

2021年10月15日(金)

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S01. 地震の理論・解析法

15:30 ~ 17:00 | P1会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S01P-01] 沈み込む海洋性地殻内部を伝播するガイド波の数値シミュレーション

○城戸口 和希¹、河原 純¹、椎名 高裕² (1.茨城大学大学院理工学研究科、2.産業技術総合研究所地質調査総合センター)

15:30 ~ 17:00

[S01P-02] Passive-source reverse-time migrationに基づく 海洋スラブのイメージング数値実験

○古村 孝志¹ (1.東京大学地震研究所)

15:30 ~ 17:00

[S01P-03] 水平成層構造での海面～海中における水中音響波形計算—海水層による増幅・減幅の影響評価—

○中村 武史¹、竹中 博士² (1.電力中央研究所、2.岡山大学)

15:30 ~ 17:00

[S01P-04] 海底地震計記録へ適用可能な近地地震向けMigration-baseの震源決定法開発

○米島 慎二¹、望月 公廣¹ (1.東京大学地震研究所 地震予知研究センター)

15:30 ~ 17:00

[S01P-05] 東北地方太平洋沖地震震源域の波形トモグラフィーに向けた波動場の検討

○岡元 太郎¹、竹中 博士²、中村 武史³ (1.東京工業大学 理学院 地球惑星科学系、2.岡山大学 学術研究院自然科学学域、3.電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 地質・地下環境研究部門)

15:30 ~ 17:00

[S01P-06] 日本列島における脈動実体波のP-s変換波の抽出

○加藤 翔太¹、西田 究¹ (1.東京大学地震研究所 数理系研究部門)

15:30 ~ 17:00

[S01P-07] 環状断層を持つカルデラ火山における鉛直CLVD型のモーメントテンソル解の解釈 — シエラネグラ火山とキラウエア火山を例に

○三反畑 修^{1,2}、金森 博雄³、Rivera Luis⁴、Zhan Zhongwen³、佐竹 健治⁵、綿田 辰吾⁵、Lai Voon Hui⁶ (1.防災科学技術研究所、2.日本学術振興会特別研究員(PD)、3.カリフォルニア工科大学、4.ストラスブール大学地球物理研究所、5.東京大学地震研究所、6.オーストラリア国立大学)

15:30 ~ 17:00

[S01P-08] MCMCによる地震波鉛直異方性パラメタの観測可能性の検証と火山直下の互層構造の再現

○丸山 純平¹、川勝 均¹、竹内 希¹ (1.東京大学地震研究所 海半球観測研究センター)

15:30 ~ 17:00

[S01P-09] ベイズ統計を用いた震源決定法に対する3次元走時計算適用の検討

○近藤 優子¹、杉岡 裕子¹、大林 政行² (1.国立大学法人神戸大学、2.国立研究開発法人海洋研究開発機構)

15:30 ~ 17:00

[S01P-10] 球対称地球自由振動モード計算のためのSymplectic数値積分法

○綿田 辰吾¹ (1.東京大学地震研究所 地球計測系研究部門)

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S02. 地震計測・処理システム

15:30 ~ 17:00 | P2会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S02P-01] 最短経路法を走時計算に適用した3次元速度構造での震源決定

○関口 渉次¹ (1.防災科学技術研究所 地震津波火山ネットワークセンター)

15:30 ~ 17:00

[S02P-02] S-netを用いたセントロイドモーメントテンソル解析の検討

○木村 尚紀¹、浅野 陽一¹ (1.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S02P-03] MQTTプロトコルを用いたWINシステム用リアルタイム表示システムの開発

○鶴岡 弘¹ (1.東京大学地震研究所)

15:30 ~ 17:00

[S02P-04] 東北地方中南部における地震活動（序報）

○岡田 知己¹、中山 貴史¹、平原 聡¹、堀内 茂木⁹、勝俣 啓²、大園 真子^{2,4}、小菅 正裕³、前田 拓人³、山中 佳子⁵、片尾 浩⁶、松島 健⁷、八木原 寛⁸、2011年東北地方太平洋沖地震緊急観測 グループ (1.東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター、2.北海道大学、3.弘前大学、4.東京大学地震研究所、5.名古屋大学、6.京都大学防災研究所、7.九州大学、8.鹿児島大学、9.ホームサイズモ)

15:30 ~ 17:00

[S02P-05] 低周波数サンプリングの加速度記録に適用可能なリアルタイム震度演算法

○平井 敬¹、吉岡 優樹² (1.名古屋大学減災連携研究センター、2.名古屋大学大学院環境学研究科)

15:30 ~ 17:00

[S02P-06] 三陸沖における海底光ケーブルとDistributed Acoustic Sensingを用いた反射法地震探査

○高野 洋輝¹、篠原 雅尚²、仲田 理映²、蔵下 英司²、石山 達也²、望月 公廣² (1.東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻、2.東京大学地震研究所)

15:30 ~ 17:00

[S02P-07] DAS地震動記録を用いた海底光ファイバーケーブルの敷設環境推定

○片上 智史¹、荒木 英一郎²、高橋 成実³、野田 俊太¹、岩田 直泰¹、是永 将宏¹、山内 泰知¹ (1.鉄道総合技術研究所、2.海洋研究開発機構、3.防災科学技術研究所)

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S04. テクトニクス

15:30 ~ 17:00 | P3会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S04P-01] アラスカ沈み込み帯における深部低周波微動と3次元温度構造・脱水分布との関連性

○岩本 佳耶¹、末永 伸明²、吉岡 祥一^{2,1} (1.神戸大学大学院 理学研究科 惑星学専攻、2.神戸大学都市安全研究センター)

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S07. 地球及び惑星の内部構造と物性

15:30 ~ 17:00 | P4会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S07P-01] 北極域における内核の東西半球境界の位置の調査

○岩崎 理史¹ (1.京都大学大学院)

15:30 ~ 17:00

[S07P-02] 表面波波形フィッティングによる海洋地殻および上部マントルのS波速度構造の推定

ー 短周期成分を活用した初期モデルの構築 ー

○永井 はるか¹、竹内 希¹、川勝 均¹、塩原 肇¹、一瀬 建日¹、杉岡 裕子²、伊藤 亜妃³、歌田 久司¹ (1.東京大学地震研究所、2.神戸大学、3.海洋研究開発機構)

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S08. 地震発生の物理

15:30 ~ 17:00 | P5会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S08P-01] 2016年熊本地震の相似地震

○森 絵万奈¹、平松 良浩² (1.金沢大学大学院自然科学研究科、2.金沢大学理工研究域地球社会基盤学系)

15:30 ~ 17:00

[S08P-02] 日本列島内陸域の通常地震と低周波地震の震源スペクトルの形状の推定

○織茂 雅希¹、吉田 圭佑¹、平 貴昭²、松澤 暢¹、長谷川 昭¹、江本 賢太郎³ (1.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、2.カリフォルニア大学バークレイ校地震研究所、3.東北大学理学研究科地球物理学専攻固体地球物理学講座)

15:30 ~ 17:00

[S08P-03] ニュージーランド北島ラウクマラ半島周辺で発生するプレート境界地震の震源パラメータの特徴

○立岩 和也¹、Chamberlain Calum²、Savage Martha²、岡田 知己¹ (1.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2.ヴィクトリア大学ウェリントン)

15:30 ~ 17:00

[S08P-04] 伊豆半島東方沖の2006年群発地震活動で発生した火山構造成地震の震源過程解析

○田中 夕香子¹、山田 卓司¹ (1.茨城大学)

15:30 ~ 17:00

[S08P-05] 震源域直上の海底水圧計記録に基づく2011年東北地震の地震波放射過程に関する考察

○久保 久彦¹、久保田 達矢¹、齊藤 竜彦¹ (1.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S08P-06] Initiation of the M~9 earthquake cycle: the 2021 Miyagi-Oki Mw7.0 earthquake at the deep seismic/aseismic transition

○吉田 圭佑¹、松澤 暢¹、内田 直希¹ (1.東北大学大学院 理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター)

15:30 ~ 17:00

[S08P-07] 2011年東北地方太平洋沖地震後の宮城県沖地震の準備過程

○中田 令子¹、日野 亮太¹ (1.東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター)

15:30 ~ 17:00

[S08P-08] 動力学的震源モデルに基づく中央構造線断層帯の連動性の検討

○加瀬 祐子¹、浦田 優美¹ (1. (国研) 産業技術総合研究所)

15:30 ~ 17:00

[S08P-09] 線形多孔質弾性体中の動的地震サイクルシミュレーション

○野田 博之¹ (1.京都大学 防災研究所)

15:30 ~ 17:00

[S08P-10] 粘弾性媒質中の地震サイクルにおける断層強度不均質による影響

○山本 誠¹、野田 博之¹ (1.京都大学)

15:30 ~ 17:00

[S08P-11] 不均質な摩擦パラメータを伴う断層におけるb値の時間変化

○伊東 良¹、金子 善宏¹ (1.京都大学)

15:30 ~ 17:00

[S08P-12] 格子H行列を用いた3次元非平面断層の大規模地震サイクルシミュレーション

○小澤 創¹、伊田 明弘²、星野 哲也³、安藤 亮輔¹ (1.東京大学理理学系研究科地球惑星科学専攻、2.海洋研究開発機構、3.東京大学情報基盤センター)

15:30 ~ 17:00

[S08P-13] プレートの沈み込みに伴う温度圧力条件の変化および粘土鉱物の脱水を考慮した水理学的モデルに基づく間隙水圧の定常解

○金木 俊也¹、野田 博之¹ (1.京都大学防災研究所)

15:30 ~ 17:00

[S08P-14] 房総沖スロースリップのすべりと応力変化を用いたすべりと時間に依存する摩擦構成則のパラメータの推定

○内田 礼央¹、佐藤 利典¹、小林 琢磨^{1,2} (1.千葉大学、2.アジア航測)

15:30 ~ 17:00

[S08P-15] スロースリップのすべり速度と剪断応力変化を用いた有効法線応力の推定

○佐藤 利典¹、小林 琢磨^{1,2} (1.千葉大学大学院理学研究院、2.アジア航測 (株))

15:30 ~ 17:00

[S08P-16] センチメートルスケールにおける変はんれい岩ガウジの摩擦特性
ー岩石摩擦特性のスケール依存性解明に向けてー

○山下 太¹、溝口 一生²、飯塚 幸子³ (1.国立研究開発法人防災科学技術研究所、2.一般財団法人電力中央研究所、3.株式会社セレス)

15:30 ~ 17:00

[S08P-17] 波動伝播シミュレーションを用いた4m二軸岩石摩擦試験機におけるAEセンサキャリブレーション

○大久保 蔵馬¹、山下 太¹、福山 英一^{2,1} (1.防災科学技術研究所、2.京都大学大学院工学研究科)

15:30 ~ 17:00

[S08P-18] 大型載荷速度変化摩擦試験によって形成されたガウジ層の微細構造

○渡辺 俊¹、山下 太²、前田 純伶²、下田 晃嘉³、福山 英一^{1,2} (1.京都大学、2.国立研究開発法人防災科学技術研究所、3.日本生命保険相互会社)

15:30 ~ 17:00

[S08P-19] 仕事率の増加と鏡面の生成・破壊にともなうインド砂岩の摩擦・摩耗率の変動

○前田 純伶¹、山下 太¹、大久保 蔵馬¹、福山 英一^{1,2} (1. (国研) 防災科学技術研究所、2. 京都大学)

15:30 ~ 17:00

[S08P-20] Existence of Weak Zones: Enhancing Dynamic Rupture or Not?

○上西 幸司^{1,2}、長沢 国洋² (1.東京大学大学院新領域創成科学研究科、2.東京大学大学院工学系研究科)

15:30 ~ 17:00

[S08P-21] On the Dynamic Stability of a Granular Slope

○上西 幸司¹、喜 東昀¹ (1.東京大学大学院新領域創成科学研究科)

15:30 ~ 17:00

[S08P-22] M5.5地震発生場と母岩から回収したコア試料の物理特性

○阪口 賢祐¹、吉田 峻輔²、東 充也³、横山 友暉⁴、鈴木 皓一郎¹、矢部 康男⁵、Ligaraba Dakalo⁶、Masondo Nandipha⁶、廣野 哲朗⁷、山本 裕二⁸、松崎 琢也⁸、小笠原 宏⁹、大場 誠也⁹、脇本 雅也⁹ (1.立命館大学大学院、2.独立行政法人造幣局、3.マツダ株式会社、4.株式会社テクノプロ、5.東北大学理学研究科、6. Graduate School of Geoscience, University of the Witwatersrand、7.大阪大学理学研究科、8.高知大学海洋コア総合研究センター、9.立命館大学理工学部)

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S10. 活断層・歴史地震

15:30 ~ 17:00 | P6会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S10P-01] 長者ヶ原一芳井断層の重力異常解析

松井 佑樹¹、澤田 明宏¹、○平松 良浩¹ (1.金沢大学)

15:30 ~ 17:00

[S10P-02] 1914年桜島地震における鹿児島市内の石垣被害と震度分布

○小林 励司¹ (1.鹿児島大学)

15:30 ~ 17:00

[S10P-03] 日記史料を用いた江戸末期の疑わしい被害地震の検証 (1)

○原田 智也¹、西山 昭仁²、片桐 昭彦³、水野 嶺⁴、吉岡 誠也⁴ (1.無所属、2.京都大学防災研究所、3.新潟大学災害・復興科学研究所、4.東京大学地震研究所)

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S12. 岩石実験・岩石力学・地殻応力

15:30 ~ 17:00 | P7会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S12P-01] 注水による誘発地震の発生過程研究に向けた寒天ゲルを用いた光弾性実験システムの構築

○吉光 奈奈¹、福山 英一^{1,2}、平野 史朗³、大寄 雅人¹ (1.京都大学、2.防災科研、3.立命館大学)

15:30 ~ 17:00

[S12P-02] 4 MHz程度まで感度を有する広帯域超音波トランスデューサの較正

○川方 裕則¹、大内 智博² (1.立命館大学理工学部、2.愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター)

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S14. 地震予知・予測

15:30 ~ 17:00 | P8会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S14P-01] 背景地震活動の地球潮汐相関情報に基づく地震予測モデルの効率：トンガ・ケルマディック海溝沿いのプレート境界型大地震に対して

○弘瀬 冬樹¹、前田 憲二²、上垣内 修³ (1.気象研究所 地震津波研究部、2.気象庁地震火山部、3.気象業務支援センター)

15:30 ~ 17:00

[S14P-02] 静岡県西部地域の地下水温変化と地震活動

○上久保 廣信¹ (1.浜松市立北星中学校)

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S16. 地盤構造・地盤震動

15:30 ~ 17:00 | P9会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S16P-01] 国道4号線沿いのDAS観測により捉えられた移動車両が励起する表面波を直接利用した浅部S波速度構造の推定

○矢武 克啓¹、中原 恒¹、江本 賢太郎¹、西村 太志¹ (1.東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻 固体地球物理学講座)

15:30 ~ 17:00

[S16P-03] 1943年鳥取地震による地震断層近傍における微動探査—鳥取市宮谷・大塚地区—

○野口 竜也¹、蘆田 龍¹、小林 和生²、西村 武³、吉川 菜緒¹、香川 敬生¹ (1.鳥取大学工学部社会システム土木系学科、2.(株)荒谷建設コンサルタント、3.鳥取大学大学院工学研究科)

15:30 ~ 17:00

[S16P-04] 高知平野の表層地盤の数値モデル高精度化のための地盤震動観測

○山田 伸之¹ (1.高知大学)

15:30 ~ 17:00

[S16P-05] 山梨地方における浅部・深部統合地盤構造モデルの構築

○先名 重樹¹、若井 淳¹、佐藤 将²、谷田 淳²、松山 尚典²、藤原 広行¹ (1.国立研究開発法人防災科学技術研究所 マルチハザード評価研究部門、2.応用地質)

15:30 ~ 17:00

[S16P-06] 常時微動H/Vによる薩摩硫黄島におけるカルデラ境界探索の試み

○山田 雅行¹、伊藤 佳洋¹、長坂 陽介²、野津 厚²、長尾 毅³、大岩根 尚⁴ (1.(株)ニュージェック、2.港湾空港技術研究所、3.神戸大学、4.合同会社むすひ)

15:30 ~ 17:00

[S16P-07] 中央構造線三野断層の断層破碎帯での動的変形特性

○香川 敬生¹、木村 一成² (1.鳥取大学 工学部 社会システム土木系学科、2.(株)ナイバ愛媛支店)

15:30 ~ 17:00

[S16P-08] 大規模盛土造成地における微動探査を用いた地盤震動特性の把握 -鳥取市北園の事例-

○西村 武¹、西村 菜沙²、野口 竜也²、香川 敬生² (1.鳥取大学大学院 工学研究科 博士後期課程 社会基盤工学専攻、2.鳥取大学 工学部 社会システム土木系学科)

15:30 ~ 17:00

[S16P-09] 地震波干渉法に基づくデコンボリューション波形に関する基礎的検討

○仲野 健一¹、上林 宏敏² (1.株式会社 安藤・間、2.京都大学)

15:30 ~ 17:00

[S16P-10] 3次元地震動シミュレーションおよびコヒーレンスモデルに基づく隣接地点間の地震動の空間変動特性評価

○徳光 亮一¹、山本 優¹、内山 泰生¹、大野 晋² (1.大成建設、2.東北大学)

15:30 ~ 17:00

[S16P-11] SITES法によるスマトラ断層の断層面推定 (2)

○山品 匡史¹、大久保 慎人¹、田部井 隆雄¹、UMAR Muksin²、ISMAIL Nazli² (1.高知大学、2.Syiah Kuala 大学)

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S17. 津波

15:30 ~ 17:00 | P10会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S17P-01] 地震をトリガーとする地すべりに起因する津波の確率論的評価手法に関する基礎的検討

○木場 正信¹、土屋 悟²、木村 達人³、松山 昌史⁴、加藤 勝秀⁵ (1.エングローブコンサルタント、2.ユニック、3.東電設計、4.電力中央研究所、5.中部電力)

15:30 ~ 17:00

[S17P-02] 異なる最適化手法を用いた津波データベース型津波浸水予測

○上谷 政人¹、馬場 俊孝² (1.徳島大学大学院創成科学研究科理工学専攻、2.徳島大学大学院産業理工学研究部)

15:30 ~ 17:00

[S17P-03] 四国沖土佐ばえ北部の海底地すべりを仮定した非静水圧効果有の二層流モデル津波計算

○黒住 将弘¹、馬場 俊孝¹ (1.徳島大学)

15:30 ~ 17:00

[S17P-04] 南海トラフ沿いで発生する海底地すべりによる津波励起の特徴に関する予察

○今井 健太郎¹、中村 恭之¹、富士原 敏也¹、谷岡 勇市郎² (1.海洋研究開発機構 海域地震火山部門、2.北海道大学 大学院理学研究院)

15:30 ~ 17:00

[S17P-05] 2006 年及び 2007 年千島列島沖地震津波の減衰過程

○赤井 啓嗣¹、新本 直子²、馬場 俊孝¹ (1.徳島大学大学院、2.徳島大学)

15:30 ~ 17:00

[S17P-06] 1952年カムチャツカ地震における顕著な津波後続波

○対馬 弘晃¹、山本 剛靖¹ (1.気象庁気象研究所)

ポスター会場（2日目） | 委員会活動紹介：S24.社会に対する委員会の活動

15:30 ~ 17:00 | 委員会活動紹介 P会場

S24

[S24P-01] 広報委員会

○佐藤 利典¹ (1.日本地震学会)

[S24P-02] 学会情報誌編集委員会

○豊国 源知¹ (1.日本地震学会)

[S24P-03] 強震動委員会

○干場 充之¹ (1.日本地震学会)

[S24P-04] 学校教育委員会

○加納 靖之¹ (1.日本地震学会)

[S24P-05] 災害調査委員会

○吾妻 崇¹ (1.日本地震学会)

[S24P-06] 普及行事委員会

○佐藤 明子¹ (1.日本地震学会)

[S24P-07] ジオパーク支援委員会

○松原 誠¹ (1.日本地震学会)

[S24P-08] 地震学を社会に伝える連絡会議

○久田 嘉章¹ (1.日本地震学会)

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S01. 地震の理論・解析法

2021年10月15日(金) 15:30 ~ 17:00 | P1会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S01P-01] 沈み込む海洋性地殻内部を伝播するガイド波の数値シミュレーション

○城戸口 和希¹、河原 純¹、椎名 高裕² (1.茨城大学大学院理工学研究科、2.産業技術総合研究所地質調査総合センター)

15:30 ~ 17:00

[S01P-02] Passive-source reverse-time migrationに基づく 海洋スラブのイメージング数値実験

○古村 孝志¹ (1.東京大学地震研究所)

15:30 ~ 17:00

[S01P-03] 水平成層構造での海面～海中における水中音響波形計算—海水層による増幅・減幅の影響評価—

○中村 武史¹、竹中 博士² (1.電力中央研究所、2.岡山大学)

15:30 ~ 17:00

[S01P-04] 海底地震計記録へ適用可能な近地地震向けMigration-baseの震源決定法開発

○米島 慎二¹、望月 公廣¹ (1.東京大学地震研究所 地震予知研究センター)

15:30 ~ 17:00

[S01P-05] 東北地方太平洋沖地震震源域の波形トモグラフィーに向けた波動場の検討

○岡元 太郎¹、竹中 博士²、中村 武史³ (1.東京工業大学 理学院 地球惑星科学系、2.岡山大学 学術研究院自然科学学域、3.電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 地質・地下環境研究部門)

15:30 ~ 17:00

[S01P-06] 日本列島における脈動実体波のP-s変換波の抽出

○加藤 翔太¹、西田 究¹ (1.東京大学地震研究所 数理系研究部門)

15:30 ~ 17:00

[S01P-07] 環状断層を持つカルデラ火山における鉛直CLVD型のモーメントテンソル解の解釈 — シエラネグラ火山とキラウエア火山を例に

○三反畑 修^{1,2}、金森 博雄³、Rivera Luis⁴、Zhan Zhongwen³、佐竹 健治⁵、綿田 辰吾⁵、Lai Voon Hui⁶ (1.防災科学技術研究所、2.日本学術振興会特別研究員(PD)、3.カリフォルニア工科大学、4.ストラスブール大学地球物理研究所、5.東京大学地震研究所、6.オーストラリア国立大学)

15:30 ~ 17:00

[S01P-08] MCMCによる地震波鉛直異方性パラメタの観測可能性の検証と火山直下の互層構造の再現

○丸山 純平¹、川勝 均¹、竹内 希¹ (1.東京大学地震研究所 海半球観測研究センター)

15:30 ~ 17:00

[S01P-09] ベイズ統計を用いた震源決定法に対する3次元走時計算適用の検討

○近藤 優子¹、杉岡 裕子¹、大林 政行² (1.国立大学法人神戸大学、2.国立研究開発法人海洋研究開発機構)

15:30 ~ 17:00

[S01P-10] 球対称地球自由振動モード計算のためのSymplectic数値積分法

○綿田 辰吾¹ (1.東京大学地震研究所 地球計測系研究部門)

沈み込む海洋性地殻内部を伝播するガイド波の数値シミュレーション

Numerical simulations of guided waves propagating in subducting oceanic crust

*城戸口 和希¹、河原 純¹、椎名 高裕²

*Kazuki Kidoguchi¹, Jun Kawahara¹, Takahiro Shiina²

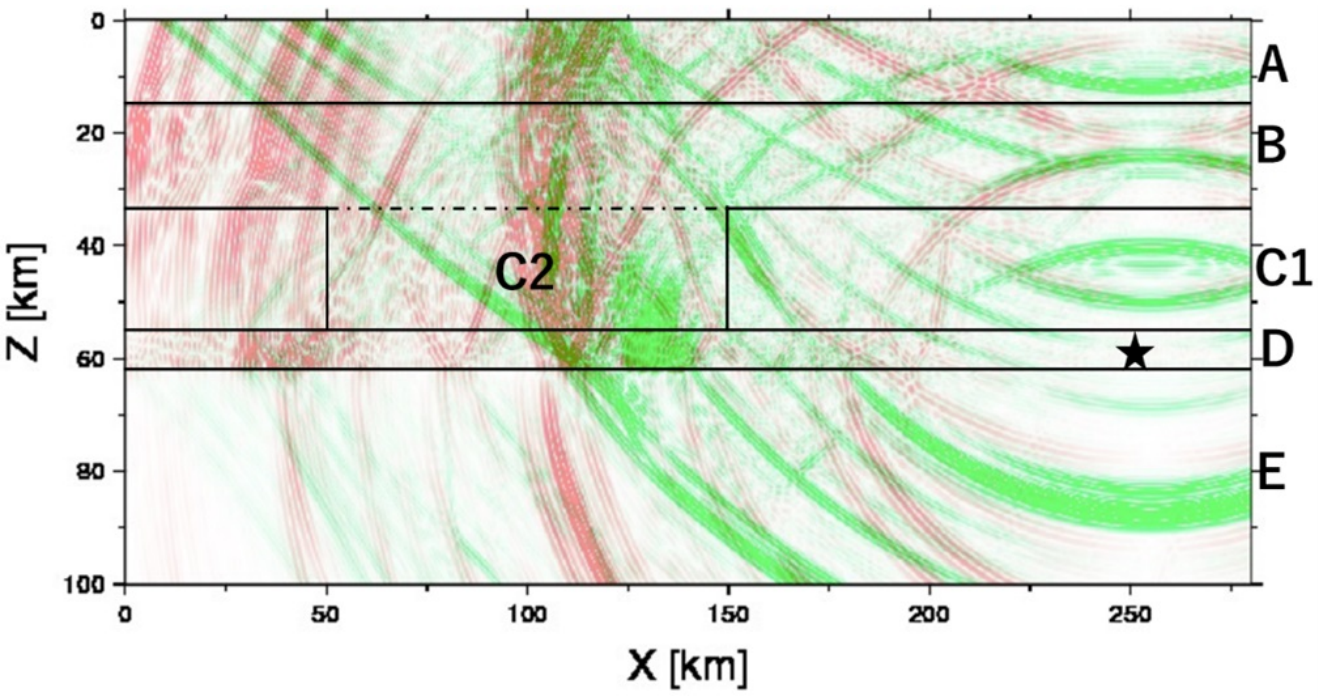
1. 茨城大学大学院理工学研究科、2. 産業技術総合研究所地質調査総合センター

1. Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, 2. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

海洋性地殻内部や近傍で発生する地震では、周囲に比べて地震波速度の遅い海洋性地殻内部に地震のエネルギーがトラップされることにより発生し、伝播するガイド波が観測されることが知られている (e.g., Fukao, 1983; Hori et al., 1985; Ohkura, 2000; Abers, 2005; Miyoshi et al., 2012)。特に日高山脈付近では太平洋スラブ直上に大陸下部地殻程度の速度を持つ低速度域が存在すると考えられており (Kita et al., 2010, 2012)、この低速度域と海洋性地殻の接触により、海洋性地殻内部を海溝軸と平行に伝わるガイド波のエネルギーの一部が、地表面に向けて放出されると推測されている (Shiina et al., 2014; 椎名, 2015)。椎名(2015)は、日高山脈下の不均質構造 (Kita et al., 2010, 2012) や低速度の海洋性地殻などを導入した2次元構造モデルを仮定し、海洋性地殻内部を伝播するガイド波の地表面での観測可能性に注目した数値シミュレーションを行った。その結果、このガイド波が地表面で観測されるためには、日高山脈下に地震波の低速度域が存在し、太平洋スラブ直上付近まで分布している必要があることがわかった。

本研究では、椎名(2015)で詳細に検討されなかった海洋性地殻の地震波速度や内部構造の違いについて、海洋性地殻内部を伝播するガイド波の地表面観測波形に与える影響に注目した数値シミュレーションを行った。計算には速度-応力型有限差分法 (Virieux, 1986) を用い、ダブルカップル点震源を与えて2次元P-SV波を放射させた。構造モデルは、椎名(2015)の2次元構造モデルを若干単純化したものを用いた (図)。このモデルは地表面から順に、大陸上部地殻、大陸下部地殻、マントルウェッジ、海洋性地殻、スラブマントルから成る水平成層構造を基本とし、マントルウェッジの一部の地震波速度を大陸下部地殻と同じ値にすることで低速度域を表現した。各層のVp/Vs比、密度、厚さなどは、椎名(2015)の2次元構造モデルを参考にして与えた。海洋性地殻内部に卓越周波数1.4 Hzの点震源を置いて波動伝播シミュレーションを行い (図)、地表観測点における地震動を合成した。その結果、海洋性地殻の地震波速度を若干 (0.5 km/s程度) 変更すると、海洋性地殻内部のガイド波の伝播速度や励起強度が変わり、結果として観測されるガイド波の走時や振幅、継続時間等にも変化が見られた。このことはガイド波の特徴から海洋性地殻内部の構造やその変化をある程度制約できる可能性を示唆する。

図：シミュレーションの一例：A：大陸上部地殻、B：大陸下部地殻、C1：マントルウェッジ、C2：マントルウェッジ内の低速度域、D：海洋性地殻、E：スラブマントル。星印は震源。赤はP波、緑はS波を表す。



Passive-source reverse-time migrationに基づく 海洋スラブのイメージング数値実験

Numerical test for imaging oceanic slab based on a passive-source reverse time migration

*古村 孝志¹

*Takashi FURUMURA¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

はじめに

近年、近地・遠地地震のアレイ観測波形データの逆伝播計算に基づく、地下深部の不連続面のイメージング手法（Passive-source reverse time migration; PSRTM）が提唱され、Moho面や沈み込む海洋プレート形状の推定への適用が議論されている（e.g. Shang et al. 2012; Li et al. 2018; Zou & Cheng 2021）。PSRTMは、地中の境界面で発生したPS、SP変換波を含む観測波形を時間反転し、観測点から地中に逆伝播させることで、変換が発生した境界へ戻す（境界面をイメージングする）手法である。地震波逆伝播計算には、差分法等が用いられ、地下構造モデルとしては既知の1次元ないし不均質構造が用いられる。なお、PSRTM解析では、P、Sの読み取りや震源情報は必要なく、また予めレシーバ関数を求める必要はない。本研究では、日本周辺の海・陸地震アレイ観測データを用いた太平洋スラブのイメージングに向けて、2次元モデルを用いた数値実験を試した。なお、既往研究はPS変換を対象に実施されたが、本研究では変換率の高いSP変換の利用を検討した。

PSRTM数値実験

数値実験は、東北～北海道下に沈み込む太平洋スラブのイメージングを想定し、図1に示す水平580 km、鉛直640 kmの2次元断面で行った。最初に、数値実験に用いる模擬観測波形を計算した地下構造モデルは、ak135速度構造モデル(Kennett et al. 1995)を背景に、厚さ100 kmの太平洋スラブ（背景より+5%の速度異常を持つ）を組み込み、深さ110 kmまで厚さ7 kmの海洋性地殻（-10%）を置いた。スラブ上面深度110～240 kmの範囲にはマントルウエッジ（-5%）を置いた（図a下）。地殻は、CRUST1.0（引用）モデルを参考に、陸域（厚さ35 km）から海域（20 km）にかけて薄く修正した。遠地地震を想定し、モデル深部から平面S波を入射して、地表に20 kmの間隔で並んだ23観測地点での上下・水平動速度波形を計算した（図a上）。レコードセクションを見ると、入射S波のほかにMoho面、スラブ上・下面で生成したSP変換波が確認できる。次に、PSRTM解析では、太平洋スラブ等を含まない、1D速度構造モデル（ak135）を、深さ方向に移動平均を取り境界をスムーズ化したものを用いた（図c）。FDM計算により、200秒間の模擬観測波形を観測点に入力し、地中に向けて逆伝播させた（図b）。このとき、粗い観測点間隔による波動場のエリアジングを避けるために、模擬観測波形には1 Hzのローパスフィルタをかけ、さらに観測点間の波動場をガウス補間することで、なめらかな逆伝播波動場を構築した。逆伝播計算で得られた各時刻の波動場に対し、発散(div)と回転(rot)を求めてP、S波動場に分解した。そして二つの波動場の相互相関を取り、P波とS波が同着する場所（すなわちSPまたはPS変換が起きた境界）をイメージングした（図b）。これを全時間にわたって足し合わせることで、境界面の位置をイメージングした（図2a）。

結果の考察

図cは、鉛直（0°）平面S波入射の場合のイメージング結果である。地殻および深さ230 km程度までの太平洋スラブ上面と海洋性地殻のイメージングが確認できる。イメージングの極性（赤／青）は、境界面の音響イン

ピーダンスに対応する。さらに、平面S波の入射角を -20° ～ 20° 、 5° 刻みに行い、イメージング結果を重ねたものを図dに示す。入射S波と速度境界面の角度が変わることで、SP変換が強く発生する場所が変化し、イメージングの範囲が拡大した。また、スラブ下面や海洋性地殻が明瞭化した。410 km不連続面はイメージングできなかった。ほぼ鉛直S波入射ではSP変換効率が小さいため斜め入射が必要である。深さ110～240 kmの範囲で太平洋スラブのイメージングが数キロ浅くなっているのは、上部のマントルウェッジの影響である。イメージングの精度は速度構造モデルに依存するため、例えば、既知の速度トモグラフィの結果を利用することも有効であろう。Zu & Chen(2021)は、マントルとスラブの速度異方性を考慮したPSRTMによる高解像度化の効果を議論している。なお、本数値実験では、非弾性減衰(Q)は考慮しなかったが、減衰の効果を適切に補正（逆伝播計算において振幅を増大させる）することで、深部のイメージング強化も期待される。本実験ではSP変換波を用いたイメージングを行ったが、PS変換波に対しても同様なPSTRM処理が可能である。S波とP波では、入射角による変換波の生成効率が異なるため、SPとPS変換波を相補的に用いることで、イメージングの高解像度化が期待できる。

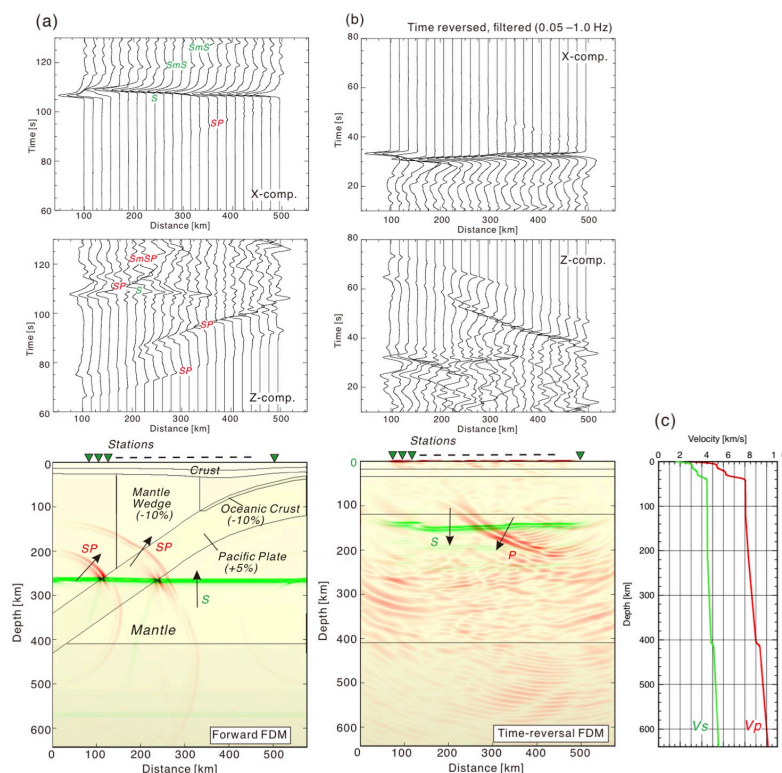


図1.(a) 実験に用いる模擬観測波形の計算。平面 S 波をモデル深部から入射させ、地表観測点での上下(z)、水平(x)成分の地震波形を計算した(緑がS波、赤がP波成分を表す)。計算波形には直達S波のほか、スラブ下面・上面、モホ面等でのSP変換波が含まれる。(b) 時間反転した模擬観測波形を入力とするPSTRM計算。観測点から地中に観測波を逆伝播させ、P、S波動場の相互相関を取りPS変換点をイメージする。(c)PSTRM計算に用いた1次元速度構造(ak135を鉛直方向にスムージング)。

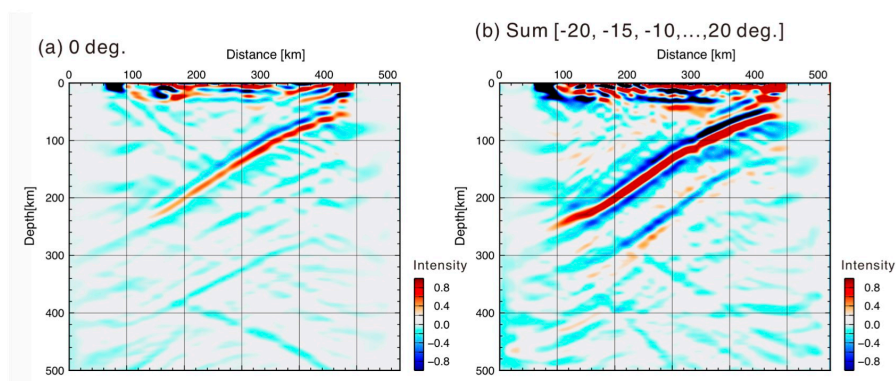


図2.(a)PSTRM計算から得られた境界面のイメージング画像(地下500 kmまでを表示;平面S波の鉛直入射=0°の場合)。赤と青は、反射係数の正負を表す。(b) S波入射角 $\pm 20^\circ$ の5°刻みでのイメージング結果のスタック画像。

水平成層構造での海面～海中における水中音響波形計算—海水層による増幅・減幅の影響評価—

Numerical simulation of seismoacoustic wave propagation on and beneath the sea surface: Evaluation of deamplification effect due to a seawater layer

*中村 武史¹、竹中 博士²

*Takeshi NAKAMURA¹, Hiroshi TAKENAKA²

1. 電力中央研究所、2. 岡山大学

1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Okayama University

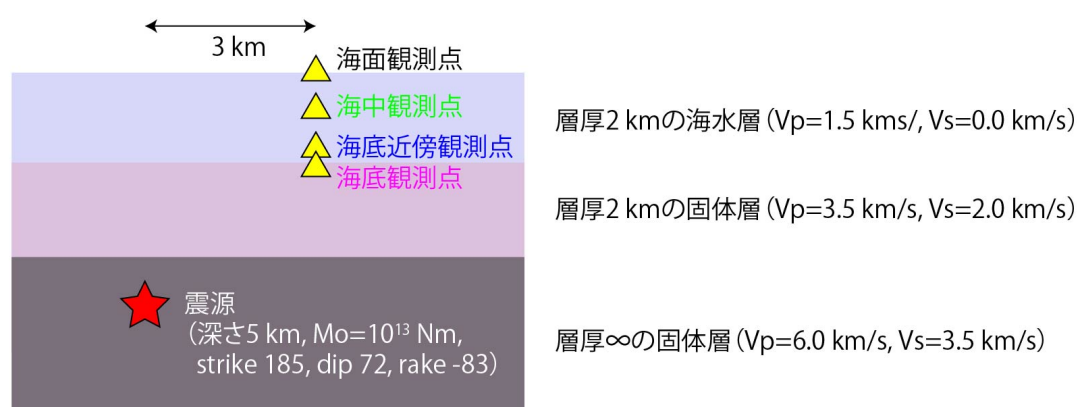
水平成層構造における地表や地中の変位を評価するために、周波数および波数領域における各層の変位・応力の応答を層境界でつないで計算を行うpropagator行列法（Haskell, 1953）が古くから用いられている。これは、構造の上層側と下層側がともに固体である場合、固体-固体間の層境界で変位と応力の成分が連続量であることを基に、各層の弾性定数や厚さ等を変数とした伝達関数の行列（propagator行列）の重ね合わせから変位を求める手法である。しかし、海域のように、海水などの流体層が入った構造の場合では、固体-流体境界で変位や応力の不連続成分があるため、固体-固体境界と同様の演算を行って変位を求めることができない。沢飯・他（1995）は、最上層を流体層として、Haskell（1953）が示した流体中におけるpropagator行列を用い、通常採用されることが多い演算処理とは異なる、下層から上層に向かって各層の行列を重ね合わせる演算を採用することで固体-流体境界条件の破綻を避け、流体層を含む構造に対する固体層上端における応答特性を示した。また、Okamoto and Takenaka（1999）は、propagator行列法ではなく反射行列・透過行列法を用い、流体内で応力変数の代わりに圧力変数を用いることで固体-流体の境界条件を満足する反射行列・透過行列を示し、不規則形状の場合を含む海底面での変位波形計算の安定的な解法を示した。

近年の海底地震観測網の充実により、海底における地震動の特性を示した成果が多く出ている（例えば、Nakamura et al. (2015); Kubo et al. (2018)）。また、CTBTOのIMSをはじめとする海中のハイドロフォン観測点のデータを使い、T相を含む、遠方から伝播した海中の地震波（もしくは水中音響波）の特徴を示した成果も出ている（例えば、Yildiz et al. (2013)）。一方、海震を含む、海面や海中における震源近傍の地震動（もしくは水中音響波による振動）は、観測例が非常に少なく（例えば、塩谷・笹（2013））、理論的評価も限られている。本研究では、海面や海中における震源近傍の地震動評価を行うために、固体において点震源の不連続ベクトルからの地震波伝播をpropagator行列法で求める中村・竹中（2005）およびNakamura and Takenaka（2006）の手法を拡張し、固体-流体の境界条件と流体中の各層でのpropagator行列を導入した。そして固体中の点震源に対する海面および海中における水中音響波形の計算を行い、海水層の存在による増幅や減幅の影響評価を行った。

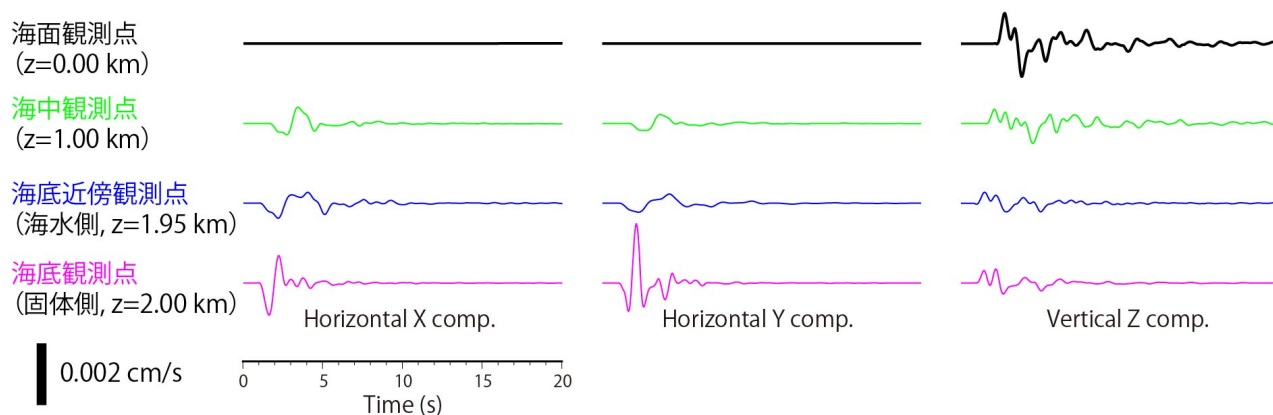
固体-流体境界条件および流体である海水層の導入にあたり、固体-流体間で変位と応力の法線成分の連続性を保ち、さらにオイラー方程式により固体側の応力の法線成分から流体側の変位の水平成分を求める行列を準備した。沢飯・他（1995）と同様に、下層から上層に向かって行列演算を行い、固体-流体境界では先述の行列を適用する。海水層においては、流体中の音波に関するpropagator行列で計算を行う。ただし、下層から上層へ向かって計算を行う場合、その逆向きの場合と比べ、自由表面と放射境界条件から導かれる応答式がやや複雑となる。さらに、層厚や鉛直波数に関わる指数関数項が増え、不連続ベクトルを導入した計算では安定性が低下し、高周波や層が厚い構造での計算は注意を必要とする。

計算で使った構造および震源と、計算結果例を図に示す。各深さ位置における観測点のpropagator行列法による波形を確認したところ、海底の固体側においては、SH波の伝播における自由表面であることから、大きな振幅が水平成分に現れた。しかし、固体-流体間で変位の水平成分が不連続かつ海中でS波が伝わらないため、海底近傍の海水側においては、固体側と比べて波形が大きく変わり、水平成分の振幅は鉛直成分と同程度にまで小さくなることを示した。その鉛直成分については、固体-流体間で連続であるため、海底の固体側と海水側で同じ波形として現れた。海面における鉛直成分については、主に自由表面の影響により、海底と比べて水中音響波が増幅することを示した。今回の計算の場合では、その増幅した振幅の大きさが、海底の固体側における水平成分の半分程度の大きさとなった。海面の水平成分については、海面で垂直応力とその水平方向微分、海面および海中でせん断応力が0であることから、波形振幅は現れない。

計算設定



計算結果例



海底地震計記録へ適用可能な近地地震向けMigration-baseの震源決定法 開発

Migration-based event location method applicable to local earthquakes recorded in Ocean Bottom Seismograph.

*米島 慎二¹、望月 公廣¹

*Shinji YONESHIMA¹, Kimihiro Mochizuki¹

1. 東京大学地震研究所 地震予知研究センター

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

はじめに

これまで海底地震計（OBS）記録を用いた震源決定では、目視により手動でP, Sの検測が行われていた。これは主に海底地震記録では、海面反射波や基盤岩でのPS変換波、ローカルなスパイクノイズなどの混在により、従来のAICなどを用いた自動検測ではミスピックが多発し十分な信頼性を確保できなかったことなどによる。一方で、近年の海底地震観測技術の発達により、海底地震計（OBS）にておよそ1年にわたる観測期間の地震記録が得られるようになった。これに数十台規模の観測網と併せて、臨時観測であっても大量の海底地震波形記録が得られるようになった。

課題

こうしたデータ量の増加に伴い、地震活動が活発な領域では、手動で検測できる量を超えている観測ケースが発生している。2011年東北沖地震の場合、茨城沖で実施していた31台のOBS観測では、周辺の余震活動として80000個を超える数の地震が検出された。これらすべての地震記録について手動で検測を行うのは時間的制約から困難であり、現実的ではない。

目的

本研究にて対象とする地震記録は、OBSで記録されたローカルな微小地震である。こうした地震について手動検測に匹敵する程度の信頼性の高い震源決定を実施する手法の開発を行うことを本研究の目的とする。

方針

本研究では、近年、海底地震計以外の分野で適用されているMigrationベースの震源決定法のアプローチをとった。このアプローチにより手動での検測を行う必要がなくなるため、震源決定に要する時間を大幅に短縮できることが期待される。Migrationの際には、多くの先行研究と同様、地震波形を変換したCharacteristic function（以下CF）を用いる。OBS記録に適用する際に必要となる項目は以下のとおりである。

- ・ イベントの検出、速度構造の作成、観測点補正などMigration以外の処理は、従来の震源決定処理と同様の手順を踏襲する
- ・ P, Sを用いた震源決定とする
- ・ CFはP, Sの到達時刻で安定したピークを持ち、手動検測と同程度の精度を持つものとする。
- ・ 観測点補正を実施可能にする
- ・ 速度構造の不確実性を織り込むことができる
- ・ 海面反射波やPS変換波にフィットしないようにする
- ・ 誤差楕円を計算する。
- ・ 処理のパラメータは既存手法と同程度で、地震データに依存しないものとする
- ・ 3次元速度構造にも対応可能にする

・後処理としてS/NによるCFピーク時刻の遅れを補正処理し検測時刻を計測する。これによりDouble difference法など高精度な震源決定処理を行えるようにする。

CFの特徴

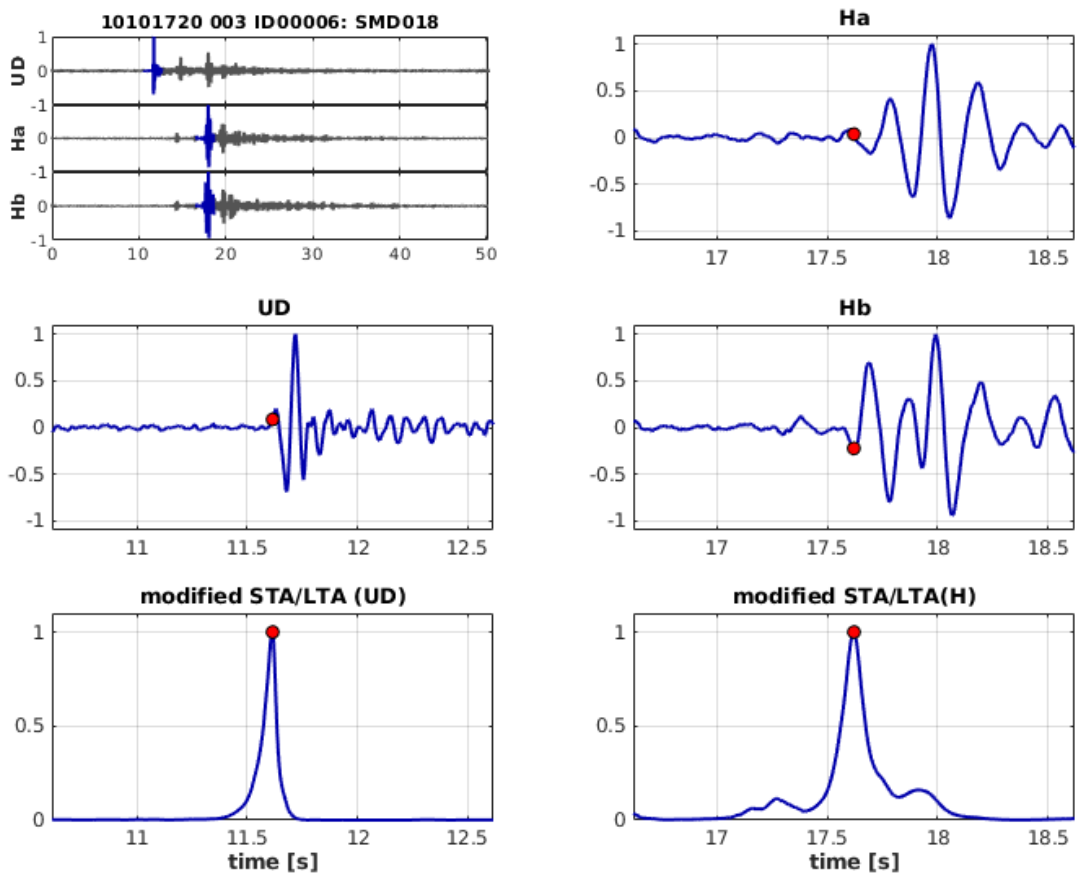
上記特性を満たすCFが先行研究では存在しないため、本研究にて新規開発となった。CFは以下の特徴を有する

- ・地震速度波形の初動の波形をTransient関数とみなし、理論的なTransientな速度波形の相互相関関数を定義する。
- ・初動周辺で相互相関関数の複数のピークが出てしまうことを避けるため、STA/LTAのコンセプトを適用し、STA部：Transientな相互相関関数（これはTransient関数を重みとする重み付きSTAとみなせる）。LTA部：従来のLTA，として、重み付きSTA/LTAとして定式化する。
- ・こうして定義された重み付きSTA/LTAは、初動付近にピークを持ち、観測点間の相対到達時刻のずれが小さいため、Migration-baseの震源決定と親和性が高い。
- ・相互相関は漸化式による再帰計算が可能のため、効率良く計算可能である。
- ・Transientな関数にはrise timeのパラメータがあるが、Transient関数同士の相互相関では、非対称な形状の関数同士ながら相互相関のピーク時刻がシフトしないという特徴を持つ。この特徴により、震源時間関数のrise timeのパラメータによらずピーク時刻はrise timeによらず不変となる。なお観測波形は機器特性や伝搬経路での減衰などの影響により歪が生じているが、観測点間で共通、あるいは十分に小さいとみなすことで相対的なピーク時刻は安定しているものとした。

結果

CFの例を図1に示す。P, S共に初動付近にユニークなピークを持っている。発表ではMigration処理全体のフロー、定式化の詳細、合成波形でのロバストネステスト、手動検測との比較、既存のCFとの比較、テストデータによる評価結果、および2010年茨城沖で観測された実データへの適用結果について紹介する。

図1. 既存手法との比較。左上：3成分の地震波速度波形（上：上下動，下：水平同2成分）。左中：上下動の地震波形。赤丸はCFのピーク時刻を示す。右上・中：水平動地震波形記録。左下：上下動CF，右下：水平動CF。



東北地方太平洋沖地震震源域の波形トモグラフィーに向けた波動場の検討

Study on the wavefield for the waveform tomography of the source region of the 2011 Tohoku-oki earthquake

*岡元 太郎¹、竹中 博士²、中村 武史³

*Taro OKAMOTO¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³

1. 東京工業大学 理学院 地球惑星科学系、2. 岡山大学 学術研究院自然科学学域、3. 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 地質・地下環境研究部門

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth Sciences, Okayama University, 3. Geology and Geotechnical Engineering Division, Sustainable System Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

沈み込み帯では地球内部構造が強い3次元不均質性を持っている。そのため、この地域の地震の震源パラメータや断層破壊過程の研究においては、3次元不均質構造をもとにして生成した計算地震波波形による解析が欠かせない。このとき計算波形の精度が不十分であると、解析結果にバイアスを生じたり分解能に制約を受けたりする可能性がある。とくに短周期（短波長）の計算波形の精度に限界がある場合は、短波長現象である破壊現象の考察や、地震発生場の短波長構造の考察において分解能のうえで制約となる可能性がある。そこで我々は、プレート沈み込み型の巨大地震である2011年東北地方太平洋沖地震の震源域において、周期数秒から10秒程度の計算波形の精度を向上させることを目的として、波形トモグラフィーによって地球内部構造モデルを改良する研究を続けている。これまでに周期7秒程度の波動場について海溝付近の浅い地震と陸上観測点との間での感度カーネルを調べ、直線経路に関して非対称なパターンや屈曲したパターンになることを見出してきた（地震学会2020年秋季大会発表など）。これは、短周期地震波においては横方向に均質な構造モデルを用いたトモグラフィーでは波動伝播状況を再現できないことによるバイアスが入る可能性を示唆する。

上記のようにこれまでの検討は周波数領域で行ったが、今回はより詳細に波動場の状況を把握するために、時間領域の波動伝播の検討を行った。例として、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域で発生した浅い地震（2003/11/01、Mw5.8）とF-net観測点TYSのペアについて中心周期7秒の波動伝播のスナップショットを調べたところ、平均的な群速度が2km/s程度以下の後続表面波群については、直線経路に関して北側の波動場の振幅が相対的にやや強くなっていることがわかった。経路の北側は南側よりも海溝に近づいており、経路上の海水層や堆積層が南側よりも厚くなっている。そのため北側の方が短周期地震波の励起が強くなる可能性や、あるいは波の振幅も大きくなるということの結果として、これらの波動場が感度カーネルの非対称なパターン形成に寄与した可能性が示唆される。発表では他の震源・観測点ペアの例も含めて時間・空間波動場の様子を議論して、波形トモグラフィーに向けた考察を行う。

謝辞 気象庁と防災科学技術研究所からは震源パラメータや地震波形データ、地盤構造モデルデータを提供していただきました。またGlobal CMTプロジェクトのCMT解を利用いたしました。本研究は科研費（課題番号：20K04101）および学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点（課題番号：jh210054-NAH）の支援によって実施しました。記して感謝いたします。

日本列島における脈動実体波のP-s変換波の抽出

Extraction of P-s converted wave of mantle discontinuities beneath Japan from ambient seismic noise

*加藤 翔太¹、西田 究¹

*Shota KATO¹, Kiwamu Nishida¹

1. 東京大学地震研究所 数理系研究部門

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

脈動は0.05-0.3 Hzの帯域で海洋波浪によって励起されるランダムな波動場である(Nishida, 2017)。脈動は従来地震波形に対するノイズとして扱われてきたが、近年では地震波干渉法によって地球内部構造の推定に用いられている (e.g., Shapiro et al., 2004; Poli et al., 2012)。地震波干渉法は、観測点間の観測波形の相互相関数を計算することにより、観測点間のグリーン関数を抽出する手法である (Snieder and Larose, 2013)。しかし、地震波干渉法によって観測点間を伝播する実体波を抽出し地球内部構造を推定する場合、脈動実体波の非一様な波源分布や観測網の配置によって適用できる領域に制約が生じることが知られている。

そこで、本研究では0.1-0.2 Hzでの脈動実体波を地震のようなイベントとしてみなし、新たなレシーバー関数解析により脈動実体波からHi-net観測点下の不連続面でのP-s変換波を抽出し、日本列島直下の構造推定を試みた。ここで脈動実体波の励起源は地震のように空間的に局在化しており、一方その震源時間関数は過渡的ではなく数日の時間スケールで持続的であると仮定した。P-s変換波の抽出には、レシーバー関数解析を拡張した手法を開発した。まずアレー解析によって入射P波を推定し、震源時間関数とみなした。上下動記録から求めた入射P波(震源時間関数)による水平動記録のRadial成分のデコンボリューションを計算し、P-s変換波の抽出を試みた。

解析に用いた観測波形は、防災科学技術研究所の展開する高感度地震観測網Hi-netの北海道を除く685点の上下動・水平動の速度計記録とし、解析対象とした脈動実体波のイベントは、0.1-0.2 Hzの全球的な脈動実体波カタログ (Nishida and Takagi, 2020 AGU) から信号/ノイズ比の良いもの100イベントとした。脈動実体波(P波)の走時の計算には1次元速度構造モデルAK135 (Kennett et al., 1995)と日本列島の3次元速度構造モデル (Nishida et al., 2008) を用いた。全観測点の上下動波形記録から1024秒の窓を切り出し、脈動実体波(P波)の走時に沿って足し合わせることで入射P波を推定した。

全観測点のレシーバー関数をアレー解析した結果、観測点下の410 km不連続面、660 km不連続面でのP-s変換波の検出に成功した。変換波の強度は空間的に異なるため、今後は反射面の空間分布について議論していく予定である。

環状断層を持つカルデラ火山における鉛直CLVD型のモーメントテンソル解の解釈 —シエラネグラ火山とキラウエア火山を例に

How to interpret vertical-CLVD moment tensor solution at active calderas with ring faults? —Case studies at Sierra Negra in the Galápagos Islands and Kilauea in Hawaii

*三反畑 修^{1,2}、金森 博雄³、Rivera Luis⁴、Zhan Zhongwen³、佐竹 健治⁵、綿田 辰吾⁵、Lai Voon Hui⁶

*Osamu SANDANBATA^{1,2}, Hiroo Kanamori³, Luis Rivera⁴, Zhongwen Zhan³, Kenji Satake⁵, Shingo Watada⁵, Voon Hui Lai⁶

1. 防災科学技術研究所、2. 日本学術振興会特別研究員(PD)、3. カリフォルニア工科大学、4. ストラスブール大学地球物理研究所、5. 東京大学地震研究所、6. オーストラリア国立大学

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. JSPS Research Fellow (PD), 3. California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 4. Université de Strasbourg, CNRS, ITES UMR 7063, Strasbourg F-67084, France, 5. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Tokyo, Japan, 6. Australian National University

At active calderas with a ring-fault system, $M_w \sim 5$ moderate earthquakes with deviatoric moment tensors dominated by a vertical compensated-linear-vector-dipole (vertical-CLVD) component are sometimes generated. Ring-faulting, dip-slips along the ring-fault system induced by pressure change of a shallow magma chamber at calderas, can cause such earthquakes with vertical-CLVD moment tensors (Shuler *et al.* 2013, JGR). However, the deviatoric moment tensor inversion using long-period teleseismic data has been known to be very unstable because at a shallow source depth M_{xz} and M_{yz} are inefficient in exciting long-period seismic waves, and therefore unresolvable; this issue makes it difficult to interpret moment tensor solutions of ring-faulting, limiting our understanding of the source properties.

We propose a method to constrain ring-fault geometry by focusing on the ratio and the polarity of the other moment tensor components that are well-resolved from long-period teleseismic data, i.e., the vertical-CLVD (CLVD) and the vertical strike-slip (SS) components. We suggest that the arc length of ring fault can be inferred from the dominance of the CLVD component, whereas the ring-fault orientation can be constrained from the azimuth of the tension- or pressure-axis of the SS component.

We apply the method to vertical-CLVD earthquakes observed at two calderas with a ring-fault system: Sierra Negra in the Galápagos Islands and Kilauea in Hawaii. We first investigate the arc angle and orientation of the fault geometry of several ring-faulting events during volcanic activities in 2005 and 2018 at the summit caldera of Sierra Negra. The difference in the tension-axis orientation of the SS component indicates variations in the slip location along the ring-fault system. Additionally, the polarity reversal of the CLVD component between the two events in 2018 indicates that the slip direction changed before and after the eruption onset. We also apply the method to recurring $M \sim 5$ seismic events during the 2018 Kilauea summit caldera collapse. We infer that the summit caldera collapses occurred with partial ring-faulting along either the northwestern or southeastern segment of the ring-fault system. Our estimations of the ring-fault geometry and kinematics at the two volcanoes are consistent with those inferred from geodetic observations and/or near-field seismic data.

These results show the usefulness of long-period teleseismic data for estimating a ring-faulting source, although parts of the source information, such as ring-fault dip angle and seismic moment, are indeterminate. By utilizing the well-resolved moment tensor components, we are able to examine remotely the structures and kinematics below active calderas with ring faults that are distributed globally. Lastly, we also discuss possible biases in the deviatoric moment tensor inversion caused by a volumetric change that potentially coincides with the ring-faulting.

MCMCによる地震波鉛直異方性パラメタの観測可能性の検証と火山直下の互層構造の再現

The observability of seismic radial anisotropy parameters using MCMC and a reconstruction of thinly layered structure under a volcano

*丸山 純平¹、川勝 均¹、竹内 希¹

*Junpei MARUYAMA¹, Hitoshi Kawakatsu¹, Nozomu Takeuchi¹

1. 東京大学地震研究所 海半球観測研究センター

1. Earthquake research institute, The university of Tokyo

近年、火山直下の地殻や海洋の地殻・上部マントルに強い鉛直異方性（Radial Anisotropy）の存在が報告されている（Ekstrom&Dziewonski, 1998; Nettles&Dziewonski, 2008; Russell et al., 2019; Jaxybulatov et al., 2014; 長岡, 2020）。このような鉛直異方性の原因として地震波速度の大きく異なる互層構造の存在が考えられている（Backus, 1962）一方で、その詳細な構造について地震波観測からの制約は得られていない。これは従来の研究で用いられている表面波のデータのみでは5つの異方性パラメタのうち主に鉛直S波速度 β_v [川勝1]と水平S波速度 β_h しか制約することができず、互層構造についての十分な情報を与えることができないことに起因している（Aki, 1968）。残された3つの異方性パラメタはP波の走時や、不連続面で生じるSP、PS変換の変換係数に大きい影響を与えることが知られており（Kawakatsu, 2018）、これらのデータと合わせることでより詳細な異方性パラメタの推定が可能となることが期待される。

本研究では、特に強い異方性が観測されている火山の直下をモデルケースとして、表面波の分散、P波の走時およびレシーバー関数の解析を同時に行うことによる異方性パラメタの計測可能性をマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)を使って評価することを試みる。そのために、表層の深さ30kmまでに鉛直異方性を持つ単純な二層構造モデルについて予備的試験を実施した。最初に構造モデルから順問題として表面波の分散曲線、P波の走時曲線、レシーバー関数の波形を計算する。それらの数値に誤差を付加した上でMCMCを用いて逆問題を解くことで、それらのデータから異方性パラメタにどのような制約を与えるか検証した。その結果、表面波とP波のデータに加えてS波レシーバー関数では入射角を20–30°, P波レシーバー関数では20–50°の範囲で幅広く取ることで複数の異方性パラメタの間に存在したトレードオフを解消し、それぞれを従来手法より精度良く推定できることを確認した。これによって、地下に存在が想定されている互層構造について、特に個々の層の V_p/V_s 比が大きく異なる場合にはそれぞれの層の厚さや地震波速度について強い制約を与えることができる場合があることを示した。講演では、様々な観測環境に応じて観測されるデータとそこから得られる地下構造についての情報の関係を整理し、鉛直異方性の制約から地下の物性や微小な構造について推定できることを明らかにすることで将来的な解析/観測に資する予定である。

ベイズ統計を用いた震源決定法に対する3次元走時計算適用の検討

A study on the Application of 3-D Travel-Time Prediction to the Bayesloc multiple-event location

*近藤 優子¹、杉岡 裕子¹、大林 政行²*Yuko Kondo¹, Hiroko Sugioka¹, Masayuki Obayashi²

1. 国立大学法人神戸大学、2. 国立研究開発法人海洋研究開発機構

1. Kobe University, 2. JAMSTEC

自然地震を用いたトモグラフィによる速度構造推定において、地震の震源位置と震源時もまた未知数であり、3次元速度不均質構造と震源位置のずれを明確に区別することは難しい。このため、震源パラメータを高い精度で推定することは極めて重要な問題である。

Myers et al. (2007; 2009)は、階層ベイズモデルを用いた多数イベントの震源同時推定手法 (Bayesloc) を開発した。Bayeslocは、震源位置、走時補正、到達時検出精度、フェイズラベルの推定パラメータセットについて、ベイズの定理に従って同時事後確率密度分布を定式化したものである。同時事後分布からのサンプリングにはマルコフ連鎖モンテカルロ法が使用されている。Myers et al. (2011)ではグローバルデータセットに適用するために改良が加えられた。この改良によって、Bayeslocで実行される走時計算に対する補正、到着時データの精度推定、確率的フェイズラベリングにおける妥当性が示されるとともに、グローバルトモグラフィに応用されている (Simmons et al., 2011; 2012)。この改良Bayeslocの走時計算では、1次元グローバル標準速度モデルに対する走時を用い、波線ごとに統計的な走時補正を施している。

本研究では、ベイズ統計を用いた震源決定法への3次元速度構造による走時計算の適用手法を検討した。まず各到着時データに対して、3次元速度構造モデルによる走時計算を行い、走時表に対する補正値を求める。次に、補正された到着時データをBayesloc (Myers et al., 2009)に適用して震源を再決定する。これら2つのプロセスを反復する。本研究はグローバルトモグラフィへの応用を目的としているが、最初の試みとして、1964年から2017年に東北地方で発生した深発地震に対してこの手法を適用し震源の再決定を行い、妥当性を検証した。ここでは、到着時データとしてInternational Seismology Centre (ISC)によるものを、3次元P波速度モデルとしてGAP_P4 (Obayashi et al., 2013)を用いた。まず、iasp91 (Kennet and Engdahl, 1991)に基づいた走時表を用いて、Bayesloc (Myers et al., 2009)で震源を再決定した。決定された震源位置とISCの位置を比較した結果、水平方向には北西へ、深さ方向には浅い方への系統的な偏差が認められた (図1)。これは、Bayeslocで実行される統計的な走時計算への補正によるものと考えられる。

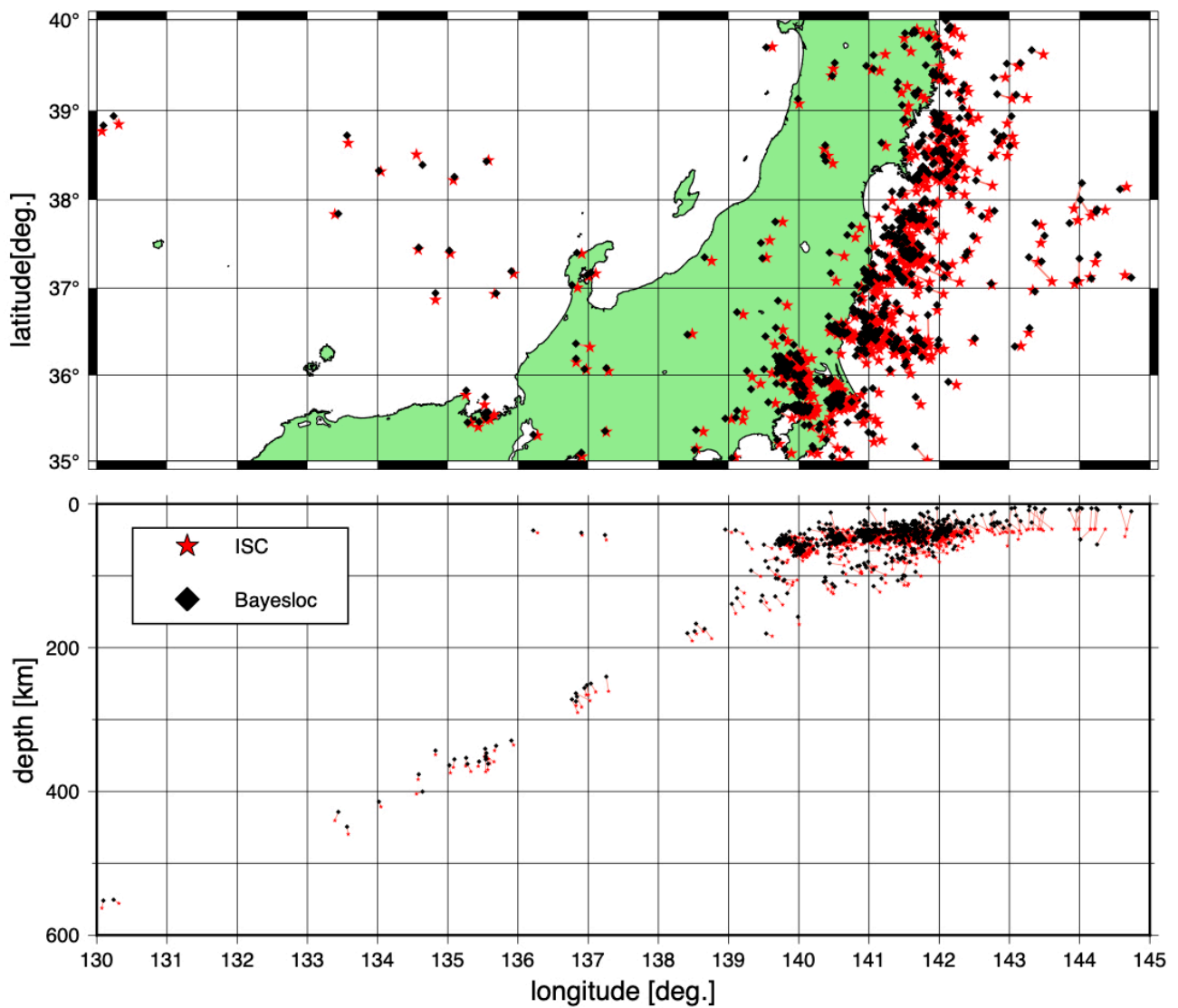


図1. 1964年から2017年に東北地方で発生した深さ35 kmより深い地震の震源分布。赤星は International Seismology Centre (ISC)で決定された震源位置を、黒菱形はiasp91(Kennett and Engdahl, 1991)の走時表を用いて、Bayesloc (Myers et al., 2009)で再決定した震源位置を表す。

球対称地球自由振動モード計算のためのSymplectic数値積分法

Symplectic numerical integration method for normal mode computation of the spherically symmetric Earth

*綿田 辰吾¹

*Shingo WATADA¹

1. 東京大学地震研究所 地球計測系研究部門

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震や地滑り火山噴火などの励起源が生じる永久変位を包括する波動現象（地震・津波・大気波動）は、重力弾性結合系の地球自由振動解を用いて、変位（と時間・空間微分）の理論波形が簡便高速に計算される。近年報告されている、P波到達前の重力場変動計算では、純粋な弾性地震波動場の粗密に起因する重力場を時間領域で計算や、励起項に相当する非斉次項を有する重力摂動を含む周波数領域の運動方程式の直接積分による手法とられてきた。重力摂動を含む重力弾性結合系の地球自由振動解を用いるとP波到着前の重力場変動が高速簡便に計算されると期待されるが、これまで、高周波（～1 Hz）領域まで安定的に数値計算することが困難であった。周波数領域で変数分離した後の動径方向を独立変数とする微分方程式は、重力摂動を含めると6変数連立1次微分方程式となる。安定的に数値積分を行うためにいくつかの手法が提案されてきたが(斎藤2009, Woodhouse 1988)、数値不安定のため高周波まで計算ができない。その連立微分方程式は、変位と重力ポテンシャルの固有関数を一般化座標ベクトル q 、歪みと重力ポテンシャルの微分の固有関数を一般化運動量ベクトル p とする、6次元位相空間のハミルトニアン形式 $d(q,p)dr = J H(q,p)$ と書くことができる。このハミルトニアン $H(r)$ は一般化座標 q と一般化運動量 p の2次形式となっており、 $H(q,p) = U(q) + T(p)$ のように分離できないため安定的数値積分法として知られているシンプレクティック（Symplectic）数値計算法を用いることができなかった。今回発見した $Q=Q(q,p)$, $P=P(q,p)$ とする座標変換によりハミルトニアン H が $H(Q,P) = U(Q) + T(P)$ 分離できた。さらに、一般化座標として動径 r と一般化運動量として $H(r)$ に相当する $E(r)$ を加えた8次元位相空間の新たなハミルトニアン $H(Q,P) - E$ は座標 r に関して一定となり、安定的に数値計算できることが判明した。

The normal mode method has been used for wave phenomena including permanent deformation, tsunami and atmospheric waves when we include the solid earth and ocean and atmosphere as a single gravitationally coupled elastic body. Once the normal mode set have been obtained, the computation time is very short, compared with other numerical simulation methods. Recently pre-P signal in seismograms induced by gravity potential change has been reported and confirmed by numerical simulations. We try to shorten the computation time by using the normal mode method. After the separation of variables of the differential equation for a symmetric Earth model in the frequency domain, 6 dependent variables as functions of independent variable r compose a 1st order simultaneous differential equation. The numerical solution methods for the simultaneous differential has been proposed, however, it has been difficult to compute the solutions at high frequencies, ~ 1 Hz. We extend the Hamiltonian formulation of the differential equation $d(q,p)dr = J H(q,p)$. $H(q,p)$ is a quadratic function of q and p and cannot be separated into $H(q,p) = U(q) + T(p)$. We found a coordinate transformation $Q=Q(q,p)$ and $P=P(q,p)$ so that the new Hamiltonian $H(Q,P) = U(Q) + T(P)$ is separable. So a numerically stable symplectic integration method is applicable for the differential equations. Further, we extended the dimension by adding a new generalized coordinate r and a new generalized momentum E and compose a new Hamiltonian $H(Q,P) - E$. The new Hamiltonian can be integrated stably.

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S02. 地震計測・処理システム

2021年10月15日(金) 15:30 ~ 17:00 | 会場 P2会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S02P-01] 最短経路法を走時計算に適用した3次元速度構造での震源決定

○関口 渉次¹ (1.防災科学技術研究所 地震津波火山ネットワークセンター)

15:30 ~ 17:00

[S02P-02] S-netを用いたセントロイドモーメントテンソル解析の検討

○木村 尚紀¹、浅野 陽一¹ (1.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S02P-03] MQTTプロトコルを用いたWINシステム用リアルタイム表示システムの開発

○鶴岡 弘¹ (1.東京大学地震研究所)

15:30 ~ 17:00

[S02P-04] 東北地方中南部における地震活動（序報）

○岡田 知己¹、中山 貴史¹、平原 聡¹、堀内 茂木⁹、勝俣 啓²、大園 真子^{2,4}、小菅 正裕³、前田 拓人³、山中 佳子⁵、片尾 浩⁶、松島 健⁷、八木原 寛⁸、2011年東北地方太平洋沖地震緊急観測グループ (1.東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター、2.北海道大学、3.弘前大学、4.東京大学地震研究所、5.名古屋大学、6.京都大学防災研究所、7.九州大学、8.鹿児島大学、9.ホームサイスマ)

15:30 ~ 17:00

[S02P-05] 低周波数サンプリングの加速度記録に適用可能なリアルタイム震度演算法

○平井 敬¹、吉岡 優樹² (1.名古屋大学減災連携研究センター、2.名古屋大学大学院環境学研究科)

15:30 ~ 17:00

[S02P-06] 三陸沖における海底光ケーブルとDistributed Acoustic Sensingを用いた反射法地震探査

○高野 洋輝¹、篠原 雅尚²、仲田 理映²、蔵下 英司²、石山 達也²、望月 公廣² (1.東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻、2.東京大学地震研究所)

15:30 ~ 17:00

[S02P-07] DAS地震動記録を用いた海底光ファイバーケーブルの敷設環境推定

○片上 智史¹、荒木 英一郎²、高橋 成実³、野田 俊太¹、岩田 直泰¹、是永 将宏¹、山内 泰知¹ (1.鉄道総合技術研究所、2.海洋研究開発機構、3.防災科学技術研究所)

最短経路法を走時計算に適用した3次元速度構造での震源決定

Hypocenter determination in 3-dimensional velocity structure based on the travel-times calculated by the shortest path method

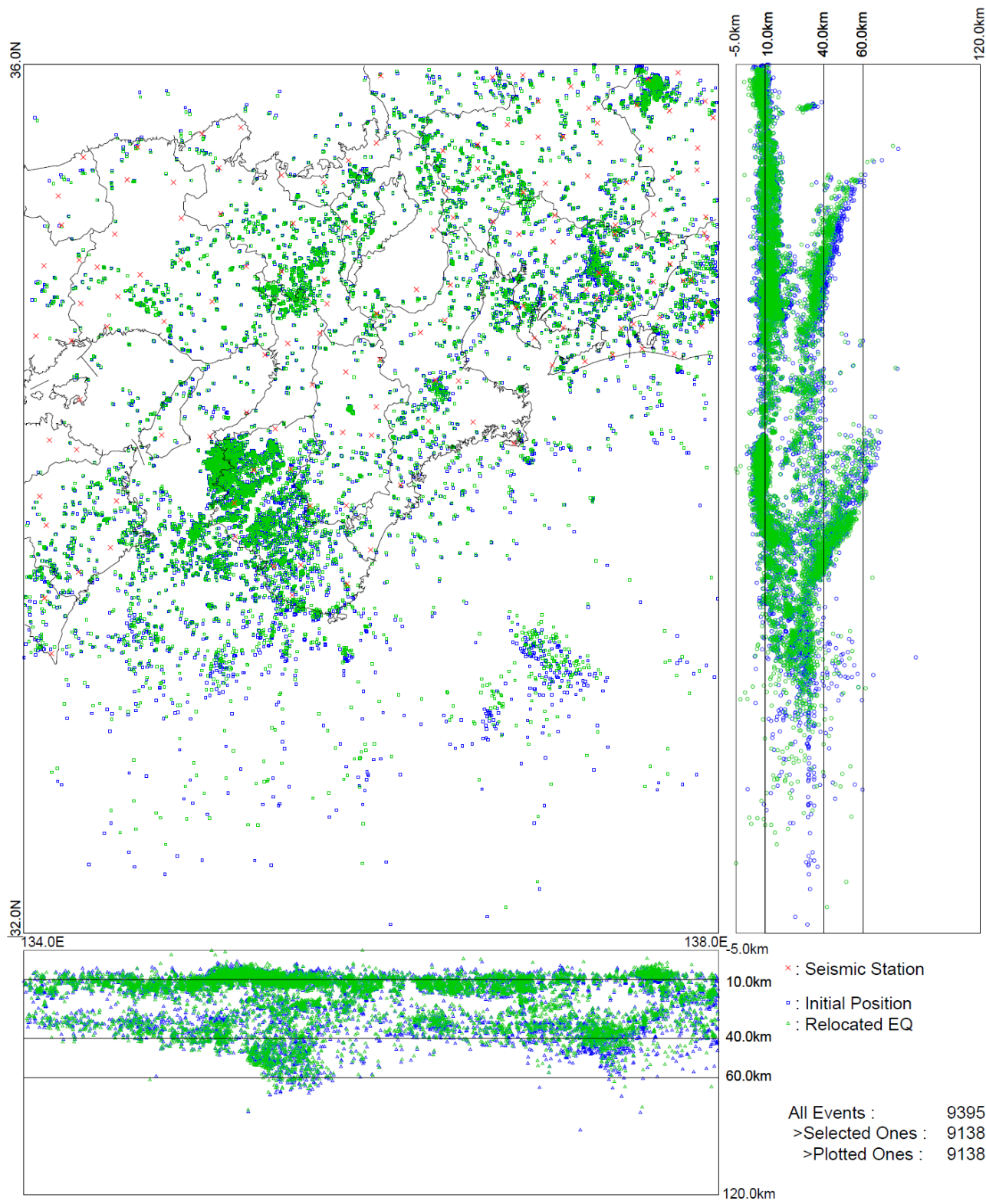
*関口 渉次¹

*Shoji SEKIGUCHI¹

1. 防災科学技術研究所 地震津波火山ネットワークセンター

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

最短経路法を3次元不均質構造の走時計算に適用し、その計算結果をもとに震源決定を行う手法を開発したので、紹介する。最短経路法の特徴として、ローカルな最小値に陥ることなく走時が計算できることがあげられる。特に3次元不均質構造の場合、多くのローカルな最小値が発生する可能性があり、また、それを事前に予測し回避することは通常の波線計算手法のみでは難しい。たとえば、日本地震学会2019年度秋季大会S01-P02（関口）においてはチェッカーボードパターンの2次元速度構造に最短経路法とPseudo-Bending Methodを適用し波線経路が一致しないことを示している。一方、最短経路法のデメリットとしては、一度に対象領域全部の走時を計算するため、計算に時間がかかる点である。そこで今回は、あらかじめ各観測点を震源として対象領域全体の走時を計算しその結果をスプライン関数として保存することにし、実際の震源再決定の際には、保存したスプライン関数をメモリ上に呼び出し、使用することにした。そのことにより震源再決定の処理時の計算時間の大幅な短縮が可能となった。なお、最短経路法の代わりにPseudo-Bending Methodを走時計算に適用したケースはすでに日本地震学会2017年度秋季大会S02-P02（関口）で報告している。計算結果を図に示す（緑色シンボル）。3次元速度構造はMatsubara & Obara (2011)を使用した。P波S波の読み取りデータはHi-netの2010年1年間のものである。比較のためHi-netのルーチン処理（1次元速度構造）により決定された震源も示す（青色シンボル）。初期震源はルーチン処理の震源を用いた。観測点の実際の高さをそのまま計算にとり入れるために高さ5kmまで速度を外挿して領域を拡張している。それ以外の観測点補正は考慮していない。ルーチン処理結果と今回の計算結果を比較してみると、ほぼ一致しているが、詳細に見てみると、ルーチン処理では南の海域下でよく決まらないために深さが固定されてしまった地震が散見されるが、今回の結果ではばらつきは大きい位置は決められている。また、東海・中部地方下の沈み込むフィリピン海プレートに対応する地震分布をみると、今回の結果の方が浅く決まっている。地震の上の領域の速度が遅いなどの3次元構造の影響であろう。なお、事前の全走時の計算時間はおよそ450時間、震源再決定の計算時間は全イベントで4秒、平均走時残差は初期値0.407秒から0.330秒へ減少した。計算機諸元は以下の通りである。CPU: Intel Xeon E-1650 v3 3.5GHz、OS: Ubuntu 20.4.2、Memory: 64G、外部保存装置: SSD。次に（図には示していないが）計算走時をPseudo-Bending Methodと比較する。1次元速度構造では、モホ面付近の速度急増域で地表に返ってくる波線によって形成されるtriplication付近で波線が一致しなくなることにより走時の差が発生する。それ以外の領域で走時はほぼ一致している。3次元速度構造の場合は、相当に広い範囲で一致しない。おそらく波線経路の違いによるものと思われる。したがって、正確な走時の計算値を得るために、計算時間はかかるものの最短経路法を用いる意味はあるだろう。



S-netを用いたセントロイドモーメントテンソル解析の検討

Examination of centroid moment tensor analysis using S-net

*木村 尚紀¹、浅野 陽一¹

*Hisanori KIMURA¹, Youichi ASANO¹

1. 防災科学技術研究所

1. NIED

2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)をうけて、日本海溝海底地震津波観測網(S-net)が整備された。S-netには、加速度計が接続されていることから、セントロイドモーメントテンソル(CMT)解析への活用が期待される。特に、S-netの導入によりカバレッジが向上し、CMT解析の精度が向上する可能性がある。一方、即時震源パラメータ解析システム(Accurate and QUick Analysis System for Source Parameters; AQUA)では、M4程度以上の地震を対象として、地震の位置、規模、およびモーメントテンソル(MT)等の震源パラメータを高精度に自動決定してきた。そこで、AQUAのCMT解析へのS-netの適用可能性について検討した。

解析にあたって、まずデータの品質を確認した。ランニングスペクトルの画像表示より、加速度計2の Low gain (以下、A2L)で長周期帯でのノイズレベルが最も低かった。また、遠地震による観測波形を近傍の広帯域地震観測網(F-net)と比較し、0.01-0.03Hzの帯域では同等の波形が再現されることを確認した。このため、S-netのA2Lについて、特段の特性補正は行わず使用することとした。

CMT解析は、検討の結果、以下のように実施した。まず、F-netのみを用いてセントロイドの水平位置を固定したMT解を決定した(AQUA-MTとする)。次いで、AQUA-MTのセントロイド時刻・深さに固定して、F-netおよびS-netの各点ごとのMT解を得た。これを元に、観測点方位毎に品質(Variance Reduction; VR)の高い点を、F-net最大10点、S-net最大10点まで選択し、セントロイド位置を探索しCMT解を決定した。セントロイド位置の探索は、以下の点を除いて、現行のAQUAと同じである。S-netのデータは、Takagi et al. (2019)のパラメータを用いて回転した後、オフセット除去、バンドパスフィルターを施し、2回積分して変位波形とした。この時、各点ごとMwがAQUA-MTのMwより0.5以上大きくなった点は除外した(詳細は後述)。帯域は、0.02-0.05Hzおよび0.01-0.05Hzを検討した。

S-net内および近傍で発生した地震(最大Mw7.0)を解析した結果、およそMw5.5以上の場合に、5点以上のS-netを含むCMT解が得られた。

S-netの各点毎の解析結果は、震央の近傍でMwが不自然に大きな値をとる傾向がみられた。こうした傾向について、様々な要因を検討したところ、地震動そのものの加速度ではないセンサーの回転に起因することが分かった。地震前後の加速度の平均値からセンサーの回転角度を推定すると、回転角度が大きいほどMwが過大評価される傾向がみられ、Mw6.8以上の地震では、回転角がおよそ $1 \times 10^{-2}^\circ$ 以上で観測点毎のMwは0.5程度以上の増加となった。Takagi et al. (2019)によると、PGAが大きいほど回転角も増大するため、震央に近くPGAが大きいほど回転が大きくMwも過大評価されると考えられる。そこで、震央距離範囲は現行のAQUAと同じとし、さらに各点ごとのMwが0.5以上大きい観測点は除外することとした。

帯域については、0.01-0.05Hzより、0.02-0.05Hzの場合に、S-netが含まれるCMT解が多く得られた。これは、長周期ほどS-netのノイズレベルが高いためと考えられる。

得られた結果をAQUAと比較したところ、Mwおよび発震機構解については、ほとんど同じ結果が得られた。セントロイド深さについては、S-netを入れた場合に、浅くなる傾向が見られた。例えば、2021年3月20日宮城県沖の地震(Mw6.9)では、深さ58 kmと推定された。これは、AQUA(65 km)やF-net(62 km)より浅く、プレート境界を表すと考えられる震源分布に近い。発震機構解や震源分布から、この地震はプレート境界の地震と考えられることから、S-netを導入することにより、もっともらしい深さに近づいた可能性がある。

CMT解析へS-netの導入を検討したところ、およそMw5.5以上の地震では有効であること、また、Mw7.0程度まではカバレッジの改善により精度が向上する可能性が示された。一方、これより大きい地震では、今回より長周期の帯域が適していると考えられる。現時点では、解析に用いた地震が十分でないため、引き続き検討が必要である。

MQTTプロトコルを用いたWINシステム用リアルタイム表示システムの開発

Development of a realtime monitor system for WIN system using the MQTT protocol

*鶴岡 弘¹

*Hiroshi TSURUOKA¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

はじめに

WINシステムは、多チャンネルの地震波形データを取り扱うための処理システムで、UNIX上で動作する多くのプログラム群から構成されている。地震観測テレメータシステムにおいては、その波形フォーマットを含め、リアルタイムデータ交換のためのシステムとして日本においては広く利用されている。プログラム群の中には、データ交換の際に利用される共有メモリ上のデータをテキストで表示するプログラムshmdumpがあり、これと連携したTcl/Tkで作成された波形表示プログラム群(shmx、shmz、shmck)もパッケージには同梱されている。波形表示プログラムは、Tcl/Tkで記述されているためマルチプラットフォーム対応となっているが、Webプラットフォームには対応していない。Webによるリアルタイム表示システムは存在しているものの、1秒ごとに波形表示用のファイルを作成して、それらをJavaScriptのプロットライブラリによって表示するシステムなどが開発されている。今回M2MやIoTにおいてよく利用されているMQTTプロトコルを用いた簡便なWINシステム用リアルタイム表示システムを開発した。

MQTTとは

Message Queueing Telemetry Transport (MQTT) は、機械同士が通信を介して情報をやり取りする M2M (Machine-to-Machine) や家電や自動車など多種多様なモノがインターネットにつながりお互いに情報をやりとりする IoT (Internet of Things) においてよく利用されているプロトコルであり、シンプル、軽量、省電力という特徴を持っている。今回はその実装アプリであるmosquitto を利用した。MQTTでは、パブリッシュ/サブスクライブ型モデルを採用しており、1対1はもとより多対多のやり取りが可能なプロトコルであり、応用性に富んでいる。

リアルタイム波形モニタリングシステム

地震データのやり取りは、MQTTプロトコルを採用し、リアルタイムの波形表示について

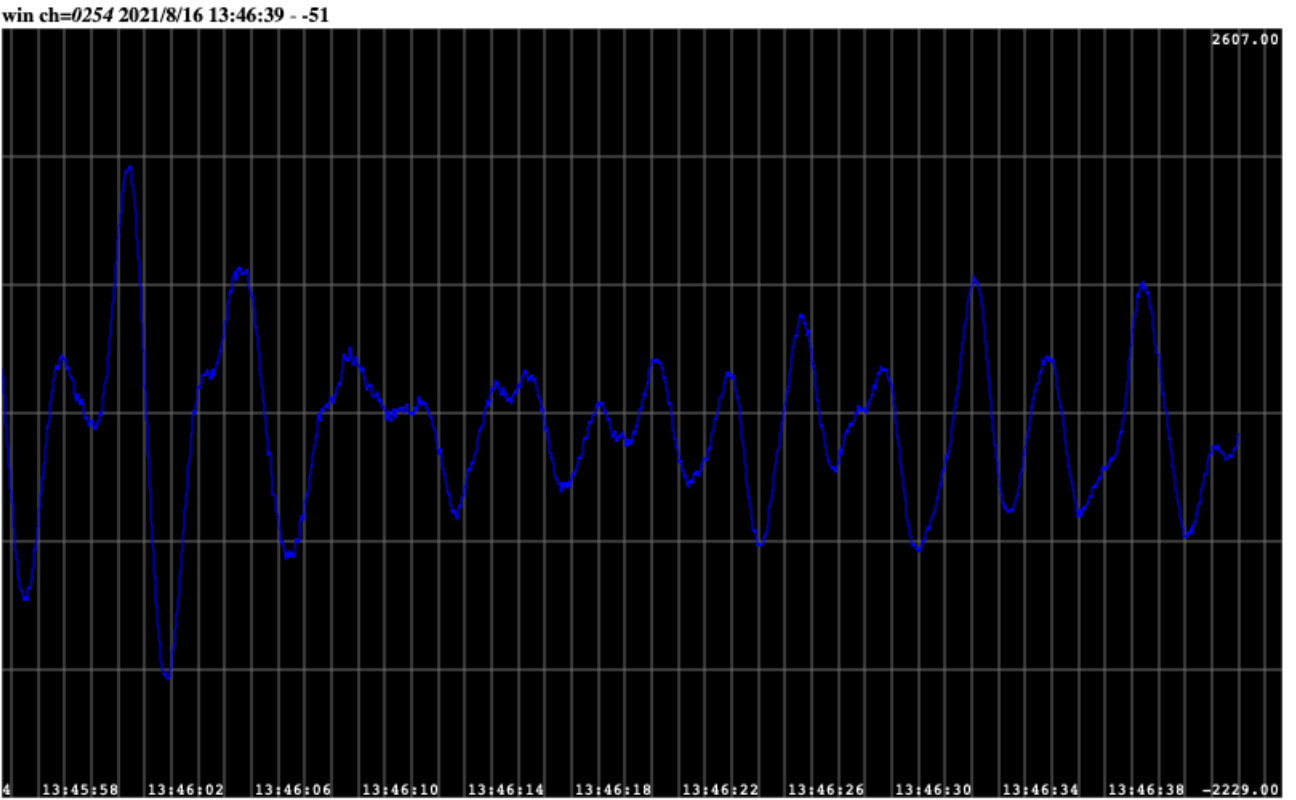
は、<http://smoothiecharts.org> にあるJavaScript ライブラリの smoothie.js を採用した。さらに、mosquitto broker への配信データフォーマットとしては、smoothie.js でのプロットがシンプルかつダイレクトであるため、WINテキストフォーマットをjson形式に変換して送信を行なった。

実際例

実際に開発されたシステムのスナップショットを示した。ブラウザの負荷は非常に軽く、スマートフォンなどのブラウザでも表示できることを確認した。

今後の展望

今回は、mosquitto を利用したために、データ伝送はアスキー形式のみの対応となっているが、WINパケット (バイナリ) を送信できることがデータ転送サイズ等の面からも効率的である。また、MQTTプロトコルを採用することによりデータ送受信にアクセス制限をかけるなどが可能であり、より柔軟なデータ送受信を実現できる。また、MQTTプロトコルはrecv/send_raw に変わって利用できる可能性がありその性能評価なども今後実施したい。



東北地方中南部における地震活動（序報）

Seismic activity in the central-southern part of Tohoku District - a preliminary report

*岡田 知己¹、中山 貴史¹、平原 聡¹、堀内 茂木⁹、勝俣 啓²、大園 真子^{2,4}、小菅 正裕³、前田 拓人³、山中 佳子⁵、片尾 浩⁶、松島 健⁷、八木原 寛⁸、2011年東北地方太平洋沖地震緊急観測 グループ
*Tomomi OKADA¹, Takashi Nakayama¹, Satoshi Hirahara¹, Shigeki Horiuchi⁹, Kei Katsumata², Mako Ohzono^{2,4}, Masahiro Kosuga³, Takuto Maeda³, Yoshiko Yamanaka⁵, Hiroshi Katao⁶, Takeshi Matsushima⁷, Hiroshi Yakiwara⁸, Group for the aftershock observation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

1. 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター、2. 北海道大学、3. 弘前大学、4. 東京大学地震研究所、5. 名古屋大学、6. 京都大学防災研究所、7. 九州大学、8. 鹿児島大学、9. ホームサイスモ

1. Tohoku University, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. ERI, University of Tokyo, 5. Nagoya University, 6. Kyoto University, 7. Kyushu University, 8. Kagoshima University, 9. Homeseismo

1. はじめに

宮城県中部～山形県南部～福島県北部にかけての領域は、長町-利府線断層帯、福島盆地西縁断層帯、双葉断層帯などの断層帯が複雑に分布している。蔵王山や吾妻山などの火山も分布している。一方で、地震活動は東北地方の他地域に比べると低調であるが、地震観測網が比較的荒いことも考えると、十分な理解がなされているとは言えない。これまで観測・理解が手薄だった領域の強化として、宮城県中部～山形県南部～福島県北部において臨時地震観測網を整備した。本稿では観測の序報について述べる。

2. 観測概要

観測点間隔は、地震発生層の厚さ（約10-20km）を考慮し、既設の定常観測網・臨時観測網と併せて約10km程度とした。地震計は1Hzないし2Hzの短周期地震計を使用している。データは携帯電話回線を利用したテレメータ方式により伝送されている。得られた連続波形データを定常地震観測網や他の臨時観測点と合わせて、自動処理（堀内・他）により、地震の同定、震源決定を行なった。

3. 初期結果

観測網の設置が概ね完了し、自動処理の改良も完了した、2020年8月～2021年7月までの期間について、震源決定結果などの確認を行なった。

3.1 震源分布

本研究で実施した臨時観測および自動処理により同定されたイベントを確認し、気象庁一元化震源カタログに記載されていない地震を確認した。それらは、双葉断層付近や長町-利府線断層帯-福島盆地西縁断層帯のおよそ西側（上盤側）の他、それらの間の領域（宮城県南部、丸森町付近）にも見られる。

3.2 メカニズム解

本研究で実施した臨時観測および自動処理により、対象領域内でメカニズム解を推定した。方法はHASH (Hardebeck and Shearer, 2002) である。横ずれ型ないし逆断層型でP軸は東-西または北西-南東方向となる。

3.3 地震波速度構造

対象領域において、地震波速度トモグラフィ (Zhao et al., 1992) を行った。初期構造はOkada et al. (2015) である。本研究で実施した臨時観測のデータを用いることで対象領域の解像度が上がることが確認できた。予備

的な成果として、例えばOkada et al. (2015)により、断層帯深部や震源域付近に地震波速度低速度域が見いだされている。 1) 長町-利府線断層帯および福島盆地西縁断層帯に沿って、上部・下部地殻に地震波速度低速度異常が分布する、 2) 蔵王山や吾妻山の直下の深部低周波地震震源域付近にはマグマ供給系に対応すると考えられる地震波低速度域が存在する、ことが得られている。今後、データの蓄積に伴い、速度構造の改良を行う予定である。

低周波数サンプリングの加速度記録に適用可能なリアルタイム震度演算法

Real-Time Calculation Method of Seismic Intensity Applicable to Low-Rate Sampled Acceleration Record

*平井 敬¹、吉岡 優樹²*Takashi Hirai¹, Yuki Yoshioka²

1. 名古屋大学減災連携研究センター、2. 名古屋大学大学院環境学研究科

1. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 2. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

1. はじめに

本稿では、功刀・他(2008)および功刀・他(2013)による時間領域の近似フィルターを用いて加速度記録からリアルタイムで計測震度相当値を算出する手法について、既存のアルゴリズムが適用不可能な低いサンプリング周波数の加速度記録や、さらには不等間隔でサンプリングされた加速度記録に対しても適用可能となる新たな計算方法を提案する。この手法は、今後活用が広がると考えられるMEMS加速度センサーなどを用いた簡易な震動計において、処理系の演算性能やサンプリングの安定性が限定されている場合などに有効である。

2. 既存のリアルタイム震度演算法の概要

功刀・他(2008)は、平成8年気象庁告示第4号に定められる計測震度算出に用いられる周波数フィルターと極力同じ振幅特性を持ち、かつ因果的な無限インパルス応答関数を有する近似フィルターを設計した。功刀・他(2013)は、これをさらに改良したものである。リアルタイム震度演算は、加速度記録に対して時間領域の処理によりこのフィルターを施したうえで3成分を合成した振幅波形を作成し、適当な時間間隔で過去60秒間の振幅波形に対して継続時間判定処理を行って計測震度相当値を得るものである。

従来の演算法では、時間領域のフィルター処理を実装するにあたり、ラプラス変換形式で表現されたフィルター伝達関数から双線形変換によりz変換形式の伝達関数を導き、等間隔でサンプリングされた加速度記録に対して漸化式を適用することでフィルター波形を得ることとしている。この方法は簡便ではあるが、双線形変換にともなう周波数ひずみの影響などにより、加速度記録のサンプリング周波数によっては漸化式の自己回帰項が不安定な特性を示すことがある。具体的には、功刀・他(2013)のフィルターの場合、サンプリング周波数がおよそ77 Hzを下回ると不安定となり、フィルター波形が発散する。

3. 提案手法の概要

たとえばサンプリング周波数50 Hzの加速度記録に対してリアルタイム震度演算を行う場合、そのまま時間領域の処理を適用するとフィルター波形が発散するため、線形補間などの方法により100 Hzサンプリングの加速度記録としてから演算を行うことも考えられる。しかし、ここではそうした方法を用いず、沢口(2018)を参考に、もとのサンプリング周波数のまま演算を行う方法を提案する。

功刀・他(2013)のフィルターは6つの双二次フィルター（ラプラス変換形式の伝達関数で分母が s の2次式となっているもの）を直列に接続した形となっている。各段階のフィルターについて、まず、入出力信号間の関係を規定する2階微分方程式を書き下す。次に、これを対角正準形式の状態空間表現で表すことにより、独立な2本の1階微分方程式の組の形にする。さらに、入力信号はサンプル時刻間で線形的に変化すると仮定して、これらの微分方程式を解析的に積分することにより、状態ベクトルおよび出力信号の時系列を得る。このとき、サンプリング間隔が一定である必要はない。最終的には状態ベクトルの時間変化が漸化式の形で表現されるが、自己回帰項はサンプリング間隔の長短にかかわらず常に安定な特性を示す。

図1に、提案手法を2004年中越地震のK-NET小千谷(NIG019)観測点の強震記録（サンプリング周波数100 Hz, 計測震度6.732）に対して適用した結果を示す。加速度波形(a)(b)(c)は東西成分のみを示しているが、計

測震度相当値 (d) は3成分を合成した結果から算出した。従来法と提案手法によるフィルター波形はよく一致しており、計測震度相当値も括弧内に示した最大値を含めて同等となっている。図2に、同記録のサンプリング周波数を50 Hz, 10 Hzとしたときの提案手法の適用結果を示す。サンプリング周波数の変更は、単にデータを間引くことによって行った。フィルター波形・計測震度相当値ともに安定して得られていることが分かる。サンプリング周波数10 Hzの場合はエイリアシングの影響を無視できないが、計測震度相当値は極端に外れた値とはならなかった。

4. 課題

功刀・他 (2013) による近似フィルターには複数のパラメータが含まれるが、その値は双線形変換に基づく演算法を用いる前提で最適化されている。提案手法に対しては、今後あらためて調整を行う必要があると考えられる。

参考文献

功刀卓, 青井真, 中村洋光, 藤原広行, 森川信之, 震度のリアルタイム演算法, 地震 第2輯, 60, pp.243-252 (2008)

功刀卓, 青井真, 中村洋光, 鈴木亘, 森川信之, 藤原広行, 震度のリアルタイム演算に用いられる近似フィルタの改良, 地震 第2輯, 65, pp.223-230 (2013)

沢口義人, 不等間隔時系列に対する状態空間フィルタによる心拍変動周波数解析の高速化, 自動制御連合講演会講演論文集, 61, pp.41-44 (2018)

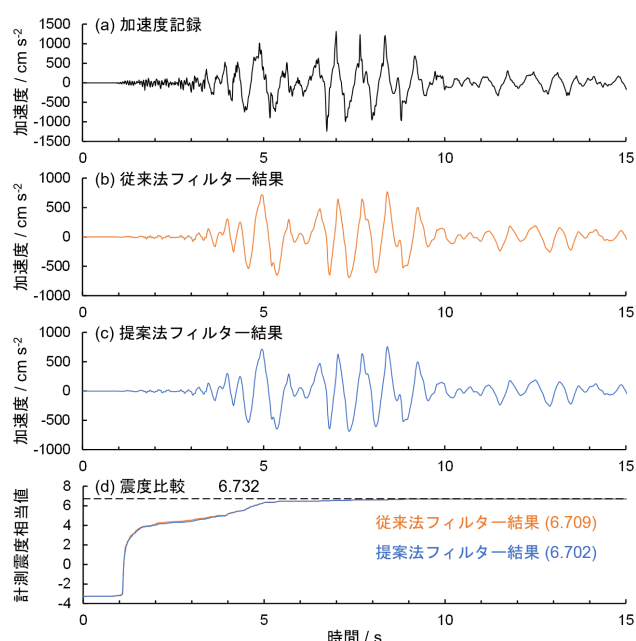


図1 (a)新潟県中越沖地震 NIG019 EW 加速度記録に対して
(b)従来法と (c)提案法のフィルターを施した結果と (d)計測震度相当値の比較

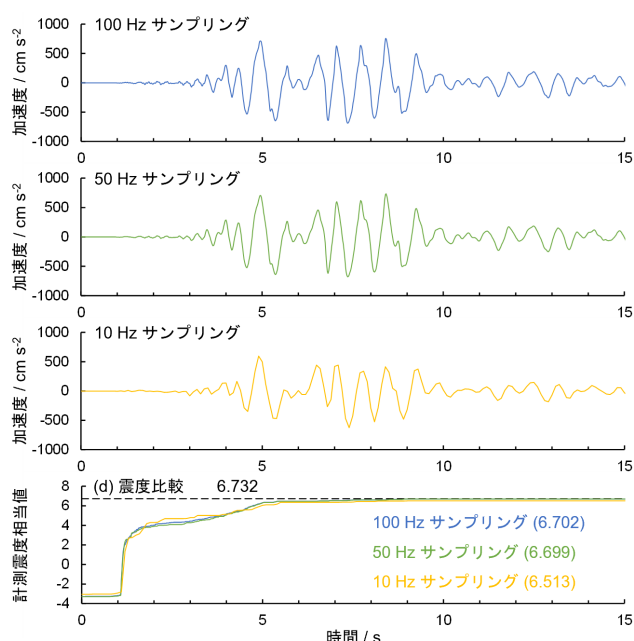


図2 新潟県中越沖地震 NIG019 EW 加速度に対して
(a) 100 Hz, (b) 50 Hz, (c) 10 Hz サンプリングとしたときの提案法によるフィルター結果と (d) 計測震度相当値の比較

三陸沖における海底光ケーブルとDistributed Acoustic Sensingを用いた 反射法地震探査

Seismic reflection survey using seafloor optical cable and DAS measurement off Sanriku

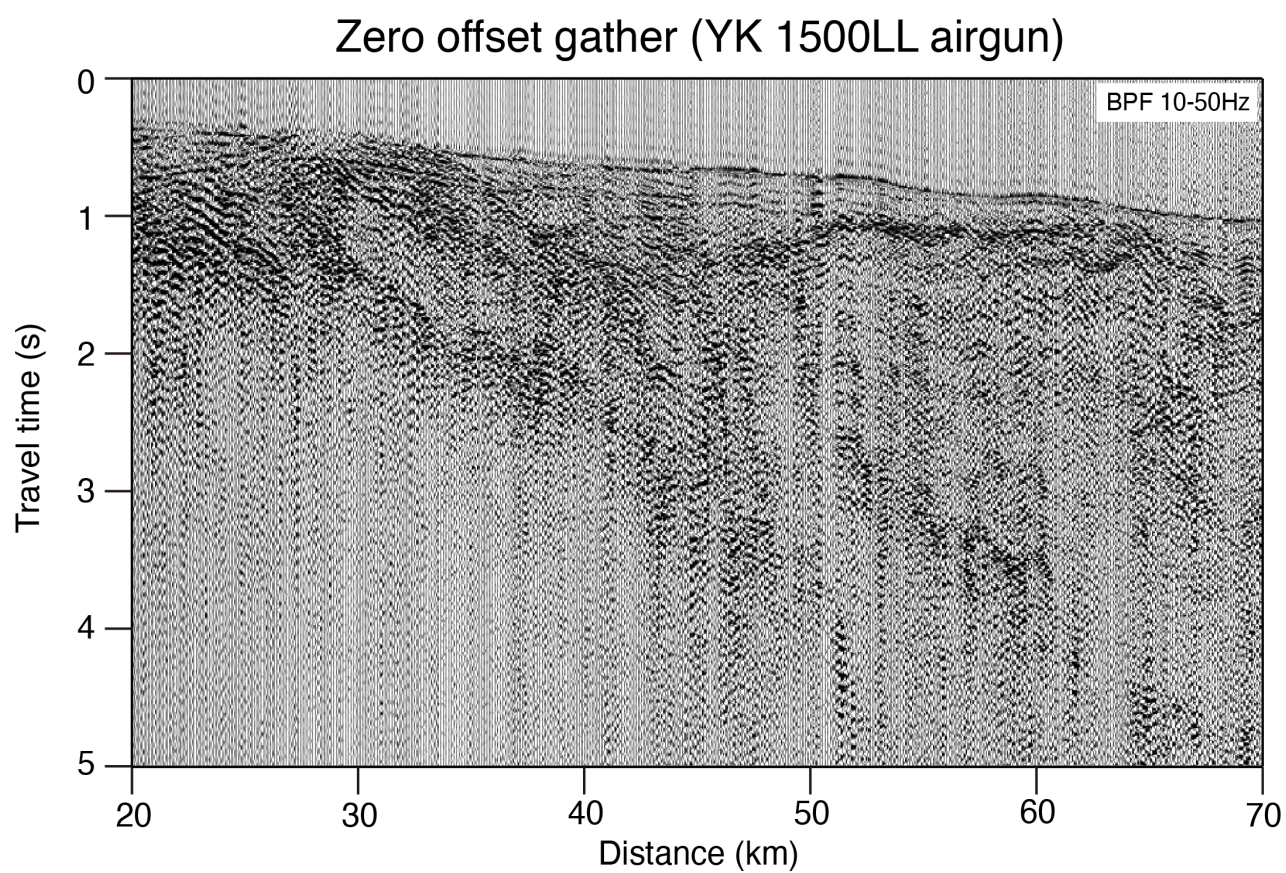
*高野 洋輝¹、篠原 雅尚²、仲田 理映²、蔵下 英司²、石山 達也²、望月 公廣²

*Hiroki Takano¹, Masanao Shinohara², Rie Nakata², Eiji Kurashimo², Tatsuya Ishiyama², Kimihiro Mochizuki²

1. 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻、2. 東京大学地震研究所

1. Department of Earth and Planetary Science, School of Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

近年、分散型音響センシング（DAS : Distributed Acoustic Sensing）計測が地震学の観測にも用いられてきている。DASは光ファイバに送り込まれたレーザーパルスが光ファイバ内の不均質部で散乱して発生する後方散乱光を観測することによって光ファイバに沿ったそれぞれの部分での歪みを計測する。DAS観測のメリットは数十キロにわたるケーブルにおいて、チャンネル間隔が数メートル～数十メートルといった高密度な観測を実施できることである。東京大学地震研究所が所有する岩手県釜石市から約120km沖合まで敷設されている海底ケーブル内の2本の未使用光ファイバを用いてDAS観測を行いながら、海底ケーブルの敷設ルートを測線とした構造探査実験を行った。構造探査は2020年11月5日～7日に実施し、エアガンの発震には大気海洋研究所白鳳丸を用いた(KH-20-11)。使用した制御震源はBolt社1500LLエアガン(チャンバー容量1500cu.in.) 4台とSercel社GIガン(チャンバー容量355 cu.in.)2台である。陸上局舎内において、2本のファイバの末端にそれぞれ計測器を接続し、同時DAS観測を行った。DASの収録はサンプリングレート500Hz、チャンネル間隔5m、ゲージ長40m、観測総距離100km（一部80km）で行った。1500LLエアガンの測線は、釜石市の沖合の約10km地点から海底ケーブル敷設ルートに沿い、ケーブルの終端を超え釜石市から東に約200kmの地点までである。発震間隔は40秒であり、発震総数は、1910発である。このうち、725発が海底ケーブル敷設ルート上で発震されている。GIガンの測線は、釜石市の沖合の約10km地点から海底ケーブル敷設ルートに沿い、釜石市から東に約100kmの地点までである。GIガンについては、同一測線を往復して、発震を行った。発震間隔は20秒であり、発震総数は、4066発である。このうち、3291発が海底ケーブル敷設ルート上で発震されている。また、エアガン発震時の平均航行速度は約4.5knotsであった。DAS計測に加えて、1500LLエアガン発震時に長さ150mの2chミニストリーマケーブル、GIガン発震時に総チャンネル48chで長さ1400mのマルチチャンネルストリーマケーブルを曳航して、エアガンを観測した。この実験では、海底において、5mの間隔で、全長80km以上の収録が行われており、DAS計測記録による反射法地震探査処理が適用可能である。しかしながら、DASを用いた海域における反射法地震探査の前例は少ないため、海底ケーブルにより収録されたDASデータへの反射法地震探査処理の適用、さらに高密度データを活かした高解像度反射断面の作成が本研究の目的である。収録されたデータでは、2つのDAS計測データ双方において、エアガンからの地震波が観測されており、2つの計測器間に大きな差はなかった。共通発震点記録では、DAS計測はケーブル方向の成分に高い感度を持つため、エアガン直下の記録では振幅が著しく小さくなる。また、エアガンから震央距離約2.5km以上になるとP波に加えてPS変換波と思われる相の到着も確認できるため、S波反射断面図が作成できる可能性がある。今後は通常の反射法処理を適用して、構造断面を作成する。



DAS地震動記録を用いた海底光ファイバーケーブルの敷設環境推定

A coupling degree of optical fiber cable on seafloor using earthquake travel time recorded by distributed acoustic sensing (DAS)

*片上 智史¹、荒木 英一郎²、高橋 成実³、野田 俊太¹、岩田 直泰¹、是永 将宏¹、山内 泰知¹*Satoshi KATAKAMI¹, Eiichiro ARAKI², Narumi TAKAHASHI³, Shunta NODA¹, Naoyasu IWATA¹, Masahiro KORENAGA¹, Yasutomo YAMAUCHI¹

1. 鉄道総合技術研究所、2. 海洋研究開発機構、3. 防災科学技術研究所

1. RTRI, 2. JAMSTEC, 3. NIED

Distributed Acoustic Sensing (DAS) は、光ファイバーケーブル (Optical Fiber Cable: OFC) に沿ったひずみ変化を測定する手法であり、低コストで長期モニタリングが可能な地球物理学に適用可能な計測ツールとして期待されている。一方、記録された信号の振幅の絶対値を利用するためには、OFCと設置面のカップリングを考慮する必要がある。室戸岬沖の海底OFCを用いたDAS観測によって観測された信号の振幅は、200m程度の距離でもDASチャンネル間で大きく異なり、特に室戸岬から20-25km先では振幅の大小 (1-2桁程度の差) が200m程度の間隔でbimodalに変化する (Ide et al., 2021)。これはOFCと海底のカップリングに起因すると考えられている。したがって、DASの記録からOFCの敷設環境を評価する手法検討として、DASを用いてOFCに沿って記録された地震動の走時の空間分布から、海底面に敷設されたOFCのカップリングを含めた敷設環境を推定した結果を報告する。

海洋研究開発機構 (JAMSTEC) は、室戸岬沖で包括的な海底監視システムを開発し、6本のシングルモードファイバーを備えた海底ケーブルは、陸上と海底の観測機器を接続している (Momma et al., 1997)。DASの観測には、海岸から伸びるケーブルの50km区間においてAPセンシング社製の機器を使用している。観測は時間サンプリング間隔500Hz、空間サンプリング間隔5.10m、ゲージ長40.8mで実施し、全チャンネル数は10789である。2021年1月から3月に室戸沖に設置されたOFCのDAS観測によって記録された西日本で発生した地震に着目し、地震波形のチャンネル間の波形相関およびlag timeを計算した。まず、各チャンネルで記録された地震波形のP波の立ち上がり部を含む2秒間の波形を使用し、4-10Hzでバンドパスフィルタを適用した。次に隣り合うチャンネル同士で相互相関を計算し、係数が最大値をとる際のlag timeを100ch毎に積算することで (50chのoverlap)、OFCに沿ったlag timeの変化から海底OFCのカップリングを含む敷設環境を推定した。

徳島県下 (深さ7km) で発生したMj4.0の地震に関して、室戸岬から約20-25km先 (4000-5000ch) のlag timeを100ch毎に積算した結果を示す。4000-5000chにおける海底OFCはおおよそ南北方向に敷設されているため、OFCの北側で発生した地震に対するDAS記録はOFCに沿ってみかけ速度は正になる。一方、4000-4060ch、4100-4170ch、4480-4500ch、4780-4810ch、4940-4960chではみかけ速度が負を示した。さらに、みかけ速度が負の区間における地震波の位相は、隣のみかけ速度が正の区間の地震波の位相と逆 (polarityが逆) を示した。また、4100-4170ch、4780-4810chにおいてはDASの信号の振幅が小さい区間 (カップリングが弱いと考えられる) においてみかけ速度が負になっている。次に、同様の地震・チャンネルにおいて、地震波形のS波の立ち上がり部を含む2秒間で相互相関を計算しlag timeを100ch間で積算した。みかけ速度が負になったチャンネル区間はP波のものと同様だが、polarityが逆転したのはカップリングが弱いと考えられる区間のみであった。

以上の結果から海底面におけるOFCの敷設環境を推察すると、みかけ速度が負になる区間ではOFCが谷を下り、水深が深い箇所にあるOFCの方が地面から入射してくる波をより早く検知していると考えられる。一方、カップリングが弱い区間では、OFCが谷部をまたぐなどして水中に浮いていると考えられる。S波から水中へ変換した音波 (疎密波) が水中を伝播し、水中に浮いたOFCにて記録されていると考えられる。水の体積弾性率は0°Cで約2.0MPa、SiO₂のヤング率は約75GPaであり1~2桁程度異なるため、記録される振幅の違い

は歪を計測する媒質の違いを表すと推測される。また走時ではS波が到来している時間だが、変換した疎密波が記録されているためpolarityが逆になったと考えられる。ちなみに、海底下堆積層におけるP波地震波速度は、浅部において1.5km/sを示し（Nakanishi et al., 2018; Tonegawa et al., 2021; JpGU）、水中の音波の伝播速度（1.5km/s）と同程度であるため、伝播した媒質の違いによるみかけ速度への影響は小さいと考えられる。

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S04. テクトニクス

2021年10月15日(金) 15:30 ~ 17:00 | P3会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S04P-01] アラスカ沈み込み帯における深部低周波微動と3次元温度構造・脱水分布との関連性

○岩本 佳耶¹、末永 伸明²、吉岡 祥一^{2,1} (1.神戸大学大学院 理学研究科 惑星学専攻、2.神戸大学都市安全研究センター)

アラスカ沈み込み帯における深部低周波微動と3次元温度構造・脱水分布との関連性

Relationship between tectonic tremors and 3D distributions of thermal structure and dehydration in the Alaska subduction zone

*岩本 佳耶¹、末永 伸明²、吉岡 祥一^{2,1}

*Kaya IWAMOTO¹, Nobuaki Suenaga², Shoichi Yoshioka^{2,1}

1. 神戸大学大学院 理学研究科 惑星学専攻、2. 神戸大学都市安全研究センター

1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

1. はじめに

アラスカ沈み込み帯では、1964年アラスカ地震（Mw9.2）に代表される海溝型巨大地震や、スロースリップイベント・深部低周波微動などのスロー地震がプレート境界付近で発生している。この地域では、北米プレートの下に太平洋プレートが沈み込んでいる。その東端では、ヤクタットテレーンと呼ばれる海台が存在し、沈み込んでいることが近年の研究で明らかになってきた。ヤクタットテレーンは、太平洋プレートとはテクトニックセッティングが大きく異なり、堆積層や海洋地殻がそれぞれ6km、25kmと非常に厚く、深部低周波微動が発生し(Wech, 2016)、その直上には火山が存在していない、といった特徴がある。岩本他 (2021, JpGU)ではヤクタットテレーンと太平洋プレートの同時沈み込みに伴う3次元熱対流数値モデルを用いて、1964年アラスカ地震の震源域と長期的スロースリップイベントの発生域の温度範囲を定量的に推定した。

本講演では、岩本他 (2021, JpGU)で得られた3次元温度構造と含水鉱物の相図を用いて、スラブ上面付近の含水量分布を求め、アラスカ沈み込み帯で発生する深部低周波微動の発生との関連性について議論する。

2. モデル設定

本数値シミュレーションでは、岩本他 (2021, JpGU)に従い、Mathews et al. (2016)のプレート回転モデルを用いてプレートの沈み込み史を考慮し、沈み込み速度を与えた。さらに、新たに、太平洋プレートとヤクタットテレーンで、堆積層や海洋地殻の厚さを区別して与え、18Maから現在までの温度場・流れ場の時間発展問題を差分法を用いて解いた。水平面内において沈み込み方向にx軸を、海溝軸に沿ってヤクタットテレーン側から太平洋プレート側に向かってy軸を、鉛直下向きにz軸をとり、それぞれ、モデルサイズは600 km, 700 km, 200 km、グリッド間隔は8.6 km, 10 km, 3.3 kmとした。流れの境界条件は、+x, -x, +y, -y, +zの境界面では流れは透過条件とし、-zの境界面（モデル表面）では流れはないものとした。温度の境界条件は、+x, +y, -y, +zの境界面では断熱条件を与え、-xの境界面の温度はプレート冷却モデル(Grose, 2012)を用い、各タイムステップで深さの関数として温度分布を与えた。-zの境界面の温度は0℃と仮定した。数値シミュレーションで得られた現在(0Ma)の温度場は、キュリー点深度分布や地殻熱流量の観測データと比較し、観測値と計算値の残差が小さくなるようなモデルを構築した。含水量分布の計算には、海洋堆積物はvan Keken et al. (2011)のタービダイトの相図を、海洋地殻とスラブマントルは、それぞれTatsumi et al. (2020)のMORBと超苦鉄質岩の相図を用いた。

3. 結果と考察

最終的に得られた0Maでの数値シミュレーション結果から、海溝側では沈み込み角が小さく、浅く平らなスラブ形状が続いているため、その上面付近の温度場に関しては、太平洋側に比べヤクタットテレーン側では低温の領域が内陸部まで広がる傾向がみられた。また、内陸側ではプレートの沈み込み角が急激に大きくなるた

め温度勾配が大きくなった。本数値シミュレーションで得られた温度-深さの関係と、海洋堆積物や海洋地殻中に含まれる前述の含水鉱物の相図を用いてスラブ上面付近の含水量分布と、沈み込み方向の単位距離当たりの脱水勾配を求めた。

その結果、現時点での暫定的な結果として、スラブ上面の深部低周波微動の発生域付近において、海洋堆積物中(スラブ上面から0~6 km)ではphengite lawsonite blueschist相からamphibole phengite zoisite eclogite相への脱水分解反応により約0.05wt%/kmの脱水勾配が、海洋地殻中(スラブ上面から6~31km)ではblueschist相からamphibole eclogite相への脱水分解反応により約0.10wt%/kmの脱水勾配が見られた。以上のことより、これらの脱水のうち、いずれか、または両者が深部低周波微動の発生に関与している可能性があることが示唆される。また、太平洋プレート側で深部低周波微動が発生していない理由として、太平洋プレートでは、ヤクタットテレーンに比べて、海洋堆積物や海洋地殻の厚さが薄いため、これらの層に含まれるスラブ内の含水量の総量が少ないことや、脱水分解反応が起こったとしても深部の高温の塑性領域での脱水となるため、深部低周波微動が起こりえないといった可能性が考えられる。

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S07. 地球及び惑星の内部構造と物性

2021年10月15日(金) 15:30 ~ 17:00 | P4会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S07P-01] 北極域における内核の東西半球境界の位置の調査

○岩崎 理史¹ (1.京都大学大学院)

15:30 ~ 17:00

[S07P-02] 表面波波形フィッティングによる海洋地殻および上部マントルのS波速度構造の推定
ー 短周期成分を活用した初期モデルの構築 ー

○永井 はるか¹、竹内 希¹、川勝 均¹、塩原 肇¹、一瀬 建日¹、杉岡 裕子²、伊藤 亜妃³、歌田 久司¹ (1.東京大学地震研究所、2.神戸大学、3.海洋研究開発機構)

北極域における内核の東西半球境界の位置の調査

The location of the inner core hemispherical boundary in the north polar region

*岩崎 理史¹

*Tadashi Iwasaki¹

1. 京都大学大学院

1. kyoto university

1. はじめに

内核表層の詳細な構造の把握は、外核の対流、内核の成長過程や深部構造を理解する上で重要である。Tanaka and Hamaguchi (1997) は、内核の表層100km~500kmに高速等方的な東半球と低速異方的な西半球が存在することを発見した。東西半球の違いは、その後表層100kmにも存在することがわかった (Niu and Wen, 2001)。しかし、東西半球の境界の位置や形状はいまだ議論の中にある (e.g. Waszek and Deuss 2011, Miller et al. 2013, Ibourichene and Romanowicz 2018, Iritani et al. 2019, Ohtaki et al. 2021)。本研究では、北極域ユーラシア大陸北部に最深点をもつPKIKPとPKiKPの走時差をもとに、東西半球の境界について検討する。

2. 使用データ・解析手法

本研究では、空間的に高密度なデータが利用可能なことから、IRISで収集された2013年1月から2016年6月までの北米東部の広帯域地震計のデータを用いた。震央距離130~150°を伝わるPKIKPを調査するために、インドネシア付近 (緯度5.03°S~4.78°N、経度95.07°E~104.63°E) で起きた震源の深さ38~151km、Mw 5.6~6.6 の7つの地震を使用した。IRISから取得した上下動成分の波形データは、地震計の応答関数を取り除き、地動速度に対して0.5~2 Hzのバンドパスフィルターをかけて使用した。本研究では、PKiKPとPKIKPの観測走時差とAK135モデル (Kennett et al., 1995) の理論走時差を比較し、両者の違い (δt) の空間分布を調べる。PKiKPとPKIKPの理論走時はTauP Toolkit (Crotwell et al., 1999) で算出した。PKiKPとPKIKPの観測値は、SN比改善のために震央距離幅数度内の波形をスタッキングした上で、振幅の極大値から読み取った。これには波の走時差とともにみかけのスローネスの違いが評価できる利点がある。スタッキングにはphase weighted stack法 (Schimmel and Paulssen, 1997) を用いた。PKIKPと後続のPKiKPの同定には、PKiKPとPKIKPの極性が逆になること、PKIKPの極性がGlobal CMT解と合うこと、PKiKPのみかけのスローネスがPKIKPより大きいことを条件にした。PKiKPやPKIKPの走時やみかけのスローネスがAK135から大きく外れる極大値は除外した。なお、本研究のPKIKPの波線は、AK135モデルより、自転軸から64~80°程度傾いていると考えられる。

3. 結果・議論

本研究で調査したPKIKPの最深点は、北緯60°~80°、東経70°~130°の領域に位置する。東西半球の境界が経線であるwedge model (Niu and Wen 2001, Waszek and Deuss 2011) では内核内波線の大部分が高速な東半球を通過して正の δt が予想されるが、震央距離幅2°のスタッキングによる本研究の結果では、震央距離130~150°にわたってゼロから負の δt が卓越して観測され、低速な西半球の特性を示す。この結果はIbourichene and Romanowicz (2018) と調和的であり、東西半球の境界が北極点を通らないTanaka and Hamaguchi (1997) のようなeye-ball model (Ohtaki et al., 2021) の東西半球境界と合うようにみえる。

表面波波形フィッティングによる海洋地殻および上部マントルのS波速度構造の推定

ー 短周期成分を活用した初期モデルの構築 ー

Surface wave fitting for Vs structure of the oceanic crust and upper mantle

- Development of the initial model using shorter period waveforms -

*永井 はるか¹、竹内 希¹、川勝 均¹、塩原 肇¹、一瀬 建日¹、杉岡 裕子²、伊藤 亜妃³、歌田 久司¹

*Haruka NAGAI¹, Nozomu Takeuchi¹, Hitoshi Kawakatsu¹, Hajime Shiobara¹, Takehi Isse¹, Hiroko Sugioka², Aki Ito³, Hisashi Utada¹

1. 東京大学地震研究所、2. 神戸大学、3. 海洋研究開発機構

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Kobe University, 3. JAMSTEC

海洋上部マントルの地震波速度構造は、グローバルトモグラフィーによって広く研究されてきたが、約50 km以浅の構造推定は難しい(例えばWoodhouse and Dziewonski, 1984)。また、近年では、海底地震計アレイのデータの位相速度解析により、アレイ直下の1次元速度構造を推定する手法が開発されている(例えばTakeo et al., 2018)。本研究では、北西太平洋に設置された広帯域海底地震計で記録された短周期(約8秒)から長周期(約200秒)に至る広い帯域の地震波形データを用いた、震源-観測点間のトモグラフィーにより、地殻からアセノスフェアまでの連続的なS波速度構造を求めることを目指す。

一般的な波形トモグラフィーは観測波形と理論波形を位相情報も含めてフィッティングをするが、短周期成分(周期約25秒以下)の活用が難しい。そこで、位相情報を含まないエンベロープのフィッティングを併用したトモグラフィーを試みる。具体的には、まずはエンベロープのフィッティングにより特に浅部構造を解像度良く制約し、得られたモデルを初期モデルとして波形トモグラフィーを実施することで、地殻からアセノスフェアまでの連続的な速度構造を推定する。

今回の発表では、エンベロープのフィッティングにより短周期成分が活用できるかどうか、並びに地殻構造や最上部マントル構造が高精度・高解像度で推定できるかどうかを調べ、適切な初期モデルが構築可能であることを確認する。

日本海溝近傍で発生したマグニチュード5.1-6.5のイベントに対する良質な鉛直動成分の波形(119トレース)を選別し、エンベロープの周期毎・群速度毎の振幅分布のダイアグラムをスタックした。また振幅ピーク位置を用いてエンベロープ振幅分布を指標化した。ブートストラップ法によりピーク位置の誤差を測定し、高精度に計測できた範囲をデータセットとした(図2)。60秒以上の長周期成分は活用が難しかったが、60秒以下の基本モード並びにオーバートーンは高精度に測定可能であることがわかった。

マントルの深さ毎のS波速度に加え、地殻のP波速度・S波速度・厚さをモデルパラメータとして推定した。地殻の各パラメータはオーバートーンや短周期の基本モードのエンベロープに異なる感度を持ち、独立に分離できることを確認した。予備的な解析では、PA5モデル(100-125 Maの太平洋下の速度構造モデル、Gaherty et al., 1996)よりも厚い地殻が推定された(8.0 km; PA5は6.8 km)。これはパスの一部が島弧地殻を通過しているためと考えられる。また地殻のP波速度はほぼ等しいがS波速度が有意に遅くなり、Vp/Vs比が大きめ(1.78; PA5は1.61)に求められた。発表では、今回求めた構造を初期モデルとして、波形インバージョンによって地殻

からアセノスフェアまでの連続的なS波速度構造モデルを発表する予定である。

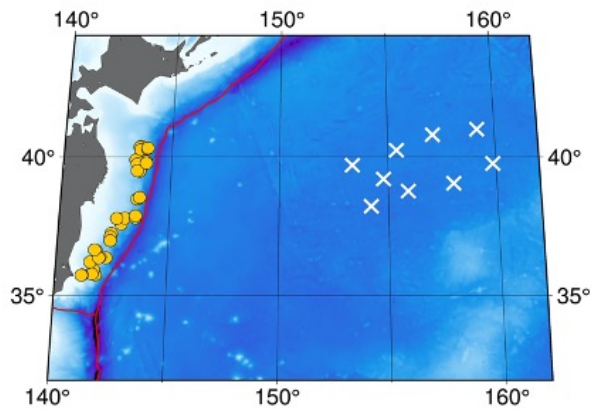


図1. 解析に用いた観測点(白十字)とイベント(黄色)の分布。

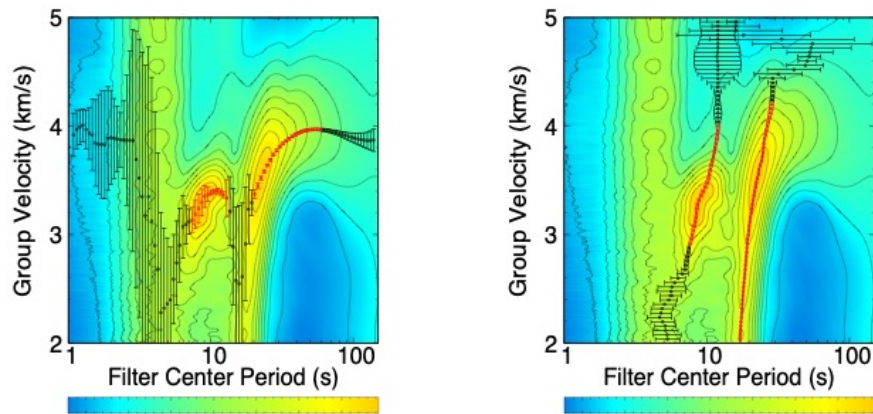


図2. 表面波エンベロープの振幅分布。各周期で振幅ピークとなる群速度(左)と各群速度で振幅ピークとなる周期(右)。赤色がデータセットとして用いた範囲。

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S08. 地震発生の物理

2021年10月15日(金) 15:30 ~ 17:00 | P5会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S08P-01] 2016年熊本地震の相似地震

○森 絵万奈¹、平松 良浩² (1.金沢大学大学院自然科学研究科、2.金沢大学理工研究域地球社会基盤学系)

15:30 ~ 17:00

[S08P-02] 日本列島内陸域の通常地震と低周波地震の震源スペクトルの形状の推定

○織茂 雅希¹、吉田 圭佑¹、平 貴昭²、松澤 暢¹、長谷川 昭¹、江本 賢太郎³ (1.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、2.カリフォルニア大学バークレイ校地震研究所、3.東北大学理学研究科地球物理学専攻固体地球物理学講座)

15:30 ~ 17:00

[S08P-03] ニュージーランド北島ラウクマラ半島周辺で発生するプレート境界地震の震源パラメータの特徴

○立岩 和也¹、Chamberlain Calum²、Savage Martha²、岡田 知己¹ (1.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2.ヴィクトリア大学ウェリントン)

15:30 ~ 17:00

[S08P-04] 伊豆半島東方沖の2006年群発地震活動で発生した火山構造成地震の震源過程解析

○田中 夕香子¹、山田 卓司¹ (1.茨城大学)

15:30 ~ 17:00

[S08P-05] 震源域直上の海底水圧計記録に基づく2011年東北地震の地震波放射過程に関する考察

○久保 久彦¹、久保田 達矢¹、齊藤 竜彦¹ (1.防災科学技術研究所)

15:30 ~ 17:00

[S08P-06] Initiation of the M~9 earthquake cycle: the 2021 Miyagi-Oki Mw7.0 earthquake at the deep seismic/aseismic transition

○吉田 圭佑¹、松澤 暢¹、内田 直希¹ (1.東北大学大学院 理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター)

15:30 ~ 17:00

[S08P-07] 2011年東北地方太平洋沖地震後の宮城県沖地震の準備過程

○中田 令子¹、日野 亮太¹ (1.東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター)

15:30 ~ 17:00

[S08P-08] 動力学的震源モデルに基づく中央構造線断層帯の連動性の検討

○加瀬 祐子¹、浦田 優美¹ (1. (国研) 産業技術総合研究所)

15:30 ~ 17:00

[S08P-09] 線形多孔質弾性体中の動的地震サイクルシミュレーション

○野田 博之¹ (1.京都大学 防災研究所)

15:30 ~ 17:00

[S08P-10] 粘弾性媒質中の地震サイクルにおける断層強度不均質による影響

○山本 誠¹、野田 博之¹ (1.京都大学)

15:30 ~ 17:00

[S08P-11] 不均質な摩擦パラメータを伴う断層におけるb値の時間変化

○伊東 良¹、金子 善宏¹ (1.京都大学)

15:30 ~ 17:00

[S08P-12] 格子H行列を用いた3次元非平面断層の大規模地震サイクルシミュレーション

○小澤 創¹、伊田 明弘²、星野 哲也³、安藤 亮輔¹ (1.東京大学理理学系研究科地球惑星科学専攻、2.海洋研究開発機構、3.東京大学情報基盤センター)

15:30 ~ 17:00

[S08P-13] プレートの沈み込みに伴う温度圧力条件の変化および粘土鉱物の脱水を考慮した水理学的モデルに基づく間隙水圧の定常解

○金木 俊也¹、野田 博之¹ (1.京都大学防災研究所)

15:30 ~ 17:00

[S08P-14] 房総沖スロースリップのすべりと応力変化を用いたすべりと時間に依存する摩擦構成則のパラメータの推定

○内田 礼央¹、佐藤 利典¹、小林 琢磨^{1,2} (1.千葉大学、2.アジア航測)

15:30 ~ 17:00

[S08P-15] スロースリップのすべり速度と剪断応力変化を用いた有効法線応力の推定

○佐藤 利典¹、小林 琢磨^{1,2} (1.千葉大学大学院理学院理学研究院、2.アジア航測 (株))

15:30 ~ 17:00

[S08P-16] センチメートルスケールにおける変はんれい岩ガウジの摩擦特性
ー岩石摩擦特性のスケール依存性解明に向けてー

○山下 太¹、溝口 一生²、飯塚 幸子³ (1.国立研究開発法人防災科学技術研究所、2.一般財団法人電力中央研究所、3.株式会社セレス)

15:30 ~ 17:00

[S08P-17] 波動伝播シミュレーションを用いた4m二軸岩石摩擦試験機におけるAEセンサキャリブレーション

○大久保 蔵馬¹、山下 太¹、福山 英一^{2,1} (1.防災科学技術研究所、2.京都大学大学院工学研究科)

15:30 ~ 17:00

[S08P-18] 大型載荷速度変化摩擦試験によって形成されたガウジ層の微細構造

○渡辺 俊¹、山下 太²、前田 純伶²、下田 晃嘉³、福山 英一^{1,2} (1.京都大学、2.国立研究開発法人防災科学技術研究所、3.日本生命保険相互会社)

15:30 ~ 17:00

[S08P-19] 仕事率の増加と鏡面の生成・破壊にともなうインド砂岩の摩擦・摩耗率の変動

○前田 純伶¹、山下 太¹、大久保 蔵馬¹、福山 英一^{1,2} (1. (国研) 防災科学技術研究所、2. 京都大学)

15:30 ~ 17:00

[S08P-20] Existence of Weak Zones: Enhancing Dynamic Rupture or Not?

○上西 幸司^{1,2}、長沢 国洋² (1.東京大学大学院新領域創成科学研究科、2.東京大学大学院工学系研究科)

15:30 ~ 17:00

[S08P-21] On the Dynamic Stability of a Granular Slope

○上西 幸司¹、喜 東昀¹ (1.東京大学大学院新領域創成科学研究科)

15:30 ~ 17:00

[S08P-22] M5.5地震発生場と母岩から回収したコア試料の物理特性

○阪口 賢祐¹、吉田 峻輔²、東 充也³、横山 友暉⁴、鈴木 皓一郎¹、矢部 康男⁵、Ligaraba Dakalo⁶、Masondo Nandipha⁶、廣野 哲朗⁷、山本 裕二⁸、松崎 琢也⁸、小笠原 宏⁹、大場 誠也⁹、脇本 雅也⁹ (1.立命館大学大学院、2.独立行政法人造幣局、3.マツダ株式会社、4.株式会社テクノプロ、5.東北大学理学研究科、6.Graduate School of Geoscience, University of the Witwatersrand、7.大阪大学理学研究科、8.高知大学海洋コア総合研究センター、9.立命館大学理工学部)

2016年熊本地震の相似地震

Similar aftershocks of the 2016 Kumamoto earthquake

*森 絵万奈¹、平松 良浩²

*Emana Mori¹, Yoshihiro Hiramatsu²

1. 金沢大学大学院自然科学研究科、2. 金沢大学理工研究域地球社会基盤学系

1. Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 2. Course in Earth and Planetary Science, School of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University

・はじめに

相似地震とは波形が類似している地震のことで、同じ小さなアスペリティを繰り返し破壊することで発生している(e.g. Nadeau and Johnson, 1998)。内陸地震においても相似地震は主に大地震後に起こる余効すべりに伴って観測される(e.g. Hiramatsu et al., 2011)。継続時間の長い余効すべりでは、構成する地震の数が多く、長い発生期間をもつ相似地震群が見つかる可能性があり、このような相似地震群が多く見つかることは余効すべりを含む内陸大地震後の断層の挙動の解明につながることが期待される。そこで本研究では、2016年4月14日21時26分(Mj6.5)の前震をはじめとし、2016年4月15日0時3分(Mj6.4)、2016年4月16日1時25分(Mj7.3)の本震が3日間の間に立て続けに発生し、余震活動も活発で継続時間の長い余効すべりが期待できる2016年熊本地震を用いた（ここでは以後、Mj6.5の地震を前震、Mj7.3の地震を本震と呼ぶことにする）。本研究では、2016年熊本地震の余震から多数の地震が属し長期間にわたる相似地震群を分類し、相似地震群を用いて大地震後の断層の挙動のモニタリングを試みた。

・データと方法

データは気象庁で記録された一元化震源データ用い、解析期間は前震が起こった2016年4月14日からの約2年間で、深さは20kmまで、Mj1.5からMj4.5のものを使用した。

はじめに、緯度・経度差が0.002度以内で、深さの差が0.3km以内である地震のペアを見つけ、異なる地震ペアが同じ地震を共有している場合は同じグループの相似地震候補と見なしグループ分けを行った。WINシステム(Urabe and Tsukada, 1991)を用いて同一観測点で同一グループの異なる地震のP波とS波の到着時間を再検測し、その値を使って検測走時差を求めた。次に、再検測した到着時間に基づき上下動成分のP波、S波部分をクロススペクトル解析し、1-8Hzの周波数帯においてコヒーレンスが0.8以上のデータを用いて解析走時差を求めた。そして、Double-Difference法(Waldhauser and Ellsworth, 2000)を用いて精密再震源決定を行った。その後、スカラーモーメントとマグニチュードのスケール関係(Hanks and Kanamori, 1979)と円形クラックモデルの式(Brune, 1970; 1971)を用いて震源域の大きさを推定した。

・結果と考察

震源域の重なり度合いや波形の類似性やマグニチュードの差を考慮して分類された相似地震の内、前震の破壊域に含まれる相似地震においては、Asano and Iwata(2016)によって推定された前震のアスペリティの端に分布している。これは小アスペリティが本震のアスペリティの周囲に分布することを示しており、2007年能登半島地震(Hiramatsu et al., 2011)、2000年鳥取県西部地震(Hayashi and Hiramatsu, 2013)の相似地震の結果と調和的である。また、相似地震は前震・本震の破壊域から離れた位置でも発生しており、前震・本震の破壊域だけでなくその周辺の余震域においても余効すべりが起こっていた可能性がある。

また、Somerville et al, (1999)によるスカラーモーメントとすべり量の式から相似地震のすべり量を算出し、相似地震のすべり量と繰り返し間隔からすべり速度を算出した。2016年6月30日以前に一つ目の地震が発生している相似地震群において、その繰り返し間隔は前震からの経過時間とともに増加し、すべり速度は前震からの経過時間とともに減少していることが分かった。これは、前震によって発生した余効すべりの減衰を反

映しているのではないかと考えられる。

謝辞：本研究には防災科学技術研究所Hi-netや九州大学、気象庁の観測点で記録された地震波形を使用しました。記して感謝いたします。

日本列島内陸域の通常地震と低周波地震の震源スペクトルの形状の推定

Estimating the shape of the source spectrum of regular and low-frequency earthquakes in the inland area of Japan

*織茂 雅希¹、吉田 圭佑¹、平 貴昭²、松澤 暢¹、長谷川 昭¹、江本 賢太郎³

*Masaki Orimo¹, Keisuke Yoshida¹, Taka'aki Taira², Toru Matsuzawa¹, Akira Hasegawa¹, Kentaro Emoto³

1. 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、2. カリフォルニア大学バークレイ校地震研究所、3. 東北大学理学研究科地球物理学専攻固体地球物理学講座

1. Research center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University, 2. Berkeley Seismological Laboratory, University of California, Berkeley, 3. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

震源スペクトルは地震時の断層破壊の時空間発展に関する重要な情報源である。Aki (1967) は地震の震源スペクトルの高周波側が周波数の2乗で減衰するオメガ二乗モデルを提案し、このモデルが観測された地震波の特徴とよく調和することを示した。オメガ二乗モデルは震源スペクトルの標準モデルとして地震の解析に幅広く用いられているが、オメガ二乗モデルに従わない地震も存在すると考えられる。特に低周波地震に関しては、震源スペクトルの高周波側が周波数の二乗ではなく一乗程度で緩やかに減衰することを示唆する先行研究 (e.g., Ide et al., 2007; Yoshida et al., 2020) も存在する。2020年に岐阜・長野県境付近で発生した群発地震活動と2008年岩手・宮城内陸地震の震源域は地震観測網に囲まれており、通常地震に加えて低周波地震も多く発生している。本研究では2020年の岐阜・長野県境付近の群発地震活動および2008年岩手・宮城内陸地震の震源域周辺で発生した地震の震源スペクトルを推定し、それらの高周波側の減衰の特徴を比較した。震源スペクトル推定のために、初めにコーダ規格化法 (Aki and Chouet, 1975; Aki, 1982) を用いて震源域周辺の $Q^{-1}(f)$ と観測点のサイト特性 $G(f)$ の推定を行った。(Takahashi et al., 2005; Yoshida et al., 2017)。この方法では地震の震源スペクトルがオメガ二乗モデルに従うことを仮定する必要がない。そして、得られた $Q^{-1}(f)$ と $G(f)$ を用いて通常地震と低周波地震の震源スペクトルを推定した。2008年岩手・宮城内陸地震震源域で発生した地震については、通常地震1036個、震源域周辺で発生した低周波地震15個について震源スペクトルの推定を行い、2020年岐阜・長野県境付近の群発地震活動の震源域で発生した地震については、通常地震773個、震源域周辺で発生した低周波地震44個について震源スペクトルの推定を行った。震源スペクトルの形状を定量化するための尺度として、震源スペクトルの高周波側での周波数減衰のべき指数 n を用いた。各地震の震源スペクトルに対してグリッドサーチを用いたフィッティングにより、地震モーメント、コーナー周波数、べき指数 n の3つのパラメータを推定した。2020年岐阜・長野県境付近の群発地震活動の震源域で発生した通常地震について得られた n の平均値は2.16、標準偏差は0.27であり、震源域周辺で発生した低周波地震について得られた n の平均値は2.44、標準偏差は0.22であった。2008年岩手・宮城内陸地震の震源域で発生した通常地震について得られた n は平均値が1.87、標準偏差が0.38であり、震源域周辺で発生した低周波地震について得られた n は平均値が1.85、標準偏差が0.17であった。2つの地域で発生した通常地震に推定した n の値がおおむね2程度で、基本的にはオメガ二乗モデルに従うようにみえる。低周波地震についても、2008年岩手・宮城内陸地震の震源域周辺で発生したもののについては概ねオメガ二乗モデルに従ってみえる。一方で、岐阜・長野県境付近の群発地震活動震源域周辺の低周波地震については、 n の値が2.44とオメガ二乗モデルよりも高周波側が大きく減衰する傾向も見られた。低周波地震について得られた結果の数は少ないものの、通常地震と低周波地震の震源時間関数の複雑性の違いを反映している可能性も考えられる。通常地震、低周波地震の両方の場合で n の値がばらついて分布している様子が見られた。得られた n の多様性は断層破壊の様式が地震ごとにある程度多様であることを反映している可能性がある。ただし、本研究では、震源域周辺の $Q^{-1}(f)$ が空間的に変化しないことを仮定して解析を行った。しかしながら、低周波地震は通常地震よりも深部で発生するため、実際には代表する $Q^{-1}(f)$ が異なっ

いる可能性も考えられる。このため本研究で推定した低周波地震の震源スペクトルの形状が系統的に誤って推定され、その結果 n の値が誤って推定された可能性は否定できない。今後、通常地震近傍で発生している低周波地震を対象にすることや、 $Q^{-1}(f)$ の空間変化を考慮した解析を行うことにより、震源スペクトルの形状の多様性についてより詳細な情報が得られると期待される。

ニュージーランド北島ラウクマラ半島周辺で発生するプレート境界地震の震源パラメータの特徴

The characteristics of source parameters of interplate earthquakes occurring in and around the Raukumara Peninsula in the North Island, New Zealand

*立岩 和也¹、Chamberlain Calum²、Savage Martha²、岡田 知己¹

*Kazuya TATEIWA¹, Calum Chamberlain², Martha Savage², Tomomi Okada¹

1. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2. ヴィクトリア大学ウェリントン

1. Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington

背景

ニュージーランド北島は太平洋プレートがオーストラリアプレート下に沈み込んでいる地域であり、スロースリップイベント、微動、繰り返し地震など多様な地震活動が観測されている。反射法地震探査やMT法（Magnetotelluric法）による調査から、流体や沈み込む海山の存在といった摩擦特性に関わる特徴と前述の多様な地震活動が結びついていることが分かってきた（例えば、Bell et al., 2009）。ニュージーランド北島は摩擦特性と地震活動や震源パラメータの関係を調べるうえで格好の研究対象となっている。

Tateiwa et al. (2021, JpGU)はニュージーランド北島北東部に位置するラウクマラ半島周辺で発生する繰り返し地震の震源パラメータ（地震モーメントと繰り返し間隔の関係やコーナー周波数）の特徴を調べることで繰り返し地震発生域での摩擦特性について議論を行った。しかし、そこで用いられた繰り返し地震の数は少なく解析領域も限られていたため、地震数を増やすことによってより信頼性の高い空間分布が求められていた。本研究ではラウクマラ半島周辺で発生する通常のプレート境界地震の震源パラメータを調べ、繰り返し地震に限らず解析される地震の数を増やすことで地震発生域における摩擦特性についての議論をTateiwa et al. (2021, JpGU)に引き続き行う。

データ・手法

プレート境界地震抽出のため以下のような手順を踏む。

1. プレート境界で発生したと考えられている1966年ギズボーン地震とメカニズム解が似ており、かつ震源がプレート境界（Williams et al., 2013）に近い地震を既存のGeoNetカタログから探し出す。ここで選ばれた地震をReference eventと呼び、プレート境界で発生した地震であると解釈する。
2. 各Reference eventと震源が近く、かつ初動付近の波形が3観測点以上で類似している $M > 2$ の地震を探す。ここで選ばれた地震をTarget eventと呼び、やはりプレート境界で発生した地震であるとする。
3. Target eventを新たなReference eventとし2に戻る。

Target eventが新たに選ばれなくなるまで上記のループを繰り返すことで最初のReference eventを中心としてプレート境界地震探索網が広がっていく。本研究ではループが4回行われ、最初のReference eventとして13個の地震が、Target eventとして累計111個の地震が選ばれた。これら計124個の地震のうち $M > 3$ の地震101個についてスペクトル比法を用いてコーナー周波数（ f_c ）の推定を行い、 $M_0 f_c^3$ やP波とS波のコーナー周波数の比（ f_c^P/f_c^S ）の空間分布を調べる。

結果・議論

P波、S波ともに $\log(M_0 f_c^3)$ はラウクマラ半島北西部で約18、それ以外の領域で約17となり、ラウクマラ半島北西部で大きくなる傾向にあった。また、繰り返し地震の $\log(M_0 f_c^3)$ の値とも整合的な結果となった。 $\log(M_0 f_c^3)$ が大きくなっている領域はヒ克蘭ギ海台の沈み込みによりプレート境界の形状が大きく変化している領域に

あたる。形状の影響で高い応力がかかるため応力降下量が高くなったと考えれば $M_0 f_c^3$ が大きな値を示す理由が説明できる。なお、コーナー周波数を推定できたプレート境界地震の数は、繰り返し地震で5個、通常地震で63個であるためデータ数を増やすという目的は適切に達成されている。

Tokomaru-Tolagaでは他の領域よりも f_c^P/f_c^S の値がやや小さな値をとる傾向にあった。 f_c^P/f_c^S が小さいことは破壊伝播速度が大きいことを示唆する（Kaneko and Shearer, 2015）。Tokomaru-Tolagaの地震発生域よりもややup-dip側では流体に富む沈み込んだ堆積物が存在すると指摘されている。断層の剛性率が小さいと破壊伝播速度が大きくなることが知られているため、Tokomaru-Tolagaのやや小さな f_c^P/f_c^S （やや大きな破壊伝播速度）は低剛性率な堆積物が原因となっている可能性がある。

伊豆半島東方沖の2006年群発地震活動で発生した火山構造性地震の震源過程解析

Source process of volcano tectonic earthquakes during the earthquake swarm off the east of Izu Peninsula in 2006

*田中 夕香子¹、山田 卓司¹

*Yukako Tanaka¹, Takuji Yamada¹

1. 茨城大学

1. Ibaraki University

1. 序論

伊豆半島東方沖では、1970年代後半以降、群発地震活動が断続的に発生している。これらの地震活動は、地下の火山性流体の移動に起因する火山構造性地震であると考えられている。本研究では、2006年4月に発生した伊豆半島東方沖の群発地震活動のうち、規模が大きな4地震 ($3.9 \leq M_w \leq 5.6$) について、経験的グリーン関数 (EGF) を用いた複数時間窓の波形インバージョンを行い、震源時間関数に見られる4地震の特徴の比較とその背景の考察を行った。

2. データと解析手法

EGFとして、同じ群発地震活動中に発生した3つの小地震の観測波形を使用した。解析対象の4地震、およびEGFとして用いた3地震は、いずれも横ずれ断層型のメカニズム解を示す。解析には、防災科学技術研究所 (NIED) のK-net強震計記録を用いた。加速度波形記録を積分して速度波形とした後、0.1-1.0 Hzのバンドパスフィルタをかけ、さらにS波を含む10秒間を切り出して解析に使用した。

解析には30個の時間窓を用い、各時間窓の間隔は0.05秒とした。次に、EGF地震の震源時間関数は破壊継続時間0.2 sの二等辺三角形で表せると仮定し、解析対象地震のモーメントはNIEDのCMT解と一致するとの条件の下、解析対象地震の震源時間関数を求めた。

3. 結果と考察

解析から得た4地震の震源時間関数を図1aに示す。解析対象地震は、規模の大きい順にAからDと呼ぶこととする。A($M_w 5.6$)は破壊開始後0.2秒程度でモーメントレートが最大になった後、破壊が1秒程度尾をひいている。B($M_w 4.5$)とC($M_w 4.3$)は、ともに2回の大きな破壊を起こしているが、特徴が異なる。すなわち、Bは2回の破壊が同規模である一方、Cは2回目の破壊が明らかに小さい。D($M_w 3.9$)は破壊継続時間0.2秒程度の単一の破壊であった。

これらの震源過程の特徴の違いは、震源の空間分布と関連すると考えられる。A, Bは少なくとも20年程群発地震が発生していない領域で起こった地震である一方、Cは1998年に発生した群発地震活動の震源域に近接している。このことから、以下のような推論が可能である。過去に破壊が起こった領域では、すでに存在する強度の低い部分を破壊が比較的スムーズに進展するのに対し、過去に破壊の起こっていない領域ではフレッシュな強度の高い部分を破壊が進展するため、複雑な破壊過程を示すのかもしれない。すなわち、たとえばUmeda(1990)が本震と余震の破壊過程の相違について言及しているように、過去の地震活動による破碎の有無が、解析した4地震の破壊過程の相違として見られたと考えられる。

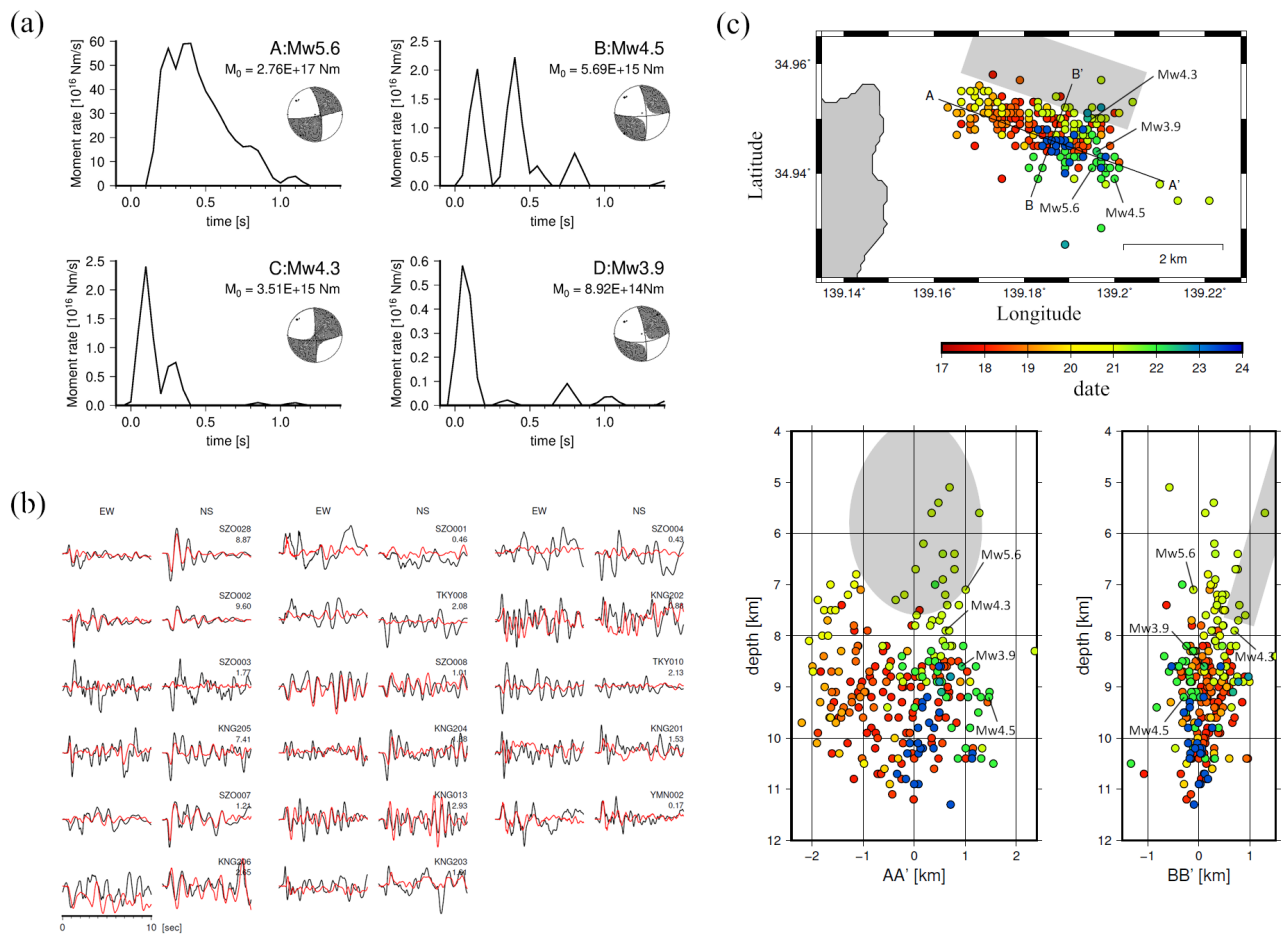


図1. (a) 解析対象の4地震の震源時間関数。縦軸はモーメントレート（単位： 10^{16} Nm/s）、横軸は時間（単位：秒）を表し、時刻ゼロは破壊開始時刻を表す。(b) 地震Aの観測波形（黒）と理論波形（赤）。(c) 2006年4月に発生した群発地震活動の震源分布。色は時間経過を示す。灰色部は1998年の群発活動の震源分布域。

震源域直上の海底水圧計記録に基づく2011年東北地震の地震波放射過程に関する考察

Seismic radiation process of the 2011 Tohoku earthquake inferred from ocean bottom pressure records above its source region

*久保 久彦¹、久保田 達矢¹、齊藤 竜彦¹

*Hisahiko KUBO¹, Tatsuya KUBOTA¹, Tatsuhiko SAITO¹

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

大地震時に震源域近傍で観測される地震波形記録は、その地震の断層破壊過程や地震波放射過程の詳細および強震動の生成メカニズムを知る上で重要なデータである。内陸で発生した地震に関しては、陸域の強震観測網で観測された断層近傍での地震波形記録が、内陸地震の震源過程解析において重要な役割を果たしてきた（e.g., Wald et al. 1994; Ma et al. 2001; Dreger et al. 2004; Asano & Iwata 2021）。他方で、海域で発生する地震に関しては海域における地震観測の乏しさから震源域直上での地震波形の観測事例はこれまであまりなかった。近年の海域観測体制の充実に伴って観測事例が少しずつ増えてきている一方で、過去に観測された海底水圧計記録から地震波形記録を取得するというアプローチがいくつかの研究にて試みられている（Nosov & Kolesov 2007; Matsumoto et al. 2012; An et al. 2017; Kubota et al. 2017a; Kubota et al. 2021）。過去の地震に関しては観測を新たに実施することはできないため、同アプローチによって当時の記録からこれまで見出されていなかった情報を新たに取り出すことは重要である。Kubota et al. (2017a)は海底水圧計記録が一定の条件下で上下動加速度記録として扱えることを示し、海底水圧計記録に基づく地震波形記録を海域地震のモーメントテンソル解析に用いた。Kubota et al. (2021)は地震動成分と津波成分が混在する海底水圧計記録から永久変位込みの地震動成分を抽出する手法を開発し、2011年東北地方太平洋沖地震（以下、東北地震）における震源域直上の海底水圧計記録に適用した。本研究では、東北地震とその二つの前震（2011年3月9日11時45分のMj 7.3の地震と2011年3月10日6時23分のMj 6.8の地震）における海底水圧計記録から上下動地震波形記録を取得した上で、それぞれの地震における地震波の伝播特性および地震波放射特性を調べた。

海水が剛体であると近似できる場合、すなわち水中音波の基本モードよりも十分に長い周期帯域において、水圧計が観測する水圧変動は重力に起因して生じる静水圧変動と海底上下動加速度に比例する動圧変動の足し合わせで表現することができる（例えば、Saito 2013; Kubota et al. 2021）。前者の静水圧変動は後者の動圧変動よりもより長い周期帯域において卓越するため（例えば、Kubota et al. 2021）、適切な周期帯域を選ぶことによって水圧計記録から上下動加速度を直接得ることが可能である。本研究では、東北沖地震およびその二つの前震の際に東大地震研および東北大の海底水圧計によって観測された記録 (Maeda et al. 2011; Hino et al. 2014) を対象とし、時間積分を行った上で、周期25秒から50秒までのバンドパスフィルターを適用して、上下動速度波形記録を得た。最小周期に関しては最も深い観測点GJT3の水深における水中音波の基本モードを考慮して設定した。最大周期に関しては、Kubota et al. (2021)の結果に基づいて、静水圧変動に対して動圧変動が十分に卓越する周期帯を取るように選んだ。なお海域だけでなく陸域の観測記録も併せた解析を行うために、防災科研の強震観測網K-NET・KiK-netによる観測記録も用いることとし、それぞれの地震波形記録に時間積分と周期25秒から50秒までのバンドパスフィルターを施した。

まず二つの前震に関しては、陸域の上下動波形記録は3~4 km/sで伝播する一つの波群で主に構成される。同波群は海域の観測点においても見られ、それぞれの地震の震央および主破壊域（Kubota et al. 2017b）の近くに位置するP08・P09までさかのぼることができる。それに対して東北地震における上下動波形記録は、前震時

の記録に比べて非常に複雑であり、東北地震の複雑な地震波放射特性を反映している。東北地震の震央から down-dip 方向に位置する陸域の観測点においては顕著な二つの波群が見られる（例えば、Suzuki et al. 2011）。この二つの波群は同地震震央近くに位置する海域観測点（P02・P06・P08・P09）の付近までさかのぼることができる。陸域では二番目の波群の方が相対的に大きな振幅であるが、海域では観測点の位置によって相対的な振幅の大小が異なっており、それぞれの波群の励起位置の違いに起因する地震波放射パターンの違いを見ている可能性がある。

Initiation of the M $\sim$ 9 earthquake cycle: the 2021 Miyagi-Oki Mw7.0 earthquake at the deep seismic/aseismic transition

*吉田 圭佑¹、松澤 暢¹、内田 直希¹

*Keisuke YOSHIDA¹, Toru Matsuzawa¹, Naoki Uchida¹

1. 東北大学大学院 理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

1. Tohoku University

The 2011 M9 Tohoku-Oki earthquake provides a rare opportunity to investigate how the earthquake cycle of a great (M9) earthquake impacts the generation of smaller (M7-8) earthquakes on the same fault. Following the Tohoku-Oki earthquake, the interplate seismicity drastically increased in the downdip extension while it disappeared within the main rupture area. An Mw7.0 earthquake occurred in the downdip extension off Miyagi in March 2021, followed by an Mw6.7 earthquake in May 2021. To examine the initial evolution of the earthquake cycle after the Tohoku-oki earthquake, we investigated the regional seismicity around the two M $\sim$ 7 earthquakes and their source processes.

We first relocated earthquake hypocenters around the source regions of the 2021 March Mw7.0 and May Mw6.7 Miyagi-Oki mainshocks by using the Double-Difference method (Waldhauser & Ellsworth, 2000). We used 49070 P-wave and 47566 S-wave differential arrival time data from the JMA unified catalog and 175817 P-wave and 204395 S-wave differential arrival time data derived from the waveform correlation.

We obtained the relocated hypocenters of 2736 interplate events. A small number of interplate earthquakes occurred before the Tohoku-Oki earthquake in and around the source region of the March earthquake, but the number sharply increased after the Tohoku-Oki earthquake. The hypocenter of the March Mw7.0 earthquake is located very close to the hypocenters of four M5-6 earthquakes which occurred after the Tohoku-Oki earthquake. The inter-event distances of these four earthquakes were much shorter than the source sizes of the four earthquakes and the mainshock, even when considering the estimation error; they probably ruptured the same seismic patch. Inside these M5-6 repeating earthquake source regions, M2-3 repeating earthquakes also occurred, forming a hierarchical structure. Almost all of these repeating earthquakes occurred after the Tohoku-Oki earthquake, suggesting that the March mainshock was initiated in a conditionally stable region where the repeating earthquake sequence emerged after the Tohoku-Oki earthquake (Hatakeyama et al., 2017).

We then estimated the spatiotemporal distributions of the slips of the two mainshocks in the same manner, following Hartzel & Heaton (1983) by using the apparent moment rate functions (AMRFs). To estimate the AMRFs, we applied the iterative time-domain approach by Ligorria and Ammon (1999) after Kikuchi and Kanamori (1982) to the S-waves (transverse component) with a non-negative constraint. We used the acceleration waveform data from onland stations of NIED KiK-net and offshore stations of S-net.

The results show that the March Mw7.0 mainshock had two large-slip regions: several kilometers ESE (first rupture; $t=4-7$ s) and ~ 20 km south of the hypocenter (second rupture; $t=8-12$ s). The rupture area of the March mainshock showed a complementary relationship with the aftershock area located between the two large slip areas. The May Mw6.7 occurred ~ 15 kilometers southeast of the southern large slip patch of the March mainshock, where the shear stress increased by the March mainshock rupture. In the May mainshock, the maximum slip occurred a few kilometers southeast of the hypocenter, with the total slip area being longer in the north direction as a moderate slip propagated to the north.

The two $M \sim 7$ mainshocks ruptured the westernmost part of seismic patches of the 1978 $M_w 7.5$ Miyagi-Oki earthquake, which is the most recent typical earthquake in an ~ 40 -year interval of $M \sim 7.5$ earthquake sequence, and loaded the eastern shallow seismic patches for the sequence. The further updip area is a part of the main rupture area of the Tohoku-Oki earthquake and hosts almost no interplate seismicity after this earthquake. Assuming that the spatial pattern of interplate earthquakes along the Japan trench will be restored to a situation similar to that before the Tohoku-Oki earthquake in the future, the downdip seismically active area should gradually expand to the updip area. The initial ruptures propagated in the updip direction for the 2021 $M \sim 7$ earthquakes, similarly to the smaller earthquakes after the Tohoku-Oki earthquake (Yoshida et al., 2020, JpGU). The March $M_w 7.0$ earthquake was initiated from a conditionally stable patch, which is probably a transient feature in the postseismic period of the previous M_9 earthquake. Therefore, the 2021 Miyagi-Oki $M_w 7.0$ initiated at the deep plate boundary probably illuminates seismicity in the early stage of the great interplate earthquake cycle. Continued monitoring of interplate seismicity is essential to examine how plate-locking evolves during the M_9 earthquake cycle.

2011年東北地方太平洋沖地震後の宮城県沖地震の準備過程

Preparation process for a Miyagi-Oki earthquake following the 2011 Tohoku-Oki earthquake

*中田 令子¹、日野 亮太¹

*Ryoko NAKATA¹, Ryota Hino¹

1. 東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター

1. Tohoku University

【はじめに】

宮城県沖では、1978年宮城県沖地震のように、過去に $M>7$ 海溝型大地震が約40年間隔で繰り返し発生し、沿岸地域に被害をもたらしてきた。この履歴に基づく長期評価に加え、2011年東北地方太平洋沖地震の影響を定性的に踏まえた結果、2021年1月時点では、宮城県沖での $M7.4$ 前後の地震発生確率は30年以内に60~70%程度となっている[地震調査研究推進本部, 2021]。ここで想定されている地震の震源域付近で2021年3月20日に発生した $M6.9$ の地震の震源域は、1978年の震源域の西側の一部に重なると考えられており[地震調査研究推進本部, 2021年4月9日]、今後の推移が注目されている。本研究では、地震発生の原因であるプレート境界での応力蓄積と解放過程に基づく数値シミュレーションを用いて、東北沖地震後の宮城県沖地震の準備過程について検討する。Nakata et al. [2016]では、地震発生サイクルシミュレーションで得られた121シナリオについて、 $M9$ 地震後には、 $M9$ 地震前の平均繰り返し間隔よりも短い間隔で、 $M>7$ 宮城県沖地震が発生するケースが多く見られたと報告している。これは、 $M9$ 地震の余効すべりが宮城県沖地震単独の場合よりも大きいために、宮城県沖の陸寄り地域での応力蓄積レートが高くなったためであると考えられる。

【手法】

地震発生サイクルシミュレーションは、先行研究[Nakata et al., 2016]と同様の物理法則とプレート境界面形状で実施する。入力する摩擦パラメタの値や空間分布に関して、複数の条件で計算を行った。全モデルの共通点は、海溝近傍の走向方向に約100~150 km長の領域と、そのdowndip側の半径20~30 kmの円内部に、摩擦的に不安定な条件を設定したことである。これによって、東北沖地震のような海溝近傍で発生する繰り返し間隔数百年以上の $M9$ クラス巨大地震と、そのdowndip側で発生する $M7$ クラスの宮城県沖地震を再現する。Nakata et al. [2016]のFigure 2で示した摩擦パラメタを基にしたものがほとんどであるが、震源域の面積（宮城県沖地震の半径、 $M9$ 震源域の走向・dip方向の広がり）や位置（中心座標、 $M9$ 震源域とバックグラウンド領域との遷移幅）、各領域の摩擦パラメタの値、東北沖地震と宮城県沖地震以外の地震（福島県沖・茨城県沖・ $M9$ 震源域内での $M\sim7$ 地震）の有無などについて、モデルごとに少しずつ異なるものを用いた。

【結果・議論】

新たに計算した結果では、東北沖タイプの地震の規模・繰り返し間隔・震源域・余効すべりの時空間分布・前震や余震の有無、宮城県沖地震の規模・繰り返し間隔などが異なる約120シナリオが得られた。これらについて、宮城県沖地震を抽出し、各地震の発生間隔を計算する。その際、先行研究と同様に、東北沖地震と宮城県沖地震の共存が再現できていないシナリオ、つまり海溝近傍で発生する最大地震の規模が $M<8.5$ の結果や、宮城県沖地震が $M<7$ の結果は、除外する。 $M9$ 地震以前の宮城県沖地震の繰り返し間隔を計算する際には、 $M9$ 地震前の200年間に発生した $M\geq 7$ 地震を扱う。上述の違いに加え、 $M9$ 地震の破壊継続時間がやや長い76シナリオ（地震波の放射によるエネルギー減衰を準動的に近似するダンピング係数が大きい条件で計算したもの）を含む先行研究の121シナリオを合わせた約240シナリオについて、先行研究と同様に、 $M9$ 地震後には、 $M9$ 地震前の平均繰り返し間隔よりも短い間隔で、 $M\geq 7$ 宮城県沖地震が発生するケースが多く見られた。

また、すべり速度の時空間変化からは、 $M9$ 地震の前後で、宮城県沖地震の余効すべりの広がり方に顕著な違いが見られた。 $M9$ 地震前の宮城県沖地震の余効すべりは、震源域のupdip側への伝播が顕著であった。一方、 $M9$ 地震後では、updip側への伝播はほとんど見られなかった。この違いは、宮城県沖地震震源域の

updip側、つまりM9地震震源域の固着がどの程度はがれているかに起因すると考えられる。今後の宮城県沖地震の発生時期を議論するには、2021年3月の地震の余効すべりがupdip側でどのようなになっているかを観測から明らかにしたうえで、シミュレーション結果と照らし合わせた議論をする必要があろう。

【謝辞】

本研究の一部は、JSPS科研費Grant Number JP21K04604およびJP19H05596の助成を受けて実施されたものです。本研究のシミュレーション結果は、東北大学サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システムおよびJAMSTECのスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を利用して得られたものです。

動力的震源モデルに基づく中央構造線断層帯の連動性の検討

Investigation of multi-segment earthquake on the Median Tectonic Line active fault zone based on dynamic rupture simulation

*加瀬 祐子¹、浦田 優美¹*Yuko KASE¹, Yumi URATA¹

1. (国研) 産業技術総合研究所

1. Geological Survey of Japan

中央構造線断層帯は、日本で最も活動的な断層帯のひとつである。この断層帯の連動可能性とその条件を検討するため、断層帯の置かれた条件を反映した動力的震源モデルを構築し、動的破壊シミュレーションをおこなう。本稿では、中央構造線断層帯讃岐山脈南縁東部区間、同西部区間、石鎚山脈北縁区間、同西部区間を対象として、既存情報を基にプロトタイプの震源モデルを構築し、連動可能性について調べるための試計算をおこなった結果を報告する。

断層モデル各区間の走向と長さは、都市圏活断層図(後藤・他, 1998; 中田・他, 1998; 岡田・他, 1998; 堤・他, 1998; 後藤・他, 1999; 中田・他, 1999; 岡田・他, 1999; 堤・他, 1999; 中田・他, 2009; 岡田・他, 2009; 岡田・他, 2014)を基に決定した。また、傾斜角と地震発生層の深さについて、地震調査研究推進本部(2017)では中角度と高角度を併記しているが、本稿では、まず、高角度(鉛直)の場合のみを扱う。モデルは半無限媒質とし、地震波速度構造はNakajima and Hasegawa (2007)の紀伊半島・中国四国地方のモデルを、密度は日本列島基盤岩類物性データベース(大熊・金谷, 2007)を参考に仮定した。

応力場は2通りのモデルを設定した。ひとつは、佐々連における応力解放法による応力測定データ(Tanaka, 1986; 斎藤・他, 1988)より、最大主圧縮応力(σ_1)は東西方向、最小主圧縮応力(σ_3)は南北方向としたもの、もうひとつは、有限要素法による静的解析(文部科学省・産総研, 2021)から、もっとも変位が大きくなると推定された、 σ_1 はN60°W、 σ_3 はN30°Eとしたものである。どちらも、 σ_1 と σ_3 の大きさは応力測定データを参照、また、中間主応力(σ_2)は鉛直でかぶり圧に等しいとし、それぞれ深さに比例するとした。その上で、破壊の始まる領域の応力降下量の比例係数 a を仮定し、静水圧条件が成り立つとして、動摩擦係数を求めた。更に、破壊の始まる区間での強度と応力降下量の比(Andrews, 1976; Das and Aki, 1977)を1.6と仮定して、静摩擦係数を求めた。摩擦係数は破壊の始まる領域の走向によって異なるが、 a を1.0として、間隙水圧を考慮しない場合、動摩擦係数は概ね0.2~0.5程度となった。

断層面の境界条件には、Coulombの破壊基準とすべり弱化的摩擦構成則(Ida, 1972; Andrews, 1976)を仮定し、弾性体の運動方程式を差分法(Kase and Day, 2006)で解くことによって、断層面上の破壊伝播過程を求めた。臨界すべり量は、全セグメント共通で0.50mとした。

σ_1 の向きと破壊の始まる領域の走向によって各区間の応力状態が異なるため、それに対応した様々な連動パターンが得られた。例えば、石鎚山脈北縁区間東端から破壊が始まった場合や、石鎚山脈北縁西部区間東端から破壊が始まる場合は、 σ_1 の向きが東西の場合、N60°Wの場合とも、その区間のみの破壊に留まる。一方、讃岐山脈南縁東部区間東端から破壊が始まる場合、 σ_1 の向きが東西の場合は4区間のほぼ全域にわたって破壊が広がるのに対し、N60°Wの場合は、讃岐山脈南縁西部区間の西端で破壊が停止し、石鎚山脈北縁区間以西には広がらないというように、 σ_1 の向きによって破壊の広がり方が異なる。今後、応力降下量の比例係数 a を変えてシミュレーションをおこない、各区間、各地点での1回の活動によるすべり量を説明するパラメータの範囲を調べる必要がある。

謝辞：本研究は、文部科学省委託事業「連動型地震の発生予測のための活断層調査研究」として実施されました。

線形多孔質弾性体中の動的地震サイクルシミュレーション

Simulation of dynamic earthquake sequence in a linear poroelastic medium

*野田 博之¹

*Hiroyuki NODA¹

1. 京都大学 防災研究所

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Rice and Ben-Zion (1996) により提案されたスペクトル境界積分方程式法 (SBIEM) による線形弾性体中の動的地震サイクルシミュレーションは、Lapusta et al. (2000) による効率化を経て、断層構成則と地震を繰り返す断層の挙動の関係の研究に大いに活用されている。動的地震サイクルシミュレーションでは、地震時に重要となる慣性項を無視せず、加えて地震間のゆっくりとした準静的過程も単一のフレームワークで（人為的に支配方程式を切り替えることなく）計算する。過去及び現在の断層変位とグリーン関数の時空間畳み込み積分を用いて断層面上でのトラクション変化 を表現することができるが、これを静的なトラクション変化 $_{st}$ と残り $_{dy} = -_{st}$ にわけると、 $_{st}$ は「もし即時に断層を接着してこれ以上の変位を禁じた場合、弾性波が過ぎ去った後に残るトラクション変化」であり、弾性体の場合には現在の変位量と静的なグリーン関数の空間畳み込みで表現される。一方 $_{dy}$ に関しては、十分過去の滑り速度による影響を無視する事ができるため、時間に関する畳み込みを打ち切る事で、無限に続く地震サイクルを有限のメモリーで計算する事ができる。近年、Miyake and Noda (2019) により本手法が Maxwell 線形粘弾性体における地震間の応力緩和にも拡張され、弾性体に限らない線形媒質に対する適用の可能性が広がった。

本発表では、SBIEM を用いた地震サイクルシミュレーションを、線形多孔質弾性体に適用した手法の報告と、予察的なシミュレーション結果を紹介する。In-plane 問題や3次元問題では、断層滑りに伴って圧縮・伸長の体積歪が生じる領域が存在し、流体圧の増加・減少が引き起こされ、その勾配に駆動されて流体移動が発生する。この流体の再分配により媒質の変形が時間発展的に発生し、断層面上での応力変化や余効変動を引き起こし得る。Detournay and Cheng (1991) は線形多孔質弾性体中の開口亀裂を解析し、亀裂の導入後に時間発展的に追加の開きが生じることを示した。また Yamashita (2007) は断層を挟んで異なる物性を持つ線形多孔質弾性体を考え、断層面の摩擦強度が一定の場合に、地震後の流体移動に伴って本震滑り域内で余効滑りが発生する可能性を指摘している。この様な効果を動的地震サイクルシミュレーションに取り入れることにより、余効滑りや余震の発生過程を調べたい。

流体移動を駆動する体積歪は anti-plane 問題では発生しないため、本研究では2次元の in-plane 問題を扱う。ある時刻に発生した局在化した滑りに対するグリーン関数は Detournay and Cheng (1987) により導出された。これを直接適用すると、 $_{st}$ の計算に時空間畳み込み積分が発生してしまう。スペクトル法では空間畳み込みは掛け算になるため問題にはならないが、時間畳み込みを実行する必要は残り、SBIEM の地震サイクルシミュレーションの問題サイズを決定する必要メモリー量を圧迫してしまう。そこで本研究では、Miyake and Noda (2019) と同様に、波数空間に分布するメモリー変数を導入し、メモリー関数の常微分方程式を毎タイムステップ逐次時間積分する事により、簡便に精度よく流体移動の影響を計算する手法を開発した。各波数におけるメモリー変数は、それぞれ固有の無次元緩和時間と $_{st}$ への寄与を持つとしたが、これらのパラメータはグリーン関数に対する最小二乗法フィッティングを行って決定した。各波数に対して18個のメモリー変数を使えば、相対誤差 10^{-6} 以下の精度での計算が可能である。Noda and Lapusta (2010) では摩擦発熱による間隙水圧の上昇を地震サイクルシミュレーションに取り入れるために、断層面上の各点に対して120個程度のメモリー（状態）変数を持ちいた。今回使用した18個のメモリー関数はそれほど多い数ではなく、シ

ミュレーションの計算速度に対しては微々たる影響しかない。

予察的に、速度・状態依存摩擦構成則（Aging law）を用いた地震性パッチの地震サイクルシミュレーションを行った。現在計算した限り、地震発生後に地震性パッチは速やかに固着し、内部での余効滑りの顕著な増加は確認できていない。上述の既往研究では、イベント後の亀裂や断層では強度が回復しないと仮定していた。Aging law では地震後の流体移動による剪断応力の上昇よりも断層強度の回復が勝るため、余効滑りが発生しにくい可能性がある。多孔質弾性体内の断層の地震直後の挙動を考える上で、強度回復の時間スケールを考える重要性が示唆される。

粘弾性媒質中の地震サイクルにおける断層強度不均質による影響

The influence of fault-strength heterogeneity on earthquake cycle in a viscoelastic medium

*山本 誠¹、野田 博之¹*Makoto Yamamoto¹, Hiroyuki Noda¹

1. 京都大学

1. Kyoto Univ.

速度状態依存摩擦則（RSF則）が発見されて以来、これを適用した地震サイクルシミュレーションが盛んに行われている [e.g., Lapusta et al., 2000]。断層の挙動を決める要素の一つに摩擦パラメータ $a-b$ が挙げられ、その正負が重要になる。低速での摩擦係数について、速度弱化 ($a-b < 0$) を示す鉱物は Byerlee 則に従う値 (~ 0.6) を示すのに対し、速度強化 ($a-b > 0$) を示す鉱物には粘土鉱物などの小さな値を示すものも存在することが確認されている。全体としては、低速での摩擦係数は摩擦パラメータ $a-b$ と負の相関が見られる [Ikari et al., 2011]。このことから、地震サイクルシミュレーションを行う際には、基準滑り速度 V_0 における定常摩擦係数 f_0 の不均質性を考慮する必要があると考えられる。ただし、媒質が線形弾性体の場合、 f_0 の分布は滑りの基準（滑りをゼロと定義する状態）の選択に吸収されてしまい、初期条件の影響のなくなったリミットサイクルやアトラクタにおける滑り速度 V の時空間的分布には影響を及ぼさない。その一方で、媒質に粘弾性体を採用する場合、非弾性変形の手がかりが媒質中の偏差応力の絶対値に依存するため、 f_0 の分布が断層の長期的挙動に影響する。

地中では、地殻浅部から深部にかけて地震性の領域、スロースリップイベント（SSE）が起こる領域、定常滑りの領域へ移り変わる。また、深さや物質の変化に依存し、媒質の弾性・粘弾性の遷移も見られる。弾性・粘性遷移による断層挙動への影響を調べるために、粘弾性媒質中での2次元の動的な地震サイクルシミュレーション手法が開発されている [Miyake and Noda, 2019]。緩和時間の変化において地震性（EQ）-永久固着（Stuck）遷移が起こることなど、緩和時間と震源核サイズの2種類のパラメータを変化させたときの影響が詳細に調べられている。しかし既往研究では、単純化の為に f_0 は断層面で一様と仮定されており、 f_0 の不均質性が断層挙動に与える影響についてはまだ調べられていない。

本研究ではまず、 f_0 の値を 0.6 で一様としていた Miyake and Noda (2019) による粘弾性媒質中での動的な地震サイクルシミュレーションに対し、他の物性値を変化させず f_0 のみに不均質性を加えた。本シミュレーションでは速度弱化パッチを断層の中央に設置しており、それに合わせて f_0 を上に凸の矩形関数として与えた。速度弱化パッチにおける f_0 を $f_0^{(rw)}$ 、速度強化領域における f_0 を $f_0^{(rs)}$ とする。初期条件について、基準状態における載荷は f_0 の平均値を与えた。緩和時間一定のもとで $f_0^{(rs)}$ をパラメータ ($0.3 \leq f_0^{(rs)} \leq 0.6$) とすることで $f_0^{(rw)}=0.6$ との差を変化させ、それによる断層挙動の変化を調べた。その結果、一定の緩和時間であっても、 $f_0^{(rs)}$ を変化させると EQ - Stuck 遷移が起こることが分かった。また、 $f_0^{(rs)}$ を 0.39 程度まで小さくすると、Miyake and Noda (2019) の報告より一桁以上大きな値での EQ-Stuck 遷移が確認された。 f_0 の不均質性が大きくなるにつれて地震再来間隔は大きくなり、やがて永久固着へと遷移する。本研究ではさらに、Ikari et al.(2011) 等を参考に摩擦パラメータ a, b の分布を再考した上で、 $f_0^{(rs)}$ と緩和時間の2次元でパラメータスタディを行い、 f_0 の不均質の影響を定量的に調べる。

不均質な摩擦パラメータを伴う断層におけるb値の時間変化

Temporal evolution of b-values in rate-and-state fault models with frictional heterogeneities

*伊東 良¹、金子 善宏¹

*Ryo Ito¹, Yoshihiro Kaneko¹

1. 京都大学

1. Kyoto University

前震活動のメカニズムを理解することは、地震の予測にとって重要な問題であると同時に、震源物理の根本的な理解につながる。大地震の前の地震活動の観測により、Gutenberg-Richterの累積地震数とマグニチュードの関係における傾き、すなわちb値が、大地震の発生前に減少することが多数報告されている。例えば、2011年Mw9.0東北地方太平洋沖地震の震源域におけるb値が本震前に減少したことが観測されている(Nanjo et al.,2012)。しかし、観測されたb値の時間変化を物理的に解釈することは未だ困難である。ここでは、摩擦不均質性を伴う地震サイクルシミュレーションを用いて、b値の時間変化の再現を試みる。本震開始前に活発化する前震がみられるような摩擦パラメータの範囲を特定し、それらの前震を統計的に解析したところ、本震開始前にb値が減少するような前震活動を再現することができた。この結果は、摩擦不均質性が前震活動に大きな影響を与えることを示唆している。モデル内の前震活動におけるb値の変化のパラメータ依存性について考察する。

格子H行列を用いた3次元非平面断層の大規模地震サイクルシミュレーション

Large-scale earthquake sequence simulations on 3D geometrically complex faults with lattice H matrices

*小澤 創¹、伊田 明弘²、星野 哲也³、安藤 亮輔¹

*So OZAWA¹, Akihiro Ida², Tetsuya Hoshino³, Ryosuke Ando¹

1. 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻、2. 海洋研究開発機構、3. 東京大学情報基盤センター

1. Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Information Technology Center, University of Tokyo

Large-scale earthquake sequence simulations with boundary element method (BEM) require huge computational costs in multiplication of a dense matrix and a slip rate vector. Recently, Hierarchical matrices (H-matrices) are often used to accelerate the multiplication. However, because of the complex matrix structure of the H matrices and communication costs between processors, it is not highly scalable and cannot be efficiently used on distributed memory computer systems. Recently, lattice H matrices are proposed as a way to improve the parallel scalability of H matrices. Here, we implement lattice H matrices in earthquake sequence simulations on 3D nonplanar faults. Our simulations using over 10^5 degree of freedom show parallel speed-up beyond 10^4 MPI processors and achieve >10 -fold speedup compared to the best performance when the normal H matrices are used. By using this code, we can run unprecedented large-scale earthquake sequence simulations on geometrically complex faults with supercomputers.

プレートの沈み込みに伴う温度圧力条件の変化および粘土鉱物の脱水を考慮した水理学的モデルに基づく間隙水圧の定常解

Steady-state pore pressure based on a hydraulic model considering changes in P-T conditions and clay dehydration due to plate subduction

*金木 俊也¹、野田 博之¹

*Shunya KANEKI¹, Hiroyuki NODA¹

1. 京都大学防災研究所

1. DPRI, Kyoto Univ.

間隙水圧の空間分布は、地震サイクルシミュレーションに代表される断層運動の数値計算を行う上で設定する必要がある境界値である。現在までに報告されている計算では、深さに対して線形に増加するモデルや、一定の深度以降は有効圧が頭打ちになるよう間隙水圧を設定することが多い。後者の圧力分布は、流体の物性値を定数、透水率を有効圧の急激な減少関数とした場合の横ずれ断層のモデルから計算されるものである（Rice, 1992）。しかし、天然のプレート沈み込み帯はこのモデルの前提を逸脱しているため、より現実的なモデルを構築して解を計算する必要があった。

近年の地震波・測地観測網の整備に伴い、スロースリップや低周波微動などのスロー地震は、世界中のプレート沈み込み帯で発生していることが明らかになりつつある。このようなスロー地震の発生は、断層中の高間隙水圧と関連付けて議論・解釈されることが多い。特に浅部スロー地震の発生深度は、粘土鉱物の脱水反応が起こる領域と空間的に重なる場合がある。しかし、脱水反応による間隙水圧への定量的な影響を評価した研究は稀であるため、脱水反応とスロー地震との関係はその有無も含めて不明な点が多い。

本研究では、Rice (1992) による既存のモデルをベースとして、沈み込みに伴う温度圧力条件の変化および粘土鉱物の脱水反応による岩石の体積変化・流体の湧き出しを考慮した水理学的モデルを構築した。一般的に断層帯の透水性は母岩と比べて高いことから、先行研究と同じく、流体は断層に沿ってのみ流れるとした。構築したモデルに基づいて間隙流体圧や脱水反応率など、諸量の時間発展と空間分布に関する偏微分方程式を立式し、定常状態の仮定と海底面での各物理量の初期値を用いた数値積分を実行することで、定常解の空間分布を求めることができる。今回は Runge-Kutta-Fehlberg 法を用いて、海底面から地震発生層下限（海底下 35 km）までの空間積分を数値的に行った。代表的なプレート沈み込み帯として南海トラフ熊野沖に着目し、種々の物性値は同地域から採取されたコア試料の値を参照した。海底面表層での岩種割合および流量は未知数であるため、これら二つについては値を振ってパラメータスタディを行った。

計算結果は大別して三つに分類でき、空間積分が系の底まで実行できないケース、系の底まで空間積分が実行できたが有効圧が負になる領域が存在するケース、系の底まで空間積分が実行できて有効圧が常に正になるケース、が存在した。最初のケースでは、海底面に与える流量が小さすぎたため、深度の増加に伴う流体源の減少によって流量が負になり、より深部で解が発散する挙動が見られた。二番目のケースでは、逆に海底面と与える流量が大きすぎたため、間隙水圧の勾配が静岩圧の勾配を超えてしまい、有効圧が負となっていた。最後のケースの解は、これら二つのケースのどちらにもならない中間の流量を海底面に与えた場合にのみ得られ、初期の泥岩割合が多いほど（透水率が低いほど）解の存在できるパラメータ空間が小さいことがわかった。このとき、有効圧の深度分布は完全な頭打ちにはならないものの、その勾配は緩やかになっていたことから、第一次近似としては深度に線形なモデルではなく既存の Rice (1992) のモデルを支持する結果と

なった。しかし、詳細に見れば有効圧に正の深度依存性が存在するため、地震時の応力降下量に深度依存性があるとする観測結果を支持している。系の底（海底下 35 km）での間隙圧比は概ね 0.9 から 0.95 の間を取ることが多かった。温度圧力条件の変化および脱水反応が有効圧に及ぼす定量的な影響は、海底面に与える流量の初期値に強く依存し、空間積分が底まで実行できないケースの流量に近づくにつれて、その影響が一桁ほど大きくなることがわかった。系の底から供給される流量を固定した場合、温度圧力条件の変化による有効圧への影響は岩種依存性が強く反映されたが、脱水反応による影響は岩種によらずおよそ一定の値を取った。また海底面での初期流量が十分大きい場合、脱水反応が流体圧のソースではなく流体圧のシンクとして機能する場合もあることがわかった。プレート沈み込み帯を対象とした地震サイクルシミュレーションを行う場合、本研究で得られた解を境界値として用いることで、より現実的な数値計算を実施することができると期待される。また、脱水反応の有無によって有効圧が局所的に顕著に変化する様な挙動は得られなかったことから、粘土鉱物の脱水反応による流体圧の上昇が直接的にスロー地震を発生させるという仮説は支持されないことがわかった。

房総沖スロースリップのすべりと応力変化を用いたすべりと時間に依存する摩擦構成則のパラメータの推定

Estimation of parameter values for a slip- and time- dependent law using slip-stress relations of the Boso slow slips

*内田 礼央¹、佐藤 利典¹、小林 琢磨^{1,2}

*Reo Uchida¹, Toshinori Sato¹, Takuma Kobayashi^{1,2}

1. 千葉大学、2. アジア航測

1. Chiba University, 2. Asia Air Survey Co.,Ltd.

断層での摩擦構成則や有効法線応力、剪断応力を知ることは、断層面の挙動を理解し、地震等のイベントを理解する上で重要である。小林・佐藤 (JpGU, 2019) は、房総沖スロースリップのすべり速度と応力変化から、すべり速度・状態依存摩擦構成則に基づいて、スロースリップが起こっている場の有効法線応力の絶対量を求める方法を提案した。本発表は、スロースリップでは摩擦力と剪断応力が釣り合っていることを用いて、すべりと応力変化からすべりと時間に依存する摩擦構成則のパラメータの推定を試みる。これにより観測からイベント発生場での摩擦構成則のパラメータを求めることができる。

用いたデータは国土地理院による日々の座標値 (F3解) である。スロースリップによる変動を抽出するために線形トレンドや季節変動などを除き、なめらかなフィッティングを行い、3日間ごとの変動を取り出した。次にその変動データからABICインバージョン法を用いてすべり分布を推定した。求めたすべり分布からCoulomb 3.3を用いて応力変化の計算を行った。すべりと時間に依存する摩擦構成則は、Aochi and Matsu'ura (2002) によるフラクタル的性質を持つ断層表面の変位に伴う変形と摩耗の効果に加え、断層表面の回復過程を示す凝着の効果を考慮した構成則を用いた。この構成則での重要なパラメータは、フラクタル的性質を持つ断層表面の上限界波長と摩耗係数、凝着係数である。

房総沖スロースリップのすべりと応力変化の観測値と構成則から求まる理論値の比較の結果、摩耗の効果のみを考慮した場合、房総沖スロースリップが発生している場のフラクタル的性質を持つ断層表面の上限波長はおよそ100cm程度、摩耗係数は0.01~0.1程度であることが推定された。また、発表時には、摩耗に加え、凝着の効果を考慮したパラメータの推定結果を述べる。

謝辞 解析では国土地理院の日々の座標値 (F3解) とUSGSのCoulomb 3.3プログラムを使用しました。記して感謝します。

スロースリップのすべり速度と剪断応力変化を用いた有効法線応力の推定

Estimating Effective Normal Stress During Slow Slip Events From Slip Velocities and Shear Stress Variations

*佐藤 利典¹、小林 琢磨^{1,2}*Toshinori SATO¹, Takuma Kobayashi^{1,2}

1. 千葉大学大学院理学研究院、2. アジア航測（株）

1. Graduate School of Science, Chiba University, 2. Asia Air Survey CO., LTD

スロースリップは、地震波を出さずにプレート境界等を10日～数か月かけて数十cmゆっくりすべる現象である。スロースリップはGNSS観測以降発見され、プレート境界でのエネルギー蓄積・解放の新たな1つの過程として位置づけられている。これを調べることはプレート境界のテクトニクス等を知る上で重要である。スロースリップの原因の1つとして、プレート境界面上の流体の存在が議論されている。

すべり速度状態依存摩擦則を用いたバネ・スライダーモデルを用いた理論的解析から、速度弱化の条件で準静的なすべりが起こることが示されている（Rice and Tse, JGR, 1986）。この解析によると、剪断応力変化とすべり速度のグラフ上のスライダーの軌跡は、準静的すべりが定常状態の摩擦則のラインに沿って徐々に加速し、そして減速することを示している。定常状態の摩擦則のラインの傾きは、摩擦係数を a 、 b 、有効法線応力を σ'_n とすると、 $(a-b)\sigma'_n$ となる。

我々は、過去6回の房総沖スロースリップについて、GNSSデータを用いてすべりの時空間分布と剪断応力変化を求め、剪断応力変化とすべり速度のグラフを作成した。ほとんどのグラフ上の軌跡は理論的解析のものと類似していて、これは房総沖スロースリップは、上記の理論的解析の結果が適用可能であることを示している。 $(a-b)$ を -0.003 とすると、軌跡の傾きから有効法線応力が深さ12.5～20.5 kmで10～50 MPaと推定された。この値はその深さの静岩圧（350～600 MPa）より著しく低く、高圧の流体の存在を示唆している。

謝辞

解析にあたり、国土地理院の日々の座標値（F3解）を使用しました。応力の計算では、米国地質調査所のCoulomb3.3を使用しました。ここに記して感謝します。

センチメートルスケールにおける変はんれい岩ガウジの摩擦特性 ー岩石摩擦特性のスケール依存性解明に向けてー

Frictional properties of metagabbro gouge in centimeter scale -Toward understanding scale dependence of rock friction-

*山下 太¹、溝口 一生²、飯塚 幸子³

*Futoshi Yamashita¹, Kazuo Mizoguchi², Sachiko Iizuka³

1. 国立研究開発法人防災科学技術研究所、2. 一般財団法人電力中央研究所、3. 株式会社セレス
1. NIED, 2. CRIEPI, 3. CERES Inc.

断層破壊シミュレーションやサイクルシミュレーションを実施するにあたり、センチメートルスケールの試料が示す摩擦特性は実大断層スケールにおいても同等であると暗に仮定されている。しかしながら、それが真に有効であるかはまだ不明な点が多い。この観点からYamashita et al. (2015, Nature)は、メートルスケールの変はんれい岩試料を用いた摩擦実験をおこない、定常摩擦係数の仕事率（せん断応力とすべり速度の積）依存性がセンチメートルスケールとは明確に異なることを明らかにした。彼らはさらにその原因が摩擦すべりにもない自発的に発生・成長する力学的不均質にあることを示したが、その実験は岩石同士を直接接触させた状態で行われており、自然断層と同様にガウジを含んだ断層の摩擦特性がスケールに依存するか否かは明らかではない。そこで著者らは断層摩擦特性のスケール依存性の解明に向けて様々なスケールにおけるガウジ摩擦実験を実施しており、本講演ではセンチメートルスケールにおける実験結果について報告する。

山下他（2020, 地震学会）及び下田他（2020, 地震学会）によるメートルスケールのガウジ摩擦実験結果と比較するため、同様にジェットミルにより粉碎した変はんれい岩の粉末粒子（平均粒径10 μm 、最大粒径200 μm ）を模擬ガウジとして用い、加圧前のガウジ層圧を3 mmとした。実験は電力中央研究所が所有する二軸摩擦試験機（Mizoguchi et al., 2021, EPS）により実施した。模擬断層面は長さ10 cm、幅5 cmである。実験中の垂直応力はメートルスケール実験と同様に3.4 MPaもしくは6.7 MPaの一定に保った。10分間加圧をした後、10 $\mu\text{m}/\text{s}$ で4 mm変位させ、0.1-1.0-10.0-100.0 $\mu\text{m}/\text{s}$ の速度ステップを3セット与えた。各速度での変位量は100.0 $\mu\text{m}/\text{s}$ における1.0 mmを除き0.5 mmとした。速度ステップに応じた摩擦係数の変化が速度-状態依存摩擦則（以下RSF則）に従うと仮定し、各パラメタの推定をおこなった。摩擦データへのフィッティングにはSkarbak and Savage (2019, Geosphere)によるプログラムを利用した。下田他（2020, 地震学会）の推定結果と比較するため、同様に速度低下時の応答にSlip law (Ruina, 1983, JGR)をフィッティングさせた。

得られたRSF則パラメタのうち、累積変位量が9.5 mmでの b - a 及び D_c はどちらの垂直応力下でもそれぞれ 1×10^{-3} 、10 μm のオーダーとなった。これらの値は下田他（2020, 地震学会）による推定結果と調和的である。このことから、比較的均質なガウジ層におけるRSF摩擦特性はスケールによって明確な違いを示さないことが示唆された。Yamashita et al. (2015, Nature)で確認されたようなスケール依存性が見られなかった理由として、ガウジ層がすべりに伴う力学的不均質の発生・成長を抑制したことが考えられる。今後、実験後に採取したガウジサンプルの観察等を通し、この仮説の検証をおこなっていく予定である。

波動伝播シミュレーションを用いた4m二軸岩石摩擦試験機におけるAEセンサキャリブレーション

Calibration of AE sensor by wave propagation modeling on a 4-meter-long biaxial friction apparatus

*大久保 蔵馬¹、山下 太¹、福山 英一^{2,1}

*Kurama Okubo¹, Futoshi Yamashita¹, Fukuyama Eiichi^{2,1}

1. 防災科学技術研究所、2. 京都大学大学院工学研究科

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Graduate school of engineering, Kyoto university

せん断応力の載荷によるひずみの蓄積、そして震源核形成から断層面の主破壊に至るまでの素過程の解明を目指し、大型岩石摩擦試験機を用いた室内実験が行われてきた。主破壊の直前に発生するAEイベントを前震とみなし、その統計的な性質についての研究が進められているが、それぞれの前震のすべり分布をはじめとする詳細な震源特性は明らかにされていない。その震源特性を精度よく決定するためには、まず岩石試料に取り付けられたAEセンサのキャリブレーションが必要である (e.g. Kwiatek et al., 2014)。そこで本研究では、ボールドロップ試験で得られた波形データと波動伝播の数値シミュレーションとを用いて、AEセンサのゲインと指向性を推定するための解析を行なった。ボールドロップ試験は、防災科学技術研究所が保有する大型二軸岩石摩擦試験機の下側岩石試料（インド産変はんれい岩、すべり面：長さ4.0 m x 幅0.1 m）を用いて行った。AEセンサの感度は、機器特性に加えて岩石試料との接着状態にも影響されるため、試料に取り付けた状態でのキャリブレーションが必要となる。高さ500 mmから直径3 mmの鉄球を断層面に自由落下させた際の衝撃を震源とし、それにより励起された弾性波を断層面下70 mmに片面あたり16個ずつ（計32個）取り付けたAEセンサ（Olympus V103-RM）を用いて計測した。計測した電気信号はプリアンプ(Physical Acoustics, 2/4/6C)によって40 dB増幅した。断層面の長手方向に沿った32箇所で行ったボールドロップ試験を実施し、それぞれについてP波の初動到達時刻からボールの落下位置を決定した。次に、岩石試料およびそれを支える金属プレートの3次元数値モデルを作成し、震源決定によって求めたボールドロップ位置とHertzian impact theoryによるボールドロップ震源関数の解析解(Reed 1985; McLaskey and Glaser, 2009)を用いて測定点における速度波形を数値計算により求めた。波動伝播シミュレーションにはOpenSWPC(Maeda et al., 2017)を用いた。グリッドサイズは一辺0.5 mmとし、ボールドロップ震源のコーナー周波数0.1 MHzに対して最小波長あたりのグリッド数が20以上となるようにした。数値シミュレーションではボールドロップ震源が励起する波の最大振幅は一様であるとしたが、鉄球の衝突速度や接触状態により実際の振幅は試行毎に異なると考えられる。また、AEセンサに関する指向性として、設置面の振動方向に対するAEセンサの鉛直成分感度についても検討する必要がある。本研究では、センサ感度に加え、ボールドロップ入力の際のばらつきを表す振幅係数、および指数関数型モデルに従うAEセンサの指向性を仮定した振幅補正モデルを提案し、その補正パラメータを用いることで観測波形がよりよく再現されることを確認した。プリアンプを含む感度は 420 ± 140 V/(m/s)、ボールドロップの振幅係数は0.6-2.1と推定された。またAEセンサの指向性については、入射角の増加に伴い最大20%の感度減少が示唆された。本研究ではさらに周波数・位相特性についても検討する。推定されたセンサ特性と岩石試料の数値モデルは、前震の震源特性の推定に活用され、前震によって生じた本震前の断層面のすべり分布を明らかにできると期待される。

大型載荷速度変化摩擦試験によって形成されたガウジ層の微細構造

Microstructure in the gouge layer developed by large-scale velocity step change experiments

*渡辺 俊¹、山下 太²、前田 純伶²、下田 晃嘉³、福山 英一^{1,2}

*Shun Watanabe¹, Futoshi Yamashita², Sumire Maeda², Akihiro Shimoda³, Eiichi Fukuyama^{1,2}

1. 京都大学、2. 国立研究開発法人防災科学技術研究所、3. 日本生命保険相互会社

1. Kyoto University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 3. Nippon Life Insurance Company

近年、石油やシェールガス・オイル採掘のため、地下深くの岩盤に人工的に亀裂を入れる水圧破碎を行うことがある。その際、破碎流体を岩盤に注入するため、間隙水圧が上昇し、誘発地震が発生することがある。このような誘発地震の発生条件を特定するために、断層摩擦の性質を調べる必要がある。しかしながら、実スケールに近い岩石摩擦実験はあまり行われていない。今回、防災科学技術研究所（防災科研）にて行われた、ガウジ層を挟んだ載荷速度を段階的に変化させた大型岩石摩擦実験後のガウジ層を採取し、薄片を作成しその観察を行ったので、報告する。特に、実験によって形成されたせん断帯の形成と載荷速度変化実験によって得られた摩擦パラメータとの関係について調べた。

実験は、防災科研の大型2軸岩石摩擦試験機を用いて行われた。用いた岩石試料は、上部がL1.5 m×W0.5 m×H0.5 m、下部がL2.0 m×W0.1 m×H0.5 mの変斑レイ岩であり、これらを積み重ねた後、上方から法線応力を加え側方から剪断応力を加えることで実験を行った。接触すべり面積は0.15 m²である。実験前に岩石試料間にガウジを厚さ3 mmとなるように散布して実験を行った。ガウジは、アイシンナノテクノロジーズ株式会社のジェットミルにより、供試体と同じ変斑レイ岩試料から、平均粒径10 μm、最大粒径200 μmとなるように粉砕して生成したガウジを用いた。各実験後に使用したガウジをすべて取り除き、実験ごとに新しいガウジを散布して実験を行った。実験は、法線応力を3.3 MPaかけたLB21-003, 004と、6.5 MPaかけたLB21-007, 008の4回行った。載荷速度は0.01 mm/s, 0.1 mm/s, 1 mm/sの間で段階的に変化させることを繰り返した。各実験の総変位量は87 mmであった。実験後、上部供試体を真上に持ち上げ、下部供試体表面上にガウジ層が露出する状態にした後、ガウジ層のサンプリングを行った。まず、整髪スプレーをガウジ層に吹きつけガウジ層を仮固定し、一定時間経過後カミソリとピンセットを用いて2 cm角程度の領域を採取した。採取したガウジ層試料はエポキシ樹脂により固化させ、すべ方向の断面の薄片を作成した。LB21-003の実験から2箇所、LB21-004, 008からそれぞれ3箇所、LB21-007から4箇所の計12カ所の薄片を作成した。作成した薄片は正立工業用顕微鏡システム（（株）オリンパス、BX53MTRF-S）を用いてガウジ層の微細構造の観察を行った。

薄片の観察により、法線応力の小さいLB21-003, 004の薄片に比べて法線応力の大きいLB21-007, 008では明瞭なせん断帯（Y面、R1面）が形成されており、法線応力が大きいほどガウジの細粒化が促進されせん断帯が形成されていることが確認できた。またR1面に形成されるリーデルせん断帯は観察した薄片12枚の内、LB21-007の2枚とLB21-008の1枚の計3枚でのみ形成されていた。この3枚のリーデルせん断帯の形成頻度を見ると、2~3 mmおきにまとまって発生している箇所もあれば一つのせん断帯だけ孤立して形成されている箇所もあり様々であり、ガウジの細粒化の程度も含め、せん断帯の形成状況は空間的には不均質であることが分かった。Marone and Kilgore (1993, Nature)は、せん断帯の厚さがすべり弱距離Dcに比例するという結果を得ている。このように薄片観察の結果からDcのような摩擦パラメータが推定できることは非常に有益である。今回の実験ではY面は供試体と境界に近いガウジ層上面及び下面付近に形成されていたため、サンプリングの際にYせん断帯全体をうまく採取できなかった。そこで、今回は、リーデルせん断帯の厚さに注目して解析を行うこととする。薄片観察で得られたリーデルせん断帯の厚さは30~70 μmであった。一方、下田・他 (2020, 地震学会)は、本実験のDcの推定を行っており、10~100 μmと推定している。リーデルせん断帯の形

成と摩擦パラメータとの関係を調べるため、本研究で得られたリーデルセン断帯の厚さと摩擦パラメータの関係を、他の既往研究による摩擦実験後のガウジ層に生じたリーデルセン断帯の厚さと摩擦パラメータの関係との比較において議論したい。

仕事率の増加と鏡面の生成・破壊にともなうインド砂岩の摩擦・摩耗率の変動

Friction and wear properties of Indian sandstone with increasing work rate and generation and destruction of the fault mirror

*前田 純伶¹、山下 太¹、大久保 蔵馬¹、福山 英一^{1,2}

*Sumire MAEDA¹, Futoshi Yamashita¹, Kurama Okubo¹, Eiichi Fukuyama^{1,2}

1. (国研) 防災科学技術研究所、2. 京都大学

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

断層帯の幅は断層の累積変位量と正の相関があり、断層の成長や活動を評価する上での重要な指標の1つである。一方、Shipton et al. (2006) は砂岩内に発達する断層帯の幅が累積変位量に対して著しく小さいことを指摘した。その要因の1つとして、断層面に発達する‘Slickenside (鏡肌)’が挙げられる。Hirose et al. (2012) は石灰岩質砂岩を用いた高速剪断摩擦実験に基づき、試料の剪断面に発達したshiny slickenside surface (以下、鏡面) が断層帯の幅の成長率を小さくする可能性を示唆した。炭酸塩岩（炭酸塩鉱物を多く含む岩石も含む）に発達する鏡面に関する研究は多数行われており、その生成・破壊条件や摩擦・摩耗特性が明らかにされつつある (e.g., Smith et al., 2013; Verberner et al., 2014; Park et al., 2021)。一方で、石英質砂岩における鏡面の生成条件等については不明な点が多く、摩擦特性等とともに明らかにする必要がある。

そこで本研究では、インドラジャスタン州カラウリに産出する白砂岩(以下、インド砂岩)を対象とした高速剪断摩擦試験を行い、模擬断層面に発達する鏡面の生成・破壊条件及び摩擦・摩耗特性を明らかにする。実験条件は垂直荷重を0.5もしくは1.0 MPaとし、すべり速度（等価変位速度）を 1.2×10^{-3} – 1.7×10^{-1} m/sの範囲とした。本研究では、すべり距離が60–100 mの間で測定された摩擦係数の平均値(μ_{ave})を代表値として使用する。鏡面の生成・破壊条件が摩擦すべりによる温度上昇に伴う化学反応と密接に関連していると予想されるため、仕事率（剪断応力とすべり速度の積）、温度、 μ_{ave} の関係性を調べた。模擬断層面近傍の温度は赤外放射温度計（KEYENCE IT2-02, IT2-50）を用いて連続的に計測した。また、摩耗率を調べるため軸方向の変位をレーザー変位計（Micro-Epsilon, optoNCDT IDL1700-50）を用いてモニターした。

本実験結果から、仕事率、試料剪断面の構造、および摩擦係数には4つのフェーズがあることが判明した。

1) 仕事率が 10^{-4} MJ m⁻² s⁻¹のオーダーでは μ_{ave} は約0.5を示し、剪断面に鏡面の発達を確認。2) 仕事率が 10^{-3} MJ m⁻² s⁻¹を超えると μ_{ave} は低下傾向を示し、仕事率が 10^{-2} MJ m⁻² s⁻¹の時に μ_{ave} は約0.2に減少。剪断面に鏡面の発達を確認。3) 仕事率が 3.6×10^{-2} MJ m⁻² s⁻¹の時に μ_{ave} は約0.4まで増加。剪断面には顕著な摩耗痕が確認。4) 仕事率が 4.7×10^{-2} MJ m⁻² s⁻¹の時に μ_{ave} は約0.3に減少。剪断面に摩耗痕と鏡面の両構造が確認。1回の実験（全すべり距離：～200m）中に有意な軸方向の変位は認められず、すべり距離に対する軸方向変位の変化はnm/mのオーダーであった。

炭酸塩岩を用いた実験では鏡面は高速度下で形成され、低速度下(< 0.07 m s⁻¹)では形成されないことが明らかにされている (e.g., Hirose et al., 2012; Siman-Tov et al., 2015; Park et al., 2021)。一方、インド砂岩は一部の条件 (1.7×10^{-1} m/s, 0.5 MPa) を除き、残りの全ての実験で鏡面の発達が確認できた。すなわち、鏡面の生成・破壊条件は岩種によって異なることを意味している。また、本研究の実験範囲では、鏡面が発達しない条件における一時的な摩擦係数の増加を除き、インド砂岩の摩擦係数および摩耗率が低いことが判明したことから、その著しく低い摩耗率は、鏡面が容易に形成されることに起因すると考えられる。Di Toro et al. (2011) は石英の非晶質化とゲル化により、石英岩の摩擦が非常に低いことを報告している。インド砂岩の構成鉱物の約70%は石英であることから、本研究で明らかとなった低摩擦・低摩耗率も石英の特性に起因すると考えられる。

本研究結果から、I) 岩種によって鏡面の生成・破壊条件が異なる、II) 砂岩の摩擦係数・摩耗率は構成鉱物の特性を強く反映している、ことが示唆された。これらの結果は、砂岩中に発達する断層帯の成長の理解に貢献すると考えられる。

Existence of Weak Zones: Enhancing Dynamic Rupture or Not?

*上西 幸司^{1,2}、長沢 国洋²

*Koji UENISHI^{1,2}, Kunihiro NAGASAWA²

1. 東京大学大学院新領域創成科学研究科、2. 東京大学大学院工学系研究科

1. Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

Existence of a mechanically weak zone such as a geological fault plane is quite often considered to enhance or promote propagation of dynamic rupture in a brittle solid. Indeed, extraordinarily accelerated high-speed ruptures and ensuing asymmetric seismic motion and structural failures due to the presence of large-scale fault planes have been indicated experimentally as well as numerically (e.g. Uenishi et al., *BSSA*, 1999; Uenishi, *Eng. Fail. Analysis*, 2015). However, for instance, as pointed out by Uenishi (*Proc. Mat. Sci.*, 2014), deflection or bifurcation of rupture propagation at another typical weak zone, namely, at an interface of a layered medium, is not usually taken into account in seismological studies, and it is not certain at all whether the existence of a weak zone really promotes seismic rupture propagation or not.

Therefore, in this study, by continuing our investigation into rupture development in a brittle solid that contains weak zones or sets of small-scale parallel cracks in certain areas (Uenishi et al., *SSJ Fall Meeting*, 2017, 2018, 2019; Uenishi and Nagasawa, *SSJ Fall Meeting*, 2020), we examine the effects of positions, density and individual length of the small-scale cracks. As before, using a digitally controlled laser cutter, we prepare rectangular photoelastic polycarbonate specimens with small-scale cracks that are parallel to each other and have some dip angle. Each specimen is externally loaded by a tensile testing machine quasi-statically at a constant strain rate.

Our experimental observations using a high-speed digital video camera show that weak zones do not always promote propagation of primary rupture and they can rather arrest and "absorb" rupture propagation itself. Furthermore, the experimentally obtained snapshots indicate that a sudden spatial change of crack density in a weak zone can mechanically serve as a large-scale plane of weakness. We also illustrate that the length of each crack plays a decisive role in rupture development in and around a weak zone.

Acknowledgements: The research has been financially supported by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) through the "KAKENHI: Grant-in-Aid for Scientific Research (C)" Program under grant number 20K04680.

On the Dynamic Stability of a Granular Slope

*上西 幸司¹、喜 東昀¹

*Koji UENISHI¹, Dongyun XI¹

1. 東京大学大学院新領域創成科学研究科

1. Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

In our previous study (Uenishi and Goji, *SSJ Fall Meeting*, 2018), in order to deepen our understanding of the fundamental mechanisms associated with dynamic phenomena involving large deformation like landslides due to earthquakes, dynamics of granular media subjected to impact loading has been investigated. In particular, wave and rupture evolution inside the media under dry conditions has been experimentally observed by employing the technique of dynamic photoelasticity in conjunction with a high-speed video camera. Using a digitally controlled laser cutter, penny-shaped birefringent particles have been prepared, and two-dimensional granular slopes consisting of the particles and having different inclination angles have been constructed on a rigid horizontal plane. Impact loading has been applied to each of the slopes on the top horizontal free surface. The experimental observations have clearly indicated that typically there exist two distinct patterns of dynamic failure in granular slopes under consideration: (1) Mass flow and total collapse of the whole slope owing to unidirectional stress transfer; and (2) toppling-like separation of the slope face only, induced by widely spread multi-dimensional waves (Uenishi and Goji, *Proc. Strut. Integrity*, 2018). However, the previous experiments have been performed in the "monolithic" framework and no inhomogeneity in and around slopes has been taken into account.

Therefore, in this contribution, possible influence of material inhomogeneities on the dynamic stability of a granular slope is examined. Firstly, rigid plates are placed over certain boundaries of the granular slopes, and the mechanical roles of confining pressure in the generation of dynamic particle motion, stress transfer and structural collapse are experimentally assessed. Secondly, the open source discrete element code ESyS-Particle is used to numerically reinforce the outcome of the experimental observations and evaluate not only the effects of material stiffness but also those of inhomogeneities like cavities and seismic barriers placed in the granular slopes.

Acknowledgements: The research has been financially supported by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) through the "KAKENHI: Grant-in-Aid for Scientific Research (C)" Program under grant number 20K04680.

M5.5地震発生場と母岩から回収したコア試料の物理特性

Physical Properties of Core Samples Recovered from a seismogenic zone and the host rock of a M5.5 Earthquake

*阪口 賢祐¹、吉田 峻輔²、東 充也³、横山 友暉⁴、鈴木 皓一郎¹、矢部 康男⁵、Ligaraba Dakalo⁶、Masondo Nandipha⁶、廣野 哲朗⁷、山本 裕二⁸、松崎 琢也⁸、小笠原 宏⁹、大場 誠也⁹、脇本 雅也⁹
*Kensuke Sakaguchi¹, Shunsuke Yoshida², Mitsuya Higashi³, Yuki Yokoyama⁴, Koichiro Suzuki¹, Yasuo Yabe⁵, Dakalo Ligaraba⁶, Nandipha Masondo⁶, Tetsuro Hirono⁷, Yuji Yamamoto⁸, Takuya Matsuzaki⁸, Hiroshi Ogasawara⁹, Seiya Ohba⁹, Masaya Wakimoto⁹

1. 立命館大学大学院、2. 独立行政法人造幣局、3. マツダ株式会社、4. 株式会社テクノプロ、5. 東北大学理学研究科、6. Graduate School of Geoscience, University of the Witwatersrand、7. 大阪大学理学研究科、8. 高知大学海洋コア総合研究センター、9. 立命館大学理工学部

1. Graduate School of Sci. Eng., Ritsumeikan Univ., 2. Japan Mint, 3. Mazda Motor Corporation, 4. TechnoPro, Inc., 5. Graduate School of Science, Tohoku Univ., 6. Graduate School of Geoscience, University of the Witwatersrand, 7. Graduate School of Science, Osaka Univ., 8. Center for Advanced Marine Core Research, Kochi Univ., 9. College of Sci and Eng., Ritsumeikan Univ.

地震発生場については、地表や海底付近からの遠隔観測が充実し、近年、研究の進展がめざましい。これらの研究では、観測結果を説明する物理パラメータを地震発生場と想像される場所に分布させ、観測データに合うようにその時空間発展を運動幾何学的に拘束して地震発生場の理解を深めている（例えば、加藤、2012）。ところが、なぜそこが地震発生場になったか、あるいは、実際に、そこで局所的に岩石と破壊と水がどのように相互作用し、応力やレオロジー特性の不均質が生まれているかを決定づけるためには、地震発生場とその周囲の直接的な調査が不可欠である（例えば、廣野・他、2013）。

地表や海底からの掘削調査が直接調査の唯一の方法である。地震発生場に到達する掘削と直接調査に挑戦したものとしては、例えば、米国のサンアンドレアス断層掘削計画（例えばZoback et al. 2011）、日本の南海トラフ地震発生帯掘削計画（Tobin et al. 2020）などがある。しかし、これらの計画では、地震発生場まで到達させることや、主にロータリー掘削であるため、試料を破壊せずに十分な量を回収することに成功していない。

この残された課題に取り組むことのできる絶好の機会が、2014年に南アフリカMoab Khotsong金鉱山下で発生した、左横ずれ型のM5.5オークニー地震であった。ICDP「DSeis計画」は、地下2.9kmの密度と地震波速度が上部地殻に近い29億年前に堆積し変成した堅固な岩盤内にある坑道から三本の孔（Hole A,B,C）をワイヤライン・フルコア掘削し、総延長1.6kmのコア試料を掘削時のダメージを抑制して回収することに成功した。Hole A（817m）はオークニー地震の余震発生帯まで約100mの位置に到達した。Hole B（約700m）はM5.5断層上部と交差させることができた。しかし、孔口から612～620mの破碎帯区間（掘削水のロスもあった）はコアが十分回収ができなかった。そのため、Hole Bの544mから分岐孔であるHole C（96m）を掘削し、最も重要な区間は1.5m長のトリプルチューブでコア試料をより多く回収できた。

横山（2020 阪大修論）は回収したコア試料から、破碎帯付近については1m間隔を目安に、1cm厚のディスクを切り出し、薄片観察や粉末XRD、XRF分析を行い、断層交差部付近がタルクや黒雲母に富む剪断構造を持つことを確認した。吉田（2021 立命大修論）と阪口（2021立命大卒業研究）では孔内検層データや高知コアセンターに輸入された破碎帯付近のコアのP波伝播速度、密度、自然γ線、磁化率を測定し、X線CTスキャンによる分析の結果をとりまとめた。本ポスターでは、この結果を報告する。

母岩に貫入したドレライト・シルは密度とP波速度が下部地殻物質並みであった。Hole BとCの断層交差部直前からは、密度は下部地殻並み（約 3000kg/m^3 ）である厚さ数mランプロファイア・ダイクが始まり、Hole BとCとの断層交差位置からダイクの走向はM5.5断層の走向・傾斜と調和的であることがわかった。また、ランプロファイア・ダイクの区間には、P波速度が低く、磁化率が高い部分があり、そこは、横山（2020）が確認したタルクが多い場所と一致した。

X線CTスキャンは、全輸入コアに対して医療用（分解能 0.35mm 以下）のものを、一部のコアに対しては産業用（分解能数十 μm ）のものを実施してある。本ポスターでは、これらから読み取れるCT値の3次元分布の特徴との比較もとりまとめて報告する予定である。

謝辞：

掘削と孔内検層はICDPとMoab Khotsonong鉱山、高知コアセンターの非破壊分析は同センター共同利用、南アフリカと高知コアセンターでの活動はJSPSCore-to-Core Program, 災害の軽減に貢献するための地震火山研究計画、立命館大学の支援を頂いた。南アフリカでは、CSIR、Witwatersrand大、CGSの方々のお世話になった。

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S10. 活断層・歴史地震

2021年10月15日(金) 15:30 ~ 17:00 | P6会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S10P-01] 長者ヶ原一芳井断層の重力異常解析

松井 佑樹¹、澤田 明宏¹、○平松 良浩¹ (1.金沢大学)

15:30 ~ 17:00

[S10P-02] 1914年桜島地震における鹿児島市内の石垣被害と震度分布

○小林 励司¹ (1.鹿児島大学)

15:30 ~ 17:00

[S10P-03] 日記史料を用いた江戸末期の疑わしい被害地震の検証（1）

○原田 智也¹、西山 昭仁²、片桐 昭彦³、水野 嶺⁴、吉岡 誠也⁴ (1.無所属、2.京都大学防災研究所、3.新潟大学災害・復興科学研究所、4.東京大学地震研究所)

長者ヶ原一芳井断層の重力異常解析

Gravity anomaly analyses of the Chojagahara and Yoshii faults

松井 佑樹¹、澤田 明宏¹、*平松 良浩¹

Yuki Matsui¹, Akihiro Sawada¹, *Yoshihiro Hiramatsu¹

1. 金沢大学

1. Kanazawa University

・はじめに

長者ヶ原一芳井断層は、広島県南東部から岡山県南西部にかけて北東－南西走向の右横ずれ断層で、神辺平野から南西に延びる長者ヶ原断層と北東に延びる芳井断層から構成される（地震調査委員会, 2016）。両断層の間隔は最大約3 kmであるが、地下の断層構造の連続性については明らかではない。本研究では長者ヶ原一芳井断層周辺で重力測定を実施し、重力異常データの解析から得られた長者ヶ原一芳井断層の断層構造について報告する。

・データおよび解析方法

長者ヶ原一芳井断層周辺地域において、2020年9月13日～19日と2020年11月29日～12月5日に、計212点の重力測定を実施した。使用した重力計は金沢大学所有のScintrex社製CG-3M型重力計である。測定点の緯度、経度および標高は、GNSSにより決定した。解析には金沢大学既存重力データに加え、国土地理院(2006), Yamamoto et al. (2011), 産業総合技術研究所地質調査総合センター(2013)の重力データを使用した。地形補正とブーゲー補正に用いる仮定密度は、産総研(2009)が岡山地域でABIC最小化法により求めた 2550 kg/m^3 を使用した。重力データは通常の補正に加え、10mDEMによる地形補正、ローパスフィルター処理、トレンドの除去を行った。この重力異常に対して重力勾配テンソル解析を行い、水平一次微分(HD), 鉛直一次微分(VD), 鉛直一次微分で正規化した水平一次微分(TDX), 次元指数(Di)を計算した(楠本, 2015; Hiramatsu et al., 2019)。また、神辺平野の断層を横断する測線で二次元タルワニ法による密度構造解析を行った。

・結果と考察

長者ヶ原一芳井断層周辺でのHD, VD, TDXの分布は、それほど明瞭ではないものの、概ね両断層に沿ってHDとTDXの高い値やVDのゼロ等値線が見られ、地下の断層構造を反映したものと考えられる。広域の解析結果からは神辺平野内ではそのような特徴的な分布は確認できなかったが、神辺平野周辺に範囲を限定した解析では断層沿いにTDXの高い値が分布するようにも見える。両断層上では概ね $Di < 0.5$ であり、二次元的な地下構造を示す。一方、芳井断層と神辺平野の断層の間では $Di > 0.5$ となり、地下の断層構造の不連続性が示唆される。神辺平野の断層を横断する測線での二次元タルワニ法による密度構造解析からは、地下約400 mに鉛直変位量60 mの断層構造を仮定した場合に観測された重力異常値が再現されることが示された。

・謝辞

本研究では、国土地理院, Yamamoto et al. (2011), 産業総合技術研究所地質調査総合センターによる重力データを使用しました。現地での重力測定では、金沢大学の稲生健人、深田雅人、山本史に協力いただいた。記して感謝します。

1914年桜島地震における鹿児島市内の石塀被害と震度分布

Damages of stonewalls and seismic intensity distribution of the 1914 Sakurajima earthquake in Kagoshima city, Japan

*小林 励司¹

*Reiji KOBAYASHI¹

1. 鹿児島大学

1. Kagoshima University

1914年1月12日、桜島大正噴火が継続している中、マグニチュード (M) 7.1の地震が発生した（以降、1914年桜島地震と呼ぶ）〔例えば、今村 (1920)、Omori (1922)、宇津 (1979)〕。この地震による死者数は29人であり、桜島大正噴火の全体の死者数の半分以上を占めている〔例えば、今村 (1920)〕。鹿児島市内においては12人が石垣または石塀の倒壊によって亡くなっている〔鹿児島新聞記者十餘名 (1914)〕。

この地震について小林・他 (2017) は武村・虎谷 (2015) の方法を使って住家の全潰率と全半潰率から鹿児島市内の震度を評価した。その結果、先行研究の今村 (1920) の震度Ⅳや深見 (2000) の震度6弱の領域と、本研究の震度6弱以上の領域とは調和的であった。しかし、今村 (1920) の震度Ⅰ～Ⅲや深見 (2000) の震度4～5強と、本研究の震度階級とはあまり調和的ではなかった。今村 (1920) や深見 (2000) では石塀倒潰率を考慮しているのに対し、本研究では考慮していないことが要因と考えられた。

そこで、深見 (2000) の方法を参考にして、石塀倒潰率を考慮した震度の評価を行った。深見 (2000) は「高級住宅街（平之・東千石・西千石など）においては、家屋倒壊率が0%であっても、石塀倒壊率が顕著（50%以上）な地域」を震度5強、「石塀倒壊率が数%～49%」を震度5弱とした。しかし、この方法の妥当性を定量的に検証したものはなかった。そこでこの妥当性を文献調査によって確認することにした。

内田 (1915) は鹿児島市で使われていた複数の石材の強度を検討しており、一部の種類を除いて極めて脆弱としている。さらに内田 (1915) は接合面に使われている材料や基礎などを詳しく検討している。今村 (1920) は内田 (1915) の結果をまとめて、1000 mm/s/s 前後の水平動で傾倒する、としている。震度と加速度とは単純には結びつけられないが、1000 mm/s/sであれば震度5弱は妥当であろう〔例えば気象庁 (1996)〕。

震度階級解説表では、塀の被害の記述がある。現在の気象庁震度階級関連解説表では、塀の中でも、ブロック塀での記述となっている。東京都総務局災害対策部 (1983) は震度階級解説表において、ブロック塀に加えて大谷石塀についても記述している。震度5弱で「施工の悪い大谷石塀は倒れるものがある」、震度5強で「大谷石塀はほとんど倒れる」としている。この解説表では、一応の目安として「……ものがある」という表現は「震度階に特徴的に現れ始めるといった程度の現象で、上記のように現象を量的に表現できかねる場合」（ここで、上記というのは、量的に表現できている他の目安を示している）、「ほとんど」は「80～90%」に対応するとしている。1914年の鹿児島市における石塀と、1980年頃の大谷石塀との違いが不明であるので、この記述をそのまま当てはめて良いかも不明ではある。しかし、深見 (2000) が採用した、倒潰率数%～49%を震度5弱、50%以上を震度5強とする評価基準は、東京都総務局災害対策部 (1983) の震度階級解説表と大きく矛盾することはないように思われる。

本研究と深見 (2000) の方法を統合すると、武村・虎谷 (2015) の方法で震度4であっても、石塀倒潰率が5%以上50%未満の時に震度5弱と評価した（深見 (2000) の数%を本研究では5%とした）。また、武村・虎谷 (2015) の方法で震度4-5弱であっても、石塀倒潰率が50%以上の時に震度5強と評価した。

その結果、石塀倒潰率が50%以上である中央部の新照院町、平之町、西千石町において、震度4から震度5強に2階級大きくなり、その周囲でも震度が1階級大きくなった。これらの地域は氾濫原低地や三角州・海岸低地となっており、かつ盛土となっている。こうした地盤によって、家屋より石塀に影響しやすい強震動となったのかもしれない。

この一連の研究は小林 (2021, 地震第2輯) で公表された。

日記史料を用いた江戸末期の疑わしい被害地震の検証（1）

Verification of the doubtful damaging earthquake in the late Edo period by using historical diary records (1)

*原田 智也¹、西山 昭仁²、片桐 昭彦³、水野 嶺⁴、吉岡 誠也⁴

*Tomoya HARADA¹, Akihito NISHIYAMA², Akihiko KATAGIRI³, Rei MIZUNO⁴, Seiya YOSHIOKA⁴

1. 無所属、2. 京都大学防災研究所、3. 新潟大学災害・復興科学研究所、4. 東京大学地震研究所

1. Independence, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recover, Niigata University, 4. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

『日本被害地震総覧599-2012』（宇佐美・他，2013）には、震央やマグニチュードが推定できない被害地震が数多く掲載されており、中には「疑わし」、「後考をまつ」、「要再考」と記述されている地震もある。これらの地震の多くは、後世の史料や乏しい情報の文献に基づいているため、その存否は疑わしい。このような地震は、例えば、南海トラフ巨大地震発生前後における内陸地殻内の地震活動を検討する際などに、取り扱いが非常に難しく、実態の検討が急務である。しかしながら、その検討は、収集・翻刻された複数の史料の記述内容を、地震学者自らが読解する必要があり、大変な労力と時間を伴うためにこれまであまり進捗していない。

最近、歴史学研究者が中心となって、江戸時代末期における日本全国の日記史料に記録された有感地震のデータベース化が開始された（西山，2019）。現在、52点の日記史料における有感地震の記録が「日記史料有感地震データベース（試作版）」（西山・他，2020）として公開されており（「日記史料DB」），疑わしい地震の検討が容易になってきた。「日記史料DB」では、「有感地震のない日についてもデータ化している」と説明されているように，“地震があった日”と同じく“地震がなかった日”が分かる。同時代史料における“地震がなかった日”の情報は、地震の存否を明らかにするために非常に重要である。すなわち、後世の史料や文献に被害地震の存在が記述されていても、複数の日記史料に被害や揺れの記録がなければ、その存在は明確に否定される。逆に、被害記録の少ない地震であっても、複数の日記史料に記録があれば、その存在は確実となる。

本研究では、嘉永元年（1851年4月）以降江戸時代末期に発生した存否の疑わしい被害地震について、「日記史料DB」の有感記録を用いた検討を行った。現在、「日記史料DB」で公開されている有感記録の期間は、一部の日記史料を除き嘉永六年(1853年)～安政三年(1857年)であるため、期間外の地震については、他の日記史料の原典や信頼できる翻刻史料を用いて検討した。今後、嘉永元年以前に発生した地震についても、順次検討を進めていきたい。

現時点の検討結果は以下の通りである。①**嘉永七年閏七月二日(1854年8月28日)八戸の地震**:「奥南温古集」(明治23年に南部家に献上された八戸藩の歴史書)にある地震。「日記史料DB」の「遠山家日記」(現青森県八戸市)、「弘前藩庁日記」(現青森県弘前市)、「門屋養安日記」(現秋田県湯沢市)、「宗尹日記」(現山形県尾花沢市)、「桜田良佐日記」(現宮城県仙台市)には、この日の地震記録はない。五日の誤りと考えられる。②**嘉永七年八月二十日(1854年10月11日)伊勢の地震**:『木曾岬村史』のみに掲載される地震。「日記史料DB」の「浄慈院日別雑記」(現愛知県豊橋市)、「竹川竹斎日記」(現三重県松阪市)、「万相場日記」(現滋賀県蒲生郡竜王町)には、この日の地震記録はない。安政二年八月二十日の台風被害の誤記と考えられる。③**安政二年六月二十三日(1855年8月5日)二戸の地震**:『南部二戸郡浅澤郷土史料』内の83歳の老人の証言(大正13年)による地震。「日記史料DB」の「遠山家日記」，「弘前藩庁日記」，「門屋養安日記」，「宗尹日記」，「桜田良佐日記」には、この日の地震記録はない。安政三年八戸沖の地震(M7.5)の記憶違いと考えられる。④**安政二年七月四日(1855年8月16日)米子の地震**:「控帳」(鳥取県立博物館所蔵)の「去る四日」を安政二年七月四日と考えたことによる地震。「日記史料DB」の「堀敦斎日記」(現鳥取県鳥取市)、「土屋家日記」(現広島県福山市)、「多度津藩日記」(現香川県仲多度郡多度津町)、「今中家日記」(現広島県広島市)、「伊予小松藩会所日

記」(現愛媛県西条市)には、この日の地震記録はない。「去る四日」は、嘉永七年十一月四日と考えて良いのではないか。⑤**安政二年十月七日(1855年12月10日)伊予の地震**:『大洲市誌』のみにある地震。「日記史料DB」の「伊予小松藩会所日記」,「今中家日記」,「広瀬久兵衛日記」(現大分県大分市),「佐伯藩日記」(現大分県佐伯市),「中村平左衛門日記」(現福岡県小倉市)には、この日の地震記録はない。嘉永七年十月七日の伊予西部の地震の誤りと考えられる。⑥**安政三年十一月十二日(1856年12月9日)益田の地震**:『益田市史』のみにある地震。「日記史料DB」の「今中家日記」,「土屋家日記」,「伊予小松藩会所日記」,「古谷道庵日乗」(山口県下関市),「中村平左衛門日記」には、この日の地震記録はない。『益田市史』には、当地に被害を与えた安政五年石見の地震(M6.2±0.2)の記述がないためその誤記と考えられる。

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S12. 岩石実験・岩石力学・地殻応力

2021年10月15日(金) 15:30 ~ 17:00 | P7会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S12P-01] 注水による誘発地震の発生過程研究に向けた寒天ゲルを用いた光弾性実験システムの構築

○吉光 奈奈¹、福山 英一^{1,2}、平野 史朗³、大寄 雅人¹ (1.京都大学、2.防災科研、3.立命館大学)

15:30 ~ 17:00

[S12P-02] 4 MHz程度まで感度を有する広帯域超音波トランスデューサの較正

○川方 裕則¹、大内 智博² (1.立命館大学理工学部、2.愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター)

注水による誘発地震の発生過程研究に向けた寒天ゲルを用いた光弾性実験システムの構築

Development of the photoelastic experimental system using gel medium to observe induced earthquakes caused by water injection

*吉光 奈奈¹、福山 英一^{1,2}、平野 史朗³、大寄 雅人¹

*Nana YOSHIMITSU¹, Eiichi FUKUYAMA^{1,2}, Shiro HIRANO³, Masato OSAKI¹

1. 京都大学、2. 防災科研、3. 立命館大学

1. Kyoto Univ., 2. NIED, 3. Ritsumeikan Univ.

近年の資源採掘技術の進歩はこれまで以上に生産率を上げることを可能にしたが、採掘の影響で発生する誘発地震がしばしば問題となっている。その一因として、ボアホールへの流体注入の影響が指摘されている。注入された流体が地殻中の既存弱面の強度を下げ、地震が発生しやすくなると考えられている。この過程における弱面や地殻内の応力変化を視覚的に観察することを目指して、本研究では寒天ゲルを用いた光弾性実験システムの確立を目指した。光弾性とは、透明な弾性体に外力を加えると応力の大きさに応じて光学的異方性が発生する現象であり、機械や構造物にかかる応力の解析にしばしば利用されてきた。光弾性を地震メカニズムの研究に利用した例は、Rosakis et al. (1999, Science)やYoshioka and Sakaguchi (2008, Advanced in Geosciences)のプラスチックを用いた実験事例がある。桑野 (2015, 東レ理科教育賞 受賞作品集)や桑野・他 (2011, 日本地震学会ニュースレター)は弾性波速度の遅い寒天ゲルを利用することで、波動伝播や断層の動的破壊が観察できることを示した。

薄板状にした寒天ゲル媒質を二次元モデルとして、ボアホールを模したアクリルパイプを介して注射器から水を注入し、媒質中を水が伝播する様子や断層が滑る様子を観察する。実験では150 mm x 30 mm x 150 mmの薄型水槽にゲルを注入して固めた。媒質の作成には粉状になった寒天末を利用した。異なる濃度の試料を複数作成・比較したところ、高濃度の硬い媒質には人力での安定的な注水が困難であったため、濃度1%の媒質を解析に用いることとした。光弾性実験から得られる応力情報は主応力差と主応力方向であるが、これらの情報を視覚的に分離するために、光源-偏光板A-1/4波長板A-ターゲット媒質-1/4波長板B-偏光板B-カメラ、の順に波長板と媒質を配置することで、円偏光を用いて等色線縞（主応力差）を得た。

まず断層のない媒質に注水を実施したところ、パイプ先端からモードIで亀裂を生成しながら左右に水が浸透していく様子が見られた。その際に、開口部先端の亀裂進展方向と直交する方向に強い応力集中が認められた。また硬さの違うゲルを用いてパイプに対して45度の角度で層境界を作成したところ、層境界の破壊は弱面のない部分の破壊に比べてはるかに高速で亀裂が進展した。

観察の結果から、これまで用いられてきた光弾性媒質よりもやわらかい寒天ゲルを用いることで、媒質内における流体の動きとそれに伴う応力変化を観察できることがわかった。今後、媒質や断層により適切な強度を与えるために実験条件を精査するとともに、応力の時空間変化の定量的解析を試みる。

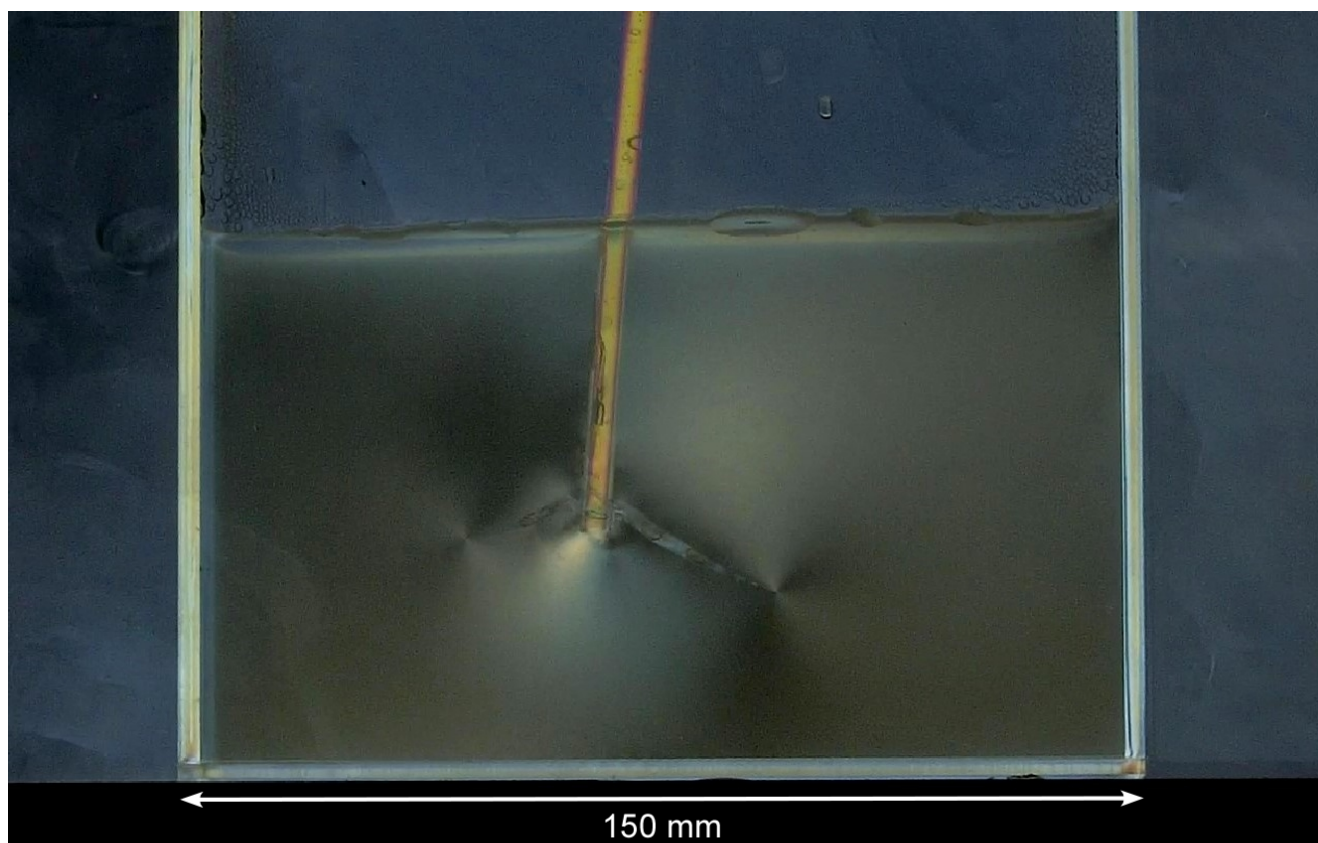


Figure: Snapshot of the photoelastic image during water injection into the gel medium.

4 MHz程度まで感度を有する広帯域超音波トランスデューサの較正

Calibration of broadband ultrasonic transducers with sensitivity up to about 4 MHz

*川方 裕則¹、大内 智博²

*Hironori KAWAKATA¹, Tomohiro Ohuchi²

1. 立命館大学理工学部、2. 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

1. College of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 2. Geodynamics Research Center, Ehime University

岩石試料の破壊にともなう微小破壊（アコースティック・エミッション、以下AE）に関し、多くの地震学的手法を用いた研究が実施されてきた。最大振幅値を利用した振幅別頻度分布の指標 m 値およびその時間変化に関する研究に端を発し、震源決定が可能になった後は、振幅を利用した簡易的な相対マグニチュードを利用した規模別頻度分布の指標 b 値、震源の時空間分布に関する研究へと発展した。近年は広周波数帯域に感度を持つトランスデューサが活用可能になり、三軸圧縮試験下では地震モーメントとコーナー周波数に関するスケーリング則がAEと自然地震で共通することが明らかにされた（例えばYoshimitsu *et al.*, 2014; GRL）。また、一軸圧縮下の水圧破碎実験においてはモーメント・テンソル推定が実施され、剪断型、開口型を中心とする様々なメカニズム解を示すAEの存在が明らかにされた（例えばTanaka *et al.*, 2021; GJI）。これらの解析は10 cmオーダーの試料を用いた試験で得られた波形に対するものであるが、より高圧下での試験の場合、試料サイズは1 cmにも満たないようなものとなる。この場合波長を考えると、これまでの広帯域トランスデューサの活用範囲上限である1-2 MHzでは十分ではなく、少なくとも4 MHz程度に上昇させる必要がある。

マルチアンビル型高圧発生装置を用いた高圧力環境においては、従来型の圧電素子を用いた計測による震源位置決定がde Ronde *et al.* (2007; GJI)によって実現されたことに端を発し、D-DIA型変形装置を用いた変形試験時のAE計測が多数おこなわれるようになった（例えばSchubnel *et al.*, 2013; Science）。これらの研究では、6個のアンビル背面に従来型の圧電素子を貼り付け、AEの初動時刻、極性、振幅を用いて、モーメント・テンソル解を得る試みがなされているが、Tanaka *et al.* (2021; GJI) などでも指摘されている通り、計器特性の補正をおこなうことは必須となる。

そこで本研究では、沈み込むスラブ内浅部の温度圧力条件下（1-2 GPa, 400-900°C）において発生するAEの高品質かつ補正可能な波形を取得し、モーメント・テンソル解の時空間分布、地震モーメントとコーナー周波数に関するスケーリング則などの解明を目指し、小型の広帯域超音波トランスデューサをD-DIA型変形装置への導入に向けて、4 MHz程度の高周波数帯域までの較正を実施した。

広帯域トランスデューサとしては、Yoshimitsu *et al.* (2014; GRL) において使用された特注仕様のもの(富士セラミックス社製5145SMAT-1152)をベースとし、信号線取り出し部分を改変したものを使用する。愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター所有のD-DIA型超高圧変形装置 Madonna IIに使用するアンビルの台座にトランスデューサを貼り付け、アンビルの試料（圧媒体）に接する側の面に貼り付けたOlympus V106探触子から疑似矩形波を送信し、その信号を計測する。また、同じ送信に対する信号をレーザー・ドップラー速度計（LDV）でも受信し、両信号を比較する。上記以外の較正に使用する信号の取得方法については、Yoshimitsu *et al.* (2011; BSSA)に準じる。

トランスデューサとLDVで取得された信号、および0-0.2 ms分の両波形（テーパー処理後）の振幅スペクトルを図1に示す。振幅スペクトルを比較したところ、4 MHz程度まではS/Nが1より高く、100kHz-4MHzの範囲においてトランスデューサによる電圧記録（単位V）の振幅スペクトルに周波数の0.84乗をかけ、 $10^{5.5}$ で割

るとLDVの速度記録（単位m/s）の振幅スペクトルと良い一致を示した。そこで、簡易的にこれをトランスデューサの特性として波形の補正を実施した。20kHz-1MHzの範囲に絞って波形比較をおこなうと（図2）、位相も含めて非常に良い一致が見られた。これより高い周波数帯においても、少しの時間ずれは見られたものの比較的似た波形が得られ、位相に関する較正も期待できる結果が示された。以上の通り、3-4 MHz付近ではLDVの感度が必ずしも高くないものの、トランスデューサでは4 MHz以下では100倍程度のS/Nが得られ、このトランスデューサを使用することで、D-DIA型超高压変形装置を用いたGPaレベルの圧力条件下での良質のAE波形を取得できる可能性が示された。

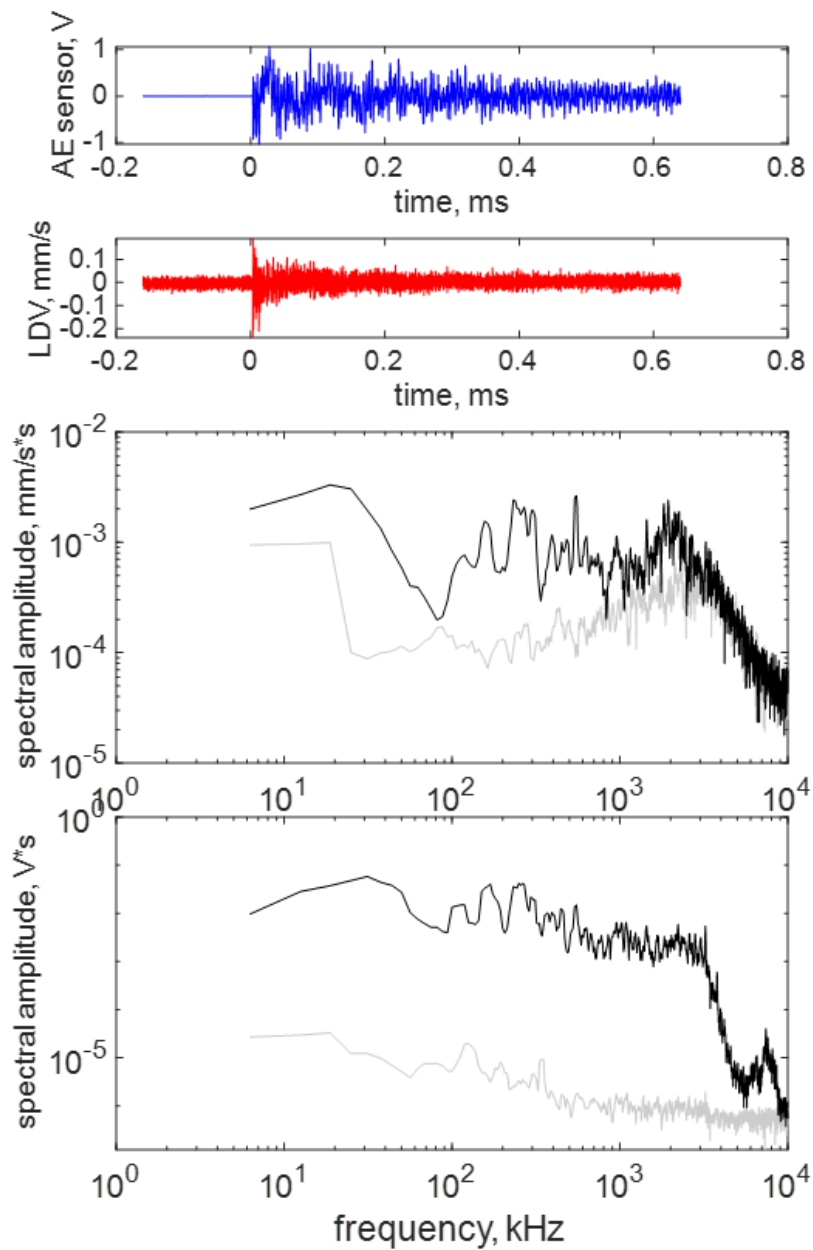


図 1. トランスデューサ (青)、LDV (赤) による波形記録 (LDVは4 MHzのLPF処理後) と両者の振幅スペクトル (黒上: トランスデューサ、黒下: LDV)。灰色はノイズスペクトル。

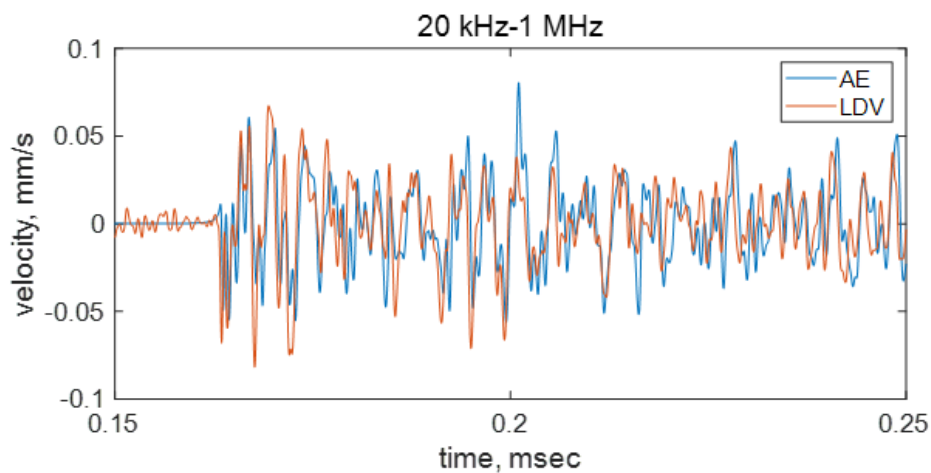


図 2. 補正後のトランスデューサ (青)、LDV (赤) による速度波形。

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S14. 地震予知・予測

2021年10月15日(金) 15:30 ~ 17:00 | P8会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S14P-01] 背景地震活動の地球潮汐相関情報に基づく地震予測モデルの効率：トンガ・ケルマディック海溝沿いのプレート境界型大地震に対して

○弘瀬 冬樹¹、前田 憲二²、上垣内 修³ (1.気象研究所 地震津波研究部、2.気象庁地震火山部、3.気象業務支援センター)

15:30 ~ 17:00

[S14P-02] 静岡県西部地域の地下水温変化と地震活動

○上久保 廣信¹ (1.浜松市立北星中学校)

背景地震活動の地球潮汐相関情報に基づく地震予測モデルの効率：トンガ・ケルマディック海溝沿いのプレート境界型大地震に対して

Efficiency of earthquake forecast models based on the information of the earth tidal correlation of background seismicity along the Tonga-Kermadec trench

*弘瀬 冬樹¹、前田 憲二²、上垣内 修³

*Fuyuki HIROSE¹, Kenji MAEDA², Osamu KAMIGAICHI³

1. 気象研究所 地震津波研究部、2. 気象庁地震火山部、3. 気象業務支援センター

1. Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute, 2. Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency, 3. Japan Meteorological Business Support Center

背景地震活動の潮汐相関が大地震前に高くなり、大地震後に低くなると報告されている。しかしながら、先行研究は特定の大地震後に回顧的に解析された結果であり、他の大地震についても同様のパターンを示すのかや、大地震とは無関係な平常時に潮汐相関が低い状態を保っているのかどうかは漠然としている。そこで本研究では、背景地震活動の地球潮汐相関情報に基づいた地震予測モデルの有効性について、トンガ・ケルマディック海溝沿いのプレート境界型地震（1977～2020年、 M_w 5.5以上、深さ70 km以浅、729個）を対象にMolchanダイアグラムを用いて検証した。その結果、ターゲット規模が M_w 7.0以上の場合については無作為な予測よりも有効とは言えなかった。ターゲット規模が M_w 6.5, 6.0, 5.5以上の場合については、無作為な予測よりも成績が良くなるケースはあったものの、最大でも確率利得は1.7であった。そのため、この地域について潮汐相関情報に基づいた予測モデル単独での実用性は乏しいといえる。このことは同時に、ターゲット地震前に必ずしも広域の背景地震活動の潮汐相関が高くなるとはいえないことを示唆する。

静岡県西部地域の地下水温変化と地震活動

Water temperature change and Seismic activity in the western region of Shizuoka Prefecture

*上久保 廣信¹

*Hironobu KAMIKUBO¹

1. 浜松市立北星中学校

1. Hamamatsu Hokusei Jhs

1 概要

静岡県西部地域では2013年5月から浜松市中郡（NG）,2016年8月から湖西 市新居（KOA）,磐田市中泉（IWN）,掛川市徳泉（KAT）にて白金测温抵抗体の水温センサーを用いた長期水温観測を行っている(図2). NGでは2014年後半から下降を続けていた水温が12月末から上昇に転じ,急激な温度上昇の後,しばらく停滞していたが最近,これまでにない上昇率での水温上昇が観測されている.

地殻の岩盤の応力が強まると深部の高圧流体は低圧環境である地殻上部へ移動し浅層地下水に混じり地下水温を上昇させるとする深部流体上昇仮説（佃,2005）[1]により静岡県西部地域の地下岩盤にかかる圧力が増加していると解釈できる.

2 KOA・NG・IWNの水温変化の同期性

図1はKOA・NG・IWNの水温変化のトレンドが変化した日の例を示したものである. 2016年12月24日にKOA・NG・IWNの3カ所で水温が上昇する変化が生じた. 2020年11月5日から11月11日にかけて3カ所の観測井で上昇していた水温が下降に転じた.2020年12月31日から2021年2月3日にかけて3カ所の観測井で下降していた水温が上昇に転じた.同時期の水温変化は地下の岩盤にかかる圧力の変化がこの地域で広範囲に生じたと考えることができる. KOAとNGはトレンドが変わる時期が近く,IWNはKOA・NGとトレンドの変わる時期が多少異なっている.地下水温変化の時期の違いから地域ごとの地下にかかる圧力の変化を推測できる可能性がある.

3 浜名湖周辺での長期スロースリップとNG水温変化

NGの水温変化は2013年の観測開始から停滞・下降を続けていたが2016年12月24日を境に上昇に転じた.これは,浜名湖周辺で観測されていた長期スロースリップが終息し地下岩盤の圧力が圧縮場となり水温変化を上昇に転じさせたと考えられる.

上久保(2018)は浜名湖周辺での長期スロースリップモーメント変化とNGでの水温変化との相関について相関性(相関係数0.91)があることを示した(図3) [2].

スロースリップ進行期は,陸側地盤の南東方向への移動により,陸側岩盤は膨張し圧力が低下する.間隙内に存在する高温の流体は圧力の低下により,地表への流入量が低下し地下水温は低下すると考えることができる.

スロースリップ停滞期には陸地岩盤は圧縮され圧力が上昇する.間隙内に存在する高温の流体は圧力の増加により地表への流入量が増加し地下水温は上昇すると考えることができる.

4 スラブ内地震発生率とNG水温変化率の関係

静岡県西部地域のスラブ内地震（30km-60km M1以上）の発生率は2017年12月頃から0.076個/日から0.100個/日に32%程増加している(図4). フィリピン海プレートが大陸プレートに沈み込みにくくなり,スラブ内にかかる圧力が増してスラブ内の地震発生率が増加していると考えられる.

NGの水温上昇率は2018年1月頃より+0.067℃/年から+0.093℃/年に39%程増加している.

プレート境界付近にかかる圧力が2018年1月頃より増加し,地下深部の間隙水が浅部帯水層に混入する流量が増

加して水温変化率を増加させていると考えられる。

5 御前崎の沈降状況とNG水温変化

これまで直線的に沈み込みを続けてきた御前崎の沈降状況は2020年4月から2021年3月にかけて沈降が停滞しているように見える(図5)。この期間、NGの水温変化は上下を伴いながらも停滞している。この地下水温変化の停滞は御前崎の沈降の停滞により地下岩盤に膨張領域と圧縮領域が交互に生じ、この付近に存在する間隙水の大陸プレート浅部への流量を変化させた可能性がある。

6 参考文献・資料

[1] Tsukuda, T., K. Goto and O. Sato, 2005, Bull. Earthq. Res. Inst., 80, 105-131.

[2] 上久保廣信, 静岡県西部地域の地下水温変化と浜名湖周辺の長期スロースリップとの相関性について, 常葉大修論, 2018.

図1 KOA・NG・IWNの水温変化と主な同期時期

図2 KOA・NG・IWN・KATの観測点位置

図3 気象庁浜名湖周辺のモーメントの累積グラフ(第375回地震防災対策強化地域判定会気象庁資料)に浜松中郡(NG)水温変化(1か月移動平均値)を上下反転させて重ねたもの

図4上・中 静岡県西部地域の地震累積回数(2013年1月~2022年7月まで M1以上 深さ30-60km)。図の作成には東大地震研究所TSEISweb版の気象庁データJMA--PDEを使用した

図4下 NG水温上昇率(2017年1月~2018年6月と2018年7月~2019年3月)

図5 NG水温変化(矢印の期間は2020.4~2021.3)と御前崎沈降状況(気象庁令和3年度8月6日判定会資料に(矢印の期間2020.4~2021.3等を加筆))

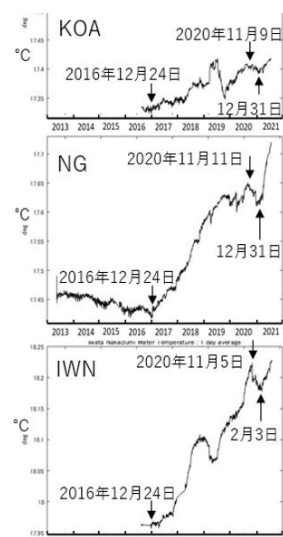


図1 KOA・NG・IWNの水温変化

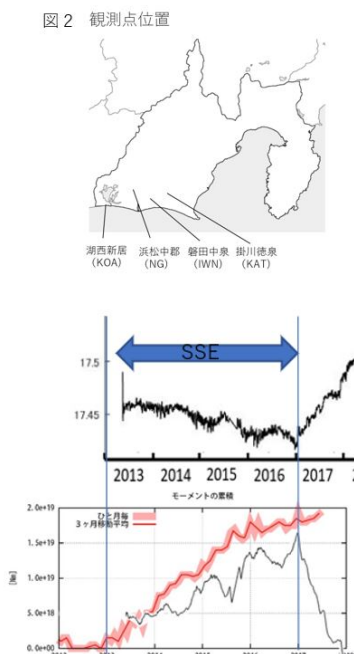


図2 観測点位置

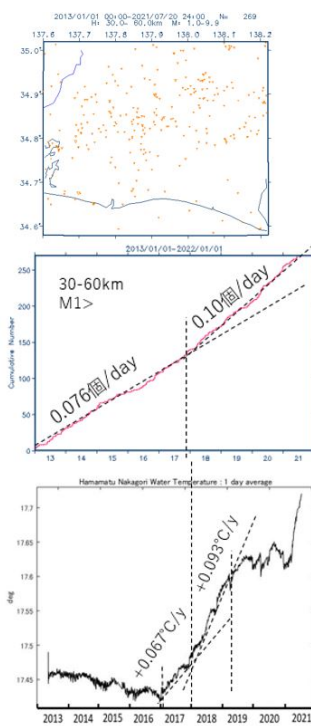


図3 スロースリップモーメントとの相関

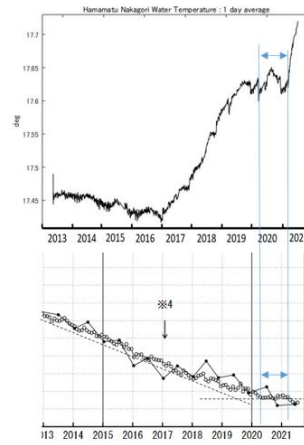


図4 地震活動変化率とNGの水温変化率

図5 NG水温変化と御前崎沈降状況

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S16. 地盤構造・地盤震動

2021年10月15日(金) 15:30 ~ 17:00 | 会場 P9会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S16P-01] 国道4号線沿いのDAS観測により捉えられた移動車両が励起する表面波を直接利用した浅部S波速度構造の推定

○矢武 克啓¹、中原 恒¹、江本 賢太郎¹、西村 太志¹ (1.東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻 固体地球物理学講座)

15:30 ~ 17:00

[S16P-03] 1943年鳥取地震による地震断層近傍における微動探査－鳥取市宮谷・大塚地区－

○野口 竜也¹、蘆田 龍¹、小林 和生²、西村 武³、吉川 菜緒¹、香川 敬生¹ (1.鳥取大学工学部社会システム土木系学科、2. (株) 荒谷建設コンサルタント、3.鳥取大学大学院工学研究科)

15:30 ~ 17:00

[S16P-04] 高知平野の表層地盤の数値モデル高精度化のための地盤震動観測

○山田 伸之¹ (1.高知大学)

15:30 ~ 17:00

[S16P-05] 山梨地方における浅部・深部統合地盤構造モデルの構築

○先名 重樹¹、若井 淳¹、佐藤 将²、谷田貝 淳²、松山 尚典²、藤原 広行¹ (1.国立研究開発法人防災科学技術研究所 マルチハザード評価研究部門、2.応用地質)

15:30 ~ 17:00

[S16P-06] 常時微動H/Vによる薩摩硫黄島におけるカルデラ境界探索の試み

○山田 雅行¹、伊藤 佳洋¹、長坂 陽介²、野津 厚²、長尾 毅³、大岩根 尚⁴ (1. (株) ニュージェック、2.港湾空港技術研究所、3.神戸大学、4.合同会社むすひ)

15:30 ~ 17:00

[S16P-07] 中央構造線三野断層の断層破碎帯での動的変形特性

○香川 敬生¹、木村 一成² (1.鳥取大学 工学部 社会システム土木系学科、2.(株)ナイバ愛媛支店)

15:30 ~ 17:00

[S16P-08] 大規模盛土造成地における微動探査を用いた地盤震動特性の把握 -鳥取市北園の事例-

○西村 武¹、西村 菜沙²、野口 竜也²、香川 敬生² (1.鳥取大学大学院 工学研究科 博士後期課程 社会基盤工学専攻、2.鳥取大学 工学部 社会システム土木系学科)

15:30 ~ 17:00

[S16P-09] 地震波干渉法に基づくデコンボリューション波形に関する基礎的検討

○仲野 健一¹、上林 宏敏² (1.株式会社 安藤・間、2.京都大学)

15:30 ~ 17:00

[S16P-10] 3次元地震動シミュレーションおよびコヒーレンスモデルに基づく隣接地点間の地震動の空間変動特性評価

○徳光 亮一¹、山本 優¹、内山 泰生¹、大野 晋² (1.大成建設、2.東北大学)

15:30 ~ 17:00

[S16P-11] SITES法によるスマトラ断層の断層面推定 (2)

○山品 匡史¹、大久保 慎人¹、田部井 隆雄¹、UMAR Muksin²、ISMAIL Nazli² (1.高知大学、2.Syiah Kuala 大学)

国道4号線沿いのDAS観測により捉えられた移動車両が励起する表面波を直接利用した浅部S波速度構造の推定

Estimation of shallow shear-wave velocity structure from vehicle-induced surface waves on DAS records along Route 4

*矢武 克啓¹、中原 恒¹、江本 賢太郎¹、西村 太志¹

*Katsuhiko YABU¹, Hisashi NAKAHARA¹, Kentaro EMOTO¹, Takeshi NISHIMURA¹

1. 東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻 固体地球物理学講座

1. Solid Earth Physics Lab., Geophysics, Science, Tohoku University

Distributed Acoustic Sensing (DAS) は、光ファイバーケーブルに入射したレーザーパルスの後方散乱波を利用することで、光ファイバーケーブルに沿った軸歪（速度）を測定する技術である。光ファイバーケーブルを多チャンネルの軸歪計として利用できるため、超稠密な地震波観測手法として近年急速に導入が進んでいる。DASで記録される常時微動を用いた地震波干渉法により浅部速度構造を求める研究が近年多数報告されている。しかしながら、多くの光ファイバーケーブルは道路直下に埋設されているため、DAS記録には自動車による道路交通振動が含まれ地震波干渉法の適用を困難にする。我々はこれまでに、複数の移動する自動車によって励起された表面波の分散曲線を求める手法を開発した(Yabu et al., IAGA-IASPEI 2021)。本研究では、国道4号線沿いにおけるDAS観測記録にこの手法を適用して分散曲線を求め、浅部S波速度構造を推定した。

使用したデータは、宮城県仙台市から大崎市古川にかけての国道4号線直下に埋設されている光ファイバーケーブルを使用したDAS記録（江本・他，2020地震学会）である。測定期間は2020年1月10日から2月10日の1か月間、チャンネル間隔とゲージ長はともに 5 m、チャンネル数は 9854（測線長約 49 km）、サンプリング周波数は 500 Hz である。

DAS記録には自動車による振動が頻繁に記録されている。レコードセクションを見ると、1台の自動車は、道路上の凹凸により1, 2秒ごとに表面波を励起し、前後数百mにわたって伝播していく様子がわかる。まず、自動車が励起する表面波の伝播が明瞭に見えている 250 mの区間を抽出し、自動車が通過する時刻を基準にそれぞれのチャンネルから1秒間の時間窓の記録を目視で選ぶ。各チャンネルの記録にトレンド除去やテーピングなどの前処理を行った後、Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) [Park et al., 1999] を用いて表面波の分散スペクトルを計算した。移動する車両の平均速度に合わせて使用するチャンネルと時間窓を変えながらこの操作を行い、さらにこれを複数の車両に対して同様の操作を行って100 mのセクション毎に平均することで分散曲線のS/Nを向上させた。S波速度構造の推定の際には、 $V_s = 1100$ m/s より深い構造はJ-SHIS（防災科学技術研究所, 2021）のデータを用い、より浅部は試行錯誤的に構造を仮定しながら、得られたレイリー波の複数のモードの分散曲線を説明できる構造を決定した。モードが見えにくい場合には、隣接するセクションの分散スペクトルも参考にした。

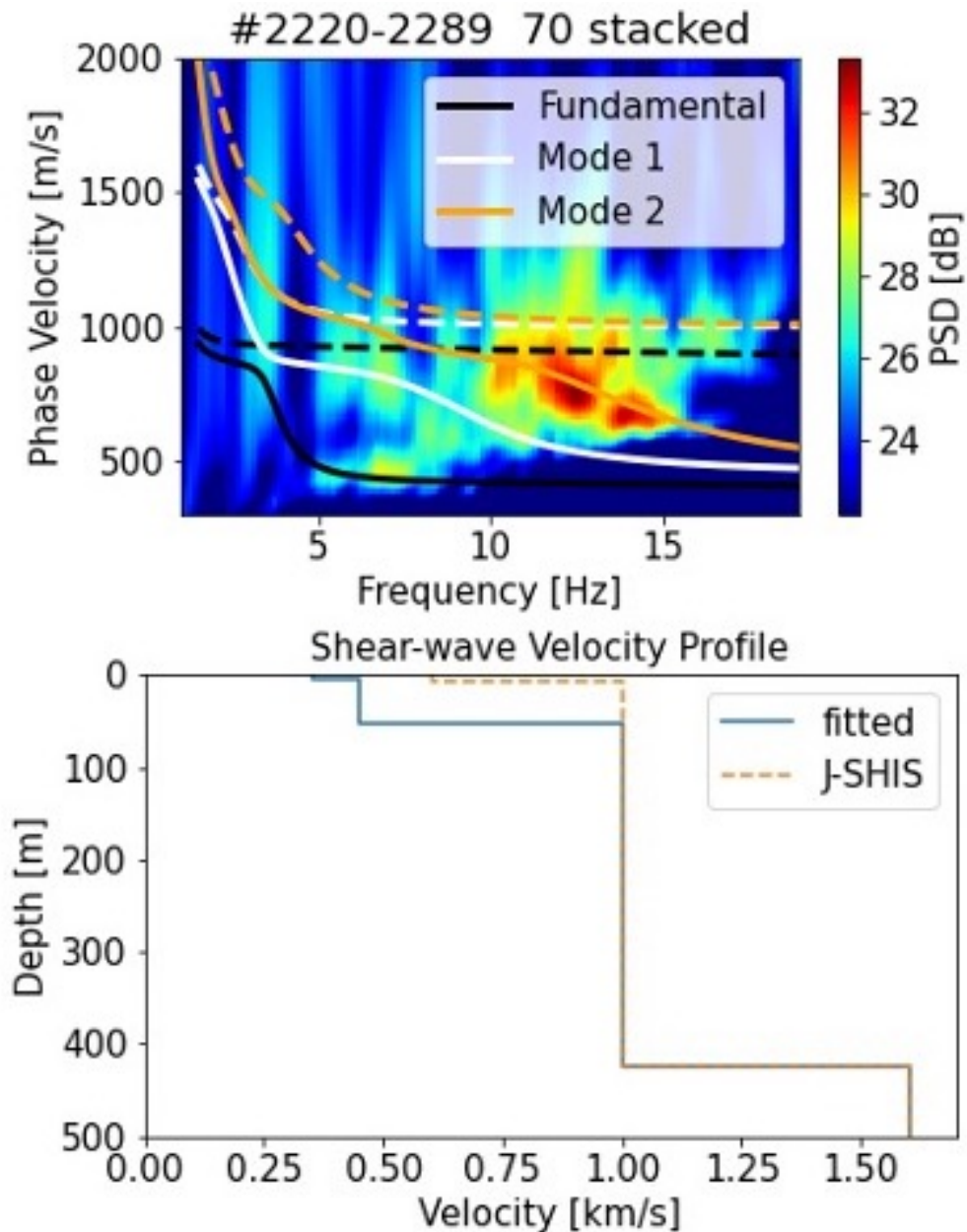
解析の結果、移動する車両に沿って時空間平均をとることで、空間分解能は低下するものの、5 kmにわたり空間的に連続的な分散曲線が得られた。レイリー波の基本モードと思われる曲線が卓越する場所だけでなく、例えば図のように、高次モードがよりはっきりとみえるセクションも観測された。このセクションではJ-SHISの速度構造に比べて浅層でより遅いS波速度が求められた。

本研究は、移動する車両を活かし、道路に沿って連続的に分散曲線を求め、速度構造を推定した。分散曲線

の空間平均を取ることでS/N比を高めることができ、また、速度構造を求める際には隣接セクションの情報も参照できるが、速度が不連続に急速に変化する場所では明瞭な分散曲線が得られない可能性がある。しかしながら、本研究の手法によりそのような場所やS/N比が極端に小さい場所を除き、空間的に連続して速度構造を得ることが可能になる。

謝辞

本研究は国土交通省所有の光ファイバーケーブルを使用した。DAS観測では、仙台河川国道事務所、東北大学大学院理学研究科の山本希氏、寒河江皓大氏、Gugi Ganefianto氏の協力を得た。



(上図) 得られた分散スペクトル. 実線はフィッティングした曲線, 破線は初期モデル(J-SHIS)を表す.

(下図) 推定した速度構造と初期モデルの比較.

1943年鳥取地震による地震断層近傍における微動探査－鳥取市宮谷・大塚地区－

Microtremor Survey near the Yoshioka Fault Caused by the 1943 Tottori Earthquake - Case of Miyadani and Ohtsuka area, Tottori City -

*野口 竜也¹、蘆田 龍¹、小林 和生²、西村 武³、吉川 菜緒¹、香川 敬生¹

*Tatsuya NOGUCHI¹, Ryo Ashida¹, Kazuki Kobayashi², Isamu Nishimura³, Nao Yoshikawa¹, Takao Kagawa¹

1. 鳥取大学工学部社会システム土木系学科、2. (株) 荒谷建設コンサルタント、3. 鳥取大学大学院工学研究科

1. Tottori University, 2. Aratani Civil Engineering Consultants CO.,LTD., 3. Graduate School of Engineering, Tottori University

1943年の鳥取地震により生じた鹿野・吉岡断層において、地震断層ごく近傍の地盤震動特性を把握するために、各種地下構造調査が行われており、これらの調査の結果、断層に伴う地下構造の変化が地盤震動特性に影響を及ぼしていることが示唆された(野口他, 2021)。本研究では、新たに吉岡断層ごく近傍の地表変位が確認されている(西田他, 1993, 金田他, 2002)宮谷地区および大塚地区で稠密な微動観測を実施し、地盤震動特性を調べた。

微動の単点3成分観測は、2020年8月28日、11月5日に、宮谷地区で24点、大塚地区で41点の計65点で行った。さらに、2021年7月15日、16日に大塚で10～20m間隔での稠密観測を55点で実施した。アレイ観測は、大塚地区において、2021年8月28日、11月5日、2021年7月16日に4箇所で行った。4台の地震計を円の中心に1台、円周上に3台を等間隔に配置し、アレイ半径1, 5, 10, 30mとして観測した。地震計はJU410(白山工業)を用い、サンプリング周波数は単点3成分観測では200Hz、アレイ観測では1000Hzもしくは200Hzとした。観測時間は単点3成分観測では1か所につき10分間、アレイ観測では1展開につき15分間とした。

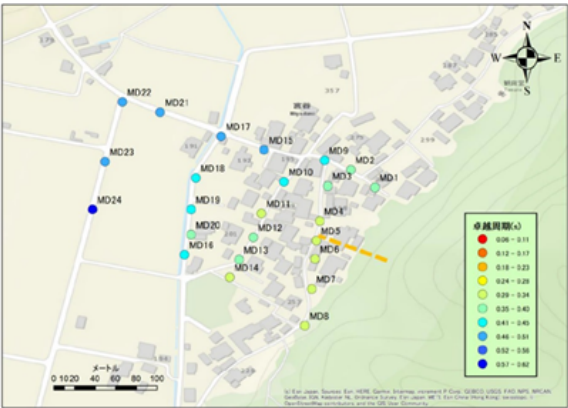
解析について、微動の3成分の記録については、20.48秒間の区間を5区間以上選定し、各成分のフーリエスペクトルを求め、平均スペクトルとし、水平動と上下動のスペクトル比(H/V)を求め、卓越周期、ピーク値、形状などの特徴を調べた。また、断層を横切るライン上の観測点では、微動波形から10秒間抽出し、0.1～0.5秒のバンドパスフィルターをかけ粒子軌跡を求めて比較した。アレイ観測の同時記録についてはCCA法(Cho, et. al., 2007)に基づき位相速度を推定した。得られた位相速度とアレイ中心のH/Vから、レイリー波基本モードによるフォワードモデリングによりS波速度構造を推定した。

宮谷地区については、断層を挟んで北側が南側より卓越周期が長く、北落ち段差構造の影響を受けていると考えられる。また、断層の南側でH/Vの形状に違いがみられ、これは断層の破碎帯の影響と考えられる。微動の粒子軌跡は、断層変位の走向である北55°西に概ね沿った方向に偏向する楕円形上を示すことがわかった。

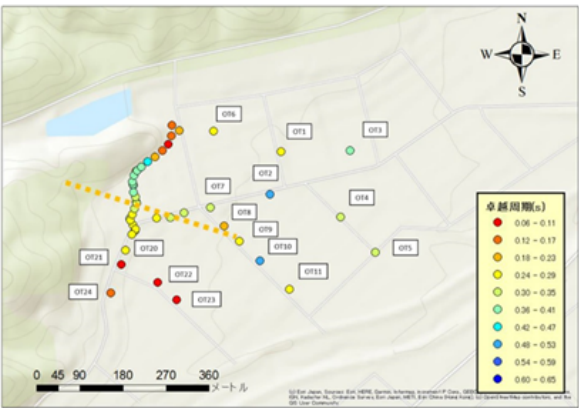
大塚地区については、断層線を境に北側で卓越周期が変動し、またピークの大きさも大きくなることがわかった。これは、断層破碎帯や段差構造などの断層運動に伴う地盤構造の変化の影響と考えられる。微動の粒子軌跡から、断層変位の走向である北70°西または北80°西に偏向する楕円形上を示す観測地点が多くみられ、断層直上付近では円形状に近くなることがわかった。地盤構造モデルとしては、1層目Vs=170m/s(シルト)の層が薄く堆積し、2層目Vs=500m/s(砂)の層が20m、3層目Vs=700m/s(礫)の層が30m堆積していることがわかった。また、3層目のVs=700m/sと4層目のVs=1500m/sとの境界が、H/Vの長周期側の

ピークに対応していることがわかった。

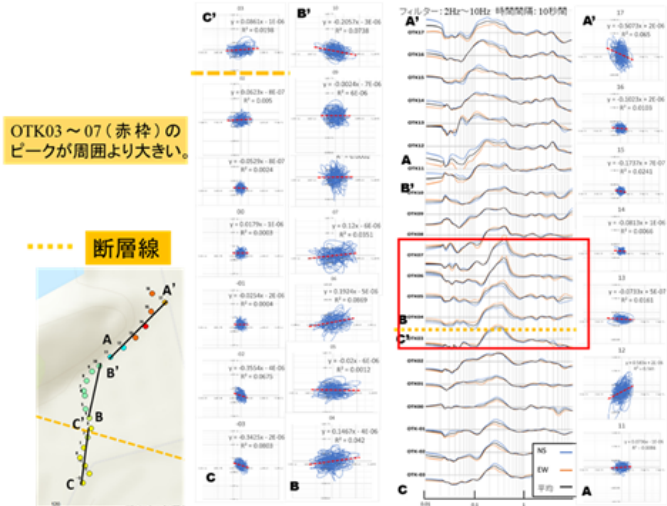
参考文献：野口・他（2021）：土木学会論文集A1（構造・地震工学）Vol.72, No.4, [特]地震工学論文
集，西田・他（1993）：鳥取大学教養部紀要，27，金田・他（2002）：活断層研
究，Vol.2002, No.21.，Cho, et. al.（2006）：J. Geophys. Res. 111



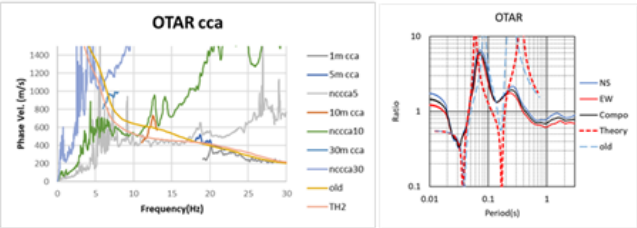
宮谷地区の卓越周期分布図



大塚地区の卓越周期分布



大塚地区の断層近傍のH/Vと粒子軌跡



位相速度分散曲線

アレイ中心点のH/V

地盤構造モデル

H[m]	ρ [t/m ³]	Vp[m/s]	Vs[m/s]
3	1.7	1480	170
20	1.9	1730	500
30	2.1	2070	700
70	2.2	2620	1500
-1	2.4	4070	2500

大塚地区の地盤構造推定結果

高知平野の表層地盤の数値モデル高精度化のための地盤震動観測

Microtremor Observation for Numerical Modeling of Subsurface Velocity Structure in the Kochi Plain

*山田 伸之¹

*Nobuyuki YAMADA¹

1. 高知大学

1. Kochi University

地震動評価のための地盤構造調査は全国各地で実施され、地盤構造モデルの構築・更新がなされている。今回対象にした高知平野（狭義の土佐平野）は、北側を四国山地、南側を標高300～400mの山地で囲まれ、南北数km東西20～30km程度で、比較的古い時代の地質で囲まれた小さな平野である。地震基盤(V_s : 3000m/s)相当層上面の深さは200～400m程度[J-SHIS]となっているが、大阪平野や関東平野のような地震基盤で囲まれた明瞭な盆地構造は示されていない。この平野の地形や表層地質、四国南部地域の地質の成因[例えば、産総研(2018)]からは、変化に富んだ複雑な地質・地下構造であることが窺える。高知平野においては、常時微動の単点観測データに基づく表層地盤構造の推定結果[例えば、大石・他(2012)]やボーリングデータ[高知地盤公開情報サイト]が多数存在し、土質とN値からS波速度に換算するなどのモデルも提案[例えば、山本・他(2010)]されてはいるものの、物理探査データに基づく速度構造情報が整理された事例は限られている[例えば、大堀・他(2013)]。こうした小規模の平野において、地震動評価のための数値モデルの高精度化のために、平野規模や地形の変化具合に見合った密度での面的な速度構造情報の把握は必要なことであると考えられる。

そこで、対象地域の速度構造情報を得ることを目的に、既往の研究成果を参照しながら、2018～2020年にかけて実施した常時微動の観測記録をもとに、微動特性と表層地盤構造について報告する。微動の観測は、高知城付近を通過する土佐平野を南北に縦断する測線（計87点）を設定した。この測線の近隣にはK-NET高知や気象台、自治体震度計の観測点があり、地震動データの活用も可能である。この測線は、平野の北端と南端および中央（高知城付近）で標高が高くなり古い時代の層が露頭する。また、南へは、土佐平野南側の山地を貫き平野の外側の海岸まで測線を伸ばしている。こうした測線は、既存のボーリングデータが複数存在し参照もできる。観測には、ポータブル3成分強震計(SMAR)を用い、各地点で20分程度の収録を実施した。一部の地点は、①同じ位置で数か月毎の複数回の収録、②複数地点での同時収録を実施した。

こうして得られた記録から、水平動/上下動スペクトル比 (H/V) を算出した。また、大堀・他(2013)から物性値を引用し、この H/V 比の山谷の周期が合うような層厚を求めた。こうして得られた測線下の表層地盤構造の推定し、ボーリングデータによる地質断面図との比較を行った。また、平野中央の岩盤地点の高知城公園での定期的な観測データのフーリエスペクトルからは、常にNS成分が大きくなる傾向が見られ、水平成分記録による粒子軌跡から、その長軸方向は $N15\sim25^\circ W$ 方向となり、この傾向は、ほかの地点では見られない特徴的なものであった。

対象とした平野での常時微動の観測とその分析は、過去にも多くの試みがなされているが、ここで得られた観測記録において、微動特性を提示するとともに、詳細な表層地盤構造の推定に結び付けることによって、既存のものにさらに詳細な速度構造モデルを作成することが可能と考えられる。現在、上記の測線に沿う位置での小規模の微動アレイ観測を実施し、地点毎の速度構造を得ることを試みている、今後、微地形などを考慮した速度構造のモデル化と数値計算等で地盤構造モデルの妥当性などを確認したい。

なお、この報告の内容の一部は、高知大学理学部・理工学部の卒業研究：森有紗氏(2018年度)、松園龍汰氏(2019年度)、石川晃大氏(2020年度)の成果によるものです。

山梨地方における浅部・深部統合地盤構造モデルの構築

Modeling of subsurface velocity structures from seismic bedrock to ground surface for Yamanashi region

*先名 重樹¹、若井 淳¹、佐藤 将²、谷田貝 淳²、松山 尚典²、藤原 広行¹

*Shigeki Senna¹, Atsushi Wakai¹, Tadashi Satou², Atsushi Yatagai², Hisanori Matsuyama², Hiroyuki Fujiwara¹

1. 国立研究開発法人防災科学技術研究所 マルチハザード評価研究部門、2. 応用地質

1. NIED, 2. OYO Corporation

1. はじめに

これまでに防災科研では、強震動予測精度向上のため、関東、東海および熊本地方の浅部・深部統合地盤構造モデルの構築を行ってきた。本検討では、関東と東海地方に隣接する山梨地方を対象とした浅部・深部統合地盤構造モデルの構築について取り上げる。モデル構築手順は基本的に、先行してモデル化を実施している関東地域の方法(例えば先名他,2017)に従う。具体的には、まず、既存の地盤モデル、これまでに収集したボーリングデータ(約3,000本超)や山梨県の地震被害想定調査、文科省の交付金調査(2002)等の地質情報等に基づき初期地盤モデルを作成した。そして、稠密な微動アレイ探査を実施して得られた地盤震動特性等を用いて、初期地盤モデルを調整した。本稿では、主に甲府盆地全域について上記内容および修正地盤モデルの特徴等について報告する。

2. 初期地盤モデルの構築

初期地盤モデルについては、深部地盤は、基本的には防災科研のJ-SHISV2モデルとした。浅部地盤は、ボーリングデータを用いて当てはめ方式で作成した地盤モデルを初期モデルとした。その上で、浅部地盤の工学的基盤上面を深部地盤の第1層上面とするなどして両者を統合あうことで、初期統合地盤モデル(250mメッシュ単位)とした。

3. 微動アレイ探査

実施した微動アレイ観測は、対象地域の低地および台地において、大アレイ観測(アレイ半径100, 200, 400mの3点および一辺25~75mのL字型)を約5km間隔にて23地点、極小・不規則アレイ観測(アレイ径60cmの4点および一辺5m~10m超の三角形)を約1km間隔にて約550地点で実施した(2021年8月現在)。微動探査地点毎の位相速度、H/Vスペクトルを求め、東京大学地震研究所の首都圏強震動総合ネットワーク(SK-net)に記録されている地震記録を用いて、観測点ごとのRVスペクトルを求めた。これらの地盤震動特性データと初期地盤モデルに基づいて、ジョイントインバージョンを行い、各観測地点における1次元S波速度構造を得た。

4. 微動アレイ探査結果に基づく初期地盤モデルの修正

甲府盆地において、3章で得られた1次元S波速度構造等を用いて、各観測地点における初期深部地盤モデルを修正し、速度層ごとに水平方向へ空間補間して3次元S波速度構造モデルを作成した。推定されたS波速度構造に基づいて、深部地盤速度構造(J-SHIS V2)の修正を行った。S波速度1,000 m/s層までは、J-SHIS V2が一樣に浅いため、修正後では深くなる結果となった。S波速度1,200m/s層以降は、山梨県の北西側において、モデル修正後のほうが浅くなり、東側では深くなった。また、深部地盤については、その他の地域(身延地域、富士山北麓地域)については、各種探査データが比較的少なく、狭小な谷筋の構造であるため、作成の方法を検討した上で構築した。

5. まとめ

本稿では、山梨地方を対象とした浅部・深部統合地盤構造モデルの構築と結果の一例を示した。今後は、モデル化の検討を続け、最終的には3次元差分法を用いて、地震観測点における地震記録と比較を行い、地盤モデルの精度の検証を行う予定である。

参考文献

先名・他(2017)：関東地域における広帯域強震動評価のための浅部・深部統合地盤モデルの構築(その2),日本地球惑星科学連合2017年大会, SSS15-19.

地震本部・文部科学省（2003）：甲府盆地の地下構造調査に関する調査成果報告書（平成13～15年度）

常時微動H/Vによる薩摩硫黄島におけるカルデラ境界探索の試み

Attempt to search the caldera boundary by microtremor H/V on Satsuma-Iwojima Island

*山田 雅行¹、伊藤 佳洋¹、長坂 陽介²、野津 厚²、長尾 毅³、大岩根 尚⁴*Masayuki YAMADA¹, Yoshihiro ITO¹, Yosuke NAGASAKA², Atsushi NOZU², Takashi NAGAO³, Hisashi OIWANE⁴

1. (株) ニュージェック、2. 港湾空港技術研究所、3. 神戸大学、4. 合同会社むすひ

1. NEWJEC Inc., 2. Port and Airport Research Institute, 3. Kobe Univ., 4. Musuhi LLC.

山田ら(2016)は、硫黄島港(以下、港と呼ぶ)および薩摩硫黄島飛行場(以下、飛行場と呼ぶ)において、臨時地震観測によるサイト増幅特性の算定と、常時微動観測(アレイ観測)による地盤モデルの推定を行った。山田ら(2016)によると、港および飛行場の地盤モデルから求めた伝達関数には0.2~0.3Hz付近にピークは見られるものの、それほど明瞭ではなかったことから、サイト増幅特性に見られる0.2~0.3Hz付近の明瞭なピークは盆地構造による3次元的な効果や、地震波の入射方向の効果に起因するものと考えられた。港と飛行場のサイト増幅特性の0.2~0.3Hz付近の共通の特徴から、両地点は深い地盤構造を共有していると推察され、実際のカルデラ構造が従来の解釈より複雑である可能性が示唆された。なお、従来の解釈では、港と飛行場の間にある急崖がカルデラ壁とされ、港はカルデラ内、飛行場はカルデラ外に位置すると考えられている。

そこで、従来の解釈でカルデラ内に位置すると考えられる港とカルデラ外に位置すると考えられる飛行場の間において振動特性の異なるカルデラ境界を探索することを目的として、港と飛行場間の常時微動観測(単点観測)を行った。

常時微動観測は、道路上を基本とし、No.1~No.30の28点(No.11とNo.20は欠測)で行った。サーボ型加速度計(白山工業製JU210)を用いて、各観測点11分間の常時微動観測を行った。常時微動H/Vの算出においては、長周期の波動成分の影響も考慮できるように、各観測点について擾乱の少ない163.84秒間のデータを3区間抽出し、その平均値としている。水平成分は直交する2成分の二乗平均の平方根とした。スペクトルの平滑化については、長周期においてもピークを明瞭に判別できるようにする観点から水平成分、鉛直成分ともにバンド幅0.05HzのParzenウィンドウを用いた。港では山田ら(2016)において常時微動観測が行われており、7mアレイ(青色●印)の中心点(A071)、20mアレイ(緑色●印)の中心点(A201)の結果を用いた。

図-1に観測点を示す。図の左端に飛行場、中央下端に港が位置している。その間に等高線が密になった急崖があり、カルデラ壁と考えられている。観測点No.1,2,3が最も港に近く、No.4からNo.5,6,7,8,9,10を通る西側ルートとNo.30,29,28,27,26,25,24,23,22,21,19,18の東側ルートを設定し、No.12からNo.13,14,15,16,17の順でNo.17が最も飛行場寄りである。西側ルートの一部は険しい獣道で、No.9と12の間にカルデラ壁と考えられる急崖があり、No.10は急崖の中段に位置する。東側ルートは普通乗用車の通行可能な道路で、No.22が崖の下、No.18が崖の上、No.21,19が崖を切り崩してできた道上であるため崖の途中と考えられる。

図-1には観測点と対応させて、常時微動H/Vを併記した。また、No.10の常時微動H/Vを左下に拡大して示した。常時微動H/Vのピーク周波数に着目すると、表層の影響と考えられる3Hzより高周波数帯のピークは観測点によって変化するものの、深い地盤構造の影響と考えられる0.3Hz付近の低周波数のピークはすべての観測点において共通にみられた。0.3Hz付近のピークは急崖の上下でも共通に見られ、港と飛行場の間において振動特性が変化する箇所は見つけることはできなかった。

港と飛行場の間にある急崖がカルデラ壁とされ、港はカルデラ内、飛行場はカルデラ外に位置すると考えられているが、深い地盤構造を反映すると考えられる低周波の振動特性が港から飛行場まで連続しており、従来、カルデラ外と考えられている急崖上もカルデラの影響を大きく受けていることがより明瞭となった。山田ら(2016)でも指摘したように、実際のカルデラ構造は従来の解釈より複雑である可能性がより強く示された。山田ら(2016)：薩摩硫黄島における低周波数のピークを有するサイト増幅特性の要因分析、土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.72, No.4(地震工学論文集第35巻), pp. I_691-I_699.

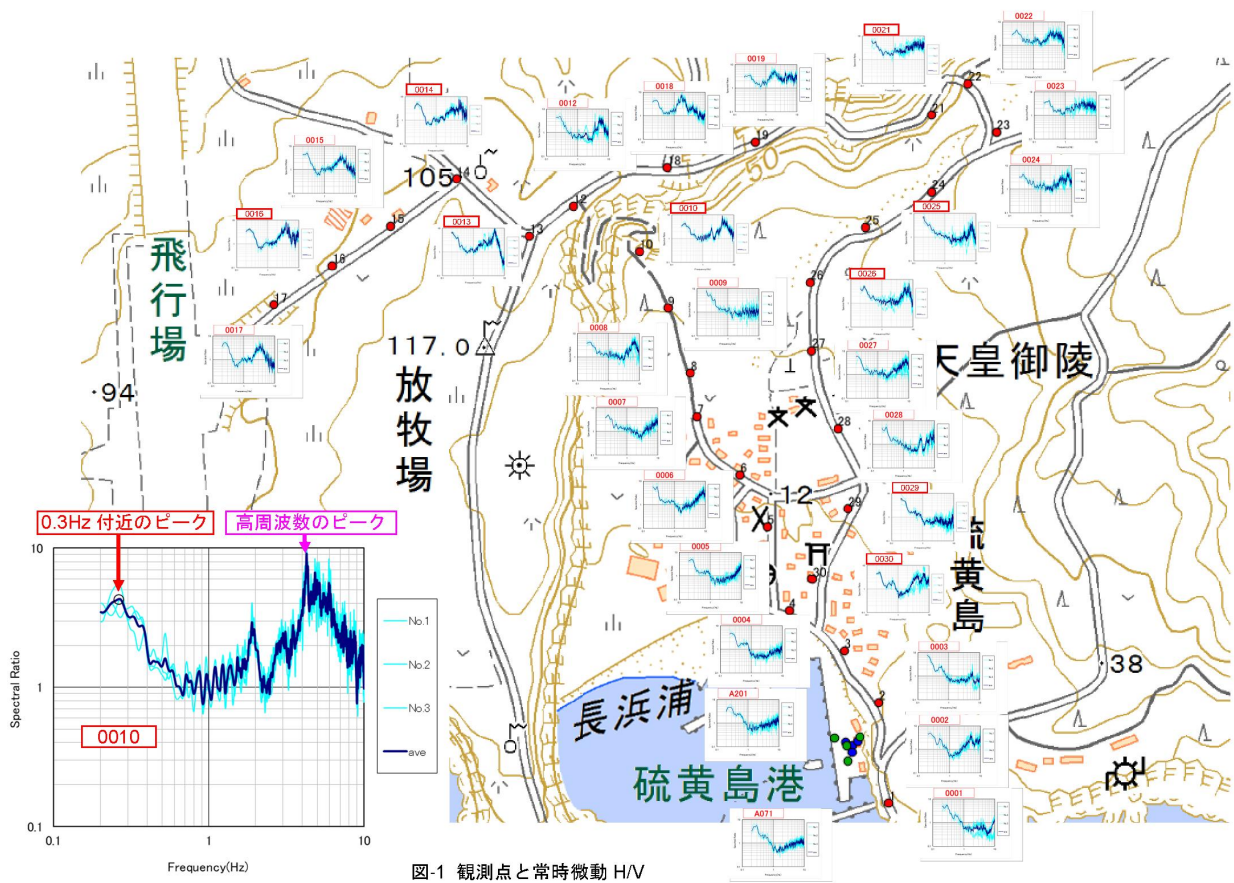


図-1 観測点と常時微動 H/V

中央構造線三野断層の断層破砕帯での動的変形特性

Dynamic deformation characteristics in the shatter zone of the Mino Fault of Median Tectonic Line

*香川 敬生¹、木村 一成²

*Takao KAGAWA¹, Kazunari Kimura²

1. 鳥取大学 工学部 社会システム土木系学科、2. (株)ナイバ愛媛支店

1. Tottori Univ., Faculty of Engineering, 2. Naiba Co. Ltd.

1. はじめに

被害地震において地表断層変位が明瞭に見られる近傍において地震動による影響が必ずしも大きくない事象が散見され、また常時微動計測においても断層帯近傍で卓越周期が不明瞭になる現象が報告されている。これを地震動応答の観点から考察すべく、断層帯破砕帯を対象に不攪乱試料を採取し、動的変形特性の把握を試みたので報告する。

2. 調査の概要

ボーリングによって不攪乱試料を得るには、アクセスが比較的容易で十分に大きな破砕帯を対象とする必要がある。そこで、徳島県三好市三野町太刀野における中央構造線断層系三野断層の破砕帯を選定した。ボーリングは表層部の10m（径86mm）を対象とし、ロータリー式三重管サンプラー（トリプルサンプラー）で9深度の試料を採取した。このうち7試料について繰り返し三軸試験を実施し、動的変形特性（ G/G_0 - γ ， h - γ ）を得た。うち4試料はよく締まった粘土質破砕帯、3試料は強固結した断層岩となった。ボーリング孔を利用してダウンホール法によるPS検層をあわせて実施し、断層破砕帯を横断するように常時微動の単点3成分観測（JU410を1台利用）を14点で実施した。

3. 調査結果

表層から7mはよく締まった粘土質破砕帯に相当し、S波速度で245～327m/sとなった。それ以深は強固結した断層岩（カタクレサイト）でS波速度484m/sが得られた。得られた動的変形特性にHardin-Drnevichを適用すると、基準ひずみは表層7mで 1×10^{-3} 程度、それ以深で $2 \sim 6 \times 10^{-4}$ 程度と比較的小さな値が得られた。最大減衰は表層7mで0.34～0.38程度と大きく、それ以深では0.14～0.18程度となった。また、特に表層7mについては、剛性低下と減衰増大で基準ひずみが異なるとした方が試験結果を説明する結果となった（図）。常時微動H/Vスペクトル比を見ると、断層帯を挟んで卓越周期が変化し、その遷移部にあたる断層帯付近でピークが不明瞭になる特性がここでも確認された。

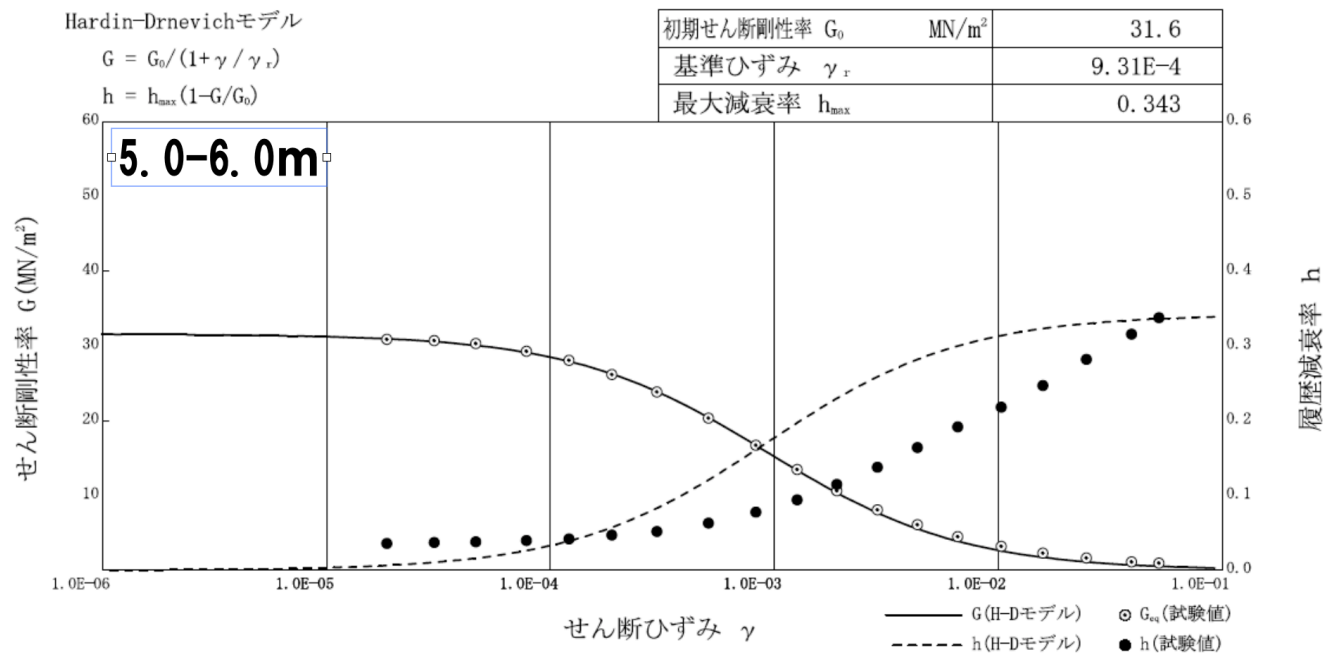
4. おわりに

得られた動的変形特性のモデル化を進め、強震時に想定される局所的な地震応答について検討したい。また、地盤速度構造より想定される常時微動特性についても解釈を試みたい。

謝辞

(有)山口興業には所有する敷地内での調査への許可、ご協力を頂きました。本研究は日本学術振興会科研費19H02406の助成を受けたものです。記して感謝致します。

G, h ~ γ 関係



大規模盛土造成地における微動探査を用いた地盤震動特性の把握 -鳥取市北園の事例-

Estimation of Subsurface Structures and Ground Motion Characteristics of Artificially Filled Ground from Microtremor Observations –Case of Kitazono, Tottori City –

*西村 武¹、西村 菜沙²、野口 竜也²、香川 敬生²

*Isamu Nishimura¹, Nazuna Nishimura², Tatsuya Noguchi², Takao Kagawa²

1. 鳥取大学大学院 工学研究科 博士後期課程 社会基盤工学専攻、2. 鳥取大学 工学部 社会システム土木系学科

1. Graduate School of Engineering Department of Management of Social Systems and Civil Engineering, Tottori University, 2. Social Systems and Civil Engineering, Department of Engineering, Tottori University

高度経済成長期以降、山麓地域や丘陵地の斜面の谷埋め盛土造成地が相次いで開発され、大地震の度にそのような地盤での被害が見られている。東北地方太平洋沖地震の被害調査によると、盛土造成地の盛土部や切り盛り境界部において、地すべりや地盤の隆起・沈下に伴う建物の倒壊などの被害が数多く発生し、切土部に比べて被害が甚大であったことが報告されている。これは谷埋め部分のS波速度が切土部と比較して小さく、地震動の増幅が起りやすいためである。本研究では盛土地盤の地盤震動特性を把握するために、大規模盛土造成地に指定されている鳥取市北園地域において常時微動観測を実施した。

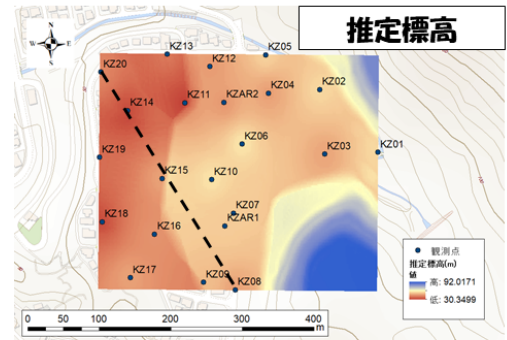
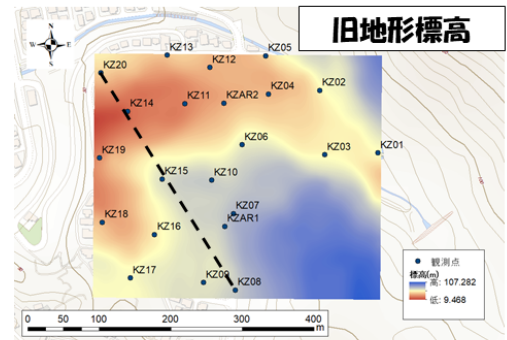
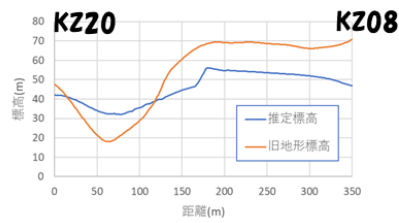
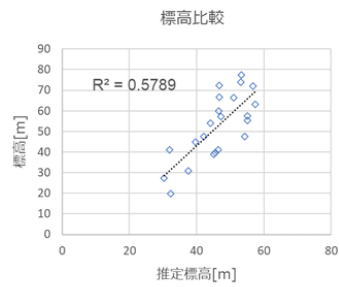
微動観測は2021/6/23の日中に実施した。3成分単点観測を観測時間10分程度として53点で行った。アレイ観測は地震計を円の中心に1台、円周上に3台が正三角形になるように4台配置し、アレイ半径は1-30mの範囲で、観測時間はアレイ半径ごとに15分程度として盛土部と切土部で各1地点の計2地点で観測を行った。使用機器には加速度型微動計JU410を4台用いた。サンプリング周波数はともに200Hzとした。

微動の3成分観測記録より、20.48秒を10区間以上選定し、3成分のフーリエスペクトルを算出、対数ウィンドウ（係数20）で平滑化し、水平動のスペクトルと上下動のスペクトルの比（H/V）を求めた。H/Vスペクトルから卓越周期とその時のピーク値（振幅比）を読み取った。アレイ観測記録は、CCA法（Cho et. al., 2006）によりセグメント長10.24秒、Parzenウィンドウ（バンド幅0.3Hz）でスペクトルを平滑化し、位相速度分散曲線を求めた。位相速度分散曲線とH/Vを用いて、レイリー波基本モードを仮定して、試行錯誤で地盤構造モデルを推定した。

解析の結果、山麓の平野部に近い場所ではH/Vスペクトルのピーク値が大きく、卓越周期が0.3-0.5秒であった。大規模盛土造成地に指定されているエリアでは盛土部で卓越周期が長く、ピーク値も大きい傾向にあることがわかった。アレイ観測より表層に盛土部では $V_s=180\text{m/s}$ 、切土部では $V_s=130\text{m/s}$ の層がみられ、切土部の方がより低速度であると推定された。推定モデルから4分の1波長則を用いて表層厚を算出し、旧地形の標高値と比較した結果、値は完全には一致しなかったが、その傾向は類似していることがわかった。

旧地形標高の比較

- 4分の1波長則を用いて表層厚を算出し、**推定標高値**（現地形標高-推定表層厚）と**旧地形標高**を比較
- 観測地点の旧地形標高を読み取り、推定標高値と相関を取る



地震波干渉法に基づくデコンボリューション波形に関する基礎的検討

A study on the de-convolution waveform based on seismic interferometry using the data observed at MeSO-net

*仲野 健一¹、上林 宏敏²

*Kenichi Nakano¹, Hirotoshi Uebayashi²

1. 株式会社 安藤・間、2. 京都大学

1. HAZAMA ANDO CORPORATION, 2. Kyoto University

首都圏地震観測網（MeSO-net; NIED, 2021）では同観測網で得られた加速度連続波形記録が公開されている。それらのデータを対象にした地震波干渉法の検討例は既にいくつか報告されている（e.g, Denolle et al, 2014; 元木ら, 2017）。その上で、関東平野内を横断する特定の測線に着目し、かつ、振幅情報と位相情報の両者に着目した検討事例の蓄積は、首都圏を対象にした地震動伝播特性の解明および強震動予測への寄与の観点からは意義があると考ええる。

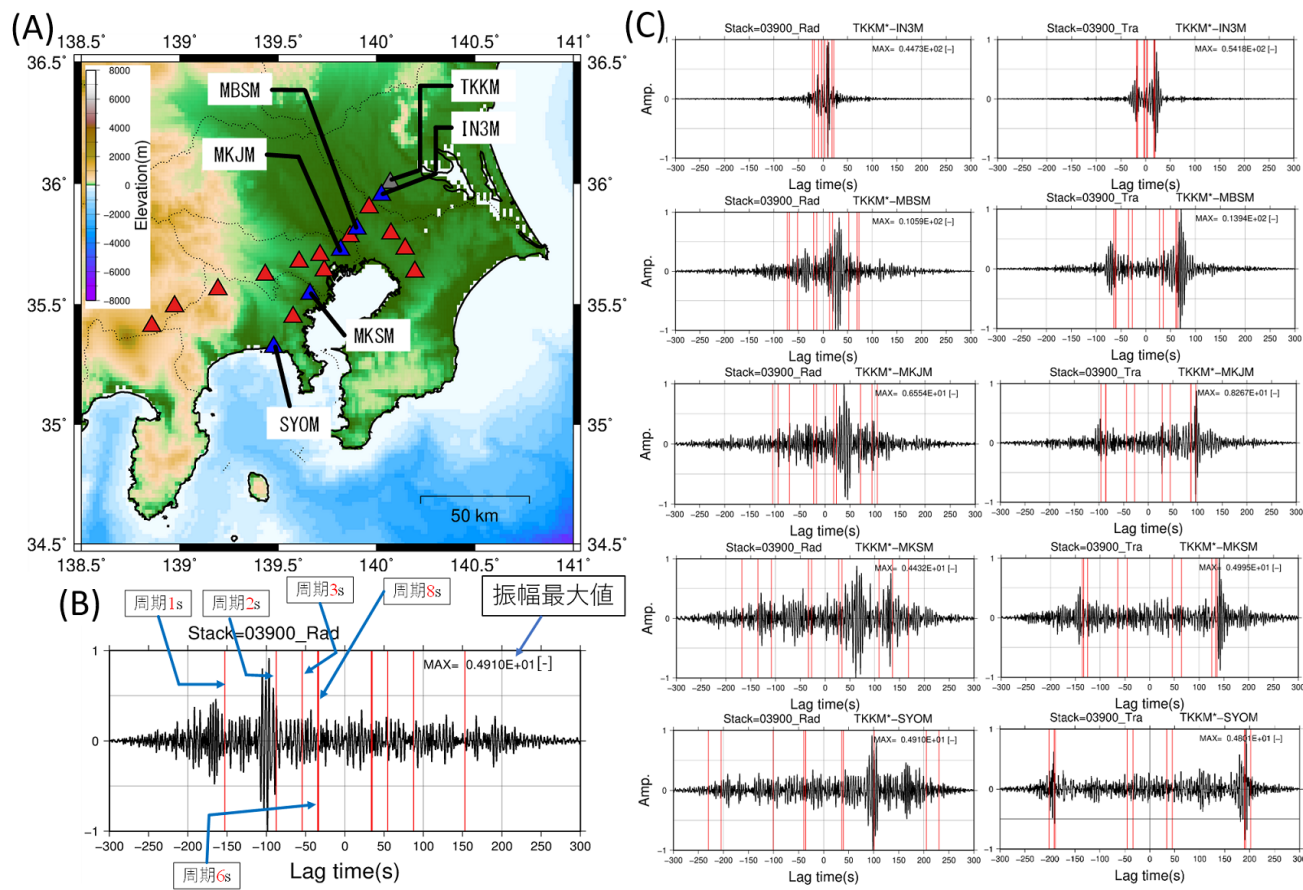
本研究では、MeSO-netの複数の観測地点と基準点を設定し、基準点に対する各観測地点のデコンボリューション波形の抽出を試みると共に、伝播に伴う基本的な性質について考察した。MeSO-netの19地点を選択し、基準点（TKKM）と各観測地点の組み合わせとなる計18ペアを設定し、それぞれのペアで（2つの観測点間で）得られる相互相関関数を推定する。ここではできるだけ歪みの少ない振幅と位相情報を求めるため、地元・山中(2010)を参考にしてコヒーレンスを介したデコンボリューション波形を求めた。まず、2020年7月20日～8月18日までの約1か月間の連続波形記録を使用し、10分間を1区間としてオーバーラップさせずに先のコヒーレンスを3,900回スタッキングした。次に、スタッキングされたコヒーレンスを逆フーリエ変換してデコンボリューション波形を求めた。この時、2点間を結ぶ測線の方位に合わせて各区間の観測波形を回転させることでRadial成分とTransverse成分を求めた後、相互相関関数を時間領域で計算した。また、考察のため、ペア毎の2つの観測点で得られる水平成層地盤構造モデル（Koketsu et al, 2012）に基づいてRayleigh波とLove波の基本モードの群速度を算出し、代表周期毎に群速度と2点間距離から求まる伝播時間を推定した（2地点それぞれから求まる伝播時間の平均値を使用）。群速度の算出には久田教授の公開プログラム（久田, 1997）を一部修正の上、リコンパイルして使用した。また2-10sの帯域に着目するため、スタッキング終了後のコヒーレンスにバンドパスフィルタを乗じた。

関東平野内の特定の測線で最大100 km程度の長い伝播距離を有する2点間ペアに関して、明瞭な振幅を持つ信号が確認できた（図(A)-(C)を参照）。また、水平成層地盤構造モデルを仮定した周期毎の波群の到達時刻との比較から、両者は子細には異なるものの大局的には調和的であり、今回求めたデコンボリューション波形は少なくとも物理的に伝播する波動であると判断でき、いわゆるグリーン関数と見なせる可能性がある。伝播特性の詳細な検討については今後の課題としたいが、デコンボリューション波形から読み取ると最も明瞭な波群（周期は約4秒前後）の伝播速度はRadial成分で約1 km/s程度、Transverse成分で約0.5 km/s程度である。この値は山中ら（2010）の群速度の推定結果や地元・山中（2011）による周期2-6 sにおける群速度のトモグラフィ解析結果（神奈川県を含む東京湾周辺の領域）と調和的である。なお、デコンボリューション波形に関しては、特にRadial成分の信号において負側の時刻よりも正側の時刻の方が大きいことが確認できた。本研究の結果は元木ら（2017）を支持する結果であると判断できる。本研究では直線的な伝播経路を仮定しているが、盆地内では地震波の伝播経路は複雑であり、必ずしも直線的ではないことが指摘されており（e.g. 向井ら, 2018; 上林・関口, 2020）、慎重に検討を進めたい。

今後の展望としては、前述の伝播経路に関する考察の他、理論的なグリーン関数との比較も実施したい。ただ

し、現時点ではデータ数自体が限定的なため、データ数を増やした検討も行いたい。

謝辞：本研究では首都圏地震観測網（MeSO-net; NIED, 2021）の連続波形を使用しました。作図には GMT（Wessel and Smith, 1998）を用いました。また、データ処理に際してはサイエンステクノロジー新井啓祐氏にご協力いただきました。ここに記して感謝申し上げます。



図(C)中の赤線の凡例（水平成層地盤(JIVSM)の群速度から概算した周期毎の推定到達時刻を表す）

(a)Radial 成分 (b)Transverse 成分
図(A)中に示した2地点間のデコンボリューション波形

3次元地震動シミュレーションおよびコヒーレンスモデルに基づく隣接地点間の地震動の空間変動特性評価

Evaluation of characteristics of spatial variation at adjacent points based on 3-D ground motion simulation and coherence model

*徳光 亮一¹、山本 優¹、内山 泰生¹、大野 晋²

*Ryoichi Tokumitsu¹, Yu Yamamoto¹, Yasuo Uchiyama¹, Susumu Ohno²

1. 大成建設、2. 東北大学

1. Taisei Corporation, 2. Tohoku Univ.

1. はじめに

地震動は離間距離が数m～数十mとごく隣接する地点間においても、表層地盤の不均質性に伴い、位相や振幅に空間的な変動が見られる。本検討では3次元不均質地盤モデルを用いた地震動シミュレーションにより、隣接地点間における地震動のコヒーレンス特性を分析する。また、散乱を考慮した波動方程式に基づき隣接地点間における地震動のコヒーレンスモデルを構築し、地震動シミュレーションにより計算されるコヒーレンスとの整合性を検証する。

2. 不均質地盤モデルと入力地震動

3次元不均質地盤モデルの形状を図1に示す。モデルのサイズは水平2方向を300mとし、深さ方向は40～200mの範囲において40m単位で変化させた。またモデルのメッシュサイズは1m×1mとした。平均S波速度は300m/sとし、ばらつきのパターンがガウス型の自己相関関数に従うように変動させた。

地盤の不均質パターンは2ケース作成した。いずれのケースも水平方向の相関距離を30mとし、鉛直方向の相関距離はケース1を6m、ケース2を15mとした。また変動係数はいずれのケースも15%とした。本検討では初期乱数を変化させることにより、各ケースに対し5種類の地盤モデルを作成した。なお地盤の内部減衰は考慮していない。ケース1の地盤モデルの例を図2に示す。

入力地震動はy方向のみに振幅を持つ加振時間0.02秒の三角型関数の変位波形を地盤モデルの底面より鉛直方向に平面波入射した。応答波は図1に太線で示すとおり、モデル地表の中央部でx、y方向ともに100mの線上において1.0m間隔で抽出し、全抽出点間のコヒーレンスの平均を評価対象とした。なお、応答波の抽出時間はモデル底面より入力を開始してから約2.5秒間とした。

3. コヒーレンスモデルとシミュレーション結果との比較

不均質地盤を伝播する地震動の波動方程式より、Ishimaru(1978)¹⁾を参考に、隣接地点間における地震動の相関関数(コヒーレンス)の評価モデルを構築した。また3次元不均質モデルを用いた地震動シミュレーションより計算した隣接地点間における地震動のコヒーレンスとの比較により、評価モデルの適用性について検証する。

不均質媒質中を鉛直方向(z方向)に波動が伝播するとき、不均質媒質中の (ρ, z) (ρ は水平方向のベクトル)における波動場 $u(\rho, z)$ の波動方程式は、伝播速度の変動分を $n_1(\rho, z)$ とすると、(1)式となる。

$$(\partial^2 u(\rho, z))/(\partial z^2) + k^2[1 + n_1(\rho, z)]^2 u(\rho, z) = 0 \quad (1)$$

ここで k は波数である。隣接地点間の地震動のコヒーレンスは(1)式を展開し、(2)式のとおき表現できる¹⁾。

$$\text{Coh}(|\rho|, z) = \exp\{-k^2 z [\int B_n(0, z-z') dz' - \int B_n(|\rho|, z-z') dz']\} \quad (2)$$

ここで $|\rho|$ は水平方向の離間距離、 $B_n(0, z-z')$ および $B_n(|\rho|, z-z')$ は $(0, z-z')$ 間および $(|\rho|, z-z')$ 間での $n_1(\rho, z)$ の相関関数で、ガウス型とする。

地震動シミュレーションにおけるケース1、2の不均質パラメータを対象に、(2)式にてコヒーレンスを評価し、地震動シミュレーションにより計算したコヒーレンスの結果を比較する。(2)式により離間距離

5m～50mにおいて5mごとにコヒーレンスを評価した結果および地震動シミュレーションにより計算されたコヒーレンスを図3に示す。

ケース1は(2)式と地震動シミュレーションによる結果がおおむね対応している。一方、ケース2では、地盤深さが深くなるほど、地震動シミュレーションによる結果の方が(2)式による評価に比べ、かなり大きくなる。

水平方向と鉛直方向の相関距離の比は地震波の散乱角に影響し、散乱角が大きくなると想定されるケース2では、散乱波がコヒーレンスの上昇に寄与する成分も多くなると予想される。ケース2において、(2)式によりコヒーレンスが過小評価されるのは、(2)式が z 方向の1次元波動方程式に基づき構築されているため、コヒーレンスに含まれる散乱波の影響が反映されていないためと推測される。

4. まとめ

隣接地点間における地震動のコヒーレンスモデルを構築し、不均質地盤モデルを用いた地震動シミュレーションに基づくコヒーレンスと比較した。コヒーレンスモデルは地震動シミュレーション結果より計算されるコヒーレンスとほぼ同様の傾向を示したが、鉛直方向の相関距離が大きい不均質地盤モデルでは、地震動シミュレーション結果に比べ過小評価する傾向が見られた。

【参考文献】1) Ishimaru, A.: Wave propagation and scattering in random media, Academic Press, New York, 1978

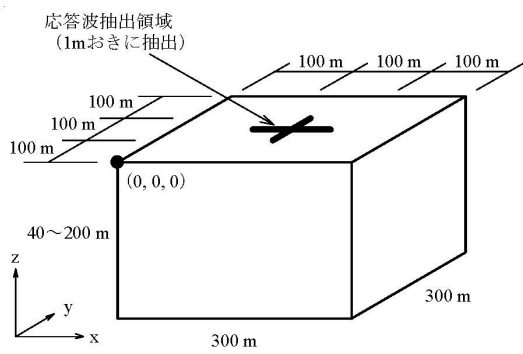


図1 3次元地盤モデルの形状

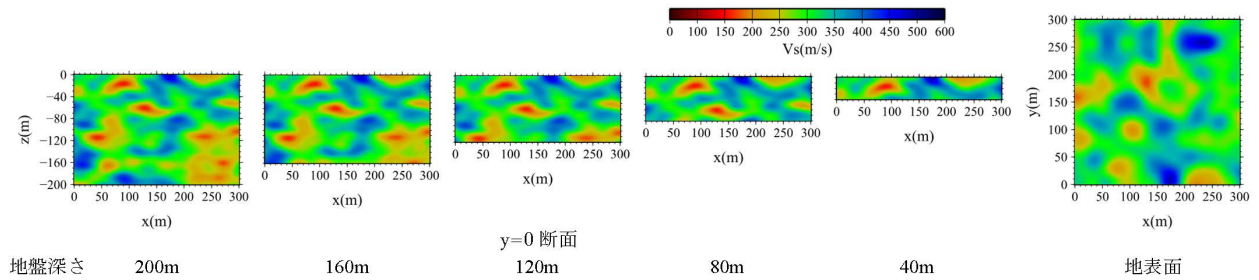
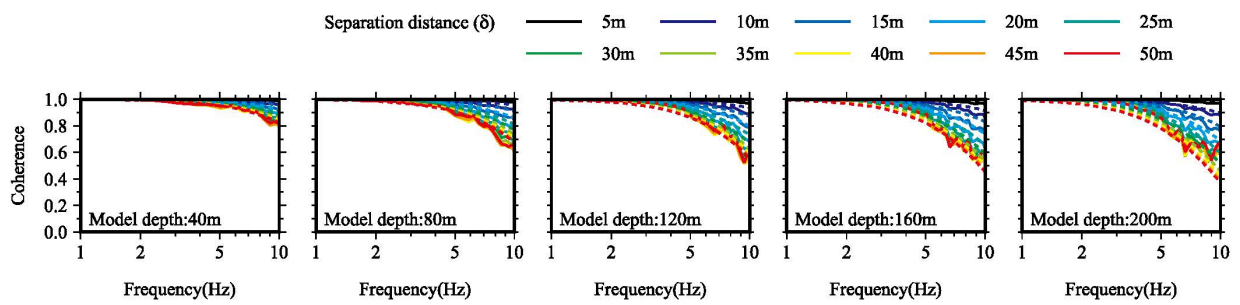
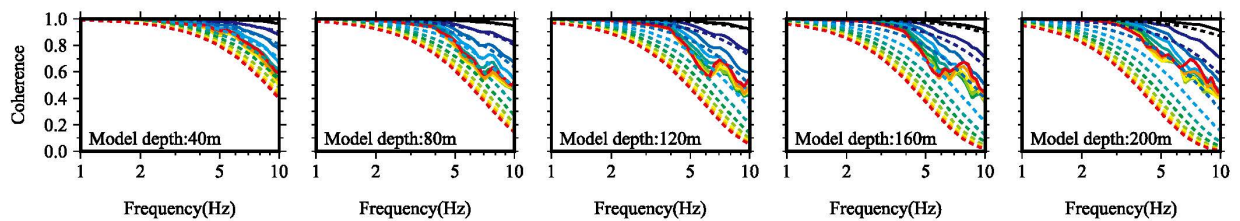


図2 不均質地盤モデルの例 (ケース1)



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図3 隣接地点間の地震動のコヒーレンス 地震動シミュレーションと評価モデルとの比較
(実線: 地震動シミュレーション 点線: コヒーレンスモデル)

SITES法によるスマトラ断層の断層面推定 (2)

Estimation of the Sumatran fault segments using SITES method (2)

*山品 匡史¹、大久保 慎人¹、田部井 隆雄¹、UMAR Muksin²、ISMAIL Nazli²

*Tadashi YAMASHINA¹, Makoto OKUBO¹, Takao Tabei¹, Muksin UMAR², Nazli ISMAIL²

1. 高知大学、2. Syiah Kuala 大学

1. Kochi University, 2. Syiah Kuala University, Indonesia

我々は、インドネシア、スマトラ島北部のスマトラ断層の断層面を推定するために断層近傍で得られた地震波形記録に地震波干渉法による地下構造推定法であるSITES法（大久保, 2009, JpGU2009, S157-015）を適用し、断層面からの反射波と考えられる信号が抽出できることを報告している（Yamashina et al., 2019, AGU Fall Meeting 2019, S11D-0373；山品・他, 2020, 日本地震学会2020年度秋季大会, S10P-12）。解析に用いたSITES法は、一般的には鉛直成分記録のみを用いる地震波干渉法を3成分の記録全てを用いるように発展させた解析手法であり、地震波反射面（例：断層、帯水層）の空間的な広がりを一観測点での記録からも評価可能である利点を持つ。解析には、2011–2015年にスマトラ島北端部Ache州を中心にスマトラ断層のセグメントであるAche、Seulimeumの両セグメント近傍で行われた臨時地震観測で得られた3成分連続雑微動記録を用いた。

前2報では、断層面からの反射波と考えられる信号が抽出され、その結果から推定された反射面は既知の断層に対応していることを報告した。しかしながら、いくつかの観測点については得られた自己相関関数

（ACF）に明瞭なピークが現れず、断層面からの反射波を同定することができない場合があった。考えられる要因としては、前処理で適用したバンドパスフィルタの帯域設定が適切でなかった、解析対象の雑微動に対して大きいエネルギーを持つ自然地震や人工振源などからの振動の影響を受けている、ことが挙げられる。そこで、バンドパスフィルタの帯域設定の検討、相関関数を用いる解析において自然地震などの過渡的な影響の軽減が期待される sign-bit normalization の適用などを行った。本発表では、上記による解析結果への影響についての検討と、断層面の推定結果について示す。

謝辞：本研究では、科研費JP24403005、JP17H04577によって得られたデータや成果を利用しました。

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S17. 津波

2021年10月15日(金) 15:30 ~ 17:00 | P10会場 P会場

P

15:30 ~ 17:00

[S17P-01] 地震をトリガーとする地すべりに起因する津波の確率論的評価手法に関する基礎的検討

○木場 正信¹、土屋 悟²、木村 達人³、松山 昌史⁴、加藤 勝秀⁵ (1.エングローブコンサルタント、2.ユニック、3.東電設計、4.電力中央研究所、5.中部電力)

15:30 ~ 17:00

[S17P-02] 異なる最適化手法を用いた津波データベース型津波浸水予測

○上谷 政人¹、馬場 俊孝² (1.徳島大学大学院創成科学研究科理工学専攻、2.徳島大学大学院産業理工学研究部)

15:30 ~ 17:00

[S17P-03] 四国沖土佐ばえ北部の海底地すべりを仮定した非静水圧効果有の二層流モデル津波計算

○黒住 将弘¹、馬場 俊孝¹ (1.徳島大学)

15:30 ~ 17:00

[S17P-04] 南海トラフ沿いで発生する海底地すべりによる津波励起の特徴に関する予察

○今井 健太郎¹、中村 恭之¹、富士原 敏也¹、谷岡 勇市郎² (1.海洋研究開発機構 海域地震火山部門、2.北海道大学 大学院理学院)

15:30 ~ 17:00

[S17P-05] 2006 年及び 2007 年千島列島沖地震津波の減衰過程

○赤井 啓嗣¹、新本 直子²、馬場 俊孝¹ (1.徳島大学大学院、2.徳島大学)

15:30 ~ 17:00

[S17P-06] 1952年カムチャツカ地震における顕著な津波後続波

○対馬 弘晃¹、山本 剛靖¹ (1.気象庁気象研究所)

地震をトリガーとする地すべりに起因する津波の確率論的評価手法に関する基礎的検討

A Fundamental Study on the Probabilistic Analysis Method for Landslide-induced Tsunamis Triggered by Earthquakes

*木場 正信¹、土屋 悟²、木村 達人³、松山 昌史⁴、加藤 勝秀⁵

*Masanobu KOBA¹, Satoru Tsuchiya², Tatsuto Kimura³, Masafumi Matsuyama⁴, Katsuhide Kato⁵

1. エングローブコンサルタント、2. ユニック、3. 東電設計、4. 電力中央研究所、5. 中部電力

1. EGC, 2. Unic, 3. TEPSCO, 4. CRIEPI, 5. CEPSCO

1. 検討対象

地すべり発生位置における地震外力（水平加速度）の年超過確率が得られている場合に、沿岸のある地点における津波水位の年超過確率を求めることを目的として、確率論的津波ハザード評価 (PTHA) の方法を検討した。海底で発生する地すべりと、陸上で発生し海域に突入する地すべりとをともに対象とし、地すべり運動のタイプは地層中の弱層がすべり面となり移動体がほぼ一体となって移動するslide（並進すべり）及びslump（回転すべり）とした。検討した方法に基づき、-仮想的な地すべりを対象とした数値実験を実施し、地すべり発生確率及び津波水位超過確率への影響を評価した。

2. 地震をトリガーとする地すべり津波の確率論的評価の構造

(1) 基本構造

地震の水平加速度を起点に、地すべりの発生（位置・規模）及び津波の発生・伝播を(2), (3)に示すモデルで関係づける。ただし、各プロセスにおいて前提条件及び解析結果に含まれる不確実さを確率論的に考慮する必要がある。そのために、地すべりのトリガーを特定せず個々の地すべりは固有の規模と繰り返し間隔をもつ前提とした木場・他（2018, 地震学会秋）と同様に、認識論的不確実さをロジックツリーにより、偶然的不確実さを確率分布により表現する。認識論的不確かさは、地すべり運動のタイプや地盤物性等、主に地すべり発生の有無に影響を与える項目と、地すべりの移動速度や水位の評価手法等、津波水位評価に影響を与える項目で構成する（図1）。

(2) 地すべり発生の評価方法

多数のすべり面または地盤物性を対象に地すべりの有無を判定することから、地すべり発生の有無に関しては、2次元断面内の極限平衡法(LEM)による比較的簡易な斜面安定解析により得られるすべり安全率 F_s を用いる。地震の最大加速度が与えられた際、地すべり面の位置、寸法（長さ・厚さ）及び地盤物性値（密度・せん断強度）をパラメータとして斜面安定解析を実施する。これらパラメータに不確実さが含まれる場合、パラメータ値を設定範囲内でランダムに変化させるモンテカルロシミュレーション（例えば、嶋原・Horrillo (2014)^{*1}）を実施し、多数の F_s を得る。地すべりが発生する F_s の閾値にも不確実さを見込む。これらの結果、地すべりと発生確率が対応づけられる。

(3) 津波の評価方法

地すべり起因の津波の水位を正確に評価できる解析手法は確立されていないという認識のもと、複数の解析手法による水位の差違を沿岸水位の不確実さとして評価に取り込む。解析手法は、以下の3通りを前提としている。①Watts et al. (2005)^{*2}; 海底またはFritz et al. (2004)^{*2}; 陸上)による初期水位+平面二次元モデルによる伝播、②Satake (2007, EPS)によるkinematic landslide model (KLS)、③二層流モデル(松本・他, 1998)^{*3}。ただし、多数の解析を必要とすることから、最も簡易な①を基本として計算を実施し、②③との差異は予備的計算により評価し、相田(1977, 震研彙報)による幾何平均 K 及び幾何標準偏差 κ を用いて解析手法間の水位の不確実さを考慮できるものとした。さらに、計算を実施した水位にも解析誤差等による不確実さを見込む。

3. 仮想的な地すべりを対象とした数値実験

仮想的な地すべりを設定し、一連の評価が可能であることを確認するとともに、パラメータや解析手法が発生確率や津波水位に与える影響を評価した。

(1) 地すべり発生確率

海底にすべり面を固定して仮想的な地震外力や地盤物性を与えた場合の修正フェレニウス法によるFsの計算を行った。すべりが生じる限界すべり安全率を1.0とした場合と0.15(有意な移動量を生じる閾値; ten Brink et al., 2009^{*4})とした場合で、地すべりの再来期間に3オーダー程度の極めて有意な違いが生じることが判った。

(2) 津波評価手法間の差違

前述した3手法により陸上及び海底の地すべりに伴う沿岸津波水位を比較した。いずれの地すべりでも手法①③と②の差違が非常に大きくなった(図2)。これには②のパラメータのひとつである地すべり移動速度の見積もりが強く影響していることが判った。ここでは自由落下または摩擦を考慮した自由落下の式により速度を設定したが、適切な設定方法については今後の課題である。

謝辞 本研究は電力11社による原子力リスクセンター共研として実施した成果であることを付記するとともに、土木学会 原子力土木委員会 津波評価小委員会(委員長 高橋智幸関西大学教授)の委員各位に研究成果をご議論頂き、有益なご助言を賜りました。関係各位に謝意を表します。

*1: 土木学会論文集B2(海岸工学), *2: Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, *3: 海岸工学論文集, *4: Marine Geology, Vol. 264, pp.65-73.

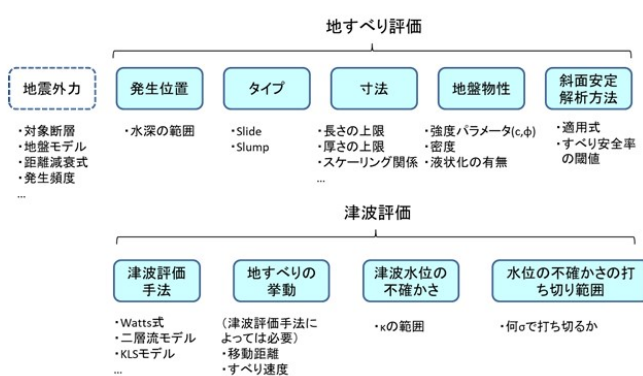


図1 認識論的不確実さの構成

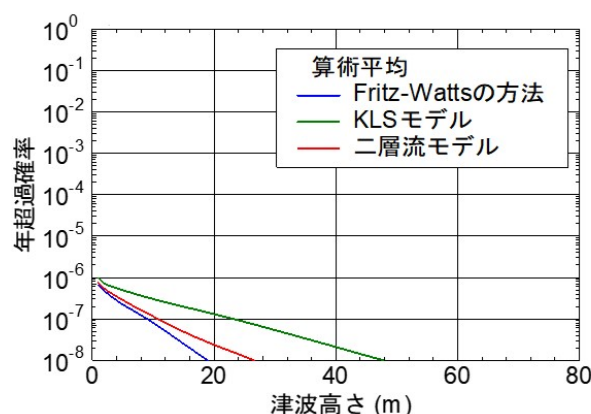


図2 仮想的な陸上地すべりによる津波水位超過確率の津波解析手法による比較例

異なる最適化手法を用いた津波データベース型津波浸水予測

Tsunami database type tsunami inundation prediction using different optimization methods

*上谷 政人¹、馬場 俊孝²

*Masato Kamiya¹, Toshitaka Baba²

1. 徳島大学大学院創成科学研究科理工学専攻、2. 徳島大学大学院産業理工学研究部

1. Graduate School of Frontier Sciences, Tokushima University, 2. Graduate School of Social Science and Engineering, Tokushima University

日本では沖合を伝播する津波は海底水圧計やGPS波浪計で海岸に到達する前に観測可能である。エネルギー保存則より得られるグリーンの法則を用いれば、沖合津波高から沿岸津波高を簡単に推定できる。さらに発展した手法として、多数の津波シミュレーション結果に基づいて回帰するモデル（以降、回帰モデル）が知られている。回帰モデルはシンプルであるが実用的で、処理速度の割に高精度な予測が可能である。しかし、回帰モデルは海岸の任意の1点のみの高さを予測するだけで、最大浸水深分布のような面的な分布を求めるに至っていない。津波災害発災後の応急対応などを考えた場合、沿岸津波高だけでなく、浸水深分布も予測できることが望ましい。既存の回帰モデルで浸水深分布を求めるには、単純には空間上のすべての点について予測を実施すればよいわけだが、予測点が膨大となるため処理時間が長くなるという問題がある。解決策として、津波による浸水深が常に類似しているエリアを予めグループ化して予測点を減らす手法を提案する。本研究では浸水深の分布を高速に予測する手法の開発を目的とする。

解析対象地域は徳島県阿南市付近とした。クラスタリング解析を行う浸水深データとして、南海トラフ沿いの地震に対する確率論的津波ハザード評価(防災科学技術研究所,2020)に掲載されている波源断層モデルから計算された津波浸水データベースを用いた。本研究の解析手順としてまず、この津波浸水データベースの3480ケースの地震シナリオからランダムに選択した14シナリオの浸水深分布に対して、非階層的な手法であるk-means法を適用し、浸水深がほぼ同じ領域を判別した。k-means法では解析者がクラスタ分割数を定義する必要があり、クラスタ内の浸水深データの平均値で規格化した標準偏差が0.2未満となる事を目安としてクラスタ数を設定した。クラスタ数18とした場合とクラスタ数を27とした場合であまり違いが見られなかったため、分割数18を最終的に採用した。次に、個々のクラスタ化した領域において、津波浸水データベースの浸水深データの特徴量（平均値、標準偏差、最大値）を抽出し、抽出した特徴量を目的変数、DONET観測点の最大津波高を説明変数として、べき乗則による回帰モデル(Yoshikawa et al., 2019)を線形化及び共役勾配法により構築した。最後に構築した線形化と共役勾配法2通りの回帰モデルを使って、内閣府モデル11ケースによる津波浸水を予測し、フォワード津波計算による真値と比較した。また、浸水深の予測モデルによる違いを比較する為に、ニューラルネットワークを用いた浸水深の予測式を構築して、フォワード津波計算による真値と比較した。

解析対象地域への影響が大きい内閣府南海トラフ地震シナリオ3について、各クラスタの予測誤差は、線形化手法に対して共役勾配法を用いることで最大値については26%、平均値は20%の改善が見られた。しかし、最大値の予測結果ではフォワード計算値と予測値の差が10mに達するクラスタも見られた。対応策として、クラスタ解析に使用するシナリオセットの違いによる浸水深の分類傾向を比較する事やクラスタ分割数を現在よりも大きいクラスタ分割数を採用する事が考えられる。ニューラルネットワークによる予測では最大値の予測は比較的うまく行えたが、平均値の予測では共役勾配法による予測値及びフォワード計算値よりも大きな値となる傾向が見られ、予測精度は共役勾配法と比べて必ずしも良いものではなかった。今後の課題として、提案手法の精度評価や浸水深の予測値が大きいパターンを上手く予測できる方法の検討が挙げられる。

四国沖土佐ばえ北部の海底地すべりを仮定した非静水圧効果有の二層流モデル津波計算

Two-Layer Flow Model Tsunami Calculation with Non-hydrostatic Pressure Effect under the Assumption of Submarine Landslide in the Northern Part of Tosa-Bae off Shikoku

*黒住 将弘¹、馬場 俊孝¹

*Masahiro Kurozumi¹, Toshitaka Baba¹

1. 徳島大学

1. Tokushima univ

地震性津波は地震動を伴っているため揺れで津波の来襲を予期できるが、海底地すべりによる非地震性津波は地震動を伴わないか、もしくは弱い場合、津波の来襲を見誤る恐れがある。我々は海底地すべりのリスク評価のため、四国沖の海底地すべり痕の地形調査を実施しており、その結果から得られた地すべり痕を基に計算コードJAGURSの二層流モデルを用いて数値シミュレーションを行った。地すべり痕の大きさは東西方向に約1.9km、南北方向に約2.3km、厚さ約60mであった。この二層流モデルには下層の変位を上層に受け渡す際に毎ステップ非静水圧効果(Kajiuraフィルター)を導入しており、本研究ではKajiuraフィルターの有無による沖合津波波形、海岸沿いでの津波高、分散波計算を調査した。Kajiuraフィルターを使用することによって津波波形に生じていた微小振動が抑制された。津波波源ではKajiuraフィルター有りの場合では水位上昇量が最大0.85mであったのに対し、考慮しない場合では2.42mであった。しかし、その他の地点ではKajiuraフィルターの有無で0.1m以下の違いしかなかった。本海底地すべりに四国海岸沿いでは最大約3mの津波が予測されるので、この値に対してKajiuraフィルターの有無による違いは、へ減を除いて、十分小さいといえる。上層に分散項を追加した計算を試みたが、Kajiuraフィルターの有無にかかわらず四国沖土佐ばえの実地形データでは、振動が発生してしまいうまく計算ができなかった。このため、水深を1000mから3500mで傾斜が10度の仮想地形データを作成し、Kajiuraフィルターの有無による解析を実施した。波形を比べるとフィルター無のほうが引き波が顕著になる傾向が見られた。さらに、本研究の解析では下層に振動が発生していたので、下層に粘性項も導入した。既往研究を参考にして粘性係数を設定し計算を実施したが、結果に違いは見られなかった。

南海トラフ沿いで発生する海底地すべりによる津波励起の特徴に関する予察

A Preliminary Examination on Characteristics of Submarine Landslide Tsunami along the Nankai Trough

*今井 健太郎¹、中村 恭之¹、富士原 敏也¹、谷岡 勇市郎²

*Kentaro IMAI¹, Yasuyuki Nakamura¹, Toshiya Fujiwara¹, Yuichiro Tanioka²

1. 海洋研究開発機構 海域地震火山部門、2. 北海道大学 大学院理学研究院

1. JAMSTEC, 2. Hokkaido Univ.

南海トラフでは100-200年間隔で巨大地震が繰り返し発生しており、当該沿岸地域では津波による激甚被害を被ってきた。このような歴史的背景に加えて、2011年東北沖地震津波の発生状況を踏まえ、内閣府は現在考え得る最大規模であるM9クラスの南海トラフ巨大地震の波源断層モデルを公表した。この最大想定モデルでは、断層すべりによる津波励起について検討されているが、巨大地震に伴った海底地すべりによる津波励起の影響については検討されていない。一方で、南海トラフ沖において海底地すべり痕は多く見出されている。森本・他（2017）は、南海トラフ沖を包含する日本周辺における海底地すべりの判読を行い、その分布特性について検討を行っている。Strasser et al. (2011) は熊野灘沖における3次元の地下構造反射断面を活かして詳細な地すべり諸元について詳細に検討を行っている。Baba et al. (2019) や黒住・他（2021）は、四国沖土佐ばえにおいてマルチナロービーム音響測深による海底地すべりの調査を実施し、大規模な海底地すべり痕を見出し、さらに、海底地すべりによる津波の影響評価を検討している。いずれの先行研究でも、海底地すべりの発生年代や励起源については言及されていないものの、南海トラフの沖合における海底地すべりの存在が発生状況の理解が進んでいるといえる。

本研究では、先行研究の成果を踏まえて南海トラフ巨大地震に伴って発生し得る海底地すべり津波の規模について、簡易的な評価手法を用いて予察を行い、巨大地震に伴った海底地すべり津波の影響について検討することを目的とする。地すべり痕の諸元が明らかにされている熊野灘沖 (Strasser et al., 2011) でのイベントにおける津波励起の規模について検討を行った。Strasser et al. (2011) で評価された地すべり規模について、発生個所の水深は2,200 m、地すべりの推定長さおよび幅は10 kmと3~5 km、構造断面から読み取ることでできる滑落深さは150~2200 mである。この地すべり諸元に基づいてWatts et al. (2005) で地すべりによる最大津波励起振幅を評価するとおおよそ10 cm程度となり、沿岸での津波は最大で40 cm程度となる。この地すべり痕の近傍地域である和歌山県那智勝浦を例としてその影響を検討してみると、当該地域では、1707年宝永地震で6~7 m、安政東海地震で6 m、昭和東南海地震では4 m程度であり、熊野灘沖の地すべり痕による津波の影響は1割程度以下となる。ただし、津波周期に応じた副振動の影響などは考慮していないため、定量的な評価には数値解析を要する。ただし、同規模の海底地すべりがより浅い水深で発生する場合には結果は大きくこととなり、Strasser et al. (2011) で評価された地すべり規模が水深200 m程度の海域で発生した場合、最大津波励起振幅は3 mを越えることとなり、無視できなくなる。

本発表では、森本・他（2017）による地すべり痕の判読成果を活用して、南海トラフ沖の海底地すべり規模の評価を行い、巨大地震に伴う海底地すべり津波の影響について検討する。

謝辞：本研究は 科学研究補助金（研究代表者：谷岡勇市郎、課題番号：19H01977）Rの一環として行われました。

2006 年及び 2007 年千島列島沖地震津波の減衰過程

Attenuation of the 2006 and 2007 Kuril islands tsunamis

*赤井 啓嗣¹、新本 直子²、馬場 俊孝¹

*Keiji Akai¹, Naoko Shinmoto², Toshitaka Baba¹

1. 徳島大学大学院、2. 徳島大学

1. Tokushima graduate school, 2. Tokushima univ.

津波の到達時刻および高さを精度よく予測する技術とともに、事後対応の迅速さや安全性のために津波の減衰について精度よく予測する技術も求められる。本研究では、2006 年及び 2007 年千島列島沖地震の DART 及び日本沿岸の験潮所で観測された津波の減衰について、地震発生から 48 時間の津波記録に適当な近似関数をフィットさせ、減衰パラメータを推定した。二つの地震はそれぞれ海溝型地震とアウターライズ地震であった。また、DART記録については非線形長波式で計算された津波の減衰と比較した。数値シミュレーションによって、津波の減衰過程を再現できるかについての検証も目的の一つである。

本研究では、減衰の傾向を把握する手法として、林ら(2010)で定義された移動自乗平均振幅(MRMS 振幅)に倣った。林ら(2010)は、験潮所で観測された津波の MRMS 振幅の最大値以降の部分について、指数関数または累乗関数をあてはめ、減衰パラメータを推定した。しかし、本研究で扱った DART 記録については指数近似、累乗近似ではうまく近似できず、対数関数による近似が最も良い2値が得られた。また、験潮所で観測された津波については、指数近似と対数近似で同等の結果となった。以上から、津波の減衰は沿岸、沖合に関わらず、共通して対数関数による近似が好ましいと結論付けた。

また、観測津波と計算津波の比較の手法として、計算の入力に用いる断層パラメータのすべり量を適宜修正することで観測津波と計算津波の MRMS 振幅の最大値を一致させ、最大値以降の減衰過程を比較した。その結果、すべての DART 観測点において計算津波の減衰が観測波形に比べ遅かった。計算時の摩擦係数を大きくするにつれ、観測津波の減衰過程に近づく傾向があるが、両者を一致させるには摩擦係数が現実的でない値が必要で、課題が残った。

1952年カムチャツカ地震における顕著な津波後続波

Later tsunami wave of the 1952 Kamchatka earthquake

*対馬 弘晃¹、山本 剛靖¹

*Hiroaki TSUSHIMA¹, Takeyasu YAMAMOTO¹

1. 気象庁気象研究所

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

背景と目的

津波が発生すると、第一波が沿岸に到着した後、数時間以上経ってから顕著に高い後続波が沿岸に押し寄せることがある。2006年千島列島沖の地震（Mw 8.3）においては、天皇海山列で散乱された津波の影響で、日本の太平洋沿岸では第一波到達後5時間以上経ってから最大波が観測された（たとえば、気象庁、2006）。こうした顕著な振幅を持つ後続波について、その発現条件（波源と観測点の位置関係等）や、津波数値モデルによる後続波の再現可能性を把握しておくことは、実際に津波が起きた際に、リアルタイムにその時間推移を見通すうえでの参考になる。1952年カムチャツカ地震（Mw 9.0）では、日本の沿岸検潮所で、第一波到達後に、遅れて高い津波が観測された。本研究では、この顕著な後続波に着目し、津波数値解析による再現が可能であるかを調べるとともに、その成因を探る。

潮位観測データ

日本の太平洋沿岸の検潮所のうち、気象庁所管の函館、宮古、鮎川、小名浜の紙記録をデジタイズして、潮位波形データを作成した。同波形データから潮汐成分を除去して、64分の時間幅で移動二乗平均平方根（Moving Root Mean Squares : MRMS）振幅を算出し、4地点のMRMS振幅時系列を津波第一波到達時刻で揃えてスタックした。得られた時系列を観察すると、日本への津波到達後、MRMS振幅が増加して経過時間12時間付近で最大になり、40時間にかけていったん減衰したのち、48時間付近において最大値の半分程度まで再び振幅が増加する様子がみられた。

津波数値計算

非線形長波理論に基づき、太平洋全域について津波数値計算を行った。数値計算にはJAGURS (Baba et al., 2015)を用いた。空間格子間隔は30秒とし、GEBCO_2014の地形データを用いて、72時間の積分計算を行った。津波の初期条件としては、Johnson and Satake (1999)が津波波形逆解析で推定した1952年カムチャツカ地震のすべり分布モデルを用いた。Okada (1985)の式で海底上下地殻変動分布を計算し、それを初期水位分布とみなした。この津波数値計算により得られた沿岸検潮所4地点の津波波形に対して、観測データと同様の処理を行い、スタックしたMRMS振幅時系列を算出した。

結果と考察

数値計算によるMRMS振幅時系列をみると、第一波到達後に振幅が増加し、いったん減衰したのち、48時間付近で再び増加する時間変化をしており、観測データにみられた時間変化のパターンを概ね再現した。この後続波の成因を調べるため、数値計算による津波高のスナップショットを観察したところ、波源から南米へ伝播した津波がチリ沿岸で反射して、日本まで伝わる様子がみられた。このことから、日本の沿岸検潮所で観測された48時間付近の振幅の高まりは、チリからの反射波であると解釈できる。

ポスター会場（2日目） | 委員会活動紹介：S24.社会に対する委員会の活動

2021年10月15日(金) 15:30 ~ 17:00 | 委員会活動紹介 P会場

S24

[S24P-01] 広報委員会

○佐藤 利典¹ (1.日本地震学会)

[S24P-02] 学会情報誌編集委員会

○豊国 源知¹ (1.日本地震学会)

[S24P-03] 強震動委員会

○干場 充之¹ (1.日本地震学会)

[S24P-04] 学校教育委員会

○加納 靖之¹ (1.日本地震学会)

[S24P-05] 災害調査委員会

○吾妻 崇¹ (1.日本地震学会)

[S24P-06] 普及行事委員会

○佐藤 明子¹ (1.日本地震学会)

[S24P-07] ジオパーク支援委員会

○松原 誠¹ (1.日本地震学会)

[S24P-08] 地震学を社会に伝える連絡会議

○久田 嘉章¹ (1.日本地震学会)

ポスター会場（2日目） | 委員会活動紹介 | S24.社会に対する委員会の活動

S24

2021年10月15日(金) 15:30 ～ 17:00 委員会活動紹介 (P会場)

[S24P-01]広報委員会

○佐藤 利典¹ (1.日本地震学会)

広報委員会の活動を紹介します

ポスター会場（2日目） | 委員会活動紹介 | S24.社会に対する委員会の活動

S24

2021年10月15日(金) 15:30 ～ 17:00 委員会活動紹介 (P会場)

[S24P-02]学会情報誌編集委員会

○豊国 源知¹ (1.日本地震学会)

学会情報誌編集委員会の活動を紹介します

ポスター会場（2日目） | 委員会活動紹介 | S24.社会に対する委員会の活動

S24

2021年10月15日(金) 15:30 ～ 17:00 委員会活動紹介 (P会場)

[S24P-03]強震動委員会

○干場 充之¹ (1.日本地震学会)

強震動委員会の活動を紹介します

ポスター会場（2日目） | 委員会活動紹介 | S24.社会に対する委員会の活動

S24

2021年10月15日(金) 15:30 ～ 17:00 委員会活動紹介 (P会場)

[S24P-04]学校教育委員会

○加納 靖之¹ (1.日本地震学会)

学校教育委員会の活動を紹介します

ポスター会場（2日目） | 委員会活動紹介 | S24.社会に対する委員会の活動

S24

2021年10月15日(金) 15:30 ～ 17:00 委員会活動紹介 (P会場)

[S24P-05]災害調査委員会

○吾妻 崇¹ (1.日本地震学会)

災害調査委員会の活動を紹介します

ポスター会場（2日目） | 委員会活動紹介 | S24.社会に対する委員会の活動

S24

2021年10月15日(金) 15:30 ～ 17:00 委員会活動紹介 (P会場)

[S24P-06]普及行事委員会

○佐藤 明子¹ (1.日本地震学会)

普及行事委員会の活動を紹介します

ポスター会場（2日目） | 委員会活動紹介 | S24.社会に対する委員会の活動

S24

2021年10月15日(金) 15:30 ～ 17:00 委員会活動紹介 (P会場)

[S24P-07]ジオパーク支援委員会

○松原 誠¹ (1.日本地震学会)

ジオパーク支援委員会の活動を紹介します

ポスター会場（2日目） | 委員会活動紹介 | S24.社会に対する委員会の活動

S24

2021年10月15日(金) 15:30 ～ 17:00 委員会活動紹介 (P会場)

[S24P-08]地震学を社会に伝える連絡会議

○久田 嘉章¹ (1.日本地震学会)

地震学を社会に伝える連絡会議の活動を紹介します