

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20918

研究課題名（和文）宇宙線生成核種を用いたシュワーベサイクル検出手法の確立

研究課題名（英文）Establishment of a method for detecting Schwabe cycles using cosmogenic nuclides

研究代表者

三宅 芙沙（Miyake, Fusa）

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号：90738569

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：年輪の ^{14}C は太陽磁場活動の優れた代替データである一方で、 ^{14}C を用いた太陽11年周期（シュワーベサイクル）の検出手法は未だ確立されていない。シュワーベサイクル検出を妨げる可能性がある年層内季節変動の調査のため、複数地点の樹木試料の早晚材の ^{14}C 濃度を測定した。その結果、年層内 ^{14}C 変動の大きさは、樹種あるいは地域によって異なり、分析に用いる樹木の年層内変動を正しく理解することが重要であることが明らかになった。年層内の季節変化が高い精度で確認されなかった樹木試料を用いて、1844～1876年に對して同一年の複数回測定を実施した結果、黒点から予想されるシュワーベサイクルと整合的な結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究から得られた知見に基づき、分析期間を過去に拡張することで、黒点データの妥当性を検証することが可能となるだけでなく、数万年間のシュワーベサイクルの調査につながり、太陽物理学をはじめ大きな影響を及ぼす。また、過去の巨大宇宙天気現象が、シュワーベサイクルのどのフェーズで発生していたか調査することが可能となる。中規模太陽高エネルギー粒子現象を捕らえる際にも役立つ。シュワーベサイクルを年輪の ^{14}C と氷床コアの ^{10}Be 双方でとらえることができれば、年輪の正確な年代軸を利用して、氷床コアに、ほぼ1年精度で年代束縛点を与えることができる。

研究成果の概要（英文）：Radiocarbon in tree rings is an excellent proxy for solar magnetic activities. However, a method for detecting the 11-year solar cycle (Schwabe cycle) using ^{14}C has not been established. To investigate seasonal variations within annual tree-ring layers that may prevent the detection of the Schwabe cycle, we measured ^{14}C concentrations in early and latewoods of tree samples from multiple locations. The results showed that the magnitude of ^{14}C variations within annual layers differs depending on the tree species or locations, and it is important to correctly understand the seasonal variations of trees using for the analysis. We conducted multiple measurements for the same year using tree samples in which seasonal variations could not be confirmed with high accuracy for the period from 1844 to 1876 CE. We observed cyclic variations in measured ^{14}C data which are consistent with the Schwabe cycle presumed from a sunspot record.

研究分野：宇宙線生成核種

キーワード：宇宙線生成核種 放射性炭素 年輪 シュワーベサイクル

1. 研究開始当初の背景

太陽黒点は、過去 400 年にわたって観測・記録されてきた。このような長期の観測記録は太陽物理学、古気候学などの諸分野で活用され、特に太陽活動の振幅と太陽 11 年周期（シュワーベサイクル）の変遷の推定において基盤となる重要なデータである。一方で、黒点データは過去 ~70 年の機器観測データに比べ、観測所や観測者、その方法などに様々な変化を伴っており、古い時代のものほど観測記録（歴史文献）の入手や解釈が難しくなる。それ故、観測者毎の補正係数を設けて、長期データの一貫性を定量的に担保することが大きな課題である。従来の復元黒点群数データ（Hoyt & Schatten, 1998）は、2014 年以降見直しが進み、3 つの新しい黒点シリーズが提案されたが、それぞれの復元は互いに必ずしも一致せず、現在も合意が得られていない。各復元では 1825 年以降は複数の記録によりシュワーベサイクル周期長は高い精度で決定されている一方で、太陽活動低調期として知られるガルトン極小期（19 世紀初頭、図 1）は記録自体の検討が進んでおらず、現在考えられている 2 サイクル中にもう 1 サイクル分の太陽周期が見落とされている可能性が指摘されている（Usoskin et al., 2009）。それ故、黒点データの妥当性を評価するためには、他の方法を用いる必要がある。

過去の太陽磁場活動の代替データとして、地球の保存サンプル中の宇宙線生成核種がある。生成量の多い宇宙線生成核種として、 ^{14}C 、 ^{10}Be が知られ、これらは宇宙線と大気原子との核反応で生成される。 ^{14}C は樹木年輪へと蓄積し、 ^{10}Be は氷床コアなどに蓄積する。宇宙線の大部分が荷電粒子であることから、太陽磁場が強くなると、地球へ飛来する宇宙線量が低下するという逆相関関係がある。図 1 下は、樹木年輪の ^{14}C 濃度の変遷であり、黒点数が低下する年代に ^{14}C 濃度が大きく上昇し、逆相関関係が見て取れる。これを応用すれば、樹木年輪や氷床コアなどの保存サンプルの宇宙線生成核種濃度から、過去の太陽磁場活動の変遷を数千～数万年前まで調査することができる。

実際に 10 年以上の長い時間スケールでは年輪 ^{14}C や氷床コア ^{10}Be データに基づいて、1 万年スケールで太陽活動度が復元されている。一方で、1～数年スケールの変化、特にシュワーベサイクルについては、多数の研究事例があるものの、依然としてその検出手法は確立されていない。その理由として、まずシュワーベサイクルの振幅が測定誤差と同程度である点が挙げられる。 ^{14}C データに現れるシュワーベサイクル振幅は、1 回の ^{14}C 測定の誤差（2～3%程度）と同じかそれよりも小さいと考えられている（e.g., Brehm et al. 2021）。また、このような微小な ^{14}C 変動を検出するためには、年輪 ^{14}C データに現れるバックグラウンド変動と切り分ける必要がある。しかし、これまでの研究ではバックグラウンド変動の調査がほとんど行われておらず、シュワーベサイクル検出の際に十分考慮されてこなかった。

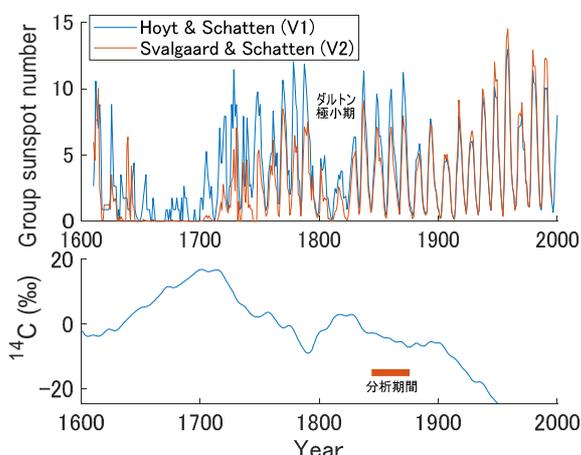


図 1：(上) 復元手法が異なる 2 つの黒点シリーズ (下) 樹木の ^{14}C データ(Reimer et al. 2020)。

2. 研究の目的

年輪 ^{14}C データのバックグラウンド変動の一つとして、成層圏-対流圏交換に起因する ^{14}C 濃度の季節変動がある。近年の大気サンプリングから、春から秋にかけて ^{14}C 濃度が増加し、次の春にかけて減少するという ^{14}C 季節変動の存在が知られており、その変動は大きい地点で 5%以上に達する（e.g., Levin et al. 2010）。従来の手法では、1 年輪（1 年分解能）の ^{14}C 分析からシュワーベサイクルが議論されてきたが、この方法では、年ごとに異なる季節を見ている可能性があり、 ^{14}C データに現れるシュワーベサイクルを乱す原因となり得る。そこで、年層内を早材、晩材と 2 層に剥離し、年層内の季節変動がどのように ^{14}C データに現れるか調査する。また、年輪が生育した地点や樹種による年層内変動の違いを確認するため、同年代の異なる年輪試料を用いて、同様の年層内変動を調査する。このような調査から、年層内 ^{14}C データのバックグラウンド変動や、樹木試料の地域・樹種の違いを正しく理解した上で、黒点記録が存在し、シュワーベサイクル既知の年代に対して、高精度な ^{14}C 分析（同一年の繰り返し測定）を行い、予想されるシュワーベサイクルが検出されるか調査する。これらの知見に基づき、将来的な長期シュワーベサイクル復元に生かす。

3. 研究の方法

本研究で対象とした年代は、西暦 1844～1876 年である（約 3 サイクル分）。この年代を選定し

た理由は、精度の高い黒点データが得られていること、1940 年代以降の大気圏核実験の影響がないこと、さらに 19 世紀半ば以降に徐々に影響が現れ始める「化石燃料使用による大気 ^{14}C 濃度の希釈効果 (Suess 効果)」がまだ小さい年代であること等が挙げられる。Suess 効果は、約 1900 年以降の ^{14}C 濃度変動に顕著に現れている (図 1 下)。

主に分析に用いた試料は、米国アラスカ産のシトカスプルスである (箱崎・中村 2013)。本試料の年輪幅データは、Prince of Wales 島のマスタークロノロジー (年輪年代の基準となる年輪幅データ) と最も高い相関を示しており、Prince of Wales 島またはその周辺地域に生息した個体と考えられている (箱崎・中村 2013)。

分析の対象年代の年輪試料を、早材と晩材に剥離し、各木片試料から、ホロセルロースを抽出する。ホロセルロースの抽出は、酸 - アルカリ - 酸処理を行った後に、酸性下で亜塩素酸ナトリウム処理を行い、その後の中和によって実施した (Miyake et al. 2023)。抽出したホロセルロース試料は、スイスのチューリッヒ工科大学に送付し、自動グラファイト化装置 (AGE, Wacker et al. 2010) によりグラファイトにした後、Micadas (Sookdeo et al., 2020) により ^{14}C 濃度を測定した。

また、地域、樹種の違いを調査するため、ロシアカムチャツカ半島のカラマツ、中国北東部 (吉林省) のマツ、中国南西部 (雲南省) のカラマツをそれぞれ用いて、1855 ~ 1865 年に対して早晩材の ^{14}C 濃度測定を行った (山形大学高感度加速器質量分析センター)。さらに、氷床コア ^{10}Be データに見られるシュワーベサイクルの知見を深めるため、19 世紀初頭のグリーンランド SE Dome 氷床コアの ^{10}Be 濃度を測定した。

4. 研究成果

図 2 (a) にアラスカ産シトカスプルスの早晩材の ^{14}C 濃度 ($\Delta^{14}\text{C}$) 測定結果を示す。測定期間における晩材と早材との差の平均は $0.0 \pm 0.3\text{‰}$ であり、高い精度で両者の違いは確認されなかった (Miyake et al., 2023)。一方で、典型的な年輪の生長季節 (早材: 春 ~ 夏、晩材: 夏 ~ 秋) を仮定すると、大気中 ^{14}C 濃度の季節変動から、早晩材間に 2 ~ 3‰ の違いが予想される。実際に、先行研究では早晩材間に約 3‰ の違いを報告している測定結果もある (e.g., McDonald et al., 2019)。今回アラスカ産のシトカスプルスに早晩材の違いが確認されなかった理由として、次の 3 つが考えられる: (1) 年輪成長のほとんどが 1 ~ 2 か月という短い期間に起きていた、(2) 年輪成長にリアルタイムで固定した炭素ではなく、貯蔵炭素を利用していた、(3) 測定期間において、使用樹木が生息した地域では、現在同緯度の大気で測定されているような季節変化が存在しなかった。

一般的に、今回使用したような針葉樹の年輪形成において、貯蔵炭素の利用は小さいと考えられているが (落葉広葉樹において、貯蔵炭素を利用した年輪成長の報告等はある、e.g., Kagawa et al. 2006)、幅広い樹種について調査されたわけではない。年輪 ^{14}C データから宇宙線変動を推定する際、通常はこのような貯蔵炭素の利用について考慮されていないため、より正確な宇宙線変動を議論する上で、今後の更なる調査が重要になる。

アラスカ産のシトカスプルスで早晩材の違いが確認されなかった一方で、カムチャツカ、中国東北産の試料の ^{14}C データに早晩材の違いの傾向が確認され、特にカムチャツカでは晩材と早材との差の平均は $2.2 \pm 1.1\text{‰}$ であった。カムチャツカの試料の測定期間は 1855 ~ 1865 年の 11 年のみであるが、同年代のアラスカ産の早晩材の差の平均 ($-0.3 \pm 0.4\text{‰}$) と比較して、誤差を上回る違いが確認された。樹種あるいは、地域の違いによる年層内の ^{14}C 濃度の差異が何に起因しているか明らかにするには、今後のさらなる研究が必要となる。しかし、本研究から、年層内の ^{14}C 濃度に数‰ の違いがみられる樹木が存在することが示唆されたことから、シュワーベサイクルや、微小な ^{14}C 変動 (例えば、極端な太陽高エネルギー粒子イベントに伴う ^{14}C 増加など) を検出する際、使用する樹木に季節変動が存在するか十分に調査することが重要と考えられる。季節変動が大きい試料を用いる場合は、同一季節の試料を用いて分析することで、このような不確実性を減少できると考えられる。

今回利用したアラスカ産シトカスプルスには早晩材の違いは確認されなかったことから、各年の早晩材の平均をとって 1 年の時間分解能データにしたものを図 2(b) に示す。図 2(b) には、先行研究で取得されたデータ (英国産試料、Brehm et al. 2021) を共に示しているが、今回取得したデータと整合的な結果となった。アラスカ産試料にみられる 1870 年以降の ^{14}C 濃度の減少は、化石燃料による Suess 効果によって説明できる可能性がある。Stuiver & Quay (1981) によると、Suess 効果は 1960 年以降徐々に現れ始め、その効果は 1860 ~ 1880 年にかけて約 2‰ の ^{14}C 濃度

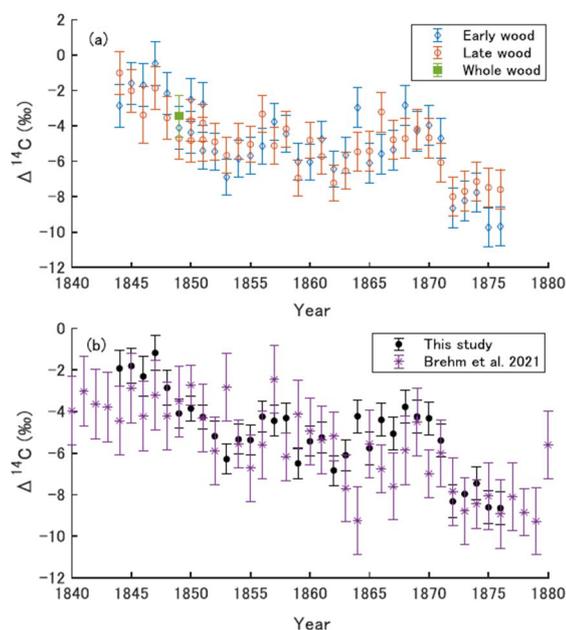


図 2: (a) アラスカ産樹木試料の早晩材の測定結果。(b) 1 年平均した ^{14}C データと先行研究データ (Brehm et al. 2021) との比較 (Miyake et al. 2023)。

減少と試算されている。今回得られた ^{14}C データにも同様の ^{14}C 減少が認められる。

図 3 に、今回得られた ^{14}C データ (3 年移動平均) と太陽黒点数の推移を示す (^{14}C の軸は反転)。年輪の ^{14}C データに現れるシュワーベサイクルは、大気で ^{14}C が生成された後、樹木に取り込まれるまでの炭素循環の影響で、その周期変動の位相の遅れ (2~3 年) が生じる。今回得られた結果は、黒点変動に対して約 3 年遅れた変化を示しており、シュワーベサイクル起因の周期変動が現れていると考えられる。またその振幅は 1~2%程度であり、先行研究の報告とも整合的である (Miyake et al., 2023)。

今後、年輪 ^{14}C 分析について、同様の手法を用いて、さらに測定範囲を過去に拡張することで、シュワーベサイクル検出の有効性を確認し、黒点データが存在しない過去長期のシュワーベサイクル復元に対する確度を担保することが重要である。

グリーンランド氷床の ^{10}Be 測定は、19 世紀初頭のダルトン極小期の一部に対して実施した。その結果、火山噴火と近い年代に顕著な ^{10}Be 増加を検出した。 ^{10}Be 増加の原因は、今後の更なる調査が必要となるが、火山噴火に伴う ^{10}Be 増加は先行研究によっても報告されており (e.g., Baroni et al. 2019) 氷床 ^{10}Be データから特に大規模噴火に近い年代のシュワーベサイクルを検出するためには、火山の影響を評価することが重要になると考えられる。

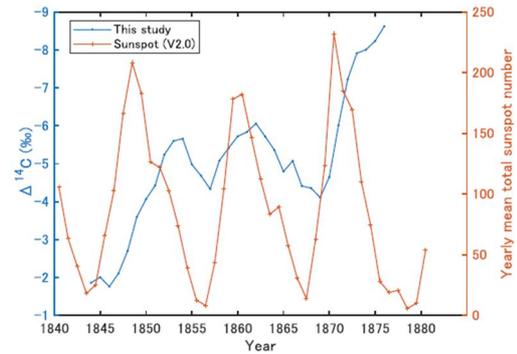


図 3 : ^{14}C データ (3 年移動平均) と太陽黒点 (年平均黒点数 V2.0, Clette & Lefèvre, 2016) との比較 (Miyake et al. 2023)。

<謝辞>

本研究は、チューリッヒ工科大学の Wacker 氏、山形大学の門叶氏、国立歴史民俗博物館の佐野氏、中国科学院の Xu 氏、Zhao 氏との共同研究によって実施した。ここに感謝の意を表します。

<引用文献>

- 1) Baroni, M., et al. 2019. Persistent draining of the stratospheric ^{10}Be reservoir after the Samalas volcanic eruption (1257 CE). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 7082–7097.
- 2) Brehm N, et al. 2021. Eleven-year solar cycles over the last millennium revealed by radiocarbon in tree rings. *Nat Geosci* 14: 10–15.
- 3) Clette F, Lefèvre L. 2016. The new sunspot number: assembling all corrections. *Sol Phys* 291: 2629–2651.
- 4) 箱崎 真隆・中村 俊夫、2013、年輪年代法による輸入スプルー材の年代決定と産地推定. 名古屋大学博物館報告 29, 1–11.
- 5) Hoyt DV, Schatten K. 1998. Group sunspot numbers: a new solar activity reconstruction. *Solar Phys* 179:189–219.
- 6) Kagawa A, et al. 2006. ^{13}C pulse-labelling of photoassimilates reveals carbon allocation within and between tree rings. *Plant Cell Environ* 29(8): 1571–1584. PMID: 16898018.
- 7) Levin I, et al. 2010. Observations and modelling of the global distribution and long term trend of atmospheric $^{14}\text{CO}_2$. *Tellus B Chem Phys Meteorol* 62(1): 26–46.
- 8) McDonald L, et al. 2019. Seasonal variations in the ^{14}C content of tree rings: influences on radiocarbon calibration and single-year curve construction. *Radiocarbon* 61(1): 185–194.
- 9) Miyake F, Hakozaki M, Hayakawa H, Nakano N & Wacker L, 2023. No signature of extreme solar energetic particle events in high-precision ^{14}C data from the Alaskan tree for 1844–1876 CE. *J. Space Weather Space Clim.* 13, 31.
- 10) Reimer PJ, et al. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*. 2020;62(4), 725–757.
- 11) Sookdeo A, et al. 2020. Quality dating: a well-defined protocol implemented at ETH for high-precision ^{14}C -dates tested on late glacial wood. *Radiocarbon* 62(4): 891–899.
- 12) Svalgaard L. & Schatten K.H. 2016. Reconstruction of the Sunspot Group Number: The Backbone Method. *Sol. Phys.* 291, 2653–2684.
- 13) Stuiver M, Quay PD. 1981. Atmospheric ^{14}C changes resulting from fossil fuel CO_2 release and cosmic ray flux variability. *Earth Planet Sci Lett* 53: 349–362.
- 14) Usoskin IG, et al. 2009. A solar cycle lost in 1793–1800: early sunspot observations resolve the old mystery. *Astrophys J Lett* 700: L154–L157.
- 15) Wacker L, et al. 2010. A revolutionary graphitization system: fully automated, compact and simple. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B* 268: 931–934.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計26件（うち査読付論文 24件 / うち国際共著 22件 / うちオープンアクセス 22件）

1. 著者名 Miyake Fusa, Hakozaki Masataka, Hayakawa Hisashi, Nakano Naruki, Wacker Lukas	4. 巻 13
2. 論文標題 No signature of extreme solar energetic particle events in high-precision ¹⁴ C data from the Alaskan tree for 1844-1876 CE	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Space Weather and Space Climate	6. 最初と最後の頁 31 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/swsc/2023030	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 該当する

1. 著者名 Usoskin Ilya, Miyake Fusa, Baroni Melanie, Brehm Nicolas, Dalla Silvia, Hayakawa Hisashi, et al.	4. 巻 219
2. 論文標題 Extreme Solar Events: Setting up a Paradigm	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	6. 最初と最後の頁 —
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11214-023-01018-1	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 該当する

1. 著者名 Uusitalo Joonas, Golubenko Kseniia, Arppe Laura, Brehm Nicolas, Hackman Thomas, Hayakawa Hisashi, Helama Samuli, Mizohata Kenichiro, Miyake Fusa, M?kinen Harri, N?jd Pekka, Tanskanen Eija, Tokanai Fuyuki, Rozanov Eugene, Wacker Lukas, Usoskin Ilya, Oinonen Markku	4. 巻 51
2. 論文標題 Transient Offset in ¹⁴ C After the Carrington Event Recorded by Polar Tree Rings	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 —
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2023gl106632	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 該当する

1. 著者名 Xu Hongyang, Miyahara Hiroko, Horiuchi Kazuho, Matsuzaki Hiroyuki, Zhao Xi, Gan Hailing, Luo Weijun, Meadows Michael E., Zheng Xiangmin, Zhou Limin	4. 巻 51
2. 論文標題 Annual 10Be Record for 1510–1701 CE Obtained From Endogenic Travertine at Baishuitai, China: A New Proxy Record of Annual Solar Activity	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 —
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2023gl107434	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 該当する

1. 著者名 Hayakawa Hisashi, Koldobskiy Sergey, Mishev Alexander, Poluianov Stepan, Gil Agnieszka, Usoskina Inna, Usoskin Ilya	4. 巻 684
2. 論文標題 Revision of the strongest solar energetic particle event of 23 February 1956 (GLE #5) based on the rediscovered original records	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A46 ~ A46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202348699	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 該当する

1. 著者名 Hayakawa Hisashi, Cliver Edward W., Clette Frederic, Ebihara Yusuke, Toriumi Shin, Ermolli Ilaria, Chatzistergos Theodosios, Hattori Kentaro, Knipp Delores J., et al.	4. 巻 959
2. 論文標題 The Extreme Space Weather Event of 1872 February: Sunspots, Magnetic Disturbance, and Auroral Displays	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 23 ~ 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acc6cc	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 該当する

1. 著者名 Hayakawa Hisashi, Bechet Sabrina, Clette Fr?d?ric, Hudson Hugh S., Maehara Hiroyuki, Namekata Kosuke, Notsu Yuta	4. 巻 954
2. 論文標題 Magnitude Estimates for the Carrington Flare in 1859 September: As Seen from the Original Records	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L3 ~ L3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/acd853	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 該当する

1. 著者名 Hayakawa Hisashi, Arlt Rainer, Iju Tomoya, Besser Bruno P.	4. 巻 13
2. 論文標題 Karl von Lindener 's sunspot observations during 1800?1827: Another long-term dataset for the Dalton Minimum	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Space Weather and Space Climate	6. 最初と最後の頁 33 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/swsc/2023023	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 該当する

1. 著者名 Hayakawa Hisashi、Carrasco V?ctor M S、Aparicio Alejandro J P、Villalba??lvarez Joaquin、Vaquero Jos? M	4. 巻 528
2. 論文標題 An Overview of Sunspot Observations in the Early Maunder Minimum: 1645?1659	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 6280 ~ 6291
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad3922	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 該当する

1. 著者名 Hayakawa Hisashi、Ebihara Yusuke、Pevtsov Alexei A	4. 巻 527
2. 論文標題 Analyses of Equatorward Auroral Extensions during the Extreme Geomagnetic Storm on 15 July 1959	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 7298 ~ 7305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad3556	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 該当する

1. 著者名 Hayakawa Hisashi、Suyama Toru、Clette Fr?d?ric、Bhattacharya Shreya、Lef?vre Laure、Ohnishi Kouji	4. 巻 stad2791
2. 論文標題 Katsue Misawa's sunspot observations in 1921-1934: a primary reference for the Wolfer-Brunner transition	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad2791	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 該当する

1. 著者名 Miyake Fusa、Hakozaki Masataka、Kimura Katsuhiko、Tokanai Fuyuki、Nakamura Toshio、Takeyama Mirei、Moriya Toru	4. 巻 9
2. 論文標題 Regional Differences in Carbon-14 Data of the 993 CE Cosmic Ray Event	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Astronomy and Space Sciences	6. 最初と最後の頁 886140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fspas.2022.886140	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 該当する

1. 著者名 Spiegel T. C., Yoden S., Langematz U., Sato T., Chhin R., Noda S., Miyake F., Kusano K., Schaar K., Kunze M.	4. 巻 127
2. 論文標題 Modeling the Transport and Deposition of ¹⁰ Be Produced by the Strongest Solar Proton Event During the Holocene	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 e2021JD035658
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JD035658	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 該当する

1. 著者名 Takeyama Mirei, Moriya Toru, Saitoh Hisako, Miyahara Hiroko, Miyake Fusa, Ohyama Motonari, Sato Rimi, Shitara Rie, Sakurai Hirohisa, Tokanai Fuyuki	4. 巻 538
2. 論文標題 Present status of the YU-AMS system and its operation over the past 10 years	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 30 ~ 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2023.01.021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 三宅美沙	4. 巻 65
2. 論文標題 14C分析による過去の極端太陽面爆発の調査	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本原子力学会誌	6. 最初と最後の頁 34-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sano Masaki, Pumijumng Nathsuda, Fujita Koji, Hakozaki Masataka, Miyake Fusa, Nakatsuka Takeshi	4. 巻 65
2. 論文標題 A WIGGLE-MATCHED 297-YR TREE-RING OXYGEN ISOTOPE RECORD FROM THAILAND: INVESTIGATING THE 14C OFFSET INDUCED BY AIR MASS TRANSPORT FROM THE INDIAN OCEAN	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Radiocarbon	6. 最初と最後の頁 505 ~ 519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/RDC.2023.14	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 該当する

1. 著者名 Hayakawa Hisashi、Hattori Kentaro、Soma Mitsuru、Iju Tomoya、Besser Bruno P.、Kosaka Shunsuke	4. 巻 941
2. 論文標題 An Overview of Sunspot Observations in 1727-1748	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 151 ~ 151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac6671	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 該当する

1. 著者名 Hayakawa Hisashi、Soma Mitsuru、Daigo Ryuma	4. 巻 74
2. 論文標題 Analyses of historical solar eclipse records in Hokkaido Island in the 18-19th centuries	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1275 ~ 1286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac064	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 -

1. 著者名 Clette F.、Lefevre L.、Chatzistergos T.、Hayakawa H.、Carrasco V. M. S.、Arlt R.、Cliver E. W.、Dudok de Wit T.、Friedli T. K.、Karachik N.、Kopp G.、Lockwood M.、Mathieu S.、Munoz-Jaramillo A.、Owens M.、Pesnell D.、Pevtsov A.、Svalgaard L.、Usoskin I. G.、van Driel-Gesztelyi L.、Vaquero J. M.	4. 巻 298
2. 論文標題 Recalibration of the Sunspot-Number: Status Report	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Solar Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11207-023-02136-3	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 該当する

1. 著者名 Uneme Shoma、Imada Shinsuke、Lee Harim、Park Eunsu、Hayakawa Hisashi、Iju Tomoya、Moon Yong-Jae	4. 巻 74
2. 論文標題 Inference of magnetic field during the Dalton minimum: Case study with recorded sunspot areas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 767 ~ 776
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac032	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 該当する

1. 著者名 Miyake F., Panyushkina I. P., Jull A. J. T., Adolphi F., Brehm N., Helama S., Kanzawa K., Moriya T., Muscheler R., Nicolussi K., Oinonen M., Salzer M., Takeyama M., Tokanai F., Wacker L.	4. 巻 48
2. 論文標題 A Single Year Cosmic Ray Event at 5410 BCE Registered in ¹⁴ C of Tree Rings	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021GL093419	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 該当する

1. 著者名 Kanzawa K., Miyake F., Horiuchi K., Sasa K., Takano K., Matsumura M., Takahashi T., Motizuki Y., Takahashi K., Nakai Y., Ohtani K., Tada Y., Ochiai Y., Motoyama H., Matsuzaki H., Yamazaki A., Muramatsu Y., Yamagata T.	4. 巻 126
2. 論文標題 High Resolution ¹⁰ Be and ³⁶ Cl Data From the Antarctic Dome Fuji Ice Core (?100?Years Around 5480 BCE): An Unusual Grand Solar Minimum Occurrence?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JA029378	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 該当する

1. 著者名 Hayakawa Hisashi, Uneme Shoma, Besser Bruno P., Iju Tomoya, Imada Shinsuke	4. 巻 919
2. 論文標題 Stephan Prantner 's Sunspot Observations during the Dalton Minimum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abee1b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Reimer Paula J, et al.	4. 巻 62
2. 論文標題 The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0?55 cal kBP)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Radiocarbon	6. 最初と最後の頁 725 ~ 757
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/RDC.2020.41	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 該当する

1. 著者名 Wacker L, et al.	4. 巻 62
2. 論文標題 Findings from an in-Depth Annual Tree-Ring Radiocarbon Intercomparison	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Radiocarbon	6. 最初と最後の頁 873 ~ 882
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/RDC.2020.49	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 該当する

1. 著者名 三宅美沙	4. 巻 870号 (11月号)
2. 論文標題 古木から読み解く過去の宇宙	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本歴史	6. 最初と最後の頁 74-75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計34件 (うち招待講演 16件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 三宅美沙、箱崎 真隆、早川 尚志、Lukas Wacker
2. 発表標題 樹木年輪14C分析による19世紀の極端太陽高エネルギー粒子イベントの調査
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 三宅美沙、栗田直幸、堀内一穂、的場澄人、松崎浩之、山形武靖
2. 発表標題 南極ドームふじ氷床から探る過去の極端太陽高エネルギー粒子現象
3. 学会等名 AMSシンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 三宅美沙、栗田直幸、堀内一穂、的場澄人、松崎浩之、山形武靖
2. 発表標題 DFにおける過去70年間の ¹⁰ Be変動
3. 学会等名 極地研共同研究集会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Fusa Miyake, Masataka Hakozaiki, Hisashi Hayakawa, Lukas Wacker
2. 発表標題 Investigation of extreme solar energetic particle events in the 19th century
3. 学会等名 Sun-Climate Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三宅美沙
2. 発表標題 年輪の C14 分析による過去の極端太陽面爆発の調査
3. 学会等名 「宇宙線で繋ぐ文明・地球環境・太陽系・銀河 2023」研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fusa Miyake, Masataka Hakozaiki, Hisashi Hayakawa, Lukas Wacker
2. 発表標題 Investigation of extreme solar events in the 19th century from tree-ring ¹⁴ C data
3. 学会等名 38th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fusa Miyake, Naoyuki Kurita, Kazuho Horiuchi, Sumito Matoba, Hiroyuki Matsuzaki, Takeyasu Yamagata
2. 発表標題 Investigating the sub-annual ^{10}Be variation at the Antarctic Dome Fuji for the past 70 years
3. 学会等名 EA-AMS (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 F. Miyake, M. Hakozaiki, R. Hantemirov, H. Hayakawa, S. Helama, K. Horiuchi, A.J. T. Jull, K. Kimura, H. Maehara, H. Miyahara, T. Moriya, M. Oinonen, I. P. Panyushkina, K. Sasa, M. Takeyama, F. Tokanai
2. 発表標題 Toward an exploration of extreme SEP events for the past 10,000 years
3. 学会等名 The 5th ISEE Symposium: Toward the Future of Space?Earth Environmental Research (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F. Miyake
2. 発表標題 Solar bursts recorded in tree rings
3. 学会等名 From Forests to Heritage (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F. Miyake
2. 発表標題 Carbon-14 spikes caused by solar energetic particle events
3. 学会等名 AmeriDendro2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F. Miyake
2. 発表標題 1. Regional difference of 14C data, 2. Small 14C increase events
3. 学会等名 ISSI meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三宅美沙
2. 発表標題 年輪から紐解く過去の太陽活動
3. 学会等名 憲章記念日講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F. Miyake, Masataka Hakozaiki, Katsuhiko Kimura, Fuyuki Tokanai, Toshio Nakamura, Mirei Takeyama, Toru Moriya, Irina Panyushkina, Rashit Hantemirov, Samuli Helama, A J Timothy Jull
2. 発表標題 Toward detections of 14C spikes: regional differences in 14C data
3. 学会等名 24th Radiocarbon & 10th 14C & Archaeology international conferences (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F. Miyake
2. 発表標題 Extreme solar energetic particle events recorded in cosmogenic nuclides data
3. 学会等名 Space Climate 8 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 F. Miyake
2. 発表標題 Report on new proxy data and detected time lags of 14C data between different latitudes
3. 学会等名 ISEE International Joint Research Program (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三宅美沙
2. 発表標題 過去1万年間に生じた大規模な太陽高エネルギー粒子イベント
3. 学会等名 第152回 SGEPS (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三宅美沙、箱崎 真隆、Rashit Hantemirov、早川 尚志、Samuli Helama、堀内 一穂、A.J.Timothy Jull、木村 勝彦、前原 裕之、宮原 ひろ子、森谷 透、Markku Oinonen、Irina Panyushkina、笹 公和、武山 美麗、門叶 冬樹
2. 発表標題 過去1万年間の極端太陽高エネルギー粒子現象の調査
3. 学会等名 AMSシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三宅美沙
2. 発表標題 過去1万年間の極端太陽高エネルギー粒子イベントの調査
3. 学会等名 2022年度太陽研連シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三宅美沙, 箱崎 真隆, 早川 尚志, Lukas Wacker
2. 発表標題 樹木年輪の14C分析による19世紀の太陽活動の調査
3. 学会等名 第70回応用物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三宅美沙
2. 発表標題 日本産樹木試料を用いた西暦992年宇宙線イベントの再検証
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 早川尚志
2. 発表標題 アナログ記録による過去の激甚宇宙天気現象の事例研究：磁気擾乱とオーロラ低緯度境界
3. 学会等名 GIC研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 箱崎真隆
2. 発表標題 酸素同位体比年輪年代法の標準年輪曲線の構築状況と北東アジアにおける年代測定事例について
3. 学会等名 2021年度「樹木年輪」研究会シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Horiuchi
2. 発表標題 Spatial variations of ^{10}Be in surface snow along the inland traverse route of Japanese Antarctic Research Expedition
3. 学会等名 15th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宅美沙
2. 発表標題 樹木年輪を用いた過去の太陽活動の研究
3. 学会等名 令和3年度 東海・北陸地区国立大学法人等 技術職員合同研修 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宅美沙
2. 発表標題 宇宙線生成核種を用いた過去の極端太陽現象の調査
3. 学会等名 日本質量分析学会同位体比部会2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Miyake
2. 発表標題 Events 660BC, 5410BC and search for new events
3. 学会等名 ISSI meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宅美沙
2. 発表標題 樹木年輪の炭素14データに記録された紀元前5410年の宇宙線イベント
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀内一穂
2. 発表標題 多数試料Be同位体分析による古宇宙線変動の解明と古記録間の同期
3. 学会等名 日本地球化学会第68回年会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hayakawa, H
2. 発表標題 Extreme space weather events in the observational history: the Carrington event and others
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Miyake
2. 発表標題 Search for past SEP events using tree-ring 14C data
3. 学会等名 3rd International Radiocarbon in the Environment Conference（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宅美沙
2. 発表標題 過去1万年間の太陽活動
3. 学会等名 共同研究「総合資料学の創成と日本歴史文化に関する研究資源の共同利用基盤構築」2021年度異分野連携ユニット第1回（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F Miyake
2. 発表標題 Extreme solar particle events shown in carbon-14 data
3. 学会等名 AGU fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 F Miyake
2. 発表標題 Current status of collection of cosmogenic data in Nagoya
3. 学会等名 ISEE International Joint Research Program "Modeling the transport and deposition of cosmogenic isotopes of historical MIYAKE Events and recent (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宅美沙ら
2. 発表標題 樹木年輪中放射性炭素を用いたキャリントンSEP(Solar Energetic Particle) イベントの探査 I I
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 国立歴史民俗博物館、箱崎 真隆、橋本 雄太	4. 発行年 2023年
2. 出版社 国立歴史民俗博物館	5. 総ページ数 112
3. 書名 REKIHAKU 特集・推定不能 炭素14研究がとらえた未知の巨大太陽フレアの謎	

〔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
研究分担者	堀内 一穂 (Horiuchi Kazuho) (00344614)	弘前大学・理工学研究科・准教授 (11101)	
研究分担者	箱崎 真隆 (Hakozaki Masataka) (30634414)	国立歴史民俗博物館・大学共同利用機関等の部局等・准教授 (62501)	
研究分担者	早川 尚志 (Hayakawa Hisashi) (10879787)	名古屋大学・高等研究院(宇宙)・特任助教 (13901)	

	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
研究協力者	-- (Wacker Lukas)		
研究協力者	門叶 冬樹 (Tokanai Fuyuki)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	-- -- (Xu Chenxi)		
研究協力者	-- -- (Zhao Yaru)		
研究協力者	中野 晟輝 (Nakano Naruki)		
研究協力者	多田 悠馬 (Tada Yuma)		
研究協力者	太田 象三 (Ohta Shozo)		

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			
スイス	ETH Zurich			
中国	中国科学院			