

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26280006

研究課題名(和文) 固体地球科学に資する次世代型データ同化法の創出

研究課題名(英文) Construction of next-generation data assimilation for the solid Earth science

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) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、固体地球科学に資する次世代型データ同化手法の創出という所期の目的を、大きく進歩させることができた。特に、大自由度モデルにも適用可能なデータ同化手法である4次元変分法の高度化や、レプリカ交換モンテカルロ法との融合によるモデル/データ両駆動型データ同化の地震観測網データへの応用研究を実施した。また、国内および海外における多数の学会において成果発表を行うとともに、国際誌に論文を出版した。これらの成果をまとめた教科書を出版する予定である。さらに、日本地球惑星科学関連学会連合大会を始めとする学会において、本研究課題に関連するセッションを開催した。

研究成果の概要(英文)：This project has made considerable advances in data assimilation (DA) methodologies for the solid Earth science. We succeeded in developing a new four-dimensional variational method, which is a DA method applicable to simulation models having large degrees of freedom. We also applied DA to the real data obtained by a dense seismic observation array, developing a model-/data-driven DA methodology through an integration of the replica exchange Monte Carlo method. The obtained results were presented in many domestic and international conferences, and published as papers in international journals. We are going to publish a book related to this issue. We convened special sessions in many conferences such as Japan Geoscience Union Meeting.

研究分野：ベイズ統計学, データ同化

キーワード：データ同化 固体地球科学 逐次ベイズフィルタ スパースモデリング データ駆動型モデリング マルコフ連鎖モンテカルロ法 レプリカ交換モンテカルロ法 地震

1. 研究開始当初の背景

主に気象学と海洋学の分野において大きく発展を遂げてきたデータ同化は、数値シミュレーションと観測データをベイズ統計学、特に状態空間モデルの枠組みで融合するための基盤技術である。その過程において、シミュレーションモデルに含まれるパラメータや、過去および現在における状態を推定しながら、未来における状態を予測するシミュレーションモデルを構築することを目的とする。身近な例としては気象予報が挙げられ、数時間～数日後の各地点における気温や気圧を予測し、台風の中心位置の存在確率を「予報円」という形で表現することは、まさにデータ同化による将来予測を具現化した典型例と言える。

固体地球科学分野においても、データ同化の有用性が示され始めており、歴史的な大地震の発生サイクルについてのモデリング、海洋プレート境界間の摩擦パラメータ分布の推定、津波データ同化による海底地形の推定、大地震に伴う大気振動の研究は、本研究計画の研究代表者・研究分担者による地震分野への先駆的な応用研究である。また、火山研究への応用も始まっており、例えば、噴火後の降灰分布予測等への貢献が期待されている。しかしながら、他分野と比較すると固体地球科学においてはまだ十分に浸透しているとは言えない。

2. 研究の目的

本研究では、固体地球科学に資する新たなデータ同化の手法確立を大目標とし、特に次の研究課題(1)～(3)を遂行する。

(1)周波数領域を考慮したデータ同化法の開発

時間変化を許した周波数帯域をパラメータとして導入し、尤度ならびに情報量規準によって評価することにより、各時間帯における有効な帯域を推定しながらデータ同化を実施する手法を確立する。帯域制限した場合の観測ノイズが従う適切な確率密度関数を提案した上で、本手法に相応しい逐次ベイズフィルタを開発する。

(2)データ駆動型モデリング機能を有するデータ同化法の開発

システムノイズから情報を抽出することを目的とした、データ駆動型モデリング機能を有するデータ同化法を確立する。システムノイズから構造行列と次元圧縮した説明変数ベクトルをスパース推定することにより、システムノイズに含まれる有意な情報を抽出する。また、本手法に相応しい逐次ベイズフィルタを開発する。

(3)固体地球科学の諸問題への応用

固体地球科学の諸問題、例えば、GPS デー

タ同化による海洋プレート境界間の摩擦パラメータ時空間分布および大地震発生サイクルの解明や、地震計データ同化による高時空間分解能を持つ地震動分布の推定、さらには、火山観測データの同化による噴火モデルの時変パラメータの推定や降灰予測モデルの構築等を目指す。

3. 研究の方法

参加研究者を開発班・実装班・応用班の3班に緩やかに分け、それぞれの班は2.で述べた研究課題(1)～(3)を担当する。本研究に関連した研究集会を毎年開催すると共に、国内学会ならびに国際学会において、本研究に関連した特別セッションを企画する。本研究で開発したデータ同化に関するプログラム資産は、データ同化に携わる異分野の研究者でも利用可能なようにデータ同化ライブラリとしてまとめた上で公開する。本研究で得られた成果を数編の論文にまとめ、国内外の学術雑誌上で発表する。

4. 研究成果

研究課題(1)～(3)について、それぞれ多くの研究成果を得ることができ、固体地球科学に資する次世代型データ同化手法の創出という所期の目的を、大きく進歩させることができた。特に、大自由度モデルにも適用可能なデータ同化手法である4次元変分法の高度化や、レプリカ交換モンテカルロ法との融合によるモデル/データ両駆動型データ同化の地震観測網データへの応用研究を実施した。また、国内および海外における多数の学会において成果発表を行うとともに、国際誌に論文を出版した。これらの成果をまとめた教科書を出版する予定である。さらに、日本地球惑星科学関連学会連合大会を始めとする学会において、本研究課題に関連するセッションを開催した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計16件)

- (1) Sasaki, K., A. Yamanaka, S. Ito, and H. Nagao, Data assimilation for phase-field models based on the ensemble Kalman filter, Computational Materials Science, Vol. 141, pp. 141-152, doi:10.1016/j.commatsci.2017.09.025, 2018, 査読有。
- (2) 須藤明人, 櫻山武浩, 矢部貴大, 樋口知之, 中野慎也, 齋藤正也, 関本義秀, 災害時におけるリアルタイムな広域人流推定のための高精度な粒子フィルタの提案, 交通工学論文集, Vol. 3, pp. A_76-A_83, doi:10.14954/jste.3.2_A_76, 2017, 査読有。

- (3) 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, pp. 529-545, doi:10.1093/gji/ggw410, 2017, 査読有.
- (4) Wang, T., J. Zhuang, K. Obara, and H. Tsuruoka, Hidden Markov modelling of sparse time series from non-volcanic tremor observations, *Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics)*, Vol. 66, doi:10.1111/rssc.12194, 2016, 査読有.
- (5) Nakamura, K. and Y. Kono, Fast and stable estimation of macroscopic parameters in particle systems by data assimilation, *Proceedings of the 47th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications*, pp. 132-136, doi:10.5687/sss.2016.132, 2016, 査読有.
- (6) Nakata, R., T. Kuwatani, M. Okada, and T. Hori, Geodetic inversion for spatial distribution of slip under smoothness, discontinuity, and sparsity constraints, *Earth, Planets and Space*, Vol. 68, 20_1-20_10, 2016, 査読有.
- (7) Ito, S., H. Nagao, A. Yamanaka, Y. Tsukada, T. Koyama, M. Kano, and J. Inoue, Data assimilation for massive autonomous systems based on a second-order adjoint method, *Physical Review E*, Vol. 94, doi:10.1103/PhysRevE.94.043307, 2016, 査読有.
- (8) Nakano, S., K. Suzuki, K. Kawamura, F. Parrenin, and T. Higuchi, A sequential Bayesian approach for the estimation of the age-depth relationship of the Dome Fuji ice core, *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol. 23, pp. 31-44, doi:10.5194/npq-23-31-2016, 2016, 査読有.
- (9) Nakata, R., T. Kuwatani, M. Okada, and T. Hori, Geodetic inversion for spatial distribution of slip under smoothness, discontinuity, and sparsity constraints, *Earth, Planets and Space*, Vol. 68, doi:10.1186/s40623-016-0396-2, 2016, 査読有.
- (10) Kano, M., S. Miyazaki, Y. Ishikawa, H. Yoshihisa, K. Ito, and K. Hirahara, Real data assimilation for optimization of frictional parameters and prediction of afterslip in the 2003, Tokachi-oki earthquake inferred from slip velocity by an adjoint method, *Geophysical Journal International*, Vol. 203, pp. 646-663, doi:10.1093/gji/ggv289, 2015, 査読有.
- (11) Zhuang, J., Weighted likelihood estimators for point processes, *Spatial Statistics*, Vol. 14, pp. 166-178, doi:10.1016/j.spasta.2015.07.009, 2015, 査読有.
- (12) Zhuang, J. and S. Touati, Stochastic simulation of earthquake catalogues, *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, 10.5078/corssa-43806322, 2015, 査読有.
- (13) Fukuda, J., A. Kato, K. Obara, S. Miura, and T. Kato, Imaging of the early acceleration phase of the 2013-2014 Boso slow slip event, *Geophysical Research Letters*, Vol. 41, pp. 7493-7500, doi:10.1002/2014GL061550, 2014, 査読有.
- (14) Nakano, S., Hybrid algorithm of ensemble transform and importance sampling for assimilation of non-Gaussian observations, *Tellus A*, Vol. 66, 21429, doi:10.3402/tellusa.v66.21429, 2014, 査読有.
- (15) Hori, T., M. Hyodo, R. Nakata, S. Miyazaki, and Y. Kaneda, A forecasting procedure for plate boundary earthquakes based on sequential data assimilation, *Oceanography*, Vol. 27, pp. 94-102, 2014, 査読有.
- (16) Nagao, H., What is required for data assimilation that is applicable to big data in the solid Earth science?, *The Proceedings of 17th International Conference on Information Fusion*, pp. 1-6, 2014, 査読有.
- [学会発表](計 32 件)
- (1) 長尾大道, 伊藤伸一, 4次元変分法データ同化のための不確実性評価法, 第12回日本統計学会春季集会, 早稲田大学早稲田キャンパス, 東京都新宿区, 2018, 招待講演.
- (2) 長尾大道, 伊藤伸一, フェーズフィールドモデルに基づく4次元変分法データ同化, 日本機械学会第30回計算力学講演会, 近畿大学東大阪キャンパス, 大阪府東大阪市, 2017, 招待講演.
- (3) 長尾大道, 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, 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, 東京大学工学部, 東京都文京区, 2017, 招待講演.
- (4) Ito, S., H. Nagao, and M. Kano,

- Uncertainty quantification for massive autonomous systems based on a second-order adjoint method, European Geosciences Union, General Assembly, Vienna, Austria, 2017.
- (5) Nagao, H. and S. Ito, Data assimilation for massive autonomous systems based on a second-order adjoint method, Taiwan-Japan Joint Workshop on Inverse Problems in Kanazawa 2017, Kanazawa University, 石川県金沢市, 2017, 招待講演.
- (6) Ito, S., H. Nagao, A. Yamanaka, Y. Tsukada, T. Koyama, M. Kano, and J. Inoue, Uncertainty quantification based on second-order adjoint method for data assimilation using massive autonomous systems, RIKEN International Symposium on Data Assimilation, 理化学研究所 計算科学研究機構, 兵庫県神戸市, 2017.
- (7) Zhuang, J. and T. Wang, Correcting biases in the estimates of earthquake clustering parameters caused by short-term missing of aftershocks, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ, 千葉県千葉市, 2016.
- (8) 中野慎也, データ同化の手法とその最近の動向, 日本機械学会 講習会, 東京大学生産技術研究所, 東京都目黒区, 2016, 招待講演.
- (9) 長尾大道, 地震研究に貢献する統計科学, 統計関連学会連合大会 市民講演会, 石川県教育会館, 石川県金沢市, 2016, 招待講演.
- (10) 中村和幸, 河野穰, 粒子系物理モデルのマクロパラメータ推定と統計モデリング, 統計関連学会連合大会, 金沢大学角間キャンパス, 石川県金沢市, 2016.
- (11) Kano, M., J. Fukuda, and S. Miyazaki, Comparison of the spatio-temporal evolution of slow slip events in the Yaeyama Islands, southwestern Japan, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ, 千葉県幕張市, 2016.
- (12) Okuda, R., K. Hirahara, S. Miyazaki, M. Kano, and M. Ohtani, Numerical experiments on estimation of frictional parameters on the SSE fault through ensemble Kalman Filter, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 幕張メッセ, 千葉県幕張市, 2016.
- (13) 兵藤守, 堀高峰, 中田令子, 有吉慶介, 地震発生サイクルシミュレーションとその地震発生予測への活用, 日本地質学会, 日本大学文理学部, 東京都世田谷区, 2016, 招待講演.
- (14) Ishikawa, D., M. Kano, S. Ito, and H. Nagao, Selection of observation points in kriging based on non-convex programming, American Geophysical Union Fall Meeting 2016, San Francisco, USA, 2016.
- (15) Nagao, H., D. Ishikawa, and M. Kano, Observation site selection strategy based on DC programming beneficial to seismic wave field imaging utilizing dense seismic array data, Asia Oceania Geoscience Society 13th Annual Meeting, Beijing, China, 2016.
- (16) Kano, M., H. Nagao, D. Ishikawa, S. Sakai, S. Nakagawa, M. Hori, and N. Hirata, Seismic wavefield imaging based on the replica exchange Monte Carlo, Asia Oceania Geoscience Society 13th Annual Meeting, Beijing, China, 2016.
- (17) Nakano, S., Data assimilation techniques in earth sciences, Next Generation Transport Aircraft Workshop 2016, Honolulu, USA, 2016, 招待講演.
- (18) Kano, M., S. Miyazaki, Y. Ishikawa, Y. Hiyoshi, K. Ito, and K. Hirahara, Real data assimilation for optimal estimation of frictional parameters and prediction of afterslip in the 2003 Tokachi-oki Earthquake by an adjoint method, 12th Annual Meeting of Asia Oceania Geoscience Society, Singapore, 2015.
- (19) Okuda, R., K. Hirahara, S. Miyazaki, M. Kano, and M. Ohtani, Estimation of frictional parameters on the SSE fault through ensemble Kalman filter, 12th Annual Meeting of Asia Oceania Geoscience Society, Singapore, 2015.
- (20) Fukuda, J., Imaging the spatiotemporal evolution of a slow slip event near the Boso Peninsula, central Japan, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, 2015, 招待講演.
- (21) 福田淳二, GNSS 時系列データの状態空間モデリングによる非地震性断層すべりの時空間イメージング, 日本地震学会 2015 年度秋季大会, 神戸国際会議場, 兵庫県神戸市, 2015, 招待講演.
- (22) 中村和幸, 静的・動的システムにおける不確かさの定量化, 第22回信頼性設計技術ワークショップ & 第35回最適設計研究会, 岡山大学, 岡山県岡山市, 2015, 招待講演.
- (23) Nagao, H., Lasso-based imaging of ground motions in the Tokyo metropolitan area excited by large earthquakes, The 24th South Taiwan Statistics Conference and 2015 Chinese Institute of Probability and Statistics Annual Meeting, 彰化, 台湾,

- 2015, 招待講演.
- (24) Nagao, H., M. Kano, S. Mizusako, and A. Suzuki, Data-driven approaches beneficial to data assimilation in earthquake researches, 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Prague, Czech Republic, 2015.
- (25) Fukuda, J., A. Kato, K. Obara, S. Miura, and T. Kato, Imaging of early acceleration phase of the 2013-2014 Boso slow slip event, American Geophysical Union 2014 Fall Meeting, Moscone Center, San Francisco, USA, 2014.
- (26) Nakano, S., Data assimilation for estimating system dynamics in geosciences, Workshop on data mining in neuroscience, 情報学研究所, 東京都千代田区, 2014.
- (27) 中村和幸, 清水脩輔, 非圧縮流体の粒子法解析におけるデータ同化と誤差モデリング, 第 63 回理論応用力学講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 東京都目黒区, 2014.
- (28) 堀高峰, 兵藤守, 中田令子, 宮崎真一, 日吉善久, 有吉慶介, 金田義行, 逐次データ同化を用いた沈み込み帯プレート境界巨大地震の予測手法, 第 63 回理論応用力学講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 東京都目黒区, 2014.
- (29) 水迫覚信, 長尾大道, 廣瀬慧, 加納将行, 堀宗朗, スパースモデリングによる首都圏における地震動分布推定手法の開発, 第 34 回地震工学研究発表会, まちなかキャンパス長岡, 新潟県長岡市, 2014.
- (30) 長尾大道, データ同化 ~ シミュレーションと観測をつなぐ計算基盤技術 ~, 日本応用数学会研究会, 筑波大学東京キャンパス, 東京都文京区, 2014, 招待講演.
- (31) 鈴木皓博, 長尾大道, 加納将行, 宮崎真一, 駒木文保, データ同化による余効すべり発生域の摩擦パラメータ推定 ~ パラメータ分布の空間解像度の検証 ~, 日本測地学会 第 122 回講演会, つくばサイエンス・インフォメーションセンター, 茨城県つくば市, 2014.
- (32) Nagao, H., What is required for data assimilation that is applicable to big data in the solid Earth science?, 17th International Conference on Information Fusion, Salamanca, Spain, 2014.

〔図書〕(計 1 件)

- (1) 三村昌泰 (編著), 中村和幸 (分担執筆), 他, 現象数理学の冒険, 「地球科学の数理学」, 明治大学出版会, 2015, 220.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/people/nagaoh/>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

福田 淳一 (FUKUDA, Jun'ichi)
 東京大学・地震研究所・助教
 研究者番号: 70569714

中野 慎也 (NAKANO, Shin'ya)
 統計数理研究所・モデリング研究系・准教授
 研究者番号: 40378576

中村 和幸 (NAKAMURA, Kazuyuki)
 明治大学・総合数理学部・准教授
 研究者番号: 40462171

庄 建倉 (ZHUANG, Jiancang)
 統計数理研究所・モデリング研究系・准教授
 研究者番号: 70465920

宮崎 真一 (MIYAZAKI, Shin'ichi)
 京都大学・理学研究科・准教授
 研究者番号: 00334285

堀 高峰 (HORI, Takane)
 国立研究開発法人海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター 地震津波予測研究グループ・グループリーダー
 研究者番号: 00359176

(3) 連携研究者

小屋口 剛博 (KOYAGUCHI, Takehiro)
 東京大学・地震研究所・教授
 研究者番号: 80178384

市村 強 (ICHIMURA, Tsuyoshi)
 東京大学・地震研究所・准教授
 研究者番号: 20333833

岩田 貴樹 (IWATA, Takaki)
 常磐大学・人間科学部・准教授
 研究者番号: 30418991

(4) 研究協力者

水迫 覚信 (MIZUSAKO, Sadanobu)

鈴木 皓博 (SUZUKI, Akihiro)

石川 大智 (ISHIKAWA, Daichi)

黒河 天 (KUROKAWA, Takashi)

加納 将行 (KANO, Masayuki)

伊藤 伸一 (ITO, Shin-ichi)