

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01703

研究課題名(和文)大自由度モデルに基づくデータ同化のための革新的4次元変分法の開発

研究課題名(英文) Innovative four-dimensional variation method for data assimilation based on large-scale models

研究代表者

長尾 大道 (Nagao, Hiromichi)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：80435833

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：次世代型4次元変分法のプロトタイプ版を開発し、2次元空間内における地震波伝播シミュレーションコード等に実装した。双子実験によって地下構造に関する物性パラメータの最適値推定と不確実性評価が可能となることを示した。また、本手法を実装する新たな対象として、磁性体内における磁化パターンの時空間変化を記述する時間依存Ginzburg-Landau方程式の数値シミュレーションコードを新たに開発した。これらの成果については、国際誌ならびに国内外の学会において発表を行った。本研究で開発した次世代型4次元変分法のソースコードについては、現在、公開に向けた準備を進めている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した次世代型4次元変分法により、従来型4次元変分法では不可能であった広域最適解探索と不確実性評価を一挙に解決することが可能となり、大規模数値モデルに基づくデータ同化の関連分野、特に気象予報業務や地震発生予測研究にとっては大きな転回点となるであろう。特に地震学においては、地震発生直後の迅速な地震波動場推定や、巨大地震発生メカニズムの理解に直結するプレート境界における断層すべりの時空間モデルの構築など、将来的に地震防災・減災に資する手法となる可能性が本研究によって拓かれた。

研究成果の概要(英文)：We have developed a prototype version of the next-generation four-dimensional variational method and implemented it in seismic wave propagation simulation code in 2D space. The twin experiments showed that the estimation of the optimum values and their uncertainty quantifications related to the physical property parameters in the underground structure. As a new target to implement our method, we have newly developed a numerical simulation code of the time-dependent Ginzburg-Landau equation that describes the spatiotemporal change of the magnetization pattern in the magnetic materials. These results were published in international journals and presented in domestic and international conferences.

The source code of the next-generation four-dimensional variational method developed in this research is currently being prepared for publication.

研究分野：固体地球科学と数理科学の融合研究

キーワード：データ同化 4次元変分法 最適化 不確実性評価 地震 時系列解析 モデリング Ginzburg-Landau 方程式

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

科学研究を進める上において、物理・化学法則等に基づく数値モデルと、観測・実験に基づくデータの比較が重要であることは論をまたない。しかしながら、近年の巨大スパコンの登場や大規模地球観測網・実験設備等の整備に伴い、大規模数値モデルと大容量観測データを突き合わせることもすらすら容易ではなくなってきた。数値モデルと観測データをベイズ統計学の枠組みで統融合するための計算技術であるデータ同化は、時々刻々と入力する観測データに基づいて各時刻における状態の逐次推定を行う「逐次データ同化」と、予め決められた時間窓において観測データと最も整合する状態を与える初期状態を探索する「非逐次データ同化」とに大別される。逐次データ同化で行う状態推定においては、アンサンブルカルマンフィルタや粒子フィルタに代表される逐次ベイズフィルタが用いられるが、ナイーブな実装では $O(e^N)$ (N は数値モデルの自由度) の計算コストを要し、 N がそれほど大きくない場合でも、世界最大のスパコンを以てしても計算機資源が全く不足するという状況が起こる。大規模数値モデルへデータ同化を実装する際には、4次元変分法を始めとする非逐次データ同化を用いるのが常套であり、データ同化の最も身近な応用例である気象予報は、主に4次元変分法に基づいて行われている。実装の手間は逐次ベイズフィルタよりも格段に大きくなるが、事後分布の初期状態における勾配を数値微分に頼らずに数値モデルに基づいて直接計算し、勾配法によって初期状態の最適化を図るため、必要な計算コストは $O(N)$ で済む。

逐次ベイズフィルタは、確率密度関数を実現値の集合であるアンサンブルによって近似表現するため、データ同化によって推定解の自然な不確実性評価が可能である。一方、従来型4次元変分法は評価関数の局所最大解を推定するだけで、その不確実性評価は原理的に不可能であった。例えば、台風の進路予測においては、中心位置の不確実性を「予報円」によって表現するが、これはアンサンブル計算によって求められている。すなわち、現在の天気予報では、非逐次/逐次データ同化をアドホックに組み合わせて実施されているのが実情である。研究代表者の長尾は、ヘッセ行列と任意のベクトルの積を直接計算する2nd-order adjoint法を導入することにより、現実的な計算時間および計算機資源の範囲内で、最適解の推定およびその不確実性評価が可能な最新型4次元変分法を開発した。本手法により、上述したようなアドホックな逐次/非逐次データ同化に頼ることなく、大規模数値モデルに基づくデータ同化の場合には4次元変分法への統一が図れるほか、例えば興味あるパラメータを所与の精度で知るために必要な実験回数を不確実性評価の結果に基づいて提案する等、観測・実験デザインの最適化に資するフィードバックが可能となる。

データ同化は、モデルとデータの融合という科学研究推進の基礎手段を与えるものとして、今では生物学や社会科学等の様々な分野へと、その応用範囲を広げている。国民生活に多大な影響を与える自然災害関連分野では、気象予報の他、地震分野においてもデータ同化の応用研究が進められており、将来的な大地震発生予測に資する地球地殻内における状態の時空間分布推定およびその予測を行う「地象予報」技術の創出へ結びつくことが期待されている。しかしながら、4次元変分法を大規模な実問題へと応用するためには、手法開発の観点からもまだ解決すべき大きな課題が残されている。従来型/最新型4次元変分法は、算出された評価関数の勾配から勾配法によって局所最適解を求めるため、初期解依存性が極めて大きい。例えば、地震データから単純な地下構造モデルを推定するという問題の場合であっても、評価関数は本質的に複雑な多峰性を持つため、初期解依存性を排除可能な手法へと発展させる必要がある。このような全く新しい革新的な「次世代型4次元変分法」が完成すれば、様々な科学分野へ計り知れない波及効果があることが明白であるため、世界で激しい競争が繰り広げられている。

2. 研究の目的

本研究では、研究項目(A)「大規模数値モデルに適用可能な次世代型4次元変分法の開発」、研究項目(B)「双子実験による次世代型4次元変分法の検証」、および研究項目(C)「地震学における実問題への次世代型4次元変分法の応用」という3つの研究項目に取り組む。

研究項目(A)においては、主に地震分野、将来的には気象分野における大規模数値モデルへの応用を念頭に、次世代型4次元変分法にマルコフ連鎖モンテカルロ法的一种であるレプリカ交換モンテカルロ法をプラグインすることにより、初期解依存性を排除可能な手法へと発展させる。研究項目(B)においては、データ同化手法の検証のためによく用いられる Lorenz モデルをはじめとする数理モデルに基づく「双子実験」と呼ばれる数値実験により、次世代型4次元変分法の検証を行う。双子実験とは、真の初期状態を与え、数値モデルから得られる人工データを擬似観測データとし、逆に提案手法によって真の初期状態が再現されるか否かを確認する手続きである。研究項目(C)においては、次世代型4次元変分法を実際の地震研究で用いられている数値モデルへの応用を行う。次世代型4次元変分法の性能検証を行うとともに、将来的には地震発生予測や気象予報の現業に活かせる手法へと発展させることを目指す。

3. 研究の方法

本研究には、データ同化の数理および気象学・地震学におけるデータ同化研究の経験者が参画する。研究チームを理論班・実装班・応用班の3班で構成し、それぞれ次世代型4次元変分法のアルゴリズム開発、並列計算機上への実装ならびに双子実験による手法の検証、および地震学の実問題への応用を担当する。特に、実装班には若手研究者と大学院生を起用し、本研究が滞りなく推進できるように配慮した。初年度中にアルゴリズム開発、2・3年度目に検証および実問題への応用研究を実施する。研究成果を示すために、国内外の学会においてセッションを企画すると共に、数編の論文として国際誌に投稿する。また、提案手法を様々な研究分野へと普及させるため、開発したソースコードを公開する。

4. 研究成果

次世代型4次元変分法のプロトタイプ版を開発し、2次元空間内における地震波伝播シミュレーションコードに実装した。双子実験によって地下構造に関する物性パラメータを正しく推定されることを確認し、かつその不確実性評価までが可能であることを示した。さらには、南海トラフ地震発生想定域のプレート境界におけるゆっくりすべりをモデル化した準静的運動方程式および摩擦構成則からなる数値シミュレーションコードに対して、次世代型4次元変分法を実装し、双子実験によってゆっくりすべりを再現する摩擦パラメータの推定ならびにその不確実性評価が可能となることを示した。これらの成果については、日本地球惑星科学連合大会や米国物理学連合秋季大会をはじめとする国内外の学会において発表を行った。

本研究の新たな展開として、薄層近似の下での磁性体や岩石内における磁化パターンの時空間変化を記述する時間依存 Ginzburg-Landau 方程式の数値シミュレーションコードを新たに開発した。この成果については、日本物理学会ならびに応用物理学会において発表するとともに、国際誌に論文を出版した。今後はこれに次世代型4次元変分法を実装することにより、幅広い学問分野に応用が可能なデータ同化手法として展開していく予定である。

本研究で開発した次世代型4次元変分法を実装したデータ同化のソースコードについては、現在、公開に向けた準備を進めている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Nakakoji, T., T. Hiraga, H. Nagao, S. Ito, and M. Kano	4. 巻 123
2. 論文標題 Diffusion Creep and Grain Growth in Forsterite +20 vol% Enstatite Aggregates: 1. High-Resolution Experiments and Their Data Analyses	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 9486-9512
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JB015818	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kuwatani, T., H. Nagao, S. Ito, A. Okamoto, K. Yoshida, and T. Okudaira	4. 巻 98
2. 論文標題 Recovering the past history of natural recording media by Bayesian inversion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 43311
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.98.043311	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 中野 慎也, 有吉 雄哉, 樋口 知之	4. 巻 66
2. 論文標題 P-cubed: Pythonによる並列計算機用粒子フィルタライブラリ	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 統計数理	6. 最初と最後の頁 339-351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kano, M., J. Fukuda, S. Miyazaki, and M. Nakamura	4. 巻 123
2. 論文標題 Spatiotemporal Evolution of Recurrent Slow Slip Events Along the Southern Ryukyu Subduction Zone, Japan, From 2010 to 2013	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 7090-7107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JB016072	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kuwatani, T., K. Nagata, K. Yoshida, M. Okada, and M. Toriumi	4. 巻 113
2. 論文標題 Bayesian probabilistic reconstruction of metamorphic P-T paths using inclusion geothermobarometry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 82-95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.170923	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 桑谷 立	4. 巻 29
2. 論文標題 地球科学プロセス解明のためのデータ駆動型解析 地質学分野における応用例	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 情報地質	6. 最初と最後の頁 49-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.6010/geoinformatics.29.2_49	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nagata K., R. Muraoka, Y. Mototake, T. Sasaki, and M. Okada	4. 巻 88
2. 論文標題 Bayesian Spectral Deconvolution Based on Poisson Distribution: Bayesian Measurement and Virtual Measurement Analytics (VMA)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 44003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.044003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mototake Y., Y. Igarashi, H. Takenaka, K. Nagata, and M. Okada	4. 巻 87
2. 論文標題 Spectral Deconvolution through Bayesian LARS-OLS	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.114004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 長尾 大道, 伊藤 伸一	4. 巻 65
2. 論文標題 不確実性評価が可能な新しい14次元変分法	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 2-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 J. Fukuda	4. 巻 123
2. 論文標題 Variability of the space-time evolution of slow slip events off the Boso Peninsula, central Japan, from 1996 to 2014	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 732-760
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017JB014709	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岡本 敦, 桑谷 立	4. 巻 123
2. 論文標題 変成岩組織と鉱物組成累帯構造からの情報抽出：フォーワードモデルと逆解析	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 地質学雑誌	6. 最初と最後の頁 733-745
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5575/geosoc.2017.0034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Hori	4. 巻 12
2. 論文標題 Earthquake and Tsunami Scenarios as Basic Information to Prepare Next Nankai Megathrust Earthquakes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 775-781
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jdr.2017.p0775	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. Morikawa, H. Nagao, S. Ito, Y. Terada, S. Sakai, N. Hirata	4. 巻 226
2. 論文標題 Forecasting temporal variation of aftershocks immediately after a main shock using Gaussian process regression	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1018-1035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggab124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 R. Anzaki, S. Ito, H. Nagao, M. Mizumaki, M. Okada, I. Akai	4. 巻 103
2. 論文標題 Phase prediction method for pattern formation in time-dependent Ginzburg-Landau dynamics for kinetic Ising model without a priori assumptions of domain patterns	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.094408	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 J. Inoue, M. Okada, H. Nagao, H. Yokota, Y. Adachi	4. 巻 61
2. 論文標題 Development of Data-Driven System in Materials Integration	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 2058-2066
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-MA2020006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計58件 (うち招待講演 20件 / うち国際学会 30件)

1. 発表者名 Nagao, H., S. Ito, T. Kasuya, and J. Inoue
2. 発表標題 Data assimilation for grain growth prediction via multi-phase-field models
3. 学会等名 The International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nagao, H., S. Ito, T. Kurokawa, T. Kasuya, and J. Inoue
2. 発表標題 Bayesian inference of grain growth prediction via multi-phase-field models
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nagao, H., M. Kano, K. Nagata, S. Ito, S. Sakai, S. Nakagawa, M. Hori, and N. Hirata
2. 発表標題 Seismic wavefield imaging of long-period ground motion in the Tokyo Metropolitan area, Japan
3. 学会等名 International Conference on Mathematical Modeling and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長尾 大道
2. 発表標題 フェーズフィールド法に基づくデータ同化モデリング
3. 学会等名 第2回計測インフォマティクス研究会 (人工知能学会第2種研究会) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長尾 大道
2. 発表標題 4次元変分法データ同化
3. 学会等名 第20回 京都大学 情報学シンポジウム「数理・計算科学の挑戦」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長尾 大道
2. 発表標題 フェーズフィールド法に基づくデータ同化研究の最前線
3. 学会等名 第7回材料系ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長尾 大道
2. 発表標題 物理モデルと観測データとの融合による地震波動場推定法
3. 学会等名 大阪大学 数理・データ科学教育研究センターセミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長尾 大道, 日野 英逸
2. 発表標題 情報計測の高度化に向けた統計的・機械学習的アプローチの今後の展望
3. 学会等名 2018年度 統計関連学会連合大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長尾 大道
2. 発表標題 計測と計算を融合するデータ同化の地震ビッグデータへの応用
3. 学会等名 公開シンポジウム 「新たな発見をもたらす科学における計測と予知・予測」（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長尾 大道
2. 発表標題 データ同化：大規模モデルと大容量データの融合
3. 学会等名 ポスト「京」重点課題(7) 研究集会「データ駆動科学と高速計算科学」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長尾 大道, 伊藤 伸一
2. 発表標題 4次元変分法データ同化の数理
3. 学会等名 第2回RCMSサロン(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yokota, S., K. Koizumi, M. Kunii, and K. Ito
2. 発表標題 4DEnVar with Iterative Calculation of Nonlinear Nonhydrostatic Model Compared to En4DVar
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Data Assimilation 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yokota, S., K. Koizumi, M. Kunii, and K. Ito
2. 発表標題 4DEnVar with Iterative Calculation of Nonlinear Nonhydrostatic Model Compared to En4DVar
3. 学会等名 The 5th International Workshop on Nonhydrostatic Models (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤 耕介
2. 発表標題 線形データ同化の基礎
3. 学会等名 固体地球科学データ同化に関する研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横田 祥, 小泉 耕, 国井 勝, 伊藤 耕介
2. 発表標題 現業メソ同化システムを用いた4DVar, En4DVar, 4DEnVarの比較
3. 学会等名 日本気象学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nakano, S.
2. 発表標題 Fluid model based image data analysis and data assimilation
3. 学会等名 NTNU-ISM Joint Workshop on Sustainability and Statistical Machine Learning (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野 慎也, 堀 智昭, 関 華奈子, 西谷 望
2. 発表標題 A non-parametric regression model for analysis of spherical vector fields and its application to ionospheric HF radar data
3. 学会等名 2018年度 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nakano, S.
2. 発表標題 On marginal likelihood estimation methods in ensemble-based data assimilation
3. 学会等名 9th Japanese Data Assimilation Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fukuda, J. and K. M. Johnson
2. 発表標題 Coupled frictional afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 Tohoku-oki earthquake
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hori, T., T. Ichimura, K. Fujita, T. Yamaguchi, R. Agata, and T. Inuma
2. 発表標題 Development of Monitoring and Forecasting Methods for Crustal Activity Utilizing Large-Scale High-Fidelity Finite Element Simulations with 3D Heterogeneous Medium
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kuwatani, T., H. Nagao, A. Okamoto, K. Yoshida, S. Ito, and T. Okudaira
2. 発表標題 Pressure-Temperature-Time Path Inversion from Zoned Minerals Using Data Assimilation
3. 学会等名 Asia Oceania Geoscience Society 15th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桑谷 立
2. 発表標題 数理情報科学による地球科学逆問題への挑戦
3. 学会等名 第21回 情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2018) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Nagao and S. Ito
2. 発表標題 Data assimilation for massive autonomous systems based on a second-order adjoint method
3. 学会等名 Taiwan-Japan Joint Workshop on Inverse Problems in Kanazawa 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Nagao and S. Ito
2. 発表標題 Data assimilation for massive autonomous systems based on a second-order adjoint method
3. 学会等名 Asia Oceania Geoscience Society Annual Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Ito, H. Nagao, and M. Kano
2. 発表標題 Uncertainty quantification for massive autonomous systems based on a second-order adjoint method
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長尾 大道, 伊藤 伸一
2. 発表標題 4次元変分法データ同化のための不確実性評価法
3. 学会等名 第12回 日本統計学会春季集会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長尾 大道
2. 発表標題 フェーズフィールド法への4次元変分法データ同化の展開
3. 学会等名 第9回 自動チューニング技術の現状と応用に関するシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中野 慎也
2. 発表標題 Use of kernel regression in ensemble Kalman filters
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中野 慎也
2. 発表標題 データ同化手法とその考え方
3. 学会等名 FAMCOワークショップ2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Nakano and Y. Ogawa
2. 発表標題 Extraction of geophysical information from auroral movies using an approximate Kalman filter
3. 学会等名 2nd ISM-ZIB-IMI MODAL Workshop on Mathematical Optimization and Data Analysis (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Nakano
2. 発表標題 Various aspects of data assimilation techniques and expansion of their applications
3. 学会等名 The 8th Symposium on Polar Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中野 慎也, 有吉 雄哉, 樋口 知之
2. 発表標題 Pythonによる並列計算用粒子フィルタライブラリ開発
3. 学会等名 第8回データ同化ワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福田 淳一
2. 発表標題 物理モデルと測地データに基づく地殻変動のモデリング
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 J. Fukuda
2. 発表標題 A coupled model of stress-driven frictional afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 Tohoku-oki earthquake
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 桑谷 立
2. 発表標題 地球科学におけるデータ駆動型解析
3. 学会等名 日本情報地質学会・地質情報整備活用機構共催シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 桑谷 立
2. 発表標題 岩石学分野におけるデータ駆動型解析の現状と展望
3. 学会等名 日本地質学会 第124年学術大会 (2017愛媛大会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤 耕介
2. 発表標題 アンサンブル手法を用いた観測感度
3. 学会等名 第3回アンサンブル同化摂動に関する研究会
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Nagata
2 . 発表標題 Spectral deconvolution and Bayesian estimation
3 . 学会等名 5th International Symposium on Kumamoto Synchrotron Radiation (ISKSR5): Progress of Data Analysis, Data-Driven Science, and Theory for Science (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Nagao, H., S. Ito, M. Kano, and M. Matsumura
2 . 発表標題 Twin experiment of 4DVar capable of uncertainty quantification based on seismic wavefield propagation
3 . 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Haba, T., H. Nagao, and S. Ito
2 . 発表標題 Decomposition of multiple seasonal components in a seasonal adjustment model
3 . 学会等名 Joint Statistical Meetings (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Nagao, H. and S. Ito
2 . 発表標題 Uncertainty quantification for parameters and time series forecasting based on data assimilation
3 . 学会等名 12th International Conference on the ERCIM WG on Computational and Methodological Statistics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ito, S., M. Kano, and H. Nagao
2 . 発表標題 Uncertainty quantification based on 4DVar data assimilation for massive simulation models
3 . 学会等名 11th International Workshop on Statistical Seismology (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ito, S., Nagao, H., T. Kurokawa, T. Kasuya, and J. Inoue
2 . 発表標題 Bayesian inference of grain growth prediction via multi-phase-field models
3 . 学会等名 16th Annual Meeting, Asia Oceania Geosciences Society (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Haba, T., H. Nagao, and S. Ito
2 . 発表標題 Decomposition of multiple seasonal components in a seasonal adjustment model
3 . 学会等名 16th Annual Meeting, Asia Oceania Geosciences Society (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Nagao, H. and S. Ito
2 . 発表標題 Bayesian inference for phase-field models with non-time-series data
3 . 学会等名 27th International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Nagao, H., S. Ito, T. Kurokawa, T. Kasuya, and J. Inoue
2 . 発表標題 Bayesian inference of grain growth prediction via multi-phase-field models
3 . 学会等名 European Geosciences Union General Assembly (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ito, S., M. Kano, and H. Nagao
2 . 発表標題 Uncertainty quantification for inhomogeneous frictional features in a slow-slipping fault based on a large-scale four-dimensional variational data assimilation
3 . 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Nagao, H., S. Ito, K. Hasegawa, M. Kano, M. Okada, H. Hino, K. Nagata, and N. Hirata
2 . 発表標題 Implementation of replica exchange Monte Carlo on 4DVar for global optimization
3 . 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ito, S., H. Nagao, T. Kurokawa, T. Kasuya, and J. Inoue
2 . 発表標題 Bayesian inference of grain growth prediction via multi-phase-field models
3 . 学会等名 NIMS WEEK 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Ito, S. and H. Nagao
2. 発表標題 Uncertainty quantification based on 4DVar data assimilation for massive simulation models
3. 学会等名 Frontiers of Statistical Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長尾 大道, 伊藤 伸一, 糟谷 正, 井上 純哉
2. 発表標題 データ同化によるフェーズフィールドモデリングの深化
3. 学会等名 第33回 日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長尾 大道, 伊藤 伸一, 長谷川 慶
2. 発表標題 4次元変分法データ同化の新展開
3. 学会等名 統計関連学会連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ito, S., M. Kano, and H. Nagao
2. 発表標題 Uncertainty quantification based on 4DVar data assimilation for massive simulation models
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金子 亮介, 長尾 大道, 伊藤 伸一, 小原 一成, 鶴岡 弘
2. 発表標題 畳み込みニューラルネットワークに基づく地震波形画像からの深部低周波微動検出に向けた数値実験
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤 伸一, 加納 将行, 長尾 大道
2. 発表標題 大規模4次元変分法データ同化に基づくスロースリップ断層面における摩擦特性不均一性の不確実性評価
3. 学会等名 日本地震学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ito, S., H. Nagao, T. Kurokawa, T. Kasuya, and J. Inoue
2. 発表標題 Bayesian inference of grain growth prediction via multi-phase-field models
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安崎 遼路, 伊藤 伸一, 長尾 大道, 水牧 仁一朗, 岡田 真人, 赤井 一郎
2. 発表標題 時間依存Ginzburg-Landau方程式による2次元スピン系でのパターン形成に関する理論的研究
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安崎 遼路, 伊藤 伸一, 長尾 大道, 水牧 仁一朗, 岡田 真人, 赤井 一郎
2. 発表標題 双極子間相互作用を含む時間依存Ginzburg-Landau方程式によるパターン形成における相分類の提案と解析的な相予測
3. 学会等名 第68回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 樋口 知之, 伊藤 耕介, 伊庭 幸人, 仙石 裕明	4. 発行年 2017年
2. 出版社 岩波書店	5. 総ページ数 152
3. 書名 岩波データサイエンス Vol. 6	

1. 著者名 Junzo Kasahara, Michael S. Zhdanov, Hitoshi Mikada (編), Hiromichi Nagao (分担執筆)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 646
3. 書名 Active Geophysical Monitoring (2nd Edition)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京大学地震研究所 長尾・伊藤研究室 https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/people/nagaoh/</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	堀 高峰 (Hori Takane) (00359176)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門 (地震津波予測研究開発センター)・センター長 (82706)	
研究分担者	中野 慎也 (Nakano Shin'ya) (40378576)	統計数理研究所・モデリング研究系・准教授 (62603)	
研究分担者	伊藤 耕介 (Ito Kosuke) (10634123)	琉球大学・理学部・准教授 (18001)	
研究分担者	福田 淳一 (Fukuda Junichi) (70569714)	東京大学・地震研究所・助教 (12601)	
研究分担者	永田 賢二 (Nagata Kenji) (10556062)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・統合型材料開発・情報基盤部門・主任研究員 (82108)	
研究分担者	桑谷 立 (Kuwatani Tatsu) (60646785)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門 (火山・地球内部研究センター)・研究員 (82706)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	杉浦 望実 (Sugiura Nozomi) (40512827)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海洋観測研究センター・主任研究員 (82706)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------