

PIUS

地震研究所
ニュースレター

NEWS LETTER Plus No.31
Earthquake Research Institute,
The University of Tokyo

Experiment

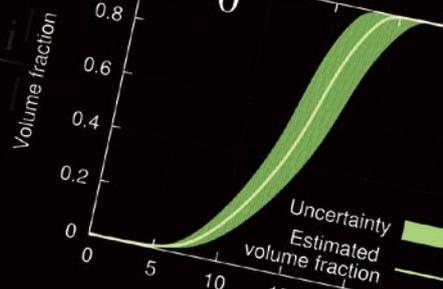
Modeling

Data Assimilation

$$\frac{\partial X_t}{\partial t} = F(X_t)$$

$$\frac{d\lambda_t}{dt} + \left(\frac{\partial F}{\partial X_t} \right)^T \lambda_t + \frac{\partial J}{\partial X_t} = 0$$
$$\lambda_T = 0, \quad \lambda_0 = \frac{\partial J}{\partial X_0}$$

$$r = \frac{p_i(x_{i+1}|T_i)p_{i+1}(x_i)}{p_i(x_i|T_i)p_{i+1}(x_{i+1})}$$
$$p(X_0|D) \simeq N(\hat{X}_0, H)$$



特集

地球を数理科学する

理論に基づく「モデル」と観測で得られる「データ」は科学を駆動する両輪であり、両者の比較検討が新しい知見をもたらす。

しかし、モデルに基づくシミュレーションと観測データは大規模化の一途をたどっており、そのような大規模シミュレーションの実施とビッグデータの解析の両立が可能な新しいアルゴリズムの開発が喫緊の課題となっている。

巨大地震津波災害予測研究センターの長尾大道准教授に、その最前線を聞いた。



東京大学地震研究所

地球を 数理科学する

長尾 大道 巨大地震津波災害予測研究センター 准教授

データ同化を革新する

「目を引くような動画は多くありません。縁の下の力持ち的な研究なんです」と長尾准教授は話し始めた。「私たちは、シミュレーションやデータ解析の根幹である数学的な理論やアルゴリズムをつくっています」。アルゴリズムとは、問題を解くための計算手順のことだ。

シミュレーションでは、現象を数式で表現したモデルをコンピュータで計算し、仮想空間で現象を再現する。しかし、シミュレーションを続けていくと、どうしても現実世界を観測したデータとずれが生じ、しかもそのずれはどんどん大きくなっていく。

「シミュレーション結果と現実世界のずれを解決するのが、データ同化という手法です。シミュレーションの途中で観測データを入力し、現実世界と合うようにシミュレーションを補正するのです。データ同化によってシミュレーションの性能は大きく向上しました。しかし、問題も残っています。そこで私は、データ同化が抱える問題を解決できる新しいアルゴリズムの開発に取り組んできました」

データ同化は身近なところで使われてい

る。天気予報だ。「天気予報のデータ同化では4次元変分法が用いられています。しかし、この手法では予測の不確実性を評価することができないのです」と長尾准教授は指摘する。だが、台風の進路予報を見ると、12時間後や24時間後の台風の中心位置が円で示されている。予報円は台風の中心が約70%の確率で入ると予想される範囲を示したものであり、予測の不確実性を具体的に可視化したものである。「予報円は、4次元変分法ではなく、アンサンブルデータ同化という別の手法を使っています」

アンサンブルデータ同化とは、条件が少しずつ異なる複数のシミュレーションを独立に行い、それらの結果の統計を取るものである。データ同化ではシミュレーションの規模を「次元」という数値で表すが、アンサンブルデータ同化の場合、次元が2倍になったら計算量は10倍、次元が10倍になったら計算量は100億倍というように、次元が増えると計算量が指数関数的に増えていってしまう。そのため、次元が増えても計算量が急激に増えることなく予測の不確実性を評価できるデータ同化の手法が求められていた。

長尾准教授らは2017年、second-order adjoint法を導入することにより、予測の不確実性評価が可能な新しい4次元変分法の開発に成功(図1)。「私たちが開発した手法は、次元が2倍になっても計算量は2倍にしか増えず、これほど計算の速いデータ同化手法はありません」と胸を張る。「シミュレーションは大規模になり、観測データも増加の一途をたどっています。スーパーコンピュータの数を増やせばいいという発想だけでは対応できません。一方で、この例のようにアルゴリズムを工夫すると劇的に計算が速くなり、同じコンピュータの数で解ける問題の範囲が格段に広がるのです」

予測が不確実性付きで評価できれば、必要な予測精度を達成するにはどういうデータがどれだけ必要か分かる。それをもとに、どの場所で、どういう観測や実験を行うべきか、観測や実験のデザイン提案ができるのも大きな利点だ。長尾准教授らが開発した新しいデータ同化手法は、気象や地震といった枠を超えて、さまざまな分野への展開が期待されている。

図1 4次元変分法データ同化に基づく予測の不確実性評価法

粒成長モデルに適用した例。4次元変分法データ同化にsecond-order adjoint法を導入することで、予測による事後確率を最大にする最適値の探索とその不確実性の評価を行えるようになり(①)、不確実性を考慮した将来予測が可能になった(②)。

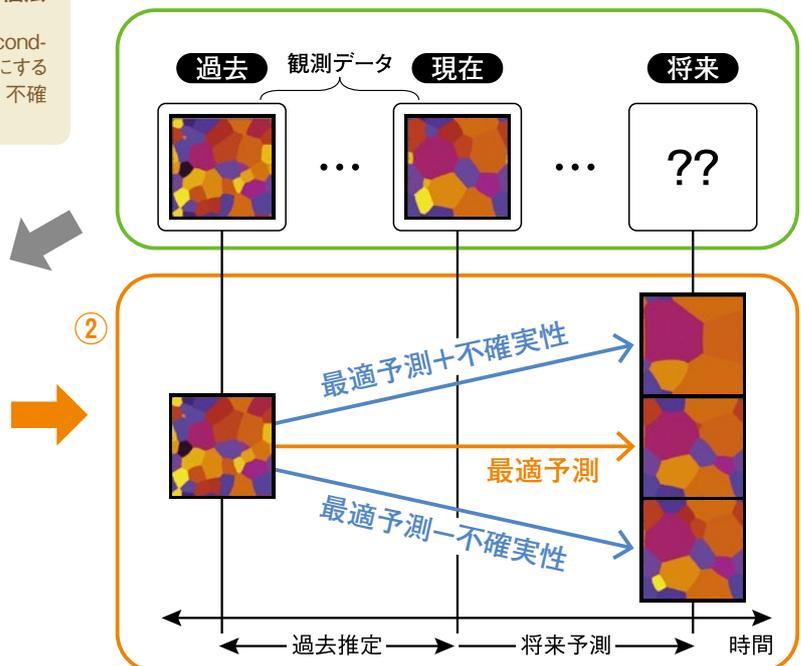
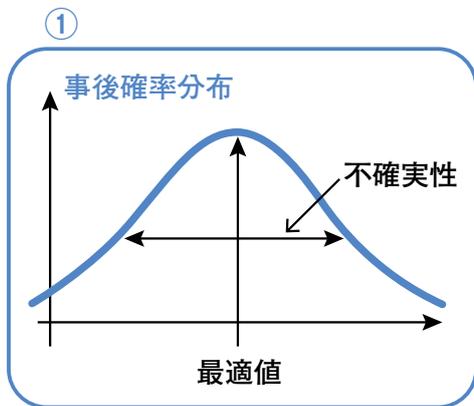


図2 首都圏地震動イメージング

2014年9月16日に発生した茨城県南部を震源とする地震 (M5.5) の周期5~10秒の地震動イメージング結果。丸印は東京23区内のMeSO-net観測点。丸印の中の色は観測波形の振幅、外の色は推定波形の振幅を表示しており、両者の色が一致すれば、推定値が正しいことを示す。

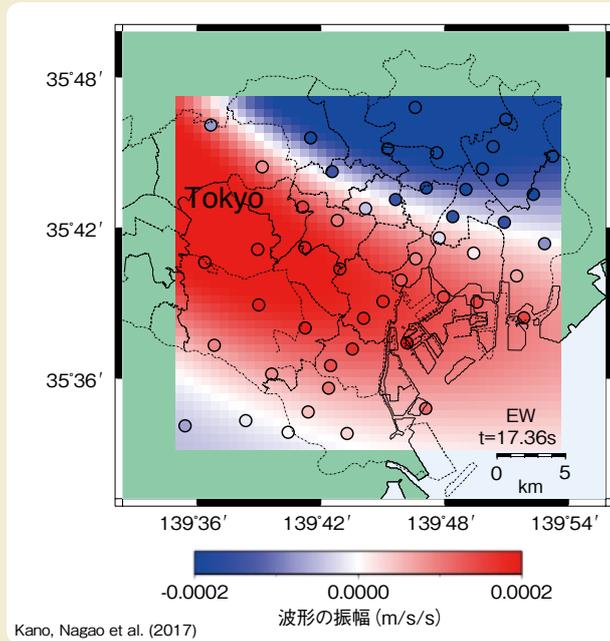
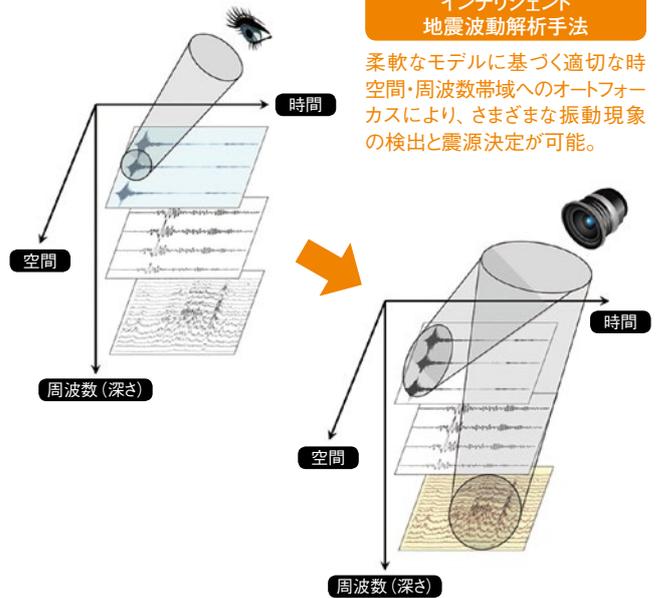


図3 インテリジェント地震波動解析手法

従来の地震解析手法

手動または硬いモデルに基づく時空間・周波数帯域選択のため、古典的な地震現象しか捉えられない。



インテリジェント地震波動解析手法

柔軟なモデルに基づく適切な時空間・周波数帯域へのオートフォーカスにより、さまざまな振動現象の検出と震源決定が可能。

まばらな観測データから面的な地震動を再構成

「地震研究では、観測点が空間的にスパースであることがシミュレーションやデータ解析を難しくしている」と長尾准教授は指摘する。スパースとは、まばらという意味だ。「一方で、シミュレーションやデータ解析ではいかに計算時間を減らすかが命題であり、得たい情報を少数のデータから抽出できるスパースモデリングが注目されています。そこでスパースモデリングとデータ同化の融合に挑戦し、空間的にスパースな観測データから地震動を面的に再構成する地震動イメージング法を開発しました」

巨大地震発生時に全ての建造物のゆれを即時的に評価できれば、建造物の被害の推定だけでなく、迅速な復旧活動や二次災害の軽減につながる。しかし、それには全ての建造物の直下で地震動を直接観測する必要があり、現実的ではない。地震動イメージング法は、首都圏地震観測網 (MeSO-net) の約300点の観測データから観測点以外の場所の地震動を推定できる画期的な手法である。高層建築物が共振しやすい周期5~10秒の長周期地震動に対して、観測波形の大部分を説明可能な地震動イメージングに成功 (図2)。一般的な中低層建造物に被害を引き起こす周期1秒程度の短周期地震動まで適用可能であることも示され、今後、建造物の即時被害推定に役立つと期待されている。

ビッグデータと統計学で拓く、地震研究の未来

地震観測点が空間的にスパースであるという根本的な問題を解決しようという取り組みも進んでいる。日本では現在、高感度地震観測網 (Hi-net) が全国的に整備され、1000点以上の観測点でデータが常時収集されている。また、ガス会社は地震を感知したら供給を遮断するために、地震計を高密度で設置している。スマートフォンにも加速度計が入っている。それらを活用する地震計測ビッグデータベースの構築が始まっているのだ。「これまで私たちが扱ったことがないほどのビッグデータです。既存のアルゴリズムを少し変えたくらいでは対応できません。ビッグデータを扱えるだけでなく、そこから本質的な情報を取り出すことができる新しいアルゴリズムの開発が必要です」

その実現のため、2017年度から科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業CREST「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」(研究代表者:平田直・地震研究所教授)が始まった。「地震研の地震学の研究者と、東京大学大学院情報理工学系研究科の数理科学の研究者が緊密に協働することで地震研究の根幹をなすアルゴリズムの開発を目指します。私は地震研と情報理工学系研究科数理情報学専攻を兼任しています。だからこそ大きな貢献をしたいですね」

これまでは、地震計データにどのような振動現象が含まれているかという事前知識があることを前提にアルゴリズムがつけられていた。それでは未知の振動現象は捉えられない。インテリジェント地震波動解析手法では、多種多様な地震計データを包括的に解析するアルゴリズムを開発し、今まで知られていなかった振動現象の発見や、地震現象の理解の深化を目指す (図3)。そうして得られた知見を、地震防災・減災にも役立てていく計画だ。

科学のコアの部分をつくる

アルゴリズム開発の秘訣を尋ねると、「数理系のセンスと発想の転換」と返ってきた。数理系の研究者は、固体地球科学の研究者とは異なる考え方や見方をするという。「もう一つ欠かせないのが、議論です。顔を見ながら言葉を交わすと、その言葉の中にアイデアが隠れていたりします。研究室のミーティングテーブルは、いつでも人が集まれるように片付けてあります」

長尾准教授は、学生のころから数学が得意で好きだったという。ただし純粋数学には興味を持たず、数学とほかの分野を結び付けた研究をしたいと思っていた。「今、それが実現できていることはとてもうれしい。そして、科学のコアの部分をつくられている、という自負があります」と語る。「地震や火山はもとより、固体地球科学以外のあらゆる分野で使われるアルゴリズムをつくらせていきたいですね」

TOPICS

報告

- 2019年4月7～12日に行われたEGU(ヨーロッパ地球科学連合)General Assembly 2019にブース出展しました。
- 2019年5月10日に「懇談の場」(『太平洋アレイ』展開開始! 川勝 均教授)を開催しました。
- 2019年5月26～30日に行われたJpGU(日本地球惑星科学連合)2019年大会にブース出展しました。
- 2019年5月、地震研YouTubeチャンネルにて、火山の研究の姿を紹介する「Messages from Volcanoes—火山噴火の解明を目指して—」を公開しました。地震研YouTubeチャンネルでは、地震の研究・観測を紹介した「Waves from the underground—地震観測について—」や、「西之島上陸調査」などの動画も公開しています。ぜひご覧ください。QRコードからアクセスできます。

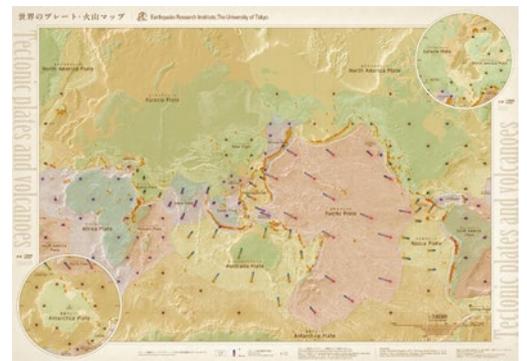


「Messages from Volcanoes」より



夏季インターンシップ制度UTRIP (University of Tokyo Research Internship Program) の学生も巡検に参加

- 2019年6月18日より、JSTの日本・アジア青少年サイエンス交流事業「さくらサイエンスプラン」が今年も開催され、アジアの国々から11名の学生が地震研究所に滞在しました。
- 地震研グッズに新たな仲間「世界のプレート・火山マップ」が加わりました。世界の火山とプレート運動の向きや速さを表した地図で、「国」ではなく、「プレート」という視点で世界を見ることができます。8月の一般公開で配布予定です。



世界のプレート・火山マップ

本所永遠の使命とする所は
地震に関する諸現象の科学的研究と
直接又は間接に地震に起因する災害の予防並に
軽減方策の探究とである(寺田寅彦)

最近の研究

最近の研究を紹介するコンテンツ「最近の研究」に新たな論文が追加されています。ぜひご覧ください。

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/outreach/latestresearch/>

- 2015年ネパール・ゴルカ地震:自然地震反射法による震源断層のイメージング、構造と断層すべり挙動との関係

地震・火山情報

- 2019年6月18日22時22分ごろの山形県沖の地震についての情報が、「地震・火山情報」に公開されています。
<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/topics/>

受賞

- 篠原雅尚教授、新谷昌人教授、山田知朗助教授らが Honorable Mentions in the category of Best Paper in Geophysicsを受賞
- 加藤愛太郎教授らがEPS Excellent Paper Award 2018を受賞
- 西田 究准教授が、地球惑星科学振興「西田賞」を受賞

INFORMATION

お知らせ

- 2019年7月26日(金)
「懇談の場」を、地震研1号館2階セミナー室にて17時30分より開催予定です。今号の特集「地球を数理科学する」について、長尾大道准教授によるお話です。お気軽にご参加ください。
- 2019年8月7日(水)
地震研究所一般公開・公開講義を開催します。



人事異動

- **2019年5月1日**
昇任 加藤愛太郎 地震予知研究センター 教授
採用 仲田理映 地震予知研究センター 助教
- **2019年5月16日**
昇任 青木陽介 地球計測系研究部門 准教授

東京大学地震研究所
ニュースレターPlus
第31号

発行日 2019年7月12日

発行者
東京大学 地震研究所

編集者
地震研究所 広報アウトリーチ室

制作協力
フォトンクリエイト
(デザイン: 酒井デザイン室)

問い合わせ先
〒113-0032
東京都文京区弥生1-1-1
東京大学 地震研究所
広報アウトリーチ室

Eメール
orhp@eri.u-tokyo.ac.jp
ホームページ
<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/>