

iSeisBayes NEWSLETTER

Vol. 03

ビッグデータと統計学で拓く、
地震研究の未来。

$$\log_{10} E = 4.8 + 1.5M$$

$$\tau_{xy}^{m,i,j} = v_y^{m-\frac{1}{2},i,j} + \frac{1}{\rho} \frac{\Delta t}{\Delta h} \left(\tau_{xy}^{m,i+\frac{1}{2},j} - \tau_{xy}^{m,i-\frac{1}{2},j} + \tau_{xy}^{m,i,j+\frac{1}{2}} - \tau_{xy}^{m,i,j-\frac{1}{2}} \right)$$

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} M_o \left(\frac{f_c}{0.21V_s} \right)^3$$

Featured

iSeisBayes 最終報告会

2023年2月21日(火)開催

iSeisBayes 最終報告会

2023年2月21日(火)
13:00 ~ 18:00

- 東京大学地震研究所1号館2階セミナー室
- オンラインを用いたハイブリッド開催
- 参加人数:100名(オンライン参加:75名)



JST CREST プロジェクト研究課題「次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合によるインテリジェント地震波動解析(通称:iSeisBayes)」は、地震学および統計学の専門家が結集し、近年進境著しい最先端ベイズ統計学を武器に多種多様な地震計測データを包括的に解析する手法群の開発を実施してきました。

2017年度秋にスタートし最終年度を迎えた今回の最終報告会では、5年間の取り組みをより理解頂くために、研究成果および社会実装を脱んだ今後の展開について、13名の講演を中心に報告致しました。その内容をこのニュースレターでご紹介いたします。

平田 直

研究代表者 東京大学名誉教授

理学博士。東京大学理学部助手、千葉大学理学部助教授、東京大学地震研究所助教授、同研究所教授、同研究所所長、同研究所地震予知研究センター長、防災科学技術研究所参与(兼)首都圏レジリエンス研究センター長を経て、現在、同研究所計算地球科学研究センター特任研究員。東京大学名誉教授。そのほか、中央防災会議委員、文部科学省「首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト」リーダー等を歴任、現在、政府の地震調査研究推進本部・地震調査委員会委員長。地震防災対策強化地域判定会・南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会会長、防災教育普及協会会長を務めている。専門は観測地震学、地震防災と固体地球科学の融合研究。



阪神淡路大震災を契機に日本は、高感度地震観測網(Hi-net)を整備し、現在は陸海統合地震津波火山観測網(MOWLAS)として充実してきました。さらに、首都圏に集中した地震観測網(MeSO-net)が整備されました。現在2000点以上の地震計が、24時間365日、地表・地下からの振動をモニタリングしています。それらの情報から緊急地震速報を出す手法が開発され、地震防災・減災に活用されています。さらに、プレート境界の地震発生域のやや深部および浅部において発生するスロー地震・低周波微動(微動)が発見され、世界に誇る日本の科学の成果として発信されています。科学技術の進歩には、大量のデータと圧倒的に優れた理論の両方が必要です。現在ようやくビッグデータを手にする環境が整いつつありますが、未だそれを使い切れていないという印象があります。

本研究課題は、地震超ビッグデータ時代に向け、近年進歩著しいベイズ統計学の最新の理論とアルゴリズムを導入することにより、地震計測データ解析手法の刷新をねらい発足いたしました。5年にわたり研究代表者を務めて参りましたが、地震学を専門とする若手研究者に加え、駒木先生、野々村先生が指導された若い情報科学の研究者がプロジェクトに加わることで、異分野間の融合研究を進めることができました。通常の地震・スロー地震・微動の検出や地球内部構造のトモグラフィ・解析など多数の新手法を開発し、今日はその研究者たちの生の声を聴けるので非常に楽しみです。このプロジェクト終了後も引き続き、日本の地震学×情報科学の研究の先駆的役割を期待します。

iSeisBayes 発足の背景とその成果

長尾大道

東京大学地震研究所 准教授

2002年京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻修了。理学(博士)。日本原子力研究開発機構客員研究員、海洋研究開発機構研究員、統計数理研究所特任准教授を経て、2013年より現職。専門は統計学・情報科学・数理学と固体地球科学の融合研究。



平田先生より、近い将来、必ず到来する地震超ビッグデータ時代に相応しいデータ解析アルゴリズム開発を始めたいとのご相談を受け、2017年10月にiSeisBayesを発足させました。長尾が兼担する大学院の東大情報理工の駒木先生のご協力を賜り、また2020年4月からは東北大の野々村先生にご参画頂き、3つの研究機関の協働による強力な研究体制を構築することができたことは、本当に幸運だったと思います。

地震学と統計学・応用数理学の専門家の緊密な連携により、地震観測点自動選択、地震波・低周波微動自動検出、地下内部構造・ダイナミクス推定、余震活動推定、地震波動場再構成といった地震学における重要なテーマに関するアルゴリズムを開発し、それらの一部を現行の地震連続データ処理システムに組み込むことにより、将来のインテリジェント地震波動解析システム構築に向けた第一歩を踏み出すことができました。

iSeisBayesに地震学と統計学から多くの若手研究者が参加し、それぞれがキャリアアップしたことは、わが国の地震学にとって大きな財産であると思っています。また、2017年頃から世界的に急進している「情報×地震」分野の潮流を機敏にとらえ、わが国における先駆けプロジェクトとして同分野を牽引したことは、iSeisBayesの大きな業績です。文部科学省STAR-Eプロジェクトや科研費学術変革領域研究(A)SF地震学の情報科学班などの後継プロジェクトに、iSeisBayesの志の継承を託したいと思います。

研究領域研究総括の挨拶



雨宮慶幸 研究総括(高輝度光科学研究センター 理事長)

「言うは易く行うは難し」の融合研究において、この5年半、実にさまざまな成果をあげてこられました。とりわけ若手研究者の発掘や育成において、プロジェクトに関わった方たちが、期間中に新たなポストを得るなど、活躍の場を広げられていることを喜ばしく思っています。ここまでの成果を一つのステップとして、後継プロジェクトでも研究をさらに発展させていかれることを期待しています。



北川源四郎 副研究総括(東京大学 数理・情報教育研究センター 特任教授)

iSeisBayesは、地震という社会的にも重要な分野を取り扱っているだけでなく、次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合により地震研究の未来を拓くという、まさに地震学の社会的使命を一身に背負うようなプロジェクトで、私たちが大変期待していました。5年後、10年後、さらにその先の未来に、ここが地震学にとってのターニングポイントだったと振り返られるよう、引き続き、研究に進捗してください。

プロジェクト終了にあたっての言葉



平田 直 研究代表者(東京大学名誉教授)

今回、当プロジェクトで皆さんが成し遂げられた成果は、この先、世界の研究最前線でも通用する非常に重要な出発点になったと思っています。ただし、競争は激しいです。ほんやりしていると、あっという間に追い抜かれるということは忘れてください。そしてもう一つ、留めておいてほしいのは、ここで生まれた異分野の研究者同士のネットワークは本当に貴重なものだということです。今後ともぜひそれを活かして研究を進めていただきたいと思います。



駒木文保 主たる共同研究者(東京大学情報理工学系研究科)

プロジェクト開始当初は、地震研にも頻りにきていましたが、途中からコロナの影響で、ほぼオンラインでのやりとりになってしまったので、今日は久しぶりに皆さんと顔を合わせて話ができて、懐かしい気持ちになりました。iSeisBayesへの参加をきっかけに活躍をはじめられた若手研究者の皆さんが、この先、ますます世界の潮流となっていくであろう地震学×情報科学×統計学の融合研究を引っ張っていかれることに期待しています。



野々村 拓 主たる共同研究者(東北大学大学院工学研究科)

3年目から参加させていただき、流体力学分野で開発したセンサ最適化をどうすれば地震学に適用できるか、手探りで研究を進めてきました。当研究室からも優秀な若手研究者たちが参加してくれて、センサ最適化技術の一般化と、それを地震波動場の再構成に利用する一連の研究を地震研グループと共同で進められたこと、そして高速化およびリアルタイム化に関して微力ながら貢献できたことを嬉しく思っています。

地震計測ビッグデータの活用に向けて： 首都圏地震波形データセットの構築

石瀬素子

東京大学地震研究所 特任研究員

岡山大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。博士(理学)。東京大学地震研究所特任研究員、日本学術振興会特別研究員(PD)、同(RPD)を経て、現在、東京大学地震研究所特任研究員。専門は地震学で、地震波異方性の時空間変化に基づき沈み込み帯を研究。



近年における計測技術の向上により、地面の揺れを計測するための専用機器(地震計)以外の計器からも、地震に関するさまざまなデータが得られるようになってきています。また、現在、我が国ではデジタルデータとして地震動を計測していますが、過去には紙や煤書き記録として波形データが取得されていました。さらに、建造物等の被害が記された史料として地震動の記録が蓄積されています。このような多種多様かつ膨大な計測データ(地震計測ビッグデータ)を隈なく活用できれば、大地震の際の被害軽減に役立てられると期待されます。そのため、地震計測ビッグデータを活用するための処理システムや解析手法の構築が、これからの地震学におけるひとつの大きな課題となっています。

これにひとつの解決策を与えるのが、機械学習やベイズ統計学を導入した新しい処理・解析手法の開発です。世界的にも、地震の検知、P波やS波の検測など、さまざまな問題に対して導入が進められています。一方で、開発手法を評価し、その性能を開発手法間あるいは既存手法と比較するためには、基盤となるデータセットが必要不可欠です。そこで本研究では、地震学の基本となる地震検知と検測のための波形解析手法の評価に資するデータセットとして「首都圏地震波形データセット」を作成しました(図2)。「首都圏地震波形データセット」は、首都圏地震観測網(MeSO-net)(図1)で観測された地震データが基になっており、このデータを用いた首都圏下の新たなフィリピン海プレートモデルも提案されています(ishise et al., JGR Solid Earth, 2021)。本稿ではこのデータセットについて簡単に紹介します。

「首都圏地震波形データセット」には、首都圏地震観測網(MeSO-net)(図1)で観測された地震波形記録、およびP波・S波の到着時刻が収録されています。収録期間は2011年9月4日から16日までの13日間です。このデータセットを構築する際には、まず、東京大学地震研究所の現行の自動処理システムを用いて「地震候補事象」の検出を行いました。次いで、目視での判定を実施し、「地震事象(イベント)」と「ノイズ等の事象(ノイズ)」に分類しました。現行の自動処理システムにより検知された「地震候補事象」は6998個です。このうち、正答(実際の地震動記録を「イベント」と判定)は589個ありました。一方、誤検知(「ノイズ」を「イベント」と判定)が10個、見逃し(「イベント」を「ノイズ」と判定)が168事例あることがわかりました(表1)。

目視判定	自動処理	
	イベント	ノイズ
イベント	589	168
ノイズ	10	6231

表1:「首都圏地震波形データセット」における自動処理と目視判定によるイベント検出結果の比較。

加えて、一部の観測点群についてはより詳しい解析を行いました。この観測点群を成田アレイ(図1右)と呼称しています。成田アレイでは可能な限り目視による検測を行い、P波とS波の符号、およびその到着時刻を付加しました(13観測点に対してP波6、481個、S波6,740個)。この成田アレイに関する検測記録と連続波形記録は、「首都圏地震波形データセット」のサブセットとして収録されています。

本プロジェクトでは、地震研グループと情報理工グループとの協働により深層学習を用いた地震検知システムが開発されました(Yano et al., JGR Solid Earth, 2021)。この共同研究において成田アレイのデータセットが活用されています。今後も、「首都圏観測地震波形データセット」が他分野との懸け橋になることが期待されます。「首都圏地震波形データセット」は、Web(<https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/project/iSeisBayes/dataset/>)で公開するとともにBlu-rayディスクを配布しています。

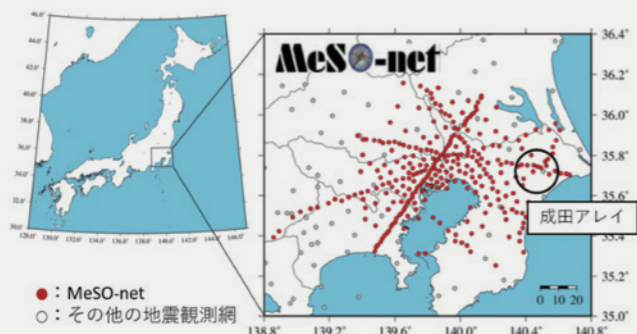


図1: MeSO-netの観測点分布と成田アレイの位置。



図2: 首都圏地震観測網の公開ホームページ(左)と配布版のBlu-rayディスク(右)。

出典: Ishise, M., A. Kato, A. Sakai, S. Nakagawa, and N. Hirata, "Improved 3-D P Wave Azimuthal Anisotropy Structure Beneath the Tokyo Metropolitan Area, Japan: New Interpretations of the Dual Subduction System Revealed by Seismic Anisotropy", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126, e2020JB021194 (2021)

深層学習とスパース推定による 地震・測地イベント検知手法開発 —複数観測点という視点—

矢野恵佑

統計数理研究所 数理・推論研究系 准教授

東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。同大学院助教を経て現職。専門は統計学。



時空間に膨大な地震・測地的な記録から興味のあるイベントを抽出することは地震学における重要な第一歩です。CREST iSeisBayesを通して私は二つのイベント検知手法を開発しました。一つは観測点の空間構造を考慮した深層学習に基づく通常地震の検知法です。もう一つは「スパースモデリング」と「p-値統合法」を用いたゆっくり「滑り」の検知法です。いずれの研究も、「観測点空間的に稠密に配置されている」ことを利用した手法になっています。それぞれについて順を追って説明いたします。

まず一つ目の手法について説明します(図3)。深層学習は今日の事実上のデータ解析の標準手法の一つであり、地震イベントの検出においても国内外で数多くの成功を収めています。しかし、私たちが研究に着手する前は、地震学における深層学習の適用のほとんどは、単一の観測点の波形データのみを利用したものでした。実際の観測波形には地震の他に地表面付近の局所的な環境雑音が多く存在します。そのため、単一の観測点のみで誤検知を抑えるのは限界があります。そこで、私たちは、地震計の空間配置を考慮した畳み込みニューラルネットワークを活用した地震計アレイでの地震自動検知法を開発しました。地震計の空間配置を距離グラフで表し、距離グラフを活用した深層学習器を考えました。数値実験によって、深層学習器の複数観測点への単純な適用や単観測点での深層学習器の適用と比較して、提案手法は高検知率・低誤検知率をもつことが確認されました。提案手法を用いて首都圏稠密地震観測網(MeSO-net)での地震検知を行ったところ、誤検知率を抑えると同時に、人が見落すような非常に微弱な地震信号を捉えることに成功しました。

次に二つ目の手法について説明します(図4)。「ゆっくり滑り」という、断層が数日から数年という長い時間をかけて破壊されずみエネルギーを解放する現象が近年注目されています。というのも、この現象は世界中の構造帯で発見されており、巨大地震が起こる領域を含む周囲の応力環境を理解する手がかりとなっているからです。ゆっくり滑りによる地表の変位は、目で見てわかるほどの明確でないことが多く、S/N比が低い状況でもイベントを検知する高精度な自動検知手法の開発が求められています。私たちは「スパースモデリング」と「p-値統合法」を用いて衛星測位データからゆっくり滑りを自動検出する手法を開発しました。既存手法と比較し、高検知率・低誤検知率をもつことを確認しました。開発手法によって、約2年という短い期間の中に四国西部でこれまでに見つかっていなかった12個のイベントを発見しました。

今回は、私たちが開発した二つのイベント検出技術を紹介いたしました。「複数観測点の情報をうまく活用する」という意識をもって手法開発に取り組んできましたが、iSeisBayesの五年を経て、今ではその意識は地震学におけるデータ解析技術開発において浸透してきたように思います。その間にも地震データは増えており、新たな情報科学技術も増えてきました。iSeisBayesは今年度で終了いたしますが、プロジェクトを通して得た技術・発想・人的ネットワークを活用し、地震学のデータ解析技術の更なる刷新に今後も取り組んでいきたいと思ひます。

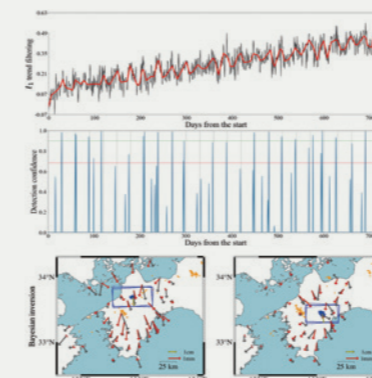


図3: 複数観測点連続波形記録を利用した畳み込みニューラルネットワークによる地震自動検知法。複数の観測の三成分加速度波形を入力とし、地震判定確率・ノイズ判定確率を出力する。さらに、提案手法は観測点距離構造をグラフ分割として取り入れる。出典: Yano, K., T. Shiina, S. Kurata, A. Kato, F. Komaki, S. Sakai, and N. Hirata, "Graph-partitioning based convolutional network for earthquake detection using a seismic array", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol.126, e2020JB020269 (2021)

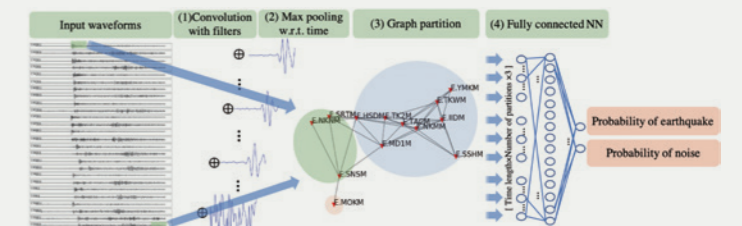


図4: ゆっくり滑り現象の新検知手法。「スパース推定」によって観測時系列に区分線形関数を適合させ、複数観測点を用いて検知確からしさを算出する。新検知したイベントに対して震源の推定と推定不確実性評価などをMCMCを用いて行った。出典: Yano, K., and M. Kano, "11 Trend Filtering-based Detection of Short-term Slow Slip Events: Application to a GNSS Array in Southwest Japan", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol.127, 5, e2021JB023258 (2022)

本震直後における余震の時間分布推定の高度・高速化

森川耕輔

大阪大学大学院基礎工学研究科 講師

2018年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。博士(理学)。日本学術振興会特別研究員DC2、東京大学地震研究所特任研究員、大阪大学大学院基礎工学研究科助教を経て現職。専門は統計学。



本震直後は地震活動が活発になるため、非常に多くの余震が発生します。特に、本震と同程度の比較的大きな余震も多く観測されるため、防災上の観点から“余震活動の特徴”をいち早くデータから推測可能な手法を開発することが喫緊の課題となっています。しかし実際の地震データカタログでは本震直後の余震活動が活発過ぎるため、地震計から正しく余震の数を計測することができず余震の数が過小評価されてしまいます。特に、マグニチュードの小さな余震は見逃される傾向にあり、本震直後にそのようなデータを用いて余震の頻度及びマグニチュードの分布を推定すると、偏りのある推測となってしまいます。そこで余震の到達時刻及びそのマグニチュードに依存した余震の検出確率を導入し統計モデルに組み込むことで、余震数の過小評価によるバイアスを補正可能な推測法の構築をしました。余震の検出確率は未知の関数であるため、モデルの特定を必要としないノンパラメトリックなモデルであることが望ましいです。そのため、本提案手法では余震の検出確率に対し機械学習の分野で近年その予測精度の高さから注目を浴びているガウス過程回帰を利用することで、余震の検出確率を高精度に推定しました。

ガウス過程回帰とは、回帰関数をベイズ的かつノンパラメトリックに推測する手法です。回帰関数とは、説明変数 X と目的変数 Y に対し、入力 $X=x$ を与えた下での Y の条件付き期待値 $f(x)=E(Y|X=x)$ を値として持つような関数です。ここでは、関数 f の推定が目的となります。ガウス過程回帰では、関数 f の事前分布に関数の確率分布であるガウス過程を、目的変数の誤差に正規(ガウス)分布を仮定します。その際、両者のガウス性により、事後分布及び予測分布が積分計算を必要とせず解析的な計算が可能になります。また、予測分布は関数値のみならずその分散も推定可能であるため、未知関数 f の不確実性の推定も可能となります(図6)。

本研究では、ガウス過程回帰を用いて余震の検出確率をモデリングしました。通常のガウス過程回帰では出力 Y の誤差分布と未知関数 f のガウス性から積分計算が必要となりますが、本設定下では誤差分布は正規分布に従わず、推定量の予測分布を計算するためには積分計算が必要となります。しかし、検出関数をうまく構成することで、必要な積分計算は打ち切り多変量正規分布という比較的計算しやすい分布での積分のみが必要となることが分かりました。そのため、Morikawa et al., GJI, 2021ではMCMCとデータ拡大法を組み合わせることで、直接積分計算を必要としないパラメータ推定アルゴリズムを開発しました。計算時間に1日程度は必要となりますが(図7)、高い推定精度を保ちつつ、興味のある推定量の区間推定だけでなく検出確率に対しても信用区間が導出可能となります。1つ目の性質より、2004年中越地震のような非常に振動が多い検出関数も推定可能です(図6)。2つ目の性質から推定量の信用区間も分かるため、余震活動や余震の検出確率が急激に変化した時刻を統計的に捉えることができます。

しかし、提案したアルゴリズムではパラメータ計算に膨大な時間を要します。そこで、Pairwise尤度関数という擬似尤度関数を用いて、必要な打ち切り多変量正規分布の次元を n から2次元まで大幅に削減することに成功しました。例えば、2004年中越地震に対するパラメータ推定では1日程度要していた計算時間が数秒まで削減可能となりました。現在、このPairwise尤度関数を用いたパラメータ推定法に関する理論結果をまとめ、論文化を行っています。今後の課題としては、検出確率をノンパラメトリックモデルに“丸投げ”するのではなくETAS(Epidemic-Type Aftershock Sequence)モデルのような少ないパラメータで地震現象を十分表現可能なパラメトリックモデルを構築することです。本研究プロジェクトで培った知識や人脈を元に、引き続きこのような地震学における重要な課題の解決に尽力していきます。

出典: Morikawa, K., H. Nagao, S. Ito, Y. Terada, S. Sakai, and N. Hirata, "Forecasting temporal variation of aftershocks immediately after a main shock using Gaussian process regression", Geophysical Journal International, 226, 1018-1035 (2021)

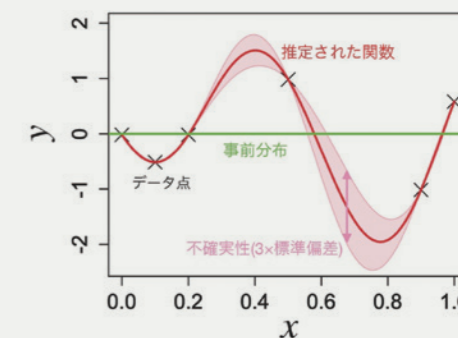


図6: 6点のデータ(×印)に対し、事前分布(緑色)を恒等的に0とした場合のガウス過程回帰で推定された回帰関数(赤色)および標準偏差の3倍で計算されるその不確実性(桃色)。

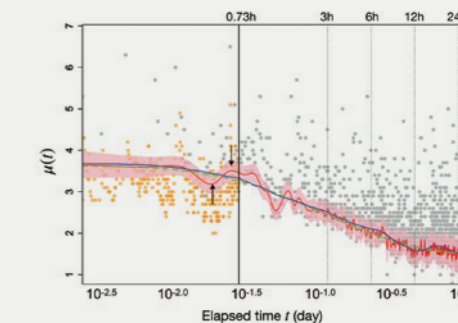


図7: 2004年中越地震の気象庁の地震カタログ(灰色)に対し、各時刻 t で50%の確率で検出するのに必要な余震のマグニチュード $\mu(t)$ を推定した結果。橙色の余震は京都大学のEnescu教授から提供していただいたHi-netの地震カタログから目視で確認された余震、先行研究1(青色)、先行研究2(緑色)、提案手法(赤色)、提案手法の99%信用区間(桃色)である。

新たな微小地震検出手法の開発

相互情報量を用いたマッチドフィルタ法による
深部低周波地震の検出

栗原 亮

神奈川県温泉地学研究所 技師

東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。博士(理学)。東京大学地震研究所特任研究員を経て、神奈川県温泉地学研究所で火山性地震やプレート沈み込みに伴う地震の研究を行う。低周波地震など微小地震の解析が専門。



高性能で稠密な地震観測網の整備が進み、地震の検知数は年々増加しています。その中で、近年ではスロー地震など旧来の観測では検知が難しかった微小地震の検出ができるようになってきました。さらにマッチドフィルタ法や機械学習といった過去の地震観測記録を用いて、それに類似するイベントを自動で検出する手法が開発され発展したことで、これらの微小地震の活動履歴がわかるようになり、スロー地震からプレートの変動の様子を把握する技術、あるいは火山性の微小地震の活動から火山活動を捉える技術が整いつつあります。

しかし、これらの微小で大量地震の起こるケースでは、現在の観測網の性能・密度であってもまだ十分な数の観測点で捉えられず、1観測点でしか観測できないような小さな地震が多発することもあります。地震データには多数のノイズも含まれるため、マッチドフィルタ法や機械学習を用いても1観測点のデータでこれらの検出を行うのは困難でした。本研究では、1観測点のみでの検出可能性を探るべく、マッチドフィルタ法を1観測点のデータに適用した場合の精度向上を目指しました。

本研究では、検出に用いる指標に注目しました。マッチドフィルタ法は検出のための指標として相関係数を利用し、複数観測点の場合はその和を使うことが一般的でした。しかし、1観測点のみを使う場合、地震波形の位相が合うと相関係数が大きくなることから、誤検出が増加するという問題がありました。そこで、本研究では、相関係数だけでなく波形同士の相互情報量を計算し、相関係数と相互情報量の積を指標とすることで検出精度が高まることがわかりました。そこで、この手法を霧島山の火山性深部低周波地震に適用し、従来手法との比較や目視による波形の確認を行いました。

その結果、従来手法で6観測点を利用した場合の精度には多少劣るものの、1観測点の手法によって、従来手法では検知されなかった深部低周波地震の検出も可能になるという結果が得られました(Kurihara et al., JGR Solid Earth, 2021)。また、検出に至る信号に対応してこの指標は相当大きくなることから、検出の閾値をどう設定するかによって検出精度は変化しますが、従来指標に比べてその変化が鈍くなり、閾値の設定で精度が低下しにくいというメリットもあります。そこで、従来の研究でよく判明しなかった2017-2018年の霧島山噴火の前後期間における深部低周波地震を新手法で検知し直したところ、この期間の地震数は多くないものの、群発地震の発生が2017年3月と7月に観測されました。この時期はそれぞれ地表面で噴気孔の出現があった時期および地殻変動が開始した時期に対応することから、これらの火山活動の進行に同期して群発的な深部低周波地震が起きていることが明らかになり、火山の噴火メカニズムの理解へ貢献することができました(図5)。

この手法は深部低周波地震のような微小地震を対象として開発しましたが、例えば大規模地震に後続する余震の分析においては、短時間に大量の地震が集中して発生し、さらに地震計が地震による停電で停止してしまうことがあるなどの理由で十分な検出ができない場合があります。そこで、本手法の使用する波形の帯域等を変更し、2004年の新潟県中越地震(M6.8)の余震検出を試したところ、本震発生から6時間で約2000個、30時間で約5000個と大量の地震の検出ができました。精度面での改善の余地は残っているものの、地震発生数をカウントする手法としては有力であることがわかりました。

本プロジェクトを通じて、統計学を利用して地震解析の機械化することの重要性に気が付くと同時に、地震データには多様なノイズや欠測が含まれることから、元の波形のうち必要な情報をどう抽出するかという課題にはまだまだ困難な部分もあると思いました。本プロジェクトが終了した以降も、別のプロジェクトにおいても統計学と地震学の融合がテーマになっており、今後も各種技術の開発が進んでいく中において、私も微小地震の検出や震源決定といった領域で貢献していきたいと考えております。

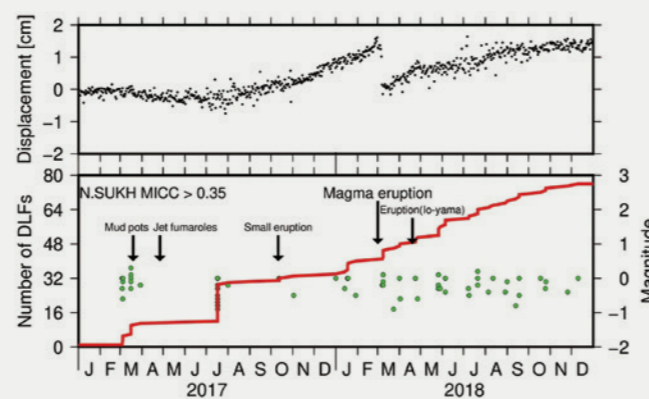


図5: 2017-2018年の霧島山の噴火前後の期間における、地殻変動の推移(上段)および本研究により作成したカタログに基づく深部低周波地震の発生数の推移(Kurihara and Kato, 2022より一部抜粋)。噴気孔の出現はTajima et al., Geosciences, 2020に基づく。出典: Kurihara R., A. Kato, S. Kurata, and H. Nagao, "Detection of low-frequency earthquakes by the matched filter technique using the product of mutual information and correlation coefficient", Earth Planets Space, Vol. 73, 225 (2021) 出典: Kurihara R. and A. Kato, "Deep low-frequency earthquake activity associated with the 2018 eruptions in the Kirishima volcanic complex, Japan", Earth Planets Space, Vol. 74, 174 (2022)

小さな地震から知る

地震の正体

吉光奈奈

京都大学大学院工学研究科 助教

立命館大学大学院理工学研究科 博士課程後期課程修了。博士(理学)。Stanford University 研究員、東京大学地震研究所・特任助教を経て、2021年より現職。岩石実験、誘発地震等の微小地震の震源の物理や波動伝播の解析が専門。



地震による断層すべりの際に解放される力(応力)の大きさは応力降下量と呼ばれ、将来発生する大地震の震動規模を予測する解析や、地震がどのような環境下で発生するかを調べる地震発生物理の研究にとって重要な値です。しかし、応力降下量の推定精度は不安定であり、得られた値の解釈に課題がありました。我々は伝統的な推定手法とは異なる統計学的手法を導入することで、推定精度の評価ができないか考えました。応力降下量のような地震の震源特性を表す値は、「震源パラメータ」と呼ばれ、地震波形のスペクトルから推定されます。震源パラメータには、地震の規模を表す地震モーメントや、断層すべりを特徴づけるコーナー周波数という値があり、それぞれ変位波形スペクトルの低周波部分の振幅と、スペクトルの折れ曲がり位置から推定されます。応力降下量も震源パラメータの一種として取り扱われ、前述の地震モーメントとコーナー周波数から推定する理論式が過去の研究によって提案されています。近年の応力降下量推定研究においては、震源位置が近接した大小ペアの地震のスペクトル比を計算し、理論モデルスペクトル比と観測スペクトル比の比較を通して応力降下量の算出に必要な(1)地震モーメント比、(2)マグニチュードの大きい地震のコーナー周波数、(3)マグニチュードの小さい地震のコーナー周波数の3つの震源パラメータを求めます。震源から地震計のある観測点までの波の伝播経路は、観測点ごとに異なっており、ほとんど同じ伝播経路を持つイベントの同じ観測点ごとのスペクトル比を取ることで、伝播経路の影響を打ち消すことができることが知られており、本研究でもコーダ波のスペクトル比を利用します。

従来の震源パラメータ推定は、グリッドサーチを使って未知変数を推定するのが主流でしたが、計算が非効率的である点や、誤差の評価が難しいなどの課題がありました。本解析では統計学的手法により確率情報を持つサンプリング分布を計算の確からしさの評価に使用できないかと考え、マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)を応用した統計学的手法を導入しました。MCMCによる解析では、その計算過程で尤度を求めるために確率密度関数を設定します。応力降下量推定のためにMCMCを用いた研究は過去に数例ありますが、それらの研究は確率密度関数に正規分布を利用していました。

しかし、正規分布の仮定に理論的裏付けはなく、我々は本解析のような比の計算を行う際には、比の形式を持った確率密度関数であるF分布を用いる方が良いのではないかと考えました。まず、模擬スペクトルを使って2種類の確率密度関数を併用して震源パラメータ推定の解析を行った結果、正規分布を仮定した場合に比べF分布を仮定した際の方が計算時に得られるサンプリングのばらつきが小さく、安定的に震源パラメータが計算できる傾向がみられました(図8)。さらに、米国において観測されたマグニチュード1から4程度の地震記録を用いて、実記録にデータが適用できることを確認しました。解析時のサンプリングの分布形状から、パラメータ間の推定トレードオフの大きさや傾向が確認されました。この際に、サンプリング分布の傾向が他のイベントと外れるものは元データのクオリティに問題があり、解析に適さないことが明らかになりました。つまり、サンプリング分布の傾向がイベントの選別に利用できるということであり、ノイズの大きさ以外の観点から解析データを選別することができるようになりました。

応力降下量は、地震発生の物理について深く知るといふ学理的な目的だけではなく、政府の地震発生時の震動予測などの実務にとっても重要な値であり、F分布を用いることでより物理的に裏付けのある解析をすることができるようになりました。

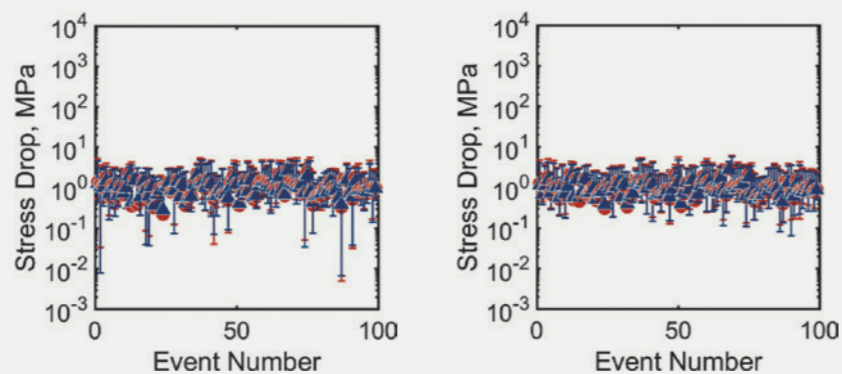


図8: 確率密度関数として(左)正規分布、(右)F分布を用いてシミュレーションイベントスペクトルから応力降下量の推定をおこなった結果。
出典: Yoshimitsu, N., T. Maeda, T. Sei, "Estimation of source parameters using a non-Gaussian probability density function in a Bayesian framework", Earth, Planets and Space, Vol.75: 33 (2023)

地下の速度構造変化を捉える

スパース正則化を用いた

地震波速度トモグラフィ

倉田澄人

九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所 助教

大阪大学 基礎工学研究科 博士後期課程修了。博士(理学)。日本学術振興会特別研究員 DC1、東京大学 情報理工学系研究科 特任研究員・特任助教を経て、現在は九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所 助教。統計学、特にモデル選択・ロバスト統計が専門。



「地震波速度トモグラフィ」は、地震の波が震源から地表の観測網へ到達するまでに要した時間を入力として、地下のどこをどんな速度で伝播するかを構造(地震波速度構造)を出力する手法です。本研究では、特に急激な速度構造変化に対する検出能力に焦点を当て、統計学・機械学習の分野で広く活躍しているスパース正則化を地震波伝播の特徴に即した形で導入し、精度を向上させることを目指しました。

一般に、地中の速度構造は深さに応じて変化することが知られ、従来法の多くはそれを反映するように設計されています。しかし地球内部には、コンラッド面やモホロビッチ面等の「速度不連続面」を筆頭に、急峻に速度構造が変化する領域が指摘されており、従来法ではその急変に対応し切れない傾向があります。地球内部のどこにどんな構造変化があるかについては未知の部分が多く、急激な変化がある場所を事前情報として与えるという対処には現状だと限界がありますので、構造変化の有無に拘わらず高い精度を発揮できる手法の構築は地球内部構造の理解において大きな意義を有しています。加えて、現実の分析においては潤沢に到達時間のデータ数が得られている場面は決して多くない為、普遍的に観測されるP波・S波の情報のみから検出することは重大な課題です。

本研究では、地下の対象領域にグリッド点を仮定し、個々に速度パラメータを与えることで領域の構造を表現するというモデルを採用しています。パラメータ推定にあたっての最適化(最小化)対象は、グリッド点を用いたモデルから計算される予測到達時間と観測到達時間に対する残差平方和となります。従来は残差平方和にパラメータの変化に対して罰則を与えるDLS法と呼ばれる手法や、ラプシアンを用いた正則化が広く用いられてきました(Moran et al. JGR Solid Earth, 1999 等)。また近年、データが持つスパース性を活用した手法が多くの分野で研究・応用されており、トモグラフィの分野にも導入されてきました(Zhang et al., Journal of Applied Geophysics, 2014 等)。なお、地球内部では急峻な構造変化は深さ方向において多く認められている一方、水平方向の構造変化は比較的滑らかであるということが数多くの観測を通じて知られていますが、従来法の多くはこの傾向を充分には実装できていません。そこで本研究では、このような地球科学的見地を反映すべく、深さ方向と水平方向に対して別種の罰則を与えた正則化法を提案しました。まず深さ方向に対しては、深さの層で見た平均速度の二階差分に対して、「 l_2 ノルムの l_1 和」という形を持つ罰則項を与えました。この項は小さな速度勾配の変動を縮小し、深さ方向で見た平均速度に区分線形的な傾向を与えることによって、急峻な速度変化の生じている深さを強調します。また水平方向には、隣接したグリッド点の一階差分に対して l_2 ノルムに基づくペナルティを与え、滑らかな速度変化を表現することを試みました。二種類の罰則項を適切に組み合わせることで、滑らかな速度変化への対応力を有しつつ、急峻な構造変化領域のイメージングを限られた数の観測から高い精度で実現します。これらの両立は、より精緻な地球内部構造モデルの構築に繋がると期待されます(Yamanaka et al., EPS, 2022)。

以上の提案手法が従来のトモグラフィよりも精度良く速度構造を推定できることを、ある深さで平均伝播速度が大きく増大する設定や、傾斜した構造変化領域がある設定、局所的に異常な速度を有した帯域が存在する設定等、多様な想定を置いた数値シミュレーションを通じて確認しました。更に提案手法を2005～2014年に日本中部地方で実際に発生した地震の直達P波読み取りデータに基づいた分析に応用したところ、深さ15km付近に速度不連続面と解釈できる構造変化、並びに傾斜した低速度領域が検出されました(図9)。本分析で用いた読み取りデータは従来法の枠組みで考えるとパラメータ数が過剰な設定ですが、提案手法が推定した構造特徴は、大標本を用いた探査(Iidaka et al., Geophysical research letters, 2003; Matsubara et al., in "Seismic Waves - Probing Earth System", 2019 等)と概ね符合しています。同設定の分析で、従来法やスパース性を持たない正則化法では妥当性のある結果は得られず、提案手法はかなり少ないデータ数から構造変化の検出に成功したと結論付けられます。

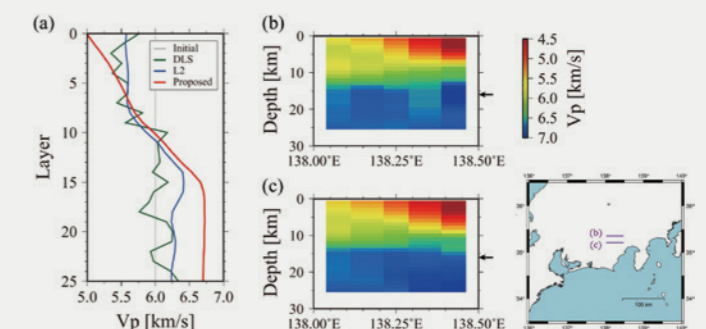


図9: 日本中部地方のP波速度の推定結果。(a) 従来法(DLS)、スパース性を持たない正則化法(L2)と、提案手法(Proposed)による深さ方向の推定平均速度。縦軸は深さ(km)、横軸は平均速度(km/s)。(b)-(c) 提案手法によって推定された水平方向の速度構造(右下図に示す緯度における断面図)。

出典: Yamanaka, Y., S. Kurata, K. Yano, F. Komaki, T. Shiina, and A. Kato, "Structured regularization based local earthquake tomography for the adaptation to velocity discontinuities", Earth, Planets and Space, Vol.74: 43 (2022)

データ同化を用いた 地震波動場イメージング

加納将行

東北大学大学院理学研究科 助教

京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻 博士後期課程修了。博士(理学)。日本学術振興会特別研究員DC1、東京大学地震研究所特任研究員を経て、現在東北大学大学院理学研究科助教。海洋研究開発機構招聘研究員、統計数理研究所外来研究員も務める。地震学・測地学が専門。



巨大地震発生時の都市部における建造物の揺れの即時評価は、建造物の被害推定だけでなく、地震後の迅速な復旧活動や二次的な災害の軽減に繋がります。建造物の揺れの計算には、建造物直下における地震動を与える必要がありますが、都市部に密集するすべての建造物において地震動を直接観測することは困難です。従って、限られた地震観測“点”で得られる記録を用いて、できるだけ正確かつ迅速に“面的な”地震波動場を再構成する「地震波動場イメージング」手法の構築が必要となります。この際得られる地震波動場は、建造物の地震応答の評価だけでなく、地震発生時の強震動の把握や、地震波が伝播する地球内部構造の理解、複雑な媒質中を伝わる地震波伝播の特微量や励起源である震源情報の効果的な抽出にも有効となることが期待されます。

関東地方では、首都圏の地震像の解明を目的として、首都圏地震観測網(MeSO-net)が整備されています。都心部を中心に数km間隔で約300点の地震計が設置されており、稠密な地震観測網の一つです。我々のグループでは、首都圏に被害をもたらすような地震動が発生した際に、MeSO-netの観測記録を用いることを念頭に、地震波動場イメージング手法の開発を行いました。

開発手法は、地震波が従う波動方程式を物理的拘束条件とし、計算される理論波形が観測波形を定量的に説明可能なように、波動場を再構成するデータ同化手法です。この際、地震波伝播の計算に必要な地下構造と震源に関するパラメータの最適化を通して、理論・観測波形と一致度の向上を実現します。最終的に推定されたパラメータを用いて波動方程式を解き、任意の場所の地震動の計算、すなわち地震波動場イメージングを行います。

地下構造と震源情報のパラメータの最適化にはレプリカ交換モンテカルロ(REMC)法を用います。REMC法は未知パラメータの確率密度関数から実現値を得るマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)法の一つで、MCMC法の中でも一般的なメトロポリス法に比べて、効率的に広範囲のパラメータ探索を行うことが可能なため、パラメータが複数の局所的な解を持つ場合に強力です。地震波動場イメージングは複数の局所的な解を持つ例であり、REMC法が有効であると考えられます。

まず関東地方の地下を近似的に3層+半無限の水平成層構造で仮定し、擬似的に作成した波形を用いて開発手法の有効性を確認しました(Kano et al., GJI, 2017)。特に従来の観測記録のみから内挿を行うクリギングと比べて、REMC法は波動方程式や地下構造・震源情報といった物理的拘束条件を課すことで、約4秒より短周期の波動場のより正確な推定が可能となりました。

次に2014年9月16日に茨城県南部で発生したマグニチュード5.5の地震に対して、MeSO-netの観測記録にREMC法を適用しました(図11)。その結果、高層建築物で卓越する周期5-10秒の長周期地震動に対し、観測波形を説明可能な地震波動場のイメージングに成功しました。また、地震時の建造物の揺れの応答の簡易評価に用いられる速度応答スペクトルを、観測波形と推定された理論波形それぞれに対して計算し、周期約1秒より長周期帯において速度応答スペクトルを再現しました。以上より、開発手法は波動場推定の観点では周期約3秒より、建造物応答評価の観点では周期約1秒より長周期の地震波動場イメージングが可能であることを示しました。

本CREST課題では本研究以降も観測データのみを用いた波動場推定の高度化(Shiina et al., SRL, 2021)や、波動場推定に有効な観測点選択手法の開発(Nagata et al., GJI, 2023; Nakai et al. in revision)など、様々な地震波動場イメージング手法の開発が行われています(本ニュースレター P11-13参照)。将来的にこれらの手法が地震発生時の即時的な被害推定や二次災害の軽減への貢献が期待されます。

本CREST課題において地震学者のみならず統計学が専門の多数の研究者と交流を通して、共同研究の実施や研究の幅が広がりました。私が、本課題とも関連する文部科学省「情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト」(STAR-Eプロジェクト)の複数課題に参画し、特に東北大学課題で研究代表者として研究を遂行できているのも、本CRESTで得られた貴重な人脈や知識のおかげです。改めて課題代表の平田先生はじめプロジェクト運営に関わってくださった多くの関係者の皆様に感謝申し上げます。

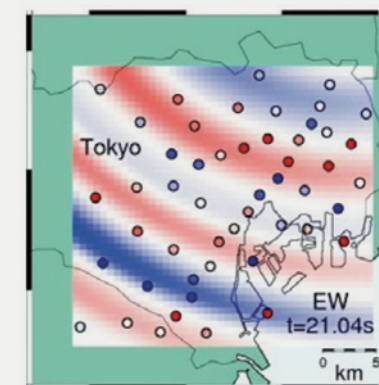


図11:首都圏地震観測網を用いた東京23区を対象とした波動場イメージングの適用例。MeSO-net観測点(丸印)で得られた地震動記録から地震波動場の再構築を行いました。
出典: Kano, M., H. Nagao, D. Ishikawa, S. Ito, S. Sakai, S. Nakagawa, M. Hori, and N. Hirata, "Seismic wavefield imaging based on the replica exchange Monte Carlo method," Geophysical Journal International, Vol. 208, Iss 1, pp.529-545 (2017)
出典: Kano, M., H. Nagao, K. Nagata, S. Ito, S. Sakai, S. Nakagawa, M. Hori, and N. Hirata, "Seismic wavefield imaging of long-period ground motion in the Tokyo metropolitan area, Japan," Journal of Geophysical Research, Vol. 122, pp. 5435-5451 (2017)

大規模データ同化に基づく スロースリップ断層摩擦特性 空間分布不確実性の高解像評価

伊藤伸一

東京大学地震研究所 助教

2015年大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻博士後期課程修了。博士(理学)。日本学術振興会特別研究員DC2、東京大学地震研究所特任研究員を経て2018年より現職。専門は統計物理。破壊現象の物理とその解析技術開発に関する研究をしている。



地震は断層に破壊が発生しすべることによって発生しますが、その運動形態は断層面に発生する摩擦力の空間分布に大きく依存します。そのため、摩擦力の空間分布の詳細を調べることは複雑な断層運動の物理的な理解へ向けた重要な課題となります。地下深部の断層を直接見て調べることは困難なので、取得可能な限られた観測データを使って、「現実には観測されている運動が実現されるには摩擦力の空間分布はどうあるべきか」を推定し、さらに、その不確実性の空間分布を評価することで、「主要な運動に寄与している場所はどこか」を推定する必要があります。これらを達成するために地震のシミュレーションモデルとベイズ統計学を合わせたデータ同化などの手法が近年利用されつつありますが、地震のモデルは一般に規模が大きく、既存のデータ同化法では「次元の呪い」により計算が大規模化し推定が困難になるとい問題がありました。この計算量的困難さは推定したい摩擦力の空間分布の解像度を制限してしまうので、本来あるべき摩擦力の空間分布の構造およびその不確実性の評価を達成するための新しい手法の開発が求められています。

本プロジェクトでは、(1)数値解析の理論に基づいたシンプレクティックアジョイント法と呼ぶ新しいデータ同化手法の開発(Ito et al., BIT Numer. Math., 2021)と(2)スロースリップ断層運動モデルへの適用を通じて断層面内摩擦力の空間分布の不確実性を高解像・高精度に評価する手法の開発(Ito et al., GJI, 2023)を行いました。

研究(1)ではアジョイント法と呼ばれるアルゴリズムの数学構造の観察からその高度化に成功しました。データ同化の分野におけるアジョイント法は事後分布の微分を数値的に計算するアルゴリズムで、得られる微分を利用して事後分布の最大解やその不確実性の評価を可能にする手法です。この手法はアジョイント方程式系と呼ばれる時間発展方程式群を時間逆方向に数値積分することで多変数の微分を高速に求めることができるため大規模なモデルでのデータ同化で利用され、近年の深層学習で用いられる誤差逆伝播法とも非常に関連が深く、固体地球科学分野に限らず気象・海洋・工学・生物など様々な科学分野で利用されています。本研究ではアジョイント方程式系の数値幾何構造に着目し、系にある種の時間保存量が普遍的に存在することを示し、その保存量を数値的に時間不変にするようにアジョイント方程式系の時間積分法を設計することで、アジョイント法で得られる諸量を数値誤差なく厳密に計算するアルゴリズムに高度化しました。本手法は対象が時間発展微分方程式で表現できる限り適用することができ、広い適用範囲で利用可能な手法となっています。

研究(2)では豊後水道スロースリップ発生域を模擬した大規模な地震断層運動モデルへ(1)で開発したデータ同化法を適用し、スロースリップ運動の原因となる断層面内摩擦力の空間分布の不確実性を高解像・高精度に評価する手法を開発しました。本研究で扱った断層運動モデル(図10上)は大規模自由度の非線形時間発展モデルであり、既存の統計手法では計算量的観点から詳細な解析が困難でしたが、(1)で開発した手法により可能となりました。図10下は擬似的な実験データに本手法を適用して得られた摩擦パラメータ空間分布の不確実性を示しています。仮定した摩擦パラメータ空間分布自体は単純でもその不確実性は複雑なパターンを形成している様子が本手法による高解像化により明らかになりました。本手法により解像度を大きく向上させた不確実性詳細構造の評価が現実的な計算量で可能となったことで、地震運動の物理的理解への一助となるだけでなく、推定される詳細な不確実性の構造と運動の比較に基づいた効率的なデータ取得の指針へのフィードバックなど、実用的な問題への貢献も期待されます。

本プロジェクトで開発された手法は現在、実データへの適用が進められているほか、地震断層運動だけでなく様々な物理対象への応用展開が始まっています。本プロジェクトで関わった方々とのディスカッションを通じて研究が洗練されました。ここに御礼を申し上げます。

豊後水道スロースリップ発生域の断層運動モデル

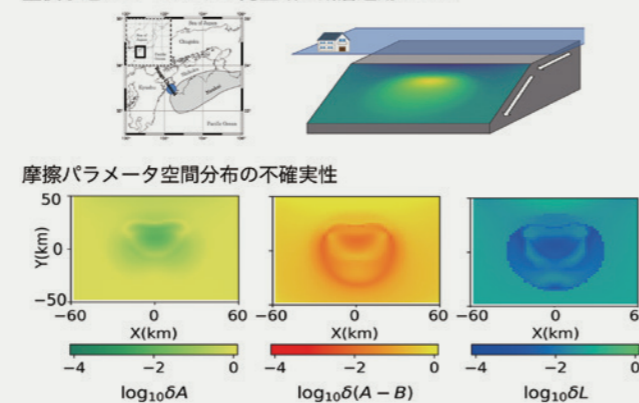


図10: (上)豊後水道スロースリップ発生域とその断層面内のすべり運動を模擬した断層運動モデル。(下)断層運動モデルの数値計算によって得られたすべり速度の擬似データに提案手法を適用して得られた摩擦パラメータ空間分布の不確実性。
出典: Ito, S., T. Matsuda, and Y. Miyatake, "Adjoint-based exact Hessian computation," BIT Numerical Mathematics, Vol. 61, pp. 503-522 (2021).
出典: Ito, S., M. Kano, and H. Nagao, "Adjoint-based uncertainty quantification for inhomogeneous friction on a slow-slipping fault," Geophysical Journal International, Vol. 232, Iss. 1, pp. 671-683 (2023)

プロセス駆動型地震波動場再構成 に向けた観測点選択手法の開発

中井公美

産業技術総合研究所
省エネルギー研究部門 研究員

東京農工大学大学院工学府 機械システム工学専攻 博士後期課程修了。博士(工学)。日本学術振興会特別研究員DC1、東北大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻 学術研究員、特任助教を経て現職。専門は流体工学、放電プラズマ工学。



地震超ビッグデータ時代の到来に先駆け、時空間に膨大な地震波形データを効率的に活用するための「観測点選択技術」の開発が重要課題の一つです。日本には2000点以上の定常地震観測点が稠密に設置され、地震波形データが常時計測されています。大地震発生時には、それらの計測データに基づき緊急地震速報や構造物の被害推定が行われます。観測点選択技術は、定常地震観測点の増設や大地震発生時の臨時観測網の設置における地震計の最適配置を明らかにすることで、地震発生時の防災・減災ならびに地震現象解明に貢献する技術です。また、大地震発生時の震度分布を十分な精度で推定するために必要な観測点セットを瞬時に選択し、選択的に解析を行うことで初動対応の精度を向上できます。

我々は流体力学分野で近年発展してきたスパースセンシングに着目し、iSeisBayesプロジェクトを通して、地震学への応用を目指したセンサー位置選択手法の開発と、地震波動場再構成のための観測点選択手法を開発しました。スパースセンシングとは、空間的に疎ら(スパース)に配置した少数のセンサーによる計測から、関心領域全体の場を高速かつ高精度に再構成する技術です。

まず、流体場を対象として、スパースセンシングに基づくセンサー位置選択手法の開発・高度化に取り組みました。センサー位置は、センサー位置選択問題の目的関数を適切に設定し、その最適化問題を最適化アルゴリズムにより解くことで決定されます。中でも最適化アルゴリズムに貪欲法を用いたセンサー位置選択手法の開発が活発に取り組まれているが、我々は目的関数が複数ある場合にも適用可能な多目的貪欲法を開発しました。これは、複数の目的関数を同時に考慮する多目的最適化問題を解く貪欲法であり、多目的パレート解に相当するセンサー位置を選択します(図12)。本手法を観測点選択に応用する場合、地震波動場の再構成誤差の最小化だけでなく、観測点ごとの設置コストを目的関数として考慮した観測点選択が可能で

また、センサー位置選択手法を地震波動場に応用することで、プロセス駆動型アプローチによる観測点選択手法を開発しました。本手法では、まず地震動シミュレーションの入力である物理モデルパラメータの高精度推定に適した観測点セットを選択します。具体的には、各観測点候補の推定対象パラメータに対する感度を表す感度行列を作成し、感度行列の特徴量を最適実験計画法におけるD最適指標に基づき貪欲法により評価することで、パラメータ感度の高い観測点セットを決定します。そして、選択された観測点セットにおける地震波形データに基づき物理モデルパラメータを推定、推定値を用いた地震動シミュレーションを実施し、地震波動場を再構成します。

本研究では、水平成層構造を仮定した地震動シミュレーションを用い、観測点選択および地震波動場再構成の数値実験を、東京23区内のMeSO-net観測点を模擬した観測点群で行いました。推定対象パラメータは各層のP波およびS波の伝播速度および層厚、並びに震源位置座標としました。図13に示すように、本手法は各推定対象パラメータについて各観測点の感度を評価でき、パラメータ感度解析結果に基づき観測点の順位付けを行うことができます。本手法は、パラメータ感度に関する物理的知見の獲得に貢献するとともに、地震の発生域や特性に応じて、波動場再構成への寄与度に基づく観測点の順位付けを行うことができるため、必要な推定精度や観測点数の制限に応じた観測点選択が可能です。

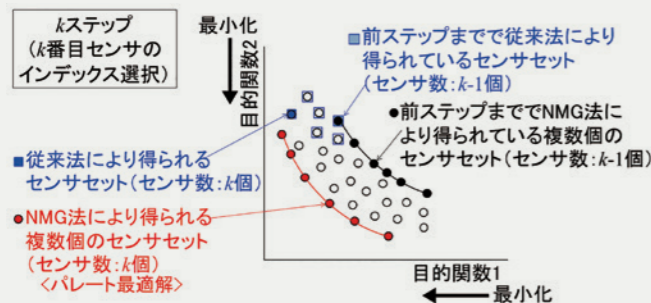


図12: 多目的貪欲法(図中NGM)によるセンサー位置選択の概要。貪欲法はセンサーを一個ずつ選択していく手法である。多目的貪欲法は従来法より目的関数の優れたセンサーセットを獲得できる。出典: Nakai, K., K. Yamada, T. Nagata, Y. Saito, and T. Nonomura, "Effect of objective function on data-driven greedy sparse sensor optimization", IEEE Access, Vol.9, pp.46731-46743 (2021) 出典: Nakai, K., Y. Sasaki, T. Nagata, K. Yamada, Y. Saito, and T. Nonomura, "Nondominated -Solution-Based Multi-Objective Greedy Sensor Selection for Optimal Design of Experiments", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol.70, pp.5694-5707 (2022)

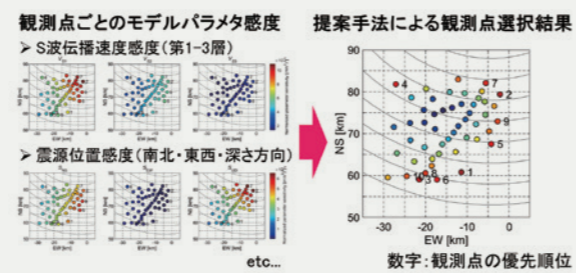


図13: 観測点選択手法による解析結果。提案手法はモデルパラメータに対する観測点候補ごとの感度(左)に基づき、観測点候補の優先順位付け(右)が可能。出典: Nakai, K., T. Nagata, K. Yamada, Y. Saito, and T. Nonomura, "Observation Site Selection for Physical Model Parameter Estimation toward Process-Driven Seismic Wavefield Reconstruction", arXiv:2206.04273 (2023)

主成分分析による地震波動場の データ駆動型低次元モデルの 構築と波動場の即時再構成への応用

永田貴之

東北大学工学研究科 航空宇宙工学専攻 特任助教

東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 博士後期課程修了。博士(工学)。日本学術振興会特別研究員DC2、同大学院博士研究員を経て、現職。専門は流体力学。



震度分布は大地震発生時の被害推定に重要な情報であり、高速・高精度での詳細な震度分布の推定は初動対応の精度を大幅に向上します。例えば、家屋や橋などの構造物ごとに被害の推定ができれば、現地調査を行うことなく迅速に初動対応のリソース配分やその投入ルートを決

定でき、航空機等による観測に制限がある夜間や荒天時などにおいても迅速に救助活動等を開始できるようになります。日本では、稠密に設置された地震計により地域ごとに一定の範囲における揺れの強さを常時監視・記録しています。大地震発生時にはそれらのデータを用いて緊急地震速報や被害予測を行い、防災・減災に役立てられています。一方で、家屋や橋などの構造物単位での被害推定には非常に高い解像度で揺れの強さの分布を得る必要がありますが、高密度な地震観測網を有する日本でさえ数kmから数十km間隔での観測です。地震波は低周波数から高周波数の範囲の波が複雑な地下構造の影響を受けながら伝播するため、観測点の情報を最大限に利用する新たな技術を開発する必要があります。

本研究では、流体力学分野で近年発展してきた「たまばらな計測から関心領域全体の状態を推定する技術」を応用し、高解像度な時系列波動場を低コストに再構成する手法を構築しました。計測が存在しない場所での情報を得る方法の一つに、複数の計測点の情報を併用して補間を行う方法がありますが、計測点密度が低い場合は良い結果は得られません。本研究で応用した手法は、実験や数値シミュレーションで得られる関心領域全体のデータから主成分分析などの特徴量抽出手法を用いて特徴的な空間パターン(空間モード)を取り出します。これを用いて低次元モデルを構築することで、圧倒的に少ない計測からの再構成が可能となります。流体力学分野では、計測点の密度を上げることが難しい手法や高速に変化する現象のリアルタイム状態推定をしたい場合などに威力を発揮しています。

地震現象の場合は実験で事前に波動場のデータを取得することが難しいため、コンピューターシミュレーションを組み合わせました。図14に提案手法の概要を示します。まず、想定震源域と再構成対象領域を設定し、様々な震源パラメータにおける再構成対象領域での波動場を多数ケース計算することで、波動場のデータセットを生成し、そこから低次元モデルを構築します。地震発生時には各観測点で観測された波形と事前に構築した低次元モデルを用いて、波動場を再構成します。低次元モデルの構築のために多数ケースのシミュレーションが必要ですが、一旦モデルを構築すれば波動場の推定は非常に高速に実施できます。低次元モデルは推定対象領域・震源ごとに事前に構築しておき、緊急地震速報の震源位置情報を用いて再構成対象領域ごとに推定に利用する低次元モデルを選択することで、迅速かつ高精度な推定が期待できます。

図15は数値実験で得られたある時刻の南北方向加速度の分布で、正解データおよびガウス過程回帰と提案手法による再構成結果をそれぞれ示します。提案手法に関しては、より少ない観測点の情報から再構成した結果も示します。この際、再構成に適した観測点を貪欲アルゴリズムで選択しました。この数値実験では、観測データに仮想的に非常に強いノイズを加えているため、ガウス過程回帰による再構成では元の波動場の定性的な再現すらできません。一方、提案手法では観測点が少ない場合も含めて良い再構成ができており、ノイズが多い安価なセンサーでの観測情報から再構成する場合や観測点が少ない地域での再構成でも高精度な推定が期待できます。

この手法は事前に低次元モデルを構築する必要がありますが、まばらな観測点の情報から高解像度な震度分布を瞬時に推定し、防災・減災に新しい手段を提供します。また、観測点位置最適化手法も同時に提案しているため、今後観測点を設置する際に波動場の推定誤差を小さくする観測点配置を設計し、その結果を加味した地震計の設置も可能です。

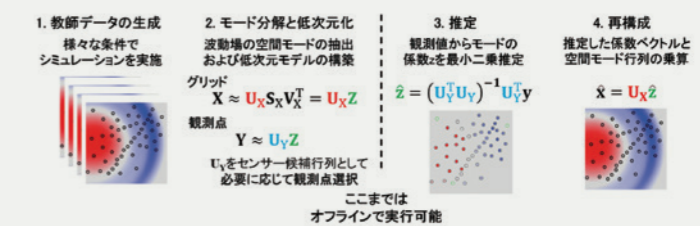


図14: 提案手法の概要。様々な条件でのシミュレーションデータから波動場の空間モード U_X を主成分分析により抽出、空間モードの係数 Z と観測値 Y の関係を表す行列 U_Y も構築する。推定の際は観測点でのデータと低次元モデルを用いて波動場を再構成する。

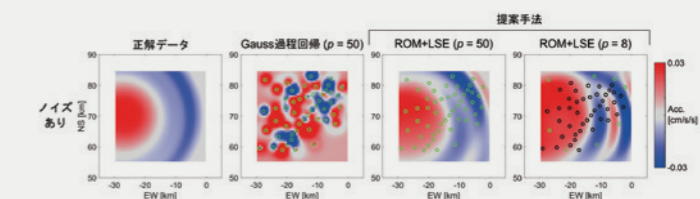


図15: ある時刻の瞬時南北方向加速度分布の正解データと再構成データ。緑のシンボルで示された観測点のデータから推定を行った。

出典: Nagata, T., Nakai, K., Yamada, K., Saito, Y., Nonomura, T., Kano, M., Ito, S., Nagao, H., "Seismic wavefield reconstruction based on compressed sensing using data-driven reduced-order model," Geophysical Journal International, Vol. 233, No. 1, pp. 33-50 (2023)

高密度地震観測データを活用した 地震波動場再構成と 地球内部構造推定手法の開発

椎名高裕

産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 研究員

東北大学大学院理学研究博士後期課程修了。博士(理学)。日本学術振興会特別研究員DC2、北海道大学大学院理学研究院非常勤研究員、東京大学地震研究所特任研究員を経て、2020年4月より現職。専門は観測地震学。



近年、基盤的地震観測網の整備やキャンペーン観測により、空間的に高い密度で地震観測データが取得できるようになりました。高密度な地震観測データからは日本列島の複雑な地下構造の解明やそこを伝播する地震波の特性のより深い理解につながる情報が得られると考えられています。そこで、本プロジェクトを通して、私はそのような高密度地震観測データを活用した地震波動場再構成や地球内部構造の推定手法の開発を行ってきました。

地震波動場は地震波の伝播を時空間的に連続する“場”として捉えたものです。地震波動場を再構成することで任意の地点における地震動を予測することができます。このため、地震波動場再構成手法の確立とその高精度化は地震災害に対するレジリエンスを高めることにつながります。具体的には、任意の建造物への入力地震動の設計や実際に大規模地震が生じた際の強震動の即時把握などへの応用が期待されます。

本プロジェクトではSeismic Wave Gradiometry (SWG)法を発展させた地震波動場再構成手法を構築しました(最適化SWG法 Shiina et al., SRL, 2021)。関東地方では首都圏地震観測網(MeSO-net)と呼ばれる地震観測網が展開されています。この観測網を構成する観測点の空間密度は中心部と周辺部で異なります。最適化SWG法では、数値シミュレーション波形を用いた最適化を行うことで、そのような不均質な観測点配置に対して地震波動場の再構成精度を最大化させることを目指しました。MeSO-netでは周期5-10秒より長い波長帯域の地震波動場を再現できることを確認しました(図16)。さらに、観測点がより稠密な領域や地震波の伝播方向を加味することで、より短波長の帯域の地震波動場を再現できます。この結果は、特に観測点が密な東京近郊において、長周期地震動におおよそ対応する周波数帯域の地震波動場を精度良く再構成できることを示しています。

また、地震波速度構造を定量的に推定するためのトモグラフィ法の開発を行いました。ここで“定量的な推定”とは地震波速度の絶対値やその不確実性を評価することを意味します。これらの値の制約は既存の手法では困難とされています。そこで、ベイズ統計学を軸とするアプローチ、特にマルコフ連鎖モンテカルロ(MCMC)法を用いた地震波速度構造の推定手法の開発を進めてきました。MCMC法の発展形の一つとして、モデルパラメータ数をReversible-jump MCMC法が知られています。これらの手法を組み合わせることでデータ駆動的に空間分解能が最適化された地球内部構造モデルが構築できると考えています。

その成果の一つとして、Shiina and Kano(GJI, 2022)ではMCMC法を用いて1次元速度構造と地震の震源位置を同時に推定する手法を提案しました。提案手法では複数の1次元速度モデルが与えられたとき、観測点が割り当てられる速度モデルに従ってデータ駆動的にクラスタリングされるように拡張しました。この工夫により、水平方向に地震波速度コントラストが存在する領域における地震波速度構造と震源位置の推定精度を大きく向上させることに成功しました。図17は提案手法を用いて2004年新潟県中越地震の震源域周辺の地震波速度構造を推定した結果です。この結果は、東西で異なる1次元速度モデルによって地震波速度構造が特徴付けられ、西側では地表付近の地震波速度が遅いことを示しています。対象地域では新発田・小出構造線と呼ばれる地質境界が南北に分布していることが知られています。提案手法が行った観測点クラスタリングはそのような複雑な地下構造を反映していると解釈されます。

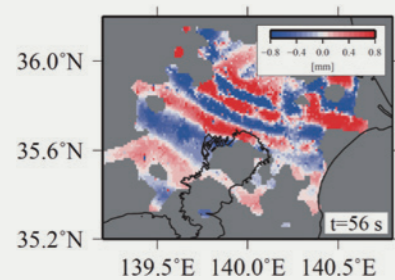


図16:首都圏地震観測網への最適化SWG法の適用例(Shiina et al., SRL, 2021を加筆・修正)。色は再構成された地震波動場の振幅分布を示す。

出典: Shiina, T., T. Maeda, M. Kano, A. Kato, and N. Hirata, "An optimum 2D seismic waveform reconstruction in densely and nonuniformly distributed stations: The Metropolitan Seismic Observation Network in Japan", Seismological Research Letters, Vol. 92, pp. 2015-2027 (2021)

出典: Shiina, T., and M. Kano, "Bayesian-based joint determination of earthquake hypocenters and 1-D velocity structures divided by a structural boundary", Geophysical Journal International, Vol. 230, pp. 759-775 (2022)

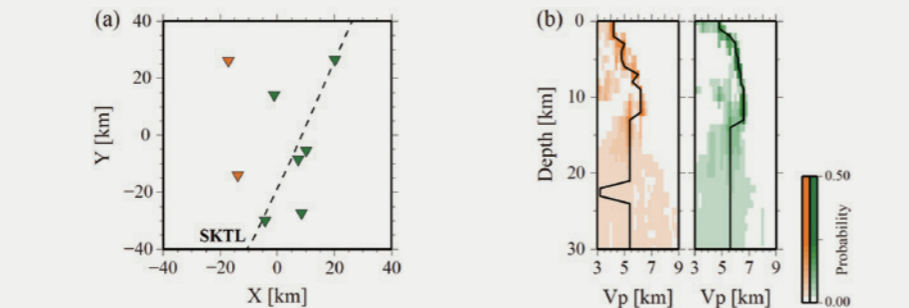


図17:2004年新潟県中越地震震源域周辺の1次元P波速度モデル(Shiina and Kano, GJI, 2022を加筆・修正)。(a)観測点のクラスタリング結果。点線は新発田・小出構造線(SKTL)の地表トレースを示す。三角が観測点であり、色は割り当てられた1次元速度モデルに対応する(橙:左、緑:右)。(b)は1次元P波速度モデルの事後確率分布。実線は深さごとの平均速度。

深層学習に基づく地震計古記録からの低周波微動の検出

長尾大道

東京大学地震研究所 准教授

1995年兵庫県南部地震を契機に、空間的に稠密な地震観測網が20年余りに整備されたことにより、西南日本において2002年にスロー地震・低周波微動が発見されました。これらは南海トラフ大地震をはじめとする100~200年周期で発生するプレート境界型大地震との関連性が強く推認されています。これを解明するためには、現代の地震観測網設立以前の地震計で得られた連続波形データから低周波微動を検出し、カタログ化しておくことが重要です。そこで、約50年前の地震計が波形をペンで直接記録した紙記録から微動を検出する深層学習器を開発しました(図18)。

残差学習に基づく畳み込みニューラルネットワークを構築し、5万枚以上の古記録を模した人工波形画像および現代の地震観測網データから生成した波形画像を学習させました。学習済みのCNNを1966~1977年に東京大学地震研究所 和歌山観測所 熊野観測点で得られた1万8千枚以上の古記録画像に適用したところ、未知の低周波微動を多数検出することに成功しました。今後は、昔の微動カタログの充実を目指し、データベース化が進められている古記録に普遍的に適用可能となるよう、最新鋭のGPU計算機を導入してCNNを強化させていく予定です。

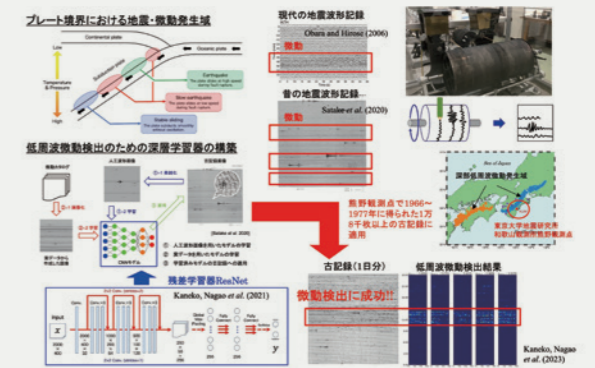


図18:深層学習に基づく地震計古記録からの低周波微動検出の概略。出典: Kaneko, R., H. Nagao, S. Ito, H. Tsuruoka, and K. Obara, "Detection of deep low-frequency tremors from continuous paper records at a station in southwest Japan about 50 years ago based on convolutional neural network", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 128, e2022JB024842 (2023)

インテリジェント地震波動解析システムの構築と今後に向けて

中川茂樹

東京大学地震研究所 准教授

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻修了。博士(理学)。防災科学技術研究所、東京大学地震研究所、気象庁地震火山部を経て、現職。専門は地震火山観測システム開発。

地震計測データから地震とみられる波形を検出し、P波とS波の到達時刻を検出して震源を推定することは地震学の根幹をなす基本的な解析で、古くから計算機を用いた自動データ処理が行われています。推定した震源データを用いて地震波速度トモグラフィ法などで地下の構造を推定し、地震発生メカニズムの理解を進めてきました。現行のデータ処理システムでは、地震検出にはノイズと地震の振幅比を用いるSTA/LTA法、位相検出には地震波形にARモデルをあてはめAICで区間分割位置を評価するAR-AIC法が広く用いられています。地震計測データから地震波を自動検出する現行システムに、本研究課題で開発した最先端ベイズ統計学を用いた新手法を実装し一連の処理システムとして機能させる「インテリジェント地震波動解析システム」の構築を行いました。

本研究課題では多くの手法が開発されましたが、解析の出発点となる地震の自動検出に関する新手法を組み込むことにしました。具体的には、地震検出手法として「観測点配置を考慮した畳み込みニューラルネットワークを用いた地震自動検知」法を現行システムのSTA/LTA法に替えて適用することにしました。また、「相互情報量を用いたマッチドフィルタ法による深部低周波地震の検出」法を新たに処理システムに組み入れることにしました。

各手法の開発に用いた観測点のみを対象とし、指定した任意の日時のデータ取得と前処理を行い開発された手法でデータを解析して結果を

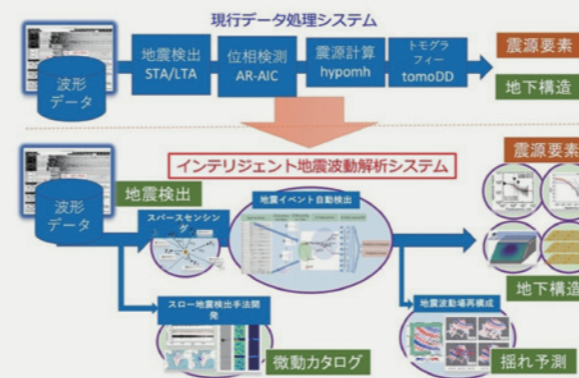


図19:現行のデータ処理システムと本研究によるインテリジェント地震波動解析システムの概要。

整理する、一連の処理をオペレータ操作により実行するプロトタイプを構築し、基本的な動作を確認しました。一方で、実用的な処理システムでは処理する観測点数は数百点規模が見込まれ大幅にデータ量が増加します。また、計測データには欠測や様々なノイズが含まれています。このようなデータを入力した際に自動処理システムが停止したり誤動作したりしないようにするための新たな課題も浮き彫りとなりました。さらに、様々なハードウェアやミドルウェアなどの環境で自動処理システムを運用できるような移植性の確保も実用化に向けての課題です。

本研究課題で個別に開発されてきた解析手法を有機的に結合し、一連の処理システムとして機能させるための第一歩を踏む出すことができました。まだ多くの課題は残されていますが、他のプロジェクト等に引き継がれて新世代の自動処理システムとして実用化され、地殻活動モニタリングの高度化や地震学研究の発展に資することが期待されます。

後継プロジェクト

文部科学省 情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト (STAR-E プロジェクト)

人工知能と自然知能の対話・協働による 地震研究の新展開



中核機関: 東京大学地震研究所 研究期間: 2021~2025年度

Web サイト <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/project/SYNTHA-Seis/>

文部科学省 科学研究費助成事業 学術変革領域研究 (A) Slow-to-Fast 地震学

情報科学と地球物理学の融合による Slow-to-Fast 地震現象の包括的理解



中核機関: 東京大学 大学院理学系研究科 研究期間: 2021~2025年度

Web サイト <https://slow-to-fast-eq.org/>

活動報告・予定

日本地球惑星科学連合大会 (JpGU) (2022.5.22) セッション「最先端ベイズ統計学が拓く地震ビッグデータ解析」を開催

AOGS2022 (2022.8.2) セッション「Data-driven Modeling in Geoscience」を開催

統計関連学会連合大会 (2022.9.7) セッション「地震ビッグデータ解析の最前線」を開催

日本地震学会秋季大会 (2022.10.25) セッション「ベイズ統計学による地震データの解析と数理モデリングの深化」を開催

Danijel Schorlemmer 博士 (GFZ Potsdam) 招聘 (2022.12-2023.3)

日本地球惑星科学連合大会 (JpGU) (2023.5.21-26) セッション: S-TT44「最先端ベイズ統計学が拓く地震ビッグデータ解析」を開催予定

第37回人工知能学会全国大会 (2023.6.6-9) オーガナイズドセッション: OS-17「地震研究と人工知能」を開催予定

AOGS2023 (2023.7.30-8.4) セッション: IG03「Data-driven Modeling in Geoscience」を開催予定

受賞・メディア掲載

2022.6.2 駒木文保 教授 (東京大学) 日本統計学会「第27回日本統計学会賞」を受賞

2022.6.2 矢野恵佑 准教授 (統計数理研究所) 日本統計学会「第36回日本統計学会小川研究奨励賞」を受賞

2022.6.2 加納将行 助教 (東北大学) 日本測地学会「第30回日本測地学会賞坪井賞」を受賞

2022.9.14 加藤愛太郎 教授 (東京大学) 内閣府「令和4年防災功労者内閣総理大臣表彰」を受賞

2022.9.1 読売新聞 (夕刊) に、長尾准教授がコメントした記事が掲載されました。

2023.3.5 産経新聞科学面に、長尾准教授の研究に関する特集記事が掲載されました。

若手研究者の動向

松田孟留 理化学研究所・脳神経科学研究センター・ユニットリーダー → 東京大学大学院情報理工学系研究科・准教授

倉田澄人 東京大学大学院情報理工学系研究科・特任助教 → 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所・助教

中井公美 東北大学大学院工学研究科・特任助教 → 産業技術総合研究所・研究員

栗原亮 東京大学地震研究所・特任研究員 → 神奈川県温泉地学研究所・技師

石瀬素子 東京大学地震研究所・特任研究員 → 山形大学理学部・講師

発行・問い合わせ先 JST CREST インテリジェント地震波動解析 (iSeisBayes) 事務局
〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1 東京大学地震研究所 Email: iSeisBayes@eri.u-tokyo.ac.jp

2023年3月発行 iSeisBayes NEWSLETTER 編集責任者: 吉田美和 (東京大学地震研究所)

