

共同利用実施報告書(研究実績報告書)
(特定共同研究(B))

1. 課題番号 2013-B-07

2. 研究課題名 (和文、英文の両方をご記入ください)

和文: 固体地球科学におけるデータ同化法の構築

英文: Development of data assimilation methods for solid earth science

3. 研究代表者所属・氏名 統計数理研究所・中野慎也

(地震研究所担当教員名) 福田淳一

4. 参加者の詳細 (研究代表者を含む。必要に応じ行を追加すること)

氏名	所属・職名	参加内容
中野 慎也	統計数理研究所・助教	データ同化手法・アルゴリズムの開発
福田 淳一	東京大学地震研究所・助教	断層すべりの時間発展モデルに対する GNSS データ同化手法の開発
庄 建倉	統計数理研究所・准教授	地震活動のモデリングと地球物理学観測量の地震活動への影響のモデリング・地震、低周波微動活動データ解析
岩田 貴樹	常磐大学コミュニティ振興学部・准教授	データ同化に基づく地震活動解析を行うための地震検知能力の統計的評価
熊澤 貴雄	統計数理研究所・特任研究員	地震活動データの点過程モデリング
中村 和幸	明治大学総合数理学部・准教授	統計科学と数理科学の観点から固体地球データ同化手法を開発
大家 義登	明治大学先端数理科学研究科・大学院生	データ同化の津波現象への適用
小屋口 剛博	東京大学地震研究所・教授	火山噴煙ダイナミクスモデルおよび火道流マグマ上昇モデルを用いたデータ同化手法の開発研究
堀 宗朗	東京大学地震研究所・教授	地震動シミュレーション法の開発
鶴岡 弘	東京大学地震研究所・准教授	地震データのためのビッグデータ解析手法の開発
長尾 大道	東京大学地震研究所・准教授	固体地球科学に資するデータ同化法の開発
市村 強	東京大学地震研究所・准教授	地震動シミュレーション法の開発
宮崎 真一	京都大学理学研究科・准教授	データ同化手法を用いた GNSS データの解析
奥田 亮介	京都大学理学研究科・大学院生	データ同化手法を用いた GNSS データの解析
堀 高峰	海洋研究開発機構・サブリーダー	大地震連動発生シミュレーションへのデータ同化の応用

有吉 慶介	海洋研究開発機構・技術研究 副主任	数値シミュレーションで再現された余効すべり過程 に対するデータ同化の応用開発
中田 令子	海洋研究開発機構・特任技術 研究副主任	大地震連動発生シミュレーションへのデータ同化の 応用
伊藤 耕介	琉球大学理学部・助教	大自由度系に適用可能なデータ同化に関する手法の 検討
日吉 善久	海洋研究開発機構・特任技術 研究副主任	データ同化手法を用いた地震予測システムの構築・ 評価
五島 仁志	京都大学理学研究科・大学院 生	データ同化手法を用いた GNSS データの解析

5. 研究計画の概要（800 字以内でご記入ください。計画調書に記載した「研究計画」から変更がある場合、変更内容が分かるように記載してください。）

大規模数値シミュレーションと大容量観測データから地球内部の複雑な現象を再現し、将来の時間発展を予測することは、固体地球科学の様々な分野において重要な課題である。これを実現するためには、観測データをシミュレーションモデルに取り込む「データ同化」と呼ばれる手法が必要不可欠である。データ同化は、統計数理学、特にベイズ統計学による理論およびアルゴリズムを基礎として厳密に構築されており、気象学や海洋学において目覚ましい発展を遂げたものの、固体地球科学ではまだ十分に普及するには至っていない。本課題では、統計数理学と固体地球科学の研究者が共同研究を行う体制を確立することにより、統計数理学で研究されてきたデータ同化法を基に固体地球科学のシミュレーションモデルと観測データに適したアルゴリズムを開発し、摩擦構成則に基づく断層すべりの時間発展モデル、地震活動の時空間変化モデル、火山の降灰モデル、津波モデル等のシミュレーションモデルに適用することを目的とする。将来的に、地震波形や GNSS データを始めとする大量の観測データから高速に情報を抽出し、数値シミュレーションモデルにリアルタイムに同化するために、これらのデータを自動処理するための技術開発も実施する。データ同化法の構築により、シミュレーションモデルと観測データの両者に基づく現象の理解や将来予測、あるいはモデルの評価および検証を定量的に行うことが可能になる。

本課題では、(1)シミュレーションモデルのパラメータや状態変数を観測データから推定するためのデータ同化法の開発、(2)固体地球科学のシミュレーションモデルへのデータ同化法の応用、(3)データ同化に使用するための大量の観測データの自動処理技術の開発という3つのサブプロジェクトを実施する。

6. 研究成果の概要 (図を含めて1~2頁で記入してください。)

キーワード (3-5程度) : データ同化, ベイズ統計学, 逐次ベイズフィルタ, ビッグデータ

本課題は平成25年度に開始した課題である。平成25年度の主な成果として、(1) 大規模・高次元モデルに対して適用可能なデータ同化手法の開発、(2) データ同化手法によるプレート境界面の摩擦法則・すべりの時空間変化の推定手法の開発、(3) データ同化に基づく地震活動解析を行うための、ベイズ平滑化に基づく地震カタログの評価手法の開発などが挙げられる。

平成26年度は9月2日、1月22日~23日、及び3月31日に地震研究所においてミーティングを開催し、摩擦構成則に従う断層すべりの時間発展モデルに対するデータ同化、地震活動のデータ同化、大自由度系に対するデータ同化手法などについての検討を行った。

平成26年度の主な研究成果は以下の通りである。

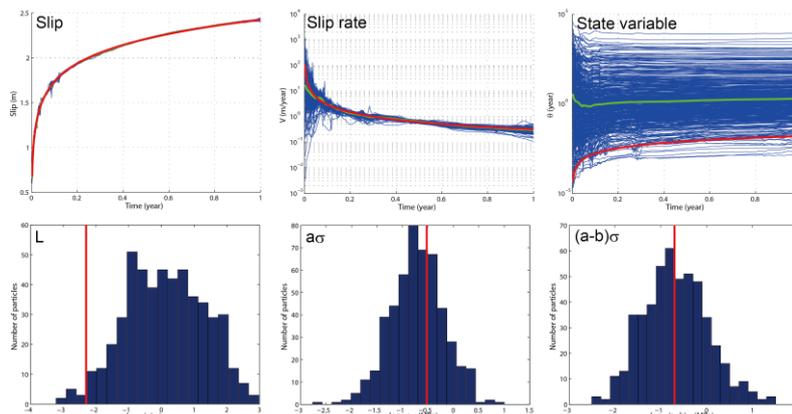
(i) 大規模・高次元モデルに対して適用可能なデータ同化手法の開発

シミュレーションの繰り返し回数を抑えながら非ガウスの観測データの情報をモデルに取り入れるために、アンサンブル変換カルマンフィルタの手続きの途中で多数の粒子によるモンテカルロ積分を実行する手法を提案した (Nakano, 2014)。一方、粒子フィルタとマルコフ連鎖モンテカルロ法を組み合わせた particle Markov chain Monte Carlo 法と呼ばれる手法について調査を行い、有用性を検討した。

(ii) データ同化手法を用いた摩擦構成則に基づく断層すべりモデルの状態・パラメータ推定

データ同化により速度・状態依存摩擦構成則に基づく断層すべりモデルの変数 (すべり・すべり速度・状態変数) と摩擦パラメータを推定する手法の開発を行った。今年度は速度・状態依存摩擦構成則に従うバネ・ブロックモデルに対して粒子フィルタ・スムーザ、アンサンブルカルマンフィルタ・スムーザ、アジョイント法を適用し、余効すべりの模擬観測データを用いた数値実験によって各同化手法のモデルに対する特性を検討した。

図1にアンサンブルカルマンフィルタ・スムーザを用いて推定されたモデル変数の時系列と摩擦パラメータの確率分布を示す。すべりとすべり速度については、真値に近い値が推定されているが、状態変数については真値から大きく離れており、分散が大きい。摩擦パラメータについても分散が大きく、Lには偏りが見られる。この結果は、状態変数と摩擦パラメータの間にはトレードオフがあり、余効すべりの観測のみからモデルの全ての変数・パラメータを拘束することが困難であることを示す。



研究成果の概要（続き）

図 1：アンサンブルカルマンフィルタ・スモータにより推定されたモデルの変数の時系列と摩擦パラメータの確率分布。（上）左からすべり、すべり速度、状態変数の時系列を示す。青線は全粒子、緑線は全粒子の平均値、赤線は真値の時間変化を表す。（下）左から速度・状態依存摩擦法則のパラメータ L , $a\sigma$, $(a \cdot b)\sigma$ の平滑化確率分布を示す。赤線は真値を表す。

(iii) データ同化に基づく地震活動解析を行うための地震検知能力の統計的評価

データ同化に基づく地震活動解析を行うにあたり、その元となる地震カタログの質を評価する必要がある。そのカタログの質の時間変化を推定することが、既存研究で行われて来ており、その例として、南極・昭和基地の地震検知能力に関する解析を行った。南極においては、主に気象要因による検知能力の顕著な年周変動が見られる。この年周変動に関して、気温データを説明変数とし、この影響によるものとそれ以外の影響によるものとに分離して推定することを試みた（図 2）。

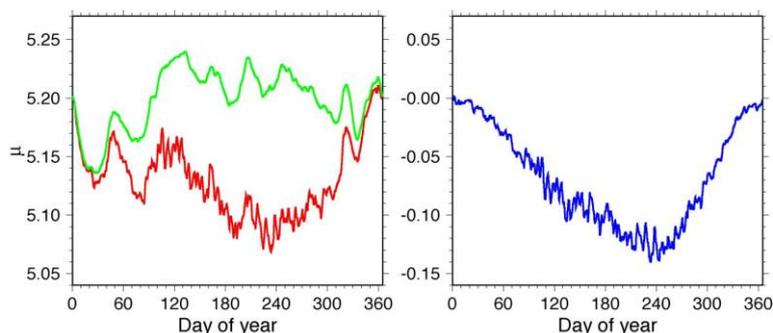


図 2：検知能力の年周変化に関する解析例。南極・昭和基地のデータから作成された地震カタログを年単位に分割して重ね合わせたものに対して推定した、地震検知率 50%に相当するマグニチュード (μ) の年周変化が、左図の赤線である。これは気温による変動（右図の青線）と、それ以外の要因による変動（左図の緑線）とに分解することが出来る。両図の横軸は、1月1日からの経過日数を表す（Iwata & Kanao (2015)を改変）。

(iv) 地震予測に向けた地球磁場・電場、重力データからの情報の抽出

地球磁場・電場、重力データに地震予測のために有用な情報があるかどうかを検証した。その結果、地震を予測するにあたって、ポアソンモデルに比べて2~5の確率利得があることがあることが分かった（Zhuang, et al, 2014; Han, et al, 2014; Chen, 2015, 投稿中）。

(v) 地震活動データに基づく地震断層形状の逆問題推定

地震断層形状を考慮した新しい ETAS モデルを定式化した。このモデルを地震活動データに適用したところ、新しいモデルはデータへのより良好なフィッティングを示した。また、楕円形の余震域が破壊域の各パッチからの等方的なトリガリングの重ね合わせによって表せることを示した。さらに、新しい ETAS モデルと確率的再構築（stochastic reconstruction）法を用いて、地震活動データから断層形状を推定する手法を開発した（Guo et al, 投稿中）。

7. 研究実績 (論文タイトル、雑誌・学会・セミナー等の名称、謝辞への記載の有無)

[論文]

Fukuda, J., A. Kato, K. Obara, S. Miura, and T. Kato (2014), Imaging of the early acceleration phase of the 2013-2014 Boso slow slip event, *Geophysical Research Letters*, 41, 7493-7500, doi:10.1002/2014GL061550.

Han, P., Hattori K., Hirokawa, M., Zhuang, J., Chen, C.-H., Febriani, F., Yamaguchi, H., Yoshino, C., Liu, J.-Y. and Yoshida, S. (2014). Statistical analysis of ULF seismomagnetic phenomena at Kakioka, Japan, during 2001-2010, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119, 4998-5011, doi:10.1002/2014JA019789.

Iwata, T. (2014), Decomposition of seasonality and long-term trend in seismological data: a Bayesian modeling of earthquake detection capability, *Australian & New Zealand Journal of Statistics*, 56, 201-215.

Iwata, T., and M. Kanao (2015), A quantitative evaluation of the annual variation in the teleseismic detection capability at Syowa Station, Antarctica, *Polar Science*, 9, 26-34.

Murru, M., Zhuang, J., Console, R. and Falcone, G. (2014). Short-term earthquake forecasting experiment before and during the L'Aquila (central Italy) seismic sequence of April 2009, *Annual of Geophysics*, 57, doi:10.4401/ag-6583.

Nakano, S. (2014), Hybrid algorithm of ensemble transform and importance sampling for assimilation of non-Gaussian observations, *Tellus A*, 66, 21429, doi:10.3402/tellusa.v66.21429.

Nakata, R., S. Miyazaki, M. Hyodo, and T. Hori (2014), Reproducibility of spatial and temporal distribution of aseismic slips in Hyuga-nada of southwest Japan, *Marine Geophysical Research*, 35, 311-317, doi:10.1007/s11001-013-9199z.

Zechar, J. D. and Zhuang, J. (2014). A parimutuel gambling perspective to compare probabilistic seismicity forecasts, *Geophysical Journal International*, 199, 60-68, doi:10.1093/gji/ggu137.

Zhuang, J. and Touati, S. (2014). Stochastic simulation of earthquake catalogues, *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*. (Under review, will be available at <http://www.corssa.org>).

Zoeller, G., Holschneider, M., Hainzl, S. and Zhuang, J. (2014). The largest expected earthquake magnitudes in Japan: The statistical perspective. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104, 769-779, doi:10.1785/0120130103.

[解説記事]

中野慎也, 樋口知之 (2014), 地球科学におけるシミュレーションとビッグデータデータ同化とエミュレーション, 電子情報通信学会誌, 97, 869-875.

[学会・セミナー等]

Falcone, G., Murru, M., Zhuang, J., and Console, R. (2014). Short-term earthquake probabilities during the L' Aquila earthquake sequence in central Italy, 2009, 2014 Fall Meeting of the American Geophysical Union (AGU), San Francisco, USA.

Fukuda, J., A. Kato, K. Obara, S. Miura, and T. Kato, Imaging of early acceleration phase of the 2013-2014 Boso slow slip event, AGU 2014 Fall Meeting, San Francisco, USA.

Hori, T., R. Nakata, T. Kuwatani, and M. Okada (2014), A Trial for Improvement in Reproducibility of Spatial Distribution of Afterslip in Geodetic Data Inversion, AGU 2014 Fall Meeting, San Francisco, USA.

Ito, K., M. Kunii, T. Kawabata, and K. Saito (2015), A meso hybrid EnKF-4DVar system based on the JMA non-hydrostatic model, The 4th International Symposium on Data Assimilation, Kobe, Japan.

Iwata, T., and M. Kanao (2014), The annual variation in teleseismic detection capability at Syowa Station, Antarctica: a statistical analysis including the effect of air temperature, 第5回極域科学シンポジウム, 立川, 東京.

Iwata, T. (2014), Estimation of completeness magnitude with a Bayesian modeling of daily and weekly variations in earthquake detectability, AGU 2014 Fall Meeting, San Francisco, USA.

Iwata, T. (2015), Statistical models to describe the spatio-temporal patterns of earthquakes: Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS) model and related model, School/Workshop on Fluctuations, Slow Dynamics and Internal Time in Complex Critical Systems, 倉敷, 招待講演.

Nakano, S. (2014), Data assimilation for estimating system dynamics in geosciences, Workshop on data mining in neuroscience, 招待講演.

Nakano, S., Suzuki, K. and Ueno, G. (2014), Optimization of the smoothness parameters in the Gaussian regression analysis for the modeling of typhoon trajectories, Data analysis and modeling in Earth sciences 2014.

Nakano, S., Suzuki, K., Kawamura, K., Parrenin, F., Abe-Ouchi, A., Saito, F. and Higuchi, T. (2014), A method for dating of Dome Fuji ice core based on a state space modeling, 第5回 極域科学シンポジウム.

Nakano, S. (2015), Two formulae of the marginal likelihood for parameter estimation using the ensemble Kalman filter, The 4th International Symposium on Data Assimilation 2015.

Zhuang, J. (2014). Evaluating earthquake predictions by using the gambling score, Varenna Workshop on Operational earthquake forecasting and decision making, Villa Monastero, Varenna, Varenna L.C., Italy.

Zhuang, J., Wang, D. and Matsuura M. (2014). Similarities between Vere-Jones' branching crack model and earthquake source process, 2014 SCEC (Southern California Earthquake Center) Annual Meeting, Palm Springs, USA.

Zhuang, J., Wang, D. and Matsuura, M. (2014). Similarities between Vere-Jones' branching cracking model and the earthquake source process, 中国地球科学連合 2014 學術年会,北京市, 中国, 招待講演.

Zhuang, J. (2014). Foreshock probabilities and the Båth law under the ETAS model, 2014 Fall Meeting of the American Geophysical Union (AGU), San Francisco, USA.

伊藤耕介, 国井勝, 川畑拓矢, 斉藤和雄 (2014), Hybrid EnKF-4DVAR データ同化法の JNoVA への実装, 日本気象学会春季大会, 横浜.

岩田貴樹, 金尾政紀 (2014), 南極・昭和基地における遠地地震の検知能力の年周変化, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 横浜.

岩田貴樹, 気象庁カタログにおける地震検知能力の週周期変化と completeness magnitude, 日本地震学会 2014 年度秋季大会, 新潟.

王 敏真, 庄 建倉, Enescu, B., 王 墩 (2014). Determining the actual nodal plane and analyzing the correlation between earthquake sizes and rake, 日本地震学会 2014 年度秋季大会, 新潟.

奥田亮介, 平原和朗, 宮崎真一, 加納将行, 大谷真紀子 (2014), アンサンブルカルマンフィルタを用いたスロースリップを引き起こす断層面上の摩擦パラメータ推定についての数値実験, 日本測地学会第 122 回講演会, つくば.

奥田亮介, 平原和朗, 宮崎真一, 加納将行, 大谷真紀子 (2014), アンサンブルカルマンフィルタを用いたスロースリップを引き起こす断層面上の摩擦パラメータ推定についての数値実験, 日本地震学会 2014 年度秋季大会, 新潟.

郭 一村, 庄 建倉, 周 仕勇 (2014). 地震断層形状の誘発地震活動への影響のモデルリング, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 横浜.

郭 一村, 庄 建倉, 周 仕勇 (2014). Inverting rupture geometry from triggering, 日本地震学会 2014 年度秋季大会, 新潟.

庄 建倉, 王 墩(2014). 震源過程と Vere-Jones の分枝モデル間の類似特性, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 横浜.

庄 建倉, Zechar, J. (2014). Recent development of the gambling score, 研究集会「日本における地震発生予測検証実験(CSEP-Japan)」, 仙台.

庄 建倉, 王 墩, 松浦充宏 (2014). Similarities between Vere-Jones' branching crack model and earthquake source process, 日本地震学会 2014 年度秋季大会, 新潟.

庄 建倉 (2014). Probability of foreshock phenomena under the ETAS model: simulation and comparison to observation, 研究集会「地震活動の時空間パターンと断層および地震サイクルとの関係」, 東京.

中野慎也, 鈴木香寿恵, 川村賢二, 樋口知之 (2014), Merging particle smoother による南極氷床コアの年代推定, 研究集会「データ同化と粒子フィルタの接点」, 東京.

日吉善久, 堀高峰, 野田博之 (2014), 動的地震発生サイクルシミュレーション結果を利用した地震発生予測システムの評価, 日本地震学会 2014 年度秋季大会, 新潟.

福田淳一, 加藤愛太郎, 小原一成, 三浦哲 (2014), 2013-2014 年房総スロースリップイベントにおけるすべりと地震活動の時空間発展, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 横浜.

福田淳一, K. M. Johnson (2014), 2011 年東北地方太平洋沖地震の余効変動の物理モデル, 日本地震学会 2014 年度秋季大会, 新潟.

福田淳一, 樋口知之, 宮崎真一 (2014), GPS 時系列データに基づく断層すべりの時空間変化の推定, 研究集会「データ同化と粒子フィルタの接点」, 東京, 招待講演.