

プレス発表資料 PRESS RELEASE

2021年3月10日

学校法人 武蔵野美術大学

国立大学法人 山形大学

国立大学法人 千葉大学

国立大学法人 弘前大学

17世紀のマウンダー極小期直前の太陽周期の変遷を解明

～数十年規模の太陽活動低下のプロセスに重要な示唆～

【概要】

武蔵野美術大学教養文化・学芸員課程研究室の宮原ひろ子准教授、山形大学学術研究院の門叶冬樹教授（山形大学高感度加速器質量分析センター長）、千葉大学大学院理学研究院の堀田英之准教授、弘前大学大学院理工学研究科の堀内一穂助教らの研究グループは、樹木年輪に含まれる炭素 14 を世界最高精度で分析し、17 世紀の中頃から 70 年間にわたって発生した太陽活動の低下の直前に、通常は約 11 年の周期を示す太陽活動周期が最長で 16 年に延びていたこと、また、活動の低下が 40 年程度の準備期間を経てゆるやかに発生していたことを明らかにしました。本研究結果は、英科学誌「Scientific Reports」に掲載されました。

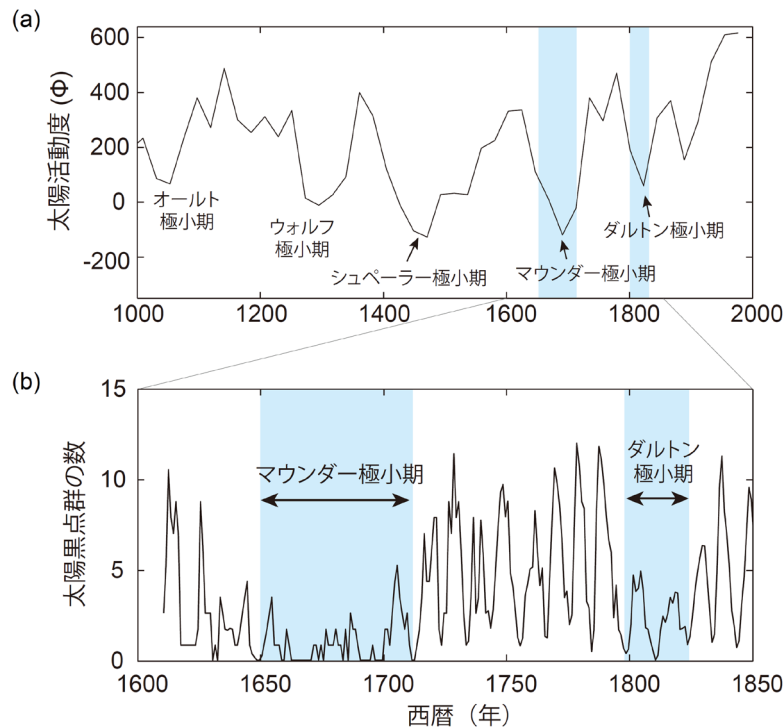


図 1. (a) 樹木年輪や氷床コアに含まれる宇宙線生成核種<sup>\*1</sup>の変動に基づき復元されている過去 1000 年間の太陽活動変動 (Steinhilber et al., *Natl. Proc. Acad. Sci.*, 2012)。数十年規模の太陽活動の低下が計 5 回発生していたことが見て取れる。これらは太陽活動極小期<sup>\*2</sup>と呼ばれる。(b) ガリレオが望遠鏡を発明した 17 世紀以降の太陽黒点群数の変動 (Svalgaard & Schatten, *Sol. Phys.*, 2016)。1645～1715 年

や 1798～1823 年に、黒点数の減少が見られ、それぞれマウンダー極小期、ダルトン極小期と呼ばれている。

## 【背景】

太陽活動には、図 1b に見られるような約 11 年の基本周期に加えて、数百～数千年スケールの長期的な変動があることが知られています。そういった長期変動に関連して、数百年に一度、太陽活動が数十年にわたって低下してしまうことが知られています。その期間は、太陽表面に現れる黒点と呼ばれる強磁場領域の数が極端に減少します。過去の太陽活動の指標として用いられている、樹木年輪や氷床コアに含まれる宇宙線生成核種の変動からは、過去 1000 年間に、そういった太陽活動の低下が 5 回発生していたことが示されています (図 1a)。14 世紀から 19 世紀にかけて発生した小氷期は、度重なる太陽活動の低下が大きな要因になったと考えられています。小氷期においては気温の低下、降水量の変化、氷河の拡大などが発生しました。太陽活動の長期的な低下は今後も発生する可能性があると考えられており、太陽活動の歴史を詳細に明らかにして活動低下のメカニズムを探り、予測手法を確立することが重要な課題となっています。

## 【研究内容・分析内容】

本研究では、過去 1000 年間の中でも比較的規模が大きく、なおかつ、望遠鏡による黒点の観測データが充実しているマウンダー極小期 (1645～1715 年、図 1b) について、発生直前の 11 年周期の振る舞いを詳細に復元することで、太陽活動の低下のプロセスに迫ることを試みました。11 年周期の長さは、太陽内部の対流層での子午面循環<sup>\*3</sup> の速度と関係することが示唆されており、もしその変化を詳細に捉えることができれば、太陽内部の循環が活動低下に果たす役割を明らかにすることができます。

過去の太陽活動は、樹木年輪に含まれる炭素 14 や極域で採取される氷床コアの年層に含まれるベリリウム 10 といった、宇宙線生成核種の濃度の変動から間接的に調べることができます。これらの核種は、宇宙から飛来する放射線 (宇宙放射線<sup>\*4</sup>) が大気中の窒素や酸素に衝突することによって作られます。生成された炭素 14 は、大気循環を経て樹木の年輪に取り込まれます。一方、ベリリウム 10 は降雪などともなって落下し、氷床に取り込まれます。過去の太陽活動を復元する際には、両者のメリット、デメリットを理解した上で相補的に進める必要があります。炭素 14 を用いる場合、大気中で変動の振幅が弱められてしまうという欠点があり、特に、太陽活動の基本周期である 11 年周期のように短い周期を扱う場合はその影響が顕著で、精細な復元を行うことが困難でした。一方で、年輪は、氷床コアと比較して、正確な年代軸で太陽活動を明らかにできるという大きなメリットを持っています。

そこで、本研究では、2010 年に山形大学に導入された加速器質量分析計のシステムの改良と重複測定を行うことで、炭素 14 の分析精度を高めるとともに、炭素 14 の変動から黒点数の 11 年周期変動の精細な情報を抽出するための手法を探ってきました。その結果、測定精度を従来の 4 倍程度に高めることに成功し (図 2a)、また、炭素 14 の 1 年分解能での分析により、11 年周期の 1 サイクルごとの長さを精密に復元することに成功しました (図 2c)。本研究では、奈良県室生寺から採取されたスギ (樹齢 382 年) と伊勢神宮スギ (樹齢 439 年) の年輪が用いられました。

## 【研究成果】

炭素 14 の高精度での分析の結果、マウンダー極小期の発生直前に太陽活動の 11 年周期に異変が見られていたことが判明し、発生直前の 3 サイクル前に 11 年周期が約 16 年という長さに伸びていたことが明らかとなりました (図 2c)。通常、黒点数の周期は  $11 \pm 2$  年程度で推移しますので、異例の長さと言えます。また、発生直前のサイクルも 12～15 年という長さに伸びていたことが分かりました。この周期の伸びは、太陽内部の対流層での子午面循環の速度が大幅に遅くなっていたことを示唆しています。

これまで、11年周期の長さが延びると次のサイクルで黒点数に減少傾向が見られるということが経験的に知られていました。19世紀の初頭に発生した小規模なダルトン極小期（図1b）でも、発生直前に周期が1サイクルだけ延びていました。しかし、マウンダー極小期のように数十年にわたり黒点数が大幅に減少する場合には、その3サイクル前、すなわち40年ほど前から太陽内部の循環に変化が生じ始め、ゆるやかに活動の低下が起こることが示唆されました。太陽活動の低下はいくつかの要因で発生することができますが、本研究の結果は、太陽内部の循環が太陽活動を左右する重要なパラメータであることを強く示唆しています。

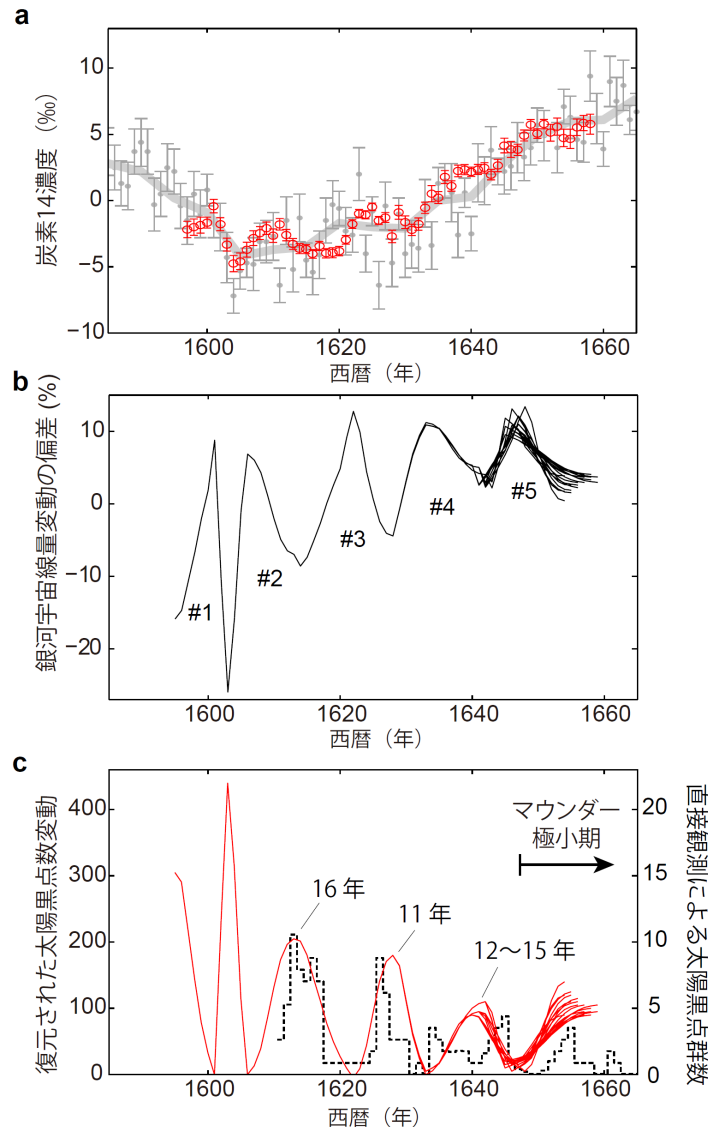


図2. (a) 赤色で示されたデータが本研究で取得された炭素14の高精度データ。灰色は先行研究により取得されていたデータ。(b) 炭素14のデータと炭素循環ボックスモデル<sup>※5</sup>を用いた計算により復元された、地球に飛来した銀河宇宙線量の変動。(c) 赤線が、bとともに復元された太陽黒点数の変動。破線は望遠鏡により観測された黒点の記録を収集することにより再構築された黒点数の変動 (Svalgaard & Schatten, *Sol. Phys.*, 2016)。

### 【今後の期待】

太陽活動の長期的な変動の様相について理解が比較的進んできている一方で、その変動の物理メカニズムを理解する上で鍵となる11年周期の変遷については、精細な復元が難しい状況が続いていましたが、炭素14の高精度での分析により、11年周期についても詳細な情報を得ることが可能であることが明らかとなりました。樹木年輪や氷床コアのほかにも、堆積物などを用いた研究も進んできており、これらを

相補的に用いることで、今後、太陽活動の低下や回復の物理メカニズムについて、よりいっそうの理解が進んでいくことが期待されます。

現在の太陽活動は、1996年にスタートしたサイクル23の長さが12年4か月に延びて以来、やや低調な傾向を示しています。2009年1月に開始し2020年に終了したサイクル24は顕著な延びを示しませんが、開始したばかりのサイクル25の動向によっては、今後さらなる活動低下が起こる可能性がありますので、注視していく必要があると考えられます。

### 【謝辞】

この研究は日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業（25287051, 25247082, 15H05816）の支援のもと行われました。

### 用語解説

※1 **宇宙線生成核種**：地球に飛来した宇宙放射線<sup>\*4</sup>によって生成される同位元素。そのうち、炭素14やベリリウム10などが過去の太陽活動の復元に用いられている。

※2 **太陽活動極小期**：太陽活動の極端な低下が数十年にわたり持続する現象。太陽表面に現れる黒点の数に大幅な減少が見られる。

※3 **子午面循環**：太陽内部のうち、中心から0.7~1.0太陽半径の位置を占める対流層に存在する子午面内の循環流

※4 **宇宙放射線**：宇宙から飛来する放射線。主に陽子から成る。天の川銀河内から飛来してきているものについては、銀河宇宙線とも呼ばれる。太陽系の近傍で、太陽から吹く磁場とプラズマの風により遮蔽を受けるため、地球で観測される宇宙放射線の量は、太陽活動度に応じて変動する。

※5 **炭素循環ボックスモデル**：大気圏、海洋圏、生物圏の間での炭素14の収支を記述したモデルで、炭素14の生成率の変動から樹木年輪中の炭素14の濃度を計算したり、また逆に、炭素14の濃度の変動から炭素14の生成率の変動を計算したりすることができる。

### 【発表論文】

掲載誌：Scientific Reports

タイトル：Gradual onset of the Maunder Minimum revealed by high-precision carbon-14 analyses

著者：宮原ひろ子<sup>1</sup>, 門叶冬樹<sup>2</sup>, 森谷透<sup>2</sup>, 武山美麗<sup>2</sup>, 櫻井敬久<sup>2</sup>, 堀内一穂<sup>3</sup>, 堀田英之<sup>4</sup>

所属：1. 武蔵野美術大学 2. 山形大学 3. 弘前大学 4. 千葉大学

DOI: 10.1038/s41598-021-84830-5

### 【お問い合わせ先】

宮原ひろ子（武蔵野美術大学 教養文化・学芸員課程研究室）

miyahara@musabi.ac.jp

門叶冬樹（山形大学 学術研究院 理学部担当／高感度加速器質量分析センター）

tokanai@sci.kj.yamagata-u.ac.jp

堀田英之（千葉大学 大学院理学研究院）

hotta@chiba-u.jp

### 【窓口】

武蔵野美術大学 大学企画グループ 広報チーム

koho@musabi.ac.jp, TEL:042-342-6038