

2021年10月15日(金)

A会場 | 一般セッション：S15. 強震動・地震災害

9:00 ~ 10:00 | A会場 A会場

AM-1

座長:浅野 公之(京都大学防災研究所)、長坂 陽介(港湾空港技術研究所)

9:00 ~ 9:15

[S15-12] 地震波トモグラフィーによる九州地方の地殻内不均質構造

○山田 浩二¹、鳥家 充裕¹、岡崎 敦² (1.(株)阪神コンサルタンツ、2.関西電力)

9:15 ~ 9:30

[S15-13] 青森県東方沖の地震があぶり出す東北日本と北海道の減衰構造の違い

○筧 楽磨¹ (1.神戸大・理)

9:30 ~ 9:45

[S15-14] 函館平野三次元速度構造モデルによる長周期地震動増幅特性

○浅野 公之¹、岩田 知孝¹、吉田 邦一²、井上 直人²、染井 一寛²、宮腰 研²、大堀 道広³ (1.京都大学防災研究所、2.一般財団法人地域地盤環境研究所、3.福井大学附属国際原子力工学研究所)

9:45 ~ 10:00

[S15-15] 地震波干渉法理論に基づく強震記録のレシーバー関数と自己相関関数の同時解析による地盤構造の推定

○地元 孝輔¹ (1.香川大学)

A会場 | 一般セッション：S16. 地盤構造・地盤震動

10:00 ~ 10:30 | A会場 A会場

AM-1

座長:長坂 陽介(港湾空港技術研究所)、浅野 公之(京都大学防災研究所)

10:00 ~ 10:15

[S16-01] 地震波干渉法の適用条件に関する一考察

○長坂 陽介¹、野津 厚¹ (1.港湾空港技術研究所)

10:15 ~ 10:30

[S16-02] 2016年11月22日福島県沖の地震 (M7.4) により福島県東部で観測されたやや長周期の後続波群

○植竹 富一¹ (1.東京電力ホールディングス(株))

A会場 | 一般セッション：S16. 地盤構造・地盤震動

11:00 ~ 12:15 | A会場 A会場

AM-2

座長:林田 拓己(国研) 建築研究所 国際地震工学センター)、吉田 邦一(一財) 地域 地盤 環境 研究所)

11:00 ~ 11:15

[S16-03] 奈良市三条本町NB-1ボーリングにおける速度構造調査

○岩田 知孝¹、山田 浩二²、澤田 基貴²、石原 大亮²、岡本 茂² (1.京都大学防災研究所、2.(株) 阪神コンサルタンツ)

11:15 ~ 11:30

[S16-04] MeSO-net観測記録データトラフィックにみる2020年の首都圏における常時微動レベル低下と要因検証

○林田 拓己¹、吉見 雅行²、鈴木 晴彦³、森 伸一郎⁴、香川 敬生⁵、山田 雅行⁶、一井 康二⁷ (1.建築研究所、2.産業技術総合研究所、3.応用地質株式会社、4.愛媛大学、5.鳥取大学、6.株式会社ニュージェック、7.関西大学)

11:30 ~ 11:45

[S16-05] 微動アレー記録をもとに求めた回転成分から推定した和歌山平野におけるラブ波位相速度

○吉田 邦一¹、上林 宏敏²、大堀 道広³ (1.(一財) 地域 地盤 環境 研究所、2.京都大学、3.福井大学)

11:45 ~ 12:00

[S16-06] 表面波分離の基礎的検討と関東平野内の長周期地震動への適用

○佐藤 拓也¹、上林 宏敏²、永野 正行¹ (1.東京理科大学、2.京都大学)

12:00 ~ 12:15

[S16-07] Equivalent linear method with complex frequency for site response analyses to near-fault fling-step displacements

○呉 双蘭¹、野津 厚¹、長坂 陽介¹ (1.港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 地震動研究グループ)

A会場 | 一般セッション：S04. テクトニクス

13:30 ~ 14:45 | A会場 A会場

PM-1

座長:中尾 篤史(海洋研究開発機構)、米島 慎二(東京大学地震研究所)

13:30 ~ 13:45

[S04-01] 北陸地方下のフィリピン海プレート形状を探る

○宮崎 一希¹、中島 淳一¹、末永 伸明²、吉岡 祥一^{2,3} (1.東京工業大学理学院地球惑星科学系、2.神戸大学都市安全研究センター、3.神戸大学大学院理学研究科)

13:45 ~ 14:00

[S04-02] 微小地震震源アレー解析及びOBSアレー解析から見てきた茨城沖におけるサイスモテクトニクス

○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)

14:00 ~ 14:15

[S04-03] Cascadia沈み込み帯の3次元異方性構造

○趙 大鵬¹、Hua Y.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)

14:15 ~ 14:30

[S04-04] 地震の最大マグニチュードと沈み込み帯パラメタを関係づける回帰分析

○中尾 篤史¹、桑谷 立¹、上木 賢太¹、吉田 健太¹、油谷 拓¹、日野 英逸²、赤穂 昭太郎³ (1.海洋研究開発機構 海域地震火山部門、2.統計数理研究所 モデリング研究系、3.産業技術総合研究所 人間情報インタラクション研究部門)

14:30 ~ 14:45

[S04-05] 大地震による火山噴火誘発のメカニズム

○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)

A会場 | 一般セッション：S15. 強震動・地震災害

2021年10月15日(金) 9:00 ~ 10:00 | A会場 A会場

AM-1

座長:浅野 公之(京都大学防災研究所)、長坂 陽介(港湾空港技術研究所)

9:00 ~ 9:15

[S15-12] 地震波トモグラフィーによる九州地方の地殻内不均質構造

○山田 浩二¹、鳥家 充裕¹、岡崎 敦² (1.(株)阪神コンサルタンツ、2.関西電力)

9:15 ~ 9:30

[S15-13] 青森県東方沖の地震があぶり出す東北日本と北海道の減衰構造の違い

○笥 楽磨¹ (1.神戸大・理)

9:30 ~ 9:45

[S15-14] 函館平野三次元速度構造モデルによる長周期地震動増幅特性

○浅野 公之¹、岩田 知孝¹、吉田 邦一²、井上 直人²、染井 一寛²、宮腰 研²、大堀 道広³ (1.京都大学防災研究所、2.一般財団法人地域地盤環境研究所、3.福井大学附属国際原子力工学研究所)

9:45 ~ 10:00

[S15-15] 地震波干渉法理論に基づく強震記録のレシーバー関数と自己相関関数の同時解析による地盤構造の推定

○地元 孝輔¹ (1.香川大学)

地震波トモグラフィーによる九州地方の地殻内不均質構造

Inhomogeneous structure in the crust of the Kyushu region by seismic tomography

*山田 浩二¹、鳥家 充裕¹、岡崎 敦²

*Koji Yamada¹, Mitsuhiro Toya¹, Atsushi Okazaki²

1. (株)阪神コンサルタンツ、2. 関西電力

1. Hanshin Consultant's Co.,Ltd., 2. KEPCO

震源決定や震源インバージョンなど地震の震源域に関する解析の多くは1次元構造によるものであり、基盤岩における不均質構造は考慮されていない。震源情報や強震動予測の精度を考慮するにあたり、基盤岩の不均質を考慮する必要性があるか否か検証しておくことは重要であると考えられる。

これまでに幾つかの大爆破の観測等により基盤岩における構造推定が試みられているが、基盤岩内部の不均質を推定できるほどその数は多くない。VJMA2001、JIVSMなど幾つかの速度構造モデルが提案されているが、いずれも情報量の少ない中で構築されていると考えられる。構造探査は波動の発生の上易さからP波が用いられるが、工学的に重要なS波に対してはほとんど行われていない。特に大深度においてはS波の構造探査は行えないのが実情である。一方、現時点までに観測された自然地震に関する走時情報は相当量蓄積されている。そこでこの走時情報を用いて、九州地方を対象としたP波およびS波の地震波トモグラフィーを実施し、基盤岩の速度不均質に関する検討を行った。

北緯32.1～34.0°、東経129.4～131.9°、深さ0～20 kmで発生した地震を対象として、Hi-net検測値データに、強震観測網（K-net）の連続観測データからP、S波走時を読み取った走時データを追加した。別途、北朝鮮で実施された核実験の表面波位相速度およびモホ面を伝わったと考えられる地震波速度を用いた逆解析を行って、地表からモホ面までの大局的な速度構造を求めた。これをトモグラフィー解析のための初期モデルとしてhypomhプログラム（Hirata and Matsu'ura, 1987）を用いた震源決定を行い観測点補正量を推定するとともに、①解の収束条件を満たさなかった地震、②データ数が10未満の地震、を除いた初動走時をトモグラフィーに用いるデータセットとした。その結果、地震数は79375地震、観測点数はHi-net、気象庁、大学で95点、K-NET62地点となった。また、走時数はP波が1130862、S波が1149210個である。

解析にはFMTOMO(Rawlinson et al, 2006)を用い、北緯32.0～34.1°、東経129.3～132.0°の範囲を水平方向のグリッド間隔を0.1°刻みとして与えた。鉛直方向に関しては、最初は4km間隔とし、解が収束した段階で、それを初期モデルとする深さ方向に2km間隔の格子として、深さ方向への分解能の向上を行った。

上記の解析をP波およびS波に対して独立に行った。それぞれ独立に行った解析であるが、それぞれの速度分布の遅速には良い対応関係にあるように見られる。なお、阿蘇火山の直下付近の深さ12～20km付近には周辺に比べ、P波及びS波が周辺に比べてやや遅い速度分布でVp/Vs比がやや小さくなる分布が見られている。Abe et al. (2017)はレシーバー関数の解析および理論計算の対応から、阿蘇の下にS波の低速度領域が存在することを指摘している。トモグラフィーによる低速度分布は、Abe et.al(2017)の結果に対応するものと考えられる。

今後は推定した不均質速度構造の妥当性の検討を3次元差分法により進める予定である。なお、今回行ったトモグラフィー解析では、地震観測点密度により、これ以上の分解能の不均質速度構造を得るのは困難であった。より詳細な不均質を明らかにするためには、地震数を増やすだけでなく、観測点密度を上げることが必要と考えられる。

謝辞：検測データおよび強震波形データは防災科学技術研究所高感度地震観測網（Hi-net）および強震観測網（K-net）に公開されているデータを用いました。記して感謝いたします。また、本研究は、12電力等による共同研究の成果の一部です。

青森県東方沖の地震があぶり出す東北日本と北海道の減衰構造の違い

Difference of attenuation structure between Northeastern Japan and Hokkaido revealed by the earthquakes east off Aomori Prefecture

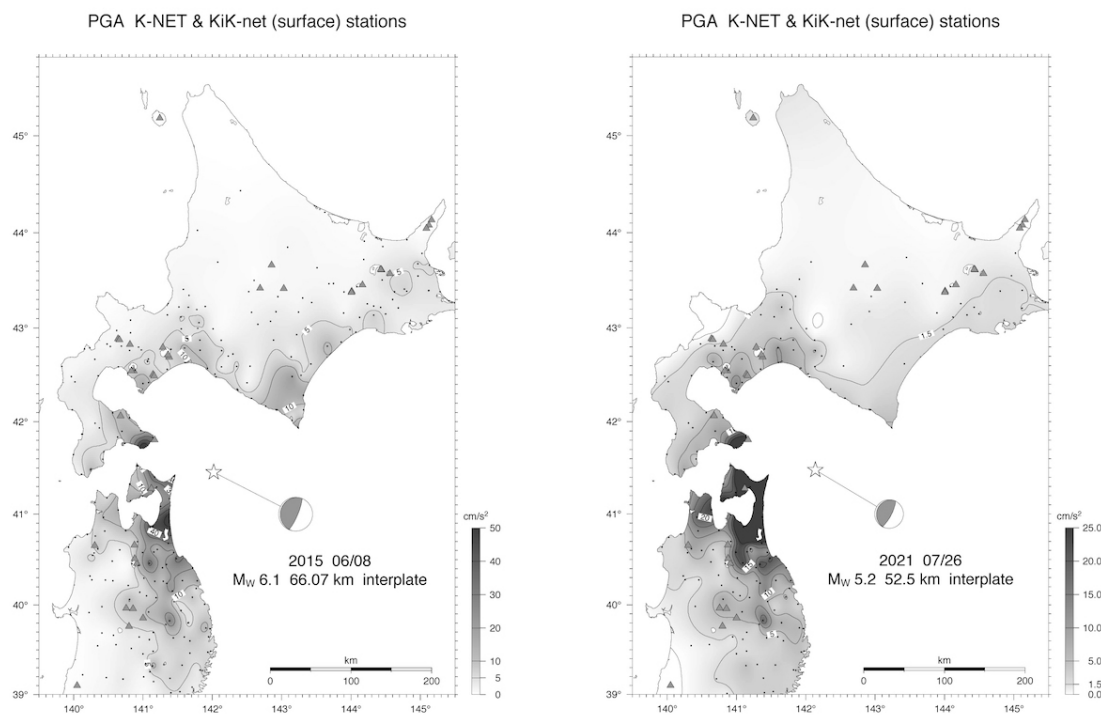
* 笥 楽磨¹* Yasumaro KAKEHI¹

1. 神戸大・理

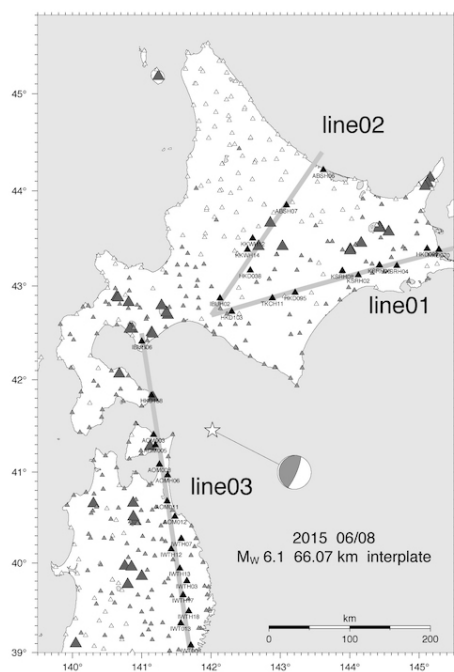
1. Graduate School of Science, Kobe Univ.

青森県東方沖では震源の深いプレート境界地震が発生する。この研究では2015年6月8日 (M_w 6.1, 深さ 66.07 km, 以下イベント1) と2021年7月26日 (M_w 5.2, 深さ 52.5 km, 以下イベント2) の2つの青森県東方沖のプレート境界地震を取り上げ、その強震動の特徴を調べる。解析には防災科学技術研究所の K-NET, KiK-netの強震記録を使った。図(a)は、2つのイベントによる加速度振幅の最大値 (PGA) の空間分布を示す。東北日本では、大きな加速度振幅は島弧の前弧側のみで見られ、背弧側での加速度振幅は小さい。これはKakehi (2015)が指摘しているように、東北日本弧の2次元的な減衰構造、すなわち前弧側は高Q値の媒質、背弧側は低Q値の媒質 (火山フロント直下は特にQ値が小さい) から成るという減衰構造を反映し、高周波地震波の振幅が背弧側で急激に小さくなることによるものである。このような島弧の背弧側での高周波地震波の振幅の減衰は、北海道でも同じように見られる。ただし、北海道の場合、東北日本とは異なり、図(a)に見られるように前弧側においても高周波地震波の振幅が小さくなる領域が存在する。具体的には日高山脈の西側の領域がそうである。日高山脈では島弧と島弧が衝突しており、その領域は「日高衝突帯」と呼ばれ、地下速度構造が複雑であることが知られている。日高衝突帯では速度構造のみならず減衰構造も複雑で、衝突帯の西側には、前弧側であるにもかかわらずQ値の低い領域が存在することが先行研究によって明らかにされている (Kita et al. (2014), Nakamura And Shiina (2019))。この前弧側の低Q値領域の存在により、北海道では前弧側でも高周波地震波の振幅が小さい領域が生じ、東北日本とは異なり複雑な振幅分布を示す。図(c)はイベント1による加速度最大振幅 (PGA) の距離減衰を示す。図は、図(b)に示す3本の直線アレイに着目し、各直線アレイをなす観測点のデータを黒丸で示している。北海道の前弧側を通るline01では、震源距離の小さい観測点も大きい観測点も振幅が同程度となる特異な傾向を示す。line01の震源距離が大きい観測点 (道東の太平洋岸の観測点) は、白丸で示されるデータセット全体の中で振幅の大きい位置を占め、これは前弧側での減衰が小さいことに対応している。それに対し、line01の震源距離が小さい観測点は、まさに上述の日高衝突帯西側の領域に対応するのだが、データセット全体の中で振幅が小さいグループをなしており、これは低Q値の媒質によって地震波の振幅が減衰したことを強く示唆している。line02は北海道の前弧側から背弧側に延びる測線であるが、測線の前弧側が日高衝突帯西側に位置し、背弧側のみならず前弧側も低Q値の媒質により高周波地震波が減衰を受けるといえる測線である。実際、距離減衰の図を見ても、測線上の観測点の黒丸は白丸で示されるデータセット全体の中で振幅の最も小さいグループをなしている。一方、主として東北日本弧の前弧側を通るline03の場合、地震波は前弧側の高Q値の媒質中のみを伝播するので、振幅はほとんど減衰しない。それを反映して、距離減衰の図の測線上の観測点の黒丸は、データセット全体の中で振幅の大きいグループをなしている。

(a)



(b)



(c)

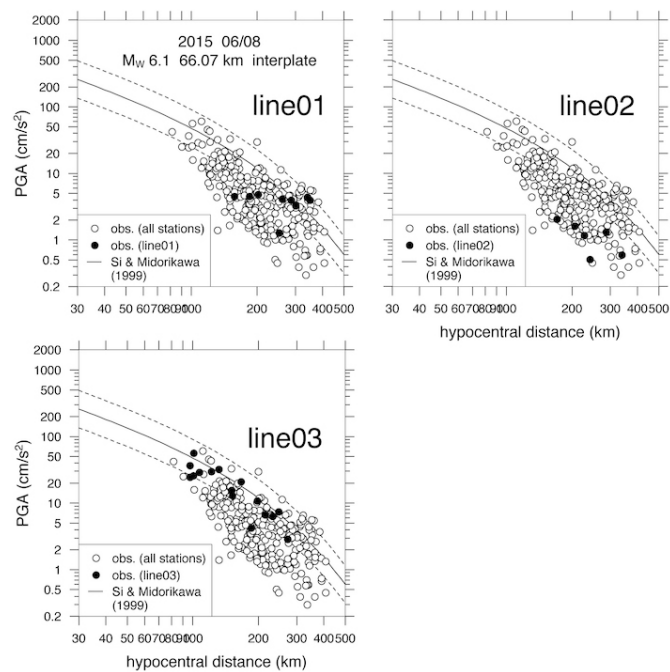


図. (a) 2つのeventのPGAの空間分布。(b) 3本の直線アレイ。(c) PGAの距離減衰(白丸:全データ, 黒丸:各直線アレイ上の観測点のデータ)。

函館平野三次元速度構造モデルによる長周期地震動増幅特性

Long-Period Ground Motion Amplifications in the Hakodate Plain Based on Ground Motion Simulations Using a New 3D Velocity Model

*浅野 公之¹、岩田 知孝¹、吉田 邦一²、井上 直人²、染井 一寛²、宮腰 研²、大堀 道広³

*KimiYuki ASANO¹, Tomotaka IWATA¹, Kunikazu YOSHIDA², Naoto INOUE², Kazuhiro SOMEI², Ken Miyakoshi², Michihiro OHORI³

1. 京都大学防災研究所、2. 一般財団法人地域地盤環境研究所、3. 福井大学附属国際原子力工学研究所

1. DPRI, Kyoto Univ., 2. Geo-Research Inst., 3. RINE, Univ. of Fukui

函館平野は南側を津軽海峡に面し、東西を上磯山地と亀田半島に囲まれた堆積盆地であり、函館平野の西縁は、逆断層である函館平野西縁断層帯によって丘陵・段丘と低地との地形境界が形成されている〔太田・他, 1994〕。我々は日本海地震・津波研究プロジェクトのサブサブテーマ3.2として、北海道の函館平野において、小半径～大半径の微動アレイ探査（5地点）を実施し、既存の反射法探査結果〔石油公団, 1981; 佐藤・他, 2019〕も併せ、函館平野の三次元深部地盤速度構造モデルを作成した。函館平野の堆積盆地構造は、大局的には平野西縁に向かって深くなる構造をしている。第四系及び新第三系からなる堆積層の層厚は最深部で約3 kmである。また、2016年内浦湾の地震の地震動シミュレーション（＜2 Hz）を行うことで、速度構造モデルのパフォーマンスチェックも行った〔以上、浅野・他, 2020, 地震学会〕。

函館平野においては、函館平野西縁断層帯のほかにも、太平洋や日本海で発生する巨大地震による地震動が想定される。例えば、1968年十勝沖地震では函館港周辺や五稜郭の被害などが報告されている〔1968年十勝沖地震調査委員会, 1969〕。また、盆地としての深さも最大で3 km程度あり、大阪盆地などと比べても遜色のない規模を有していることから、長周期地震動についても発達しやすい環境にあると考えられる。本研究では、日本海地震・津波研究プロジェクトで作成した速度構造モデルに基づいて、函館平野における長周期地震動の伝播・増幅特性を検討した。理論的な地盤増幅特性に関する既往の多くの研究では、一次元構造の地盤速度構造モデルを与えて計算されることが多い。函館平野をはじめ活断層などで盆地形状が急変している地域などでは、地震動の三次元的な伝播による影響も考慮していく必要がある。また、実体波（S波）だけでなく、後続の表面波部分についても含めて考えなければならない。

本研究では、函館平野からある程度離れた位置に仮想的な点震源を配置し、それぞれの震源について、堆積盆地ありと堆積盆地なしの2通りの地震動シミュレーション（差分法）を実施し、水平2成分の全波（60秒間）のフーリエスペクトルの二乗和平方根を計算地震動のフーリエ振幅スペクトルとして得た。ここで堆積盆地なしモデルとは、堆積層各層の物性値をすべてS波速度2.7 km/sの層のものに置き換えたモデルである。今回は、震央8ケース、震源深さ2ケースを設定したので、全部で16ケースのシミュレーションを実施した。各ケースについて、堆積盆地ありとなしの計算地震動のフーリエ振幅スペクトル比を計算した。最後に、全16ケースのフーリエ振幅スペクトル比の対数平均と対数標準偏差を求めることにより、その地点の地震動増幅特性を推定した。

周期5秒では、平野南西部の沿岸付近（上磯周辺）を中心に増幅率5～6倍の領域が広がった。その領域を取り囲むような感じで、周期4秒の増幅率が大きい領域が広がっている。これらは、この地域で基盤深度が最も深くなっていることと対応している。周期3秒以下では平野のほぼ全域に増幅率4倍以上の領域が広がっている。周期1～2秒になると、平野内でかなり複雑な空間分布となるとともに、対数標準偏差が大きくなり、ケース間のばらつきも目立つようになる。周期1秒での増幅率の対数標準偏差は最大で0.3（つまり2倍）となった。この検討では、全波のフーリエスペクトルを計算していることから、周期が短くなると、入射方向によって後続動の励起や干渉に違いが生じるためと推測される。ただし、 $V_s < 600$ m/sの浅部地盤速度構造モデルについては作成されていない。このため、本検討はあくまでS波速度600 m/sの速度層上面での地震動増幅特性を議論していることに注意が必要である。函館平野での地震動予測の高度化においては、浅部地

盤速度構造の適切なモデル化に資する調査や研究も今後実施されることが望まれる。

謝辞：本研究で使用した三次元深部地盤速度構造モデルは文部科学省科学技術試験研究委託「日本海地震・津波研究プロジェクト」（平成25～令和2年度，代表機関：東京大学地震研究所）による成果です。

地震波干渉法理論に基づく強震記録のレシーバー関数と自己相関関数の同時解析による地盤構造の推定

Joint analysis of receiver function and autocorrelation using strong motion for velocity structure profiling based on seismic interferometry

*地元 孝輔¹

*Kosuke CHIMOTO¹

1. 香川大学

1. Kagawa University

地下構造探査では、遠地震によるPs変換波を検出するためのレシーバー関数が多く使われている (Langston, 1979)。小林ほか(1998)は、堆積盆地において近地震のレシーバー関数により、地震基盤面を推定している。大規模な堆積平野においては、PpPs変換波が卓越する (下村ほか, 2018)。近年、レシーバー関数法が、地震波干渉法により一般化されたものであることが示された (Tauzin et al., 2019)。それにより地震波干渉法による自己相関関数とレシーバー関数を同時に使用した解析が行われている (Mroczek and Tilmann, 2021)。本研究では、KiK-net成田において観測された強震記録のレシーバー関数と自己相関関数を計算し、それらの同時解析によりP波とS波速度構造の推定を行う。まず、全国一次地下構造モデルにより、理論レシーバー関数を計算した。モホ面によるPs変換波は、4秒以上で観測される一方で、地震基盤によるPs変換波は約0.8秒で観測され、さらに1.6秒程度でPpPs変換波が観測されることを確認した。さらに、モホ面によるPs変換波は、入射角と層の傾斜によって走時がそれぞれ1秒以上遅くなるが、地震基盤によるPs変換波はそれらによる変化はほとんど見られないことも確認した。KiK-net成田において、2008年以降に観測された1000以上の地震観測記録のP波部分のレシーバー関数と、上下動の自己相関関数を計算した。計算ではスペクトルホワイトニングを施し、周波数1-8Hzのバンドパスフィルタをかけた。レシーバー関数にはおよそ1秒と2秒においてPs変換波とPpPs変換波が明瞭に確認できた。さらに上下動の自己相関関数には、約1秒において反射波が確認できた。これらは、KiK-net成田の速度構造モデル (NIED, 2019) から計算されるものとよく合っている。さらに、S波のレシーバー関数を同様に解析したところSp変換波が確認できた。レシーバー関数によるPs変換波とPpPs変換波および自己相関関数の上下動とトランスバース成分によるP波とS波の反射を用いて、H-kスタック (Zhu and Kanamori, 2000) によりVpとVsの推定を行なった。Vsは適切にモデル化されているが、Vpは低くモデル化されていることがわかった。

A会場 | 一般セッション：S16. 地盤構造・地盤震動

2021年10月15日(金) 10:00 ~ 10:30 | A会場 A会場

AM-1

座長:長坂 陽介(港湾空港技術研究所)、浅野 公之(京都大学防災研究所)

10:00 ~ 10:15

[S16-01] 地震波干渉法の適用条件に関する一考察

○長坂 陽介¹、野津 厚¹ (1.港湾空港技術研究所)

10:15 ~ 10:30

[S16-02] 2016年11月22日福島県沖の地震（M7.4）により福島県東部で観測されたやや長周期の後続波群

○植竹 富一¹ (1.東京電力ホールディングス(株))

地震波干渉法の適用条件に関する一考察

A theoretical basis for the applicability of seismic interferometry

*長坂 陽介¹、野津 厚¹*Yosuke NAGASAKA¹, Atsushi Nozu¹

1. 港湾空港技術研究所

1. Port and Airport Research Institute

Sanchez-Sesma and Campillo (2006)やWapenaar and Fokkema (2006)は2地点の相互相関と厳密なグリーン関数を結びつけるための地震波干渉法の定式化を示しているが、そこでは波動場についていくつかの仮定が必要であり、その1つとして、S波とP波のエネルギー密度の比が $2(V_p/V_s)^3$ となるという仮定が用いられている。この仮定の妥当性については、過去にも研究がなされているが、未解明な点も残されている。

Weaver(1982)は拡散波動場をある周波数周辺に固有周波数を持つ各モードが平均的に等しいエネルギーを持つような波動場と定義している。このとき、S波とP波のエネルギー密度比は各固有モードの数の比と等しくなり、これが $2(V_p/V_s)^3$ となることを説明している。しかし、エネルギー密度比が $2(V_p/V_s)^3$ でない状態から出発して最終的に $2(V_p/V_s)^3$ となるためには固有モード間のエネルギー交換が必要であり、このエネルギー交換が弾性方程式を満たしながらどのように行われるかについてはWeaver(1982)は示していない。一方、Ryzhik et al. (1996)やPapanicolaou et al. (1996)は弾性波の放射輸送方程式を用いて多重散乱によるS波とP波のエネルギー交換について調べた。その結果、ランダムな媒質の内部では多重散乱により初期条件に関わらずエネルギー密度比は最終的に $2(V_p/V_s)^3$ となることを示した。しかし、自由表面や媒質境界の影響については論じておらず課題であると述べている。自由表面の影響に最も迫った研究はEgle(1981)の研究である。Egle (1981)は自由表面を持つ一様弾性体を考え、拡散波動場を様々な方向に伝播するランダムな平面波の重ね合わせとして定義して考察している。Egle (1981)による拡散波動場の定義は、Weaver(1982)によるものと比べより直観的で分かりやすく、また、反射の影響を考慮しやすい形となっている。Egle (1981)は自由表面にランダムに入射する平面波がPS変換、SP変換を繰り返すことでエネルギー密度比が一定の値に収束することを示したが、Egle (1981)が数値的に求めた値は $2(V_p/V_s)^3$ とはわずかに異なっていた。Weaver(1982)はその違いを数値誤差によるのではないかと考えたが、その真偽は明らかとなっていない。そこで本研究では自由表面が弾性波のエネルギー密度equipartitionに与える影響をより厳密に理解することを目的とし、Egle(1981)の条件に従う波動場のS波とP波のエネルギー密度比が $2(V_p/V_s)^3$ に収束することを解析的に示す。媒質は自由表面に囲まれた一様弾性体とし、波動場はランダムな位相を持つ平面波の重ね合わせとして表現されるものとする。異なる進行方向、タイプ (S波, P波), 周波数を持つ平面波は互いに無相関とする。Egle(1981)の検討によれば、このとき、自由表面での反射によるモード変換を繰り返すことで、S波とP波のエネルギー密度比 (R とする) は $R = (\gamma_{LT} V_p) / (\gamma_{TL} V_s)$ で表される。ここで γ_{LT} は単位時間あたりの自由表面への入射P波のエネルギーに対する反射S波のエネルギーの比率、 γ_{TL} はその逆の変換におけるエネルギーの比である。 γ_{LT} と γ_{TL} はあらゆる入射角を考慮した平均的なモード変換の割合である。特に反射波については自由表面における反射係数の2乗を入射角について積分することが必要であり、解析的な検討がなされなかった理由の1つであると推測される。しかし、 R を求めるには γ_{LT} と γ_{TL} の比率を求めればよく、それぞれを解析的に求める必要はない。本検討ではまずEgle(1981)で示されていなかった γ_{LT} と γ_{TL} の表現を求め、これらについて比較的単純な変数変換を行うことにより直接積分を行うことなく R を積分を含まない形で表せること、それが $2(V_p/V_s)^3$ となることを示した。本検討により、自由表面をもつ一様弾性体内におけるランダムな平面波による波動場は地震波干渉法の定式化におけるエネルギー密度比に関する条件を満たすことが示された。自由表面での反射と多重散乱はS波とP波のエネルギー密度について同じ効果を持つことになる。自由表面での反射または散乱によりSP変換とPS変換が繰り返されることが本質的なメカニズムであると考えられる。従って自由表面を持つランダムな媒質内においても波動場は上記の比率を満たすことが期待できる。自由表面だけでなく異なる媒質の境界の影響についても検討を行う必要があり、これについては今後の課題である。

2016年11月22日福島県沖の地震（M7.4）により福島県東部で観測されたやや長周期の後続波群

Long-period later phases in the east of Fukushima prefecture during the M7.4 off Fukushima earthquake on Nov. 22, 2016

*植竹 富一¹

*Tomiichi UETAKE¹

1. 東京電力ホールディングス(株)

1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

1. はじめに

2016年11月22日に福島県沖で発生したM7.4の地震は、地震規模が大きく、震源も浅い

（JMA:25km、F-net:11km）ため、広域でやや長周期地震動が観測された。特に震央に近い福島県東部の広野町では周期6秒が卓越した顕著な後続波群が三成分に認められた。本研究では、福島県東部における後続波群の伝播に注目し、広野で観測された後続波群の特徴を明らかにする。

2. 波群の伝播特性

福島県内のK-NET・KiK-netの記録を用いて、周期5秒以上の長周期速度波形を作成し、福島県東部域での波群の伝播性状を調べた。なお、水平動波形は、震央からの方位でRadial成分・Transverse成分に変換した。UD成分に見られる後続波は、浜通りの平野から双葉断層を越え、阿武隈山地、中通り、会津盆地まで追跡が可能である。見かけの群速度は、およそ3.0 km/sである。Radial成分にも同様な波群が認められた。一方、Transverse成分波形では、震央に近い海岸部での振幅は大きい、広域で連続性の良い後続波が認められない。

3. 海岸線沿いの波群の変化

各機関により福島県東部で行われている強震観測の記録をもちいて、広野町周辺での後続波群の変化を調べた。UD成分に見られる後続波群については、隣接する広野火力とFKS010での振幅がやや大きいものの、観測点間の連続性は広い範囲で良い。一方、広野火力での速度波形が振幅最大、継続時間最長となっている水平動の後続波群は、南北に延びる海岸線上では連続的に波形が変化しているが、やや内陸の観測点では後続波の振幅は小さく継続時間も短い。そのため、顕著な後続波群は海岸線にトラップされているように見える。なお、北側の海岸線では顕著な後続波は認められない。長周期地震動予測地図(暫定版)[Koketsu et al.(2012)]の地震基盤（ $V_s=3.2$ km/s）深さを見ると、深さ変化は海岸線と平行ではなく、海岸線に斜行する様に県南部が急激に深くなっている。構造変化の違いが後続波の励起に影響している可能性がある。

4. アレイ解析による伝播方向の推定

広野町周辺の強震観測点5点をアレイ観測点と見なし、周期6秒における波動の伝播性状を把握し、地下構造モデルから計算される表面波速度との対応を検討した。広野の地下構造モデルは、防災科研のJ-SHIS深部地盤モデル（Ver3.2）にKoketsu et al.(2012)の地震基盤（ $V_s=3.2$ km/s）以深の構造を組み合わせた。UD成分のバンドパスフィルター波形（中心周期6秒）にセンブランス解析を適用すると、位相速度3.6 km/sでN61度E方向から伝播していると評価された。広野から見た震央の方位は約76度なので、ほぼ震央方向から伝播していると評価できる。構造モデルから計算されたRayleigh波速度と対比すると1次高調モードに対応する。水平動のフィルター波形を用いた解析からは、N21度Eの方角から伝播する3.8 km/sの波が抽出された。到来方向は、震央より北側となっている。波の到来方向に直交する振動成分を抽出しているため、この波はLove波の

1次高調モードに対応する。

なお、阿武隈山中の観測点5点（F-net：HRO地点を含む）を用いてUD成分のアレイ解析を行い、周期6秒の波動の速度を求めると3.1 km/sであった。Koketsu et al.(2012) のモデルを用いると、この速度は、HROにおけるRayleigh波の基本モードに相当する。

5. まとめ

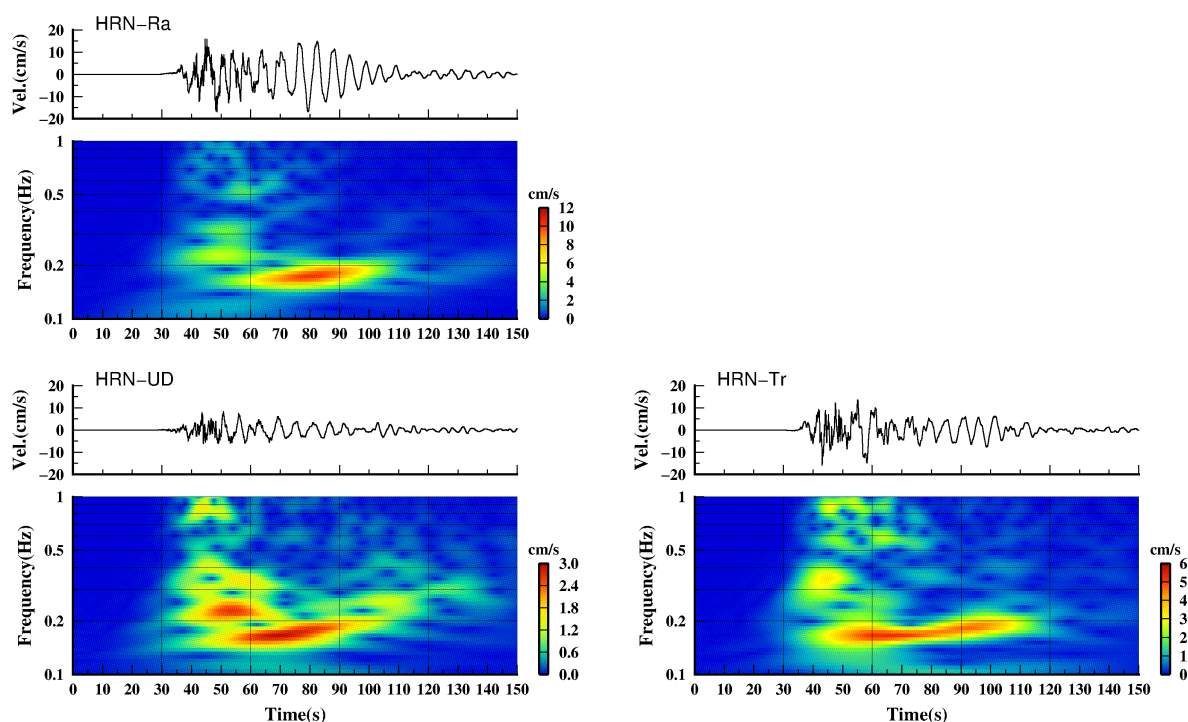
2016年11月22日福島県沖の地震(M7.4)により、福島県東部の広野周辺で観測された周期6秒の顕著な後続波群について分析を行った。UD成分の後続波は、阿武隈山地の観測点とも連続性が良い。アレイ解析からは、広野周辺（海岸線付近）では一次高調モードのRayleigh波が、山地部では基本モードのRayleigh波が伝播していると考えられる。広野周辺の記録の水平動に顕著な後続波は、県の南半分の海岸線にトラップされたように見える。アレイ解析結果は、震央方向より北から伝播する一次高調モードのLove波の可能性を示唆している。ローカルな波群の生成・伝播には、地下構造の変化が影響していると考えられる。

謝辞

次の機関による強震観測記録を使用致しました。記して感謝いたします。(国研)防災科学技術研究所、気象庁、(一財)電力中央研究所、(公財)地震予知総合研究振興会、東京電力HD(株)。

2016.11.22 05:59 Fukushima-oki Mj7.4 at Hirono Thermal Power Station

Multiple filter analysis 0.02–2.0 Hz



A会場 | 一般セッション：S16. 地盤構造・地盤震動

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

AM-2

座長:林田 拓己(国研) 建築研究所 国際地震工学センター)、吉田 邦一(一財) 地域 地盤 環境 研究所)

11:00 ~ 11:15

[S16-03] 奈良市三条本町NB-1ボーリングにおける速度構造調査

○岩田 知孝¹、山田 浩二²、澤田 基貴²、石原 大亮²、岡本 茂² (1.京都大学防災研究所、2.(株) 阪神コンサルタンツ)

11:15 ~ 11:30

[S16-04] MeSO-net観測記録データトラフィックにみる2020年の首都圏における常時微動レベル低下と要因検証

○林田 拓己¹、吉見 雅行²、鈴木 晴彦³、森 伸一郎⁴、香川 敬生⁵、山田 雅行⁶、一井 康二⁷ (1.建築研究所、2.産業技術総合研究所、3.応用地質株式会社、4.愛媛大学、5.鳥取大学、6.株式会社ニュージェック、7.関西大学)

11:30 ~ 11:45

[S16-05] 微動アレー記録をもとに求めた回転成分から推定した和歌山平野におけるラブ波位相速度

○吉田 邦一¹、上林 宏敏²、大堀 道広³ (1.(一財) 地域 地盤 環境 研究所、2.京都大学、3.福井大学)

11:45 ~ 12:00

[S16-06] 表面波分離の基礎的検討と関東平野内の長周期地震動への適用

○佐藤 拓也¹、上林 宏敏²、永野 正行¹ (1.東京理科大学、2.京都大学)

12:00 ~ 12:15

[S16-07] Equivalent linear method with complex frequency for site response analyses to near-fault fling-step displacements

○呉 双蘭¹、野津 厚¹、長坂 陽介¹ (1.港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 地震動研究グループ)

奈良市三条本町NB-1ボーリングにおける速度構造調査

Seismic velocity structure at NB-1 boring site, Nara city

*岩田 知孝¹、山田 浩二²、澤田 基貴²、石原 大亮²、岡本 茂²

*Tomotaka IWATA¹, Koji YAMADA², Motoki SAWADA², Daisuke ISHIHARA², Shigeru OKAMOTO²

1. 京都大学防災研究所、2. (株) 阪神コンサルタンツ

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Hanshin Consultants, Co. Ltd.

令和元年度より3年計画で実施している「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」では、当該断層帯の長期評価及び強震動評価の高度化を進めている。令和元年度には奈良盆地北部の奈良市高畑町から宝来町にかけて、奈良堆積盆地の基盤岩までを明らかにする測線長約7kmの反射法地震探査を行った（文部科学省・京都大学防災研究所，2020）。引き続き、この測線沿いの奈良本町において深度300mのオールコアボーリングを実施した（文部科学省・京都大学防災研究所，2021，三田村・他，2021）。このボーリング孔を使用したVSP探査等を行って、奈良堆積盆地の速度構造に関する情報を得た。

VSP調査はP波震源（油圧インパクト）及びS波震源（油圧式S波震源）と、孔中3成分地震観測を行い、P波及びS波の速度構造を推定した。孔中地震計は深度5mから300mまで5m間隔で測定を行った。初動解析から、深さ300mまでのP波及びS波の速度構造を推定した。地表極近傍を除いて、P波速度は1.8～2.0km/s、S波速度は0.34～0.75km/sに深さとともに漸増する速度構造が得られた。この深さまでの反射法解析に用いた速度解析結果とよい対応が得られていることもわかった。

反射法探査から、ボーリング地点の堆積層基盤面深度は約520mと推定されている。また、記録には、この基盤面からの反射波と考えられる相が得られていたことから、これらの相を利用して、深さ300～520mの堆積層下部の速度プロファイルを求めた。深さ300m以深のP波速度は2.0～2.3km/s、S波速度は0.8～0.85km/sと求められた。これらの値は、類似の堆積環境や堆積物で構成されている大阪平野や京都盆地南部のそれらと似通った値であった。

加えて、浅部の速度構造を詳しく知るため、深度25mまで、1mきざみで、カケヤによるP波及びS波起震を行っての速度構造調査も行った。発表では、これらの速度構造及び地震波減衰構造についても触れる予定である。これらの情報やこの地点の速度構造プロファイルを用いて、奈良堆積盆地の速度構造モデル（関口・他，2019）の高度化を進めている。

参考文献

三田村宗樹・高橋春菜・岩田知孝，奈良東縁断層帯調査における奈良市三条本町NB-1ボーリングコアの概要，日本地質学会第128年学術大会，2021

文部科学省・京都大学防災研究所，奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測，令和元年度成果報告書，198pp，2020。

文部科学省・京都大学防災研究所，奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測，令和2年度成果報告書，234pp，2021。

関口春子・浅野公之・岩田知孝，奈良盆地の3次元速度構造モデルの構築と検証，地質学雑誌，125(10)，715-730，2019。

謝辞：本研究は、令和3年度文部科学省科学技術基礎調査等委託事業「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」によってなされました。ボーリング実施に関しては、奈良市都市整備公園緑地課のお世話になりました。記して感謝致します。

MeSO-net観測記録データトラフィックにみる2020年の首都圏における 常時微動レベル低下と要因検証

Investigations of the 2020 seismic noise reductions in areas around Tokyo using MeSO-net seismic data traffic

*林田 拓己¹、吉見 雅行²、鈴木 晴彦³、森 伸一郎⁴、香川 敬生⁵、山田 雅行⁶、一井 康二⁷

*Takumi Hayashida¹, Masayuki Yoshimi², Haruhiko Suzuki³, Shinichiro Mori⁴, Takao Kagawa⁵,
Masayuki Yamada⁶, Koji Ichii⁷

1. 建築研究所、2. 産業技術総合研究所、3. 応用地質株式会社、4. 愛媛大学、5. 鳥取大学、6. 株式会社ニュージェック、7. 関西大学

1. IISEE/BRI, 2. GSJ/AIST, 3. OYO Corporation, 4. Ehime Univ., 5. Tottori Univ., 6. NEWJEC Inc., 7. Kansai Univ.

地震計によって測定される常時微動（雑微動、地動ノイズ：以下、微動と呼ぶ）のうち、1Hz以上のものは人間活動が主たる振動源であるとされている。2020年初頭、新型コロナウイルス感染症（Covid-19）の感染拡大を受けて都市封鎖が実施された都市において人間活動が著しく低下し、周辺の地震観測点で記録された微動の振幅が低下したという現象が世界中で数多く報告されている（例えば、Gibney, 2020; Lecocq et al., 2020）。日本国内においても、小中高校の休校措置・国や自治体による外出自粛要請等の社会的背景を反映したと思われる首都圏での微動振幅の低下が報告されている（Yabe et al., 2020）。これらの先行研究では微動のスペクトル特性の考慮や評価の対象周波数に違いがあるものの、振幅特性の経時変化の有無と増減に、人間の社会活動の消長を対応付けて検討していることが共通している。一方、首都圏を対象にYabe et al. (2020)が検討に用いた観測点の多くは代表的な繁華街付近に位置しており、用いた観測点数も限られていることから、微動の変化をもたらした主要因が何であったのか、その影響はどの範囲にまで及ぶのかなど、様々な解釈の余地が残されている。これらを適切に評価するためには、多地点、長期間のデータによる検討が必要であり、そのためには微動の振幅特性を総合的に示す簡易的な振幅指標があれば便利である。

東京大学地震研究所により設置され、現在、防災科学技術研究所によって運用されているMeSO-net観測点は、首都圏周辺の約300地点に展開されており、各点で地震動の連続観測が行われている。MeSO-netの波形データはWIN32形式によって圧縮されており、同形式ではデータ転送の高速化・効率化のために振幅情報を前タイムステップの振幅との差分情報として記録している（例えば、ト部・他、1990；ト部、1994）。このため、微動の振幅が大きい平日昼間の時間帯に波形データの容量が増加し、夜間や休日に低下するという特徴がある（岡田・小原、2000）。本研究ではこの特性に着目し、MeSO-netの波形データ容量の時系列変化（データトラフィック）を「微動レベルの簡易的な指標」とみなすことで2020年における微動振幅の推移を追った。我々は、東京都および近郊エリアの169点で2018年1月～2021年8月の期間に観測された連続観測記録を用いて、Covid-19蔓延に伴う人間活動の変化とデータトラフィックとの関係を検証した。本発表では、首都圏におけるデータトラフィックの時間帯毎の特徴を紹介するとともに、観測点が設置されている施設の種別や周辺環境、観測点周辺のモバイル人流データ、断面交通量データなど各種記録との比較検討を通じて、2020年の首都圏において微動の振幅低下をもたらした原因について考察する。また、各観測点における振幅スペクトルの時間推移についても併せて議論する。

謝辞：本研究は、国内の微動研究者および技術者から成る「微動の会」会員有志による研究プロジェクト（代表：愛媛大学 森伸一郎）の一環として実施したものです。また、同会会長である藤原広行博士（防災科学技術研究所）からは、本研究の着想を得る上で有益なご助言をいただきました。本研究の実施にあたり防災科学技術研究所のMeSO-net、Hi-netの観測記録を使用しました。記して感謝いたします。

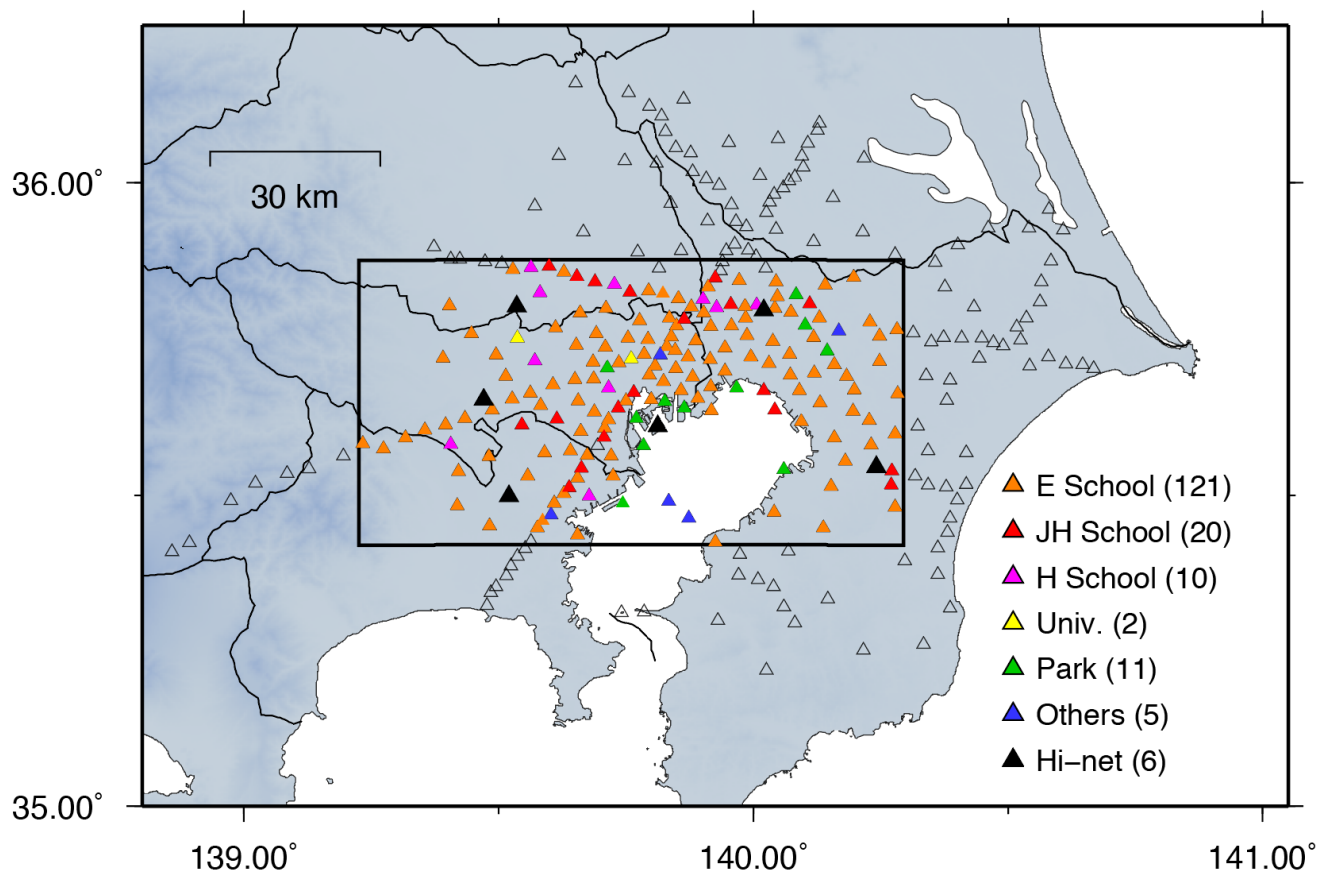


図. 検討に用いた観測点の分布

微動アレー記録をもとに求めた回転成分から推定した和歌山平野におけるラブ波位相速度

Phase velocity of the Love wave estimated based on array-derived rotation from the microtremor array records observed in the Wakayama plain, Japan

*吉田 邦一¹、上林 宏敏²、大堀 道広³

*Kunikazu Yoshida¹, Hirotoshi Uebayashi², Michihiro Ohori³

1. (一財) 地域 地盤 環境 研究所、2. 京都大学、3. 福井大学

1. Geo-Research Institute, 2. Kyoto University, 3. University of Fukui

強震動予測に用いる地下構造モデルを作成する基礎データとして、微動アレー探査の結果がよく用いられる。これまでは鉛直成分をもとにしたレイリー波の位相速度が数多く用いられてきたが、水平成分を用いたラブ波の位相速度も考慮することによって地下構造モデルをより精度よく構築できることが期待される。ラブ波の位相速度の推定法として、回転成分を用いたものが最近提案されている（吉田・上林, 2018; Yoshida and Uebayashi, 2021）。本研究ではこの手法の妥当性を評価するため、上林・他（2018）により和歌山平野で観測された微動アレー記録の水平成分を用いてラブ波の位相速度を推定した。

本研究では、アレー記録から回転成分を求める際にゆがんだ三角形アレーにも対応できるように手法を改良した。回転成分を評価するアレーの基準点（原点） P_0 での地動を u_0 とし、 $P_i=(x_i, y_i)$ における観測点*i*における地動の u 成分は、空間方向の微分をテイラー展開し2次以降の項を無視して

$$u_i = x_i \partial u / \partial x + y_i \partial u / \partial y + u_0$$

と表される。この式を*N*個の観測点に対し作り、行列で表記すれば、右辺の偏微分および u_0 を逆行列あるいは最小二乗法で求められる。水平2成分に対しこの計算を行い、ベクトルの回転の定義に従って回転成分を求めた。この改良した手法を観測記録に適用し、各サイトにおける回転成分を求めた。得られた回転成分波形から、空間自己相関法により位相速度を求めた。

和歌山平野で行われた微動アレー観測では、半径200～600 mの7点二重三角形アレーが用いられた。位相速度の推定に先立ち、アレー記録からコヒーレンスとフェイズを求め、観測記録の水平成分の品質を確認した。

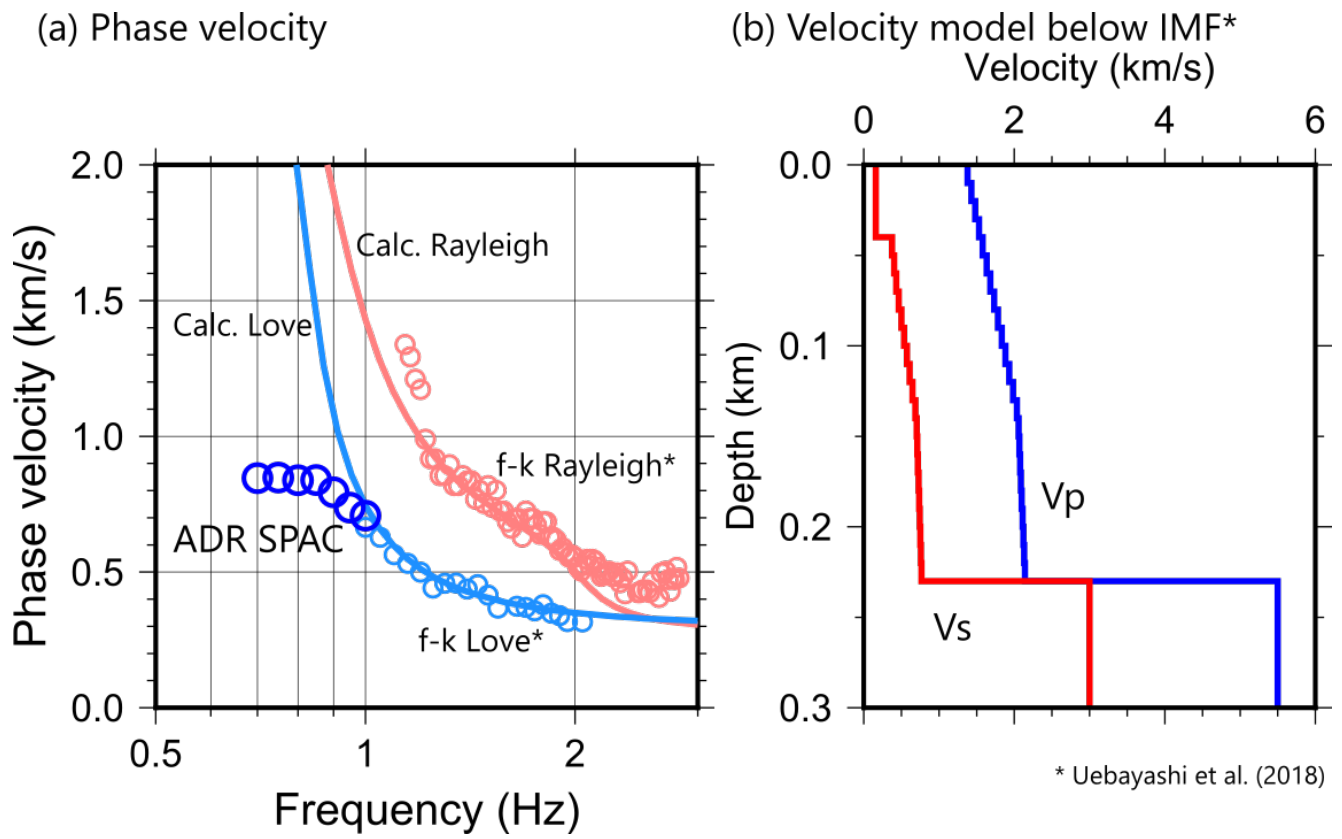
回転成分より得られた位相速度は、アレー半径などに応じて0.5～2 Hzで0.4～1.3 km/sで、ほとんどの観測サイトで正の分散性を示した。一例としてIMFサイトでの結果を図aに示す。回転成分の空間自己相関法（ADRS-PAC）により推定したラブ波の位相速度と、大堀・他（2015）およびそれをまとめた上林・他（2018）による同じアレー記録を用いた水平成分のf-k法により求めたラブ波の分散曲線を比較すると、重複する周波数帯域でほぼ同じ値が得られた。また、空間自己相関法の方がf-k法よりも長周期側の位相速度を求めることができた。

ラブ波位相速度を求めたサイトのうち、IMFおよびJMAサイトについて微動記録から推定した位相速度と既往の3次元地下構造モデルから計算した理論位相速度を比較した。IMF（図b）では、理論と観測の位相速度はおおむね対応したが、JMAサイトでは差が見られた。JMAサイトについては発表までにさらに検討を進めたい。

謝辞 本研究は科研費・基盤研究(B)「強震動予測のための微動を用いた不整形地盤構造推定システムの構築」（課題番号：19H02287, 代表：上林宏敏）による。文部科学省委託研究業務「中央構造線断層帯（金剛山地東縁－和泉山脈南縁）における重点的な調査観測」プロジェクトのデータおよび成果の一部を利用しました。

参考文献 大堀・他（2015）建築学会大会梗概集. 上林・他（2018）地震工学会論文集. 吉田・上林

(2018) 物理探査. Yoshida and Uebayashi (2021) BSSA.



表面波分離の基礎的検討と関東平野内の長周期地震動への適用

Fundamental Study on Separation of Surface Waves and Application to Long-Period Ground Motions in the Kanto Plain

*佐藤 拓也¹、上林 宏敏²、永野 正行¹

*Takuya Sato¹, Hirotoshi Uebayashi², Masayuki Nagano¹

1. 東京理科大学、2. 京都大学

1. Tokyo university of Science, 2. Kyoto university

南海トラフを代表とするM 8~9クラスのプレート境界での巨大地震の発生が危惧される中、関東平野や大阪平野での地震動予測が多く行われている。このときの長周期地震動の計算には主に三次元差分法が用いられ、サイトと震源位置に依存して変化する波動の伝播特性や増幅特性が明らかとなっている。一方、検討対象地点の地震動の増幅特性を把握する際に、どのような表面波が堆積層内を伝播し、増幅するかを調べることは、波動伝播特性を考察するうえで必要である。上林(2019)は、3次元波動場を波動ポテンシャルによりP, SV, SH波に分離する手法を提案し、簡易的な堆積盆地状の堆積地盤モデルに適用した。提案手法をAL法で得られたP, SV, SH波との比較により検証し、グリッド間隔による波形の精度などの検証を行った。本研究では、上林(2019)で示された手法を用いて、簡易的な波動場での波動分離の精度を確認するとともに、3次元差分法に波動分離の式を直接組み込み、プレート境界から生じ関東平野に伝播する長周期地震動の波動分離に適用した。なお、本検討では、SH波(ラブ波)とそれ以外のP・SV波(レイリー波)の分離のみに着目し、水平2方向の波動成分のみを利用している。最初に、図1,2_aに示すように、平面波の斜め入射場をイメージして水平方向に一定速度で伝播する面外波(SH波)と面内波(SV波)の波動場を擬似的に作成した。この結果、図1,2_b,cに示すように、上記手法で精度よく波動分離が行われていることを確認した。次に、図3,4_aに示すように、解析領域の中心部から同心円状に広がる波動場について、Radial方向、Travsvers方向に振幅を有する波動場を擬似的に作成し、波動分離を試みた。図3,4_b,cに示す結果から、多少の誤差は見られるが、概ね精度よく波動分離が行われていることが分かる。最後に、関東平野を対象領域とし、茨城県沖で生ずる太平洋プレート境界の地震が関東平野における影響を数値計算により評価した。関東平野の堆積層やプレート境界の地盤構造を考慮した地震動評価には三次元差分法[永野(2004)]を利用し、そこに波動分離を組み込んだ。地盤モデルは全国1次地下構造モデルを使用し、最表層は第二層の物性値に置換した。グリッド間隔は250mとした。以上より、計算された速度波形および分離した波形について水平2方向の合成を行い、最大速度を評価した結果を図5に示す。これより、茨城県沖の震源に対しては、関東平野ではレイリー波が卓越して伝播することが分かった。図の作成にGMTを利用させて頂きました。

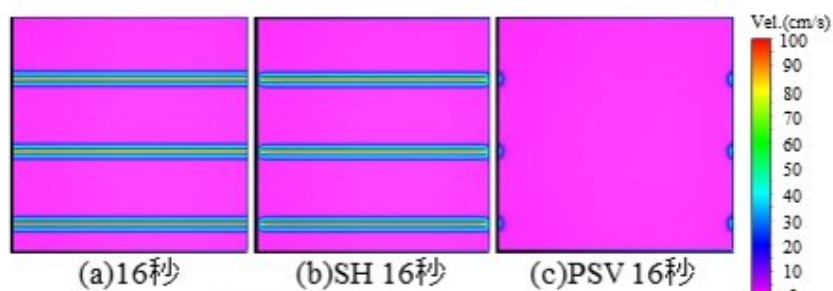


図1 面外波と分離波形のスナップショット

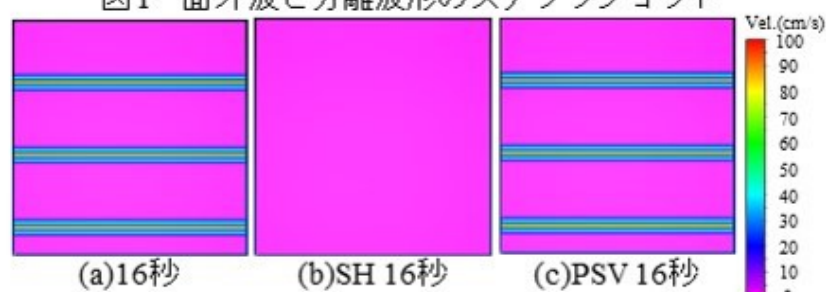


図2 面内波と分離波形のスナップショット

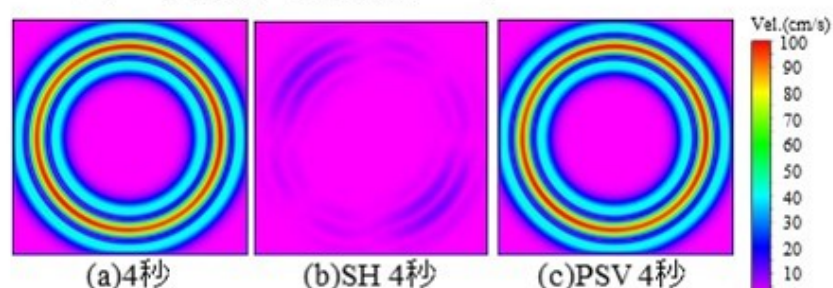


図3 Radial方向に振幅を有する波動場と分離波形のスナップショット

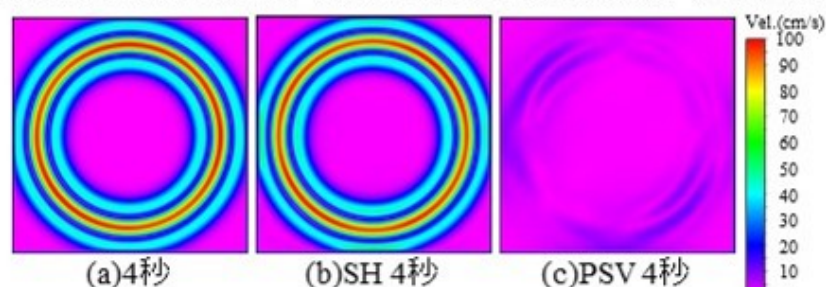


図4 Transverse方向に振幅を有する波動場と分離波形のスナップショット

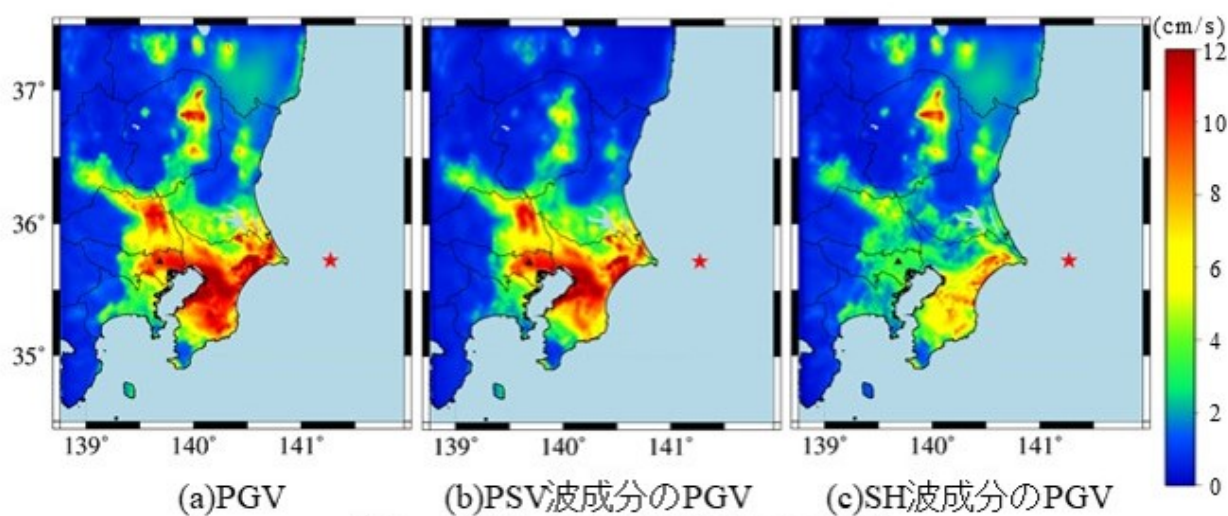


図5 水平二方向合成のPGV分布

Equivalent linear method with complex frequency for site response analyses to near-fault fling-step displacements

*呉 双蘭¹、野津 厚¹、長坂 陽介¹

*Shuanglan WU¹, Atsushi Nozu¹, Yosuke Nagasaka¹

1. 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 地震動研究グループ

1. Port and Airport Research Institute

The equivalent linear method is commonly used for site response analyses in engineering practice. However, it cannot evaluate the displacement response of the ground subject to fling-step displacements because the fling-step displacements are characterized by non-zero final values, making the application of ordinary Fourier transform with real frequency inappropriate. On the other hand, in seismology, the use of complex frequency is a well-established technique. It was proposed by Phinney [1] and has since been widely and successfully adopted in computational seismology for the calculation of ground motions including near-fault fling-step displacements with the discrete wavenumber (DWN) method [2, 3]. As pointed by Wu et al. [4], the use of complex frequency is essential in avoiding the inconsistency between the theoretical and discrete Fourier transforms when the DWN method is applied to a displacement waveform with a nonzero final value. Therefore, in this study, the complex frequency was introduced to the equivalent linear method for the seismic ground response analyses subjected to near-source fling-step displacements.

The newly developed method was applied for analyzing the recordings at the KiK-net KMMH16 vertical array during the mainshock of the 2016 Kumamoto earthquake sequence. The vertical array contains two acceleration sensors on the ground surface and in the borehole at a depth of 252 m (NIED Strong-motion Seismograph Networks). We adopted the soil profile including the PS logging data at KMMH16 provided by NIED. We also used the density profile re-evaluated by Goto (Personal communication). Moreover, we also adopted the nonlinear soil properties at KMMH16, i.e., the stiffness-strain and damping-strain relations, which were again estimated by Goto (Personal communication) based on Ramberg-Osgood model. In the following we will show the results for the EW-components. Based on Boore [5], the accelerograms were integrated in time domain after a baseline correction and the resultant velocity waveforms were corrected by subtracting linear functions. Then the corrected velocity waveforms were integrated again in time domain to obtain displacement time histories at GL-252m and GL-0m. The former was used as the input ground motion for the equivalent-linear analyses.

Fig. 1 showed the results. **Fig. 1 (a ~ c)** shows good agreement between the synthetic and observed time histories for acceleration, velocity and displacement, respectively. In particular, the agreement is excellent for the displacement waveforms including the fling-step as well as the initial vibratory components. The maximum acceleration was underestimated but the phases were reproduced very well. **Fig. 1(d)** shows that the agreement between the observed and synthetic spectral ratio is excellent especially for the fundamental mode. **Fig. 1 (e ~ g)** show the peak acceleration, velocity and strain as a function of depth. The tendencies in the peak strain in **Fig. 1(g)** is similar to the results by Suetomi et al. [6] in a sense that the maximum strain occurred near GL-8m ~ 9m, even though different soil models were used in the analyses. The maximum strain is approximately 0.6%, which is less than 1%. These results well demonstrated that, the equivalent linear method with complex frequency is applicable to seismic ground response analyses subject to fling-step displacements.

Acknowledgment

Strong motion data and the soil profile at KMMH16 were provided by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. The authors also express their appreciations to Hiroyuki Goto, Associate Professor of Kyoto University, for sharing his knowledge on the soil profile and dynamic soil properties at KMMH16, and suggestions regarding the application of the parameters.

References

- [1] Phinney RA. *J. Geophys. Res.* 1965; 70(20): 5107-5123.
- [2] Bouchon M, Aki K. *Bull. Seismol. Soc. Am* 1977; 67(2): 259-277.
- [3] Bouchon M. A Review of the discrete wavenumber method. *Pure and applied geophysics* 2003; 160(3): 445-465.
- [4] Wu SL, Nozu A, Nagasaka Y. *Bull. Seismol. Soc. Am* 2020; 111(1): 309-320.
- [5] Boore DM. *Bull. Seismol. Soc. Am* 2001; 91(5): 1199-1211.
- [6] Suetomi I, Fukushima Y, Oshige J. Proc of the 36th JSCE earthquake engineering symposium, 2016: Tokyo, Japan. A23-1006.

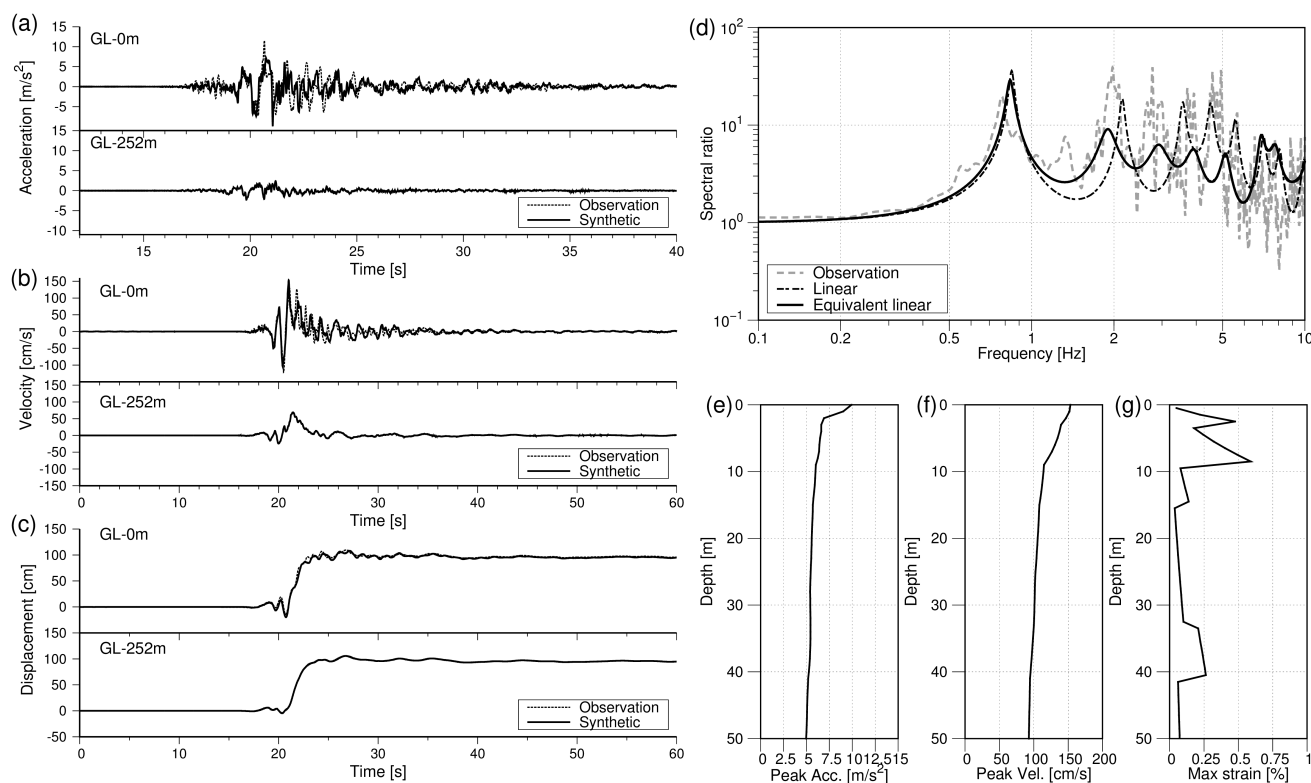


Fig. 1 Observed and synthetic time histories for (a) acceleration, (b) velocity, and (c) displacement. Also plotted are the (d) spectral ratios and the peak responses along the depth for (e) acceleration, (f) velocity and (g) strain.

A会場 | 一般セッション：S04. テクトニクス

2021年10月15日(金) 13:30 ~ 14:45 | A会場 A会場

PM-1

座長:中尾 篤史(海洋研究開発機構)、米島 慎二(東京大学地震研究所)

13:30 ~ 13:45

[S04-01] 北陸地方下のフィリピン海プレート形状を探る

○宮崎 一希¹、中島 淳一¹、末永 伸明²、吉岡 祥一^{2,3} (1.東京工業大学理学院地球惑星科学系、2.神戸大学都市安全研究センター、3.神戸大学大学院理学研究科)

13:45 ~ 14:00

[S04-02] 微小地震震源アレー解析及びOBSアレー解析から見えてきた茨城沖におけるサイスモテクトニクス

○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)

14:00 ~ 14:15

[S04-03] Cascadia沈み込み帯の3次元異方性構造

○趙 大鵬¹、Hua Y.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)

14:15 ~ 14:30

[S04-04] 地震の最大マグニチュードと沈み込み帯パラメタを関係づける回帰分析

○中尾 篤史¹、桑谷 立¹、上木 賢太¹、吉田 健太¹、油谷 拓¹、日野 英逸²、赤穂 昭太郎³ (1.海洋研究開発機構 海域地震火山部門、2.統計数理研究所 モデリング研究系、3.産業技術総合研究所 人間情報インタラクション研究部門)

14:30 ~ 14:45

[S04-05] 大地震による火山噴火誘発のメカニズム

○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)

北陸地方下のフィリピン海プレート形状を探る

Exploring the Geometry of the Philippine Sea Plate beneath Hokuriku region

*宮崎 一希¹、中島 淳一¹、末永 伸明²、吉岡 祥一^{2,3}

*Kazuki MIYAZAKI¹, Junichi Nakajima¹, Nobuaki Suenaga², Shoichi Yoshioka^{2,3}

1. 東京工業大学理学院地球惑星科学系、2. 神戸大学都市安全研究センター、3. 神戸大学大学院理学研究科

1. Tokyo Institute of Technology, 2. Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, 3. Faculty of Science, Graduate School of Science, Kobe University

西南日本下に沈み込んでいるフィリピン海プレートの形状は地震波トモグラフィーをはじめとした手法を用いて詳細に決定されており(例えばNakajima et al., 2009; Liu and Zhao, 2016など)、特に四国・中国地方下に沈み込むフィリピン海プレートは日本海下約400kmの深さまでイメージングされている。一方で、北陸地方下では約140kmまでしか形状が確認されておらず、現在理解されているフィリピン海プレートの沈み込み量は東西で大きく異なっている。四国海盆の拡大以降、フィリピン海プレートが一定の速度で西南日本下に沈み込み続けているとするモデル(Seno and Maruyama, 1984)に基づいて沈み込み量を推定すると、北陸地方下のフィリピン海プレートには未発見の部分が存在すると考えられる。この地域のフィリピン海プレート形状を新たに決定することによって、フィリピン海プレートの沈み込みの歴史や、陸上の火山との関連性、さらに太平洋プレートとの相互作用に伴うプレートの変形量から沈み込むプレートの物性について新たな知見を提供することができると期待される。

そこで、本研究では若狭湾から佐渡島にいたる北陸地方下におけるフィリピン海プレート形状を明らかにすることを目的とする。本研究では中部日本下の、太平洋プレートと地表に囲まれた領域の構造を求めるため、主に太平洋プレート内で発生する深発地震を用いた走時トモグラフィーを行なった。結果として、現在決定されているフィリピン海プレート形状より深部へと繋がる連続的な低速度構造がイメージングされた。また、太平洋プレートと接する一部の領域では、太平洋プレートの上に乗り上げるような低速度構造も見られた。次に、フィリピン海プレートと太平洋プレートの沈み込みにおける相互作用を二次元の粘性流体を仮定してシミュレーションしたところ、中部日本下に沈み込んだフィリピン海プレートが、より高速で沈み込む太平洋プレートによって深部に引き込まれるような結果が得られた。以上のことから、北陸地方下のフィリピン海プレートは、地下で太平洋プレートと衝突し相互作用を受けた結果、形状・温度ともに特異的な状態であると予想される。そのため、この領域のプレート形状をより詳細に決定するためには、様々なアプローチを用いる必要があると考えられる。また、本講演では、ScSp波とScS波の波形を用いて、走時とは独立に北陸地方下のフィリピン海プレート上面の形状を明らかにするとともに、粘性流体を仮定した数値シミュレーションにより沈み込んだフィリピン海プレートの温度構造を計算することで、トモグラフィーを行なった際にイメージされるフィリピン海プレートの速度偏差についても触れる予定である。

微小地震震源アレー解析及びOBSアレー解析から見えてきた茨城沖におけるサイスモテクトニクス

Seismotectonics at off-Ibaraki region identified from dense earthquake source arrays and dense OBS arrays.

*米島 慎二¹、望月 公廣¹

*Shinji YONESHIMA¹, Mochizuki Kimihiro¹

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

茨城沖では、2011年に発生した東北沖地震の最大余震として本震発生からおよそ30分後に Mw7.9の最大余震が発生した。最大余震の発生に伴い、多くの余震としての微小地震が発生したが、最大余震震源域直情付近に設置されていたOBSの稠密アレーにより最大余震発生域から浅部にかけての海底微小地震記録を得ることができた。筆者らによるこれまでの地震活動の震源決定解析の結果、深さ約10~30km程度の領域にて、幾つかの複雑だが特徴のある地震活動の時空間分布が明らかになった。1つ目は、微小地震発生領域、大地震の発生領域、Tremor発生領域が空間的に相補関係にあるような分布を示していること。2つ目は、微小地震活動は大局的にはdowndipなトレンドを持つがローカルには変化の大きい3次元的な分布を示していること、などである。

目的・課題

こうした地震活動で見出された複雑だが特徴のある地震活動が、沈み込み帯のどの層あるいは層境界で発生しているかを高精度に把握することは、テクトニクスを理解するうえで重要であり、これが本研究の目的である。しかしながら、震源については比較的詳細な分布が得られた一方で地下構造については不明な点が多い。一般に陸側プレート、海洋プレートともに異なる岩相から構成されるためプレート境界の他にも複数の速度境界が存在することがよく知られているが、これに加え茨城沖では海山の沈み込みが報告されている。このため地下構造は3次元的に変化していると考えられるが茨城沖では今回の地震活動で得られたものと同程度の空間密度を持つ高密度な3次元構造は得られていない。だが地下構造を得るにも、自然地震を用いる地震波tomographyやレシーバ関数などでは地下構造情報の解像度が不足している。他方、一般に解像度が高いと考えられる人工地震探査ではエネルギー不足による探査深度不足や、多重反射波などの影響により、海山を有するのSeismogenic zone付近での複雑な地下構造をイメージングすることは困難である。さらに仮に構造が得られたとしても、震源分布と地下構造は異なる手法、モデルで得られたものであり、互いの深度を一致させることは難しい。上記理由によりseismogenic zoneにおいては震源と構造を高精度でマッチングすることは技術的に大きな困難を伴うものであるというのがこれまでの現状であった。

方法

本研究では、こうした自然地震と構造の対応問題を解決するために、OBS観測網周辺で発生したローカルな微小地震のみを用いて、自然地震そのものから、震源位置周辺の速度境界や速度を抽出することを試み、自然地震の発生位置と速度境界とのマッチングを行う。具体的には以下の2アプローチを取った。

1. 震源アレー、特にVertical source arrayを用いることによりVSP-likeな処理を行い自然地震と速度構造境界とのマッチングをする。
 2. OBSアレーによる自然地震掃除から屈折波速度解析を実施することにより震源近傍の速度構造を求める。
- まず1. の震源アレーでは後続波である特定の境界面からの反射波を抽出することで反射面位置を特定す

る。これにより反射面の深さと自然地震の深さを直接対応付けることが可能となる。また初動到達時刻より V_p , V_s の速度プロファイルを得ることができる。これらにより、Vertical source array 周辺での震源深さと構造との対応を明らかにすることができると考えられる。ただし、このアプローチでは Source array 周辺のみの情報しか得られない。一方2. の屈折波解析では、震源と層境界の相対位置はわからないが、震源周辺にどのような層境界があるかの情報を得ることができる。さらにOBSネットワーク内の複数のOBS測線と震源を工夫して組み合わせることで、3次元的な見掛け屈折波速度分布を得ることができる。1と2を突合することで、OBSネットワーク周辺における微小地震の発生位置を相当程度制約することができると考え、現在解析を進めている。

結果

現時点までで得られている震源分布および解釈図を図1に示す。プレート境界が複雑な形状をしていること、プレート境界より深部に反射面が存在し、Layer II/III の境界と解釈される。最大余震が発生したと考えられる深さ領域では、地震発生面は比較的シンプルな形状をしていることなどがわかってきた。発表では最新の解析結果および解釈結果を示し、最大余震—海山—Tremor 含めたテクトニクスについての議論を行う。

参考文献

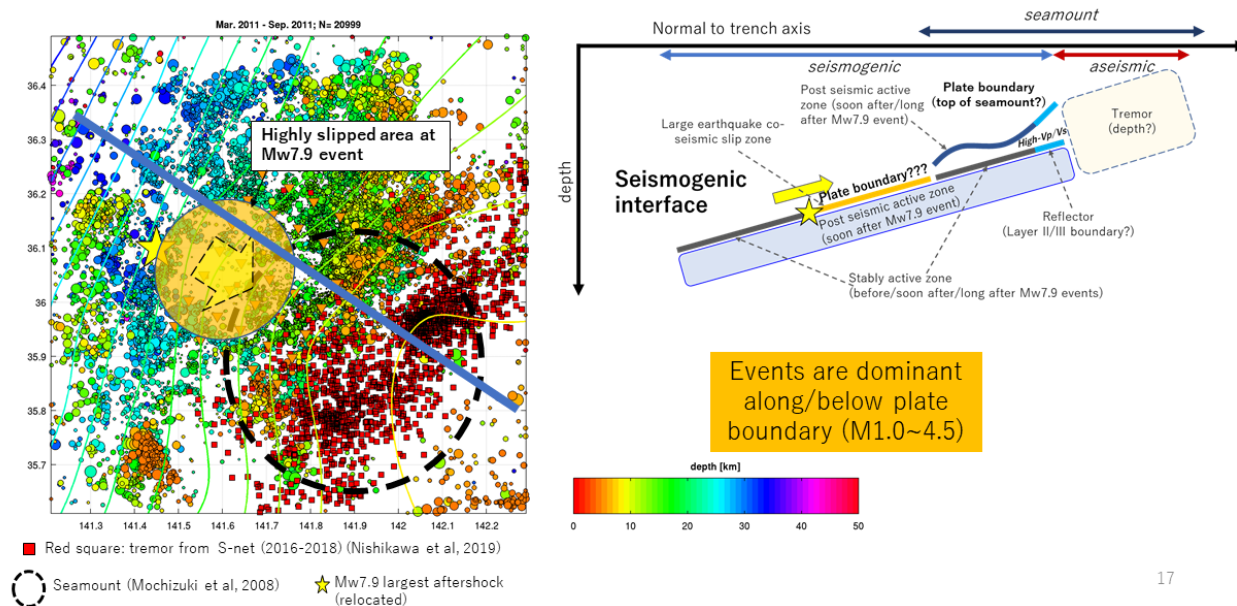
Mochizuki et al. (2008, Science)

Kubo et al. (2013, GRL)

Nishikawa et al. (2019, GRL)

図1：茨城沖OBSのデータ解析結果。左図：震源分布（丸）と最大余震（黄色のハッチ）、海山（黒点線）、Tremor（赤四角）。右図：深さ断面の解釈図（断面は左図の青測線）。

Summary of Ibaraki-oki seismicity and other tectonic activities



Cascadia沈み込み帯の3次元異方性構造

3-D seismic anisotropy structure of the Cascadia subduction zone

*趙 大鵬¹、Hua Y.¹

*Dapeng ZHAO¹, Y. Hua¹

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. Research Center for Earthquakes & Volcanoes, Graduate School of Science, Tohoku University

We determine the first P-wave tomography of 3-D azimuthal and radial anisotropy of the Cascadia subduction zone by inverting a great number of arrival-time data of local and teleseismic events. Fast-velocity directions (FVDs) of azimuthal anisotropy in the crust are generally trench-parallel, reflecting N-S compression along the Cascadia margin. Radial anisotropy (RAN) is negative (i.e., $V_{pv} > V_{ph}$) in the crust and upper-mantle wedge beneath the Cascadia volcanoes and back-arc area, reflecting hot and wet upwelling flows associated with fluids from dehydration reactions of the young and warm Juan de Fuca plate that is subducting toward the northeast. Trench-parallel FVDs occur in the subducting slab under the forearc, suggesting that the gently-dipping slab may still keep its original anisotropy produced at the mid-ocean ridge and modified at the outer-rise before subduction. The slab and subslab mantle exhibit the same RAN pattern: positive RAN in the Cascadia forearc whereas negative RAN under the Cascadia volcanoes and the back-arc. This feature suggests that the slab and the subslab asthenosphere are strongly coupled, and subslab mantle flow is formed by entrainment of the asthenosphere with the overriding slab. In northern Cascadia, NE-SW FVDs occur in a prominent subslab low-velocity zone that also exhibits negative RAN, reflecting thermally buoyant mantle materials derived from nearby oceanic hotspots, which flow toward the northeast and gradually accumulate under northern Cascadia, resulting in decompression melting.

Reference

Zhao, D., Y. Hua (2021). Anisotropic tomography of the Cascadia subduction zone. *Phys. Earth Planet. Inter.* 318, 106767.

地震の最大マグニチュードと沈み込み帯パラメタを関係づける回帰分析

Regression analysis relating maximum earthquake magnitudes with subduction zone parameters

*中尾 篤史¹、桑谷 立¹、上木 賢太¹、吉田 健太¹、油谷 拓¹、日野 英逸²、赤穂 昭太郎³

*Atsushi NAKAO¹, Tatsu Kuwatani¹, Kenta Ueki¹, Kenta Yoshida¹, Taku Yutani¹, Hideitsu Hino², Shotaro Akaho³

1. 海洋研究開発機構 海域地震火山部門、2. 統計数理研究所 モデリング研究系、3. 産業技術総合研究所 人間情報インタラクション研究部門

1. Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Department of Statistical Modeling, The Institute of Statistical Mathematics, 3. Human Informatics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

1. 研究背景・研究目的

巨大地震は、海洋プレートが沈み込むプレート境界(沈み込み帯)でのみ発生する。その規模には地域差があり、チリ南部では過去にM9.5が観測された一方、ケルマデク諸島南部では最大M6.6しか記録されていない。近年、沈み込み帯に関する地球物理的データが充実にしてきたものの、各地域の最大マグニチュード $M_{\max}$ と明確に相関するパラメタは見つかっていない(Schellart & Rawlison, 2013)。本研究では、複数のパラメタの複合的な寄与を検討するため、後述する「沈み込み帯パラメタ」のうちから、 $M_{\max}$ を合理的に説明する変数を、複数の評価基準を用いた全数探索法により抽出する。

2. データ・解析方法

$M_{\max}$ の説明変数の候補として、データベース SubMap4.3 (Heuret & Lallemand, 2005; Heuret et al., 2011 ほか)等による世界の沈み込み帯169地点・17次元の観測データを用いる。用いたデータには、海洋底の年代、海底地形の荒さ、プレートの沈み込み角度、プレート・海溝の運動速度、上盤プレートの応力場、付加体の有無などが含まれる。「圧縮/中立/引張」や「有る/無し」といった名義尺度は、ダミー変数に変換する。これら17種のパラメタの線形和として目的関数 $M_{\max}$ を表現し、重回帰分析を行う。2¹⁷通りのパラメタの全組合せの内から、 $M_{\max}$ を最もよく説明するものを、LOOCV(一個抜き交差検証)による平均二乗誤差、AIC(赤池情報量規準)、BIC(ベイズ情報量規準)などの評価基準に基づいて決定する。

3. 結果・議論

LOOCV誤差・AIC・BICのいずれの評価基準においても、 $M_{\max}$ を最もよく説明する変数の組合せとして、上盤プレートの地殻の厚さ、海洋スラブの曲率半径、海溝の堆積物の厚さ、付加体の有無、海溝の深さの5つが選ばれ、いずれも $M_{\max}$ に対して正の寄与をする(付加体については、存在する方が $M_{\max}$ が大きくなる)ことがわかった。堆積物の厚い地域ほど大きな $M_{\max}$ が観測されるという結果は、過去の複数研究と整合的である(Heuret et al., 2012; Seno, 2017; Brizzi et al., 2018)。近年の数値シミュレーションでは、沈み込み角度が $M_{\max}$ を制御するパラメタであることが示唆されていたが(Brizzi et al., 2020; Muldashev & Sobolev, 2020)、本研究では曲率半径の方がより良い説明変数として採用された。上盤プレートの地殻の厚さが $M_{\max}$ の説明変数である点は新しい発見であり、広域スケールでプレート境界の面積が大きいことが、巨大地震の発生する上で重要であることが示唆される。本研究で得られた回帰モデルは、 $M_{\max}$ のおおよその傾向を再現できるものの、一部説明できない観測点もあり、考慮していない要素(海山の沈み込みなど)が影響している可能性がある。

大地震による火山噴火誘発のメカニズム

Triggering mechanism of volcanic eruptions by large earthquakes

*西村 太志¹

*Takeshi NISHIMURA¹

1. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

1707年の宝永地震（M8クラス）の発生から49日後に富士山が噴火したり（宝永噴火）、フィリピンではM7.8ルソン地震の約1年後に20世紀最大の噴火といわれる1991年ピナツボ噴火が発生したりしたように、大地震が発生すると近くの火山が噴火することはよく知られている。このような大地震による火山噴火の誘発現象は、過去の記録をもとにした調査から起こりうることを示され、そのメカニズムとして、大地震の応力解放に伴う火山体の静的膨張や収縮、あるいは、強震動が提案されている。これまで、様々な視点からこれらのメカニズムの可能性を指摘する研究が報告されてきたものの、必ずしも主要因は明らかとなっていない。今回、信頼性の高いカタログデータをもとに、大地震による静的・動的歪みの火山噴火への影響を調べ、噴火誘発の条件と噴火発生の可能性を明らかにしたので報告する。

地震のデータは、1976年から世界規模の地震観測によって整備されたGlobal CMTカタログを利用する。火山噴火は米国スミスソニアン博物館Global Volcanism Programの噴火カタログを使う。大地震発生前後10年間の噴火の誘発現象は調べるため、噴火データは1966年から2020年の55年間、地震のデータは1976-2010年の35年間を解析する。なお、漏れなく記録されている、マグニチュード5以上の地震、火山爆発指数（VEI）が2以上の中規模以上の噴火のみを解析対象とする。

噴火誘発のメカニズムとしては、これまで主要因のひとつとして提案されている動的歪み及び静的歪み（膨張／圧縮）を検討する。動的歪みは強震動と関係するので、地震のマグニチュードと火山までの距離などから求められる強震動予測式（司・翠川1999）を利用する。また、静的歪み場は、Okada（1992）の解を利用し、モーメントテンソル解をもとに火山下5kmでの体積ひずみを計算する。大地震の発生時刻を基準に経過時間を取り、静的歪みと強震動の大きさをもとに噴火発生数を調べた。その結果、強震動の大小の違いによっては、大地震の発生前後で噴火数には違いが見られないことがわかった。一方、強震動の大小にかかわらず、静的歪みが0.5micro strain以上の膨張場となると、噴火発生数が大地震前の2-3倍になることがわかった。この噴火数の増大は、大地震発生から10年程度は続く。膨張場の形成により、気泡成長によってマグマの密度低下と浮力の獲得、火道の閉塞の緩和が促され、噴火が発生しやすくなったと考えられる。

噴火を誘発される火山の特徴を調べるため、火山の噴火履歴を調べた。その結果、噴火を頻繁に起こしている火山の方が誘発されやすい傾向があるものの、静穏期の長い火山でも噴火が誘発されることがわかった。また、大地震により静的歪みが0.5 micro strain以上の膨張場となるのは、世界で年間2-3火山であり、そのうちの15-25%でVEI 2以上の噴火が発生すると見積られた。この数はそれほど大きくないが、VEI 1の小規模な噴火の発生頻度はVEI2の約7倍であるので、大地震の発生により噴火が発生する可能性は、この見積もりよりは大きくなると考えられる。