

平成 30 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25120005

研究課題名(和文) スパースモデリングに基づくデータ駆動解析による地球プロセスモデルの構築

研究課題名(英文) Earth Process Model Development by Data Driven Analysis based on Sparse Modeling

研究代表者

駒井 武 (Komai, Takeshi)

東北大学・環境科学研究科・教授

研究者番号：30357024

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 55,500,000円

研究成果の概要(和文)：スパースモデリングを地球科学分野に導入することで、高次元・大量の地球科学データに潜む本質的な物理化学プロセスや構造を抽出する普遍的な枠組みを構築した。具体的な研究対象として、地球科学が直面した喫緊の課題である津波堆積物を扱うと共に、固体地球科学分野にも適用し、地球科学のデータ解析に革命的な進捗を達成した。具体的には、以下の三課題の解決を目的として、新学術領域研究を推進した。すなわち、【1】津波堆積物の地球化学判別の高精度化と歴史大津波堆積物への適用、【2】津波堆積物の物理化学的挙動の解明と環境リスク評価、【3】新たに開発したデータ解析法の固体地球科学への応用を可能にした。

研究成果の概要(英文)：The development of comprehensive framework to extract intrinsic physico-chemical processes hidden in multi-dimensional huge data has been conducted, by introducing the original sparse modeling techniques in the field of earth science. The research areas are the discrimination of tsunami deposits faced on the disaster prevention and the application to basic understanding in solid-earth science and geology, in order to bring fusional approach in the field of big data analysis in earth sciences. For the specific research targets, we have conducted the following three topics for the implementation of data driven analysis. 1) The application to tsunami deposits discrimination method by geochemical data analysis, 2) The risk assessment and behaviors of toxic metals in tsunami deposits, and 3) The introduction of developed sparse modeling to the solid-earth scientific problems.

研究分野：環境科学

キーワード：津波堆積物 データ解析 固体地球科学

1. 研究開始当初の背景

地球科学分野で得られる高次元・大量の計測データの振る舞いは非常に複雑であり不確定性も大きい。したがって、高次元データから地学現象を真に理解するためには、現象を記述する本質的な説明変数を選択しデータに潜む比較的少数の物理化学支配プロセスや構造を抽出する必要がある。

例えば、堆積物や岩石の主要・微量・同位体元素組成からなる高次元の地球化学データ中には、地球表層及び地球内部の様々な情報が保存されている。従来の地球科学では、経験的もしくは研究者の直観で選んだ 2, 3 元素を用いて物質を分類し、物質の被った物理化学プロセスを類推してきた。本研究では、スパースモデリングによって高次元データ駆動で本質的な元素を客観的に選択し、高次元データに隠れた物理化学プロセス・構造を抽出する。

2. 研究の目的

本計画研究では、スパースモデリングを地球科学分野に導入することで、高次元・大量の地球科学データに潜む本質的な物理化学プロセスや構造を抽出する普遍的な枠組みを構築する。具体的課題を以下に示す。

【課題 1】津波堆積物の地球化学判別の高精度化と歴史大津波堆積物への適用

堆積学データや各元素の比などの基底を説明変数として新たに導入し、判別法を高精度化すると共に、産総研の有する大量のデータセットに適用し、歴史大津波到達範囲を特定する。

【課題 2】津波堆積物の物理化学的挙動の解明と環境リスク評価

津波堆積物や土壌などに関する地球表層の物質移動モデルを提案する。また、津波堆積物の化学的特徴や重金属元素の挙動メカニズムを明らかにすることで、環境汚染リスクの定量的な評価までシームレスに接続させる。

【課題 3】地球化学データ解析法の固体地球科学への応用

上の二つの課題で開発した手法を表層堆積物のみならず、沈み込み帯の岩石にも適用することで、従来とは異なる地球化学判別図や、物質循環ダイナミクスモデルを構築する。

3. 研究の方法

スパースモデリングとベイズ推論に基づいたデータ駆動型解析手法を開発し、実際のデータに適用する。以下に各課題の方法を示す。

【課題 1】津波堆積物の地球化学判別の高精度化と歴史大津波堆積物への適用

貞観津波、弥生津波などの過去の津波堆積物の判別の高精度化を目指し、新たに、堆積学データや各元素の比などの非線形な基底を観測変数として導入する。この場合、あら

ゆる組み合わせを全探索するには現実的に不可能な膨大な計算時間を要するが、高速アルゴリズムを開発することで、スパースモデリングにより過去の大津波到達範囲の緻密な推定を行う。

【課題 2】津波堆積物の物理化学的挙動の解明と環境リスク評価

スパースモデリングにより、高次元データから、現象を説明する本質的な基底を抽出できる。選択された軸は、化学反応・溶出・拡散・移流などの物理化学プロセスを意味する。これらを、様々な地球科学的知見と比較し精査することで、各元素の水溶性や反応性、輸送メカニズムを明らかにする。本研究ではこれらの基盤技術を開発し、実データ解析により、環境リスクの定量評価を行う。

【課題 3】地球化学データ解析法の固体地球科学への応用

上記で開発した手法を、沈み込み帯に分布する変成岩や火成岩に適用し、岩石流体相互作用及び反応輸送方程式を抽出する。まず、高精度多数の高次元地球化学データセットに対して説明変数を半自動抽出し、地球化学判別図をデータ駆動で作成する。次に、抽出された説明変数間の時空間特性を解析する。これにより、岩石組織スケールから沈み込み帯まで、各時空間スケール階層における岩石・流体系の反応輸送方程式及び拡散係数や反応速度定数などを定量的に推定できる。また、得られた結果と地球科学的知見を統合し、地球内部における物質循環ダイナミクスを解明する。

4. 研究成果

主要な成果として、【課題 1】に関しては、サポートベクトルマシーンと交差検定法などの機械学習的手法により、18 種類の元素含有量データから 2011 年東北沖津波堆積物を高精度に判別する方法を開発した(5:Kuwatani et al. 2014c; 13:駒井ほか 2016)。

【課題 2】については、主成分分析をはじめとする多様な多変量解析法を用いて、2011 年東北沖津波堆積物や仙台平野河川堆積物に関する地球化学特性を抽出した研究(7:桑谷ほか 2014; 11:Nakamura et al. 2016; 15:中村ほか 2016, 2018)や、実験データから土壌の吸着特性を解明した研究などがある(19:Nakamura et al. 2017)。【課題 3】については、ベイズ推論的手法であるマルコフ確率場モデルを地球物理学データ解析に適用した研究など(3, 4:Kuwatani et al. 2014a, b; 7:桑谷ほか 2014)がある。また、これらの研究として、公募班と共同して、GPS データから、プレート境界のゆっくりすべり量空間分布を推定する研究なども並行して進めている(12:Nakata et al. 2016, 2017; 14:桑谷ほか 2016)。また、物理モデリング班(B01-3)と協働して、岩石形成のダイナミクスに関する順モデルや逆解析計算の新技术を開発し

た(2:Okamoto et al. 2015; 21:Omori et al. 2016; 岡本・桑谷 2017). さらに、沈み込み帯における変成作用進行中の物質移動量を定量化した研究(27:Yoshida et al. 2018)や世界の火山岩に多変量解析を適用した研究(16:Iwamori et al. 2017; 24:Ueki et al. 2018)がある。また、これらの研究と関連して、非線形班(C01-1)・スパースモデリング班(B01-2)と連携して、高次元データから潜在構造及び構造の種類を推定する研究(6:Wakasugi et al. 2014)など多数の共同研究を進めている(Igarashi et al. 2016)。

上記の具体的な課題解決のほか、新学術領域内外との密接な連携体制を背景に、様々な連携が順調に進んでいる。さらに、国際会議・学会内企画セッション・研究集会主催などの学術普及活動やプレスリリース・新聞報道などによる社会・国民への発信も積極的に実施している。データ駆動科学の創成、および地球科学分野への浸透・定着という目標達成は当初予定以上に早期に実現しつつある。本稿では、こうした多数の共同研究の中から、各課題について、代表的な研究成果および萌芽的な研究について例を挙げながら、データ駆動科学の創成に向けた地球科学班の研究成果を以下に紹介する。

【課題 1】津波堆積物の地球化学判別の高精度化と歴史大津波堆積物への適用

スパースモデリング班(B01-2)と協働して組み合わせ全探索法を用いることにより、2011年東北沖津波堆積物について、サポートベクトルマシン(SVM)を利用した高精度な地球化学判別法を開発した(5:Kuwatani et al. 2014c; 13:駒井ほか 2016)。また、地球化学判別を高精度化すると共に、津波堆積物の起源や浸水プロセスに関する情報を取得する手法を新たに開発した。また、仙台平野における歴史大津波に関する大量の地球化学データを取得した。特に、仙台市若林区においてジオスライサー(深度:1~2m)を用いて採取したサンプルに関しては、深さ方向に1mm程度おきにITRAXを用いた化学分析を行い、時間方向の高密度データを取得した。また、ITRAXから得られた津波堆積物中の元素分布を用いて主成分分析を用いて、歴史津波堆積物中の本質的な元素の関係を定量的に評価した。

【課題 2】津波堆積物の物理化学的挙動の解明と環境リスク評価

2011年東北沖津波堆積物の全岩化学組成を対象に、主成分分析を利用した化学特性の抽出を行った。その結果、津波堆積物の化学組成バリエーションを支配する要因として、「ケイ酸塩鉱物の含有量比」、「重金属類の付加」、「海水成分の影響」の3つが重要であることが明らかになった(4:桑谷ほか 2014b)。さらに、津波堆積物の環境リスク評価のために、2011年東北沖津波堆積物に含まれる重金

金属類に特に注目し、クラスタ分析や主成分分析を行った(11:Nakamura et al. 2016)。また、重金属類を含んだ土壌の長期にわたる溶出量を推定及び周辺環境への影響評価を行うために、数理的な手法を用いて、重金属類の土壌への吸着メカニズムの推定を行った。具体的には、吸着係数に与える土壌の物理的・化学的パラメータ(pH, 陽イオン交換容量, 比表面積, 総炭素量, 強熱減量, 水分保持容量)の依存性をスパース重回帰分析により推定した。その結果、各重金属元素に対する土壌吸着特性を支配する物理化学パラメータが抽出された(19:Nakamura et al. 2017)。

茨城県・宮城県に分布する表層土壌の化学組成データに主成分分析を用いることで、土壌を構成する元素間の関連性や含有量・頻度の観点から、様々な土壌に共通する地球化学的特徴の抽出を試みた。重金属類元素は、同土壌種内での土壌中での濃度差が大きく、環境中において一部分に偏在する可能性があることが示された。重金属類元素間の関係性は、土壌への供給・分配に関して、地質や母岩に寄与する要因に加えて、特定の人為的な汚染源からの混入であることが示された。

主成分分析から得られたPC間の関係性より、土壌中に含有している重金属類では、外れ値と考えられる一部の土壌試料はあるものの、多くの土壌で共通した因子を有していることが判明した。この要因としては、様々な起源(火山灰, 鉱物 etc)が想定される土壌において、土壌中の重金属類が本質的に同様な環境動態のもと分布に寄与している可能性が考えられる(28:中村ほか 2018)。

【課題 3】地球化学データ解析法の固体地球科学への応用

スパースモデリング班(B01-2)と共同により、ベイズ推論を利用した画像解析手法の一種であるマルコフ確率場(MRF: Markov Random Field)モデルを用いて、様々な地球科学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(5:桑谷ほか 2014a)。理論研究面では、MRFモデルを地震波トモグラフィなどの一般的な線形逆解析問題へ拡張することに成功した(3:Kuwatani et al. 2014a)。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に関する多様な地球物理観測データの解析が可能である。応用研究面においても、3次元地震波速度構造データから、岩石に含まれる流体量・流体形状の空間分布を定量的に評価する手法の開発に成功している(4:Kuwatani et al. 2014b)。

また、公募班との共同により、MRFモデルを応用することで、GPS変位データからのゆっくりすべり空間分布の高精度逆解析手法の開発を行った。ゆっくりすべりとは、数か月から数年間の時間スケールで、地下の断層が大きな地震波の放出を伴わずにゆっくりとすべる現象のことである。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、圧縮センシングを導入した解析手法を提案した(12:Nakata et al. 2016). 日向灘沖の現実のゆっくり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、様々な条件下で人工データ逆解析テストを行った。また、南海トラフ豊後水道沖で発生したゆっくりすべりの空間分布について、Fused lasso法の適用により、詳細なすべり量空間構造の推定に成功した(20:Nakata et al. 2017).

物理モデリング班(B01-3)と協働し、岩石学データからの岩石形成ダイナミクスの抽出手法を開発した。固体地球内部の諸現象は、岩石の組織パターンや化学組成の不均質構造として保存される(21:岡本・桑谷 2017)。本研究課題では岩石-水相互作用に関するいくつかの問題について、物理現象の本質を残しつつ最大限の単純化を行い、順モデルの構築および逆問題解析を進めている。順モデル構築の例として、シリカ(SiO₂)の流体内沈殿現象の核形成プロセスの解析を実施した。シリカの沈殿の際に出現する複数の準安定相の表面エネルギーの効果を統計力学のポツスピンで表現し、その時間発展を交換モンテカルロ法で数値計算することで、オストワルドの段階則(物質析出時に準安定相が段階的に出現し最終安定相まで変化する現象)の再現に成功した(2:Okamoto et al. 2015)。逆問題解析の例として、実験系の時系列化学分析データから非線形反応ダイナミクスを抽出する基礎的な数理的方法論の構築を進めている。本年度までに、固相の表面積に反応速度が依存するような不均質反応について、化学組成の時系列データから状態空間モデルを用いて、反応係数を推定するベイズ逆解析法を開発した(9:Omori et al. 2016)。

領域内外の様々な研究グループと協働して学融合型共同研究を実施した。質量分析装置に関する共同研究により、生物試料や岩石試料などの超微量元素・同位体の空間マッピングを可能にする超解像技術の開発に成功したほか(青西ほか特許出願)、機械学習的手法の地球化学データへの適用などに成功している(たとえば、26:Yoshida et al. 2018; 24:Ueki et al. 2018)。

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 34 件)

2018 年度

1. Kuwatani, T., Nagata, K., Yoshida, K., Okada, M. and Toriumi, M. (in press) Bayesian probabilistic reconstruction of metamorphic P-T paths using inclusion geothermobarometry. *Journal of*

Mineralogical and Petrological Science. (査読付き)

2. Matsumura, T., Kuwatani, T., Ando, Y. and Masuda, T. (in press) Application of the inverse Batschelet distribution to measuring the preferred orientation of tourmaline grains. *Journal of Structural Geology.* (査読付き)
3. Ueki, K., Hino, H. and Kuwatani, T. (2018) Geochemical discrimination and characteristics of magmatic tectonic settings: a machine learning-based approach. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems.* 16 April, 2018 (査読付き) doi.org/10.1029/2017GC007401
4. Yasumoto, A., Yoshida, K., Kuwatani, T., Nakamura, D., Svojtka, M. and Hirajima, T. (in press) Fast and precise quantitative electron probe chemical mapping technique and its application to ultrahigh-pressure eclogite from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif (Nové Dvory, Czech Republic). *American Mineralogist.* (査読付き)
5. Yoshida, K., Kuwatani, T., Yasumoto, A., Haraguchi, S., Ueki, K. and Iwamori, H. (in press) GEOFCM: a new method for statistical classification of geochemical data using spatial contextual information. *Journal of Mineralogical and Petrological Science*, 171127R2 (査読付き)
6. Yoshida, K., Kuwatani, T., Hirajima, T., Iwamori, H. and Akaho, S. (2018) Progressive evolution of whole-rock composition during metamorphism revealed by multivariate statistical analyses. *Journal of Metamorphic Geology*, vol.36, no.1, pp.41-54. doi.org/10.1111/jmg.12282 (査読付き)
7. 中村謙吾・桑谷 立・駒井 武・山崎真一 (2018) 主成分分析を用いた表層土壌の元素濃度の地球科学的特徴の抽出. *Journal of MMIJ*, vol.134, no.2, pp.13-21. doi.org/10.2473/journalofmmij.134.13 (査読付き)

2017 年度

8. Iwamori, H., Yoshida, K., Nakamura, H., Kuwatani, T., Hamada, M., Haraguchi, S. and Ueki, K. (2017) Classification of geochemical data based on multivariate statistical analyses: Complementary roles of cluster, principal component, and

- independent component analyses. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol.18, no.3, pp.994-1012. (査読付き)
doi.org/10.1002/2016GC006663
9. Matsumura, T., Kuwatani, T. and Masuda, T. (2017a) The relationship between the proportion of microboudinaged columnar grains and far-field differential stress: A numerical model for analyzing palaeodifferential stress. *Journal of Mineralogical and Petrological Science*, vol.112, no.1, pp.25-30. (査読付き)
doi.org/10.2465/jmps.160711
10. Matsumura, T., Kuwatani, T. and Masuda, T. (2017b) Statistical model selection between elastic and Newtonian viscous matrix models for the microboudin palaeopiezometer. *Earth, Planets and Space*, vol.69, pp.83:1-12. (査読付き)
doi.org/10.1186/s40623-017-0669-4
11. Nakamura, K., Yasutaka, T., Kuwatani, T. and Komai, T. (2017) Development of a predictive model for lead, cadmium and fluorine soil-water partition coefficients using sparse multiple linear regression analysis. *Chemosphere*, vol.186, pp.501-509. (査読付き)
doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.131
12. Nakata, R., Hino, H., Kuwatani, T., Yoshioka, S., Okada, M. and Hori, T. (2017) Discontinuous boundaries of slow slip events beneath the Bungo Channel, southwest Japan. *Scientific Reports*, vol.7, pp.6129:1-7. (査読付き)
doi.org/10.1038/s41598-017-06185-0
13. 岡本 敦・桑谷 立 (2017) 変成岩組織と鉱物組成累帯構造からの情報抽出：フォーワードモデルと逆解析. *地質学雑誌*, vol. 123, no.9, pp.733-745. (査読付き)
doi.org/10.5575/geosoc.2017.0034
- 2016 年度
14. Omori, T., Kuwatani, T., Okamoto, A. and Hukushima, K. (2016) Bayesian inversion analysis of nonlinear dynamics in heterogeneous reactions. *Physical Review E*, vol.94, pp.033305:1-11. (査読付き)
doi.org/10.1103/PhysRevE.94.033305
15. Igarashi, Y., Nagata, K., Kuwatani, T., Omori, T., Nakanishi-Ohno, Y. and Okada, M. (2016) Three levels of data-driven science. *Journal of Physics: Conference Series*, vol.699, pp.012001:1-13. (査読付き)
doi.org/10.1088/1742-6596/699/1/012001
16. Nakamura, K., Kuwatani, T., Kawabe, Y. and Komai, T. (2016) Extraction of heavy metals characteristics of the 2011 Tohoku tsunami deposits using multiple classification analysis. *Chemosphere*, vol.144, pp.1241-1248. (査読付き)
doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.09.078
17. Nakata, R., Kuwatani, T., Okada, M. and Hori, T. (2016) Geodetic inversion for spatial distribution of slip under smoothness, discontinuity, and sparsity constraints. *Earth, Planets and Space*, vol. 68, pp.20:1-10. (査読付き)
doi.org/10.1186/s40623-016-0396-2
18. 駒井 武・桑谷 立・中村謙吾・土屋範芳 (2016) スパースモデリングによる津波堆積物の判別—津波到達推定への応用. *電子情報通信学会会誌*, vol. 99, no.5, pp. 418-423. (査読付き)
19. 桑谷 立・中田令子・岡田真人・堀 高峰 (2016) スパースモデリングの地球物理学への応用. *電子情報通信学会会誌*, vol.99, no.5, pp.406-410. (査読付き)
20. 中村謙吾・佐藤海里・川辺能成・桑谷立・駒井 武 (2016) 名取川水系の重金属類の環境評価に関する調査及び数理統計解析. *Journal of MMIJ*, vol.132, no.1, pp.22-30. (査読付き)
doi.org/10.2473/journalofmmij.132.22
- 2015 年度
21. Ohno, Y., Nagata, K., Kuwatani, T., Shouno, H. and Okada, M. (2015) Deterministic algorithm for nonlinear Markov random field model. *Journal of Physical Society of Japan*, vol.81, pp.064006:1-6.
doi.org/10.1143/JPSJ.81.064006 (査読付)
22. Okamoto, A., Kuwatani, T., Omori, T. and Hukushima, K. (2015) Free-energy landscape and nucleation pathway of polymorphic minerals from solution in a Potts lattice-gas model. *Physical Review E*, vol.92, pp.042130:1-9. (査読付き)
doi.org/10.1103/PhysRevE.92.042130
23. Kuwatani, T., Nagata, K., Okada, M. and Toriumi, M. (2014a) Markov-random-field modeling for linear seismic tomography. *Physical*

- Review E, vol.90, pp.042137:1-7.
doi.org/10.1103/PhysRevE.90.042137
(査読付き)
24. Kuwatani, T., Nagata, K., Okada, M. and Toriumi, M. (2014b) Markov random field modeling for mapping geofluid distributions from seismic velocity structures. Earth, Planets and Space, vol. 66, pp.5:1-9. ,
doi.org/10.1103/PhysRevE.90.042137
(査読付き)
25. Kuwatani, T., Nagata, K., Okada, M., Watanabe, T., Ogawa, Y., Komai, T. and Tsuchiya, N. (2014c) Machine-learning techniques for geochemical discrimination of 2011 Tohoku tsunami deposits. Scientific Reports, vol.4, pp.7077:1-6. (査読付き)
doi.org/10.1038/srep07077
26. Wakasugi, K., Kuwatani, T., Nagata, K., Asoh, H. and Okada, M. (2014) Verification of effectiveness of a probabilistic algorithm for latent structure extraction using an associative memory model. Journal of Physical Society of Japan, vol.83, pp.104801:1-8. (査読付き)
doi.org/10.7566/JPSJ.83.104801
27. 桑谷 立・永田賢二・岡田真人(2014a) マルコフランダムフィールドモデルによる計測画像データからの潜在構造抽出. 映像情報メディア学会誌, vol.68, no.12, pp.892-896. (査読付き)
doi.org/10.3169/itej.68.892
28. 桑谷 立・中村謙吾・渡邊隆弘・小川泰正・駒井 武 (2014b) 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, vol.123, no.6, pp.923-935. (査読付き)
doi.org/10.5026/jgeography.123.923
- ほか6報 (査読無し)

[学会発表] (計 73 件)

1. 桑谷立,地球科学におけるデータ駆動型解析, 日本情報地質学会・地質情報整備活用機構共催シンポジウム, 飯田橋レインボービル, 東京 2017/11/31
ほか 72 件

[図書] (計 1 件)

1. 桑谷 立・岩森 光 (2018) ビッグデータ解析. 「図説 地球科学の事典」朝倉書店. 2018. 4. 25. 全 248 ページ

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 質量分析計の信号処理方法及びプログラム
発明者: 青西亨, 木村純一, 桑谷立, 平田岳史
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特許願 2017-084599 号
出願年月日: 平成 29 年 4 月 21 日
国内外の別: 国内

[その他]

【Web ページ】 <http://dsap.jamstec.go.jp/>
【新聞】サンデーサイエンス 宇宙や津波, 数学で迫る一少ないデータで「本質」解析一, 日本経済新聞, 2015. 5. 3.
【TV】情報科学の名探偵! 魔法の数式スパースモデリング, NHK Eテレ サイエンス ZERO, 2015. 8. 23.
【雑誌】注目のスパースモデリング データ駆動科学は化学に何をもたらすのか, 化学と工業, 71, 185-187, 2018. 3. 1.
【TV】NHK World, Science view, “What is Sparse Modeling?”, 2017. 5. 3.
【一般向け講演会】横浜研究所休日開館 第 218 回公開セミナー「自然科学と情報科学のコラボで解き明かす岩石の歴史」, 2018. 3. 17.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

駒井 武 (KOMAI, Takeshi)
東北大学・大学院環境科学研究科・教授
研究者番号: 30357024

(2) 研究分担者

岡本 敦 (OKAMOTO, Atsushi)
東北大学・大学院環境科学研究科・准教授
研究者番号: 40422092

桑谷 立 (KUWATANI, Tatsu)
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

(3) 連携研究者

土屋範芳 (TSUCHIYA, Noriyoshi)
東北大学・大学院環境科学研究科・教授
研究者番号: 40207410

(4) 研究協力者

中村 謙吾 (NAKAMURA, Kengo)
東北大学・大学院環境科学研究科・助教

吉田 健太 (YOSHIDA, Kenta)
海洋研究開発機構・掘削科学センター・研究員