

## 太陽フレアが大気中のヘリウム-3の供給源となる

高知大学海洋コア総合研究センター  
カナダ・ケベック大学モントリオール校  
東京大学大気海洋研究所  
国立極地研究所気水圏研究グループ  
フランス・ロレーヌ大学岩石学地球化学研究所

### 発表のポイント

- ◆北極点近くのスバルバード島で、大規模な太陽フレアが発生した2017年9月6日の直後に、大気ヘリウム同位体比の変動を観測した。
- ◆太陽フレアで発生した大量のヘリウム-3が地球に達し、オーロラ降下と同じメカニズムで地球大気に取り込まれたと考えられる。
- ◆このヘリウム-3が、化石燃料の採掘に伴う人為的ヘリウム-4に加わり、大気中のヘリウム同位体比（ヘリウム-3/ヘリウム-4）を一定に保っているのだろう。

### 発表者

佐野有司 (高知大学海洋コア総合研究センター 特任教授・センター長、  
東京大学大気海洋研究所 名誉教授)

Daniele L. Pinti (ケベック大学モントリオール校地球ダイナミクス研究  
センター教授・センター長)

Teresa Escobar-Nakajima (東京大学大気海洋研究所 博士研究員)

高畑直人 (東京大学大気海洋研究所 助教)

Maoliang Zhang (天津大学地球系統科学研究員 准教授)

後藤大吾 (国立極地研究所気水圏研究グループ 助教)

Bernard Marty (フランス・ロレーヌ大学岩石学地球化学研究所 教授)

### 発表概要

大気中のヘリウム濃度の時系列測定は、20世紀初頭からの天然ガス等の採掘による地殻内の<sup>4</sup>Heの人為的供給を示唆している。しかし、大気中の<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比はほぼ一定であり、人為起源<sup>4</sup>Heの大気中への寄与を補う未知の<sup>3</sup>He供給源が必要である。<sup>3</sup>Heは核融合炉や極低温工学に必須な資源でもあり、大気中の<sup>3</sup>Heの起源と循環を知ることは重要である。本研究で

は、北極に近いスバルバード島のニーオルスンにおいて 2017 年 9 月に観測した大気  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比の変動について報告する。2017 年 9 月 6 日に発生した太陽フレアで誘導された太陽風は 9 月 8 日に地球に到達すると予想されていた。太陽フレア直後に採取された計 5 つのサンプルは、地上大気同位体値と比較して、最大  $5.5 \pm 1.7\%$  ( $^3\text{He}$ ) の過剰を示した。もし、太陽フレアによって増強された太陽風がオーロラ降下によって地表大気に供給されれば、極域の大気ヘリウム同位体比が上昇することになる。そして、ヘリウムは拡散によって希釈され、過剰な  $^3\text{He}$  は消滅するだろう。このように、太陽フレアによって供給された過剰な  $^3\text{He}$  は、人為起源の  $^4\text{He}$  とつりあって大気中の  $^3\text{He}/^4\text{He}$  を一定に保っている可能性がある。

## 発表内容

### (1) 背景

大気中のヘリウム濃度は、固体地球からの脱ガスと、上層大気からの流出のバランスによって決定される。しかし、20 世紀以降に加速された化石燃料の採掘と消費は、このバランスを変化させた可能性がある。天然ガスには約 0.25% のヘリウムが含まれており、その同位体比 ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ) は大気中の値 ( $R_a: 1.382 \times 10^{-6}$ ) よりもずっと小さい。もし、天然ガスから流出したヘリウムが大量に大気中に付け加わると、大気中の  $^4\text{He}$  濃度は時間とともに増加し、 $^3\text{He}/^4\text{He}$  比は減少するはずである。しかしこれまでの研究では、大気中の  $^3\text{He}/^4\text{He}$  は一定とされてきた。一方、高精度 ( $\pm 0.07\%$ ) で過去 4 6 年間のヘリウム濃度を測定した結果、 $^4\text{He}$  濃度は 1.9% 増加し、天然ガスからの人為的なヘリウム放出によるものと結論づけられた。このように、 $^3\text{He}/^4\text{He}$  比が一定であるにもかかわらず、人為的に放出された  $^4\text{He}$  が増加しているという明らかな矛盾は、未知の  $^3\text{He}$  供給源が補っていることを示唆している。この  $^3\text{He}$  ソースを「未知のヘリウム-3」と定義する。 $^3\text{He}$  は地球上の重要な資源であり、核融合炉の開発・運転や極低温工学に必要であることから、ヘリウムの起源と循環を知ることは重要である。本研究では、極域で測定された大気中ヘリウム同位体比の変化に基づき、 $^3\text{He}/^4\text{He}$  がほぼ一定であることを説明するために必要な  $^3\text{He}$  の供給源が太陽フレアである可能性を示唆する。

### (2) 実験と結果

本研究で使用した大気試料は、北極に近いスバルバード島ニーオルスンのノルウェーが管理する国際観測村 (北緯 78 度 55 分、東経 11 度 56 分) にて採取された。各サンプルは、ニーオルスンの基地屋上にある空気取り入れ口からダイヤフラム・ポンプで採取し、 $-78^\circ\text{C}$  に冷却した水トラップを通し、あらかじめ真空にした 800ml のステンレス製容器に加圧して導入した。2017 年 9 月 6 日に大規模な太陽爆発、すなわち太陽フレアが発生した。太陽風は 9 月 8 日に地球に到達すると予想された。そこで、空気サンプルの採取日を 2017 年 8 月 30 日から 10 月 18 日までの約一週間間隔の 8 日とした。これらのサンプルは日本まで迅速

に空輸され、国立極地研究所で保管された。2018年5月に試料の一部が東京大学大気海洋研究所に持ち込まれ、ヘリウム同位体比の分析が行われた。測定は個々の試料について2-3回行い、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が  $20.63 \pm 0.10 \text{ Ra}$  ( $\text{Ra}: 1.382 \times 10^{-6}$ ) の合成ヘリウム標準試料 HESJ と比較検討した。そして大気の標準値に規格化された。

ニーオルスンでの大気ヘリウム同位体比のバックグラウンドを決定するために、太陽活動の静穏期にある2020年1月から2021年1月にかけて、約3ヶ月間隔で大気試料を採取し、分析した。これらの $^3\text{He}/^4\text{He}$ の変動を図1に示す。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は-3.0‰から+3.0‰の範囲で変動しており、東京大学キャンパスに近い柏公園で採取した大気標準と実験誤差の範囲で一致している。15回の測定の加重平均と内部誤差は $-0.47 \pm 0.79\text{‰}$ で、統計的に標準大気の数値と区別がつかない。したがって、2020年1月～2021年1月の期間における大気中ヘリウム同位体比の異常はなく、分析システムは有意に安定であると判断できる。

太陽フレア発生時に採取した大気ヘリウム同位体比を図2に示す。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は $-5.6 \pm 3.1\text{‰}$ から $+8.4 \pm 3.4\text{‰}$ まで変動した。18試料中12試料の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は標準大気の数値と誤差の範囲内で一致した。異常を示す6つのデータのうち、2017年9月13日、20日、27日に採取した5つのデータは、明らかに $^3\text{He}$ が過剰であった(図2)。これらのデータは、太陽フレアを強さで区分する太陽嵐スケールでX9.3を記録した9月6日の大規模太陽フレアの直後に採取されたものであり注目される。このX9.3と同等以上の事象は、1975年から2018年までに27回発生しており、その発生は異常なことではない。その他の $^3\text{He}/^4\text{He}$ のデータは、10月4日の1回目のデータが原因不明の $^3\text{He}$ 欠乏を示す以外は、標準大気と一致する。したがって、「未知のヘリウム-3」の供給源は、太陽フレアによって増強された太陽風由来の $^3\text{He}$ の大気への注入であろう。本研究は、太陽フレアによる大気の局所的な $^3\text{He}$ 過剰の検出を初めて示したものである。

### (3) 考察

大気中の $^3\text{He}$ 濃度は、大気中のヘリウム濃度5.24ppmと $^3\text{He}/^4\text{He}$   $1.382 \times 10^{-6}$ から、7.24pptとされる。大気中の $^3\text{He}$ の主な供給源は、中央海嶺からの火山活動による固体地球の脱ガスや惑星間空間からの降下である。太陽で爆発的な現象(太陽フレア)が起こると、大量の $^3\text{He}$ を含むプラズマブルーム(太陽風)が発生し、磁力線に沿った経路で地球に接近する。この $^3\text{He}$ は地球の磁気圏を通過する際に捕獲され、極域の上層大気に降下してくる。この空気は局所的に下方の空気と混合し、暫定的に高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を生み出す可能性がある。このメカニズムはオーロラの形成と関連しており、オーロラ降下と呼ばれ、今回観測された過剰な $^3\text{He}$ を説明できる可能性があります。太陽フレアによって増強された太陽風が、オーロラ降下によって大気中に供給されると、図2に示すように、極域の大気ヘリウム同位体比が上昇するだろう。その後、ヘリウムは拡散によって希釈され、過剰な $^3\text{He}$ は消滅する。

太陽フレアによる $^3\text{He}$ の下方注入の仮説を検証するためには、 $^3\text{He}$ の物質収支に関する議論が必要である。文献によると大気中ヘリウム濃度の増加の研究は、大陸地殻中のヘリウム

( ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}=2\times 10^{-8}$ ) が人為的に  $3.9\pm 0.3\times 10^{10}$  mol/year 供給されることを示唆している。人為的な  ${}^4\text{He}$  の添加を補償し、大気中の  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比を一定に保つためには、年間  $6.3\pm 2.5\times 10^4$  mol の  ${}^3\text{He}$  の付加が必要である。天然ガスは海洋堆積物中で形成されることが多いので、そのヘリウム同位体比は、報告された海洋堆積物間隙水の平均値  $4.5\times 10^{-7}$  と仮定してもよいだろう。この場合に必要な同位体比の変化は  $+0.028\pm 0.022\%$ /年である。したがって、バランスすべきヘリウム同位体比の変動は  $0.028\pm 0.020\%$ /年 $\sim 0.049\pm 0.020\%$ /年となる。

太陽フレアによって注入された  ${}^3\text{He}$  の総量は、図 2 に示すように、大気中のヘリウム同位体比の変動から推定することができる。ヘリウム同位体比の偏差は 9 月 13 日から 9 月 27 日まで続き、6 つの異常値から算出した平均過剰は  $5.5\pm 1.7\%$  であった。オーロラ降下が有効な極域に相当する地球面積は、全地球面積の約 3% と推定される。5.5% の  ${}^3\text{He}$  過剰が全球で拡散・希釈されるとすると、たった 1 回のイベントによって大気全体の  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比が 0.165% 増加することになる。観測結果によると、1975 年から 2018 年までに X9.0 より大きいイベントが 27 回あった。ほぼ 2 年に 1 回の割合で太陽フレア現象が発生していることを意味する。これらのイベントが大気に同様の影響を与えるとすると、大気ヘリウム同位体比の増加は平均  $0.10\pm 0.03\%$ /年となり、上記で計算・予測した  $0.028\text{--}0.049\%$ /年よりも大きくなる。このように、太陽フレアの大規模現象は、たとえ上記の複雑な大気循環プロセスによって希釈されたとしても、人為的な  ${}^4\text{He}$  の添加を補償するのに十分な  ${}^3\text{He}$  を大気中に供給できる。

#### 発表雑誌

雑誌名: Geochemical Perspectives Letter **23**, 49–52.

論文タイトル: Sun flare activity may solve unknown source of helium-3 in the atmosphere

著者: Sano, Y., Pinti, D.L., Escobar-Nakajima, T., Takahata, N., Zhang, M., Goto, D., Marty B.

DOI 番号: <https://doi.org/10.7185/geochemlet.2237>

2022年10月18日掲載

#### 問い合わせ先

高知大学 海洋コア総合研究センター

佐野 有司

電話: 088-864-6712 (事務室)

E-mail: [yuji.sano@kochi-u.ac.jp](mailto:yuji.sano@kochi-u.ac.jp)

添付資料：

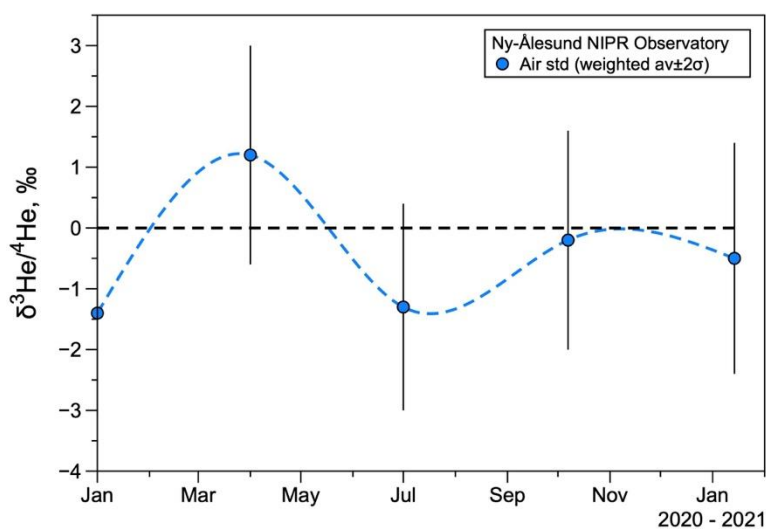


図1 北極点近くのスバルバード島ニーオルスンにおける、2020年1月から2021年1月までの大気中のヘリウム同位体比の変動。 $\delta^3\text{He}/^4\text{He}$ 値は大気標準の値からの偏差を千分率で示すもの。

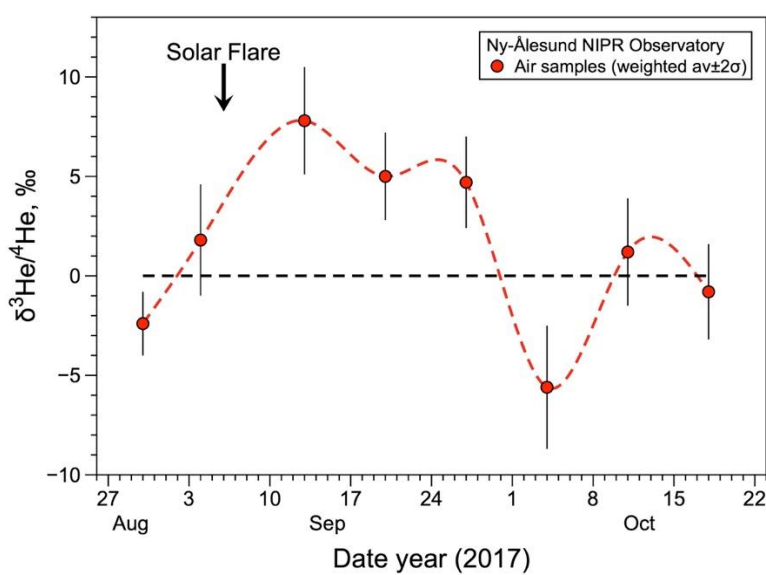


図2 北極点近くのスバルバード島ニーオルスンにおける、2017年8月30日から10月18日までの大気中のヘリウム同位体比の変動。矢印は9月6日に起きた太陽フレアを表す。 $\delta^3\text{He}/^4\text{He}$ 値は大気標準の値からの偏差を千分率で示すもの。