

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25280090

研究課題名(和文) マルコフ確率場モデルによる科学技術計測イメージングデータからの潜在構造推定

研究課題名(英文) Extraction of Latent Structure from Imaging Data Using Markov Random Field Models

研究代表者

岡田 真人 (Okada, Masato)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：90233345

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、イメージングデータから画像の潜在構造を抽出するアルゴリズムを提案することである。当初の目的としていた、MRFモデルのハイパーパラメータを用いたフィルタ幅の自動推定、MRFモデルと反応拡散方程式との対応の明確化、ハイパーパラメータ分布推定を行った。さらに、アルゴリズムに関して、分布推定の解析的な評価手法の開発を行い、画像のダウンサンプリングの影響評価を行った。アルゴリズム提案だけでなく、MRFモデルを用いて地球、地質科学におけるデータの潜在構造抽出に応用した。また、物性科学のSTM/STSデータから、スパースモデリングに基づく手法であるLASSOを用いて潜在構造抽出を行った。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research was to propose an algorithm to extract latent structure from imaging data. As an initial objective, we proposed an algorithm that automatically estimates filter width using hyper-parameter of MRF model, clarified correspondence between MRF model and reaction diffusion equation, and proposed algorithm to estimate hyper-parameter distribution. Furthermore, we developed the method to analytically evaluate distribution estimation, and evaluated the influence of downsampling of the image data.
We applied extraction of latent structure to analysis using MRF model of data in Earth and geological sciences. We also applied extraction of latent structure from the STM / STS data of the physical science, using LASSO which is a method based on sparse modeling.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：画像処理 バイズ推論 イメージング 潜在構造 ビッグデータ

1. 研究開始当初の背景

(A) 先端科学技術計測とイメージングデータ

科学技術の計測技術の進展により、我々は大量の画像化(イメージング)されたデータを取得することができる。高次元データを画像化することにより、我々は視覚情報としてデータを把握し、深い理解を得ることができる。このようにイメージング計測は、計測対象の物理的な特性を知る上で、非常に有用な技術であり、それを発展させることが科学技術全般を発展させる鍵である。この計測技術の潮流をさらに加速するためには、イメージング計測によって得られた画像から、画像データの背後にある潜在的な測定対象の物理特性を、恣意性なしに自動的に抽出するアルゴリズムの開発が急務である。

(B) イメージングデータ解析の現状

STM (Scanning Tunneling Microscope, 走査型トンネル顕微鏡)は固体表面の原子の吸着度合いを直接観測し画像化することができる。STM 画像から、固体表面に吸着している原子の位置を直接に観測できる。固体表面の原子間には、斥力や引力からなる複雑な相互作用が存在する。STM 画像から原子配置を知ることができるが、相互作用を直接に観測することは難しい。この場合、原子間の相互作用が画像の背後にある潜在的な測定対象の物理特性である。このような状況では、これまで得てきた測定対象の知識を使って画像をヒトが解釈し、原子間相互作用に代表される系の潜在構造を推定している。その解釈には観測者の主観が混入する。また、人手を介しており大量の画像を処理できず、計測機器の高性能化による、画像のハイスループット化に追いついていけない現状がある。

(C) 画像処理から潜在構造推定へ

科学技術計測では極限的な観測が行われるのでノイズ処理が必須であり、イメージングデータの取り扱いには、フィルタリングに代表される画像処理技術が必須である。画像処理によってきれいな画像が得られることによって、先ほどのヒトの解釈の精度の向上は期待されるが、人手で潜在構造推定を行っている状況は変わらない。もう一つ重要な問題点は、多くの画像処理技術は自然画像の統計性を積極的に使っているため、必ずしもイメージングデータ解析には最適化されていない可能性がある。

2. 研究の目的

前項の(A)~(C)の背景に基づき、本研究課題では、イメージングデータから潜在的な物理特性を、人手を経ずに抽出するアルゴリズムを、ベイズ推論にもとづくマルコフ確率場モデル(MRF)を用いて開発する。

MRF は画像処理で最もよく使われている手法の一つであり、「隣接する画素における画素値が似ている」という空間的連続性の仮定を利用して、ノイズの加わった観測画像からノ

イズを除去する。この連続性は、画素間にバネをとりつけたことに相当する。MRF の枠組みでは、このバネのバネ定数は、画像の背後にある潜在的なパラメータであるのでハイパーパラメータと呼ばれる。

多くの観測対象の系の挙動は拡散方程式で近似できる。それを用いると、バネ定数に対応する空間的連続性を司るハイパーパラメータは系の拡散係数に対応する。このような考察から、STM 画像にとって、ハイパーパラメータは原子間の相互作用を表し、地震波トモグラフィにとっては地盤に含まれる流体の浸透率を表すことがわかる。

以上の考察から、本研究課題では、科学技術イメージングデータに特化した画像修復アルゴリズムを MRF にもとづき開発する。この提案アルゴリズムを STM 画像や地震波トモグラフィの画像修復問題に適用することで、どこまで深い潜在的な物理特性を抽出できるかを以下の3つの観点から調べる。

(1) ハイパーパラメータ推定によるフィルタ幅の自動決定

MRF モデルのハイパーパラメータ推定の枠組みを用いて、自然科学分野におけるデータに適用できる従来のフィルタリング技術よりも高性能なアルゴリズムを提案する。

(2) MRF モデルと反応拡散方程式の数理的対応の明確化

MRF モデルと拡散方程式の数理的対応を明確化し、ハイパーパラメータと対応する物理的パラメータの関係を明らかにする。また、ハイパーパラメータ推定手法を用いて、画像の背後に隠れた潜在的な物理パラメータをデータのみから推定する。

(3) MRF モデルによるハイパーパラメータの分布推定

計測データのノイズによって生じるハイパーパラメータの誤差を記述するために、それが従う確率分布を導出する枠組みを提案する。

3. 研究の方法

(1)ハイパーパラメータ推定によるフィルタ幅の自動決定

イメージングデータを取り扱う際には通常、平滑化フィルタを用いることでノイズを削減する。科学技術計測、特に自然科学分野では、平滑化フィルタのフィルタ幅は、個々の研究者や技術者の経験にもとづく直感に頼って、恣意的に決定されることが多い。しかし、適切にフィルタ幅を設定しない限り、イメージングデータからのノイズ除去を適切に行うのは難しい。MRF の画像の滑らかさのハイパーパラメータは、観測ノイズの大きさに依存して決まる変数である。ハイパーパラメータの値はフィルタ幅と対応している。MRF を用いるとベイズ推論の枠組みで、観測データのみからハイパーパラメータを推定することができる。これをハイパーパラメータ推定と呼ぶ。つまりハイパーパラメータ推定を用いると、先ほど指摘した恣意性なしに、最適なフィル

タ幅を自動的に決定することができる。これは画像の背後に隠されている、滑らかさと言う潜在的な構造が画像から推定できることを意味する。

(2) MRF と反応拡散方程式の数理的対応の明確化

MRF の枠組みは反応拡散過程と数理的に対応する。この観点から、ハイパーパラメータが反応定数や拡散定数と対応することがわかる。この対応にもとづき、ハイパーパラメータ推定によって、観測画像の背後に隠れた物理特性や物理法則を抽出することが本研究のキーコンセプトである。その対応を深めるために本研究では、MRF と反応拡散方程式をはじめとする様々な現象論的方程式との数理的対応を比較・解析し、様々な観測・計測画像に潜む様々な物理特性をハイパーパラメータ推定によって決定する体系的な方法論を構築する。

(3) MRF モデルによるハイパーパラメータの分布推定

ハイパーパラメータは拡散係数などの物理パラメータに対応しているため、計測工学の観点からは、計測して得られる値の誤差評価をする必要がある。

そこで、ハイパーパラメータの確率分布の推定を行う。確率分布そのものを求めることは、最適な一点を求めることに比べ、技術的にも時間的にも困難であることは明らかであり、これを達成することが本研究を実用化する際の要となる。ここでは、ハイパーパラメータの事前知識から、データとの整合性を考慮し、マルコフ連鎖に従い更新することでハイパーパラメータの精度を表す事後分布を構成する。

4. 研究成果

(1) MRF モデルを用いた画像の潜在構造推定についての理論構築

本研究課題では、MRF モデルを用いたイメージングデータから、対象となる系の潜在的な物理特性を推定する手法について、理論的な研究を行い、推定手法の基礎づけを行った。成果を以下 3 項目に分けて説明する。

① MRF と反応拡散方程式の数理的対応の明確化

MRF モデルは離散的に画素を繋いだモデルであり、反応拡散方程式は連続的な系を扱う方程式である。そのため、反応拡散方程式の離散化によって MRF モデルとの対応を示した。反応拡散方程式の最も単純なケースとして、線形の拡散方程式を考え、これを離散化することで、MRF モデルのエネルギ関数との対応を示された。この対応付けによって、MRF モデルの画像の滑らかさを表すハイパーパラメータと拡散方程式の対象系の重要な潜在変数である拡散係数が対応していることが示され、研究目的(2)が達成された。

② MRF モデルによるハイパーパラメータの分布推定

本研究課題では MRF モデルのハイパーパラ

メータ分布推定を行った。ベイズ推定の枠組みでは、ハイパーパラメータの事後分布を推定することで、推定値とともに分布の広がりによって推定の信頼度を評価する事ができた(図 1)。この分布の幅は、推定された物理量の含む誤差に対応している。本研究課題では、従来近似的手法や確率的なサンプリングによって行われていたハイパーパラメータ分布推定を解析的に行う手法を提案した。これにより、推定値と信頼度を画像から厳密に得ることが可能になり、研究目的(3)が達成された。さらに、画像の生成モデルを仮定することで、推定されるハイパーパラメータ事後分布の期待値を解析的に導出した。観測対象の系と観測系のモデルから得られる分布の期待値を厳密に評価することが可能になった。これは当初の目的を超える成果である。また、以上の方法により推定されたハイパーパラメータは理論的に最も精度が高くなるような画像修復の際のフィルタ幅を定めることに相当する。これによって研究目的(1)が達成された。

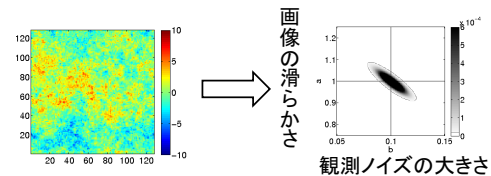


図 1 : MRF のハイパーパラメータ分布推定

③ 観測画像のダウンサンプリングによるハイパーパラメータ推定への影響評価

観測画像は画像により様々な観測条件によって撮像される。なかでも重要な条件が解像度である。本課題では空間的な観測の粗さを示す空間解像度と時間的な観測の間隔を示す時間的解像度とに分け、2つの解像度のそれぞれに対し、解像度の低下(ダウンサンプリング)がハイパーパラメータに与える影響を、②での分布推定手法を用いて評価した。

まず、時間的ダウンサンプリングでは、時間的解像度を落とす一方、ノイズの影響を低減する非自明なトレードオフがある状況を考えた。分布推定を行った結果、ダウンサンプリングによりハイパーパラメータ推定値の信頼度が低下することが分かった(図 2)。このことから、潜在変数の推定に関してはたとえノイズが増えるとしても、短い時間間隔で撮像を行う方が良いと示された。

次に、空間的ダウンサンプリングでは、ダウンサンプリングにより推定されるハイパーパラメータ分布は信頼度が低下すると同時に、拡散係数に対応する推定値にはバイアスが加わることがわかった。このバイアスは 2次元画像では確認されるが、1次元では存在しない。このことから、2次元画像から推定される拡散係数に対応する潜在変数には解像度依存性が存在する。またこのバイアスは系統的であることから、バイアスのフィッティングにより異なる解像度の画像から得られた推定結果の比較を行うことが出来る。

以上の時間的、空間的ダウンサンプリングによるハイパーパラメータ推定への非自明な影響を考慮することで、画像から潜在変数を推定する際の観測系の設計に重要な指針を与えることが出来た。これは当初の目的を超える成果である。

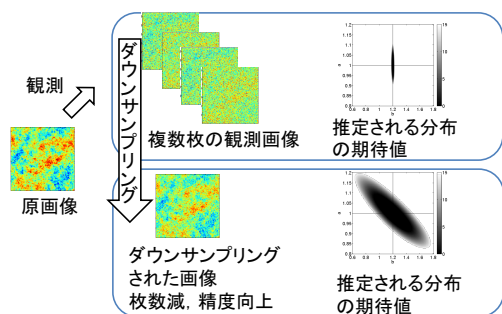


図 2 : 時間的ダウンサンプリングの影響

(2) MRF モデルの地球科学分野計測・観測画像データへの応用

MRF モデルは、空間方向の連続性を持つような物理的対象を取扱うことが可能なため、地球科学の様々な観測データの解析にその効果を発揮する。本研究課題では、主に以下の 4 項目について、MRF モデルを用いて、地球科学画像観測データから物理化学プロセスや潜在構造を抽出する手法を開発した。

① 地球内部媒質評価への応用

地球内部媒質評価とは、地球物理観測データから、地球内部の地質学的・物質科学的な情報を得ることである。本項目では、地震波トモグラフィによって得られた地震波速度構造から、地球内部の岩石に含まれる流体量と流体形状の空間分布を定量的に推定する方法を開発した。

地震波 P 波速度および S 波速度と、流体量および形状の関係性は非線形の構成方程式で表現されることから、解析的に MRF モデルの最適解を求めることはできない。そのため、マルコフ連鎖モンテカルロ法により、最適解を推定した。人工データを用いて手法の妥当性と有効性を確認したほか、日本列島東北地方地下 40 km の地震波速度構造データに適用した結果、火山地帯の直下において流体量が多く、形状が等方的であることが分かった。

② 地震波トモグラフィへの応用

通常 MRF モデルでは、観測量と求めるべき物理量は、サイトごとに独立した関係式で結び付けられていることが多い（観測行列が対角行列で表現される）。しかし、地球科学分野では一般的に、観測量と推定すべきパラメータは畳み込みで関係づけられ、観測行列は非対角行列であることが多い。そこで、MRF モデルを一般的な線形逆解析問題に拡張し、地震波トモグラフィへの応用を可能にした。

特に、フィルタ幅の決定に対応するハイパーパラメータ推定に関して、系統的な導出方法を明らかにしたほか、観測データ数とノイズの大きさを変えた場合の推定精度を評価し、

手法の頑健性を証明している。

本手法を利用することで、空間・時間方向の連続性を持つような物理的対象を持ち、かつ線形の観測方程式を持つ多様な地球科学的逆問題のイメージング解析が可能である。

③ プレート境界域余効すべり空間分布推定への応用

前項目で拡張した MRF モデルを応用することで、測地的変位データからの余効すべり量空間分布の高精度逆解析手法の開発を行った。余効すべりとは、大地震発生後の数か月から数年間の時間スケールにおいて、地下断層が地震波の放出を伴わずにゆっくりとすべる現象を示す。本研究では、従来手法よりも高精度・高分解能なすべり量空間分布の逆解析を実現するために、圧縮センシング技術を導入した逆解析手法を提案した。

提案手法では、一般的な MRF モデルで用いられる連続性の条件の他、スパース性、および、すべり領域と非すべり領域の不連続性の制約条件を新たに導入した。現実の余効すべりを模擬した数値シミュレーション結果を利用して、人工データ逆解析テストを行った結果、提案手法の有効性が確認された。

このように、実問題における解析対象にあわせたモデリングを行うことで、従来では不可能であった高精度・高解像度の推定が可能である。一方、ハイパーパラメータの推定方法に一部発見法的なアプローチを取り入れる必要があること、また、評価関数の最適化にかかる計算量など、様々な課題があることも事実である。現在、情報科学者と議論しながら、新たな解析手法の開発を進めている。

④ 岩石の温度圧力履歴推定への応用

MRF モデルは、地質学・岩石学の問題にも適用可能である。本研究項目では、変成岩中の鉱物化学組成から岩石の経験した温度圧力履歴を推定する新たな方法を開発した。

変成岩中のザクロ石や角閃石などの鉱物粒子は、しばしば組成累帯構造を有する。組成累帯構造とは、鉱物粒子の中心から縁辺に向かって、化学組成が連続的に変化する微細組織である。化学組成の変化は岩石の経験した温度 (T) と圧力 (P) の変化 (温度圧力履歴) の時間変化を反映しており、熱力学的な逆解析により温度圧力履歴を推定することが可能である。我々は既にホスト鉱物の化学組成のみを用いて正確な温度圧力履歴を復元した。

本研究項目では既存の包有物温度計圧力計を用い、汎用性の非常に高い新しい温度圧力履歴の推定法を開発した。開発手法の妥当性を調査するため、既存文献中のザクロ石ホスト鉱物中の黒雲母および斜長石包有物の化学組成データセットを用い、温度圧力履歴の復元テストをした。その結果、インクルージョンの個数密度に応じた詳細な温度圧力履歴の復元と誤差評価が可能であることが示された。

上記の 4 つの研究項目の例から、本研究課題で開発した MRF モデル逆解析法により、地球科学の多様な問題に対して、潜在構造推定

を実現できることが明らかになった。

(3) LASSO による STM/STS データからの潜在構造推定

物性科学では STM 技術の発達により、固体表面の各計測点で印加電圧を掃引することにより分光測定が可能である。このような計測法は STM/STS (Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy, 走査型トンネル顕微鏡/分光法) と呼ばれ、物質表面の空間局所的な電子状態密度を原子分解能で知ることができるようになった。実際に STM/STS を用いて固体表面のイメージングを行うと、準粒子干渉 (Quasi-Particle Interference, QPI) パターンと呼ばれるさまざまな模様が見られる。QPI パターンは量子力学における電子の波動性を如実に示すものであり、この解析により非従来型超伝導などに関連する複雑な電子状態が明らかになると期待されている。

準粒子干渉実験では、STM/STS により直接得られる実空間電子状態像よりも、準粒子干渉パターンをフーリエ変換して得られる波数空間像が重要な情報をもつ。本研究では、STM/STS 計測により得られるイメージングデータからの潜在構造推定を行うため、LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) の有効性を、Ag(111) 表面のイメージングデータにより調べた。LASSO とはスパースモデリングに基づいてイメージングデータから潜在構造を推定するための手法であり、準粒子干渉実験では電子状態の分散関係に関するスパース性が重要な役割を担う。スパース性とは多くの成分がゼロであり、少数の変数が非ゼロであることをいう。本研究で扱った Ag(111) 表面は電子状態が自由電子的に表されるため、一定のエネルギー下では決められた大きさの運動量しか許されず、波数空間像では等方的な円環部にしか非零成分が現れないというスパース性が見られる。

従来法により解析した場合はデータ量が通常通りである場合は円環模様が再構成できるが、データ数が少ない場合は円環模様がノイズに埋もれることが分かった。一方で、LASSO を用いると、データが少ない場合にも所望の円環模様が鮮明に再構成できることが分かった。スパースモデリングに基づいて LASSO を適用することにより、潜在構造抽出が可能になるだけでなく、計測時間の短縮が可能になることが示唆された。STM/STS による QPI 実験では、1 週間に及ぶこともある計測時間の長さが問題になっており、本研究を機に物性科学の分野で QPI 実験のより一層の普及が期待される。また、本研究では、あるエネルギー面のみを絞って議論したが、STM/STS の特性であるエネルギー軸も考慮に入れることにより電子状態全体の描像を今後明らかにする。

本研究課題は、全体を通して、科学技術計測イメージングデータからの潜在構造推定を目指し、その中でも特に空間的連続性に基づく MRF によるモデリングの有効性を議論して

きた。その過程で MRF だけでなくスパース性という別の切り口からのモデリングが有効であることを発見した QPI 実験に関する本研究は予想外の進展であるといえる。もちろん、両モデリング手法は相反するものではない。たとえば QPI 実験の場合では、空間方向はスパースモデリングが好ましいが、エネルギー方向をモデリングするには連続性に基づく MRF が望ましいというように組み合わせて用いることも考えられる。このようにさまざまなモデリング手法があるなかで、解くべき対象の特性に応じて適切に問題を定式化することが重要であることが分かった。

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 11 件)

- (1) Hikaru Takenaka, Kenji Nagata, Takashi Mizokawa, and Masato Okada, “Bayesian Approach to Effective Model of NiGa₂S₄ Triangular Lattice with Boltzmann Factor,” *Journal of the Physical Society of Japan*, **85**(12), 124003, 査読あり 2016.
- (2) Shin Murata, Kenji Nagata, Makoto Uemura, and Masato Okada, “Extraction of Latent Dynamical Structure from Time-series Spectral Data,” *Journal of the Physical Society of Japan*, **85**(10), 104003, 査読あり 2016.
- (3) Yoshinori Nakanishi-Ohno, Masahiro Haze, Yasuo Yoshida, Koji Hukushima, Yukio Hasegawa, and Masato Okada, “Compressed sensing in scanning tunneling microscopy/spectroscopy for observation of quasi-particle interference,” *Journal of the Physical Society of Japan*, **85**(9), 093702, 査読あり 2016
- (4) Hirotaka Sakamoto, Yoshinori Nakanishi-Ohno, Masato Okada, “Theory of distribution estimation of hyperparameters in Markov random field models,” *Journal of Physical Society of Japan*, **85**(6), 063801, 査読あり 2016
- (5) Ryoko Nakata, Tatsu Kuwatani, Masato Okada, and Takane Hori, “Geodetic inversion for spatial distribution of slip under smoothness, discontinuity, and sparsity constraints,” *Earth, Planets and Space*, **68**:20, 1-10, 査読あり 2016
- (6) Yasushi Naruse, Ken Takiyama, Masato Okada, Hiroaki Umehara and Yutaka Sakaguchi, “Phase shifts in alpha-

- frequency rhythm detected in electroencephalograms influence reaction time,” *Neural Networks*, **62**, 47-51, 査読あり 2015.
- (7) Hikaru Takenaka, Kenji Nagata, Takashi Mizokawa, Masato Okada, “Model selection of NiGa₂S₄ triangular lattice by Bayesian inference,” *Journal of the Physical Society of Japan*, **83**, 124706, 査読あり 2014.
- (8) Tatsu Kuwatani, Kenji Nagata, Masato Okada and Mitsuhiro Toriumi, “Markov random field modeling for linear seismic tomography,” *Physical Review E*, **90** 042137, 査読あり 2014.
- (9) Tatsu Kuwatani, Kenji Nagata, Masato Okada and Mitsuhiro Toriumi, “Markov random field modeling for mapping geofluid distributions from seismic velocity structures,” *Earth, Planets and Space*, **66**(5), 1-9, 査読あり 2014.
- (10) Yoshinori Nakanishi-Ohno, Kenji Nagata, Hayaru Shouno and Masato Okada, “Distribution estimation of hyperparameters in Markov random field models,” *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, **47**(4), 045001, 査読あり 2014.
- (11) Yasushi Naruse, Ken Takiyama, Masato Okada and Hiroaki Umehara, “Statistical method for detecting phase shifts in alpha rhythm from human electroencephalogram data,” *Physical Review E*, **87**, 042708, 査読あり 2013.
- [学会発表] (計 9 件)
- (1) 谷田健, 坂本浩隆, 五十嵐康彦, 出利葉健, 徳田悟, 佐々木耕太, 大澤五住, 岡田真人, “LASSO を用いたスパースなフーリエ表現を持つ受容野の高速推定,” ニューロコンピューティング研究会, 2017 年 1 月 26 日, 北九州学術研究都市産学連携センター (福岡県・北九州市)
- (2) Hikaru Takenaka, Kenji Nagata, Takashi Mizokawa, and Masato Okada “Bayesian Model Selection of NiGa₂S₄ Triangular Lattice with Boltzmann Factor”, *STATPHYS 26*, 2016 年 7 月 18 日, リヨン (フランス)
- (3) Tatsu Kuwatani, Kenji Nagata, Masato Okada and Takeshi Komai, “Data-driven geoscience: concept and applications”, *Goldschmidt2016*, 2016 年 06 月 28 日, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市)
- (4) 坂本浩隆, 中西 (大野) 義典, 岡田真人, “マルコフ確率場によるベイズ画像処理に対する平均操作の影響,” 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 22 日, 東北学院大学 (宮城県・仙台市)
- (5) Hikaru Takenaka, Kenji Nagata, Takashi Mizokawa, and Masato Okada, “Bayesian Inference of Effective Classical Spin Hamiltonians from Hartree-Fock Calculation”, *American Physical Society March Meeting*, 2016 年 3 月 17 日, ボルチモア (アメリカ合衆国)
- (6) Hirotaka Sakamoto, Yoshinori Nakanishi-Ohno and Masato Okada, “Bayesian hyper-parameter estimation on Markov random field influenced by using image data of low quality,” *International Meeting on “High-Dimensional Data Driven Science*,” 2015 年 12 月 16 日, メルパルク京都 (京都府・京都市)
- (7) Ryoko Nakata, Tatsu Kuwatani, Masato Okada and Takane Hori, “Improvement in reproducibility of spatial distribution of afterslip in geodetic data inversion.” *AOGS2015 Annual meeting*, 2015 年 8 月 5 日, サンテック (シンガポール)
- (8) 坂本浩隆, 中西 (大野) 義典, 岡田真人, “分布推定を用いたマルコフ確率場モデルにおける観測の最適化,” 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 24 日, 早稲田大学 (東京都・新宿区)
- (9) 中西 (大野) 義典, 永田賢二, 庄野逸, 岡田真人, “2 次元マルコフ確率場のハイパーパラメータ推定,” 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 28 日, 東海大学 (神奈川県・平塚市)
- [その他]
ホームページ等
<http://mns.k.u-tokyo.ac.jp/~okada/>
- ## 6. 研究組織
- (1) 研究代表者
岡田 真人 (OKADA, Masato)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号：90233345
- (2) 研究分担者
永田 賢二 (NAGATA, Kenji)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・人工知能研究センター・主任研究員
研究者番号：10556062
- 赤井 一郎 (AKAI, Ichiro)
熊本大学・パルスパワー科学研究所・教授
研究者番号：20212392
- 桑谷 立 (KUWATANI, Tatsu)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球内部物質循環研究分野・研究員
研究者番号：60646785