

Thu. Oct 29, 2020

ROOM D

Room D | Regular session | S01. Theory and analysis method

[S01]PM-1

chairperson:Daisuke Sato(DPRI, Kyoto University),

chairperson:Tsutomu Takahashi(JAMSTEC)

1:00 PM - 2:15 PM ROOM D

[S01-01] Bayesian estimation method of fault slip

distributions considering underground structure

uncertainty based on ensemble modeling

○Ryoichiro Agata¹, Amato Kasahara, Yuji Yagi²

(1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)

1:00 PM - 1:15 PM

[S01-02] Proper reduction and asymptotic sampling

difficulty of posterior distributions in fully

Bayesian inversions

○Daisuke Sato¹, Yukitoshi Fukahata¹ (1.DPRI, Kyoto University)

1:15 PM - 1:30 PM

[S01-03] Problems caused by the non-negative slip

condition on seismic source inversion

○Yukitoshi Fukahata¹, Yuji Yagi² (1.DPRI, Kyoto University, 2.Graduate School of Life and

Environmental Sciences, University of Tsukuba)

1:30 PM - 1:45 PM

[S01-04] Toward short-period (< 10 s) full waveform tomography in and around the 2011 Tohoku-Oki source area using land-ocean unified 3D initial model

○Taro Okamoto¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³ (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3.Earthquake Engineering Sector, Civil Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry)

1:45 PM - 2:00 PM

[S01-05] Wavelet-based analysis of surface roughness of the subducted Philippine Sea plate in the western Nankai trough

○Tsutomu Takahashi¹, Ayako Nakanishi¹, Shuichi Kodaira¹, Yoshiyuki Kaneda² (1.JAMSTEC, 2.Kagawa University)

2:00 PM - 2:15 PM

Room D | Regular session | S01. Theory and analysis method

[S01]PM-2

chairperson:Kaoru Sawazaki(NIED), chairperson:Issei Doi(DPRI, Kyoto University)

2:30 PM - 3:30 PM ROOM D

[S01-06] A centroid catalog of P-wave microseisms

○Kiwamu Nishida¹, Ryota Takagi² (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Graduate School of Science, Tohoku University)

2:30 PM - 2:45 PM

[S01-07] Early forecast of maximum amplitude and threshold exceeding amplitude number due to aftershocks using a continuous seismogram

○KAORU SAWAZAKI¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

2:45 PM - 3:00 PM

[S01-08] Landslide source determination using amplitude source location method for the 2017 landslide in southwest Japan

○Issei Doi¹, Takuto Maeda², Toshitaka Kamai¹, Gonghui Wang¹ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

3:00 PM - 3:15 PM

[S01-09] sP converted waves seen on broadband record sections from earthquakes near the plate boundary of Tohoku district

○Masahiro Kosuga¹ (1.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

3:15 PM - 3:30 PM

Room D | Regular session | S01. Theory and analysis method

[S01]PM-1

chairperson:Daisuke Sato(DPRI, Kyoto University), chairperson:Tsutomu Takahashi(JAMSTEC)

Thu. Oct 29, 2020 1:00 PM - 2:15 PM ROOM D

[S01-01] Bayesian estimation method of fault slip distributions considering underground structure uncertainty based on ensemble modeling

○Ryoichiro Agata¹, Amato Kasahara, Yuji Yagi² (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)

1:00 PM - 1:15 PM

[S01-02] Proper reduction and asymptotic sampling difficulty of posterior distributions in fully Bayesian inversions

○Daisuke Sato¹, Yukitoshi Fukahata¹ (1.DPRI, Kyoto University)

1:15 PM - 1:30 PM

[S01-03] Problems caused by the non-negative slip condition on seismic source inversion

○Yukitoshi Fukahata¹, Yuji Yagi² (1.DPRI, Kyoto University, 2.Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)

1:30 PM - 1:45 PM

[S01-04] Toward short-period (< 10 s) full waveform tomography in and around the 2011 Tohoku-Oki source area using land-ocean unified 3D initial model

○Taro Okamoto¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³ (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3.Earthquake Engineering Sector, Civil Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry)

1:45 PM - 2:00 PM

[S01-05] Wavelet-based analysis of surface roughness of the subducted Philippine Sea plate in the western Nankai trough

○Tsutomu Takahashi¹, Ayako Nakanishi¹, Shuichi Kodaira¹, Yoshiyuki Kaneda² (1.JAMSTEC, 2.Kagawa University)

2:00 PM - 2:15 PM

Bayesian estimation method of fault slip distributions considering underground structure uncertainty based on ensemble modeling

*Ryoichiro Agata¹, Amato Kasahara, Yuji Yagi²

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2. Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

測地データや地震波データを用いた断層すべり推定においては、地下構造の不確かさに起因するモデル予測誤差が、しばしば推定に伴う誤差の主たる要因となる。しかし、従来の断層すべり逆解析手法では、モデル予測誤差を考慮しないか、観測に伴う誤差と区別しない定式化が一般的である。一方、過去10年間で、モデル予測誤差を陽に考慮した断層すべり推定手法が複数提案されるなど（例えばYagi & Fukahata 2008 & 2011, Duputel et al. 2014, Ragon et al. 2018）、手法開発が飛躍的に進んできた。これらの手法に共通するのは、モデル予測誤差が正規分布に従うことを仮定し、推定に必要なアルゴリズムを簡単にしている点である。本研究では、これらの研究の考え方を基礎とし、非正規分布に従うモデル予測誤差を柔軟に取り扱うことができ、同時に観測データから断層すべりだけでなく地下構造の情報も得る、という新しい断層すべり推定手法を開発する。地下構造の不確かさに関する既知の確率分布からランダムサンプルされたパラメータを基に地下構造モデルを多数生成することで、グリーン関数の不確かさを係数行列のアンサンブルにより表現する。断層すべりの事後分布を推定するベイズモデルを設定し、予測誤差に相当する積分項をこのアンサンブルを用いたモンテカルロ近似により計算する。これにより、非ガウスの予測誤差を考慮した断層すべりの事後分布推定が可能となる。さらに、モンテカルロ積分を行う過程で各係数行列に対する尤度も計算されることにより、地下構造モデルのサンプルの中から尤もらしいものの抽出を同時に行うことができる。事後分布のサンプリングにはレプリカ交換モンテカルロ法を用いる。事前に係数行列を十分数計算しておけばよいという点から、断層すべりと地下構造パラメータの事後分布を直接的に同時サンプリングする方法と比べ、計算コストにおいてアドバンテージがある。

手法の有効性を確かめるため、2次元半無限均質弾性体内の低角逆断層におけるすべり遅れレート（SDR）の測地データを用いた推定について数値実験を行った。すべり遅れレート分布の真値を設定し、真のディップ角を15度として人工データを作成した。その上で、ディップ角について、「平均18度、標準偏差3度の正規分布に従う」というバイアスを含んだ不確かな情報しかない、という状況を想定して推定を行った。このような場合、予測誤差は一般に正規分布には従わない。SDRの事後分布を推定したところ、事前知識におけるディップ角の平均値がディップ角真値と3度ずれているにもかかわらず、事後確率分布を近似するSDR分布のサンプル群がSDR分布の真値とよく整合した。ディップ角の不確かさに由来する予測誤差が精度よく推定されていることが示唆される。予測誤差を考慮しない場合はSDR分布の事後確率分布がSDR分布の真値と整合的でなかったため、手法の有効性が示されたといえる。また、SDRの事後分布のサンプリングを通じて計算された係数行列の事後確率密度を調べたところ、ディップ角15度前後に対応した係数行列の事後確率密度が特に大きくなっていた。このように、推定を通じて、データから真の地下構造に関する情報も得ることができた。同時に、ディップ角の推定精度が、事前情報の不確かさを表す、事前に設定したディップ角の標準偏差の大きさに依存することを確認した。また各観測点におけるモデル予測誤差の確率分布形状を可視化したところ、複数の観測点で、正規分布では通常表現が難しいといわれる歪度の大きな分布となっていることが確認された。

Proper reduction and asymptotic sampling difficulty of posterior distributions in fully Bayesian inversions

*Daisuke Sato¹, Yukitoshi Fukahata¹

1. DPRI, Kyoto University

前回の地震学会で、モデルパラメータ数が大きくなるにつれて従来のフルベイズ推定と赤池ベイズ情報量規準 (ABIC) によるベイズ推定とでモデルパラメータ推定値が乖離し、これまでフルベイズの近似とわれてきたABICの方がより適切な推定値となるという問題を報告した (佐藤・深畑, 2019). 本発表では、その原因となっていた同時事後分布の性質を精査する。

ベイズ推定では、観測方程式とモデルパラメータに関する事前分布とをベイズの定理を介して結合し、事後分布を構成する。フルベイズ推定では、さらにモデルパラメータの事前分布を規定する超パラメータについてもその事前分布 (超事前分布) を考慮し、モデルパラメータと超パラメータに関する同時事後分布を構成する。

ここで、フルベイズ推定の本来の解は同時事後分布であるのだが、多次元の確率分布そのままでは有用な情報を引き出せない (松浦, 1990). そこで、同時事後分布からモデルパラメータの有用な統計量を得るために情報の縮約が必要となる。適切な縮約の方法は自明ではなく、少なくとも3つの流儀がこれまで用いられてきた。1つは、同時事後分布から超パラメータとモデルパラメータの組を直接的に同時推定する。この立場では、事後確率最大 (MAP) 解が推定値として通常採用される。もう1つは、同時事後分布からモデルパラメータのみを推定する。これは、超パラメータに関して事後分布を積分し、モデルパラメータに関して周辺化した事後分布を用いることに相当する。Fukuda & Johnson (2008) などフルベイズ推定を行っている研究では、しばしばこの指標が用いられている。そして、最後の1つはABICで、モデルパラメータを積分することにより超パラメータに関して周辺化された事後分布を求め、その分布を基にモデルパラメータを推定する。これは、同時事後分布を超パラメータの周辺事後分布とモデルパラメータの条件付き事後分布とに因数分解し、これら2つの確率値に基づく二段推定を行うことに相当する。この方法は、地球物理では広く用いられてきた (Yabuki & Matsu'ura, 1992).

これらの縮約に関して、モデルパラメータ数の増加につれて、モデルパラメータの周辺事後分布がMAP解にデルタ関数的に収斂する一方で、超パラメータの周辺事後分布はABIC推定値にデルタ関数的に収斂することを我々は解析的に導いた。これは、ABIC型の多段推定を行うかどうかでフルベイズ推定のモデルパラメータ推定値がABIC型とMAP型に二分されるということを意味する。

それらの二分された推定値のうちどちらが良いかをsynthetic testで検討した。検討の際は、roughnessが小さいという事前分布を用いた。その結果、従来の報告通り、同時事後分布が、MAP解として通常採用される局所最大に加え、underfit解 [モデルパラメータ数が多い場合にはさらにoverfit解 (伊庭, 1996)] に大域最大を持つ多峰分布であることを確認した。また、モデルパラメータ数が多い場合に局所最大解がunderfit側にバイアスされ、さらには消失していくことも新たに観察された。対照的に、超パラメータの周辺分布 (ABIC) は、一貫して最適値付近にピークを持つ単峰分布だった。

このようにしてABIC型の多段推定がそれ以外の縮約された分布に比べてより適切だとわかった。しかし、いずれの縮約も同時事後分布から生成される分布関数を用いている以上、これらの分布から得られる平均値は同一でなければならない。この点で、三通りに縮約された分布関数が異なる推定値にデルタ関数的に収斂するとした我々の結果は、一見奇妙である。

そこで、事後平均 (EAP) 推定値の解析的表現を導いた。その結果、モデルパラメータのABIC推定値とEAP推

定値とが同様の値をとることが見出されると共に、EAP推定値の同時事後分布での出現確率がモデルパラメーター数の指数関数として急減少していくことが明らかになった。従来、モンテカルロサンプリングは多次元標本空間がパラメーター数の指数で増加する問題（次元の呪い）を確率値の高い事象のみをサンプルすることで克服するとしたが、同時事後分布では確率の高い推定値（MAP解近傍）は適切でない以上、この処方是有効に機能しない。従来のモンテカルロサンプリングによるEAP推定値の数値近似解はMAP解の側にバイアスされていた可能性が高い。

一方、超パラメーターの周辺事後分布については、ほぼ無限大の個数で且つほぼ確率ゼロの事象が平均を支配するという同時事後分布の困難を、字義通り無限個の事象を積算することで解決していた、と考えられる。MAPのABICからのずれに相当する、同時事後分布と超パラメーターの周辺事後分布の対数差の主要項が、シャノンエントロピーと呼ばれる量（確率変数に対して拡張された事象の個数の対数（エントロピー）を表す量）であることがわかり、この予想が裏付けられた。

Problems caused by the non-negative slip condition on seismic source inversion

*Yukitoshi Fukahata¹, Yuji Yagi²

1. DPRI, Kyoto University, 2. Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

地震の震源過程（断層面上でのすべり分布、あるいはすべりの時空間発展）を求めるインバージョン解析では、非負の拘束条件が広く用いられてきた。非負の拘束条件とは、例えば逆断層型の地震では、逆断層成分が常に正またはゼロで、マイナスのすべり（つまりは正断層成分）が生じないという条件のことを指す。この条件は物理的に妥当であると考えられ、多くの解析において疑問を持たずに使用されてきた。

しかしながら、本講演で指摘するように、震源過程解析で非負の拘束条件を課すことには大きく二つの問題がある。

一つは、そもそもなぜ非負の拘束条件が必要となるのか、という問題である。震源過程解析において、少量の負のすべりが生じることは特に問題ないであろう。観測データや解析モデルは常に誤差を含んでいるので、推定誤差の範囲内で負のすべりが生じることはある意味自然であり、別段目くじらを立てる必要はない。そして、この場合には、非負の条件を課して、（例えば、政府への提出資料等として）結果の見栄えを良くすることは許容されるだろう（後述する2つ目の問題が重大でない場合には）。

実際のところ非負の条件が強く必要とされるのは、推定誤差を大きく越えて負のすべりが生じてしまう場合である。しかし、逆説的ではあるが、この場合には非負の拘束条件は使うべきではない。なぜなら、推定誤差を大きく越えて負のすべりが生じるということは、モデル化に重大な欠陥が隠れていることを意味するからである。つまり、何か重大な欠陥があるから、大きな負のすべりが生じてしまうのである。この場合に、非負の条件を課して一見もっともらしいすべり分布を得ることは、その重大な問題を覆い隠してしまい、真の解に近づく上ではむしろ弊害となる。但し、具体的にどのようにしてその重大な問題を解決するのは難しい問題である。一つの方策としては、グリーン関数の誤差の導入(Yagi & Fukahata, 2011, GJI)があるが、万能ではない。しかし、この難しい問題を解決していくのが、地震学の発展というものであろう。

もう一つの問題は、非負の拘束条件を課すと、震源域から離れたモデル領域において、そのすべり量の推定が不偏推定とならないことである。”不偏推定”とは、推定量の期待値が真値に一致することを意味し、どのように統計的推定を行うかの上で、最も重視される指標と言って良い。通常、震源過程解析では、モデル領域の設定がすべり量の推定に影響を及ぼさないように、すべりが実際に生じた範囲よりもある程度広くモデル領域を設定する。このとき、前述のようにモデル領域の端の近くの大抵の場所では、滑り量 u がゼロとなることが期待される。一方、非負の条件を課すと、必然的に、 $E(u(\mathbf{x})) > 0$ となる。ここで、 $\mathbf{x}$ は空間座標、 E は期待値を表す。つまり、すべりがほぼゼロのところでは、正の方向にバイアスされた値が選ばれてしまうのである。実際の解析において、すべりがゼロの領域を含まないように断層面の設定をすることはまず不可能である。しかし、非負の条件付きの場合、すべりがゼロの領域では常に正の方向にバイアスされた値が得られる。そのため、地震モーメントを一定にするために最大すべりを含む他の領域のすべり量が減少し、すべり分布の形自体にも影響を与えるといったことが起こる。

要するに、非負の条件だけを取り上げれば物理的に自然なものと言えるが、震源過程解析に非負の条件を用いることは、モデル化に含まれる重大な欠陥を覆い隠し、すべり分布にも無視できないバイアスを与えるという問題がある。

Toward short-period (< 10 s) full waveform tomography in and around the 2011 Tohoku-Oki source area using land-ocean unified 3D initial model

*Taro Okamoto¹, Hiroshi Takenaka², Takeshi Nakamura³

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3. Earthquake Engineering Sector, Civil Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

We need accurate 3D structure model to study the correlation between the physical properties of the materials and the seismicity as well as the rupture processes of earthquakes. Currently available 3D structure model in and around the 2011 Tohoku-Oki source area is not sufficient in terms of the accuracy of the synthetic waveforms generated based on the model: we found that short period (< 10 s) synthetics for land stations in northeastern Japan do not reproduce the characteristics in the observed full waveforms from shallow earthquakes occurred there (Okamoto et al. *Earth Planets Space (EPS)* 2018). This research suggests the short wavelength features in the current model are not sufficient. Thus we attempt to improve the 3D model using the waveform tomography. We select shallow earthquakes ($M_w \sim 6$) in and around the source area. In this study, we re-analyze six events that we have previously reported (SSJ Fall Meeting 2019) and newly add five more shallow events. The observed full waveforms recorded by land seismic network (F-net, KiK-net) in northeastern Japan are used. A land-ocean unified 3D structure model including oceanic water layer is used as the initial model. First, we re-determine the source parameters (the moment tensor, source time function, source location, and origin time) based on the initial model using First-motion Augmented Moment Tensor analysis method (Okamoto et al. *EPS* 2017, 2018) to minimize the biases due to one-sided (i.e., only on land) station distribution. Then we simulate the forward (using the earthquake source) and the adjoint (using a single force at the station location) wave propagations based on the initial model. The simulations are performed on TSUBAME super computer of GSIC, Tokyo Institute of Technology using a multi-GPU version (Okamoto et al. in *GPU Solutions to Multi-scale Problems in Science and Engineering* 2013) of HOT-FDM (Nakamura et al. *BSSA* 2012). The simulated waveforms are Fourier transformed and multiplied to generate waveform sensitivity kernels of relaxed modulus for P- and S-waves, density, Qp and Qs in frequency domain. For example, the kernels for a pair of a F-net station (TYS) and an outer-rise event (2017/10/06 M_w 6.2) show an asymmetric pattern with respect to the straight path even at a period of 9.8 s. At a period of 7.1 s, large amplitude pattern is observed along the oceanic trench, suggesting scatterings due to strong heterogeneity there. We will discuss the kernel features in other examples, and the results of the attempts of tomographic inversion.

Acknowledgements: The authors are grateful to Japan Meteorological Agency, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED), and Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project for providing the earthquake parameters, to K Kisimoto for providing the topography models, to Headquarters for Earthquake Research Promotion and NIED for providing the structure models, and to NIED for providing the waveform records of KiK-net, and F-net. This study is supported by the Japan Society for the Promotion of Science (KAKENHI grant no.16K05535 and 20K04101), and Joint Usage/Research Center for Interdisciplinary Large-scale Information Infrastructures in Japan (JHPCN) (Project ID: jh200059-NAH).

Wavelet-based analysis of surface roughness of the subducted Philippine Sea plate in the western Nankai trough

*Tutomu Takahashi¹, Ayako Nakanishi¹, Shuichi Kodaira¹, Yoshiyuki Kaneda²

1. JAMSTEC, 2. Kagawa University

断層面の形状は幅広い空間スケールで不均質性（以下、面粗さ）を示す。露頭の断層面形状の調査などでは、面粗さのパワースペクトル密度が波数のべき乗に依存し、ハースト指数 H が0.6~0.9程度の自己アフィン性を示すことが報告されている(e.g., Brown & Scholtz 1985; Candela et al. 2011)。面粗さの統計的性質は表面の摩擦係数などを理解する上で重要な要素の一つであるが、地下の断層の面粗さは速度構造の空間分解能の制約などからこれまで推定されていない。この推定を行うには、断層周辺の速度構造の分解能を適切に把握した上で、解析可能な波数域が狭い場合でも安定した結果が得られる手法を用いることが重要となる。本研究では、ウェーブレット変換を用いた解析法の適用可能性を検討し、南海トラフ西部において沈み込んだフィリピン海プレートの面粗さを評価した。

解析に用いるプレート形状のデータは、JAMSTECが南海トラフ周辺で調査を行った構造探査測線のうち、海底地震計を用いた屈折法地震探査とMCS反射法探査がともに実施され、観測点間隔やエアガン発振間隔が密な6測線で得られたものである。屈折法探査の初動走時トモグラフィで得られた速度構造を用い、MCS記録の海洋地殻上面からの反射波走時を深度変換してプレート形状を得た。測線長は100km前後で、形状データは0.1km間隔である。上盤側の地震波速度の水平変化を調べた結果、そのパワースペクトル密度は低波数側ではべき乗則に従うが、観測点間隔よりやや小さい約4.5kmに対応する波数より高波数側でべき乗則から外れ、パワースペクトル密度が小さくなる傾向が見られた。このずれはトモグラフィの正則化項などの影響と考えられることから、面粗さの推定は約4.5kmよりも大きな空間スケールのみを対象とすることとした。

ウェーブレット変換を用いた面粗さの解析には、Wavelet Transform Modulus Maxima (以下、WTMM)と呼ばれる連続ウェーブレット変換の極大値に着目し、データ全体のスケール依存性が単一のハースト指数で特徴づけられることを仮定した解析法 (Audit et al. 2002) を用いた。これは本研究で用いるサンプル数が少ないデータでも安定する手法とされている。しかしサンプリング間隔から数オクターブ程度の範囲では安定した結果が得られるものの、それ以上のスケールでは推定誤差が増大する。この推定誤差を抑制するため、本研究では複数測線のデータを統合し、その平均的な面粗さを推定することとした。非整数ブラウン運動の人工データを使って検証を行った結果、1000サンプルの形状データが3つ程度あれば概ね安定してハースト指数を推定できることが確認された。

南海トラフ西部の各探査測線では、WTMMによる解析でもハースト指数を十分な精度で推定することはできないが、全6測線を統合することで南海トラフ西部におけるフィリピン海プレート表面のハースト指数は0.87程度と推定された。また沈み込んだプレートの南北でrms振幅が系統的に異なり、北側のrms振幅が大きな領域では $H \sim 0.57$ 、南側のrms振幅が小さな領域では $H \sim 0.86$ と推定された。単一測線での面粗さの推定精度を向上させるには、測線長が速度構造の空間分解能を数倍以上にすることが必要となる。しかし形状データのrms振幅とWTMMを併用することで、現状の探査精度でも面粗さの大きさやハースト指数の空間変化を安定して推定することが可能となった。今後、測線数の増大とともにハースト指数やその空間変化をより詳細に把握できるようになると期待される。

Room D | Regular session | S01. Theory and analysis method

[S01]PM-2

chairperson:Kaoru Sawazaki(NIED), chairperson:Issei Doi(DPRI, Kyoto University)

Thu. Oct 29, 2020 2:30 PM - 3:30 PM ROOM D

[S01-06] A centroid catalog of P-wave microseisms

○Kiwamu Nishida¹, Ryota Takagi² (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo,
2.Graduate School of Science, Tohoku University)

2:30 PM - 2:45 PM

[S01-07] Early forecast of maximum amplitude and threshold exceeding amplitude number due to aftershocks using a continuous seismogram

○KAORU SAWAZAKI¹ (1.National Research institute for Earth Science and Disaster Resilience)

2:45 PM - 3:00 PM

[S01-08] Landslide source determination using amplitude source location method for the 2017 landslide in southwest Japan

○Issei Doi¹, Takuto Maeda², Toshitaka Kamai¹, Gonghui Wang¹ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

3:00 PM - 3:15 PM

[S01-09] sP converted waves seen on broadband record sections from earthquakes near the plate boundary of Tohoku district

○Masahiro Kosuga¹ (1.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University)

3:15 PM - 3:30 PM

A centroid catalog of P-wave microseisms

*Kiwamu Nishida¹, Ryota Takagi²

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Tohoku University

■はじめに

地動の脈動の存在自体は1940年代から知られている。励起源が海洋波浪であることは既に確立されており、その励起の特徴から大きく2つに分類される。1つ目は、primary microseisms と呼ばれる約 0.07 Hz の特徴的な周波数を持つ振動である。この周波数が海洋波浪の特徴的な周波数と対応している事と Love波の振幅が卓越していることから、海岸線付近の斜面に打ち寄せる海洋波浪 が励起源だと考えられている。2つ目は secondary microseisms と呼ばれ、海洋波浪のちょうど倍の卓越周期 (0.15 Hz) をもつ。海洋波浪の非線形効果が励起に寄与していると考えられている[Longuet-Higgins, 1950. とともに海洋波浪が励起源のため、表面波が卓越していることがよく知られている。

■解析手法

脈動の起源メカニズムを系統的に理解するためには理解するためには、脈動P波の重心位置のカタログ化は情報は重要である。backprojection法は、脈動P波の重心位置を特定するのに有効な手法である。この手法は、slowness ベクトルと波面の曲率の両方の情報を利用している。また、多くのphase (P, PP, core phase等)の情報を利用することも可能である。しかし全ての情報を同時に使用するため、どの情報が震源位置を抑えているのか検証することが難しい。また、10年以上にわたるグローバルなカタログを作成するためには、計算コスト大きな問題となる。一方、beamforming法の計算コストは実用的であるが、この方法では、slownessベクトルの情報のみを利用しているため、P波とPP波を区別することが原理的にできない。本研究では、beamforming法の自然な拡張として、slowness ベクトルと波面の曲率の両方の情報を抽出できる新しい手法を提案する。

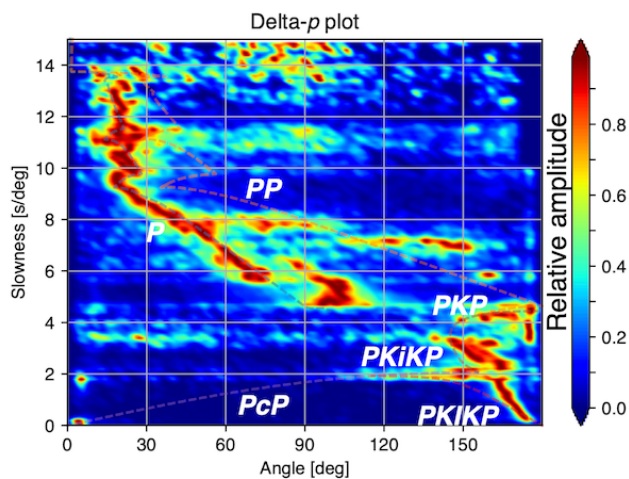
この手法では、まず、従来のbeamforming法に基づいて、アレー中心でのslowness ベクトルの初期値推定を行う。次のステップでは、slowness ベクトルを固定して、波面の曲率を変化させbeam power が最大化することによって波面の曲率を推定する。これらの値をアレー中心での初期値とし、摂動理論に基づいて、slownessベクトルと波面の曲率の値を反復的に更新していく。波面の曲率から、アレー中心と励起源の重心位置との距離を推定することができる。波面の曲率はslownessよりも水平方向の不均質に敏感なため、推定精度は悪くなる。しかし推定された距離情報に基づいて(図1)、検出されたスローネスを対応する相(例えば、P, PP)に分類する事が可能となる。この分類された位相に基づいて、推定したslowness ベクトルの値から震源の重心位置を推定する。

■解析

2004年から2018年までに防災科学技術研究所が運用によって展開されているHi-net (速度計 鉛直成分約750点)を解析した。機器応答は時間領域 で補正し[Maeda *et al.*, 2011]、収録機器起源のコヒーレントなノイズは予め差し引いた[Takagi *et al.*, 2015]。解析には、これら” 広帯域化” した速度計記録を用いた。時系列を512秒ごとに切り出し、地震の影響を取り除き解析から除外した。遠地の地震はglobal CMTカタログ[Ekström *et al.*, 2012]を用い除外し、近地の地震は平均自乗振幅の時間変化の大きさから判断し除外した。さらに、観測点ごとの平均自乗振幅の大きさに閾値を設定し、局所的なノイズの影響を受けているとして解析から除外した。選択したデータを用い、0.1-0.2Hzの帯域で解析を行った。

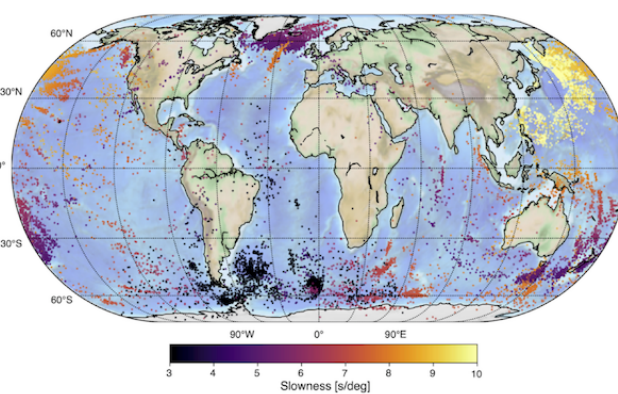
■結果と展望

推定された重心位置は季節的な変動を示しており、過去の研究結果とも調和的である。P, PP, PKP, PKIKP等の多くの相を同定できたため、1箇所のアレーデータから全球点な脈動P波の重心位置のカタログ化(図2)に成功した。本発表では、推定された脈動P波の重心位置のカタログから、脈動の励起メカニズムについて議論する予定である。



まず推定した震源毎に、震央距離とslownessに対して点をプロットし、その数密度を計算する。次に、各slowness毎に最大値で規格化する。P, PP, core phaseを同定することができる。

図 1



決定した重心位置をプロットしたず。色はイベントごとのslownessを表している。例えばグリーンランド近くではP波によって震源が決まっている。少し南側ではP波がshadowに入るため、PP波によって震源位置が決まっている様子が見て取れる。

図 2

Early forecast of maximum amplitude and threshold exceeding amplitude number due to aftershocks using a continuous seismogram

*KAORU SAWAZAKI¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

昨年度は、観測された連続地震動記録の統計的特徴を用いることで、地震カタログを用いることなく、余震による最大振幅の発生確率を早期に予測する手法を提案した（澤崎、2019）。今回は、任意の閾値を超える最大振幅の発生数を確率的に表現する手法について報告する。具体的には、「期間 T_1 から T_2 の間に閾値 z 以上の振幅が n 回以上観測される確率は $Q\%$ 」と表される超過確率 Q を、任意の T_1 、 T_2 、 z 、 n の組み合わせについて算出する。ここでは n を閾値超過振幅数と呼ぶ。 n を1とする場合、この超過確率は「期間 T_1 から T_2 の間に観測される最大振幅が z 以上である確率は $Q\%$ 」と言い表すことができ、最大振幅の予測は閾値超過振幅数の予測の特殊な場合に相当する。

連続地震動記録の区間最大振幅（一定時間 T ごとの最大振幅。今回は T を1分に固定）は、Frechet分布と呼ばれる極値分布の一種にしたがう。この分布は、地震活動の活発さや伝播経路特性等を反映するパラメータ A と、Gutenberg-Richter式の b 値等を反映するパラメータ m とで特徴づけられる。地震数が大森-宇津則にしたがい時間減衰する場合、大森-宇津式の p 値もパラメータとなる。加えて、地震動記録は地震以外の雑微動を含み区間最大振幅は下限を持つため、その下限 $x_{\min}$ もパラメータとなる。以上4個のパラメータを用いると、区間最大振幅がしたがうFrechet分布の累積分布関数 G は

$$G(z, t, t+T) = \exp[-ATm^{-1}(z-x_{\min})^{-m}t^p] \quad (1),$$

確率密度関数 g は

$$g(z, t, t+T) = ATt^{-p} \exp[-ATm^{-1}(z-x_{\min})^{-m}t^p](z-x_{\min})^{-m-1} \quad (2)$$

と表される。ただし1、2式とも本震からの経過時間 t が T よりも十分大きいという条件の下で成り立つ。観測された区間最大振幅に最尤法を用いてFrechet分布をあてはめ、4個のパラメータを推定する。最尤推定値 $\theta = (A, p, m, x_{\min})$ を用いると、超過確率 Q は

$$Q_n(z, T_1, T_2; \theta) = 1 - \exp[-(N_{\infty} - N)] \sum_{n'=1}^n (N_{\infty} - N)^{n'-1} / (n'-1)! \quad (3)$$

$$N_{\infty} - N = (z - x_{\min})^{-m} A (T_2^{1-p} - T_1^{1-p}) / [m(1-p)] \quad (4)$$

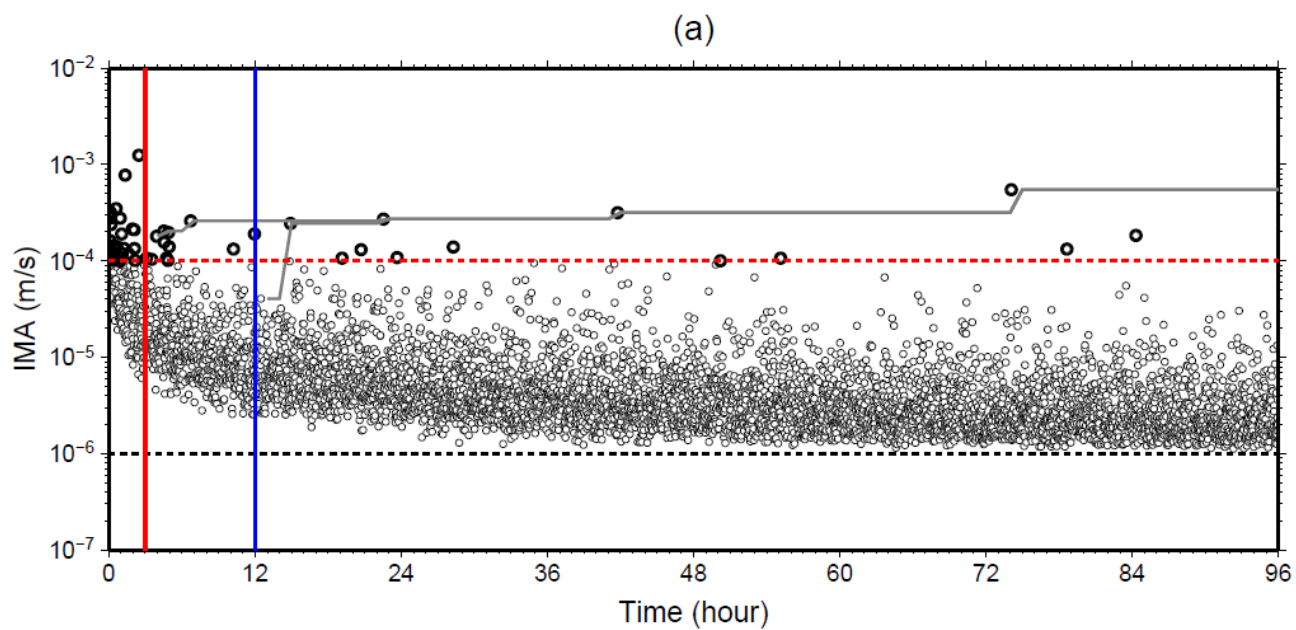
と表される。 N_{∞} は期間 T_1 から T_2 の間に発生する全地震数を、 N はその中で最大振幅が閾値 z を超えない地震数を表す。超過確率 Q は、 z についてFrechet分布、 n についてポアソン分布にしたがう。実際の予測においては、推定値の不確定性を考慮したベイズ予測（例えば、Omi et al., 2015）を用いる。

図aは、G-R式と大森-宇津式にしたがう余震活動を乱数を用いて生成し、マグニチュードと最大振幅の関係式から算出した区間最大振幅の推移（白丸）を表す。最大振幅の閾値は 10^{-4} m/s（赤点線）に設定し、これを超える区間最大振幅は太い丸印で示している。区間最大振幅の下限 $x_{\min}$ は 10^{-6} m/s（黒点線）に設定した。灰色の実線は評価時点以降に観測された最大振幅を表す。この疑似余震記録について、本震発生の5分後から3時間後（赤縦線）までのデータを用いてパラメータを推定し、超過確率曲線を描いた図がb（最大振幅）とc（閾値超過振幅数）である。赤丸が3時間後以降に発生した最大振幅（図b）と、閾値 10^{-4} m/sを超えた振幅の数（図c）の推移を表す。黒線は3時間後時点で評価した96時間後までの10%、50%、90%超過確率曲線を示す。最大振幅、閾値超過振幅数共に、予測の範囲で推移している。評価時点が12時間後（図a青縦線）の場合（図d、e）、使用できるデータ数が増えるためにパラメータの推定精度が上がり、特に閾値超過振幅数の予測幅は

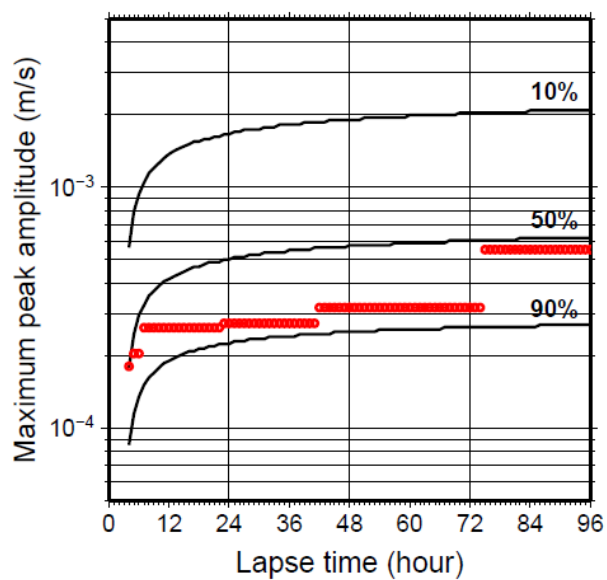
より絞り込まれる。この場合も3時間後の場合と同様に、超過確率曲線から予測される範囲内で最大振幅、閾値超過振幅数とも推移する。

異なる乱数列を用いて図b~eと同様の図を1000通り描くと、最大振幅や閾値超過振幅数が10%超過確率曲線を上回るケースと90%超過確率曲線を下回るケースはそれぞれ100ケース程となり、全ケースの10%程度となった。同様に、10%と50%超過確率曲線の間および50%と90%超過確率曲線の間を推移するケースはそれぞれ400ケース程で、全体の40%程度であった。以上の結果から、パラメータが時間変化しない理想的な状況下では、区間最大振幅を用いることで、大地震発生後数時間以内にその後の最大振幅と閾値超過振幅数を確率的に予測できることが分かった。

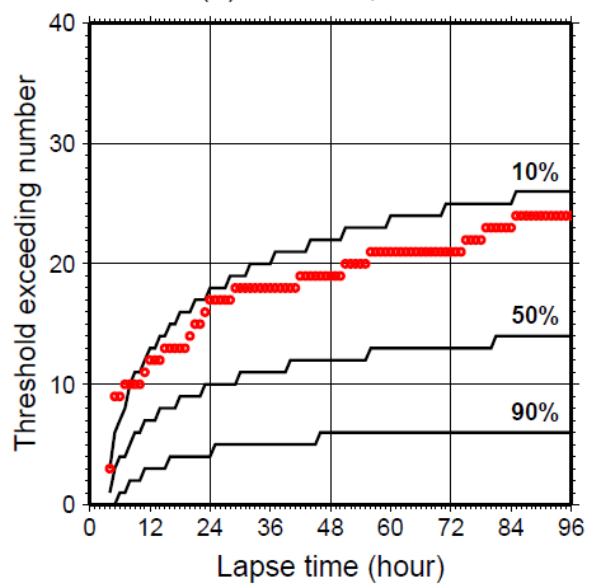
謝辞：本研究は科研費・若手研究B「連続地震波形記録を用いた準リアルタイム余震活動予測手法の開発」（課題番号17K14385）からの支援を受けています。



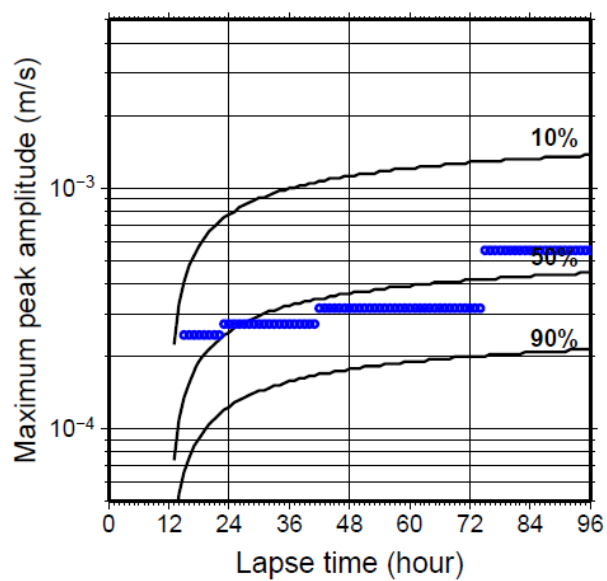
(b) Amplitude, 3 hrs



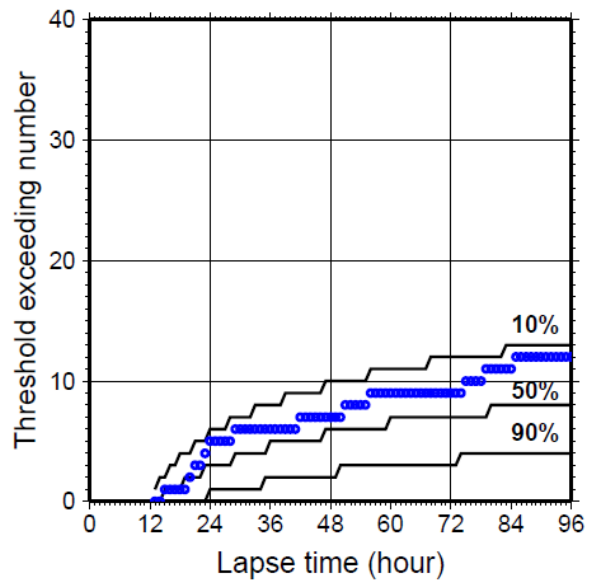
(c) Number, 3 hrs



(d) Amplitude, 12 hrs



(e) Number, 12 hrs



Landslide source determination using amplitude source location method for the 2017 landslide in southwest Japan

*Issei Doi¹, Takuto Maeda², Toshitaka Kamai¹, Gonghui Wang¹

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

2017年九州北部豪雨によって大分県日田市小野地区において7月6日午前9時45分ごろに大規模な斜面崩壊が発生した。この斜面崩壊によると思われる地震動が、約1分の間隔をおいて2回、定常地震観測網の4-5点の地震観測点において捉えられた。継続時間は40-60秒程度、卓越周波数は0.5-3 Hzであり既往研究（e.g. Dammeier et al., 2011）による斜面崩壊の地震波形記録と矛盾しない特徴を示した。また、崩壊地から約3 km/sの見かけ速度で伝播していたことから、本崩壊によって励起された地震動が捉えられたことが窺えた。

このように、比較的規模の小さな斜面崩壊であっても、高感度地震観測網にはその震動が記録されていることがあり、高周波連続地震観測記録が斜面崩壊の監視に重要な役割を果たすと期待される。しかし、それらの記録は一般にS/Nが低く、しかも通常の地震と違い明瞭なP波S波相がみられることはほとんどない。そこで、本研究ではこのような地震動が定常地震観測網で捉えられた際に、斜面崩壊に関する事前情報なしにどの程度震源を推定できるのかを調べた。

Doi and Maeda (2020) は、火山性の低周波微動の震源を観測点間の振幅比から推定した振幅震源決定法（ASL法、Kumagai et al., 2010）を、定常地震観測網で記録された2017年長野県飯山市の斜面崩壊による10観測点以上の地震波形データに適用し、推定精度約5 kmで崩壊斜面の周辺に震源を決定することに成功した。しかし、本研究で対象とする日田市小野地区における斜面崩壊はそれよりも規模が小さい。そのため、この手法をそのまま本研究の波形データにあてはめ震源決定をおこなったところ、高いS/N比を有する地震観測点が4点程度と少なく、そのままでは震源位置の拘束がうまくいかなかった。そこで、本研究では、S/N比が低い観測点におけるデータを有効活用するため、仮想震源位置に応じて利用するデータを動的に変更する2段階法を採用した。まず、グリッドサーチで仮定する仮想震源位置に対し、観測記録のS/N比の高い点のみの記録と振幅の理論予測曲線との比較から、すべての観測点における振幅の予測値を算出する。そして、信号のS/N比が低い観測点であっても、仮定した仮想震源位置からの振幅の理論予測値がノイズレベルの2倍以上であれば、その観測点では仮想震源位置からの地震動をノイズレベルよりも有意に大きな振幅で記録できるはずであると考えるデータとして算出し、理論予測曲線と観測振幅との残差を計算する。このようにして得られた残差がもっとも小さな仮想震源位置を斜面崩壊の波源とし、その周辺の残差の空間分布から誤差範囲を推定した。その結果、2回の地震動に対して、推定精度5 km程度で崩壊斜面の周辺に震源が求められた。

本研究で扱った小野地区の斜面崩壊は、観測点間隔が平均20-30 km 程度である定常地震観測網に囲まれるような場所で発生した。そのため、一般に日本国内の内陸部で発生する斜面崩壊においても、同様の観測条件が満たされることが予想される。したがって、本研究で採用した観測点選定基準を用いることで、高感度定常地震観測網の観測記録から、国内の多くの地域において同程度の斜面崩壊を事前情報無しに検知できることが期待される。

謝辞：防災科学技術研究所の高感度地震観測網の地震波形データを使用させていただきました。記して感謝いたします。

sP converted waves seen on broadband record sections from earthquakes near the plate boundary of Tohoku district

*Masahiro Kosuga¹

1. Graduate School of Science and Technology, Hirotsuki University

はじめに

地震観測網から離れた位置で発生した地震の震源深さを精密に決定するために、sP変換波を用いることがよく行われる。この波は、震源から放射されたS波が海底面などでP波に変換されて観測点に届いたもので、sP-P時間が震源深さの関数となる性質を震源決定に利用する。先行研究での変換波の検出は、主に目視と観測点ごとの波動特性によるものであった。しかし、特性の揃ったHi-net観測網のデータを用いると、sP変換波やその他の変換波を空間的に連続した波動として検出することが可能である。そこでここでは、地震計の特性を補正して低周波成分を用いると変換波が極めて明瞭に検出できることと、震源位置やメカニズム解の違いによって波形がどのように異なるのかを示す。

方法

地震計の特性補正は、Hi-net地震計特性でのデコンボリューションとF-net地震計特性のコンボリューションを行う再帰型数値フィルタ (Maeda et al., 2011) を作用させて行なった。変換の妥当性はF-net観測点での波形と比較して確認した。この変換により、地震計の固有周波数よりも低周波成分の波形の利用が可能になる。さらに、地震波形をwiggle表示して振幅の符号に応じて波形に着色する視覚化と、振幅の大小に応じて表示振幅を変えるauto gain controlを導入した。これらの処理を施した波形記録のペーストアップを作成して、変換波の出現の有無と波動の特徴を調べた。

また、変換波の起源を検討するために、OpenSWPC (Maeda et al., 2017) による3次元波動伝播シミュレーションも用いた。この目的には、観測波形と同様なペーストアップに加えて、スナップショットでの波動の追跡が有効である。

今回の検討は東北地方太平洋沖合で発生した地震を対象とした。気象庁CMT解カタログを基に、以下の2通りの地震群を抽出した。マグニチュードの範囲は4.3から6.4である。

- (1) 宮城県沖にほぼ東西に並ぶ低角逆断層型地震。これらはプレート境界で発生していると考えられる。同じ領域でのその他の断層タイプの地震も加えた。
- (2) 岩手県沖で発生している低角逆断層型地震。震央が近く断層タイプは同じでも、セントロイド深さが15 km程度異なるものを含むように抽出した。

変換波とその特徴

多くのペーストアップ記録において明瞭なsP変換波を検出することができた。sP波は震央距離100 km程度においてS波波群から分離し、震央距離とともに見かけ速度が増加してP波のそれに漸近し、震央距離400 km程度まで追跡することができる。sP波の空間的連続性には周波数依存性があり、フィルタの周波数が0.1-0.5 Hzにおいて最も明瞭で、高周波になるにつれて不明瞭になる。これは、低周波成分ほど地殻の不均質構造の影響を受けにくいため、短周期地震計記録を広帯域化することの効果をよく示している。また、震源位置に近い地震に対するペーストアップ記録の再現性は、非常に高いことも確認できた。

宮城県沖の地震は東西方向に並ぶように選択したが、sP波やその他の変換波の出現状況は経度とともに変化する。震源位置が東経142.5°以西では、sP波やpP波などの限られた変換波が見られる。震源位置がそれ以东になると、P波と同程度の見かけ速度を持つ変換波が繰り返し現れるようになる。これは海底面と海面の間での多重反射波と考えられる。この多重反射波以降の位相は、震源位置が東経143.5°付近では極めてインコヒーレントである。これは、この付近の海底面下の構造が広い波長範囲にわたって不均質であるためと考えられる。また、メカニズム解が異なると、P波とsP波の相対的振幅の空間分布が明瞭に変化することも確認できた。

岩手県沖ではセントロイド深さが異なる地震についての比較を行なった。深さが異なると変換波の出現時刻が

変わるようにも見えるが、震央位置の違いも影響するため、低周波の波形から目視で確認するのは困難であった。

おわりに

短周期地震計記録を広帯域化して視覚化の工夫を加えることで、sP波は広い震央距離にわたって明瞭に追跡できることがわかった。sP-P時間を精密に読み取ることができれば、震源深さの再決定や地殻構造の推定に有用なデータとなる。その読み取りは、sP波の波形が空間的に連続である性質を用い、平均的波形との相関を用いることで可能となる。

謝辞

本研究では防災科研H-netおよびF-netの観測波形と、気象庁CMT解カタログを使用した。波動伝播シミュレーションには東京大学地震研究所のEIC計算機システムを利用した。（公財）地震予知総合研究振興会からは研究費の援助をいただいた。以上の機関に感謝します。