

平成21年 5月20日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18340153  
 研究課題名（和文） ベリリウム10と炭素14を用いた最終退氷期の太陽活動変遷史に関する研究  
 研究課題名（英文） Studies on the history of solar-activity changes during the last deglaciation using cosmogenic nuclides  $^{10}\text{Be}$  and  $^{14}\text{C}$   
 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：年縞堆積物中のベリリウム10を分析し、同一の堆積物から得られた既存の炭素14記録や、本研究にて新たに分析されたアイスコアのベリリウム10記録と比較することで、最終退氷期の太陽活動変動曲線を抽出することに成功した。その結果、太陽活動は退氷期の古気候変動を支配するものではないが、気候変動イベントのトリガーには成り得ることが分かった。また、古木から単年分解能で効率的に炭素14を分析する手法や、年縞堆積物から単年分解能でベリリウム10を分析する手法が確立された。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2007年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2008年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：地質学、地球化学、気候変動、宇宙線、太陽物理学

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙線生成核種ベリリウム10と炭素14は、大気中で宇宙線と大気との相互作用により生成される。大気に到達する宇宙線の強度は、太陽活動に伴う太陽磁場強度に支配されていることにより、大気中でのこれらの核種の生成率は太陽活動の変動をよく反映する。

大気にて生成後のベリリウム10は、降水などと共に地表に落下し、最終的に堆積記録中に保存される。一方で炭素14は、大気-海洋間の炭素大循環の影響を受けながら植物遺体に閉じこめられる。従って双方には、太

陽活動変動以外の要素として、地域的降水変動（ベリリウム10）や海洋変動（炭素14）の影響も刻まれることになる。しかし、地域的降水変動と海洋変動が、同時に同方向に双方の核種の量を変動させることは難しい。このことから、ベリリウム10と炭素14の双方に共通する変動を太陽活動変動とみなすことができる<sup>(注1)</sup>。

こうした研究は、これまで後氷期（1万2千年前以降）を対象に、アイスコアのベリリウム10と年輪中の炭素14を用いて行われてきた。しかし、時代を遡るにつれ、双方の年

年代尺度の食い違いが拡大することが指摘されている。最終退氷期（ほぼ1万～2万年前）についても、ベリリウム10記録と炭素14記録が、それぞれ氷床コアと堆積物（+珊瑚化石）から得られている。しかし当然のことながら、双方の記録には無視できない年代の食い違いが存在し得る。

そこで申請者らは、ベリリウム10と炭素14を同一記録から得ることが出来る年縞堆積物に注目した。すなわち、年縞堆積物中のベリリウム10を分析し、これから別途得られた炭素14記録との比較を行うことで、この年代尺度の違いによる問題を解決することを試みた。さらに本研究では、単年分解能のベリリウム10記録と炭素14記録を、それぞれ年縞堆積物と古木年輪試料から高精度で得る技術を確立することをも目指す。これらは近い将来、高時間分解能の太陽活動変動記録を得るために、重要な貢献となると期待できる。

注1) 宇宙線生成核種の生成率を支配する要因には地球磁場強度変動も挙げられるが、これは数千年のオーダーで生成率を変動させると考えられるため、本申請研究の時間スケールではあくまで副次的要因に留まると予想される。

## 2. 研究の目的

本研究では、過去の太陽活動の指標として、宇宙線生成核種ベリリウム10と炭素14をペアで用いることにより、最終退氷期の太陽活動変遷史を明らかにすることを目指した。

申請期間では、以下の事項に特に焦点を絞って研究を行った。

- (1) 最終退氷期の年縞堆積物中のベリリウム10変動を数十年間隔で分析
- (2) これを数十年間隔の炭素14記録と「同時期面」で比較
- (3) (2)により双方の核種に共通の変動要素-つまり太陽活動変動曲線-を抽出
- (4) 高時間分解能のベリリウム10記録と炭素14記録を年縞・古木年輪より得る手法の確立

## 3. 研究の方法

最終退氷期の年縞堆積物には、福井県の水月湖にて掘削されたSGコアの年縞堆積物を用いた。この年縞堆積物からは、既に数十年間隔での炭素14記録が公表されている (Kitagawa and van der Plicht, 1998, 2000)。また年輪試料には、約1万5千年前に噴出した十和田八戸テフラに埋積された「十和田八戸埋没林」より、数本の立木の試料を採取して用いた。なお、研究の進展に伴い、新たに

行われたアイスコアのベリリウム10分析(後述)では、南極ドームふじアイスコアが用いられた。

ベリリウム10分析の前処理は弘前大学にて行われた。ベリリウム10の定量は東京大学にて加速器質量分析法によりなされた。炭素14の前処理は主に国立環境研究所と東北大にて行われた。炭素14の定量は国立環境研究所にて加速器質量分析法によりなされた。さらに、本研究にて弘前大学に炭素14前処理ラインが導入されたことにより、このラインの立ち上げ実験に加えて、炭素14分析の前処理の一部を弘前大学でも行った。また、国立環境研究所にて分析しきれなかった炭素試料を、日本原子力研究開発機構のタンデロン加速器を利用して分析した。

## 4. 研究成果

(1) 水月湖の年縞堆積物について、最終退氷期に相当する1万1千年前から1万5千年前を対象に、加速器質量分析法にて数10年分解能でのベリリウム10分析を行い、本研究の基盤となる貴重なデータを得た。これは、退氷期の高時間分解能のベリリウム10記録を堆積物から得た、世界初の成果になる。

(2) 水月湖の年縞堆積物のベリリウム10分析の結果を、同堆積物から既に得られている炭素14記録と比較した。その結果、双方に大まかな変動の類似性が認められた。このことは、双方の記録間の比較により、その共通項を太陽活動変動曲線として抽出できることを、データからも裏付けるものである。しかし、大まかな傾向以外の短周期の変動は、必ずしも一致しなかった。水月湖年縞堆積物のベリリウム10には、炭素14とは異なり、分析された期間を通じて、短周期の大きな変動が顕著に認められた。こうした変動が、水月湖での地域的な降水変動または堆積変動によるのか、あるいは太陽活動変動に由来したベリリウム10本来の生成率の変動によるのかを解明するためには、別のベリリウム10記録が必要となる。

(3) 水月湖年縞堆積物のベリリウム10記録の正当性を裏付けるために、独立した記録として、ドームふじアイスコアから退氷期のベリリウム10記録を得ることを試みた。その手始めとして、様々な記録に基づいて良く知られている過去1000年間の顕著な太陽活動変動を、ドームふじアイスコアにて確実に検出できるかどうかを検討した。その結果、ドームふじアイスコアのベリリウム10記録には、降水等の地域的な影響がほとんど現れずに、生成率の情報が確実に残されていることが判明した。次に、太陽活動変動を抽出する

際に妨害となる降水や堆積等の地域的効果を評価するために、最終退氷期におけるドームふじアイスコアのベリリウム 10 分析を行い、これを基準として水月湖年縞堆積物のベリリウム 10 記録を評価した。双方の記録には、大まかな変動だけでなく、詳細な（数百年スケールの）変動にもかなりの類似が認められた。このことは、最終退氷期の炭素 14 の生成率変動が、数百年スケールでは、全球炭素循環の効果によってかなり消されている可能性を示唆する。また、独立に構築された年縞堆積物とアイスコアの年代モデル間には、数十年以上の時間の食い違いは存在しないことも示す。一方で、ドームふじアイスコアと水月湖年縞堆積物にも、いくつかの細かいベリリウム 10 変動の不一致が認められた。こうした不一致は、ベリリウム 10 の降下・堆積過程に関する地域効果で説明できる。本研究により、世界で初めて高緯度と中緯度でのベリリウム 10 変動を比較することができた。今後は、全ての記録をスタック化するなどして、地域や核種間の違いを相殺し、より確かな太陽活動変動曲線標準を構築することが期待できる。

(4) 本研究にて明らかになった 1 万 1 千年前から 1 万 5 千年前の太陽活動変動（水月湖年縞堆積物とドームふじアイスコアのベリリウム 10 曲線で相互に一致した変動）は、以下の特徴を示す。

- ① 時間の経過に伴う一方向の変動傾向は見られない。
- ② 太陽活動の静穏期は、大まかに 1 万 5 千年前付近と 1 万 2 千 8 百年前付近及び 1 万 1 千 2 百年前付近に見られる。
- ③ 太陽活動の活発期は、大まかに 1 万 4 千 4 百年前付近と 1 万 2 千年前付近及び 1 万 1 千年前付近に見られる。
- ④ 上記の大まかな変動に加えて、数百年スケールの周期的な変動が認められる。

退氷期の様々な古気候記録と照らし合わせると、こうした特徴は、太陽活動変動が少なくとも退氷期の古気候変動を支配する要因ではないことを示唆する。一方で、気候変動イベントのトリガーとしての可能性は残される。今後の詳細な解析により、この時代の太陽活動と気候変動との細かい関係が明らかにされると期待できる。

(5) 高時間分解能のベリリウム 10 記録を年縞堆積物から得る手法を確立するために、通常は 200～300 mg 用いられる試料量を、10 mg まで減らした場合の分析法を開発した。これにより、試料量の軽減と実験時間の短縮が実現した。これは近い将来、年縞堆積物を対象に、単年分解能での多数試料分析が可能となることを意味する成果である。

(6) 1 万年以上前の古木年輪を対象とした単年輪毎の高時間分解能炭素 14 分析へ向けて、複数の試料処理法を比較検討した。その結果、脱リグニン処理とセルロース処理の組み合わせが最適なことが分かった。次に、実試料の炭素 14 分析を行った。これには、1 万 5 千年前に噴出した十和田八戸テフラ直下の埋没林から採取された状態の良い 2 本の古木を、主に用いた。まずは、40 年輪ごとに 4～5% の精度での炭素 14 分析を行った結果、太陽活動変動に由来すると解釈できる双方で一致した変動を見出すことができた。また Intcal 標準曲線との比較により、これらの古木の死亡年代が、1 万 5 千 5 百年前である可能性が最も高いことも明らかになった。続いて、2 本の古木を網羅する約 160 年輪分の炭素 14 連続記録を、単年輪分解能にて得ることに成功した。得られた炭素 14 変動曲線には、太陽活動に由来すると考えられる 10 年スケールの変動が認められた。これに対して、最大エントロピー法やウエーブレット法により周期解析を行った結果、太陽活動の Schwabe cycle に相当する約 9 年の変動周期と Hale cycle に相当する約 18 年の変動周期が検出された。これらは現在の太陽活動変動周期と比べて若干短いものであり、退氷期の太陽活動変動を解明するための重要な基礎情報となる。さらに、同じ埋没林から新たに採取された古木の年輪年代学的分析により、2 本の古木と同時に死亡したより年輪数の多い（368 年輪）古木が分析に使用できることが分かった。よって、今後さらに 200 年以上を遡って、単年輪分解能の炭素 14 記録を拡張することが期待できる。

(7) 炭素 14 分析試料前処理用の気体精製ラインを弘前大学に購入・設置し、各種標準試料を利用して、立ち上げ実験を行った。その結果、精度は多少ばらつくものの、確度の高い分析値を得ることができ、装置の立ち上げに無事成功した。その後、これを用いた実際の試料前処理を開始するとともに、弘前大学と地理的的近傍にある日本原子力研究開発機構（むつ市）のタンデム加速器により、上記古木試料に関する炭素 14 分析の一部を行うことができた。

## 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 10 件）

- ① 堀内一穂・鬼柳いつみ・和佐田博史・岸山碧・松崎浩之・箕浦幸治、堆積物アーカイブを対象にした宇宙線生成核種分析の

- 新展開. 2008 年度 MALT 共同利用研究報告, 査読無し, 印刷中.
- ② 堀内一穂・松崎浩之・横山俊一・小林大平・内田智子・本山秀明, ドームふじアイスコア深層部の  $^{10}\text{Be}$ . 2008 年度 MALT 共同利用研究報告, 査読無し, 印刷中.
- ③ Ilya G. Usoskin, Kazuho Horiuchi, Sami Solanki, Gennady A. Kovaltsov, Edouard Bard, On the common solar signal in different cosmogenic isotope data sets. *Journal of Geophysical Research*, 査読有り, 114, 2009, A03112, doi:10.1029/2008JA013888.
- ④ 堀内一穂, 加速器質量分析計を用いて宇宙線と地球環境の変動史を探る. 放射線と産業, 査読無し, 118, 2008, 33-38.
- ⑤ Kazuho Horiuchi, Tomoko Uchida, Yuko Sakamoto, Aoi Ohta, Hiroyuki Matsuzaki, Yasuvuki Shibata, and Hideaki Motoyama, Ice core record of  $^{10}\text{Be}$  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*, 査読有り, 3, 2008, 253-261.
- ⑥ Horiuchi, K., A. Ohta, T. Uchida, H. Matsuzaki, Y. Shibata, H. Motoyama, Concentration of  $^{10}\text{Be}$  in an ice core from the Dome Fuji station, Eastern Antarctica: preliminary results from 1500-1810 yr AD. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 査読有り, 259, 2007, 584-587.
- ⑦ Horiuchi, K., S. Sonoda, H. Matsuzaki, M. Ohyama, 2007, Radiocarbon analysis of tree rings from a 15.5 cal kyr BP pyroclastically buried forest: a pilot study. *Radiocarbon*, 査読有り, 49, Nr 2, 2007, 1123-1132.
- ⑧ H. Matsuzaki, C. Nakano, Y. S. Tsuchiya, K. Kato, Y. Maejima, Y. Miyairi, S. Wakasa, T. Aze, Multi-nuclides AMS performances at MALT, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 査読有り, 259, 2007, 36-40.
- ⑨ Motonari Ohyama, Megumi Ohwada, Mitsuo Suzuki, Chronology development of Hiba arbor-vitae (*Thujaopsis dolabrata* var. *hondae*) and dating of timbers from an old building, *Journal of Wood Science*, 査読有り, 53, 2007, 367-373.
- ⑩ 藤井昭二・奈良正義・畑中盛・山口吾一郎・竹内貞子・吉田明弘・能城修一・鈴木三男・邑本順亮・堀内一穂・奈須紀幸, 下北半島周辺の海底林. *地球科学*, 査読有り, 60, 2006, 375-388.
- [学会発表] (計 5 件)
- ① 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.
- ② Koji Minoura, Radiocarbon analysis of single-year tree rings at the last glacial-deglacial transition. The 11th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, September, 14-19, 2008 Rome.
- ③ Tomoko Uchida, Be-10 variations in Dome Fuji ice core during the last deglaciation. The 11th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, September, 14-19, 2008 Rome.
- ④ 堀内一穂, 地球表層試料を対象にした  $^{10}\text{Be}$  と  $^{26}\text{Al}$  の高感度分析. 第 10 回 AMS シンポジウム, 東京大学大学院工学系研究科 武田ホール, 2008 年 3 月 8 日.
- ⑤ 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, 幕張メッセ, 2007 年 5 月 22 日.
- [図書] (計 1 件)
- ① 堀内一穂, 2008, 宇宙線生成核種による年代測定: (日本第四紀学会 50 周年電子出版編集委員会編) デジタルブック最新第四紀学, 第四紀学会, 印刷中.
- [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

柴田 康行 (SHIBATA YASUYUKI)  
国立環境研究所・化学環境研究領域・領域長  
研究者番号：80154251

米田 穰 (YONEDA MINORU)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授  
研究者番号：30280712

大山 幹成 (OHYAMA MOTONARI)  
東北大学・学術資源研究公開センター・助教  
研究者番号：00361064

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

(2008年度より連携研究者に変更)

箕浦 幸治 (MINOURA KOJI)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：10133852

(2008年度より連携研究者に変更)