

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 4日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22244061

研究課題名（和文） 宇宙線層序学の開拓

研究課題名（英文） An exploratory study of cosmic-ray stratigraphy

研究代表者

堀内 一穂 (HORIUCHI KAZUHO)

弘前大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：00344614

研究成果の概要（和文）：南極ドームふじアイスコアに含まれる宇宙線生成核種ベリリウム 10 を、過去 30 万年間を通して約千年の時間分解能で分析した。また化学抽出法の適用や有孔虫殻の分解により、海底堆積物の自生成成分中のベリリウム同位体比（ベリリウム 10/ベリリウム 9 比）を測定する手法を確立し、実際に堆積物からベリリウム 10 記録を得た。こうして得られたデータに、古地磁気情報や炭素 14 の情報を加味して、過去 70 万年間の宇宙線層序標準曲線を構築した。

研究成果の概要（英文）：Cosmogenic beryllium-10 in the Dome Fuji ice core (Antarctica) was analyzed over the last 300 kyr with a millennial time resolution. Isotopic ratios of beryllium ($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$) in marine sediments were also analyzed using a chemical extraction method developed in this study. Taking paleointensity records of the earth's magnetic field and cosmogenic carbon-14 records into account, we constructed a standard curve of "cosmic-ray stratigraphy" over the past 700 kyr from the beryllium-10 records obtained in this study and obtained previously from the Dome Fuji ice core.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	16,500,000	4,950,000	21,450,000
2011年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2012年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
年度			
年度			
総計	29,300,000	8,790,000	38,090,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地質学

キーワード：第四紀学，層序学，年代学，古地磁気学，宇宙線

1. 研究開始当初の背景

層序学は、地質学の根幹をなす研究分野として発展を遂げてきた。地球化学や地球物理学においても、地球表層の歴史を実際の記録に基づいて解釈する試み、すなわち古環境・古気候の復元の際には、層序学もしくは層序

学的概念が意識・無意識を問わずに利用されている。堆積物やアイスコア及び年輪などから得られる古環境情報を時系列記録に変換する際には、深部から浅部に向けて（年輪では中心から外側に向けて）情報を並べて層序断面を作成した後に、複数の層序断面を対比

する手段（層序対比手段）により標準層序と重ね合わせ、標準層序に刻まれた年代に基づいて時系列曲線へと変換することが多い。こうした対比手段と層序の組み合わせには、酸素同位体層序、地磁気極性層序、火山灰層序、生層序などが挙げられる。また、かねてから第四紀の代表的な放射年代決定手段であった炭素 14 も、今や IntCal 標準曲線との対比にて較正值が得られる、いわば層序学的な年代決定手段となった。

層序対比の各手段は、次の基準をより良く満たすことを理想とする。i) 広い地理的範囲にて同一の基準で利用できる。ii) 利用可能な試料の種類が多い。iii) 特徴（対比の基準点）が多い。iv) 絶対年代が多く挿入できる。

本課題にて開拓を試みた宇宙線層序学は、これらの基準を良く満たすものである。銀河系に端を発する銀河宇宙線は、太陽磁場と地球磁場のシールドを潜り抜けて地球大気上層に到達する。主に銀河宇宙線と大気との相互作用により生成される宇宙線生成核種は、従って太陽活動と地球磁場強度変動に依存してその生成率を変化させる。よって、アイスコアや堆積物及び年輪等に含まれる宇宙線起源の核種（宇宙線生成核種）は、様々なスケールの古宇宙線強度変動現象を捉えているはずである。これらは、宇宙線の変動であることから i) 全球現象であり、ii) 様々な古環境アーカイブより検出でき、iii) 特徴的な変動も多く、iv) 年輪年代や年縞年代および軌道年代などを通して絶対年代を多く挿入することができる。

2. 研究の目的

本研究では、宇宙線の強度変動を新たな層序対比の手段として開拓することを目的としている。宇宙線生成核種による古宇宙線強度変動の研究は、炭素 14 により比較的よくなされてきたが、その検出限界である数万年前以前については、研究の事例に極めて乏しい。しかしながら研究代表者らは近年、南極ドームふじアイスコア深部の宇宙線生成核種ベリリウム 10 を約千年の時間分解能で分析し、30~72 万年前の古宇宙線強度変動を復元した。その結果、そこに見られる数千年スケール以上の変動が、おおよそ古地磁気強度の変化で説明できることが分かった。こうした古地磁気強度に加えて、もう一つの支配要因である太陽活動の変動を考慮し、アイスコア中のベリリウム 10 に基づいた古宇宙線強度の標準変動曲線を確立した上で、他の古環境アーカイブから古宇宙線強度変動データ（例えば堆積物のベリリウム同位体比など）を取得することができれば、宇宙線の強度変動は新たな層序対比手段として極めて有用

なものになることが期待できる。

そこで本研究期間では、以下の事項に焦点を絞って研究を行うこととした。

- (1) 30 万年前以降の宇宙線強度変動をドームふじアイスコアのベリリウム 10 から復元
- (2) 堆積物のベリリウム同位体比を分析する手法を確立
- (3) 堆積物よりベリリウム 10 記録を得て、ドームふじアイスコアのそれと比較
- (4) 古地磁気強度変動記録を整備し、これをベリリウム 10 記録と比較
- (5) 炭素 14 記録等に見られる周期的な太陽活動変動の証拠を、層序対比の手段として用いることができるかどうかを検討
- (6) 過去 72 万年間の宇宙線変動層序のアウトライン作成

3. 研究の方法

(1) ドームふじアイスコアのベリリウム 10 を、30 万年前以降満遍なく、千年の時間分解能で分析した。ベリリウム 10 の分析には、東京大学大学院工学系研究科に設置された 5MV 加速器質量分析計を用いた（以後の項目でも同様）。

(2) 堆積物から自生成成分を化学的に抽出しそのベリリウム同位体比を測定する手法と有孔虫殻のベリリウム同位体比を測定する手法を、実測定により検討した。そのために、前述の加速器質量分析計に加えて、本補助金にて弘前大学大学院理工学研究科に導入されたグラフィトファーネス原子吸光光度計や学習院大学理学部の誘導結合プラズマ質量分析計を用いて、ベリリウム 9 の高感度分析を試みた。

(3) (2) で確立された手法を用いて、堆積物中の自生成成分を対象にしたベリリウム同位体分析を行った。分析には、宇宙線強度変動の支配要因の一つと目されている古地磁気強度の変動曲線が、共同研究者等により既に得られている、赤道太平洋域西カロリン海盆の堆積物を用いた。これと (1) により、赤道域と南極という極めて異なる環境間での宇宙線層序の可能性を探ることができる。

(4) 過去数十万年間の古地磁気変動について、特にエクスカージョンに焦点を当てて、記録を整備した。こうした作業は産業技術総合研究所で行われた。

(5) 古宇宙線強度変動に見られる太陽活動変動成分を、地磁気変動成分と分離し、層序対比手段として用いる手法を確立するために、太陽極小期と極大期の炭素 14 濃度変動を分析し、その特徴を炙り出した。炭素 14

の分析には、山形大学高感度加速器質量分析センターの加速器質量分析計を利用した。

(6) 本研究での分析結果と、これまでに得られたドームふじアイスコアのベリリウム 10 データとを統合し、これに酸素/窒素比を用いた精密な軌道年代を挿入することにより、過去 72 万年間の古宇宙線強度変動曲線の編纂を試みた。またこの曲線に対して、古地磁気強度やエクスカッションのデータに基づいた定量的な解釈を行い、さらに南極と赤道域という大きく異なる特徴を持つ場所から得られたベリリウム 10 記録の相互比較を行うことで、宇宙線層序の可能性を探った。

4. 研究成果

(1) ドームふじアイスコアの過去 30 万年間 (2400m 以浅に相当) について千年の時間分解でベリリウム 10 を分析した。その結果、過去 30 万年間の主要な地磁気エクスカッションに対応するベリリウム 10 濃度とフラックスの上昇が明瞭に認められた。地磁気エクスカッション時には地磁気強度が著しく低下することが知られており、これに伴う宇宙線強度の上昇が、ドームふじアイスコア中のベリリウム 10 に正しく反映した結果と考えられる。また理論的手法と実験的手法により、ベリリウム 10 から過去の地磁気強度の推定を試みた結果、主要な古地磁気強度変動曲線との大まかな一致が認められた。このことから、過去 30 万年間のドームふじアイスコアに認められる数千年規模以上のベリリウム 10 変動は、主に地磁気強度変動に伴う宇宙線強度の変動を反映していることが明らかになった。

(2) 弘前大学に導入されたグラフィトフナーネス原子吸光光度計を立ち上げ、多数の濃度の異なる標準液を用いた検討実験により、1ppt にまで至るベリリウム 9 の定量が可能であることを確認した。続いて、日本海海底堆積物より既に数十ミリグラム拾い出されていた有孔虫殻をテスト試料にして、各種表面洗浄の後に希硝酸にて溶解し、加速器質量分析計と原子吸光光度計を用いてベリリウム同位体比 (ベリリウム 10/ベリリウム 9 比) を定量することに成功した。さらに、堆積物から自生成分を化学的に抽出してそのベリリウム同位体比を分析する手法や、堆積物の極微量 (1mg) 分析法についても確立することで、上記の装置を用いて本研究の目的が達成可能であることが確かめられた。

(3) (2) で確立された手法を用いて、赤道太平洋域西カロリン海盆の堆積物を対象に、化学的に抽出された自生成分のベリリウム同

位体分析を行うことで、過去 30 万年間を数千年の時間分解能で網羅するベリリウム同位体記録の獲得に成功した。得られた結果を、共同研究者等の手により既に公表されている同一堆積物の古地磁気強度変動曲線と比較すると、ベリリウム同位体比は相対古地磁気強度と大まかに逆相関してして変動していた。このことは、アイスコアのベリリウム 10 記録での解釈と同様に、地磁気強度の変化に伴う宇宙線強度変動に支配されたベリリウム 10 の生成率が、西カロリン海盆堆積物のベリリウム同位体比に良く反映していることを意味する。一方で、ベリリウム同位体変動と古地磁気強度変動との間には、堆積性古地磁気の獲得機構に由来するとみなすことができる、見かけのオフセットが観察された。

(4) ドームふじアイスコアのベリリウム 10 分析から得られた過去 30 万年間の古宇宙線強度変動記録と西カロリン海盆から得られたベリリウム 10 記録及び古地磁気強度変動記録とを相互に比較した結果、ベリリウム 10 同士では類似するものの古地磁気強度変動曲線には見られない特徴とドームふじアイスコアでのみ検出される特徴の双方が認められた。特にエクスカッションに焦点を当てて他の古地磁気変動記録も用いて検討した結果、前者の特徴は地磁気強度変動以外の原因による宇宙線強度変動を反映し、後者の特徴は堆積物での記録獲得プロセスに依存していそうなのが判明した。今後、これらについて断定的な結論を得るためには、アイスコア記録に匹敵する千年の時間分解能を持つベリリウム 10 記録を、堆積物から得る必要があると考えられる。

(5) 測定された炭素 14 濃度の変動には、十年スケールのシュワーベ周期が認められ、さらに太陽極小期と極大期にて周期長の違いが確認できた。一方で、変動幅の小さい炭素 14 にてこうした傾向を確実に捉えるためには、加速器質量分析計の限界に近い高精度な分析が必要なため、実験は最低限しか完了できなかった。故に、こうした違いに基づいて宇宙線強度変動曲線から太陽活動変動成分のみを抽出するためには、今後も継続した研究が必要である。また研究期間中に、年輪の炭素 14 記録に短期間の (1 年以下の) 宇宙線強度変動が記録され得ることを示唆する研究結果が公表されており、恐らくコロナ質量放出のような爆発的な太陽活動に由来するイベントとみなされつつある。こうした現象も、将来の超高精度 (単年以下レベルの) 層序対比に使える可能性があるため、今後詳細に検討する必要があるだろう。

(6) これまでに得られたドームふじアイスコアのベリリウム10記録を統合し、さらに酸素/窒素比を用いた精密な軌道年代を挿入することにより、過去72万年間の古宇宙線強度変動曲線が編纂できた。また、堆積物のベリリウム10や年輪の炭素14記録と共通する変動を特定することで、過去72万年間の宇宙線層序のアウトラインを作成できた。こうした成果は、世界的にもユニークなものである。今後の展望としては、古宇宙線強度変動曲線の時間分解能を上げること、アルミニウム26や塩素36など他の宇宙線生成核種にも研究テーマを拡張すること、堆積物や有孔虫殻のさらなる分析により宇宙線層序の適用範囲を拡げること、などが挙げられる。

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10件)

- ① Kazuho Horiuchi, 他3名, ^{10}Be measurements at MALT using reduced-size samples of bulk sediments, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 査読有, 294巻, 2012, 72-76, DOI: 10.1016/j.nimb.2012.06.022
- ② Kataoka, R., Miyahara, H., 他1名, Anomalous ^{10}Be spikes during the Maunder Minimum: Possible evidence for extreme space weather in the heliosphere, Space Weather, 査読有, 10巻, 2012, S11001, DOI: 10.1029/2012SW000835
- ③ K. Nagaya, 他5名, H. Miyahara, 他1名, Variation of the Schwabe Cycle Length During the Grand Solar Minimum in the 4th Century BC Deduced from Radiocarbon Content in Tree Rings, Solar Physics, 査読有, 280巻, 2012, 223-236, DOI: 10.1007/s11207-012-0045-2
- ④ Steinhilber F., 他9名, Miyahara H., 他3名, 9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings, Proceedings of the National Academy of Sciences, 査読有, 109巻, 2012, 5967-5971, DOI: 10.1016/j.nimb.2012.06.022
- ⑤ Takahiro Watanabe, 他3名, Kazuho Horiuchi, 他2名, Last glacial to post glacial climate changes in continental Asia inferred from multi-proxy records (geochemistry, clay mineralogy, and paleontology) from Lake Hovsgol, Global and Planetary Change, 査読有, 88-89巻, 2012, 53-63,

DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.03.005

- ⑥ Mochizuki, N., Oda, H., 他3名, Paleointensity variation across the Matuyama-Brunhes polarity transition: Observations from lavas at Punaruu Valley, Tahiti, Journal of Geophysical Research, 査読有, 116巻, 2011, B06103, DOI: 10.1029/2010JB008093
 - ⑦ Miyahara, H., 他2名, Y. Yokoyama, 他4名, Is the Sun heading for another Maunder Minimum? -Precursors of the grand solar minima, Journal of Cosmology, 査読有, 8巻, 2010, 1970-1982, <http://journalofcosmology.com/ClimateChange104.html>
 - ⑧ Suganuma, Y., Y. Yokoyama, T. Yamazaki, K. Kawamura, 他2名, ^{10}Be evidence for delayed acquisition of remanent magnetization in marine sediments: Implication for a new age for the Matuyama-Brunhes boundary, Earth and Planetary Science Letters, 査読有, 296巻, 2010, 443-450, DOI: 10.1016/j.epsl.2010.05.031
 - ⑨ 宮原ひろ子, 過去1200年間における太陽活動および宇宙線変動と気候変動との関わり, 地学雑誌, 査読有, 119巻, 2010, 510-518
 - ⑩ Kimikazu Sasa, 他5名, Kazuho Horiuchi, 他4名, Measurement of cosmogenic ^{36}Cl in the Dome Fuji ice core, Antarctica: Preliminary results for the Last Glacial Maximum and early Holocene, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 査読有, 268巻, 2010, 1193-1196, DOI: 10.1016/j.nimb.2009.10.131
- [学会発表] (計10件)
- ① Kazuho Horiuchi, Long-term variations of cosmogenic radionuclides recorded in ice cores, sediments and tree rings, H24 MALT progress symposium, 2012年09月20日~2012年09月21日, Takeda Hall, The University of Tokyo.
 - ② Kazuho Horiuchi, 他4名, Yusuke Yokoyama, Yasuyuki Muramatsu, 他2名, Beryllium 10 analysis for the Dome Fuji ice cores and cosmic-ray stratigraphy, 19th International Mass Spectrometry Conference, 2012年09月15日~2012年09月21日, Kyoto International Conference Center.
 - ③ 堀内一穂, ベリリウム10からみた過去の宇宙線強度変動と宇宙線層序学, 日本第四紀学会2012年大会, 2012年08月20日~2012年08月22日, 立正大学熊谷キャンパス.

- ④ H. Miyahara, K. Horiuchi, 他 6 名, Periodic cosmic - ray spikes at the Maunder Minimum indicated by the Be - 10 content in Greenland and Antarctic Ice cores, Thirteenth International Solar Wind Conference, 2012 年 06 月 18 日～2012 年 06 月 22 日, the Sheraton Keauhou Bay on the Big Island, Hawaii, USA.
- ⑤ H. Miyahara, 他 6 名, Importance of heliospheric environment as a parameter to determine the multi - decadal variations of terrestrial climate, Thirteenth International Solar Wind Conference, 2012 年 06 月 18 日～2012 年 06 月 22 日, the Sheraton Keauhou Bay on the Big Island, Hawaii, USA.
- ⑥ K. Kawamura, 他 3 名, Accurate age scale of the Dome Fuji ice core, Antarctica from O_2/N_2 ratio of trapped air, European Geosciences Union General Assembly 2012, 2012 年 04 月 22 日～2012 年 04 月 27 日, Vienna, Austria.
- ⑦ K. Kawamura, 他 7 名, Accurately dated 700,000-year climatic record from the Dome Fuji ice core, Antarctica, International Partnerships in Ice Core Sciences First Open Science Conference, 2012 年 10 月 01 日～2012 年 10 月 05 日, Presqu'île de Giens, Côte d'Azur, France.
- ⑧ Hirokuni Oda, 他 5 名, Paleomagnetic records of Iceland Basin Excursion from Lake Baikal: Detailed morphology of VGP paths and relative paleointensity, European Geosciences Union General Assembly 2012, 2012 年 04 月 22 日～2012 年 04 月 27 日, Vienna, Austria.
- ⑨ 村松康行, 安定ベリリウムの ICP-MS による分析, 研究集会「宇宙線生成核種の連続記録と古宇宙線・古環境変動 II」, 2012 年 08 月 24 日～2012 年 08 月 25 日, 弘前大学文京町キャンパス.
- ⑩ Kazuho Horiuchi, 他 4 名, Yusuke Yokoyama, Yasuyuki Muramatsu, 他 2 名, A 300-kyr ^{10}Be record from Dome Fuji (Antarctica) and cosmic-ray stratigraphy, The 4th East Asia AMS Symposium, 16-18, December, 2011, Takeda Hall, The University of Tokyo.

[図書] (計 2 件)

- ① 上出洋介・宮原ひろ子 訳, 太陽活動と地球: 生命・環境をつかさどる太陽 (J Eddy 著), 丸善出版, 2012, 272.
- ② 藤井理行・他 5 名・川村賢二・他 3 名・堀内一穂・他 2 名, 極地研ライブラリー アイスコア-地球環境のタイムカプセル-, 成

山堂書店, 2011, 236.

[その他]

ホームページ

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀内 一穂 (HORIUCHI KAZUHO)

弘前大学・大学院理工学研究科・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・気水圏研究グループ・准教授

研究者番号: 90431478

村松 康行 (MURAMATSU YASUYUKI)

学習院大学・理学部・教授

研究者番号: 70166304

小田 啓邦 (ODA HIROKUNI)

独立行政法人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)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号: 00532681

横山 祐典 (YOKOYAMA YUSUKE)

東京大学・海洋研究所・准教授

研究者番号: 10359648

(H23→H24: 連携研究者)

山崎 俊嗣 (YAMAZAKI TOSHITSUGU)

独立行政法人産業技術総合研究所・地質情報研究部門・研究グループ長

研究者番号: 80344125

(H23→H24: 連携研究者)