

トラバーチン堆積物を用いて 太陽活動と宇宙線の歴史を探る

宮原ひろ子
Miyahara Hiroko

はじめに

樹木年輪に含まれる炭素 14 (^{14}C) や極域の氷床の年層に含まれるベリリウム 10 (^{10}Be) 等の宇宙線生成核種は、過去の太陽活動史や宇宙線変動史を紐解く貴重なツールとなっています。太陽活動には数百～数千年スケールの長期的な変動がありますが、太陽の連続的な直接観測データは 17 世紀以降のものしか存在せず、長期的な変動の物理に迫るには不十分です。また、頻度が低いながらも規模が大きい太陽フレアが発生し得ることも近年明らかとなり、過去に発生した太陽フレアの探索にも宇宙線生成核種は用いられています。

太陽フレアのような突発的な現象を探索したり、あるいは太陽ダイナモ物理の鍵を握ると考えられている太陽活動の 11 年周期についての情報を得るためには、1 年分解能でのデータの取得が必要不可欠です。しかしながら、それが達成できるのは、樹木年輪や氷床コアを使った場合、最近の数万年間が限界とされています。そこで筆者らは、太陽活動や宇宙線の変動史を復元できる新たなツールの開拓を試みてきました。その結果、トラバーチンと呼ばれる石灰質堆積物に含まれる ^{10}Be が、太陽活動や宇宙線の変動を記録している可能性があることが示唆されました。

1. 宇宙線生成核種を用いた太陽活動史と宇宙線変動史の研究

過去の太陽活動や宇宙線変動の復元には、樹木の

年輪に含まれる ^{14}C (半減期 5,730 年) や、南極やグリーンランドの氷床から掘削されるコアに含まれる ^{10}Be (半減期 139 万年) 等が用いられています。太陽活動が変動すると、太陽風が銀河宇宙線を遮蔽する度合いが変化し、地球に到達する宇宙線の量が変動します。それにより、大気中で生成される宇宙線生成核種の量も変動します。 ^{14}C の場合、宇宙線によって生成された後、二酸化炭素となり炭素循環を経て、光合成により樹木に取り込まれます。 ^{10}Be の場合は、大気中のエアロゾル等に吸着し、降雪等にもなって氷床に降下します。5～10 年分解能での宇宙線生成核種の分析により、過去 1 万年間の太陽活動や宇宙線の長期的な変動についてはかなり理解が進んできています。一方で、1 年分解能でのデータは、まだ断片的にしか取得されていません。2012 年に名古屋大学の研究チームによって大規模な太陽フレアの痕跡と考えられる ^{14}C のピークが発見されて以来、各国の研究チームによって活発に高時間分解・高精度データの取得が進められています。

樹木を用いる場合、厳密な 1 年分解能でデータの取得が可能である一方で、 ^{14}C の半減期が 5,730 年であるため、データが取得できるのは 5～6 万年ほど前までが限界とされています。 ^{10}Be を用いればより古い時代に遡ることができますが、氷の年層が深い方ほど圧縮されてしまうため、1 年分解能を達成できるのは、現時点では 4～5 万年ほど前までが限界です。

地球に降り注ぐ宇宙線は、ほかに、地磁気によっても変動します。地磁気が弱い時代は、銀河宇宙線や太陽フレア起源の宇宙線が地球大気に到達しやすくなります。地球の宇宙線環境変動を包括的に明ら



図1 中国雲南省に広がるトラバーチンの地形と採取された試料の年層

かにするためには、1年分解能でなるべく古い時代まで遡ることが肝要です。

2. トラバーチン堆積物に含まれる ^{10}Be

筆者らは2015年頃より、トラバーチンと呼ばれる石灰質堆積物（図1）を用いた宇宙線変動の復元に取り組んできました。トラバーチンは炭酸泉を起源とする表層水から炭酸カルシウムが沈殿したもので、乾期と比べて雨期に土壌粒子の流入が増すことで年層が形成されます。年層は1cmほどの厚みを持ち、氷床と異なり圧縮の影響をほとんど受けません。もしトラバーチンに含まれる ^{10}Be が宇宙線の変動を保存しているとすれば、数十万年前の時代でも1年分解能でのデータ取得を達成できる可能性が拓かれることになります。

分析の結果、土壌粒子の混入が少ない乾期の明色層に含まれる ^{10}Be を抽出し分析することで、宇宙線の変動が復元できる可能性があることが示唆されました¹⁾。ただし、乾期でもわずかながら土壌粒子の流入が発生しており、降水の影響をまったく受けないわけではないということも分かりました。そこで、 ^{10}Be に加えて ^9Be 、カリウム、鉄等についても分析し、堆積プロセスや降水量変動の影響を除去することを試みました。

その結果、図2に示すように、宇宙線の変動に対して約2年の遅れで、トラバーチンの年層に含まれる ^{10}Be の変動が良い一致を示すことが明らかとなりました²⁾。2年の遅れは、 ^{10}Be の大気中での平均滞在時間と水循環の時間スケールを足し合わせたものと整合的です。トラバーチンが、樹木の年輪や氷

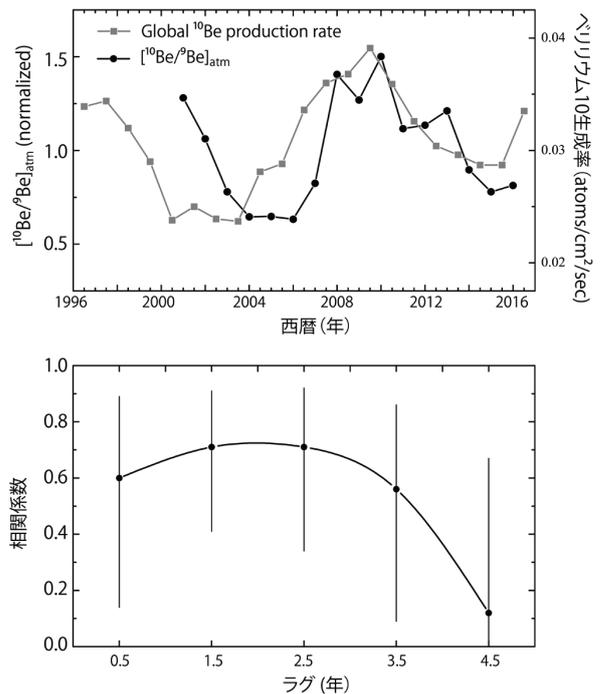


図2 トラバーチンの年層の分析から得られた ^{10}Be の変動偏差（黒）と中性子モニターによって観測された宇宙線量をもとに計算した ^{10}Be の生成率（灰）の比較（上）。両者の相関係数とタイムラグ（下）。Xu, et al., (2019) をもとに改変

床コアに加えて、新たな宇宙線変動の復元ツールとなり得ることが示唆されました。

おわりに

今後、より長期間にわたる分析を進め、トラバーチンに微量に含まれる ^{10}Be の分析手法を確立すると共に、降水にともなう土壌流入の影響を除去する手法の最適化を行っていく必要があります。トラバーチンは古いものでは100万年ほど前のものまで確認されており、分析が進めば、従来よりも格段に長い時代について、精細な太陽活動と宇宙線変動の履歴が明らかになると期待されます。

参考文献

- 1) Miyahara, H., et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, **464**, 36-40 (2020)
- 2) Xu, H., et al., *Quat. Sci. Rev.*, **216**, 34-46 (2019)

(武蔵野美術大学 教養文化・学芸員課程研究室)