

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24244073

研究課題名(和文) 流れ場の反転が主導する新しい地磁気逆転のメカニズム

研究課題名(英文) New mechanism for geomagnetic polarity reversals induced by flow reversals

## 研究代表者

柳澤 孝寿 (YANAGISAWA, Takatoshi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・主任研究員

研究者番号：20359186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,500,000円

研究成果の概要(和文)：地球磁場が反転するメカニズムの解明を目的として、室内実験と数値シミュレーションによって、磁場および回転の影響下での熱対流の研究を実施した。水平磁場の影響下での液体金属の対流形態を、磁場と浮力とに關係した幅広いパラメータ領域で確立した。流れ場が反転するメカニズムの鍵は水平循環の発生であることを見出した。回転球殻でのダイナモシミュレーションを実施し、流れ場の変化と磁場の反転との対応關係を明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：We explored magnetoconvection and rotating convection by means of laboratory experiments and numerical simulations, to elucidate the mechanism that induces geomagnetic polarity reversals. We established a regime diagram of convection in a liquid metal under the influence of imposed horizontal magnetic field. The searched space is summarized by the relation between buoyancy and magnetic force, in which a regime exists that reversals of flow direction repeat intermittently. We found that the key mechanism for flow reversals is an occurrence of large-scale circulation in a horizontal plane. We also performed numerical simulations of dynamos in a rotating spherical shell, and clarified the relation between polarity reversals and transitions of convection flow.

研究分野：固体地球惑星科学

キーワード：地磁気の逆転 液体金属の対流 流れ場の反転 室内実験 数値シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

地球磁場の大きな特徴は、数十万年という長い時間スケールで逆転を繰り返してきたことであり、地磁気逆転は表層環境にも大きな影響を与えてきたと考えられる。しかし逆転の起こるメカニズムについて未だ確立したものはない。我々は、液体金属を用いた室内実験から、磁場をかけた熱対流系は自発的に流れ場の反転を繰り返すことを発見した。反転は履歴によらず不規則に生じ、多くの点で地磁気の逆転と共通の特徴を示す。これは乱流状態にある熱対流系の一般的な特徴である可能性があり本研究で更に深く追求することにした。また、数値シミュレーションや地磁気変動の解析と組み合わせ、従来あまり考察されてこなかった流れ場自体の変動を主体とした視点からの地磁気逆転現象の解明を目指した。

### 2. 研究の目的

地球磁場が逆転するメカニズムの解明を目的として、磁場を生み出す外核の流れの理解に重要な液体金属の対流を調べる。磁場と系の回転はともに対流パターン方向性を規定する働きを持ち、乱流的な流れに平均的な構造を出現させ、その変動を支配する要因となる。そして流れ場の反転現象がどのような条件の下で起こるかを明らかにして、反転を引き起こすメカニズムを確立する。そのため、これまでにない強磁場の領域、かつ高いレイリー数の領域まで対流のデータを取得する。そして、明らかにしたメカニズムが地球でどのように働くかを検討し、磁極逆転の理解につなげる。

### 3. 研究の方法

磁場及び回転のある熱対流系を対象として、室内流対実験と数値シミュレーションを並行して進めた。得られた知見を生かしつつ、回転球殻でのダイナモシミュレーションを実施し、流れ場の変動と磁場の極性の反転との関係を調べた。

(1) 磁場の影響を見る実験では作業流体として液体金属のガリウムを用いた。一様な磁場をかけるための大型のコイルと直流電源装置、そして対流を駆動する温度差を維持するための大容量の恒温槽を導入した。図1に実験系の概要を示す。容器は厚さ40mm、水平スケール200mmの正方形である。液体金属の流れの測定には超音波流速分布計を用い、サーミスタによる流体中での高精度温度計測を併用した。

(2) 回転の影響を見る実験では、大型の回転台の上に容器と各種の計測機器、そしてカメラを設置した。ゆっくりした回転から毎分60回転までの高速回転を安定して実現し、主に水の対流を対象にして回転が流れ場に与える影響を調べた。測定には超音波流速分布計

と Particle Imaging Velocimetry (PIV) を併用した。

(3) 固液が共存する系についての熱対流の実験を実施した。粒子-水のような相変化のない系とワックスのように固液の変化のある系の両者を扱った。さらに、外部から振動を与える実験も行った。高速度カメラも利用して映像により変化を追跡するとともに温度の計測を行った。

(4) 数値シミュレーションでは、地球シミュレータ及びクラスタ計算機で使用するための、独自の電磁流体力学コードを作成した。(1, 2)の実験に対応させて、磁場及び回転の影響のある系で、液体金属の対流のシミュレーションを実施した。また、地球を模した回転球殻でのダイナモシミュレーションを実施した。

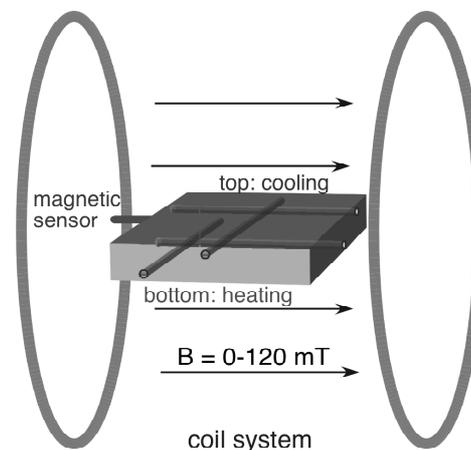


図1：磁場をかける対流実験の装置概略

### 4. 研究成果

(1) 最も重要な成果として、水平磁場の影響下での液体金属の対流形態を、磁場と浮力とに関係した幅広いパラメータ領域で確立したことが挙げられる。磁場はチャンドラセカル数  $Q$ 、浮力はレイリー数  $Ra$  で、それぞれ評価する。水平磁場をかけたこの系では、磁場の方向に軸を持つロール構造という2次元性の強い状態から、方向性を示さないような乱流的な対流まで、磁場強度に対応して構造が段階的に遷移していくことが明らかとなった。外部から磁場をかけることは流れ場の方向性を規定する要因となるため回転の役割との対応関係がよく、外核のような回転球殻内での対流の考察にも有用である。

Yanagisawa et al. (2013) では対流の挙動を分類し、そのレジームダイアグラムを報告した。これは、従来は点の計測から想像するしかなかった液体金属における層流から乱流に至る変遷を、流れの場の変動から理解することを可能としたものであり、画期的な成果である。

さらに進んで、Tasaka et al. (2016)では、ドイツのヘルムホルツセンターとも協力してより強い磁場の下でのレジームダイアグラムを提示した(図2)。対流のレジームは広い領域で  $Ra/Q$  の値に応じて分類されることが分かった。レイリー数が  $10^4$  以上の領域で  $Ra/Q$  の小さいほうから順に見ていくと、 $Ra/Q < 1$  というのが強磁場による定常5ロールの領域である。 $1 < Ra/Q < 10$  の領域では5ロール構造が非常に小さい振幅での周期的な振動を示す。 $10 < Ra/Q < 30$  というのが最も興味深い領域であり、ロール数が5の構造と4の構造の間で変化を繰り返すとともに、流れ場の反転現象が見られる。 $30 < Ra/Q < 100$  ではヒステリシスが強く見られる。印加磁場の強度を下げる方向では、4ロールの状態を保ったまま大きな振幅での振動を示す。磁場強度を弱いほうから上げていくと、4ロールと3ロールの間の変化が繰り返し起こる。 $100 < Ra/Q$  ではロール構造自体がはっきりせず、磁場をかけているにもかかわらず無磁場と違いのない流れ場の状態となっている。これらの実験で取得したデータを利用して更に、固有直交分解(POD)によって流れ場を空間モード間の競合と捉えることが、対流構造とその時間変化の理解に有用であることを示した。

流れ場と温度変動の詳細な計測から、流れ場の反転以外にもこれまでに知られていなかった振る舞いや主要ロールと2次元的な循環との関係などが明らかになってきており、これらは新たな流体物理の問題として発展することが予想される。

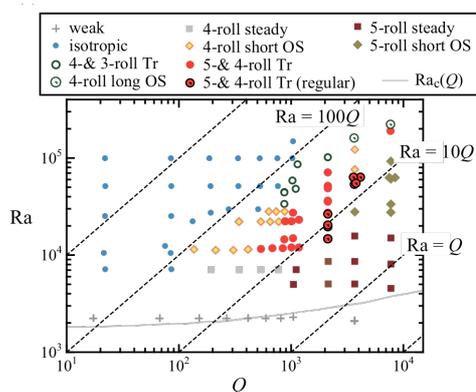


図2: 対流のレジームダイアグラム

(2) 回転の影響について、まずは内部発熱により駆動される水の対流での可視化実験を行い、複数のレジームが存在することを示した。その中でも特に複雑に対流構造が変化するレジームについて、シート状の下降流を伴う対流セルの移流によるものであることを示すとともに、そのレジームの出現条件が流体層厚に対するエクマン層の厚さの比率により整理されることを明らかにした。

続いて、下部加熱により駆動される回転対

流についても研究を進めた。水の対流ではレーザー光と移動台を用いたスキニング PIV のシステムを構築し、準2次元的な渦構造を速度場から抽出することに成功した。これは理論の予測を実験で初めて検証した画期的な成果である。液体金属の回転対流についても超音波計測によって渦のサイズ分布についてのデータが得られた。これらによって個々の対流渦の寿命や渦同士の相互作用のデータが蓄積されつつあり、これらはダイナモシミュレーションによる結果を解釈する際に重要な情報となる。

(3) 内核の固化の過程に重要な役割を果たす固液共存系の振る舞いについて、複数の設定による幅広いパラメータ領域での実験を行った。冷却しつつ分離していく過程において、どのような時間スケールでどのような構造が形成されるかということが明らかになった。更には固液系の物理の適用対象として、鉛直振動下の液状化と地すべり、斜面への衝突クレータリング、粘弾性体中の浮力クラックの移動、マグマだまりの固化過程、等も視野に入れて、それぞれの素過程を調べる実験を進めた。

(4) 磁場及び回転の影響下での熱対流の数値シミュレーションを実行し、実験結果を再現することに成功した。従来は流速分布の情報が実験で得られていなかったため、比較検証の対象がなく、十分にはなされてこなかった系のシミュレーションである。

特に水平磁場の影響下での液体金属の対流のシミュレーションでは、実験による図2の対流レジームをほぼ再現するところまで到達した。これにより流れ場の反転のプロセスが明らかとなり、Yanagisawa et al. (2015)で報告した。図3(a-f)に一連の過程をスナップショットで示す。図の手前から奥に向かう一様な水平磁場をかけている。水色で表示したのがロール面で、その上の赤と青のラインは、垂直面で見た対流ロールの回転の向きを示し、それぞれ、時計回りと反時計回りである。このケースでは5ロールの状態が長い時間を占めるが、ロール数が4に変化してまた5に戻るといった過程の中で流れ場の反転が起こっている。(a)は磁場とほぼ平行にロール軸を持つ5ロール状態であり、手前から見た垂直面内では左右の壁に接したロールと中央のロールは時計回りの回転をしている。(b)では、手前側のロールは全体として右向きに、奥側は左向きに移動していてロールに歪みが生じている。手前の右側の壁付近ではロールが縮小している。(c)では手前と奥とでそれぞれ右と左の壁でのロールが消滅し、歪んだ4ロールの構造になっている。(d)では手前と奥とで4ロール同士のつなぎ替えが生じ、ロールの歪んだ状態を解消している。(e)では壁際でロールが成長してきていて、5ロールの構造が回復しつつある。(f)では5

ロール構造が完全に回復しているが、その回転の向きは左右の壁際と中央のロールでは反時計回りとなっていて(a)の状態とは完全に逆転している。これが反転の典型的な過程である。流れ場の反転というのは、ロールの歪み、すなわち水平面内での大規模な循環を介して行われることが明らかとなった。これは今まで全く想像されていなかったメカニズムによる反転現象であり、我々の実験に基づく数値シミュレーションによって初めて明らかになった大きな成果である。

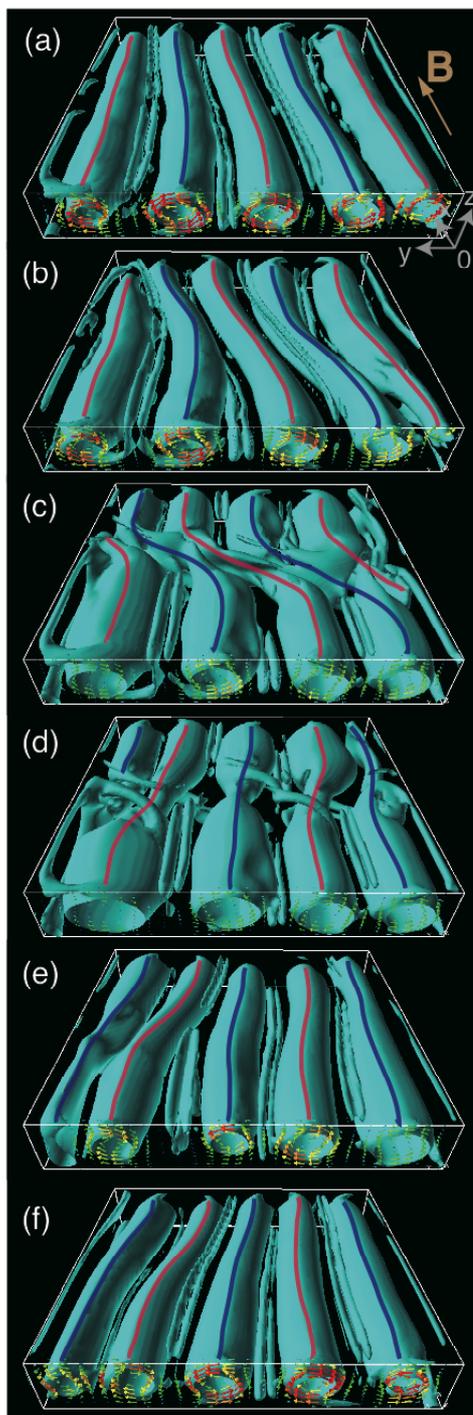


図3：流れ場の反転過程のシミュレーション

我々は並行して、地球シミュレータを用いて地球ダイナモのシミュレーションを実施し、そこに現れる流れ構造の理解を進めるとともに磁場の反転が起こりうるパラメータ領域の絞り込みをした。回転球殻内での対流場は、回転の影響を強く受けて回転軸の方向に軸を持つロール構造をとる(図4)。このケースでは双極子型の磁場が生成されるとともに、その極性が不規則に逆転を繰り返しており、地球的なダイナモの挙動が再現されている。逆転を含むその前後について流れ場の詳細な解析を進めて、磁場の反転が起こる際には流れ場が大規模に変化することを実証した。

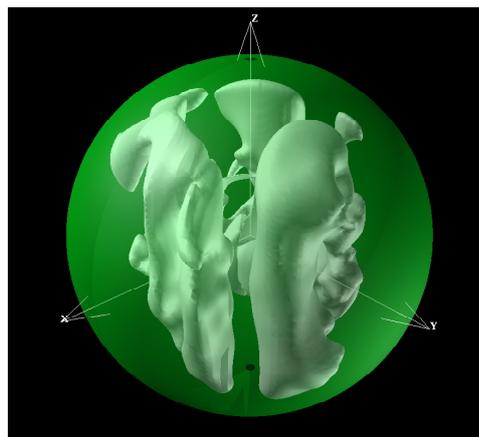


図4：回転球殻のダイナモシミュレーション

これらの研究によって本課題の目標である流れ場が反転する現象と磁場の逆転との関連性を明らかにすることができた。今後は、より現実の地球に近い条件でダイナモシミュレーションを実現し、逆転するケースについて流れ場の遷移を詳細に調べることを目指す。また、新たな対流のレジームが見つかったので、測定をこれまでより高精度化しその実態の解明を進める。

<引用文献>

- ① Yanagisawa et al. (2013), Phys. Rev. E, 88, 063020.
- ② Tasaka et al. (2016), Phys. Rev. E, 93, 043109.
- ③ Yanagisawa et al. (2015), Phys. Rev. E, 92, 023018.

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32件)

- ① Tasaka, Y. et al., Regular flow reversals in Rayleigh-Bénard convection in a horizontal magnetic field, Phys. Rev. E, 査読有, Vol. 93, 2016, 043109,

DOI:10.1103/PhysRevE.93.043109

- ② Yasuda, N. and I. Sumita, Effect of viscosity on the shaking-induced fluidization in a liquid-immersed granular medium, *Phys. Rev. E*, 査読有, Vol. 93, 2016, 022901, DOI:10.1103/PhysRevE.93.022901
- ③ Yanagisawa, T., et al., Flow reversals in low-Prandtl-number Rayleigh-Bénard convection controlled by horizontal circulations, *Phys. Rev. E*, 査読有, Vol. 92, 2015, 023018, DOI:10.1103/PhysRevE.92.023018
- ④ Sumita, I. and M. I. Bergman, Inner-Core Dynamics, in Schubert, G. (ed.) *Treatise on Geophysics* (second edition), Oxford: Elsevier Ltd., 査読有, Vol. 8, 2015, pp. 297-316.
- ⑤ Miyagoshi, T., M. Kameyama and M. Ogawa, Thermal convection and the convective regime diagram in super-Earth, *J. Geophys. Res. Planets*, 査読有, Vol. 120, 2015, pp. 1267-1278, DOI:10.1002/2015JE004793
- ⑥ Kameyama, M., T. Miyagoshi and M. Ogawa, Linear analysis on the onset of thermal convection of highly compressible fluids: Implications for the mantle convection of super-Earths, *Geophys. J. Int.*, 査読有, Vol. 200, 2015, pp. 1064-1075, DOI:10.1093/gji/ggu457
- ⑦ Hayashi, H. and A. Kageyama, Yin-Yang-Zhong grid: An overset grid system for a sphere, *J. Computational Phys.*, 査読有, Vol. 305, 2015, pp. 895-905, DOI:10.1016/j.jcp.2015.11.016
- ⑧ Mabuchi, J., Y. Masada and A. Kageyama, Differential rotation in magnetized and non-magnetized stars, *Astrophys. J.*, 査読有, Vol. 806, 2015, 10, DOI:10.1088/0004-637X/806/1/10
- ⑨ 宮腰剛広、陰山聡、講座 MHD ダイナモ : 流れによる磁場の自発的生成「第 3 章 地球ダイナモ研究のこれまでとこれから」、*プラズマ・核融合学会誌*、査読無、91 巻、2015、pp. 676-682. [http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JSPF/jspf2015\\_10/jspf2015\\_10-676.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2015_10/jspf2015_10-676.pdf)
- ⑩ 陰山聡、講座 MHD ダイナモ : 流れによる磁場の自発的生成「第 1 章 MHD ダイナモとは何か」、*プラズマ・核融合学会誌*、査読無、91 巻、2015、pp. 597-602. [http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JSPF/jspf2015\\_09/jspf2015\\_09-597.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2015_09/jspf2015_09-597.pdf)
- ⑪ Ogawa, M. and T. Yanagisawa, Mantle evolution in Venus due to magmatism and phase transitions: From punctuated layered convection to whole-mantle convection, *J. Geophys. Res. Planets*, 査読有, Vol. 119, 2014, pp. 867-883, DOI:10.1002/2013JE004593
- ⑫ Yasuda, N. and I. Sumita, Shaking conditions required for flame structure formation in a water-immersed granular medium, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 査読有, Vol. 1, 2014, pp. 1-11, DOI:10.1186/2197-4284-1-13
- ⑬ Yoshida, M. and A. Kageyama, A Fortran visualization program for spherical data on a Yin-Yang grid, *Geochem. Geophys. Geosys.*, 査読有, Vol. 15, 2014, pp. 1642-1647, DOI:10.1002/2013GC004967
- ⑭ Sakuraba, A. and H. Yamauchi, Linear stability of plane Poiseuille flow in an infinite elastic medium and volcanic tremors, *Earth Planets Space*, 査読有, Vol. 66, 2014, 19, DOI:10.1186/1880-5981-66-19
- ⑮ 隅田育郎、他、液体中における密に詰まった粉粒体の重力不安定、混相流、査読無、28 巻、2014、pp. 304-311 [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjmf/28/3/28\\_304/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjmf/28/3/28_304/_pdf)
- ⑯ Yanagisawa, T., et al., Convection patterns in a liquid metal under an imposed horizontal magnetic field, *Phys. Rev. E*, 査読有, Vol. 88, 2013, 063020, DOI:10.1103/PhysRevE.88.063020
- ⑰ Shibano, Y., I. Sumita and A. Namiki, A laboratory model for melting erosion of a magma chamber roof and the generation of a rhythmic layering, *J. Geophys. Res.*, 査読有, Vol. 118, 2013, pp. 4101-4116, DOI:10.1002/jgrb.50295

- ⑱ Miyagoshi, T. and Y. Hamano, Magnetic field variation caused by rotational speed change in a magnetohydrodynamic dynamo, Phys. Rev. Lett, 査読有, Vol. 111, 2013, 124501, DOI:10.1103/PhysRevLett.111.124501
- ⑲ Masada, Y., K. Yamada and A. Kageyama, Effects of penetrative convection on solar dynamo, Astrophys. J., 査読有, Vol. 778, 2013, 11, DOI:10.1088/0004-637X/778/1/11
- ⑳ Ogawa, M. and T. Yanagisawa, Two-dimensional numerical studies on the effects of water on Martian mantle evolution induced by magmatism and solid-state mantle convection, J. Geophys. Res., 査読有, Vol. 117, 2012, E08008, DOI:10.1029/2012JE004054
- [学会発表] (計 107 件)
- ① Kageyama, A., Dynamo simulations with Yin-Yang-Zhong grid and its visualization, The dynamo effect in astrophysical and laboratory plasmas (招待講演), 2015 年 12 月 8 日, Princeton, USA.
- ② Yanagisawa, T., Convection in liquid metals: basic study for the flow in the outer core, Japan Symposium of Study of the Earth's Deep Interior 2015 (招待講演), 2015 年 9 月 25 日, 東京都文京区, 東京大学地震研究所.
- ③ 柳澤孝寿, 他, 小さいコアを持つ球殻マントルでの対流パターン: 粘性の温度依存性の影響, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会 (招待講演), 2015 年 5 月 26 日, 千葉県千葉市, 幕張メッセ.
- ④ Tasaka, Y., Ultrasound Doppler measurements in liquid metal flows, 3rd International Workshop on Measuring Techniques for Liquid Metal Flows (招待講演), 2015 年 4 月 15 日, Dresden, Germany.
- ⑤ 柳澤孝寿, 地球の大規模な活動と熱の流れ “マントルとコアを中心に”, 熱工学コンファレンス 2014 プレコンファレンスワークショップ (招待講演), 2014 年 11 月 7 日, 東京都江戸川区, ホテルシーサイド江戸川.
- ⑥ Tasaka, Y., Extraction of fluid and flow information from spatio-temporal UVP data obtained in

rotating configurations, 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (招待講演), 2014 年 8 月 28 日, Strasbourg, France.

[図書] (計 1 件)

- ① Takeda, Y., Y. Tasaka, H. Murakawa (editors), Springer, Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow, 2012, 274.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柳澤 孝寿 (YANAGISAWA, Takatoshi)  
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・主任研究員  
研究者番号: 20359186

### (2) 研究分担者

田坂 裕司 (TASAKA, Yuji)  
北海道大学・工学研究院・准教授  
研究者番号: 00419946

陰山 聡 (KAGEYAMA, Akira)  
神戸大学・システム情報学研究所・教授  
研究者番号: 20260052

櫻庭 中 (SAKURABA, Ataru)  
東京大学・理学系研究科・助教  
研究者番号: 50345261

宮腰 剛広 (MIYAGOSHI, Takehiro)  
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・主任研究員  
研究者番号: 60435807

隅田 育郎 (SUMITA, Ikuro)  
金沢大学・自然システム学系・准教授  
研究者番号: 90334747

### (3) 連携研究者

浜野 洋三 (HAMANO, Yozo)  
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・特任上席研究員  
研究者番号: 90011709