crustal and uppermost mantle velocity-depth structure is well established (e.g. Shibutani et al., 1996). Their operation is analogous to the evolution of biological species through the use of (pseudo)random numbers to control the selection, crossover and mutation processes in their search for an optimal model(s). Despite their robustness, one drawback of the standard genetic algorithms is that towards the end of a 'run', only a few new solution ideas are explored which may lead to the stagnation of the optimization process. This can be an especially major drawback for large model dimensions, such as in the inversion of receiver functions for dipping and anisotropic structures. To mitigate this problem, this study introduces an extinction concept to genetic algorithm inversion of receiver functions for crustal shear wave velocity structure. With extinction, parts of the explored model population are regularly replaced to exploit highly fit models as well as random explorations of other domains. The concept of self-organized criticality, which has similarly been used to explain the extinction of biological species (e.g. Newman, 1996), is applied to control the size and frequency of the extinction events in the genetic algorithm following Krink et al. (2000).

Three different model replacement strategies are tested against the standard genetic algorithm of Shibutani et al. (1996) for performance comparison on both synthetic and real data problems. In random replacement, extinct models are replaced by randomly generated models. Survivor mutant replacement comprises replacing extinct models with randomly generated mutations of the surviving population. Lastly, in best-model mutant replacement, extinct models are replaced with mutations of the current best model, mutated at 2, 3 or 4 points selected at random positions. Preliminary results show that random replacement achieves the most extensive model space exploration but with the least exploitation of fitter models, consequently resulting in a less fit ‘best model’. Greater exploitation of fitter models is achieved by survivor mutant and best-model mutant replacement strategies which obtain fitter best models in fewer generations compared to the standard genetic algorithm. A combination of the three replacement strategies may offer the best balance between exploitation of 'fitter' models and exploration of the whole model space without affecting the efficiency of the algorithm as shown by the results from the synthetic tests. The difference in computational costs between the standard genetic algorithm and the genetic algorithm with extinction was insignificant during these tests. These results show that extinction in genetic algorithm inversion of receiver functions can be tuned to improve the efficiency of the optimization process in escaping local minima as well as reducing convergence time. This technique can prove very useful for optimization problems with large dimension model spaces.

© 日本地震学会

D会場 | 一般セッション：S03. 地殻変動・GNSS・重力

2021年10月14日(木) 14:00 ~ 15:00 | D会場 D会場

PM-1

座長:小林 知勝(国土地理院)、田中 優作(東京大学地震研究所)

14:00 ~ 14:15

[S03-01] 東北地方太平洋沖地震の余効変動予測モデルを利用した広域の微小な地殻変動検出

〇藤原 智[1] (1.国土地理院)

14:15 ~ 14:30

[S03-02] 能登半島で発生した群発地震と、それに伴ってゆっくりと進行する地殻変動

〇田中 優作[1]、鷺谷 威[1] (1.名古屋大学)

14:30 ~ 14:45

[S03-03] 陸上ボアホール歪観測による紀伊半島沖浅部SSEの検出

〇板場 智史[1]、太田 和晃[2]、長谷川 浩[3] (1.産業技術総合研究所、2.防災科学技術研究所、3.気象庁)

14:45 ~ 15:00

[S03-04] 継続時間1時間のスロースリップイベント

〇勝間田 明男[1]、宮岡 一樹[3]、露木 貴裕[5]、板場 智史[4]、田中 昌之[5]、伊藤 武男[6]、高森 昭光[2]、新谷 昌人[2] (1.富山大学、2.東大地震研究所、3.気象庁、4.産総研、5.気象研究所、6.名古屋大学)

東北地方太平洋沖地震の余効変動予測モデルを利用した広域の微小な地殻変動検出

Detection of small crustal deformations in a wide area using spatiotemporal functional model of post-seismic deformation after the 2011 Tohoku-oki earthquake

*藤原 智[1]
*Satoshi FUJIWARA[1]

1. 国土地理院
1. Geospatial Information Authority of Japan

地殻変動の空間的分布を求めるためには、観測点ごとに抽出目的の地殻変動が含まれる期間の前後の差をとることによって求められるのが通常である。ところが、対象となる地域の範囲が広くなると、例えばプレート運動に伴うような広域の地殻変動も含まれてくるために、単純に２時期の差をとるだけでは、抽出目的以外の変動がノイズとなって現れてしまう。本報告では、国土地理院の電子基準点を200点以上利用し、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による余効変動を時間と空間両方で関数モデル（時空間モデル）化することで、実際の観測値からの差分を求めるだけで余効変動以外の微小な地殻変動を精度よく、かつ非常に簡便に求められることを示す。

Tobita (2016)により、下記の式で表される、２つの対数と１つの指数関数の混合モデルを用いることで、東北地方太平洋沖地震の余効変動の時系列が短・中期的な時間推移とともに、場所によって異なる余効変動の空間分布も予測できる時空間モデルが作成できることが示されている。

$$D(t)=a\ln(1+t/b)+c+d\ln(1+t/e)-f\exp(-t/g)+Vt$$

ここで、$D(t)$は余効変動時系列の各成分、t は地震後の日数、lnは自然対数、b、 e、 g は全観測点に共通の対数関数または指数関数の緩和時定数、Vは観測点ごとの定常速度である。

この時空間モデルを利用して2020年までの余効変動の時系列を精査したところ、2015年2月以降に北海道から中部地方にかけての広域において一定速度で進行する新たな変動が見いだされた。この一定速度成分も新たに関数項として追加することで、時空間モデルの余効変動の推定精度を向上させた。

一般に、微小な地殻変動を時系列から検出するためには、対象となる場所や時期に合わせて近傍に基準となる固定点を設定したり、広域の変動を除去するためにトレンドを観測点ごとに推定したりといったモデル化をその都度ごとに行う必要がある。本報告は、このモデル化を時空間モデルであらかじめ与えてしまうものである。 最初にローカルな変動の抽出例として、2018年5月末～7月に発生した房総半島SSEについて図１に示す（固定点 福江）。数十日間の短期ではあるが、単純に2時期の差分をとった図１左では東北沖地震の余効変動があちこちに含まれており、そのパターンも一様でない。しかし、改良した時空間モデルを使用して時間変化を求めた図１右では房総半島のSSEのみがきれいに抽出されており、単純の2時期の差とは比べものにならない地殻変動抽出力を持っている。

この時空間モデルはさまざまな微小な変位現象を抽出するのに有効である。もちろん、上記のようなローカルな現象にも使えるが、ローカルな範囲内では大地震の余効変動という広域の現象は均一的に現れるた

© 日本地震学会

め、ローカルな範囲内のみの差分でも十分なことが多い。したがって、本時空間モデルが真価を発揮するのは広域にわたる微小な現象の抽出である。こうした広域で微小な変動を検出する例として積雪による荷重変形による変動を図２に示す。この図は、例年3月上旬頃が最深積雪になることから地震後の各年（2015年を除く）3月11日前後の実測値から時空間モデルの残差を求め、その平均値を描いたものである。1~2mmという非常に小さな変化を求めてこうした図を作成するには各点で変化をモデル化するなど複雑な操作が必要になるが、時空間モデルを差し引くだけでこうした図が簡単に描くことができる。

この時空間モデルの特徴は、広域（北海道～中部地方）、高精度、簡便（観測値から差し引くだけ）、将来予測可能（新たな広域の現象が現れなければ使い続けられる）であり、変動検出には応用範囲も広い強力なツールである。

参考文献 Tobita M (2016) Earth Planets Space. https://doi.org/10.1186/s40623-016-0422-4

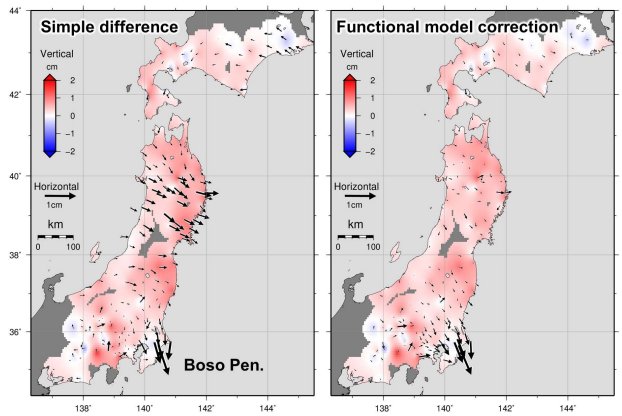


図１ 2018年6月の房総半島沖SSEによる地殻変動
左 5月末～6月末の10日間ごとの単純差（固定点 福江）
右 上記から東北地震余効変動関数モデルによる変化を除去

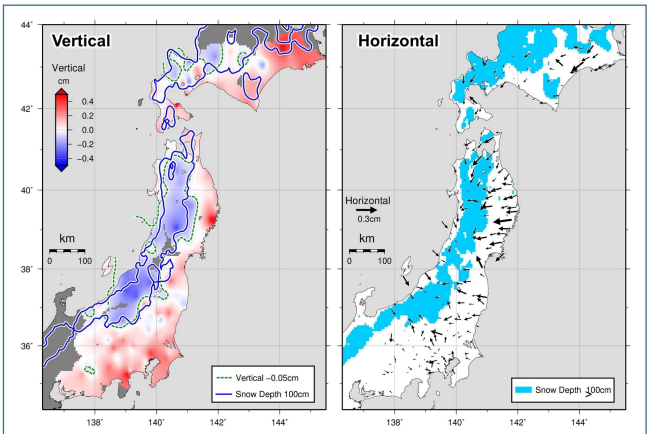


図２ 各年3月上旬の余効変動モデルからのずれと積雪量
左 上下変位
右 水平変位
各変位量は、各年（2015年を除く、2012年～2020年の3月11日前後10日間平均値から東北地震余効変動関数モデルによる変化を除去して求めている。

© 日本地震学会

能登半島で発生した群発地震と、それに伴ってゆっくりと進行する地殻変動

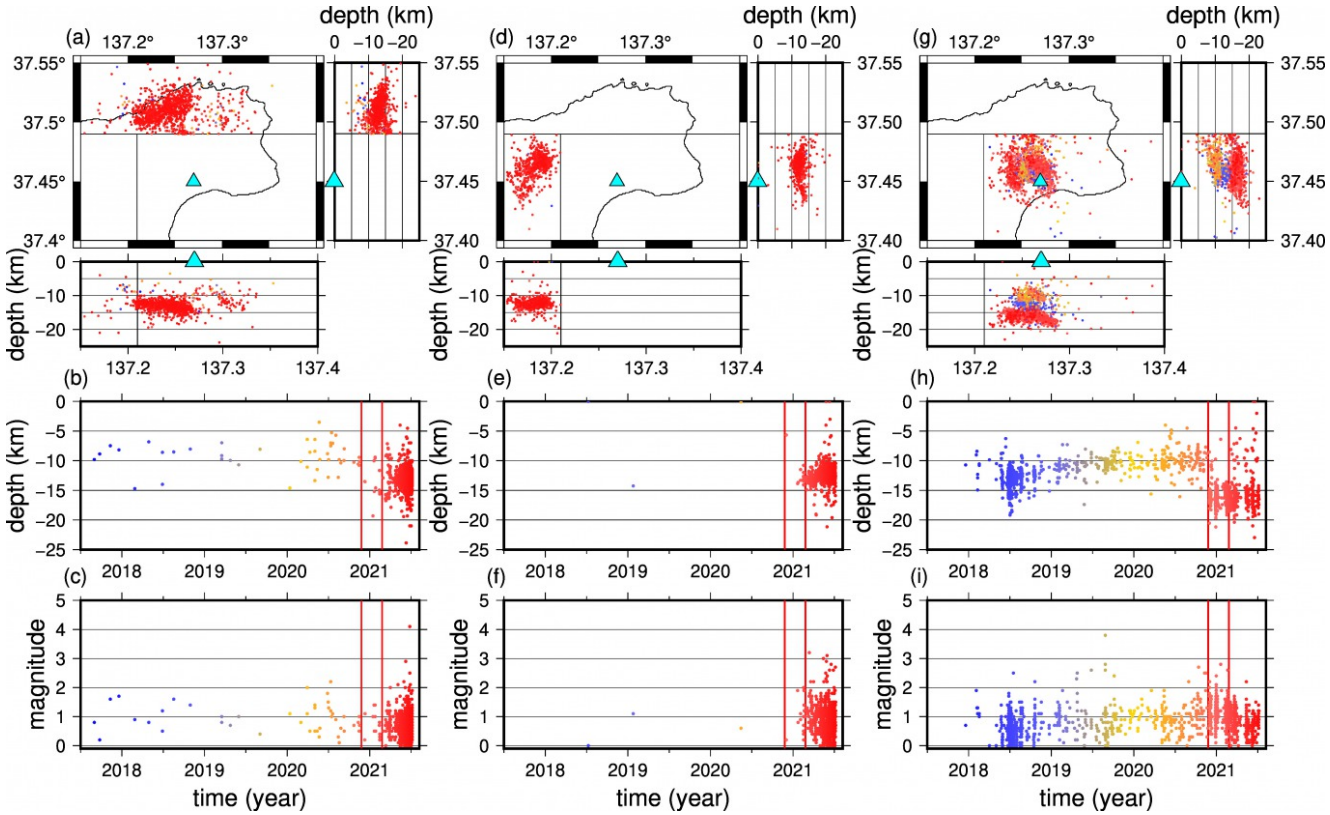
Slow crustal deformation observed together with earthquake swarm in Noto peninsula

*田中 優作[1]、鷺谷 威[1]
*Yusaku TANAKA[1], Takeshi Sagiya[1]

1. 名古屋大学
1. Nagoya Univ.

地震、すなわち断層すべり運動の進行速度は幅広い帯域で観測される。このうち、非常にゆっくりとした速度で進行するものをスロー地震と呼び、特に、地震波の検出が困難であるため地殻変動を通して検出されるものをスロースリップイベント（SSE）と呼ぶ。SSEはこれまで環太平洋の多くの沈み込み帯で観測されているが、内陸においての検出事例はほとんど報告されていない。これには内陸でSSEが発生しづらい何らかの物理的要因が存在する可能性が考えられるが、それに加えて、SSEが内陸で発生したとしても、その地殻変動の振幅や空間スケールが小さく、明確にそのシグナルがSSEであると判断することが困難であるという事情もある。これまでに報告された数少ない内陸SSEの観測報告としては、2012年に北海道で発生した群発地震と同時期に観測された局地的な地殻変動を、群発地震を引き起こしたSSEによるものだとみなして説明を試みたOhzono et al., (2015) があるが、内陸で発生した群発地震に伴ってSSEによると見られる地殻変動が発見された事例は他に無かった。 本発表では、2018年から現在まで引き続き発生している能登半島における群発地震と、その活動の変化に伴って2020年11月から進行し始めた、ゆっくりとした地殻変動について報告する。当該群発地震は2018年に能登半島北部、深さ約 13 km の地点で発生し、その後、非常にゆっくりと深さ約 8 km までマイグレーションした様子が観測されている。そのマイグレーションは2020年11月に終息したが、それとほぼ同時に、その下部、深さ約 17 km の地点で群発地震が発生した。更に、この群発地震の下方移動と同時に、その直上のGNSS観測点(GEONET, 珠州)で地殻変動が進行を開始した。この地殻変動は、水平方向の変動は2021年2月ごろ終息したものの、上下方向については2021年7月末においても隆起を続けている。また、2021年2月ごろ及び3月ごろのそれぞれに、それまでに群発地震が観測されていた領域の西部と北部で、別の群発地震が開始した。 これまでの多くの研究で、群発地震やSSEの発生には、断層中の流体移動が関与していることが示唆されている。能登半島については、火山地帯ではないものの温泉が湧くことで有名であり、また、マントルからヘリウムガスが湧き出てくることも知られている(Umeda et al., 2009)。このように、能登半島の地下には多くの流体が存在することが分かっている。また、多くの先行研究で、能登半島の地下には多くの断層が存在することも分かっているため、今回観測された現象には、能登半島地下の断層中の流体移動が関与していることが疑われる。そこで、本発表では、この現象の詳細と、それを説明するモデルを提唱する予定である。

© 日本地震学会


(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
(g)
(h)
(i)
depth (km)
depth (km)
depth (km)
magnitude
time (year)
time (year)
time (year)

© 日本地震学会

陸上ボアホール歪観測による紀伊半島沖浅部SSEの検出

Detection of shallow SSE off the Kii Peninsula by onshore borehole strainmeter

*板場 智史[1]、太田 和晃[2]、長谷川 浩[3]
*Satoshi ITABA[1], Kazuaki OHTA[2], Hiroshi HASEGAWA[3]

1. 産業技術総合研究所、2. 防災科学技術研究所、3. 気象庁
1. AIST, 2. NIED, 3. JMA

2020年12月上旬から翌1月下旬にかけて，紀伊半島沖熊野灘において活発な浅部微動活動が観測された[太田ほか, 2021]．2020年12月中旬～翌1月中旬にかけては，産総研のボアホール歪観測3点においてわずかな変化が観測された．観測された歪変化からプレート境界面上におけるすべりを仮定して断層面を推定したところ，微動発生域のうち西側・深部側においてMw6.2のすべりが推定された（図1 model A）．微動発生域全体がすべったと仮定して断層面を推定したところ，その規模はMw6.6と推定された(図1 model B).

海域のボアホールにおける間隙水圧観測などによると，この領域では繰り返し浅部SSEが発生していることが報告されている[Araki *et al.*, 2017]．観測条件が良好な場合（SSEの規模が大きい，降雨・気圧変化が少ない，深部SSEが発生していない等）については陸域のボアホール歪観測でも有意な変化が検出され断層モデルの推定が可能であることが分かっている（例えば2016年4月）．スタッキング手法[宮岡・横田, 2012]を用いて過去の観測波形を網羅的に調査したところ，これらのイベント以外にもいくつかの浅部SSE発生の可能性がある事例が検出された．陸域の観測網は，浅部SSE発生領域からは大きく離れており，海溝軸（dip）方向へのすべりの広がりを把握することは困難である．一方でstrike方向の広がりなど，大まかな全体像を把握するには有用であると考えられる．

本講演では，上述の2020年末～2021年初めのイベントのほか，いくつかの浅部SSE検出事例を紹介する．

参考文献

Araki, E., D. Saffer, A. Kopf, L. M. Wallace, T. Kimura, Y. Machida, S. Ide, E. Davis, IODP Expedition 365 shipboard scientists (2017), Science, 356(6343), 1157-1160, doi:10.1126/science.aan3120.
太田和晃, 松澤孝紀, 汐見勝彦 (2021), 紀伊半島南東沖の微動活動（2020年12月～2021年1月）, 地震予知連絡会会報, 106, 印刷中.
宮岡一樹, 横田崇 (2012), 地殻変動検出のためのスタッキング手法の開発ー東海地域のひずみ計データによるプレート境界すべり早期検知への適用ー, 地震２, 65, 205-218.

© 日本地震学会

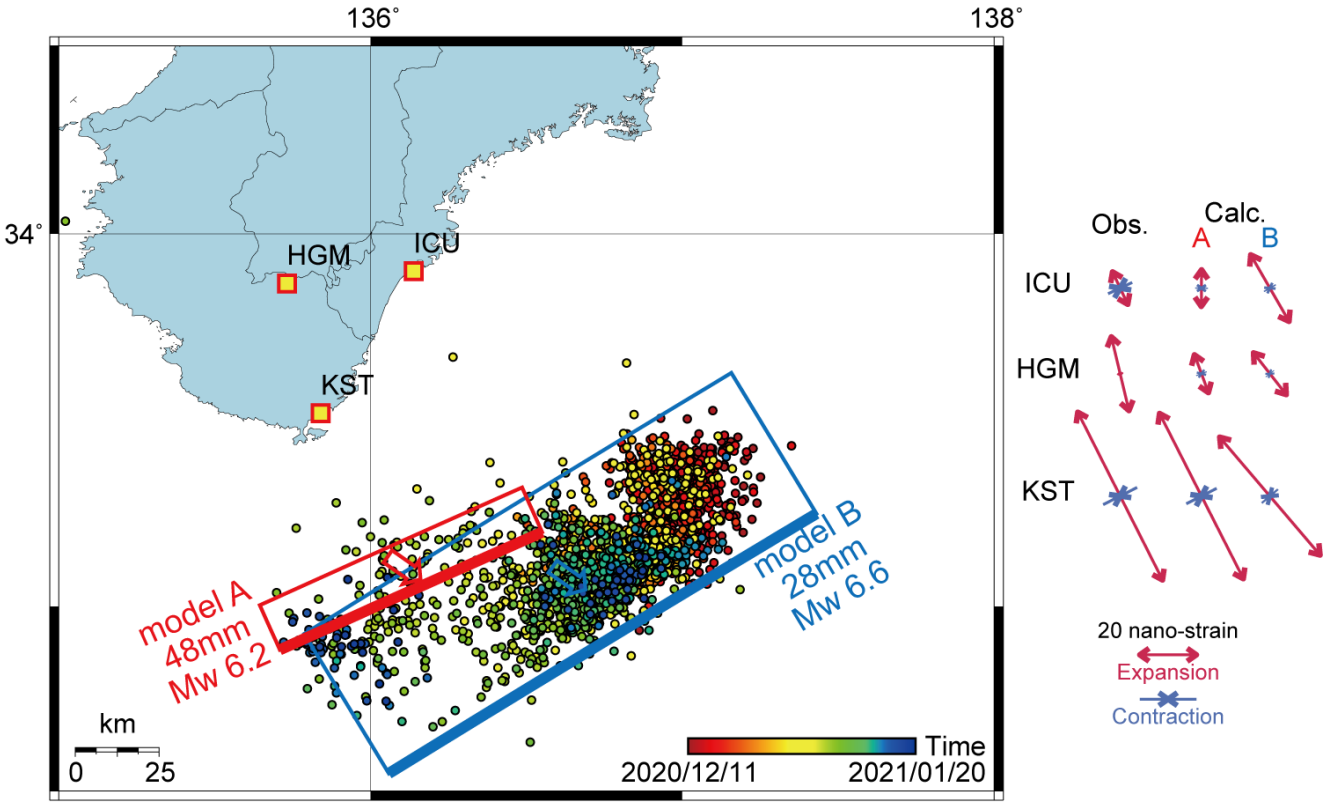


図1 2020年末～2021年初めに発生した浅部SSEの推定断層モデル（赤色矩形: model A, 青色矩形: model B）および浅部微動の震央分布. 右側は, 主歪の観測値および理論値の比較.

© 日本地震学会

継続時間1時間のスロースリップイベント

Slow-slip events of one-hour duration

*勝間田 明男[1]、宮岡 一樹[3]、露木 貴裕[5]、板場 智史[4]、田中 昌之[5]、伊藤 武男[6]、高森 昭光[2]、新谷 昌人[2]
*Akio KATSUMATA[1], Kazuki Miyaoka[3], Takahiro Tsuyuki[5], Satoshi Itaba[4], Masayuki Tanaka[5], Takeo Ito[6], Akiteru Takamori[2], Akito Araya[2]

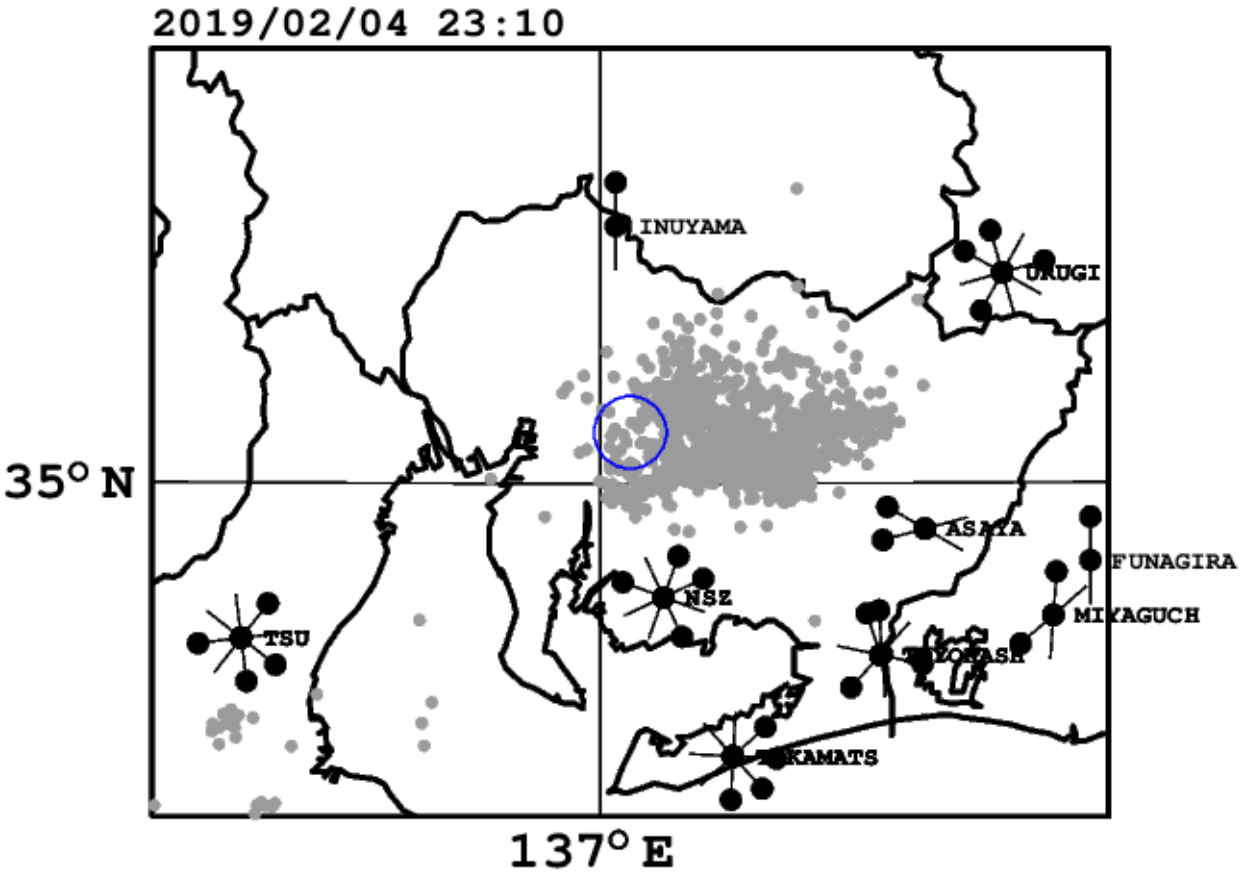
1. 富山大学、2. 東大地震研究所、3. 気象庁、4. 産総研、5. 気象研究所、6. 名古屋大学
1. Univ. of Toyama, 2. ERI, Univ. of Tokyo, 3. JMA, 4. AIST, 5. MRI, JMA, 6. Nagoya Univ.

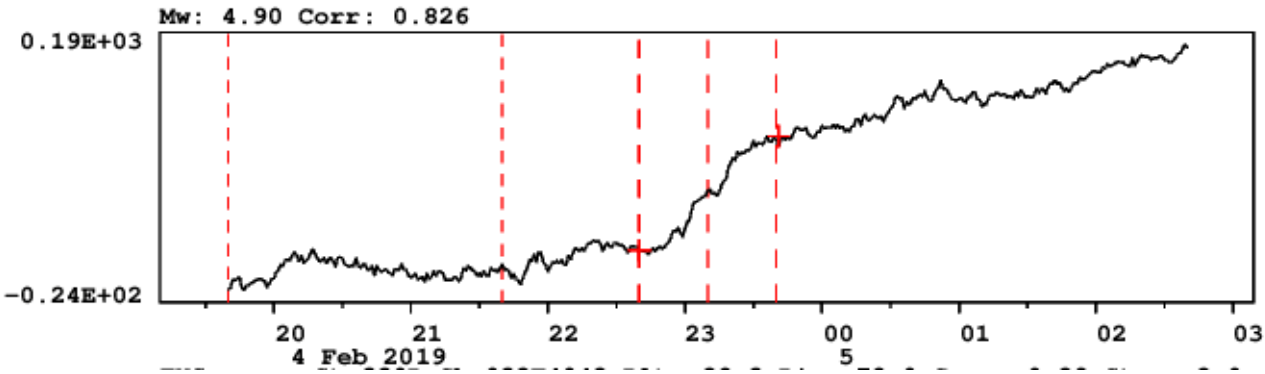
これまで様々な継続時間のスロースリップ現象が報告されている。継続時間が数十秒より短い深部低周波微動・地震や超低周波地震は地震計によって検知されている。また、継続時間数日の短期的スロースリップはボアホール型ひずみ計や傾斜計あるいはGNSSなどにより検知されている。継続時間が数十秒と数日の間のスロースリップ現象はあまり知られていない。ここでは、その間の継続時間を持つスロースリップ現象についてレーザー伸縮計とひずみ計のデータを用いて調査した。

我々は犬山観測点及び天竜船明観測点に設置されているレーザーひずみ計と気象庁・産業技術総合研究所が設置している及びボアホール型多成分ひずみ計のデータを用いて、継続時間1時間のスロースリップ現象を解析した。まず、観測ひずみデータとランプ関数との間の相関をとり、複数観測点において同時に相関が高くなる時間帯を見つける。その時間帯について宮岡・横田(2012)によるスタッキング手法により規模等を推定した。スタッキング法においては、断層位置・すべり方向を仮定して、ノイズレベルに基づい重みをつけて複数観測点のデータを足し合わせた。ノイズは対象とする時間帯の1～3時間前の範囲の値を評価した。推定された規模はM4.7からM5.0程度であった(図)。この規模は、Ida et al.(2007)によって提唱されたスロー地震のスケーリング則に調和的である。ただし、検出された信号のレベルはノイズに比べて明確に大きなものでなく、ソースの位置やすべり方向をデータだけから推定することは困難であった。ここでは短期的スロースリップの場所を仮定して規模を求めた。そのため解析対称は短期的スロースリップの発生時間帯に限られている。なお、微動活動の位置・発生時間帯を参照して検出を試みたが、有意な結果は得られていない。

図の説明
地図の青丸の位置は仮定した震源断層の位置を表す。用いた観測点の場所も示す。観測点に示す線分はひずみ計の方位を表している。灰色の点は、産業技術総合技術研究所が求めた深部低周波微動の震央である。下の図はスタッキングの結果を示す。中央の部分が検出した継続時間1時間のスロースリップ現象であり、規模はMw4.9と推定された。左側の2本の赤い波線で示す範囲でノイズレベルを評価した。

© 日本地震学会


2019/02/04 23:10
INUYAMA
UKUGI
35° N
ASAIA
FUNAGIRA
NSZ
TSU
137° E


Mw: 4.90 Corr: 0.826
0.19E+03
-0.24E+02
20
21
22
23
00
01
02
03
4 Feb 2019
5

© 日本地震学会

ポスター会場（1日目）| 一般セッション：S03. 地殻変動・GNSS・重力

2021年10月14日(木) 15:30 ~ 17:00 | P1会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S03P-01] PTS解析による地震時の動的な破壊過程から初期余効すべりまでの連続的な推定　～2011年東北地方太平洋沖地震の事例～

○田中 優介[1]、太田 雄策[2]、宮崎 真一[3] (1.東北大学大学院理学研究科、2.東北大学大学院理学研究科、3.京都大学大学院理学研究科)

15:30 ~ 17:00

[S03P-02] 2016年熊本地震の断層終端部における地殻変動と重力データから推定した地下の密度構造の詳細

○小林 知勝[1]、松尾 功二[1]、安藤 亮輔[2]、中埜 貴元[1] (1.国土地理院、2.東京大学)

15:30 ~ 17:00

[S03P-03] 長期的スロースリップ客観検出手法の日向灘への適用

○小林 昭夫[1] (1.気象研究所地震津波研究部)

15:30 ~ 17:00

[S03P-04] アラスカ沈み込み帯における短期的スロースリップイベントの系統的検出

○岡田 悠太郎[1]、西村 卓也[2] (1.京都大学大学院 理学研究科、2.京都大学防災研究所)

15:30 ~ 17:00

[S03P-05] 2018年以降GEONETで検出された南海トラフ沿いの長期的SSE

○小沢 慎三郎[1]、水藤 尚[1]、宗包 浩志[1] (1.国土交通省国土地理院地理地殻活動研究センター)

15:30 ~ 17:00

[S03P-06] GNSS-A海底地殻変動観測アレイ「SGO-A」で捉えた東北地方太平洋沖地震後10年間の地震後海底地殻変動

○渡邉 俊一[1]、石川 直史[1]、中村 優斗[1]、横田 裕輔[2] (1.海上保安庁海洋情報部、2.東京大学生産技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S03P-07] GNSS-A海底地殻変動観測アレイSGO-Aによる南海トラフプレート境界のすべり欠損レートの変動モニタリング

○石川 直史[1]、渡邉 俊一[1]、中村 優斗[1]、横田 裕輔[2] (1.海上保安庁海洋情報部、2.東京大学生産技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S03P-08] 数値シミュレーションを用いたGNSS-A海底地殻変動観測における海中音速場の影響評価

○中村 優斗[1]、横田 裕輔[2]、石川 直史[1]、渡邉 俊一[1] (1.海上保安庁海洋情報部、2.東京大学生産技術研究所)

PTS解析による地震時の動的な破壊過程から初期余効すべりまでの連続的な推定　～2011年東北地方太平洋沖地震の事例～

Continuous estimation of the transition process from coseismic rupture to initial postseismic slip based on the PTS analysis

*田中 優介[1]、太田 雄策[2]、宮崎 真一[3]
*Yusuke TANAKA[1], Yusaku Ohta[2], Shin'ichi Miyazaki[3]

1. 東北大学大学院理学研究科、2. 東北大学大学院理学研究科、3. 京都大学大学院理学研究科
1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Graduate School of Science, Kyoto University

地震時すべりから地震後の余効すべりに至る遷移過程の把握は，断層のすべり収支や摩擦特性の正確な理解に必要不可欠である．しかしながら地震時すべりの終了から余効すべりのごく初期の立ち上がりに至る，地震発生後の数分から半日程度の期間をGNSSで連続的に扱った事例は今のところ少数である．これは地表変位と大気遅延等の他の誤差要因との分離の困難性により，同時間スケールで既存の測位解析の精度が特に低下するためである．そこで我々は新たな手段として，GNSS搬送波位相変化から直接断層すべりを推定する手法 (以降 PTS (Phase To Slip)) を用いた，広帯域断層すべりモニタリング技術の開発に取り組んでいる．PTSでは座標推定を行わず，生データである搬送波位相変化をグリーン関数と視線方向への幾何学的変換を介して直接断層すべりに結びつける．そして断層すべりと他の誤差要因の時間変化を一括で推定する．このような手法であれば未知パラメータの推定・分離状況の一体的な定量評価が可能であり，分離精度の改善において有利であると考えられる． 本研究では広帯域な断層すべり把握手段としてのPTSの性能評価を目的として，2011年東北地方太平洋沖地震の地震時すべり・初期余効すべりの連続的な推定を試みた．推定では東日本の73のGEONET点の搬送波1秒データを使用し，3月11日の14時から16時 (JST，本震発生は14時46分) の2時間について解析した．まず静的なグリーン関数としてOkadaの式を用いた推定では，本震と岩手沖・茨城沖で発生した余震の断層すべり分布やマグニチュードが通常測位と同等の精度で推定された．得られた結果は地震波形インバージョンによる推定とも概ね調和的となった．さらに上記の3つの地震時すべりとは別に，本震後の時間帯に初期余効すべりの発生も推定された．初期余効すべりは主に本震で大きくすべった領域の深い側に隣接する，岩手・福島・茨城付近の陸寄りの断層域に推定された．すべり量は本震後の34分間で0.2-0.5mとなり，Munekane (2012) 等の先行研究と比べて大きいものの，すべり域の位置としてはよく一致した．これらの結果により，PTSを用いて地震時と地震後のすべりを一括して推定可能であることが示された．一方で現状の推定では静的なグリーン関数を用いているため，地震動の影響は適切に扱われていない．したがって地震発生直後の最初の数分間の部分については，詳細な議論に達していない状況にある．そこで本発表ではさらに発展的な解析として動的なグリーン関数を用い，本震の動的な破壊過程と引き続く余効すべりの立ち上がりの一括推定を試みた結果を紹介する．そして地震時から地震後のすべり現象の遷移過程や両者の関係性，および背景の物理について議論を行う．また広帯域な断層すべり把握手段としての，PTSの有用性について論じる．

© 日本地震学会

2016年熊本地震の断層終端部における地殻変動と重力データから推定した地下の密度構造の詳細

Details on crustal deformation and gravity-inferred density structures at the terminus of fault rupture for the 2016 Kumamoto earthquake

*小林 知勝[1]、松尾 功二[1]、安藤 亮輔[2]、中埜 貴元[1]
*Tomokazu KOBAYASHI[1], Koji MATSUO[1], Ryosuke ANDO[2], Takayuki NAKANO[1]

1. 国土地理院、2. 東京大学
1. Geospatial Information Authority of Japan, 2. University of Tokyo

１．はじめに

本研究の目的は，断層破壊の終端部及びその周辺に特徴的な地殻構造が存在するかを調べ，断層破壊の終焉を制御する要因について議論することにある．この目的のために，本研究では，2016年熊本地震を対象に，SARによる地殻変動から推定される断層運動の詳細と重力によって推定される地殻構造との間の空間的関係を調査した．

２．データと解析

まず初めに，ALOS-2衛星のSARデータを用いたInSAR解析を行い，断層付近を含む震源域の地殻変動を取得した．本研究では，標準的なInSAR法に加えて，レンジ及びアジマス成分の周波数を帯域分割して干渉処理する手法（SBI法）も適用した．アジマス成分に関する処理はMAI法として知られているが，本手法を適用することにより，標準的なInSARでは大きな変位勾配のために干渉性が低くなる震源域近傍においても，空間的に詳細な変位を取得できた．標準的なInSARでは変位計測できなかった領域にSBI法で得られた変位を補間することで，震源領域全体における完全な変動場を獲得できた．さらに，複数の軌道データから得られた変動データを用い，最小二乗法により上下，東西，南北3成分の地殻変動を得た． 続けて，重力データを用いた地殻構造の推定を行った．解析には，後述する布田川断層の破壊終端部周辺を中心にキャンペーン重力観測（60点）を行い，これらデータと既存の重力データを用いたインバージョン解析により地下の密度構造を推定した．地球の質量構造に起因しない重力の影響を除去し，ブーゲ補正や地形補正等を施して地球の内部不均質構造を反映する完全ブーゲ重力異常を得た後，重力インバージョン解析によって地下の密度不均質構造を推定した．密度不均質構造は，平行六面体の質量塊の引力を応答関数とし，密度コントラストを推定パラメータとする重み付き最小二乗法により3次元的に推定した．解析では，初期値として与える密度を様々なパターンで計算することで，初期値依存性を把握・考慮しながら，信頼性の高い解を得るようにした．

３．結果

地殻変動の解析から，断層運動起因と推定される変位境界が，布田川断層の東部延長上に伸展して，阿蘇カルデラ西縁部で主に2方向に分岐していることが認められた（図１a）．1つは布田川断層の東部延長上に右横ずれを伴いながら南東側の地盤が沈降する変動を，もう1つはほぼ東西方向に左横ずれを伴いながら北側の地盤が沈降する変動を示している．これらの変位境界・急変帯は比較的広範囲に広がり，かつ直線的に分布することから断層運動起因であることが強く示唆される． 一方，重力データから推定された密度構造の結果は，阿蘇カルデラの中心部に比較的広い低密度領域が分布していることを示す．さらに西側に注目すると，その低密度領域から舌状に延びるように，阿蘇カルデラ西部の浅い部分（深さ約1～2km）にくさび形の低密度体が存在することが分かった（図１b）．注目すべきは，SARによって推定された分岐断層が，その局所的な低密度体の側面およびその西部延長上に沿って位置しており，地殻変動の終端部はその低密度体とほぼ重なっていることである．低密度領域の実体については今後さらに検討する必要があるが，断層面を構成する何かしらの物理境界を示している可能性がある．

© 日本地震学会

謝辞： 本報告で使用したALOS-2データの所有権は，JAXAにあります．これらのデータは，国土地理院とJAXAの間の協定及び地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループの活動に基づいて，JAXAから提供されたものです．本研究はJSPS科研費JP18K03810の助成を受けたものです．

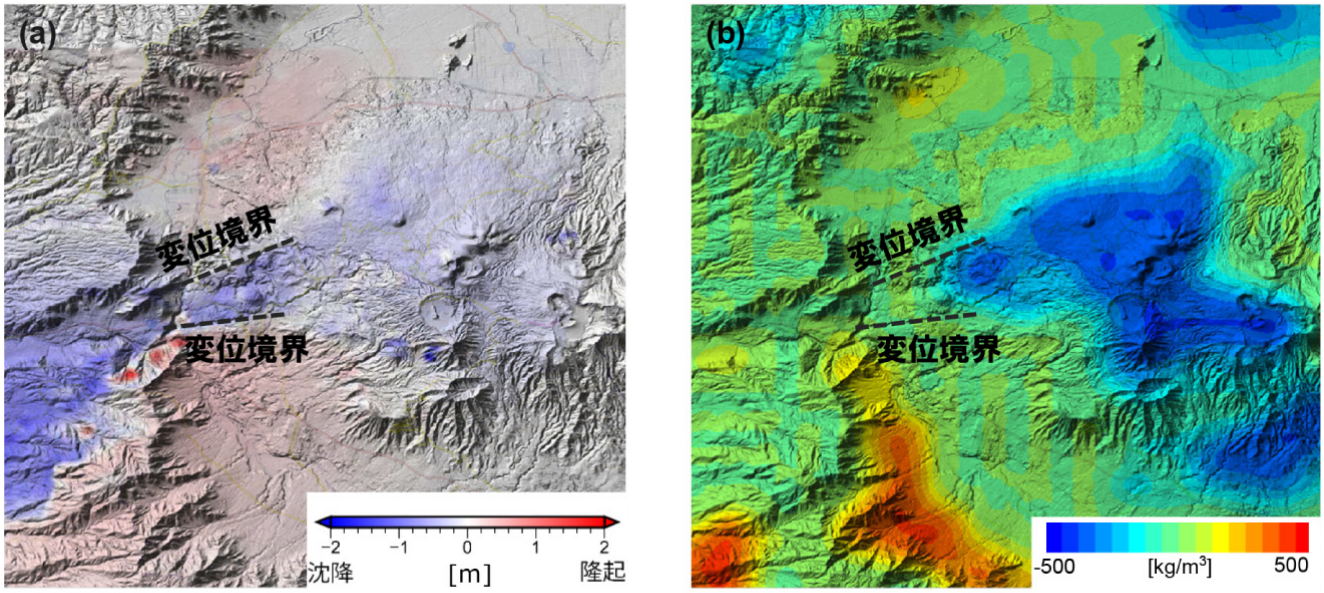


図1 (a) 干渉SAR解析から得られた上下変位. (b) 重力インバージョンによって推定された阿蘇カルデラ西縁周辺の地下密度不均質構造（深さ1.5㎞の水平断面）. 青色（赤色）は周囲よりも密度が低い（高い）領域を表す.

© 日本地震学会

長期的スロースリップ客観検出手法の日向灘への適用

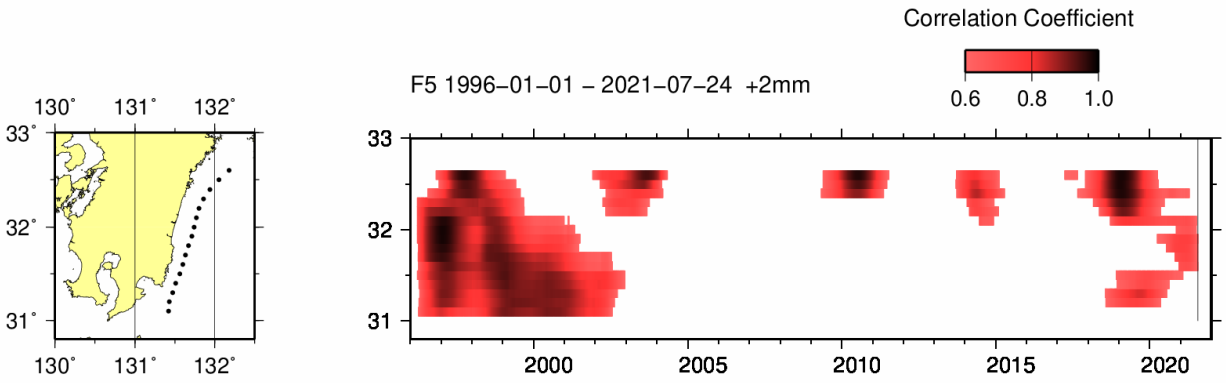
Application of an objective detection method for long-term slow slip events to Hyuga-nada

*小林 昭夫[1]
*Akio KOBAYASHI[1]

1. 気象研究所地震津波研究部
1. Meteorological Research Institute

Kobayashi (2017)はGNSS日座標値（日値）を用いて、南海トラフ沿いの長期的スロースリップ（SSE）をランプ関数との相関値により客観的に検出する手法を開発し、それまで試行錯誤的に検出していたSSE現象を一定条件で検出した。検出領域の西端は豊後水道であるが、九州東岸の日向灘でもこれまでに長期的SSEが報告されている（Yarai and Ozawa, 2013; Takagi et al., 2019）。南海トラフ地震の想定震源域は日向灘を含むため、この領域で発生するSSEの監視も重要となる。このため、同手法の仕様を一部変更して日向灘で発生する長期的SSEを検出できるようにした。具体的な手順は以下の通り。
(1)観測点の成分ごとに直線トレンド、アンテナ交換などに伴うオフセットと主な地震に伴うオフセット、年周・半年周成分を除去する。
(2) 長期的SSEの影響がほぼ見られない九州北西部の観測点の共通ノイズを全点から引き去り、領域全体を固定する。
(3) 各観測点の水平成分からフィリピン海プレート沈み込みと逆方向（S55E）の成分を計算し、プレート等深線25 kmに沿って設定した緯度0.1度間隔の地点を南東端とする50×100 kmの矩形範囲内の各観測点の成分の平均値を求める。
(4) 2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)、2016年熊本地震(M7.3)、2019年5/10日向灘の地震(M6.3)の余効変動を除去する。なお、1996年10/19(M6.9)と12/3(M6.7)の日向灘の地震に伴う余効変動は検討中。
(5) 地点ごとの時系列と1年の傾斜期間を持つランプ関数との相互相関と、対象期間前後の2年間変化量を求める。
なお処理の仕様上、最新期間については、今後データ追加に伴い解析結果が変わる可能性がある。
また、小林（2021）の手順に従い、プレート境界上に置いた矩形断層でのすべりによる理論変位と比較することにより、長期的スロースリップの規模を推定した。
相関係数0.6以上の時空間分布を見ると、1996年の日向灘の地震に伴う余効変動に対応する非定常変位の他に、1997、2003、2010、2014、2019年の豊後水道長期的SSEに対応する変位、2020年からの日向灘南部の長期的SSEに伴う変位が見られる。2019年に鹿児島県東岸で相関の高い部分が見られるが、これは2019年1月に発生した種子島近海の地震（M6.0）に伴う余効変動が含まれている可能性がある。相関係数は0.6未満になるが、Yarai and Ozawa (2013)で指摘された2005年、2007年、2009年の日向灘長期的SSEに伴う変位、Takagi et al. (2019)による2013年の日向灘長期的SSEに伴う変位、Ozawa (2017)による2013-2014年、2015-2016年の日向灘長期的SSEに伴う変位に対応するやや相関の高い部分も確認できる。
本調査には国土地理院GEONETの座標値およびオフセット値を使用させていただきました。

© 日本地震学会


Correlation Coefficient
0.6
0.8
1.0
F5 1996–01–01 – 2021–07–24 +2mm
130˚
131˚
132˚
33˚
32˚
31˚
33
32
31
2000
2005
2010
2015
2020

© 日本地震学会

アラスカ沈み込み帯における短期的スロースリップイベントの系統的検出

Systematic-detection of short-term slow slip events in the Alaska subduction zone

*岡田 悠太郎[1]、西村 卓也[2]
*Yutaro OKADA[1], Takuya NISHIMURA[2]

1. 京都大学大学院 理学研究科、2. 京都大学防災研究所
1. Graduate School of Science, Kyoto University , 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

スロー地震は通常の地震と比べゆっくりと断層がすべる現象であり、環太平洋地域の複数の沈み込み帯で観測されている（e.g., Obara and Kato, 2016）。スロースリップイベント（以下、SSE）は測地観測機器により観測されるスロー地震の一種で、数か月間から数年間継続する長期的SSE（以下、L-SSE）と数日間から数週間継続する短期的SSE（以下、S-SSE）に大別される。また一部地域で発生するSSEは同じくスロー地震の一種であるテクトニック微動（Obara, 2002）と時空間的に同期することが知られており、この同期現象はEpisodic Tremor and Slip（以下、ETS）と呼ばれる（Rogers and Dragert, 2003）。北アメリカプレートの下に太平洋プレートが沈み込むアラスカ沈み込み帯では、L-SSEや微動が先行研究により検出されている（Ohta et al., 2006; Wei et al., 2012; Wech, 2016）。一方で、S-SSEが定常的に発生している可能性が微動活動とそれに同期する地表変位により示唆されているものの、この地域において個別のS-SSEとしてモデル化されたイベントは1例しかない（Rousset et al., 2019）。そこで、本研究ではアラスカ沈み込み帯において個別のS-SSE検出を系統的に実施することで、この地域のS-SSEの活動様式とL-SSEや微動との時空間的関係の解明を試みる。

本研究ではNevada Geodetic Laboratory（http://geodesy.unr.edu/）によって解析されたGNSS観測局86局の2007年4月から2021年3月までの期間の日座標時系列（Blewitt et al., 2018）を用いた。初めに、181日間の座標値とSSEの時間発展を模したテンプレートの間の相関係数を計算することで、各観測局・成分の時系列からS-SSEが発生したおおよその時期を抽出する。次に、SSEが沈み込むプレート境界面上で発生した場合に期待される地表変位で相関係数を重みづけして平均することで、S-SSEの候補となるイベントを検出する（Rousset et al., 2017; Okada et al., in prep.）。続いて候補イベントの矩形断層モデル（Okada, 1992）と継続期間を推定する。継続期間は座標時系列のノイズレベルと推定した断層モデルから計算される変位によって重みづけされた各観測局・成分の181日間の座標値を重合した時系列を用いて推定した（宮岡・横田, 2012; Rousset et al., 2017; Okada et al., in prep.）。最後に、断層モデルと継続期間の推定結果に閾値を適用することで、候補イベントをS-SSEへと分類した。

その結果、アラスカ沈み込み帯において14年間で28個のS-SSEの検出に成功した。検出されたS-SSEの大部分は西経151°より東に分布し、西経150°と西経148°の深さ40 km付近にS-SSEのクラスターが発見された。S-SSEの空間分布は1964年に発生したアラスカ地震の余効すべり域（Suito and Freymueller, 2009; Huang et al., 2020）とおおよそ一致しており、また西側のクラスターはクック湾奥部のL-SSEのすべり域（Ohta et al., 2006; Fu and Freymueller, 2013）と一致していた。検出されたS-SSEの規模はMw 6.1から6.6であり、継続期間は2日間から57日間であった。また、S-SSEの地震モーメントと継続期間の分布は、スロー地震のスケーリング則（Ide et al., 2007）に大きく矛盾しない。検出されたS-SSEの一部は、Rousset et al.（2019）で示唆されたように、微動活動（Wech, 2016）と時空間的に同期するETS型のイベントであった。

謝辞
本研究ではAaron Wech博士に提供していただいたテクトニック微動カタログと、Nevada Geodetic Laboratoryによって解析されたGNSS日座標データを使用した。本研究で用いたGNSS観測局は、UNAVCO、University of Alaska, Fairbanks、United States Coast Guard、Alaska Volcano Observatory、Federal Aviation Administration、National Oceanic and Atmospheric Administrationにより設置されたものである。

© 日本地震学会

2018年以降GEONETで検出された南海トラフ沿いの長期的SSE

Long-term SSE along the Nankai trough since 2018

*小沢 慎三郎[1]、水藤 尚[1]、宗包 浩志[1]
*Shinzaburo Ozawa[1], Hisashi Suito[1], Hiroshi Munekane[1]

1. 国土交通省国土地理院地理地殻活動研究センター
1. Geospatial Authority of Japan

要旨 GNSS観測により、2018年以降、九州・四国・紀伊水道域で遷移的な地殻変動が観測された。観測された地殻変動から南海トラフ域のプレート間滑りを推定した。その結果、2018年６月頃から2019年８月頃にかけて、日向灘北部・豊後水道域で長期的SSEが発生し、2019年初めころから2021年1月にかけて四国中部で長期的SSEが発生したこと、2020年７月頃から日向灘南部で長期的SSEが発生していることが推定された。また紀伊水道では、2019年４月頃から2021年1月頃まで継続し、その後鈍化している。 はじめに 豊後水道では５～６年ほどの周期で繰り返し長期的SSEが発生してきた。四国中部では1977-1980年に水準測量の結果から長期的SSEの発生が推定されている(Kobayashi,2012)。紀伊水道の長期的SSEは、1996, 2000, 2016年に発生している(Kobayashi,2014; Kobayashi,2017)。そのような中、2018年6月頃から、九州北部で遷移的な地殻変動が発生し、その後2018年10月頃から豊後水道周辺で遷移的な地殻変動が発生している。また四国中部で2019年初めころから豊後水道SSEに伴う地殻変動と異なった遷移変動が発生している。2020年７月頃から九州南部で遷移的な変動が発生し、2021年７月まで続いている。紀伊水道では、2019年４月頃から遷移的な変動が発生している。本研究では、GNSSで観測された地殻変動のデータから、四国・九州・紀伊水道域のプレート間滑りの時空間変化を推定した。 解析手法 九州域では豊後水道域で2006-2009年間、宮崎南部域で2007/1-2009/1間、種子島域で2008/3-211/3間の一次トレンドを除去している。四国中部、紀伊水道域では2017/1-2018/1間の一次トレンドを除去した。九州域に関しては、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震の余効変動を粘弾性緩和のシミュレーション結果に基づいて除去している（Suito 2017;水藤2017）。このようにして得られた東西、南北、上下の座標時系列データを用いて時間依存のインバージョン解析を九州・四国域、四国中部域及び紀伊水道域に関して行った。観測点は南海トラフ域の観測点約250点を使用した。弘瀬他(2008)によりコンパイルされたフィリピン海プレートの形状を九州・四国域、四国中部域の解析では三角形要素で表して解析に使用している。グリッド間隔は、20-40ｋｍ程度としている。プレート境界面上のすべりの方向はプレート収束方向になるように拘束をかけた。紀伊水道域に関しては、弘瀬他(2008)によりコンパイルされたフィリピン海プレートの形状をスプライン曲面で表し、滑り方向は東向きから南向きの範囲に拘束した。グリッド間隔は10km程としている。 結果と考察 2018年６月頃から2019年８月頃にかけて日向灘北部・豊後水道でSSEが発生している。豊後水道SSEと同時期に四国中部でSSEが発生し、2020年７月まで継続している。豊後水道SSEはMw6.9、四国中部SSEはMw6.1程度と推定された。豊後水道SSEはおおよそ５－６年周期と調和的で、四国中部は、1977-1980年に発生し、2013年に発生しているが、その繰り返し間隔はあまり周期的でないように見える。2018年末に日向灘南部で長期的SSEが発生し、2020年7月頃から日向灘南部で長期的SSEがまた発生している。紀伊水道のSSEは、2019年４月頃から2021年1月頃まで継続し、その後鈍化している。繰り返し間隔ははっきりしないように思われる。

© 日本地震学会

GNSS-A海底地殻変動観測アレイ「SGO-A」で捉えた東北地方太平洋沖地震後10年間の地震後海底地殻変動

Decadal postseismic deformation of the Tohoku-oki earthquake observed with the GNSS-A Seafloor Geodetic Observation Array (SGO-A)

*渡邉 俊一[1]、石川 直史[1]、中村 優斗[1]、横田 裕輔[2]
*Shun-ichi WATANABE[1], Tadashi Ishikawa[1], Yuto Nakamura[1], Yusuke Yokota[2]

1. 海上保安庁海洋情報部、2. 東京大学生産技術研究所
1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo

2011年に発生した東北沖地震の地震時・地震後プロセスを研究することで，日本海溝沿いの領域における地震サイクルに関して有用な知見を得ることができる．東北沖地震の震源域はほぼ全域が海底下にあったが，多くの海底観測装置が設置されていたことにより，地震時の破壊や地震後の緩和過程等のシグナルが高い空間分解能で取得されている．中でも，GNSSー音響測距結合方式（GNSS-A）による海底地殻変動観測は，地震後の変形過程における粘弾性緩和の重要性を示し，震源域近傍の余効変動の理解において重要な役割を果たした（Watanabe et al., 2014, GRL）．しかし，海底測地観測点の空間カバレッジや観測期間が不足しており，地震時の挙動も含め，特に走行方向の広がりについてコンセンサスの得られるような地殻変動モデルの構築には至っていない．震源域周辺での経時的な余効変動，すなわち粘弾性緩和と余効すべり，による変動を分離することを目的とし，われわれは海上保安庁が運用するGNSS-A海底測地観測アレイ（SGO-A）において海底測地データを取得してきた．今回得られた10年間のGNSS-Aデータから，主破壊域の南北縁において余効すべりが生じ，それが概ね2–3年でほぼ減衰したことがわかった．これらの余効すべり域は非地震性の摩擦特性を持ち，それらが地震時の破壊の南北への伝播を止めたと考えられる．また，震源域南部（~37 °N）の福島県沖の観測点では，水平方向の余効変動が減衰した後も沈降が継続していることが確認された．この観測事実を説明するためには，それより東側の，海溝近くでの地震時すべりに駆動される粘弾性応答を考慮に入れる必要がある．つまり，地震時の測地観測データでは，福島県沖の海溝近くでの解像度が足りずに地震時のすべりが推定できていなかった（e.g., Iinuma et al., 2012, JGR）が，今回の観測結果から，そこですべりが生じていたことが明らかになった．これは津波データから推定されるすべり分布（e.g., Satake et al., 2013, BSSA）と整合的であり，それをサポートする結果である．さらに，こうした結果からは，長期的な粘弾性緩和による余効変動が，地震発生から10年が経過した現在においても継続しており，宮城県沖の主破壊域のみならず震源域南部の福島県沖においても顕著な影響を及ぼしていることも示された．なお，本研究の内容はWatanabe et al. (EPS, in press) として報告されている．

© 日本地震学会

GNSS-A海底地殻変動観測アレイSGO-Aによる南海トラフプレート境界のすべり欠損レートの変動モニタリング

Temporal variation in slip deficit rate at Nankai trough observed by the GNSS-A Seafloor Geodetic Observation Array (SGO-A)

*石川 直史[1]、渡邉 俊一[1]、中村 優斗[1]、横田 裕輔[2]
*Tadashi ISHIKAWA[1], Shun-ichi Watanabe[1], Yuto Nakamura[1], Yusuke Yokota[2]

1. 海上保安庁海洋情報部、2. 東京大学生産技術研究所
1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

海上保安庁では、GNSS-音響測距結合方式(GNSS-A)による海底地殻変動観測を定常的に実施し、南海トラフ想定震源域におけるプレート境界の固着状態の把握のためのデータを収集している。観測成果は、気象庁の「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」や地震調査研究推進本部の「地震調査委員会」に定期的に報告し、地震・地殻活動の現状評価に役立てられている。

これまでに、陸上GNSSと海底GNSS-Aの観測結果から得られた海陸の地殻変動速度場から、南海トラフ地震想定震源域のプレート境界におけるすべり欠損レートの推定が行われている(例えば、Yokota et al. 2016; Nishimura et al. 2018; Noda et al. 2018; Kimura et al. 2019など) 。その結果、陸上GNSSのみで解像できなかったすべり欠損レートの空間的不均質性が見えるようになった。南海トラフでは、スロースリップ (SSE)などの短期の非定常変動が度々発生しているため、時間変化を含めたプレート境界の状態を把握することが必須である。しかしながら、これまでの研究に用いられている海底の速度場は、ある特定の期間のデータの回帰分析から求めた平均値によるスナップショットであり、時間変化は考慮されていない。

十分長期のデータから求めた平均速度場は、プレート境界の摩擦特性の違いから生じるSSE発生域と強固着域の分布を把握するために有効である。平均を取る期間にSSE発生時期が含まれる領域では速度が相対的に遅くなるため、SSEが発生しない領域との速度差にコントラストが生まれ、SSE発生域と強固着域の分布が明確になることが期待される。しかしながら、現在のGNSS-Aデータは高々10年程度の蓄積しかなく、SSE発生域においても0〜1回程度のイベントしか含まれていないと考えられるため、より正確な領域の分布の推定には、今後も観測を長期間継続しデータを蓄積する必要がある。本発表では、現時点のデータを用いた推定結果について報告する。

SSEのような非定常変動の推移を把握するためには、定常的な状態からのゆらぎとして顕れる変動を検知し監視していく必要がある。しかしながら、GNSS-A観測は、無人のオンライン連続観測が実現している陸上のGNSS観測網と異なり、観測の都度有人船で現場に赴く必要があることから、観測頻度が年に4ー6回程度であり、時間分解能の高い監視を実施することは困難である。Yokota and Ishikawa (2020)は、過去のデータにAICを用いたモデル比較を適用し、SSE由来と考えられる非定常な時間変化を検出した。本発表では、速度場の移動平均を取ることで、すべり欠損レートの時間変化を推定した結果について報告する。

© 日本地震学会

数値シミュレーションを用いたGNSS-A海底地殻変動観測における海中音速場の影響評価

Evaluation of the effects of underwater sound speed structure on GNSS-A observation using numerical simulation

*中村 優斗[1]、横田 裕輔[2]、石川 直史[1]、渡邉 俊一[1]
*Yuto NAKAMURA[1], Yusuke Yokota[2], Tadashi Ishikawa[1], Shun-ichi Watanabe[1]

1. 海上保安庁海洋情報部、2. 東京大学生産技術研究所
1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo

GNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）は、GNSS測位と海中音響測距を海上プラットフォームで結合することで、海底に設置した基準点の絶対位置をセンチメートル単位で決定する技術である。GNSS-A方式を用いた海底地殻変動観測により、日本海溝と南海トラフ沿いの海底下における様々な現象が明らかにされてきた。しかし、GNSS-Aは依然として陸域GNSS観測に比べ観測頻度と測位精度が大きく劣るという課題を抱えている（Yokota et al. 2021, under review）。時空間的により小さなイベントを検出可能にするためには、GNSS-A観測に影響する個々の誤差要因の評価が不可欠である。
GNSS-A観測における最大の誤差要因の一つとして、海中音速場の擾乱が挙げられる。海中音速場の時空間的な変動を適切に表現するため、これまでに様々な解析手法が開発されてきた。中でもベイズ統計的手法を用いて海中音速場と海底局位置を同時推定するGNSS-A解析ソフトウェア「GARPOS」（Watanabe et al. 2020, FES）では、海中音速場を平均音速度、海上プラットフォームの位置に依存する成分（比較的上部における音速の水平傾斜場）、そして海底トランスポンダの位置に依存する成分（比較的下部における音速の水平傾斜場）に分解した海中音速度モデルを実装している。しかしながら、GNSS-A観測の時空間スケール（観測海域は数km四方、観測時間は1回あたり数時間程度のスケール）の中での海洋場の変動を観測することは困難であり、GARPOSで実データを解析して得られた海中音速度モデルの妥当性について詳しく検証することはできていない。
そこで本研究では、任意の海中音速場を与えることができる数値シミュレーターを用いてGNSS-A疑似データを作成し、これを解析することによりGARPOSの海中音速度モデルを検証した。本研究で用いた数値シミュレーターは、PythonのEikonal方程式レポジトリ「PyKonal」（White et al. 2020, SRL）を用いることで、与えられた海中音速場グリッドから三次元的な音波の伝播を計算する。これにより、鉛直のみならず水平方向の音波の屈折も考慮した、より厳密な音響走時のシミュレーションが可能である。数値実験では、まず水平傾斜場が存在しない時空間的に一様な海中音速場を与えることで、GARPOSの海中音速度モデルで時空間的に一定な場が再現されることを確認した。その後、様々な深さ・厚さの水平傾斜場を与えた海中音速場でシミュレーションを行い、与えた水平傾斜場に対するGARPOSの解析結果を検証した。

© 日本地震学会

ポスター会場（1日目） | 一般セッション：S06. 地殻構造

2021年10月14日(木) 15:30 ~ 17:00 | P2会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S06P-01] 北海道南東沖・千島海溝周辺での反射法地震探査

○野 徹雄[1]、小平 秀一[1]、藤江 剛[1]、中村 恭之[1]、白石 和也[1]、三浦 亮[1]、山口 寛登[2,1]、海宝 由佳[1]、朴 進午[3]、孫 岳[3]、于 凡[3]、中西 正男[4]、藤本 萌[5,6]、小林 稜弥[5] (1.海洋研究開発機構、2.神戸大、3.東京大大気海洋研究所、4.千葉大院理学、5.千葉大院融合、6.ハワイ大)

15:30 ~ 17:00

[S06P-02] S波スプリッティング解析による東北地方の地震波速度異方性測定（４）

○水田 達也[1]、岡田 知己[1]、Savage Martha[2]、高木 涼太[1]、吉田 圭佑[1]、酒井 慎一[3]、勝俣 啓[4]、大園 真子[3,4]、小菅 正裕[5]、前田 拓人[5]、山中 佳子[6]、片尾 浩[7]、松島 健[8]、八木原 寛[9]、中山 貴史[1]、平原 聡[1]、河野 俊夫[1]、松澤 暢[1]、2011年東北地方太平洋沖地震 緊急観測グループ (1.東北大学大学院　理学研究科　地震・噴火予知研究観測センター、2.Victoria University of Wellington、3.東大地震研、4.北大・理、5.弘前大・理工、6.名古屋大・環境、7.京大防災研、8.九州大・理、9.鹿児島大学)

15:30 ~ 17:00

[S06P-03] 深発地震のSP変換波から推定される首都圏下のフィリピン海プレート構造：丹沢山地から関東平野西域を対象とした予備解析

○吉本 和生[1] (1.横浜市立大学)

15:30 ~ 17:00

[S06P-04] Double-Difference Tomography法を用いた白山火山下の三次元速度構造推定

○三浦 凜[1]、平松 良浩[2] (1.金沢大学大学院自然科学研究科、2.金沢大学理工学域地球社会基盤学系大学院自然科学研究科)

15:30 ~ 17:00

[S06P-05] 潮岬－足摺岬沖南海トラフにおける稠密反射法探査による構造マッピング

○中村 恭之[1]、海宝 由佳[1]、野 徹雄[1]、白石 和也[1]、藤江 剛[1]、小平 秀一[1]、木村 学[1]、尾鼻 浩一郎[1]、三浦 誠一[1]、仲西 理子[1] (1.海洋研究開発機構)

15:30 ~ 17:00

[S06P-06] 南海トラフ海側で沈み込むフィリピン海プレート上に発達する微小正断層群の特徴

○山下 幹也[1,2]、仲西 理子[2]、三浦 誠一[2]、小平 秀一[2]、金田 義行[3,2] (1.国立研究開発法人　産業技術総合研究所　地質調査総合センター　地質情報研究部門、2.国立研究開発法人　海洋研究開発機構　海域地震火山部門、3.香川大学)

15:30 ~ 17:00

[S06P-07] 地震波到来方向の偏りが傾斜する地震波速度不連続面の推定に与える影響

○汐見 勝彦[1] (1.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S06P-08] 南海トラフ西部周辺におけるランダム速度不均質構造

○高橋 努[1]、尾鼻 浩一郎[1]、石原 靖[1]、三浦 誠一[1]、小平 秀一[1]、金田 義行[2] (1.海洋研究開発機構、2.香川大学)

北海道南東沖・千島海溝周辺での反射法地震探査

Preliminary report on seismic reflection survey off the southeastern coast of Hokkaido, Kuril trench

*野 徹雄[1]、小平 秀一[1]、藤江 剛[1]、中村 恭之[1]、白石 和也[1]、三浦 亮[1]、山口 寛登[2,1]、海宝 由佳[1]、朴 進午[3]、孫 岳[3]、于 凡[3]、中西 正男[4]、藤本 萌[5,6]、小林 稜弥[5]
*Tetsuo NO[1], Shuichi Kodaira[1], Gou Fujie[1], Yasuyuki Nakamura[1], Kazuya Shiraishi[1], Ryo Muira[1], Hiroto Yamaguchi[2,1], Yuka Kaiho[1], Jin-Oh Park[3], Yue Sun[3], Fan Yu[3], Masao Nakanishi[4], Megumi Fujimoto[5,6], Ryoya Kobayashi[5]

1. 海洋研究開発機構、2. 神戸大、3. 東京大大気海洋研究所、4. 千葉大院理学、5. 千葉大院融合、6. ハワイ大
1. JAMSTEC, 2. Kobe Univ., 3. AORI, Univ. of Tokyo, 4. Graduate School of Science, Chiba Univ., 5. Graduate School of Science and Engineering, Chiba Univ., 6. SOEST, Univ. of Hawaii at Manoa

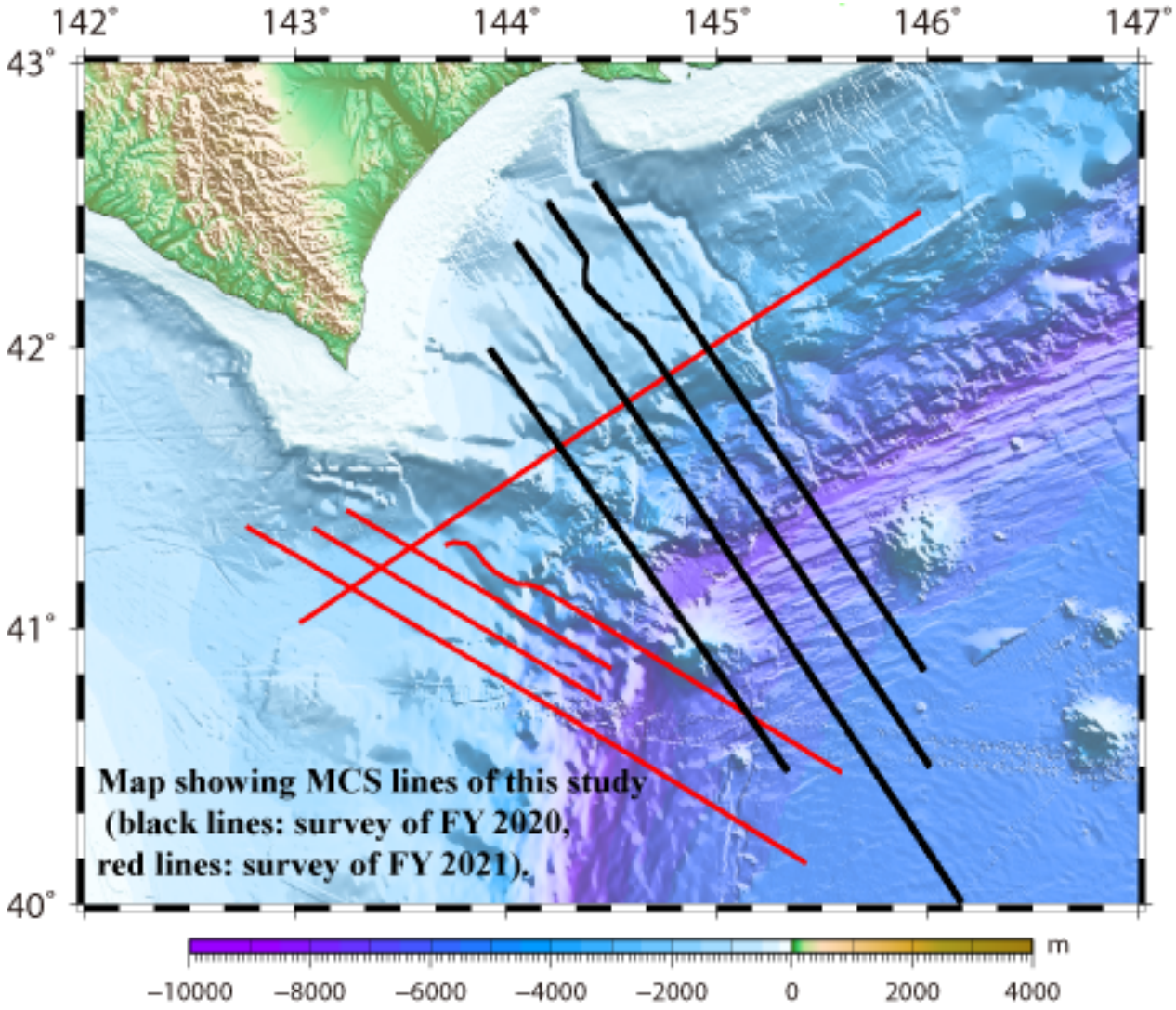
1990年代後半以降、日本周辺の沈み込み帯では南海トラフや日本海溝を中心に多くの地殻構造探査とそのデータを用いた研究が進められ、単に地殻構造研究のみならず、掘削科学や津波・地震サイクルシミュレーション等へも重要な役割を果たしてきた。一方、2011年東北地方太平洋沖地震の発生に伴い、日本周辺の地震発生帯に関する評価の再検討が進められ、千島海溝においても地震調査研究推進本部が2017年12月に「千島海溝沿いの地震活動の長期評価（第三版）」を新たに公表した。ただし、地殻構造探査の観点からみると、千島海溝周辺は南海トラフや日本海溝と比べるとデータが少なく、千島海溝周辺の長期評価をより高精度する上では、さらなる多くの観測・研究が必要な海域である。 東北地方太平洋沖地震以降、JAMSTECは2016年と2018年に深海潜水調査船支援母船「よこすか」で千島海溝の海溝底を中心に横切る測線を設定した高解像度反射法地震探査を実施し（中村・他, 2019, JpGU）、2019年には根室沖から釧路沖にかけて深海調査研究船「かいれい」を用いたMCS探査とOBSを用いた地震探査を行った（東・他, 2021, JpGU）。

そして、2020年10月と2021年7月には、釧路沖から日高沖にかけて、新たな調査測線を設定し、海底広域研究船「かいめい」による反射法地震探査を実施した（図）。新型コロナウイルスに関わる対応や調査海域での漁業活動・気象・海象の影響等はあったが、2航海で9測線のデータを取得することができた。これらの測線の一部は、日本海溝と千島海溝の接合部にも位置しており、もし千島海溝から日本海溝への構造変化を抽出できれば、この接合部での地震活動や震源断層と地殻構造の関係についての知見が得られる可能性もある。また、海溝海側に関しても、アウターライズ域での正断層型の大地震に関する震源断層の研究に対して貢献できるデータとなる。

なお、2020年と2021年の「かいめい」によるMCS探査の主なデータ取得仕様は、発震間隔50 m、エアガン総容量最大10600 cu.in.、エアガン曳航深度10 m、受振点間隔12.5 m、ストリーマーケーブル曳航深度12 m、受振チャンネル数最大444である。

本発表では、以上のデータ取得の概要と暫定的なデータ解析結果について報告する。

© 日本地震学会


142°
143°
144°
145°
146°
147°
43°
42°
41°
40°
Map showing MCS lines of this study
(black lines: survey of FY 2020,
red lines: survey of FY 2021).
m
−10000
−8000
−6000
−4000
−2000
0
2000
4000

© 日本地震学会

S波スプリッティング解析による東北地方の地震波速度異方性測定（４）

Measurement of seismic velocity anisotropy in the Tohoku region, NE Japan by shear wave splitting analysis (4)

*水田 達也[1]、岡田 知己[1]、Savage Martha[2]、高木 涼太[1]、吉田 圭佑[1]、酒井 慎一[3]、勝俣 啓[4]、大園 真子[3,4]、小菅 正裕[5]、前田 拓人[5]、山中 佳子[6]、片尾 浩[7]、松島 健[8]、八木原 寛[9]、中山 貴史[1]、平原 聡[1]、河野 俊夫[1]、松澤 暢[1]、2011年東北地方太平洋沖地震 緊急観測グループ
*Tatsuya MIZUTA[1], Tomomi OKADA[1], Martha Savage[2], Ryota TAKAGI[1], Keisuke YOSHIDA[1], Shin'ichi SAKAI[3], Kei KATSUMATA[4], Mako OHZONO[3,4], Masahiro KOSUGA[5], Takuto MAEDA[5], Yoshiko YAMANAKA[6], Hiroshi KATAO[7], Takeshi MATSUSHIMA[8], Hiroshi YAKIWARA[9], Takashi NAKAYAMA[1], Satoshi HIRAHARA[1], Toshio KONO[1], Toru MATSUZAWA[1], Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

1. 東北大学大学院　理学研究科　地震・噴火予知研究観測センター、2. Victoria University of Wellington、3. 東大地震研、4. 北大・理、5. 弘前大・理工、6. 名古屋大・環境、7. 京大防災研、8. 九州大・理、9. 鹿児島大学
1. Univ. of Tohoku, 2. Victoria University of Wellington, 3. Univ. of Tokyo, 4. Univ. of Hokkaido, 5. Univ. of Hirosaki, 6. Univ. of Nagoya, 7. Univ. of Kyoto, 8. Univ. of Kyushu, 9. Univ. of Kagoshima

本研究では，地殻中の異方性媒質を地震波が通る時にS波が速い波と遅い波に分裂する現象であるS波スプリッティングを用いて，東北地方のS波偏向異方性の測定を行った．手法はSavage et al.（2010）で紹介されているMFAST（Multiple Filter Automatic Splitting Technique）を用いた．この手法では，各観測点で得られた地震波形3成分のデータに対し，あらかじめ用意した14個のバンドパスフィルターから最適なものを適用後，多数の時間窓でSC91（Silver and Chan, 1991）の手法で異方性の方向と大きさを測定し，多数の時間窓から測定された多数の測定値でクラスター分析（Teanby et al., 2004）を用い，結果の信頼性評価を行う．MFASTはこの一連の流れがプログラムで自動化されているため，従来の方法と比べて素早く多数のデータを処理することができ，客観的で信頼性の高い測定値を使うことができる．
解析は東北地方全域で行っているが，本講演では，主に秋田県内陸部の地震群発域と，岩手県内陸部から沿岸部で詳細な解析を行った結果を紹介する．データには，2011年東北地方太平洋沖地震緊急合同観測などの臨時地震観測データも利用した．秋田県内陸部では，2011年の東北沖地震の前後で解析を行った．東北沖地震の前後で異方性の方向はあまり変化しなかったものの，領域全体で様々な方向の異方性が観測された．異方性が小さなスケールで空間変化していることが示唆され，領域内に応力起因のものと断層などの構造性起因の異方性のどちらも存在していると考えられる．異方性の大きさを示す遅延時間は，東北沖地震前後ともに，領域全体で大きい値を示していたが，前後で比較すると東北沖地震後に地震が群発している領域では大きくなったものの，活火山である岩手山周辺では東北沖地震後に小さくなる結果となった．
岩手県内陸部から沿岸にかけての解析では，異方性の方向は秋田県内陸部と同様に領域全体で様々な方向が得られ，各々の場所により応力起因のものと断層などの構造性起因の異方性のどちらも存在していたと考えられる．一方，異方性の大きさは秋田県内陸部と比べて全体的に小さい結果となった．岩手県沿岸では深さ40kmよりも深い（プレート境界ないし沈み込むプレート内）地震も観測対象とした. 深さ毎に分けて検討すると，浅い領域では異方性は大きいが，深くなるにつれて異方性は全体的に小さくなる結果となりS波スプリッティングの原因となる異方性は主に地殻上部に分布していると考えられる．ただし，プレート境界ないしプレート内で発生している地震に対しては異方性が若干大きくなる傾向も得られた．

© 日本地震学会

深発地震のSP変換波から推定される首都圏下のフィリピン海プレート構造：丹沢山地から関東平野西域を対象とした予備解析

Philippine Sea plate structure inferred from SP converted waves: Preliminary analysis in the southwestern Tokyo metropolitan area

*吉本 和生[1]
*Kazuo YOSHIMOTO[1]

1. 横浜市立大学
1. Yokohama City University

はじめに

首都圏下の地震活動は，相模トラフから沈み込むフィリピン海プレート（以下，PHSプレート）の構造により強く特徴付けられている [例えば，長谷川・他 (2013)]．このうち首都圏南西部（神奈川県およびその周辺）においては，相模トラフの走向に沿った方向（概ね東西方向）に地震活動の空間変化が見られ，その要因には，伊豆半島北部におけるプレート衝突や東西方向へのPHSプレートの構造変化（島弧地殻～海洋地殻）などが考えられる．しかしながら，伊豆衝突帯とその周辺のPHSプレートの構造については，その南方の伊豆・小笠原島弧の構造と比べて不明な点が多い．そこで本研究では，制御震源よりも大深度の構造推定に有利な自然地震を用いて，観測地震波形のSP変換波に着目し，首都圏南西部におけるPHSプレートの構造推定のための予備解析を実施した．

データと解析方法

解析には，2008年5月から首都圏地震観測網（MeSO-net）の神奈川県や東京都などの観測点で記録されている，日本列島周辺で発生した深発地震の波形データを使用した．波形記録のSN比が高く，直達波（P波およびS波）の波形がパルス的なマグニチュード5～6程度の地震を選択した．MeSO-netの加速度波形は時間積分して，速度波形または変位波形に変換して解析した．解析した地震の変位波形のパルス幅は1～3秒程度である．水平成分の波形記録は，震源と観測点の位置関係をもとに，radial成分とtransverse成分に回転した．特定の観測点の波形記録には，S波の到達に先行して，上下動成分に卓越するSP変換波と考えられる波相が検出された．本解析では，神奈川県と東京都を横断するMeSO-netの２本の測線で収録された地震波形に注目して，これらの測線におけるSP変換波の振幅とS-SP時間の空間変化を詳しく調べた．

解析結果

例えば，2013年11月19日4時10分に遠州灘で発生した深発地震（M_w 5.7，深さ340 km）については，発生時間が未明であり関東地方の最大震度が2であったことから，SN比の高い地震波形が収録されている．この地震について，神奈川・栃木県境から東京都東部まで西南西-東北東に約80 km連続する測線で観測されたSP変換波の特徴をまとめると以下のようになる．測線西端の丹沢山地に位置する観測点では，大振幅で明瞭なSP変換波が観測され，S-SP時間は5.5秒程度である．このSP変換波については，その振幅極性とS-SP時間から，上位（浅部）が相対的に低速度の地震波速度不連続面を形成する同地域のPHSプレートのモホ面によって励起されたものと解釈できる．なお，SP変換波は，丹沢山地（藤野木-愛川線を東縁とする）より東側で急に不明瞭になることから，関東平野に入るとその地震波速度不連続性は小さくなるものと考えられる．一方，関東平野の中央部に位置する測線東端に近い東京都内の観測点では，S-SP時間で5～7秒程度に，逆極性のSP変換波が1～2秒程度の走時差を伴って観測される．既往研究 [例えば，Nakajima et al. (2009)] より，これらのSP変換波はPHSプレート（スラブ）の地殻のほぼ上面と下面で発生しているものと考えられるが，詳細の解明については今後の課題である．本発表では，上述の地震ついて他の観測点で見られたSP変換波の特徴，および他の深

© 日本地震学会

発地震についての解析結果などを紹介する予定である.

謝辞

防災科学技術研究所・東京大学地震研究所・神奈川県温泉地学研究所による MeSO-net（DOI：10.17598/NIED.0023）の地震波形記録を使用しました．震源情報は，防災科学技術研究所 F-net MTカタログ，気象庁一元化震源カタログを参照しました.

© 日本地震学会

Double-Difference Tomography法を用いた白山火山下の三次元速度構造推定

Three-dimensional velocity structure beneath Hakusan volcano estimated by double-difference tomography

*三浦 凜[1]、平松 良浩[2]
*Rin Miura[1], Yoshihiro Hiramatsu[2]

1. 金沢大学大学院自然科学研究科、2. 金沢大学理工学域地球社会基盤学系大学院自然科学研究科
1. Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 2. Course in Earth and Planetary Science, School of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University

１. はじめに
白山火山はフィリピン海プレートの沈み込み開始に伴い、流体起源が太平洋プレートからフィリピン海プレートに推移した活火山である。最終噴火記録は1659年であり、その後の経過時間の長さから長期的にはいつ活動を再開してもおかしくなく、現在は山頂直下での群発地震が度々観測されている。白山火山に焦点を当てた地震波トモグラフィー(高橋・他, 2004)では、深さ10～14 km付近にマグマ溜り、その深部に下部流体域が推定されているが、このマグマ供給系について詳細に明らかにされているとは言い難い。そこで本研究では、Double-Difference Tomography法を用いて白山火山周辺の３次元速度構造を推定し、マグマ供給系に関する新たな情報を得ることを目指す。

２. データと方法
気象庁一元化震源カタログに記載されている、2010年から2020年に発生した3590個の地震 (東経135.5-139度，北緯34.5-37.5度，震源深さ0-500 km, 2.0≦Mj≦9.0)，の験測値データを用いた。以上の地震と、全地震データから半径150 km以内の常時観測点を用いて連係震源決定(JHD) 法(Kissling et al. (1994))により一次元速度構造を決定した。地震波トモグラフィーにはDouble-Difference Tomography法(Zhang and Thurber, (2003))を用いた。これにより先行研究より震源が集中している地域においての解像度の上昇を図ることができる。また、チェッカーボードテストにより解像度を検討した。

３. 結果
得られた地下速度構造について、先行研究で発見された深さ10~14kmの低速度・高Vp/Vs領域に加え、今回は深さ6~10kmでP波低速度(-9%程度), S波低速度(-8%程度)領域を発見できた。また、この領域におけるVp/Vs値が1.68だったことから、先行研究に新たな解釈を加えることが必要だと考えられる。この特徴から水に富む領域が存在するのではないかと推測できるが、今後更なる考察を行なっていく予定である。

４. 謝辞
解析には気象庁一元化震源カタログを使用させて頂きました。解析について、東京大学地震研究所の行竹洋平博士にご助言いただいた。記して感謝いたします

© 日本地震学会

潮岬ー足摺岬沖南海トラフにおける稠密反射法探査による構造マッピング

Detailed seismic reflection structure mapping in the western Nankai Trough

*中村 恭之[1]、海宝 由佳[1]、野 徹雄[1]、白石 和也[1]、藤江 剛[1]、小平 秀一[1]、木村 学[1]、尾鼻 浩一郎[1]、三浦 誠一[1]、仲西 理子[1]
*Yasuyuki NAKAMURA[1], Yuka Kaiho[1], Tetsuo No[1], Kazuya Shiraishi[1], Gou Fujie[1], Shuichi Kodaira[1], Gaku Kimura[1], Koichiro Obana[1], Seiichi Miura[1], Ayako Nakanishi[1]

1. 海洋研究開発機構
1. JAMSTEC

南海トラフはプレート境界型の巨大地震が繰り返し発生してきた沈み込み帯である。近年ではゆっくり地震の観測が報告され、プレート間滑り挙動の多様性や相互関係を研究する上で重要な領域である。超低周波地震と沈み込む海山の関連が指摘されるなど、沈み込み帯の詳細な地下構造は、プレート境界近傍での地震関連滑り現象を解明する鍵の一つであると考えられる。
我々は、2018年から南海トラフ沈み込み帯において稠密測線による反射法地震探査を主とした構造調査を実施し、これまでに、潮岬沖から足摺岬沖の海域において4-8km間隔の測線で反射法探査データを取得した。これら新規取得した測線に加え1990年代に取得した測線のデータを対象に重合前時間マイグレーション（PreSTM）、重合前深度マイグレーション（PreSDM）解析を実施し、高品質な反射断面を作成した。20年以上前に取得されたデータは、ケーブル長が短い、チャンネル間隔が長いなど、反射法解析には不利な条件のデータではあったが、近傍で新規に得られたデータの解析結果を参考にしつつ最新の解析技術を適用することで、過去のデータからも構造マッピングに使用可能な断面を作成することができた。
得られた断面には、沈み込むフィリピン海プレート上面やデコルマ面、付加体の変形、斜面堆積物、BSRなど、南海トラフに特徴的な構造が明瞭に描き出されている。稠密な測線で得られた断面の解釈を元に、これまでに無い高分解能での3次元的構造マッピングが可能となった。沈み込むフィリピン海プレート上面の形状は、浅部低周波地震活動が報告されている室戸岬沖周辺では起伏に富む一方、紀伊半島西部から紀伊水道沖および土佐湾沖では多少の起伏は認められるものの概ね滑らかであることがわかった。室戸岬沖には海山が沈み込んでいることがこれまでにも指摘されていたが、本研究の結果からそれらの海山は複数の頂部を持つような構造であることが示唆されるなど、プレート境界滑りに関わるより詳細な構造情報が得られつつある。
本研究では、PreSDMによって深度断面を作成した。約4.5-5.5km長のストリーマーケーブルによって得られたデータを用いているため、沈み込み帯深部における速度決定精度は低下する。これは反射断面にイメージされるプレートの沈み込み角度などに影響を与えると考えられる。今回の解析では、フィリピン海プレート上面からの反射波の連続性などを指標に速度推定を行ったが、今後、OBSを用いた速度構造との比較などによって、速度・深度の精度に関する議論も行っていきたい。

© 日本地震学会

南海トラフ海側で沈み込むフィリピン海プレート上に発達する微小正断層群の特徴

The characteristics of small normal faults developed on the subducting Philippine Sea Plate along Nankai Trough

*山下 幹也[1,2]、仲西 理子[2]、三浦 誠一[2]、小平 秀一[2]、金田 義行[3,2]
*Mikiya YAMASHITA[1,2], Ayako Nakanishi[2], Seiichi Miura[2], Shuichi Kodaira[2], Yoshiyuki Kaneda[3,2]

1. 国立研究開発法人　産業技術総合研究所　地質調査総合センター　地質情報研究部門、2. 国立研究開発法人　海洋研究開発機構　海域地震火山部門、3. 香川大学
1. Institute of Geology and Geoinformation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2. Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3. Kagawa University

1．はじめに
巨大地震が繰り返し発生する南海トラフでは，これまで数多くの地殻構造探査が実施され沈み込むフィリピン海プレートの形状が詳細になってきた（Nakanishi et al., 2018）．また近年南海トラフ周辺では高密度・高精度の地震観測によって低周波地震・微動の分布が数多く報告されている（例えばYamashita et al., 2015）．プレート構造や物性と低周波地震・微動の分布を対比させることはプレート境界における地震性すべり域やスロースリップといった現象の理解に有効であり，また詳細なモデルを作成することで地震動予測などシミュレーション分野にも大きく貢献することが期待される．一方，南海トラフでは深部強反射面の発見（Park et al., 2002）やデコルマ面上の位相変化（Park et al., 2014）などのトラフ軸より陸側の研究例がほとんどで，日本海溝などで注目されている海溝海側の構造については研究例が報告されていない．低周波地震・微動の現象には高間隙水圧が関係影響しているが（Hirose et al., 2021），沈み込むフィリピン海プレートのどこからプレート内部へ水が供給されているのかは明らかになっていない．本研究では高分解能で取得された既存反射法地震探査測線を利用して，トラフ軸より海側に発達する正断層に着目してその特徴を報告する．

２．高分解能反射法地震探査
海洋研究開発機構が南海トラフで2013・2014年に海洋調査船「かいよう」によって四国沖から紀伊半島にかけて実施した高分解能反射法地震探査はトラフ軸周辺の微細構造解明が目的であった．取得した計23測線のうち13測線はトラフ充填堆積層を横断し四国海盆までデータが得られている．測線間隔は10～20㎞であり，本データを用いてトラフ軸よりも海側の構造に着目した正断層マッピングを行った．

３．結果
本研究では海底面で確認できるものを断層と同定し，解釈可能な13測線すべてで正断層が確認された．これらの正断層はトラフ軸で見られるプロトスラスト帯と同様に断層面に沿った大きな変位を伴わず，海底面での変位もほとんど見られなかった．断層の平均水平間隔は250mである．陸側に一番近い正断層のトラフ軸の前縁断層からの距離は10～25㎞であり，トラフ充填堆積層の分布幅と調和的であった．四国海盆の拡大軸周辺にある紀南海山の延長部にあたるHDNT123・125測線で最も発達しており，沈み込むフィリピン海プレートが断層発達に影響していると考えられる．さらに本研究では複素アトリビュート解析を適用することで，正断層群によるプレート内部の影響を評価していく予定である．

© 日本地震学会

地震波到来方向の偏りが傾斜する地震波速度不連続面の推定に与える影響

Effects of insufficient back-azimuth coverage on the estimation of a dipping velocity discontinuity

*汐見 勝彦[1]
*Katsuhiko SHIOMI[1]

1. 防災科学技術研究所
1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

【はじめに】
地下の地震波速度不連続面を検出する手法として、レシーバ関数 (RF) 解析法が広く活用されてきた。沈み込むプレート等、検出対象となる速度不連続面が傾斜している場合では、地震波の到来方向によってtransverse成分にも関連する変換波が記録される。Shiomi & Park (2008; JGR)によるグリッドサーチやBianchi et al. (2010; JGR)によるharmonic decomposition解析は、いずれもradialおよびtransverse両成分のRFの地震波到来好方向依存性に着眼し、観測点下の速度不連続面の傾斜方向や傾斜角、異方性構造の特徴を推定するための解析方法である。これらの解析方法は、RFの推定に用いる遠地地震記録が、全ての方位から均質に到来することで、安定した推定結果を得ることが可能になる。一方、日本列島を対象としたRF解析を行う場合、通常の解析に用いられる遠地地震は南東から南南西方向 (オセアニア～東南アジア) で発生するものが圧倒的に多く、逆に北東から東方向や北西方向から到来する遠地地震波形は皆無である。今回、日本のように地震波の到来方向に強い偏りがある場合に、上記の解析方法でどの程度安定した推定結果が得られるのかを改めて確認するため、簡単な構造を用いた理論波形を合成し、検証を行った。

【計算方法】
理論波形の合成にはRAYSUM (Frederiksen & Bostock, 2000; GJI) を用いた。今回は、傾斜する地震波速度不連続面推定において、一定の方位からの地震波が欠落している場合の影響を調査することを目的とした。そのため、モデルは下部地殻と最上部マントルに相当する単純な2層構造とし、その境界面に傾斜を与えた。傾斜方向 (strike) は0˚から345˚まで15˚おきに、傾斜角 (dip) は5˚から45˚まで5˚ごとに変化させた。地震波の到来方向は0˚から355˚まで5˚ごとに設定し、全ての方位から地震波が到来する事例 (ケース1) と、実際の観測結果同様、東方向に相当するN60˚EからN115˚Eおよび北西方向に相当するN320˚EからN345˚Eのデータを除外した事例 (ケース2) の2例を設定した。モデル下部への入射角は約25˚に固定した。なお、理論波形にノイズ（雑微動）は加算していない。

【結果・議論】
まず、得られたRFにharmonic decomposition解析を適用し、境界面の傾斜方向を推定した。ノイズを加算していないこともあり、全方位から地震波が到来するケース1では、設定した方位と寸分違わぬ結果が得られ、計算方法が妥当であることの確認が取れた。また、一部の方位の地震波を除外したケース2でも、全てのstrike / dipのモデルにおいて推定値と設定値の差分は2˚未満であった。結果を詳細に確認すると、境界面が南西から西方に傾斜する事例、すなわち境界面が浅くなる方向のデータが欠落している場合に設定値からの差分がやや大きくなる傾向が見えた。次に、グリッドサーチにより、境界面のdipを推定した。この場合、ケース1でも3˚程度の差分が生じるとともに、設定したdipが30˚を超えるあたりから、推定するdipの頭打ちが生じた。前者は変換波のパルス幅の取り方、後者はモデル下部への入射角よりも大きなdipを設定したことに起因すると考えられる。なお、元来、RF解析では急な傾斜角を持つ不連続面や大きな入射角の地震波の使用は想定されていない (e.g., Ammon, 1991; BSSA)。一方、この方法をケース2に適用すると、多くのモデルでは、設定値と推定値の差分は5˚以下であったが、設定したdipが20˚以下、かつ面が南西から西方に傾斜するモデルで推

© 日本地震学会

定値が設定値と10°～35°異なる事例を確認した。以上の結果から、現状、傾斜方向はある程度の確度で推定可能であるが、傾斜角は10°程度の推定誤差を有すること、特に日本の場合では、西方に緩く傾斜する不連続面の傾斜角の推定は困難であることが分かった。汐見 (2020; SSJ FM) は、harmonic decomposition解析により、四国東部下の海洋モホ面が、従来のRF断面図やトモグラフィ解析からは見いだせなかった凹凸がある可能性を示した。今後は、より安定した傾斜角の推定方法を検討するとともに、四国の各観測点下の海洋モホ面の傾斜角の推定を実施し、より詳細なフィリピン海プレートモデル構築につなげる予定である。

© 日本地震学会

南海トラフ西部周辺におけるランダム速度不均質構造

Random velocity inhomogeneity at the western part of the Nankai subduction zone

*高橋 努[1]、尾鼻 浩一郎[1]、石原 靖[1]、三浦 誠一[1]、小平 秀一[1]、金田 義行[2]
*Tsutomu TAKAHASHI[1], Koichiro OBANA[1], Yasushi ISHIHARA[1], Seiichi MIURA[1], Shuichi KODAIRA[1], Yoshiyuki KANEDA[2]

1. 海洋研究開発機構、2. 香川大学
1. JAMSTEC, 2. Kagawa Univ.

数Hz以上の地震波は，伝播距離の増大とともに波形が崩れ複雑な波群を示す．これはランダムな不均質構造による多重散乱として解釈され，波群の継続時間などを用いて速度不均質のパワースペクトル密度などを推定する研究が進められている．S波の初動到達から最大振幅到達までの時間差（ピーク遅延）は内部減衰の影響を受けにくく，ランダム不均質構造を推定するのに適していると考えられている．本研究では四国沖からトカラ列島周辺までの領域を対象とし，陸上観測点と海底地震計で得られた地震波形記録を用いてランダム速度不均質の三次元構造を推定した．解析に用いた地震数は492で，防災科学技術研究所のHi-net及びF-net，海洋研究開発機構が島嶼部に設置した臨時陸上観測点，265台の海底地震計の計485点で得られた約38000経路の波形記録を使用した．速度波形の水平動2成分からRMSエンベロープを合成し，4-8Hz, 8-16Hz, 16-32Hzにおけるピーク遅延を測定した．ランダムな速度不均質のパワースペクトル密度はvon Karman型を仮定し，スペクトルの勾配を規定するパラメータ(κ)とパワースペクトル密度の振幅を規定するパラメータを未知数とした．構造推定にはreversible jump MCMC（Green 1995）を用い，未知数の数と空間配置を変えながら最適解を探索した．散乱の周波数依存性を考慮するため，同一波線の異なる周波数間の残差が相関をもつよう，尤度関数の共分散行列の非対角成分の一部を非ゼロとした．
解析の結果，地殻内の非火山地域ではκが0.8程度と推定され，速度不均質のパワースペクトル密度は波数15km^{-1}で10^{-8} ~ 10^{-7} km^3 と比較的弱い不均質性が推定された．別府から島原の火山列や桜島付近の火山群の下は周囲に比べて不均質性が強く，深さ0-30kmではκ は約0.5，波数15km^{-1}でのパワースペクトル密度は約10^{-6}km^{3}と推定された．これらの火山の下では，深さとともにκが減少し，パワースペクトル密度が大きくなる傾向が見られた．沈み込んだ九州パラオ海嶺付近では顕著な不均質性の変化は見られなかったが，九州パラオ海嶺付近に設置された海底地震計では16-32HzのS波が明瞭に観測されない傾向が見られた．これは散乱の影響を強く受けたために最大振幅がノイズレベルを下回った可能性を示唆し，高周波数域での多数の欠測により不均質性を過小評価した可能性が考えられる．
種子島・トカラ列島の東側では，波数15km^{-1}でのパワースペクトル密度が火山地域の地殻内と同程度の媒質が深さ0-20kmに分布していることがわかった．この領域ではκが0.5以上であり，スペクトルの特徴は火山域とは大きく異なる．この領域のプレート境界10-20kmと推定されており(Yamamoto et al. 2020)，主に上盤側の構造を反映していると考えられる．また中国地方西部の深さ20-40kmに火山周辺と類似した不均質性の強い領域が推定された．同様の構造は九州東部の深さ20-30kmにも分布する．これらの不均質性の強い構造の成因などは現時点では不明であり，今後他の領域での解析事例を増やすなどして解釈を進める必要がある．

© 日本地震学会

ポスター会場（1日目）| 一般セッション：S09. 地震活動とその物理

2021年10月14日(木) 15:30 ~ 17:00 | P3会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S09P-01] 琉球海溝－南海トラフのすべり速度欠損分布と繰り返し地震活動の関係

〇橋間 昭徳[1]、佐藤 比呂志[2]、石山 達也[2]、五十嵐 俊博[2] (1.海洋研究開発機構、2.東京大学地震研究所)

15:30 ~ 17:00

[S09P-02] 能登半島北東部の群発地震活動

〇平松 良浩[1] (1.金沢大学)

15:30 ~ 17:00

[S09P-03] 日本の内陸地震の余震数とその継続時間

〇本多 泰知[1]、山田 卓司[1] (1.茨城大学)

15:30 ~ 17:00

[S09P-04] 和歌山市付近の地震活動と地球潮汐の関連性

〇飯塚 ふうな[1]、吉田 康宏[2] (1.札幌管区気象台、2.気象研究所)

15:30 ~ 17:00

[S09P-05] 微動解析に向けた関東東海地殻活動観測網アナログ地震計記録の自動デジタル化とスペクトル解析の試み

〇松澤 孝紀[1]、武田 哲也[1] (1.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S09P-06] 日本海溝沿いの地震活動の規模別頻度分布に関する指標値の地域特性とプレート間のすべり現象との比較

〇永田 広平[1]、溜渕 功史[1]、弘瀬 冬樹[1]、野田 朱美[1] (1.気象庁気象研究所)

15:30 ~ 17:00

[S09P-07] 2021年4月トカラ列島近海の群発地震に伴う緊急海底地震観測

〇仲谷 幸浩[1]、八木原 寛[1]、山下 裕亮[2]、平野 舟一郎[1]、中尾 茂[1] (1.鹿児島大学南西島弧地震火山観測所、2.京都大学防災研究所宮崎観測所)

15:30 ~ 17:00

[S09P-08] 2016年熊本地震前後の地震活動のパターンについて

〇楠城 一嘉[1,2,3]、井筒 潤[4]、織原 義明[5]、鴨川 仁[1] (1.静岡県立大学、2.静岡大学、3.統計数理研究所、4.中部大学、5.東京学芸大学)

15:30 ~ 17:00

[S09P-09] 富士山直下で起きる低周波地震の研究の序報：Matched Filter法を用いた地震カタログの作成とカタログの性能評価

〇楠城 一嘉[1,2,3]、行竹 洋平[4] (1.静岡県立大学、2.統計数理研究所、3.静岡大学、4.東京大学)

15:30 ~ 17:00

[S09P-10] 函館市付近の浅部低周波地震と通常地震が混在する地震活動：稠密地震観測による震源分布と波形の特徴

〇野口 科子[1]、笠原 敬司[1]、小菅 正裕[2]、前田 拓人[2] (1.（公財）地震予知総合研究振興会　地震防災調査研究部、2.弘前大学　理工学研究科)

15:30 ~ 17:00

[S09P-11] 東北地方の応力場と発生した地震の断層面との関係（３）

〇田上 綾香[1]、松野 愛弥[1]、岡田 知己[1]、酒井 慎一[2]、大園 真子[2,3]、勝俣 啓[3]、小菅 正裕[4]、山中 佳子[5]、片尾 浩[6]、松島 健[7]、八木原 寛[8]、中山 貴史[1]、平原 聡[1]、河野 俊夫[1]、堀 修一郎[1]、松澤 暢[1]、2011年東北地方太平洋沖地震緊急観測グループ . (1.東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター、2.東京大学地震研究所、3.北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター、4.弘前大学理工学研究科、5.名古屋大学大学院環境学研究科、6.京都大学防災研究所地震予知研究センター、7.九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター、8.鹿児島大学・南西島弧地震火山観測所)

15:30 ~ 17:00

[S09P-12] ハッシュ法を用いた類似波形検出手法の性能比較

〇高山 裕紀[1]、平野 史朗[1]、川方 裕則[1] (1.立命館大学)

15:30 ~ 17:00

[S09P-13] 南海トラフで発生する浅部超低周波地震活動の走向方向の変化の定量解析

〇武村 俊介[1]、馬場 慧[1]、矢部 優[2]、江本 賢太郎[3]、汐見 勝彦[4]、松澤 孝紀[4] (1.東京大学地震研究所、2.産業総合技術研究所、3.東北大学、4.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S09P-14] エンベロープ相関と振幅に基づく浅部低周波地震モニタリングシステム

〇溜渕 功史[1]、小木曽 仁[1] (1.気象研究所)

15:30 ~ 17:00

[S09P-15] 内陸地震の余震活動と剪断歪みエネルギー変化

〇田中 佐千子[1] (1.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S09P-16] 直接的先験情報を考慮した長期間地震データによるテクトニック応力場の推定

〇寺川 寿子[1]、松浦 充宏[2] (1.名古屋大学大学院環境学研究科　附属地震火山研究センター、2.統計数理研究所)

15:30 ~ 17:00

[S09P-17] 熊野灘における超低周波地震の時空間分布 ―2020年12月から2021年1月の活動―

〇山本 揚二朗[1]、有吉 慶介[1]、矢田 修一郎[1]、中野 優[1]、堀 高峰[1] (1.海洋研究開発機構海域地震火山部門)

15:30 ~ 17:00

[S09P-18] 沈み込み帯の超巨大地震のalong-dipセグメントの要因

〇蓬田 清[1] (1.北海道大学大学院理学研究院　地球惑星科学部門・地球惑星ダイナミクス分野)

15:30 ~ 17:00

[S09P-19] 地震活動異常の視覚化ー複数手法による比較

〇吉川 澄夫[1] (1.所属なし（元・気象庁）)

15:30 ~ 17:00

[S09P-20] スラブ内地震のモーメントマグニチュードと断層面積のスケーリング則

〇張 学磊[1]、根本 信[1]、森川 信之[2]、土肥 裕史[2]、平田 賢治[2]、藤原 広行[2] (1.応用地質株式会社、2.防災科学技術研究所)

琉球海溝ー南海トラフのすべり速度欠損分布と繰り返し地震活動の関係

Relation between activity of repeating earthquakes and slip-rate deficit under the Ryukyu Trench–Nanakai Trough

*橋間 昭徳[1]、佐藤 比呂志[2]、石山 達也[2]、五十嵐 俊博[2]
*Akinori HASHIMA[1], Hiroshi Sato[2], Tatsuya Ishiyama[2], Toshihiro Igarashi[2]

1. 海洋研究開発機構、2. 東京大学地震研究所
1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

著者らは、さきの研究において、琉球ー西南日本弧における1998–2010年の測地データのインバージョンにより琉球海溝ー南海トラフにおけるすべり速度欠損の分布を求めた（橋間ほか, 2018, 日本地球惑星科学連合2018年大会）。すべり速度欠損は、南海トラフでは最大8 cm/yrとなり、過去の研究と調和的であった。一方、琉球海溝では、九州南部から南方に向けて負のすべり速度欠損（すべり速度余剰）が増加し、琉球海溝最南部で5 cm/yrに達した。琉球海溝におけるすべり速度余剰はスラブ後退の浅部における表れであり、沖縄トラフの背弧拡大を引き起こすものと考えられる。一方、琉球海溝においては、測地データとは独立に、繰り返し地震によるすべり速度が求められている（Igarashi, 2010, 2020; Igarashi & Kato, 2021)。そこで本研究では、測地データインバージョンによるすべり速度欠損分布を繰り返し地震によって検証する。繰り返し地震のすべり速度データとしては、観測期間を考慮し、Igarashi (2010)のカタログのものを用いた。繰り返し地震によるすべり速度はプレート相対速度に沿った向きであると仮定し、各点におけるプレート相対速度を差し引いてすべり速度欠損とする。プレート相対速度の計算にはNUVEL-1Aモデル（DeMets et al., 1994）を用いた。繰り返し地震によるすべり速度欠損はばらつきが2-3 cm/yrと非常に大きく、琉球海溝の最南部ではすべり速度欠損が3 cm/yrと-10 cm/yrを示す繰り返し地震が近接する例もある。測地データインバージョンのすべり速度欠損は、このばらつきの下限を画するように分布する。両者の解像度の違いを考えると、繰り返し地震によるすべり速度のばらつきは、測地データインバージョンでは捉えられない局所的な固着による影響を受けたものと考えられる。興味深いことに、1911年M8喜界島地震の震源域（後藤, 2013）付近では、測地データインバージョンのすべり速度欠損、繰り返し地震のすべり速度欠損の下限がともに0 –-1 cm/yrとなり、相対的な固着域となっている。一方、両すべり速度欠損分布と計器観測以前の1771年、1791年の～M8地震の震源域との間に明白な関連は見られなかった。

© 日本地震学会

能登半島北東部の群発地震活動

Swarm earthquake activity in the northeastern Noto Peninsula

*平松 良浩[1]
*Yoshihiro Hiramatsu[1]

1. 金沢大学
1. Kanazawa University

・はじめに
能登半島北東部の珠洲市では気象庁震度データベースによると2021年5月～7月に有感地震が13回発生し，明らかに過去の平均的な有感地震数（～数回／年）より多い．この地域での地震活動の活発化は2020年12月頃から始まっており，GNSSデータでもそのタイミングに合わせて奥能登で局所的な地殻変動が始まっていることを見ることができる（西村, 2021）．さらに遡ると，この地震活動の始まりは2018年5月頃である．本研究では，能登半島北東部の群発地震活動について報告する．

・データと方法
本研究で対象とする地域は能登半島北東部の珠洲市周辺地域で，北緯37.4～37.6度，東経137.1～137.4度の範囲である．気象庁の験測値データを用いて，JHD法（Kissling et al., 1994）にて一次元地震波速度構造を求め，その速度構造を用いてDouble Difference法（Waldhauser and Ellsworth, 2000）にて震源再決定を行った．

・結果と考察
本研究地域の地震活動は珠洲市の南部（富山湾側），西部（内陸部），北部（日本海側）の3つの領域に大別できる．南部域では2018年5月から地震数が増加し，6月～8月にかけて集中的に地震が発生し，その後も地震活動が比較的高い状態が継続していた．2020年12月にそれまでの活動域を囲むような震源分布で地震数が急増した．震源の深さは3領域全てにおいて概ね～15 km程度であるが，2020年12月の南部域の地震については15 kmより深い地震が多いことやそれまでの活動域の外側にドーナツ状に地震発生域が広がっていることが特徴的である．西部域では2021年2月から，北部域では2021年3月から地震活動が目立つようになり，両地域ともに5月から地震数が急増し，特に北部域では2021年6月，7月にかけてさらに地震数が増え，マグニチュードも3～4と比較的規模の大きい地震が起こるようになった．

能登半島北東部のGNSSデータからは，2020年12月頃からこの地域において局所的に非定常地殻変動が起こっていることが分かる．西村(2021)は能登半島のGNSSデータの詳細解析から，この非定常地殻変動は茂木モデルを仮定すると，2020年12月からのドーナツ状の地震活動域の北西部付近の深さ12 kmの体積膨張源により説明できることを示した．この非定常地殻変動は現在も継続しており，2021年に一層の活発化を示した一連の群発地震の成因であると考えられる．

飯尾(1983)は群発地震の最大地震のマグニチュード（M_{max}）と活動域のリニアディメンジョン（L_{swm}）の関係式として，$M_{max}=\log_{10}L_{swm}+2.65$を提唱している．2021年7月末時点において，奥能登の3つの群発地震活動域について，観測された最大地震のマグニチュードと活動域のリニアディメンジョンの関係は飯尾(1983)の関係式と概ね整合的である．

・謝辞：本研究では気象庁の験測値データを使用しました．記して，感謝します．

© 日本地震学会

日本の内陸地震の余震数とその継続時間

Numbers and duration of aftershocks for inland earthquake in Japan as a function of their size

*本多 泰知[1]、山田 卓司[1]
*Taichi Honda[1], Takuji Yamada[1]

1. 茨城大学
1. Ibaraki Univ.

1.はじめに

余震とは、ある地震（以後、本震と記す）の後に本震の断層およびその近傍で起こる本震よりも小さな地震のことである。本研究では、余震数と余震の継続時間という２点に着目し、2003年以降に日本の内陸部で発生した、マグニチュード(M)5.5以上の13地震を解析した。

2.解析手法

定常的な活動の地震と余震を区別するために、時空間的な余震の定義が必要である。最初に、スケーリング則から本震の断層の長さを求めた。そして、深さ30 km以浅、本震の震央から断層の長さを半径とする円柱を余震域と定義し、余震域内に震源を持つ地震を余震の候補とした。また、時間的定義は以下とした。はじめに、余震域内での本震前180日間の地震活動を「定常的な活動」として定義し、その地震数を集計した。次に、本震後180日間の地震総数を1 日ずつ時間窓をずらしながら集計し、その地震数が「定常的な活動」の地震数を以下になった時点を余震活動の終了とした。以上の空間・時間的な定義を両方満たす地震を余震とした。なお、各余震域での地震活動の規模別頻度分布を考慮することにより、M2.0以上の地震を解析対象とした。

3.結果および考察

一般に、地震数の時間変化をグラフ化すると、余震数と本震の規模には単純な相関がない印象を受ける。ところが解析の結果、日本の内陸地震に関しては、本震の規模と余震数には強い相関があることが明らかとなった（図1.a）。この結果は、本震直後の余震活動の激しさと余震の継続時間が逆相関の関係にあることを示唆している。また、Mが１大きくなると余震数はおよそ10倍になることから、余震数はグーテンベルク・リヒター則を満たすような値を取ることが確認された。しかし、本震の規模と余震数の相関から大きく外れる地震も存在している。本震が発生しなければ余震も起こらないことを考慮しながら、各地震の破壊の複雑性等との相関を吟味することにより、これらの原因について今後検討を進めていきたい。また、余震の継続時間と本震の規模の間には緩やかな正の相関があるものの、本震の規模と余震数の相関に比べると明確に弱い（図1.b）。これは、余震の継続時間には本震の規模以外の要素が重要であることが考えられる。一方、余震の時間的定義については、慎重に検討する必要がある。余震の時間変化がOmori公式に従うならば、余震の積算数は本震後の経過時間の対数に比例すること、現在の定義では180日以内で終了する余震活動が存在しないことなどを考慮しながら、余震の継続時間についても議論を深めたい。

© 日本地震学会

(a) 本震の規模（Mw）と余震数　　(b) 本震の規模（Mw）と余震継続時間

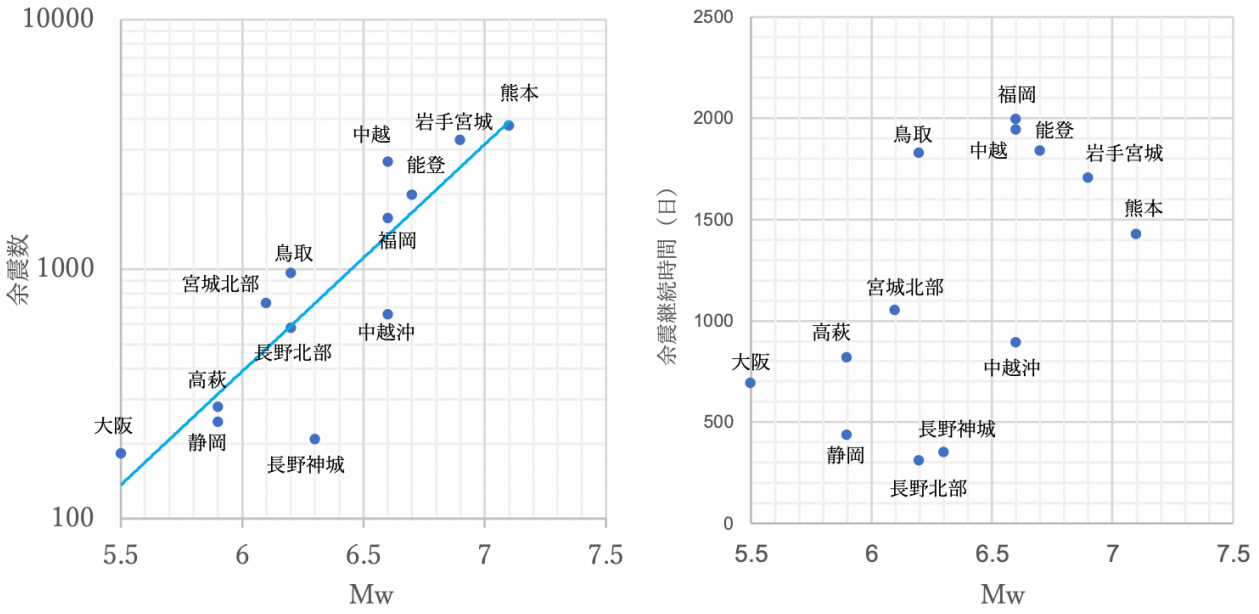


図 1 . (a)余震数および(b)余震継続時間と本震の規模の関係。(a)内の水色直線は、余震数が地震の規模の 1 次関数として表されると仮定した際に、最小二乗法により求められた回帰直線を示す。

© 日本地震学会

和歌山市付近の地震活動と地球潮汐の関連性

Relevance of Seismic activity near Wakayama City to the earth tides

*飯塚 ふうな[1]、吉田 康宏[2]
*Funa Iizuka[1], Yasuhiro Yoshida[2]

1. 札幌管区気象台、2. 気象研究所
1. Sapporo Regional Headquarters, JMA, 2. Meteorological Research Institute

和歌山市付近の地震活動は非常に活発で、まわりに比べて震源が浅い、土地の膨張・隆起が観測されている、といった特徴があるものの地震の発生原因について詳しく調査した研究は少ない。本研究では、この領域での地震活動と地球潮汐との関係を調べることでこの地震活動が何に影響を受けているのかを解明することを目的とした。

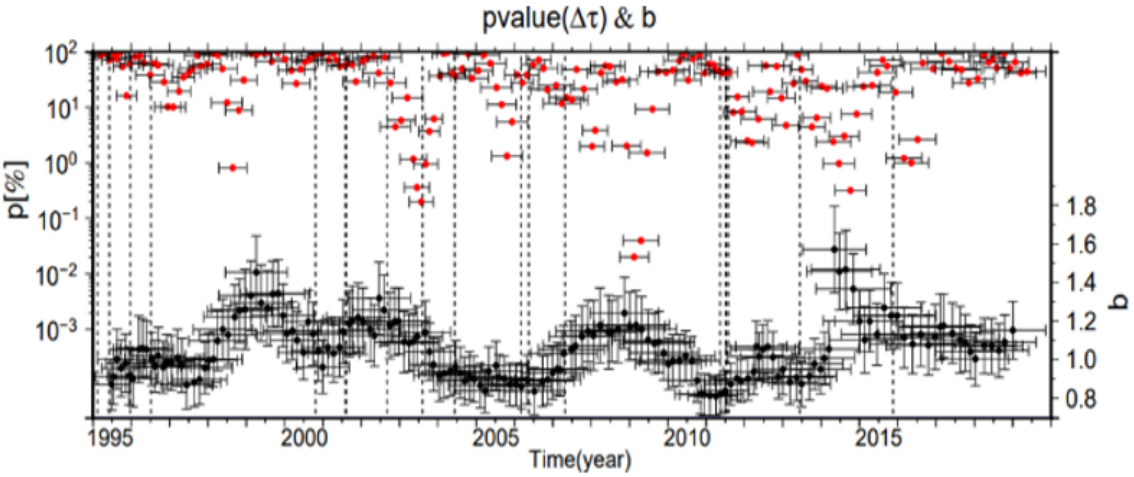
地震活動と地球潮汐の相関は、地震発生時の地球潮汐の応答を計算し（Hirose et al.,2019）、Schuster’s testの手法に基づいたｐ値などに基づいて判断する。この方法を使った解析の結果から地震活動と潮汐の相関がみられる時期について、対象領域の周辺で発生している低周波地震や長期的スロースリップ、地震活動のｂ値、地殻変動、地震発生場所との関連を調べた。

解析対象期間は1995年から2019年の25年間であり、期間中、潮汐によるせん断応力Δτと地震活動の相関が強く、1998、2003、2005、2008、2011、2015年の6つの時期に特に潮汐相関が高まっていることが分かった。低周波地震と潮汐相関の関係を調べたところ、大阪湾での低周波地震が活発化していた時期の数か月後にΔτのｐ値が低下している事例が数例観測された。この地域では地下から流体が上昇してきている可能性が指摘されており（Nakajima and Hasegawa,2007）、フィリピン海スラブの下から湧昇してきた流体が深さ20～30km で低周波地震を引き起こし、その流体が更に上昇してきて対象領域の下深さ約10kmの群発地震域に到達し、断層面に入り込むことで断層滑りが起こりやすくなり潮汐相関が高まったと考えられる。また、ｐ値とｂ値の時間変化を調べた結果が下図である。赤丸がp値(左軸)、黒丸がｂ値(右軸)の時間変化を示しており、その対応関係を調べたところΔτのｐ値の低下と地震活動のｂ値の上昇には弱い相関(r=0.371)が見られた。また、ｐ値が低下しているときにｂ値が高い領域での地震の発生率が高まっていたことが分かった。これは水やマグマといった高温物質が地下から上昇してきて断層面に入り込み差応力が小さくなることでｂ値が大きくなり、それと同時に断層面が滑りやすい状況になっていたために地球潮汐と地震活動の相関が強くなった考えられる。

このように、潮汐相関が高まっていた時期について大阪湾で発生した低周波地震、地震活動のｂ値との関係が見られた。両者とも上昇してきた流体が断層面に入り込み、断層滑りが起こりやすくなったことで地球潮汐という微小な応力変化による地震の誘発が見られた、というモデルを立てると観測事実を整合的に説明できる。以上のことから、和歌山市付近の浅発地震の発生には地下から上昇してくる流体が関わっている可能性が高いと考えられる。一方、紀伊水道での長期的スロースリップや紀伊半島下のフィリピン海プレート上面で発生する低周波地震、GNSSによる土地の膨張・隆起が捉えられていた時期との関連は見られなかった。

謝辞：本研究では気象庁が決定した震源及び発震機構のデータを使用しました。 また、気象研究所の弘瀬冬樹様から提供して頂いたプログラムTidal strain、気象研究所の小林昭夫様から頂いた地殻変動に関するデータ、気象大学校の木村一洋准教授のGNSSデータ解析ツールを使用させて頂きました。その他、本研究に対するご助言を賜りました気象研究所の皆様にも深く感謝申し上げます。

© 日本地震学会



図：ｐ値とｂ値の時間変化（赤丸がｐ値(左軸)、黒丸がｂ値(右軸)を表す）

© 日本地震学会

微動解析に向けた関東東海地殻活動観測網アナログ地震計記録の自動デジタル化とスペクトル解析の試み

A trial digitization and spectral analysis of analog seismograms of the Kanto-Tokai Observation Network for the analysis of tectonic tremor

*松澤 孝紀[1]、武田 哲也[1]
*Takanori MATSUZAWA[1], Tetsuya TAKEDA[1]

1. 防災科学技術研究所
1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

南海トラフにおける深部微動（以下，微動）の発見(Obara, 2002)以降，多くの研究者によってスロー地震が精力的に研究されてきた．一方数値シミュレーションの研究からは，大地震発生領域への応力蓄積過程に伴い，スロー地震活動の発生間隔に長期的な変化が見られる可能性が指摘されている(例えば，Matsuzawa et al., 2010)．東海地域における長期間のスロー地震カタログとしては，例えば東海地域の1984年以降についてひずみ計を用いた短期的スロースリップイベントに関する研究がなされているが（小林他，2006），とくに1998年以前については観測点数の問題から，詳細な位置推定は難しい．また，歪や傾斜といった地殻変動観測においては，降水などの影響を受けやすい点も，活動を網羅的にカタログ化する観点で課題となる．

防災科研は1970年代末から関東東海地殻活動観測網の運用を開始しており，ペンレコーダーによる地震計のアナログ記録が残されている．高密度に展開された地震観測網の地震波形記録が連続のデジタルデータとして保存されることが一般的になったのは2000年代以降であるため，それ以前のスロー地震活動状況を解明するには，こうしたアナログの地震波形記録が有用となる．我々はこの記録を用いた1980年代の愛知県東部の微動活動把握を目指し，目視による活動検出を実施した（松澤・武田, 2020）．しかし，客観的な基準で微動を検出し，微動源の位置を議論するためには，波形をデジタルデータ化して解析することが重要となる．また，数日間におよぶエピソード単位の活動の解析や，年単位の連続記録の網羅的な解析を目指す場合には，手作業でなく可能な限り自動化できることが望ましい．こうした目的のもと，我々は波形データの自動デジタイズの試みを開始した（松澤・武田，2021, JpGU)．しかしながら，スキャンされた画像の傾きが補正できない点，波形の振幅がトレース間の平均間隔の半分を越えた場合には周囲のトレースを含め正しくデジタイズできない点が，主な問題点となっていた．我々はこうした問題の解決を目指し，手法の改良を行った．

解析対象となる波形記録では，１枚の記録紙に２時間分の上下動地震波形がペンレコーダーで記録されている．記録は上下段および左右の４つのブロックに分かれ，上段が前半１時間，下段が後半１時間分となっている．左側は毎分0～35秒台の波形トレースが上から順に並んでおり，右側は30～65秒台の波形トレースが同様に並んでいる．各トレースにおいては，１秒毎にstreak状のタイムマークが上向きに入り，0秒台にはやや長いオフセットが入るようになっている．デジタル化を実施する波形画像については，松澤・武田(2021, JpGU)と同様，この記録紙を400dpiグレースケールのPNG(Portable Network Graphics)形式でスキャンしたものを使用した．

データのデジタイズにあたっては，プログラム上でビットマップデータを扱った．今回の方法では，まずこのビットマップデータについて画素毎に縦方向に，色のついた領域を抽出した．その後，抽出された領域について横方向に近接するもの同士をつなぐことで，それぞれ35秒間のトレースを得た．左右のブロックを分離した後，それぞれのトレースの傾きからブロック全体の傾きを推定し，ペンレコーダーによる記録時およびスキャン時の傾きの補正値とした．加えて，傾きと同時に推定される縦軸の切片情報を用い，トレースの間隔を

© 日本地震学会

推定するとともに，上下段の分離も行った．こうして得られた波形トレースをデジタルの波形のデータとして得た．

手法の検証として，防災科研Hi-netのデジタル地震計記録を用いて疑似的な紙記録イメージを作成したのち，このプログラムを適用し元データとの比較を行った．微動の発生が確認されている期間の記録については，高周波成分の情報は欠落しているものの，波形は概ね一致し，スペクトルの比較でも10Hz以下の帯域ではよく一致した．さらに，実際の波形への適用も試み，傾きが補正され，上下の隣のトレースと線が交わらない範囲内において，デジタイズ後の波形は元画像と概ね一致することを確認した．また，小林他(2006)で短期的スロースリップイベントが報告されている期間について適用したところ，1Hzとその倍音にピークは見られるものの，Hi-netと同様に数Hzに卓越するシグナルが確認できた．ただし，ここで得られたデータは1秒毎のタイムマークを含んでいるため，そのままエンベロープ相関法のような震源決定手法に適用することは難しい．今後，微動源の位置を議論するためには，こうした影響を回避する方法を検討する必要がある．

© 日本地震学会

日本海溝沿いの地震活動の規模別頻度分布に関する指標値の地域特性とプレート間のすべり現象との比較

Comparison of the regional characteristics of the magnitude-frequency distribution of earthquakes with interplate slip phenomena along Japan Trench

*永田 広平[1]、溜渕 功史[1]、弘瀬 冬樹[1]、野田 朱美[1]
*Kohei Nagata[1], Koji Tamaribuchi[1], Fuyuki Hirose[1], Akemi Noda[1]

1. 気象庁気象研究所
1. Meteorological Research Institute

著者らは，地震活動の特徴を表す様々な指標の監視に基づき地殻活動の現在の異常度を表現することを主な目的とし，過去の地震活動から“ふつう”の地震活動の特徴を洗い出して，他とは有意に異なる指標値分布を持つ活動を統計的手法により抽出することを提案している．永田ほか [2021, JPGU] では，気象庁一元化震源を用いて，規模別頻度分布に関するGR則のｂ値とGR則からの逸脱を表すη値，体積ひずみの潮汐変動との相関，ETASモデルによる地震発生回数の期待値と実際の地震発生回数の差を指標とし，日本全国を矩形領域で分割した各領域について，領域内の連続する一定数毎の地震から推定した指標値の分布が領域外のすべての推定値の分布と有意に異なる場合の抽出を試みた．この結果，特に規模別頻度分布に関する指標について，他とは異なる指標値分布を持つ領域が抽出され，地域的な物理現象を反映していることが推察される．本発表では，これらの他とは異なる指標値分布がどのような物理現象と対応づけられるのかを確かめるため，主にプレート境界のすべりに関係すると考えられている既往研究による観測成果（Igarashi [2020, EPS] による相似地震カタログから推定される平均すべり量，Nishikawa et al. [2019, Science] によりまとめられている微動や超低周波地震）との比較を行った結果について報告する．

相似地震カタログ [Igarashi, 2020] から推定される平均すべり量との比較からは，以下のことが分かる．ア．ｂ値の分布が他とは異なりかつその平均値が他よりも低い領域では，領域中の地震数における相似地震の割合が高く，平均すべり量は小さい．イ．ｂ値の分布が他とは異なりかつその平均値が他よりも高い領域のうち，領域中の地震数における相似地震の割合が高いところでは，平均すべり量が大きい．ウ．ｂ値の分布が他とは異なりかつその平均値が他よりも高い領域であっても，領域中の地震数における相似地震の割合が低いもしくは無いところでは，平均すべり量は小さい．これらの領域を微動や超低周波地震の発生域 [Nishikawa et al., 2019] と比較すると，地震活動の解析を一定の空間領域内で行っているために空間分解能は良くないものの，上記ア．に対応する領域が微動や超低周波地震の発生域もしくはその周辺陸側に多くあることが分かる．このことと上記ア．イ.の結果を合わせて見ると，Nanjo & Yoshida [2018, Nature Communications] が指摘する南海トラフ沿いのすべり欠損速度とｂ値の負の相関と同様の関係が日本海溝沿いにおいても確認されたものと考えられ，そのうちｂ値の分布が全体に比べて有意に高い領域，低い領域が本手法により抽出できていることが強く示唆される．また，本解析の結果からは，このようなプレート間のすべりとの対応関係が，プレート間地震が主体の活動以外からは見て取れないことも分かる．上記ウ．は，プレート境界以外の地震活動が主体でｂ値が高い活動領域に対応すると考えられる．F-netカタログ（https://www.fnet.bosai.go.jp）によれば，これらの活動中には正断層型の地震が多く含まれており，Schorlemmer et al. [2005, Nature] が指摘する地震の発震機構の違いに対応するｂ値の分布のうち，全体に比べて有意に高い活動に対応するものと考えている．

これらの結果からは，統計的手法により抽出された特徴的な指標分布が，プレート間のすべり速度や，地震の

© 日本地震学会

メカニズムを支配する応力場といった地域的な特徴を反映していることが確認できたと言えるだろう．このことは，通常とは異なるプレート間のすべりや応力場の変化に対応する地震活動の変化を，地震活動の統計的手法により客観的に検出できる可能性を示唆する．発表においては，このような可能性についても議論したい．

引用文献

Igarashi, T. (2020). Catalog of small repeating earthquakes for the Japanese Islands. Earth, Planets and Space, 72, 1-8.
Nanjo, K. Z., & Yoshida, A. (2018). A b map implying the first eastern rupture of the Nankai Trough earthquakes. Nature communications, 9(1), 1-7.
Nishikawa, T., Matsuzawa, T., Ohta, K., Uchida, N., Nishimura, T., & Ide, S. (2019). The slow earthquake spectrum in the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observatories. Science, 365(6455), 808-813.
Schorlemmer, D., Wiemer, S., & Wyss, M. (2005). Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes. Nature, 437(7058), 539-542.

© 日本地震学会

2021年4月トカラ列島近海の群発地震に伴う緊急海底地震観測

Urgent ocean bottom seismic observation of earthquake swarms in the Tokara Islands initiated in April 2021

*仲谷 幸浩[1]、八木原 寛[1]、山下 裕亮[2]、平野 舟一郎[1]、中尾 茂[1]
*Yukihiro NAKATANI[1], Hiroshi Yakiwara[1], Yusuke Yamashita[2], Shuichiro Hirano[1], Shigeru Nakao[1]

1. 鹿児島大学南西島弧地震火山観測所、2. 京都大学防災研究所宮崎観測所
1. NOEV, Kagoshima Univ., 2. Miyazaki Observatory, DPRI, Kyoto Univ.

南西諸島北部のトカラ列島近海（鹿児島県十島村・小宝島付近）において，2021年4月9日23時台から顕著な地震活動が発生した．一連の地震活動は，開始から約3日間で200回以上の有感地震を伴う群発地震の様相を呈し，最大マグニチュード（M）は5.3，最大震度は4（悪石島）であった．島嶼部に展開された地震観測網を用いて，鹿児島大学地震火山地域防災センター附属南西島弧地震火山観測所（NOEV）が決定した震源の多くは深さ約10–20 kmであり，当該群発地震は陸側プレートの地殻内で発生したと考えられる．有感地震の活動としては，消長を繰り返しながら約10日間で計250回以上を観測し，4月22日以降は散発的な活動を示している．
今回の群発地震が発生した小宝島周辺では，過去にも群発地震活動が見られている．特に1995年12月に発生した活動域は今回と類似しており，最大Mが5.5，M2.5以上の地震が約10日間で250回以上観測された点でも共通している．多くの群発地震活動の背景の一つとして，地殻流体の移動が考えられている．小宝島周辺においては，熱水活動やガスプルームを伴う海底火山が確認されているほか，トカラ海峡付近で流体の流路となり得る構造的な不均質性も高いと考えられる．しかしながら，今回の群発地震の原因を検討するにあたり，現有の震源精度が悪い問題がある．これは，地震観測点が北東一南西方向に直線状かつ疎らに配列した島嶼部に限定されているためである．
NOEVと京都大学防災研究所宮崎観測所は，こうした背景を踏まえ，緊急の海底地震観測を開始した．新規に設置した海底地震計は4.5 Hz速度計を搭載した短期収録型海底地震計1台で，観測点配置は，曽根が多い急峻な海底地形も考慮しつつ，陸上観測点が存在する悪石島・宝島との3点で地震活動域を取り囲むように設定した．4月17日に設置が完了し，同日23時より観測を開始した．海底地震計の回収は，当初2021年6月～7月に計画していたが，海況不良やコロナ禍のため本予稿投稿時点では未実施で，8月下旬～9月上旬に予定している．本発表では，当該地震活動の特徴と海底地震観測の詳細について紹介するとともに，回収予定の海底地震計記録も用いた暫定結果を報告する．

謝辞：海底地震計の設置航海は，長崎大学水産学部附属練習船長崎丸の教育関係共同利用に基づき実施されました．記して感謝いたします．

© 日本地震学会

2016年熊本地震前後の地震活動のパターンについて

Seismicity pattern before and after the 2016 Kumamoto earthquakes

*楠城 一嘉[1,2,3]、井筒 潤[4]、織原 義明[5]、鴨川 仁[1]
*Kazuyoshi NANJO[1,2,3], Jun Izutsu[4], Yoshiaki Orihara[5], Masashi Kamogawa[1]

1. 静岡県立大学、2. 静岡大学、3. 統計数理研究所、4. 中部大学、5. 東京学芸大学
1. Univ. of Shizuoka, 2. Shizuoka Univ., 3. Inst. of Stat. Math., 4. Chubu Univ., 5. Tokyo Gakugei Univ.

本講演では、平成28年(2016年)熊本地震の起きた布田川・日奈久断層帯周辺の地震活動のパターンについて解析した結果を報告する。2016年4月14日と16日に起きたマグニチュード(*M*)6.5と7.3の地震は、それぞれ、日奈久断層帯と布田川断層帯で起きた。これらの断層帯周辺では、熊本地震前から一定程度の地震活動はあったが、前者の*M*6.5地震の後の地震活動や、後者の*M*7.3地震の後の地震活動は更に活発だった。先行研究(Nanjo et al., 2016, 2019; Nanjo and Yoshida, 2017)では、個々の地震活動のパターンについて議論しているが、本研究ではそれらを総合的にまとめ、熊本地震前後の地震活動のパターンについて議論する。

本解析は、地震活動の時空間分布と、地震の規模別頻度分布を表すグーテンベルグ・リヒター(GR)則(Gutenberg and Richter, 1944)、および余震の減衰様式を表す大森・宇津(OU)則(Utsu, 1961)に基づく。規模の大きい地震と小さい地震の数の比率に相当するGR則の*b*値は、岩石破壊実験では、差応力に反比例の関係があると示唆され、地球規模の事例でも、その関係を支持する傾向が見られる(Scholz, 1968, 2015)。また、OU則は、大きい地震(本震)の発生直後に増加した小さい地震(余震)の数は時間と共にべき乗で減少することを表す。速度・状態依存摩擦では(Dieterich, 1994)、OU則の冪指数p=1が仮定されているが、応力減少が速いか遅いかにより、p>1やp<1が観測されうる事を示している。

気象庁が維持管理する地震カタログ(一元化震源カタログ)を使用して解析した結果は、以下の様にまとめられる。(1)熊本地震が起きる前は、*M*6.5と*M*7.3の地震の震央付近における応力状態は高めであった。熊本地震の一連の活動が開始した後は、布田川・日奈久断層帯に沿った応力は大局的に減少傾向を示した。(2) *M*7.3地震前のプレスリップや同地震後のアフタースリップが断層帯に沿って起きた事が示唆される。これは、国土地理院のGEONETによる地殻変動の解析結果(Pollitz et al., 2017)や、応力テンソルインバージョン法による、熊本地震の震央周辺の応力場の特徴(防災科学技術研究所, 2016)と調和的である。

GR則を利用した最近の研究から(Gulia and Wiemer, 2019)、大地震後にそれが本震か、または将来に起きる更に大きな本震の前震かを判断するモデルが提案されている。本発表では、上記の熊本地震の結果から示唆されたプレスリップの効果をモデルに取り込む事が、モデルの精度向上になる可能性があると指摘する。

謝辞：本研究では、気象庁一元化震源カタログを使用した。また、日本学術振興会による科研費(20K05050)の助成、中部電力株式会社「原子力に係る公募研究」の助成、東京海上各務記念財団の研究助成、中部大学問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究IDEAS202111の助成、文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次)」の助成を受けて、本研究の一部を実施した。

© 日本地震学会

富士山直下で起きる低周波地震の研究の序報：Matched Filter法を用いた地震カタログの作成とカタログの性能評価

A preliminary study on low-frequency earthquakes below Mt. Fuji: Creation of an earthquake catalog using the Matched Filter method and quality evaluation of the catalog

*楠城 一嘉[1,2,3]、行竹 洋平[4]
*Kazuyoshi NANJO[1,2,3], Yohei Yukutake[4]

1. 静岡県立大学、2. 統計数理研究所、3. 静岡大学、4. 東京大学
1. Univ. of Shizuoka, 2. Inst. of Stat. Math., 3. Shizuoka Univ., 4. Univ. of Tokyo

通常の地震よりもゆっくりとした地震波を励起する低周波地震が、富士山直下の深さ10-25kmで観測されている(浜田, 1981; Ukawa et al., 2005)。富士山の低周波地震は常時起きているが、2000-2001年の活発化の様に(吉田他, 2006)、活動に変化が見られる。低周波地震の発生は、火山深部の流体の存在を示唆すると考えられている(例えば、Nakamichi et al., 2003)。例えば、富士山の山体膨張と低周波地震の関係性を示す報告があり、富士山直下のマグマ溜まりの圧力が高まって膨張歪を生じさせ、低周波地震も活発化したと説明されている(原田他, 2010)。一方で、箱根火山周辺での観測結果の様に、膨張歪に伴って、低周波地震の活発化が見えない事例もある(原田他, 2010)。本講演では、富士山の低周波地震と火山活動の関係について再検証することを目的として、富士山周辺で得られた地震波形記録にMatched Filter法(MF法)を適用し、低周波地震を詳細に把握することを目指す研究の序報を報告する。

MF法はS/N比の良い地震波形を雛形にして、連続地震波形と雛形地震波形との相関処理により、イベント検知を行う方法である(例えば、Peng & Zhao, 2009)。本研究では、箱根山の低周波地震を検知するMF法を用いたシステムを(行竹, 2017, Yukutake et al., 2019)、富士山に適用できる様に改良した。改良方法について、日本地球惑星科学連合2021年大会で楠城他 (2021)は報告したので、ここでは、その概要を説明する。(1)はじめに、気象庁の一元化震源カタログから雛形地震となる低周波地震を選択し、その地震の波形を雛形波形として準備した。(2)次に、雛形波形に対して、富士山周辺の32観測点で記録された2012-2020年の連続波形と相関処理を行い、雛形地震と相関のあるシグナルが含まれている場合に地震が起きたと判断して、地震を検知した。(3)最後に、検知された地震の震源情報をリスト化した(地震カタログの作成)。

低周波地震の詳細を把握する前に、その大まかな特徴を理解する必要があるという方針で、作成された地震カタログの性能を評価した。(i)2012-2020年の低周波地震はほぼ一定の割合で起きていた。同様の傾向は、気象庁の一元化震源カタログに収録されている低周波地震でも確認した。ただし、前者は年間約1,250個の割合で低周波地震が起きており、後者(年間約125個の割合)の約10倍に相当する。(ii)また、小さい低周波地震ほど数が多く、大きい低周波地震ほど数が少ない傾向にあった。これも、気象庁の一元化震源カタログに収録されている低周波地震で見られる特徴であることを確認した。

現在、2000年代の前半まで連続地震波形を遡って、地震カタログを再構築することを行っている。このことにより、長期間の低周波地震の発生様式が把握できることになる。また、富士山の膨張歪み変化は、2006年頃から少なくとも2009年末まで見られたが(原田他, 2010)、その歪み変化と低周波地震との関係を再検証する研究環境が整うことになる。

さらに、通常の地震の活動推移を把握するために使われている技術を、低周波地震へ適用できるように改良し

© 日本地震学会

ている。例えば、ETAS (Epidemic-Type Aftershock Sequence)を用いて(Ogata, 1999)、低周波地震の活動推移を評価できるか、また、規模別頻度分布を表すグーテンベルグ・リヒター則の*b*値を用いて(Gutenberg and Richter, 1944)、富士山直下の応力状態の変化を推定できるかなどについて検討している。

本講演では、現在進めている研究の速報も合わせて報告する予定である。

謝辞：本研究では、気象庁一元化震源カタログ、気象庁、防災科学技術研究所及び東京大学地震研究所観測点における地震波形記録を使用した。また、本研究の一部は、公益社団法人ふじのくに地域・大学コンソーシアムの共同研究助成、日本学術振興会による科研費(20K05050, 21K04613)の助成、中部電力株式会社「原子力に係る公募研究」の助成、伊豆半島ジオパーク学術研究助成を受けて実施した。

© 日本地震学会

函館市付近の浅部低周波地震と通常地震が混在する地震活動：稠密地震観測による震源分布と波形の特徴

Anomalous seismic activity including shallow low-frequency events near Hakodate: hypocenter distribution and characteristics of waveforms derived by dense seismic observation

*野口 科子[1]、笠原 敬二[1]、小菅 正裕[2]、前田 拓人[2]
*Shinako NOGUCHI[1], Keiji Kasahara[1], Masahiro Kosuga[2], Takuto Maeda[2]

1.（公財）地震予知総合研究振興会　地震防災調査研究部、2. 弘前大学　理工学研究科
1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Hirosaki University

本発表では，北海道函館市付近で発生する特異な地震活動について，稠密地震観測によるデータを用いた解析結果について報告する．
北海道函館市沖では，地震予知総合研究振興会（以下，振興会）が設置・運用する地域観測網AS-netによって，地殻内の深さ10 kmより浅部で低周波地震が発生していることが確認された（野口・他，2018）．さらに，通常地震もこの低周波地震とほぼ同じあるいは極めて近接した位置で発生していると推定された．従来，低周波地震は，プレート境界浅部で発生するものや火山活動に伴うものを除けば，通常の地震が発生する脆性破壊領域ではなく，より深部の深さ約15~40 kmで発生すると考えられてきた．上記の函館浅部の特異な低周波地震活動は，こうした考えを覆すものである．なお，この特異な活動の領域から5-10 km東の深さ約15-35 kmには，深部低周波地震の活動領域も存在する．こちらは，内陸に点在する深部低周波地震活動の典型的な特徴を示す．
この特異な浅部低周波地震活動について詳細な調査を行うことは，低周波地震一般の発生メカニズムの解明や，地殻内地震との関係の解明のためにも非常に重要である．しかしながら，この地震活動では地震の規模が概ねM2かそれ未満と小さく，既存の観測網では詳しい調査のための地震観測点の密度が十分ではない．このため，振興会と弘前大学は，2018年10月より当該地震活動の周辺に臨時地震観測点の設置を開始した（野口・他，2020）．以降，同時に最大で14観測点が展開され，データの蓄積が進んだことから，得られた高密度データを活用した解析を開始した．
震源決定は，函館市付近の浅部の特異な低周波地震活動と，その東側の深部低周波地震活動のイベントを対象に行った．臨時観測点とともに周辺の既存の18観測点のデータを用いた．これら観測点についてWIN systemによる手動検測を行った．臨時観測点は地域が市街地に近く，波形にノイズが多いことから，観測波形によるイベント検出には使用せず，振興会が青森県～北海道南部において独自に決定している震源カタログ（野口・他，2016）の中から，対象のイベントの震源再決定を行った．
浅部の特異な低周波地震活動については，活動が低調なものの8件のイベントが震源決定された．これらの地震については，最も近い観測点（石崎神社，臨時）からの震央距離は1.5 kmほどだが，そこでのS-P時間は1秒未満であり，振興会のカタログによる震源深さよりさらに浅い可能性が示された．再決定された震源位置のばらつきの大きさは最大でも1 km程度であり，非常に狭い範囲で発生していることが示唆された．震源決定プログラムhypomhによる震源決定誤差は概ね0.2-0.5 kmであり，振興会カタログの誤差値のおおよそ半分程度であった．なお，これら8件が通常地震であるか低周波地震であるかについては，少なくとも2件の波形ではS波部分で高周波数成分を欠き継続時間が長いなどの低周波地震の特徴を示したが，その他については一見して判断が難しい波形であった．しかしその他の波形についても，付近の通常地震と比べて波形全体で高周波数成分を欠き，低周波数成分に富む傾向がみられた．気象庁一元化カタログでは，この8件中7件が記載されており，うち3件は低周波地震，他は通常地震とされていた．この3件の低周波地震は，低周波地震の特徴を示す上記2件のイベントを含んでいる．

© 日本地震学会

一方，東側の深部低周波地震の活動については，23イベントが再決定された．これらの波形は典型的な低周波地震のものであり，しばしば連続して発生することから，読み取り精度は高くないが，観測点が増えたことで震源決定がより安定するようになった．
この函館付近の特異な地震活動については，Yoshida et al. (2020)が詳細な解析を行っている．既存観測点のデータで高精度の震源決定を行い，この活動の低周波地震と通常地震は極めて近接していると結論付けた．これは本研究の結果と同様である．また，特に2015-2016年に頻発した一連の通常地震がほぼ同じ場所で発生しており，これらが地殻流体の間隙水圧の急変に伴う「繰り返し地震」であることを示唆している．このような現象は，稠密地震観測の期間では未だ捉えられていない．さらにこの浅部の活動は東側の深部低周波地震活動と関連しており，ともに地殻流体の移動に起因すると推定している．我々は今後も稠密地震観測を続けるとともに，高密度データを活かした解析を行い，こうした仮説の検証にも取り組んでいく予定である．

謝辞
臨時観測点の設置・運用にあたり，函館市をはじめとする関係各位には多大なご協力をいただきました．また，本研究では，防災科学技術研究所，気象庁，北海道大学，東北大学，青森県による地震観測データを使用しています．記して感謝いたします．

参考文献
Yoshida, K., A. Hasegawa, S. Noguchi and K. Kasahara (2020), Low-frequency earthquakes observed in close vicinity of repeating earthquakes in the brittle upper crust of Hakodate, Hokkaido, northern Japan, Geophysical Journal International, 223(3), 1724-1740, December 2020.
https://doi.org/10.1093/gji/ggaa418
野口科子・関根秀太郎・澤田義博・笠原敬司・佐々木俊二・田澤芳博・矢島浩・石田貴美子（2016），AS-netによる青森県・北海道南西部の震源分布，日本地震学会2016年度秋季大会，名古屋，2016年10月，S09-P16.
野口科子・関根秀太郎・澤田義博・笠原敬司・佐々木俊二・田澤芳博・矢島浩・阿部信太郎・石田貴美子（2018），高密度観測網AS-netで捉えられた東北地方北部～北海道南西部の低周波イベントの分布と特徴，日本地震学会2018年度秋季大会，郡山，2018年10月，S23-P26.
野口科子・笠原敬二・小菅正裕・前田拓人・雨澤勇太・春山太一・石田早祐美・松野有希・大類樹（2020），函館市付近の浅部低周波地震と通常地震が混在する地震活動を対象とした稠密地震観測，日本地球惑星科学連合2020年大会，SSS13-P06.

© 日本地震学会

東北地方の応力場と発生した地震の断層面との関係（３）

Stress field in the Tohoku region, Japan and its relationship with faults of recent earthquakes (3)

*田上 綾香[1]、松野 愛弥[1]、岡田 知己[1]、酒井 慎一[2]、大園 真子[2,3]、勝俣 啓[3]、小菅 正裕[4]、山中 佳子[5]、片尾 浩[6]、松島 健[7]、八木原 寛[8]、中山 貴史[1]、平原 聡[1]、河野 俊夫[1]、堀 修一郎[1]、松澤 暢[1]、2011年東北地方太平洋沖地震緊急観測グループ .
*Ayaka TAGAMI[1], Miu Matsuno[1], Tomomi Okada[1], Shin'ichi Sakai[2], Mako Ohzono[2,3], Kei Katsumata[3], Masahiro Kosuga[4], Yoshiko Yamanaka[5], Hiroshi Katao[6], Takeshi Matsushima[7], Hiroshi Yakiwara[8], Takashi Nakayama[1], Satoshi Hirahara[1], Toshio Kono[1], Shu'ichiro Hori[1], Toru Matsuzawa[1], . Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

1. 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター、2. 東京大学地震研究所、3. 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター、4. 弘前大学理工学研究科、5. 名古屋大学大学院環境学研究科、6. 京都大学防災研究所地震予知研究センター、7. 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター、8. 鹿児島大学・南西島弧地震火山観測所
1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, 4. Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, 5. Graduate School of Encironmental Studies, University of NAGOYA, 6. Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 7. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 8. Nansei-toko Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Kagoshima University

背景・目的

現在の東北日本の応力場は逆断層型応力場が分布する（例、Terakawa and Matsu’ura, 2010）。東北日本には日本海形成時に発達した正断層が存在し(岡村・加藤, 2002; 岡村, 2010)、古い正断層が逆断層として活動するインバージョンテクトニクスが発生する（例、Okamura et al., 1995）。我々は東北日本で発生した大規模地震周辺の応力場に対する断層面のすべりやすさをSlip Tendency法を用いて検討した（例、田上・他、JpGU2021）。推定した応力場は2011年前後で最大圧縮方向（S_{Hmax}）が反時計回りに回転する傾向を示し、ST値から内陸地域ではすべりにくい面が実際にすべっていることを確認した。
本研究では①応力場とST値の関係の検討と②東北地方内陸地域の2011年東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）後における応力場の変化の要因の検討を行った。

検討①

Synthetic slip（Neves et al., 2009）を使用し、応力場に対して断層面が活動するときのrakeを算出した（計算rake）。断層モデルのrakeと計算rakeの差をrake差とし、ST値と比較した。

結果

ST値0.5~1.0、rake差40°以内に集中する。内陸地域では2011年後にrake差が大きくなり、東北沖地震の影響を反映している可能性が考えられる。

検討②

Coulombプログラム（Toda et al., 2005; Lin and Stein, 2004）を用いて、東北沖地震による応力場の変化を求めた。地震時の応力変化によって計算された応力場と実際の地震から推定した東北沖地震後の応力場を比較し、それらが類似した条件を求めた。

© 日本地震学会

結果

1998年岩手県雫石町の地震、2008年岩手・宮城内陸地震では東北沖地震後に見られたS_{Hmax}の回転と応力比の大きさの増加を再現することができた。2003年宮城県北部の地震においても再現することができたが、摩擦係数が小さかった。震源の空間分布の違いがあることから応力場の不均質を反映している可能性（Smith and Dietrich, 2010; Smith and Heaton, 2011）が考えられる。

まとめ

東北沖地震の断層モデルから応力場の傾向を再現することができたため、応力場の変化は大規模地震による応力擾乱の影響と考えられる。応力場の変化はST値に影響してしまうため、広域の応力場に変化をもたらす大地震の影響を除くことが望ましいと考えられる。

Introduction

In northeastern Japan, stress fields of east-west oriented compression are widely distributed (e.g., Terakawa and Matsu'ura, 2010). It is frequently observed that tectonic inversion of old normal faults occurs acting as reverse faults (e.g., Okamura et al., 1995). In our previous studies, we evaluated the fault activity in the northeastern Japan by using the Slip Tendency (ST) method (e.g., Tagami et al, JpGU Meeting 2021). From the estimated stress field, we confirmed the rotate of maximum compression direction (S_{Hmax}) after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (the Tohoku-oki earthquake). From the ST value, we suggested the fault planes were active in an unlikely to slip condition in the inland area.

In this study, we evaluated the relationship between the ST value and the stress field (Study 1). Furthermore, we investigated the factors of the changes in stress field after the Tohoku-oki earthquake (Study 2).

Study 1

We use the Synthetic Slip (Neves et al., 2009) to calculate the rake angle (calculated rake) when the fault plane become active to stress field. The difference between “fault model rake” and “calculated rake” is defined as “rake difference” and compared with the ST value.

Result

Distribution of ST value is concentrated in a range of 0.5 to 1.0 and rake difference 40˚. In the inland area, rake difference become large in the after the Tohoku-oki earthquake. This may reflect the influence of the Tohoku-oki earthquake.

Study 2

We use the Coulomb program (Toda et al., 2005; Lin and Stein, 2004) to estimate changes in the stress field due to the Tohoku-oki earthquake. We compared the calculated stress field with the actual stress field, and seek the condition which both become similar.

Result

In the case of the 1998 Shizukuishi earthquake and the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, we were able to reproduce the rotation of the S_{Hmax} and increase of the stress ratio. In addition, even in the case of the 2003 northern Miyagi earthquake, we were able to reproduce the stress field. However, the friction coefficient is too small.

Summary

We were able to reproduce the tendency of the stress field. Therefore, the changes might be due to the stress disturbance caused by the Tohoku-oki earthquake. When evaluating using Slip Tendency, we should eliminate the effect of a large earthquake which could change the stress field over a wide area.

© 日本地震学会

References

Neves, M.C., Paiva, L.T., and Luis, J., 2009, Com. & Geosci., 35(12), 2345-2352.
Okamura, Y. and Kato, Y., 2002, Univ. Tokyo Press, 47-69.
Okamura, Y., Watanabe, M., Morijiri, R., and Satoh, M., 1995, Island Arc, 4(3), 166-181.
Smith, D.E., and Dietrich, J.H., 2010, Pure Appl. Geophys. 167, 1067-1085.
Smith, D.E., and Heaton, T. H., 2011, Bull. Seismol. Soc. Am. 101, 1396–1421.
Terakawa, T., and M. Matsu’ura, 2010, Tectonics, 29(6).

© 日本地震学会

ハッシュ法を用いた類似波形検出手法の性能比較

Performance comparison of hash-based methods for similar waveform detection

*高山 裕紀[1]、平野 史朗[1]、川方 裕則[1]
*Yuki Takayama[1], Shiro Hirano[1], Hironori Kawakata[1]

1. 立命館大学
1. Ritsumeikan University

はじめに

これまで、Template matchingを用いて相似地震を検出する研究が多く行われてきた。相似地震とは、類似の波形を持つイベントとして定義される(Igarashi, 2020)。ただし、Template matchingでは、既知の波形の類似波形のみを見つけることしかできない。既知の波形をテンプレート波形として固定しない類似波形の検出を行うことで、Template matchingでは見つけ出せなかった新たな類似波形のペアを見つけ出すことが可能となる。そのような検出手法には、Auto correlation（AC）がある。この手法は連続波形をN個の波形ウィンドウに分割し、それらすべての組み合わせにおいて相関係数を計算するというものである。しかし, ACは解析する期間が長いと計算時間が$O(N^2)$に比例して、非常に長くなるという欠点がある。そこで、Yoon et al. (2015)は、画像検索や音声検索、Web検索エンジン等で利用されているハッシュ法を用いたFingerprint and Similarity Thresholding(FAST)という手法を開発した。ハッシュ法とは、ハッシュ関数を文字データや画像データなどの任意のデジタルデータに作用させることで、より簡易なデータ(ハッシュ値)に変換し、ハッシュ値をデータの要約として、データ同士の比較を高速化するという手法である。ここでハッシュ関数とは、個々のデジタルデータに何らかのビット列を割り当てる規約であり、類似性検索の場合には高速化のために元データよりも短いビット列を割り当てる。駒形ほか(2020)は、Fingerprintingよりも簡単に計算でき実行時間短縮が見込める、2bit-ahashとkhashの2つを提案した。

一方、ほぼ同じ場所で発生し、ほぼ同一の発震機構を持つ類似の地震を繰り返し地震と呼ぶ(Igarashi, 2020)。しかし、前段落のようにして検出される相似地震のうちどの程度が繰り返し地震であるかについては、検出される波形をもたらすイベントの小ささ故、詳しく調べられてこなかった。Uchide(2020)は、深層学習を利用して日本列島下で発生した小規模地震の初動メカニズム解を推定した。小さいイベントは、メカニズム解が決定できるとは限らないため、まずはメカニズムまで含めて既知のイベントについて類似度指標とメカニズム解の相関を見ることが必要となる。ノイズ(常時微動)とノイズやノイズとイベントは相関の低いものであり、余分な計算となってしまう。駒形ほか(2020)によりkhashならノイズは高確率で除去できることが確かめられているため、イベントとイベントについてのみメカニズム解と類似度の相関を考えることになる。

そこで、本研究では、駒形ほか(2020)が提案した2bit-ahashとkhashに着目し、この２つと相互相関係数を使用して波形の類似度を計算し、波形の類似度だけでなく、発震機構も使用することで、繰り返し地震に対して、どの程度有効となるかを1つの指標として、3つの類似度指標の比較を行うことを目的とする。

解析手法

解析データとして、2018年6月18日7:58に大阪府北部で発生したMj6.1の地震直後から16時間のHi-net交野、久御山観測点で記録された連続波形記録の3成分を用いた。サンプリング周波数は100Hz、周波数帯域は5~30Hzを使用した。まず、非定常的なイベントをピックし、それらについて3つの類似度指標それぞれで観測点ごと総当たり的にイベント同士の類似度を計算した。その後、Uchide(2020)で初動解が決定されているイベントのうち信頼性のたかいもののみについてUchide(2020)の初動解からP軸、T軸、N軸を計算した。イベント同士のP軸の内積とT軸の内積の絶対値の和を横軸に、イベント同士の類似度を縦軸に、イベント同士の震央間距離をカラースケールでとり、図を作成した。ここで、深さについては、決定精度が低い可能性があるた

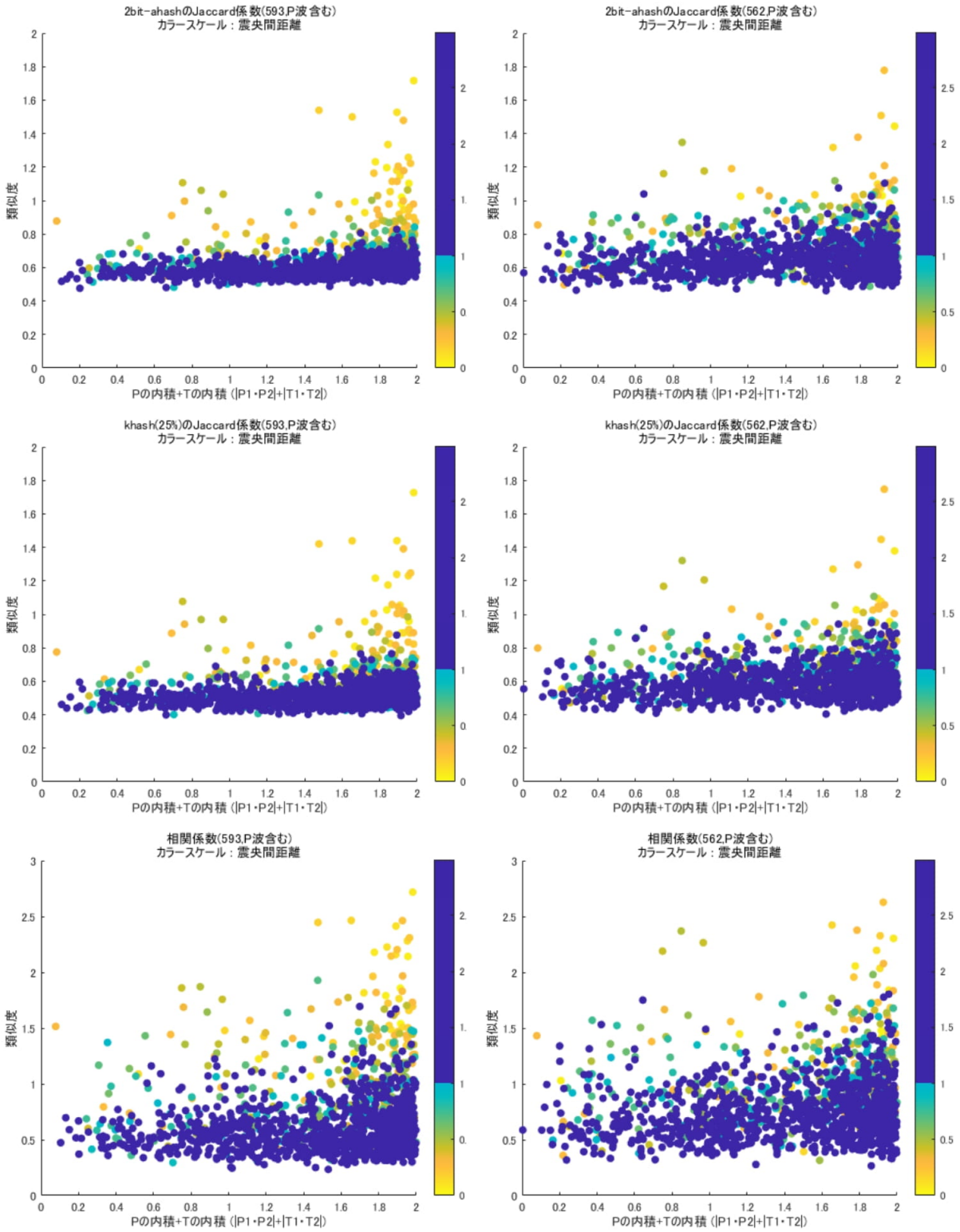
© 日本地震学会

め、無視した。

結果

図より、2bit-ahashとkhashは相互相関係数に比べて、イベント同士の震央間距離が遠いペアの類似度は相対的に低くなり、震央間距離が近いペアの類似度が相対的に高くなり、その境界が明確になることが明らかになった。このことから、類似度閾値の設定を容易にすることが期待できる。また、相互相関係数よりも2bit-ahashやkhashの方が、震央間距離が遠いイベントについては、メカニズムが似ていたとしても、類似度が高くならないことが期待できる。また、解析の結果、3つの類似度指標間の順位相関(特に相互相関係数)が必ずしも高くならないことが明らかになった。波形が類似していることと、イベント間の震央間距離と震源メカニズムが似ていることが、どの程度一致するのかを知ることは、3つの類似度指標が繰り返し地震についてどの程度確証を持てるかの指標になる。今回の解析結果では、相互相関係数よりも2bit-ahashやkhashの方が繰り返し地震の判定に有効であることが考えられる。

© 日本地震学会



左：交野観測点　右：久御山観測点

上：2bit-ahash　真ん中：khash　下：相互相関係数

© 日本地震学会

南海トラフで発生する浅部超低周波地震活動の走向方向の変化の定量解析

Along-strike variation of shallow very low frequency earthquake activity in the Nankai subduction zone

*武村 俊介[1]、馬場 慧[1]、矢部 優[2]、江本 賢太郎[3]、汐見 勝彦[4]、松澤 孝紀[4]
*Shunsuke TAKEMURA[1], Satoru Baba[1], Suguru Yabe[2], Kentaro Emoto[3], Katsuhiko Shiomi[4], Takanori Matsuzawa[4]

1. 東京大学地震研究所、2. 産業総合技術研究所、3. 東北大学、4. 防災科学技術研究所
1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Tohoku University, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

南海トラフの巨大地震発生域の浅部側では浅部スロー地震活動が確認されている．浅部スロー地震は，プレート境界のすべり欠損速度（あるいはせん断応力変化）が大きい領域の周囲かつ地震波速度の低速度帯で活発な傾向がある（例えば，Tonegawa et al., 2017; Baba, Takemura et al., 2020）．そのため，浅部スロー地震活動は，プレート境界浅部の摩擦強度などの指標となると考えられている．武村・他（2021，JpGU）では，紀伊半島南東沖において高精度かつ長期的な浅部超低周波地震カタログを構築し，古銭洲海嶺の西端で特に活発であることを示した．本研究では，武村・他（2021, JpGU）の手法を室戸岬沖と紀伊水道沖の浅部超低周波地震活動へも適用することで，南海トラフの浅部超低周波地震活動の走向方向の変化とその原因を明らかにすることを目的とする．

広帯域地震観測網F-netの連続記録に対してTakemura, Noda et al. (2019)の手法を適用し，浅部超低周波地震の検知および震央再推定を行った．OpenSWPC（Maeda et al., 2017）の相反定理モードを用いて0.025º毎の仮想震源格子上，プレート境界型の逆断層のメカニズム，6秒のKüpper関数のシミュレーション波形を大量に作成した．震央位置は再推定した位置，深さはJIVSM（Koketsu et al., 2012）のプレート境界に固定した．浅部超低周波地震のモーメントレート関数が，6秒のKüpper関数の重ね合わせで記述できると仮定し，焼き鈍し法により推定した．

2004年4月から2021年3月の解析期間中、室戸岬沖と紀伊水道沖において483個の浅部超低周波地震を検知した．これらの浅部超低周波地震活動のうち，観測波形との一致度VR 30%以上のもののみで計算した積算モーメントは5.5×10^{17} Nmであり，Takemura, Matsuzawa et al. (2019)のCMTカタログの積算モーメントの3.6倍程度である．この差は，相互相関解析とモーメントレート関数の詳細推定により，小さいサイズのイベントあるいはサブイベントまで網羅的にモデル化できたことに起因する．再推定した震央位置は，Takemura, Noda et al. (2019)と同様に，30 km四方程度の狭い領域で集中的に発生していた．Yokota & Ishikawa (2020)により，2009年および2018年頃に室戸岬沖から紀伊水道沖にかけてMw 6.5程度の浅部スロースリップ（SSE）が検知されており，浅部SSE中に室戸岬沖から紀伊水道沖への浅部超低周波地震の活動域の移動が確認された．浅部SSE期間の浅部超低周波地震による積算モーメントはそれぞれ1.6×10^{17}および1.4×10^{17} Nmと，浅部SSEの地震モーメントの1~5 %程度である．深部短期的SSE（以下、単に深部SSE）と同期間に発生した深部超低周波地震の積算モーメントも，深部SSEのモーメント1 %以下と報告されている（Ito et al., 2009）．

発表では，本研究で構築した室戸岬沖と紀伊水道沖の浅部超低周波地震カタログと武村・他（2021, JpGU）の結果を合わせることで，超低周波地震活動の走向方向の変化を詳細に議論する．

謝辞　防災科学技術研究所F-net（https://doi.org/10.17598/NIED.0005）の波形記録を利用しました．地震波伝播シミュレーションに東京大学情報基盤センターのOakforest-PACSを利用しました。本研究は、JSPS科研費21K03696により実施されました。

© 日本地震学会

エンベロープ相関と振幅に基づく浅部低周波地震モニタリングシステム

Shallow low frequency earthquake monitoring system based on envelope cross-correlation and amplitude

*溜渕 功史[1]、小木曽 仁[1]
*Koji TAMARIBUCHI[1], Masashi OGISO[1]

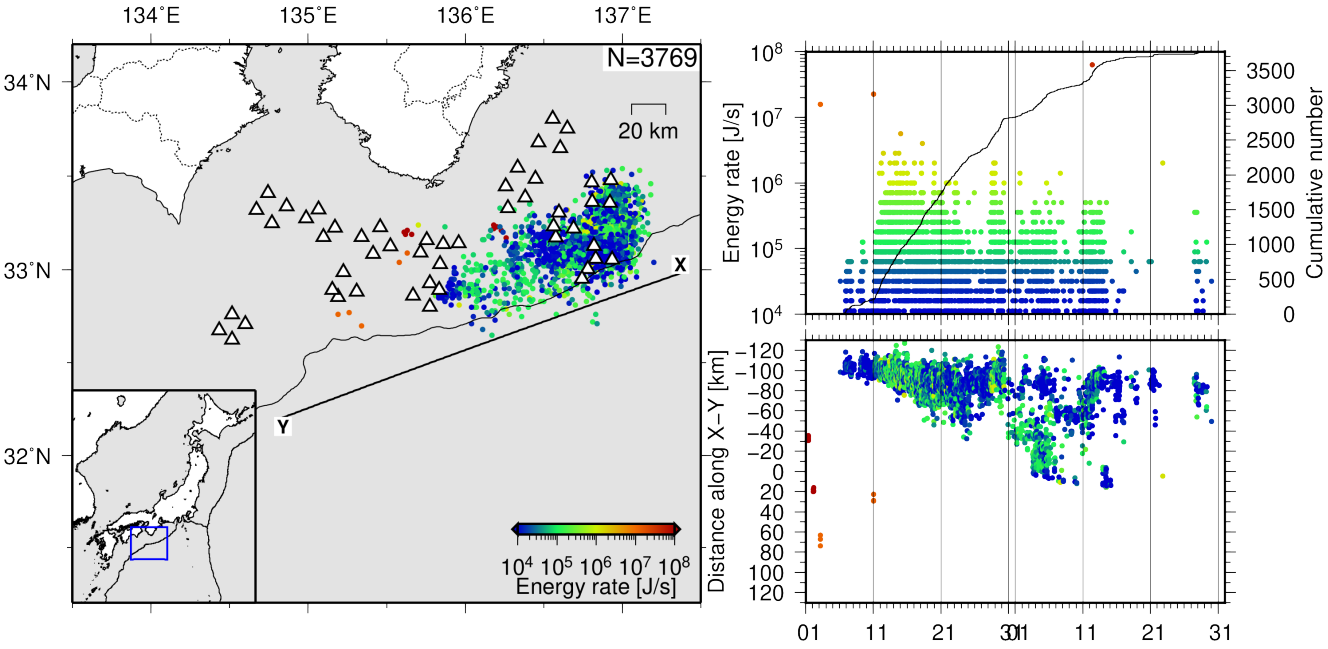
1. 気象研究所
1. Meteorological Research Institute

浅部低周波地震（微動）は，普通の地震に比べて低周波域が卓越し，継続時間が長い特徴があるすべり現象である．南海トラフ沿いでは，海溝軸付近で浅部低周波地震が海底地震観測により観測されている (e.g. Annoura et al. 2017, Tamaribuchi et al. 2019)．浅部低周波地震は，広帯域地震計で観測される超低周波地震や，測地観測によるスロースリップと同期して発生することが知られており (Nakano et al. 2018)，プレート境界あるいは分岐断層上で発生する断層すべりによるものと考えられる．これらのスロー地震は，1週間–1か月程度活発になり，その後数年間活動がないなど，エピソード的に発生する．さらに，遠方で発生した大地震，潮汐によって誘発されることがあるので，応力変化に敏感なストレスメータとしてふるまう．
近年ではDONET 等のケーブル式海底地震観測網の進展により，リアルタイムでの地震観測体制が構築されている．これまで，低周波微動の解析では主にエンベロープ相関法（Obara 2002）が用いられてきた．浅部の場合，ソースと観測点が深部に比べて近く，パスが観測点によって大きく異なることから，必ずしもエンベロープの相互相関が良いとは限らない．そこで本研究では，エンベロープ最大振幅も同時に考慮した震源決定プログラムを開発した．これにより，南海トラフ浅部のスロースリップの監視強化に寄与することを目的とする．
データは，DONETの広帯域速度波形の記録で，水平2成分を使用した．まず連続波形から微動を検出し，次に検出した時刻付近の波形を用いて震源推定を行う．連続波形から微動を検出する方法として，Frequency scanning method (FSM) (Sit et al. 2012, Katakami et al. 2017) を用いた．FSM は微動の特徴的な周波数帯である2-8 Hz が他の周波数帯に比べて卓越する時間帯を検出する．3 種類のバンドパスフィルタ（帯域T: 2–5 Hz, E: 10–15 Hz, S: 0.02–0.1 Hz）を適用し，$R=T^2/ES$を観測点ごとに求めた．R値の時系列から漸化式フィルタでSTA/LTAを求め，STA/LTAが2倍以上の場合に微動検出とした．
次に，エンベロープ波形からエンベロープ相関法 (Obara 2002) により相対走時を計算する．また，最大振幅分布から，震源位置を推定するAmplitude Source Location (Battaglia and Aki 2003) を併用して最尤法で震源を推定した．ここでは，相対走時と振幅は独立変数なので，単純にそれぞれの尤度を分散で規格化して積を取った．尤度関数には，正規分布の代わりに異常値にロバストなコーシー分布を採用した．また，震源誤差を見積もるため，最尤値探索には重点サンプリングを用いた．得られた震源分布から，クラスタリングを行った．クラスタリング条件は，一元化震源と比較して通常の地震を取り除き，1時間以内かつ震央距離20 km以内に震源が3個以上決定された場合に結果を出力した．
本手法を2020年12月～2021年1月の地震波形に適用した．暫定的な結果ではあるが，クラスタリング後で約3800個（クラスタリング前で約7000個）が決定された．震源分布は概ね海溝軸に沿って東西に分布しており，マイグレーションやRapid tremor reversalなどが観測された．振幅のみで決定した小木曽・溜渕（2021, 本大会）との結果と調和的である．
今後，リアルタイムモニタリングシステムを構築するとともに，長期間の解析を行い，微動検出や震源推定の安定性や精度などを確認する予定である．

謝辞
MOWLAS DONET (https://doi.org/10.17598/nied.0008) の地震波形を使用しました．サイト増幅特性には

© 日本地震学会

Yabe et al. (2021) を使用させていただきました．解析には東京大学地震研究所共同利用 (2021-F3-12) 大規模地震連続波形データ解析システムを利用しました．一元化震源を使用しました．



© 日本地震学会

内陸地震の余震活動と剪断歪みエネルギー変化

Aftershocks and shear strain energy changes caused by inland earthquakes in Japan

*田中 佐千子[1]
*Sachiko TANAKA[1]

1. 防災科学技術研究所
1. NIED

大地震が発生すると，震源域やその周辺では，引き続き，多数の余震が発生する．通常，余震の規模は本震と比べると一回り小さいが，追加的な被害を生じさせるような大きい余震が発生する場合もあり，余震活動の評価は被害の軽減の観点からも重要である．本研究では，余震活動の空間的な広がりの検討として，日本列島内陸域の地震について，本震による剪断歪みエネルギー変化と余震活動の対応関係を調査した．剪断歪みエネルギーは，応力テンソルの第2不変量や相当応力に関連する量で，その増加は，ランダムに分布する断層群の平均的な剪断応力の増加に対応する（Saito et al., 2018）．

用いた地震データは，気象庁一元化処理による震源リスト（2006年から2019年まで，深さ20 km以浅，M2.0以上）である．シングルリンク法（Frohlich and Davis, 1990）によるクラスタリング処理（時空間の変換係数1 km/day，時空間距離10 km以内）を行い，M6以上の地震を含むクラスタについて，最大規模の地震を本震，それ以降の地震を余震として定義した．本震による剪断歪みエネルギー変化は，Saito et al.（2018）の導出に従い，半無限均質弾性体を仮定し，Okada（1992）の方法を用いて計算した．本震の断層モデルは国土地理院による矩形断層モデルを採用した．背景の応力場は，防災科研高感度地震観測網Hi-netによるP波初動解（2004年から2020年まで，深さ20 km以浅）から応力テンソルインバージョン法（Michael, 1987）を用いて推定した．

以上の手法が適用可能な本震を8個選定し（M6.1～7.3），各余震について，本震による剪断歪みエネルギー変化を計算した結果，余震の総数に対して剪断歪みエネルギー変化が正となる余震の割合が65%以上となる事例が4個あった．特に，2016年熊本地震（M7.3）では，剪断歪みエネルギーの増加域で約85%の余震が発生していた．一方，残りの4事例については，剪断歪みエネルギー変化が正となる余震の割合は25～50%に止まり，剪断歪みエネルギーの増加との相関は認められなかった．

剪断歪みエネルギー変化と余震活動の対応関係について，相関の有無の観点から各事例を比較すると，本震規模や断層タイプによる違いは確認できなかった．一方，余震活動の空間的な広がりに注目すると，広がりの大きい事例でよい相関を示す傾向がみられた．実際，日本列島の内陸地震（M5.5～7.3）を対象に本震規模と余震域面積との間に得られた関係式（田中・他，2019）と比較すると，相関のある4事例はこの関係式より広い余震域，相関のない4事例は狭い余震域を伴っている．今回設定した単純な断層モデルでは，本震近傍の剪断歪みエネルギー変化を正確に評価できておらず，余震活動の広がりが小さい事例でその影響が特に大きく表れているのかもしれない．しかし，余震活動が広がりをみせるような事例では，このような単純なモデルでも剪断歪みエネルギー変化によって余震活動の広がりを十分評価できる可能性を示唆していると考えられる．

© 日本地震学会

直接的先験情報を考慮した長期間地震データによるテクトニック応力場の推定

Three-dimensional tectonic stress field inferred from long-term data of seismicity with prior information

*寺川 寿子[1]、松浦 充宏[2]
*Toshiko TERAKAWA[1], Mitsuhiro Matsu'ura[2]

1. 名古屋大学大学院環境学研究科　附属地震火山研究センター、2. 統計数理研究所
1. Nagoya Univ., 2. ISM

複雑な沈み込み帯に位置する日本列島の周辺域では，プレート運動が作り出すテクトニック応力場を反映した多様な地震活動が観測される．CMTデータインバージョン法（Terakawa & Matsu'ura, 2008）は，モーメントテンソルの定義に基づいてCMTデータと応力場を結び付け，ベイズの統計推論とABIC（Akaike, 1980）に基づくインバージョン手法（e.g., Yabuki & Matsu'ura, 1992）に従って3次元応力場のパターンを推定誤差と共に求める手法である．Terakawa & Matsu'ura (2010) は，CMTデータインバージョン法を防災科学技術研究所のF-netモーメントテンソル・カタログのデータに適用し，当時の最大限のデータセットから日本列島全域のテクトニック応力場のパターンを推定している．その後，2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震をはじめとした大地震が発生し，そのたびに地震前後の応力場の時間変化が議論されている．しかし，地震データの分布は空間的に強い不均質性を持ち，時々刻々変化する場合が多く，大地震前後の応力場の時間変化を議論することは難しい．

本研究では，長期間の地震データから安定的にテクトニック応力場を推定し，その時間変化を評価することを目指し，従来のCMTデータインバージョン法に「過去のデータの解析結果を直接的先験情報として取り入れる機能」を追加した（Terakawa & Matsu'ura, in prep.）．具体的には，Matsu'ura et al. (2007) の統合逆化公式に基づき，直接的先験情報とモデルパラメータの構造を規定する間接的先験情報を統一的に取り扱うことができるようにした．この定式化により，観測データ，直接的及び間接的先験情報の３種類の情報の最適な重みをABICに基づいて求め，応力場のパターンを推定する．既存のデータセットから得られた直接的先験情報に，新しい観測データを追加した解析を実施することで，一般には，応力場の推定精度が向上することが期待される．一方，新しいデータを追加したにも拘らず推定誤差が大きくなる場合は，応力場のパターンに時間変化があったことや局所的な断層強度の低下などにより特定の向きを持つ断層運動が活発化したことなどを示唆する．まず，模擬データを用いた解析により，これらのことが正しく再現できることを確認した．

次に，実データへの適用例として，24年分のF-netモーメントテンソル・カタログのデータ（1997年1月～2020年12月）から，2016年4月16日に発生した熊本地震の震源周辺域（水平：160 km×210 km, 深さ：0～20 km）の応力場を推定した．この期間のデータセットの中には，熊本地震の余震をはじめとした大量の余震データが含まれている．余震は本震による応力変化だけでなく間隙流体圧の変化も反映して発生するため，これらのデータから正しく応力場が推定されるとは限らない（Terakawa et al., 2013）．このため，Zaliapin & Ben-Zion (2013) の方法により，データを単独地震とグループ地震に分け，更にグループ地震を前震，本震，余震に分け，単独地震及び本震のみから構成されるデータセットを作成した．このデータセットを期間1（1997年1月～2016年3月）と期間2（2016年4月～2020年12月）の２つに分け，まず，期間別に従来法で応力場を推定した（解析1及び2）．次に，解析1の結果を直接的先験情報として取り入れ，期間2のデータを追加して応力場を推定した（解析3）．解析2と解析3を比較すると，情報が多い解析3の方が全体の推定誤差が小さくなった．また，解析1と解析3の応力場の結果を推定誤差と共に比較すると，両者の応力場

© 日本地震学会

のパターンに大きな違いは見られないが，震源断層の南西端の延長部の浅い領域（深さ 5 km）で，応力場のパターンの系統的な“時間変化”が見られた．この領域の地震時応力変化は0.1MPaオーダーと小さく，応力場のパターンの“時間変化”は地震時応力変化では説明できない．一方，この地域は熊本地震後に地震活動度が著しく上昇した領域であり，間隙流体圧の上昇が地震活動の活発化を促したことが示唆されている（Nakagomi et al. 2021）．二つの期間において，この領域で発生した地震のモーメントテンソルのCLVD成分の割合を計算したところ，熊本地震後の方がCLVD成分の割合が大きい傾向があることが分かった．この結果は，この領域に分布する既存断層に深部から高圧流体が流入することにより地震がトリガーされた可能性を示唆する（Matsu'ura & Terakawa, 2021）．

© 日本地震学会

熊野灘における超低周波地震の時空間分布 ー2020年12月から2021年1月の活動ー

Spatio-temporal distribution of the very-low frequency earthquake at Kumano-nada —Activity between Dec. 2020 and Jan. 2021—

*山本 揚二朗[1]、有吉 慶介[1]、矢田 修一郎[1]、中野 優[1]、堀 高峰[1]
*Yojiro Yamamoto[1], Keisuke Ariyoshi[1], Shuichiro Yada[1], Masaru Nakano[1], Takane Hori[1]

1. 海洋研究開発機構海域地震火山部門
1. JAMSTEC

南海トラフ沈み込み帯は、M8級の巨大地震が繰り返し発生する領域として知られ、現在も強く固着していると考えられている。通常の地震活動はその多くがプレート内地震である一方で、プレート境界では、さまざまな時定数を持つスロー地震活動が観測されている。スロー地震活動は強い固着域と安定滑り域の遷移域で発生すると考えられるため、それらの時空間分布を把握することは、プレート間固着状態をモニターする上で重要である。
2020年12月から2月にかけて、熊野灘のトラフ軸近傍においてスロースリップが発生した（例えば、Araki et al., 2021JpGU）。我々は、DONET広帯域地震計記録により、このスロースリップの活動期間中において、周期10～20秒の波が卓越する浅部超低周波地震（以下、VLFE）の発生を確認した。これらVLFE活動の時空間変化を調べるため、DONET波形記録の目視によるVLFE活動の検出と震源決定、発震機構解の推定を実施した。解析にはNakano et al. (2008)によるSWIFTを適用し、Nakano et al. (2018)と同様に、海域の1次元速度構造を仮定したグリーン関数を用いた。この解析により、合計736個のVLFEの震源位置と発震機構解を推定した。
推定したVLFEのうち、M3以上、かつ3観測点以上、上下動成分最低1つを含む5成分以上の波形データを利用でき、Variance reductionが0.3以下となったものは、290個である。これらを用いて、今回の活動の検討を行った。 まず、活動域の平均的なプレート境界形状である走向240度、傾斜角6度の逆断層を仮定した発震機構解と比較すると、2つの発震機構解の間の最小回転角を示すKagan角が30°以内となるものが大半であることから、VLFE活動の多くは低角逆断層型のプレート境界上の活動と解釈した。次に時空間分布を検討した。今回のVLFE活動には、2段階の空間発展がみられる。第一段階として、12月6日の夜にDONET1のBノード付近からVLFE活動が開始したが、この活動は3日間の活動を経て数日低調となった。この活動域は2015年10月におけるVLFE活動域とほぼ同じである（Nakano et al., 2018; Toh et al., 2020）。その後第二段階として、12月11日から、VLFEはBノードからみてトラフ軸平行方向南西側に位置するDノード付近、およびDノードの南東、トラフ軸近傍に位置するCノード付近まで活動域を拡大し、1月中旬まで活動は継続した。時空間分布からは、第一段階・第二段階ともにトラフ軸平行方向に活動域が広がっている様子が見られ、拡大速度は第二段階のほうが第一段階よりも速いようにみえる。また、第二段階の活動と領域が同じ2016年4月に観測されたVLFE活動（Nakano et al., 2018）においても、逆方向への拡大であるものの第二段階と同程度の拡大速度での空間発展がみられる。このことから、活動域の時空間拡大の速度は場所によって一定である可能性が考えらえる。また、12月28日にはRapid tremor reversal（RTR; Houston et al., 2011）が発生したように見える。
孔内観測による間隙水圧変化からは、スロースリップ現象は2021年2月中旬まで継続したようにみえる。一方で、2021年1月18日以降は、発震機構解の推定に十分なデータ数をもつVLFE活動は確認されていない。ただし、１～２観測点の波形記録においてVLFE活動が確認される例が、特にCノード付近で1月5日から2月2日まで確認される。このことから、スロースリップ活動の後半では、トラフ軸近傍において小規模なVLFEが発生していた可能性がある。

© 日本地震学会

沈み込み帯の超巨大地震のalong-dipセグメントの要因

Controling factors of along-dip segmatation of mega-thrust earthquakes in subduciton zones

*蓬田 清[1]
*Kiyoshi YOMOGIDA[1]

1. 北海道大学大学院理学研究院　地球惑星科学部門・地球惑星ダイナミクス分野
1. Earth Planetary Dynamics, Grad Sch Sci, Hokkaido University

沈み込み帯プレート境界のmegathrust地震に対して、海溝軸に沿っての断層面のセグメントの区分け（along-strike segmentation）は詳細な議論が長くなされてきた（e.g., Lay et al., 1982）。しかし、2011年東北沖地震では、全く異なった海溝軸に直角方向のセグメントの区分け（along-dip segmentation）が本質的な役割を担っていたことが多くの研究で明らかになった。超巨大地震の典型例と考えられてきた1960年チリ地震や2004年スマトラ地震では、この方向のセグメントは実質的に単一であり、だからこそalong-dip segmentationはそれまで考慮されてこなかった（along-dip single segmentatiom、以下single seg.と呼ぶ）。2011年東北沖地震では深い側のセグメントと浅い側のセグメントの破壊様式・発生前後での挙動のコントラスが明らかとなり（along-dip double segmentation, double seg.）、1964年アラスカ地震でも実はそのような特徴が内在していたことが判明した（Yomogida et al, 2011; Koyama et al., 2012）。

Double seg.の地震が発生する沈み込み帯は、海溝軸と陸側の海岸線にある程度の距離が必要で、海溝側の浅いセグメントは通常時の地震活動がほぼ皆無に対して、深いセグメントでは活発な活動と対照的である。さらに、double seg.の沈み込み帯では、海溝軸方向の隣接したセグメント間（along-strike）で発生様式や大地震時での滑り量が劇的に異なる点は、従来型のsingle seg.のmegathrust地震の概念とは異なっている（e.g., Feymueller et al., 2008）。例えば、東北沖地震の宮城沖では100mに迫る大滑り量のセグメントに対して、両側の三陸沖と福島沖では突然小さくなった。この海溝軸方向のセグメント毎の大きな変動は、沈み込むプレートの年代（温度構造）といった従来考えられてきた不均質性では説明がつかない。また、海山などの存在では、セグメント境界を規定する可能性のみで、セグメント境界をまたいでの差異の要因にはならない。

沈み込むプレートの探査が飛躍的に進み、例えば、東北沖で沈み込む前の太平洋プレート浅部に大きな構造の違いが最近発見された（e.g., Fujie et al., 2020)。東北沖地震での大滑り領域の沖合の太平洋プレートでの均質で厚いチャート層に対して、その北側ではpetit hot spotsによりチャート層が岩脈などで著しく乱されている。このプレート浅部の微細構造の違いが数百年以上にわたる歪み蓄積の有無を決して、通常の地震活動や東北沖地震での滑り量の違いをもたらしたとするFujie et al. (2020)の案は自然である。しかし、浅いセグメントのみならず、深いセグメントでも宮城沖と三陸沖では通常の地震活動で大きな差があり、それだけがプレート境界での地震発生・活動様式を支配する要因に限らない。

　沈み込むプレート浅部の構造のコントラストは、東北沖に限らず一般的に存在する。多くの沈み込み帯はsingle. seg.であり、セグメント間の劇的な相異は顕著でない。Double seg.は比較的古いプレートが沈み込み、プレート境界のカップリングが古典的な視点（2011年以前に日本海溝はそう思われていた）では弱い。古典的な視点でカップリングが強いsingle seg.の沈み込み帯（e.g., チリ、南海トラフ）では、沈み込むプレート浅部の不均質性の効果は限定的であろう。弱いプレート境界でのカップリングの沈み込み帯で、かつdouble seg.の浅いセグメントのみ、すなわち弱い背景応力場でかつ比較的低温のプレート境界面であるからこそ、沈み込むプレート浅部の微細構造が長期の歪み蓄積に本質的な役割をもたらすと考える。日本近海では千島海溝の南部がある。南海トラフのようなsingle seg.の沈み込み帯では、このような不均質性は大まかなセグメント区分けを規定するだけで、セグメント間の大きな違いはもたらさないと考える。

© 日本地震学会

地震活動異常の視覚化ー複数手法による比較

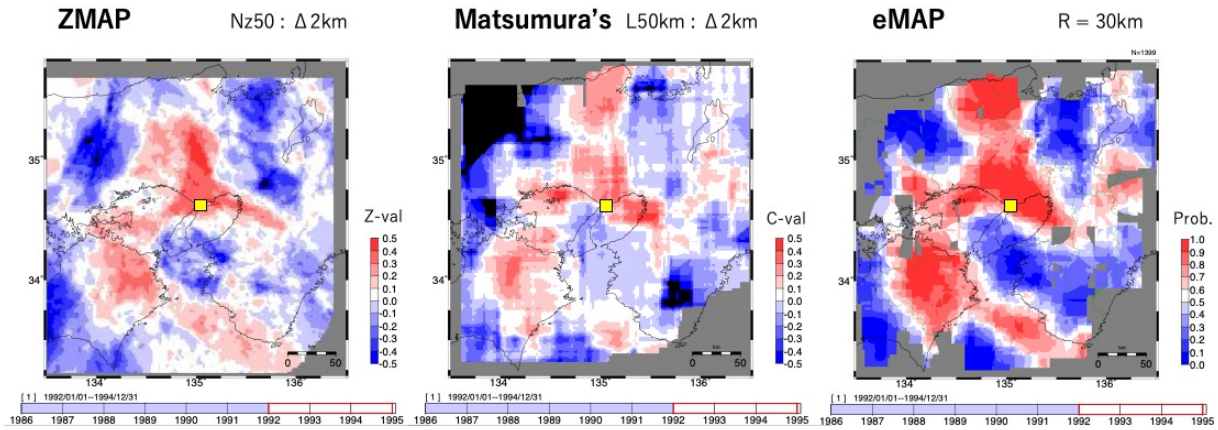
Visualization of seismic activity anomalies - comparison of multiple methods

*吉川 澄夫[1]
*Sumio YOSHIKAWA[1]

1. 所属なし（元・気象庁）
1. No affiliation (JMA, retired)

地震活動の変化を客観的に検出する方法として，震源分布そのものではなく地震活動の静穏化・活発化現象の視覚化を目的としたZMAP［Wiemer and Wyss (1994)］が開発されている．また同様の目的で，松村の方法［松村 (2002)］および eMAP［吉川・他 （2017］が開発されている．これらの方法の地震活動の変化に対する特性が明らかでなかったことから，吉川・他（2021）は３つの方法において地震活動に同じ変化を与えた場合の解析結果を比較した．それによると松村の方法とZMAPは地震活動の変化に対してほぼ同様に変化に応じた定量的性質を示す一方，eMAPは定性的ではあるが地震活動の変化をより高感度に捕捉できる結果を示した．この発表では，1995年1月17日の兵庫県南部地震（Ｍ７.３）発生前の地震活動の事例を用いて３つの方法による解析結果を比較した結果を示し，視覚化表示の有効性を再確認する．　それぞれの解析方法には基本的な違いがある．地震活動の基準期間と評価期間を設定することは同様であるが，ZMAPは両期間の地震計数率の相対差（Z値），松村の方法は両期間の地震計数率の相対比をそれぞれ用いるのに対して，eMAPは両期間の地震計数率に基づくポアソン確率を用いる．また地震活動を把握する領域に関しては，ZMAPと松村の方法では等間隔の円形および矩形要素をそれぞれ用いるのに対し，eMAPでは個々の震源位置を中心とする円形要素を用いる．　今回の調査は，気象庁震源カタログで近畿地方とその周辺における地殻内のＭ２.２以上の震源を対象とした．図は，1986年1月から1991年12月までの期間を基準に，1992年1月から1994年12月までの期間の活動変化を示す．いずれの解析結果も淡路島付近を中心とする静穏化域とそれを囲む活発化域を示しており，いわゆるドーナツパターンを示す．３者を比較するとZMAPは地域的な詳細変化を最も明確に表すことが分かる．またeMAPは静穏化・活発化域のコントラストを最も明確に示すのが明らかである．　以上の事例から，地震活動の視覚化は異常変化の客観的把握に効果的な方法であり，複数の解析手段を同時に適用することは評価の信頼性を確認するのに役立つということができる．

© 日本地震学会



Seismic rate changes visualized by ZMAP, Matsumura's method and eMAP. The analysis values of Z-val. and C-val. are normalized to be within the range of -0.5 to +0.5. Prob. is the Poisson probability. The square in each figure is the epicenter of the main shock.

© 日本地震学会

スラブ内地震のモーメントマグニチュードと断層面積のスケーリング則

Scaling relations of moment magnitude and rupture area for intraslab earthquakes

*張 学磊[1]、根本 信[1]、森川 信之[2]、土肥 裕史[2]、平田 賢治[2]、藤原 広行[2]
*Xuelei Zhang[1], Makoto Nemoto[1], Nobuyuki Morikawa[2], Yuji Dohi[2], Kenji Hirata[2], Hiroyuki Fujiwara[2]

1. 応用地質株式会社、2. 防災科学技術研究所
1. OYO corporation, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

Intraslab earthquakes that occur in the subducting slab have different source characteristics compare to those earthquakes that occur in the subduction interface. The systematic difference of fault rupture area between intraslab and interface events has been revealed by previous studies of scaling relations for fault rupture area and moment magnitude (Strasser et al.,2010). Such kind of difference has been supported by a later study by Allen and Hayes 2017 which only uses finite fault models in regression analysis. In the study of Strasser et al.,2010 and Allen and Hayes 2017, all data for intraslab earthquakes have complied in a single data set even though source characteristics might also be different between shallow and intermate depth intraslab earthquakes (Satatani et al., 2006). Recent years, more and more finite fault models for intraslab earthquake have been published online which make the discussion of the difference in centroid depth possible. In this study, we compile a data set of fault parameters from 56 finite fault models corresponding to 47 intraslab earthquakes. The fault dimension of each model has been estimated using effective length and width (Mai and Beroza 2000) based on the definition of the autocorrelation width (Bracewell 1986). As in previous studies, averaged effective length, width, and moment magnitude were taken for earthquakes with multiple models. Based on the circular crack model (Kanamori and Anderson 1975), we also calculated the averaged stress drop for each pair of fault rupture area and earthquake magnitude. The results of stress drop show 8 earthquakes have very low stress drop (less than 2MPa). By reviewing the slip distribution of those earthquakes, we noticed the slip of those earthquakes are widely distributed and most of them have multiple slipped areas. Since the distribution of slip of these earthquakes is different from the others, they should be considered in different scaling relations. By visualizing the distribution of centroid depth and Stress drop, we found that there is a gap at a depth around the depth of 80km. In the depth shallower than 80km, the stress drop increase with depth, and in the depth deeper than 80km, although the deviation is larger, generally the stress is independent with depth (Fig 1a). Based on the analysis shown above, scaling relations divided by a centroid depth of 80km is obtained (Fig 1b). The average stress drop for the deeper earthquakes is roughly double the number for shallower earthquakes. The difference of the stress drop of earthquakes at different depths is a result of a complicated combination of the physical properties of materials such as the coefficient of friction of the fault surface, elasticity, viscosity of surrounding rocks, and the forces applied by the bending of unbending of the slab, dehydration, and buoyancy. Although the detail of these factors is still unclear to us and further discussion is beyond the scope of this study, the result of the study shows that the depth dependence of stress drop needs to be considered in the scaling relation for intraslab earthquakes.

Reference Allen, T. I., & Hayes, G. P. (2017). Alternative rupture-scaling relationships for subduction interface and other offshore environments. *Bulletin of the Seismological Society of America,* 107(3),

© 日本地震学会

1240-1253. Bracewell RN (1986) The Fourier transform and its applications, vol 31999. McGraw-Hill New York Kanamori H, Anderson DL (1975) Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America* 65(5):1073-1095 Mai, P. M., & Beroza, G. C. (2000). Source scaling properties from finite-fault-rupture models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(3), 604-615. Sasatani, T., Morikawa, N., & Maeda, T. (2006). Source characteristics of intraslab earthquakes. Geophys. *Bull. Hokkaido Univ*, 69, 123-134. Strasser, F. O., Arango, M. C., & Bommer, J. J. (2010). Scaling of the source dimensions of interface and intraslab subduction-zone earthquakes with moment magnitude. *Seismological Research Letters*, 81(6), 941-950.

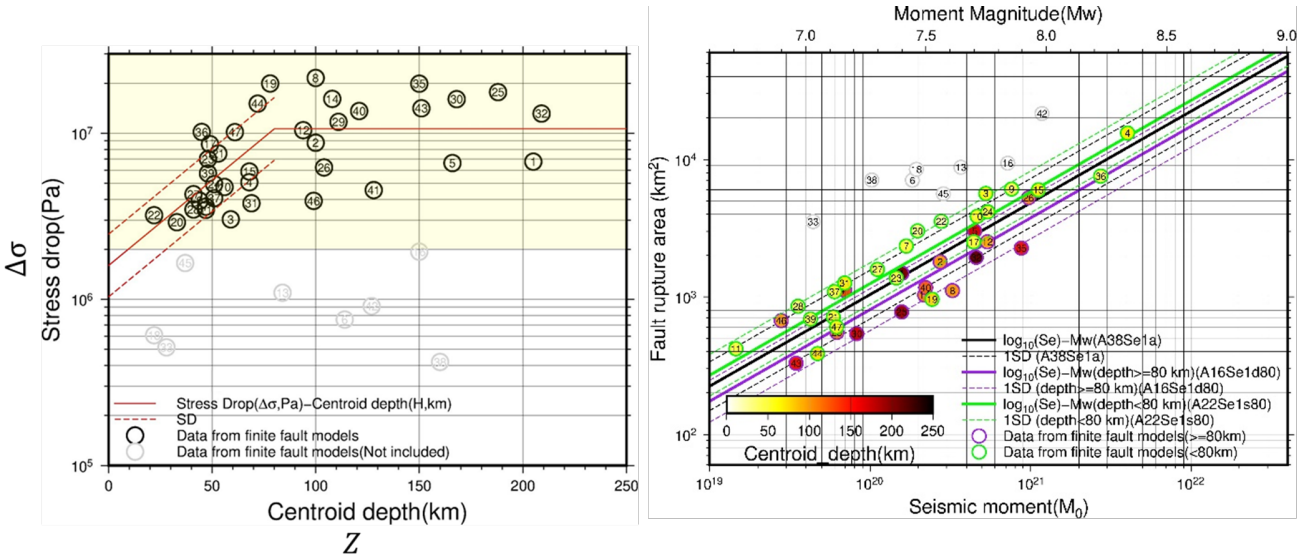


Fig1. (a)Black circles show the relationship between stress drop and Centroid depth. The red solid line and broken line at a depth shallower than 80km are the regression line and standard error derived from data, respectively. A Red solid line at a depth deeper than 80km indicates the averaged stress drop. (b)Solid lines show the scaling relation for moment magnitude and fault rupture area for intraslab earthquake The fill color of circles shows the centroid depth for earthquakes. Gray circles show the magnitude and fault rupture area of those earthquakes whose stress drop are smaller than 2MPa. These earthquakes are not used in the regressions. Green and purple circles are the earthquakes whose centroid depth is shallower and deeper than 80km, respectively. Green and purple lines are the regression lines for the data with the same color. The black line is the regression line for all data except for the gray circle.

© 日本地震学会

ポスター会場（1日目） | 一般セッション：S13. 地殻流体と地震

🗓2021年10月14日(木) 15:30 ~ 17:00 | 🏛P4会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S13P-01] 福島県いわき地方を対象としたS波スプリッティング解析

〇渡部 豪[1]、平塚 晋也[1]、島田 耕史[1] (1.日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター)

15:30 ~ 17:00

[S13P-02] S波スプリッティング解析による御嶽山周辺の異方性構造

〇村上 理[1]、渡部 豪[1] (1.日本原子力研究開発機構　東濃地科学センター)

福島県いわき地方を対象としたS波スプリッティング解析

Shear wave splitting analysis for the crust in Iwaki area, Fukushima Prefecture, northeast Japan

*渡部 豪[1]、平塚 晋也[1]、島田 耕史[1]
*Tsuyoshi WATANABE[1], Shinya Hiratsuka[1], Koji Shimada[1]

1. 日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター
1. Japan Atomic Energy Agency

地殻内に存在する流体、とりわけ深部からの流体の流入は、地震発生を議論する上で重要なファクターであるとともに、地層処分事業においても、地層処分システムにおける閉じ込め機能の喪失という観点から懸念事項とされている。このような問題に対し、地震学などの地球物理学的観測から地下のイメージングを行い、流体の存在や移動経路を明らかにすることは有効であると考えられる。そこで、原子力機構では、S波が流体やクラックなどの異方性媒質中を通過する際、二つに分離するという特徴に着目し、S波スプリッティング解析を用いた地殻内流体の移動経路推定手法の開発に取り組んでいる。本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震（以下、2011年東北地震）の発生後に地殻内の地震活動が活発になった福島県浜通りから茨城県北部にかけての地域を対象に実施したS波スプリッティング解析について報告を行う。

上記の領域では、2011年東北地震の発生後、2011年3月19日にM6.1、3月23日にM6.0、M5.8、M5.5、M5.8のいずれも西北西－東南東から東－西方向に伸張軸をもつ正断層型の地震が相次いで発生した（気象庁・気象研究所, 2011）。さらに、4月11日には、福島県浜通りで東北東－西南西方向に張力軸を持つ正断層型のM7.0の地震（福島県浜通りの地震）が発生し、活断層とされる井戸沢断層と湯ノ岳断層の一部で同時に破壊が生じ震源断層が現れている（堤・遠田, 2012）。また、この地震直後から、いわき市内の数か所で温泉の異常な湧き出しが報告され、その湧水は湧出量の変化を生じつつも、2018年以降も継続した（Sato et al., 2020）。

このような背景に基づき、本研究では、2011年東北地震及び福島県浜通りの地震発生前後の二つの期間に分けてS波スプリッティング解析を進めた。使用したデータは、これらの地震前（期間Ⅰ）については、2004年4月28日から2011年1月6日までに30 km以浅で発生したMj 1.5～3.2の675イベント、地震後（期間Ⅱ）については、2011年6月1日から2011年12月30日までに30 km以浅で発生したMj 1.5～1.9の4159イベントの地震波形である。また、利用した観測点は、福島・茨城・栃木県に位置する防災科学技術研究所の高感度地震観測網、気象庁、東北大学が運用する18観測点である。解析には、Silver and Chan（1991）による手法を用い、速いS波の振動方向（φ）と遅いS波が到達するまでの時間差（dt）の推定を行った。さらに、SP変換波によるS波到達時の位相擾乱を避けるため、鉛直下向きより各観測点への波線の入射角が35°以内となる震源と観測点の組み合わせを対象とした。そして、速いS波と遅いS波の波形の相関係数が0.9以上となる地震を採用し、φやdtの空間分布について調べた。

期間Ⅰでは、φ分布のヒストグラムを作成するにあたり、十分な地震数であるとは言い難いものの、沿岸部で最大水平圧縮応力や太平洋プレートの収束方向（Yoshida et al., 2015）である西北西－東南東方向ではなく、海溝に対し平行な方向への分布が卓越し、内陸部でも同様の特徴が示された。期間Ⅱについても、沿岸部で、おおむね海溝に対して平行な方向へのφ分布が卓越し、内陸部でも、最大水平圧縮応力や太平洋プレートの収束方向とは異なり、南北方向から北東－南西方向へのφ分布が示された。これらの結果は、先行研究（Iidaka and Obara, 2013; Iidaka et al., 2014）で示されたものと調和的であった。また、期間ⅠとⅡを通してφ分布の比較を行うと、数十度程度の違いが見られる観測点はいくつかあるものの、大きな変化はな

© 日本地震学会

かった。

続いて、地震数が十分に確保された期間 II について、dtを震源距離で規格化した値（距離規格化dt）の平均値に関する空間分布について調べた。この結果、ほとんどの観測点で距離規格化dtの平均値が0.005 sec/km以下となったが、観測点IWAKMZやHITACHで相対的に高い値が示されることが明らかとなった。とくに、観測点IWAKMZは、Sato et al.（2020）で示された湧水の継続している温泉付近に存在することから、地殻内に存在する深部流体の影響を反映し、他の観測点に比べて大きな距離規格化dtの平均値が得られたことが示唆される。なお、同観測点は、いわき市三和町の水石山（みずいしやま）公園内に設置されており、水石山の起源が、山頂に水が溜まっている石があり、日照りでも枯れることがないという言い伝えに由来している。このことからも、同領域付近は定常的に流体の豊富な地域であることが示唆され、今回の解析で得られた結果を支持する。

一方で、Umeda et al.（2015）は、2013年11月から12月に解析対象領域の南部で電磁探査を行っている。その結果では、太平洋沿岸の海岸線から陸域に向けて長さ約30 km程度、深さ20〜30 kmの領域に低比抵抗領域が存在し、その直上に福島県浜通りの地震に関連した地震活動が集中している。この電磁探査の測線は、観測点N.JUOHとN.KIBHの間に位置することから、地殻内に流体が存在すると仮定した場合、距離規格化dtの平均値が相対的に高い値をとることが期待されたが、同観測点で相対的に大きな値は示されなかった。いくつかの理由として、電磁探査の測線を横切るような地震が今回の解析に含まれなかったこと、電磁探査で見えた低比抵抗領域が不連続な分布で島弧と平行な方向へ広がっていないことなどが考えられる。これについては、解析期間を延長するなどしてデータの拡充を行い、電磁探査の結果との対応関係についても議論を進めたい。

本発表は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業である「令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」の成果の一部である。

© 日本地震学会

S波スプリッティング解析による御嶽山周辺の異方性構造

Crustal anisotropy structure around Mt Ontake derived from shear-wave splitting analysis

*村上 理[1]、渡部 豪[1]
*Osamu MURAKAMI[1], Tsuyoshi Watanabe[1]

1. 日本原子力研究開発機構　東濃地科学センター
1. Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency

御嶽山周辺では，1979年の噴火以降，2007年，2014年にも小規模な水蒸気噴火が発生し，さらに1984年長野県西部地震や2017年長野県南部の地震（Mj5.6）をはじめとした御嶽山南東麓での活発な地震活動が見られる．このような様々なイベントが発生する領域では，かなり不均質な地殻構造が予想され，御嶽山近傍には地殻流体の存在も予想される．断層のような不均質構造や地殻流体の検出に有用なツールの1つとして，S波スプリッティング解析法が挙げられる．そこで本研究では，このような御嶽山周辺域における常設地震観測点で記録された連続地震波形データを用いたS波スプリッティング解析を行うことにより，領域内の地殻異方性構造の推定を試みた．
解析にあたっては，気象庁一元化震源カタログから，解析対象領域内で2004年4月1日から2019年12月31日までに発生したMj1.5以上の地震3223個（深さ20km以下）を選んだ．これらの地震について，御嶽山周辺域に展開されている常設地震観測点（Hi-net，気象庁，大学）で観測された連続波形データを用いた．はじめに，Nakajima and Hasegawa (2007)による地震波速度構造を用いて，各観測点における1次元速度構造を仮定した．この仮定した速度構造と気象庁一元化震源から，それぞれのイベントによる各観測点に到来する地震波の入射角を推定し，入射角35度未満の震源-観測点ペアのみに解析対象を限定した．これは，入射角が高角度な場合に生じうる，地表でのS-P変換波の影響（e.g., Booth and Crampin, 1985）を排除するためである．入射角35度未満の観測点-震源ペアについて，Silver and Chan (1991)の手法を適用して，速いS波の偏向方向および，速いS波と遅いS波とのarrival timeの差を推定した．
上述の解析の結果，多くの観測点でこの領域の最大水平圧縮応力の方向（WNW-ESE）と概ね平行な速いS波の偏向方向が得られたが，一部の観測点ではそれと直交するような速いS波の偏向方向が推定された．前者については応力起源の地震波異方性を，後者については構造起源の地震波異方性を反映しているものと考えられる．しかしながら，近接した観測点で互いに90度異なるような速いS波の偏向方向が推定されるケースも見られた．Crampin et al. (2004)は，90度異なる速いS波の偏向方向を異方性のある多孔質弾性体でモデル化し，観測点下におけるマイクロクラック分布の形状の，間隙流体圧の変化によるクラックの開口や閉口による再配列の結果，90度異なる速いS波の偏向方向が生じることを提唱している．発表では，本研究において近接する観測点で推定された90度異なる速いS波の偏向方向が，間隙流体圧の変化で説明可能かどうかを検討する．

謝辞: 本研究では，防災科学技術研究所 Hi-net，気象庁 地震・津波検知網，気象庁 火山観測網，東京大学地震観測網，名古屋大学地震観測網のデータを使用させていただきました．また，本研究は，経済産業省資源エネルギー庁委託事業「令和2~3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発)」の成果の一部である．

参考文献:
・Booth, D. C. and S. Crampin, Shear-wave polarizations on a curved wave- front at anisotropic free surface, Geophys. J. R. Astron. Soc., 83, 31–45, 1985.
・Crampin, S., Peacock, S., Gao, Y. and Chastin, S., The scatter of time-delays in shear-wave splitting

© 日本地震学会

above small earthquakes. Geophys. J. Int., 156, 39–44, 2004.
・Nakajima, J., and A. Hasegawa, Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism, J. Geophys. Res., 112, B08306, doi:10.1029/2006JB004770, 2007.
・Silver, P. G. and W. W. Chan, Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation, *J. Geophys. Res.*, 96, 16429–16454, 1991.

© 日本地震学会

ポスター会場（1日目） | 一般セッション：S15. 強震動・地震災害

2021年10月14日(木) 15:30 ~ 17:00 | P5会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S15P-01] S-netを用いたブロックインバージョン解析に基づく福島県周辺で発生する地震の距離減衰特性の推定

○友澤 裕介[1]、引田 智樹[1]、池浦 友則[1]、笠松 健太郎[1] (1.鹿島技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S15P-02] **Features of horizontal-to-vertical spectral ratios of ambient noises and earthquake motions at the S-net sites**

○Yadab Prasad DHAKAL[1]、Atsushi Wakai[1]、Hiroaki Yamanaka[2]、Takashi Kunugi[1]、Shin Aoi[1] (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience、2.Tokyo Institute of Technology)

15:30 ~ 17:00

[S15P-03] 多数の微動アレイによる浅部３次元S波速度構造のモデル化：愛知県西尾市周辺の場合

○長 郁夫[1] (1.産業技術総合研究所　地質情報研究部門)

15:30 ~ 17:00

[S15P-04] 2016年熊本地震の地表断層ごく近傍の強震動について

○岩城 麻子[1]、藤原 広行[1] (1.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S15P-05] 2021年2月福島県沖で発生したスラブ内地震の震源過程解析－３次元地下構造モデルを考慮した検討－

○引間 和人[1] (1.東京電力ホールディングス株式会社 経営技術戦略研究所　技術開発部　環境・エネルギーエリア)

15:30 ~ 17:00

[S15P-06] 2021年福島県沖の地震（Mj7.3）の強震動評価に基づいた強震動予測手法の適用性評価

○入江 紀嘉[1]、吉田 昌平[1]、岡田 康男[1]、宮腰 研[2]、染井 一寛[2]、鳥田 晴彦[1] (1.（株）大崎総合研究所、2.（一財）地域 地盤 環境 研究所)

15:30 ~ 17:00

[S15P-07] 国内のプレート間地震を対象にした震源スケーリング則の再検討

○宮腰 研[1]、郭 雨佳[1]、吉田 邦一[1]、入江 紀嘉[2] (1.(一財) 地域 地盤 環境 研究所　地震解析グループ、2.（株）大崎総合研究所)

15:30 ~ 17:00

[S15P-08] 南海トラフ巨大地震の発生の多様性を考慮した地震防災基盤シミュレータの構想

○中村 洋光[1]、藤原 広行[1]、前田 宜浩[1]、土肥 裕史[1]、時実 良典[2]、石丸 晴海[3] (1.防災科学技術研究所　マルチハザードリスク評価研究部門、2.応用アール・エム・エス、3.三菱スペース・ソフトウエア)

15:30 ~ 17:00

[S15P-09] 南海トラフ巨大地震による長継続時間・広帯域強震動のシミュレーション

○前田 宜浩[1]、岩城 麻子[1]、青井 真[1]、中村 洋光[1]、藤原 広行[1]、関 航佑[2]、今井 隆太[3] (1.防災科学技術研究所、2.三菱スペース・ソフトウエア株式会社、3.みずほリサーチ＆テクノロジーズ株式会社)

15:30 ~ 17:00

[S15P-10] 南海トラフ巨大地震の発生の多様性を考慮した津波遡上計算とその利活用に向けて－概要と利活用事例の紹介－

○土肥 裕史[1]、中村 洋光[1]、藤原 広行[1]、矢守 克也[2]、杉山 高志[2] (1.国立研究開発法人防災科学技術研究所、2.京都大学 防災研究所)

15:30 ~ 17:00

[S15P-11] 南海トラフ巨大地震の多様性を踏まえた条件付きハザード評価の試行

中村 洋光[1]、○時実 良典[2]、藤原 広行[1]、清水 智[2]、麻生 未季[2] (1.防災科学技術研究所　マルチハザードリスク評価研究部門、2.応用アール・エム・エス株式会社)

15:30 ~ 17:00

[S15P-12] 確率論的地震動予測地図(2020年版)の地震活動モデルで表現される地震発生数

○宮腰 淳一[1]、森川 信之[2]、藤原 広行[2] (1.大崎総合研究所、2.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S15P-13] **ニューラル・ネットワークによる非エルゴード地震動予測式**

○岡崎 智久[1]、森川 信之[2]、岩城 麻子[2]、藤原 広行[2]、上田 修功[1] (1.国研）理化学研究所　革新知能総合研究センター、2.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S15P-14] AN-netで得られた近地地震記録の解析と数値モデリング

○中原 恒[1]、関根 秀太郎[2] (1.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2.地震予知総合研究振興会)

S-netを用いたブロックインバージョン解析に基づく福島県周辺で発生する地震の距離減衰特性の推定

Estimation of Strong Ground Motion Attenuation Characteristics of earthquakes around Fukushima Prefecture based on Block Inversion analysis using S-net data

*友澤 裕介[1]、引田 智樹[1]、池浦 友則[1]、笠松 健太郎[1]
*Yusuke TOMOZAWA[1], Tomoki Hikita[1], Tomonori Ikeura[1], Kentaro Kasamatsu[1]

1. 鹿島技術研究所
1. Kajima Technical Research Institute

1. はじめに

福島県沖で発生する海溝型地震の距離減衰特性は，例えば筧 (2015) や池浦 (2020) で議論されているように，プレート内部の地震波伝播の影響や低減衰領域の通過の影響等で特徴づけられている．2016年のS-netの観測開始以降，観測記録が蓄積されつつあり，海域での距離減衰特性や，震源特性のより高精度な推定に資するものと考えられる．本検討では，S-net，K-NET，KiK-net記録を用いたブロックインバージョン解析により福島県周辺で発生する地震の距離減衰特性を推定した．

2. データセット

福島県沖で発生した地震は，S-netとK-NET，KiK-netで同時に観測された地震を対象とした．対象期間はS-netの観測開始から2021年3月31日まで，M_J 5.0以上，震源深さ100 km以下の地震を収集した．S-netの観測開始前ではあるが，福島県周辺の陸域で発生した内陸地殻内地震も収集した．内陸地殻内地震は，震源距離100 km，プレート間地震とプレート内地震は，震源距離200 kmまでの記録を収集した．地盤の非線形化の影響を避けるため，K-NETとS-netは100 cm/s^{2}以下の記録を用い，KiK-netは地中記録を用いた．S-netの観測記録は，Takagi et al. (2019) の姿勢角情報を基に回転補正を行った．地震による揺れの途中で加速度波形にオフセット変化を生じさせるような強震動を受けた観測点では，姿勢角に変化が生じたと判断して，それ以後に発生した地震の記録は用いないこととした．対象地震と観測点の分布を図1に示す．

3. 解析手法

友澤ほか (2020) を参照して深さ方向と水平方向のQ値の不均質性を考慮したブロックインバージョン解析を行った．伝播経路特性は，深さ方向を大陸地殻，マントル，太平洋プレートの3層でモデル化し，各層の水平方向の不均質性を考慮してモデル化した．震源と観測点を結ぶ断面で2次元レイトレースを行って，各層の伝播距離を評価した．地震本部 (2012) を参照して各層の境界は第17層のマントル，第21層の海洋性地殻第2層（太平洋プレート）の上面深度を用いた．S波速度はそれぞれ3.4 km/s，4.5 km/s，4.6 km/sとした．レイトレースの例を図2に示す．本手法はブロックの統合と分割を行い，領域分割の再設定をしながらブロックインバージョンを繰り返し実行し，最適な領域分割を推定する．本検討では，最小ブロックサイズを0.4˚×0.4˚，各ブロックが満たすべき有意水準を5%とした．なお，本検討では伝播経路特性のみに着目し，震源特性とサイト特性については議論しない．

4. 解析結果

推定した不均質減衰構造を図3に示す．大陸地殻の不均質減衰構造は，海域も含めて概ね均質なQ値が広がっており，活火山周辺が相対的にlow-Qの領域が推定された．マントルの不均質減衰構造は，対象領域の西側でlow-Qが推定された．ただし，本検討で用いた観測記録は，活火山直下よりも海溝軸側のマントル部分を伝播する波線が支配的である．太平洋プレートは水平方向の不均質性を推定する自由度を与えて解析したが，最終的には一様な領域分割が推定された．推定した不均質減衰構造を用いて，福島県沖で発生する深さ30 kmのプレート間地震と，深さ50 kmのプレート内地震を想定し，地震基盤面上での地震動振幅の面的評価を

© 日本地震学会

行った結果を図4に示す．図4に矩形で示した領域の距離減衰特性を図5に示す．なお，震源特性は基準化しているため，距離減衰特性の傾きのみに着目すると，傾きはプレート内地震＞プレート間地震であり，観測記録の特徴と整合する．

謝辞

防災科学技術研究所K-NET，KiK-net，S-netの観測記録を活用させていただきました．記して感謝します．

参考文献

筧楽麿 (2015), 神戸大学都市安全研究センター研究報告. 池浦 (2020) , 日本地震工学会論文集, 第20巻, 第7号. Takagi et al. (2019), Seismological Research Letters, Vol. 90, No. 6. 友澤裕介, 加藤研一, 塩田哲生 (2020), 日本地震工学会論文集, 第20巻, 第7号. 地震調査研究推進本部 (2012), 長周期地震動予測地図2012年試作版.

© 日本地震学会

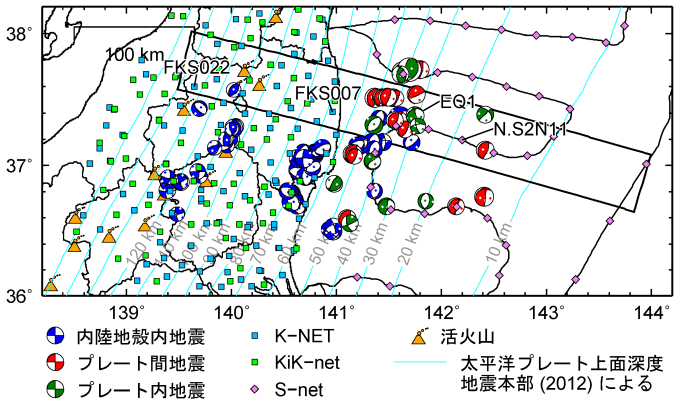


図 1　解析に用いたデータセット

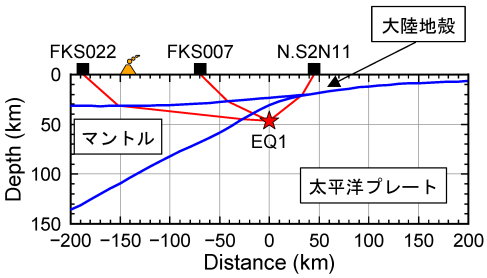


図 2　2 次元レイトレースの例

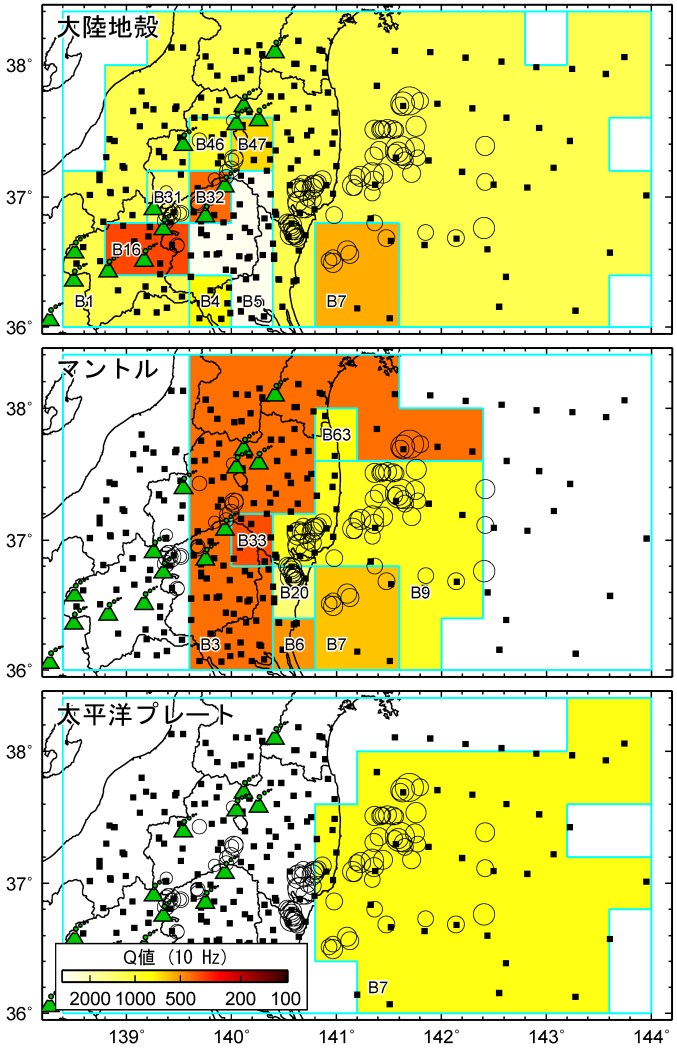


図 3　推定した不均質減衰構造（カラーは 10 Hz の Q 値）

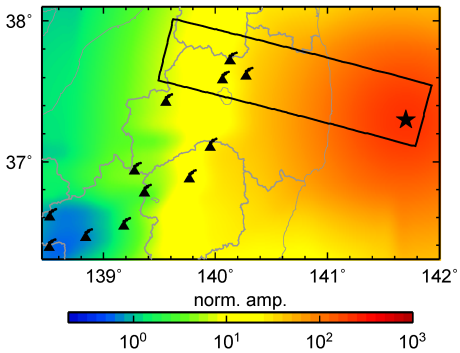


図 4　基盤面上の 10 Hz の距離減衰特性の面的分布（プレート内地震）

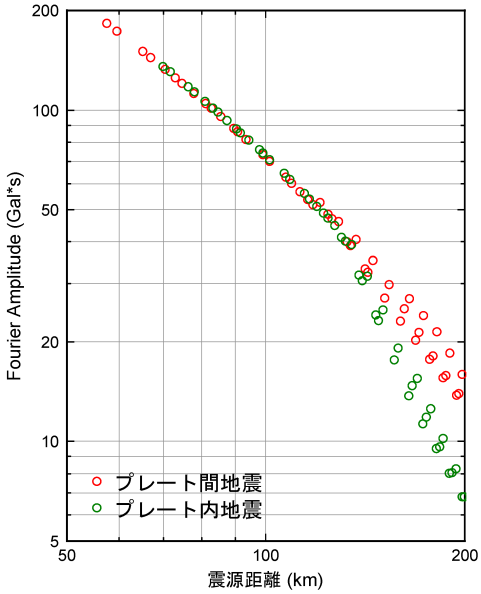


図 5　距離減衰特性の比較（10 Hz）

© 日本地震学会

Features of horizontal-to-vertical spectral ratios of ambient noises and earthquake motions at the S-net sites

*Yadab Prasad DHAKAL[1], Atsushi Wakai[1], Hiroaki Yamanaka[2], Takashi Kunugi[1], Shin Aoi[1]

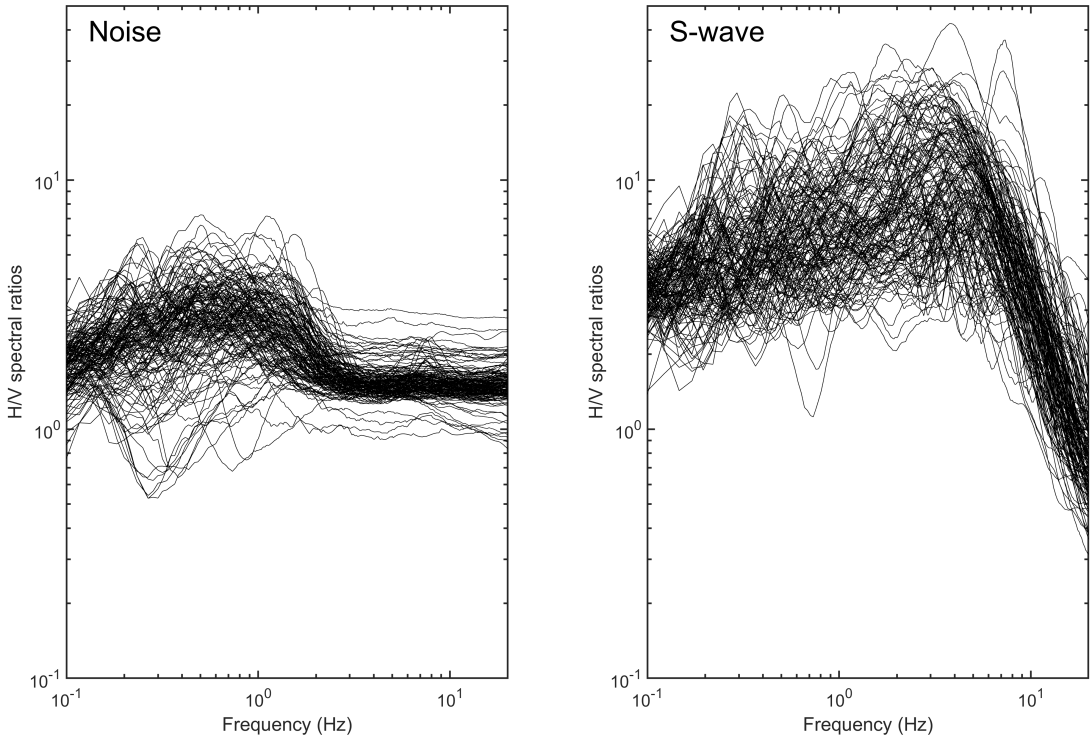
1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Tokyo Institute of Technology

Studies about the horizontal-to-vertical spectral ratios (HVSRs) of ambient noises and earthquake motions are popular in Japan and many other earthquake-prone countries to estimate the dynamic properties of soils for earthquake disaster mitigation. In this study, we analyzed the HVSRs of ambient noises, referred to as noises, and earthquake motions at the S-net seafloor sites to understand the site effect on the recorded motions for the reliable prediction of ground motions for earthquake early warning. We processed the strong-motion records at the 150 stations of S-net from over 1000 earthquakes of Mj >= 4 and JMA focal depth < 70 km recorded between 2016 and 2019. We focused on the relatively low amplitude records (maximum value of peak accelerations of three components < 50 gals) to minimize the effects of rotations of sensor vessels and nonlinear site responses that may occur during large amplitude earthquake motions. The horizontal and vertical components of motions were obtained by finding the roll and pitch angles from the pre-event parts of the records and matrix operations described in Takagi et al. (2019). The S-wave onset times were estimated from the JMA2001 travel-time table (Ueno et al. 2002) to expedite the data processing, and a time window of 40.96 s was selected beginning 5 s before the S-onset time. We obtained the Fourier spectral amplitudes for each component, smoothed them using the smoothing function of Konno and Ohmachi (1998), and obtained the HVSRs as the square root of the sum of squares of the two horizontal components of motions divided by the vertical component of motions. The HVSRs for the noises were also similarly computed from the parts of the records before the earthquake origin time. We show the median values of the HVSRs for the noises and S waves (more accurately, extended S-wave portion) at all sites of the S-net in the attached figure. The plots of HVSRs of the noises gave gentle hump-shaped curves at frequencies between about 0.1 and 2 Hz at many sites, while they were flat at higher frequencies. In contrast, the plots of the S-wave HVSRs gave higher and wider hump-shaped curves including between 1 and 10 Hz. Some of the curves showed prominent peaks with steep slopes between 1 and 10 Hz. The maximum values of the HVSRs for the noises ranged between about 1.5 and 7, with the median value about 3.5. In contrast, the maximum values of the HVSRs for the S-waves ranged between about 5 and 40, with the median value about 10. The peak frequencies of the HVSRs for the noises mainly ranged between 0.1 and 2 Hz, with the median frequency of about 0.6 Hz, while they were mostly between 0.2 and 10 Hz for the S-waves, with the median frequency of about 3 Hz. The HVSRs of the noises at few sites displayed sinuous pattern with frequencies lower than about 1-2 Hz, especially in the shallow water regions (depths < 600 m). The S-wave HVSRs showed a steep decrease of the values after about 7-8 Hz. Some sites gave peak values of the S-wave HVSRs near the resonance frequency of the P waves in the water layer, while such peaks did not exist for the noise HVSRs. It has been argued that the HVSRs at the ground stations primarily reflect the effect of sediments. On the other hand, the values at the seafloor sites may reflect the combined effect of the sediments and water layer because the vertical components of motions are affected by the water layer. Further analysis is necessary to explain these observed features of the HVSRs to extract useful information for site characterization.

Acknowledgments: This study was supported by "Advanced Earthquake and Tsunami Forecasting Technologies Project" of NIED and JSPS KAKENHI Grant Number JP20K05055.

© 日本地震学会

Median values of H/V spectral ratios at the S-net sites



© 日本地震学会

多数の微動アレイによる浅部３次元S波速度構造のモデル化：愛知県西尾市周辺の場合

Modeling of a three-dimensional shallow S-wave velocity structure based on numerous microtremor arrays: A case study in and around Nishio City, Aichi Prefecture

*長 郁夫[1]
*Ikuo CHO[1]

1. 産業技術総合研究所　地質情報研究部門
1. Geological Survey of Japan, AIST

産業技術総合研究所では，沿岸域の産業立地評価や地震防災施策等に資する調査手法指針の構築を目指し，海洋–沿岸–陸域におけるシームレスな地質情報の整備を実施している．本発表は，その一環として行われた伊勢湾・三河湾沿岸域の地質・活断層調査（2017–2019年度）のうち，愛知県西尾市周辺における微動アレイ探査結果についての報告である．

愛知県西尾市北部周辺の調査対象領域（3.7 km×4.4 km）で120地点の微動アレイ探査を実施した．各地点で半径0.6 mの三角形アレイ及び地震計間隔8–20 mの三角形／直線アレイを用いて15分間程度の観測を行なった．上下動微動波形からレーリー波位相速度（概ね2 –28 Hz；最大1.9 Hzから47 Hz）を同定し，深さ30 mまでの平均S波速度（AVS30）と 1次元S波速度（Vs）構造を推定した．長さ1.1–4.5 kmの12測線に沿うVs鉛直断面をそれぞれ作成し，調査対象領域浅部（平均最大深度28 m）の3次元Vs構造の概観を得た（図１）．調査対象領域南部の完新世低地ではVs 200 m/s以下の沖積層が深さ10–20 mまで堆積する一方，北部の更新世中位段丘でこの軟弱層は非常に薄いことが分かった（測線NS1）．また，領家変成岩の山地ではVs 数百m/s以上の基盤が地表付近に現れ，周囲に向かって徐々に深度を増す様子が捉えられた（測線EW1）．今後は他の種類の調査・探査結果を統合して地質地盤モデルとしての完成度を高める必要がある．

なお，現在実務で用いられているいわゆる微動アレイ探査は，2000年代の初めに実用化されたものであり，標準的な観測方式とデータ処理手順が確立されている（物理探査学会標準化検討委員会, 2008; 佐藤・岡田，2016）．本発表のケースもスペクトル解析は確立された手順に従うが，ごく小さな微動アレイを多くの地点で展開する稠密微動アレイ観測を基礎として浅部地盤の2次元ないし3次元速度構造をモデル化するような方式は，近年始まったばかりの試みである（長・先名, 2016；中澤ほか，2020）．したがって，その手順は必ずしも一般的ではなく，試行錯誤的な部分も多く含まれる．本発表では，このような新しいタイプの微動アレイ探査のケーススタディとして，標準化されていない観測方式やデータ処理手順について紹介する予定である．

微動観測点の選定及び解析結果の確認のために産総研 阿部朋哉氏との議論が参考となった．

物理探査学会標準化検討委員会 (2008) *物理探査適用の手引き，土木物理探査マニュアル*，111–126.
長　郁夫, 先名重樹 (2016) 極小微動アレイによる浅部構造探査システム：大量データの蓄積と利活用に向けて, *Synthesiolgy*, **9**, 86-96.
中澤努・長　郁夫・坂田健太郎（2020） ローム台地のS波速度構造と地盤震動特性，*地質学雑誌*，**126**, 311-326, doi:10.5575/geosoc.2020.0012.
佐藤浩章・岡田　廣 (2016) 微動利用の地下構造推定法，物理探査学会編，*物理探査ハンドブック増補改訂版*

© 日本地震学会

，第4章，229--248.

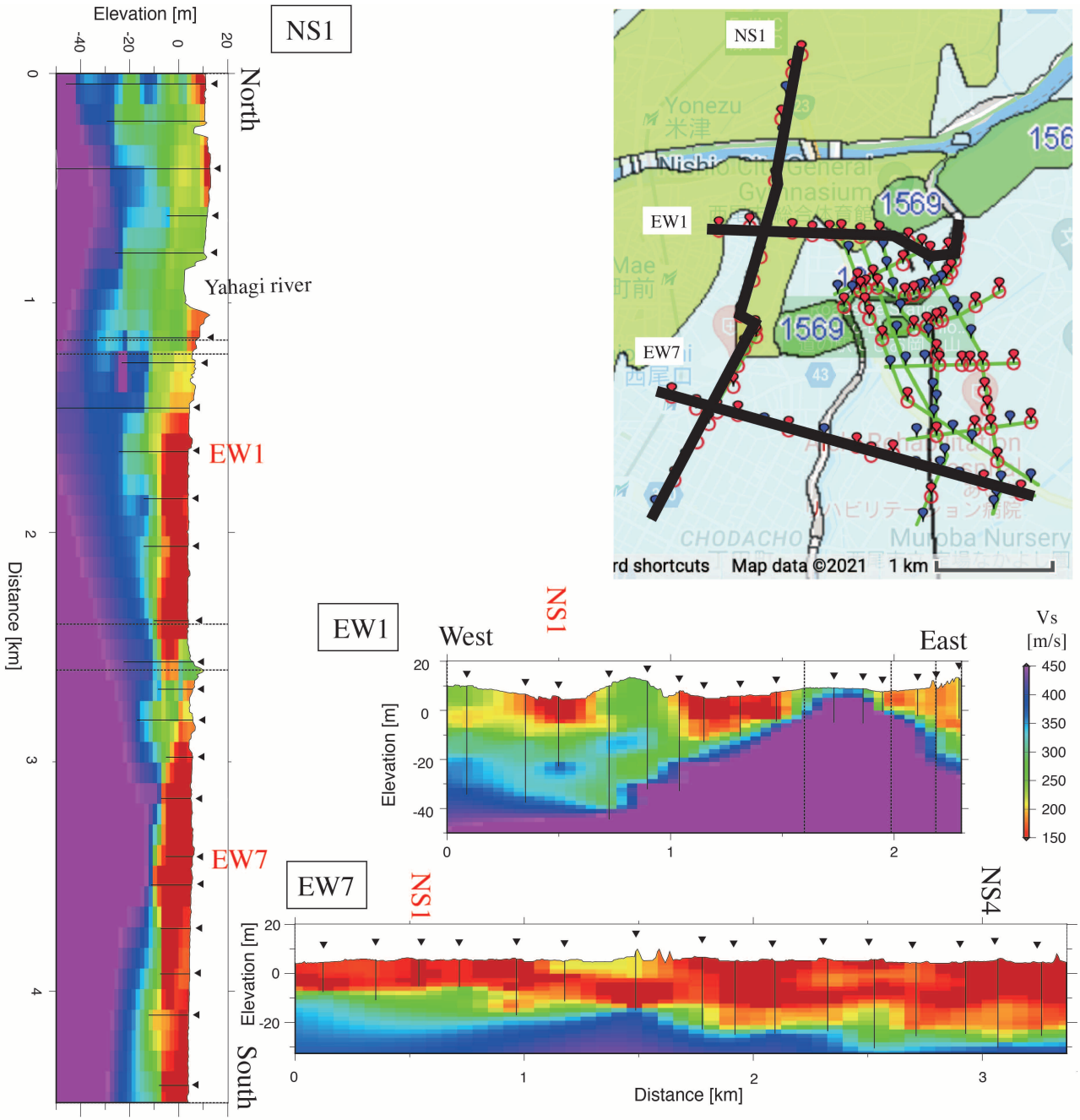


図 1 測線沿いのVs構造鉛直断面（測線NS1, EW1, EW7）. 右上の地質マップの太線は測線位置を示す. 速度断面の縦点線は測線の折れ曲がる箇所, 三角は観測点位置, 三角直下の縦棒は速度構造モデルの最下層までの深さを示す.

© 日本地震学会

2016年熊本地震の地表断層ごく近傍の強震動について

Strong motion very close to the surface rupture during the 2016 Kumamoto earthquake

*岩城 麻子[1]、藤原 広行[1]
*Asako IWAKI[1], Hiroyuki Fujiwara[1]

1. 防災科学技術研究所
1. NIED

2016年熊本地震で特に益城町中心部で建物被害が集中したことは広く関心を集めた．断層モデルを用いた強震動評価によって益城町中心部における強震動を断層内の比較的浅い領域に位置する強震動生成域によって説明するモデルが提案されている（例えば，貴堂・他，2019；Somei et al. 2020）．
この地震で益城町寺迫から同町広崎町に至る地表断層が新たに確認されており（都市圏活断層地図，2017），益城町中心部で特に甚大な建物被害の集中した地域を通っている．現地調査に基づく詳細な地表断層位置（鈴木・他, 2018）および航空写真・道路走行調査画像判読と建物登記簿調査に基づいた分析により，地表断層から100mの範囲に倒壊建物の約80%が集中しており断層から離れるに従い急激に倒壊率が下がることが報告されている（内藤・他, 2018; 中村・他2018）．
この地震について，詳細な地表断層形状を取り入れた断層モデルによる強震動計算により断層近傍の変位分布の再現性が向上することを示しており（岩城・他, 2021），強震動予測における事前情報としての活断層情報の有用性を検討している．しかし，使用した断層モデルにおいて数kmの広がりを持つ強震動生成域や断層浅部の食い違いは地表断層から数100ｍ～数km離れた位置に強い地震動を生じさせるものの，上述したような地表断層から100 m程度以内の集中的な被害を断層モデルで説明するためには，それらに加えて断層内部でさらにスケールの小さい機構が必要である可能性がある． そこで，その機構として地表付近のごく近傍域のみに存在する断層内部領域で生じている地盤変形の影響を考えた．この地盤変形は，観測された地表断層の変位量の断層運動で生じた変位量からの欠損分と仮定すると，地表付近での断層運動による変位を一部打ち消す方向に働く力に相当すると考えることができる．この地盤変形に対応する力として断層ごく近傍の地表付近に体積的な変形を近似的に表現するシングル力をおき，断層モデルと組み合わせた線形の強震動計算による簡単な数値実験により，断層面全体に連続的な食い違い量を持つ断層モデルだけでは説明できない地表断層ごく近傍に集中した強い地震動を生成できることを示した． 実際の建物倒壊率を説明するためには，この変形が建物倒壊に寄与するための力の大きさを地盤の非線形応答も含めて検討する必要がある．

© 日本地震学会

2021年2月福島県沖で発生したスラブ内地震の震源過程解析－３次元地下構造モデルを考慮した検討－

Source Process of the Off Fukushima Earthquake of February 2021 - Analysis considering 3D subsurface structure -

*引間 和人[1]
*Kazuhito HIKIMA[1]

1. 東京電力ホールディングス株式会社 経営技術戦略研究所　技術開発部　環境・エネルギーエリア
1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. , TEPCO Research Institute

【はじめに】
　2021年2月13日に福島県沖で発生したMj7.3の地震では福島県および宮城県では最大震度6強に達し多くの被害が発生した．この地震は西北西－東南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型で，太平洋プレート内で発生した地震である（地震調査委員会,2021）．スラブ内地震による生じる強震動を考える上で震源過程を知ることは重要であり，防災科学技術研究所(2021)による速報解をはじめ，既にいくつかの詳細な解析が行われている（津田・他，久保・他，染井・宮腰; 2021 JpGU，など）．
　本発表では，既報と同様に強震記録を使い震源インバージョン解析を行った結果を報告する．解析に当たっては，余震の震源を再決定しその結果を考慮して断層面を設定するとともに，太平洋プレートを含む３次元速度構造の影響についても検討する．
【震源再決定】
　震源インバージョン解析に先立ち，本震を含めて一連の地震の震源再決定を行った．本震発生後4週間以内に発生した地震について，防災科研のWebサイトで公開されている気象庁一元化処理による検測値を用いて，DD法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)により震源決定を行った．以下の解析に用いた本震の震源位置は(37.7259˚N, 141.6894˚E, 55.17km)である．
　再決定された余震分布は主に北北東－南南西方向に並びその範囲は40 km程度に及ぶ．多くの余震は東南東側に高角に傾き下がる面上に分布しているが，一部ではより低角な面上に並ぶ余震群も見られる．これは気象庁(2021)などによる再決定震源分布と同様である．なお，本震震源は震源域の北東端に近い位置にあり，破壊は南南西方向にユニラテラル的に進展したものと考えられる．
【震源過程解析】
　震源域が海域に位置するためやや遠い観測点も含まれるものの，震源から120 km程度以内のKiK-netの波形記録を震源インバージョン解析に使用した．また，福島県内にある東京電力の地震観測点での観測記録も解析に加えた．なお，浅部地盤による影響を軽減するために地中記録の使用を基本とした．
　通常の震源インバージョン解析の際には，グリーン関数の計算はKohketsu (1985)により行い，計算に用いる１次元水平成層構造は，全国１次地下構造モデル（JIVSM-V1; Koketsu et al., 2012）の各観測点直下の速度構造を抜き出したものを余震記録で若干のチューニングを行ったモデルを使用した．
　震源解析には，加速度波形に0.03～0.6 Hz をフラットレベルとするバンドパスフィルタをかけて積分した速度波形を用い，インバージョンはマルチタイムウィンドウ法(Yoshida et al., 1996; 引間, 2012)により行った．
　解析の際の断層面は，再決定した余震のうち，本震後24時間以内程度に発生した余震の分布をもとに，F-netによるメカニズム解なども参考にし，さらに予備的解析を行い観測波形と合成波形との残差も考慮して設定した．余震分布全体に拡がる主断層面は走向:37˚，傾斜:45˚の長さ40km，幅24kmの1枚の矩形断層とした．さらに，この面を仮定した解析に加えて，これらから離れた低角な余震の並びを考慮し，長さ14km．幅12kmの傾斜:20˚の副断層面も付加したケースについてもインバージョンを実施した．なお，小断層

© 日本地震学会

サイズは2 km×2 km とした．

【解析結果（１次元構造）】

主断層面のみを考慮した解析では，破壊は震源から南東側にほぼユニラテラルに進展し，震源から12～20 km程度離れたやや浅部に大きなすべりが求まった．その分布は既発表の解析結果と概ね整合している．最大すべり量は2m程度，地震モーメントは4.7×10^{19}Nm (Mw7.0)となった．一方，副断層も設定した場合には，主断層面の最大すべり量は約1.8m，副断層では約1.6mのすべり量が求まり，全体ではM_0=5.3×10^{19}Nm (Mw7.1)とやや大きな値になった．

観測波形の再現性の観点では，副断層面を設定した場合には特に福島県内での観測点の再現性が主断層面のみに比べると良好であった．インバージョン結果では副断層面上にも有意なすべりが求まっており，また，副断層面近傍の余震は本震直後から発生していることから，本震時には副断層面に相当する断層面もほぼ同時に活動したものと考えられる．

【３次元速度構造による波形計算】

１次元速度構造による震源インバージョン結果を用いて，３次元速度構造モデル（JIVSM）を使い波動伝播シミュレーションを行った．暫定結果ではあるが，観測波形の主要な特徴が良好に再現されることを確認した．これにより仮定した速度構造モデルは震源インバージョン結果を大きく変える程は影響を及ぼさないものと考えている．ただし，細部では再現が不足している地点も見られるため，３次元速度構造を用いた震源インバージョンを実施し，より詳細な震源過程を求める予定である．

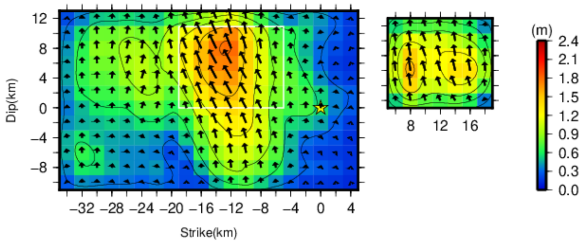
謝辞：本検討ではKiK-netおよびF-netメカニズム解，JMA一元化データを使用させて頂きました．

震源インバージョン結果（２枚断層）

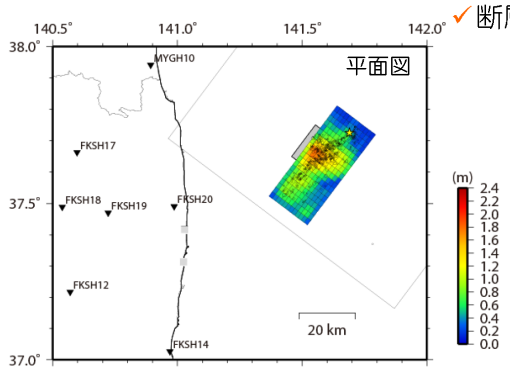
●1次元速度構造による暫定結果

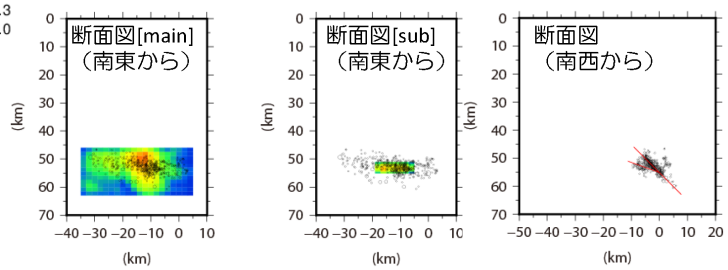
走向: 37°，傾斜: 45°　[主断層]
走向: 37°，傾斜: 20°　[副断層]
M_O=5.3×10^{19}Nm (M_W7.1)
最大すべり量: 約1.8 m[主]，約1.6 m[副]

✓すべり分布（拡大図）

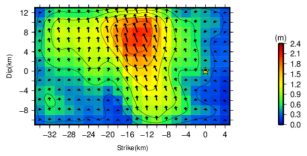


✓断層面と余震分布





•参考：1枚断層のすべり分布



© 日本地震学会

2021年福島県沖の地震（Mj7.3）の強震動評価に基づいた強震動予測手法の適用性評価

Applicability of the strong ground motion prediction method to the 2021 Fukushima-oki earthquake (Mj7.3)

*入江 紀嘉[1]、吉田 昌平[1]、岡田 康男[1]、宮腰 研[2]、染井 一寛[2]、鳥田 晴彦[1]
*Kiyoshi IRIE[1], Shohei YOSHIDA[1], Yasuo OKADA[1], Ken MIYAKOSHI[2], Kazuhiro SOMEI[2], Haruhiko TORITA[1]

1.（株）大崎総合研究所、2.（一財）地域 地盤 環境 研究所
1. Ohsaki Research Institute, Inc., 2. Geo-Research Institute

１．はじめに

2021年2月13日に福島県沖の地震（Mj7.3）が発生した．この地震は沈み込む太平洋プレート内に震源が位置するスラブ内地震であり，この地震によりKiK-net山元観測点（MYGH10）の地表において1,432 Gal（三成分合成）の地震動が観測された（地震調査研究推進本部（地震本部），2021）．スラブ内地震を対象とした特性化震源モデルの設定手法は，地震本部の強震動予測手法「レシピ」において提示されているが，実地震による地震動予測手法の検証例は他のタイプの地震に比べて多くない．そこで，本研究では2021年福島県沖の地震について既往の研究結果で求められた震源パラメータをスラブ内地震のデータベースと比較するとともに，既往の地震動予測手法に基づいて特性化震源モデルを構築し，強震動シミュレーションにより地震動予測手法の適用性について検討を行った．

２．2021年福島県沖の地震のパラメータ

2021年福島県沖の地震について，強震記録を用いた震源インバージョンによって震源過程が推定されている（たとえば，津田・他，2021；久保・他，2021；など）．一方，染井・宮腰（2021）や吉田・他（2021）は，経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングにより強震動生成域（SMGA）や短周期レベルを求めている．これらのパラメータ値を既往のスラブ内地震のスケーリングデータと比較した．ここで，既往地震のデータには，大崎総合研究所（2021）のスラブ内地震のデータベースを用いた．地震モーメントと短周期レベルの関係（暫定結果）を図1に示す．国内外のスラブ内地震のデータと比較するため，地震モーメントはGlobal-CMT解の値を用いた．同図より，染井・宮腰（2021）および吉田・他（2021）の短周期レベルは既往地震のばらつきの範囲内におさまっており，新井・他（2015）による太平洋プレートを対象とした関係式と調和的な値となっている．同様に，地震モーメントとSMGAの面積の関係についても，大崎総合研究所（2021）のデータベースと比較したところ，吉田・他（2021）のSMGA面積は笹谷・他（2006）の関係式に調和的な値を示しているのに対し，染井・宮腰（2021）のSMGA面積はやや小さい値を示しているが，既往地震のばらつきの範囲内にはおさまっていることが確認された．これらから，2021年福島県沖の地震のパラメータは既往のスラブ内地震と比べて特異な値ではないことがわかる．

３．特性化震源モデルの設定

笹谷・他（2006）および新井・他（2015）を用いた特性化震源モデルをそれぞれ設定する．断層走向，断層傾斜，アスペリティ位置は染井・宮腰（2021）等のSMGAモデルの先行研究を参考に設定する．

４．強震動シミュレーション

構築した特性化震源モデルを用いて，経験的グリーン関数法により強震動シミュレーションを行う．特性化震源モデルと強震動シミュレーション結果は発表時に報告する．

© 日本地震学会

謝辞：
本研究は、原子力規制庁の委託研究「令和３年度原子力施設等防災対策等委託費（海溝型地震の特性化震源モデルに係る検討）事業」の一環として実施しています．

参考文献：
新井・他 (2015) AIJ, 716, 1537-1547; 壇・他 (2001) AIJ, 545, 51-62; 地震本部 (2021) 2021年2月13日福島県沖の地震の評価; 大崎総合研究所 (2021) 令和2年度原子力規制庁委託成果報告書; 久保・他 (2021) JpGU, SSS11-17; 笹谷・他 (2006) 北海道大学地球物理学研究報告, 69, 123-134; 染井・宮腰 (2021) JpGU, SSS11-P24; Somerville *et al.* (1999) SRL, 70, 59-80; 津田・他 (2021) JpGU, SSS11-16; 吉田・他 (2021) AIJ大会梗概集（投稿中）．

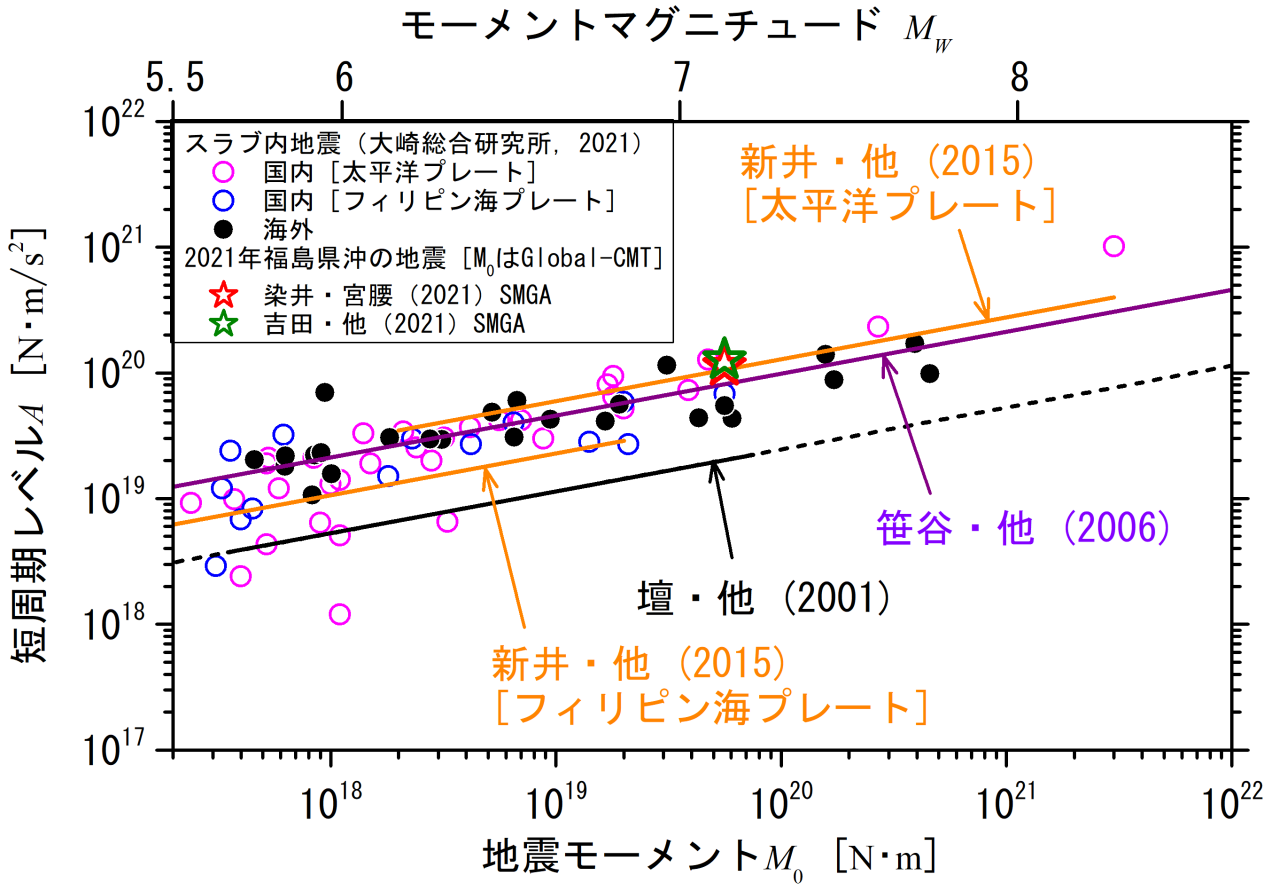


図1　スラブ内地震の地震モーメントと短周期レベルの関係（暫定結果）

© 日本地震学会

国内のプレート間地震を対象にした震源スケーリング則の再検討

Re-examination of scaling relationships of source parameters of the interplate earthquakes in Japan

*宮腰 研[1]、郭 雨佳[1]、吉田 邦一[1]、入江 紀嘉[2]
*Ken MIYAKOSHI[1], Yujia GUO[1], Kunikazu YOSHIDA[1], Kiyoshi IRIE[2]

1. (一財) 地域 地盤 環境 研究所　地震解析グループ、2. （株）大崎総合研究所
1. Geo-Research Institute, 2. Ohsaki Research Institute, Inc.

プレート間地震の震源スケーリング則として地震本部(2020)は，例えば佐藤(1989) や宇津(2001)などを挙げている．一方，Murotani et al. (2008, 2013)や田島他(2013)は，主に震源インバージョン解析による不均質すべり分布モデルに基づいた震源スケーリング則を提案している．佐藤(1989) と宇津(2001)は1498～1994年に国内で発生した地震(Mw6～8クラス)，Murotani et al. (2008, 2013)と田島他(2013)は1923～2011年に国内外で発生した地震(Mw6～9クラス)を対象にしている．これらの震源スケーリング則は震源断層面積に対して地震モーメントの2/3乗の比例関係(Mw<8.4)を仮定している．なお，田島他(2013)は断層幅の飽和(200km弱)を指摘し，Mw8.4以上の地震の震源断層面積は地震モーメントの1/2乗の比例関係となることを提案している．ところで，これらの震源スケーリング則はMw8.4以下で同じ傾き(2/3乗)を仮定しているにもかかわらず，宇津(2001)とMurotani et al. (2008)のy切片は異なる．すなわち，同じ地震モーメントに対して前者の震源断層面積は後者に対して約0.6倍と小さい．このような震源スケーリング則の差異は用いているデータセットの違い（例えば，解析手法や国内外の地震）が考えられることから，本検討では国内のプレート間地震(Mw6.7～9.0)に限って震源スケーリング則の再検討を行う．
震源スケーリング則を検討する上で，同質なデータセットを用いることは重要であり，Somerville et al. (1999)は断層全体の平均すべり量の0.3倍未満となる断層端部をトリミング操作して，それ以上のすべりを持つ領域を震源断層と規定する規範を提案している．本検討ではSomerville et al. (1999)の規範あるいはそれと同等な規範を用いた国内のプレート間地震のデータセットを収集・整理した．Somerville et al. (1999)の規範を用いた地震のデータセットとして①Somerville et al. (2002; SM2002), ②Murotani et al. (2008; MU2008), ③田島他(2013; TJ2013), ④Skarlatoudis et al. (2016; SK2016)がある．ただし，同じ規範を用いているにもかかわらず，SK2016についてはMU2008と同じ地震の一部で同程度の震源断層面積が得られていなかった．この原因は不明であるが，本検討ではこのようなデータは用いなかった．また，⑤Thingbaijam et al. (2017; TH2017)のデータセットはSomerville et al. (1999)とは異なるThingbaijam and Mai (2016)の規範でトリミングしたものを用いているが，宮腰他(2018)は同じ地震を対象に両者の規範によってトリミングされた震源断層面積は同程度となることを確認している．一方，⑥Allen and Hayes (2017; AH2017)は独自のトリミング手法によって震源断層面積を抽出しているが，同じ地震を対象にTH2017と比較した結果，AH2017はTH2017に比べてMw8程度以下で系統的に小さいことが認められた．本検討では同質なデータセットを用いることを重視し，①SM2002, ②MU2008, ③TJ2013, ④SK2016の一部，⑤TH2017の計5つのデータセットを用いた．なお，異なるデータセット間で同一研究者によるインバージョンモデルを持つ地震も複数存在するが，ここでは，それらを区別していない．
以上の国内のプレート間地震を対象に収集・整理した5つのデータセットと宇津(2001) ，Murotani et al. (2008) 及び田島他(2013)が提案する震源スケーリング則を比較した．その結果，Mw6.7～8.4の地震データセットに対し，宇津(2001)に比べてMurotani et al. (2008)の震源スケーリング則の方が整合的であった．一方，Mw8.4以上の地震データセットは少なく，宇津(2001)及び田島他(2013)のスケーリング則の整合性の検討は困難であった．ここまでは暫定的な結果であり，今後は，データセットと震源スケーリング則の差について定量的な評価を行うとともに，他の震源パラメータ（断層幅や長さ等）についても検討を進める予定である．

謝辞：本研究は原子力規制庁による令和3年度原子力施設等防災対策等委託費（海溝型地震の特性化震源モデルに係る検討）事業の一環として実施されています．

© 日本地震学会

南海トラフ巨大地震の発生の多様性を考慮した地震防災基盤シミュレータの構想

Concept of Earthquake Disaster Prevention Infrastructure Simulator for the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough

*中村 洋光[1]、藤原 広行[1]、前田 宜浩[1]、土肥 裕史[1]、時実 良典[2]、石丸 晴海[3]
*Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Takahiro MAEDA[1], Yuji DOHI[1], Yoshinori TOKIZANE[2], Harumi ISHIMARU[3]

1. 防災科学技術研究所　マルチハザードリスク評価研究部門、2. 応用アール・エム・エス、3. 三菱スペース・ソフトウエア
1. NIED, 2. OYO RMS Corporation, 3. Mitsubishi Space Software Co.,Ltd.

地震調査研究推進本部（以降「地震本部」と称す）の長期評価は、南海トラフでは、約100～200年間隔で繰り返し大地震が発生し、同じ領域で同じような地震が繰り返し発生するのではなく、その規模や震源域の広がりは多様性に富んでいることを指摘している。また、これまでの科学的知見等に基づき、Ｍ８クラスの大地震が発生し、残りの領域においても連動して大地震が発生する可能性が高まることや、通常と異なるゆっくり滑り等が観測される可能性が中央防災会議防災対策実行会議報告書等において示されている。このような国難級の南海トラフ地震に備えるため、科学的・定量的なデータに基づき、「通常と異なる現象」の把握とその推移予測を、迅速かつ精度よく評価することを目指した評価・情報発信手法の開発や、発信された情報を被害軽減に最大活用するため、「通常と異なる現象」が観測された場合、住民や地域、企業等の防災対策のあり方や、防災対応を実行する方策について研究を実施する「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」が開始された（小平・他；地惑連合2021年大会）。 本研究では、前述の研究プロジェクトにおける将来を予測する基盤的情報として、「通常と異なる現象」発生後の時間推移についてもその地震発生の時空間的な多様性の一例として取り込み、地震や津波のハザードやそれによって引き起こされるリスク情報を提供可能とする地震防災基盤シミュレータの開発構想について述べる。具体的には、「通常と異なる現象」を地震発生の多様性の一例としてとらえ、それが起こった後の時間推移を考慮した条件付きリスク評価手法の開発を行う。また、地震本部の知見を採り入れつつ、地震発生の多様性を表現するために構築された時空間的に膨大な組み合わせからなる断層モデル群に対して、長継続時間・広帯域強震動（長周期地震動を含む）や津波遡上を安定的かつ効率的にシミュレーションできる手法を開発し（前田・他、土肥・他；本秋季大会）、これらのハザード情報に基づいたリスク評価から事前避難、産業活動、大都市機能維持のそれぞれの地域性の観点から南海トラフの地震像を類型化する手法の開発を行い、類型化毎の代表的な広域災害シナリオを構築する（時実・他；本秋季大会）。このように創出したハザード・リスク情報を格納する情報基盤を、防災科研の地震ハザードステーション（J-SHIS）、津波ハザードステーション（J-THIS）、リアルタイム地震被害推定システム（J-RISQ）と連携できる形で地震防災基盤シミュレータとして構築し、想定する利用者の目的に適した形態で提供可能とするとともに、利活用を推進する活動を通して防災対策に活かすことを計画している。 謝辞：本研究は文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として行われた。

© 日本地震学会

南海トラフ巨大地震による長継続時間・広帯域強震動のシミュレーション

Long-duration and broadband ground motion simulation for the great earthquakes along the Nankai Trough

*前田 宜浩[1]、岩城 麻子[1]、青井 真[1]、中村 洋光[1]、藤原 広行[1]、関 航佑[2]、今井 隆太[3]
*Takahiro MAEDA[1], Asako IWAKI[1], Shin AOI[1], Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Kosuke SEKI[2], Ryuta IMAI[3]

1. 防災科学技術研究所、2. 三菱スペース・ソフトウエア株式会社、3. みずほリサーチ＆テクノロジーズ株式会社
1. NIED, 2. Mitsubishi Space Software Co.,Ltd., 3. Mizuho Research & Technologies, Ltd.

南海トラフのプレート境界ではこれまでマグニチュード8級の海溝型巨大地震が繰り返し発生しており、強震動や津波によって甚大な被害が引き起こされてきた。地震調査研究推進本部による南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）では、2011年東北地方太平洋沖地震の経験を踏まえ、過去に発生したことが確認されていないものの現在の科学的知見に基づいて推定されうる「最大クラス」の地震も含む、地震の多様性が考慮されている。
文部科学省の「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」（小平・他；地惑連合2021年大会）の一環として、防災科学技術研究所では、時空間的に多様な南海トラフ地震による地震や津波のハザードやリスク情報を提供可能とする地震防災基盤シミュレータ（中村・他；本秋季大会）を開発しており、本研究では、地震防災基盤シミュレータに格納するハザード情報のひとつである長継続時間・広帯域強震動（長周期地震動を含む）を安定的かつ効率的にシミュレーションできる手法を開発している。
　海溝型巨大地震では震源から遠く離れた平野や盆地においても長大構造物が長周期地震動による被害を受けることが知られている。首都圏を含む大都市は平野上に発達しており、南海トラフの海溝型地震に対しては強震動と津波の評価のみならず長周期地震動の評価も重要である。我々はこれまで南海トラフ沿いで想定される多様な断層モデル群に対して差分法による長周期地震動シミュレーションを行ってきたが、計算タイムステップの増加とともに振幅が指数関数的に増大する発散現象のため長継続時間の地震動を計算することが困難な場合があった。そこで、本研究では防災科研が開発しているシミュレーションシステムであるGMS（地震動シミュレータ）による地震波伝播計算にImai et al.(2018)の波動場平滑化スキームを導入し、発散抑制効果を検証した。
波動場平滑化スキームは移流拡散方程式のアナロジーを応用し波動方程式に拡散項を付加した修正波動方程式を解くもので、拡散項（付加項）に乗ずる係数を適切に設定することで、ある周期よりも短周期成分を選択的に減衰させることができる。経験的に発散現象は、地震動計算として有効な周期帯域よりも短周期帯で生じており、波動場平滑化スキームにより発散の影響のみが除去され、長継続時間の地震動計算が可能となることが期待される。
　我々がこれまでに実施した差分法計算において発散が生じた計算モデル（3次元地下構造モデル＋震源モデル）を対象に、波動場平滑化スキームを実装したGMSを用いて計算を行ったところ、拡散項の係数をある幅の中で設定することで発散が抑制されることが確認できた。今後は、拡散項の係数の設定が波動場にどのような影響を与えているかを定量的に評価するとともに、係数の適切な設定方法に関する検討を行い、南海トラフ巨大地震による長継続時間地震動の計算を行う予定である。
謝辞：本研究は文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として行われた。

© 日本地震学会

南海トラフ巨大地震の発生の多様性を考慮した津波遡上計算とその利活用に向けてー概要と利活用事例の紹介ー

Tsunami Inundation Simulation Considering the Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough - For Effective Use of Tsunami Hazard Information -

*土肥 裕史[1]、中村 洋光[1]、藤原 広行[1]、矢守 克也[2]、杉山 高志[2]
*Yuji DOHI[1], Hiromitsu NAKAMURA[1], Hiroyuki FUJIWARA[1], Katsuya YAMORI[2], Takashi SUGIYAMA[2]

1. 国立研究開発法人防災科学技術研究所、2. 京都大学 防災研究所
1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

近い将来の発生が懸念される南海トラフ巨大地震に対して、事前の備え・対策に資する、多様な津波ハザード・リスク情報を創出することは喫緊の課題である。地震調査委員会（2020）による「南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的津波評価」は、最大クラスの地震を除く、Ｍ８クラスからＭ９までの地震規模の南海トラフ巨大地震について、地震発生の空間的な多様性を考慮した波源断層モデル2,720個を設定し、海岸に来襲する津波に対する確率論的津波評価を実施した。また、藤原・他（2020；防災科学技術研究所研究資料）は、地震調査委員会（2020）が設定した波源断層モデル群に加え、最大クラスの地震を考慮した波源断層モデル3,480個を設定し、海岸に来襲する津波に対する確率論的津波評価を実施した。これらの既往研究では、地震発生の時空間的な多様性を持つとされる南海トラフ巨大地震に対して、多様性を表現する膨大な数の波源断層モデル群を用いた津波ハザード情報を創出しているものの、浸水域の拡がりや浸水深といった、陸域における津波ハザード情報は示されていない。事前の備え・対策に資する、より効果的な津波ハザード・リスク情報を創出するためには、陸域を遡上する津波の検討が求められる。
本研究では、地震調査委員会（2020）や藤原・他（2020）が設定した、南海トラフ巨大地震に対する空間的な多様性を表現する膨大な数の波源断層モデル群を用いた津波遡上計算を実施し、陸域における津波ハザード情報を含む、多様な津波ハザード情報を創出する。創出する津波ハザード情報は、南海トラフ巨大地震に対する事前避難、産業活動、大都市機能維持に資するハザード・リスク情報を整備する情報基盤「地震防災基盤シミュレータ」（中村・他、2021；本大会）に格納する予定である。また、南海トラフ巨大地震による建物被害・人的被害のリスク評価（時実・他、2021；本大会）や、「臨時情報」発表時における事前避難分析ツールの開発（杉山・他、2021；信学技報）等における利活用を想定している。本研究の概要を図１に示す。
本発表では、上述した研究全体の計画、進捗、さらに、現時点における津波ハザード情報の活用事例について報告する。

謝辞：本研究は「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として実施している。

© 日本地震学会

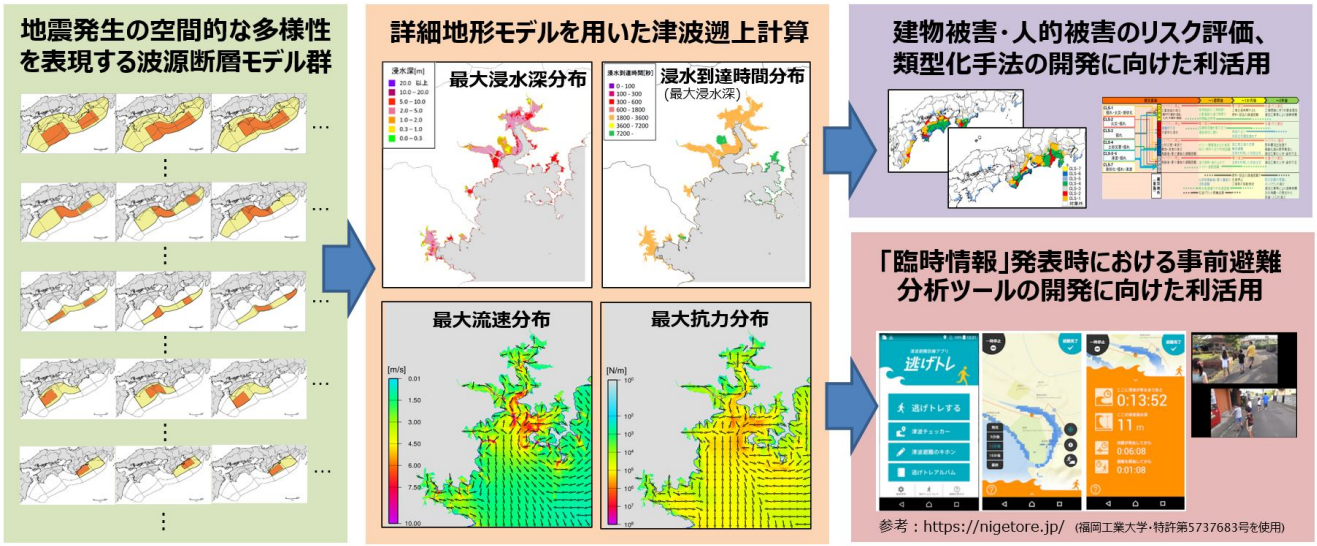


図１　本研究の概要。本研究では、南海トラフ巨大地震に対する空間的な多様性を表現する膨大な数の波源断層モデル群（図左側）を用いた津波遡上計算を実施し、多様な津波ハザード情報を創出する（図中央）。創出する津波ハザード情報について、建物被害・人的被害等のリスク評価、南海トラフ巨大地震の地震像に対する類型化手法の開発、「臨時情報」発表時における事前避難分析ツールの開発に向けた利活用等を想定している（図右側）。

© 日本地震学会

南海トラフ巨大地震の多様性を踏まえた条件付きハザード評価の試行

A trial of conditional hazard assessment based on Variety of Occurrences of the Great Earthquakes along the Nankai Trough

中村 洋光[1]、*時実 良典[2]、藤原 広行[1]、清水 智[2]、麻生 未季[2]
Hiromitsu NAKAMURA[1], *Yoshinori Tokizane[2], Hiroyuki FUJIWARA[1], Satoshi SHIMIZU[2], Miki ASO[2]

1. 防災科学技術研究所　マルチハザードリスク評価研究部門、2. 応用アール・エム・エス株式会社
1. NIED, 2. OYO RMS Corp.

南海トラフ沿いで発生する地震は、規模や震源域の広がりが多様であると評価（地震調査研究推進本部、2020）されており、防災対策のあり方を考える際にはこれらの多様性を踏まえた検討が必要と考えられる。これらの課題をうけて、「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」（小平・他；地惑連合2021年大会）では、時空間的に多様な南海トラフ地震によるハザードやリスクを取り込んだ地震防災基盤シミュレータの開発に取り組んでいる（中村・他；本秋季大会）。本研究では、地震防災基盤シミュレータの開発の一環として、膨大な地震および津波ハザード情報（前田・他、土肥・他；本秋季大会）に基づいたリスク評価を行い、事前避難、産業活動および大都市機能維持等の観点で、地震発生の多様性を有する南海トラフ地震を類型化する手法を開発するとともに、類型毎の代表的な広域での災害シナリオを構築する計画である。本発表では、研究計画を紹介することに加え、前述の災害シナリオ構築の基礎的な情報となる半割れケース発生後の条件付きハザード評価を試みたので報告する。ここでの「半割れケース」とは南海トラフ沿いのプレート境界で発生するＭ８クラス以上の地震のうち潮岬以東もしくは以西を震源域とする地震を指し、内閣府の「南海トラフ地震の多様な発生形態に備えた防災対応検討ガイドライン」において発生後には南海トラフ臨時情報のうち巨大地震警戒が発表される地震に相当するものである。 半割れケース発生後の条件付きハザード評価は、確率論的津波評価(地震調査研究推進本部、2020)や地震動予測地図(地震調査研究推進本部、2021)の考え方を参考とした。まず半割れケース発生後に起こりうる地震の震源域の組み合わせとして、既に半割れした震源域を除いたいわゆる割れ残り領域のみから構成される震源域の組み合わせと、既に半割れした震源域を含む全ての震源域の組み合わせを考えた。次に、それぞれの組み合わせに対して地震動予測地図での事例を参考に重みを付与し、半割れケースが発生した場合におけるハザードと条件付き超過確率の関係を評価した。今後、これらのハザード評価に基づいて、事前避難等による人口分布の変化を考慮したリスク評価を行っていく予定である。 謝辞：本研究は文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として行われた。

© 日本地震学会

確率論的地震動予測地図(2020年版)の地震活動モデルで表現される地震発生数

Number of earthquakes from seismic activity model of the probabilistic seismic hazard map for Japan starting from 2020

*宮腰 淳一[1]、森川 信之[2]、藤原 広行[2]
*Jun'ichi MIYAKOSHI[1], Nobuyuki MORIKAWA[2], Hiroyuki FUJIWARA[2]

1. 大崎総合研究所、2. 防災科学技術研究所
1. Ohsaki Research Institute, Inc., 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震調査研究推進本部地震調査委員会により公表されている「全国地震動予測地図」のうち確率論的地震動予測地図では、地震を複数に分類した上で、各々について地震発生の確率モデルが作成されている。確率論的地震動予測地図の妥当性検証の1つとして、地震活動モデルで表現されている規模別地震発生頻度と近年の地震カタログデータとの比較がある（例えば、森川・他，2019、日本地球惑星科学連合大会）。そこでは、確率論的地震動予測地図2018年版の地震活動モデルを対象としており、平成23年東北地方太平洋沖地震後のカタログの余震の扱いが一つの課題となっていた。本稿では、2017年までの地震カタログを用いた確率論的地震動予測地図2020年版における地震発生数を算定し、地震カタログデータおよび2018年版における地震発生数との比較を行う。

まず、確率論的地震動予測地図の地震活動モデルにおいて、2020年版での主な変更点は以下の通りである。

・日本海溝沿いの超巨大地震、青森県東方沖および岩手県沖北部のプレート間巨大地震、宮城県沖のプレート間地震について、多様な発生パターンを考慮している。

・南海トラフの地震（M8～9クラス）について、確率論的津波評価で設定した従来よりも多様な震源域の組み合わせと、それぞれの起こりやすさを考慮した重み付けを踏まえたモデルとしている。

・震源断層を予め特定しにくい地震の発生頻度の算定において、領域区分を一部変更、地震カタログとして宇津（1982）による1885～1921年のM 6.0以上の地震と1922～2017年のM 5.0以上の気象庁震源データに変更（2018年版は、宇津（1982）による1885～1925年のM 6.0以上の地震と1926～2010年のM 5.0以上の気象庁震源データ）、余震を除去する場合とカタログのすべての地震を用いる場合を併用、等である。

つぎに、確率論的地震動予測地図の地震活動モデルで表現される地震発生数として、30年間での期待値を規模ごとに算定し累積地震数で表す。手順は以下の通り。

・非定常な地震活動モデルが採用されている地震については、基準日から30年間の地震発生確率を地震数の期待値とする。

・多様な発生パターンを考慮している地震（南海トラフの地震（M8～9クラス）、相模トラフ沿いのM8クラスの地震、千島海溝沿いの超巨大地震（17世紀型）、十勝沖および根室沖のプレート間巨大地震、日本海溝沿いの超巨大地震、青森県東方沖および岩手県沖北部のプレート間巨大地震、宮城県沖のプレート間地震）については、30年間の全体の地震発生確率に各発生パターンの重みを乗じたものをそれぞれ30年間の地震数の期待値とする。

・ポアソン過程が採用されている地震については、地震発生頻度に基づく30年間の地震数を用いる。

・モーメントマグニチュード（Mw）でモデル化されている地震の規模について、主要活断層帯で発生する地震はM = (Mw-1.08) / 0.78、それ以外の地震は M = Mwにより気象庁マグニチュードMに変換する。

比較対象とする地震カタログについては、宇津（1982）による1885～1921年のM 6.0以上の地震と1922～2017年のM 5.0以上の気象庁震源データを組み合わせたものとする。このとき、確率論的地震動予測地図2020年版と同様に、余震を除去する場合とカタログのすべての地震を用いる場合との地震数を

© 日本地震学会

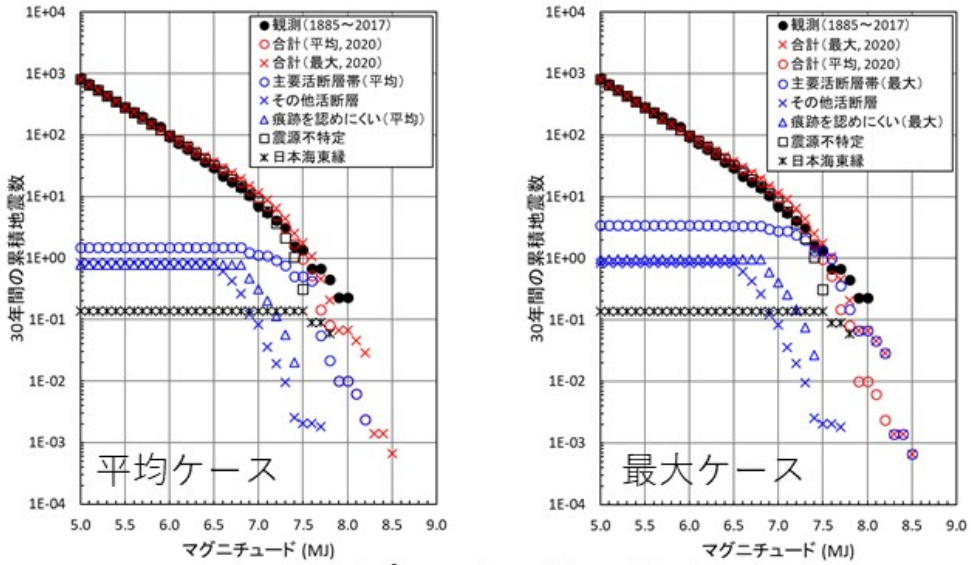
0.5：0.5の重みで算出する。

陸側プレートの浅い地震については、平均ケースの場合M7.4以下、最大ケースの場合M7.6以下においてカタログよりモデルの地震数がやや大きいが、それより大きな規模ではモデルの地震数が小さい傾向が見られる。

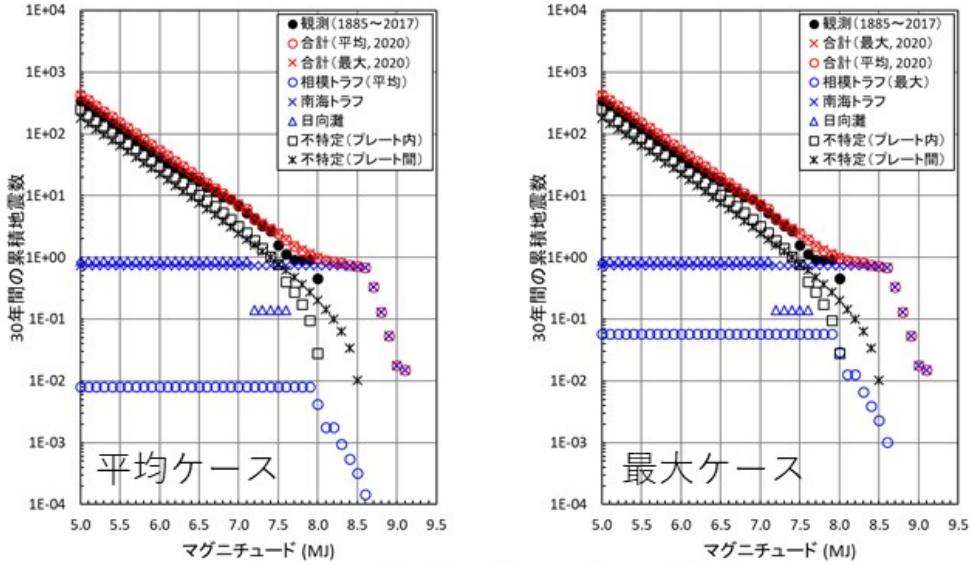
フィリピン海プレートの地震については、M8.0以下においてモデルとカタログの地震数が整合的であるものの、それより大きな規模ではモデルの地震数が極端に大きくなっている。これは南海トラフの地震（M8～9クラス）において時間予測モデルに基づいた大きな発生確率がモデル化されていることが影響している。ただし、カタログにおける最大規模の地震は1946年の南海地震（M8.0）であり、それより大きな規模については直接カタログの地震数との比較はできない。

太平洋プレートの地震については、平均ケースの場合M8.4以下、最大ケースの場合M8.8以下においてカタログよりモデルの地震数がやや大きいが、それより大きな規模ではモデルの地震数が小さい傾向が見られる。ただし、カタログにおけるM8.6以上の地震は2011年の平成23年東北地方太平洋沖地震（M9.0）のみであり、カタログでは133年に1回発生したとして地震数を算定していることに注意されたい。

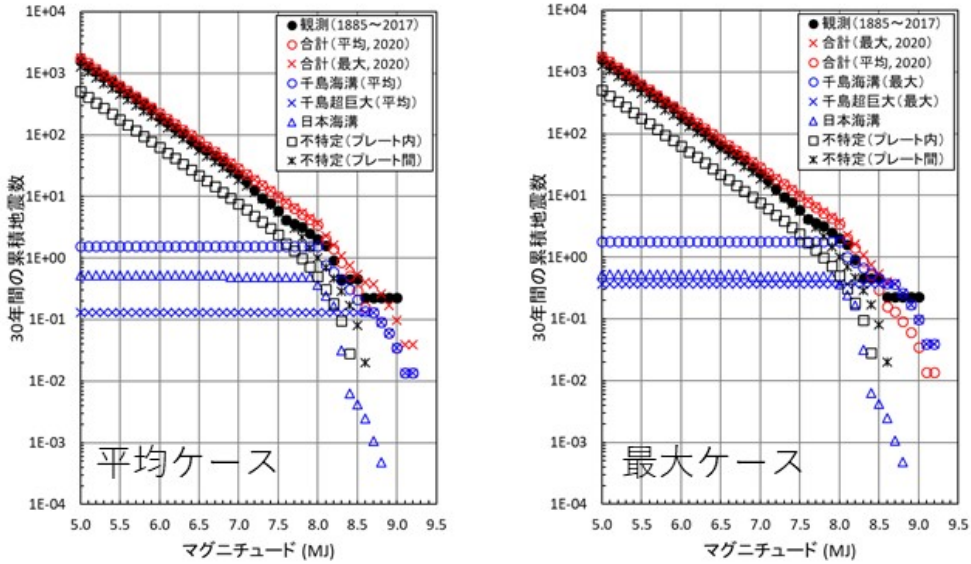
© 日本地震学会



陸側プレートの浅い地震



フィリピン海プレートの地震



太平洋プレートの地震

モデルとカタログの地震数の比較（2020年版）

© 日本地震学会

ニューラル・ネットワークによる非エルゴード地震動予測式

Nonergodic Ground Motion Prediction Model Using Artificial Neural Networks

*岡崎 智久[1]、森川 信之[2]、岩城 麻子[2]、藤原 広行[2]、上田 修功[1]
*Tomohisa OKAZAKI[1], Nobuyuki MORIKAWA[2], Asako IWAKI[2], Hiroyuki FUJIWARA[2], Naonori UEDA[1]

1. 国研）理化学研究所　革新知能総合研究センター、2. 防災科学技術研究所
1. RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震動予測式（距離減衰式）は、地震・観測点に関する少数の説明変数から強震動強さを推定する経験式であり、主に回帰分析による研究が進められてきた。地震動予測式は確率論的地震ハザード評価において重要な役割を持つ。2000年頃より地震・観測点の地理的位置を明示的に考慮する非エルゴード的予測式が、稀少な地震動に対するハザード評価において本質的であることが認識され、非エルゴード的予測式の開発が活発に行われている。

最近では機械学習のニューラル・ネットワークによるモデル化が多数提案されているが、その大部分は地理的位置を考慮しないエルゴード的予測式である。Okazaki et al. (2021, BSSA)は、観測点をone-hotベクトルで入力するサイト特定モデルを提案し、過適合を抑制しつつ観測点固有の特性を学習できることを示した。しかし、学習されたサイト特性には、震源・伝播経路の特性が含まれていることが観察された。

本研究では、ニューラル・ネットワークにより地震・観測点位置を指定するパス特定モデルの構成を試みた。その際、各特性の寄与を分離できるように、エルゴード的予測式・震源項・伝播経路項・サイト項を逐次的にモデル化した。発表においては、各項が示す地震学的知見について議論を行う。

© 日本地震学会

AN-netで得られた近地地震記録の解析と数値モデリング

Analysis and numerical modeling of local earthquake records obtained by the AN-net

*中原 恒[1]、関根 秀太郎[2]
*Hisashi NAKAHARA[1], Shutaro Sekine[2]

1. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2. 地震予知総合研究振興会
1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Association for the Development of Earthquake Prediction

はじめに　AN-net（関根・他，2010）は，（公財）地震予知総合研究振興会により新潟県長岡地域の40カ所に展開された地震観測網で，ボアホール内に加速度計と速度計，地表に加速度計が設置されている．観測点間隔は5㎞から10㎞と小さく，やや長周期の地震波であればコヒーレントな伝播過程を調べることが可能であると期待される．そこで本研究では，観測網周辺で発生したM6程度の中規模地震を対象に，AN-netと防災科研K-NET, KiK-netで観測された表面波の伝播の特徴をまとめ，地震波伝播の数値モデリングにより，その特徴を再現することを試みた．

データ解析・結果 解析に使用した地震は２つで，2013年2月25日栃木県北部の地震（Mj6.3）と2019年6月18日山形県沖の地震（Mj6.7）である．一つ目の地震はAN-netから西に位置し，震央距離は60-120㎞程度である．2つ目の地震は，AN-netから北に位置し，震央距離は100-170km程度である．AN-netの地表の加速度記録，防災科研KiK-netの地表の加速度記録，K-NETの加速度記録を使用した． データ解析として，レコードセクションの確認，ランニングスペクトル解析，最大振幅や卓越周波数の空間分布の推定，粒子軌跡の計算，センブランス解析による位相速度と到来方向の推定，を行った． レコードセクションでは，長岡平野のAN-netの観測点ではやや長周期地震動の継続時間が伸びていることを確認できる．後続波の伝播は結構複雑で，平野内の往復するような様子を視認することは難しい．最大速度振幅は，AN-netの観測点の間で最大1桁程度変化している．その空間分布は，同じ周波数帯では，上下動成分のほうが水平動成分よりやや複雑な分布を示すように見える．後続波のスペクトルは，周波数0.2-0.6Hz程度が卓越することがわかり，長岡平野の北部では低く，南部では高い傾向にある．北に向かって地震基盤等の境界面の深さが深くなるためと推察される．この傾向は3成分すべてで確認されるが，特に上下動ではっきりと見える．水平動成分の表面波ではレイリー波とラブ波双方の寄与があるが，上下動成分ではレイリー波のみの寄与のためだと考えられる．また，隣接する複数の観測点を地震計アレイと見なしたセンブランス解析により，後続波部分では見かけ速度が概して1km/sより遅く0.5km/sに近い場合もある．表面波の卓越が考えられる．また到来方向は，最初は震源方向からの入射が見られるが，時間が経過するにつれて震源とは逆方向から入射するフェイズも見られるようになり，散乱された表面波であると考えられる．

数値モデリング 数値モデリングにはOpenSWPC（Maeda et al.,2017）を使用した．地震波速度構造はJIVSM（Koketsu et al., 2012）に基づく．点震源を仮定し，防災科研F-netのモーメントテンソル解を採用した．震源時間関数はKupper型とし，継続時間はGlobal CMT解のHalf-durationを2倍して用いた．現在は，グリッドサイズ0.2㎞，時間ステップ0.01sとして，最大周波数0.35Hz程度まで計算している．計算波形は観測波形に比べると比較的単純な形状をしている．そのため，レコードセクションを作成すると，観測とは異なり，震源方向から長岡平野に入射し平野の端で逆方向に向かって伝播していく様子を見つけやすい．最大速度振幅の空間分布については，低周波成分はそれなりに再現できている．しかし，高周波になるにつれて，観測と数値計算とのずれが出てくる．後続波のみかけ速度については，1km/sより遅い波が再現される．観測と数値計算で相違が出てくるのは，震源時間関数がもっと複雑であるのか，点震源の仮定が不十分なのか，あるいは現実の3次元地震波速度構造がより小さい空間スケールまで不均質であるのか，このような可能性が考えら

© 日本地震学会

れる．今後，それぞれの影響について検討する予定である．

まとめ 本研究では，AN-netで観測された近地地震の波形の特徴をまとめ，数値モデリングによる再現を試みた．観測波形と計算波形との合わせこみにはまだ改良の余地が残っており，今後，震源時間関数や速度構造の調整を行う予定である．

謝辞　防災科学技術研究所のK-NET，KiK-netのデータを使用しました．また，地震波形の数値モデリングには，OpenSWPC（Maeda et al.，2017）と東京大学情報基盤センターのOakforest-PACSスーパーコンピュータシステムを使用しました．また，計算にあたっては，東京大学地震研究所共同利用 (2020-S-04) の助成を受けました．ここに記して感謝いたします．

© 日本地震学会

ポスター会場（1日目） | 一般セッション：S19. 地震一般・その他

2021年10月14日(木) 15:30 ~ 17:00 | P6会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S19P-01] 2016年熊本地震で誘発された大分県中部の地震の初動読み取りと震源決定

〇髙崎 雄大[1]、小松 正直[2]、渡邉 禎貢[2]、竹中 博士[3]、大島 光貴[4] (1.岡山大学理学部地球科学科（現所属：気象庁）、2.岡山大学大学院自然科学研究科、3.岡山大学学術研究院自然科学学域、4.清水建設)

15:30 ~ 17:00

[S19P-02] 「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」：これまでの成果と今後の計画

〇小平 秀一[1]、藤原 広行[2]、高橋 成実[1,2] (1.海洋研究開発機構、2.防災科学技術研究所)

2016年熊本地震で誘発された大分県中部の地震の初動読み取りと震源決定

Picking of P and S waves and hypocenter determination of the Oita earthquake triggered by the 2016 Kumamoto earthquake

*髙崎 雄大[1]、小松 正直[2]、渡邉 禎貢[2]、竹中 博士[3]、大島 光貴[4]
*Katsuhiro Takasaki[1], Masanao Komatsu[2], Tomotsugu Watanabe[2], Hiroshi Takenaka[3], Mitsutaka Oshima[4]

1. 岡山大学理学部地球科学科（現所属：気象庁）、2. 岡山大学大学院自然科学研究科、3. 岡山大学学術研究院自然科学学域、4. 清水建設
1. Department of Earth Sciences, Okayama University (Current Affiliation: Japan Meteorological Agency), 2. Department of Earth Sciences, Okayama University, 3. Department of Earth Sciences, Okayama University, 4. Shimizu Corporation

2016年4月16日の熊本地震本震(M_{JMA}7.3)で誘発された大分県由布市の地震(M_{JMA}5.7) は、本震の後続波の影響で震源決定のために必要なP波、S波の初動読み取りの気象庁検測値データが少なく、その精度も良くない. 本研究では気象庁検測値がない観測点を含む大分県の観測点の波形記録から誘発地震の初動読み取りを行い、震源を再決定した.

波形記録は、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net、気象庁震度計、大分県内の自治体震度計によるものを使用した. P波、S波の読み取りには Oshima and Takenaka (2020, BSSA)の地震波振幅の確率密度関数に基づくP波、S 波のピッキング手法を用いた. この手法では記録された波形振幅の確率密度関数とランダム性の高い波の振幅分布に従うレイリー分布及びガウス分布との時間経過に伴う非類似性の変化をKullback-Leibler divergenceを計算して評価する. Kullback-Leibler divergenceはP波、S 波の初動部分で大きくなるため、それらの到達時間を検出できる. この方法で得られたP波、S 波の読み取り値を使用して、震源決定を行った. 気象庁が推定した震央周辺を水平方向、深さ方向にグリッドサーチし、観測点間の理論走時と読み取り走時の残差二乗和のRMSが最小となる点を震源とした. 理論走時の計算には気象庁の走時表（JMA2001）を用いた. なお、走時の観測点補正値は2016年04月29日に発生したM_{JMA}4.5の余震記録を使用し、各観測点の波形からP波、S波の初動を目視で読み取り、理論走時との差を計算することによって求めた. 余震の震源情報は、小割（2020, 岡山大学修士論文）によるものを用いた.

結果をFigure 1に示す. Figure 1(a)は、S波の検出例を示す. 誘発地震のS波の初動付近に明瞭なピークが見られる. Figure 1(b)は、震源決定の結果を示す. 本研究における震央は、気象庁が推定した震源より南西方向の由布院断層の西端付近に求められた. 誘発地震発生後、由布院断層沿いに余震が発生している（小割, 2020, 岡山大学修士論文）ことから、大分誘発地震は由布院断層の活動によって発生したと考えられる.

謝辞
本研究では防災科学技術研究所（K-NET、KiK-net）、気象庁、大分県の震度観測網の観測波形記録及び気象庁一元化処理震源データを使用させて頂きました. 誘発地震の余震の震源情報は、小割（2020, 岡山大学修士論文）によるものを使用させて頂きました.

© 日本地震学会

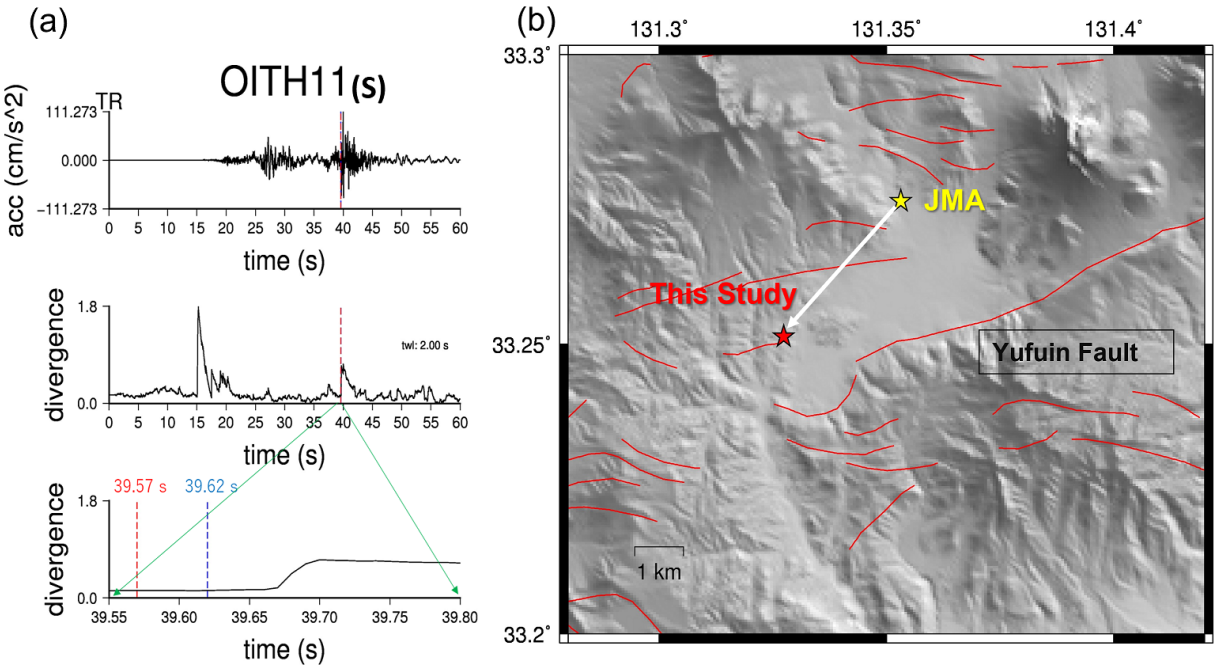


Figure 1. (a) An example of S-wave picking in OITH11. Red and blue dashed lines indicate arrival times of S-wave picked in this study (39.57 s) and reported by JMA (39.62 s), respectively. (b) Location of the triggered earthquake in this study. Red and yellow stars denote epicenters determined in this study and reported by JMA, respectively. Each of Red lines indicates the active fault in this region.

© 日本地震学会

「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」：これまでの成果と今後の計画

Research Project for Disaster Prevention on the great Earthquakes along the Nankai trough: Result and plan

*小平 秀一[1]、藤原 広行[2]、高橋 成実[1,2]
*Shuichi KODAIRA[1], Hiroyuki Fujiwara[2], Narumi Takahashi[1,2]

1. 海洋研究開発機構、2. 防災科学技術研究所
1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

最近の研究成果により南海トラフにおける多様な巨大地震発生様式や複雑なプレートすべり・固着の現状が指摘され、それら科学的な知見や観測データを取り入れた防災対応の検討が求められている。本プロジェクトは、南海トラフ地震に備えるため、2020年度より5カ年計画の予定で開始され、現在、以下の三つの課題を実施している。
「課題１地殻活動情報創成研究」目的：南海トラフの地殻活動の現状や通常と異なる現象を観測した際に、それら観測情報を迅速かつ精度よく評価し情報発信する手法を開発する。取り組み：最新の観測データに基づいて南海トラフ地震発生帯の海陸統合３Dモデルを構築し、そのモデルと海陸統合地震・地殻変動データを活用した地震活動・プレート固着すべりの現状把握・推移予測を行うシステムを構築する。
「課題２地震防災情報創成研究」目的：発信された情報を被害軽減に最大活用するためのシステムを構築し、平時や通常と異なる現象が観測された場合、防災対策のあり方、実行方策について検討する。取り組み：巨大地震や通常と異なる現象発生の多様性も取り込んだ地震や津波ハザードやリスクの防災情報基盤を創生し、それら情報を活用し、”命、地域産業、都市機能“を守るための総合的な研究を実施する。
「課題３創成情報発信研究」目的：課題１，２等で進めた研究成果が被害軽減の向上にどのように貢献したか定量的な評価を行い、地域防災・減災計画に向けた効果的な研究開発項目を明らかにする。取り組み：地域での情報発信検討会等を通して、地域防災力の向上のために事前準備、災害時対応、災害後対応の各ステージで地域防災に活用するための情報発信の在り方を検討する。
さらに、プロジェクト成果の最大活用に向けて、防災情報基盤で活用するための地震発生シナリオや地震発生帯モデルの構築などの課題間連携の強化も進めている。本発表ではこれら課題間連携の検討結果を含み、本プロジェクトのこれまでの成果と今後の計画について報告する。

© 日本地震学会

ポスター会場（1日目） | 特別セッション：S21. 震源物理・地下構造推定・強震動評価のための地震波スペクトル解析

2021年10月14日(木) 15:30 ~ 17:00 | P7会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S21P-01] 自己回帰モデルによるスペクトル解析を用いた地盤増幅率の周波数特性評価の試行

○鎌谷 紀子[1]、小木曽 仁[1] (1.気象研究所)

15:30 ~ 17:00

[S21P-02] 福島県沖の中規模地震の震源スペクトルに基づく破壊伝播効果

○佐藤 智美[1] (1.清水建設㈱技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S21P-03] 茨城県・千葉県東方沖における小地震の応力降下量解析：太平洋プレート上の摩擦特性の空間不均質性の推定

○増田 掌[1]、山田 卓司[1] (1.茨城大学)

自己回帰モデルによるスペクトル解析を用いた地盤増幅率の周波数特性評価の試行

Preliminary analysis of frequency response of ground amplification by spectral analysis with autoregressive model

*鎌谷 紀子[1]、小木曽 仁[1]
*Noriko KAMAYA[1], Masashi OGISO[1]

1. 気象研究所
1. Meteorological Research Institute

１．はじめに

精度の高い強震動即時予測を実現するためには、予測対象地点のサイト特性を考慮する必要がある。そのサイト特性として、周波数に依存するサイト増幅係数を使用することの有効性が既往研究により示されている（例えばHoshiba (2013)やOgiso *et al.* (2016)）。それらのサイト増幅係数を算出する際に使われているのは高速フーリエ変換（FFT）であるが、FFTでスペクトルを求める場合、分析可能な最低周波数を引き下げるためには時間窓長を延ばす必要があり、短時間のシグナルデータから低周波のスペクトルを算出するのは難しい。また、FFTでは周波数軸で等間隔の分析結果が得られるため、低周波側は疎なデータになる。これに対し、過去のデータを元に将来のデータを予測するために使われる自己回帰（AR）モデルは、モデルの推定の際にスペクトルが得られ、そのスペクトルにはFFTにあるような制限がない。そこで、長周期地震動を含む地震動即時予測の精度向上のため、ARモデルによるスペクトル解析を用いた、地盤増幅率の周波数特性評価を試行した。

２．解析手法

北海道のKiK-net白糠南（KSRH09）観測点の、地表置き（標高27m）及び地下置き（深度100m）の強震計において観測された加速度データ（計６成分）の、8イベントのP波10秒間及び9イベントのS波20秒間のデータについてARモデルとFFTによるスペクトルを求め、地表と地下のスペクトルの振幅比を算出した（図１）。サンプリングレートは、2002年と2003年のイベントは200Hz、それら以外は100Hzである。ARモデルの係数は、Yule-Walker法で求めた。Yule-Walker法では、あらかじめARモデルの次数を決める必要があるので、最適次数を求めるために次数ごとの赤池情報量規準（AIC）を算出した。そうしたところ、次数が大きいほどAICが小さい傾向を示したこと（図２）や、低次のARモデルによるスペクトルは特に低周波領域で平滑化することから（図３）、取り得る最大次数（解析対象サンプル数－２）をARモデルの次数として用いることにした。なお、高次数のARモデルによるスペクトルは、FFTによるスペクトルと良く似た形状になる。今回の解析ではプログラミング言語pythonを使い、FFTは拡張モジュールNumPyのfft.fft()、AICはStatsmodelsのar_select_order().aic、Yule-Walker法に必要な自己相関はPandasのautocorrを使用して算出した。

３．結果

解析の結果、KSRH09観測点の地表/地下のスペクトルの振幅比は、ARモデルとFFTで大きな違いはないことや、詳しく見ると以下の傾向があることが分かった（図４）。

・P波（NS成分）：ほぼ全ての周波数領域において、ARモデル<FFT
・P波（EW成分）：ほぼ全ての周波数領域において、ARモデル≈FFT
・P波（UD成分）：ほぼ全ての周波数領域において、ARモデル<FFT。特に低周波領域において顕著。
・S波（NS成分）：高周波領域以外では、ARモデル>FFT。特に低周波領域において顕著。
・S波（EW成分）：ほぼ全ての周波数領域において、ARモデル≈FFT
・S波（UD成分）：ほぼ全ての周波数領域において、ARモデル<FFT

また、低周波領域において、ARモデルの方がFFTよりもイベントごとのばらつきが大きいように見えた。

© 日本地震学会

４．今後に向けて

今後は解析対象観測点を増やし、ARモデルによる地表/地下のスペクトル振幅比の持つ性質の検出とその原因の考察を行い、ARモデルのスペクトルが特に低周波領域での地盤増幅特性の評価に有効であるかどうか、検討していく予定である。

[謝辞]

国立研究開発法人防災科学技術研究所のKiK-netのデータ(防災科学技術研究所、2019)を使用させていただきました。ここに記して感謝いたします。

[参考文献]

Hoshiba M (2013) Real-time correction of frequency-dependent site amplification factors for application to earthquake early warning. Bull Seismol Soc Am 103:3179–3188. doi:10.1785/0120130060

Ogiso M, Aoki S, Hoshiba M (2016) Real-time seismic intensity prediction using frequency-dependent site amplification factors. Earth, Planets and Space 68:83. doi:10.1186/s40623-016-0467-4

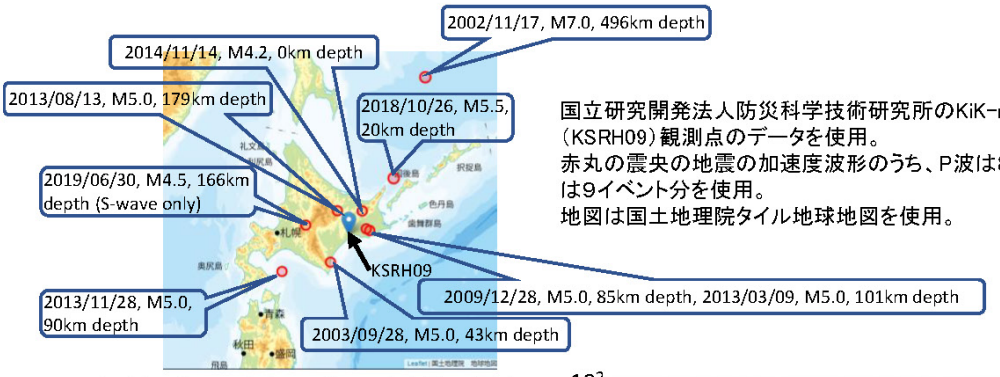
防災科学技術研究所 (2019) NIED K-NET, KiK-net. doi: 10.17598/nied.0004

© 日本地震学会

自己回帰モデルによるスペクトル解析を用いた地盤増幅率の周波数特性評価の試行

Preliminary analysis of frequency response of ground amplification by spectral analysis with autoregressive model

鎌谷紀子・小木曽仁（気象研究所）



国立研究開発法人防災科学技術研究所のKiK-net白糠南（KSRH09）観測点のデータを使用。
赤丸の震央の地震の加速度波形のうち、P波は8イベント、S波は9イベント分を使用。
地図は国土地理院タイル地球地図を使用。

図1. 解析に使用した観測点及び地震の震央

図2. ARモデル推定に使用する次数とAICの関係
次数が大きいほどAICが小さくなる。（2002/11/17のイベントのS波20秒間のNS成分を使用。サンプリングレートは200Hz, サンプル数は4000。）

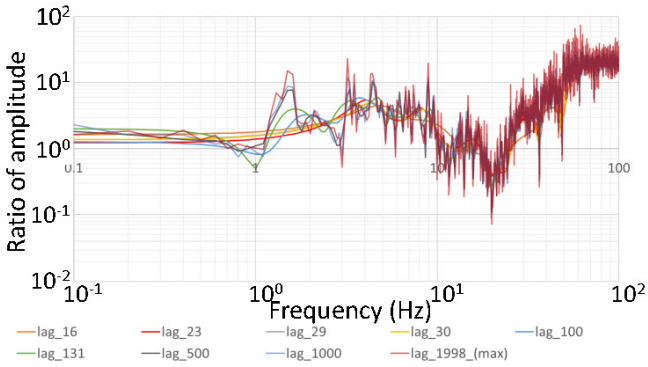


図3. ARモデルのスペクトルで見た地表/地下の振幅比の次数による違い
低い次数のARモデルのスペクトルは平滑化した形状を呈するので、地表/地下の振幅比のグラフも平滑化したものになる。特に低周波領域では低次数での平滑化の度合いが大きくなり、次数による振幅の違いが大きくなる。（2002/11/17のイベントのP波10秒間のNS成分を使用。サンプリングレートは200Hz, サンプル数は2000。）

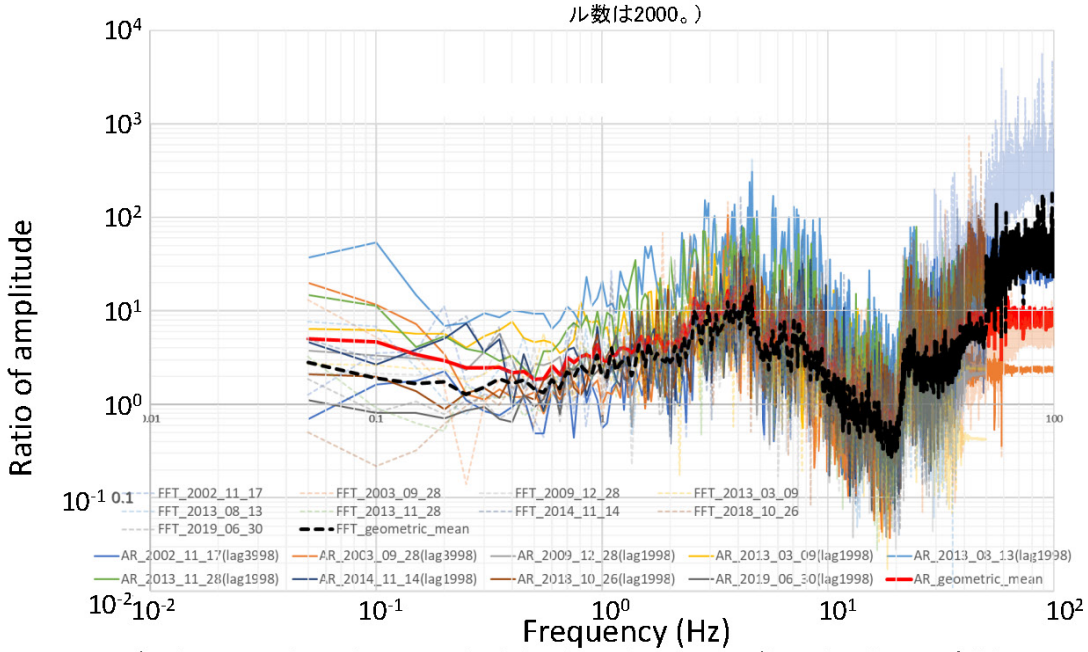


図4. ARモデルとFFTによるスペクトルで見た地表/地下の振幅比の比較（S波20秒間NS成分）
実線はARモデル、点線はFFTによるスペクトルから算出した地表/地下の振幅比。赤実線と黒点線は、それぞれARモデル及びFFTによる振幅比の幾何平均（相乗平均）を示す。振幅比はARモデルとFFTで大きな違いはないが、S波20秒間のNS成分のデータを使用した解析では、ARモデルは高周波領域以外ではFFTよりやや大きめであり、特に低周波領域においてその傾向が顕著であることが示された。

© 日本地震学会

福島県沖の中規模地震の震源スペクトルに基づく破壊伝播効果

Rupture propagation effects of moderate-sized earthquakes off Fukushima prefecture derived from source spectra

*佐藤 智美[1]
*Toshimi SATOH[1]

1. 清水建設㈱技術研究所
1. Shimizu Corporation

本研究では、2016年8月から観測が開始されたS-netとK-NET、KiK-netの強震記録を用いて、2021年2月13日の福島県沖の地震(Mw7.0)の震源域の11の中規模地震の破壊伝播方向と震源スペクトルに寄与する破壊伝播効果について検討した。2016年8月から2021年3月までの震源深さ40～60kmの地震であり、本震と同タイプ(down-dip compression)の4つのスラブ内地震(Mw4.4-5.0)と7つのプレート境界地震(Mw4.7-6.3)を対象とした。このMwの範囲は、本震の強震動生成域を経験的グリーン関数法で推定するための要素地震の選択を念頭においたものである。震源距離150km以下の水平成分のS波部を対象とし、最大加速度が200cm/s2以上のデータは対象外とした。RT変換し、フーリエ振幅の2乗和の平方根を検討対象とした。 基準地震に対する同一観測点での他の地震のフーリエ振幅スペクトル比を距離補正して、観測震源スペクトル比を算出した。そして、すべり量とライズタイムが一定でユニラテラル破壊を仮定し、コーナー周波数より高周波数の震源スペクトル比が破壊伝播方向と震源での波線の方向のはさむ角に依存するモデルを用いて、破壊伝播方向を推定した。基準地震及び他の10地震の破壊伝播方向を-170°～180°を10°刻みで与えて、基準地震と他の10地震の断層面内での破壊伝播方向を、観測震源スペクトル比をターゲットにグリッドサーチで推定した。7つの周波数帯域(0.2-0.5、0.5-1.0、1-2、2-3、3-5、5-7、7-10Hz)で算出した観測震源スペクトル比は1-5Hzで方位依存性が大きく、特に、2-3Hzで顕著であった。観測震源スペクトル比から推定された対象地震のコーナー周波数は、ほとんどの地震で1-4Hzであることから、大規模地殻内地震で指摘されているディレクティビティパルスの周期の地震規模依存性と同様に、地震規模に依存していると考えられる。一方、0.2～0.5Hzの観測震源スペクトル比はラディエーションパターンの方位依存性と類似していた。そこで、本研究では、2-3Hzの観測震源スペクトル比を破壊伝播方向を推定した。なお、基準地震との方位角の差が45°以上のデータは除いた。S波速度に対する破壊伝播速度の比は0.7と0.8のケースを検討し、差は極めて小さいものの観測との残差が小さい方の0.7を用いた。 モデルスペクトル比は、観測震源スペクトル比の方位角依存性を震源距離150kmまで良く再現しており、4つのスラブ内地震はupdip方向の破壊伝播が推定された。すなわち、西の陸側に向かう伝播方向である。一方、プレート境界地震は5つはupdip方向、2つはdowndip方向の破壊伝播が推定された。downdip方向に伝播した1地震は、pure updip方向であるが、他の1地震はほぼ水平に近い方向であった。この水平に近い破壊伝播の地震と5つのupdip方向の破壊伝播の地震は、南方向に近い破壊伝播である。pure updip方向の破壊は、震源から西の陸側に向かう伝播方向である。4つのスラブ内地震の全無限弾性体のSV波とSH波の2乗和の平方根のラディエーションパターンは、いずれも震源の西側の陸域で大きく、破壊伝播でスペクトルレベルが大きくなる領域と重なっていることがわかった。したがって、観測震源スペクトル比は全観測点での平均より、陸域の観測点での平均が大きくなり、S-netでの平均は小さくなっている。陸域の観測点での平均をターゲットに短周期レベル(コーナー周波数より高周波数側の加速度震源スペクトルの一定レベル)を推定した結果、全観測点での平均をターゲットにした場合の2倍程度大きい値が推定された。一方、プレート境界地震のラディエーションパターンが大きくなる領域は、陸域では沿岸部ではなく震源から遠い内陸部であり、破壊伝播効果によりスペクトルレベルが大きくなる領域はほとんど重なっていない。したがって、陸側に破壊伝播する1地震を除き、全観測点での平均をターゲットにした場合と陸域の観測点での平均をターゲットにした場合の短周期レベルの違いはほとんどなかった。2021年福島県沖の地震が震源から同心円状に破壊したとすると、1日以内の余震分布や震源インバージョンによるすべり量の大きな領域に対応す

© 日本地震学会

る破壊伝播方向に近いのは、2017年7月15日のスラブ内地震(Mj4.6)であり、全観測点の観測震源スペクトル比から推定されたコーナー周波数は3.16Hz、Bruneの応力降下量は27MPaであった。 謝辞：本研究では防災科学技術研究所のS-net、K-NET、KiK-net、F-net、気象庁の一元化震源情報を用いました。

© 日本地震学会

茨城県・千葉県東方沖における小地震の応力降下量解析：太平洋プレート上の摩擦特性の空間不均質性の推定

Stress drops of small earthquakes off the east coast of Ibaraki and Chiba Prefectures: Spatial heterogeneity in frictional properties on the subducting Pacific Plate

*増田 掌[1]、山田 卓司[1]
*Tsukasa Masuda[1], Takuji Yamada[1]

1. 茨城大学
1. Ibaraki University

1. はじめに
茨城県・千葉県東方沖では、太平洋プレートの沈み込みに伴う地震が定常的に多数発生している。本研究では、2003年1月から2019年12月の期間に茨城県沖・千葉県東方沖で発生した小地震 (4.2 <= Mw <= 5.0) のうち、2. で説明するとおり、太平洋プレートの摩擦特性を反映していると考えられる576地震について、S波を用いて応力降下量を解析した。

2. 解析対象地震と解析手法
2003年1月から2019年12月に茨城県沖・千葉県沖で発生した 4.2 <= Mw <= 5.0 の地震の内、震源が太平洋プレート上面から15 km以内の地震について、Yamada *et al.* (2021)の手法を用いて応力降下量を解析した。まず、各解析対象地震に最も震源の近いMw 3.5の地震の観測波形を経験的グリーン関数とした。また、周波数領域にて解析対象地震の観測波形を経験的グリーン関数の波形で除し、観測点ごとにスペクトル比を求めることにより、震源の情報を抽出した。次に、地震の震源スペクトルはオメガ2乗モデル（Boatwright, 1978）に従うと仮定し、スペクトル比から解析対象地震および経験的グリーン関数地震のコーナー周波数を求めた。さらに、Madariaga (1976) の円形断層モデルに従って、コーナー周波数から応力降下量を推定した。この操作を解析対象地震すべてについて実行し、576地震の応力降下量を求めた。

3. 結果および考察
緯度経度0.1度ごとに平滑化した応力降下量の解析結果を図1に示す。茨城県中部沖 (図1. の領域A) で応力降下量の値が大きく、スロースリップの発生が報告されている千葉県沖 (領域B) で小さい特徴が見られる。この領域AとBの応力降下量の差は、t検定より危険率5%で有意な差であることが確認できた。また、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域 (図1. の領域C) では、応力降下量の値が大きい。これは、過去の大地震大すべり域で応力降下量が大きいと主張しているYamada *et al.* (2017) の結果と調和的であり、応力降下量の空間分布から剪断強度の不均質性の推定ができると主張しているYamada *et al.* (2021) の結果を支持する。今後、P波についても解析を行うとともに、応力降下量の時間変化の有無を確認しながら、摩擦特性の時間変化についても議論したい。

謝辞：本研究では、Hi-net （防災科学技術研究所）、気象庁、国土地理院、国立大学の観測点の地震波形データと、気象庁の一元化震源およびP, S検測値を使用しました。記して感謝いたします。

© 日本地震学会

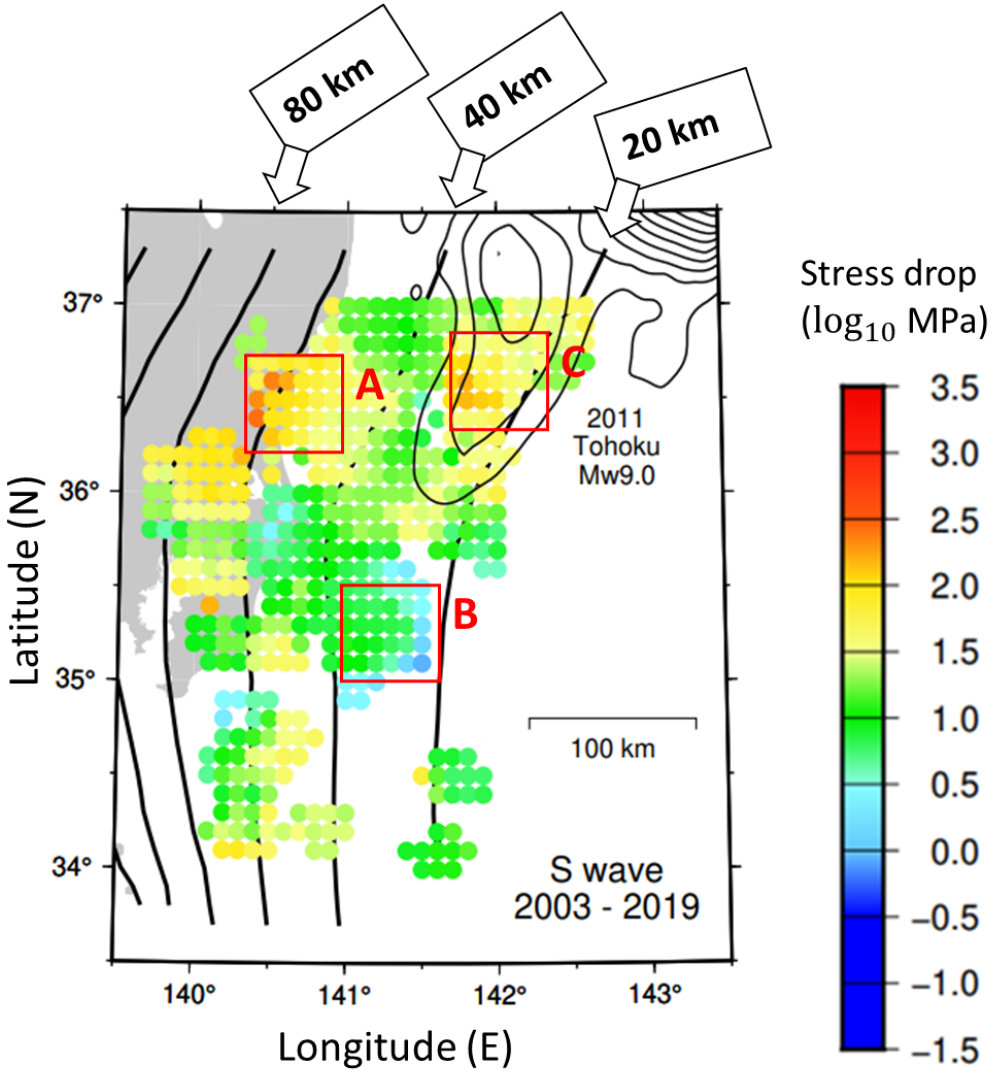


図１． S波の解析から得られた応力降下量の空間分布。グリッドポイント間隔は緯度経度0.1度ごとである。各グリッドポイントの値は、グリッドポイントから半径20 km以内の地震の応力降下量の平均値を示す。黒のコンターは、2011年東北地方太平洋沖地震のすべり分布を示し、その間隔は2 mごとである(Iinuma *et al.*, 2012)。太い黒線は、沈み込む太平洋プレート上面の深度を表しており、線間隔は20 kmである(Kita *et al.* 2010; Nakajima and Hasegawa 2006; Nakajima *et al.* 2009) 。

© 日本地震学会

ポスター会場（1日目） | 特別セッション：S22. AIによる地震学の発展

2021年10月14日(木) 15:30 ~ 17:00 | P8会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S22P-01] 箱根火山における機械学習を用いた地震波検測の性能評価

〇金 亜伊[1]、中村 勇士[1]、畠山 海[1]、上松 大輝[1]、行竹 洋平[2]、安倍 祐希[3] (1.横浜市立大学、2.東京大学地震研究所、3.神奈川県温泉地学研究所)

15:30 ~ 17:00

[S22P-02] 室内水圧破砕実験で誘発された微小破壊のモーメントテンソル解析を目的とした深層学習によるP波初動振幅読み取り

〇直井 誠[1]、陳 友晴[1]、田中 塁[1]、有馬 雄太郎[2] (1.京都大学、2.独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構)

15:30 ~ 17:00

[S22P-03] 機械学習法による早期地震警報における単独観測点処理の改良

〇野田 俊太[1]、鵜飼 正人[1] (1.鉄道総合技術研究所)

箱根火山における機械学習を用いた地震波検測の性能評価

Validation of Seismic Phase Picking Using Deep Learning Models Trained by Hakone Volcanic Earthquake Data

*金 亜伊[1]、中村 勇士[1]、畠山 海[1]、上松 大輝[1]、行竹 洋平[2]、安倍 祐希[3]
*Ahyi KIM[1], Yuji Nakamura[1], Umi Hatakeyama[1], Hiroki Uematsu[1], Yohei Yukutake[2], Yuki Abe[3]

1. 横浜市立大学、2. 東京大学地震研究所、3. 神奈川県温泉地学研究所
1. Yokohama City University, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Hot Springs Research Institute, Kanagawa

火山地帯では度々火山活動に関連した活発な群発地震が発生し、それらの迅速な検出、検測は火山防災において非常に重要である。しかし現在、これらのプロセスは最終的には人間の判断に委ねられ、膨大な時間とコストを要し、リアルタイムでの詳細な検証は不可能である。本研究ではこの問題を解決するため、近年多くの地震観測で研究が進んでいる機械学習の適用を試みた。現在、すでに膨大な訓練データ（主に地殻内地震）を用いた学習済みモデルがいくつか公開されている。それらをそのまま適用しても問題無い事例もあるが、検出精度が有意に悪くなる例も報告されている。本研究のターゲットは火山地帯という特殊な地域で発生する地震であるので、既存の学習済みモデルが適用が難しい可能性がある。そこで、本研究ではZhu and Beroza(2018)によって構築されたPhaseNetの学習済みモデル（model0）と、そのアーキテクチャを利用して、箱根火山で記録された1999年から2020年までの約3万個のイベントから約22万個の地震波形データを用い、ゼロから学習を行ったモデル（model1）とmodel0を初期値に前述の箱根データでファインチューニングしたモデル（model2）を作成し、その性能評価を行った。model1とmodel2の学習では220424個の地震波形をランダムに振り分け、75%を訓練データ、25%を検証用データとして用い、epoch100まで計算を繰り返し各モデルのパフォーマンスを検証した。その結果model1ではepoch8で、model2ではepoch89でF1値が最高となり、それぞれ、P波で0.870, 0.867, S波で0.782, 0.776という、わずかにmodel1で高いが、ほぼ同じ結果になった。同じ検証用データを用いてmodel0でのF1値を計算したところ、P波で0.832、S波で0.707となり、主にS波で大きな改善が見られた。また、これらのモデルを訓練にも検証にも用いていない2021年1月から5月まで記録された947個の波形に適用したところ、model0, model1、 model2でそれぞれ、P波、0.916、0.942、 0.941、S波、0.760, 0.817、0.814という結果になった。検証用データの時と同様にmodel1とmodel2でわずかにmodel１が良い値を示し、model0に比べて箱根の訓練データを用いて学習したモデルで良いパフォーマンスを示す事がわかった。検証用データで全体的に性能が落ちるのは2009、2011、 2015年の非常に活発な群発地震のデータを多く含むためである可能性がある。本研究では訓練データに多様性を持たせるために、オリジナルのPhaseNetでの訓練データ作成方法を踏襲し、波形をある程度長く（90秒）切り出し、そこからP、S波を含む30秒をランダムに切り出して訓練、検証用データとしている。しかし活発な群発地震では90秒の間でも他の地震が入り込むことがあり、判定の正誤検証に問題を招く場合がある。今後はそのような短いタイムウィンドウに多数のイベントを含むデータについて、該当箇所をノイズで置き換えるなどの処理を施し、再度学習検証を行う予定である。また、このモデル他の火山地帯での地震にも適用し、火山地帯の地震波検測への汎用化の可否を検証する。

© 日本地震学会

室内水圧破砕実験で誘発された微小破壊のモーメントテンソル解析を目的とした深層学習によるP波初動振幅読み取り

Automatic reading of P-wave first motion amplitudes of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory using a deep learning technique

*直井 誠[1]、陳 友晴[1]、田中 塁[1]、有馬 雄太郎[2]
*Makoto NAOI[1], Youqing CHEN[1], Rui TANAKA[1], Yutaro ARIMA[2]

1. 京都大学、2. 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構
1. Kyoto Univ., 2. JOGMEC

指向性が公表されておらず，設置状態によって感度が変化するAEセンサの記録に対しては，振幅を用いた解析は簡単ではないが，これらの特性を適切に補正することで個々のAEイベントのモーメント・テンソル解（以下MT解）を推定できる．Yamamoto et al. (2019; GJI), Naoi et al. (2020; GJI), Tanaka et al. (2021; GJI)では，シェールガス・オイル開発における水圧破砕亀裂進展プロセスの解明を目的とした室内実験で記録されたAEに対し，P波初動極性・振幅を読み取り，個々のセンサ感度及び指向性を補正して逆解析を行うことで，MT解の推定に成功している．

Yamamoto et al. (2019)，Naoi et al. (2020)では，解析対象となるイベントが１供試体あたり多くても数百個程度だったため，極性・振幅は手動で読み取られたが，Tanaka et al. (2021)では，１供試体あたり数千個，合計10供試体で５万個に及ぶAEイベントを解析対象としており，手動処理は不可能であった．そこでTanaka et al. (2021)では，１次元の畳み込みニューラルネットワークを用いて up, downの二値分類問題としてP波の初動極性を読み取り，結果がup（down）であれば理論走時周辺の波形の最大（最小）値を初動振幅値とする，という方法で逆解析に用いる振幅値を取得した．しかし，この方法には，１）理論P波走時と初動ピーク値を取るタイミングの差が大きい場合に振幅値を誤って読み取る可能性が高い，２）波形のどの場所を参照したかの情報は得られないので，特にSN比が低い波形において，波形を目視で確認しても読み取りの妥当性が判断し難い，３）訓練・検証は SNの良い波形を用いて行っているのに対し，実際の推論はよりSNが悪いものに対しても適用しているので，検証データで得られた性能指標が，実際に適用する場合の読み取りの精度を表していない，という問題があった．

そこで本研究では，初動極性ではなく，初動ピーク値をとる時刻を読み取る深層学習ネットワークを構築し，訓練・検証・テストに，SNの良い波形とノイズ波形を合成したものを用いることで，上記の問題を改善して，MT解析に必要な初動振幅値を取得することを試みた．解析には，Zhu and Beroza (2019)が実体波の走時検測に用いたものと類似したUnet型（Ronneberger et al. 2015）のアーキテクチャを採用した．ネットワークへの入力は，10 MHz samplingで収録されたP波走時前後512 サンプルの波形を用いた．出力は512サンプルの波形の各ポイントがP波の初動ピーク時刻に対応する確率値とし，教師データにおいては，読み取り初動ピーク値のタイミングで１の値を持つ，幅1.0 μs（10サンプル）の三角形形状の確率値を与えて訓練を実施した．

訓練・検証・テストデータは，Naoi et al. (2020)が実施した米国産イーグルフォード頁岩で行った2実験，Tanaka et al. (2021)で実施した山口県産黒髪島花崗岩で行った10実験，及び新たに実施した香川県産庵治花崗岩で行った1実験で得られたAEデータの中からSN比が良い波形を選び，実験開始直後のAEシグナルが含まれていない時間帯のノイズ記録を合成することで作成した．このとき，シグナルが含まれている波形に適当

© 日本地震学会

な倍率をかけて振幅を調整することで，さまざまなSN比の波形を再現した．また，訓練データの作成においては，各シグナル波形に対して10個のノイズ波形と組み合わせることでデータを水増しし，合計423 732個の波形データを用意した．訓練後のネットワークをテストデータに適用した結果に対し，出力スコアの最大値が0.5以上でかつ読み取り時刻の走時差が2サンプル以下のものを正解と定義して性能を評価した結果，precisionが0.888，recallが0.965，accuracy が0.866，F1値が0.925であった．なお，テストデータにはSN比が非常に低いイベントが含まれており，読み取り時刻の振幅値のプレシグナルに対するSN比が1.5以上という条件でデータを選別したところ，precisionは0.962まで上昇した．

本研究は独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC)，科研費 (16H04614；21H01191)，文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の援助により行われました.

© 日本地震学会

機械学習法による早期地震警報における単独観測点処理の改良

Improvement of the Single Station Algorithm in Earthquake Early Warning Using Machine Learning Technique

*野田 俊太[1]、鵜飼 正人[1]
*Shunta NODA[1], Masato UKAI[1]

1. 鉄道総合技術研究所
1. Railway Technical Research Institute

気象庁の緊急地震速報や新幹線の早期地震警報システムでは、それぞれの観測点ごとに震央距離・方位やマグニチュードを推定するアルゴリズムが使用されている（以下、単独観測点処理；例えば、Yamamoto & Tomori [2013]）。単独観測点処理における問題として、他の地震計のデータを使わずに独立して推定を行うため、震央距離などの推定精度が低いという点が挙げられる（ただしその代わり、警報の即時性が高いなどのメリットがある）。

以前の新幹線早期地震警報システムでは、震央距離の推定においてB-Δ法と呼ばれる手法を使用していた（Odaka et al. [2003]）。現在はこの手法を更新し、C-Δ法と呼ばれる手法の使用が始まっている（岩田・他 [2016]）。この手法は、P波の極初動部分（1秒）の10Hz以上の加速度振幅の立ち上がり（＝傾き：Cと呼ぶ）が震央距離Δと負の相関を持つことを利用したものである（Okamoto & Tsuno [2015]）。

本研究では、単独観測点処理において、このC-Δ法の代わりにニューラルネットワーク法（例えば、He et al. [2016]）を用いて震央距離を推定し、推定精度の検証を行った。手法の適用にあたって学習させたデータは、（国研）防災科学技術研究所の強震観測網K-NETで観測されたMj4.0以上かつ震央距離200km以内の16,562個（データ全体の80%）の上下動成分加速度データ（P波開始から2秒間）である。検証に使用したデータは同条件の4,161個のデータである（学習に使用していない残り20%のデータ）。なお学習用と検証用のデータは無作為に分割している。なお、ここでは検証のため、P波開始時刻は手動で検測したデータを用いている。

ここではニューラルネットワーク法として、畳み込みニューラルネットワーク法（He et al. [2016]）を用いた。これにより推定された震央距離の精度は、対数誤差RMSで約0.25となった。C-Δ法による震央距離の推定精度は同指標で約0.31であるため、畳み込みニューラルネットワーク法の使用により、精度が約19%向上することが明らかになった。なお岩田・他[2016]は、B-Δ法（Odaka et al. [2003]）からC-Δ法へ手法を更新した際、6%程度推定精度が向上することを指摘しているが、本研究ではこれと比較してさらに大きな精度改善が期待される結果を示している。

今後はさらなる震央距離推定手法の改善、震央方位やマグニチュードなどへの適用性の検証、および新幹線早期地震警報システムへの機械学習法の導入に向けた検討を継続する計画である。

© 日本地震学会

ポスター会場（1日目） | 特別セッション：S23. ベイズ統計学による地震データの解析と数理モデリングの深化

2021年10月14日(木) 15:30 ~ 17:00 | P9会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S23P-01] アジョイント法に基づく2003年十勝沖地震の余効すべりの現状把握と短期推移予測

〇加納 将行[1]、宮崎 真一[2]、石川 洋一[3]、平原 和朗[4,5] (1.東北大学大学院理学研究科　地球物理学専攻　固体地球物理学講座、2.京都大学理学研究科、3.海洋研究開発機構、4.理化学研究所、5.香川大学)

15:30 ~ 17:00

[S23P-02] MCMC法を用いた2004年新潟県中越地震震源域周辺の地震波速度分布の推定

〇椎名 高裕[1]、加納 将行[2]、倉田 澄人[3]、加藤 愛太郎[4] (1.産業技術総合研究所地質調査総合センター、2.東北大学大学院理学研究科、3.東京大学大学院情報理工系研究科、4.東京大学地震研究所)

アジョイント法に基づく2003年十勝沖地震の余効すべりの現状把握と短期推移予測

Adjoint-based direct data assimilation of GNSS time series for understanding the current state of postseismic deformation and its short-term prediction following the 2003 Tokachi-oki earthquake

*加納 将行[1]、宮崎 真一[2]、石川 洋一[3]、平原 和朗[4,5]
*Masayuki KANO[1], Shin'ichi Miyazaki[2], Yoichi Ishikawa[3], Kazuro Hirahara[4,5]

1. 東北大学大学院理学研究科　地球物理学専攻　固体地球物理学講座、2. 京都大学理学研究科、3. 海洋研究開発機構、4. 理化学研究所、5. 香川大学
1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Faculty of Science, Kyoto University, 3. JAMSTEC, 4. Riken, 5. Kagawa University

プレート沈み込み帯で観測される様々な時定数を持つ断層すべり現象は、主にプレート境界面の摩擦特性の違いを反映していると考えられる[例えばYoshida and Kato, 2003]。従って摩擦特性を観測データから推定することにより、より定量的にプレート境界のすべりの挙動を知ることができる。Kano et al. [2013]は、速度状態依存摩擦構成則を仮定して計算される断層すべりの数値シミュレーションに、断層すべり速度を観測データとしてアジョイント法により同化し、プレート境界の摩擦特性を推定する手法を開発し、数値実験を行った。さらに、2003年十勝沖地震の地震後15日間の余効すべりの断層すべり速度[Miyazaki et al. 2004]を同化し、摩擦特性の空間分布の推定を通して、その後15日間の余効すべりの短期推移予測性能が向上することを示した[Kano et al. 2015]。しかしながら、Kano et al. [2015]において使用したデータは、運動学的インバージョンにより推定されたプレート境界における日毎の断層すべり速度であり、インバージョンの際のすべりの平滑化によるバイアスが含まれている可能性がある。そこで、Kano et al. [2020]では先行研究で開発したアジョイント法を改良し、GNSSデータの地震後の日毎の累積変位を直接データ同化することにより摩擦特性を推定し、断層すべりの現状把握と短期推移予測を行う手法を開発した。
その結果、地震後15日間のGNSSの累積変位を説明可能な摩擦特性が、Kano et al. (2015)と同様、A–B ~ O(10 kPa), A ~ O(100 kPa), L ~ O(10 mm)として推定され、摩擦特性の推定により、その後15日間のGNSSデータの短期推移予測精度が向上することが分かった。一方で、得られた摩擦特性のオーダーは同じものの、Kano et al. [2015]で推定された摩擦特性を用いると、GNSSデータの海溝方向の変位が最大数十%程度過小評価されることが分かった。これはデータ同化に用いる観測データの違い、すなわち断層すべり速度推定に用いるすべりの平滑化の影響、を反映していると考えられる。
また、摩擦特性に加え、数値シミュレーションにおける初期条件（地震発生直後の断層すべり速度）の同時推定を行い、摩擦特性の推定のみを行った場合の結果と比較した。よい初期条件が得られている場合には、GNSSデータの再現と短期推移予測という観点で両者の結果に大きな差異は見られなかった。実際の問題においては、運動学的インバージョンで得られた断層すべり速度を初期条件として用いるのが現実的であり、またこの初期条件には上述の通りバイアスが含まれていることから、初期条件と摩擦特性を同時に推定するのがよいと考えられる。

© 日本地震学会

MCMC法を用いた2004年新潟県中越地震震源域周辺の地震波速度分布の推定

Estimation of depth-dependent variations in seismic velocity in the source area of the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake based on the MCMC approach

*椎名 高裕[1]、加納 将行[2]、倉田 澄人[3]、加藤 愛太郎[4]
*Takahiro SHIINA[1], Masayuki KANO[2], Sumito KURATA[3], Aitaro KATO[4]

1. 産業技術総合研究所地質調査総合センター、2. 東北大学大学院理学研究科、3. 東京大学大学院情報理工系研究科、4. 東京大学地震研究所
1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

地震波速度構造は地震の震源位置を決定するために必要不可欠な情報であるとともに，震源域周辺の物質構造や物理特性を検討・議論する際の基礎となる．このため，地震波速度構造を精度良い推定およびその不確かさを定量的に評価することは地震発生場の環境や地震活動のメカニズムを理解する上で非常に重要となる．
椎名・加納 [2021, JpGU]ではマルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC法）を用いた断層近傍，具体的には鉛直に近い速度境界面が存在する領域，において震源位置と境界を挟んだ異なる2つの1次元速度構造を同時に推定する手法を提案した．彼らの手法では，割り当てられる1次元速度構造をデータ駆動的に選択することで観測点をクラスタリングすることで，水平方向に速度構造が大きく変化する領域における震源位置や速度構造の特徴を精度良く推定することを可能とした．
本発表では，椎名・加納 [2021, JpGU]の手法を用いて2004年新潟県中越地震震源域周辺の速度構造の推定を行う．特に，2004年新潟県中越地震発生直後に行われた臨時観測で取得された稠密な地震観測データ[e.g., Kato et al., 2009]に基づき，震源域周辺における地震波速度構造の特徴を再検討する．なお，椎名・加納 [2021, JpGU]の手法では，観測点のクラスタリング結果から地表面における速度境界の分布を推測することができる．しかしながら，地下の速度境界面の形状に関する情報を直接得ることができない．そこで，MCMC法でサンプリングされたモデルパラメータをベースにした速度境界面の形状，特に地表面からの傾斜角の検出可能性についても議論する．

謝辞：本研究では新潟県中越沖地震合同観測グループにより取得されたデータを使用させていただきました．また，JST CREST [JPMJCR1763]の支援を受けました．記して感謝申し上げます．

© 日本地震学会

ポスター会場（1日目） | 委員会活動紹介：S24.社会に対する委員会の活動

2021年10月14日(木) 15:30 ~ 17:00 | 委員会活動紹介 P会場

S24

[S24P-01] 広報委員会

〇佐藤 利典[1] (1.日本地震学会)

[S24P-02] 学会情報誌編集委員会

〇豊国 源知[1] (1.日本地震学会)

[S24P-03] 強震動委員会

〇干場 充之[1] (1.日本地震学会)

[S24P-04] 学校教育委員会

〇加納 靖之[1] (1.日本地震学会)

[S24P-05] 災害調査委員会

〇吾妻 崇[1] (1.日本地震学会)

[S24P-06] 普及行事委員会

〇佐藤 明子[1] (1.日本地震学会)

[S24P-07] ジオパーク支援委員会

〇松原 誠[1] (1.日本地震学会)

[S24P-08] 地震学を社会に伝える連絡会議

〇久田 嘉章[1] (1.日本地震学会)

S24

2021年10月14日(木) 15:30 〜 17:00 委員会活動紹介 (P会場)

[S24P-01]広報委員会

○佐藤 利典[1] (1.日本地震学会)

広報委員会の活動を紹介します

©日本地震学会

ポスター会場（1日目） | 委員会活動紹介 | S24.社会に対する委員会の活動

S24

2021年10月14日(木) 15:30 〜 17:00 委員会活動紹介 (P会場)

[S24P-02]学会情報誌編集委員会

○豊国 源知[1] (1.日本地震学会)

学会情報誌編集委員会の活動を紹介します

©日本地震学会

S24

2021年10月14日(木) 15:30 〜 17:00 委員会活動紹介 (P会場)

[S24P-03]強震動委員会

○干場 充之[1] (1.日本地震学会)

強震動委員会の活動を紹介します

©日本地震学会

S24

2021年10月14日(木) 15:30 〜 17:00 委員会活動紹介 (P会場)

[S24P-04]学校教育委員会

○加納 靖之[1] (1.日本地震学会)

学校教育委員会の活動を紹介します

©日本地震学会

S24

2021年10月14日(木) 15:30 〜 17:00 委員会活動紹介 (P会場)

[S24P-05]災害調査委員会

○吾妻 崇[1] (1.日本地震学会)

災害調査委員会の活動を紹介します

©日本地震学会

S24

2021年10月14日(木) 15:30 〜 17:00 委員会活動紹介 (P会場)

[S24P-06]普及行事委員会

○佐藤 明子[1] (1.日本地震学会)

普及行事委員会の活動を紹介します

©日本地震学会

S24

2021年10月14日(木) 15:30 〜 17:00 委員会活動紹介 (P会場)

[S24P-07]ジオパーク支援委員会

○松原 誠[1] (1.日本地震学会)

ジオパーク支援委員会の活動を紹介します

©日本地震学会

S24

2021年10月14日(木) 15:30 〜 17:00 委員会活動紹介 (P会場)

[S24P-08]地震学を社会に伝える連絡会議

○久田 嘉章[1] (1.日本地震学会)

地震学を社会に伝える連絡会議の活動を紹介します

©日本地震学会