

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) 11:15 ~ 12:30 | C会場 8階 (820研修室)

[S01] AM-2

座長: 中原 恒(東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻)、佐藤 大祐(京都大学防災研究所)

11:15 ~ 11:30

[S01-06] 非ガウスフルベイズ推定における事後平均およびABIC演算の計算論的困難：新しい階層モンテカルロ法による解決法の提案

*佐藤 大祐¹、深畑 幸俊¹ (1. 京都大学防災研究所)

11:30 ~ 11:45

[S01-07] FDP-H行列の実装を見据えた時空間境界積分方程式の近似精度評価

*宮脇 拓光¹、安藤 亮輔¹ (1. 東京大学)

11:45 ~ 12:00

[S01-08] DASと3成分地震計によるspatial autocorrelationの定式化と三陸沖海底ケーブルデータへの適用

*福島 駿^{1,2}、篠原 雅尚²、山田 知朗²、西田 究²、竹尾 明子²、蓬田 清³ (1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2. 東京大学地震研究所、3. 北海道大学 理学院 自然史科学専攻 地球惑星ダイナミクス分野)

12:00 ~ 12:15

[S01-09] 変位記録とDASの軸歪記録との相互相関の定式化

*中原 恒¹、Haney Matthew² (1. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2. アラスカ火山観測所, アメリカ地質調査所)

12:15 ~ 12:30

[S01-10] 地震波減衰の振幅依存性について

*手老 勇登¹、中島 淳一¹ (1. 東京工業大学)

非ガウスフルベイズ推定における事後平均およびABIC演算の計算論的困難：新しい階層モンテカルロ法による解決法の提案

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

*佐藤 大祐¹、深畑 幸俊¹

*Daisuke Sato¹, Yukitoshi Fukahata¹

1. 京都大学防災研究所

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。

FDP-H行列の実装を見据えた時空間境界積分方程式の近似精度評価

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

*宮嶋 拓光¹、安藤 亮輔¹*Takumi Miyajima¹, Ryosuke Ando¹

1. 東京大学

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。

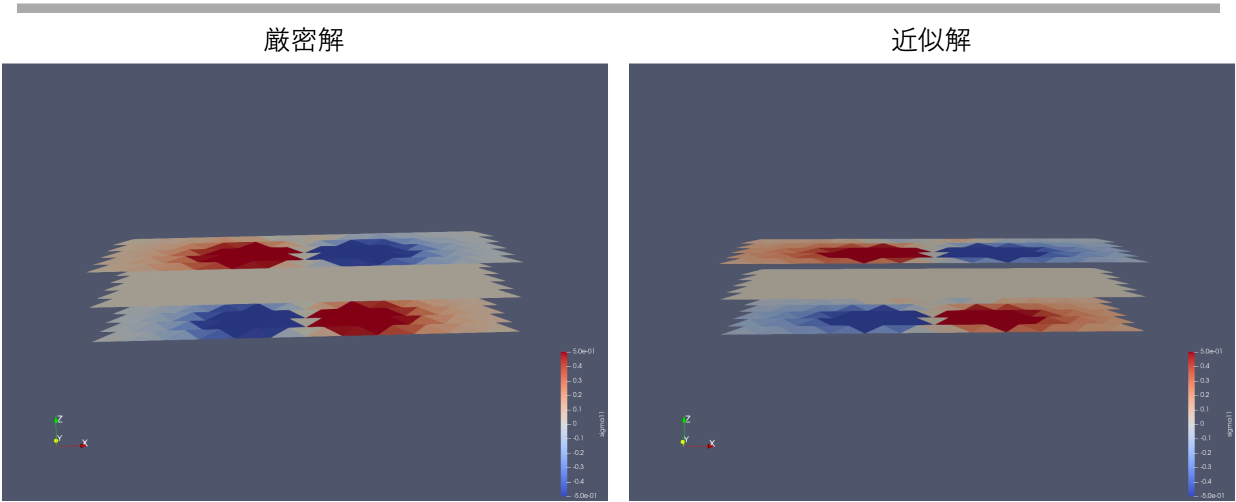
Domain Fは時間幅が $O(1)$ であり、グリーン関数の性質から応力核を時間方向に積分すると空間依存性の強い項と弱い項に分離できると考えられる。Domain Iは時間幅が広いので、応力核を時間方向にリサンプリングする量子化を行い、計算量やメモリを削減する近似を行う。H行列への実装を見越して、滑り速度の累積和(滑り)の差と積分核の積の形から、滑り速度の累積和と積分核の差の積の形に式変形を行なった。

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、上記クラスター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。

$c_x=c_y=c_z=2 \quad \sigma_{11}$ 成分



DASと3成分地震計によるspatial autocorrelationの定式化と三陸沖海底ケーブルデータへの適用

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

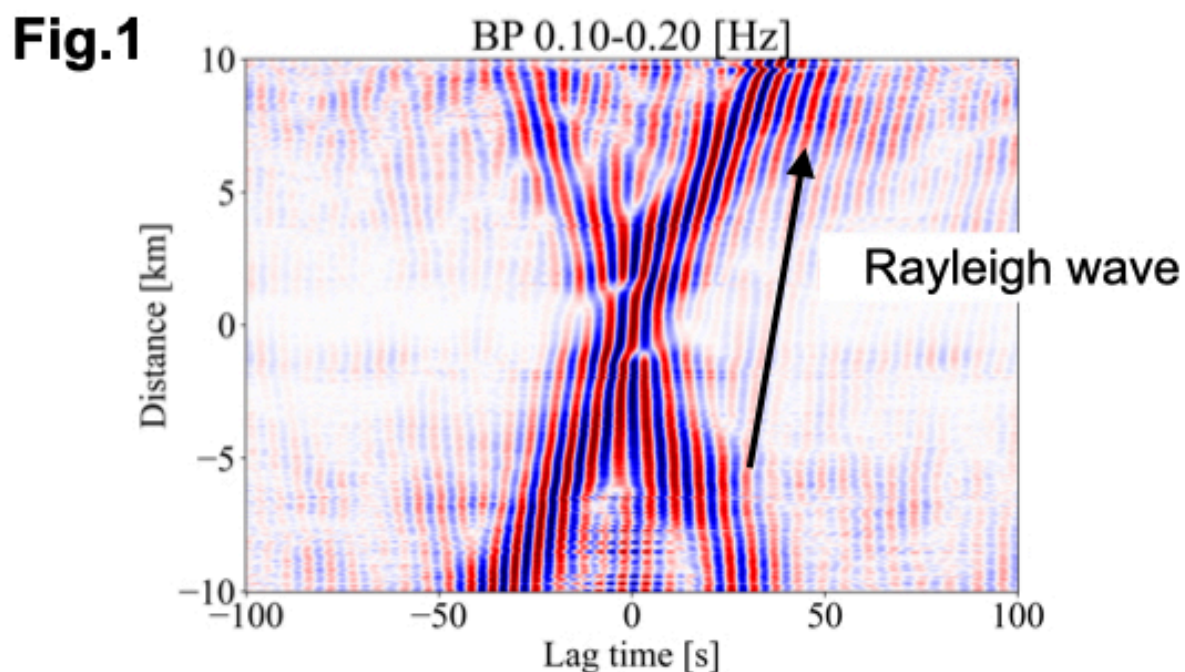
*福島 駿^{1,2}、篠原 雅尚²、山田 知朗²、西田 究²、竹尾 明子²、蓬田 清³

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

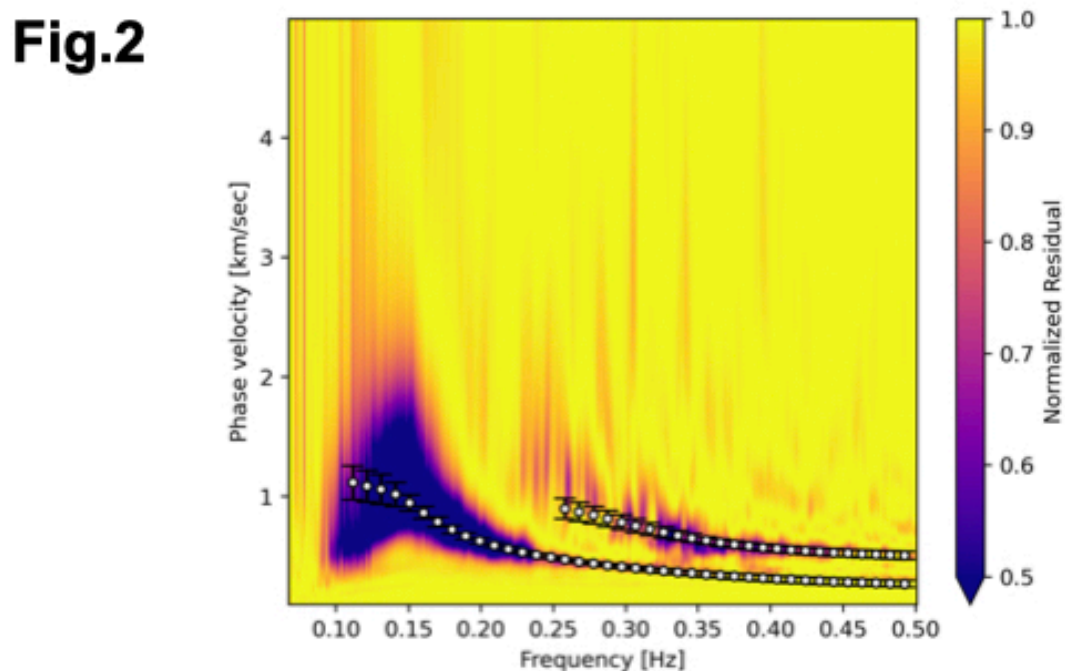
1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2. 東京大学地震研究所、3. 北海道大学 理学院 自然史科学専攻 地球惑星ダイナミクス分野

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.

変位記録とDASの軸歪記録との相互相関の定式化

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

*中原 恒¹、Haney Matthew²

*Hisashi NAKAHARA¹, Matthew M. Haney²

1. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2. アラスカ火山観測所，アメリカ地質調査所

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_r （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_θ, 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、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記録と通常の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．

地震波減衰の振幅依存性について

Amplitude dependence of seismic wave attenuation

*手老 勇登¹、中島 淳一¹

*Hayato Tero¹, Junichi Nakajima¹

1. 東京工業大学

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。