

C会場 | 一般セッション：S01. 地震の理論・解析法

2022年10月25日(火) 9:45 ~ 11:00 | C会場 8階 (820研修室)

[S01] AM-1

座長:蓬田 清(北海道大学大学院理学研究院 地球惑星科学部門)、野津 厚(港湾空港技術研究所)

9:45 ~ 10:00

[S01-01] 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とその成立条件

*野津 厚¹、長坂 陽介¹ (1. 港湾空港技術研究所)

10:00 ~ 10:15

[S01-02] 精密制御定常震源システムACROSSによる、地震波速度の地下水位への応答の解析

*大庭 拓武¹、生田 領野¹、山岡 耕春²、辻 修平³、馮 晨²、渡辺 俊樹²、小池 遥之² (1. 静岡大学、2. 名古屋大学、3. 海洋研究開発機構)

10:15 ~ 10:30

[S01-03] 斜面における降雨期間中の能動的弾性波モニタリングの試み

*中山 雅之¹、川方 裕則¹、土井 一生² (1. 立命館大学、2. 京大防災研)

10:30 ~ 10:45

[S01-04] ワッサースタイン計量を用いた地震波センブランス解析の試み

*奈良 樹¹、後藤 浩之² (1. 京都大学大学院、2. 京都大学防災研究所)

10:45 ~ 11:00

[S01-05] 補助関数を用いた非線形問題のパラメータ最適化：波形インバージョンなどへの応用

*蓬田 清¹ (1. 北海道大学大学院理学研究院 地球惑星科学部門・地球惑星ダイナミクス分野)

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とその成立条件

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

*野津 厚¹、長坂 陽介¹

*Atsushi NOZU¹, Yosuke Nagasaka¹

1. 港湾空港技術研究所

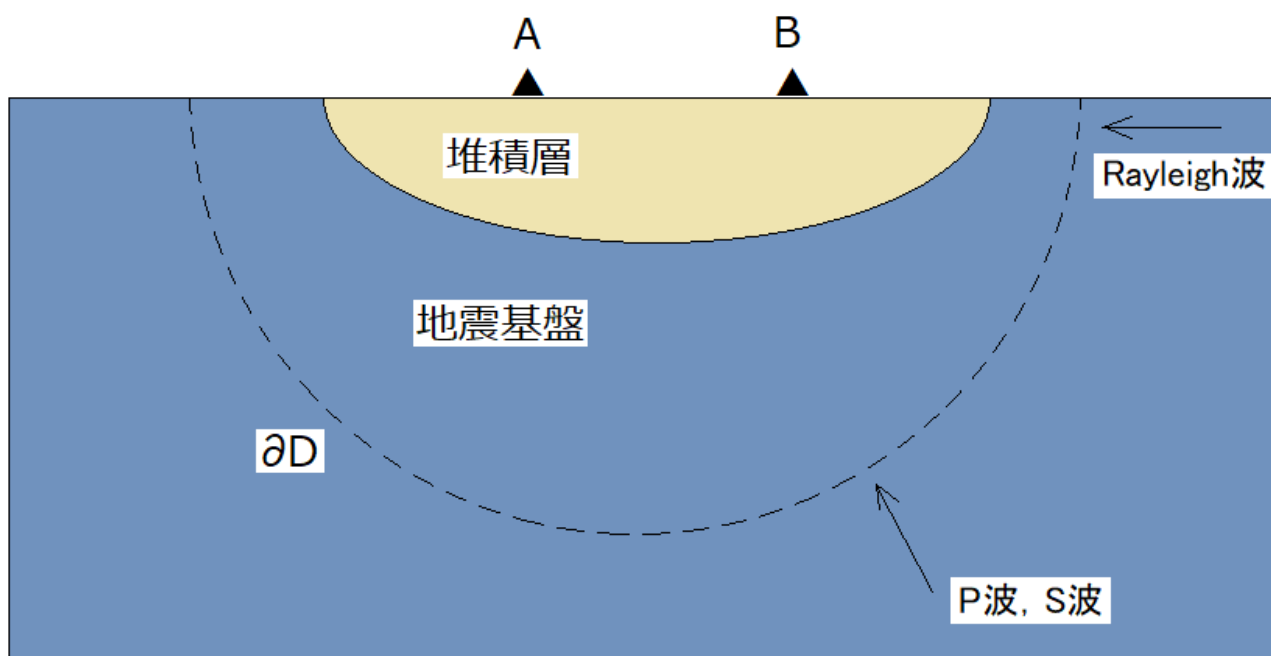
1. Port and Airport Research Institute

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、と、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と考えることが望ましく、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。



精密制御定常震源システムACROSSによる、地震波速度の地下水位への応答の解析

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

*大庭 拓武¹、生田 領野¹、山岡 耕春²、辻 修平³、馮 晨²、渡辺 俊樹²、小池 遥之²

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

1. 静岡大学、2. 名古屋大学、3. 海洋研究開発機構

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を知ることに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).

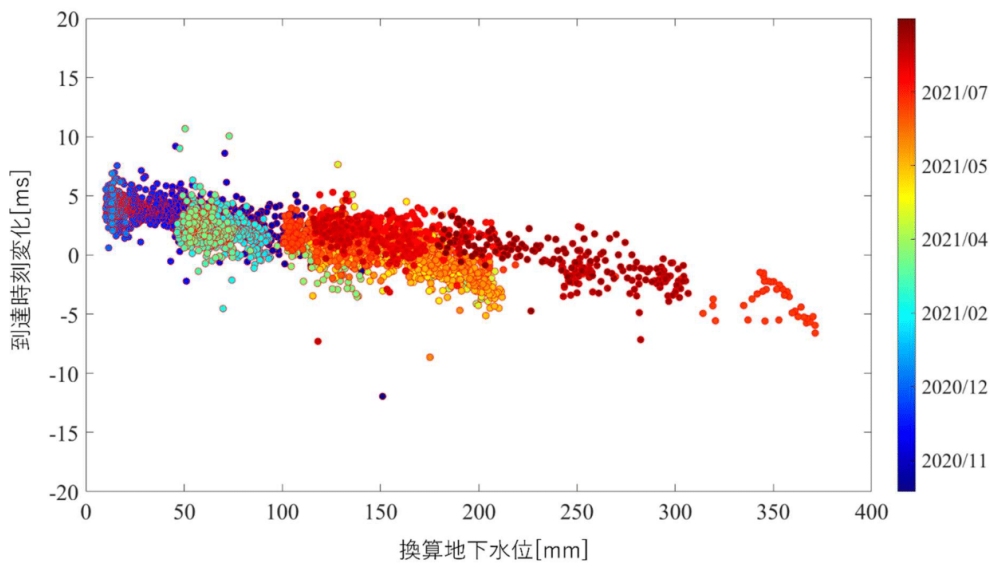


図. 2020 年以降における 2.8 秒の波群の到達時刻変化と換算地下水位の関係
到達時刻変化は正が早まりで負が遅れを示している。地下水位が 100mm 増加すると地震波は 2.3 ミリ秒遅れて到達する。

斜面における降雨期間中の能動的弾性波モニタリングの試み

Active seismic monitoring tests on a field slope during rainfall

*中山 雅之¹、川方 裕則¹、土井 一生²

*Masayuki NAKAYAMA¹, Hironori KAWAKATA¹, Issei DOI²

1. 立命館大学、2. 京大防災研

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 ksp/s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の範囲に求められた。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。

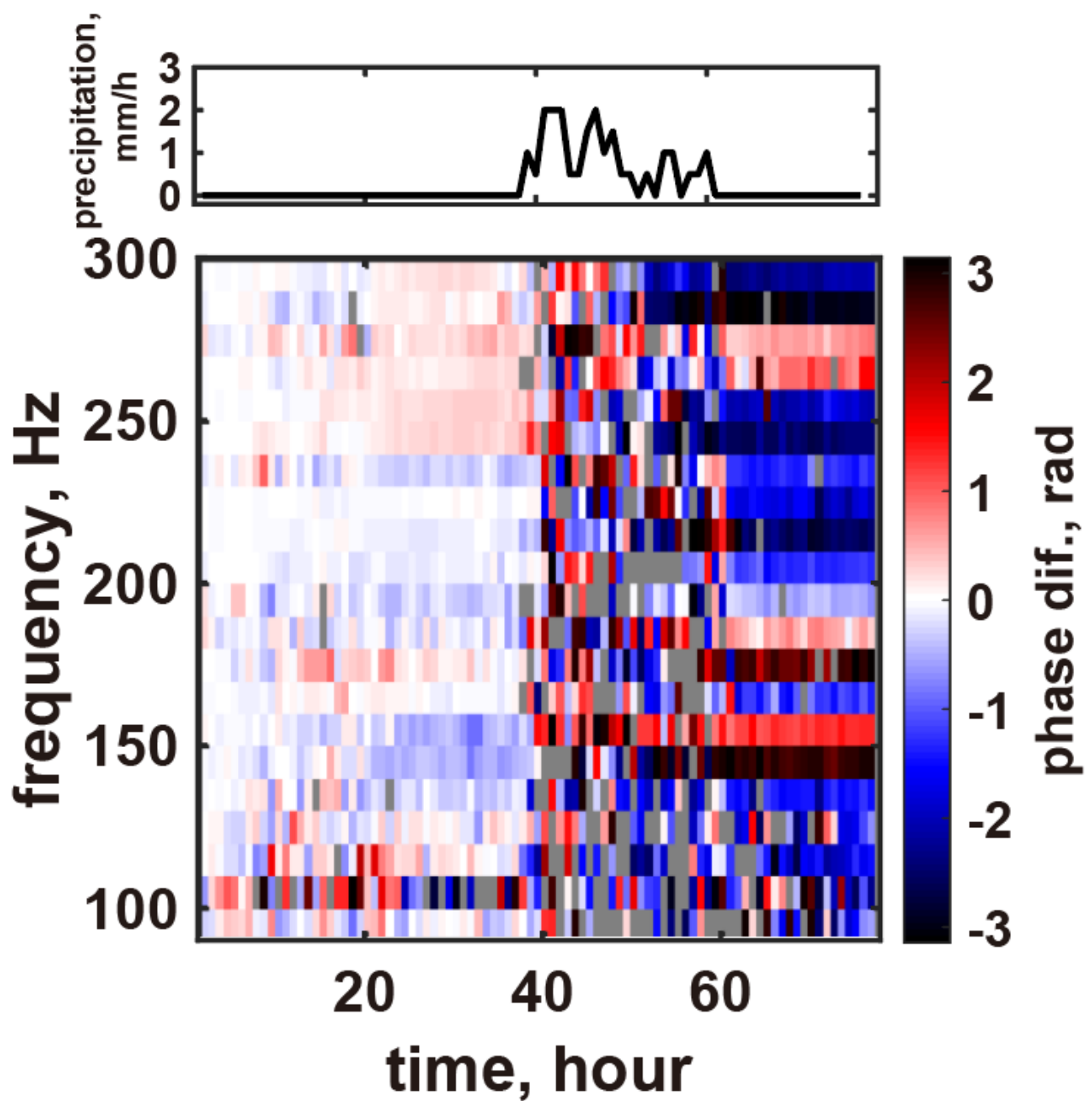


図1. 降水量と AC8 に関する計測初期の値に対する位相差の時間変化.
下図の灰色は S/N 比が 2 未満であったことを表す.

ワッサーズタイン計量を用いた地震波センブランス解析の試み

Semblance analysis of seismic array records using wasserstein metric

*奈良 樹¹、後藤 浩之²*Tatsuki Nara¹, Hiroyuki Goto²

1. 京都大学大学院、2. 京都大学防災研究所

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, 鎌田泰子, 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.

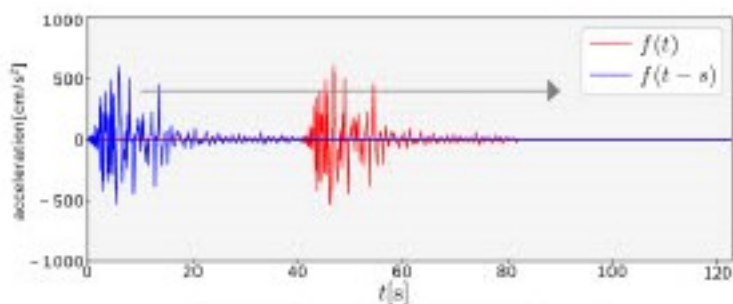


図 1. 同一の地震波形の時間シフト

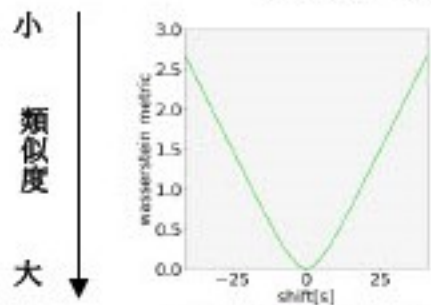


図 2. 二波形間の W_2^2

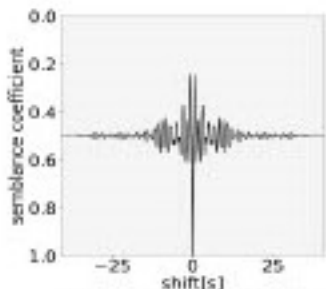


図 3. 二波形間の S_e

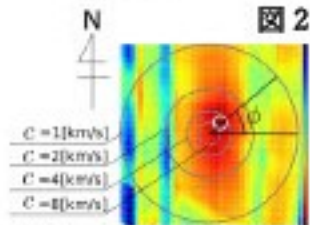


図 4. 解析結果の見方

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。

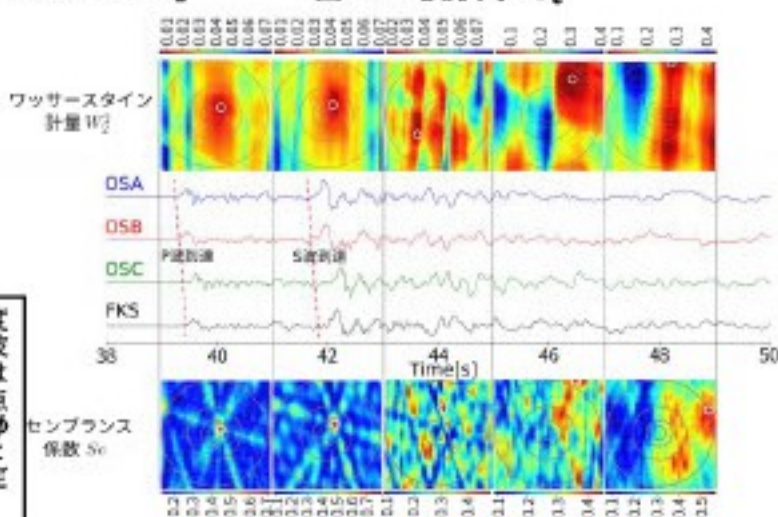


図 5. 実体波に対するセンブランス解析の結果

補助関数を用いた非線形問題のパラメータ最適化：波形インバージョンなどへの応用

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

*蓬田 清¹

*Kiyoshi YOMOGIDA¹

1. 北海道大学大学院理学研究院 地球惑星科学部門・地球惑星ダイナミクス分野

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。

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

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

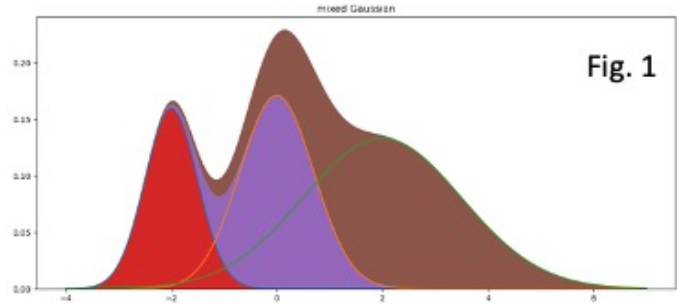


Fig. 1

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

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

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

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

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

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

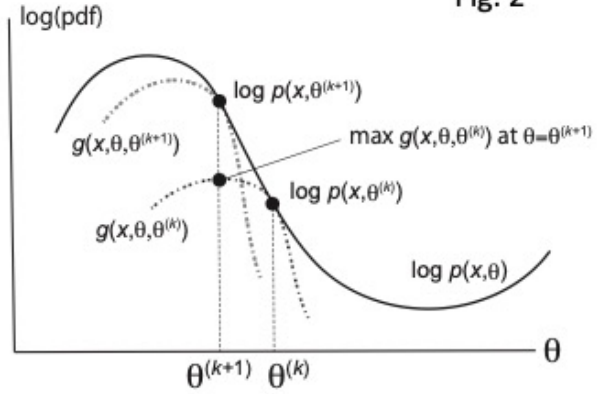


Fig. 2