

4.3.2 過去の宇宙線強度変動の詳細解析

宮原 ひろ子 (武蔵野美術大学)

(2019年12月6日受付、2021年5月31日公開)

過去の太陽活動の変動にともなう宇宙線強度の変動を復元する上で基盤となるのは、樹木年輪や氷床などの年層に含まれる宇宙線生成核種の濃度のデータである。炭素 14 (半減期: 5730 年) やベリリウム 10 (半減期: 136 万年) が広く用いられているほか、塩素 36 (半減期: 30 万 8000 年) も指標として用いられる。これらは、地球に飛来した宇宙線と地球大気成分との核相互作用によって生成される。炭素 14 は、生成後は二酸化炭素となり炭素循環を経て光合成により植物にとりこまれる。ベリリウム 10 や塩素 36 などは大気循環を経た後に降雪などによって地表面に降下し、南極やグリーンランド等の氷床に取り込まれるほか、湖底あるいは海底の堆積物の年層にも取り込まれる。

宇宙線生成核種のデータには各々長所と短所がある。例えば、炭素 14 は、主に大気、海洋、生物圏から成る炭素循環を経る際に変動が大きく減衰するため、特に十年以下のスケールの変動の情報などが失われやすいという欠点がある。また、計測された変動から宇宙線強度変動を復元するためには、炭素循環をモデリングして炭素 14 の生成率を算出する必要があるため、不確実性が生じる。一方で、炭素 14 のデータは明確な年層を持つ樹木年輪から取得されるため、少なくとも過去 1 万年間については、正確な時間軸で宇宙線強度を復元することが可能である。樹木年輪の絶対年代の決定には、年輪幅のパターンを解析することによる年輪年代法 (Douglass, 1937; Douglass, 1946) と、核実験による大気圏内の炭素 14 の濃度のピークが 1963 年の年輪に見られること (Cain & Suess, 1976) の 2 つが用いられる。

一方、ベリリウム 10 は降雪等により地表面に降下するため、大気中での減衰は少ない。しかしながら、気候変動、特に降雪量や降水量などの変動による影響を受けやすいため、それを十分に補正できるかどうかは正確な宇宙線情報の復元に影響する。ベリリウム 10 を用いた宇宙線強度の復元には氷床コアが用いられることが多いが、絶対年代の決定に数年以上の誤差を伴うため注意が必要である。数十年以上の長期的な変動の復元を行う際には影響は少ないが、太陽の 11 年周期などの復元をする際には誤差が大きく影響するため、正確な周期長の復元などには不向きである。ベリリウム 10 は湖底堆積物や海底堆積物からもデータを取得することが可能であるが、ベリリウム 10 は土壤に吸着されやすいという特徴を持つため、気候変動などにもなって土壤成分の湖底/海底への集積量に変動が起きた場合は、その影響を受ける。そのため、やはり気候変動の影響を慎重に検討する必要がある。

上記のように、それぞれの宇宙線生成核種のみでは誤差の大きなデータが得られるため、それぞれのメリット/デメリットを考慮に入れながら、複数核種の対比により正確な宇宙線強度の時系列を取得していくことが重要である。これまでに、過去約 1 万年については、複数のデータから共通な変動成分を抽出するなどの方法により、正確な太陽活動の長期変動の復元が行われている (図 1)。より古

い年代については、主に半減期の長いベリリウム 10 の分析により復元が進められている（例えば Horiuchi et al., 2016 など）。

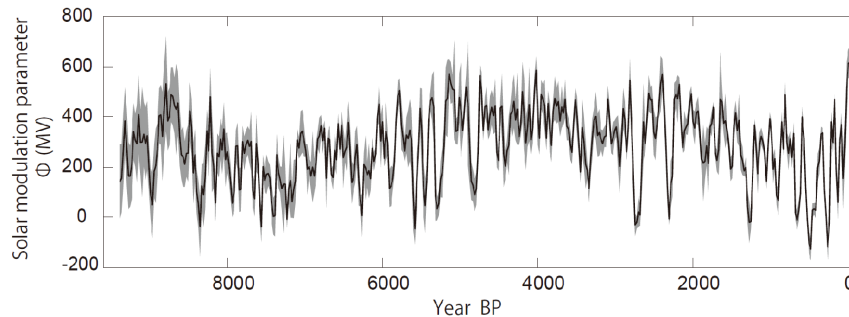


図1. 樹木年輪中の炭素 14 と、複数の氷床コア中ベリリウム 10 のデータにより復元された、過去約 1 万年間の太陽活動変動 (Steinhilber et al., 2012)。

炭素 14 は半減期が比較的に短いため、5 万年程度前までの復元が限界である。一方で、ベリリウム 10 は半減期が長いため、数十万年以上にわたる履歴をたどることが可能である。氷床に関しては、深い年層ほど圧縮を受けやすいため、深い深度では 1 年分解能での分析が困難になるが、南極の氷床コアにおいては現時点で約 3 万年前まで (Sigl et al., 2016)、グリーンランドの氷床コアにおいては約 6 万年前まで (Svensson et al., 2008)、年層の検出が行われている。

最近新たに、トラバーチンと呼ばれる石灰質堆積物の年層からも宇宙線強度の復元が可能であることが示された (Xu et al., 2019; Miyahara et al., 2020)。トラバーチン堆積物は、雨季に土壌成分の流入がある地域では明確な年層が形成されるため、1 年分解能でのデータの取得が可能である。氷床と異なり、トラバーチンは形成後に圧縮を受けないため、深い深度でも 1 年分解能が実現可能である。これまでに 100 万年前までのトラバーチンの存在が確認されており (Capezuoli et al., 2014)、将来的には、より長期間にわたる 1 年分解能での宇宙線強度変動の検証が可能になる可能性がある。

地球に到来する宇宙線の強度は太陽活動度と逆相関の関係にあり、主には、太陽圏磁場強度の変動やパークースパイラル構造の発達の度合いに応じて変動している (Jokipii and Thomas, 1981)。まず、太陽活動が活発化し太陽風の強度が増すと、宇宙線の減衰が大きくなる。また、太陽圏の磁気中性面のスパイラル構造が大きく発達すると、主に陽子から成る宇宙線の軌道がその影響を受けて変化するため、宇宙線はそのエネルギーを失いやすくなる。これらの影響により、数十 GeV 以下の宇宙線が大きく変調を受ける。中性子モニターにより観測される宇宙線量のデータによると、太陽活動の増減にともない 20-25% 程度の変動がみられる。そのほか、突発的なコロナ質量放出によっても宇宙線量の変動が生じる場合がある。

宇宙線の変動において特に特徴的なのは、太陽双極子磁場の反転にともなう 22 年周期変動が顕著に見られるという点である (Kota and Jokipii, 1983)。太陽圏内における宇宙線はサイクロトロン運動をしながらも子午面方向にドリフトを受けており、その向きは太陽双極子磁場の向きに依存して反転する (図 2)。一方で、太陽圏の磁気中性面のスパイラル構造は、太陽活動が活発になり太陽表面での

磁気中性線の傾きが大きくなるほど発達するため、特に磁気中性面に沿って宇宙線が太陽圏内部へ侵入するフェーズにおいて、宇宙線は強くモジュレーションを受ける。それらの影響により、太陽双極子磁場が正極性の 11 年間で負極性の 11 年間で宇宙線変動の波形が異なるため、22 年の周期変動を生じる。この、正極性と負極性の波形の差異は、例えば長期的に太陽活動が低下したり活発化した場合には、特に顕著になる可能性が示唆されている (Miyahara et al., 2008)。

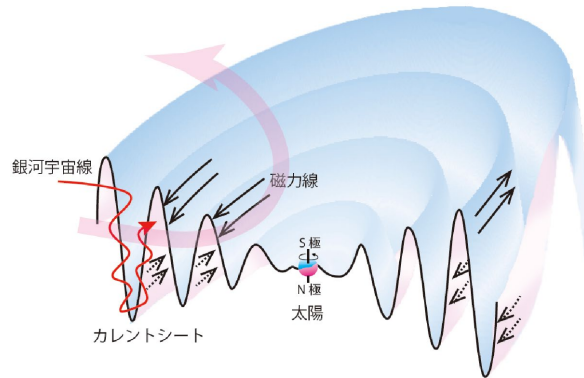


図 2. 太陽圏の磁気中性面のスパイラル構造と銀河宇宙線の軌道の模式図。太い矢印は、太陽の双極子磁場が負極性の際の子午面循環の向き。正極性においては矢印の向きが反転する。

太陽黒点が数十年以上にわたって消失したマウンダー極小期のベリリウム 10 のデータから、太陽周期の極小において磁気中性面が極端に平坦化し、太陽双極子磁場が負極性の年に一時的に 40% もの宇宙線量の増加が起こっていたことが示唆された (Kataoka et al., 2012)。これには、太陽圏の磁気中性面の平坦化に加えて、さらに外側のヘリオシース等の環境も影響していた可能性がある。宇宙線の観測データに基づきモジュレーションの物理に関して理解を深め、より現実的な太陽圏モデルを構築していくことが、今後の宇宙線量を正確に予測する上で必要である。

宇宙線生成核種のデータは、過去の太陽周期の履歴も記録しており、太陽ダイナモの長期的な変動について理解を得ていく上でも重要な役割を果たす。太陽活動の 11 年周期の長さは、太陽の対流層の循環と関係している可能性が示唆されており (Dikpati and Charbonneau, 1999)、太陽活動低下のプロセスを議論する上でも重要な基礎データである。マウンダー極小期の樹木年輪に含まれる炭素 14 の解析からは、太陽周期が約 14 年程度に延びていたことが示された (Miyahara et al., 2004)。この周期の延びは、マウンダー極小期が発生する 2~3 周期前から始まっていたことが示唆されており、またシュペーラー極小期でも同様な傾向が確認されている (Miyahara et al., 2010; Moriya et al., 2019)。太陽活動の実際の周期長をより正確に復元し、より多くの極小期について検証していくことで、太陽活動極小期の規模や継続時間が、どのような要因によって決定づけられるのかなどを議論していくことが可能になってくると考えられる。

宇宙線生成核種の 1 年値のデータは、過去の大規模太陽フレアイベントの検出にも有効であることが近年判明してきている。西暦 774-775 年、993-994 年などに、炭素 14 のデータにおいて太陽周期と

は異なる波形で大幅な値の上昇がみられており (Miyake et al., 2012; Miyake et al., 2013)、これらは大規模な太陽フレアによりエネルギーの高い太陽宇宙線が大量に放出されたことによるものとみられている。西暦 774-775 年と 993-994 年については、ベリリウム 10 と塩素 36 のデータにおいても同様の濃度の上昇がみられている (Mekhaldi et al., 2015)。このような突発的なピークは、天体物理学的な観点や宇宙天気の見点からだけではなく、様々な自然物から復元される時系列データの年代決定の目印としても今後重要な役割を果たしていくだろうと期待される。

参考文献

- Douglass, A. E.: Tree rings and chronology, Univ. Arizona Bull. 8, 1937.
- Douglass, A. E.: Precision of ring dating in tree-ring chronologies, Univ. Arizona Bull. 17, 1946.
- Cain, W. F., Suess, H. E.: Carbon 14 in tree rings, J. Geophys. Res. 81, 3688-3694, 1976.
- Steinhilber, F., et al.: 9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings, Proc. Natl. Acad. Sci. 109, 5967-1971 (2012)
- Horiuchi, K., et al.: Multiple ^{10}Be records revealing the history of cosmic-ray variations across the Iceland Basin excursion, Earth Planet. Sci. Lett. 440, 105-114 (2016)
- Sigl, M., et al.: The WAIS Divide deep ice core WD2014 chronology – Part 2: Annual-layer counting (0–31 ka BP), Clim. Past 12, 769-786 (2016)
- Svensson, K., et al.: A 60 000 year Greenland stratigraphic ice core chronology, Clim. Past 4, 47-57 (2008)
- Miyahara, H., et al.: Measurement of beryllium-10 in terrestrial carbonate deposits from South China: A pilot study, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 464, 36-40 (2020)
- Xu, H., et al.: High-resolution records of ^{10}Be in endogenic travertine from Baishuitai, China: A new proxy record of annual solar activity?, Quat. Sci. Rev. 216, 34-46 (2019)
- Capezuoli, E., Gandin, A., Pedley, M.: Decoding tufa and travertine (fresh water carbonates) in the sedimentary record: The state of the art, Sedimentology 61, 1-21 (2014)
- Jokipii, J. R., Thomas, B.: Effects of drift on the transport of cosmic rays IV - Modulation by a wavy interplanetary current sheet, Astrophys. J. 243, 1115-1122 (1981)
- Kota, J., Jokipii, J. R.: Effects of drift on the transport of cosmic rays. VI - A three-dimensional model including diffusion, Astrophys. J. 265, 573-581 (1983)
- Miyahara, H., Yokoyama, Y., Masuda, K.: Possible link between multi-decadal climate cycles and periodic reversals of solar magnetic field polarity, Earth Planet. Sci. Lett. 272, 290-295 (2008)
- Kataoka, R., Miyahara, H., Steinhilber, F.: Anomalous ^{10}Be spikes during the Maunder Minimum: Possible evidence for extreme space weather in the heliosphere, Space Weather 10, S11001 (2012)

- Dikpati, M., Charbonneau, P.: A Babcock-Leighton flux transport dynamo with solar-like differential rotation, *Astrophys. J.* 518, 508-520 (1999)
- Miyahara, H., et al.: Cyclicity of solar activity during the Maunder Minimum deduced from radiocarbon content, *Sol. Phys.* 224, 317-322 (2004)
- Miyahara, H., et al.: Is the Sun heading for another Maunder Minimum? —Precursors of the grand solar minima, *J. Cosmology* 8, 1970-1982 (2010)
- Moriya, T., et al.: A Study of variation of the 11-year solar cycle before the onset of the Sporer Minimum based on annually measured ¹⁴C content in tree rings, *Radiocarbon*, in press.
- Miyake, F., et al.: A signature of cosmic-ray increase in AD 774–775 from tree rings in Japan, *Nature* 486, 240-242 (2012)
- Miyake, F., Masuda, K., Nakamura, T.: Another rapid event in the carbon-14 content of tree rings, *Nature Comm.* 4, 1748 (2013)
- Mekhaldi, F.: Multiradionuclide evidence for the solar origin of the cosmic-ray events of AD 774/5 and 993/4, *Nature comm.* 6, 8611 (2015)