

3.1.6 コラム：宇宙回収サンプルに記録された CME

塚本 尚義（北海道大学）

（2020年3月30日受付、2021年5月31日公開）

3.1.6.1 序論

米国 NASA が 2001 年 8 月 8 日に打ち上げた Genesis 探査機は、人類初の太陽風のサンプルリターンミッションである (Burnett, 2013)。同年 12 月 3 日から 2004 年 4 月 1 日までの 2 年 4 ヶ月間、探査機は太陽と地球の間のラグランジュ点 (L_1) において、4 枚の太陽風収集アレイを展開して太陽風の採取を行った (図 1)。太陽風は平均速度が約 450 km s^{-1} の荷電粒子からなる。この高速の荷電粒子がアレイ表面に衝突すると、アレイ中に注入されることを利用した太陽風収集法である。この収集期間後半の 2003 年 10 月末から 11 月初めにかけて、米国の静止気象衛星 GOES の観測史上最大の太陽嵐 (2003 年のハロウィーン太陽嵐と呼ばれている) が発生した。この太陽嵐による地上の被害は幸い限定的なものであったが、当時運行中の多くの人工衛星・惑星探査機に大きな影響があった (NOAA, 2004)。例えば、太陽風を常時観測している米国 ACE 探査機は、この太陽風により一部の検出器が損傷を受けた。

ACE 探査機は 1997 年 8 月 25 日に打ち上げられ、Genesis 探査機の太陽風収集地点と同じラグランジュ点 (L_1) において、現在も、太陽観測を続けている。したがって、Genesis 太陽風収集アレイに照射された期間の太陽風の経時変化が、この探査機により記録されている。ACE 探査機の SWICS 測定器が観測した太陽風 He 粒子の速度変化を、Genesis 太陽風収集期間において、積算して得られた太陽風 He 粒子数の速さ分布図を図 2 に示す。同じ観測データから新旧 2 種類のキャリブレーションにより得られた速さ分布を比較すると、太陽風の低速度成分と高速度成分の速さ分布は一致が良いにも関わらず、速さが 1000 km s^{-1} を超えるコロナ質量放出 (CME) 成分については 1 桁以上の不一致がある。時系列測定により CME 成分のこの部分は、2003 年のハロウィーン太陽風の積分値を表していることがわかっている。このキャリブレーションの不一致は、もしかすると、ハロウィーン太陽嵐により発生した高フラックスの太陽風に起因する装置上の不具合の発生のせいなのかもしれない。探査機を用いた観測は、原理的に測定が一度きりなので、キャリブレーションに不定性が見つかった時は、定量性の正確さを検証することが難しい。

一方、Genesis 収集アレイに採取された太陽風は、収集期間中の積分値であるので、期間中の経時変化を見ることはできないが、その期間の太陽風は太陽風収集アレイの物質中に保存されている。そのため、アレイの物質を何回でも測定し、再現性を検討できる。ただし、その測定法は、定量性を含め、これまで全く未踏であった。今回、二次イオン質量分析法を工夫することに加え、新しい二次中性粒子質量分析法を開発し、ハロウィーン太陽嵐の CME 太陽風を Genesis 収集アレイから測定すること

に初めて成功した。この方法は、地質学的試料から過去の太陽嵐の歴史を解読することにも応用できる。

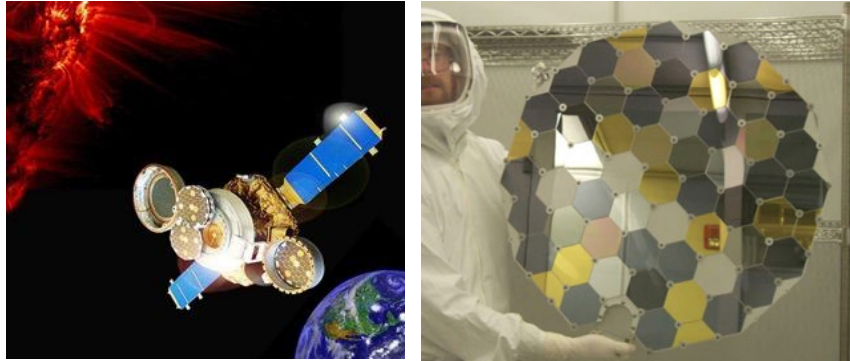


図1. ラグランジュ点(L1)において太陽風を採集しているNASA Genesis 探査機の模式図(左)と太陽風収集アレイ(右)
(クレジット: JPL NASA)

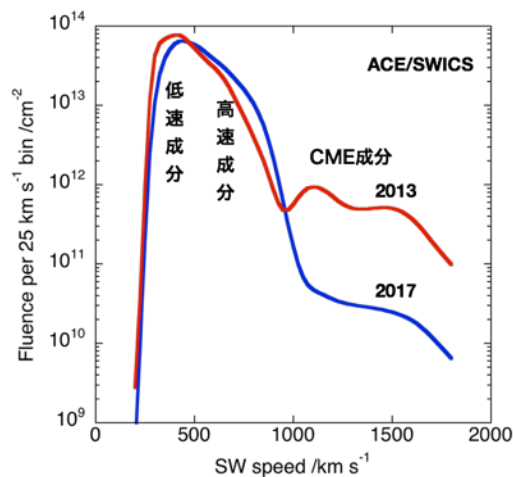


図2. ACE/SWICS の測定値から推定された太陽風 He 粒子数の速さ分布。グラフは Genesis 運用期間 (2001 年 12 月～2004 年 3 月) の太陽風 He の積分値。2013 年 (赤線, (Reisenfeld et al., 2013)) と 2017 年 (青線, Reisenfeld, 私信) のキャリブレーション結果の比較。

3.1.6.2 固体中に注入された太陽風の分析法

太陽風を構成する主な元素は、水素 (95%) とヘリウム (5%) である。また、太陽風のような数～数百 keV の運動エネルギーを持つ荷電粒子が固体に衝突すると、個々の粒子のエネルギーの大きさに応じ、固体の表面から約数～数百 nm の深さに、注入される。従来、このような固体中に注入された粒子を分析するために、二次イオン質量分析法 (SIMS) が用いられてきた。SIMS による水素の検出感度は大きいので、水素分析に対して SIMS の適用は合理的である (Greenwood et al., 2011)。本研

究で用いた SIMS はマイクロメートルサイズに絞った Cs の一次イオンビームを固体表面に照射し、スパッタリングに伴い発生する二次イオンを質量分析した。この時、水素検出のバックグラウンドは、スパッタされている一次イオン照射面上への真空中の残留水蒸気の吸着量により決定され、本実験では数 ppm であった。深さ方向の空間分解能は約 5nm である。

一方、ヘリウムはもっとも大きいイオン化エネルギーを持つ元素なので二次イオンになる効率が非常に小さい。そのため、SIMS に代わる新しい分析法が必要である。我々は、固体中に注入されたヘリウムを分析するため同位体ナノスコープ (LIMAS, 日本電子) を開発した (Bajo et al., 2015; Tonotani et al., 2016) (図 3)。同位体ナノスコープはナノメートルサイズの Ga の一次イオンビームを固体表面に照射し、スパッタリングにより発生する二次中性粒子を、高強度レーザーによりトンネルイオン化し、質量分析する新しい二次中性粒子質量分析法 (SNMS) である。本研究の条件では、トンネルイオン化により He では 70%、その他の元素では 100% のイオン化が起きる。注意するのは、このトンネルイオン化の時、レーザービーム中にある真空中の残留ガスも同時にイオン化されることである。分析中のサンプル室の真空度は全圧 10^{-9} Pa なので、He の分圧はもっと小さいが、それでもイオン化された残留ガス中の He がバックグラウンド信号として検出される。このヘリウム検出のバックグラウンドは、固体中の He 原子濃度換算で、数 ppm に相当する。また、SIMS 同様、深さ方向の空間分解能は、こちらも約 5nm である。

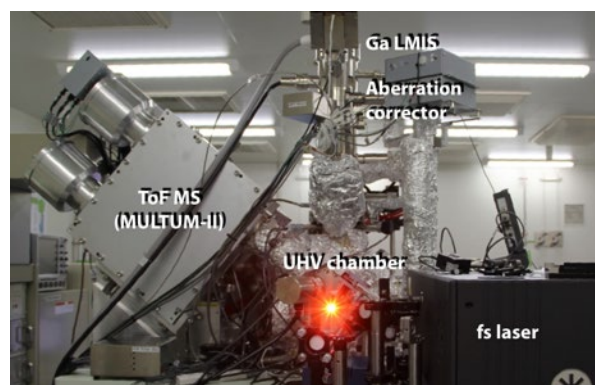


図 3. 同位体ナノスコープ LIMAS。Ga LMIS: Ga 液体金属イオン源、UHV chamber: 超高真空サンプル室、fs laser: フェムト秒レーザー、ToF MS: 飛行時間型質量分析計。

3.1.6.3 宇宙空間で採集された太陽風の測定結果

米国 NASA Genesis ミッションにより、2001 年 12 月 3 日から 2004 年 4 月 1 日までの 2 年 4 ヶ月間の太陽風が宇宙空間で採取され地上に持ち帰られた。太陽風収集アレイは、鏡面表面を持つ 15 種類の高純度固体物質 (アルミニウム、サファイヤ、シリコン、ゲルマニウム、ダイヤモンドライクアモルファスカーボン、金等) の板で構成されている (図 1)。我々は、ダイヤモンドライクアモルファス

カーボン (diamond-like amorphous carbon: DLC) の破片を分析した。DLC を選んだ理由は、DLC には、2 年 4 ヶ月間収集アレイに降り注いだ太陽風水素と太陽風ヘリウムの全量が、アレイから逃散せずに、蓄積されているからである (Heber et al., 2012; Huss et al., 2020)。DLC 層は、500 μm 厚のシリコン基板の上にプラズマ CVD 法により、1 μm の厚さに成膜されている (図 4)。

DLC 中の水素とヘリウムの深さ方向濃度プロファイルを図 5 に示す。水素の注入飛程は 12 nm で $6.0 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ (12 原子%) のピークを持つ。その後、濃度は深さとともに減少し、さらに深さ 100 nm のところから減少率がなだらかになり、250 nm 以深で減少が止まり、一定濃度 20 ppm となる。この一定値の水素量は、DLC 膜の成膜時から元々含有している量である。一方、ヘリウムの注入飛程は、水素の時よりやや深いところ 22 nm でピークを持つ。ピーク濃度は、 $1.7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (0.34 原子%) である。その後、濃度は減少し、深さ 100 nm を超えるところでなだらかな減少になり、深さ 400 nm のところで一定値となる。ただ、この一定値 4 ppm は、上述したように、サンプル室の真空中の残留 He ガスによる見かけ上のものであり、DLC の He 含有量を示す訳ではないことに注意しよう。

太陽風の DLC 中への飛程は、衝突する荷電粒子の運動エネルギーにより決定される。したがって、衝突する荷電粒子と物質との相互作用から物質中の荷電粒子輸送を計算する数値シミュレーション SRIM/TRIM (Ziegler et al., 2012) を用いると、図 5 に示された深さ方向プロファイルを衝突する荷電粒子の速さ分布に変換できる (図 6)。

このようにして太陽風回収試料の分析から復元した太陽風の速さ分布は、約 400 km s^{-1} のところに最大値を持つ。この最大値は実測した太陽風の平均速度と等しい。また、He の速度分布は ACE 探査機が観測した速さ分布 (図 2) と表面付近ではほぼ一致している。したがって、Genesis の太陽風収集期間中の太陽風の低速度成分 (インターストリーム成分) と高速度成分 (コロナホール成分) の速さ分布は、太陽風回収試料の深さ方向分析結果から再現されていることがわかる。

一方、速さ 1000 km s^{-1} を超える CME 成分は ACE 観測に不定性があった (図 2)。太陽風回収試料から得た結果と比較すると、照射量としては ACE の 2013 年のキャリブレーション値に近いが、速度変化の度合いは 2017 年のキャリブレーション値の傾きに近い。また、最高速度が、ACE で観測されていた 2000 km s^{-1} をはるかに超え、水素の速さ分布も考慮すると、太陽風の最高速度は 3000 km s^{-1} を超えていたかもしれないことが明らかになった。2003 年のハロウィーン太陽嵐時には、このような超高速の CME が地球を襲っていたことが初めて明らかになった。

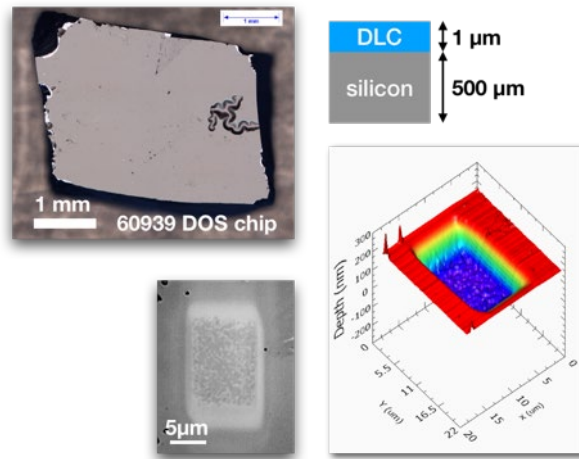


図 4. 太陽風が打ち込まれたダイヤモンドライクアモルファスカーボン (DLC) 片 (左上)。DLC の断面構造の模式図 (右上)。同位体ナノスコープ LIMAS による分析後のスパッタクレーターの走査電子顕微鏡写真 (左下)。スパッタクレーターの形状図 (右下)。

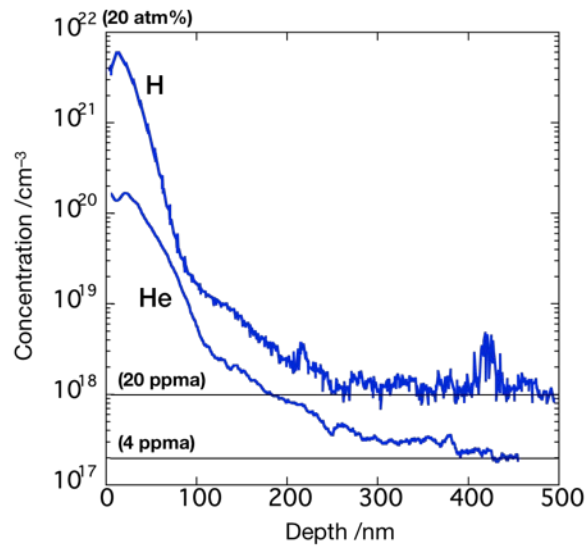


図 5. DLC 中の H と He の深さ方向プロファイル。水素の 210 nm と 430 nm のところのスパイク上の濃度上昇は、DLC 成膜工程により水素が一時的に混入した結果である。

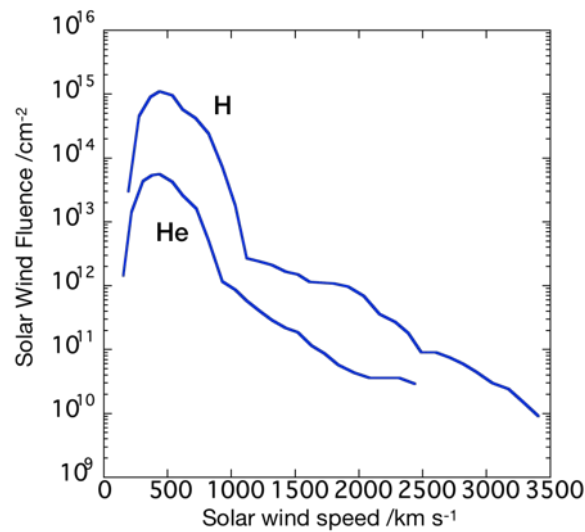


図 6. 太陽風回収試料の分析から復元した太陽風の速さ分布。

3.1.6.4 結論

NASA Genesis 探査機により回収された太陽風を、新しく開発した SIMS 法と SNMS 法を用いて測定することに成功した。これにより、宇宙空間でしか観測できなかった太陽風を地上の実験室中で分析できるようになった。太陽風を実験室中で分析する第一のメリットは、過去の太陽風を何回も分析し検証できることである。宇宙空間の衛星観測では太陽風観測はリアルタイムの一回きりで、やり直しはできない。実験室で決定した 2001 年 12 月 3 日から 2004 年 4 月 1 日まで 2 年 4 ヶ月間の太陽風の速さ分布は、インターストリーム成分とコロナホール成分の部分に関して、ACE 探査機により観測されていた速さ分布と一致した。しかし、CME 成分に関しては今回の測定によりはじめて、速さ 3000 km s^{-1} に達する CME 太陽風が 2003 年のハロウィーン太陽嵐の期間に地球を襲っていたことが判明した。このように、太陽風回収サンプルを地上の実験室で分析することにより、衛星で観測した事象を検証することが可能になった。さらにこの方法を月の試料やイトカワやリュウグウのような小惑星試料に適用することにより、太古の太陽活動の歴史を再現することが可能になるかもしれない。

参考文献

- Bajo, K.-i., Olinger, C. T., Jurewicz, A. J. G., Burnett, D. S., Sakaguchi, I., Suzuki, T., Itose, S., Ishihara, M., Uchino, K., Wieler, R. and Yurimoto, H. (2015) Depth profiling analysis of solar wind helium collected in diamond-like carbon film from Genesis. *Geochem. J.* 49, 559-566.
- Burnett, D. S. (2013) The Genesis solar wind sample return mission: Past, present, and future. *Meteorit. Planet. Sci.* 48, 2351-2370.
- Greenwood, J. P., Itoh, S., Sakamoto, N., Warren, P., Taylor, L. and Yurimoto, H. (2011) Hydrogen isotope ratios in lunar rocks indicate delivery of cometary water to the Moon. *Nature Geoscience* 4, 79-82.
- Heber, V. S., Baur, H., Bochsler, P., McKeegan, K. D., Neugebauer, M., Reisenfeld, D. B., Wieler, R. and Wiens, R. C. (2012) Isotopic Mass Fractionation of Solar Wind: Evidence from Fast and Slow Solar Wind Collected by the Genesis mission. *Astrophys. J.* 759, 121.
- Huss, G. R., Koeman-Shields, E., Jurewicz, A. J. G., Burnett, D. S., Nagashima, K., Ogliore, R. and Olinger, C. T. (2020) Hydrogen fluence in Genesis collectors: Implications for acceleration of solar wind and for solar metallicity. *Meteorit. Planet. Sci.* 55, 326-351.
- NOAA. (2004) Halloween space weather storms of 2003. NOAA Technical Memorandum OAR SEC-88.
- Reisenfeld, D. B., Wiens, R. C., Barraclough, B. L., Steinberg, J. T., Neugebauer, M., Raines, J. and Zurbuchen, T. H. (2013) Solar Wind Conditions and Composition During the Genesis Mission as Measured by in situ Spacecraft. *Space Science Reviews* 175, 125-164.
- Tonotani, A., Bajo, K.-i., Itose, S., Ishihara, M., Uchino, K. and Yurimoto, H. (2016) Evaluation of multi-turn time-of-flight mass spectrum of laser ionization mass nanoscope. *Surf. Interface Anal.* 48, 1122-1126.
- Ziegler, J. F., Biersack, J. P. and Ziegler, M. D. (2012) SRIM, the stopping and range of ions in matter. Lulu Press Co., <http://www.srim.org>.