

Tue. Oct 25, 2022

Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method

9:45 AM - 11:00 AM JST | 12:45 AM - 2:00 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S01] AM-1

chairperson: Kiyoshi YOMOGIDA (Earth and Planetary Dynamics, Grad Sch Science, Hokkaido University), Atsushi Nozu (Port and Airport Research Institute)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S01-01] Required conditions for the formulation of seismic interferometry under simultaneous incidence of P, S and Rayleigh waves

*Atsushi NOZU¹, Yosuke Nagasaka¹ (1. Port and Airport Research Institute)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S01-02] Seismic velocity response to ground water level revealed by ACROSS and seismic array

*Hiromu Ohba¹, Ryoya Ikuta¹, Koshun Yamaoka², Shuhei Tsuji³, Feng Chen², Toshiki Watanabe², Haruno Koike² (1. Shizuoka University, 2. Nagoya University, 3. Japan Agency for Marine Earth Science and Technology)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S01-03] Active seismic monitoring tests on a field slope during rainfall

*Masayuki NAKAYAMA¹, Hironori KAWAKATA¹, Issei DOI² (1. Ritsumeikan Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ.)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S01-04] Semblance analysis of seismic array records using wasserstein metric

*Tatsuki Nara¹, Hiroyuki Goto² (1. Kyoto University Graduate School, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[S01-05] Parameter optimization of non-linear modellings with a surrogate function: Application to waveform inversions

*Kiyoshi YOMOGIDA¹ (1. Earth and Planetary Dynamics, Grad Sch Science, Hokkaido University)

Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method

11:15 AM - 12:30 PM JST | 2:15 AM - 3:30 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S01] AM-2

chairperson: Hisashi NAKAHARA (Graduate School of Science, Tohoku University), Daisuke Sato (DPRI, Kyoto University)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S01-06] Computational difficulty of posterior means and ABIC in fully Bayesian inference: a proposal of new Monte-Carlo methods

*Daisuke Sato¹, Yukitoshi Fukahata¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S01-07] Accuracy evaluation of the approximation of spatiotemporal boundary integral equation toward implementation of FDP-H matrices

*Takumi Miyajima¹, Ryosuke Ando¹ (1. The University of Tokyo)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S01-08] Formularization of spatial autocorrelation for DAS and 3C seismometer and application to seafloor cable data off Sanriku

*Shun FUKUSHIMA^{1,2}, Masanao SHINOHARA², Tomoaki YAMADA², Kiwamu NISHIDA², Akiko TAKEO², Kiyoshi YOMOGIDA³ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Hokkaido University, Graduate school of Science, Department of Natural History Sciences)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S01-09] Formulation of the mixed cross-correlations between displacement and DAS axial strain

*Hisashi NAKAHARA¹, Matthew M. Haney² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Alaska Volcano Observatory, USGS)

12:15 PM - 12:30 PM JST | 3:15 AM - 3:30 AM UTC

[S01-10] Amplitude dependence of seismic wave attenuation

*Hayato Tero¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method

2:00 PM - 3:30 PM JST | 5:00 AM - 6:30 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S01] PM-1

chairperson:Kiwamu Nishida(ERI, the university of Tokyo), Masahiro Kosuga(Hirosaki University)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S01-11] Near-trench amplification of seismic waves from deep earthquakes in low-frequency band: comparison between observation and 2D simulation

*Yuki Ihara¹, Shiro Hirano¹, Hironori Kawakata¹ (1. Ritsumeikan University)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S01-12] Examination of broadband slant-stacked waveform with synthetic one by 3-D wave propagation and their application to focal depth estimation

*Masahiro KOSUGA¹ (1. Graduate School of Science and Technology)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S01-13] Extraction of P-s converted wave from teleseismic P-wave microseisms

*Shota KATO¹, Kiwamu Nishida¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S01-14] On the sensitivity kernels for Rayleigh wave azimuthal anisotropy

*Hitoshi KAWAKATSU^{1,2} (1. Earthquake Research Institute, 2. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[S01-15] Ocean external gravity wave excited by the 2022 eruption of Hunga volcano, Tonga

*Kiwamu NISHIDA¹, Takashi TONEGAWA², Tatsuya KUBOTA³, Mie ICHIHARA¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. NIED)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S01-16] Eruption sequence of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano from P-wave back-projection: Atmospheric coupling mode and eruption cycles

*Kazunori YOSHIKAWA^{1,2}, Kotaro TARUMI² (1. Department of Earth & Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University)

Room C | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

3:45 PM - 4:45 PM JST | 6:45 AM - 7:45 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S03] PM-2

chairperson:Yuya Machida(JAMSTEC), Yohei Kinoshita(University of Tsukuba)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[S03-01] Experimental characterization of sensor drift of pressure gauges using a pressure standard*Hiroyuki MATSUMOTO¹, Hiroaki KAJIKAWA², Keisuke ARIYOSHI¹, Eiichiro ARAKI¹ (1. JAMSTEC, 2. AIST)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[S03-02] Seafloor geodetic observation using the pressure gauges without inherent drift components in the Nankai trough seismogenic zone*Yuya MACHIDA¹, Shuhei Nishida¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Araki Eiichiro¹ (1. JAMSTEC / IMG)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[S03-03] Shallow slow slip and associated VLFE activity observed by seafloor fiber optic strainmeter in the Nankai Trough.*Eiichiro ARAKI¹, Takashi Yokobiki¹, Satoru Baba¹, Yojiro Yamamoto¹, Mark Zumberge², Shuhei Nishida¹, Yuya Machida¹, Hiroyuki Matsumoto¹ (1. JAMSTEC Institute for Marine Geodynamics, 2. Scripps Institution of Oceanography)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[S03-04] Sentinel-1 SAR observation at the northern Noto peninsula associated with active seismicity since the end of 2020*Yohei Kinoshita¹ (1. University of Tsukuba)

Room C | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

5:00 PM - 5:45 PM JST | 8:00 AM - 8:45 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S03] PM-3

chairperson:Yuya Machida(JAMSTEC), Yohei Kinoshita(University of Tsukuba)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[S03-05] Dense GNSS observations around strain-rate concentration zones – Detailed velocity distribution in the San-in shear zone and Arima-Takatsuki fault zone*Takuya NISHIMURA¹ (1. Kyoto University)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[S03-06] Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation and its application to gravity Bayesian inversion*Yuanyuan Niu¹, Jiancang Zhuang^{2,1} (1. SOKENDAI, 2. ISM)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[S03-07] Strain and barometric pressure observations of the 2022 Hunga-Tonga eruption with a laser strainmeter at Kamioka*Akiteru TAKAMORI¹, Akito ARAYA¹, Kouseki MIYO², Tatsuki WASHIMI³, Takaaki YOKOZAWA², Hideaki HAYAKAWA², Masatake OHASHI² (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, 3. National Astronomical Observatory of Japan)

Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method

📅 Tue. Oct 25, 2022 9:45 AM - 11:00 AM JST | Tue. Oct 25, 2022 12:45 AM - 2:00 AM UTC | 🏢 ROOM C
8th floor (Training Room 820)

[S01] AM-1

chairperson: Kiyoshi YOMOGIDA (Earth and Planetary Dynamics, Grad Sch Science, Hokkaido University), Atsushi Nozu (Port and Airport Research Institute)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S01-01] Required conditions for the formulation of seismic interferometry under simultaneous incidence of P, S and Rayleigh waves

*Atsushi NOZU¹, Yosuke Nagasaka¹ (1. Port and Airport Research Institute)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S01-02] Seismic velocity response to ground water level revealed by ACROSS and seismic array

*Hiromu Ohba¹, Ryoya Ikuta¹, Koshun Yamaoka², Shuhei Tsuji³, Feng Chen², Toshiki Watanabe², Haruno Koike² (1. Shizuoka University, 2. Nagoya University, 3. Japan Agency for Marine Earth Science and Technology)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S01-03] Active seismic monitoring tests on a field slope during rainfall

*Masayuki NAKAYAMA¹, Hironori KAWAKATA¹, Issei DOI² (1. Ritsumeikan Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ.)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S01-04] Semblance analysis of seismic array records using wasserstein metric

*Tatsuki Nara¹, Hiroyuki Goto² (1. Kyoto University Graduate School, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[S01-05] Parameter optimization of non-linear modellings with a surrogate function: Application to waveform inversions

*Kiyoshi YOMOGIDA¹ (1. Earth and Planetary Dynamics, Grad Sch Science, Hokkaido University)

Required conditions for the formulation of seismic interferometry under simultaneous incidence of P, S and Rayleigh waves

*Atsushi NOZU¹, Yosuke Nagasaka¹

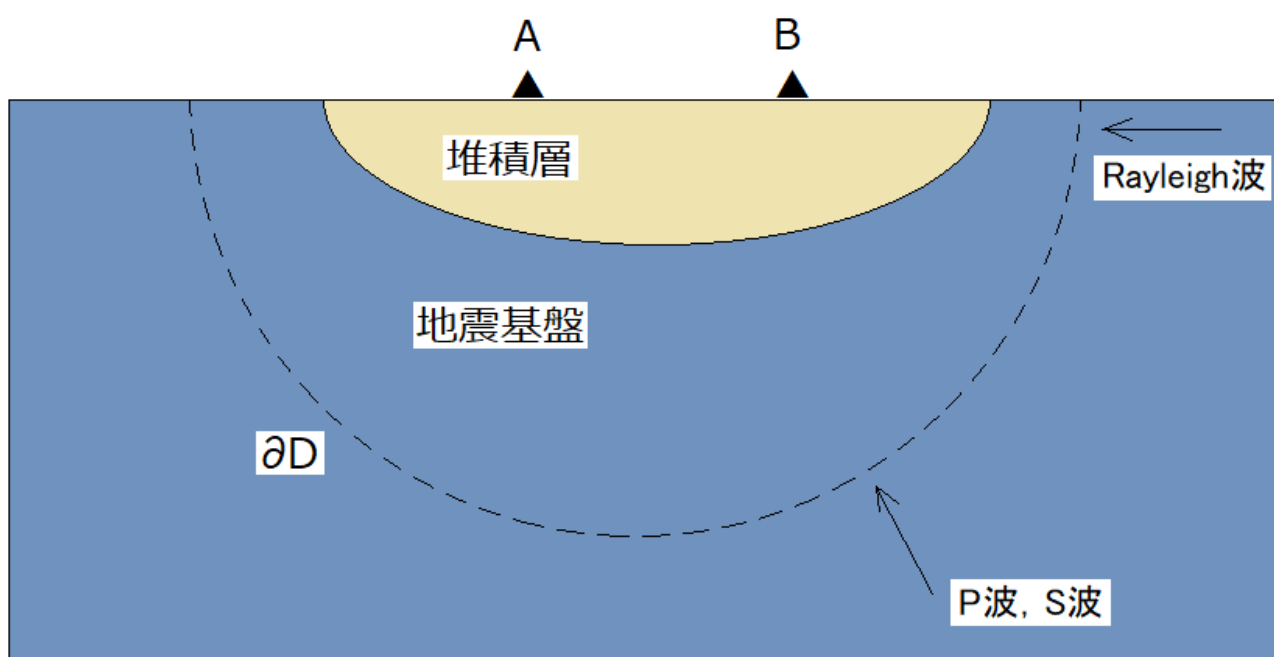
1. Port and Airport Research Institute

著者らは、常時微動 H/V スペクトルを実務上多用する者として、常時微動 H/V スペクトルに関する正しい認識を得たいと願っている。常時微動 H/V スペクトルの波動論的な解釈のうち最も興味深いものは Sanchez-Sesma et al. (2011)によるものであり、そこでは、常時微動 H/V スペクトルは載荷点と観測点が等しい場合のグリーン関数の比の平方根であると解釈されている。この解釈は、Wapenaar and Fokkema (2006)による地震波干渉法の定式化から直ちに導かれるので、Wapenaar and Fokkema (2006)による地震波干渉法の定式化が正しい限り、Sanchez-Sesma et al. (2011)による常時微動 H/V スペクトルの解釈も正しいということになる。そこで、Wapenaar and Fokkema (2006)による地震波干渉法の定式化を逐一追ってみると、遠方からP波、S波が入射する場合の定式化となっており、自由表面の存在を考慮する場合でも、Rayleigh波入射は考慮されていないことに気付く。Wapenaar and Fokkema (2006)による定式化では、遠方では媒質は均質であると仮定しているが、この均質媒質は地震基盤であると考え、Sanchez-Sesma et al. (2011)の解釈を適用する上で都合が良い（図）。そのためには、この均質媒質は全無限でなく半無限であることが望ましく、それに伴い、Wapenaar and Fokkema (2006)による定式化を拡張して、Rayleigh波入射も考慮できるようにすることが望ましい。

そこで、本研究では、遠方での媒質は半無限であると考え、Wapenaar and Fokkema (2006)による定式化を拡張し、P波、S波、Rayleigh波の同時入射の下での地震波干渉法の定式化を行った。Wapenaar and Fokkema (2006)による定式化が成立するための条件として、外部から入射するP波とS波の単位体積あたりのエネルギーの比は、 $E_s/E_p = 2(\alpha/\beta)^3$ でなければならないことは広く知られている。同様に、Rayleigh波の入射も考慮する場合は、Rayleigh波の単位面積あたりのエネルギーを E_R とすれば、 $E_R/E_p = (\pi/\omega) \alpha^3/C_R^2$ でなければならないことが本研究の結果として示された。ここに ω は角周波数、 C_R は半無限媒質におけるRayleigh波速度である。この比は、Weaver(1982; 1985)が拡散波動場におけるRayleigh波とP波のエネルギー比として示した値と同じである。

ただし、Weaverの論文は、ある周波数の近傍にある複数の振動モードのエネルギーがすべて同じになった状態を拡散波動場と定義した上で、その場合のRayleigh波とP波のエネルギー比に言及したものであり、現実の媒質においてそのようなエネルギー比が実現されることをどの程度期待して良いかは、Weaverの論文を読んだだけではわからない。P波とS波のエネルギー比については、これまで、媒質内部における散乱の観点(Ryzhik et al., 1996)や媒質表面における反射の観点(Egle, 1981; Nagasaka and Nozu, 2022)から検討がなされ、上述のエネルギー比が実現することの確からしさについて研究が進められているが、Rayleigh波とP波のエネルギー比については研究が不足していると言える。そこで、本研究では、その端緒として、P波とS波のエネルギー比に関連したAki(1992)の研究を拡張し、Rayleigh波とP波のエネルギー比について検討した。

Aki(1992)の研究は、全無限媒質中に局在する任意形状の散乱体を考え、この散乱体によるP波からS波への変換率とS波からP波への変換率の比が、P波速度とS波速度の比によって簡単に表されることを示したものである。その結果から、このような散乱体によって弾性波が繰り返し散乱されるうちに、S波とP波のエネルギー比は上述の割合に収束していくことが期待される。本研究では、半無限媒質の表面付近に局在する任意形状の散乱体を考え、この散乱体によるP波からRayleigh波への変換率とRayleigh波からP波への変換率の比について検討した。その結果によると、このような散乱体によって弾性波が繰り返し散乱されるうちに、Rayleigh波とP波のエネルギー比は上述の割合に収束していくことが期待される。



Seismic velocity response to ground water level revealed by ACROSS and seismic array

*Hiromu Ohba¹, Ryoya Ikuta¹, Koshun Yamaoka², Shuhei Tsuji³, Feng Chen², Toshiki Watanabe², Haruno Koike²

1. Shizuoka University, 2. Nagoya University, 3. Japan Agency for Marine Earth Science and Technology

本研究では、ACROSS（Accurately Controlled Routinely Operated Signal System）と地震計アレイを用いて、降雨に伴う地震波速度の時間変化を観測した。

ACROSSは、精密に制御された地震波を長時間継続して送信することにより地下構造の時間変化を捉えることを目的とした震源システムである。本研究では静岡県森町に設置したACROSS震源装置に対して約3km離れた地点に設置した地震計を用い、降雨に対する地震波速度の応答を調査した。2017年と2018年にそれぞれ2台の地震計を用いた3週間ずつの予備調査を行い、2020年9月から2021年9月、同じ場所に小規模地震計アレイを展開して観測を行った。

地震波速度は地下水位に伴って変化する。近年、地震波干渉法を用いた地震波速度のモニタリング（例えば、Kim & Lekic, 2019、Clements & Denolle, 2018など）がこれを明らかにしてきたが、地震波干渉法では環境震動中に優占する地震波が強調されるため、特定の実体波や表面波の波群毎に地下水に対する応答を調べることは難しい。波源としてACROSSを導入し、地下水位の変動に対する様々な波群の応答を別々に解析することで、地下水が地震波速度を変化させるメカニズムの特定を試みる。また、観測された地震波速度の変動がどの範囲の地下水位の変動を反映するのかを知ることも重要な課題である（例えば、Liu et al. 2020）。ACROSSを用いることで、地下水位の時間発展の局所・広域の違いに対応した地震波速度の変動を高い時間分解能で解析できる。

2017年と2018年の観測では、パーティクルモーションから到達している波の種類を特定し、2.8秒付近に到達し（速度に直すと1.1 km/s）水平成分が卓越する波をラブ波的、3.8秒付近に到達し（0.79 km/s）鉛直面内でレトログレードを示す波をレイリー波的と考えた。これらの地震波の走時変化は、降雨量からタンクモデルで予測される地下水位変化との間に高い相関がみられた。この際、地震波走時変化を最もよく説明するのは、降雨に対して時定数20日の指数関数的減衰応答であった。2つの波群は地下水位に対する感度が異なり、2.8秒の波群では0.035ミリ秒/m (=1.25%/m)、3.8秒の波群では0.024ミリ秒/m (=0.86%/m)である。2020年9月から開始したアレイ観測では、半径4、8、16mの同心円上に3つの三角形を配したSPAC法の典型的なアレイ構成に、震源方向の波数分解能を高めるために南側と北側に各2点を追加して14点の地震計を設置した。ACROSS信号のアレイ解析の結果、予備観測で降雨に対する応答が大きかった2.8秒と3.8秒付近の地震波の見かけ速度は直達S波と同じ（～2.5 km/秒）であり、表面波ではないことが分かった。

走時変化の原因範囲について調査するため上記2つの波群の地震計アレイ内での速度の変化を算出したところ、降雨に対応した変動は認められなかった。アレイに到達している地震波の走時変化は、アレイ直下ではなく、ACROSS震源から地震計アレイまでの経路の途中の地下水位変化に応答しているものと推定される。

以上から、降雨に対する地震波走時変化の20日の時定数は、広域の水の流動を表している可能性がある。2022年8月から開始したアレイ直下の地下水位の実観測を開始した。これと河川流量、近傍のHi-net観測点の地震波走時変動の解析結果とあわせて、地下水が地震波速度を変化させるメカニズムを考察したい。

参考文献

Clements. T., Denolle. A. M., (2018), Tracking Groundwater Levels Using the Ambient Seismic Field,

Geophysical Research Letters, **45**(13), 6459-6465.

Kim. D., Lekic. V., (2019), Groundwater Variations from Autocorrelation and Receiver Functions, *Advancing Earth and Space Science*, **46**(23), 13722-13729.

Liu. C., Khurram. A., Eric. D., (2020), Seismic Velocity Changes Caused by Water Table Fluctuation in the New Madrid Seismic Zone and Mississippi Embayment, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **125**(8).

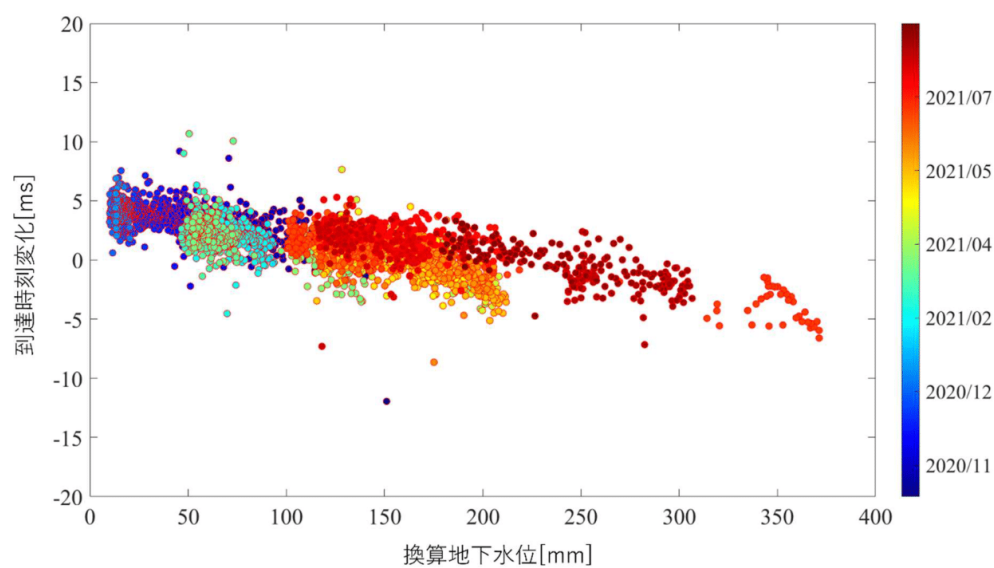


図. 2020 年以降における 2.8 秒の波群の到達時刻変化と換算地下水位の関係

到達時刻変化は正が早まりで負が遅れを示している。地下水位が 100mm 増加すると地震波は 2.3 ミリ秒遅れて到達する。

Active seismic monitoring tests on a field slope during rainfall

*Masayuki NAKAYAMA¹, Hironori KAWAKATA¹, Issei DOI²

1. Ritsumeikan Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ.

降雨や融雪による斜面の表層崩壊の機構解明などを目的として、弾性波を利用して地下水の挙動をモニタリングしようとする研究が行われている。例えば、Mainsant et al. (2012) は、過去に崩壊を経験した斜面での表面波の受動的観測をおこない、地震波干渉法を用いて、降雨にともなう斜面崩壊時の弾性波速度変化を調べた。弾性波速度は、主要な崩壊が発生する数日前から次第に低下していき、崩壊直前にはさらなる急激な低下を示した。しかしながら、地震波干渉法は励起源の分布が等方的でないことや季節によって変動することなどが指摘 (e.g., Stehly et al., 2006) されており、地下水の時空間変化を適切に把握するためには、震源が空間的だけでなく時間的にも安定していることが望ましい。地震学では、例えば弾性波アクロス (e.g., Ikuta et al., 2002) のような時空間的に安定した人工震源を用いた能動的弾性波モニタリングが試みられている。しかしながら、人工震源を用いたモニタリングは長期間同じ場所に設置され、地殻などの主に固結した岩盤を対象に長期モニタリングがおこなわれている。崩壊が予想される斜面や地震後に崩壊した斜面などにおいて短期的あるいは臨時的な観測をおこなうためには、機動的な観測システムが望まれるものの、人工震源を含む機動的な観測システムはほとんど例がなく、斜面表層での観測事例はほぼみられない。さらに、多孔質岩石試料において、試料内の含水量に応じて透過弾性波の伝播特性変化に周波数依存性が生じることが示唆されている (e.g., Müller et al., 2010)。もし斜面内部においても透過波の伝播特性に周波数依存性を生じさせるような現象がみられるならば、人工震源からの透過波のスペクトルを安定的にモニタリングすることによって、観測結果の周波数依存性も考慮した解釈が可能になる。そこで、本研究では斜面にて、降雨時を含む期間において人工震源を用いた能動的弾性波モニタリングをおこない透過波のスペクトルの安定性を調べた。

実斜面に1台の市販の振動スピーカー (以下加振器と呼ぶ) と、約2 m離れた位置に1台の加速度計AC9 (富士セラミックス社製S04SG2)、約8 m離れた位置に8台の同種の加速度計AC1-8を設置し多点アレイ観測をおこなった。入力信号として30秒間に10 Hzから310 Hzまで線形に変化するスイープ信号を採用し、ファンクション・ジェネレータ (以下、FG) を用いて加振器にくり返し印加した。なお印加する電圧は人工震源から放射される波が地盤に影響を及ぼさないように微弱なものとした。降雨時を含む2017年3月19日0時から2017年3月22日5時のおよそ3日間、サンプリング周波数51.2 kspsで透過弾性波を連続収録した。当該期間の降水記録は、気象庁の福岡観測点における降水量データを使用した。

収録波形はジッタにより信号の初期位相が周期的に変化しておりそのままではスタックできなかったため、加速度計AC9で得られた位相変化が震源スペクトルの位相変化に等しいと仮定し、全ての加速度計ACに対して位相補正後スタックした。以降の解析では、AC9において強度が高かった90~300 Hzの帯域の結果のみ議論する。スタック後の各ACのスペクトログラムをAC9でデコンボリューションし、S/N比が2以上となる場合のデータのみを使用して位相成分の時間変化を調べた。

スタック後のスペクトログラムについて、計測初期の値に対する位相差の時間変化の結果から、震源に一番近いAC8において比較的安定した結果が得られた (図1)。このときの速度は430~970 m/sの範囲に求めた。今後は、降雨後の速度の推定および得られた速度について精査する。

謝辞: 本研究は、JSPS科研費JP15H02996と26750315の助成を受けた。また、気象庁の降水量データを利用した。ここに感謝の意を表する。

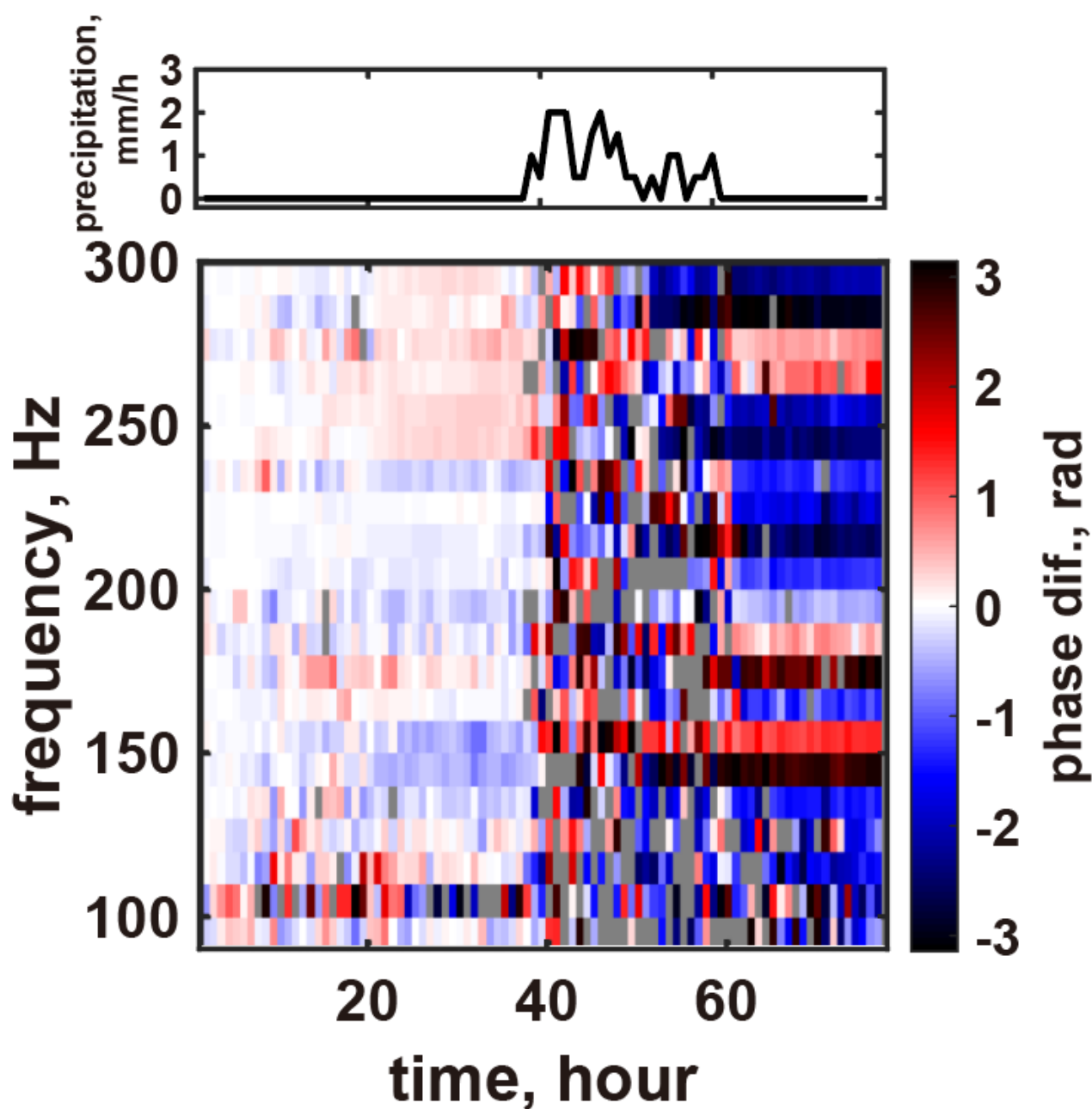


図1. 降水量と AC8 に関する計測初期の値に対する位相差の時間変化.
下図の灰色は S/N 比が 2 未満であったことを表す.

Semblance analysis of seismic array records using wasserstein metric

*Tatsuki Nara¹, Hiroyuki Goto²

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

地震波形の類似度評価は地震学および地震工学における重要な要素の一つである。例えば、センブランス解析、震源インバージョンなどでは、地震波形の類似度評価が必要となる。現在、地震波形の類似度評価の指標として波形やその包絡線の平均二乗誤差を使用することが一般的であるが、近年になって最適輸送理論の一つであるワッサーズタイン計量 W_2^2 を適用することが提唱されている。そこで、本研究では W_2^2 を用いてセンブランス解析を行い、従来手法との比較を行った。

センブランス解析とは、地震計アレイにおける観測波形の走時差と地震計間距離から波群の伝播速度と到来方向を推定する解析手法をいう。解析過程において、波形の類似度を評価する必要があるが、その指標として平均二乗誤差と等価なセンブランス係数 S_e を用いるのが一般的となっている。ここで、 W_2^2 と S_e の性質の違いを考察するため、同一波形の時間ずれ(図1)に対する W_2^2 , S_e の挙動をそれぞれ示す(図2, 図3)。ともに類似度の最大点は時間ずれ0[s]となっているが、 S_e は時間ずれに対して細かく振動し、局所解が複数出現している。一方、 W_2^2 は時間ずれに対して凸性を示し、類似度の最大点を大域的に判断できることが分かる。

本研究では、2018年6月18日7時58分に発生した大阪府北部の地震を対象とし、大阪市福島区にある地震計アレイで観測された速度波形のUD成分を用いて、実体波に対するセンブランス解析を行った。解析結果の見方を図4に示し、解析結果を図5に示す。P波・S波の到達時には W_2^2 , S_e ともに北東方向に解が出現しており、地震計アレイから見て震源である高槻市が北東方向であることを踏まえると、整合性の取れた結果といえる。また、 W_2^2 の方が局所解が少ない傾向にあり、解析解の特徴を大域的に捉えられるということが分かる。

<参考文献>

- ・ Bjorn Engquist and Brittany D Froese. Application of the wasserstein metric to seismic signals. arXiv preprint arXiv:1311.4581, 2013.
- ・ Bjorn Engquist and Yunan Yang. Optimal transport based seismic inversion: Beyond cycle skipping. arXiv preprint arXiv:2002.00031, 2020.
- ・ 水上昌信, 鍬田泰子, 後藤浩之, 福島康宏. 大阪平野における高密度地震観測システムの構築. 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 2018.

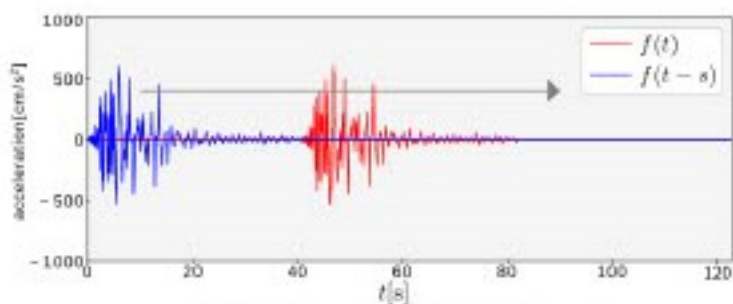


図 1. 同一の地震波形の時間シフト

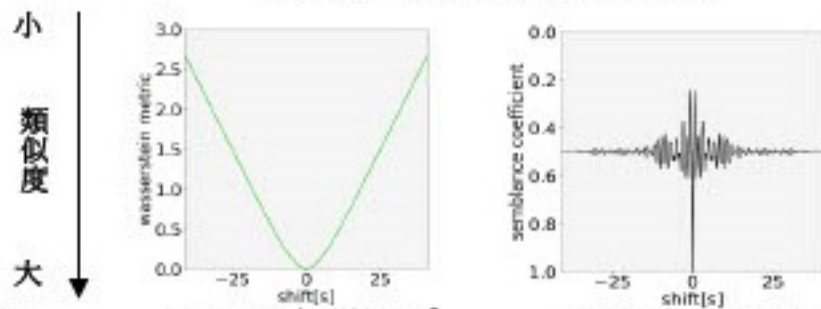


図 2. 二波形間の W_2^2

図 3. 二波形間の S_e

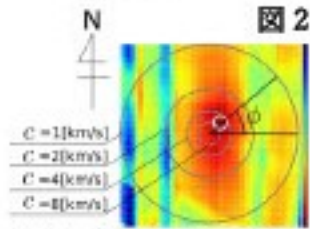


図 4. 解析結果の見方

赤色に近いほど波形の類似度が大きく、青色に近いほど波形の類似度が小さい。白丸は波形の類似度の最も大きい点を示しており、そのときの c, ϕ がそれぞれ実際の伝播速度と到来方向を示していると推定できる。

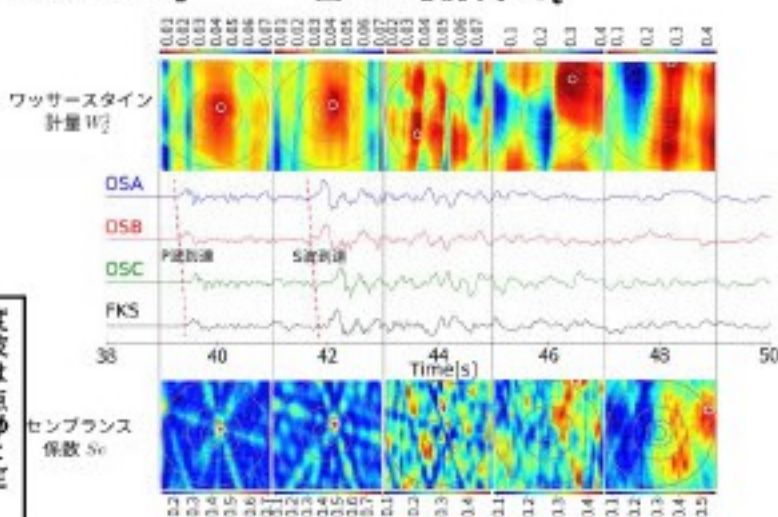


図 5. 実体波に対するセンプランス解析の結果

Parameter optimization of non-linear modellings with a surrogate function: Application to waveform inversions

*Kiyoshi YOMOGIDA¹

1. Earth and Planetary Dynamics, Grad Sch Science, Hokkaido University

波形インバージョンなど地震学に用いられているモデルパラメータの推定において、最近では非線形性が高く複雑な問題を対象とする場合が多い。ローカルな極小値への収束や遅い収束速度を避けるための初期値の選択など、他分野でも様々な手法の提案がなされてきた（e.g., Wienerフィルタを介した波形や相互相関の最適化）。音源などの複雑な信号処理では、最適化への尤度関数から直接モデルパラメータを推定するのではなく、単純な代理関数（surrogate function）を導入し、これを反復操作で最適化する過程で安定したパラメータ推定が可能となる方法が利用されている。さらに、従来の推定法は単一の事象の場合には有効だが、複数の事象が混在しているデータ（例：複数のガウス分布が重なると混合ガウス分布となる（Fig. 1））では、これを直接の最適化の関数とすると、非効率で不安定な解法となってしまう。そのような場合、EMアルゴリズムと呼ばれる手法より、単純な反復操作の繰り返しで安定して各現象のパラメータが推定できる。地震学で類似の問題としては、複数の震源からの波形データや後続の散乱波が大きく複雑な場合などに当たる。本研究では、これらの他分野で発展中の手法を検討し、波形インバージョンなど地震学への応用を考察する。

複数の現象が混在したデータに対しては、各現象の確率密度関数pdfは重み α 付きガウス分布（平均 μ と標準偏差 σ ）の簡単な和である、式(1)やFig.1で表される（ θ は μ などの推定すべきパラメータ群とする）。これが最大となるような θ を求めるには、直接の計算は困難なので、従来は選んだ初期値からのTaylor展開での線形化により反復操作で求めた。これに対して、EMアルゴリズムではJensenの不等式（ f は一般の凸関数、式(2)）より、潜在変数 z を介して、式(3)の右辺で尤度関数を代用する。ここで、 λ を反復操作における k 番目ステップのパラメータ推定値 $\theta^{(k)}$ とした元の変数 x の条件付きpdfとおくと、式(4)となる。さらに、 $\theta = \theta^{(k)}$ の場合に等号となるので、右辺 $g(\theta)$ が最大となる θ を求め、それを $\theta^{(k+1)}$ として更新すれば良い。このような反復操作によって、最適な推定値が安定して得られる（Fig. 2）。式(4)は元のpdfである式(1)に比べて、容易に最適化が求められる形式を選ぶことができる点が重要である。式(4)の被積分関数内のlog関数の分子のみ θ が含まれるので、実際にはこの部分を代理関数 Q として、これを各ステップで最大となる θ を探索する。

混合ガウス分布の場合、各データが独立に生成されたと仮定できれば、 j 番目のガウス分布が生成される事前確率を α_j とすると、式(4)のうち、最適化すべき代理関数は式(5)となる。これを α, μ, σ での偏微分がゼロとして、 k 番目のステップの各パラメータが解析的に求まるので、十分に収束するまで単純に反復操作すれば良い。

代理関数を規定するJensenの不等式は、逆関数についての式(6)や対数関数に対する式(7)など様々な例がある。これらを活用すると、ガウス分布のみならず、一般のpdfの形式に適用できる。例えば、L1ノルム最小に対応する、平均の両側が指数関数的に減少するラプラス分布でも、式(5)と同様な定式化が可能となる。よって、波形インバージョンだけでなく、エンベロップや多次元のスペクトルグラム、f-kダイアグラム等、地震学で広い応用が可能である。

$$p(x, \theta) = \sum_{j=1}^M \alpha_j \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp\left(-\frac{(x - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad (1)$$

$$f\left(\sum_i \lambda_i \theta_i\right) \leq \sum_i \lambda_i f(\theta_i) \quad (2)$$

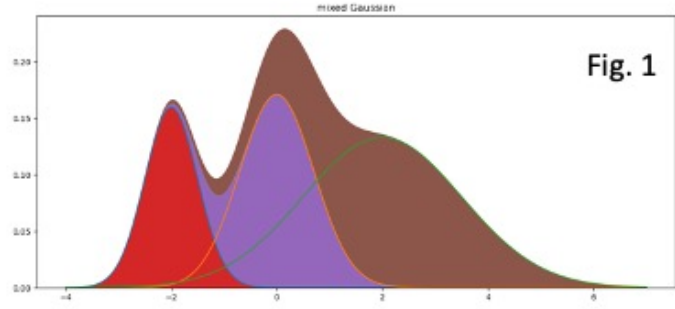


Fig. 1

$$\log p(x, \theta) = \log \int_z p(x, z, \theta) dz \geq \int_z \lambda(z) \log \frac{p(x, z, \theta)}{\lambda(z)} dz \quad \text{where} \quad \int_z \lambda(z) dz = 1 \quad (3)$$

$$= \int_z p(z|x, \theta^{(k)}) \log \frac{p(x, z, \theta)}{p(z|x, \theta^{(k)})} dz \equiv g(x, \theta, \theta^{(k)}) \quad (4)$$

$$Q(\theta, \theta^{(k)}) =$$

$$\sum_i \sum_j p(z_i \equiv j | x_i, \theta^{(k)}) \log \left(\frac{\alpha_j}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp\left(-\frac{(x - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) \right) \quad (5)$$

$$\frac{1}{\sum_i \lambda_i x_i} \leq \sum_i \lambda_i \frac{1}{x_i} \quad (6)$$

$$\log x \leq \frac{x}{x_0} + \log x_0 - 1 \quad (7)$$

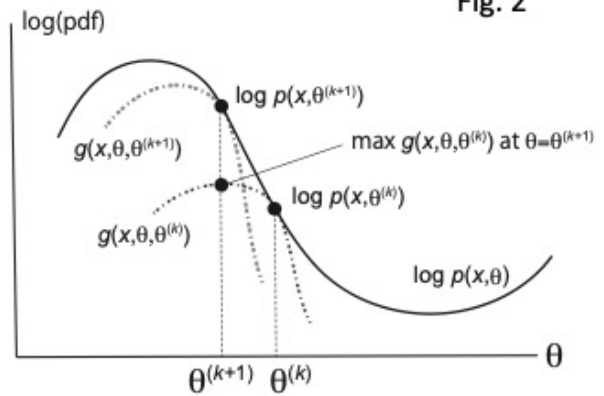


Fig. 2

Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method

📅 Tue. Oct 25, 2022 11:15 AM - 12:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 2:15 AM - 3:30 AM UTC | 🏢 ROOM C
8th floor (Training Room 820)

[S01] AM-2

chairperson: Hisashi NAKAHARA (Graduate School of Science, Tohoku University), Daisuke Sato (DPRI, Kyoto University)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S01-06] Computational difficulty of posterior means and ABIC in fully Bayesian inference: a proposal of new Monte-Carlo methods

*Daisuke Sato¹, Yukitoshi Fukahata¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S01-07] Accuracy evaluation of the approximation of spatiotemporal boundary integral equation toward implementation of FDP-H matrices

*Takumi Miyajima¹, Ryosuke Ando¹ (1. The University of Tokyo)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S01-08] Formularization of spatial autocorrelation for DAS and 3C seismometer and application to seafloor cable data off Sanriku

*Shun FUKUSHIMA^{1,2}, Masanao SHINOHARA², Tomoaki YAMADA², Kiwamu NISHIDA², Akiko TAKEO², Kiyoshi YOMOGIDA³ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Hokkaido University, Graduate school of Science, Department of Natural History Sciences)

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S01-09] Formulation of the mixed cross-correlations between displacement and DAS axial strain

*Hisashi NAKAHARA^{1,2}, Matthew M. Haney² (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Alaska Volcano Observatory, USGS)

12:15 PM - 12:30 PM JST | 3:15 AM - 3:30 AM UTC

[S01-10] Amplitude dependence of seismic wave attenuation

*Hayato Tero¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

Computational difficulty of posterior means and ABIC in fully Bayesian inference: a proposal of new Monte-Carlo methods

*Daisuke Sato¹, Yukitoshi Fukahata¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

ベイズ推定では、観測データとモデルパラメータを理論的に関係付ける観測方程式とモデルパラメータに関する事前情報から、モデルパラメータの事後分布を構成する。フルベイズ推定では、観測方程式と事前分布によるモデルパラメータの拘束を重み付ける超パラメータについても事前分布（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。同時事後分布はモデルパラメータと超パラメータの全統計的情報を記述するフルベイズ推定の形式解だが、ここからモデルパラメータの有用な情報を引き出す縮約の操作は必ずしも容易ではない。Sato, Fukahata, & Nozue (2022)は、同時事後分布から単純に計算した場合、モデルパラメータの標本平均が事後母平均へ収束するのにモデルパラメータ数の指数関数時間が必要になることを結論づけた。赤池のベイズ情報量規準(ABIC; Akaike, 1980)として知られる同時事後分布をモデルパラメータについて積分(周辺化)する方法が有効な縮約であることが同時に示されたが、非線形問題では通常ABICを解析的に計算できないという問題は残る。同時事後分布のモデルパラメータに関する周辺化を数値的に実行することも、モデルパラメータ数の指数関数時間を要するために実行は一般に現実的でない。

本研究では、非線形問題でABICおよび事後母平均を高速に計算するための新たなモンテカルロ法を提案し、その性能を検討する。新手法では、(i)モデルパラメータの条件付事後分布と(ii)超パラメータの周辺事後分布へと同時事後分布を形式的に分解する。超パラメータの周辺事後分布の解析形(閉形式)が既知である場合、(ii)は従来のABICの計算と同一であり、上記手法は入れ子構造をなしたMulti-Stage Monte-Carlo法として数値計算できる。さらに、超パラメータの周辺事後分布の閉形式が未知であるより一般の場合には、熱力学的積分法(Kirkwood, 1935)と呼ばれる、統計力学における自由エネルギーの高速計算法を応用する。熱力学的積分法は、未規格化確率(ボルツマン因子)の積分の対数(自由エネルギー)の超パラメータ微分が高速計算可能なボルツマン因子の対数(エネルギー; 損失関数)の平均になることを利用した、一種のlikelihood free推定である。超パラメータの周辺事後分布は、データ分布・モデルパラメータの事前分布・同条件付事後分布に対する3つの自由エネルギーの線型結合になっており、各項の超パラメータに関する微係数を熱力学的積分法で高速に、つまり非指数関数時間で計算できる。これにより、超パラメータ値の微小変化に対するABICの変化量(ベイズ因子)が得られ、前述のMulti-Stage Monte-Carlo法が非指数関数(多項式)時間解法として機能する。

発表では、上記手法を概略した上で、その性能を従来標準的に用いられてきたフルベイズモンテカルロ法の結果と比較する。これまでに、Sato, Fukahata, & Nozue (2022)と同様の線形逆問題で、モデルパラメータの事後平均の計算において新手法の方がより高速であることを確認している。さらに、新手法の応用として、同時事後分布が非ガウス分布になる、非負の拘束下 (ABICの閉形式が得られるためベンチマークとして利用できる)やスパース条件下での滑りインバージョンを取り上げる予定である。

Accuracy evaluation of the approximation of spatiotemporal boundary integral equation toward implementation of FDP-H matrices

*Takumi Miyajima¹, Ryosuke Ando¹

1. The University of Tokyo

1.はじめに

時空間領域に関する境界積分方程式法を解くためには、境界要素数 N 、時間ステップ数を M として、積分核と滑り速度の畳み込みを愚直に計算すると $O(N^2M^2)$ の計算量と $O(N^2M)$ のメモリを使用することになる。我々は、巨大地震の導き破壊シミュレーションを高効率に行うため、Sato and Ando(2021)で構築されたFDP=H行列法を3次元問題に拡張するとともに、大規模並列計算に対応した実装とするためのコード開発を行なっている。FDP=H行列法とは、既存のFDP法(高速領域分割法, Ando(2016))で積分核の性質ごとにドメインを分割し、走時近似(Averaged Reduced Time: ART)によって時空間畳み込み積分を近似的に実行してH行列法を取り入れ、一部には量子化などの近似を用いる工夫を行うことで、 $O(N\log N)$ の計算量を達成するものである。今回は、3次元モデルを用いてFDP=H行列法で考慮する近似計算のうち、H行列の近似以外の部分を実装したため、その精度評価を行なった。

2. 手法

FDP法によって、積分核の因果律円錐はP波、S波の前線のDomain Fp, Domain Fsと、P波の到着後S波の到着までのDomain I, S波が過ぎ去ったあとのDomain Sの3つに分割される。

Domain Fは時間幅が $O(1)$ であり、グリーン関数の性質から応力核を時間方向に積分すると空間依存性の強い項と弱い項に分離できると考えられる。Domain Iは時間幅が広いため、応力核を時間方向にリサンプリングする量子化を行い、計算量やメモリを削減する近似を行う。H行列への実装を見越して、滑り速度の累積和(滑り)の差と積分核の積の形から、滑り速度の累積和と積分核の差の積の形に式変形を行なった。

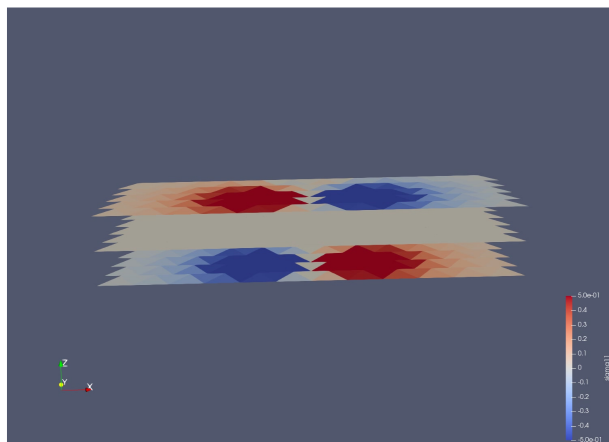
Domain Sは応力核が時間変化しない性質をもつ。本来は全ドメインに対して、空間依存の応力核行列の距離減衰の性質を用いたH行列近似を行うが、今回はH行列における分割を想定し、実空間の x, y, z 各軸方向に数等分の分割を行い、各クラスターの重心を観測点の代表とみなして走時の近似を行うARTの実装のみ行なった。精度評価のための問題設定は次のようなものである。まず、断層形状モデルとして、3枚の断層面を平行に配置したものを仮定する。次に、1つの断層の中央付近を一定の時間滑らせ、周囲の断層面上での応力変化を計算する。さらに、応力の時空間変化について、厳密に計算した場合と金次計算した場合をそれぞれのドメインごとに比較して、近似精度を評価する。

3. 予備的結果

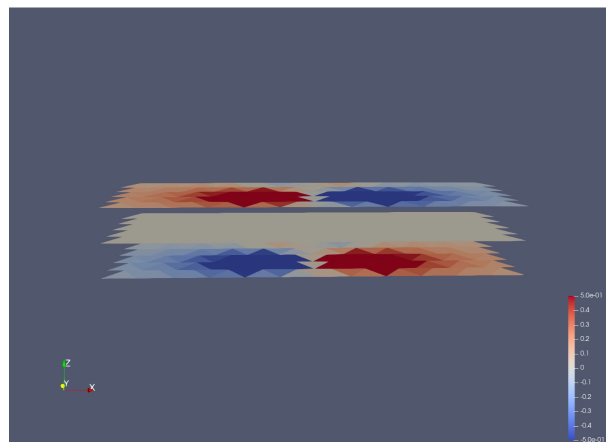
手始めに、上記クラスタサイズをそれぞれの軸方向に2分割して計8個のクラスターを設定し、応力時空間変化を計算した。その結果、Domain Sについては厳密解に近い結果が得られたが、それ以外のドメインについては誤差がより大きいという結果となった。学会発表では、クラスタリングや量子化、ARTなど複数ある近似の、最終的な応力値における誤差への依存性を詳しく評価した結果を報告する予定である。

$$c_x=c_y=c_z=2 \quad \sigma_{11} \text{ 成分}$$

厳密解



近似解

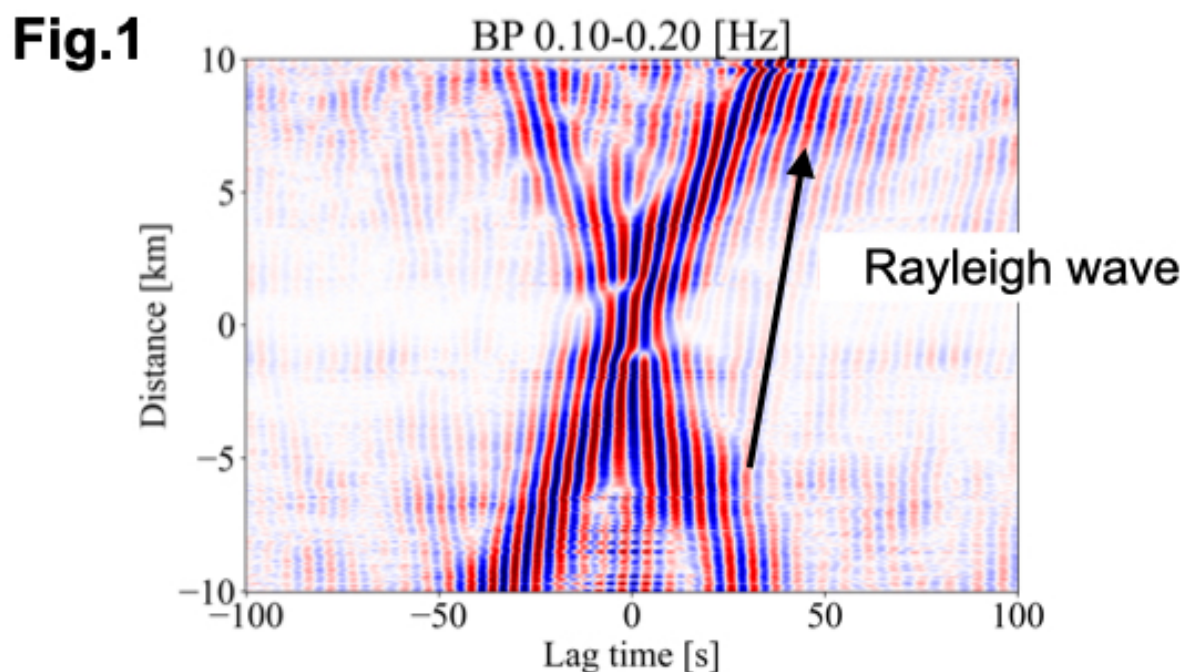


Formularization of spatial autocorrelation for DAS and 3C seismometer and application to seafloor cable data off Sanriku

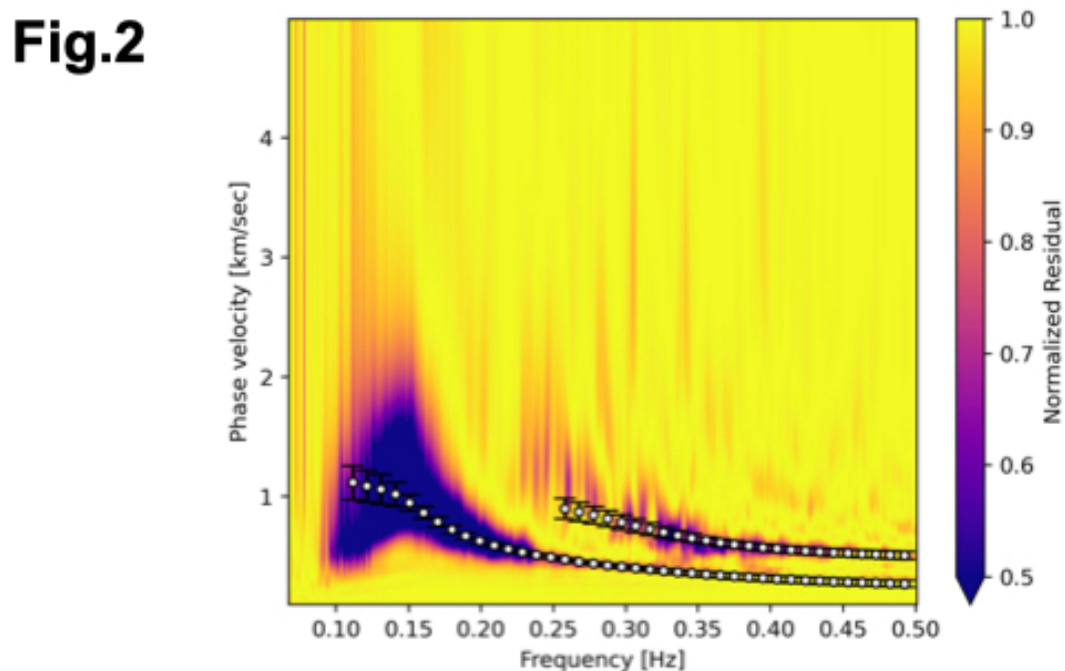
*Shun FUKUSHIMA^{1,2}, Masanao SHINOHARA², Tomoaki YAMADA², Kiwamu NISHIDA², Akiko TAKEO², Kiyoshi YOMOGIDA³

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Hokkaido University, Graduate school of Science, Department of Natural History Sciences

近年、光ファイバをセンサとして、歪みを数m間隔で数十kmの長距離観測が行えるDistributed Acoustic Sensing（以下 DAS）が地球科学分野に応用されつつある（e.g., Zhan 2019）。これまで、我々は海底ケーブルにおけるDASデータに対して地震波干渉法を適用し、抽出した表面波から堆積層・最上部地殻のS波速度構造を高分解能に推定してきた(Fukushima et al. 2022)。これまでの研究は、抽出される表面波はレイリー波であると仮定してきた(Fukushima et al. 2022)。しかし、Nakahara et al. (2020)は歪み記録のspatial autocorrelation（以下SPAC）の定式化により、DASデータに対して地震波干渉法を行った場合、レイリー波に加えてラブ波も抽出され、観測点間隔が波長に対して、十分に離れていない場合にはラブ波の影響は無視できない可能性があることを示した。しかしながら、DAS記録だけではファイバー軸方向1成分記録であるため、レイリー波とラブ波の分離が困難である。本研究では、DAS記録と3成分地震計間のSPACについて定式化を行い、その結果、ファイバー軸方向と地震計設置方向のなす角度に応じた補正項が必要であることがわかった。さらに、DAS記録と地震計上下動成分に対して地震波干渉法を行うことで、レイリー波だけが抽出され、DASと地震計のトランスバース成分の地震波干渉法では、ラブ波が主に抽出されることを示した。レイリー波のみを抽出するために、東京大学地震研究所が所有する光ケーブル式海底地震・津波観測システムを利用したDAS観測記録と同ケーブルシステム上の海底地震計(SOB01)の上下動記録に対して地震波干渉法を適用し(Fig.1)、レイリー波の位相速度を、定式化したSPACを適用して推定した(Fig.2)。これまでの研究(Fukushima et al., 2022)では、ラブ波を考慮していない歪みSPACからレイリー波の位相速度を推定している。本研究から求めたDAS-地震計上下動のSPACから推定した結果を比較した。その結果、周波数0.1-0.2Hz間では、それぞれの位相速度はブートストラップ法により推定した誤差の範囲内であり、研究対象地域の場合、DAS-DAS記録間で地震波干渉法を行った場合のラブ波の影響は小さいことが確認された。今後、DASと通常の地震計を組み合わせることで、海域における3次元的なS波速度構造を高分解能に推定できると考えられる。さらに、DASと地震計を組み合わせることでレイリー波とラブ波の分離が可能であるため、鉛直異方性構造の推定への応用が期待できる。



- Fig1. Calculated correlation between DAS and vertical component of OBS03 at the frequency range between 0.1-0.2 Hz. We will showed only Rayleigh waves can be extracted using the seismic interferometry between DAS data and a seismometer from formularization of SPAC.



- Fig2. Dispersion curves of fundamental and first-higher modes of the Rayleigh waves estimated from formulated SPAC in this study.

Formulation of the mixed cross-correlations between displacement and DAS axial strain

*Hisashi NAKAHARA¹, Matthew M. Haney²

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Alaska Volcano Observatory, USGS

はじめに

分散型音響計測（DAS）は光ファイバーケーブルに沿った軸歪（速度）の時系列を長距離にわたって稠密に測定できることから、地震学分野でもその利用が広がっている。DASで測定される軸歪は、通常地震計により観測される並進成分（変位など）とは異なるため、地震学でこれまでに使用されてきた手法を歪みに拡張する必要がある。我々は、DASで測定される軸歪に対して地震波干渉法を適用するための理論構築を行ってきた（Nakahara et al., 2021; Nakahara and Haney, 2022）。最近、DASの歪記録と通常地震計記録とを併用した地震波干渉法解析が提案され、数値計算と実際のデータ解析が行われた（Nayak et al., 2021）。本研究では、SPAC法に基づいて、DAS記録と変位記録とのクロススペクトル（周波数領域での相互相関）を解析的に表現することに成功したので、その結果について報告する。

定式化と結果

問題設定は次のとおりである。原点にDASのチャンネルがあり、そこで軸歪 e_{rr} （方向は任意に設定可）を測定するものとする。また、原点からx軸方向に距離 r だけ離れた点に通常地震計を置き、そこで変位3成分 u_r, u_φ, u_z を測定するものとする。これらの観測点に、さまざまな方向からレイリー波、ラブ波の平面波が入射するものとする。このような問題設定に対して、先行研究（Nakahara et al., 2021）の手法にほぼ従った定式化を行う。その結果、軸歪と変位3成分とのクロススペクトルを解析的に導出することができた。

その結果、変位の上下動成分と軸歪との相関は、レイリー波のみが寄与することが分かった。そのため、上下動成分を用いると、ラブ波の影響を受けずにレイリー波の分散曲線の推定を高精度に行えるものと考えられる。また、等方成分の項は偶数次のベッセル関数で表現される。一方、変位の水平動2成分を用いた場合、軸歪との相関には、レイリー波とラブ波の双方が寄与することが分かった。ただし、観測点間距離が波長に比べて長いFar-fieldでは、特にDASの光ファイバーの軸方向に対して45°の角度をなす方向にある観測点でのトランスバース成分を用いると、ラブ波をうまく抜き出せることが分かった。このことはNayak et al. (2021)により数値計算に基づきすでに指摘されていたが、本研究でも理論的に確認することができた。一方、観測点間距離が波長に比べて短いNear-fieldの場合は、レイリー波、ラブ波ともに卓越することがわかった。これは本研究が初めて指摘する結果である。また等方成分の項は、奇数次のベッセル関数を含み、上下動成分の場合とは異なる。

相互相関の物理的意味（等方的波動場の場合）

地震波干渉法の理論に基づくと、等方的波動場に対しては、相互相関（クロススペクトル）とグリーン関数との間に明確な対応関係があり、相互相関の物理的な意味を理解することができる。Nakahara and Haney (2022)と同様の解析に基づき、本研究でも解釈を行うと、軸歪と変位とのクロススペクトルは、原点での軸方向のダイポール震源に対する観測点での変位のグリーン関数であることが示された。これにより、クロススペクトルの物理的意味が明らかになり、実際に解析において得られたクロススペクトルの解釈を行う上で有用である。

結論

最近、DAS記録と通常地震計記録とを併用した地震波干渉法解析が提案されており、本研究では、SPAC法に基づいてDAS記録と変位記録との相互相関について解析表現を得ることに成功した。また等方的波動場に対して、クロススペクトルの物理的意味を明らかにすることができた。

Amplitude dependence of seismic wave attenuation

*Hayato Tero¹, Junichi Nakajima¹

1. Tokyo Institute of Technology

Q 値とは非弾性減衰を表し、過去の観測や室内実験から弱い周波数依存性があることが知られている。そして実験的研究により、非弾性減衰の主なメカニズムは粒界すべりであること、 Q は大きなひずみ振幅に対して非線形な応答を示すことが明らかにされている。しかし、現在行われているあらゆる地震波の解析において、非弾性減衰が振幅に依存しないことを前提としている。そこで本研究では、地震波の非弾性減衰は本当に振幅に依存しないのかを、地震波の解析から求めることを目的とした。

2003 年宮城沖地震の余震と 2008 年岩手・宮城内陸地震の余震を解析対象とした。マグニチュードの幅は 3.0-5.3 である。まず震源が 5km 以内にある地震ペアを選択し、同一観測点における P 波初動のスペクトル比を計算した。次にそのスペクトル比を 2 つの地震の観測走時の平均で割り算し、震源距離の影響を取り除いた。最後に観測された振幅比がある幅（振幅比の常用対数で 0.2 毎）の中に入る全ての地震ペアをスタックすることで観測スペクトル比を計算し、それに理論スペクトル比をフィッティングすることで、観測振幅比の異なる地震間における平均的な Q^{-1} の差を決定した。

その結果、観測振幅比が 1 の地震ペアでは平均的な Q^{-1} の差はゼロであるのに対し、振幅比が大きくなるとその差が徐々に大きくなることがわかった。この観測振幅比と Q^{-1} の差に正の相関があるという結果は、地震波が非弾性減衰の振幅依存を強く示唆している。

Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method

📅 Tue. Oct 25, 2022 2:00 PM - 3:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 5:00 AM - 6:30 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S01] PM-1

chairperson:Kiwamu Nishida(ERI, the university of Tokyo), Masahiro Kosuga(Hirosaki University)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S01-11] Near-trench amplification of seismic waves from deep earthquakes in low-frequency band: comparison between observation and 2D simulation

*Yuki Ihara¹, Shiro Hirano¹, Hironori Kawakata¹ (1. Ritsumeikan University)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S01-12] Examination of broadband slant-stacked waveform with synthetic one by 3-D wave propagation and their application to focal depth estimation

*Masahiro KOSUGA¹ (1. Graduate School of Science and Technology)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S01-13] Extraction of P-s converted wave from teleseismic P-wave microseisms

*Shota KATO¹, Kiwamu Nishida¹ (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S01-14] On the sensitivity kernels for Rayleigh wave azimuthal anisotropy

*Hitoshi KAWAKATSU^{1,2} (1. Earthquake Research Institute, 2. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[S01-15] Ocean external gravity wave excited by the 2022 eruption of Hunga volcano, Tonga

*Kiwamu NISHIDA¹, Takashi TONEGAWA², Tatsuya KUBOTA³, Mie ICHIHARA¹ (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. NIED)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S01-16] Eruption sequence of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano from P-wave back-projection: Atmospheric coupling mode and eruption cycles

*Kazunori YOSHIZAWA^{1,2}, Kotaro TARUMI² (1. Department of Earth & Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University)

Near-trench amplification of seismic waves from deep earthquakes in low-frequency band: comparison between observation and 2D simulation

*Yuki Ihara¹, Shiro Hirano¹, Hironori Kawakata¹

1. Ritsumeikan University

地震の揺れは一般に、震央から離れるにつれて弱まるような同心円状の震度分布を示すが、例えば、スラブ内で地震が発生した際には、それとは異なる、「異常震域」と呼ばれる震度分布を示すことがある。遠方での地震動増大は、主に数Hz以上の高周波帯域において顕著に観察され、地下の散乱構造、非弾性減衰構造に起因するとされている（Furumura and Kennett, 2005）。日本陸域において異常震域は観測され議論がなされているが、陸域から海溝にかけての、海域については十分な議論がなされおらず、陸域を離れてどこまでの領域でどのように振幅が増大しているかなどは、よくわかっていない。このことは、海域における地震波観測網が充実していなかったことに起因するが、2016年8月15日以降は、防災科学技術研究所の日本海溝海底地震津波観測網S-net (<https://doi.org/10.17598/nied.0007>) による観測データが公開されている。そこで本研究では、深発地震による地表面最大振幅を陸域-海溝にかけての、地表面の最大振幅分布を高感度地震観測網Hi-net (<https://doi.org/10.17598/nied.0003>) と日本海溝海底地震津波観測網S-netを用いて調べた。その結果、4~8Hzの帯域については、いわゆる異常震域のような振幅増大が陸域から海溝にかけて見られたが、0.25~0.5Hzの帯域については、陸域では振幅が減少し、海溝付近で振幅が増大する現象が見られたため、卓越周波数0.25Hzとして、深発地震についての2D波動伝播シミュレーションを行った。

深発地震の観測データとして、2017年7月13日4時48分頃に日本海で発生した、震源深さ603km, M6.3の地震と、2021年9月29日17時37分頃に日本海で発生した、震源深さ394.4km, M6.1を使用した。ただし、Hi-netとS-netでは計器の周波数応答が異なるため、Maeda et al. (2011) を参考に、S-netのHi-net化処理を行った。S波の最大速度振幅に着目し、海溝軸に直行する方向に最大振幅の分布を確認したところ、4~8Hzの帯域については、いわゆる異常震域のような振幅増大が陸域から海溝にかけて見られた。しかし図1aに例を示すように、0.25~0.5Hzの帯域については、陸域では振幅の減少、海域では振幅の増大が見られた。近地地震で同様の最大速度振幅の分布図を作成したところ、Hi-netとS-netで系統的には、それぞれ幾何減衰が見られるものの、陸域と海域間での明確なステップが確認できた。この原因として、陸域と海陸で地盤増幅率や計器と地盤とのカップリングが異なる可能性が考えられ、これらを除くために、2018年8月19日9時19分にフィジーで発生した、震源深さ600km, M8.2の遠地地震の観測データとの比をとった。そうしたところ、近地地震についてはHi-netとS-netで連続的に海溝にかけて単調に減少する結果が得られた。深発地震については、図1bに例を示すようにHi-net, S-netで震央から離れるにつれて最大振幅は減少していくが、海溝付近において振幅の増大が見られた。

この低周波での振幅増大がどのような地下構造によって引き起こされたものなのかを明らかにするために、卓越周波数0.25Hzとして、深発地震についての2D波動伝播シミュレーションを行った。また放射パターンの影響をなくすために、震源では等方S波を発生させ、数値計算にはMaeda et al. (2017) によるOpenSWPCを使用した。計算領域は、水平2500km、鉛直700kmの断面とした。速度構造はak135 model (Kennett et al., 1995) を参考に作成した。また、プレート形状は双曲線で近似し、プレート内部の値はFurumura et al. (2016) を参考に周囲よりも2%大きいとした。非弾性減衰を示すQ値はFurumura et al. (2016) を参考に、マントルウェッジを $Q_p=150$, $Q_s=100$, その他のマントルを $Q_p=450$, $Q_s=330$, プレート内部を $Q_p=1600$, $Q_s=1200$ とした。以下の4通りの組み合わせについてシミュレーションを行った：

- ①速度構造：均質、非弾性構造：無し、
- ②速度構造：1次元速度構造、非弾性構造：無し、

③速度構造：1次元速度構造&プレート形状，非弾性構造：無し，

④速度構造：1次元速度構造&プレート形状，非弾性構造：あり．

パターン②について，図1cに示すように，-300～0km辺りにおいて振幅増大が見られることから，プレート形状や非弾性減衰に依らず，1次元速度構造の影響により振幅増大が引き起こされていると考えられる．この振幅の増大は地表面でのsP変換がある地点で臨界角を迎え，さらにそれがモホ面やコンラッド面にトラップされることで引き起こされたと考えられる．しかし，この振幅増大域は観測結果よりも広範囲にわたって現れている．プレート形状の影響により，パターン③に示すように，海溝付近の比較的狭い領域で振幅増大が見られ，観測と比較的一致した(図1b)．パターン④について，振幅増大域はパターン③とほぼ一致したが，陸域での振幅の減少が見られない結果となった(図1b)．海溝付近で振幅が増大するという定性的な面は観測とシミュレーションで一致し，これは散乱や非弾性減衰の構造，震源の放射パターンに依らずとも再現が可能な現象であった．

謝辞：本研究はJSPS科研費JP22H01336の助成を受けたものである．

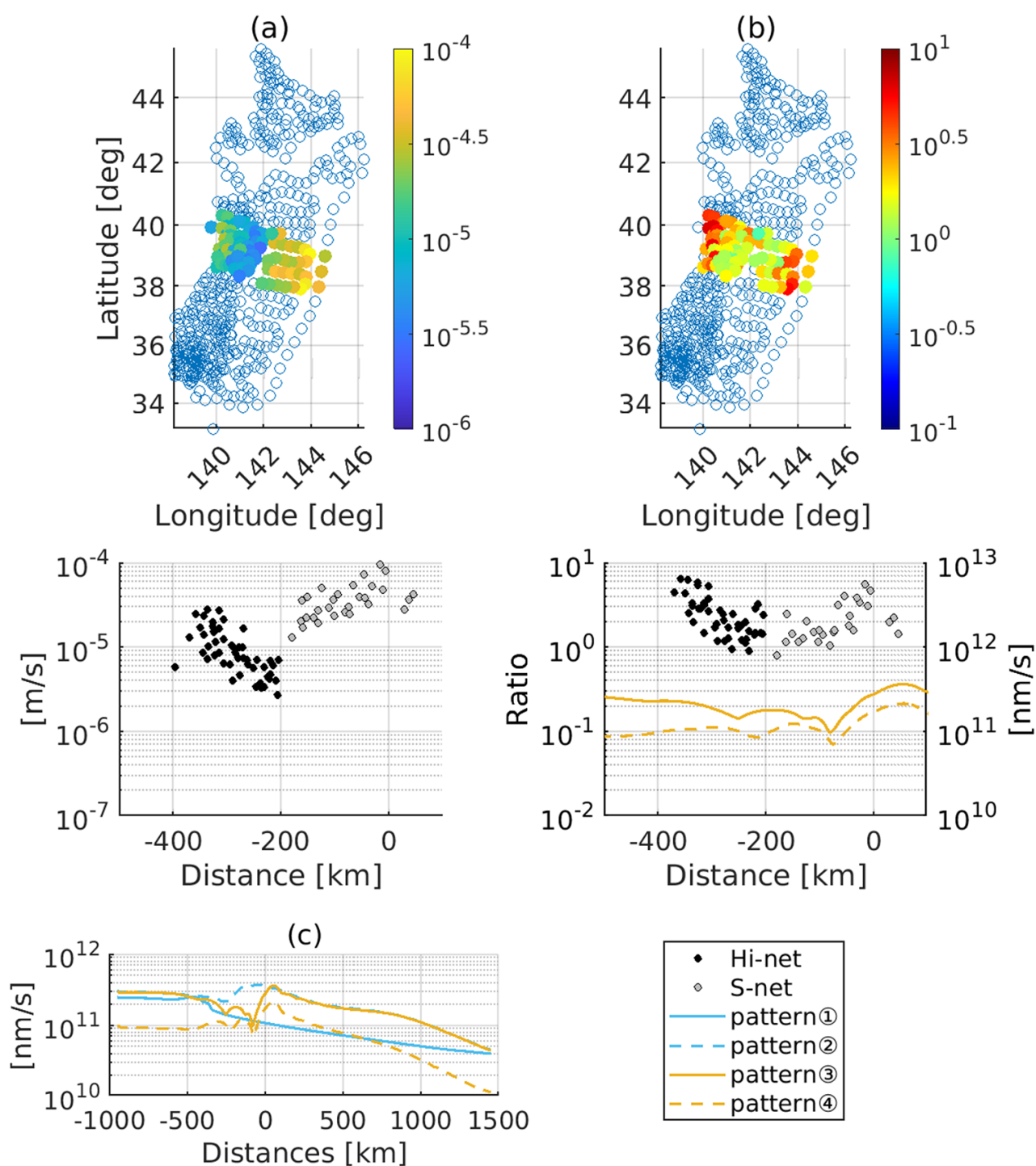


図1. (a) : 2017年7月13日4時48分に日本海で発生した、震源深さ603 km、M6.3の深発地震の最大振幅分布図. 横軸は沖側を正とする、海溝からの距離. (b) : (a)を2018年8月19日9時19分にフィジーで発生した、震源深さ600 km、M8.2の遠地地震で規格化した図. (c) : シミュレーションによる地表面最大振幅図.

Examination of broadband slant-stacked waveform with synthetic one by 3-D wave propagation and their application to focal depth estimation

*Masahiro KOSUGA¹

1. Graduate School of Science and Technology

1. はじめに

走時データを用いた震源決定において、震源上方に観測点が存在しない場合の震源深さは、地震発生時刻とのトレードオフのため精度良く推定することが困難である。これは海域で発生した地震において深刻な問題であった。それはS-net観測点でのデータを用いることで解消された地域があるとは言え、過去に発生した地震に対する状況は変わっていない。これまで、さまざまな地表（海面）変換波が海域地震の震源深さの精度向上に用いられてきたが、目視で確認できる周波数帯の利用に限られていたのに加え、変換波の波動場の利用例はほとんどない。一方、特性の揃ったHi-net観測網の波形記録を広帯域化すると、多数の後続波が空間的に連続した波動として検出できることがわかってきた。前報（JpGU2022）では、広帯域化した波形のslant-stackを行うことで各地震の波形を単純化し、波形相関によって分類された地震の空間分布・CMT解・波形の特徴の検討を行なった。今回は、3次元地下構造を仮定した波動伝播シミュレーションによって計算した波形に対しても同じ処理を行い、観測スタック波形がシミュレーションによってどの程度再現可能なのかを調べた。また、シミュレーションのスタック波形が震源深さに対して系統的に変わる性質が震源の深さ推定に適用可能なことがわかったので報告する。

2. データ処理

波形に対して、地震計の特性補正・フィルタリング・auto gain controlを行った後でスタッキングを行った。フィルターの帯域は0.02-0.2, 0.05-0.5, 0.1-1.0 Hzの3通りを用いた。スタッキングは見かけ速度7.0~9.0 km/sまで0.4 km/sごとの6通りに対して行った。スタッキングは震央からの距離が400 km以内で、エンベロープ振幅のS/N比が設定したしきい値を超えている観測点の波形に対して行った。シミュレーションにはOpenSWPC（Maeda et al., 2017）を用いた。3次元地下構造は全国1次地下構造モデル（JIVSM）（Koketsu et al., 2012）を用いた。震央から400 km以内のHi-net観測点に対して計算された波形に対しても、観測波形と同様な処理を行った。対象地震は、岩手県中部の沖（39.53N, 143.56E, 15.7 km, M5.0）、宮城県北部の沖（38.66N, 142.15E, 42.1 km, M4.5）、および宮城県中部の沖（38.13N, 143.49E, 16.3 km, M5.0）の、いずれもプレート境界付近で発生した地震とした。震源位置・マグニチュード・メカニズム解は、気象庁CMT解のセントロイド位置・モーメントマグニチュード・ダブルカップル成分を与えた。

3. 観測とシミュレーションによるスタッキング波形の比較

シミュレーションによるスタッキング波形は、長周期の波、それより大振幅の中間周期の波、および小振幅で短周期の波の重なりと見ることができる。長周期の波が明瞭なのは規模が大きい地震に対して長周期のフィルターをかけた場合で、周期は20 s程度、振動の継続時間は50 s程度である。中間周期の波の周期は5 s前後で、相対的に小さい見かけ速度でのスタッキング波形において明瞭である。観測スタッキング波形と比較すると、両者がよく似ているのは、見かけ速度の範囲が7.0~8.2 km/sで初動から30 s程度の時間範囲内であることがわかった。見かけ速度がそれよりも速くなると、シミュレーション波形の中間周期の波の振幅は次第に小さくなる。また、シミュレーション波形では初動から30 s以降にも振幅の大きい後続波が見られるが、観測波形では明瞭な波動は見られない。ただし、これが一般的な傾向かどうかは他の地震に対するシミュレーションも行って検討する必要がある。

4. 震源深さ推定の試み

震源深さを変えてシミュレーションを行い、スタック波形の変化を確認した。それによると、中間周期の波の山谷の間隔（周期）が、震源が深くなると系統的に長くなることがわかった。これは、震源から後続波生成源までの距離が深さとともに長くなるためと解釈できる。この性質を使うと、観測スタック波形との相関から

震源深さを推定することができる。すなわち、震源深さと相関係数の関係は単一の山を有する2次関数的な形になると期待されるので、相関係数を深さの多項式で近似することで、相関が最大となる深さを決めることができ、それを震源深さと見なすことができる。

5. おわりに

観測スタック波形の主要な部分はシミュレーション波形においても再現できることが確認できた。また、シミュレーション波形の中間周期の波の周期が仮定した震源深さとともに系統的に変わることがわかった。この性質を用いると、海域で発生した地震の震源深さを精度良く推定できる可能性がある。今後は多数のシミュレーションによってこれらの結果の一般性を確認し、3次元的な震源位置の推定方法の検討が課題である。

謝辞

本研究では防災科研H-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。

Extraction of P-s converted wave from teleseismic P-wave microseisms

*Shota KATO¹, Kiwamu Nishida¹

1. Earthquake Research Institute, 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 (e.g., Nishida, 2017)

。0.1-0.3 Hzの帯域の脈動はsecondary microseismと呼ばれ、波浪の非線形相互作用に伴う圧力変動によって励起される。そのためRayleigh波とP波の励起が卓越することが知られている。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るようになった (e.g., Shapiro et al., 2004, Poli et al., 2012)。地震波干渉法解析では、観測点間の観測波形の相互相関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 (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は相互相関関数に見かけ上の波が出現し、グリーン関数の推定において問題となることが知られている (e.g., Pedersen and Colombi, 2018, Li et al., 2020)。

そこで、本研究では0.1-0.25 Hzでの脈動P波を空間的に局在化したイベントとみなし、レシーバー関数解析手法を適用し、日本列島直下の構造推定を試みた。ここで、脈動P波の波源は地震のように空間的に局在化しているが、震源時間関数は数日スケールで継続的であると仮定し、観測点下の不連続面でのP-s変換波を抽出するため、脈動P波に適した新たなレシーバー関数解析手法を開発した。

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687点の上下動・水平動の速度計記録である。解析対象とした脈動P波のイベントは、0.1-0.25 Hzの全球的な脈動P波カタログ (Nishida and Takagi, 2022) から信号/ノイズ比の良いもの6000イベントとした。波源の位置はカタログで仮定した継続時間 (6時間) 内で一定であると仮定した。全観測点の上下動波形記録から1024秒の時間窓を切り出し、脈動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、震源時間関数とみなした。脈動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。各観測点でのレシーバー関数は水平動成分を震源時間関数でデコンボリューションすることで求めた。

この手法の有効性を検証するため、QSEIS (Wang, 1999) を用いて仮想的な脈動P波の波形を計算し同様なレシーバー関数解析を行った。速度構造をAK135とし鉛直方向のシングルフォースによるグリーン関数にランダムな震源時間関数を畳み込むことで仮想的な脈動P波波形を計算した。点震源を1つ置く場合、点震源が空間的に分布している場合の双方について計算を行った。計算の結果、点震源が空間的に分布している場合であっても十分な数の時間窓があれば点震源を1つ置く場合と同様P-s変換波を確認することができた。

次に、得られたレシーバー関数について深度変換を行った。速度構造AK135を仮定し、深さ200-1000 kmにおけるP-s変換波のPに対する相対走時をtaup toolkit (Crotwell et al., 1999) によって計算し、計算したP-s変換波の相対走時に沿ってレシーバー関数を足し合わせることで深度方向への変換を行った。波源の領域 (北大西洋、北太平洋、南太平洋) ごとに全観測点のレシーバー関数の深度変換を行い重合した結果、共通して410 km不連続面、660 km不連続面に対応するピークを確認できた。さらに、深度変換したレシーバー関数から日本列島の東西断面図を作成したところ、連続的に410 km不連続面、660 km不連続面を確認することができた。今後は、不連続面の空間分布について議論を進める予定である。

On the sensitivity kernels for Rayleigh wave azimuthal anisotropy

*Hitoshi KAWAKATSU^{1,2}

1. Earthquake Research Institute, 2. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica

For the investigation of the oceanic lithosphere-asthenosphere system employing regional OBS array data, it is essential to resolve azimuthal anisotropy as well as radial anisotropy (e.g., Takeo et al., 2018). Considering the presence of strong sub-Moho anisotropy both in P_n and S_n , it is important to analyze both P and S anisotropy for Rayleigh waves as the phase velocity is quite sensitive to the shallow-most P-wave structure. It is well established that, in the case of weak anisotropy, the sensitivity kernels of azimuthal anisotropy have the same form as those for the corresponding VTI parameters (Montagner and Nataf, 1986). This may be understood as that, within the framework of the first order perturbation theory, the eigenfunction is unchanged and thus the phase velocity change is expressed in terms of the equivalent VTI parameters within the plane of the wave propagation. Recently, Russell (2021, Ph.D. Thesis, Appendix E, F) discussed how parameterizations using Love parameters ($\delta A(B)$, $\delta L(G)$, $\delta N(E)$, $\delta F(H)$) due to (Montagner and Nataf, 1986) and those using velocity perturbation ($\delta \alpha_H$, $\delta \beta_V$, $\delta \beta_H$, $\delta \eta$) due to (Takeuchi and Saito, 1972) might be related for azimuthal anisotropy. After pointing out that solving for $\delta \beta_V / \beta_V$ (or $\delta \alpha_H / \alpha_H$) on its own is not equivalent to solving for G/L (or B/A) because of the presence of the δF -term, they suggest assuming $\delta \eta / \eta \sim 0$ for inversion. However, the assumption $\delta \eta / \eta = 0$ is exactly the reason why the usage of the conventional η introduces the unpreferable behavior of P-wave kernels that is contaminated by the S-wave sensitivities (Kawakatsu, 2016) and unjustifiable; also existing mantle fabrics show a strong azimuthal dependence for $\delta \eta / \eta$. Instead, we suggest using the parameterization involving the new fifth parameter η_κ , i.e., ($\delta \alpha_H$, $\delta \beta_V$, $\delta \beta_H$, $\delta \eta_\kappa$). Because the fifth parameter is difficult to constrain, it might be more practical to omit the corresponding term in the inversion, which is equivalent to assume $\delta \eta_\kappa / \eta_\kappa \sim 0$, meaning azimuthal independency of the "ellipticity" parameter η_κ that offers a physical background of the modeling. Also, the aforementioned fabrics show a much weaker azimuthal dependency for $\delta \eta_\kappa / \eta_\kappa$ compared to that for $\delta \eta / \eta$. This approach may be useful for the scaling of S- and P-wave azimuthal anisotropy to reduce the number of parameters in the Rayleigh wave inversion.

Ocean external gravity wave excited by the 2022 eruption of Hunga volcano, Tonga

*Kiwamu NISHIDA¹, Takashi TONEGAWA², Tatsuya KUBOTA³, Mie ICHIHARA¹

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

2022年1月15日、海底火山であるフンガ火山で大規模な噴火が発生した。噴煙は中間圏までに達し、顕著な大気Lamb波を励起した。大気Lamb波は海面変動を引き起こし、特異な津波として観測された。このような大気波動と津波のカップリング現象は、1883年クラカタウ噴火時にも観測されたが、現代的な観測によって捉えられたことは初めての事であった。また、今回の2022年フンガ火山の噴火に伴う振動現象を理解する上で、大気波動と津波、地球自由振動など、多圏にわたるカップリングが重要な役割を果たしている事が分かってきた。

噴火を理解する上で、噴火の推移を推定することは重要である。火山近傍で地震・空振観測記録があれば理想的であるが、海洋島での観測は限られているのが現状である。例えば遠地の空振観測による噴火推移の推定もなされているが、伝播の複雑性が定量的な議論の妨げとなっている。今回の噴火では、特に長周期帯域(<10mHz)では、多圏にわたるカップリングが波動の伝播を複雑にしており、噴火の推移の推定の障壁になっている。海洋外部重力波の短周期成分(0.015-0.05Hz)は、津波と異なり位相速度が100m/s以下と遅いため、大気とのカップリングの効果が弱い。そのため、単純なモデリングによる定量化が可能である。本研究では、海洋外部重力波の解析から噴火の推移を制約する事を目的とする。

本研究では、まずS-net、DONETの水圧計を解析した。これらの観測点では0.015-0.05Hzの周波数帯域で正の分散性をもつ海洋外部重力波の検出に成功した。0.015Hzでは噴火からおおよそ2日後、0.04Hzではおおよそ5日後に到来している事を確認した。海洋島の広帯域地震計記録(青ヶ島、南大東島等)でも同様の波が記録されていた。これは、海洋外部重力波によって海洋島が荷重変形しており、これを広帯域地震計が捉えていたためである(e.g., Hanson and Bowman 2005)。噴火の規模を見積もるため、WKB近似によりGreen関数を推定し(e.g., Dahlen and Tromp 1998)、S-net波形記録をモデリングした。観測値を説明するには、おおよそ1E10N程度の大きさのランダムな鉛直方向のシングルフォースが必要であることが分かった。海洋外部重力波の励起はUTC 4:00からはじまり5時間ほど継続したのち、UTC8:40頃に小規模な噴火を励起していたことも分かった。またそれらに加え、5-10mHzの帯域で津波は、海洋外部重力波に比べて2時間ほど遅れて励起されていることも明らかとなった。今後、これらの観測事実をもとに、噴火の推移を考察する予定である。

Eruption sequence of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano from P-wave back-projection: Atmospheric coupling mode and eruption cycles

*Kazunori YOSHIKAWA^{1,2}, Kotaro TARUMI²

1. Department of Earth & Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

2022年1月15日（UTC）に発生したフンガトンガ・フンガハアパイ火山の爆発的噴火では、大気波動や気象津波など、大気・海洋・固体地球に渡る種々の振動現象が観測された。この噴火で発生した地震波も世界中の観測点で明瞭に記録されている。振幅の大きい表面波の波形記録から、複数の爆発噴火の発生が示唆されるが、長周期の分散性表面波では、小規模な爆発噴火の発生時間も含めた噴火全体のプロセスを知ることは難しい。本研究では、遠地で記録されたP波のback-projection（BP）解析により、爆発噴火のシーケンスを推定し、大気-固体カップリングによる振動周期との関連性も調べる。

本研究では、0.03~0.08Hzの遠地P波を用いてBP解析を行った。IRIS DMCから入手した世界各地の地震観測点の鉛直成分記録について、最初に発生した大規模噴火を基準として、波形の相関処理を行った上で、241観測点での波形記録を抽出した。走時補正にはAK135モデルを用いる。また噴火による遠地P波の極性は方位によらないことから、震源はsingle forceによるものと仮定し、極性の補正は行わない。これらの波形記録を用いて4-th root stackの方法でBP解析を行った。その結果、他の地震波フェイズがP波と重なっている状況下でも、複数の爆発や地震に関連するイベントを検出できた。

BP解析の結果から、一連の爆発噴火のシーケンスは2つのグループに分けられることがわかった。1番目のグループは04:02 UTC頃に始まった後、04:15 UTC頃とその200-300秒後に大規模な爆発が起こり、04:35 UTC頃まで確認できる。2番目のグループは約4時間後（08:26 UTC）に始まり、08:31 UTC頃に最後の大規模な噴火が発生している。本研究で推定された爆発噴火の発生時刻は、周期100秒以下の表面波の波群とも整合的である。

特に1番目のグループに分類された大規模な爆発噴火の発生時間の間隔は主に約270秒であった。この発生間隔の周期は大気-固体カップリングモード(OS29)の固有振動数3.7mHzとほぼ一致する。この噴火で観測された鉛直成分の振幅スペクトルでは、よく知られているもう一つの大気-固体カップリングモード(OS37, 4.4mHz)に比べ、3.7mHzの方が特に顕著なピークを示している。本研究の結果から、爆発噴火の発生サイクルが、OS29モードの固有周期と強く同期していたことが示唆される。

Room C | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

📅 Tue. Oct 25, 2022 3:45 PM - 4:45 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 6:45 AM - 7:45 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S03] PM-2

chairperson: Yuya Machida(JAMSTEC), Yohei Kinoshita(University of Tsukuba)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[S03-01] Experimental characterization of sensor drift of pressure gauges using a pressure standard

*Hiroyuki MATSUMOTO¹, Hiroaki KAJIKAWA², Keisuke ARIYOSHI¹, Eiichiro ARAKI¹ (1. JAMSTEC, 2. AIST)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[S03-02] Seafloor geodetic observation using the pressure gauges without inherent drift components in the Nankai trough seismogenic zone

*Yuya MACHIDA¹, Shuhei Nishida¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Araki Eiichiro¹ (1. JAMSTEC / IMG)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[S03-03] Shallow slow slip and associated VLFE activity observed by seafloor fiber optic strainmeter in the Nankai Trough.

*Eiichiro ARAKI¹, Takashi Yokobiki¹, Satoru Baba¹, Yojiro Yamamoto¹, Mark Zumberge², Shuhei Nishida¹, Yuya Machida¹, Hiroyuki Matsumoto¹ (1. JAMSTEC Institute for Marine Geodynamics, 2. Scripps Institution of Oceanography)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[S03-04] Sentinel-1 SAR observation at the northern Noto peninsula associated with active seismicity since the end of 2020

*Yohei Kinoshita¹ (1. University of Tsukuba)

Experimental characterization of sensor drift of pressure gauges using a pressure standard

*Hiroyuki MATSUMOTO¹, Hiroaki KAJIKAWA², Keisuke ARIYOSHI¹, Eiichiro ARAKI¹

1. JAMSTEC, 2. AIST

DONETやS-netの圧力計は圧力変化を高分解能で計測できるため、巨大地震発生の準備過程で発生する鉛直方向の地殻変動を計測できることが期待されている。しかしながら、圧力計はドリフト（校正値の経時変化）が発生することが知られており、地殻変動を計測するためには圧力校正が必要である。このドリフトによる誤差を補正するために、加圧－大気圧開放（ゼロ）－加圧のパターンを繰り返し、ゼロ点でのドリフトで加圧時のドリフトを補正する手法（A－0－A方式）があり、すでに海域での試験報告がある（太田ほか、2021）。

本研究では、複数タイプの圧力計に重錘形圧力天びんから一定圧力を連続印加して、ドリフト特性について考察する。室内実験ではDONETやS-netで採用されている水晶振動子を受圧部にもつ「水晶振動式圧力計」と主に産業分野で採用されてきたシリコン単結晶の半導体素子を受圧部にもつ「シリコン振動式圧力計」を計測した。水晶振動式圧力計は3式の8B7000-2-005（Paroscientific社）を、シリコン振動式圧力計は4式のEJX610A（横河電機社）ならびに3式のMT300（横河計測社）を準備して、合計10式の圧力計に重錘形圧力天びんから同時に加圧した（図1）。圧力計はすべて室温環境に設置して計測を行った。8B7000-I-005とEJX610Aは絶対圧力計であるのに対し、MT300はシールドゲージ圧計である。室内実験では、A－0－A方式の加圧パターンで印加した。具体的には、水深2,000 mに相当する20 MPaを約1ヶ月間連続印加して、1日1回約15分間だけ大気圧（ゼロ点）に開放する（図2）。20 MPaを連続印加しているときは重錘形圧力天びんによる基準圧力と圧力計の出力値との偏差を計算し、ゼロ点に開放したときは約10分間待機した後、4分間計測し重錘形圧力天びん内の大気圧計による基準圧力との偏差を計算する。

それぞれの圧力計について、加圧時とゼロ点の基準圧力との偏差の時系列変化の一例を図3に示す。黒点は加圧時の計測データ、赤線は加圧2日目からの指数項と線形項を組み合わせた近似曲線である（Watts & Kontoyiannis, 1990）。薄い黒点はゼロ点の計測データ、青線はその近似曲線である。シリコン振動式圧力計はゼロ点に開放することで、再加圧の直後には一時的にヒステリシスが観測されるが、間もなく元のドリフト曲線に漸近することがわかる。図3は圧力計の種類にかかわらず、一時的にゼロ点に開放しても連続印加の特性は保持されることを示唆する。約1ヶ月間の計測でそれぞれの圧力計のドリフト特性が認識できる。図4に圧力計の雰囲気温度を示すが、8B7000-I-005とEJX610Aの圧力偏差は温度変化に相関していることがわかる。MT300に長周期のゆらぎが観測されているが、雰囲気温度との明瞭な相関は見られない。図3の赤線の線形項の係数がドリフトの特性を表すが、20 MPaを連続印加したときの圧力計の係数は、(a) -0.09 hPa/日、(b) -0.12 hPa/日、(c) -0.10 hPa/日となっている。なおこれらは代表値ではなく、圧力計により個体差がある。

次に、ゼロ点の偏差の時系列変化について考察する。図3に青線で示した近似曲線の線形項の係数は、(a) -0.10 hPa/日、(b) -0.19 hPa/日、(c) -0.09 hPa/日となった。これは上述の20 MPa印加時の係数と調和的である。室内実験でA－0－A方式により、水晶振動式圧力計のドリフト特性を評価した研究はある（Kajikawa & Kobata, 2019）が、シリコン振動式圧力計でも加圧時とゼロ点のドリフト特性が一致することを確認できた。実験室の温度環境で温度特性が計測データに重畳されたが、本研究の室内実験の結果はシリコン振動式圧力計でもA－0－A方式が適用可能なことを示唆する。

謝辞：本研究の一部は、JSPS科研費（JP19H02411）の支援を受けている。

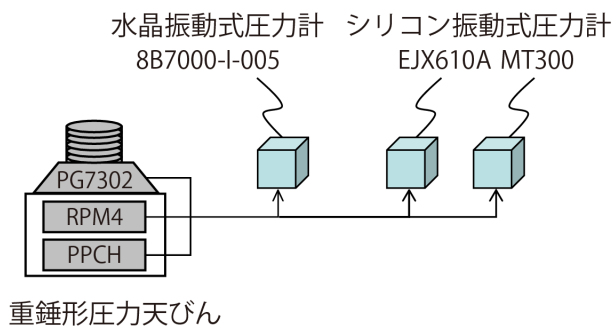


図 1：室内実験のダイアグラム図

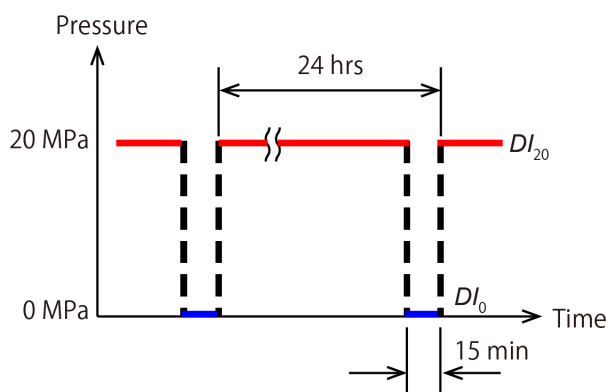


図 2：重錘形圧力天びんの加圧パターン

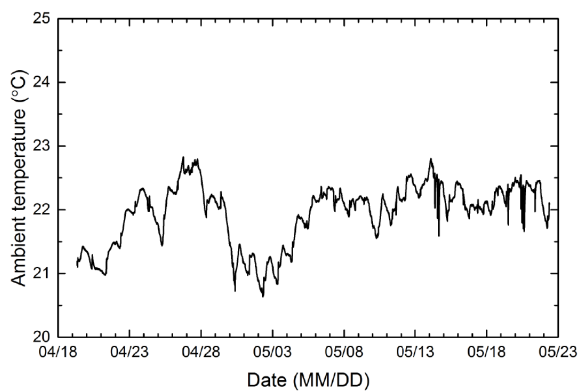
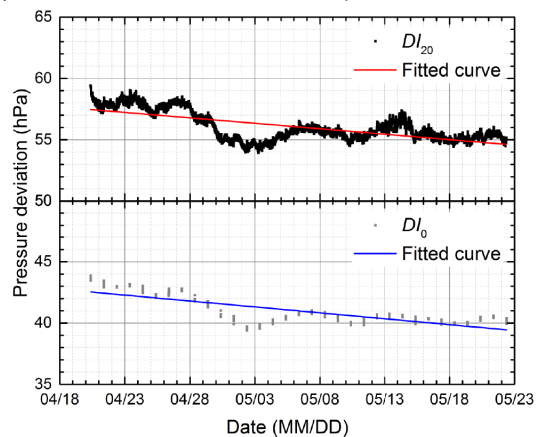
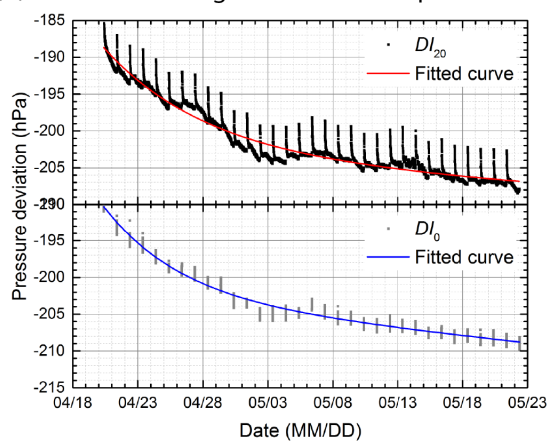


図 4：室内実験中の環境温度変化

(a) 8B7000-I-005/Paroscientific, Inc.



(b) EJX610A/Yokogawa Electric Corporation



(c) MT300/Yokogawa Test & Measurement Corporation

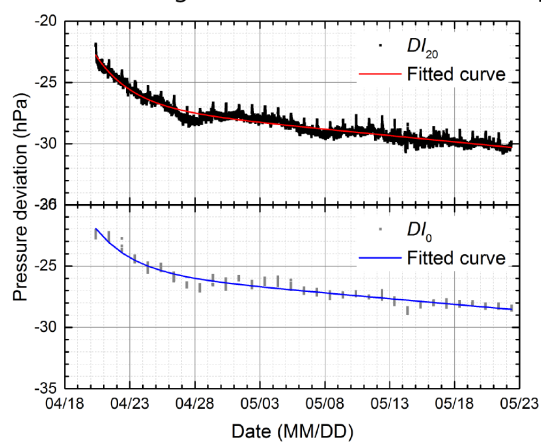


図 3：重錘形圧力天びんからの基準圧力との偏差。

(a) 水晶振動式圧力計、(b) シリコン振動式圧力計
(絶対圧タイプ)、(c) シリコン振動式圧力計 (シー
ルドゲージ圧タイプ)

Seafloor geodetic observation using the pressure gauges without inherent drift components in the Nankai trough seismogenic zone

*Yuya MACHIDA¹, Shuhei Nishida¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Araki Eiichiro¹

1. JAMSTEC / IMG

海洋研究開発機構では南海トラフに展開されている地震・津波観測監視システム（DONET: Dence Oceanfloor Network system for Earthquake and Tsunamis）に接続された水圧計の校正を繰り返し実施し、水圧計に特有な機器ドリフト成分を水圧記録から切り分けることで長期的な海底地殻変動を捉える試みを行ってきた。DONET水圧計の校正には、絶対的な精度を持った水圧計とDONET水圧計が示す圧力を現場で比較する必要があるが、南海トラフでは年間1cm程度の地殻変動が期待されるため、校正作業を行うためには1cm以下の精度を持った高精度な水圧計が必要である。このため水圧計の計測の不確かさの主要因である圧力ヒステリシス、温度特性、姿勢の影響を最小にすることで高精度な計測を実現する移動式水圧構成装置を開発することで、現場での比較校正作業を実現した（Machida et al., 2019）。さらに現場における校正時にはDONET水圧計との水準差を計測することができ、その水頭差を把握することでDONET水圧計に対して絶対圧力を値付けすることができる。これまでDONET1, DONET2においてそれぞれ1観測点ずつ（MRC10, KMB08）のDONET水圧計の校正を重点的に繰り返し行ってきた。

校正の結果、DONET2海域に設置されたMRC10観測点では1.9cm/year (± 0.6 cm) の沈降、DONET1海域に設置されたKMB08観測点では1.2cm/yearの沈降を示した（1hPa = 1 cm）。南海トラフにおいては海上保安庁によるGNSS-A観測により海底地殻変動が繰り返し行われてきており（Yokota et al., 2018）、その中でMRC10観測点、KMB08観測点に近傍なSIOW観測点、KUM3観測点における長期地殻変動成分を比較したところ、KMB08観測点では整合的な変動成分が示された一方で、MRC10観測点においては水圧計による変動成分がやや大きく見られている。より定量的な沈降速度を評価するためには、沈降速度の短期的な変化の可能性や、DONET水圧計が測器の初期ドリフトのような影響を含んでいる可能性があるなど、より慎重な検討が必要である。

Shallow slow slip and associated VLFE activity observed by seafloor fiber optic strainmeter in the Nankai Trough.

*Eiichiro ARAKI¹, Takashi Yokobiki¹, Satoru Baba¹, Yojiro Yamamoto¹, Mark Zumberge², Shuhei Nishida¹, Yuya Machida¹, Hiroyuki Matsumoto¹

1. JAMSTEC Institute for Marine Geodynamics, 2. Scripps Institution of Oceanography

南海トラフでのプレート沈み込み境界域の浅部では、繰り返しゆっくり滑りが発生することが掘削孔内の観測で明らかにされている(Araki et al., 2017). 広域でのゆっくり滑りの時空間的発生を検討するために、これまでの掘削孔の観測網の西側の南海地震震源域の沖合の、ゆっくり滑りの発生が想定される地域の近傍で海底ケーブル観測網 (DONET) に接続することで長期間連続観測が行える海底光ファイバー歪計(Zumberge et al., 2018)を開発し、観測を行ってきた。2022年1月12日~2月5日にかけて、海底光ファイバー歪計の観測データはゆっくりとした変化を示し、3週間ほどかけて 0.7μ 歪程度伸長を示した。また、この期間近傍で超低周波地震(VLFE)が観測されており、光ファイバー歪計の接続されているDONET-2Fノード近傍およびDONET-2Gノード近傍で活発なVLFE活動がみられた。さらに光ファイバー歪計では、近傍のDONET-2Fノード付近で発生したVLFEの多くについて、歪観測記録にゆっくりとしたステップ状の変化を観測した。うち、例えばDONETで地震波形インバージョンにより決定されたMw 4.4のVLFEについて光ファイバー歪計によって観測された海底面歪変化量は20n strain程度であった。これは、微小な変化ではあるが、VLFEの断層運動に伴う海底面変動を観測出来ているものと考えられる。また、観測されたVLFEにともなう歪変化は、VLFEの位置・メカニズムと光ファイバー歪計の位置によく関連した極性と推移を示しており、VLFEの断層近傍での歪計測によって、個別の超低周波地震における断層の滑り過程を議論することが可能であると考えられる。一方、3週間の間に観測されたゆっくりとした変化量は、これらのVLFEでの断層運動で説明することは困難であった。従って、観測されたゆっくりとした歪変動は、VLFEがみられたDONET-2Fおよび2Gの広域を跨ぐ可能性のある浅部ゆっくり滑りであって、その滑りによって個別のVLFE断層をローディングし浅部ゆっくり滑りと同時期のVLFEのバースト的なクラスターとなったのではないか。VLFEの活動期間は観測された浅部ゆっくり滑りより少し遅れていることも、このようなVLFEの発生メカニズムをサポートするものとする。

Sentinel-1 SAR observation at the northern Noto peninsula associated with active scismicity since the end of 2020

*Yohei Kinoshita¹

1. University of Tsukuba

2020年末頃より、能登半島北部の珠洲市近郊にて地震活動の活発化が確認されている。また、地震活動の活発化と同時期より、国土地理院のGNSS連続観測網GEONETによって地震発生域周辺の観測点で局所的な地表面変位が始まったことが報告されている。西村ほか（2022, 日本地球惑星科学連合大会）はこれらGEONET観測データに加え臨時GNSS観測データを解析し、球状圧力源の膨張により地表面変位を説明できるとしている。しかしながら、GNSS観測は検出精度および時間分解能に優れているものの空間分解能は観測点密度に依存しており、本事例における地表面変位の空間的な詳細は明らかではない。本研究では高空間分解能に地表面変位を検出可能なSAR時系列解析を実施し、能登半島北部での地表面変位の空間的な詳細を明らかにするとともに、その結果に基づいて地表面変位の変動源について推定も行なったので、それら結果を報告する。

SAR時系列解析には、C-バンドSARのSentinel-1データを用い、ISCE ver.2ソフトウェアにより干渉解析を実施、得られたSAR干渉画像から時系列解析ソフトウェアLiCSBASにより面的地表面変位の時系列を推定した。C-バンドSARは植生等の影響による干渉性の低下が著しいため、マルチルッキング処理およびスペクトルフィルターを適用して干渉性を向上させている。上記SAR時系列解析を2つの異なる観測方向データに適用することで、2方向について地表面変位速度を求めた。なおSAR時系列解析で用いたSentinel-1Aおよび1BのうちSentinel-1Bについては2021年12月の観測を最後にセンサートラブルにより観測が停止しているため、本研究では2つの観測方向情報が利用可能な2021年12月までのSARデータで時系列解析を実施した。地表面変位画像を解釈しやすくするため、SAR時系列解析で得られた推定変位速度は2.5次元解析により準東西成分と準上下成分に投影した。SAR時系列解析で得られた変位速度の妥当性を検証するため、GEONETのF5解日座標値データを用いた。その際、変位の基準点として珠洲市より西方に位置し本事例による地殻変動の直接的影響が無いとみられる穴水（020972）を設定した。地表面変位の変動源推定には、Fukuda and Johnson（2008, GJI）のFully Bayesian Inversionを用い、SAR時系列解析の変位速度およびGEONETの変位速度を入力としたJoint inversionを実施した。変動源の候補として、本研究では反無限弾性体矩形断層モデルおよび球状圧力源モデルの2つを用いた。

SAR時系列解析および2.5次元解析の結果、珠洲市近郊で顕著な隆起およびその周辺で東西方向に拡大するパターンの変位空間分布が得られた。衛星SAR観測は南北方向の変位に感度が無いものの、東西方向および鉛直方向の推定変位速度については、GEONETで得られた変位速度と時間・空間ともに調和的なパターンが得られている。このSAR変位速度とGNSSの変位速度に対しInversion解析を実施した結果、矩形断層モデルと球状圧力源モデルのいずれでも同程度に地表面変位を説明できるモデルパラメータが推定された。観測変位とモデル変位のRMSEを比較したところ、球状圧力源モデルの方がわずかに良い結果が得られ、西村ほか（2022）の結果を支持する結果となった。ただし矩形断層モデルと球状圧力源モデルのいずれにおいても、SAR変位速度に対して4, 5mm程度のRMSE推定残差が見られていること、またGNSS観測点能都（960574）での1cm程度の南向きの変位を全く説明できていないことから、単一の矩形断層および単一の球状圧力源のみでは、InSAR観測とGNSS観測の両方を十分に説明することはできていないことが示唆される。

本研究はJSPS科研費JP22K19949の助成を受けたものです。

Room C | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

📅 Tue. Oct 25, 2022 5:00 PM - 5:45 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 8:00 AM - 8:45 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

[S03] PM-3

chairperson: Yuya Machida(JAMSTEC), Yohei Kinoshita(University of Tsukuba)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[S03-05] Dense GNSS observations around strain-rate concentration zones – Detailed velocity distribution in the San-in shear zone and Arima-Takatsuki fault zone

*Takuya NISHIMURA¹ (1. Kyoto University)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[S03-06] Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation and its application to gravity Bayesian inversion

*Yuanyuan Niu¹, Jiancang Zhuang^{2,1} (1. SOKENDAI, 2. ISM)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[S03-07] Strain and barometric pressure observations of the 2022 Hunga-Tonga eruption with a laser strainmeter at Kamioka

*Akiteru TAKAMORI¹, Akito ARAYA¹, Kouseki MIYO², Tatsuki WASHIMI³, Takaaki YOKOZAWA², Hideaki HAYAKAWA², Masatake OHASHI² (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, 3. National Astronomical Observatory of Japan)

Dense GNSS observations around strain-rate concentration zones –Detailed velocity distribution in the San-in shear zone and Arima-Takatsuki fault zone

*Takuya NISHIMURA¹

1. Kyoto University

1. はじめに

日本列島で国土地理院によるGNSS連続観測網（GEONET）が構築され、地震間の変形速度分布が明らかになってから30年近くが経過した。この間、特に歪み速度が大きい「ひずみ集中帯」と呼ばれる地帯が日本各地に発見されており（例えば、Sagiya et al. 2000; Nishimura and Takada, 2014）、内陸地震の多発帯と一致することから注目されている、しかし、GEONETの平均観測点間隔は20km程度であり、ひずみ集中帯の詳細な分布や活断層との対応関係を詳細に検討することやひずみ集中のメカニズムの解明には十分とは言えない。そのため、観測点間隔を数km程度とするような稠密GNSS観測がひずみ集中帯の各地域で行われてきた（例えば、Sagiya et al., 2002）。新潟-神戸ひずみ集中帯の最西部に位置する大阪府北部の有馬-高槻断層帯は、地質学的な平均変位速度が1.5mm/年に達する右横ずれ断層である。GEONETデータに基づく測地学的平均変位速度より、この断層帯の深部で10mm/年程度のすべり速度が推定されている（Nishimura et al., 2018）。周辺で2018年に大阪府北部地震(M6.1)が発生したことを契機として、断層帯に直交方向のアレイを主とした11点の新規連続観測点を2019年8月に設置した。一方、山陰ひずみ集中帯の最西部に位置する島根県西部三瓶山周辺では、西北西-東南東走向のひずみ集中帯とは概ね直交する北北西-南南東走向の地震群が見られ、2018年にも同じ走向の地震（M6.1）が発生するなど興味深い地域である。この地域においては、地震分布とひずみ速度分布の対応関係を調べるために、9点の新規観測点を2020年7月に設置した。これらの観測点の設置から2年以上が経過し、データが蓄積したことで、高精度の変位速度を算出できるようになった。本発表では、有馬-高槻断層帯周辺及び三瓶山周辺でのGNSSデータを解析し、変位速度及びひずみ速度分布と簡単なモデル化を行なった結果について報告する。

2. データ及び解析方法

日座標値の計算には、GipsyX Ver 1.4によるバイアス整数化精密単独測位法を用いた。米国ジェット推進研究所（JPL）が提供している精密歴及び座標変換パラメータを用いてITRF2014準拠(IGS14)の座標値を得た。得られた座標値に線形・年周・半年周からなる関数をフィッティングし、約3年間の平均速度を最小二乗法で求めた。ひずみ速度の計算には、ABICを用いた3次Bスプラインの基底関数展開によって表された変位分布を空間微分するOkazaki et al.(2021)の手法を用いた。

3. 結果

有馬-高槻断層帯周辺の速度場からは、断層に平行な速度成分が断層帯を挟んでarctan型の変位分布が明瞭に認識され（図）、2次元の鉛直横ずれ断層の深部すべりモデル（Savage and Burford, 1973）を用いると、深部すべり速度は約9mm/年、固着域の深さは12kmと推定された。すなわち、数年程度の測地学的時間スケールでは、地質学的時間スケールよりもはるかに速く断層深部がすべっていることが確かめられた。一方、三瓶山周辺の速度場からは、顕著なひずみ集中域は見られず、陸域にひずみ集中域が観測されている鳥取県側（Meneses-Gutierrez and Nishimura, 2020）とは異なり、ひずみ集中域が海域にあることが示唆される。

謝辞：GNSS観測点の設置にあたり自治体の関係者には大変お世話になりました。国土地理院GEONET及び京都市埋蔵文化財研究所のGNSSデータを使用しました。後者のデータ提供にあたっては、宮原健吾様にご尽力いただきました。ここに記して感謝いたします。

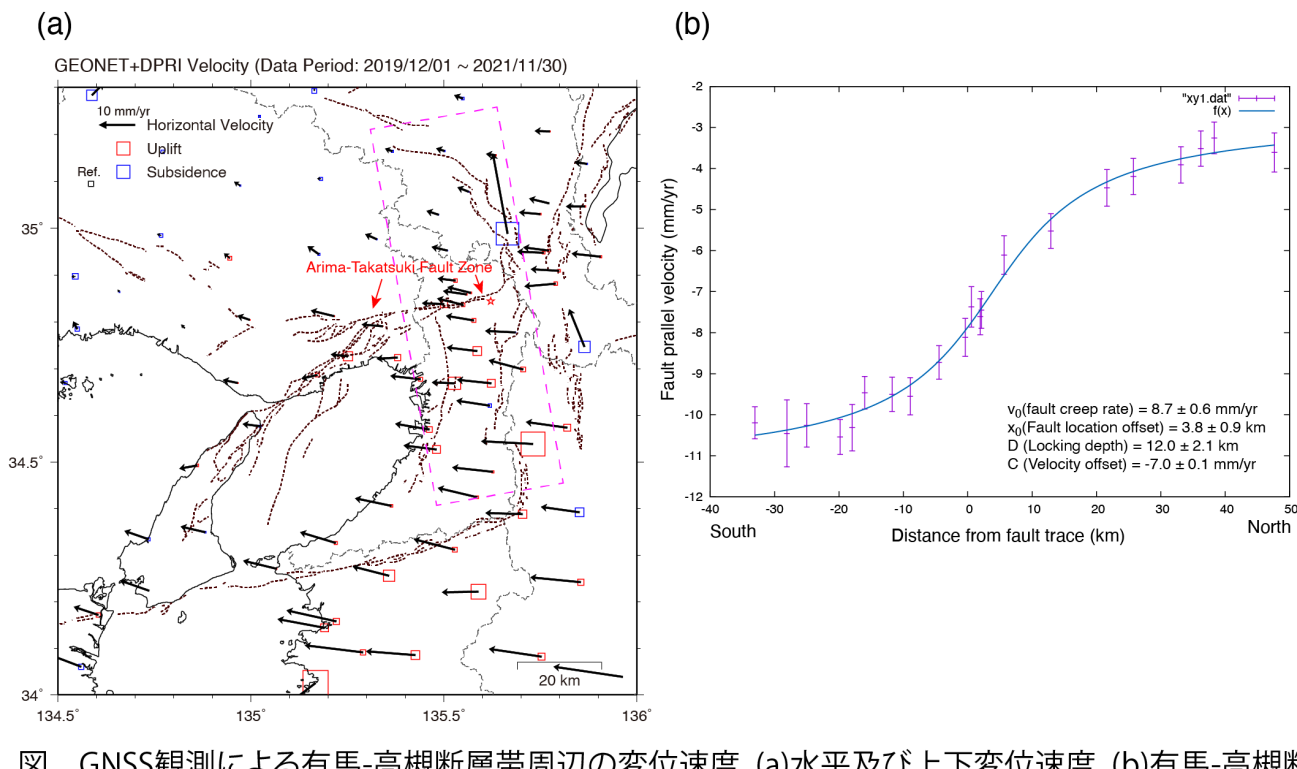


図 GNSS観測による有馬-高槻断層帯周辺の変位速度. (a)水平及び上下変位速度. (b)有馬-高槻断層帯に平行な速度成分. 青のカーブは, 鉛直右横ずれ断層の深部すべり(Savage and Burford, 1973)を仮定してフィティングした速度分布. (a)のピンクの矩形領域の観測点を使用.

Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation and its application to gravity Bayesian inversion

*Yuanyuan Niu¹, Jiancang Zhuang^{2,1}

1. SOKENDAI, 2. ISM

Prior information is always used to add constraints in Bayesian geophysical inversions to solve the non-uniqueness problem of the solution. A commonly used constraint is on the smoothness (second-order derivative) of the model parameters. The smoothness is usually calculated through interpolation over regular grids for the reason of easy implementation in numerical calculations. When observed data are irregularly distributed such as in geodetic data, interpolation based on a Delaunay tessellation (DT) over the observation locations is popularly used to avoid additional interpolations and to maintain the flexibility in the resolution of the model solution. However, calculating the smoothness of a function based on DT-based interpolation is more difficult than calculating the flatness (first-order derivative). We propose two interpolation methods for calculating the smoothness with DT-based interpolators: the double linear and the quadratic interpolators. These two methods are tested through numerical experiments. We also apply the DT-based interpolation methods to a gravity Bayesian inversion problem, in which the Bouguer gravity anomaly and the near-surface density structure are estimated.

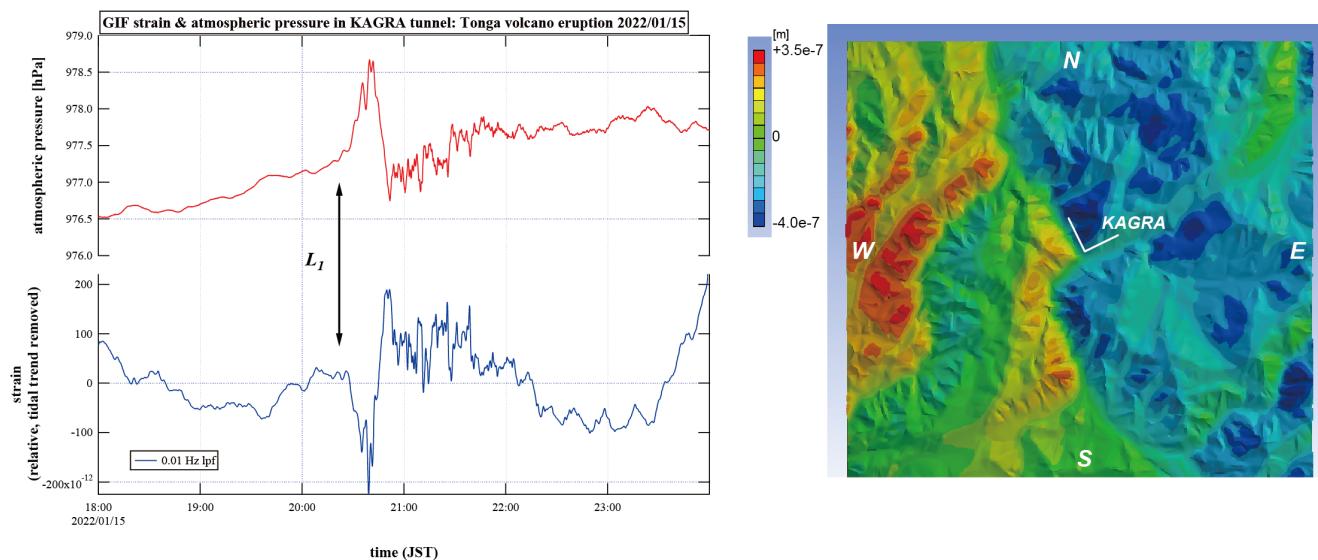
Strain and barometric pressure observations of the 2022 Hunga-Tonga eruption with a laser strainmeter at Kamioka

*Akiteru TAKAMORI¹, Akito ARAYA¹, Kouseki MIYO², Tatsuki WASHIMI³, Takaaki YOKOZAWA², Hideaki HAYAKAWA², Masatake OHASHI²

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, 3. National Astronomical Observatory of Japan

我々は岐阜県飛騨市神岡町の重力波望遠鏡KAGRAのトンネル内に基線長1500 mのレーザー伸縮計（Geophysics Interferometer: GIF）を設置して2016年よりひずみ観測を行っている（Araya et al. 2017）。周波数安定化レーザーを用いることにより、GIFでは1 Hz以下の帯域で 10^{-12} 台のひずみ分解能を定常的に実現しており、これまでに潮汐や地震に伴うひずみステップなどの現象を観測してきた。また、0.1 – 1 mHzの周波数帯域では坑内の気圧とGIFのひずみスペクトルの形に高い類似性がみられた。そこで、両者の比例関係を仮定してひずみ観測値から気圧の寄与を差し引く補正を試みたところ、その効果は最も良い場合でも約1/3倍にとどまった。この結果は、ひずみが局所的な気圧変化だけで決まるのではなく、より広域の気圧変動の影響を受けていることを示唆していると考えられる（Akutsu et al. 2021）。

2022年1月15日のフンガ・トンガ海底火山の大規模噴火は、津波や電磁場の擾乱をはじめ地球規模で様々な影響を及ぼした。噴火によって発生した大気Lamb波が地球を周回する様子は気圧や潮位の変動として各地で観測された。KAGRAサイトでもLamb波による気圧変動やインフラサウンド等が捉えられ、GIFでは気圧に伴うひずみの変化を明瞭に観測することができた。また、気圧変化とひずみには負の相関がみられ、その係数はおおよそ $-(2-3) \times 10^{-10}$ /hPaであった。本講演では、このイベントの観測結果を紹介するとともに、気圧の影響を定量的に分析するために作成した有限要素モデルによる解析等について報告する。ひずみ計設置点だけでなく、周辺領域に加わる気圧の影響を含むモデルは、将来的には先に述べた広域の気圧変化とひずみの関係の理解に役立つものと期待できる。



左図：KAGRA 坑内で観測された、フンガ・トンガ噴火によって発生した大気 Lamb 波による気圧変化（上）と GIF によるひずみ観測結果（下）

右図：有限要素モデルにより求められた、1 hPa の気圧変化に対する KAGRA 周辺の地表の東西方向の変位（西方向を正とする）