

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247082

研究課題名(和文)複数核種と複数原理に基づく宇宙線年代決定法の新展開

研究課題名(英文) New development of cosmic-ray dating based on multi-nuclides and multi-principles

研究代表者

堀内 一穂 (Horiuchi, Kazuho)

弘前大学・理工学研究科・助教

研究者番号：00344614

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,600,000円

研究成果の概要(和文)：南極ドームふじアイスコアを対象に、ベリリウム10を高時間分解能で分析することで、宇宙線層序標準曲線の一部を詳細化した。また単年宇宙線イベントとの対比や天文年代の見直しにより、標準曲線の年代モデルを向上させた。さらに西太平洋赤道域の堆積物に対してベリリウム同位体分析を行い、宇宙線層序編年に基づく年代を挿入することで、17～20万年前の地磁気極小期における宇宙線強度変動の詳細を解明した。アイスコアと堆積物の双方にてアルミニウム26を分析し、標準曲線の複数核種化と、アルミニウム26/ベリリウム10年代決定を試みた。地表生成の宇宙線生成核種による蓄積・放射年代など、様々な応用研究も促進させた。

研究成果の概要(英文)：By analyzing beryllium-10 with high temporal resolution, we refined the standard curve of cosmic-ray stratigraphy for certain intervals of the Antarctic Dome Fuji ice core. We also improved the age model of the standard curve by correlating with certain annual cosmic-ray events and reviewing the official chronology of the core. Furthermore, we analyzed beryllium-10 in sediment cores retrieved from the equatorial western Pacific and successfully applied the cosmic-ray chronostratigraphy to the revision of the age model of the cores. As a result, we obtained a robust proxy record for cosmic-ray intensity across the minimum of geomagnetic intensity between 170 and 200 ka. Aluminum-26 was also analyzed on the Dome Fuji ice core and partly on the equatorial sediments in order to attempt the radiometric aluminum-26 / beryllium-10 dating. Finally, various approaches, such as accumulation/radiometric dating on continental sediments using cosmogenic nuclides, were also advanced in this project.

研究分野：地球年代学，古環境学，地質学，第四紀学

キーワード：宇宙線生成核種 アイスコア 堆積物 層序編年 放射年代 宇宙線 太陽活動 古地磁気

1. 研究開始当初の背景

地質時代の中でも過去 259 万年間を網羅する第四紀は、人類や現在環境との関わりが深いことより、物理学・化学・人文科学等の研究者も参加して、様々な観点での研究がなされている。こうした多岐に亘る研究の要求に応えるためには、意味のある全ての過去情報に可能な限り詳細な年代軸を挿入することが期待される。しかし、これは実現しているとは言い難い。第四紀試料の年代決定には、これまでも様々な層序年代決定(編年)法や放射・蓄積年代決定法および年層カウント年代が適用されてきたが、その何れもが、使用できる試料の性質や要求できる精度・確度の面で、得手不得手を抱えている。

宇宙線と物質との相互作用により生成する宇宙線生成核種(ベリリウム 10, 炭素 14, アルミニウム 26, 塩素 36 など)は、その生成と放射壊変のメカニズムより、宇宙線強度変動、ひいては太陽活動・地球磁場強度変動の指標や、地質試料の放射年代決定手段として用いられてきた。なかでも炭素 14 年代は、第四紀において最も成功した年代決定法の一つであり、これの確度をさらに高め、暦年代に変換するための標準曲線を作成する試みが、弛まなく続けられている。しかし如何に強力な手段とは言え、炭素 14 年代の適用はおおよそ 10 半減期分(5~6 万年前まで)に限られる。また測定試料には、当時の通常大気と交換した炭素がミリグラム程度は存在しなければならない。

研究代表者らは、研究開始当初までに、A) 宇宙線生成核種ベリリウム 10 の放射壊変(半減期: 136 万年)を利用した陸域堆積物の過去 840 万年間年代決定、B) ベリリウム 10 とアルミニウム 26 の蓄積年代(宇宙線照射年代)を利用した氷河地形の露出年代決定、C) 宇宙線変動曲線の対比に基づくアイスコーアの詳細年代決定などに成功して来た。特に C) については、南極観測隊の手により掘削されたドームふじアイスコーアを分析することにより、過去 30 万年間を網羅する千年時間分解能のベリリウム 10 変動曲線を得ることに成功し、これに基づいた宇宙線層序編年の標準曲線を構築することができた。このように、層序編年を中心として、放射壊変・蓄積年代など様々な原理に基づいた宇宙線生成核種による年代決定の可能性が、今まさに開かんとする状況にあった。

2. 研究の目的

本研究は、研究開始当初までの研究代表者らの研究をさらに進展させ、包括的な意味での宇宙線生成核種を用いた年代決定法、すなわち「宇宙線年代決定法」の新展開を目指すものである(図 1)。具体的には、先ずアイスコーアのベリリウム 10 記録に基づく宇宙線層序編年の標準曲線を詳細化することで、その汎用性を高める。次に、海底堆積物のベリリウム 10 記録をアイスコーアの標準曲線と同

期させることで、宇宙線層序編年を実際に行う。さらに、アイスコーアや海底堆積物を対象に他の宇宙線生成核種(特にアルミニウム 26)を分析することで、宇宙線層序編年の複数核種化とアルミニウム 26/ベリリウム 10 放射年代決定を試みる。加えて、陸域堆積物の年代決定のために、地表生成の複数核種を利用した年代決定法を開発する。最終的には、将来の応用の拡大を見据えて、化学沈殿物への適用や太陽活動-気候対比年代など、新応用領域の開拓も試みる。

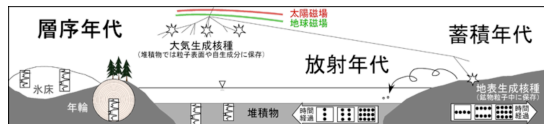


図 1: プロジェクトの概念図

3. 研究の方法

(1) ドームふじアイスコーアの未分析区間を対象に、数十~百年の時間分解能でベリリウム 10 を分析する。また同コーアの年代モデルを天文年代などの観点から改善する。これらに基づいて、詳細で年代精度の高い宇宙線層序編年のための標準曲線を構築する。宇宙線生成核種の分析は、東京大学総合研究博物館の 5MV タンデム加速器を用いて、主になされる(以下全てに同じ)。

(2) これまでの研究により 10 年時間分解能のベリリウム 10 記録が得られている過去約千年間のドームふじアイスコーアを対象に、単年時間分解能のベリリウム 10 分析を行う。その結果を年輪の炭素 14 記録と対比することで、単年宇宙線イベントや太陽の短周期変動を宇宙線層序編年の高時間分解能な年代制約点とする。一部の年代範囲については、日本産年輪の炭素 14 分析も新たに行う。

(3) 西太平洋赤道域の西カロリン海盆から採取された堆積物コア(深海調査研究船「かいいい」KR05-15 航海コア)を対象に、自生成成分を化学的に抽出し、ベリリウム同位体分析を行う。その際、同コアから既に得られている古地磁気記録などの情報を考慮する。安定同位体(ベリリウム 9)の分析には、弘前大学のフレームレス原子吸光分析計を用いる。得られた結果を、アイスコーアの標準曲線と対比することで、陸海に跨った全球規模での宇宙線層序編年を試みる。

(4) ドームふじアイスコーアを対象にアルミニウム 26 を分析する。また堆積物自生成成分や有孔虫殻中のアルミニウム 26 を分析する手法を確立し、西カロリン海盆堆積物にてこれを試す。これらの結果に基づいて、宇宙線層序標準曲線の複数核種化を図るとともに、アルミニウム 26/ベリリウム 10 比に基づいた放射年代決定の可能性を探る。

(5) 大陸域の古代湖堆積物について、宇宙線

生成核種の蓄積年代と放射年代を組み合わせた年代決定を試みる。また宇宙線層序編年の応用（例えば、これを年代軸にした古環境記録の利用）や、応用範囲拡大に向けた化学沈殿物に対するベリリウム 10 分析手法の開発、及び宇宙線・太陽活動-気候対比年代決定などに関して、予察的な研究を行う。

4. 研究成果

(1) ドームふじアイスコアの 5~10 万年前（酸素同位体ステージ 3~5）および 17~20 万年前（酸素同位体ステージ 6/7 境界付近）を対象に、数十~百年の時間分解能でベリリウム 10 を分析することで、宇宙線層序編年の土台となるアイスコア標準曲線の詳細化がなされた。さらに、標準曲線に適用するために、ドームふじアイスコアの年代モデルの改善を試みた。その成果の一部（17~20 万年前のベリリウム 10 変動）は *Earth and Planetary Science Letters* 誌に掲載された。また、年代モデル改善の手法に関しては、*Nonlinear Processes in Geophysics* 誌に掲載された。本研究で分析された年代範囲では、数十~百年時間分解能のベリリウム 10 記録自体が世界に例がない。従って本研究の成果は、宇宙線層序編年の礎となるだけでなく、太陽活動・地球磁場強度変動の指標となる宇宙線強度の変動史を解明するためにも、今後大きく貢献することが期待できる。

(2) 単年宇宙線イベントや太陽の短周期変動を高時間分解能な年代制約点とするために、ドームふじアイスコアを対象に、過去 1300 年間の限られた区間について、単年時間分解能のベリリウム 10 分析を行った。1645~1715 年の太陽活動の極小期（マウンダー極小期）では、太陽活動の 22 年周期にともない周期的に現れる宇宙線強度の上昇を、ドームふじアイスコアのベリリウム 10 と日本産年輪の炭素 14 の双方に見出し、これを詳細な年代制約として利用できる可能性を示した。この成果は、学会発表を経て投稿準備中である。また、南北両半球の年輪記録にて 774/775 年に知られる顕著な単年炭素 14 イベントに対応するベリリウム 10 イベントを、ドームふじアイスコアの従来の（10 年解像度記録に基づく）宇宙線層序編年（Horiuchi et al., 2008）にて 779/780 年の層準に特定した。この成果は *Geophysical Research Letters* 誌に掲載され、出版後の二年間で二桁の引用数に至っている。また当該論文出版後に別のグループにより出版された論文（Sigl et al., 2015）では、グリーンランドアイスコアの年層年代にて 767/768 年に同様の現象が見出された。このことは、誤差が皆無もしくは極めて小さいとされている年輪年代を基準とした場合、宇宙線層序年代は年層年代と同等以上の正確さを示すことを意味する。

(3) アイスコアから得られた宇宙線層序標準曲線を他のアーカイブの年代決定に適用する目的で、西太平洋赤道域堆積物中のベリリウム同位体比（ベリリウム 10/ベリリウム 9 比）を分析した。その結果、過去 30 万年間を千~数千年の時間分解能で網羅する記録が得られ、そこからアイスコア標準曲線と対比できる複数の特徴を見出すことができた。特に、約 19 万年前に知られる地磁気の顕著な極小期（アイスランドベイゼンエクスカッション）では、5 百年時間分解能の詳細な分析を 2 本のコアについて行い、これを堆積物コアの年代軸の補正とアイスコア記録との精密な同期に利用した（図 2）。さらに、同期された記録からロバストな宇宙線強度変動曲線を得ることができ、この時代の地磁気変動や太陽活動の周期性を解明（図 3）するとともに、堆積物の自然残留磁化獲得深度に関する新たな知見を得ることができた。また同コアにて、古地磁気学的手法による環境解析もなされた。これらの成果は、既に述べた *Earth and Planetary Science Letters* 誌や *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 誌に掲載された。

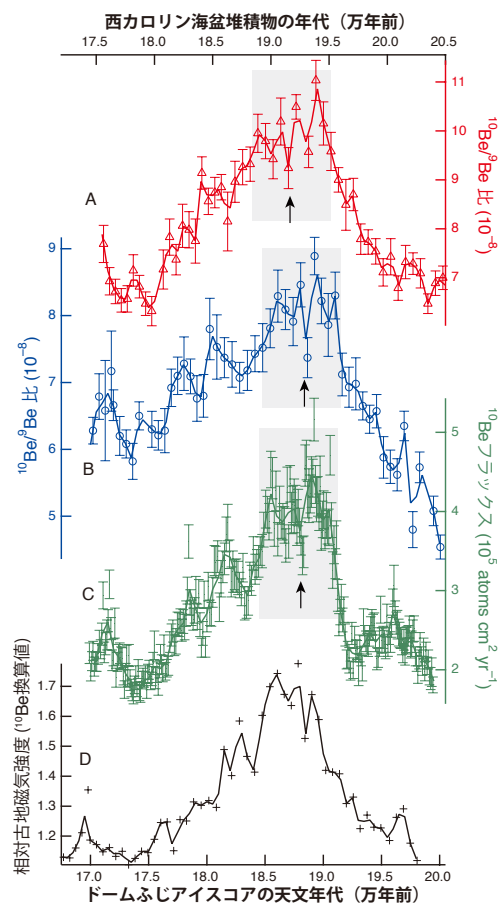


図 2：ベリリウム 10 の連続記録に基づく、南極アイスコアと赤道域堆積物との詳細同期。赤と青が堆積物のベリリウム同位体比。緑がアイスコアのベリリウム 10 フラックス。黒線は相対古地磁気強度記録をベリリウム 10 生成率に換算した推定値。

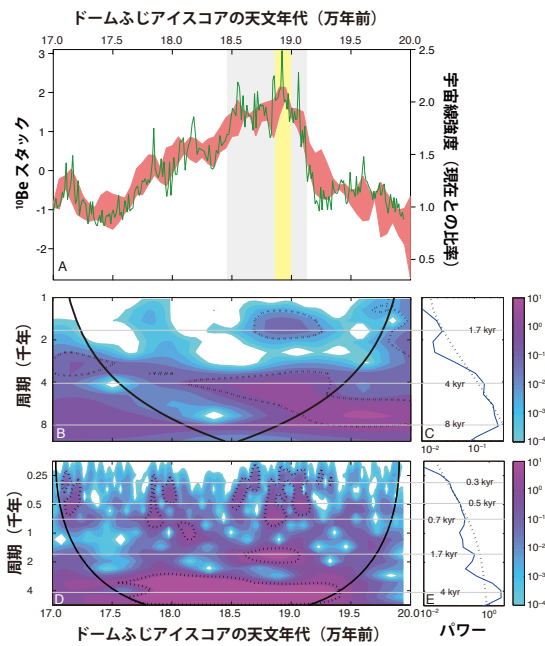


図3：17～20万年前の宇宙線強度変動曲線を示すベリリウム10スタック（上の図）とその周期解析の結果（下の図）。上の図にて、灰色の領域は約7000年間継続した宇宙線の増大期を示し、その中でも極大である18.85～19万年前を黄色で示した。下の図の縦軸は周期の年数で、色は周期性の強さを表している。色が濃く、赤紫に近いほど、その年代での変動周期がはっきりとしていることを示す。太線より外側は見かけの値。点線は90%の信頼限界。

(4) ドームふじアイスコアのアルミニウム26分析を行うことにより、時間分解能は未だ低いものの、標準曲線の複数核種化がなされた。また堆積物のアルミニウム26分析法を確立し、西太平洋赤道域堆積物の一部の区間についてこれを分析することで、複数核種化がなされた。これらは、第四紀試料の新たな放射年代決定法として期待される大気起源のアルミニウム26/ベリリウム10年代決定法の実現に繋がる成果である。これらの成果は、国際会議等での複数回の発表を経て、現在投稿準備中である。

(5) 研究の進行とともに、複数の宇宙線生成核種記録や古地磁気記録を統一的に扱うことが必要になった。そこで、ウェーブレット理論を利用して一度に複数の記録を同期する手法を開発した。また、堆積物からより正確な古地磁気記録を連続に得るための新たな解析法を開発した。これらの成果は、New Astronomy 誌や Geochemistry, Geophysics, Geosystems 誌および Earth, Planets and Space 誌に掲載された。

(6) プロジェクトの遂行に不可欠なベリリウム10の分析に関して、従来よりもさらに微量な試料での分析法を開発した。この成果

は、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 誌に掲載にされた。宇宙線層序編年に関しては応用も進んでおり、これを年代軸とした時系列データを用いた研究が Scientific Data 誌に受理された。地表生成の宇宙線生成核種による蓄積・放射年代に関しては、地表面での素過程に関する基礎的な論文が報文誌「地形」に掲載された。堆積物中の有孔虫殻や化学沈殿物の分析については、研究の端緒についたばかり、あるいは事情により途中で中断しており、これらの遂行が将来への課題として残された。

<引用文献>

① Horiuchi, K. et al. (2008) Ice core record of ^{10}Be over the past millennium from Dome Fuji, Antarctica: A new proxy record of past solar activity and a powerful tool for stratigraphic dating. *Quat. Geochronol.* 3, 253-261.

② Sigl, M. et al. (2015) Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. *Nature.* 523, 543-549.

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29件)

① Julien Emile-Geay, 50名略, Kazuho Horiuchi, 4名略, Kenji Kawamura, 7名略, Hideaki Motoyama, 他33名, in press, A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era. *Scientific Data*, 査読有。

② V.M. Velasco Herrera, W. Soon, G. Velasco Herrera, R. Traversi, and K. Horiuchi, 2017, Generalization of the cross-wavelet function. *New Astronomy*, 56, 86-93, doi: 10.1016/j.newast.2017.04.012. 査読有。

③ Toshitsugu Yamazaki and Kazuho Horiuchi, 2016, Precessional control on ocean productivity in the Western Pacific Warm Pool for the last 400 kyr. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17, 4399-4412, doi:10.1002/2016GC006446. 査読有。

④ Kazuho Horiuchi, Kanae Kamata, Shun Maejima, Sho Sasaki, Nobuyoshi Sasaki, Toshitsugu Yamazaki, Shuji Fujita, Hideaki Motoyama, Hiroyuki Matsuzaki, 2016, Multiple ^{10}Be records revealing the history of cosmic-ray variations across the Iceland Basin excursion. *Earth and Planetary Science Letters*, 440, 105-114. doi:10.1016/j.epsl.2016.01.03

4. 査読有.

- ⑤ H. Oda, C. Xuan, Y. Yamamoto, 2016, Toward robust deconvolution of pass-through paleomagnetic measurements: New tool to estimate magnetometer sensor response and laser interferometry of sample positioning accuracy. *Earth, Planets and Space*, 68, 109, doi:10.1186/s40623-016-0493-2. 査読有.
- ⑥ H. S. Nakano, K. Suzuki, K. Kawamura, F. Parrenin and T. Higuchi, 2016, A sequential Bayesian approach for the estimation of the age-depth relationship of the Dome Fuji ice core. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 23, 31-44, doi: 10.5194/npg-23-31-2016. 査読有.
- ⑦ Kazuho Horiuchi and Hiroyuki Matsuzaki, 2015, Exploration of ^{10}Be analysis using 10 μg of Be carrier. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 361, 423-430. doi:10.1016/j.nimb.2015.07.123. 査読有.
- ⑧ Fusa Miyake, Asami Suzuki, Kimiaki Masuda, Kazuho Horiuchi, Hideaki Motoyama, Hiroyuki Matsuzaki, Yuko Motizuki, Kazuya Takahashi, Yoichi Nakai, 2015, Cosmic ray event of AD 774-775 shown in quasi-annual ^{10}Be data from the Antarctic Dome Fuji ice core. *Geophysical Research Letters*, 42(1), 84-89, doi: 10.1002/2014GL062218. 査読有.
- ⑨ 松四雄騎・松崎浩之・牧野久識, 2014. 宇宙線生成核種による流域剝剥速度の決定と地形方程式の検証. *地形* 35, 165-185. 査読有.
- ⑩ Hirokuni Oda, and Chuang Xuan, 2014, Deconvolution of continuous paleomagnetic data from pass-through magnetometer: A new algorithm to restore geomagnetic and environmental information based on realistic optimization, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, 3907-3924, doi: 10.1002/2014GC005513. 査読有.

[学会発表] (計 78 件)

- ① Kazuho Horiuchi, Tomoko Uchida, Ai Sugawara, Shoko Seino, Saya Matsuda, Hiroyuki Matsuzaki, and Hideaki Motoyama, On the possibility of radiometric dating on the “oldest ice”

using cosmogenic $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ ratio: Insights from the Dome Fuji second deep (DF2) ice core. JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari Messe, 20-25 May, 2017.

- ② Hiroko Miyahara, Kazuho Horiuchi, Fuyuki Tokanai, Toru Moriya, Yusuke Yokoyama, Hiroyuki Matsuzaki, and Hideaki Motoyama, Dating of cosmic ray events in the 17th century found by the analysis of beryllium-10 content in Antarctic ice core. JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari Messe, 20-25 May, 2017.
- ③ K. Kawamura, I. Oyabu, S. Aoki and T. Nakazawa, Updates on O_2/N_2 dating of the Dome Fuji ice core, and some analyses on Terminations, Second QUIGS Workshop “Glacial Terminations: Timing & Shape”, Montreal, Oct. 18-20, 2016.
- ④ Yusuke Yokoyama, Rindai Tsunekawa, Satomi Takahashi, Yosuke Miyairi, Takahiro Aze, Kazuho Horiuchi, Hiroyuki Matsuzaki, and Hideaki Motoyama, High resolution and continuous reconstruction of Blake and Post Blake excursions using cosmogenic radio nuclides in the Antarctic ice core. 2015 AGU Fall Meeting, Moscone Center, San Francisco, USA, 14-18 Dec., 2015.
- ⑤ Kazuho Horiuchi, Yasuyuki Muramatsu, Hiroyuki Matsuzaki, Yuko Sakamoto, Mayumi Hoshina, Atsushi Iwasaki, Tomoko Uchida, Hideaki Motoyama, Ice core record of ^{10}Be and ^{26}Al over the last 3 kyr from Dome Fuji, Antarctica: foundations for decadal-to-century-scale stratigraphic dating and future $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ dating. XIX INQUA Congress, Nagoya Congress Center, Nagoya, 26 July - 2 August, 2015.
- ⑥ 奈良郁子・渡邊隆広・掛川武・箕浦幸治・堀内一穂・宮原ひろ子・Stephen Obrochta・井上千弘・中村俊夫・河合崇欣, 最終氷期最盛期におけるユーラシア大陸内部の1000年周期気候変動. 日本第四紀学会 2014年大会, 東京大学柏キャンパス, 2014年9月5日-9月9日.
- ⑦ 堀内一穂・須口翔太・須田健介・内田智子・阿瀬貴博・横山祐典・村松康行・松崎浩之・本山秀明, ドームふじアイスコアから得られた長期 ^{10}Be 記録と宇宙線層序学. 日本地球惑星科学連合 連合大会 2014年大会, パシフィコ横浜, 2014年4月28日-5月2日.

⑧笹公和・黒住和奈・末木啓介・高橋努・松四雄騎・戸崎裕貴・堀内一穂・内田智子・松崎浩之・本山秀明, 最終退氷期から完新世初期にかけての南極氷床コア中の宇宙線生成核種 $^{36}\text{Cl}/^{10}\text{Be}$ 比. 日本地球惑星科学連合 連合大会 2014 年大会, パシフィコ横浜, 2014 年 4 月 28 日-5 月 2 日.

[図書] (計 7 件)

①河村公隆ほか編 (堀内一穂, 川村賢二, 本山秀明を著者に含む), 2016, 低温環境の科学事典, 朝倉書店, 411 (266-267, 284-286, 291-292, 295-296).

②宮原ひろ子, 2014, 地球の変動は宇宙で解明できるか - 太陽活動から読み解く地球の過去・現在・未来, 化学同人, 206.

[その他]

ホームページ等

JSPS 科研費「複数核種と複数原理に基づく宇宙線年代決定法の新展開」

<http://www.st.hirosaki-u.ac.jp/~kh/multiinclides/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀内 一穂 (HORIUCHI Kazuho)

弘前大学・理工学研究科・助教

研究者番号: 00344614

(2) 研究分担者

川村 賢二 (KAWAMURA Kenji)

国立極地研究所・研究教育系・教授

研究者番号: 90431478

小田 啓邦 (ODA Hirokuni)

産業技術総合研究所・地質情報研究部門・主任研究員

研究者番号: 90356725

宮原 ひろ子 (MIYAHARA Hiroko)

武蔵野美術大学・造形学部・准教授

研究者番号: 00532681

松四 雄騎 (MATSUSHI Yuki)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号: 90596438

根本 直樹 (NEMOTO Naoki)

弘前大学・理工学研究科・講師

研究者番号: 20208292

渡邊 隆広 (WATANABE Takahiro)

日本原子力研究開発機構・バックエンド研究開発部門東濃地科学センター・研究員

研究者番号: 40436994

(3) 連携研究者

松崎 浩之 (MATSUZAKI Hiroyuki)

東京大学・総合研究博物館・教授

研究者番号: 60313194

本山 秀明 (MOTOYAMA Hideaki)

国立極地研究所・研究教育系・教授

研究者番号: 20210099

笹 公和 (SASA Kimikazu)

筑波大学・研究基盤総合センター・准教授

研究者番号: 20312796

横山 裕典 (YOKOYAMA Yusuke)

東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号: 10359648

三宅 芙沙 (MIYAKE Fusa)

名古屋大学・高等研究院・特任助教

研究者番号: 90738569

奈良 郁子 (NARA Fumiko)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・研究員

研究者番号: 70414381

(4) 研究協力者

内田 智子 (UCHIDA Tomoko)

宮入 陽介 (MIYAIRI Yosuke)

阿瀬 貴博 (AZE Takahiro)