

## 地球惑星科学へのデータ駆動アプローチ Data-driven approaches to frontier of earth and planetary sciences

桑谷 立<sup>1\*</sup>; 永田 賢二<sup>2</sup>; 岡田 真人<sup>2</sup>; 駒井 武<sup>1</sup>  
KUWATANI, Tatsu<sup>1\*</sup>; NAGATA, Kenji<sup>2</sup>; OKADA, Masato<sup>2</sup>; KOMAI, Takeshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院環境科学研究科, <sup>2</sup> 東京大学大学院新領域創成科学研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, <sup>2</sup>Graduate school of Frontier Sciences, University of Tokyo

It is important to extract essential processes and structures from observed data sets in order to understand the dynamic behavior of the earth and planetary systems. Recently, many powerful methodologies have been proposed to extract useful information from high-dimensional data sets in information sciences. Since the summer of 2013, we have launched a big scientific project entitled as 'Initiative for high-dimensional data-driven science through deepening sparse modelling' supported by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology in Japan ([http://sparse-modeling.jp/index\\_e.html](http://sparse-modeling.jp/index_e.html)). The main purpose of this project is to develop the innovative mathematical methodology for understanding the world of nature by tight fusion of information science and natural science. The project includes a wide variety of natural sciences such as biology, medicine, brain science, earth and planetary sciences and astronomy. Two main key technologies are important to develop data-driven sciences: One is 'Bayesian estimation', which is a probabilistic methodology which can estimate cause from effect by reversing law of causality, and the other is 'Sparse modeling', which is a mathematical framework which can effectively extract a small number of essential explanatory variables from high-dimensional data sets. In this presentation, based on these two key technologies, we will overview data-driven analytical technologies with some examples (Kuwatani et al., 2014a *Earth, Planets and Space*; 2014b *Physical Review E*; 2014c *Scientific Reports*).

キーワード: データ駆動科学, ベイズ推論, スパースモデリング

## ハンドヘルド XRF を用いた隕石の全岩組成分析 Estimation of bulk composition for meteoritic samples using handheld XRF

新原 隆史<sup>1\*</sup>; 宮本 英昭<sup>1</sup>; 洪 鵬<sup>1</sup>; 小熊 みどり<sup>1</sup>; Dohm James M.<sup>1</sup>  
NIIHARA, Takafumi<sup>1\*</sup>; MIYAMOTO, Hideaki<sup>1</sup>; HONG, Peng K.<sup>1</sup>; OGUMA, Midori<sup>1</sup>; DOHM, James M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 総合研究博物館

<sup>1</sup>UMUT

Over 50,000 meteorites are recovered in hot and cold desert, and most of these meteorites are thought to originate from asteroids. The Hayabusa mission confirmed that the samples from asteroid Itokawa (S-type) have compositions similar to ordinary chondrites, therefore meteorites and asteroids have direct correlation, and thus the importance of meteorites increases to understand small bodies that could record early solar system histories. Direct comparison of meteorites and asteroids may produce important information of the surface materials of asteroids. Surface chemical composition can be obtained by onboard instruments such as APXS and GRS. On the other hand, bulk chemical composition for most meteorites are missing (only 10% have been analyzed) due to a limited mass of each sample. Therefore, most meteoritic samples cannot be analyzed using conventional techniques (e.g. INAA and XRF). To solve this issue, we are now developing an analytical procedure using a handheld XRF (Olympus Delta) to estimate bulk chemical composition without any sample preparation, although the accuracy of measurement is relatively lower than conventional techniques. The tube voltages of 40 kV and 10 kV are used for heavy elements (heavier than Ti) and light elements, respectively. The fundamental parameter method is adopted for calculation of elemental abundances and gives us semiquantitative values. One big problem of this method is analyzable elements are limited; light elements (lighter than Mg) cannot be detected with our instrument. In this presentation, we will report preliminary results of the precision and accuracy of measurement tested through geochemical standard (JB-3, JA-3, and JG-1a, supplied from geological survey of Japan). We currently calibrated for 6 major elements (Si, Ti, Al, Fe, Mn, and Ca) and can analyze within the variation of <5 % (GSJ values +/- 1 wt. %) in powder condition (soil cup with Mylar filter). Our purpose of this study is to expeditiously analyze the composition of a slab (or block) of the meteorites without any kind of sample preparation. We will continue to calibrate using slabs of diverse rock types stored in the UMUT.

キーワード: 隕石, 小惑星, 全岩組成

Keywords: meteorite, asteroid, bulk composition

溶液中の多形鉱物の核形成の経路に関するミクロなモデル  
Microscopic model for nucleation pathways of polymorphic minerals from solutions

岡本 敦<sup>1\*</sup>; 桑谷 立<sup>1</sup>; 大森 敏明<sup>3</sup>; 福島 孝治<sup>2</sup>  
OKAMOTO, Atsushi<sup>1\*</sup>; KUWATANI, Tatsu<sup>1</sup>; OMORI, Toshiaki<sup>3</sup>; HUKUSHIMA, Koji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学, <sup>2</sup> 東京大学, <sup>3</sup> 神戸大学  
<sup>1</sup>Tohoku University, <sup>2</sup>University of Tokyo, <sup>3</sup>Kobe University

“

キーワード: 岩石組織, オストワルドの段階則, 核形成, モンテカルロシミュレーション, ポッツモデル, 界面エネルギー  
Keywords: rock texture, Ostwald step rule, nucleation, Monte Carlo Simulation, Potts model, interfacial energy

## Lassoに基づく首都圏地震動分布のデータ駆動型イメージング Data-driven imaging of seismic wave field in the Tokyo metropolitan area based on lasso

水迫 覚信<sup>1</sup>; 長尾 大道<sup>1\*</sup>; 廣瀬 慧<sup>2</sup>; 加納 将行<sup>1</sup>; 堀 宗朗<sup>1</sup>; 酒井 慎一<sup>1</sup>; 中川 茂樹<sup>1</sup>; 本多 亮<sup>3</sup>;  
木村 尚紀<sup>4</sup>; 平田 直<sup>1</sup>  
MIZUSAKO, Sadanobu<sup>1</sup>; NAGAO, Hiromichi<sup>1\*</sup>; HIROSE, Kei<sup>2</sup>; KANO, Masayuki<sup>1</sup>; HORI, Muneo<sup>1</sup>;  
SAKAI, Shin'ichi<sup>1</sup>; NAKAGAWA, Shigeki<sup>1</sup>; HONDA, Ryou<sup>3</sup>; KIMURA, Hisanori<sup>4</sup>; HIRATA, Naoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 大阪大学大学院基礎工学研究科, <sup>3</sup> 神奈川県温泉地学研究所, <sup>4</sup> 防災科学技術研究所  
<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Graduate School of Engineering Science, Osaka University, <sup>3</sup>Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, <sup>4</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Rapid prediction of damage due to large earthquakes on constructions such as buildings and bridges through a numerical simulation that computes seismic responses of all constructions provides important information for making a decision of priority order relating to rescue and rehabilitation activities without waiting for on-site reports. Such a simulation requires ground motion input to each construction, which usually distributes much denser than seismometers. An estimation of the ground motion should rely on data-driven modeling from observational data because of insufficient information related to hypocenters or underground structure models needed in a numerical simulation of seismic wave propagation.

We propose a new methodology based on lasso (least absolute shrinkage and selection operator) for the purpose of data-driven imaging of seismic wave field in an urban area from seismograms obtained by a dense array. The target of this study is the Tokyo metropolitan area, in which MeSO-net (Metropolitan Seismic Observation network) consisting of 296 accelerometers has been established. We assume that a Taylor's expansion model is capable of estimating the seismic wave field at an arbitrary point from seismograms at nearby observatories. This model is reduced to a multivariate linear regression of which the matrix of predictors is a set of products of positions of the observatories, the outcome matrix consists of the observational data, and the coefficient matrix to be estimated consists of the partial derivative coefficients. The coefficient matrix is estimated by group lasso, which minimizes an evaluation function consisting of a loss function given as the squared discrepancy between the observation data and the regression model, and a regularization term based on the L2 norm for selection of grouped variables. The reason why we implement group lasso rather than ordinary lasso is that it can avoid the dependency of subjective coordinate settings in time and space.

We have applied the proposed method to synthetic seismograms obtained from an analytic solution of seismic wave field assuming that an earthquake of M7 class occurs in a horizontally-layered underground. The resulting image reproduced better than those obtained by other methods such as the ordinary least square, ridge regression, and lasso. We have also applied these methods to the actual MeSO-net data when the 2011 Earthquake off the Pacific coast of Tohoku occurred, and confirmed that group lasso reproduced the actual seismic wave field better than other methods.

キーワード: 首都直下地震, 首都圏地震観測網, 疎性モデリング, lasso, イメージング, 正則化  
Keywords: urban mega earthquake, MeSO-net, sparse modeling, lasso, imaging, regularization

## マイクロブーディン地質古応力計における赤池情報量規準を用いたモデル選択 AIC model selection in microboudin palaeo-piezometer

松村 太郎次郎<sup>1\*</sup>; 増田 俊明<sup>2</sup>  
MATUMURA, Taroujiro<sup>1\*</sup>; MASUDA, Toshiaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学創造科学技術大学院, <sup>2</sup> 静岡大学理学部地球科学科

<sup>1</sup>Graduate school of science and Technology, Shizuoka University, <sup>2</sup>Institute of geosciences, Shizuoka University

マイクロブーディン構造とは岩石変形構造の一つである。この構造は岩石中の鉱物が変形によって割れて離れ、その間隙を周囲の基質が流動して埋めることで出来る。特に石英質もしくは石灰質な基質中に存在する柱状鉱物(例えば、電気石、角閃石、紅簾石)がマイクロブーディン構造を示す場合において、これをマイクロブーディン地質古応力計として利用できる。マイクロブーディン地質古応力計は柱状鉱物の縦横比とマイクロブーディン構造の存在率の関係を弾性モデルによって表現し、これまで困難であった岩石が高温高压変形を受けた際の応力値を定量的に推定することを可能とした。しかし、構造地質学において、高温高压下での岩石の変形は粘性モデル、特にニュートン流体に近似して取り扱われるのが一般的である。そこで、本発表では、弾性モデルと粘性モデルではどちらが縦横比とマイクロブーディン構造の存在率の関係を説明するモデルとしてふさわしいのか赤池情報量規準(AIC)による検証を行なったので報告する。測定データは西オーストラリア、東ピルバラ地域の花崗岩体周辺に産する9つの石英片岩(メタチャート)中の計6171粒の電気石を測定して得たものを利用する。結果として、全てのサンプルで弾性モデルが選択された。従って、マイクロブーディン地質古応力計のモデルとしてふさわしいのは弾性モデルであると結論付けられる。

キーワード: マイクロブーディン構造, 地質古応力計, 赤池情報量基準, モデル選択

Keywords: Microboudin structure, palaeo-piezometer, AIC, Model selection

## 海洋玄武岩全岩組成への主成分分析の適用とその定量的理解：ココスプレート海洋底変質玄武岩の例 Application of principal component analysis to seafloor basalt and its quantitative interpretation

宇野 正起<sup>1\*</sup>; 桑谷 立<sup>1</sup>; 上木 賢太<sup>2</sup>  
UNO, Masaaki<sup>1\*</sup>; KUWATANI, Tatsuo<sup>1</sup>; UEKI, Kenta<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院 環境科学研究科, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構 地球内部物質循環研究分野

<sup>1</sup>Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, <sup>2</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Department of Solid Earth Geochemistry

岩石の全岩化学組成は数十元素ものデータからなり、その定量的な解釈には、高次元データの解析が不可欠である。従来の研究では、経験的に選ばれた特定の元素比に着目して、プロセスが評価されてきた。このような岩石の化学組成に対して、先見的知識に頼らないプロセスの抽出法として、主成分分析 (PCA) の適用が試みられてきた (桑谷ら, 2014; 上木, 2014)。例えば、島弧火山岩への PCA の適用により、火山毎に主成分が異なり、ミクシングや結晶分化などのプロセスが区別されることが明らかになっている (上木, 2014)。このように、岩石組成への PCA の適用は一定の成果を収めているが、さらなる発展には、PCA の結果 (寄与率や主成分負荷量) の定量的な解釈の手法開発が必要である。そこで本研究では、主成分負荷量の定量的評価を目的として、比較的単純なプロセスから形成されている、海洋玄武岩を対象として主成分分析を行い、理論的な分別作用との定量的な関係性を検証した。

対象試料は、IODP Exp. 334 で採取されたコスタリカ沖の海洋底玄武岩である。試料は海洋底からの深度 99-164 m の一連の玄武岩質の層序から採取されたものであり、比較的単純なプロセスで形成されていると期待される。先見的な指標である Nb/Zr 比や Cr/Zr 比から、溶融度の違いや、結晶分化作用の違いから組成バリエーションが作られていることが示唆されている (Uno et al., in prep.)。

深度 99-164 m から採取された 43 試料について、主要 10 元素 (Si, Ti, Al, Fe, Mg, Mn, Ca, Na, K, P)、微量 33 元素 (Li, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Sr, Rb, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Pb, Th, U) に関して、主成分分析を行った。

主な主成分は第 1 - 3 主成分で、データのバリエーションの約 80% を説明する。第 1 主成分は寄与率 52% で、Middle REE の負荷量が高く、Rb, Ba などの不適合元素 (岩石に分配しにくく、メルトに入りやすい元素) は低い。第 2 主成分は寄与率 19% で、Ni, Co, Heavy REE などの適合元素の負荷量が高い一方、Rb, Ba, Th などの不適合元素は負の負荷量を示し、岩石-メルト間の分配を示唆する。第 3 主成分は寄与率 8% で、Cs, Li, U など水溶液への分配の高い元素と全岩含水量 (LOI) の負荷量が高く、水溶液による変質を示唆する。

これらの第 1 - 3 主成分の深度分布は、それぞれ先見的な指標である Nb/Zr 比や Cr/Zr 比、変質鉱物の量と調和的である。このように、ココスプレートの玄武岩の全岩化学組成は、定性的には、鉱物分別・溶融度・熱水変質の 3 プロセスで解釈することができる。

主成分の定量的評価のために、各種分配係数と主成分負荷量の比較を行った。PC2 の主成分負荷量パターンは、玄武岩質メルト-かんらん岩の分配係数で定量的に説明出来る。一方、PC1 については、単純なメルト?鉱物の分配係数では説明ができないが、かんらん石/輝石の分配係数で定量的に説明できることがわかった。

本発表では、主成分負荷量とこのような分化プロセスの定量的な関係性について議論を行う。

### 引用文献:

桑谷立, 中村謙吾, 渡邊隆弘, 小川泰正, 駒井武 (2014) 主成分分析を用いた次元圧縮に基づく東北地方太平洋沖地震による津波堆積物の地球化学的特性評価, *地学雑誌*, **123**, 923-935.

上木賢太 (2014) 微量元素の主成分分析を用いた島弧マグマの分化プロセスの解析, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, SVC54-P02, 横浜.

Uno, M., Stipp, M., Vannuchii, P., Ujiie, K. (in prep.) Fluid flow in the oceanic crust of the Cocos plate offshore Costa Rica trench: petrological and geochemical investigations on IODP Expedition 334 samples.

キーワード: 主成分分析, 海洋底玄武岩, 元素分別, コスタリカ

Keywords: principal component analysis, seafloor basalt, elemental differentiation, Costa Rica

## 名取川流域における因子分析を用いた重金属類の分布メカニズムの解明 Distribution mechanism of heavy metals revealed by correspondence analysis in the Natori River, Send

中村 謙吾<sup>1\*</sup>; 桑谷 立<sup>1</sup>; 川辺 能成<sup>2</sup>; 駒井 武<sup>1</sup>

NAKAMURA, Kengo<sup>1\*</sup>; KUWATANI, Tatsu<sup>1</sup>; KAWABE, Yoshishige<sup>2</sup>; KOMAI, Takeshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院環境科学研究科, <sup>2</sup> (独) 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Tohoku University Graduate School of Environmental Studies, <sup>2</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

It is important to understand the distribution mechanism of heavy metal elements in environmental systems, because the toxicities of various metals and metalloids significantly affect health risks. The heavy metals concentrations are controlled by a wide of variety environmental factors. This study aims to clarify main influence factors on the heavy metal distribution in the sediment, soil, river in the Natori River, Sendai City.

We firstly produced geochemical maps for heavy metal concentrations (As, Pb and Cr) of river sediment, neighboring soil (bulk component, soluble component in 1N HCl and in pure water) and river water. The heavy metals concentrations in river water increase from upper stream to down stream, whereas heavy metal concentrations in river sediments and soil vary little from upper stream to downstream. There are no anomalous distributions of heavy metals in the studied area, although many anthropogenic materials are found in sediment, soil and river water.

The correspondence analysis was used to investigate relationships of heavy-metal concentrations between sediment, soil (bulk component, soluble component in 1N HCl and in pure water) and river water. The results indicate that the heavy metals (As, Pb and Cr) in sediment, soil and river water are dominantly controlled by natural sedimentary processes, such as denudation and sedimentation. The proposed method could be further applied for other pollutants in various environment systems.

キーワード: 地球化学図, 重金属類, 因子分析, リスク評価

Keywords: geochemical map, heavy metals, factor analysis, risk assessment

## 黒鉱鉱床における金属濃度の空間モデリングと鉱液パス推定への応用 Spatial modeling of metal contents in a kuroko-type deposit with application to estimating ore-solutions paths

内倉 里沙<sup>1</sup>; 久保 大樹<sup>1</sup>; 劉 春学<sup>2</sup>; 柏谷 公希<sup>1</sup>; 小池 克明<sup>1\*</sup>; 山田 亮一<sup>3</sup>  
UCHIKURA, Risa<sup>1</sup>; KUBO, Taiki<sup>1</sup>; LIU, Chunxue<sup>2</sup>; KASHIWAYA, Kouki<sup>1</sup>; KOIKE, Katsuaki<sup>1\*</sup>;  
YAMADA, Ryoichi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学工学研究科, <sup>2</sup> 雲南財経大学都市・環境学部, <sup>3</sup> 東北大学理学研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Eng., Kyoto Univ., <sup>2</sup>School of Urban and Environment, Yunnan Univ. of Finance and Economics, <sup>3</sup>Graduate School of Sci., Tohoku Univ.

持続可能な社会作りや技術革新のために金属資源の需要は年々増加しており、この傾向は将来も継続する可能性が高い。これによって既開発鉱山の周辺における鉱床の広がり、および経済的価値の高い新規の金属鉱床の探査・開発がますます重要な課題となってきている。この課題に対処するには、(i)「鉱床内・周辺における品位（岩石中の金属濃度）の高精度空間分布推定」、および(ii)「鉱床を形成した物理法則の解明」の2つが不可欠である。(ii)は複雑な品位分布から低次の物理モデルへの次元変換、すなわちスパースモデリング化の一種に相当する。また、物理法則が解明できれば、鉱液の流動形態や鉱化作用が及んだ範囲が推定できるとともに、鉱床形成のプロセスが定量的に表現できるようになる。

これら(i)・(ii)を本研究の目的に掲げ、そのケーススタディの対象として秋田県北鹿地域において最大規模の黒鉱鉱床である松峰鉱床を選んだ。黒鉱とは火山性塊状硫化物(VMS)の一種であり、Cu, Zn, Pbに富んだ緻密な鉱石である。鉱床形成は海底火山活動に起因し、鉱液が地下深部から海底付近に上昇、海水との混合で冷却され、金属が沈殿したことによる(山田・吉田, 2013など)。解析では、鉱床での77本の垂直、あるいはそれに近いボーリングによる地質柱状図、および1457地点でのCu, Zn, Pb濃度データを用いた。対象領域の大きさは水平方向に500 m × 1000 m、垂直方向に標高0 mから-300 mまでの範囲であり、領域を格子で区切った。

まず、地質柱状図を10種の主要地質に分類し、地質分布モデルを作成した。これは、各地質の出現確率の空間分布を3次元最適化原理(Koike et al., 1998)で計算し、各格子点で最も出現確率が高い地質を選択するという手法に基づく。次に、地球統計学(Geostatistics)の適用によって、金属濃度の3次元分布を推定した。3種の金属濃度データのバリオグラムを求めたところ、いずれも球モデルで近似できる空間的相関構造を有することが見出され、その水平方向の相関距離(レンジ)は垂直方向の2, 3倍ほど長いことがわかった。これは鉱液の水平方向への広がり起因すると解釈できる。バリオグラムに基づき、測点での濃度データから各格子点での濃度を計算する空間推定法には、ordinary kriging (OK)を適用した。これは、3種類の金属濃度相互の空間的相関性は弱く、多変量クリギングよりもOKという単純な単変量クリギングの方が推定精度が高かったことによる。

以上により得られた地質分布モデルと濃度分布モデルとを重ね合わせた結果、高濃度部は黒鉱と黄鉱の分布域に重なるとともに、これらの斑状の分布を繋ぐように水平方向に連続する。この成因として、海底で堆積した鉱石が小規模な火山活動、あるいは海底地すべりなどによって礫状化し、移動の後に再堆積したことが考えられる。また、黒鉱下部には深度方向に珪鉱が連続し、その周囲には流紋岩が広がる。これらの範囲での高濃度部は一部に限られる。

さらに、鉱液の移動と金属の沈殿は移流拡散現象で近似できると仮定して、格子状の濃度分布を移流拡散方程式に当てはめて、移流速度と拡散係数を求めた。移流速度に関しては鉛直上向きが多く、珪鉱と流紋岩の分布域でこの方向が連続するという特徴が現れた。これは鉱液の主要なパスに対応する可能性がある。この連続性から下向き成分が分岐していることは、鉱液の複雑な流動を示唆するものである。また、垂直方向の拡散係数の符号が2:1と偏り、これは概ね浅部ほど濃度が高いという傾向に関連すると考えられる。この移流拡散方程式とクリギングとを組み合わせ、物理法則を考慮した金属濃度の空間分布推定への改良に取り組んでいるところである。

**謝辞:** 貴重なボーリング調査資料のご提供と整理にご協力いただいたDOWA メタルマイン(株)、エコシステム花岡(株)に深甚の謝意を表したい。

### 文 献

Koike, K., Shiraishi, Y., Verdeja, E. and Fujimura, K (1998) Three-dimensional interpolation and lithofacies analysis of granular composition data for earthquake-engineering characterization of shallow soil, *Mathematical Geology*, v. 30, no. 6, p. 733-759.

山田亮一・吉田武義(2013)北鹿地域における黒鉱鉱床と背弧海盆火山活動, *地質学雑誌*, v. 119 補遺, p. 168-179.

キーワード: 黒鉱, 地球統計学, クリギング, 地質モデル, 移流拡散方程式, 松峰鉱床

Keywords: Kuroko, Geostatistics, kriging, spatial modeling, advection-diffusion equation, Matsumine mine



不均質反応を支配する非線形ダイナミクスのベイズ解析～岩石形成ダイナミクスの理解に向けて～

Bayesian analysis of nonlinear dynamics in heterogeneous reactions – toward understanding of rock-forming processes –

大森 敏明<sup>1\*</sup>; 桑谷 立<sup>3</sup>; 岡本 敦<sup>3</sup>; 福島 孝治<sup>2</sup>

OMORI, Toshiaki<sup>1\*</sup>; KUWATANI, Tatsu<sup>3</sup>; OKAMOTO, Atsushi<sup>3</sup>; HUKUSHIMA, Koji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学, <sup>2</sup> 東京大学, <sup>3</sup> 東北大学

<sup>1</sup>Kobe University, <sup>2</sup>The University of Tokyo, <sup>3</sup>Tohoku University

Heterogeneous reactions, which occur at interface between two phases, play important roles in rock-forming processes. In heterogeneous reactions, dynamics are intrinsically nonlinear, because surface area governs actual reaction rates and changes temporally. In general, even static surface area, not to mention the temporal change of surface area, is very difficult to be measured. Therefore, it has still been difficult to determine kinetic parameters of heterogeneous reactions even by well-designed laboratory experiments, because we can only use nonlinear and incomplete data sets.

In this study, we develop novel methodologies which estimate kinetic parameters from nonlinear dynamics of heterogeneous reactions using a Bayesian probabilistic approach. With an increasing demand of data-driven analysis, the Bayesian estimation has been widely applied to various fields in the natural sciences including physics, medicine, brain science, and earth sciences (e.g. Watanabe et al., 2009; Naruse et al., 2009; Shouno and Okada, 2010; Omori et al., 2013; Kuwatani et al., 2014; Omori, 2014). In this study, we first formulate probabilistic models of nonlinear dynamics of heterogeneous systems based on state space model. Sequential Monte Carlo Method and EM algorithms are employed for the proposed state-space model in order to simultaneously estimate time course of heterogeneous systems and kinetic parameters underlying nonlinear dynamics. The proposed method provides a very suitable framework for inversion analysis of nonlinear dynamics from incomplete datasets.

In this study, we focus a simple heterogeneous reaction, in which the solid reactant changes to solid product via intermediate product dissolved in fluid phase. It can be regarded as one of the most fundamental and substantial heterogeneous reactions for solid-fluid interactions. Using our proposed method, the reaction rate constants of dissolution and precipitation as well as the temporal changes of solid reactants and products were successfully estimated only by the observable temporal change of the dissolved intermediate product. The proposed method can be potentially applied to actual laboratory experiments of heterogeneous kinetics in various fields of earth and planetary sciences.

キーワード: 地球惑星科学データ解析, データ駆動型アプローチ, ベイズ統計, 非線形ダイナミクス, 不均質反応, 岩石形成ダイナミクス

Keywords: data analysis in geoscience, data-driven approach, Bayesian statistics, nonlinear dynamics, heterogeneous reaction, rock-forming processes

## 交換モンテカルロ法を用いた合成単斜輝石の反射スペクトル分解 Deconvolution analysis of reflectance spectra of synthetic clinopyroxenes using the exchange Monte Carlo method

洪 鵬<sup>1\*</sup>; 宮本 英昭<sup>1</sup>; 永田 賢二<sup>2</sup>; 杉田 精司<sup>3</sup>; 新原 隆史<sup>1</sup>; James Dohm M.<sup>1</sup>; 逸見 良道<sup>1</sup>; 岡田 真人<sup>2</sup>

HONG, Peng<sup>1\*</sup>; MIYAMOTO, Hideaki<sup>1</sup>; NAGATA, Kenji<sup>2</sup>; SUGITA, Seiji<sup>3</sup>; NIIHARA, Takafumi<sup>1</sup>; JAMES, Dohm M.<sup>1</sup>; HENMI, Ryodo<sup>1</sup>; OKADA, Masato<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 総合研究博物館, <sup>2</sup> 東京大学 複雑理工学専攻, <sup>3</sup> 東京大学 地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Univ. Museum, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo, <sup>3</sup>Earth & Planetary Sci., Univ. of Tokyo

反射スペクトル分解はこれまで様々な鉱物に適用され、その組成や結晶構造の推測に役立ってきた。その中でも単斜輝石は固体天体表層に豊富に存在すること、その特徴的なスペクトルの形状から、スペクトル分解において最も重要な鉱物の一つだとみなされている。単斜輝石の可視近赤外反射スペクトルに含まれる吸収帯中心は、Fe と Ca の量に応じて移動することが知られている。Klima et al. (2011) は人工的に合成した様々な組成を持つ単斜輝石の可視近赤外反射スペクトルを修正ガウス関数モデル (MGM) (Sunshine et al., 1990) を用いて分解した。MGM は反射スペクトル分解において広く用いられている手法だが、そのアルゴリズムで用いられている最急降下法は、局所解に陥りやすいという欠点を持つ。したがって、解析者は初期値を調節しながら何度も計算を繰り返す必要があり、理想的な解が得られたとしても、その解には初期値を調節したことに起因する恣意性が付きまとう。我々はこの局所解問題を解決するため、ベイズ理論に基づく交換モンテカルロ法 (Nagata et al., 2012) を用いて、幅広い組成の単斜輝石の反射スペクトル分解を行った。交換モンテカルロ法はマルコフ連鎖モンテカルロ法を改良したものであり、局所解に陥りにくく、初期値依存性も少ないという性質を持つ。そのモデルを、我々は Klima et al. (2011) によって計測された人工的に合成された単斜輝石の可視近赤外反射スペクトルに適用した。スペクトルの波長解像度は 5 nm であり、波長範囲は 0.3-2.6  $\mu\text{m}$  である。試料は 45  $\mu\text{m}$  以下のサイズの粉末であり、典型的なサイズは 15-25  $\mu\text{m}$  である。31 個の単斜輝石の反射スペクトルを用い、Ca, Mg, Fe のそれぞれの含有量は 8-52%, 0-52%, 3-90% と幅広い組成を含んでいる。解析の結果、(1) 1  $\mu\text{m}$  吸収帯は Ca 量の増加に応じて長波長側に移動する (2) 1  $\mu\text{m}$  吸収帯は Fe 量の増加に応じて短波長側に移動するが、分散は斜方輝石のそれに比べて大きい (3) Ca < 30% の試料については、Ca の増加につれて 2  $\mu\text{m}$  吸収帯が長波長側に移動するが、Ca > 30% の試料については 2  $\mu\text{m}$  吸収帯の中心は 2.4  $\mu\text{m}$  でほぼ固定される (4) 普通輝石 (Ca < 20%) の 2  $\mu\text{m}$  吸収帯の中心波長は Fe 量にあまり依存しないが、ピジョン輝石 (Ca > 20%) については Fe 量の増加に応じて 2  $\mu\text{m}$  吸収帯の中心波長が長波長側に移動する、ことがわかった。これらの結果は MGM を用いた Klima et al. (2011) の結果と極めて調和的であり、交換モンテカルロ法が伝統的な MGM による解析と同じ結果を得ることが可能であることを示唆している。また幅広い組成の単斜輝石に対して交換モンテカルロ法が適用できたことは、今後かんらん石や斜方輝石など様々な鉱物を含む反射スペクトルへの応用の第一歩となることを意味する。

## スパース性に基づく VLF 波動の伝搬ベクトル推定法の検討 Study on direction finding method based on sparsity

太田 守<sup>1\*</sup>; 笠原 禎也<sup>1</sup>; 後藤 由貴<sup>1</sup>  
OTA, Mamoru<sup>1\*</sup>; KASAHARA, Yoshiya<sup>1</sup>; GOTO, Yoshitaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学  
<sup>1</sup> Kanazawa University

地球磁気圏の科学衛星によって観測されるプラズマ波動の特性解析は、波動の伝搬機構だけでなくその伝搬・励起条件に影響を与えるプラズマ環境を把握するために重要である。特にプラズマ波動の伝搬方向は、VLF 波動の伝搬特性を理解するための極めて重要な要素であり、その推定手法の一つとして波動分布関数法が提案されている。この手法は衛星で観測される電磁場波形をもとに、それらに含まれる複数波動の伝搬方向を推定するものであり、複数の伝搬ベクトルをエネルギー密度分布 (波動分布関数) として表現する。衛星が飛翔する空間のプラズマ波動の分散関係式を用いることで波動分布関数の推定を行うのだが、一般にこの求解は不良設定問題となるため、何らかの事前情報を付加することで推定像を一意に定める必要がある。先行研究においては、波動分布関数法に用いる事前情報として幾つかのモデルが提案され、擬似データを用いた性能評価が数多く行われている。

本研究では新たに、波動分布関数のスパース性を仮定した解法を提案する。このスパース性の仮定は、データを説明するために有効な到来方向が少数であることを考慮したものであり、従来手法に比べて広がり小さい良好な推定像が得られることが期待できる。また従来行われてきた評価では、解析対象とする電磁場波形から推定の入力データとして用いるスペクトルマトリクスが正確に計算可能であることを仮定している。しかし、実観測データの場合には有限の区間において不規則信号からスペクトルマトリクスを精度良く計算しなければならないという検討すべき課題がある。そのため本研究では、実観測データにおいて波動分布関数法を適用する場合の問題点の検討を行う。

キーワード: プラズマ波動, 不良設定問題, 波動分布関数法, スパース性  
Keywords: Waves in plasma, Ill-posed problem, Wave distribution function, Sparsity

## プレート沈み込み帯における摩擦特性のデータ駆動型空間モデリング Data-driven spatial modeling of frictional features at plate subduction zones

加納 将行<sup>1\*</sup>; 鈴木 皓博<sup>2</sup>; 長尾 大道<sup>1</sup>; 駒木 文保<sup>2</sup>

KANO, Masayuki<sup>1\*</sup>; SUZUKI, Akihiro<sup>2</sup>; NAGAO, Hiromichi<sup>1</sup>; KOMAKI, Fumiyasu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 東京大学大学院 情報理工学系研究科

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

Frictional properties at a plate boundary are considered to control the time evolution of fault slips, so that clarification of their spatial distribution is one of the major issues to predict the states in the Earth's crust.

Recently, various aspects of the whole earthquake generation such as intervals of occurrence times, interseismic tectonic loading, afterslips, and episodic slow slips, were qualitatively reproduced, empirically giving the frictional parameters in the rate and state friction law [e.g., Kato and Yoshida (2011), Hori and Miyazaki (2011)]. For a more realistic simulation, the frictional parameters should be quantitatively determined based on observational data and theoretical prior information. Data assimilation (DA) is a computational technique based on the Bayesian statistics to integrate numerical simulation models and observational data [Higuchi et al. (2011)], which is widely used in geoscience including the solid earth science [e.g., Nagao et al. (2013)]. DA has also been applied to clarify the frictional features at plate boundaries, which are considered to control postseismic phenomena, estimating the frictional parameters in afterslip regions [e.g., Fukuda et al. (2009), Mitsui et al. (2010), Kano et al. (2013), Kano (2014)]. These previous studies assumed that the frictional parameters were unrealistically uniform in the entire fault region or subjectively divided the afterslip region into several areas in each of which the frictional feature is uniform in order to avoid substantial computational cost due to too much high-resolution spatial grids never to be determined by the limited observations on the Earth's surface. Therefore, it is meaningful to develop a method to divide the region appropriately in an automatic and objective way. We propose a data-driven procedure consisting of the *k*-means-based clustering method to obtain candidate division patterns in the afterslip region and the Akaike's Information Criterion to determine the optimum model among the candidates. We have confirmed that the model obtained by an application to synthetic data is almost the true one. We will report results when the proposed method is applied to the case of the afterslip region of the 2003 Tokachi-oki earthquake. This method will help to extract the large-scale frictional features and make relevant simulations more effective, objective and realistic.

## 主成分分析を用いた東北日本仙岩地域のマグマ分化プロセスの解析 Principal Component Analysis based determination of chemical differentiation processes of volcanic rocks

上木 賢太<sup>1\*</sup>  
UEKI, Kenta<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

マントル・地殻の岩石の溶融の結果として生成されるマグマの主要、微量元素化学組成は、地下のソースの多様性や溶融プロセスを反映している。これらの化学組成データは多変量のデータであると同時に、上昇する過程での冷却・減圧過程でのマントル・地殻・地表と、組成も温度圧力も異なる3つの場のプロセスの積分値である (Annen et al., 2006 など)。このような系を解くためには多変量解析が重要となる。

マグマの化学組成は、固体地球に存在度が高く鉍物やマグマの構造を作る主体となる主要元素 10 元素と、地球上の存在度が小さく鉍物やマグマに微量にしか分配されない微量元素に大別できる。主要元素の挙動は場の温度・圧力・組成に支配され非線形であるため温度や圧力の指標となる一方 (Ueki and Iwamori, 2014 など)、自由度が低く容易に上書きされてしまうため、温度圧力の推定には有用であるがプロセスの抽出には向いていない。微量元素は、主要元素と比較して組成空間の次元が広く自由度が高いこと、特定の相への溶解度が桁で変化することから (Blundy and Wood, 1994 など)、一度何らかのプロセスで得られた特徴は上書きされづらく、特定の相やプロセスのトレーサーとして用いることが可能である (Depaolo, 1981; Pearce et al., 2005 など)。本研究では、最も汎用的な多変量解析の手法である主成分分析を、沈み込み帯の火山岩の微量元素組成に適用することで、島弧火山岩の組成バリエーションをもたらす化学分化プロセスの議論を行う。

解析には、東北日本沈み込み帯の火山フロント付近の第四紀火山群である仙岩地域から稠密にサンプリングした玄武岩からライオライトまでの組成幅の火山岩の一連のデータセットを用いた。火山群全体として組成幅をもたらすプロセスを考察するために、火山群全体の 17 の異なる火山から採取した、262 サンプル 14 の微量元素からなるデータセットに主成分分析を適用した。

主成分分析の結果、これらのサンプルと元素が作る組成バリエーションは 3 つの主成分で十分説明できることが分かった。サンプルごとの、微量元素から得られた主成分得点と主要元素含有量との関係および、元素ごとのメルト—鉍物間の分配係数に着目することで、主成分の解釈を行い、マグマ生成・分化プロセスを抽出した。その結果、島弧マグマの微量元素の組成幅は、地殻由来と解釈できる 3 成分、すなわちマントル由来メルトと地殻由来メルトのメルト同士の混合、深部でのかんらん石主体の結晶分化、そして浅所での斜長石主体の結晶分化の 3 プロセスで生成されることが示された。また、安山岩以上の珪長質なマグマの生成には、結晶分化ではなく、マグマ混合を示す主成分の寄与が重要であることが分かった。微量元素から得られた主成分は、サンプルごとの鉍物組成のデータとも良い相関を示し、地球化学データと岩石学データがカップリングしていることが示された。さらに、マグマ混合を示す主成分の空間分布が、地殻内部の地震波の低速度域 (Nakajima et al., 2001) や地温勾配の高い地域 (玉生, 1994) の分布と良い一致を示すことから、マグマ混合と地殻の溶融構造の密接な関与があることが分かった。

キーワード: 火山岩, 多変量解析, マグマ, 島弧, 東北日本

Keywords: volcanic rock, multivariable analysis, magma, arc, Northeastern Japan

## 疎性モデリングを用いた余効すべりのインバージョン Bayesian inversion with sparsity constraint for spatial distribution of afterslip

中田 令子<sup>1\*</sup>; 桑谷 立<sup>2</sup>; 岡田 真人<sup>3</sup>; 堀 高峰<sup>1</sup>  
NAKATA, Ryoko<sup>1\*</sup>; KUWATANI, Tatsu<sup>2</sup>; OKADA, Masato<sup>3</sup>; HORI, Takane<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 東北大学大学院環境科学研究科, <sup>3</sup> 東京大学大学院新領域創成科学研究科  
<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Tohoku University, <sup>3</sup>University of Tokyo

本研究では、沈み込むプレートとその上のプレートとの境界面上で、将来大地震を起こす可能性のある固着域を、地表の地殻変動データから高分解能で抽出するための手法を開発することを目指す。そのために、地震後に生じるゆっくりしたすべり（余効すべり）の時空間分布をターゲットとする。余効すべりとは、大地震後に数カ月～数年間かけて、地下の断層がゆっくりと（地震波を放出せずに）すべる現象であり、GPS等によって地表で観測された地殻変動から、断層上のすべり量を推定できる。海域で発生した過去の大地震による余効すべりを解析した結果、余効すべりが起きている間、大地震の震源域はほとんどすべていないことが知られている。

我々は、地震や余効すべりを含むプレート境界面上のすべりの時空間変化の数値シミュレーションによって、大地震とその後の余効すべりを計算した [Nakata et al., 2012]。数値シミュレーションでは、大地震の震源域には、予め、周囲よりも不安定な摩擦条件を与えているため、周囲とは異なる挙動（普段は周囲よりもすべり速度が遅く、地震時には、周囲よりも高速ですべる）を示す。数値シミュレーションで起こした大地震後の余効すべりは、地震時のすべり域（震源域）を取り囲むように分布していた。

この余効すべりに伴う地殻変動を計算し、それを模擬データとして、プレート境界面上のすべり分布を推定したところ、すべり分布に対して観測点分布に偏りがある場合だけでなく、直上に観測点がある場合でも、すべりが0であるべき震源域内において、無視できない大きさのすべりが推定されていた [Nakata et al., 2014]。これは、データ（地殻変動観測点数）に対して推定すべき変数（プレート境界面を分割したセル数）が多い問題設定のため、すべり分布のなめらかさを仮定することで拘束条件を増やしていることによる。もし、大地震後の余効すべり域とすべていない領域が時空間的により高分解能で分離できれば、地震後のプレート境界面上の応力分布をより高い精度で推定できる。この知見は、地震後の応力蓄積・解放過程や強度回復過程の理解を助け、大きな余震発生の可能性が近い将来にある場所の推定にもつながる。

本研究では、数値シミュレーションで得られた余効すべり（真の物理量）による地殻変動の模擬データ（観測物理量）を用いて、プレート境界面上のすべり分布を推定した。評価関数は Kuwatani et al. [2014] の手法を改良し、Markov random fields (MRF) モデルに基づいたすべりの不連続性およびなめらかさを規定する項と、スパースモデリングに基づいたモデルパラメタのスパース性を規定する項を導入した。評価関数を最小にするモデルパラメタセットは、従来の手法よりも高い解像度で、余効すべり域と固着域を分離できていた。講演では、評価関数による結果の違いについても紹介する。

## 隕石の全岩組成データベースのクラスター解析 Cluster analyses on bulk elemental compositions of meteorites

宮本 英昭<sup>1\*</sup>; 新原 隆史<sup>1</sup>; 栗谷 豪<sup>2</sup>; 洪 鵬<sup>1</sup>; 杉田 精司<sup>1</sup>; James Dohm<sup>1</sup>  
MIYAMOTO, Hideaki<sup>1\*</sup>; NIIHARA, Takafumi<sup>1</sup>; KURITANI, Takeshi<sup>2</sup>; HONG, Peng<sup>1</sup>; SUGITA, Seiji<sup>1</sup>;  
JAMES, Dohm<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> 北海道大学

<sup>1</sup>University of Tokyo, <sup>2</sup>Hokkaido University

Meteorites are now determined to be precious samples from extraterrestrial bodies and thus identifications of the corresponding meteorite types of the targeted bodies of asteroid missions are among the major goals of asteroid missions. Besides such scientific importance, rapid identification of the surface materials during the reconnaissance phase is also critically important even for maneuvering a spacecraft. Modern spacecraft carry cameras/spectrometers in the visible to infrared wavelengths, which are powerful tools in identifying surface materials. However, irradiation by cosmic and solar wind ions as well as bombardment by interplanetary dust particles modify the surface of airless bodies through processes known as space weathering. Impact events also mix materials at the surface of the body. These processes may flatten or change the absorption characteristics of reflectance spectra. In this sense, elemental compositions, which can be obtained by X and gamma-ray spectrometers, may be useful for the above purpose. However, it has not been investigated extensively how well we can classify these planetary materials based on elemental composition alone. In this study, we perform principal component and cluster analyses on 12 major and minor elements of the bulk compositions of 500 meteorites reported in the NIPR database. Our unique approach, which includes using hierarchical cluster analysis, indicates that meteorites can be classified into about 10 groups purely by their bulk elemental compositions. We suggest that Si, Fe, Mg, Ca, and Na are the optimal set of elements, as this set has been used successfully to classify meteorites of the NIPR database with more than 94% accuracy. Principal components analysis indicates that elemental compositions of meteorites form 8 clusters in the 3 dimensional space of the components. The three major principal components (PC1, PC2, and PC3) are interpreted as degree of differentiations of the source body (i.e., primitive vs. differentiated), degree of thermal effects, and degree of chemical fractionation, respectively. Though the exact ranges of elements of each cluster suffer from the systematic intra-laboratory error, realized through comparing our results with those of another elemental composition database, our new method shows promise in the classification of the surface materials of a small body into a known group of meteorites, having a significant bearing in future reconnaissance.

キーワード: 隕石, 全岩組成, クラスター解析, 小惑星, XRF

Keywords: meteorite, bulk composition, cluster analysis, asteroid, XRF

## 地球科学研究における統計数理手法の活用と展開 Application of advanced statistical analysis in geoscience and its evolution

駒井 武<sup>1\*</sup>; 桑谷 立<sup>1</sup>  
KOMAI, Takeshi<sup>1\*</sup>; KUWATANI, Tatsu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学

<sup>1</sup>Tohoku University

地球科学分野では調査や観測による膨大なデータが蓄積され、有効に活用されない状態で保管されているものが多い。これらの高次元のデータの中には、重要なメカニズムや法則性を内包する可能性を秘めている。本研究では、スパースモデリングなどの新規の数理統計手法を活用して高次元データを解析して、有用な地球科学情報を抽出する試みを行っている。また、データ駆動により低次元の法則性を見出すための新学術領域研究を進めている。本講演では、津波堆積物、表層土壌、岩石などの地質試料の地球化学データを用いて数理解析を実施した適用事例を中心に、今後の研究の展開について報告する。

キーワード: 地球科学, 統計解析, スパースモデリング

Keywords: geoscience, statistical analysis, sparse modeling