

機関番号：12601
 研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19201003
 研究課題名（和文） アイスコア中の宇宙線生成核種による宇宙線と地球環境の変動史に関する研究
 研究課題名（英文） Study on the earth paleoenvironmental history using cosmogenic nuclides record in ice core
 研究代表者
 松崎 浩之（MATSUZAKI HIROYUKI）
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号：60313194

研究成果の概要（和文）：過去 72 万年の記録を保持している南極アイスコア中の宇宙線生成核種 Be-10, Al-26, および Cl-36 を、加速器質量分析の手法により測定した。その結果、様々な年代領域において、これらの核種の生成量の変動と、太陽活動、地球磁場、および地球の中緯度地域の気候の変動と関係する証拠を多数つかんだ。

研究成果の概要（英文）：Cosmogenic Radio Nuclides, Be-10, Al-26, and Cl-36 in Antarctic ice core (spanned over 720 kyr) were systematically measured by means of Accelerator Mass Spectrometry. As a result, many cosmic ray events in multiple time scales were found. Most of observation indicated the strong correlation between the variation of production rate of above nuclides and solar activity, geomagnetism and climate change of mid-latitude region.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	17,300,000	5,190,000	22,490,000
2008 年度	12,800,000	3,840,000	16,640,000
2009 年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
年度			
年度			
総計	36,400,000	10,920,000	47,320,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：アイスコア、宇宙線生成核種、環境変動、加速器質量分析

1. 研究開始当初の背景

宇宙線生成核種の生成率変動は、地球の古環境およびその変動を示す指標として注目されている。その一つとしてよく調べられている年輪や炭酸塩中の ^{14}C は、半減期（5730 年）による制約により、過去 5 万年を遡るのが手法的な限界であり、特に 2 万 6 千年前以前の記録の正当性には様々な議論の余地が残されていた。また堆積物中の ^{10}Be は、過去約 1000 万年間の年代を遡ることができ、長

期記録としては優れるが、堆積過程による変動が大きく生成率シグナルが隠されることや一般的に時間分解能が低いため、正確で詳細な生成率の復元には不向きであった。そこで本研究では、堆積過程による変動が少なく時間分解能が高いアイスコア中の ^{10}Be や ^{36}Cl に着目した。

アイスコア中の ^{10}Be や ^{36}Cl は、グリーンランドのアイスコアにて最も詳細な研究が行われてきたが、氷床の堆積速度や地質的条

件から、遡ることのできる年代は、過去数万年間までに留まってきた。一方で、南極氷床においては、2006年、国立極地研の南極観測隊の手により、南極東部内陸域のドームふじ地点から、3030m長のアイスコア（過去72万年をカバー）が掘削された。本研究では、このドームふじアイスコア中の宇宙線生成核種を分析することで、過去数十万年間の宇宙線変動や、これと環境変動との関係を調べることを着想した。

2. 研究の目的

地球大気に到達する銀河宇宙線の強度は、太陽活動や地球磁場強度変動とともに変動する。従って銀河宇宙線は、それ自体が高層大気に影響を与える外力となるだけでなく、地球の環境に影響を及ぼすと考えられる太陽活動や地球磁場強度変動の指標にもなる。高層大気にて、銀河宇宙線と大気中の原子との相互作用により生成される宇宙線生成核種の生成率は、こうした銀河宇宙線の強度変動を推定する良い指標となる。代表的な宇宙線生成核種として、 ^{10}Be 、 ^{14}C 、 ^{26}Al 、 ^{36}Cl 、などが挙げられる。

本研究では、南極ドームふじ地点で採取されたアイスコア（2006年に採取された第2期コアは、長さ3,030mにおよび過去72万年をカバーする）中の宇宙線生成核種を分析することで、過去数十万年間の宇宙線変動や、これと環境変動との関係を調べることを目的とした。

3. 研究の方法

宇宙線生成核種の存在度は、環境中で、その安定同位体との比で、 10^{-10} ~ 10^{-14} という極微量であり、これを検出するためには、加速器質量分析法を用いる必要がある。現在、 ^{10}Be および ^{26}Al の加速器質量分析が可能な施設は、国内では、東京大学タンデム加速器研究施設（MALT）しかなく、また、 ^{36}Cl を実用的に行える機関は、筑波大学タンデム加速器施設しかない。本研究では、これらの施設における加速器質量分析のパフォーマンスを強化した上で、世界でも類例のない長さを誇る南極ドームふじアイスコアの分析を行う。分析の基本戦略は、以下の通り：

①過去3000年程度の現在の近い部分は、単年度ないし10年精度の高分解能で分析する。
②1万年オーダー、10万年オーダーの過去については、既知の気候イベント、地磁気イベントを中心に宇宙線イベントの探索を行う。

4. 研究成果

(1)東京大学タンデム加速器研究施設（MALT）において、高強度イオン源を導入した結果、 ^{10}Be -AMSおよび ^{26}Al -AMSにおいて、ほぼ3倍のカレントを得ることができ、測定効率が

幅に向上した。このことにより、以下に挙げる成果を生み出す素地を築くことができた。
(2)過去3000年間を対象に10年の時間分解能で ^{10}Be の分析を行った。その結果、歴史時代に良く知られる太陽活動の衰退期であるオールド極小期（紀元1010~1050年）、ウォルフ極小期（紀元1280~1340年）、シュペーラー極小期（紀元1420~1540年）、マウンダー極小期（紀元1645~1715年）、及びダルトン極小期（紀元1795~1820年）にて、 ^{10}Be の明瞭な増大を確認できた。これは、太陽活動が低下した結果、地球大気上層に到達する銀河宇宙線の強度が上昇し、大気中の ^{10}Be の生成率が上昇したことを良く反映する。さらに、得られた ^{10}Be 変動曲線は、別途推定された ^{14}C の生成率曲線と非常に良く一致することが明らかになった。宇宙線生成核種の増大ピークは、紀元前300年付近と同700年付近にも認められ、これらも宇宙線強度の上昇イベントを反映すると結論づけられる。

(3)過去3000年間の ^{10}Be 分析の結果を、いくつかの同時代の古気候記録と比較した。その結果、中低緯度域の気候変動との相関関係を見出すことができた。一方で、南極域の気候変動との関係は見出すことができなかった。このことは、宇宙線もしくは太陽活動の影響が、主に中低緯度に働き、極域にはあまり及ばないことを示唆する。

(4)最終退氷期（約1~2万年前）を対象に20年の時間分解能で ^{10}Be の分析を行った。その結果、退氷期の始めに、これまで知られていない複数の顕著な宇宙線イベントを発見した。

(5)太陽活動の変動周期として良く知られ、千年スケールの気候変動のトリガーとも目される200年と90年の周期的変動を、過去3000年間の ^{10}Be 記録より検出できた。また同様の変動は、退氷期や最終間氷期（約12~13万年前）の ^{10}Be 分析結果からも検出され、太陽活動の長周期変動が地質時代でも継続していたことを確認できた。

(6)30~72万年前を対象に、千年の時間分解能で ^{10}Be の分析を行った。その結果、未知の宇宙線増大イベントを複数発見することができた。また得られた ^{10}Be 変動曲線を、海底堆積物から復元された地磁気古強度の変動曲線と比較した結果、 ^{10}Be 変動のうちのかなりの部分が地磁気変動を原因として説明できることが明らかとなった。このことは、宇宙線生成核種と古地磁気データを相補的に用いることによって、様々な古環境記録間を同期するタイムマーカーが成立する可能性を示唆する。

(7) ^{10}Be に比べてアイスコア中の濃度が桁違いに低い ^{26}Al の分析に成功した。 ^{26}Al と ^{10}Be の比は、気候変動に同調するような変動は示さず、コア深部に向かい一定の割合で減少

する傾向にあった。このことは、アイスコア中の $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 比が主として放射減衰に支配されていることを意味し、 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 年代決定法への道を拓く成果となった。

(8)最終氷期最盛期(Last Glacial Maximum : LGM)から完新世(Holocene)の初期に相当する南極ドームふじアイスコア試料の宇宙線生成核種 ^{36}Cl の濃度を測定した。 ^{36}Cl 濃度の平均は、LGMで $16 \times 10^3 \text{ atoms g}^{-1}$, Holoceneで $7 \times 10^3 \text{ atoms g}^{-1}$ となった。LGM から Holocene の期間の南極ドームふじでの ^{36}Cl 降下量は $2.5\text{--}3.5 \times 10^4 \text{ atoms cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と見積もられた。

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 8 件)

- ① H. Matsuzaki, C. Nakano, Y. S. Tsuchiya, K. Kato, Y. Maejima, Y. Miyairi, S. Wakasa, T. Aze (2007) Multi-nuclides AMS performances at MALT, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B259, 36-40. 【査読有】
- ② K. Sasa, Y. Nagashima, T. Takahashi, R. Seki, Y. Tosaki, K. Sueki, K. Bessho, H. Matsumura, T. Miura, M. He (2007) ^{26}Al and ^{36}Cl AMS system at the University of Tsukuba: A progress report. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B 259, 41-46. 【査読有】
- ③ K. Horiuchi, A. Ohta, T. Uchida, H. Matsuzaki, Y. Shibata, H. Motoyama (2007) Concentration of ^{10}Be in an ice core from the Dome Fuji station, Eastern Antarctica: preliminary results from 1500-1810 yr AD. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B259, 584-587. 【査読有】
- ④ 松崎浩之 (2007) 加速器質量分析の原理, 真空, 第 50 巻第 7 号, 467-474. 【査読有】
- ⑤ T. Aze, H. Matsuzaki, H. Matsumura, H. Nagai, M. Fujimura, M. Noguchi, Y. Hongo, Y. Yokoyama (2007) Improvement of the ^{36}Cl -AMS system at MALT using a Monte Carlo ion-trajectory simulation in a gas-filled magnet, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B259, 144-148. 【査読有】
- ⑥ K. Horiuchi, T. Uchida, Y. Sakamoto, A. Ohta, H. Matsuzaki, Y. Shibata, H. Motoyama (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. Quaternary Geochronology, 3, 253-261.
- ⑦ K. Sasa, Y. Matsushi, Y. Tosaki, M. Tamari, T. Takahashi, Y. Nagashima, K. Horiuchi, H. Matsuzaki, Y. Shibata, M. Hirabayashi, H. Motoyama (2010) Measurement of cosmogenic ^{36}Cl in the Dome Fuji ice core, Antarctica: Preliminary results for the Last Glacial Maximum and early Holocene, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B268, 1193-1196. 【査読有】
- ⑧ K. Sasa, T. Takahashi, Y. Tosaki, Y. Matsushi, K. Sueki, M. Tamari, T. Amano, T. Oki, S. Mihara, Y. Yamato, Y. Nagashima, K. Bessho, N. Kinoshita, H. Matsumura (2009) Status and research programs of the multinuclide accelerator mass spectrometry system at the University of Tsukuba, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B268, 871-875. 【査読有】

[学会発表] (計 32 件)

- ① 宮原 ひろ子, 南極氷床コア中 ^{10}Be 濃度測定による太陽・宇宙線変動史の研究 I, 第 62 回日本物理学会年次大会, 2011 年 9 月 22 日, 北海道大学.
 - ② 宮原 ひろ子, High-resolution measurement of beryllium-10 in the Dome Fuji shallow ice core during the Maunder Minimum, 2007 American Geophysical Union fall meeting, 2011 年 12 月 11 日, San Francisco, USA.
 - ③ 宮原 ひろ子, マウンダー極小期における南極ドームふじ氷床コア中 ^{10}Be 濃度変動, 第 10 回 AMS シンポジウム, 2012 年 3 月 8 日, 東京大学.
 - ④ 堀内 一穂, 古気候記録間を結ぶ宇宙線生成核種の古生成率変動, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2011 年 5 月 20 日, 幕張メッセ.
 - ⑤ 堀内 一穂, ドームふじアイスコアの Be-10 変動より何をどこまで言えそうなのか, 氷床コアによる古気候・古環境復元の高度化研究, 2011 年 7 月 3 日, 北海道大学.
 - ⑥ 堀内 一穂, ドームふじアイスコアの Be-10 変動より何をどこまで言えそうなのか, 氷床コアによる古気候・古環境復元の高度化研究, 2011 年 7 月 3 日, 北海道大学.
 - ⑦ 岩崎 敦史, AMS を用いた南極ドームふじ氷床コア中の ^{10}Be の分析, 第 9 回「環境放射能」研究会, 2012 年 3 月 28 日, 高エネルギー加速器研究機構.
 - ⑧ 内田 智子, Be-10 variations in Dome Fuji ice core during the last deglaciation, 2007 American Geophysical Union fall meeting, 2011 年 12 月 11 日, San Francisco, USA.
 - ⑨ 内田 智子, Be-10 variations in Dome Fuji ice core during the last deglaciation, 2007 American Geophysical Union fall meeting, 2011 年 12 月 11 日, San Francisco, USA.
- 内田 智子, 南極ドームふじ氷床コアにおける最終退氷期の ^{10}Be 変動 ,
- ⑩ 第 10 回 AMS シンポジウム, 2012 年 3 月 8 日, 東京大学.
 - ⑪ 阿瀬 貴博, 宇宙線生成核種を用いた南極ドームふじアイスコア中の古地磁気イベントの分析, 第 10 回 AMS シンポジウム, 2012 年 3 月 8 日, 東京大学.

- ⑫ 笹 公和, 南極ドームふじ氷床コア中の宇宙線生成核種 Cl-36 の変動と放射壊変減衰による年代推定, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2011 年 5 月 20 日, 幕張メッセ.
- ⑬ 笹 公和, 宇宙線生成核種を用いた南極ドームふじアイスコア中の古地磁気イベントの分析, 第 10 回 AMS シンポジウム, 2012 年 3 月 8 日, 東京大学.
- ⑭ 笹 公和, 南極氷床コアに記録された宇宙線生成核種 ^{36}Cl の解析, 第 63 回日本物理学会年次大会, 2012 年 3 月 23 日, 近畿大学.
- ⑮ Hiroyuki Matsuzaki, Status report on MALT AMS facility, The 11th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, September 14-19, 2008, Rome, Italy.
- ⑯ Kimikazu Sasa, Cosmogenic nuclide ^{36}Cl measurements in the Dome Fuji ice core, Antarctica, The 11th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, September 14-19, 2008, Rome, Italy.
- ⑰ Takahiro Aze, Preliminary results of Be-10 and Cl-36 analysis during 35-45 kyr BP at the Dome Fuji ice core, Antarctica, The 11th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, September 14-19, 2008, Rome, Italy.
- ⑱ Tomoko Uchida, Determination of Be-10 in several-gram-ice samples from Dome Fuji ice cores, The 11th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, September 14-19, 2008, Rome, Italy.
- ⑲ Tomoko Uchida, Be-10 Variation in Dome Fuji Ice Core During the Last Deglaciation, The 11th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, September 14-19, 2008, Rome, Italy.
- ⑳ Kazuho Horiuchi, Fluctuations of cosmogenic nuclides during the first millennium of the Holocene epoch, The 11th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, September 14-19, 2008, Rome, Italy.
- 21 Kimikazu Sasa, Multi-nuclide AMS system at the University of Tsukuba (invited), 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, November 9 - 13, 2009, Tsukuba, Japan.
- 22 Kimikazu Sasa, Progress of an accelerator mass spectrometry system at the Tsukuba 12UD Pelletron tandem accelerator, The 11th edition of the International Conference "Heavy Ion Accelerator Technology - HIAT", June 8-12, 2009, Venice, Italy.
- 23 Kimikazu Sasa, Application of Cl-36 AMS to geo-environmental sciences at the University of Tsukuba, 3rd East Asian Symposium on Accelerator Mass Spectrometry (EA-AMS-3), October 19-22, 2009, Xi'ai, China.
- 24 Kimikazu Sasa, Cosmogenic ^{36}Cl record in an ice core at the Dome Fuji station, Antarctica from the Last Glacial Maximum to Holocene, The 2nd International Symposium on the Dome Fuji ice core and related topics, National Institute of Polar Research, November 18-20, 2009, Tachikawa, Japan.
- 25 Kazuho Horiuchi, Cosmogenic beryllium-10 in the Dome Fuji ice core, The 2nd International Symposium on the Dome Fuji ice core and related topics, National Institute of Polar Research, November 18-20, 2009, Tachikawa, Japan.
- 26 Tomoko Uchida, ^{10}Be variations during the last deglaciation in the Dome Fuji ice core, The 2nd International Symposium on the Dome Fuji ice core and related topics, National Institute of Polar Research, November 18-20, 2009, Tachikawa, Japan.
- 27 Hiroko Miyahara, Solar irradiance during the last 1300 years reconstructed from beryllium-10 content in the Dome Fuji ice core, The 2nd International Symposium on the Dome Fuji ice core and related topics, National Institute of Polar Research, November 18-20, 2009, Tachikawa, Japan.
- 28 Takahiro Aze, Cosmogenic Be-10 and Al-26 during the Laschamp geomagnetic excursion in the Dome Fuji ice core, The 2nd International Symposium on the Dome Fuji ice core and related topics, National Institute of Polar Research, November 18-20, 2009, Tachikawa, Japan.
- 29 Hideaki Motoyama, "Characteristics of basal ice and chemical constituents at Dome Fuji, Antarctica, European Geosciences Union General Assembly 2009, April 19-24, 2009, Vienna, Austria.
- 30 Hideaki Motoyama, Study of ice flow observations in Shirase drainage basin and around Dome Fuji area, East Antarctica by differential GPS method,

PAGES 3rd Open Science Meeting (OSM) "Retrospective views on our planet's future", July 8-11, 2009, Oregon State University in Corvallis, USA.

31 Hideki Motoyama, Study of ice flow observations in Shirase drainage basin and around Dome Fuji area, East Antarctica by differential GPS method, PAGES 3rd Open Science Meeting (OSM) "Retrospective views on our planet's future", July 8-11, 2009, Oregon State University in Corvallis, USA

32 Hideaki Motoyama, "Study of glacial-interglacial cycle and the present and future global environmental change, AOGS2009 (Asia Oceania Geosciences Society), August 11-15, 2009, Singapore

33 Hideaki Motoyama, Overview of the second deep ice coring project at Dome Fuji, East Antarctica and the paleoenvironmental record during the last seven glacial periods, The 2nd International Symposium on the Dome Fuji ice core and related topics, National Institute of Polar Research, November 18-20, 2009, Tachikawa, Japan.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松崎 浩之 (MATSUZAKI HIROYUKI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号 : 60313194

(2) 研究分担者

横山 祐典 (YOKOYAMA YUSUKE)

東京大学・海洋研究所・准教授

研究者番号 : 10359648

笹 公和 (SASA KIMIKAZU)

筑波大学・数理物質科学研究科・講師

研究者番号 : 20312796

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

村松 康行 (MURAMATSU YASYUYUKI)

学習院大学・理学部・教授

研究者番号 : 70166304

柴田 康行 (SHIBATA YASUYUKI)

国立環境研究所・化学環境領域・領域長

研究者番号 : 80154251

本山 秀明 (MOTOYAMA HIDEAKI)

国立極地研究所・教育研究系・教授

研究者番号 : 20210099

(3) 連携研究者

長島 泰夫 (NAGASHIMA YASUO)

筑波大学・名誉教授

研究者番号 : 60090914