

## 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 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22340144

研究課題名（和文）

放射性炭素測定による過去の太陽活動の周期性及び地球環境との関係の解明

研究課題名（英文）

Understanding of the periodicity of the past solar activity by radiocarbon measurements and the relation to the global environment

研究代表者

増田 公明 (MASUDA KIMIYAKI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号：40173744

研究成果の概要（和文）： 過去3千年の樹木年輪中の放射性炭素濃度を測定し、過去の宇宙線強度及び太陽活動の変化について考察した。太陽活動の特徴的な期間である大極小期(grand solar minima)において、太陽のシュワーベ・サイクルの周期長が現代のような11年ではなく、13～16年に伸びていたことを発見した。また西暦775年と993年に放射性炭素濃度が急激に増加したことを発見し、太陽表面で大規模フレアが発生し大量の粒子が地球環境へ到達したことを示唆した。これらの結果は太陽活動のダイナモ・メカニズムの解明とその地球への影響の理解に大きく貢献するものである。

研究成果の概要（英文）： We have measured the radiocarbon concentration in tree rings from the past 3,000 years and discussed the variation of cosmic-ray intensity and solar activity in the past. We found the increase of the Schwabe cycle lengths from the modern value of 11 years to 13-16 years during grand solar minima, which are characteristic periods of solar activity change. We also discovered the rapid increase of radiocarbon concentration at AD775 and AD993. These events indicate that extremely large solar flares occurred at the solar surface in these years and a lot of solar high-energy particles arrived at the global environment. These results largely contribute to solve the dynamo mechanism of solar activity and the understanding of its influence to the Earth.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2011年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2012年度	2,700,000	810,000	3,510,000
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：太陽地球システム, 宇宙天気, 太陽物理学, 地球変動予測, 宇宙線, 放射性炭素, 加速器質量分析計

## 1. 研究開始当初の背景

太陽活動は、ダイナモ機構によってつくられる磁場強度に関する平均11年の周期(シュワーベ・サイクル)で変化している。この11

年周期は太陽黒点数の変化によく現れており、また最近では人工衛星による精密観測から太陽全放射(太陽定数)も11年周期で変化することが明らかにされている。しかしこれ

らの周期長は一定ではなく、黒点観測データのある過去350年では9-13年程度の幅があり、その周期長が太陽活動の強さと関係があるという考えもある。太陽は地球システムに対する唯一の外部エネルギー源であり、太陽活動の変動は地球の気候にも何らかの変化を与えると考えられ、最近の地球温暖化の議論とも関連して、将来の太陽がどのように変化するかは多くの関心を集めている。未来の太陽を予測するためにも、過去において太陽活動の強度やその周期がどのように変化してきたかを明らかにする必要がある。

過去の太陽活動に関する信頼できるデータは、1950年代以降に太陽電波、X線等の地上及び衛星からの観測が行われるまでは、西暦1610年以降の望遠鏡による黒点の観測、19世紀以降の地磁気変動の観測しかない。西暦1600年以前の太陽活動の強弱は、裸眼による黒点観測の記録やオーロラ出現頻度によってある程度知ることができるが、定量的には炭素14のような大気中の宇宙線生成核種の濃度によってのみ知ることができる。炭素14濃度が高い時は、地球へ到来する宇宙線強度が大きく、太陽活動が弱かったものと解釈される。過去の観測記録や炭素14濃度測定から、太陽活動は11年周期や太陽磁場極性の反転を考慮した22年周期のほかに、100-200年程度のスケールで変化してきたことがわかっている。西暦1645年-1715年には黒点がほとんど現れず太陽活動が極端に低下していたことが知られている(マウンダー極小期)。それ以前にも西暦1500年頃、1300年頃に炭素14濃度が高い太陽活動の極小期と考えられる時期がある(シュペラー極小期、ウォルフ極小期)。しかしこれまでの炭素14濃度の測定のほとんどは、樹木の年輪10年又は20年分をまとめて測定したもので、時間分解能が悪く、数十年以上の長期的な変動しか見ることができなかつた。太陽活動の11年/22年周期を調べるためには、樹木年輪中の炭素14濃度を1-2年の時間分解能で精度よく調べる必要がある。このような高時間分解能による炭素14濃度の測定はほとんどなく、本研究代表者のグループによるもの以外では西暦1510年以降のStuiverら及び西暦998-1025年のDamonらのみであり、しかも太陽活動11年/22年周期にはほとんど言及していない。

本研究代表者のグループは、樹木年輪中の炭素14濃度の変動を1-2年という高時間分解能で測定することにより、太陽活動に起因する11年周期を検出することを試みてきた。これまでに、顕著な太陽活動極小期であるマウンダー極小期やシュペラー極小期についてシュワーベ・サイクルを測定し、これらのサイクルによる炭素14濃度の変動を検出した。これは黒点が消失する太陽活動極小期

であっても太陽の活動が止まっているわけではないことを炭素14によって初めて証明したものである。さらに現在の太陽では平均11年であるこれらの周期が、マウンダー極小期では14年であったことを見出した。このことは、太陽活動が弱いときにはダイナモ機構によるシュワーベ・サイクルの周期長が長くなることを示唆している。一方、シュペラー極小期における周期長はほぼ11年で、マウンダー極小期のような周期長の顕著な伸長は見られなかったが、極小期の直前の周期の伸びが報告されている。マウンダー極小期とシュペラー極小期はその継続時間が違い、極小期としての特性が異なる可能性がある。このような太陽活動極小期と周期長の関係を多くの事例でさらに詳しく調べ、極小期による違いの原因を探る必要があるとともに極小期でない年代についても検証が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究は、過去三千年の太陽活動の周期性、特に11年周期のシュワーベ・サイクルの変遷を解明することを目的とする。特に17世紀に起こったマウンダー極小期のような数十年間継続する太陽活動極小期における周期長の伸長が普遍的に生じていたのかどうか、極小期以外の通常期や活発期ではどうだったのかを、宇宙線起源の大気中炭素14の高時間分解能測定により明らかにする。その結果から太陽活動変動の全体像を理解するとともに、太陽活動の周期性や地球近傍の宇宙空間における突発事象と地球気候の関係を調べる。そして今後起こりうる太陽活動の変動、特に数十年継続する極小期や突然起きる高エネルギー現象に対する地球環境変化の予測の可能性を考察する。

## 3. 研究の方法

炭素14は、宇宙から飛来する高エネルギー宇宙線が地球大気に入射し、大気原子核と反応することにより生成される。地球に到達する宇宙線粒子のほとんどはプラスの電荷を持つ陽子である。星間空間から太陽圏に入った荷電粒子はその経路に存在する磁場によって進路を曲げられるが、その惑星間空間磁場は太陽活動によって変化する。従って地球へ到達する宇宙線強度は太陽活動によって変動し、大気中に生成される炭素14の量も変動することになる。太陽活動が活発になると、太陽表面でフレアが起り、高エネルギー粒子が発生して地球に飛来することがあるので、これらの検出も試みた。

試料は主に樹齢1,900年の屋久杉とBC4世紀に生育したクスノキの土埋木を使用し

た。突発現象に対しては再現性確認のために他の樹木も使用した。これらの樹木から単年輪を削り出し、化学処理や精製過程を経てグラフアイトとして抽出した炭素試料中の炭素 14 濃度を、主に名古屋大学の加速器質量分析計を用いて測定した。得られた炭素 14 濃度は学界標準に従って  $\Delta^{14}\text{C}$  として表してある。周期性に関するデータに対してはフーリエ解析やウェーブレット解析を行なった。

#### 4. 研究成果

##### (1) 太陽活動極小期におけるシュワーベサイクル長の変動の測定

本研究において、紀元前 4 世紀の顕著な太陽活動極小期と西暦 7-8 世紀の小さい極小期に対するシュワーベサイクルの同定と周期長変動の有無を調べた。

我々は、紀元前 4 世紀の太陽活動極小期と予測された年代の樹木を入手し、紀元前 431 年から紀元前 281 年までの単年輪 1 年おきの  $^{14}\text{C}$  濃度を加速器質量分析計により平均 2.6‰ の高精度で測定し、得られた 150 年分 (76 試料) の炭素 14 濃度の時系列に対してウェーブレット法による周期解析を行った。またモンテカルロ・シミュレーションにより測定誤差の影響の評価を行い、得られた信号周期が 95% 以上の信頼度をもつことを示した。その結果、これまでで最古の年代における太陽活動のシュワーベ・サイクルの検出に成功し、さらに通常 11 年の周期長が極小期中頃の年代の 3 周期にわたって一時的に 16 年と長くなっていたことを見出した (図 1)。これはマウンダー極小期の 14 年周期と類似しており、太陽活動極小期の特徴と理解することができる。この周期の伸長は極小期の期間内 (無黒点期) に起きており、マウンダー極小期と類似である。一方でダルトン極小期やシュペラー極小期では無黒点期の直前にシュワーベ・サイクル周期長の伸長が起こったと考えられている。太陽活動極小期は持続期間によって 3 つの型に分類されているが、本研究の結果はこれらの型分けが持続期間だけでなくシュワーベ・サイクル周期長変化の様式の違いという側面を持つ可能性を示唆した。太陽活動極小期の出現に関して、シュワーベ・サイクル周期長の伸長を意味する太陽子午面流速の減少をトリガとするダイナモモデルが提案されており、本研究によって検出された周期長の変化は極小期の発生機構を探る手がかりを与えるものと期待される。また紀元前 8 世紀から 4 世紀と続いた太陽活動極小期と同時期に南ヨーロッパの気候が寒冷化したことが指摘されており、紀元前 4 世紀においてマウンダー極小期と類似した太陽活動が見られたことは、小氷期のように長期的な太陽活動の衰退と気候変動の関連

性を示す新たな証拠となる可能性がある。

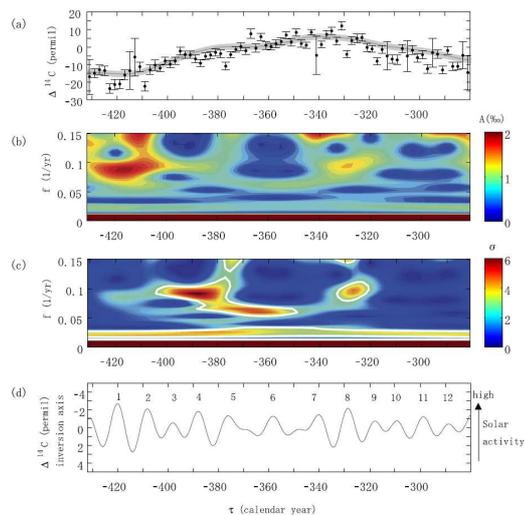


図 1 紀元前 4 世紀の炭素 14 濃度変化。(a)  $\Delta^{14}\text{C}$  データ, (b) S-変換による時間依存周波数分布, (c) 誤差評価による時間依存有意性分布, (d) 9-18 年のフィルターをかけた  $\Delta^{14}\text{C}$  データ

一方、西暦 7-8 世紀にやや小さいマウンダー型の太陽活動極小期があり、これに引き続く通常レベルあるいは活発期に近い太陽活動も調べた。この極小期を含む西暦 600 年-760 年の屋久杉年輪試料を用いて、2 年分解能で炭素 14 濃度を測定した。その結果、極小期の期間を通して 12-13 年の周期を見出した。これはマウンダー極小期、シュペラー極小期、上述の紀元前 4 世紀極小期に次いで、4 例目の炭素 14 による極小期における周期長増加の発見であり、太陽活動極小期におけるシュワーベ・サイクル長の伸びは普遍的なものである可能性が大きくなった。一方で、マウンダー型極小期ではほとんどの極小期間を通して周期長が伸びており、シュペラー型極小期ではその期間の直前か始まりの頃に伸長が見られるという違いもある。またマウンダー型では極小の深さと周期長のあいだに相関が見られる。周期長の増加に加えて、極小期の始め頃に短周期成分が現れており、今後はその原因の解明が必要である。

##### (2) 放射性炭素急増の発見とその原因事象の特定

これまでに測定されていた IntCal データから、過去 3,000 年の間に炭素 14 濃度が大きな増加率 (3‰/10 年以上) を示した時期が 3 回あったことがわかる (紀元前 600 年, 西暦 780 年, 西暦 1800 年頃)。そのうちの 2 回では既に 1 年ごとの炭素 14 濃度が測定されており、その増加期間は 1 年より長い時間スケールであった。そこで我々に残る 1 回の増加 (西暦 780 年) について詳しく調べた。そ

の結果、西暦 774 年から 775 年の 1 年間で 12‰の炭素 14 濃度の増加を発見した。10 年平均したデータは、IntCal の 10 年値とよく一致し、また南極のアイスコアから得られた、同じ宇宙線生成核種であるベリリウム 10 の 30 年値でも同じような増加が見られることから、この現象が、地球外から来た宇宙線によって全地球で起こっていたことがわかった。この炭素 14 濃度の増加とその後の減衰の時間変化は、短時間の宇宙線の増加とその後の大気中の炭素循環から予測される変化の様子とよく一致する。すなわち 774 年から 775 年にかけての 1 年の間に何らかの理由で宇宙線が増加して大気中に炭素 14 を生成し、その後炭素循環によって減衰していったと考えられる。この変化は、1960 年頃の大気圏内核爆発実験の時の大気中炭素 14 濃度の変化と同様の形をしている。

この炭素 14 濃度の変化は、通常の太陽活動の 11 年変動による銀河宇宙線強度の変化によるものに比べて 20 倍大きい変化率を示している。このような変化を与えることができる事象としては、太陽系近傍の超新星爆発やガンマ線バーストあるいは太陽高エネルギー陽子である。超新星爆発の場合は、星間空間磁場の影響を受けない高エネルギーのガンマ線が飛来し、地球大気と反応して中性子を作り、炭素 14 がつくられる。しかし測定された炭素 14 の増加量を説明するには、地球からの距離が典型的な超新星残骸 SN1006 に比べて 1/10 であることが必要となり、古文書などの歴史記録がないことが問題となる。短期のガンマ線バーストの可能性もあるが、発生頻度の点から疑問が残る。一方、太陽高エネルギー陽子の場合、測定された炭素 14 の増加量を説明するには、等方的放射を仮定するとスーパーフレアと呼ばれる大規模フレアが起こる必要がある。通常フレアの場合の放射角を仮定すると等方的放射に比べて 1/100 でよいが、それでも過去最大のフレアの数十倍の規模が必要である。

発生頻度を調べるために対象年代を拡大して炭素 14 濃度の測定を行なった。その結果、西暦 993 年にも大気中の炭素 14 濃度が急激に増加したことを発見した (図 2)。これは前述の西暦 775 年の炭素 14 イベントに続いて 2 例目で、その規模は 775 年イベントの 0.6 倍であった。これらは西暦 774-775 年と西暦 992-993 年に地球へ到来する宇宙線が急増したことを意味している。他の 1-2 年の高時間分解能の測定を合わせると 1,600 年間に 2 つの炭素 14 濃度の急増イベントがあったことになり、その頻度からこれらのイベントの原因は太陽フレアによる大規模な Solar Proton Event (SPE) である可能性が高い。これらのイベントが太陽フレアによるものであるなら、これまで観測で知られている最

大級のフレアの数十倍の規模の SPE に相当することになり、そのような SPE が過去に頻繁に発生していた可能性が示された。現代においてこれらのイベントと同程度の規模の SPE が発生すれば、社会に与える影響は非常に大きいと考えられ、今回の発見は今後の大規模 SPE を予測する上で非常に重要である。

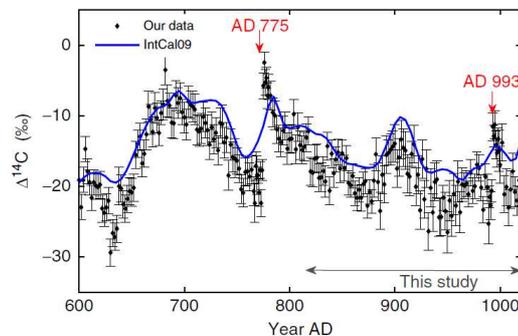


図 2 西暦 600 年-1020 年の樹木年輪中炭素 14 濃度。青線は IntCal09 による 5 年ごとのデータ。我々の 1-2 年の高時間分解能測定が炭素 14 急増イベントの検出に有効なことがわかる。西暦 775 年と 993 年を矢印で示してある。

## 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 F. Miyake, K. Masuda and T. Nakamura, Another rapid event in the carbon-14 content of tree rings, *Nature Communications*, 査読有, 4:1748 doi: 10.1038/ncomms2783 (2013).
- ② K. Nagaya, K. Kitazawa, F. Miyake, K. Masuda, Y. Muraki, T. Nakamura, H. Miyahara and H. Matsuzaki, 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, 223-236 (2012).
- ③ F. Miyake, K. Nagaya, K. Masuda and T. Nakamura, A signature of cosmic-ray increase in AD 774-775 from tree rings in Japan, *Nature*, 査読有, 486, 240-242, doi: 10.1038/nature11123 (2012).
- ④ F. Miyake, K. Nagaya, K. Masuda and T. Nakamura, Reconstruction of the solar activity in 7<sup>th</sup>-11<sup>th</sup> centuries by the carbon 14 content in tree-rings, *Proc. 32<sup>nd</sup> ICRC*, 査読無, Vol.11, 428-430 (2011).

- ⑤ H. Miyahara, K. Kitazawa, K. Nagaya, Y. Yokoyama, H. Matsuzaki, K. Masuda, T. Nakamura and Y. Muraki, Is the Sun heading for another Maunder minimum? Precursors of the grand solar minima, *J. Cosmology*, 査読有, 8, 1970-1982 (2010).

[学会発表] (計 20 件)

- ① 三宅美沙, 増田公明, 中村俊夫, 樹木年輪中  $^{14}\text{C}$  濃度高精度測定による 7-8 世紀のシュワーベサイクル周期長, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 19 日-24 日, 幕張メッセ, 千葉.
- ② 三宅美沙, 増田公明, 中村俊夫, 樹木年輪中放射性炭素 14 濃度測定による 7-11 世紀の宇宙線強度の復元 (III), 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日-29 日, 広島大学, 東広島.
- ③ Kimiaki Masuda (invited), Rapid increase in cosmic-ray intensity in the past from tree rings, 日本天文学会 2013 年春季年会, 2013 年 3 月 20 日-23 日, 埼玉大学, さいたま.
- ④ 増田公明 (招待講演), 炭素 14 と宇宙線変動-奈良時代の異変-, 第 25 回名古屋大学年代測定総合研究センターシンポジウム, 2013 年 1 月 16 日-17 日, 名古屋大学, 名古屋.
- ⑤ 三宅美沙, 永治健太郎, 増田公明, 中村俊夫, 樹木年輪中放射性炭素 14 濃度測定による 8 世紀宇宙線強度増加の痕跡, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 11 日-14 日, 京都産業大学, 京都.
- ⑥ 三宅美沙, 増田公明, 西暦 775 年の宇宙線イベントについて, 「宇宙線生成核種の連続記録と古宇宙線・古環境変動 II」研究集会, 2012 年 8 月 24 日-25 日, 弘前大学, 弘前.
- ⑦ 増田公明, 三宅美沙, 永治健太郎, 中村俊夫 (招待講演), 炭素 14 と宇宙線変動, 第 25 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会, 2012 年 7 月 20 日-21 日, 名古屋大学, 名古屋.
- ⑧ 三宅美沙, 永治健太郎, 増田公明, 村木綏, 中村俊夫, 樹木年輪中放射性炭素 14 濃度測定による 7-11 世紀の宇宙線強度の復元 (II), 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日-27 日, 関西学院大, 西宮.
- ⑨ 三宅美沙, 増田公明, 樹木年輪中放射性炭素 14 濃度測定による 7-8 世紀の太陽活動周期の研究, 「樹木年輪の  $^{14}\text{C}$  年代測定の実験室間比較による高精度の暦年代較正データの確立」研究集会, 2012 年 3 月 12 日-13 日, 名古屋大学, 名古屋.
- ⑩ 三宅美沙, 永治健太郎, 増田公明, 中村

俊夫, 村木綏, 樹木年輪中放射性炭素 14 濃度測定による 7-11 世紀の宇宙線強度の復元, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 16 日-19 日, 弘前大, 弘前.

- ⑪ 三宅美沙, 永治健太郎, 増田公明, 中村俊夫, 村木綏, 樹木年輪中放射性炭素 14 濃度測定による 6-10 世紀の太陽活動の復元, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 25 日-28 日, 新潟大学, 新潟.
- ⑫ 永治健太郎, 三宅美沙, 増田公明, 中村俊夫, 宮原ひろ子, 松崎浩之, 村木綏, 樹木年輪中放射性炭素濃度測定による紀元前 4 世紀太陽活動極小期におけるシュワーベサイクル周期長の研究, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 11 日-14 日, 九州工大, 北九州.
- ⑬ 三宅美沙, 永治健太郎, 増田公明, 中村俊夫, 村木綏, 樹木年輪中放射性炭素 14 濃度測定による 6-9 世紀の太陽活動の復元, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 11 日-14 日, 九州工大, 北九州.

[その他]

ホームページ

名古屋大学

<http://www.nagoya-u.ac.jp/>

太陽地球環境研究所

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/>

同研究所宇宙線研究室

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/CR/research/index.html/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

増田 公明 (MASUDA KIMIYAKI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授  
研究者番号: 40173744

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者 なし

### (4) 研究協力者

永治 健太郎 (NAGAYA KENTARO)

名古屋大学・太陽地球環境研究所

・大学院生 (H22-23)

三宅 美沙 (MIYAKE FUSA)

名古屋大学・太陽地球環境研究所

・大学院生

中村 俊夫 (NAKAMURA TOSHIO)

名古屋大学・年代測定総合研究センター

・教授

