

2021年10月14日(木)

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] I_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 Kaj² (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 Wu¹ (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

○熊 子瑠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)**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

○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)

2021年10月15日(金)

B会場 | 一般セッション：S08. 地震発生の物理

9:00 ~ 10:30 | B会場 B会場

AM-1

座長:安藤 亮輔(東京大学)、久保田 達矢(防災科学技術研究所)

9:00 ~ 9:15

[S08-01] 東北沖地震のすべり分布と応力降下分布：海溝大すべりの原因の力学的考察

○久保田 達矢¹、齊藤 竜彦¹ (1.防災科学技術研究所)

9:15 ~ 9:30

[S08-02] 2016年熊本地震震源域における余震活動による非弾性歪み場・変位場の時間発展について

○光岡 郁穂¹、松本 聡²、湯浅 雄平³ (1.九州大学大学院理学部地球惑星科学専攻、2.九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、3.気象庁)

9:30 ~ 9:45

[S08-03] 2016年鳥取県中部地震の破壊を止めた応力緩和

○飯尾 能久¹、松本 聡²、京大防災研九大東大地震研 鳥取県中部地震余震観測班 (1.京都大学防災研究所、2.九州大学大学院理学研究院地震火山観測研究センター)

9:45 ~ 10:00

[S08-04] なぜ2016年Kaikoura地震でHope断層は連動破壊しなかったのか？

○安藤 亮輔¹、金子 善宏²、Andy Howell^{4,3}、Nicol Andy⁴、Langridge Robert³、Hamling Ian³ (1.東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻、2.京都大学 理学研究科 地球惑星科学専攻、3.GNS Science、4.Canterbury University)

10:00 ~ 10:15

[S08-05] 準動的な地震シーケンスシミュレーションを用いた中央構造線断層帯の連動破壊過程の解明

○村松 和紀¹、小澤 創¹、安藤 亮輔¹ (1.東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻)

10:15 ~ 10:30

[S08-06] 階層パッチ構造をもつ動的破壊シミュレーションを用いた地震の震源パラメータのスケール法則の検証

○増田 和貴¹、金子 善宏¹ (1.京都大学理学研究科)

B会場 | 一般セッション：S08. 地震発生の物理

11:00 ~ 12:15 | B会場 B会場

AM-2

座長:野田 朱美(気象研究所)、今西 和俊(産業技術総合研究所)

11:00 ~ 11:15

[S08-07] 南海トラフの力学的固着：プレート境界地震の連鎖的な発生と余効すべり

○齊藤 竜彦¹、野田 朱美² (1.防災科学技術研究所、2.気象研究所)

11:15 ~ 11:30

[S08-08] オフフォルト地震と地殻変動データを用いた新手法による東北沖プレート間固着の詳細な時空間変動の推定

○今西 和俊¹、野田 朱美² (1.産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門、2.気象研究所)

11:30 ~ 11:45

[S08-09] 東北日本の応力場の時空間変化によって引き起こされる火山深部低周波地震

○及川 元己¹、麻生 尚文¹、中島 淳一¹ (1.東京工業大学理学院地球惑星科学系)

11:45 ~ 12:00

[S08-10] 2017年長野県南部の地震(Mj5.6)の断層近傍における応力場推定

○野木 ひかり¹、飯尾 能久²、澤田 麻沙代²、富坂 和秀² (1.京都大学大学院理学研究科、2.京都大学防災研究所)

12:00 ~ 12:15

[S08-11] 測地データと地震データを併用した非弾性変形の解析：新潟神戸変形集中帯への適用

○野田 朱美¹、齊藤 竜彦² (1.気象庁気象研究所、2.防災科学技術研究所)

B会場 | 一般セッション：S08. 地震発生の物理

13:30 ~ 15:00 | B会場 B会場

PM-1

座長:鈴木 岳人(青山学院大学)、中島 淳一(東京工業大学)

13:30 ~ 13:45

[S08-12] 繰り返し地震と非地震性すべり：地震発生メカニズムの統一的理解

○中島 淳一¹、長谷川 昭² (1.東京工業大学理学院地球惑星科学系、2.東北大学大学院理学研究科)

13:45 ~ 14:00

[S08-13] 地震滑りとスロースリップとを繋ぐ遷移領域滑りの検出

○深尾 良夫¹、久保田 達也²、杉岡 裕子³、伊藤 亜妃¹、利根川 貴志¹、塩原 肇⁴、山下 幹也⁵、齊藤 竜彦² (1.海洋研究開発機構、2.防災科学研究所、3.神戸大学、4.東京大学、5.産業技術総合研究所)

14:00 ~ 14:15

[S08-14] 2016年チャマン断層の中規模地震に伴う一年以上続く地震後滑り：地震時滑りとの非相補性

○古屋 正人¹、松本 史子² (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、2.(株)パスコ)

14:15 ~ 14:30

[S08-15] 固着域を伝播する非地震性すべりの伝播速度

○加藤 尚之¹ (1.東京大学地震研究所)

14:30 ~ 14:45

[S08-16] 黒潮大蛇行がスロースリップイベントに及ぼす影響：孔内とDONETの観測データの統合解析

○有吉 慶介¹、木村 俊則¹、宮澤 泰正¹、ヴァーラモフ セルゲイ¹、飯沼 卓史¹、永野 憲¹、ゴンバーグ ジョアン^{2,3}、荒木 英一郎¹、美山 透¹、末木 健太郎¹、矢田 修一郎¹、堀 高峰¹、高橋 成実⁴、小平 秀一¹ (1.海洋研究開発機構、2.米国地質調査所、3.ワシントン大学、4.防災科学技術研究所)

14:45 ~ 15:00

[S08-17] 2種類の滑り伝播端形状に対する伝播速度の存在条件とその物理的解釈

○鈴木 岳人¹ (1.青山学院大学理工学部 物理科学科)

2021年10月16日(土)

B会場 | 一般セッション：S08. 地震発生の物理

11:00 ~ 12:15 | B会場 B会場

AM-2

座長:吉田 圭佑(東北大学)、直井 誠(京都大学防災研究所)

11:00 ~ 11:15

[S08-18] 動的破壊モデルから考察する複雑な断層形状がもたらす条線への影響

○青木 拓実¹、金子 善宏¹、Kearse Jesse² (1.京都大学、2.Victoria University of Wellington)

11:15 ~ 11:30

[S08-19] スペクトル比を用いた2000年鳥取県西部地震震源域におけるダブルカップル地震と非ダブルカップル地震の震源特徴の推定

○本越 拓実¹、松本 聡²、飯尾 能久³、酒井 慎一⁴、加藤 愛太郎⁴ (1.九州大学大学院理学府 地球惑星科学専攻、2.九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、3.京都大学防災研究所、4.東京大学地震研究所)

11:30 ~ 11:45

[S08-20] 室内水圧破碎実験によって誘発された微小破壊の地震モーメント・コーナー周波数推定

○直井 誠¹、今北 啓一¹、陳 友晴¹、山本 和敏¹、田中 壘¹、川方 裕則²、石田 毅¹、福山 英一¹、有馬 雄太郎³ (1.京都大学、2.立命館大学、3.独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構)

11:45 ~ 12:00

[S08-21] Radiated energy and source complexity of small earthquakes estimated from a large source time function data base in Japan

○吉田 圭佑¹、金森 博雄² (1.東北大学 地震・噴火予知研究観測センター、2.カリフォルニア工科大学)

12:00 ~ 12:15

[S08-22] P波前地震重力信号に現れる地震波形と異なる見かけの震源励起依存性

○河合 貴太郎¹、亀 伸樹¹ (1.東京大学地震研究所)

B会場 | 一般セッション：S08. 地震発生の物理

13:30 ~ 14:00 | B会場 B会場

PM-1

座長:平野 史朗(立命館大理工)

13:30 ~ 13:45

[S08-23] ω^{-2} モデル, モーメントの3乗則, およびGR則を満たす確率的震源時間関数○平野 史朗¹ (1.立命館大学理工学部)

13:45 ~ 14:00

[S08-24] テクトニック微動から低周波地震を抽出する

○井出 哲¹ (1.東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻)

B会場 | 一般セッション：S18. 地震教育・地震学史

14:00 ~ 15:00 | B会場 B会場

PM-1

座長:光井 能麻(名古屋大学)

14:00 ~ 14:15

[S18-01] 国立科学博物館で開催した東日本大震災からの10年間についての企画展

○室谷 智子¹ (1.国立科学博物館)

14:15 ~ 14:30

[S18-02] 活断層の長期評価と地震動予測に関する理学系専門家向けアンケート調査
ー不確実性を有する情報の発信方法改善に向けてー

○光井 能麻¹、鷺谷 威¹ (1.名古屋大学 減災連携研究センター)

14:30 ~ 14:45

[S18-03] ヤフーコメントから探る民間の地震予測を信じる理由

○織原 義明¹ (1.東京学芸大学教育学部)

14:45 ~ 15:00

[S18-04] 平成29（2017）年改訂学習指導要領での小中学校「理科」における地震，地震防災・減災の取扱い

○根本 泰雄¹ (1.立命館大学理工)

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 AGATA¹, Ryoko Nakata², Amato Kasahara³, Yuji Yagi⁴, Yukinari Seshimo⁵, Shoichi Yoshioka⁵, Takeshi Iinuma¹

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

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。

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 ITO¹

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と、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.

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 Yamada¹, Yusaku Ohta¹, Keitaro Ohno²

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法的一种であり、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。

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 Kurata¹, Yohta Yamanaka¹, Keisuke Yano², Fumiyasu Komaki¹, Takahiro Shiina³, Aitaro Kato¹

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。

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 KURIHARA¹, Aitaro Kato¹, Sumito Kurata², 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。

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 YANO¹, Masayuki Kano²

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 l_1 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 l_1 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、 l_1 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定の疑わしさを表す検定のp-値を統合する。 l_1 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、 l_1 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・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atalog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。

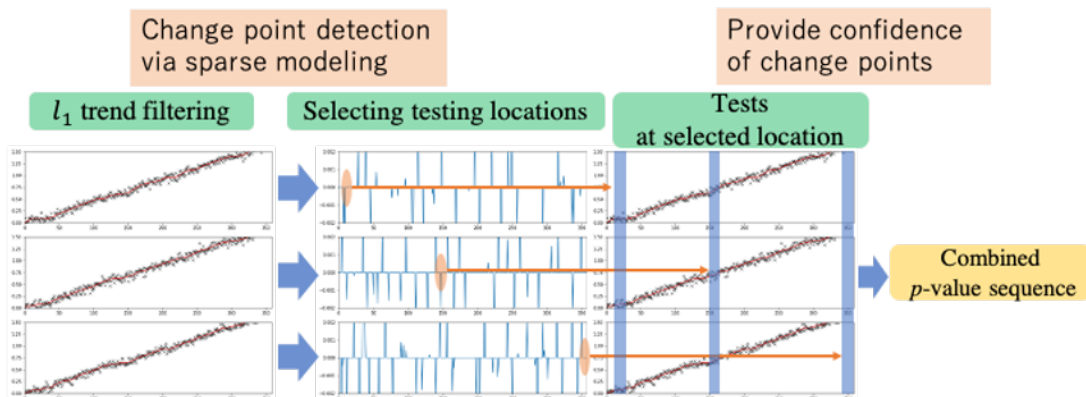


図1：提案手法の概要図

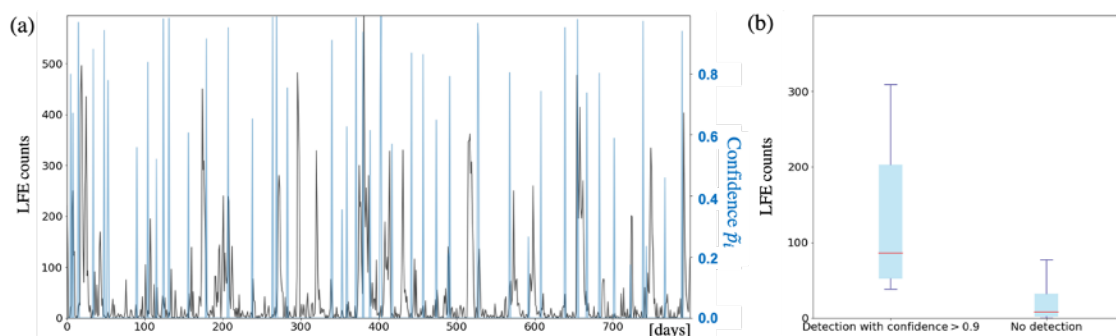
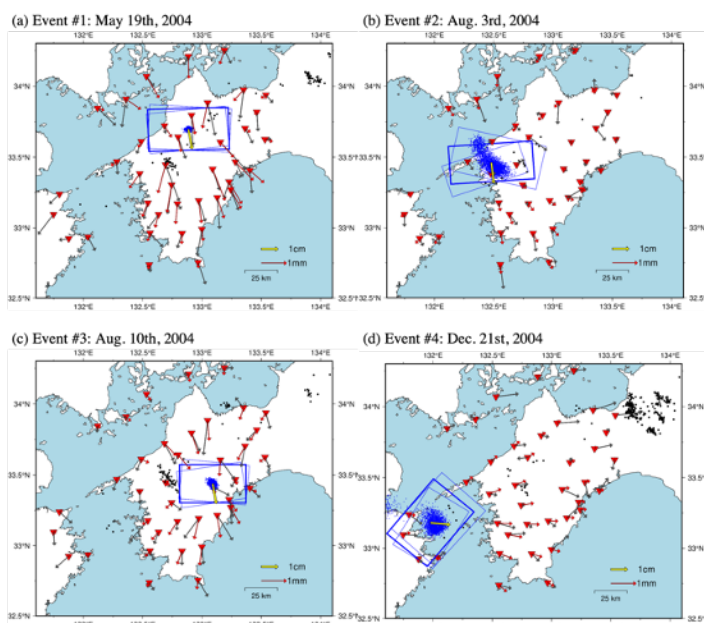
図2：(a) 提案手法の検知確からしさ(青線)とKato & Nakagawa (2020)カタログの低周波微動の日次平均(黒線)。(b) 検知日 ± 3 日と検知なし日の低周波微動数の箱ひげ図。

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)。

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

○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 Kaj² (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 Wu¹ (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)

[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 FUKAHATA¹

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。そのため最近では、"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について、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。

[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 Kaj²

*Junichi Fukuda¹, Kaj M. Johnson²

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・摩擦やマンツ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に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、海洋マンツルとマンツルウェッジの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。

[Invited] A Bayesian framework for Earthquake Early Warning

*Stephen Wu¹

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.

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 SAWAZAKI¹

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

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。

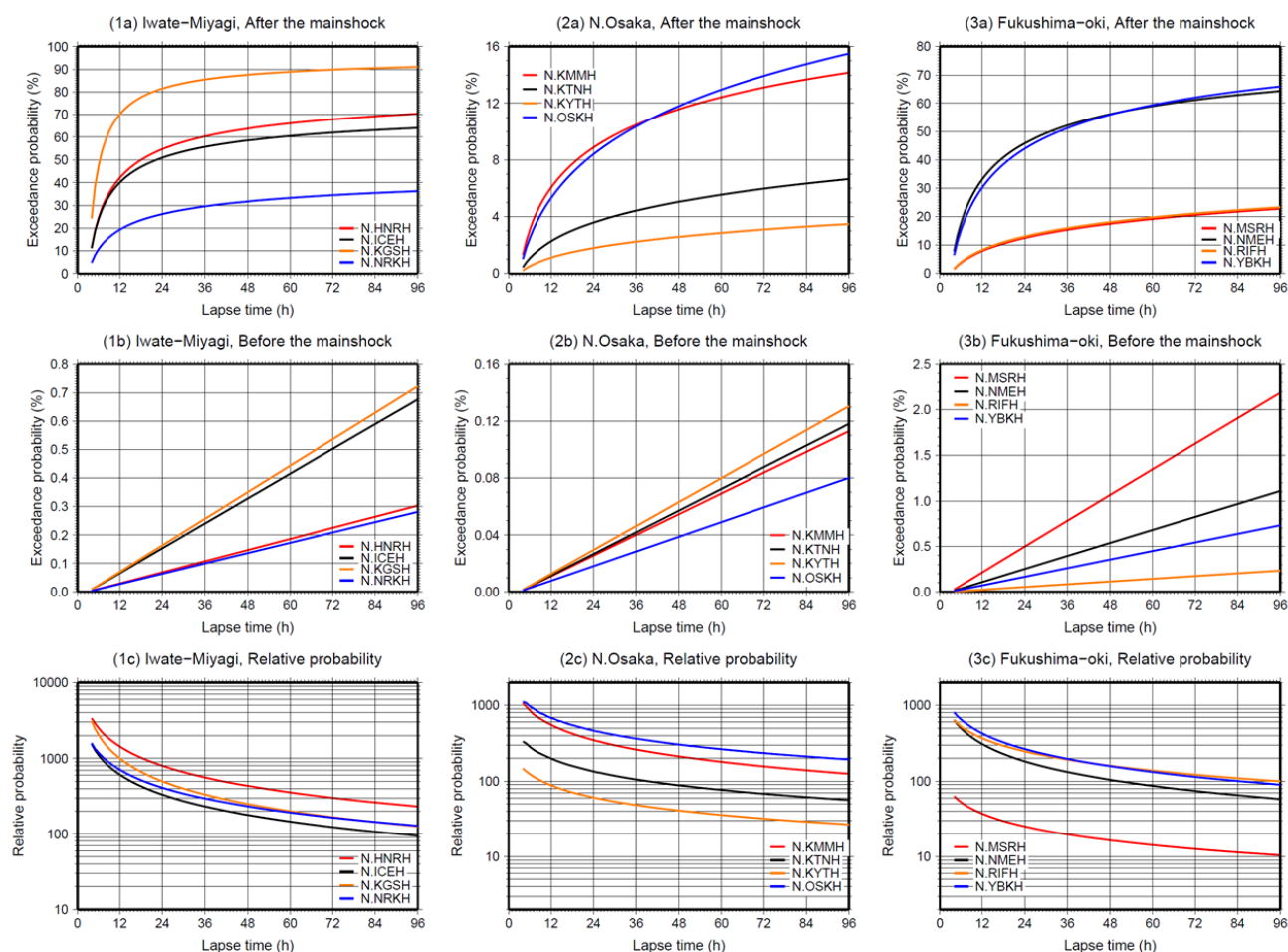


図1: (a) 岩手・宮城内陸地震発生後4日間での最大振幅 10^{-2}m/s を超える確率。予測時点は本震から3時間後。(b) 岩手・宮城内陸地震発生前半期間の地震動記録に基づく、本震が起こらなかった場合の4日間での最大振幅 10^{-2}m/s を超える確率。(c) 最大振幅 10^{-2}m/s を超える確率の本震前に対する本震後の倍率。1aの曲線を1bの曲線で除して算出。異なる色の曲線は異なるHi-net観測点名(図中凡例)を表す。
図2: 大阪府北部の地震における、図1a~1cと同様の図。
図3: 福島県沖の地震における、図1a~1cと同様の図。

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 子瑠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 Xiong¹, Jiancang Zhuang¹

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.

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 Morikawa¹, Hiromichi Nagao², Shin-ichi Ito², Yoshikazu Terada^{1,3}, Shin'ichi Sakai², Naoshi Hirata^{2,4}

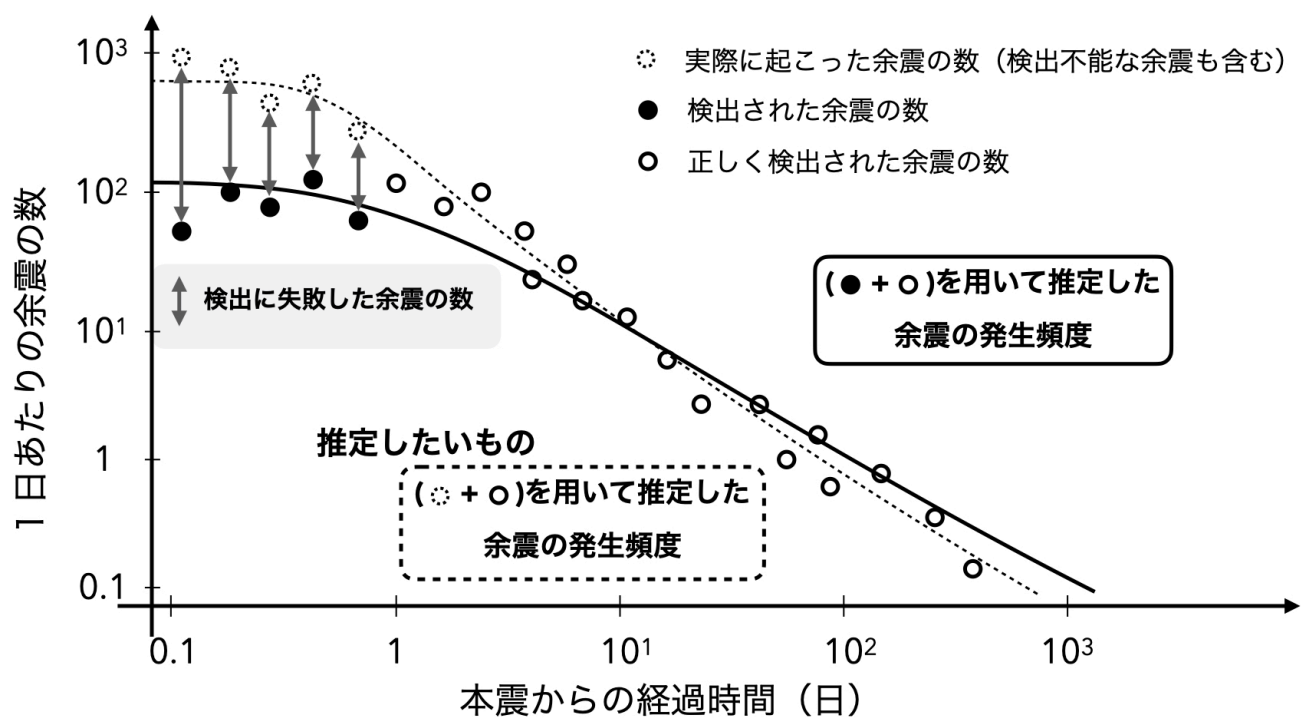
1. 大阪大学、2. 東京大学、3. 理研、4. 防災科学技術研究所

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。



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 OBARA², Hiroshi TSURUOKA²

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。

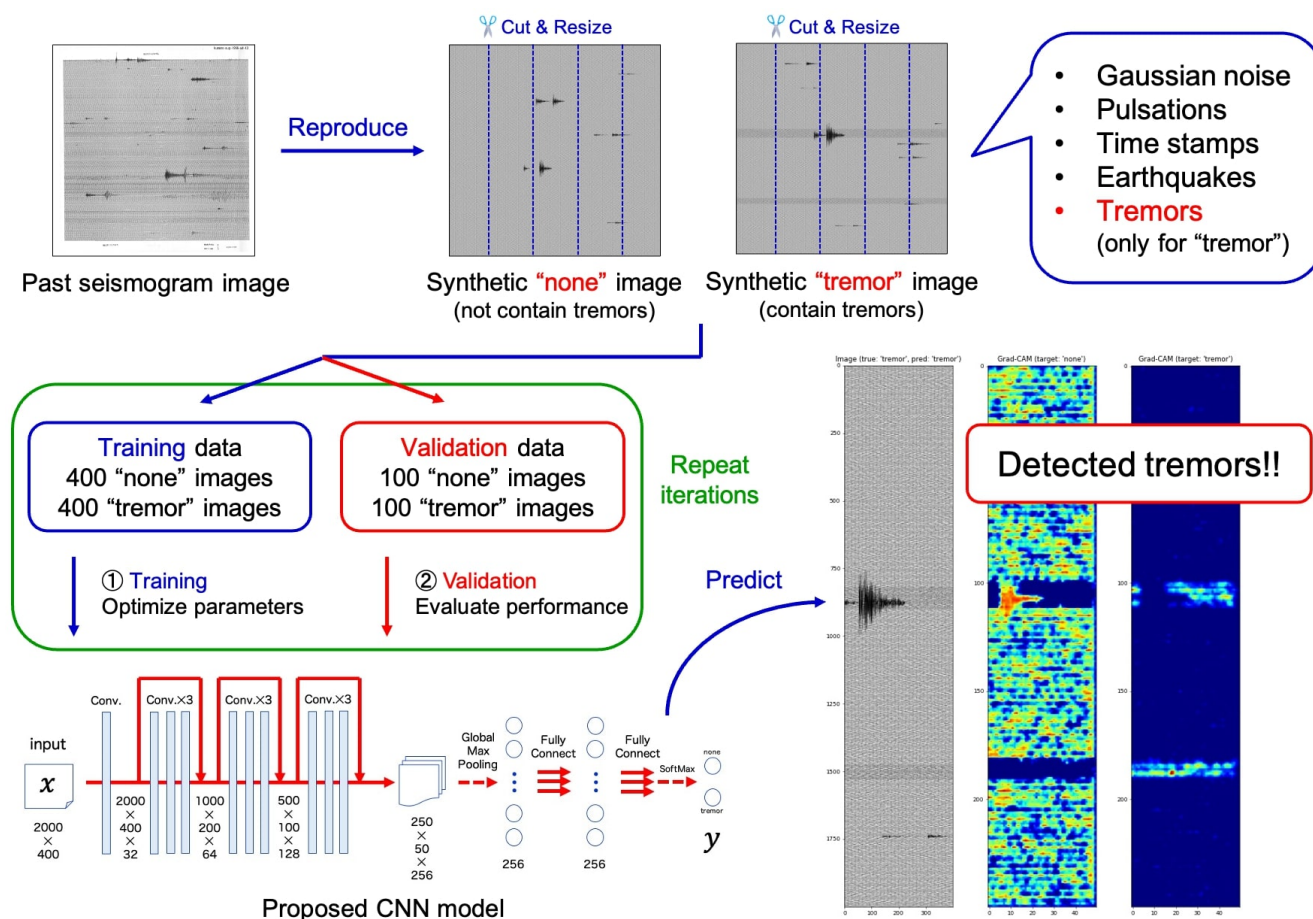
本講演では、この数値実験の結果をもとにHi-netの実データを用いてモデルの学習を行った結果を紹介する。人工波形画像による学習済みモデルをファインチューニングに活用しモデルの構造にも改良を加えることで、ノイズを多く含む実データに対しても人工波形画像に対する結果と遜色ない性能を示した。

[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 archives at the Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Seismological Research Letters, 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.

- [4] K. Obara, S. Tanaka, T. Maeda and T. Matsuzawa, Depth-dependent activity of 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 to detect deep low-frequency tremors from seismic waveform images, *Trends and Applications in Knowledge Discovery and Data Mining (Lecture Notes in Computer Science, vol. 12705)*, 31-43, 2021.



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

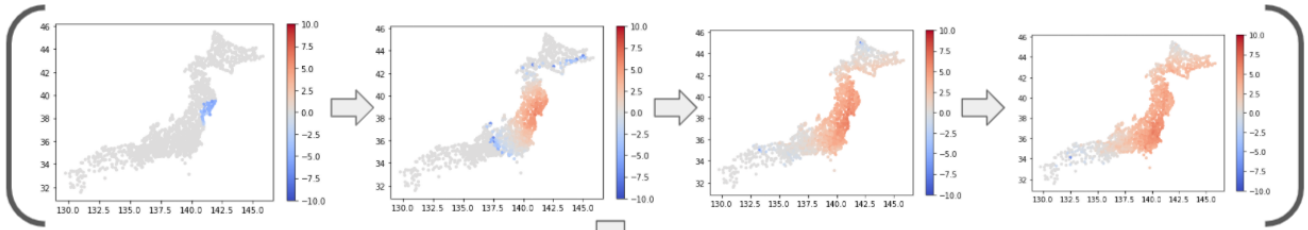
*Ryota Kikuchi¹, Hisahiko Kubo²

1. 京都大学、2. 防災科学技術研究所

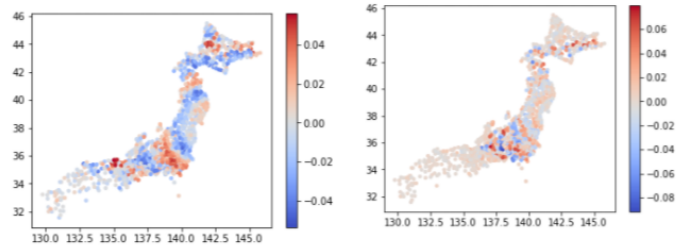
1. Kyoto University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

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 Decomposition: 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。

地震揺れデータ



動的モード



地震の進展に関する
動的モードを抽出する
→時間空間情報を含む
内部の波の構造抽出

Figure: 地震揺れ時系列データから動的モード抽出の例

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 KUBO¹, Keisuke YOSHIDA², Takeshi KIMURA¹

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出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。

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。

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 OKAZAKI¹, Yukitoshi FUKAHATA²

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

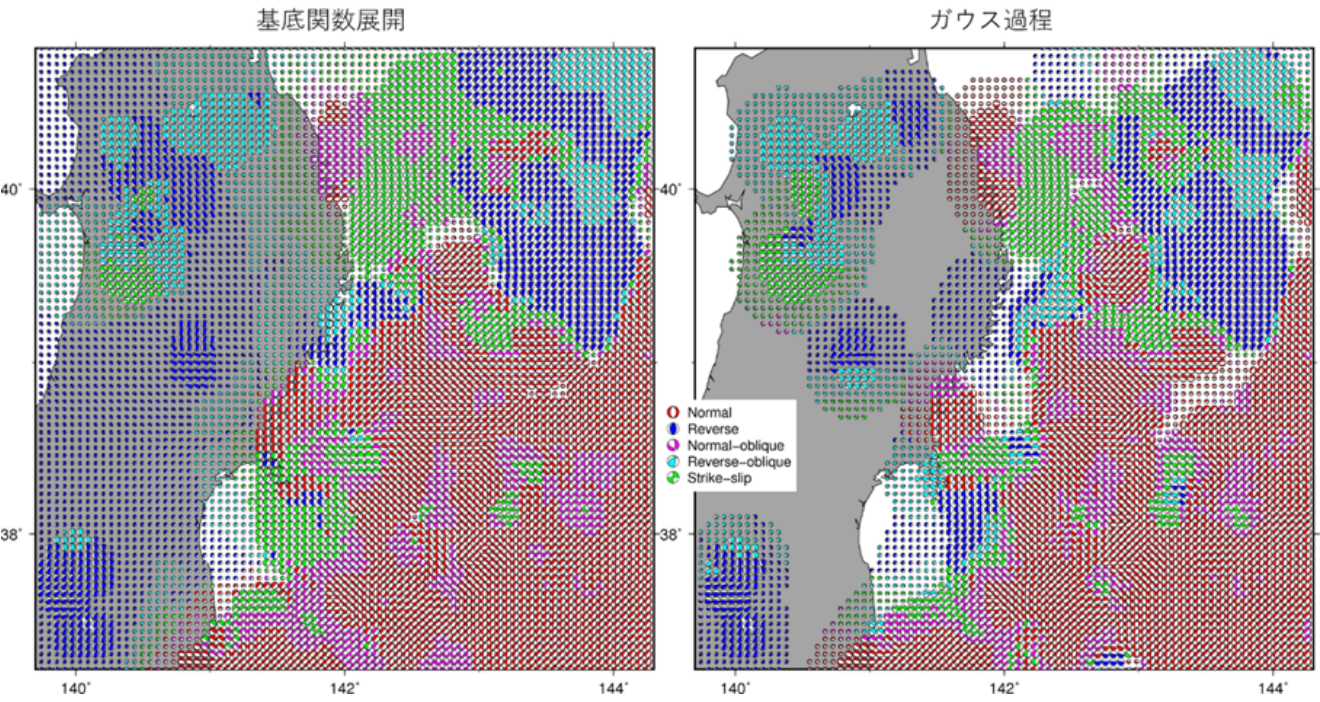
地殻の応力状態を推定する応力インバージョン手法の一つであるCMTデータインバージョン(Terakawa and Matsu'ura, 2008)は、地震による応力解放が周辺の応力場に比例するという仮定の下で、CMT解から応力場の空間パターンを推定する。原論文では基底関数展開(Yabuki and Matsu'ura, 1992)によるインバージョン解析が適用された。

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。



B会場 | 一般セッション：S08. 地震発生の物理

■ 2021年10月15日(金) 9:00 ~ 10:30 | 会場 B会場

AM-1

座長: 安藤 亮輔(東京大学)、久保田 達矢(防災科学技術研究所)

9:00 ~ 9:15

[S08-01] 東北沖地震のすべり分布と応力降下分布：海溝大すべりの原因の力学的考察

○久保田 達矢¹、齊藤 竜彦¹ (1. 防災科学技術研究所)

9:15 ~ 9:30

[S08-02] 2016年熊本地震震源域における余震活動による非弾性歪み場・変位場の時間発展について

○光岡 郁穂¹、松本 聡²、湯浅 雄平³ (1. 九州大学大学院理学部地球惑星科学専攻、2. 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、3. 気象庁)

9:30 ~ 9:45

[S08-03] 2016年鳥取県中部地震の破壊を止めた応力緩和

○飯尾 能久¹、松本 聡²、京大防災研九大東大地震研 鳥取県中部地震余震観測班 (1. 京都大学防災研究所、2. 九州大学大学院理学研究院地震火山観測研究センター)

9:45 ~ 10:00

[S08-04] なぜ2016年Kaikoura地震でHope断層は連動破壊しなかったのか？

○安藤 亮輔¹、金子 善宏²、Andy Howell^{4,3}、Nicol Andy⁴、Langridge Robert³、Hamling Ian³ (1. 東京大学理学系研究科 地球惑星科学専攻、2. 京都大学 理学研究科 地球惑星科学専攻、3. GNS Science、4. Canterbury University)

10:00 ~ 10:15

[S08-05] 準動的地震シーケンスシミュレーションを用いた中央構造線断層帯の連動破壊過程の解明

○村松 和紀¹、小澤 創¹、安藤 亮輔¹ (1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻)

10:15 ~ 10:30

[S08-06] 階層パッチ構造をもつ動的破壊シミュレーションを用いた地震の震源パラメータのスケール法則の検証

○増田 和貴¹、金子 善宏¹ (1. 京都大学理学研究科)

東北沖地震のすべり分布と応力降下分布：海溝大すべりの原因の力学的考察

Slip and stress drop distribution models of the Tohoku-Oki earthquake: A mechanical implication on the near-trench large slip

*久保田 達矢¹、齊藤 竜彦¹

*Tatsuya Kubota¹, Tatsuhiko Saito¹

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

はじめに

これまで2011年東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）の震源過程の研究が広く行われ、さまざまな断層モデルが提案されてきた。なかでも、プレート浅部のすべりやすべり域の広がりへの拘束には津波記録が大きく貢献した (e.g., Satake et al. 2013; Yamazaki et al. 2018 JGR)。津波データに基づく断層モデルによると、宮城沖から岩手沖にかけて大すべりがあり、海溝まで進展するすべりが推定されている。この特徴は多くの地震波・測地データに基づく断層モデルでも共通する (e.g., Wang et al. 2018 Geosphere)。このような高い精度で拘束されたすべり分布にもとづいて東北地震の発生に至った過程を定量的に考察することが、巨大地震の発生メカニズムの理解に重要である。

巨大地震の発生メカニズムの理解には、断層面上のすべり分布にもとづく運動学的な議論だけでなく、地震時に解消された歪みエネルギー量や応力解放（降下）量などに基づく力学的な考察 (e.g. Kostrov 1974; Noda et al. 2021 JGR)、および摩擦則による破壊シミュレーション (e.g. Hok et al. 2011) も重要である。断層面上の応力降下量は、すべり分布から得られる基本的な力学的物理量である。しかし、これまで報告されてきた断層モデルに基づいて計算された東北地震の応力降下分布には、さまざまなパターンがみられる (e.g., Brown et al. 2015 GRL)。なかには、運動学的（すべり分布）視点では不都合が無くても、力学的（応力）視点では不自然となる断層モデルもあり得る。地震発生を力学的に議論するには、力学的にも正確なすべり分布が不可欠である。本研究では、以上の点を踏まえて東北沖地震の断層モデルの推定を試みる。そして、断層モデルから期待される応力降下量の分布が断層モデルが力学的にもっともらしいか議論し、東北沖地震時に海溝で大すべりが発生した力学的原因を考察する。

手法・データ

解析には沖合の津波データを用いた (e.g., Maeda et al. 2011)。なかでも震源域直上で得られた水圧計データ (Kubota et al. 2021 GRL) は、過去の断層モデル推定の研究では使用されていない。

本解析では、3次元のプレート形状を正しく表現するため、Iinuma et al. (2016) を参考に、既存のプレートモデルを三角形の小断層要素に分割した。地殻変動の計算においては、水深を考慮して、プレートモデルから設定した三角要素の深さを一律 8 km 浅くした。さらに、東北沖地震の地表にまで進展した破壊を正しく表現するため、三角要素断層のうち、海溝と一致するもっとも浅い列の要素の上端深さを計算上の自由表面 ($z = 0$ km) に接するように補正した。

結果・議論

津波データのインバージョン解析の結果、これまで報告されてきたすべり分布と同様、宮城沖の領域に海溝軸まで進展する大すべりが推定された (図1a)。一方で、すべり分布から期待される応力変化（応力降下）では、海溝軸そば付近では応力降下はほとんどゼロで、深部側の震源近傍に大きな応力降下域が得られた (図1b)。

本解析で得られた応力降下分布から、力学的な固着はプレート境界深部側でのみ起こり、浅部では起こっていないことが示唆される。一方で、これまで報告されてきた断層モデルに基づく応力降下分布には、海溝軸近傍の大すべりに対応して浅部に大きな応力降下をもち、一方で深部側での応力降下が小さくなるものも見られた (Brown et al. 2015, fig. S2). この応力降下分布は固着が海溝軸の浅い場所でのみ生じていると解釈できるが、深さとともに増加する温度・圧力の条件を考慮すると、浅部でのみ固着が生じるとは考えづらい (e.g., Scholtz 1998; Lay et al. 2012). 深部側でのみ力学的な固着が生じる本研究のモデルが力学的にもっともらしいと言える。プレート境界浅部において大きなすべりが生じた原因は、浅部が力学的に固着していたのではなく、プレート境界深部の力学的な固着が浅部側の沈み込みが押し留め、すべり遅れを生じさせた (Herman & Govers, 2020 G3; Lindsey et al. 2021 Nature Geo) ためと解釈される。

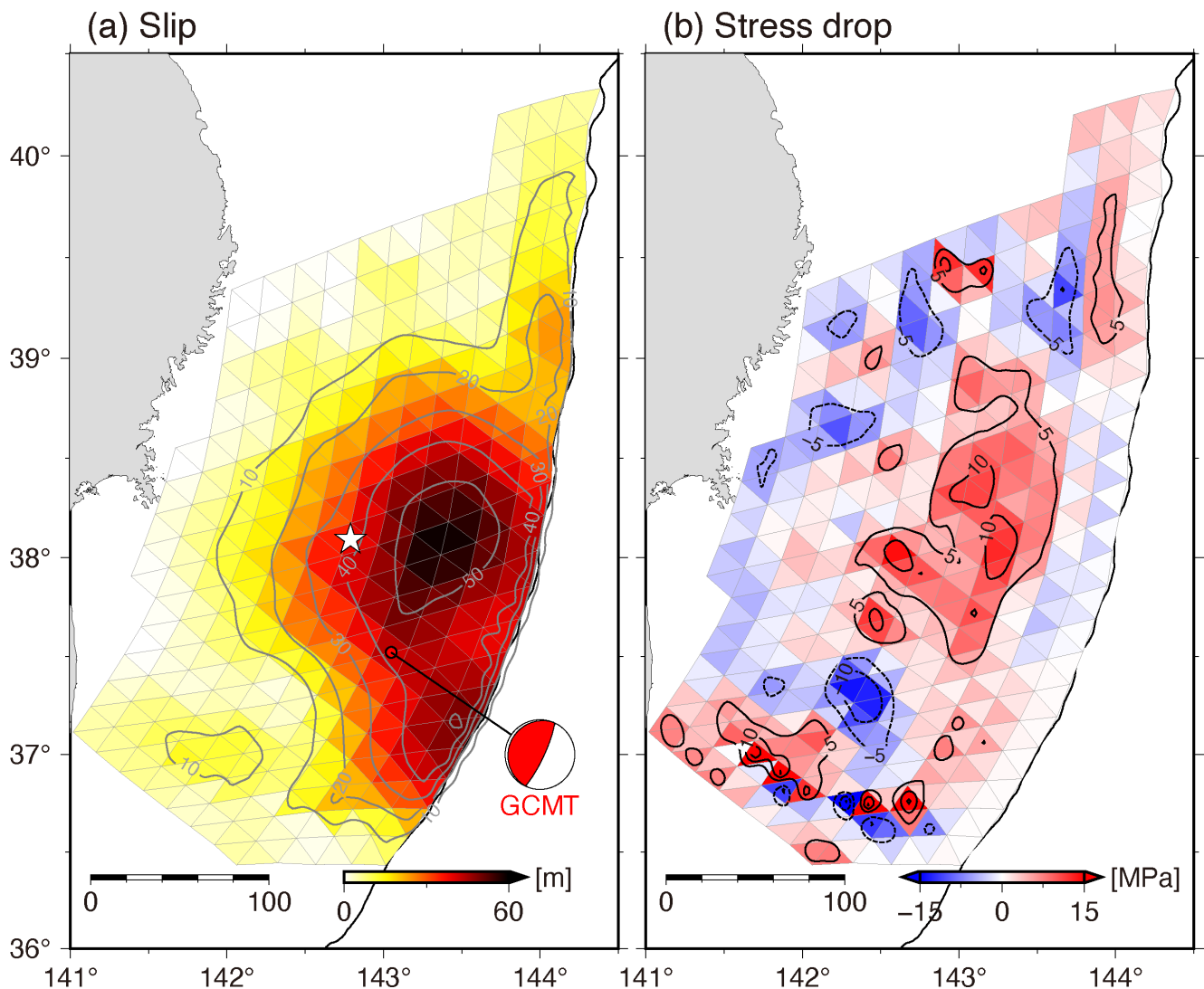


Figure. (a) 解析により推定された東北沖地震のすべり分布. 各要素断層上でのすべり量を色とコンター線で表す (コンター線間隔: 10m). 白星は震央 (Suzuki et al. 2012 EPS) を示す. (b) すべり分布から計算した断層面上での応力降下の分布 (正: 応力降下, 負: 応力増加). コンター線の間隔は 5MPa.

2016年熊本地震震源域における余震活動による非弾性歪み場・変位場の時間発展について

Spatiotemporal change in the inelastic strain and displacement fields due to aftershock activity of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, in central Kyushu, Japan

*光岡 郁穂¹、松本 聡²、湯浅 雄平³

*Ayaho MITSUOKA¹, Satoshi MATSUMOTO², Yuhei YUASA³

1. 九州大学大学院理学部地球惑星科学専攻、2. 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、3. 気象庁

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Japan Meteorological Agency

地震は地殻内に蓄積された弾性歪み(応力)を解放する現象であることを考えると、大地震発生後の余震活動は、大地震の断層運動によって蓄積された弾性歪みを、地震(非弾性変形)によって解消する活動と解釈することができる。地震発生後の地殻内での応力再配分、緩和過程を理解するために、余震活動による非弾性歪み場をとらえることは重要である。

大地震後の余震活動による非弾性歪み速度は、時間のべき乗則($d\varepsilon/dt \propto t^{-P}$)に従うことが知られており、これらの時間変化は、地震時に生じた弾性歪みへの応答として解釈することができる(たとえばNanjo et al., 2019; 楠城, 2007)。このべき乗則のべき指数 $-P$ を本研究では P 値と呼ぶ(余震数の減少を示す大森係数 p 値とは異なる意味を持つ)。

対象期間を、熊本地震本震(Mj 7.3、2016年4月16日)後から2020年9月までと設定し、モーメント密度テンソルと非弾性歪みテンソルの関係(Noda and Matsu'ura, 2010)を用いて、非弾性歪み速度の時空間変化を調べ、 P 値を最小二乗法で推定した。 $P>1$ となる領域は、歪みが時間経過に伴い、減少する領域であるが、地震時断層(たとえばAsano and Iwata, 2016; Mitsuoka et al., 2020)の周辺に位置していた。一方で、 P 値が1より小さくなる(非弾性歪みが時間経過とともに増加する)領域が、地震時断層の南西側に確認された。このような領域は、最大前震・本震が発生したことによる弾性変形によって生じた応力ステップへの応答だけでは、この活動を説明できないことがわかる。

また、GNSS観測網の拡充により、詳細な地表面での変位場を得ることができる。対象期間の九州全域の変位場を求めると、およそ10–30 cmの変位があることがわかった。さらにプレート運動などによる定常運動による変動を除くと、日奈久・布田川断層周辺、つまり2016年の熊本地震の震源域では、定常運動とは異なる数cmから10 cmほどの変位が推定された。

このような地殻内の非弾性歪みや地表変位の増加は、大地震発生後に、アフタースリップなどの余効変動の影響を受けていると考えることができる。そこで本研究では、地震後に見られた非弾性歪みと地表変位は、アフタースリップによって生じたと仮定し、このすべりを起こす断層モデルの推定を試みる。

アフタースリップを仮定すると、ある断層が非地震的にすべることによって周囲に弾性歪みが蓄積されと考えられる。

余震活動によって生じた非弾性歪みは、個々の地震の発震機構データから推定されるわけだが、その場に負荷された弾性歪みが非弾性歪み(余震活動)として即座に解消されるのか、時定数がどうなっているのか、また、空間的に応力の緩和過程が異なるのかどうか、という問題が重要になってくる。つまり、その場に負荷さ

れた弾性歪みをどのくらいの時間かけて解消するのか、また、観測された非弾性歪みがその何%に相当するのか、場所によってそれらは異なるのか、未知なままである。

一方で、地表面では与えられた弾性歪みがそのまま変位として現れると考えると、地殻内のアフタースリップ断層のすべりに対する地表変位を計算することで、データと比較することが可能であると考えられる。そこで、地表での変位をデータとし、Okada (1992)の矩形断層による弾性歪み変化、変位を用いて観測方程式を立て、最小二乗法でアフタースリップ断層面上のすべり分布を推定した。アフタースリップ断層は、日奈久・布田川断層それぞれで地震時断層(たとえばAsano and Iwata, 2016; Mitsuoka et al., 2020)を延長して設定した。その結果、最大で50 cm程度、地震時にすべった領域に加え、日奈久断層の深部延長部で大きいすべりを示す分布が得られた。

これは、地表変位が説明できるすべり分布であるわけだが、このアフタースリップ断層がすべることによって生じる歪み変化を、低P値が示された領域で計算し、地震によって解放された非弾性歪みと比較を行った。歪みテンソルの軸方向は有意に一致しないものの、正断層型、横ずれ型の歪み変化を生じることがわかり、これは観測された非弾性歪みの傾向と同じであった。また、非弾性歪みの大きさは、弾性歪み変化のおおよそ10%程度である結果が得られた。さらに詳細な断層すべりやそれが周囲に及ぼす歪み変化、P値との比較について議論する。

2016年鳥取県中部地震の破壊を止めた応力緩和

Stress relaxation arrested the mainshock rupture of the 2016 Central Tottori earthquake

*飯尾 能久¹、松本 聡²、京大防災研九大東大地震研 鳥取県中部地震余震観測班

*Yoshihisa IIO¹, Satoshi Matsumoto², Kyoto Kyushu Tokyo

1. 京都大学防災研究所、2. 九州大学大学院理学研究院地震火山観測研究センター

1. DPRI, Kyoto University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu University

1. はじめに

大きな地震が起こると余震が引き起こされる。断層端での大きな静的応力集中により、大きな地震が起こることが予想されるが、実際に大きな地震が発生することはむしろ稀である。2016年鳥取県中部地震の約10,000個の高精度のメカニズム解を解析して、余震震源に対する本震断層の水平端の位置を約200mの精度で推定することが出来た(Iio et al., 2021)。その結果、余震は、断層の水平方向の端と延長部ではほとんど発生しないことが分かった。この観測結果は、本震の前に断層の両端部で応力緩和が起こっていたことにより解釈可能である。断層端の応力緩和は、本震の破壊を止めるとともに、大きな地震の続発を起こりにくくすると考えられる。

2. 結果と考察

2016年10月21日鳥取県中部地震(Mj6.6)の余震域に、本震発生の翌日早朝から設置を開始した69点の高感度地震計および周辺の高感度定常観測点のデータを用いて、約2か月間に発生した余震の震源とメカニズム解を正確に決定した。それにより、断層の両端付近において、P・T軸とも、推定断層を境に方位が急変していることが分かった。また、断層南端の東側においては正断層型の余震が卓越しており、本震すべりによる正断層型の地震に対する ΔCFS が正の領域と良く対応していることも分かった。推定断層を境としたT軸の方位の急変から「真の」断層面の位置を推定した。断層に直交する方向におけるT軸の方位分布を階段関数で近似し、その段差の位置に断層があると見なし、それらの位置を平滑化して断層面を推定した。この断層面を用いて、余震域の両端部付近において、正断層型の余震に対する ΔCFS が最も大きくなる断層端の位置を求めた。本震のすべり分布は、InSARやGNSSデータから推定された断層モデル(Meneses-Gutierrez et al., 2019)を参考にし、矩形すべりの端からtaperをかける単純なものとした。その結果、断層南端の位置を200m程度の精度で推定することが出来た。

断層南端付近におけるP軸の傾斜角の分布と、正断層および本震と同じ横ずれ断層に対する ΔCFS の分布を比較により、正断層型の余震の分布が、正断層に対する ΔCFS の大きな領域とよく一致している一方、横ずれ断層に対する ΔCFS の大きな領域では、横ずれ型の余震は非常に少ないことが分かった。この ΔCFS は本震すべりによる応力変化によるものであり、地震前の応力場も考慮すると、本来は、断層端では本震と同様の横ずれ型の余震が圧倒的に起こりやすいはずである。

このことを説明する4つの可能性が考えられる。i) 断層端付近において、その規模に寄らず断層の強度が非常に大きい、ii) 地震前に、本震すべりの起こった領域のみに応力集中が発生していた、iii) 断層端において地震後に非弾性変形が起こった、iv) 地震前に断層端において応力緩和が起こっていた。i)の場合は、一般的には、断層端付近で余震活動が活発になる(例えば、Aki, 1979)。ii)として想定されるのは、地震前に本震断層の周辺で非地震性すべりが発生していた場合である。しかし、非地震性すべりが発生していた場合、同じところで地震後に予効すべりが起こることが期待されるが、地殻変動の解析結果からはそのような変動は検知されていないし、予効すべりに伴うことが期待される余震の震源移動も見られていない(Iio et al., 2020)。また、山陰の地震帯は歪集中帯となっており、地震帯直下の下部地殻において数mm/年の非地震性すべりが検知されているが(Nishimura and Takada, 2017)、それによる応力集中は幅広いものとなり、震源断層だけに応力集中を起こすことは出来ない。iii)についても、地殻変動の解析結果では検知されていない。残されるのはiv)であり、断

層端において、本震前に非常に長い時間スケールを持った非弾性変形が発生して応力緩和が生じていた可能性が考えられる。山陰の地震帯においては、満点観測網のデータを用いた地震波トモグラフィーにより、大きめの地震の余震域の両端に、系統的に低速度異常域が推定されている。この知見は、山陰の地震帯において、大きな地震の断層両端において、地震前に応力緩和が起こっていた可能性を示唆している。

文献 Iio et al., 2021, Stress relaxation arrested the mainshock rupture of the 2016 Central Tottori earthquake, Communications Earth & Environment DOI : 10.1038/s43247-021-00231-6.

なぜ2016年Kaikoura地震でHope断層は連動破壊しなかったのか？

Why the Hope fault bypassed during the 2016 Kaikoura earthquake?

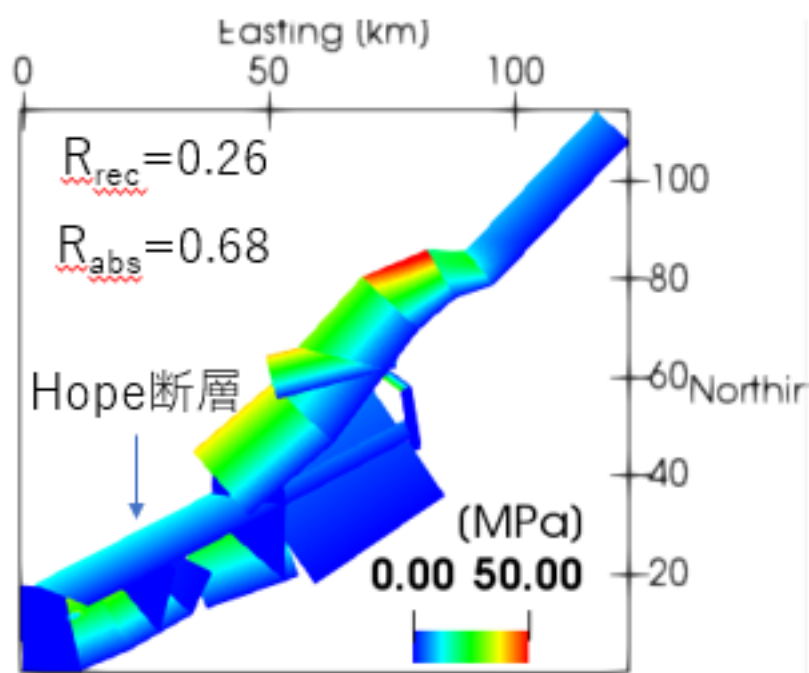
*安藤 亮輔¹、金子 善宏²、Andy Howell^{4,3}、Nicol Andy⁴、Langridge Robert³、Hamling Ian³

*Ryosuke ANDO¹, Yoshihiro Kaneko², Howell Andy^{4,3}, Andy Nicol⁴, Robert Langridge³, Ian Hamling³

1. 東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻、2. 京都大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻、3. GNS Science、4. Canterbury University

1. School of Science, University of Tokyo, 2. School of Science, Kyoto University, 3. GNS Science, 4. Canterbury University

The complex multi-fault rupture is observed in the 2016 Kaikoura (New Zealand) earthquake. Although the overall slip pattern was well explained by dynamic rupture simulations (Ando and Kaneko, 2018, GRL), a big question remains on the reason why the Hope fault was bypassed during the 2016 event. The Hope fault is one of the most active upper plate faults in the focal area, accommodating the relative motion between the Pacific Plate and the Australian Plate. In this study, we first test a hypothesis: The stress level of the Hope fault (see fig.) is lower than the surrounding faults due to the effect of the last event before 2016. A set of parameter studies shows that 70-80% lower stress level on the Hope fault leads to the passive partial slip resembling the observation of the 2016 event. So far, we do not exclude the possibility that the Hope fault is bypassed through a more complicated rupture path than that obtained in A&R (2018). To explore this hypothesis, we adopt the 3D fault geometry developed by Nicol et al. (in prep July 2021) to revise the geometry of the Point Kean and Papatea faults based on the aftershock distribution (Chamberlain et al., 2021).



準動的地震シーケンスシミュレーションを用いた中央構造線断層帯の連動破壊過程の解明

Quasi-dynamic earthquake sequence simulation of the Median Tectonic line Fault Zone

*村松 和紀¹、小澤 創¹、安藤 亮輔¹

*Kazunori Muramatsu¹, So Ozawa¹, Ryosuke Ando¹

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

1. Department of Earth and Planetary Science, The university of Tokyo

中央構造線断層帯（MTLFZ）上で生じた地震の記録は乏しく、MTLFZの構造およびMTLFZ上における地震の連動破壊過程は不明である。古文書の記録およびトレンチ調査（HERP,2017）などの地質学的な証拠から、MTLFZ上で起こった最新の地震は慶長地震（1596）であると推定されている。慶長地震では、少なくとも300kmの規模で、慶長伊予地震、慶長豊後地震、慶長伏見地震の3つの地震が連動して発生したことが示唆されているが、この一連の地震における破壊開始点とその伝播過程は断定されていない。Ikeda et al. 2018は慶長地震について、MTLFZの西端を破壊開始点として慶長豊後地震および慶長伊予地震が発生し、東方に伝播して慶長伏見地震を起こすケースと、四国北部の川上断層を開始点として西方に伝播したのちに慶長伏見地震が生じるケースを想定した。そして主応力軸の方向、傾斜角をパラメータセットとしてCoulomb応力変化を計算し、その正負から東西の双方向に伝播するケースを支持した。本研究では、MTLFZを10数個の深さ10kmの鉛直な矩形断層に分けて3次元モデル化し、準動的地震シーケンスシミュレーションを行った。0.25kmのセルサイズで各断層を離散化し、それぞれの要素は速度状態依存摩擦則に従い、諸摩擦パラメータは深さ依存せず一様とした。全断層面に一様なせん断応力速度を付加した場合、全セルの平均変位速度との比例関係が見られた。GNSSを用いて求められたMTLFZ周辺の区間における平均相対変位速度は9~10m/1000年、平均歪速度は 10^{-7} /年（Nishimura et al. 2018）であるが、本シミュレーションでは、少なくともセル平均変位速度が1~15m/1000年となる範囲で、MTLFZの中央から西方に地震が伝播したのち、MTLFZの東側で中央から東に地震が連動することが再現された。代表的な例では、平均歪速度 1.3×10^{-7} /年に対応する平均変位速度は5m/1000年、再来間隔は約3000年であった。今後は、現状の矩形断層が接続された滑らかでない断層モデルの改善や、摩擦パラメータの深さ依存性の設定、また四国周辺の応力分布の観測結果に則した非一様な広域応力場の考慮が必要である。

階層パッチ構造をもつ動的破壊シミュレーションを用いた地震の震源パラメータのスケール法則の検証

Investigation of scaling laws for earthquake source parameters using simulations of dynamic rupture with a hierarchical patch structure

*増田 和貴¹、金子 善宏¹

*Kazuki Masuda¹, Yoshihiro Kaneko¹

1. 京都大学理学研究科

1. Graduate School of Science, Kyoto University

地震破壊の成長過程とそれに伴う地震波の放射を理解することは、地震災害や減災のために重要である。Ide (2019) は、異なるマグニチュードの地震で、P波の発生から0.2秒以内の初期波形の類似性が観測されたことを、フラクタルに分布する断層パッチの階層構造で説明できるのではないかと提案した。本研究では、すべり弱化摩擦則に基づき、破壊エネルギー G_c の階層構造を取り入れた断層上の自発的な動的破壊モデルが、地震の震源パラメータに関するいくつかのスケール法則を説明できるという仮説を検証する。このシミュレーションはスペクトル要素法で行われており、Aochi and Ide (2003)によって提案された効率的な計算手法を取り入れている。まず、破壊エネルギー G_c の階層的なパッチで特徴づけられた一次元断層上で、幅広いマグニチュード（M1からM6）の地震のシミュレーションを行った。次に、計算した地震の震源パラメータに関する様々なスケール法則（地震モーメントと震源継続時間、マグニチュードと発生頻度の関係、モーメントレートの成長と時間、破壊エネルギーと地震性すべりなど）を定量化した。そして、モデルパラメータの値を変化させたときにこれらのスケール法則がどのように変化するかを分析した。予備的な結果として、階層的なパッチの大きさと個数の関係を変えると、スケール法則の一部に影響を与えることが示唆された。今回得られたスケール法則に影響を与える重要なモデルパラメータを特定し、このモデルを2次元断層に拡張するための取り組みを報告する。

B会場 | 一般セッション：S08. 地震発生の物理

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

AM-2

座長:野田 朱美(気象研究所)、今西 和俊(産業技術総合研究所)

11:00 ~ 11:15

[S08-07] 南海トラフの力学的固着：プレート境界地震の連鎖的な発生と余効すべり

○齊藤 竜彦¹、野田 朱美² (1.防災科学技術研究所、2.気象研究所)

11:15 ~ 11:30

[S08-08] オフフォルト地震と地殻変動データを用いた新手法による東北沖プレート間固着の詳細な時空間変動の推定

○今西 和俊¹、野田 朱美² (1.産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門、2.気象研究所)

11:30 ~ 11:45

[S08-09] 東北日本の応力場の時空間変化によって引き起こされる火山深部低周波地震

○及川 元己¹、麻生 尚文¹、中島 淳一¹ (1.東京工業大学理学院地球惑星科学系)

11:45 ~ 12:00

[S08-10] 2017年長野県南部の地震(Mj5.6)の断層近傍における応力場推定

○野木 ひかり¹、飯尾 能久²、澤田 麻沙代²、富坂 和秀² (1.京都大学大学院理学研究科、2.京都大学防災研究所)

12:00 ~ 12:15

[S08-11] 測地データと地震データを併用した非弾性変形の解析：新潟神戸変形集中帯への適用

○野田 朱美¹、齊藤 竜彦² (1.気象庁気象研究所、2.防災科学技術研究所)

南海トラフの力学的固着：プレート境界地震の連鎖的な発生と余効すべり

Plate locking along the Nankai Trough: A scenario for coseismic and post seismic ruptures

*齊藤 竜彦¹、野田 朱美²

*Tatsuhiko SAITO¹, Akemi Noda²

1. 防災科学技術研究所、2. 気象研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Meteorological Research Institute

（はじめに） 運動を予測するためには、運動を引き起こす原動力やエネルギーを定量化することが重要である。プレート間巨大地震を引き起こす原因は、プレート間の固着によって蓄積する歪みエネルギーである (e.g., Savage 1969; Noda et al. 2021 JGR). 衛星測位データ解析によってすべり遅れ分布を推定し、それをもとに将来起こりうる巨大地震の規模や場所が予測されている (e.g., Watanabe et al. 2018; Baranes et al. 2018). しかし、すべり遅れ域と力学的な固着域は同一ではない (e.g., Wang and Dixon 2004; Noda et al. 2018 JGR). 力学的に固着している箇所では、大きな摩擦力によって地震間に応力が増大し、歪みエネルギー蓄積の根本原因となる。一方、力学的固着が無い箇所でも、隣接した固着域によってすべり遅れが生じる (e.g., Herman et al. 2018). このような領域では地震間の応力増加が無くても、地震時には隣接する固着の破壊のためにすべりを引き起こす。例えば、東北地震では宮城沖海溝付近は、応力降下がほとんど無いにもかかわらず、隣接深部に位置する力学的固着の破壊によって大すべりが起こっている（久保田・齊藤 本大会）。巨大地震の連動や半割れ破壊後の推移予測を行うために、地震を引き起こす原因となる力学的固着分布が重要である。本研究では、力学的固着の推定法を提案し、南海トラフの固着分布を推定する。さらに、結果をもとに想定しうる連鎖的な巨大地震発生と余効すべりのシナリオ例を示す。

（解析手法） プレート間の剪断応力の蓄積速度が大きい箇所が、力学的に固着している箇所と考えられる。剪断応力として、プレート沈み込みによるslip方向の向きのtractionの成分を考え、以下の手順によって、プレート間剪断応力速度分布をGNSSデータ逆解析で推定する。プレート間剪断応力分布を水平広がり60km程度の大きさの基底関数を約250個使って表現する。各基底関数による地表変形速度応答を次のように計算する。半無限均質媒質を仮定し、南海トラフプレート境界を大きさ一辺10km程度の三角要素5400個程度を使って表し、それぞれの三角要素のすべり速度に対するそれぞれの三角要素における剪断応力速度応答を計算する。このデータセットを使うことで、剪断応力速度基底関数に対応するすべり速度分布を逆問題によって得ることができる。そして、地表変位速度をすべり速度分布から計算する。この手順で剪断応力速度の基底関数による地表変形速度応答を得る。地表変形速度応答を使い、GNSSデータの逆解析から、プレート間剪断応力速度分布を推定した。

（力学的固着と連動破壊シナリオ） プレート境界深さ~25kmより浅い箇所に4箇所（室戸沖、紀伊半島沖、熊野灘沖、東海沖）に顕著な力学的固着域を推定した。それぞれ、年間10kPa程度で剪断応力が蓄積されていく。特に、室戸沖の固着領域は広く、剪断応力蓄積速度が大きい。仮に、応力蓄積期間が100年ならば、これら固着域に1MPa程度の応力が蓄積する。固着域が破壊すれば、1MPa程度の応力降下をもつ巨大地震を引き起こす。一方、プレート境界深部や力学的固着が弱い箇所では、余効すべりが発生する可能性がある。得られた固着分布から想定しうる破壊シナリオのうち、複数のプレート境界地震が連鎖的に発生する可能性を紹介する。まず、紀伊半島沖の固着が破壊することで、Mw 8程度の前震が発生する。この地震によって周囲の応力が増加する。前震すべり域周辺の応力をゆるやかに解消するようにして余効すべりが発生する。余効すべりはMw 8程度と前震と同程度の規模となるが、応力降下量が前震に比べて小さいために解消する歪みエネルギー（available energy）は、前震の3分の1程度となる。さらに、余効すべりにトリガーされ室

戸沖の固着が破壊することで、Mw 8.3の本震となる。本震は前震に比べて3倍程度の歪みエネルギーを解消する。ただし、モーメント、解消する歪みエネルギーは、応力解消領域やすべり域の設定で変化する。

（さいごに） 本研究やNoda et al. (2021 JGR) は力学的な固着分布から、今後起こりうる巨大地震や連鎖する地震の破壊シナリオを想定した。しかし、摩擦則および背景応力に関して大きな不確定性があり、大地震や余効すべりが起きたときに、そのデータを使って、現在の考えやモデルの検証と修正をすることが重要である。あり得る複数の破壊シナリオを提示し、シナリオ作成時の仮定・条件を明確するなど、検証の準備をすすめていく。

オフフォルト地震と地殻変動データを用いた新手法による東北沖プレート間固着の詳細な時空間変動の推定

Spatial and temporal variations in interplate coupling along the Tohoku-Oki plate boundary deduced from a new method using off-fault earthquakes and geodetic data

*今西 和俊¹、野田 朱美²

*Kazutoshi IMANISHI¹, Akemi Noda²

1. 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門、2. 気象研究所

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Meteorological Research Institute

1. はじめに

プレート境界における巨大地震の発生時期や規模を予測するためには、プレート境界の固着状態をモニタリングすることが重要である。通常は地殻変動データをもとに推定されるが、地震データも組み合わせた解析を行うことで、高い時空間分解能を持つ固着状態の推定が期待できる。本研究では、プレート境界の周辺で発生している地震（オフフォルト地震）がプレート間固着による応力変化に調和的に発生しているか否かを評価し、直近のプレート境界の固着状態を推定する方法を提案する。そして、この手法を東北沖プレート境界に適用した結果について報告する。

2. 手法

本手法の背景にある基本的な考え方は以下の通りである。

- ・ 応力場は、背景応力にプレート間固着による応力蓄積が加わったものと記述される。
- ・ 地殻内には様々な姿勢の既存クラックがあり、それらの多くが応力の臨界状態にある。
- ・ 背景応力に調和的なクラックでも破壊は生じるが、プレート間固着に起因する応力場（応力変化）に調和的なクラックが優先的に破壊する。

プレート間固着に起因する応力場から計算されるすべり角と断層面のすべり角との角度差（ミスフィット角）に着目すると、プレート間固着が継続する場合はミスフィット角の小さい地震が多く発生することが期待され、逆にゆっくりすべり等により固着が剥がれる場合は、ミスフィット角の大きい地震が多く発生することが期待される。従って、ミスフィット角の時空間平均を推定することで、直近のプレート間固着状態の変動を可視化することができる。

実際の解析手順は以下の通りである。

- (1) プレート間固着により周辺域に作り出される応力テンソルを水平方向に0.1°間隔、深さ方向に5km間隔で計算する。
- (2) それぞれのメカニズム解の震源位置に最も近い位置の応力テンソルを用いて、ミスフィット角を計算する。この際、2つの節面のうち、小さい方のミスフィット角を採用する。
- (3) 空間方向に0.1°間隔のグリッドを設定する。グリッドを中心とした半径75km以内、1年以内に含まれる地震を抽出し、ミスフィット角の平均値を計算する。

3. データ

データとなるメカニズム解は、防災科学技術研究所のF-net解（1997年1月～2021年7月）を使用した。デクラスタリング（Reasenber, 1985）処理後、代表的なプレート境界地震のメカニズム解に対するKagan角を元にプレート境界型の地震を除去し、オフフォルト地震のカタログを作成した。また、プレート間固着に関しては、1998年3月から2008年2月のGNSSデータを用いて推定した。

4. 結果と解釈

本研究では2011年東北沖地震を挟む約24年間にわたる解析結果が得られた。ミスフィット角は時間的にも空間的にも複雑な挙動を示すが、特定の場所に着目すると、ある程度の周期性を持ちながら変動している。Uchida et al.(2016)は小繰り返し地震と地殻変動データから、およそ1~6年の周期を持つゆっくりすべりの存在を報告しているが、本研究の結果はそれと概ね調和的である。また、プレート境界型の地震はミスフィット角が小さい時（固着継続時）に発生する傾向があり、本手法の妥当性が伺える。

東北沖地震発生前に着目すると、東北沖地震の大すべり域（アスペリティ）内のミスフィット角は小さく、基本的に固着し続けていたと推定される。また、その周囲ではミスフィット角の大きい時期が間欠的に発生しており、周囲のゆっくりすべりにより応力が繰り返しアスペリティ内に载荷されていたことも予想される。アスペリティ内をさらに詳細にみると、2001年7月から10月、2005年8月から10月、2008年8月から2009年3月、2010年8月、そして東北沖地震発生前に、ミスフィット角の大きい時期が確認できる。このうち、一部は先行研究（e.g., Ito et al., 2013）により報告されているゆっくりすべりの発生時期と重なっている。今後慎重な検討が必要であるが、徐々に発生間隔が短くなっている傾向があり、アスペリティ内での固着の剥がれが加速的に進行していた可能性がある。

東北沖地震発生後は広い範囲でミスフィット角が 90° を超えるようになる。これは本震による応力変化に調和的なクラックで破壊が生じているためと考えられ、正断層型の余震が多く起きている観測事実（Asano et al., 2011）からも理解できる。一方、三陸沖と茨城県沖では本震後も小さいミスフィット角を維持しており、固着が継続していると解釈できる。それに加えて、本震すべりによる応力载荷の寄与もあると考えられ、地震発生ポテンシャルの高い地域として注意が必要であろう。

謝辞：防災科学技術研究所のF-netカタログ、国土地理院のGEONET F3解を使用しました。記して感謝します。

東北日本の応力場の時空間変化によって引き起こされる火山深部低周波地震

Deep volcanic low frequency earthquakes induced by spatio-temporal stress distribution in northeast Japan

*及川 元己¹、麻生 尚文¹、中島 淳一¹

*Genki OIKAWA¹, Naofumi Aso¹, Junichi Nakajima¹

1. 東京工業大学理学院地球惑星科学系

1. Tokyo Institute of Technology

近年の高感度な地震観測網の発達により、通常の地震よりも深部の下部地殻及び上部マントルで発生する微小地震が観測されてきた。この地震は規模が小さいにも関わらず2-8Hzの低周波成分が卓越することから低周波地震と呼ばれ、主に火山周辺やプレート境界で観測されている。東北日本では活火山周辺で活発な地震活動が見られており、2011年に発生した東北沖地震以降、いくつかの地域では顕著な活動変化が見られている(小菅・他2017)。東北日本の応力場は基本的に東西圧縮(Terakawa and Matsu'ura, 2010)であるが、東北沖地震によって応力変化が起きたことが活動変化に繋がったと考えられる。本研究では火山深部低周波地震のメカニズム解を決定し、応力の時間及び空間変化との関係を調べた。

メカニズムの決定にはS波とP波の振幅比を用い、グリッドサーチによって理論振幅比との残差が最小となるモーメントテンソルを推定した。結果として東北日本の26個の火山領域で発生した264イベントについてメカニズム解を決定した。得られたメカニズム解の多くは、double-couple成分を多く含んでおり、低周波地震の初期破壊プロセスが断層すべりによって駆動されている可能性を示している。一方で、メカニズムには有意なCLVD成分も少なからず含んでいることを考えると、完全な平面ではなく凸凹な面、もしくは湾曲した面上での断層すべりである可能性がある。さらに興味深い特徴として、メカニズム解のNull軸の傾斜角は震源深さ15~25kmでは20~30°と小さいが、深くなるにつれてばらつきが大きくなり、多様であることがわかった。この結果は、下部地殻では局所的な応力場がおおむね東西圧縮であるのに対し、モホ不連続面付近では熱応力やマグマ貫入プロセスによる応力の擾乱によって変化していることを示唆している。

次に、Coulomb 3.3 (Toda et al., 2005; Lin et al., 2004) を用いて2008年岩手宮城地震、2011年東北沖地震による静的応力変化と得られた低周波地震との関係性を調べた。この解析の結果、応力テンソルの変化と低周波地震のメカニズム解のモーメントテンソル間の類似度と活動変化の度合いには弱い正の相関があることが分かった。この結果は低周波地震活動が時間的な応力変化にある程度敏感であることを示唆している。

2017年長野県南部の地震(Mj5.6)の断層近傍における応力場推定

Estimate of the stress field in the region of the 2017 southern earthquake

*野木 ひかり¹、飯尾 能久²、澤田 麻沙代²、富坂 和秀²

*Hikari Nogi¹, Yoshihisa Iio², Masayo Sawada², Kazuhide Tomisaka²

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

内陸地震の発生には応力場が密接に関係しており、地震発生過程を理解するためには、地殻の応力状態を知ることが重要である。例えばKawanishi et al.(2009)では、2000年鳥取県西部地震 (Mw=6.6) の稠密余震観測で得られた余震データを使用して応力インバージョン法により詳細な応力場を推定し、中国地方の地震帯において、それ以外の領域に比べて最大圧縮応力の向きが回転していることを示唆した。この空間変化は、地震帯直下の下部地殻の不均質構造を仮定した有限要素法による応力場のパターンと整合的であり、断層上の延性的なすべりによる影響で説明できることが報告された。

本研究では、長野県西部地域における稠密地震観測で得られた地震データを用いて、2017年6月25日に発生した長野県南部の地震(Mj=5.6)の断層近傍の詳細な応力場を推定し、空間的な不均質性を調べた。

本研究の対象領域である長野県西部地域は、1984年の長野県西部地震(Mj=6.8)の発生以降30年以上にわたり地震活動が継続している。地震は本震断層面に沿って分布するだけでなく、御嶽山東麓域では断層から離れたところでも多数起こっている。本研究で扱う長野県南部の地震は、村瀬・木股(2020)において左横ずれ断層によると考えられ、長野県西部地震の断層の東端付近で発生した。

メカニズム解の推定には、稠密地震観測データのうちIio et al.(2017)が使用した1995年6月から2010年6月までの地震データに未解析のデータを加えて、2017年長野県南部の地震発生前までのデータを使用した。この地域は震源が浅く、その直上に多数の観測点が設置されているため、精度の良いメカニズム解を求めることができる。

応力インバージョンの計算には、Iio et al.(2017)による、断層面上で生じるすべりの方向が断層面に働く剪断応力の方向と平行であるとするWallace-Bott仮説と、解析領域内の応力場は時空間的に一様であるという仮定を用いて、解析に用いる地震に関して、観測されたすべりの方向と理論的なそれとの差 (ミスフィット角) の二乗和を最小とする方法を用いて、グリッドサーチにより求めた。

応力インバージョンの結果、断層近傍において応力場の不均質性が見られた。本解析領域全体における最大圧縮応力 σ_1 のazimuthの平均は西南西-東南東方向であり、これはTerakawa et al.(2013)における、本研究で解析に用いた領域を含む広域での σ_1 のazimuthと比較すると、やや東-西に近い向きであった。また長野県南部の地震の西側の一部(深さ2-3km)では、 σ_1 のazimuthが北西-南東から北北西-南南東方向であり、応力比は周囲と比べて低い傾向が見られた。これはYukutake et al.(2010)にて報告された特徴と同様の応力場のパターンを示している。さらに、長野県西部地震の断層の南東側(深さ2.5-3km)と長野県南部の地震断層より北部(深さ3-3.5km)では一部、 σ_1 のazimuthが東-西方向へと回転している領域が見られた。

これより、本解析領域全体における σ_1 のazimuthの平均が西北西-東南東であるのに対して、一部北西-南東から北北西-南南東を示す領域や東-西方向など、平均的な応力パターンとは異なる不均質構造の存在が考えられる。しかしながら、不均質性を示す一部の領域では、ミスフィット角が明確な最小値を示していないため、解の精度評価についても検討する。また、地震発生前の不均質な応力場が地震発生にどのような影響を与えるのかについては、局所的な剪断応力の増加に寄与するのか、断層強度の低下に寄与するのか、などの観点から考察していきたい。

測地データと地震データを併用した非弾性変形の解析：新潟神戸変形集中帯への適用

Estimation of inelastic deformation using geodetic and seismic data: Application to Niigata-Kobe Tectonic Zone

*野田 朱美¹、齊藤 竜彦²

*Akemi NODA¹, Tatsuhiko SAITO²

1. 気象庁気象研究所、2. 防災科学技術研究所

1. Meteorological Research Institute, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震は地殻内の弾性歪みエネルギーを解消する現象であることから、地殻内の歪みエネルギーの蓄積状況を知ることは、地震の発生メカニズムを理解する上で重要である。そのため、我々はこれまで地震データと測地データに基づいて地殻内の歪みエネルギー変化をモニタリングする手法の開発を行ってきた。

歪みエネルギー変化は、背景応力場と応力変化から定量的に評価することができる。地震発生に至る歪みエネルギー蓄積（時間変化）をモニタリングするためには、周辺の地殻活動による応力変化の正確なモデル化が必要となる。プレート境界地震を発生させる歪みエネルギー蓄積の原因は、プレート境界での安定すべりや固着といったすべりの不均質による応力変化にあると理解できるのに対して、内陸の地殻浅部で発生する地震（内陸地震）はプレート境界ほど明瞭な構造境界のない場所で発生するため、プレート境界地震と同じ枠組みをそのまま適用することはできない。そこで本研究では、応力変化の原因である地殻内非弾性変形をプレート境界のような平面に限定させるのではなく、3次元モーメントテンソル密度分布としてモデル化することで、地殻内の応力変化の汎用的な推定手法を確立することを目指している。

Noda & Matsu'ura (2010) で提案した3次元モーメントテンソル密度分布の推定手法では、モーメントテンソルの方向も含めて推定したが、地表の限られたGNSS観測データから地下のモーメントテンソル6成分を一意に決定できるか、その信頼性が残された課題となっていた。地殻変動の力源たるモーメントテンソルの物理的実体が、地殻内の微小なクラックで生じる脆性破壊や塑性流動といった非弾性変形であることを考慮すると、その方向は基本的にテクトニック応力場（背景応力場）に従うはずである。そこで、モーメントテンソルの方向を応力場の方向に固定した上でモーメントテンソル密度分布を推定することとした。応力場の情報は、対象地域で発生した地震のメカニズム解から推定できる。つまり、モーメントテンソルを応力場の方向に固定する新たな手法では、測地データでは足りない情報を地震データの情報で補い、モデルの信頼性を高めることができる。

本講演では、新潟神戸変形集中帯への適用例を紹介する。新潟神戸変形集中帯のうち東経136°以東をモデル領域とし、F-netメカニズム解からモデル領域内の平均的な応力場を推定した。次に、GEONETのF3解を時系列解析して2004年中越地震等の地震イベントによる変動を取り除き、地震間のGNSS変位速度データを得た。モーメントテンソルの方向を平均的な応力場に固定し、変位速度データから3次元モーメントテンソル密度分布を推定した結果、新潟神戸変形集中帯に沿って不均質な分布が推定された。

Noda & Matsu'ura (2010) の結果と比較すると、Noda & Matsu'ura (2010) のモーメントテンソル密度のピークのうち、モーメントテンソルの方向が背景応力場と調和的な領域に関しては、本研究の解析でも同様のピークが現れた。一方、Noda & Matsu'ura (2010) でモーメントテンソルの方向が背景応力場と食い違う領域に関しては、本研究の結果ではモーメントの集中は見られなかった。したがって、モーメントテンソルの方向を固定することにより、その場のテクトニクスと調和的なモーメント、つまり非弾性変形を抽出することができたと考えられる。

B会場 | 一般セッション：S08. 地震発生の物理

■ 2021年10月15日(金) 13:30 ~ 15:00 | 金 B会場 B会場

PM-1

座長:鈴木 岳人(青山学院大学)、中島 淳一(東京工業大学)

13:30 ~ 13:45

[S08-12] 繰り返し地震と非地震性すべり：地震発生メカニズムの統一的理解

○中島 淳一¹、長谷川 昭² (1.東京工業大学理学院地球惑星科学系、2.東北大学大学院理学研究科)

13:45 ~ 14:00

[S08-13] 地震滑りとスロースリップとを繋ぐ遷移領域滑りの検出

○深尾 良夫¹、久保田 達也²、杉岡 裕子³、伊藤 亜妃¹、利根川 貴志¹、塩原 肇⁴、山下 幹也⁵、齊藤 竜彦² (1.海洋研究開発機構、2.防災科学研究所、3.神戸大学、4.東京大学、5.産業技術総合研究所)

14:00 ~ 14:15

[S08-14] 2016年チャマン断層の中規模地震に伴う一年以上続く地震後滑り：地震時滑りとの非相補性

○古屋 正人¹、松本 史子² (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、2.(株)パスコ)

14:15 ~ 14:30

[S08-15] 固着域を伝播する非地震性すべりの伝播速度

○加藤 尚之¹ (1.東京大学地震研究所)

14:30 ~ 14:45

[S08-16] 黒潮大蛇行がスロースリップイベントに及ぼす影響：孔内とDONETの観測データの統合解析

○有吉 慶介¹、木村 俊則¹、宮澤 泰正¹、ヴァーラモフ セルゲイ¹、飯沼 卓史¹、永野 憲¹、ゴンバーク ジョアン^{2,3}、荒木 英一郎¹、美山 透¹、末木 健太郎¹、矢田 修一郎¹、堀 高峰¹、高橋 成実⁴、小平 秀一¹ (1.海洋研究開発機構、2.米国地質調査所、3.ワシントン大学、4.防災科学技術研究所)

14:45 ~ 15:00

[S08-17] 2種類の滑り伝播端形状に対する伝播速度の存在条件とその物理的解釈

○鈴木 岳人¹ (1.青山学院大学理工学部 物理科学科)

繰り返し地震と非地震性すべり：地震発生メカニズムの統一的理解

Repeating earthquakes and aseismic slip: Toward unified understanding of seismogenesis

*中島 淳一¹、長谷川 昭²

*Junichi NAKAJIMA¹, Akira Hasegawa²

1. 東京工業大学理学院地球惑星科学系、2. 東北大学大学院理学研究科

1. EPS Department, Tokyo Tech, 2. Graduate School of Science, Tohoku University

内陸地殻やスラブ内における地震の発生には高間隙圧流体の存在とそれによる有効法線応力の低下が深く関与しているとの指摘がある一方で、プレート境界における繰り返し地震の発生には孤立したアスペリティパッチの周囲の準静的すべり（非地震性すべり）が不可欠であると考えられている。内陸地殻においても大地震の前震の中の繰り返し地震活動や前震のマイグレーションなどから非地震性すべりの存在が示唆されているが、非地震性すべりが普遍的に存在するかどうかはよくわかっていない。そこで本研究では、Igarashi (2020)の相似地震・繰り返し地震カタログに含まれる地震を用いて、日本列島下における繰り返し地震の分布およびその時間的特徴を系統的に調査した。まず、相似地震カタログに含まれる2003年～2017年に発生した地震を内陸地殻、太平洋プレートの上部境界面、および太平洋プレート・フィリピン海プレート内部（スラブ内部）の3つの領域に分け、地殻内とスラブ内の地震については波形相関を用いた震源決定(hypoDD)を行い、震源の重なりから繰り返し地震かどうかを判定した。断層半径の計算には応力降下量は3MPa（内陸地殻）、10MPa（スラブ内）を仮定し、断層が平面および深さ方向とも70%以上重なっている場合を繰り返し地震と判定した。このようにして選ばれた繰り返し地震は地殻内が1333グループ、スラブ内が79グループであった。これらの繰り返し地震は発生間隔が短い（数分から数ヶ月）ものがほとんどであり、いわゆるバースト型の繰り返し地震（Igarashi et al. 2003）である。なお、プレート境界の繰り返し地震についてはこれまでも多くの研究がなされているため、Igarashi (2020)の繰り返し地震カタログをそのまま利用した。本研究の結果、繰り返し地震は従来その発生が確認されていたプレート境界だけではなく、内陸地殻やスラブ内でも広く発生していることが明らかになった。特に、M6.5以上の大地震余震域や群発地震が活発な地域で繰り返し地震が多く発生しているという特徴がある。また、発生の時間的特徴から、平均発生間隔と発生レートがべき乗則の関係にあることも示された。この特徴は繰り返し地震の発生場所（内陸地殻、プレート境界、スラブ内）、またはその発生時期（定常的な活動か大地震の余効すべりに伴って発生かなど）によらず、すべての繰り返し地震グループで共通であり、改良大森公式のp値は概ね0.7-1.0の範囲になる。これらの結果は、繰り返し地震はどこでも起こりうることを、またその発生メカニズムは場所によらず同じであることを強く示唆している。つまり、周囲の準静的すべりにより孤立したパッチが破壊することで繰り返し地震が発生するというプレート境界で考えられてきたモデルは、すべての繰り返し地震に適用できると考えられる。繰り返し地震の発生メカニズムをより詳細に調べるため、2011年東北沖地震に誘発され、その地震活動の詳細な解析から間隙流体圧の時間変化が明らかにされた福島・山形県境の群発地震（Yoshida and Hasegawa, 2018）の震源域内で起こっている繰り返し地震の時空間変化を分析した。その結果、1) 繰り返し地震は背景地震と同じ断層面上で発生していること、2) 間隙圧が高い活動初期に繰り返し地震の発生割合が高いこと、3) 繰り返し地震の発生間隔は間隙圧が高い活動初期に短いことが明らかになった。結果1)は繰り返し地震の発生は通常地震（背景地震）と同じメカニズム（既存断層面上でのすべり）であることを示している。さらに、プレート境界での繰り返し地震の解釈を援用し、結果2), 3)も考慮すると、断層面上での間隙流体圧が大きいときに非地震性すべりのすべりレートが大きいこと、そのすべりに伴って繰り返し地震が発生することが強く示唆される。なお、繰り返し地震として認識されるためには、周囲のパッチと相互作用のない孤立したパッチが観測期間内に複数回すべることが必要であり、この条件が満たされない場合には、繰り返し地震ではないいわゆる普通の地震として観測されることになる。今回の観測事実とこれまでにわかっている知見を総合的に解釈すると、すべての地震は、A) 間隙圧の

上昇によって既存断層面の強度が低下し、B)そこで非地震性すべりが発生し、C) その中のアスペリティパッチがすべることによって発生すると結論づけられるのではないだろうか。これまでは地震発生にはA) のメカニズムが本質であると考えられてきたが、全ての地震の背後には非地震性すべりがあると考えると、プレート境界地震も含めすべての地震を統一的に理解できる。

地震滑りとスロースリップとを繋ぐ遷移領域滑りの検出

Detection of slip events amid the transitional regime between the unstable seismic and stable sliding regimes

*深尾 良夫¹、久保田 達也²、杉岡 裕子³、伊藤 亜妃¹、利根川 貴志¹、塩原 肇⁴、山下 幹也⁵、齊藤 竜彦²

*Yoshio FUKAO¹, Tatsuya Kubota², Hiroko Sugioka³, Aki Ito¹, Takashi Tonegawa¹, Hajime Shiobara⁴, Mikiya Yamashita⁵, Tatsuhiko Saito²

1. 海洋研究開発機構、2. 防災科学研究所、3. 神戸大学、4. 東京大学、5. 産業技術総合研究所

1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. Kobe Univ, 4. Univ Tokyo, 5. AIST

1. 序：プレート間滑りには、応力解放を伴わない定常安定滑りから蓄積応力を爆発的に解放する不安定滑りまで多様なモードが存在する。どのモードが出現するかは断層とそれを取り巻く条件に依存する。数値実験によればコントロールされた条件下では、滑りモードは安定滑り領域、遷移領域、不安定滑り領域に分離される（Barbot, 2019）。スロースリップイベント（SSE）は安定滑り領域と遷移領域との境界付近で発生し、津波地震や超低周波地震（VLFE）は遷移領域と不安定滑り領域との境界付近で起こる現象と考えられる（図1）。しかし、これまで遷移領域本来の滑りイベントの観測例がないため、SSEと津波地震との間には物理的に本質的なギャップがあるとする考えもある（Ide, 2014）。本講演では遷移領域の真ただ中に位置付けられる滑りイベントの観測例を2件報告する。

2. 観測と記録解析：2015年5月から翌年5月までの1年間、北部小笠原海溝急斜面の西側緩斜面（水深約5000m）において10台（故障のため実質的には8台）の絶対海底水圧計PARO-8B7000-I-005による最小サイト間距離10kmのアレー観測を行った。サンプリング速度は4Hz、カットオフ周波数は0.7Hzとした。2015年9月1日にアレーのごく近傍でM6.0の低角逆断層地震が発生し、アレーはその長周期地震波海底加速度成分・津波・上下動海底永久変位を記録した。これらを一連のダイナミックなプロセスとして解析し地震断層モデル（ $D=15\text{ cm}$, $S=210\text{ km}^2$, $M_0=0.95\times10^{18}\text{ Nm}$, $\Delta\sigma=0.77\text{ MPa}$ ）を得た。このモデルに基づいて計算した水圧波形と観測波形との一致は驚くほど良い。アレーは、地震の直後と3.5日後にそれぞれ時定数1–2時間程度の海底変動を記録した（図2：青線）。これら2イベントは、それぞれ本震と同じメカニズムの非地震性逆断層滑りであると考えて、その大まかな滑りの分布と時間発展を求めた。断層面はIwasaki et al. (2015)の推定したプレート境界面上にあるとし、深さ方向に3枚の断層セグメント（各面積は $20\times20\text{ km}^2$ ）を設定し、滑りは1つのセグメント上で一定であるとした。時刻 t の観測水圧変化は3つのセグメントの時刻 t における滑りの効果の和であると考え、各セグメントの滑りの時間発展を求めた。得られたモデルに基づく水圧変化の時間発展を赤線で示す（図2）。観測とモデルとの一致は一般に大変良い。

3. 結果と議論：本震直後のイベントも3.5日後のイベントも、また何れのセグメントにおいても、滑りの時間発展は、 $f(t)=1-\exp(-t/T)$ タイプの時間関数で非常に良く近似できる。3セグメントの平均的な T の値は最初のイベントが3800 s、2番目のイベントが2100 sであった。即ちイベントの特性時間 $2T$ は1時間から2時間の程度であった。 M_0 は最初のイベントが $8.1\times10^{18}\text{ Nm}$ 、2番目のイベントが $8.4\times10^{18}\text{ Nm}$ で、何れも本震より1桁近く大きい。震源関数 $f(t)$ の形と M_0 の大きさからして、これらが本震の余効変動ではなく、テクトニックな応力の解放イベントであることは明らかと思われる。応力降下量 $\Delta\sigma$ は最初が1.2 MPa、次が0.96 MPaの程度で本震の $\Delta\sigma$ と余り変わらない。観測されたイベントの特性時間 $2T$ は同じ M_0 の通常の地震の継続時間と比べて4桁大きく、同じ M_0 のSSEの継続時間と比べて3桁小さい（Gao et al., 2012）。応力降下量は、通常の地震と比べると（Denolle & Shearer, 2016）低めで、SSEと比べると（Gao et al., 2012）1桁以上大きい。破壊速度を断層の長さで継続時間の比で定義すると、通常の地震よりも4桁遅く、SSEよりも3桁速い（Gao et al., 2012）。今回検出したイベントは津波地震や超低周波地震よりも遅く、スロースリップイベントよりも早い現象である。プレート間滑りを不安定滑り（地震）領域と安定滑り領域とに分けたとき、両者の間を繋ぐ遷移領域の実態が見えてきたと考える。

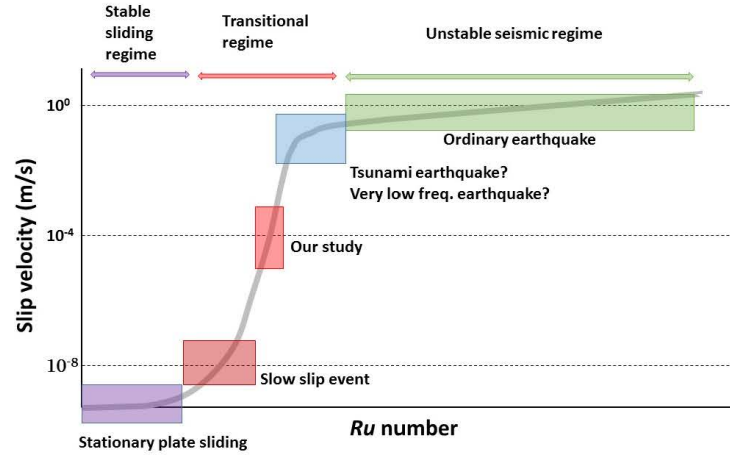


Figure 1. Schematic illustration for how slip mode changes when the R_u number is varied while the frictional parameter ratio, $(b-a)/b$, is kept constant (Barbot, 2019).

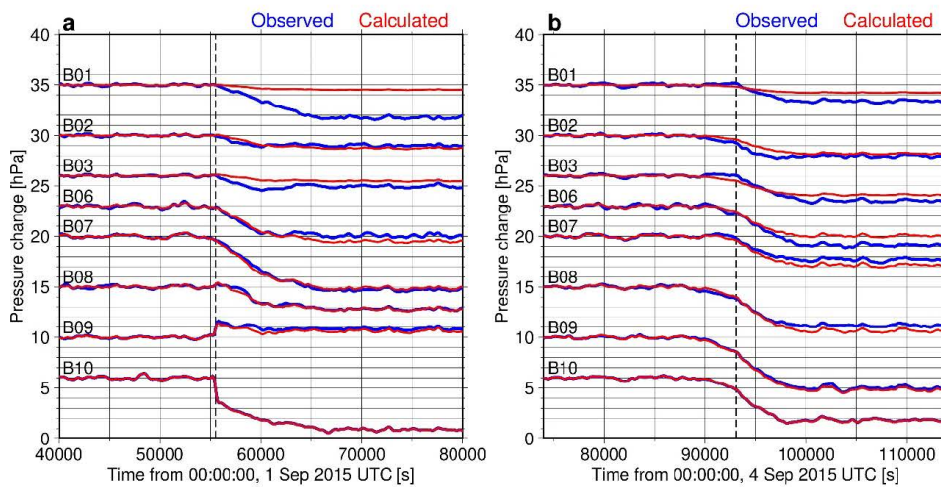


Figure 2. Observed (blue) and calculated (red), 600-s lowpass filtered, tide-removed records. They show the quasi-static responses of seawater to seafloor vertical displacements. **a.** Records for the first aseismic event. The vertical dashed line indicates the origin time of the mainshock. **b.** Records for the second aseismic event. The vertical dashed line indicates the origin time of the M3.2 aftershock. In **a**, the records were inverted for the first aseismic event after subtraction of the impact of the mainshock.

2016年チャマン断層の中規模地震に伴う一年以上続く地震後滑り：地震時滑りとの非相補性

Longer than One-year Afterslip due to the 2016 Moderate Earthquakes along Chaman Fault: Noncomplementary Co- and Post-seismic Slip Distribution

*古屋 正人¹、松本 史子²

*Masato FURUYA¹, Fumiko Matsumoto²

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、2. (株)パスコ

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. PASCO

チャマン断層は、インドプレート西部とユーラシアプレートの境界にあたる長さ900km以上の左横ずれ断層であり、地質学的に予想されるプレート間相対運動は $\sim 2\text{cm}/\text{年}$ 程度である。この断層は歴史的に見ても地震活動が低いことが知られており、固着しているかあるいはクリープしているのではないかと考えられてきた (Ambraseys and Bilham 2003)。陸上観測点は依然として少なく、InSARを用いてクリープ域と固着域のマッピングが報告されている (Fattahi and Amelung 2016; Barnhalt 2016)。一方、Furuya and Satyabala (2008)は、2005年に発生したM5の地震が非常に長く広い範囲でのAfterslipを起こしていたことを報告した。この2005年のM5地震以来、大きな地震は発生していなかったが、2016年5月と7月にM5クラスの地震が南西方向に100km以上離れた断層沿いで発生した。

2016年地震の地震前および地震時、地震後の地殻変動をESAのSentinel-1衛星のInSARデータを用いて調べたところ、震源近傍での地震前の地表付近のクリープ運動は存在していなかった。地震時地震後の地殻変動は明瞭で、特に2016年7月のmb4.7に伴う地殻変動は、Furuya and Satyabala (2008)で報告した変動とよく似ている。

得られた地震時地震後のInSARデータを元に、カルマンフィルタ[~]に基づいたいわゆる「時間依存滑りインバージョン」 (Segall and Matthews 1997)を行って、滑り分布と滑り速度分布を推定した。空間方向と時間方向の二つのハイパーパラメータは、Miyazaki et al (2006)に倣ってトレードオフから決定した。

推定された滑り分布(滑り速度分布)で最も特徴的なことは、一年以上続いた地震後滑りが地震時滑りの空間分布と「相補的ではない」ことである。従来から報告されているM>6地震に伴うAfterslipは、ほぼ例外なく地震後滑りは地震時滑りの外側で起こっている(e.g., Miyazaki et al., 2004; Hsu et al., 2006; Barbot et al., 2009)。我々の推定でも浅部での地震後滑りはゼロではないが、最も顕著に滑るパッチは明らかに地震時滑りが最大のパッチである。

この結果をRate-and-state friction (RSF) lawの枠組みで解釈するためには、(a-b)の「滑り速度依存性」 (e.g., Shimamoto 1986)が必要である。この滑り速度依存性はSlow slip event (SSE)のモデリングでもしばしば要請されている(e.g., Shibasaki and Iio 2003, Im et al 2020)。SSEは”静かに”滑り始めるように見えるため地震時滑りは無視されることが多いが、Ide et al (2007)が示したようにゼロではない。チャマン断層の中規模地震(とその地震後滑り)はNon-silent SSEと言えるかもしれない。

有効法線応力の動的な変化など(e.g., Suzuki and Yamashita 2009, Segall et al 2010)のRSF則の摩擦パラメータの調整以外の解釈もあり得る。

固着域を伝播する非地震性すべりの伝播速度

Propagation velocity of detachment front along a seismogenic plate interface in a rate-state friction model

*加藤 尚之¹*Naoyuki KATO¹

1. 東京大学地震研究所

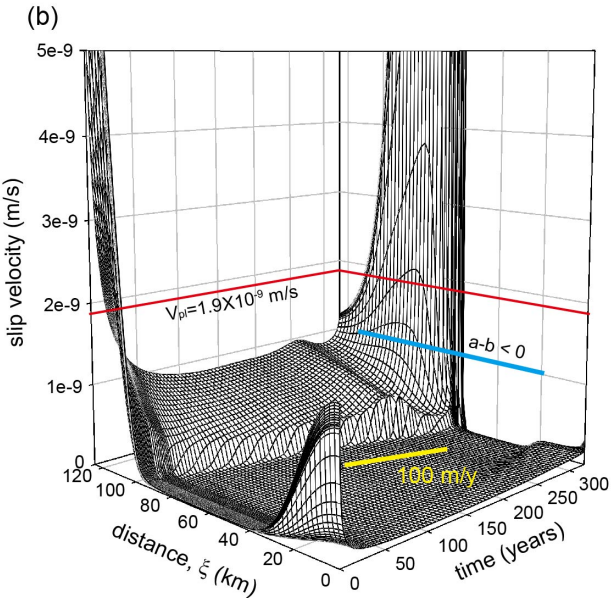
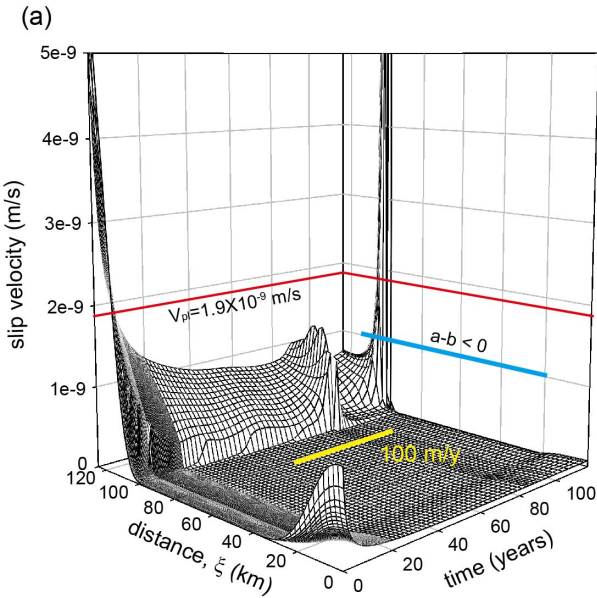
1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

速度・状態依存則を用いて地震発生サイクルの数値シミュレーションを行い、地震間（前の地震の直後から次の地震の直前まで）の非地震性すべりの時空間発展を調べた。モデルでは、沈み込み域のプレート境界を仮定し、十分深部のプレート境界に一定の安定すべり速度 V_{pl} を与えた。シミュレーションでは、浅部の速度弱化域（ $a-b<0$ ）で地震が周期的に発生し、深部の速度強化域（ $a-b>0$ ）で常に非地震性すべりが発生する状況が再現される。地震間での速度弱化域は完全に固着しているわけではなく、非地震性すべりが深部から浅部に伝播していく。深部の非地震性すべりにより固着域の最深部で応力集中が生じ、固着が徐々に破壊されていくためである。図1は、地震間のすべり速度の時空間分布のシミュレーション結果の例であり、(a)は速度・状態依存則の特徴的すべり量 $L=20\text{mm}$ の場合、(b)は $L=100\text{mm}$ の場合である。 ξ はプレート境界に沿って地表から測った距離であり、速度弱化域と速度強化域の境界は $\xi=113\text{ km}$ である。深部の速度強化域では常に非地震性すべりが発生しており、これは速度弱化域に徐々に伝播していく様子が見られる。速度弱化域での非地震性すべりのすべり速度は $0.1V_{pl}$ 程度であり、伝播速度はほぼ一定で、 V_{pl} に比例し、 $(b-a)\sigma$ に反比例することがわかった（ σ は有効法線応力）。特徴的すべり量 L には依存しない。非地震性すべりの伝播に伴い、プレート境界のせん断応力は、前の地震による応力降下状態から、すべり速度約 $0.1V_{pl}$ に対応する定常応力まで増大する（負の応力降下）。非地震性すべり域の先端では、深部の非地震性すべりによる応力集中と、非地震性すべりの伝播による負の応力降下による負の応力集中とが釣り合っている状況であると考えられる。この2つの状況の応力拡大係数が等しいと仮定し、均質無限弾性体中の半無限長クラックの解を利用すると、非地震性すべりの伝播速度を導くことができ、 V_{pl} に比例し $(b-a)\sigma$ に反比例するというシミュレーション結果を説明することができる。図1の2つの例の場合の理論的な伝播速度は約80 m/yで、シミュレーションで得られる約100 m/yと非常に近い値が得られる。非地震性すべりの伝播は測地データなどから検出できる可能性がある。Bruhat & Segall (2017)はCascadia沈み込み帯においてプレート境界の固着域で伝播する非地震性すべりの伝播速度を30–120 m/yと推定した。この結果から、前述の関係を使うと、 $(b-a)\sigma$ は0.1–0.3 MPaと推定することができる。

図1では、サイクルの後半ですべり速度の顕著な増大がみられる。このエピソード的すべりは、 L が小さいほど、また σ が小さいほど顕著となる傾向がある（図1a）。プレート境界の浅部行くほど、前の地震による応力降下から回復しておらず低応力状態にあるので、このすべりは浅部にはあまり伝播せず停止する。一方、深部方向には高速で逆伝播し、その伝播速度は図1(a)の場合は4 km/yである。図1(b)の場合は、すべり域の先端が明瞭でなく、伝播速度は決められない。このエピソード的すべりに伴い、せん断応力は、ほぼ $\tau_{ss}(V)$ に沿って低下する。

文献

Bruhat, L. & Segall, P., 2017, *Geophys J Int.*, 211, 427-449.



黒潮大蛇行がスロースリップイベントに及ぼす影響：孔内とDONETの観測データの統合解析

Impact of Kuroshio meander on the slow slip event in March 2020 detected by borehole and DONET observatories

*有吉 慶介¹、木村 俊則¹、宮澤 泰正¹、ヴァーラモフ セルゲイ¹、飯沼 卓史¹、永野 憲¹、ゴンバーグ ジョアン^{2,3}、荒木 英一郎¹、美山 透¹、末木 健太郎¹、矢田 修一郎¹、堀 高峰¹、高橋 成実⁴、小平 秀一¹

*Keisuke ARIYOSHI¹, Toshinori Kimura¹, Yasumasa Miyazawa¹, Sergey Varlamov¹, Takeshi Iinuma¹, Akira Nagano¹, Joan Gomberg^{2,3}, Eiichiro Araki¹, Toru Miyama¹, Kentaro Sueki¹, Shuichiro Yada¹, Takane Hori¹, Narumi Takahashi⁴, Shuichi Kodaira¹

1. 海洋研究開発機構、2. 米国地質調査所、3. ワシントン大学、4. 防災科学技術研究所
1. JAMSTEC, 2. USGS, 3. University of Washington, 4. NIED

In our recent study, we detected the pore pressure change due to the slow slip event (SSE) in March 2020 at the two borehole stations (C0002 and C0010), where the other borehole (C0006) close to the Nankai Trough seems not because of instrumental drift for the reference pressure on the seafloor to remove non-crustal deformation such as tidal and oceanic fluctuations. To overcome this problem, we use the seafloor pressure gauges of cabled network (DONET) stations nearby boreholes instead of the reference by introducing time lag between them. We confirm that the time lag is explained from superposition of theoretical tide modes. By applying this method to the pore pressure during the SSE, we find pore pressure change at C0006 about 0.6 hPa. We also investigate the impact of seafloor pressure due to ocean fluctuation on the basis of ocean modeling, which suggests that the decrease of effective normal stress from the onset to the termination of the SSE is explained by Kuroshio meander and may promote updip slip migration, and that the increase of effective normal stress for the short-term ocean fluctuation may terminate the SSE as observed in the Hikurangi subduction zone.

2種類の滑り伝播端形状に対する伝播速度の存在条件とその物理的解釈

Conditions for the existence of the propagation velocities for two forms of the slip fronts and their physical interpretations

*鈴木 岳人¹

*Takehito SUZUKI¹

1. 青山学院大学理工学部 物理科学科

1. Department of Physical Sciences, Aoyama Gakuin University

2つの媒質間の滑りの伝播は理学的・工学的に重要な問題であり、特にその伝播端の伝播速度の決定機構は長く興味を集めてきた。これにはもちろん断層面上の滑りの伝播速度の理解も含まれる。本発表では滑り速度に二次で依存する摩擦則を仮定した以前の我々の結果（Suzuki and Matsukawa, 2019）を拡張し、滑りにも依存する摩擦力を導入して、それらの伝播速度が物理的に存在できる条件を摩擦則中に現れるパラメータの観点から明らかにする。

解析には線形臨界安定性解析（Linear Marginal Stability Hypothesis, LMSH）を用いる。ここで伝播端にはintruding frontとextruding frontの二通りがあることに注意する（Suzuki and Matsukawa, 2019）。その理解のため、1次元系を考え、ある物理量 s の伝播を考える。 s がゼロと正の定常状態があるとし、一方が安定、もう一方が不安定であるとする。この時、 $s=0$ が不安定で $s>0$ の領域が侵入していく場合をintruding front、 $s>0$ が不安定で $s=0$ の領域が侵入していく場合をextruding frontと呼ぶ。特にextruding frontについて着目したい。定義から明らかのように、通常extruding frontは「一定速度で相対的に滑っている媒質の運動を止めた時の滑りの伝播端」の形状である。

LMSHの仮定の下、intruding front速度として2つ、extruding front速度として3つが存在することが明らかになり、またそれらの解析解も得られた。これらのうち、intruding front速度のうちの一つ、extruding front速度のうち2つは光学モードであり非物理的な伝播速度であった。すなわち両frontsに対して一つずつが物理的な音響モードであったと言える。加えて、支配方程式中において摩擦則を $C_1 \dot{u} - C_2 u$ と書いた時（ u は変位、 $\dot{u}$ はその時間微分） $C_1 - C_2$ 相空間でそれらの物理的伝播速度が存在し得る領域の境界を表す曲線の解析的表現も得た。これは伝播速度の存在の有無、すなわち定常伝播の存在の有無が C_1 と C_2 の値から予測可能であることを示す。

加えて、extruding front速度において、滑り速度の二次の依存性を仮定した摩擦則に基づいた以前の数値計算結果（Suzuki and Matsukawa, 2019）と調和的な結果が得られたことは重要である。LMSHで行われるような、変位 u やその微分が小さいという仮定では通常intruding frontしか現れない。しかしここでは（一般的に小さくない）ある基準となる滑り・滑り速度の点の伝播がextruding frontとして記述できるということが明らかになった。加えて強調すべきは、extruding速度の方がintruding速度よりも小さいということである。前者が高速地震、後者がゆっくり地震に対応することも示唆される。通常の地震とゆっくり地震の存在する条件を示せたとも言える。

B会場 | 一般セッション：S08. 地震発生の物理

2021年10月16日(土) 11:00 ~ 12:15 | B会場 B会場

AM-2

座長: 吉田 圭佑(東北大学)、直井 誠(京都大学防災研究所)

11:00 ~ 11:15

[S08-18] 動的破壊モデルから考察する複雑な断層形状がもたらす条線への影響

○青木 拓実¹、金子 善宏¹、Kearse Jesse² (1. 京都大学、2. Victoria University of Wellington)

11:15 ~ 11:30

[S08-19] スペクトル比を用いた2000年鳥取県西部地震震源域におけるダブルカップル地震と非ダブルカップル地震の震源特徴の推定

○本越 拓実¹、松本 聡²、飯尾 能久³、酒井 慎一⁴、加藤 愛太郎⁴ (1. 九州大学大学院理学府 地球惑星科学専攻、2. 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、3. 京都大学防災研究所、4. 東京大学地震研究所)

11:30 ~ 11:45

[S08-20] 室内水圧破碎実験によって誘発された微小破壊の地震モーメント・コーナー周波数推定

○直井 誠¹、今北 啓一¹、陳 友晴¹、山本 和敏¹、田中 壘¹、川方 裕則²、石田 毅¹、福山 英一¹、有馬 雄太郎³ (1. 京都大学、2. 立命館大学、3. 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構)

11:45 ~ 12:00

[S08-21] Radiated energy and source complexity of small earthquakes estimated from a large source time function data base in Japan

○吉田 圭佑¹、金森 博雄² (1. 東北大学 地震・噴火予知研究観測センター、2. カリフォルニア工科大学)

12:00 ~ 12:15

[S08-22] P波前地震重力信号に現れる地震波形と異なる見かけの震源励起依存性

○河合 貴太郎¹、亀 伸樹¹ (1. 東京大学地震研究所)

動的破壊モデルから考察する複雑な断層形状がもたらす条線への影響

Dynamic simulations of coseismic slickenlines on non-planar and rough faults

*青木 拓実¹、金子 善宏¹、Kearse Jesse²

*Takumi Aoki¹, Yoshihiro Kaneko¹, Jesse Kearse²

1. 京都大学、2. Victoria University of Wellington

1. Kyoto University, 2. Victoria University of Wellington

地震の強震動分布を決定する要因の1つである地震の破壊伝播方向を、古地震に対して求めることは重要な課題である。近年、過去の地震で観測された条線と単純な平面断層での動的破壊モデルによって、地震時に断層面上に記録される条線の湾曲と破壊伝播方向との間の関係性が示され（Kearse et al., 2019; Kearse and Kaneko, 2020）、地質的観察から破壊伝播方向を推定できる可能性が提示された。一方で複雑な断層面で記録された条線には、この関係性と湾曲の凹凸が逆向きになっているものも報告されている。このような湾曲が逆向きになっている条線を説明するため、本研究では地表付近に形状を与えた断層や複雑な形状を持つ断層モデルを用いて地震破壊のシミュレーションを行った。その結果、平面断層の場合と逆向きの凹凸を持つ条線が得られた。これは断層に形状を与えることで断層面上の初期応力が変化し、特にその鉛直成分の変化によって逆向きの湾曲が得られたと考えられる。また本研究では、特に初期応力が深さとともに増加するようなモデルでは地表面近くで逆向きの湾曲が得られるようなパラメータ範囲が狭く、地表付近で湾曲の向きを逆にすることが難しいことも分かった。本研究の結果から、複雑な断層形状を持つ地点での条線の解釈には地形の影響を考慮する必要があり、条線の湾曲から破壊伝播方向を推定する際には断層形状が単純な地点での観察を用いるべきであると考えられる。

スペクトル比を用いた2000年鳥取県西部地震震源域におけるダブルカップル地震と非ダブルカップル地震の震源特徴の推定

Estimation of characteristics of the epicenter of double-couple earthquake and Non-double-couple earthquake in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake

*本越 拓実¹、松本 聡²、飯尾 能久³、酒井 慎一⁴、加藤 愛太郎⁴

*Takumi MOTOKOSHI¹, Satoshi Matsumoto², Yoshihisa Iio³, Shin'ichi Sakai⁴, Aitaro Kato⁴

1. 九州大学大学院理学府 地球惑星科学専攻、2. 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、3. 京都大学防災研究所、4. 東京大学地震研究所

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

通常の断層運動（ダブルカップル型地震：DC地震）では説明できない地震を非ダブルカップル型（NDC）地震と呼ぶ。NDC地震は、これまで主に火山地域や地熱地帯で報告されており、NDC成分は、断層の破壊の複雑さや流体の存在などを示すものとして考えられている。NDC地震の研究は、断層運動のプロセスや地震の発生機構を理解するために重要であり、地殻の応力や強度に関する新しい情報を得る機会を提供すると考えられる。

2000年に発生した鳥取県西部地震震源域では様々な研究がされており、この地域では2017年3月から2018年4月まで1000点の地震計を設置する観測が行われた（0.1満点地震観測）。Hayashida et al. (2020) は0.1満点地震観測網の地震計と定常観測点であるHi-net観測点の記録を用いてP波の走時と極性を読み取り、震源決定を行った。発震機構解を推定すると節面やヌル軸付近にDCでは上手く説明できない極性分布があり、内陸地震発生場でNDC地震が観測されたことが示された。本研究は、P波のスペクトルからNDC地震とDC地震の特徴を比較することで、NDC地震への理解を深めることを目的とする。

本研究では、NDC地震とDC地震について、観測点ごとにP波到達時間前後のスペクトルを求め、これらをコーダ波のスペクトルで規格化することで、各観測点のスペクトルの特徴を見た。また、震源球上でP軸、T軸を通る観測点を選択し、スペクトルの変化を確かめた。観測点選択の際はコーダ波/ノイズのスペクトル比が2以上となる周波数が多い観測点を選択した。

解析の結果、DC地震とNDC地震で震源スペクトルに大きな違いは見られなかった。そのうえ、地震によってはノイズが大きく、広い周波数域でスペクトルの特徴を正確に見ることができなかった。そのため、近接するDC地震とNDC地震について、各観測点のP波スペクトルとその比の特徴をみたが、同様に観測点の位置とスペクトルの関係は見られなかった。今回は少数の地震について震源スペクトルの特徴を確認したため、今後はより多くの地震とDC地震・NDC地震の組み合わせの震源スペクトルの特徴を確かめることで、NDC地震の発生過程を考察していく。

室内水圧破砕実験によって誘発された微小破壊の地震モーメント・コーナー周波数推定

Estimation of seismic moment and corner frequency of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory

*直井 誠¹、今北 啓一¹、陳 友晴¹、山本 和畝¹、田中 壘¹、川方 裕則²、石田 毅¹、福山 英一¹、有馬 雄太郎³

*Makoto NAOI¹, Keiichi IMAKITA¹, Youqing CHEN¹, Kazune YAMAMOTO¹, Rui TANAKA¹, Hironori KAWAKATA², Tsuyoshi ISHIDA¹, Eiichi FUKUYAMA¹, Yutaro ARIMA³

1. 京都大学、2. 立命館大学、3. 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構
1. Kyoto Univ., 2. Ritsumeikan Univ., 3. JOGMEC

圧電素子を用いたAE (Acoustic Emission) センサは、数cm規模の室内実験から数十m規模の現場計測において破壊現象の監視に用いられる。数100 kHz以上の高周波で高い感度を得られるので、地震計では検知できない微小な破壊を検出できるが、その周波数特性は複雑であり、かつ設置状態の影響を大きく受けるので、波形記録やスペクトルを用いて詳細な解析を行うことは簡単ではない。例えば、個々のセンサの微妙な接着状態の違いによってその感度が倍半分程度変化するので、振幅を用いた解析にはそれぞれのセンサの感度評価・補正が必要であるし、絶対感度が不明であるため波形記録から破壊の規模を求めることも困難である。本研究では、1) AEセンサの指向性を独自推定、2) 実際に用いる設置方法における周波数特性をレーザー・ドップラー速度計を用いて評価、3) 実験毎に全センサの相対感度を音波透過試験によって評価、することでこれらの問題を解決し、室内水圧破砕実験で得られたAEの地震モーメント M_0 を評価するとともに、Multiple Empirical Green function法 (MEGF法; Hough et al. 1999) によってそのコーナー周波数 f_c を評価した。

解析には、Tanaka et al. (2021; GJI) が実施した山口県産黒髪島花崗岩を用いた実験と、Naoi et al. (2020; GJI) が実施した米国産イーグル・フォード頁岩を用いた実験で得られたAEデータを用いた。実験は、65x65x130 mmの直方体形状に整形した供試体を用いて実施し、供試体長手方向に5 MPaの一軸載荷を加えた状態で、供試体中央部に穿孔した破砕孔に流体を圧入することで実施した。AEデータは、供試体表面に設置した24個のAEセンサ（共振型AEセンサ8個、プリアンプ内蔵高感度AEセンサ16個）によって、10 MHz sampling, 14bitの連続収録によって取得した。得られた連続波形データから、波形切り出し、走時自動検測、震源決定を行ってAEカタログを作成し、これらのイベントに対して、 M_0 と f_c の推定を実施した。

個々のAEのP波スペクトルに対し、1) - 3) の影響を補正した観測スペクトルに、理論スペクトルをフィッティングして M_0 、 M_w (モーメント・マグニチュード) を評価したところ、-9.2から-6.8の M_w を得た。 M_0 の評価に必要な放射パターン係数の補正は、Naoi et al. (2020; GJI) , Tanaka et al. (2021; GJI) が、各センサの相対感度とセンサ指向性を評価・補正した上で求めたモーメント・テンソル解を用いて行った。これらの先行研究では、イーグルフォード頁岩ではほぼすべてのAEが開口型であること、黒髪島花崗岩の実験では、剪断・開口・閉合型を含む多様なメカニズムのAEが生じたことがわかっている。

次に、AEセンサの周波数特性や媒質の伝達関数のモデリング誤差の影響を軽減可能なMEGF法を用いて個々のイベントの f_c を推定したところ、100-1000 kHzの範囲の値を得た。測定帯域が狭いことや、AEの震源メカニズム・規模の時間変化に起因するバイアスが複数かかるために、結果の解釈に注意が必要であるが、得られたAEに対して、1) せん断型破壊に対して繰り返し報告されている応力降下量一定則と調和的な M_0 - f_c 関係を持つイベントが震源メカニズムによらず多発した、2) 特に開口成分が卓越するものに対して、上記スケーリン

グ則から予想されるよりも低周波成分が卓越するイベントが多発した，という結論が得られた． 2）からは，震源における高い間隙流体圧の存在が，開口変位の発生と低周波成分の卓越に寄与することが示唆される．

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) および，科研費 (16H04614)，京都大学教育研究振興財団の援助により行われました．

Radiated energy and source complexity of small earthquakes estimated from a large source time function data base in Japan

*吉田 圭佑¹、金森 博雄²

*Keisuke YOSHIDA¹, Hiroo Kanamori²

1. 東北大学 地震・噴火予知研究観測センター、2. カリフォルニア工科大学

1. Tohoku University, 2. California Institute of Technology

Although the corner frequency is widely used in earthquake source studies, its relation to physical source parameters is often ambiguous. Specifically, the source corner frequency or source duration does not explicitly include information about the complexity of the source process. The radiated energy is a more direct physical quantity for studying the dynamic characteristics of earthquake rupture. In Japan, high-quality seismic waveform records are available from the dense national seismic networks, which allow the determination of detailed source time functions even for small earthquakes ($M_w > 3.3$) (Yoshida, 2019). We systematically examined the radiated energy of small earthquakes in Japan using the abundant source time function data.

We estimated the radiated energy of earthquakes for which the moment tensor is listed in the F-net moment tensor catalog from 2004 to 2019 ($M_w 3.3-5.5$). The waveform data were derived from the stations of national universities, JMA, NIED Hi-net, F-net, and V-net. We applied the deconvolution algorithm developed by Ligorria and Ammon (1999) that employs the method of Kikuchi and Kanamori (1982) to SH waves and estimated the apparent source time functions (ASTFs). We used the waveforms of smaller earthquakes that occurred close to the target earthquake (< 3 km) with magnitude differences from 1 to 2 as the empirical Green's functions (eGFs). We first applied a low-pass filter to the raw velocity waveforms, with a cut-off frequency increasing with $M_0^{-1/3}$ of the target earthquake.

For approximately 1300 earthquakes ($M_w 3.3-5.5$), we derived ASTFs at more than ten stations. Many earthquakes show a coherent azimuthal dependence of AMRFs. Some earthquakes are characterized by distinct multiple pulses (Fig. 1), indicating complex ruptures of multiple patches. Then, we estimated the radiated energy E_R from each AMRF using the method of Vassiliou & Kanamori (1982). We also measured the source duration T and computed the radiated energy enhancement factor (REEF; Ye et al., 2018). As representative values of E_R , source duration T , and REEF for each earthquake, we used the median of the results estimated from the different AMRFs.

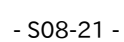
The estimated values of E_R are generally proportional to M_0 , with a typical ratio E_R/M_0 of about 3.6×10^{-5} . The duration cubed, T^3 , tends to be proportional to M_0 , with a typical value of M_0/T^3 about 3.9×10^{16} (in SI unit). This corresponds to a stress parameter of 2.0 MPa in Brune's (1970) model. REEF is typically ~ 3 but tends to be larger for multiple shocks. We do not see significant spatial variations of E_R/M_0 , M_0/T^3 and REEF, or any clear dependence of these parameters on depth, focal mechanism, and seismicity type.

The scaled energy $E_R/M_0 = 3.6 \times 10^{-5}$ obtained in this study for small earthquakes ($M_w < 5.5$) is comparable to the estimates for larger earthquakes (e.g., Kanamori et al., 2020) in Japan. E_R/M_0 in our dataset does not significantly vary with the earthquake size, as suggested by Ide et al. (2001). The typical values of $T/M_0^{1/3}$ and REEF in our data set tend to be smaller than those of larger global earthquakes (Duputel et al., 2013; Ye et al., 2018). At face value, this suggests that small earthquakes have simpler source processes than large ones. However, this trend may be affected to some extent by our low-pass filter with a relatively

low cut-off frequency.

Although the median values of E_R/M_0 and M_0/T^3 are fairly constant with M_0 (or Mw), the individual values do vary over an approximately 1.5 order of magnitude. E_R/M_0 in our dataset generally increases with M_0/T^3 with an approximate slope of 0.5 on the log-log plot. This suggests that M_0/T^3 or stress parameter can be used to approximately estimate the scaled energy. However, the proportionality relationship does not hold for complicated ruptures (high REEF events). The variation of REEF ranging from 1 to 40 obtained in this study suggests that considerable rupture complexity is involved in small earthquakes too.

Er/M0= 3.11e-05, REEF= 6.78e+00, Td= 2.90e-01s (median)



P波前地震重力信号に現れる地震波形と異なる見かけの震源励起依存性

Source-parameter dependencies appeared in earthquake pre-P elasto-gravity signals and the difference from seismic waves

*河合 貫太郎¹、亀 伸樹¹

*Kantaro Kawai¹, Nobuki Kame¹

1. 東京大学地震研究所

1. ERI, UNIVERSITY OF TOKYO

地震の動的破壊は断層周辺に質量再分配を引き起こし、また地震波は岩石の密度変動を伴いながら伝播する。両過程はP波到達前に過渡的な重力変動を引き起こす。このようなP波前重力信号は、既往研究において複数の大地震のデータ中に検出されてきた。しかし、検出は垂直成分に限定されノイズの高い水平成分は利用されてこなかった。

木村(2020, 学位論文)は、Hi-net水平加速度計(tiltmeter)アレイデータ解析から2011年の M_w 9.1 東北沖地震におけるP波前重力信号の水平成分を初めて検出した。これを、広域帯地震計の信号垂直成分と組み合わせ3成分全波形を用いて震源パラメータのグリッドサーチを行ったところ、断層の傾斜角 δ を 11.5° - 15.3° 、 M_w 8.75-8.92 に制約することに成功した。地球自由振動の理論研究において地震波の励起は、 δ が小さく震源が浅い地震に対して地震モーメントを M_0 とすると $M_0 \sin(2\delta)$ に近似的に比例し、 δ と M_w はそれぞれ独立に決定できない量であることが示される(Kanamori and Given, 1981)。木村の研究は従来の自由振動理論では説明されていないP波前信号の震源励起依存性を示している。そこで本研究では、この新たに見いだされた信号特性を理解することを目指して、理論波形合成計算コードを用いた数値実験を行った。

数値実験には Zhang et al. (2020)と Wang et al. (2017)によって開発された計算コード QSSPEGS_potential_Code を用いた。この計算コードは、従来の長周期地震波形成計算と同じ弾性重力完全結合の方程式を用いて現実的な地球構造におけるP波前重力信号の波形合成を可能にする。これまでに提案されてきた計算法と異なり、一切の近似計算をしていないことが特徴であり、また現実的な時間で実用制度の波形を得ることができる。ここでは、2011年 M_w 9.1 東北沖地震の傾斜角を系統的に変化させた模擬P波前重力信号波形を合成し、振幅の傾斜角依存性を調べた。点震源を仮定し、 $M_w = 9.1$ に固定し、 $\delta = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ と変化させた。観測点を神岡として、地動加速度 $(d^2/dt^2)\mathbf{u}$ 、重力場の変化 $\delta\mathbf{g}$ のそれぞれの成分を合成し、これらを用いて観測されるP波前重力信号を求めた。ここで、加速度センサーの出力 $\mathbf{s}$ は重力変化そのものではなく、地動加速度の影響を受け $\mathbf{s} = (d^2/dt^2)\mathbf{u} - \delta\mathbf{g}$ となることに注意が必要である。

結果、 $(d^2/dt^2)\mathbf{u}$ と $\delta\mathbf{g}$ の水平成分は共に $\sin(2\delta)$ の依存性を示すが、信号出力 $\mathbf{s} = (d^2/dt^2)\mathbf{u} - \delta\mathbf{g}$ には $\sin(2\delta)$ とは異なる傾斜角依存性がみられた。計算前の想定通りに $(d^2/dt^2)\mathbf{u}$ と $\delta\mathbf{g}$ は $M_0 \sin(2\delta)$ で震源励起され、これらの差をとると新しい傾斜角依存性が現れる結果となった。一方、想定とは異なり $(d^2/dt^2)\mathbf{u}$ と $\delta\mathbf{g}$ の垂直成分の振幅は共に、 $\sin(2\delta)$ の依存性を示さなかった。逆に、 $\mathbf{s} = (d^2/dt^2)\mathbf{u} - \delta\mathbf{g}$ は $\sin(2\delta)$ の依存性を示す結果となった。このP波前重力信号 $\mathbf{s}$ の δ 依存性は水平成分と垂直成分ともに木村(2020)の実データ解析結果と調和的である。しかし、数値実験の垂直成分の結果は想定しておらず、今後、地球自由振動の理論との整合性との検討が必要である。

B会場 | 一般セッション：S08. 地震発生の物理

📅 2021年10月16日(土) 13:30 ~ 14:00 | 🏢 B会場 B会場

PM-1

座長: 平野 史朗(立命館大理工)

13:30 ~ 13:45

[S08-23] ω^{-2} モデル, モーメントの3乗則, およびGR則を満たす確率的震源時間関数

○平野 史朗¹ (1.立命館大学理工学部)

13:45 ~ 14:00

[S08-24] テクトニック微動から低周波地震を抽出する

○井出 哲¹ (1.東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻)

ω^{-2} モデル, モーメントの3乗則, およびGR則を満たす確率的震源時間関数

Stochastic source time functions satisfying the ω^{-2} -model, the cube law, and the GR law

*平野 史朗¹

*Shiro HIRANO¹

1. 立命館大学理工学部

1. College of Sci. & Eng., Ritsumeikan Univ.

震源時間関数(STF)は, 地震時の断層面上の滑り速度分布を空間積分した時系列である. 多くの震源過程インバージョンの結果がデータベースに集積された結果, STF について以下の経験則が明らかにされている:

経験則1) STF は連続で, 有限の持続時間を持ち, 多くは非負かつ単峰.

経験則2) STF を時間積分したモーメント関数は, 破壊開始からの経過時間の3乗に比例して成長.

経験則3) STF の Fourier 振幅スペクトルは ω^2 モデルで良く近似される.

経験則4) 最終的なモーメントの出現頻度は Gutenberg-Richter 則に従う.

経験則1については, ごく最近定量化され, STF の8割は単峰, 2割は複峰であることが分かっている [Yin+ 2021 SRL]. この傾向と例外の存在は, 震源過程のモデルが概ね単純でありながら, ある程度の複雑さもまた要求されることを示唆している. また, 個々の事例においては充分滑らかな関数というわけではなく, 多少の擾乱を伴う時系列であることも明らかである. 経験則2および3については, 古くから知られ, これらを説明する様々な震源モデルが提唱されてきた. しかし古典的な亀裂モデルなどは前述の擾乱を容易に再現できない. 一方で非平面断層などの動力学的モデルは, パラメタ数と計算機負荷の双方に難があり, データを高精度に説明するには不可欠であるものの, 全く別の単純なアプローチもまた, 困難を補い理解に資する可能性がある. 更に経験則4も踏まえると, 現象の細部は割愛するとして, 統計的に経験則を満たす確率論的アプローチが有効であろうと考えられる.

地震にまつわる統計的性質を理解するための確率論的方法として, 確率微分方程式(SDE)によるモデル化が複数試みられてきた. SDE とは, 微分方程式にノイズ項を加えて積分することにより, ランダムさを内包した系をモデル化するものである. 先駆的なものは繰り返し地震の間隔 [Matthews+ BSSA 2002] やスロー地震 [Ide 2008 GRL] について, いずれも長時間を意識したものである. これらは通常地震イベントの STF をモデル化するものではないが, 地震学における SDE の有効性を示唆している. より短時間の現象としては, 破壊の最中における断層面上の運動方程式に摩擦法則とノイズを導入した事例 [Wu&Chen 2019 arXiv; Wu+ 2019 Chaos] があるが, 残念ながら定常状態を意識したものであり, 地震の開始と停止については度外視されている.

そこで本研究においては, 地震時の STF を SDE に基づいてモデル化し, 経験則1-4を満足することを示す. ただし SDE の性質から必然的に, 確率変数の時系列は, その振幅スペクトルが ω^1 に漸近するブラウン運動である. 従って1つの確率変数の時系列だけでは, 通常地震についての経験則3を満たすことはできない. そこで, スペクトルが ω^1 に漸近する時系列を2つ用意し, その畳込み積分が STF であると解釈することで, 経験則3を満たすことができる. これを発想の起点として, Bessel 過程と呼ばれる SDE を考える. Bessel 過程の解は必ず非負で, かつパラメタを適切に設定すれば有限持続時間を持つことが数学的に示されているため, 経験則1を満たす上で都合が良い. また, パラメタ如何では持続時間の出現頻度がべき分布で近似され, 従って経験則4も満足する. 残された経験則3については, 本研究の数値計算により統計的に満たされることが明らかになった. 従って, 4つの経験則は全て, 2つの Bessel 過程の畳込み積分によって説明可能である. なお, 2つの Bessel 過程の持続時間は確率によって決まるためそれぞれに異なるが, 両者が大きく異なる場合には経験則3が満たされない. そこで

両者の比を2以内(case A)に制限した場合と10以内(case B)に制限した場合を考え, 後者のほうが STF に多様性が生じることが分かった(Figure 1).

最後に, 2つの Bessel 過程の畳込み積分が持つ物理的意味について考察する. Aki&Richards の表現定理から, STF は断層面上の応力降下速度の空間積分と, それに対する断層滑りの自己応答関数の畳込み積分で記述できる. 前者の応力降下速度が Bessel 過程だとすると, 断層全体で積分した滑りと応力の時系列は, 臨界滑り量が最終滑り量の20–50%程度であるような滑り弱化則と等価であることがわかった. 後者については, 今なおその意味が自明ではないが, 少なくとも断層の自己応答が線形弾性体のものではなく, 断層破砕帯などに起因する散乱波などのランダムネスが卓越するものであると予想される.

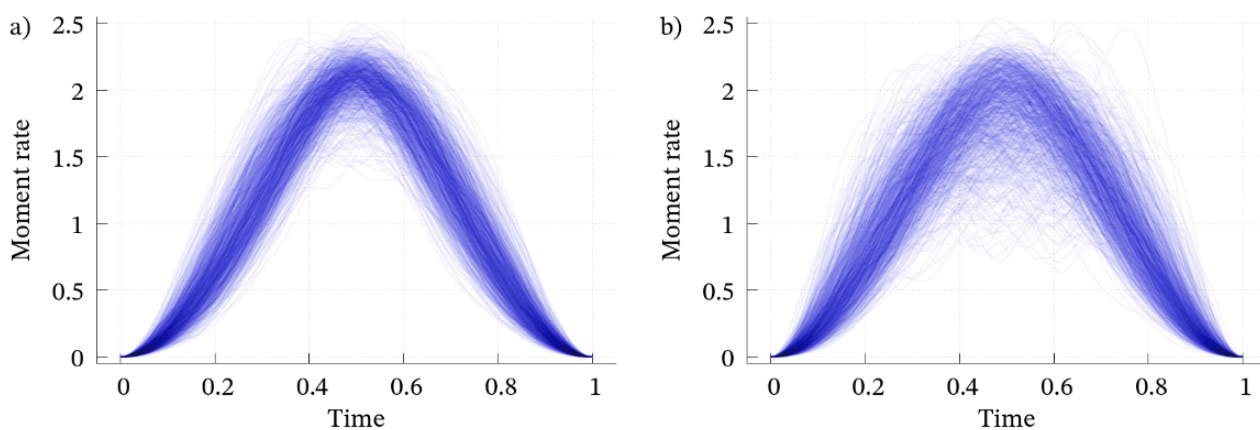


Figure 1. The 1,000 computed convolutions of the two Bessel processes for (a) case A and (b) case B. Time scale and total moment are normalized.

テクトニック微動から低周波地震を抽出する

Extraction of Low-Frequency Earthquakes from Tectonic Tremor

*井出 哲¹

*Satoshi IDE¹

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

テクトニック微動と低周波地震（LFE）は、広帯域スロー地震の高周波（1Hz以上）成分の異なる表現であり、様々な地域で発見されている。LFEは微動の構成要素と考えられているが、長時間続く微動の中には、構成要素とみなせるLFEを見つけることが困難な場合も多い。そこで本研究では一般的に微動中から合成LFE、つまり微動発生地域におけるインパルスの震源からの地動応答を抽出する新しい手法を開発した。合成LFEは、多くの観測点で同時に発生する微動信号のインパルス性を用いて定義され、規格化してスタックした微動波形の絶対振幅最大値を最大化することで抽出される。この最大化関数は、極めて多峰的なので、遺伝的アルゴリズムと反復的改善を組み込んだ最適化手法を用いて最大化する。まず、この手法の妥当性をテストデータに適用して検証した後、近隣でLFEがほとんど検出されていない微動活動に適用する。一例は、潮汐応力に非常に敏感であることが知られている岡山の微動である。この微動に対して抽出した合成LFEは、正確な震源位置の決定や、マッチドフィルター解析による長期にわたる包括的な微動活動の把握に役立つ。具体的には海溝軸から遠く離れているにもかかわらず、岡山の微動の深さは約26kmと極めて浅いことがわかる。このように、LFEを微動のインパルス性を用いて新たに定義できることは、連続する微動活動は、ランダムな揺らぎで構成されているという仮説を支持する。スロー地震の挙動をより深く理解するためには、このようなランダム性を定量的に特徴づけることが重要である。

B会場 | 一般セッション：S18. 地震教育・地震学史

📅 2021年10月16日(土) 14:00 ~ 15:00 | 📍 B会場 B会場

PM-1

座長:光井 能麻(名古屋大学)

14:00 ~ 14:15

[S18-01] 国立科学博物館で開催した東日本大震災からの10年間についての企画展

○室谷 智子¹ (1.国立科学博物館)

14:15 ~ 14:30

[S18-02] 活断層の長期評価と地震動予測に関する理学系専門家向けアンケート調査
ー不確実性を有する情報の発信方法改善に向けてー

○光井 能麻¹、鷺谷 威¹ (1.名古屋大学 減災連携研究センター)

14:30 ~ 14:45

[S18-03] ヤフーコメントから探る民間の地震予測を信じる理由

○織原 義明¹ (1.東京学芸大学教育学部)

14:45 ~ 15:00

[S18-04] 平成29（2017）年改訂学習指導要領での小中学校「理科」における地震，地震防災・減災の取扱い

○根本 泰雄¹ (1.立命館大学理工)

国立科学博物館で開催した東日本大震災からの10年間についての企画展

Planned exhibition for the Great East Japan earthquake held at the National Museum of Nature and Science

*室谷 智子¹

*Satoko MUROTANI¹

1. 国立科学博物館

1. National Museum of Nature and Science

2021年は東日本大震災から10年となる年である。国立科学博物館（以下、科博）では、地震発生日である3月11日を含む約1か月間（3月9日～4月11日）を会期として、企画展「東日本大震災から10年ーあの日からの地震研究ー」を開催した。災害を風化させないため、当時の被害や復興の様子を振り返るとともに、この10年間の地震調査研究の成果や科博がこの10年間でやってきた標本レスキュー活動や復興支援事業についても紹介した。科学系博物館での展示であるため、ただ東日本大震災のことを振り返るだけではなく、地震調査研究というサイエンスの部分に重点を置き、私たちは前を見て進んでいるということを示す展示を目指した。コロナ禍の中、入場人数や展示場所の制限を行うなかでの開催ではあったが、約3万人の方に足を留めていただいた。

本展示は第1会場5章＋第2会場という構成とした。1章は「東北地方太平洋沖地震と東日本大震災」として、地震の概要や当時の被害状況を岩手県の津波被災資料（東北地方整備局より借用）とともに振り返った。2章は「地震調査研究の貢献」として、この10年間の大きな成果と言える日本海溝海底地震津波観測網（S-net）や緊急地震速報の改良、2020年から導入された津波フラッグ（気象庁より借用）の紹介など、震災以降に巨大地震に対する防災・減災に向けて行われてきている調査研究の一部を紹介した。この企画展の目玉となったのは海底地震津波観測装置（日本電気株式会社・防災科学技術研究所より借用）で、展示ホール中央に展示したが、かなりのインパクトを与えたようである。来場者からは、津波フラッグの取り組みを始めて知ったというコメントが多かった。3章は「くり返し起こる地震・津波」として、東北地方をくり返し襲った地震・津波について紹介した。日本三代実録における869年貞観地震の記述や、明治三陸地震、昭和三陸地震に関する資料、ならびに仙台平野での津波堆積物のほぎ取りとその調査風景（産業技術総合研究所より借用）を展示した。また、今年は1891年濃尾地震から130年という節目の年でもある。4章では「いつでもどこでも地震は起こる」として、海域で発生した観測史上最大の地震である2011年東北地方太平洋沖地震に対して、陸域で発生した観測史上最大の地震である1891年濃尾地震の写真を展示した。5章は「国立科学博物館の取り組み」として、この10年間に科博として行った被災地の標本レスキュー活動や復興ミュージアム活動について紹介した。さらに第二会場では「東日本大震災からの復興と伝承」として、この10年間の三陸地方の復興の様子を辿った映像や写真（NHKテクノロジーズより借用）とともに、東日本大震災に関する伝承施設の紹介パネルを展示した。

展示できたのは震災に関するほんの一部であり、関連する講演会を開催することもできなかったが、会期中は春休みだったということもあり、親子連れや友人同士で観に来られた方が多かった。展示を見ていく中で、改めて思い出したことや自分がすべきことを考えることができた、という感想も見られた。今後も博物館という強みを生かし、展示等を通して、来館者に地震・津波や防災に関する教育や普及に努めていきたい。最後に、本展示にあたっては多くの方々にお世話になりました。深く感謝申し上げます。

活断層の長期評価と地震動予測に関する理学系専門家向けアンケート調査 —不確実性を有する情報の発信方法改善に向けて—

Questionnaire survey for experts on long-term evaluation of active faults and evaluation of ground motion

*光井 能麻¹、鷺谷 威¹

*Noa MITSUI¹, Takeshi Sagiya¹

1. 名古屋大学 減災連携研究センター

1. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University

活断層で起きる地震に備えるには、ハザード情報の適切な提供が必要である。しかし、活断層の情報は不確実性を有する。例えば、一つの断層帯における震源断層の区間を正確に決定できないという不確実性が、マグニチュードや再来間隔、地震動の大きさの不確実性を生じる。

この問題に対して現在は、活断層地震に関する確率を計算し、公表する方法で対処している。具体的には、各活断層帯において今後30年以内に発生するM7.0以上の活断層地震を確率で表し、確率に応じたランクで発表する方法（主要活断層の長期評価）ならびに、各地域におけるM6.8以上の活断層地震の発生確率を発表する方法（活断層の地域評価）が地震調査研究推進本部（以降、地震本部）によって行われている。

確率を用いた対処方法について、活断層の長期評価内容を国民にわかりやすく伝えられるように表現を工夫してきたことを高く評価する声もある（山口、2008）。一方、これらの評価が適切に理解されず、本来の意図とは異なる形で使用される事例が指摘されている。また、別の視点からの批判として、Geller（2011）は、確率論的地震動予測地図で高い発生確率を示す場所が過去約30年間の被害地震の発生場所と一致しないことを示している。地球科学的に算出される地震動予測地図と、人間の時間スケールで把握できる被害地震が一致しないということは、地震動予測地図は元々人間が理解しにくい情報である可能性を示す。

これらの状況を考慮して我々は、最初の取り組みとして、現在の活断層情報の伝え方、すなわち、地震本部による公表結果（活断層の長期評価と地震動予測）の適切さを検討する。公表結果の受け止め方に関する調査は、地震本部が一般国民や地方公共団体を対象に行っている（文部科学省、2011-2019）。一方、活断層や地震に関する専門家の意見は、長期評価や地震動予測の作業過程では反映されているが、公表結果の認知度や評価は明らかになっていない。

そこで本研究では、長期評価や地震動予測地図の公表結果について、活断層や地震の専門家へのアンケート調査を実施した。調査対象は、日本活断層学会会員262人および日本地震学会代議員123人である。調査期間は令和3年2月22日～令和3年3月4日（日本活断層学会は令和3年2月24日～令和3年3月4日）である。インターネット上のセルフアンケートサイトQuestantを利用したウェブ調査を行い、各学会のメーリングリストを通じて、回答の協力を依頼した。有効回答数は全体47件（うち、回答者の所属学会は、活断層学会のみ36.2%、地震学会のみ27.7%、両学会34.0%）であった。

アンケート結果から、まず、自治体職員には活断層に関する情報を幅広く知っていて欲しい、という期待の高さが読み取れた。また、改善案の検討で参考にすべき下記の回答傾向が得られた。

1. 科学的妥当性&信頼性を重視

2. 長期評価等の発信方法：改善の余地が多い
3. 他機関との連携の必要性
4. 評価と災害と関係を述べる必要がある
5. 公表結果の活用方法について言及することが必要
6. 外部の知見を取り入れることが必要

その他、情報提供先の区別や新手法への評価など、意見が分かれる検討課題の存在も明らかになった。例えば、委員経験の有無によって「活断層の地域評価」の認知度の違いや、他機関との連携に関する考え方の違いが見られた。後者について、委員経験のない回答者は「情報を受け取る側（住民や自治体）」の視点に立ち、利便性の改善や知識の理解度を考慮した意見が多かった。一方、委員経験者は「情報の発信側（政府）」の視点に立ち、各省庁の目的の違いや、情報を統一する正当性を考慮した意見がしばしば見られた。このように、専門家間でも一つの問題に対して視点の違いに基づく意見の違いがみられたことは重要である。また、このような意見の違いは、専門家間の議論によって、解決策を示せる可能性が考えられる。

上記の意見を、一般国民ならびに地方公共団体を対象とした調査結果（文部科学省、2011-2019）と比較した。その結果、住民は知識より予測される災害を重視する点、地方公共団体は情報源の信頼性や発信方法の改善を求める点など、専門家と共通する意見が多くみられた。また、これらの比較により、専門家を含めた情報発信側の課題も明らかになった。例えば、知識を得る重要性を含めて住民に伝えるよう工夫する、市区町村の防災が中央防災会議や都道府県の指針に沿って行われていることをふまえて情報提供方法を改善する、などの課題が挙げられる。

上記の意見や検討課題は、多角的な視点から具体的な改善策を検討すべきである。そのため、地震動や災害関連などの専門家や地方公共団体の防災担当者、防災関連団体、地域住民への調査を行い、意見を集約して改善案の提案につなげることが今後の課題である。

謝辞

本調査研究においてアンケート調査にご協力いただいた日本活断層学会ならびに日本地震学会の皆様には感謝の意を表します。

ヤフーコメントから探る民間の地震予測を信じる理由

Search for reasons to believe in earthquake prediction by a private sector using Yahoo comments

*織原 義明¹

*Yoshiaki ORIHARA¹

1. 東京学芸大学教育学部

1. Tokyo Gakugei University

週刊ポストでは年に数回、株式会社地震科学探査機構（JESEA）による地震予知情報に近い「MEGA地震予測」を掲載している。2021年4月26日に“予測中の「MEGA地震予測」 GW中に要警戒の全国5エリア”と題したWeb記事がNEWSポストセブンから配信された（NEWSポストセブン, 2021）。「MEGA地震予測」は、データの扱い方から予測の出し方、自己評価など様々な点で問題があると指摘されている（織原・長尾, 2015; 川崎・加藤, 2016; 横山, 2020）。しかし、週刊誌などのメディアによる宣伝の影響もあり、否定的な主張は世間になかなか広まらない。

今回のNEWSポストセブンの記事はYahoo Newsでも取り上げられた（Yahoo, 2021）。Yahoo Newsの大半は記事ごとに読者のコメントが掲載されている。この「MEGA地震予測」の記事についても、肯定的、否定的両方のコメントが掲載されていた。そこで、本研究ではこのコメントから、なぜ信じるのか、または信じないのか、その理由を探ることを試みた。肯定的なコメントとしては、注意喚起としてこのような活動を受け入れる意見や、「MEGA地震予測」の村井俊治氏を専門家として応援する意見などがみられた。一方、否定派のコメントは、データの扱い方に関する問題点の指摘、必ず当たるような言い方への批判などであった。また、今回の記事については、予測対象期間であるGW（ゴールデンウィーク）中に該当する地震が発生している（2021年5月1日宮城県沖で最大震度5強の地震）。地震発生後、肯定派のコメントは予想が当たったと賞賛する声が多かった。これに対し否定派は、予測範囲の広さを問題視するコメントが多くみられた。

<引用文献>

NEWSポストセブン, 2021, 予測中の「MEGA地震予測」 GW中に要警戒の全国5エリア,

<https://www.news-postseven.com/archives/20210426_1654811.html?DETAIL>, (参照2021-5-6).

織原義明・長尾年恭, 2015, 地震前兆現象を科学する, 祥伝社新書, 232pp.

川崎一朗・加藤照之, 2016, 科学史・科学哲学の枠組みを借りた 地震予知研究についての論点整理の試み, 地震2, 69, 11-22.

横山裕道, 2020, 迷走する地震予知：課題の解決急ぎたい, 地震ジャーナル, 70, 55-58.

Yahoo, 2021, 予測中の「MEGA地震予測」 GW中に要警戒の全国5エリア, <

<https://news.yahoo.co.jp/articles/a9f45647b8ce8b00189151ea0b80afe8514b7715>>, (参照2021-5-6).

<謝辞>

本研究は東京大学地震研究所共同利用（2020-KOBO08）の援助を受けました。

平成29（2017）年改訂学習指導要領での小中学校「理科」における地震、地震防災・減災の取扱い

Treatment of earthquake and its disaster prevention in primary and lower secondary school science in the 2017 standard curricula

*根本 泰雄¹

*Hiroo NEMOTO¹

1. 立命館大学理工

1. Ritsumeikan Univ.

1. はじめに

平成20（2008）年改訂小学校学習指導要領（以下、旧小学習指導要領と記す）および中学校学習指導要領（以下、旧中学習指導要領と記す）（まとめて記す時は、旧小中学習指導要領と記す）の告示以降、平成29（2017）年に改訂された小学校学習指導要領（以下、現行小学習指導要領と記す）および中学校学習指導要領（以下、現行中学習指導要領と記す）（まとめて記す時は、現行小中学習指導要領と記す）が告示されるまでの間に、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震や平成28年（2016年）熊本地震など最大震度7を記録する大震災を伴う事象が発生している。気象事例でも、平成24年（2012年）九州北部豪雨、平成26年（2014年）8月豪雨、平成27年（2015年）9月関東・東北豪雨など激甚な被害をもたらした気象災害が発生してきている。こうした自然災害の多発を受け、小中学校にて地震や気象、および自然災害に関して旧小中学習指導要領による学びから現行小中学習指導要領による学びにて具体的にどのような変更があったのかを調査分析しておくことは、今後の地震教育、地震防災・減災教育等を考える上で必要であると考え、現行課程の教科書分析を行った。なお、高等学校での学びに関しては、平成30（2018）年改訂の高等学校学習指導要領による学習開始が令和4（2022）年以降であることから、2021年時点では取り上げられない。

2. 資料

本発表では、自然現象、自然災害のうち、小中学校「理科」での地震、地震防災・減災の学びに焦点をあて、旧小中学習指導要領および現行小中学習指導要領での課程（以下、順に旧課程、現行課程と記す）による「理科」教科書の記載内容の比較分析および考察を行った結果を報告する。よって、用いた資料は旧課程および現行課程での小中学校「理科」の全教科書（小学校6種類、中学校5種類）である。なお、旧課程での分析に関しては根本（2015a：2015b）にて報告済みである。例えば、旧課程小学校「理科」では、6種類の教科書に共通して使われている地震に係る用語は僅かに2語（地震、断層）だけであったことを報告している〔根本（2015a）〕。

3. 結果および考察

現行課程の小学校「理科」教科書では、6種類の教科書に共通して使われている地震に係る用語は“地震”，“断層”，“津波”の3語となっている。平成23年（2011）年東北地方太平洋沖地震による津波の影響を受けた結果と考えられる。“断層”と“地震”との説明が地震学におかしな記述となっている教科書が旧課程の小学校「理科」教科書では6種類中5種類あったが〔根本（2015a）〕，現行課程の教科書では6種類中1種類と改善が進んでいる。この1種類の教科書の説明文も、地震学的に正しい記載であるとも読み取れなくは無いため、日本語の問題と言えるのかもしれない。

現行小学習指導要領では内容の取扱いにて『自然災害についても触れること。』と旧小学習指導要領には記されていなかった文言が加わった。これを受け、6種類の教科書ともに震災、火山災害の記述が行われるようになったが、取扱いの分量には差が生じている。ページ数で比較すると、火山災害と合わせて3ページの教科書

もあれば7ページの教科書もある。使われている用語も教科書により大きく異なっており、例えば、緊急地震速報は4種類の教科書で使われている一方、防災倉庫、稲むらの火、ハザードマップなどは1種類の教科書で使われているだけである。こうした現状は、小学校段階で伝えるべき地震防災・減災に関わる用語選択が、各教科書出版社の判断によっているために生じている可能性が高い。「理科」にて取り扱う地震防災・減災に係る用語や内容の整理が必要である。

字数制限の関係で「社会科」や現行課程の中学校「理科」教科書の内容に関して本予稿では触れないが、小学校「理科」教科書と同様の課題が浮かび上がってきている。

4. まとめ

旧課程および現行課程の小中学校「理科」教科書の分析から、地震に関する記載の改善が見られていること、および小中学学習指導要領での記載の変化により震災、地震防災・減災に関する記述が加わったが、その内容は教科書毎に開きのあることが明らかとなった。今後、小学校段階および中学校段階にて「理科」にて取り扱うべき、地震防災・減災、震災に関して使用する用語および内容の整理を行い提案する必要がある。

参考文献

旧課程および現行課程の小中学校「理科」教科書。

根本泰雄, 2015a, (公社)日本地震学会モノグラフ, 4, 44-48.

根本泰雄, 2015b, (公社)日本地震学会モノグラフ, 4, 56-60.

< <https://www.zisin.jp/publications/pdf/monograph4.pdf> >