

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00706

研究課題名(和文) 高解像度マルチアーカイブ分析による太陽地磁気変動史と宇宙線イベントの解明

研究課題名(英文) Elucidating the history of solar/geomagnetic variations and cosmic ray events through high-resolution multi-archive analyses

研究代表者

堀内 一穂 (Horiuchi, Kazuho)

弘前大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：00344614

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、アイスコアや堆積物及び年輪中の宇宙線生成核種(ベリリウム10や炭素14及び塩素36)を高時間解像度で分析することで、以下の成果を得た。1) 南極アイスコアより、13万から19万年前を網羅する百年解像度のベリリウム10連続データなどの長期データを獲得するとともに、南極でのベリリウム10の沈着過程を明らかにした。2) 海底堆積物を対象にベリリウム同位体分析を行い、その結果をアイスコアの記録と比較することで、宇宙線層序編年を試みた。3) 様々な時代を対象に年解像度の宇宙線生成核種記録を獲得することで、当時の宇宙線イベントや太陽地磁気変動史を明らかにした。4) 新たな宇宙線アーカイブを開拓した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で新たに得られた宇宙線生成核種記録の多くが、解像度を問わず、世界初の成果であり、過去の宇宙線強度変動や太陽/地磁気変動および宇宙線イベントを研究するための優れた基盤となり得る。こうした記録は同時に、様々な古環境アーカイブを対象とした宇宙線層序編年の標準曲線としても扱うことができる。本研究で開拓された新たな宇宙線アーカイブは、これまで分析が難しかった地域や年代領域でも高時間解像度の宇宙線生成核種分析ができる可能性を拓くものである。過去の宇宙線イベントの発生頻度や性質を明らかにすることは、災害的な宇宙線イベントの将来予測にも貢献できる。

研究成果の概要(英文)：We analyzed cosmogenic nuclides (beryllium-10, carbon-14, and chlorine-36) in ice cores, sediments, and tree rings at high temporal resolution and achieved the following results: 1) We obtained centennial-resolution continuous beryllium-10 data covering 130,000 to 190,000 years ago from the Antarctic Dome Fuji ice cores; 2) We elucidated some of the depositional processes of beryllium-10 in Antarctica; 3) We succeeded in applying a cosmic ray chronostratigraphy to the beryllium isotope records obtained in this study for marine sediments; 4) We obtained annual-resolution records of cosmogenic nuclides for several epochs and elucidated the history of cosmic ray events and solar/geomagnetic variations at these times; and 5) We developed several types of new cosmic ray archives.

研究分野：古環境学、宇宙線生成核種、古宇宙線変動、太陽活動、古地磁気学、古気候学、加速器質量分析

キーワード：宇宙線生成核種 アイスコア 堆積物 ベリリウム10 塩素36 炭素14 宇宙線 太陽活動

1. 研究開始当初の背景

ベリリウム10や炭素14および塩素36のような宇宙線と物質との相互作用により生成される宇宙線生成核種は、過去の宇宙線強度変動の、ひいてはこれのほとんどを支配する太陽活動や地磁気強度の良い代理指標である。アイスコアや堆積物および年輪などの古環境アーカイブ(マルチアーカイブ)から宇宙線生成核種の連続記録を得ることは、従って過去の太陽活動や地磁気強度変動を解明するための得難い手段となる(図1)。加えて、スーパーフレア(超巨大太陽フレア)や太陽系近傍超新星爆発などに端を発する突発的な宇宙線イベントも、宇宙線生成核種のスパイクとして検出できる可能性がある。さらに、宇宙線変動は全球規模の現象であるため、気候変動と独立に古環境アーカイブ間を同期させるための強力な層序学的手段となることも期待できる(Horiuchi et al., 2008; Miyake et al., 2015; Horiuchi et al., 2016)。

しかしながら、こうした研究の基盤たる宇宙線生成核種の連続記録は、未だに極めて限られた年代範囲と地域からしか得られていない。それ故に地質時代の宇宙線変動の姿は、過去数十万年間に限定したとしても、まだほとんど解明されていない状態にあった。これは、太陽活動による宇宙線強度変動や突発的な宇宙線イベントにおいて、特に顕著な問題である。転じて、強力な手段たる宇宙線に基づいた全球層序対比も、未だ潜在能力を十分発揮できない状態にあった。本研究計画は、過去50万年間の宇宙線生成核種記録の獲得と宇宙線層序による海陸の詳細対比を基盤とし、これに基づいて太陽活動・地磁気強度変動史を高解像度で解明するとともに、未知の宇宙線イベントを見いだすものであった。

2. 研究の目的

本研究の目的を箇条書きで以下に示す。

- (1) マルチアーカイブから宇宙線生成核種の連続記録を獲得する
- (2) それぞれのアーカイブに対して、宇宙線層序編年を適用する
- (3) 太陽活動・地磁気強度変動史を高解像度で解明する
- (4) 突発的な宇宙線イベントなど未知の宇宙線イベントを突き止める
- (5) (3)と(4)の成果に基づいて、宇宙線層序編年を高度化する

3. 研究の方法

本研究では、達成目的ごとに、それぞれ異なる古環境アーカイブに対して異なる時間スケールで宇宙線生成核種(ベリリウム10と炭素14および塩素36)を分析した。分析の対象はアイスコアと堆積物および年輪である(図1)。また解像度については、数十~数百年解像度の分析を基盤としながら、限られた区間については単年~数年解像度の分析を行った。

アイスコアには、研究代表者らがこれまでも研究を進めてきた南極ドームふじアイスコアを用いた。このコアは、過去72万年間を整理と網羅する極めて良質な古環境記録を保存する(Kawamura et al., 2017)ことから、あらゆる解像度にて本研究の土台となるものである。年輪は、その単年解像度と年輪年代に優れた特徴をもつ。一方で、過去約1万年間では5~10年の解像度を示す標準曲線IntCalが存在するなど、炭素14の連続記録が相当数公表されている。よって年輪に関しては、既存の記録を宇宙線層序の年代基準として利用することに主眼を置き、宇宙線・太陽活動イベント相当部のみを集中的に分析した。堆積物では、研究代表者らの研究などから宇宙線シグナルを忠実に記録することが推定されている太平洋赤道域の堆積物を分析に用いた。具体的には、西太平洋赤道域の西カロリン海盆(WCB)から得られたKR0515コア群(以後WCBコアと称す)(Yamazaki et al., 2008)と東太平洋赤道域から得られたIODP Site U1335コア(Yamazaki and Yamamoto, 2018)である。前者は、過去50万年間を網羅する4本のコア試料からなる。後者は、少なくとも過去800万年間を網羅できる2本のコア試料である。

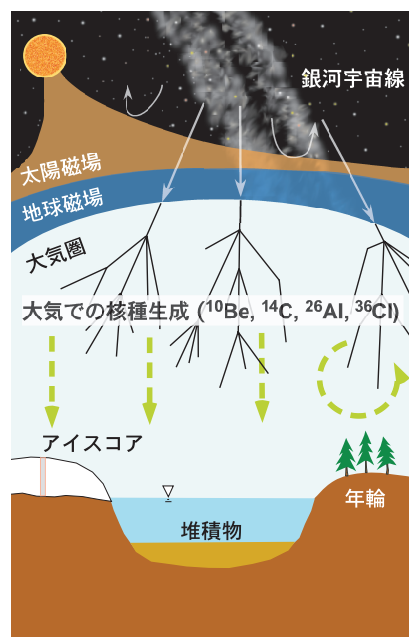


図1. プロジェクトの概念図。宇宙線生成核種ベリリウム10、炭素14、および塩素36の生成と、それを記録する様々な古環境アーカイブ(マルチアーカイブ)。

4. 研究成果

- (1) ドームふじアイスコアのベリリウム10に関する長期連続記録の獲得と堆積過程の解明

ドームふじアイスコアの酸素同位体ステージ 6（13 万年前から 19 万年前）を百年の時間解像度で網羅するベリリウム 10 連続記録を、世界で初めて得ることができた。また、同コアの天文年代を向上させる目的で酸素窒素などの気体分析を行い、併せて、その際に副次的に生産される融解水を用いて 20 万年前から 50 万年前の大まかなベリリウム 10 変動を復元できる記録を得た。このような記録は何れも世界初のものであり、地質時代の宇宙線変動の解明に今後大いに役立てることができる。

酸素／窒素天文年代、メタンガス対比点、及び既存のベリリウム 10 変動の対比点を拘束として、多数の拘束点の誤差分布を加味した新たな氷床流動モデルを駆使することで、従来の標準年代モデルである DF0-2006 (Kawamura et al., 2007) を更新して、新たな年代モデル DF2021 を構築した。この年代モデルを、上記のベリリウム 10 連続記録に適用した結果、酸素同位体ステージ 6 では約 1 万年のサイクルで宇宙線強度の強弱が繰り返したことが明らかになった。

南極アイスコアのベリリウム 10 記録をよりよく解釈するためには、ベリリウム 10 の南極での沈着過程への理解が欠かせない。しかし、これに関する研究はこれまで著しく乏しかった。

本研究では、南極地域観測隊の内陸トラバースに参加して表面積雪を採取し、これを分析することで、南極でのベリリウム 10 濃度の空間分布とそれを支配する沈着過程の地理的变化を明らかにした (図 2)。またベリリウム 10 の大気での輸送・沈着過程に関する数値モデル計算も行われた。これらの成果により、南極大陸におけるベリリウム 10 の輸送・沈着メカニズムの解明に大きく前進した。

以上の成果のうち、DF2021 年代モデルに関しては Quaternary Science Reviews 誌に、ベリリウム 10 濃度の空間分布や数値モデル計算については Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 誌と Journal of Geophysical Research 誌に、それぞれ公表された。

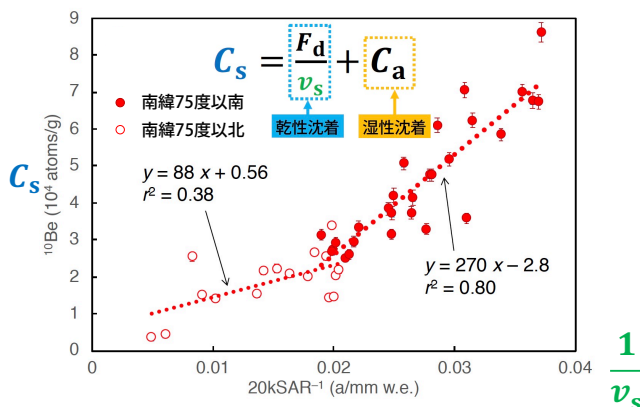


図 2. 南極地域観測隊の内陸トラバースで採取された表面積雪中のベリリウム 10 濃度と涵養量 (20kSAR) との関係。南緯 75 度以南ではベリリウム 10 の沈着過程に乾性沈着の効果が大きくなることが明瞭に示された。図中の式にて、 C_a は大気中の雪の ^{10}Be 濃度、 F_d は ^{10}Be の乾性沈着速度を表す。

(2) 堆積物アーカイブからのベリリウム 10 連続記録の獲得と宇宙線層序編年の適用

WCB コアを対象に、過去 40 万年間の地磁気極小期に関する高時間解像度ベリリウム同位体 (ベリリウム 10 と 9) 分析を行った。また補足的に、南大洋インド洋区から得られた堆積物コアに関しても、千年解像度でのベリリウム同位体記録を得た。得られたベリリウム同位体記録を対象に、ドームふじアイスコアのベリリウム 10 記録を標準曲線として、宇宙線層序編年を試みた。こうした研究と平行して、堆積物や岩石から得られた古地磁気記録を吟味・検討することで、古地磁気強度の推定を高度化させた。そしてこれを、本研究で得られたベリリウム 10 記録と比較することで、宇宙線強度変動から古地磁気変動に由来する成分の抽出を試みた。こうした成果の多くは論文公表に至っていないが、一部については学会での講演や Earth, Planets and Space 誌にて発表された。

U1355 コアを対象に、ベリリウム同位体を 1 万年の時間解像度で過去 80 万年間連続的に分析した。その結果を堆積物から得られた古地磁気強度変動記録と比較することで、双方の記録に刻まれた変動の確かな類似性を見出した。すなわち U1355 コアのベリリウム同位体変動には宇宙線強度の変動が記録されていることが明らかになった。U1355 コアについては、過去 850 万年間分を網羅する試料が日本に保管されているため、近い将来、これまでにない長期間の宇宙線強度変動記録を 1 本のコアより連続して得ることが期待できる。

(3) 地磁気極小期における太陽活動・宇宙線強度変動史の高解像度解明

19 万年前の地磁気極小期に関して、ドームふじアイスコアを対象に約 2 年の解像度でベリリウム 10 を分析することで、炭素 14 の測定限界である 5 万年前以前では前例のない詳細な宇宙線生成核種記録を約 500 年間分獲得することに成功した。これに対して、DF2021 を年代軸として時系列解析を行ったところ、現代と類似した太陽の短周期活動が、当時にも存在していた可能性が高いことが明らかになった。今後は、この基礎データをコアの詳細な化学組成データなどと比較することで、宇宙線変動と気候変動の問題に取り組むことができる。また、ベリリウム 10 の詳細な変化に未知の宇宙線イベントの痕跡がないか検討するための、基盤となり得る成果ともなった。

(4) 完新世の未知の宇宙線イベントの解明

単年解像度での分析が必要な完新世の宇宙線イベントに関して、年輪の炭素 14 分析により発見された紀元前 5480 年の特異な太陽極小期(Miyake et al., 2017) に着目してドームふじアイスコアの分析を行った。まずは既に得られている完新世の十年解像度ベリリウム 10 記録を炭素 14 標準記録 IntCal と対比し、宇宙線層序学的手法により、イベント区間を特定した。続いて、その区間を対象に高解像度でベリリウム 10 と塩素 36 の分析を行った(図 3)。その結果、このイベントは巨大太陽面爆発現象に起因するわけではなく、特異な性質の太陽極小期(グランドミニマム)が原因であることが示唆された。他にも、紀元前 660 年の宇宙線イベントを対象に、炭素 14 とベリリウム 10 の単年解像度分析を行い、このイベントが巨大太陽面爆発の連発に由来する可能性を提示した。これらの成果の一部は、Journal of Geophysical Research 誌や Scientific Reports 誌に掲載された。

(5) 完新世の太陽活動の高解像度復元

単年解像度での分析が必要な完新世の宇宙線イベントに関して、17 世紀前半の特異な太陽活動周期を、年輪の炭素 14 分析とモデル計算により詳細に解明した。また、下北半島猿ヶ森埋没林の年輪炭素 14 分析により、13 世紀の後半に、少なくとも 3 回の巨大太陽嵐イベントが起こっていた事実を世界に先駆けて発見した(図 4)。これらの成果は、Scientific Reports 誌や Geophysical Research Letters 誌に掲載された。

(6) 新たな宇宙線アーカイブの開拓

将来の関連研究のさらなる発展に向けて、新たな宇宙線/太陽活動アーカイブを開拓した。中国雲南省白水台の炭酸塩堆積岩(トラバーチン)には、雨季層と乾季層の組み合わせからなる明瞭な年層が刻まれている。この年層を対象に、雨季層と乾季層に分けてベリリウム同位体の分析を行った結果、双方ともに太陽変調の 11 年周期を記録している可能性が高いことが明らかになった。また、北極圏アラスカに分布する地下水を対象にベリリウム同位体の分析を行い、その宇宙線変動プロキシとしての可能性を探求した。伝統的な宇宙線アーカイブであるアイスコアに関して、両極にて堆積速度の早いコアを対象に、季節解像度でのベリリウム 10 分析の実現可能性を検討した。こうした新たなアーカイブに関する成果は、国際会議などで発表がなされ、さらにその一部は Quaternary Science Reviews 誌や Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 誌にて公表された。

<引用文献>

- ①Horiuchi, 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.
- ②Miyake, F. et al. (2015) Cosmic ray event of AD 774-775 shown in quasi-annual ^{10}Be data

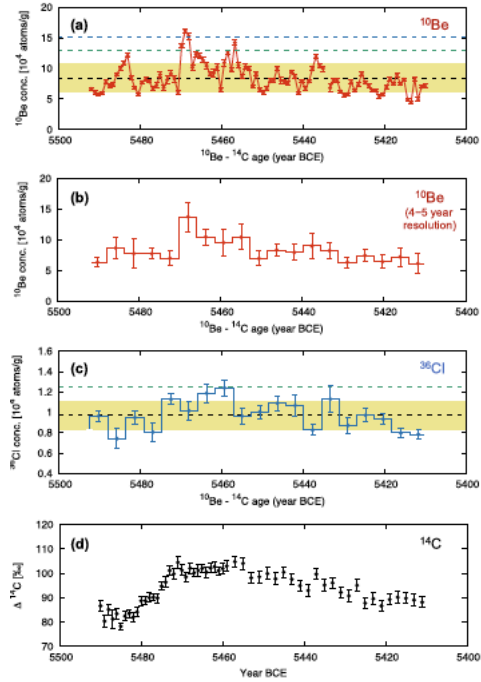


図 3. ドームふじアイスコアの高時間解像度分析により復元された紀元前 5480 年付近のベリリウム 10 変動と塩素 36 変動。同時代の年輪の炭素 14 記録とともに示す。

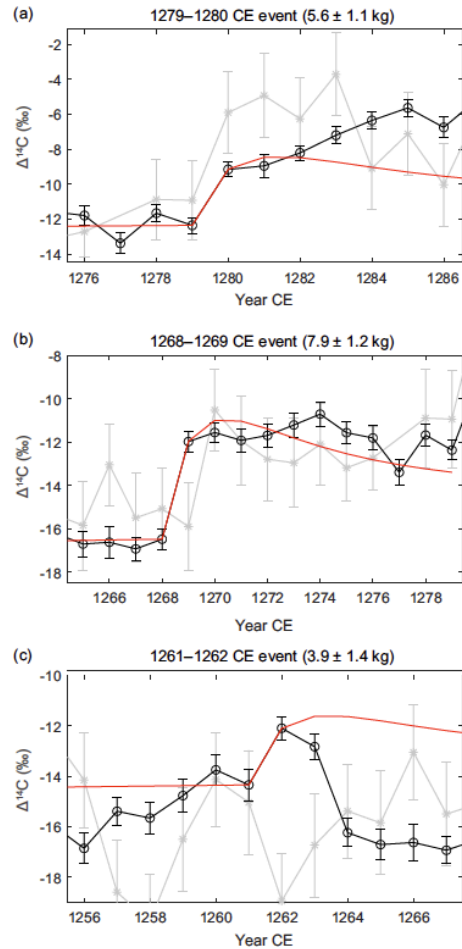


図 4. 13 世紀後半に連発した 3 回の巨大太陽嵐イベントの証拠。

- from the Antarctic Dome Fuji ice core. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 84–89, doi: 10.1002/2014GL062218.
- ③Horiuchi, K. et al. (2016) Multiple ^{10}Be records revealing the history of cosmic-ray variations across the Iceland Basin excursion. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 440, 105–114. doi:10.1016/j.epsl.2016.01.034.
- ④Kawamura, K. et al. (2017) Ice core record of ^{10}Be over the past millennium from Dome Fuji, Antarctica: State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modelling, *Sci. Adv.*, 3, e1600446, doi: 10.1126/sciadv.1600446.
- ⑤Yamazaki, T. et al. (2008) Geomagnetic field variations during the last 400 kyr in the western equatorial Pacific: Paleointensity–inclination correlation revisited. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L20307, doi:10.1029/2008GL035373.
- ⑥Yamazaki, T. and Yamamoto, Y. (2018) Relative paleointensity and inclination anomaly over the last 8 Myr obtained from the Integrated Ocean Drilling Program Site U1335 sediments in the eastern equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 7305–7320 doi: 10.1029/2018JB016209.
- ⑦Kawamura, K. et al. (2007) Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360,000 years. *Nature*, 448, 912–916.
- ⑧Miyake, F. et al. (2017) Large ^{14}C excursion in 5480 BC indicates an abnormal sun in the mid-Holocene. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 114, 881–884.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計26件（うち査読付論文 24件／うち国際共著 12件／うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 Horiuchi Kazuho, Kato Shinji, Ohtani Kou, Kurita Naoyuki, Tsutaki Shun, Nakazawa Fumio, Motoyama Hideaki, Kawamura Kenji, Tazoe Hirofumi, Akata Naofumi, Yamagata Takeyasu, Matsuzaki Hiroyuki	4. 巻 533
2. 論文標題 Spatial variations of 10Be in surface snow along the inland traverse route of Japanese Antarctic Research Expeditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 61～65
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nimb.2022.10.018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Spiegel T. C., Yoden S., Langematz U., Sato T., Chhin R., Noda S., Miyake F., Kusano K., Schaar K., Kunze M.	4. 巻 127
2. 論文標題 Modeling the Transport and Deposition of 10Be Produced by the Strongest Solar Proton Event During the Holocene	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JD035658	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Oyabu Ikumi, Kawamura Kenji, Buizert Christo, Parrenin Frederic, Orsi Anais, Kitamura Kyotaro, Aoki Shuji, Nakazawa Takakiyo	4. 巻 294
2. 論文標題 The Dome Fuji ice core DF2021 chronology (0-207 kyr BP)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Quaternary Science Reviews	6. 最初と最後の頁 107754～107754
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.quascirev.2022.107754	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Oda Hirokuni, Nakazato Hiroomi, Nanayama Futoshi, Harigane Yumiko	4. 巻 74
2. 論文標題 Matuyama-Brunhes geomagnetic reversal record and associated key tephra layers in Boso Peninsula: extraction of primary magnetization of geomagnetic fields from mixed magnetic minerals of depositional, diagenesis, and weathering processes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-022-01626-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 K. Kanzawa, F. Miyake, K. Horiuchi, K. Sasa, K. Takano, M. Matsumura, T. Takahashi, Y. Motizuki, K. Takahashi, Y. Nakai, K. Ohtani, Y. Tada1, Y. Ochiai, H.Motoyama, H. Matsuzaki, A. Yamazaki, Y. Muramatsu, and T. Yamagata	4. 巻 126
2. 論文標題 High-resolution 10Be and 36Cl data from the Antarctic Dome Fuji ice core (~100 years around 5480 BCE): An unusual Grand Solar Minimum occurrence?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 e2021JA029378
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JA029378	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroko Miyahara, Fuyuki Tokanai, Toru Moriya, Mirei Takeyama, Hirohisa Sakurai, Motonari Ohyama, Kazuho Horiuchi, and Hideyuki Hotta	4. 巻 49
2. 論文標題 Recurrent large-scale solar proton events before the onset of the Wolf grand solar minimum	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2021GL097201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021GL097201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyahara Hiroko, Tokanai Fuyuki, Moriya Toru, Takeyama Mirei, Sakurai Hirohisa, Horiuchi Kazuho, Hotta Hideyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Gradual onset of the Maunder Minimum revealed by high-precision carbon-14 analyses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 5482
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-84830-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fukuyo Naoto, Oda Hirokuni, Yokoyama Yusuke, Clark Geoffrey, Yamamoto Yuhji	4. 巻 73
2. 論文標題 High spatial resolution magnetic mapping using ultra-high sensitivity scanning SQUID microscopy on a speleothem from the Kingdom of Tonga, southern Pacific	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-021-01401-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Horiuchi Kazuho, Ohno Hiroshi, Iwahana Go, Iizuka Yoshinori, Matsuzaki Hiroyuki	4. 巻 459
2. 論文標題 Measurements of beryllium isotopes in ice wedges in Alaska	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 64 ~ 70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2019.07.046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Xu Hongyang, Miyahara Hiroko, Horiuchi Kazuho, Matsuzaki Hiroyuki, Sun Hailong, Luo Weijun, Zheng Xiangmin, Sugauma Yusuke, Wang Shijie, Zhou Limin	4. 巻 216
2. 論文標題 High-resolution records of ¹⁰ Be in endogenic travertine from Baishuitai, China: A new proxy record of annual solar activity?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Quaternary Science Reviews	6. 最初と最後の頁 34 ~ 46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.quascirev.2019.05.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sakurai Hirohisa, Tokanai Fuyuki, Miyake Fusa, Horiuchi Kazuho, Masuda Kimiaki, Miyahara Hiroko, Ohyama Motonari, Sakamoto Minoru, Mitsutani Takumi, Moriya Toru	4. 巻 10
2. 論文標題 Prolonged production of ¹⁴ C during the ~660 BCE solar proton event from Japanese tree rings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 660
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-57273-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Miyahara Hiroko, Horiuchi Kazuho, Sakashita Wataru, Matsuzaki Hiroyuki, Xu Hongyang, Zhou Limin	4. 巻 464
2. 論文標題 Measurement of beryllium-10 in terrestrial carbonate deposits from South China: A pilot study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 36 ~ 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2019.11.036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Moriya Toru, Miyahara Hiroko, Ohyama Motonari, Hakozaiki Masataka, Takeyama Mirei, Sakurai Hirohisa, Tokanai Fuyuki	4. 巻 61
2. 論文標題 A Study of Variation of the 11-yr Solar Cycle before the onset of the Spoerer Minimum based on Annually measured 14C Content in tree Rings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Radiocarbon	6. 最初と最後の頁 1749 ~ 1754
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/RDC.2019.123	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計70件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 39件)

1. 発表者名 堀内一穂・加藤慎士・大谷昂・栗田直幸・津滝俊・中澤文男・本山秀明・川村賢二・田副博文・赤田尚史・山形武靖・松崎浩之
2. 発表標題 南極地域観測隊内陸トラバースルートにおける表面積雪中の10Be空間分布：南緯75度を境とした堆積レジームの変化
3. 学会等名 第23回AMSシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 八木橋理子・堀内一穂・本山秀明・山形武靖・松崎浩之
2. 発表標題 東南極沿岸域H15アイスコアに刻まれた1930年以降の10Be変動
3. 学会等名 第23回AMSシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 栗野正義・堀内一穂・松井浩紀・菅沼悠介・川村賢二・池原実・山形武靖・松崎浩之
2. 発表標題 南大洋インド洋区の深海堆積物に記録されたラシャン地磁気極小期の10Be上昇
3. 学会等名 第23回AMSシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三宅美沙・箱崎真隆・Rashit Hantemirov・早川尚志・Samuli Helama・堀内一穂・A.J.Timothy Jull・木村勝彦・前原裕之・宮原ひろ子・森谷透・Markku Oinonen・Irina P. Panyushkina・笹公和・武山美麗・門叶冬樹
2. 発表標題 過去1万年間の極端太陽高エネルギー粒子現象の調査
3. 学会等名 第23回AMSシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀内一穂・八木橋理子・吉岡恒星・坂下伶菜・飯塚芳徳・的場澄人・山形武靖・松崎浩之
2. 発表標題 グリーンランド南東ドームアイスコア2本の超高解像度10Beデータ比較：前処理操作の向上と変動の再現性について
3. 学会等名 SE-Domeアイスコア研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 八木橋理子・堀内一穂・本山秀明・山形武靖・松崎浩之
2. 発表標題 東南極沿岸域H15アイスコアに記録された1930年以降の10Be詳細変動
3. 学会等名 SE-Domeアイスコア研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F. Miyake, M. Hakozaiki, R. Hantemirov, H. Hayakawa, S. Helama, K. Horiuchi, A.J. T. Jull, K. Kimura, H. Maehara, H. Miyahara, T. Moriya, M. Oinonen, I. P. Panyushkina, K. Sasa, M. Takeyama, F. Tokanai
2. 発表標題 Toward an exploration of extreme SEP events for the past 10,000 years
3. 学会等名 The 5th ISEE Symposium: Toward the Future of Space-Earth Environmental Research (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F. Miyake
2. 発表標題 Carbon-14 spikes caused by solar energetic particle events
3. 学会等名 AmeriDendro2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F. Miyake
2. 発表標題 Extreme solar energetic particle events recorded in cosmogenic nuclides data
3. 学会等名 Space Climate 8 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三宅美沙
2. 発表標題 過去1万年間に生じた大規模な太陽高エネルギー粒子イベント
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第152回総会・講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Miyahara, F. Tokanai, T. Moriya, M. Takeyama, H. Sakurai, M. Ohyama, K. Horiuchi, H. Hotta
2. 発表標題 Recurrent Large-Scale Solar Proton Events Before the Onset of the Wolf Grand Solar Minimum
3. 学会等名 AGU fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xu, Hongyang, Miyahara, Hiroko, Zhou, Limin, Horiuchi, Kazuho
2. 発表標題 Exploration of the depositional process of ^{10}Be in endogenic travertine at Baishuitai, Yunnan
3. 学会等名 AGU fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Miyahara
2. 発表標題 Beryllium-10 in travertine deposits: A new proxy for the past solar and cosmic-ray variations
3. 学会等名 The 5th ISEE Symposium: Toward the Future of Space-Earth Environmental Research (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroko Miyahara, Fuyuki Tokanai, Toru Moriya, Mirei Takeyama, Hirohisa Sakurai, Motonari Ohyama, Kazuho Horiuchi, and Hideyuki Hotta
2. 発表標題 Recurrent large-scale solar proton events before the onset of the Wolf grand solar minimum indicated by carbon-14 content in tree rings
3. 学会等名 JpGU meeting, JpGU-AGU joint session (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大藪 幾美、川村 賢二、Buizert Christo、Parrenin Frederic、Orsi Anais、北村 享太郎、青木 周司、中澤 高清
2. 発表標題 ドームふじ深層氷床コアの0 - 20万年前の年代構築 (DF2021)
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山崎俊嗣、李嘉熙、下野貴也、金松敏也
2. 発表標題 相対古地磁気強度推定の高度化への取り組み：南東太平洋チリ沖コアの例
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小田 啓邦、James E.T. Channell
2. 発表標題 堆積物による高精度・高分解能地磁気エクスカージョン記録の復元：Iceland Basinエクスカージョンを例にとって
3. 学会等名 第8回 地球環境史学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笹 公和
2. 発表標題 加速器質量分析法による宇宙線生成核種の検出と地球化学への応用
3. 学会等名 日本地球化学会 第69回年会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroko Miyahara, Fuyuki Tokanai, Toru Moriya, Mirei Takeyama, Hirohisa Sakurai, Kazuho Horiuchi, and Hideyuki Hotta
2. 発表標題 Variation of solar cycle before the onset of the Maunder Minimum revealed by high-precision carbon-14 analyses
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	Kazuho Horiuchi, Shinji Kato, Kou Ohtani, Naoyuki Kurita, Shun Tsutaki, Fumio Nakazawa, Hideaki Motoyama, Kenji Kawamura, Hirofumi Tazoe, Naofumi Akata, Keisuke Yamagata, and Hiroyuki Matsuzaki
2. 発表標題	Spatial variations of ^{10}Be in surface snow along the inland traverse route of Japanese Antarctic Research Expedition
3. 学会等名	15th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Kanzawa, K., Miyake, F., Horiuchi, K., Fujimori, R., Yamagata, T. and Matsuzaki, H.
2. 発表標題	Exploration of beryllium calcination condition for the high-resolution ^{10}Be analysis of cosmic ray events
3. 学会等名	15th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	堀内一穂
2. 発表標題	多数試料Be同位体分析による古宇宙線変動の解明と古記録間の同期
3. 学会等名	日本地球化学会第68回年会 (招待講演)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	堀内一穂
2. 発表標題	観測・歴史時代の宇宙線・大気環境のプロープとしての高解像度宇宙線生成核種分析
3. 学会等名	グリーンランド南東ドームアイスコア、研究・掘削報告と分析計画に関する研究集会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 Hiroko Miyahara, Hongyang Xu, Limin Zhou, Kazuho Horiuchi, Hiroyuki Matsuzaki
2. 発表標題 Measurement of cosmogenic ^{10}Be in endogenic travertine deposits at Baishuitai
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroko Miyahara, Fuyuki Tokanai, Toru Moriya, Mirei Takeyama, Hirohisa Sakurai, Kazuho Horiuchi, Hideyuki Hotta
2. 発表標題 Solar cycles around the onset of the Maunder Minimum
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshitsugu Yamazaki, Futoshi Nanayama, Kosuke Inoue, Kazuho Horiuchi
2. 発表標題 Paleoceanographic interpretation of environmental magnetic and XRF core scanner data from sediment cores in the Western Pacific Warm Pool
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宅美沙
2. 発表標題 宇宙線生成核種を用いた過去の極端太陽現象の調査
3. 学会等名 日本質量分析学会同位体比部会2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 F. Miyake, I. P. Panyushkina, A.J. T. Jull, F. Adolphi, N. Brehm, S. Helama , K. Kanzawa, T. Moriya, R. Muscheler, K. Nicolussi, M. Oinonen, M. Salzer, M. Takeyama, F. Tokanai, L. Wacker
2 . 発表標題 Search for past SEP events using tree-ring 14C data
3 . 学会等名 3rd International Radiocarbon in the Environment Conference (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 F. Parrenin, L. Bazin, C. Buizert, E. Capron, J. Chowdhry-Beeman, E. Corrick, R. Drysdale, K. Kawamura, A. Landais, R. Mulvaney, I. Oyabu, S. Rasmussen
2 . 発表標題 The Paleochrono probabilistic model to derive a consistent chronology for several paleoclimatic sites
3 . 学会等名 EGU General Assembly 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Hongyang Xu, Hiroko Miyahara, Limin Zhou, Kazuho Horiuchi, Hiroyuki Matsuzaki, Hailong Sun, Weijun Luo, Xiangmin Zheng, Yusuke Saganuma, Shijie Wang
2 . 発表標題 10Be record in travertine sediment: a potential proxy for reconstructing high-resolution solar activity
3 . 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Fusa Miyake, Kazuho Horiuchi, Hirohisa Sakurai, Yuko Motizuki, Yoichi Nakai, Kazuya Takahashi, Hideaki Motoyama, and Hiroyuki Matsuzaki
2 . 発表標題 宇宙線生成核種を用いた紀元前660年頃の宇宙線イベントの調査
3 . 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 菅澤佳世・三宅芙沙・多田悠馬・堀内一穂・大谷昂・笹公和・高橋努・松村万寿美・落合悠太・高野健太・望月優子・高橋和也・中井陽一・本山秀明・松崎浩之
2. 発表標題 約100年分のドームふじアイスコア中10Beと36Clの高分解能測定によるBC5480年宇宙線イベントの調査
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hirohisa Sakurai, Fuyuki Tokanai, Fusa Miyake, Kazuho Horiuchi, Kimiaki Masuda, Hiroko Miyahara, Motonari Ohyama, Minoru Sakamoto, Takumi Mitsutani, and Toru Moriya
2. 発表標題 14C during the ~660 BCE solar proton event from Japanese tree rings.
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮原ひろ子, 門叶冬樹, 森谷透, 堀内一穂
2. 発表標題 太陽活動極小期の発生プロセスの詳細解析に向けて
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮原ひろ子
2. 発表標題 太陽活動極小期における宇宙線強度変動の研究および過去の宇宙線変動復元のための新手法開拓
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Oda, H., Y. Yamamoto and Y. Inouchi
2. 発表標題 High resolution paleomagnetic secular variation records from Lake Biwa and its implications on core dynamics
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint-Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Kawamura, Ikumi Oyabu, Shuji Aoki, Takakiyo Nakazawa, Ayako Abe-Ouchi, Fuyuki SAITO
2. 発表標題 Accurate chronology and climatic reconstruction around MIS 11 from the Dome Fuji ice core
3. 学会等名 JpGU2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三宅美沙・堀内一穂・櫻井敬久・望月優子・中井陽一・高橋和也・本山秀明・松崎浩之
2. 発表標題 宇宙線生成核種を用いた紀元前 660 年頃の宇宙線イベントの調査
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅澤佳世・三宅美沙・多田悠馬・堀内一穂・大谷昂・笹公和・高橋努・松村万寿美・落合悠太・望月優子・高橋和也・中井陽一・本山秀明・松崎浩之
2. 発表標題 BC5480 年宇宙線イベントにおける ^{10}Be と ^{36}Cl の変動: ドームふじアイスコアからの証拠
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hongyang Xu, Hiroko Miyahara, Limin Zhou, Kazuho Horiuchi, Hiroyuki Matsuzaki, Hailong Sun, Weijun Luo, Xiangmin Zheng, Yusuke Suganuma, Shijie Wang
2. 発表標題 Examination of ^{10}Be in travertine sediment as a possible tool to reconstruct high-resolution past solar activity
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kayo Kanzawa, Fusa Miyake, Yuma Tada, Kazuho Horiuchi, Kou Ohtani, Kimikazu Sasa, Yuko Motizuki, Kazuya Takahashi, Yoichi Nakai, Hideaki Motoyama, Hiroyuki Matsuzaki
2. 発表標題 Variation of cosmogenic ^{10}Be for cosmic ray event in ~5480 BC from Antarctic Dome Fuji ice core
3. 学会等名 The 8th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀内一穂
2. 発表標題 SE-Dome アイスコアにおける ^{10}Be 年代決定の可能性
3. 学会等名 グリーンランド南東ドーム (SE-Dome) アイスコアに関する研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀内一穂・坂下伶菜
2. 発表標題 SE-Dome アイスコアから得られた2008年以降の一ヶ月解像度 ^{10}Be 記録
3. 学会等名 グリーンランド南東ドーム (SE-Dome) アイスコアに関する研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅澤佳世・三宅美沙・多田悠馬・堀内一穂・大谷昴・笹公和・望月優子・高橋和也・中井陽一・本山秀明・松崎浩之
2. 発表標題 ドームふじアイスコア中10Beと36Cl濃度の測定によるBC5480年宇宙線イベントの調査
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hongyang Xu, Hiroko Miyahara, Kazuho Horiuchi, Hiroyuki Matsuzaki, Hailong Sun, Weijun Luo, Xiangmin Zheng, Yusuke Suganuma, Shijie Wang, Limin Zhou
2. 発表標題 Examination of 10Be in travertine sediment as a possible tool to reconstruct past solar activity
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Miyahara
2. 発表標題 High-precision measurement of carbon-14 in tree rings around the onset of the Maunder Minimum
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Oyabu I., Kawamura K., Kitamura K., Orsi A., Parrenin F
2. 発表標題 Timing of climatic events for Termination II from O2/N2, 180atm and CH4 records of the Dome Fuji ice core, Antarctica
3. 学会等名 The 10th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Oyabu I., Kawamura K., Kitamura K.
2. 発表標題 Timing of penultimate glacial-interglacial transition from gas measurements of the Dome Fuji ice core, Antarctica
3. 学会等名 EGU General Assembly 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Oyabu I., Kawamura K., Kitamura K.
2. 発表標題 Penultimate glacial-interglacial transition viewed from the Dome Fuji ice core, Antarctica
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fusa Miyake
2. 発表標題 Cosmogenic Evidences for Past SEP Events
3. 学会等名 36th International Cosmic Ray Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 宮原ひろ子	4. 発行年 2019年
2. 出版社 新日本出版社	5. 総ページ数 160
3. 書名 太陽ってどんな星	

1. 著者名 F. Miyake, I. Usoskin, S. Poluianov	4. 発行年 2019年
2. 出版社 IOP Publishing	5. 総ページ数 276
3. 書名 Extreme Solar Particle Storms: The hostile Sun	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>堀内研のWeb Page http://www.st.hirosaki-u.ac.jp/~kh/ 太陽地球圏環境予測 オープン・テキストブック (PSTEP Open Textbook) https://nagoya.repo.nii.ac.jp/search?search_type=2&q=1621213872938 走査型SQUID顕微鏡の開発と地質試料への応用(1), センサイト・プロジェクト: 特集・解説記事 http://sensait.jp/17452/ 走査型SQUID顕微鏡の開発と地質試料への応用(2), センサイト・プロジェクト: 特集・解説記事 http://sensait.jp/17468/ 宮原ひろ子准教授の研究グループが17世紀のマウンダー極小期直前の太陽周期の変遷を解明 https://www.musabi.ac.jp/news/20210310_03_01/ 過去の太陽活動/宇宙線変動史を解明する新手法を開拓 ~ 白水台の石灰棚に残された過去の太陽活動変動 ~ https://www.hirosaki-u.ac.jp/42381.html 宮原ひろ子准教授の研究グループが過去の太陽活動/宇宙線変動史を解明する新手法を開拓 https://www.musabi.ac.jp/news/20190620_03_01/ 【プレスリリース】紀元前660年頃の宇宙線増加の詳細を解明 (理工学研究科) https://www.hirosaki-u.ac.jp/46410.html 紀元前660年頃の宇宙線増加の詳細を解明 http://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload_images/20200121_isee1.pdf</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	三宅 芙沙 (Miyake Fusa) (90738569)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授 (13901)	
研究分担者	宮原 ひろ子 (Miyahara Hiroko) (00532681)	武蔵野美術大学・造形学部・教授 (32681)	
研究分担者	川村 賢二 (Kawamura Kenji) (90431478)	国立極地研究所・先端研究推進系・准教授 (62611)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山崎 俊嗣 (Yamazaki Toshitsugu) (80344125)	東京大学・大気海洋研究所・教授 (12601)	
研究分担者	小田 啓邦 (Oda Hirokuni) (90356725)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・上級主任研究員 (82626)	
研究分担者	笹 公和 (Sasa Kimikazu) (20312796)	筑波大学・数理物質系・准教授 (12102)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	松崎 浩之 (Matsuzaki Hiroyuki)		
研究協力者	山形 武靖 (Yamagata Takeyasu)		
研究協力者	藤田 秀二 (Fujita Shuji)		
研究協力者	本山 秀明 (Motoyama Hideaki)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	大藪 幾美 (Oyabu Ikumi)		
研究協力者	菅澤 佳世 (Kanzawa Kayo)		
研究協力者	奈良 郁子 (Nara Fumiko)		
研究協力者	國分 陽子 (Kokubu Yoko)		
研究協力者	大谷 昂 (Ohtani Kou)		
研究協力者	白戸 和也 (Shiroto Kazuya)		
研究協力者	畠山 匠 (Hatakeyama Takumi)		
研究協力者	粟野 正義 (Awano Masayoshi)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	八木橋 理子 (Yagihashi Riko)		
研究協力者	渡辺 茅乃 (Watanabe Kayano)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
中国	華東師範大学	中国科学院地球化学研究所	
米国	アラスカ大学フェアバンクス校		