

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 10 日現在

機関番号：11501

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14728

研究課題名(和文)高精度炭素14測定法の開発による宇宙線異常増加現象の研究

研究課題名(英文) Research on cosmic ray anomalies by developing high-precision carbon-14 measurement method

研究代表者

森谷 透 (Moriya, Toru)

山形大学・理学部・助手

研究者番号：40732392

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、山形大学に導入した加速器質量分析装置(AMS)を用いて、古木1年輪毎の¹⁴C濃度を高精度に測定し、過去の宇宙線強度変動及び太陽活動の周期依存性を調べることを目的とした。

青森県下北半島で発見された下北埋没木(樹種：アスナロ、年輪年代：西暦1329-1450年)について、年輪中の¹⁴C濃度を正確に評価するため化学的に安定なセルロースを抽出し、西暦1368-1420年の53年輪を1年輪毎に¹⁴C濃度を測定した。その結果、シュペラー極小期が始まる2サイクル前から11年周期が伸びていることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、加速器質量分析装置(AMS)を用いた樹木単年輪中に含まれる¹⁴C濃度の高感度測定から、太陽活動が極端に低下した極小期と呼ばれる時期が度々存在していたことが明らかになってきた。17世紀に発生したマウンダー極小期では、地球環境にも多大な影響を及ぼしたことが知られているが、極小期発生の詳しいメカニズムはわかっていない。そのため、過去に発生した極小期の発生プロセスやその共通点を探り、太陽活動低下のメカニズムを明らかにする必要がある。

本研究の結果はマウンダー極小期についての先行研究と同じ傾向を示しており、今後の極小期発生の予測において太陽活動の11年周期の伸びが手がかりを与えるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigate the past cosmic ray anomalies and the variation of the length of solar cycles by measuring the ¹⁴C content in the annual ring with high accuracy using the Accelerator Mass Spectrometer (AMS) introduced at Yamagata University (YU).

We used asunaro (*Thujaopsis dolabrata*) samples that were excavated in the Shimokita Peninsula, Aomori Prefecture, and dated by dendrochronology. In this study, the 53 annual rings, corresponding to 1368 -1420 CE, were measured for the ¹⁴C content. To obtain an accurate ¹⁴C content in the annual rings, alpha-cellulose was extracted from each tree ring. Then, we investigated the detailed variation of the Schwabe cycle by measuring the ¹⁴C content using the YU-AMS system. We found that at least two preceding solar cycles were lengthened by several years before the onset of the Spörer Minimum.

研究分野：宇宙原子核物理学

キーワード：放射性炭素年代測定 加速器質量分析 炭素14 太陽活動の11年周期 突発的宇宙線急増現象

1. 研究開始当初の背景

銀河系から地球に飛来する宇宙線のうち数十 GeV 以下のエネルギーのものは太陽圏内において太陽磁場の変調を受ける。そのため地球における宇宙線強度の変動には、太陽活動の基本周期である 11 年周期のほか、太陽圏磁場の大規模構造の変化が反映される。そのほか、太陽フレアや超新星爆発等の高エネルギー現象でも、突発的な宇宙線強度の増加が生じる (図 1)。

近年、樹木年輪中の ^{14}C 濃度の 1 年値での分析から、西暦 775 年と 994 年の突発的な宇宙線増加現象が名古屋大学の三宅准教授により発見され(図 2 左、以下「 ^{14}C スパイク」という。)、その成因が大きな議論を巻き起こしている。 ^{14}C は、宇宙線によって大気中で生成され、二酸化炭素として光合成により樹木に吸収される。従って、樹木年輪中の ^{14}C の濃度は、その年輪が形成された年の宇宙線強度変動を反映する。 ^{14}C スパイクの成因として、巨大太陽フレアによる高エネルギー陽子の放出や、超新星残骸、線バースト等の可能性が議論されたが、天体現象を示唆する証拠が無いため、現時点では太陽フレアが有力視されている。

もし太陽フレアによるものであるとすれば、それは 1600 年以降の観測史上最大のフレアで世界的に多大な影響を及ぼした 1859 年のキャリントンフレアの数から数十倍規模に相当する。しかし、(1) 南極氷床中の硝酸濃度にも増加が見られるべきところが検出されていない、(2) より小規模のピークが多数見つかるべきところが発見されていない、といった問題点があり、 ^{14}C スパイクの成因は未解明である。一方、太陽圏環境の変化によっても、単年スケールの突発的な宇宙線異常増加イベントが発生することが、17 世紀の太陽活動のマウンダー極小期 (図 2 右) の ^{14}C データから発見された(H. Miyahara et al., Solar Physics, 224, 2004, 317-322; H. Miyahara et al., Journal of Cosmology, 8, 2010, 1970-1982)。極小期は地球環境にも多大な影響を及ぼしたことが知られており、そのメカニズム解明の観点からも、太陽活動と宇宙線変動の解明が急務となっている。



図 1. 宇宙線強度変動の要因の概念図

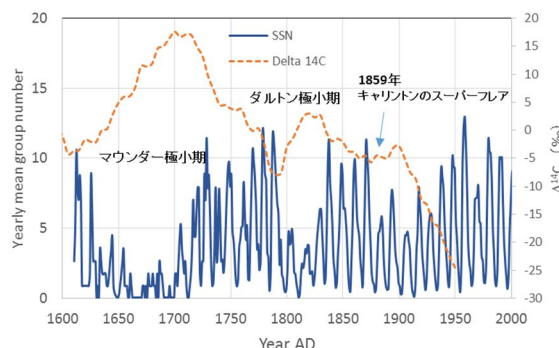
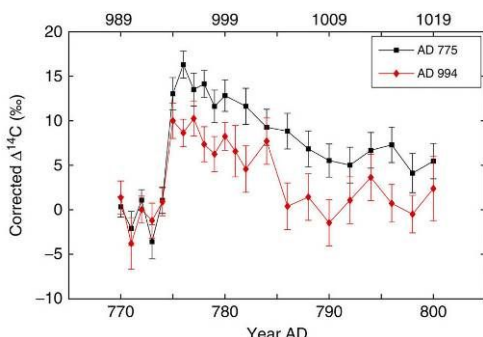


図 2. 三宅が Nature 論文 2 編で発表した西暦 775 年と 994 年の ^{14}C スパイク (左) と過去 400 年の太陽黒点数の変化 (実線) と ^{14}C 濃度 (破線) (右)

2. 研究の目的

^{14}C スパイク (^{14}C 濃度にして 1.3% 増) の成因が超巨大太陽フレアである場合、より小規模なイベントが過去の 1 年輪毎の試料から多数発見されるはずである。例えば、1/10 規模のものはおよそ 10 倍の頻度で発生しているはずである(K. Shibata et al., Publ. Astron. Soc. Japan, 65, 49, 2013)。しかし、現時点の加速器質量分析計 (AMS) の精度は、世界的には 0.3~0.5% が標準であり、ピークの強度、頻度等を系統的に解析し、成因を明らかにすることが困難である。また、太陽圏の磁場構造の変化にともなう突発的な宇宙線増加も、 ^{14}C 濃度にして 0.4% 程度の増加であるため、より高精度での分析が必要不可欠である。本研究では、上記 2 つの宇宙線増加現象の探索およびメカニズムの解明に向けて、山形大学が国内で唯一有するダブルイオン源最新型加速器質量分析 (YU-AMS) システム (図 3) の高精度化 (0.2%) を進め、 ^{14}C 濃度分析の超高精度化の研究開発を行う。そして、我々が保有する過去約 3000 年間の日本産年輪試料を用いて、突発的な宇宙線急増現象のイベント探索を行う。この探索に伴い強度、頻度、時定数、太陽周期依存性とそれらの関連性を調べることでその成因の解明が期待できる。また、太陽圏大規模構造の変化にともなう宇宙線異常増加イベントの探索も併せて行う。

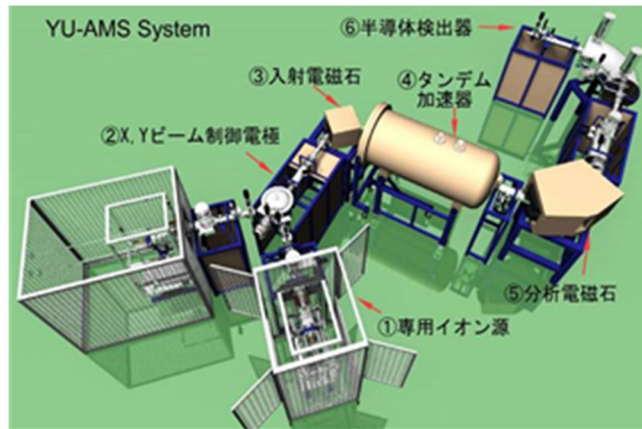


図 3 . 山形大学が国内で唯一有するダブルイオン源型コンパクト加速器質量分析システム(YU-AMS システム)

3 . 研究の方法

本研究で行った年輪試料を用いた AMS 測定の工程を以下に示す。

- (1) 年輪毎に剥離する。
- (2) 塩酸(Acid) 水酸化ナトリウム(Alkali) 塩酸(Acid)による AAA 処理により, 不純物を取り除く。
- (3) 塩素漂白と濃アルカリ処理によって β -セルロースを抽出する。
- (4) β -セルロース抽出後の試料は、元素分析装置で燃焼し、専用ガラスラインでその二酸化炭素を自動回収した後、鉄を触媒とした水素還元反応($\text{CO}_2 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2\text{O}$)によってグラファイトに精製され、専用カソードに装填する。
- (5) 同様に、 ^{14}C 濃度の分かった標準試料や ^{14}C 濃度がほぼ 0 のバックグラウンド試料もグラファイトに精製され、専用カソードにそれぞれ装填する。
- (6) AMS 測定専用の回転ホイールにカソードをセットし、AMS イオン源(図 3-)から発せられたセシウムによりイオン化され炭素ビームとして次段のシステムに導かれる。

ホイールは 1 回 5 分程度の ^{14}C 濃度分析の後、次の試料に向けて自動回転し、連続的にグラファイト試料の ^{14}C 濃度分析が行われる。一般的な AMS 分析の場合、1 試料当たり 8 から 10 回の測定が行われる。本研究では 0.1%の統計精度を、1) 年輪試料を 1 ホイールにつき $n=3$ から 4 で装填し、2) それぞれの試料を 14 から 20 回測定することで達成する。

4 . 研究成果

本研究では、過去 1,000 年間に発生した極小期の中でも最大規模のシュペラー極小期に着目し、青森県猿ヶ森砂丘で出土した年輪年代が 1270 年から 1450 年と判明したアスナロ埋没木 (*Thujaopsis dolabrata*) のうち、1368 年から 1420 年の 53 年輪分を用いた。図 4 にアスナロ埋没木試料(AOSR-028)を示す。

図 5-a)に本研究で得られたアスナロ埋没木試料の ^{14}C 値と、その年代範囲において北半球の樹木試料を用いて得られた国際較正曲線 IntCal13、および南半球の樹木試料を用いて得られた国際較正曲線 SHCal13 (Reimer et al., Radiocarbon, 55, 2013, 1869-1887) のデータをそれぞれ示す。アスナロ埋没木試料の ^{14}C 値は 1375 年ごろまで徐々に減少し、そこから緩やかに増加する長期時間依存性が見られ、IntCal13 や SHCal13 においても同様の長期時間依存性が確認できた。そこで、アスナロ埋没木試料の ^{14}C 値の長期時間依存性を、4 次関数の多項式近似を用いて評価した。図 5-a)に 4 次関数の多項式近似で得られた ^{14}C 値の長期時間依存性を示す。そして、図 5-b)に得られた長期時間依存性を差し引いた ^{14}C 値に対して求めた ^{14}C 値のピーク値の年代とその周期長を示す。長期時間依存性を差し引いた ^{14}C 値のピーク値の年代は 1371 年、1380 年、1394 年、1410 年であった。また、得られた周期長は 9 年、14 年、16 年であり、シュペラー極小期開始の 2 サイクル前から太陽活動の 11 年周期が有意に延びていたことがわかった。本研究の結果から、シュペラーやマウンダー極小期といった数十年以上にわたり太陽活動が大きく低下した極小期では、極小期開始の 30 年以上前から



図 4 . 本研究で用いたアスナロ埋没木試料 (AOSR-028) の写真。

ら太陽活動の11年周期が優位に延びていたことが示された。

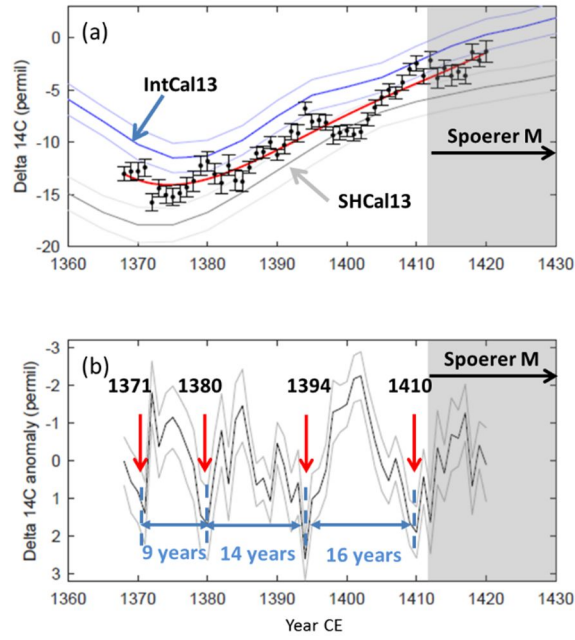


図5 .a)本研究で得られたアスナロ埋没木試料の ^{14}C 値(黒点)と4次の多項式近似を用いて得られた ^{14}C 値の長期時間依存性(赤)。北半球の樹木試料を用いて得られた国際校正曲線 IntCal13 の1 σ の範囲(青)と南半球の樹木試料を用いて得られた国際校正曲線 SHCal13 の1 σ の範囲(グレー) および灰色の網掛け領域はシュペーラー極小期の範囲(1416年から1534年)。b) 長期時間依存性を ^{14}C 値から差し引き得られた ^{14}C 値のピーク値の年代とその周期長。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

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 ¹⁴ C 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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 武山 美麗, 森谷 透, 櫻井 敬久, 宮原 ひろ子, 大山 幹成, 斉藤 久子, 岡田 靖, 門叶 冬樹
2. 発表標題 ・発表表題 山形大学に導入した高感度加速器質量分析報告 IV
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武山 美麗, 森谷 透, 櫻井 敬久, 宮原 ひろ子, 大山 幹成, 斉藤 久子, 岡田 靖, 門叶 冬樹
2. 発表標題 山形大学に導入した高感度加速器質量分析報告 II
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森谷 透, 武山 美麗, 櫻井 敬久, 宮原 ひろ子, 大山 幹成, 斉藤 久子, 岡田 靖, 門叶 冬樹
2. 発表標題 山形大学における高感度加速器質量分析装置を用いた応用研究
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武山 美麗, 森谷 透, 櫻井 敬久, 宮原 ひろ子, 大山 幹成, 斉藤 久子, 岡田 靖, 門叶 冬樹
2. 発表標題 山形大学に導入した高感度加速器質量分析報告 III
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toru Moriya, Mirei Takeyama, Hirohisa Sakurai, Hiroko Miyahara, Motonari Ohyama, Hisako Saitoh, Yasushi Okada, Fuyuki Tokanai
2. 発表標題 Research and performance with YU-AMS system
3. 学会等名 EA-AMS-8
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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