

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23740337

研究課題名(和文)モンテカルロ法による最適なモデル解像度を得る逆解析手法の開発とその応用

研究課題名(英文)Development of Monte Carlo Method for optimizing model parameter resolution and application

研究代表者

伊藤 武男 (ITO, TAKEO)

名古屋大学・環境学研究科・助教

研究者番号：40377982

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：多くの地球科学の逆問題はデータの不足により劣決定問題となっている場合が多く、物理的に根拠のない制約条件を導入することで、劣決定問題を優決定問題に転化してパラメータを推定する場合が多い。本研究ではモンテカルロ法により推定可能なパラメータと推定できないパラメータを分離した上で、パラメータの配置を問題の最適化を行った。さらに、推定されたパラメータの確率密度分布を直接推定する事が出来る事から、応用範囲が広く、地下構造推定、断層すべり推定、地震メカニズム推定などの応用例を示した。また、モンテカルロ法の計算にはGPUを用いることは、計算時間の短縮に極めて有効であることをしめした。

研究成果の概要(英文)：Many inverse problems of earth science are underdetermined problems. These problems will be change well-posed problem with prior information, which use no reason of physical condition. In this study, we optimize estimated parameters using Monte Carlo method. We applied several studies, such as estimate under ground structure, slip distribution, seismic mechanism and etc. In addition, we show that the Monte Carlo method is very efficient using GPU calculation.

研究分野：固体地球科学

キーワード：MCMC法 確率密度分布 GPU 最適化

1. 研究開始当初の背景

地球科学における逆問題の解法はとても重要な役割を占めているのは疑いの余地がない。多くの重要な地球科学の発見等はインバージョン手法に基づいて得られた結果の解釈である場合が多く、その傾向はより小さな現象の解釈へと向かっているため、信頼性の議論が重要になる。しかしながら、逆問題における劣決定問題にはトレードオフの問題が内在しており、先験情報はより慎重に選択しなければならないが十分に検討されていないのが現状である。

一方、多くの先人達の努力により AIC や ABIC などの情報量基準量を用いてより客観的にトレードオフパラメータを見積もることができる。その便利さ故に、多くの研究で使われて来た経緯があるが、同じデータを用いても古典的な手法ではトレードオフパラメータを正しく求められない事があることが示された。しかしながら、依然、トレードオフの問題が存在する事から、劣決定問題の本質的な解決にはなり得ないと申請者は考えている。このような背景の元、モンテカルロ手法に基づく逆問題の解法手法によって、トレードオフパラメータも含めて解決する手法が提案され、特に海外では盛んに研究が成されており、日本での研究が遅れているのが現状である。

2. 研究の目的

不確かな先験情報を用いず、データが持っている情報のみから最大限に正しく情報を引き出す手法の重要性が増しているのは疑いの余地はない。古典的なアプローチでは劣決定問題を優決定問題へ転換させるためにトレードオフパラメータを導入し、最小二乗法により解くことを行う。一方、新しい手法は、劣決定問題を劣決定問題として解く事でトレードオフパラメータを不要にする手法である。本研究のアプローチの本質には劣決定問題のままモンテカルロ手法で解く事にある。しかし、一般的にモンテカルロ法は計算機資源を大量に消費するため、スーパーコンピュータを用いる。そのため敷居が高く、計算機使用料などが比較的高い日本国内では普及が難しいことが挙げられる。日本国内でモンテカルロ法による逆問題の解法を普及させることを考慮すると、GPU (グラフィックス プロセッシング ユニット) による計算の加速がより重要な役割を果たすと考えられる。GPU はすでに多くの計算機に搭載されており計算機資源としての敷居は低く、モンテカルロ法の普及を加速させる事ができる。

よって、本研究ではモンテカルロ手法により、様々なパラメータを不確かな先験情報を用いずに解く事を目的とする。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、基礎的な MCMC (Markov chain Monte Carlo) アルゴリズムを構築する。主に GPU を用いたアルゴリズム、空間解像度の最適化アルゴリズムによる地震すべり分布、地震のメカニズム、ブロック運動、地下構造を推定するプログラムを作成する。MCMC 法は逆行列を解かないため、一回あたりの計算に必要なメモリ使用量は小さく、大量の繰り返し計算は GPU に適した種類の計算であると言える。最新の GPU は 450 個以上の計算コアを一つのチップに搭載し (一般的な計算機にも十数個の計算コアを搭載している)、今までの数値計算を大幅に高速化してくれる反面、プログラミングが極めて難しく、ソフトウェアだけでなく、ハードウェアの知識も必要になる。しかしながら、効率的な計算ライブラリが相次いで発表され、申請者の様な計算機の専門家ではない研究者でも利用できる環境がやっと整ってきたという状況である。たとえば、CUDA BLAS

(Basic Linear Algebra Subprograms) を用いれば、CPU の 40 倍から 150 倍の計算速度の加速が期待でき、メモリを大量に消費する大規模な計算以外はスーパーコンピュータを使わなくても実用的な時間で計算可能になりつつある。また、MCMC 法は場合によっては単精度の計算でも十分であり、市販の計算機に搭載されている GPU も活用できる。つまり、一台の計算機で実質 50 台から 100 台程度の計算機相当の計算が可能であり、より手軽にモンテカルロ手法を実行できる環境がやっと整ったと言える。

新しく開発する手法の本質は逆問題に MCMC 法を用いることであるが、さらに、多くの改良を加える。その一例として、パラメータを Fully unregularized することでトレードオフパラメータ廃止し、空間解像度の最適化アルゴリズムを導入する。この手法により、空間に配置されたモデルパラメータはすべて独立に推定され、これらの独立性は相関係数によって補償されるため、解像度の議論が不要になることが期待される。

4. 研究成果

本研究では、複数の研究対象を設定しており、海洋地球潮汐応答を用いた地下構造推定、スマトラ島北端部における、スマトラ断層の固着の推定、地震のメカニズム推定、フィリピン断層とブロック運動の推定など多岐にわたる。これらの内、2つの研究事例を紹介する。

本研究の基本的な推定方法として MCMC 法を用いており、GPU を用いた計算資源の有効活用と計算速度の向上について報告する。GPU を用いた

MCMC 法と CPU を用いた MCMC 法の速度比較を図 1 に示す。並列数を増やす事で GPU による計算速度は上昇する。問題設定にも依存するが、512 並列よりも大きな並列数で GPU (TeslaC2070) での計算が CPU (Intel Xeon 6 Cores 2.27GHz×2) の計算速度を超える。これは GPU へのデータ転送のオーバーヘッドがあるため、並列数が増加すると、データ転送に要する時間は低減することを意味している。これらのグラフから GPU の有効性を確認し、並列数を増やすことで、それらの差は顕著になり、最大で 2.6 倍程度の加速が見られた。なお CPU 上の計算は 12 コアであり、1 core

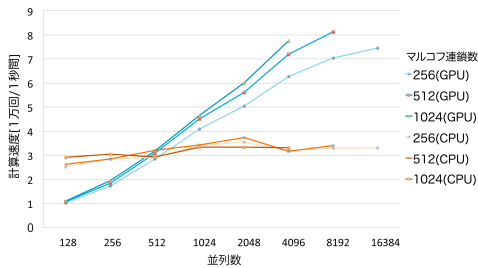


図 1 : MCMC 法の計算速度比較

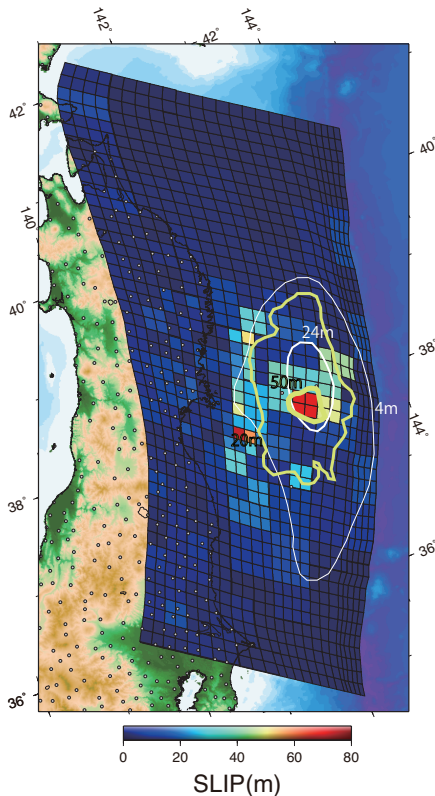


図 2 : MCMC 法により最適な解像度を推定した 2011 年東北沖地震 (M9.0) のすべり分布。コンターは国土地理院によるすべり分布を示す。

あたりで換算すると、31.2 倍であることから、GPU の使用が極めて有効であることがわかる。

GPU を用いた MCMC 法によって、スムージングパラメータを導入しない、新たなアルゴリズムを構築し、2011 年東北沖地震のすべり分布を推定した。解析手法の骨子は、サブフォルト間にスムージングパラメータを導入しない代わりに、MCMC のサンプリングに関してサブフォルト間で相関をとる。相関が無ければ、サブフォルトを分割し、大きな相関があれば、空間解像度が限界を超えているとしてサブフォルトを統合することで、大きなサブフォルトに置き換える。最終的には全てのサブフォルトが独立に推定されることで、観測データから、最適な解像度が選択される (図 2)。データの質によって最適な解像度自動的に設定され、この解析事例では最小の空間解像度と最大の空間解像度は 16 倍程度の差があることが分かった (口頭発表 17)。

2 つめの事例は、スマトラ断層の固着を MCMC 法で推定したものである。MCMC 法では推定されたパラメータを確率密度分布として推定することが可能であることから、推定されたパラメータの信頼性を同時に示す事ができた (図 3)。この研究により、スマトラ断層がクリープしている可能性を指摘した (発表論文 1)。

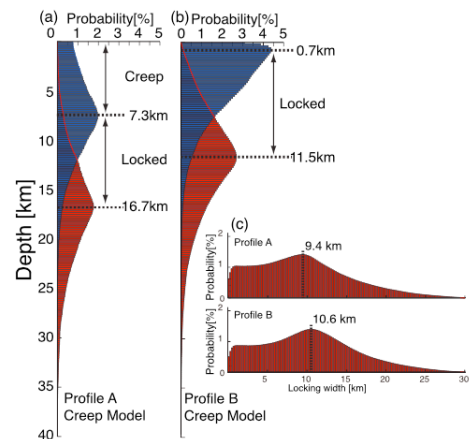


図 3 : (a-b) はスマトラ島北西部における GNSS 観測から MCMC 法により断層の固着域を示している。北部の断層プロファイル A では浅部がクリープしている事を示している。(c-d)は固着域の幅を示している。

## 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 2 件)

- ① T. Ito, E. Gunawan, F. Kimata, T. Tabei, M. Simons, I. Meilano, Agustan, Y. Ohta, I. Nurdin, D. Sugiyanto, Isolating along-strike variations in the depth extent of shallow creep and fault locking on the northern Great Sumatran Fault, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2011JB008940, 2012. (査読有)
- ② T. Ito and M. Simons, Probing asthenospheric density, temperature and elastic moduli below the Western United States, *Science*, 332, 6032, 947-951, 2011. (査読有)

[学会発表] (計 17 件)

- ① Spatio-temporal Distribution of Afterslip due to the 2011 Tohoku-Oki Earthquake Using 3-D Visco-Elastic FEM Green's Function, Takeo ITO, Syota SUZUKI, Kachishige SATO, Mamoru HYODO, GENAH 2014. (宮城県松島)
- ② Geodetic and Geomorphic Evaluations of Earthquake Generation Potential of the Northern Sumatran Fault, Indonesia, Takao TABEL, Fumiaki KIMATA, Takeo ITO, Endra GUNAWAN, Hiroyuki TSUTSUMI, Yusaku OHTA, Tadashi YAMASHINA, Nazli ISMAIL, Irwandi NURDIN, Didik SUGIYANTO and Irwan MEILANO, GENAH 2014. (宮城県松島)
- ③ 粘弾性応答を考慮した 2011 年東北沖地震の余効すべりの時空間分布, 鈴木 翔太, 伊藤 武男, 里 嘉千茂, 兵藤 守, 日本地球惑星科学連合大会 2014 年. (神奈川県横浜)
- ④ Crustal deformation detected by GPS observation network across the Sumatran fault system in northwestern Sumatra, Indonesia, Takeo Ito, Lecture for crustal deformation along the GSF, 2014. (インドネシア)
- ⑤ Crustal deformation detected by GPS observation network across the Sumatran fault system in northwestern Sumatra, Indonesia, Takeo Ito, The 3rd International Symposium on Earthquake and Disaster Mitigation, 2013. (インドネシア)
- ⑥ Crustal deformation detected by GPS observation network across the Sumatran fault system in northwestern Sumatra, Indonesia, Takao Tabei, Takeo Ito, Fumiaki Kimata, Yusaku Ohta, Endra Gunawan, Nazli Ismail, Didik

Sugiyanto, Irwandi Nurdin, AGU Fall meeting, 2013. (アメリカサンフランシスコ)

- ⑦ スマトラ断層北西部の GPS 観測網内で連続して発生した地震, 伊藤武男, Endra Gunawan, 太田雄策, 田部井隆雄, 木股文昭, Nazli Ismail, Didik Sugiyanto, Irwandi Nurdin, 日本地震学会秋季大会, 2013. (神奈川県横浜)
- ⑧ 3次元地下構造を考慮した有限要素法による 2011 年東北沖地震の粘弾性応答, 鈴木翔太, 伊藤武男, 里嘉千茂, 兵藤守, 日本地震学会秋季大会, 2013 年. (神奈川県横浜)
- ⑨ Slip distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake inferred from geodetic data, Takeo ITO, French-Japanese Seminar on Earthquakes and Tsunamis, 2012. (日本東京)
- ⑩ 2011 年東北沖地震における余効すべりの時空間分布, 鈴木 翔太, 伊藤 武男, 兵藤 守, 里 嘉千茂, 野口 拓美, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会. (千葉県幕張)
- ⑪ GPS 観測網 (AGNeSS) によるスマトラ断層の断層固着の空間変化, 伊藤 武男, Endra Gunawan, 木股 文昭, 田部井 隆雄, 太田 雄策, Meilano Irwan, Agustan, Irwandi Nurdin, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会. (千葉県幕張)
- ⑫ Spatial variations in Fault Coupling on the northern portion of the Great Sumatran Fault, Takeo Ito, International workshop on Active Tectonics in subduction zone geodesy research group, 2012. (インドネシア)
- ⑬ Probing asthenospheric density, temperature and elastic moduli below western United States, Takeo Ito and Mark Simons, AGU 2011 Fall Meeting, 2011. (アメリカサンフランシスコ)
- ⑭ モンテカルロ手法を用いた断層すべりに関する空間解像度の最適化手法の構築, 伊藤 武男, 兵藤 守, 野口 拓美, 里 嘉千茂, 鷺谷 威, 日本測地学会講演会, 2011 年. (岐阜県高山)
- ⑮ Afterslip Following 2004 Sumatra-Andaman Earthquake in Northern Sumatra Deduced from AGNeSS data, E. GUNAWAN, T. SAGIYA, T. ITO, F. KIMATA, T. TABELI, I. MEILANO, D. SUGIYANTO, IRWANDI, 日本地震学会 2011 年秋季大会. (静岡県静岡)
- ⑯ Lecture of OTL tomography and spatial variations in Fault Coupling on the GFS, Takeo Ito, Lecture for understanding several topics, 2011. (インドネシア)
- ⑰ アメリカ西海岸におけるアセノスフェアの密度, 温度, 弾性定数の推定, 伊藤武

男, Simons Mark, 日本地球惑星科学連合  
2011年大会. (千葉県幕張)

[図書] (計0件)

[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  
とくに無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊藤 武男 (Takeo Ito)  
名古屋大学・大学院環境学研究科・助教  
研究者番号: 40377982

### (2) 研究分担者

無し

### (3) 連携研究者

無し