

火星粒子サンプルリターンに向けたエアロゲル サンプルコレクター開発

○小澤宇志, 鈴木俊之, 黒澤耕介, 長谷川直(JAXA), 奥平恭子(会津大), 三河内岳(東大),
田端誠(JAXA), 島山義清(日大), 高柳大樹(JAXA), 藤田和央(JAXA)

Abstract

In order to improve the feasibility of the Mars Aero-flyby Sample Collection mission, we have carried out a study of capturing Martian dust particles using aerogel during the Martian atmospheric flight. At Japan Aerospace Exploration Agency, a carbon aerogel-silica aerogel (CASA) two layered sample collector has been developed for the mission, and arcjet heating tests and light gas-gun capture simulations have been conducted to investigate characteristics of the sample collector. It was found that the superiority of the carbon aerogel against heating has been verified, and the sampling time can be longer than 10 seconds for the mission. Also, particles of montmorillonite, the primary constituent of Martian dusts, were successfully captured by the CASA sample collector.

1. 目的および背景

現在, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) では火星無着陸サンプルリターン¹⁾ (MASC: Mars Aero-flyby Sample Collection) ミッションを検討している. 本システムは, 火星大気圏に突入した探査機が火星大気中に浮遊するダストサンプルを極超音速飛行中に採取するものである. ダストサンプルを地球に持ち帰ることによって長期的な分析が可能となり, 火星地殻の化学的組成, 同位体組成, 鉱物学的組成の解明に役立つとともに, 火星における水の存在, 水を含むプロセス解明に貢献する. 火星のダスト成分は, モンモリロナイトやパラゴナイトのような粘土鉱物が主成分と考えられているが, MASC では火星大気飛行速度約 4.2 km/s においてこのような物性の粒子捕獲を目指している. このような飛行環境ではサンプルコレクター表面が加熱率約 0.08 MW/m² の熱環境に曝されるとともに, 秒速 4.2 km で突入してくる微粒子がサンプルコレクターへの衝突衝撃や熱によって破壊, 熱変成する可能性がある²⁾. 従って, ミッションの実現に向けて, MASC 飛行環境に適したサンプリングシステムの開発が必要不可欠である.

火星では高度 25-45 km においてダスト粒子が浮遊しており, MASC 火星探査機は火星大気圏突入後, 誘導制御飛行を行いつつ, 高度約 25-45 km において火星ダストや火星大気サンプルを採取する. MASC ダストサンプルコレクターには断面積が 13 × 13 mm² のエアロゲルセグメントを 12 個搭載予定である(全エアロゲル断面積は約 20 cm²). この採取器を搭載した場合の火星高度と火星ダストサンプルサイズ, サンプル数の比較を表 1 に示す. ダストモデルとしては, 5 つのモデル³⁾ を比較検討し, 平

サンプルコレクター特性

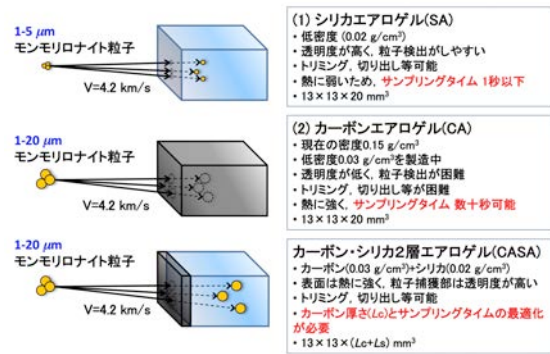


図 1 MASC サンプルコレクター特性比較.

均的なモデルであった Tomasko モデル³⁾ を本稿では採用した. 例えば, 想定されているサンプリング高度 30 km において, サンプリング時間が 20 秒以上確保出来れば 5μm サイズの粒子を約 50 個, 10μm サイズの粒子を約 12 個捕獲することが可能である.

表 1 各高度における 1 秒当たりの火星ダストサンプル数

高度 km	サンプル数 (2 μm)	サンプル数 (5 μm)	サンプル数 (10 μm)
25	22600	8.23	2.14
30	6230	2.72	0.592
35	950	0.48	0.088
40	61	0.036	0.006
45	0.86	5.7 × 10 ⁻⁴	8.2 × 10 ⁻⁵

我々はこれまでマイクロクラスの火星ダスト粒子捕獲を目指して, NASA のスターダストミッションやデブリ採取等で実績のあるシリカエアロゲルによる粒子捕獲を検討してきた. しかし, シリカエアロゲルの熱耐性を検証した結果, MASC 熱環境下でのシリカエアロゲルによるサンプリング時間は 1 秒以下が適しており, ダストサンプルのターゲッ

トサイズがマイクロサイズに限定されてしまうことが判明した。そこで本稿ではシリカエアロゲルに加えてより大きなダストサンプル捕獲を目指したカーボンエアロゲルの利用を検討する。図 1に示すように火星ダスト採取器として(1)シリカエアロゲル(SA), (2)カーボンエアロゲル(CA), (3)カーボン・シリカ二層エアロゲル(CASA), のような3種類のサンプルコレクターを開発し,その性能を比較検討する。

2. 研究手法

2.1. 軽ガス銃撃込試験

JAXA 宇宙科学研究所の二段式新型軽ガス銃を使用し,火星ダストエアロゲル撃ち込み模擬実験を行う。本試験では,サンプル粒子がサンプルコレクターに衝突,貫入する際の影響を評価する。まず,比較検証を行いやすい $30\mu\text{m}$ サイズのアルミナ粒子の撃ち込み試験を行う。次に,火星ダストの主成分と考えられているモンモリロナイト粘土鉱物の撃ち込み試験を行う。モンモリロナイト粒子は 30 及び $10\mu\text{m}$ サイズに分級してある。シリカエアロゲル試験片は,本稿では密度 0.02 g/cm^3 のものを用い,カーボンエアロゲル試験片は密度が $0.025\sim 0.15\text{ g/cm}^3$ の複数ものを比較し,密度依存性を調査する。カーボン・シリカ二層エアロゲル(CASA)に関しては,アーク風洞試験で表面加熱した試験片も使用し,表面加熱の影響評価を行う。

図 2のようにエアロゲルホルダーにトリミングされた $13\times 13\times 20\text{ mm}^3$ のエアロゲル試験片を複数個配置し,エアロゲルホルダーを真空チャンバーにセットする。約 0.5 mg の撃ち込み粒子をプロジェクトイル・サボに詰め込み,散弾銃として粒子をターゲットに撃ち込む。また,撃ち込み中心からのホルダー位置を調整することにより,捕獲粒子数を調

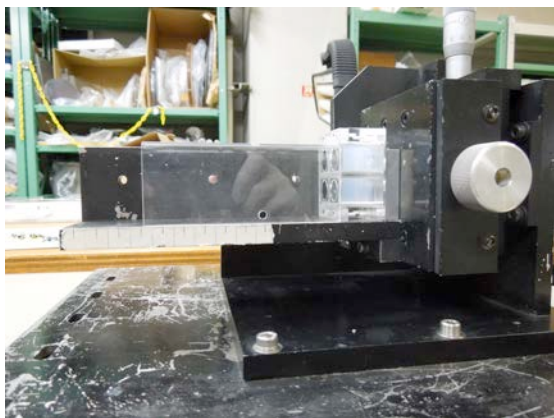


図 2 CASA サンプルコレクターモデル。

節する。撃ち込み粒子の速度は, MASC 飛行速度 4.2 km/s に設定する。

2.2. 分析手法

火星ダストサンプルキャプチャの実現性を検証するため,撃ち込み試験後粒子分析を行い,粒子の残存率,化学組成変化等を評価する。撃ち込み分析は,第一にデジタルマイクロスコープ(VHX-1000, Keyence)もしくは実体顕微鏡で撃ち込み表面や粒子トラックを撮影し,貫入距離,トラック形状,粒子サイズ等を分析する。第二に,透明度のないCAに関してはマイクロスコープによる観察が困難であるため,マイクロ X 線 CT を用いて貫入距離,トラック形状,粒子サイズ等を分析する。第三に,図 3のような SEM(走査型電子顕微鏡)-マニピュレーターシステムを用いて,SEM 分析及びナノマニピュレーターによる微粒子ピックアップを行う。現在, JAXA において SEM(JSM6010, JEOL)にマニピュレーター(UP-100U, Unisoku)を組み込んだシステムを開発中である。

3. 結果と考察

3.1. エアロゲル撃込試験結果

軽ガス銃撃ち込み試験では,3種類の撃ち込み粒子:(1) $30\mu\text{m}$ アルミナ,(2) $30\mu\text{m}$ モンモリロナイト,

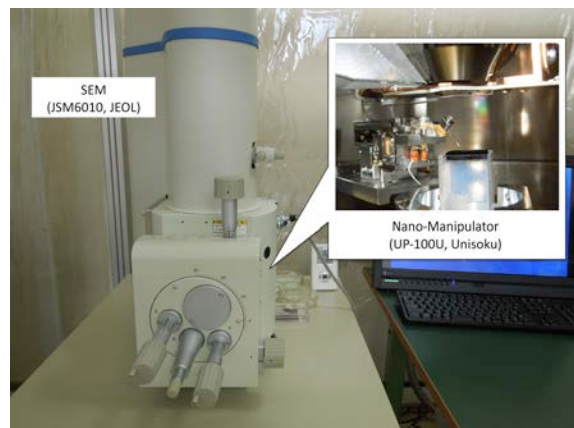


図 3 SEM-マニピュレーターシステム写真。



図 4 AWT エアロゲル加熱試験.

(3)10 μm モンモリロナイト, を使用した. ターゲットは, 初めに SA, 次に CA, 最後に CASA を使用した. これらの試験片は, 図 4 のように JAXA 調布のアーケジェット風洞(AWT)で加熱試験を行った供試体と加熱試験無しの供試体の 2 種類準備し, 空力加熱の影響を評価した. 撃ち込み速度誤差は, $\pm 0.4 \text{ km/s}$ 程度であった. 撃ち込み粒子は, 半径約 30 μm の範囲に分散したため, エアロゲルはこの範囲内にセットした.

撃ち込み表面や SA 層は, 光学顕微鏡で粒子貫入穴形状やトラック形状を観察することが可能であるので, 実体顕微鏡やデジタルマイクロスコープでエアロゲルに捕獲された粒子を観察し, トラック形状, 貫入距離 L を計測した. CASA に撃ち込んだ 10 μm モンモリロナイト粒子のサイドから観察したトラック写真を図 5 に示す. 図に見られるように CA 層を貫通した粒子は SA 層においてそのトラックを検出でき, 粒子の捕獲位置やトラック分析を容易に行うことができる. アルミナ粒子のトラック形状は主にキャロット型(carrot-shaped)であるが, モンモリロナイト粒子では, 球根型(bulbous-shaped), スピンドル型(spindle-shaped), クレーター型(crator-shaped)等も多数確認できる.

一方, CA 層に捕獲された粒子は光学顕微鏡による分析が困難であるため, 本稿ではマイクロ X 線 CT による粒子検出, トラック長分析を行った. X 線 CT により 3D に蓄積された撮像の分析を行ったところ, 図 6 に見られるように, SA 層のトラックは空洞が大きく, 先端の粒子検出, トラック形状, トラック長の分析を容易に行うことが可能であった. しかし, CA 層のトラックはカーボンと空気のコントラストをつけにくいことに加え, SA 層のトラックと比べてトラックの空洞が細いためトラック形状の分析は比較的困難であった. ただし, 粒子

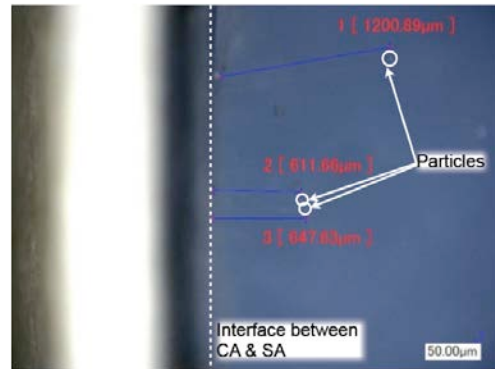


図 5 デジタルマイクロスコープによるトラック分析及び粒子検出.

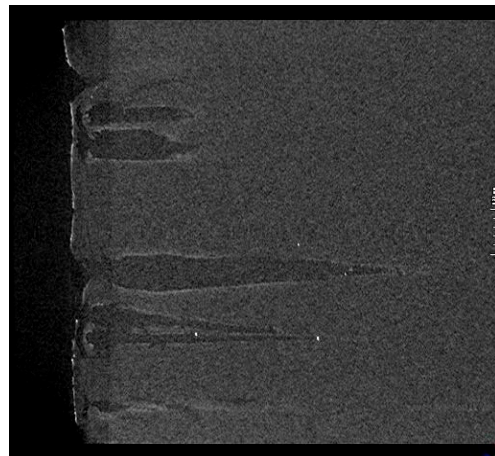


図 6 X 線 CT によるトラック分析及び粒子検出(SA に撃ち込まれた 30 μm アルミナ粒子).

位置は容易に判別できるため, トラック長の分析は可能であった.

本稿ではカーボンエアロゲルに対する平均貫入距離 L について, 試験結果を式(1)のような改良 Horz モデル⁴⁾の結果と比較した (図 7参照).

$$L = L_{ref} d_p \times \left(\frac{\rho_p}{\rho_r} \right)^{0.860} \quad (1)$$

SA に対する解析については, 文献5)において実験と解析結果の比較が示されている. 本研究では, SA の場合と同様に CA においてもエアロゲル密度が低くなるほど粒子の貫入距離が長くなるような密度依存性が確認された. ただし, CA の場合, エアロゲル密度 0.025 g/cm^3 においても平均貫入距離は 0.5 mm 程度で SA の場合よりも短くなっている. また, エアロゲル SEM 観察を行った結果, SA も CA も低密度ではスポンジ状の構造が確認できたが, CA の方が構造が硬い結果が得られた. CA の場合アルミナとモンモリロナイト粒子で大差がないので, 代表長 L_{ref} を 0.25 とすると実験と解析結果で良い一致が得られた. 本試験の結果から CASA の CA 層の厚みは 0.5 mm 以下が良いことが判明し

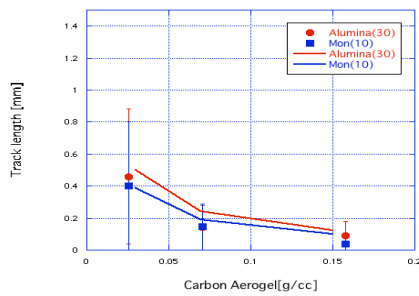


図 7 撃ちこみ粒子のカーボンエアロゲル貫入距離の比較：[実験値(シンボル)，モデル(線)].

たため、CA 層の薄膜の整形技術向上が今後必要である。

3.2. エアロゲルピッキング及び分析

現在、JAXA において開発中の SEM-マニピュレーターシステム(図 3 参照)を用いて、エアロゲル撃ち込み表面分析及び微粒子ピッキング操作を行った。まず、以前バンデグラフ撃ち込み試験で使用した、 $1\mu\text{m}$ 銀粒子が撃ち込まれた SA のサンプルを用いて粒子の検出能力確認を行った。その結果、 $1\mu\text{m}$ クラスの粒子検出及びその成分分析が可能であることが判明した。また、マニピュレーターを使用してエアロゲルの切り出し・粒子抽出操作を 30, $10\mu\text{m}$ クラスの粒子で行ったところ、図 9 に見られるように抽出可能であることが確認された。ただし、プローブによっては帯電の影響で粒子が跳びやすい等の課題も確認できたため、今後切り出し用のプローブ、抽出用のプローブの選定等が重要である。

4. おわりに

MASC ミッションの実現に向けて、カーボンエアロゲルを用いた火星ダストサンプルコレクターを開発した。AWT 加熱試験の結果、CA 層の 10 秒以上の熱耐性が証明されたため、 $10\mu\text{m}$ クラスの粒子捕獲を目指して CASA 二層サンプルコレクターを開発し、軽ガス銃エアロゲル撃ち込み試験によりその捕獲性能を検証した。その結果、CA においても粒子貫入距離の密度依存性が判明し、低密度化の重要性とともに、現状では CA 層の厚さは 0.5mm 以下が最適であることがわかった。また、SEM マニピュレーターシステム開発においては $1\mu\text{m}$ クラスの粒子検出・成分分析能力が確認でき、さらに $10\mu\text{m}$ クラスの粒子ピッキング能力も確認できた。今後、サンプルコレクター開発においては CA 薄膜整形技術の向上、分析技術開発においてはマニピュレータープローブの選定およびピッキング技術向上が必要である。

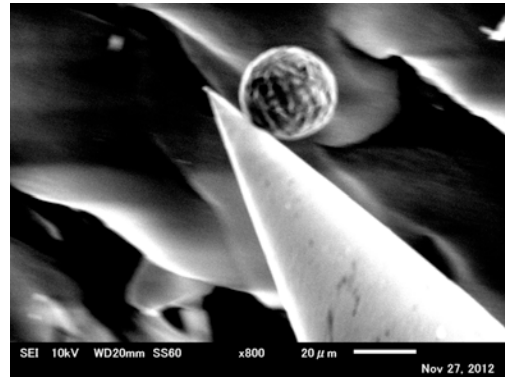


図 9 SA 層からピッキングされた $30\mu\text{m}$ アルミナ粒子。

謝辞

エアロゲル試験片を制作していただいた河合秀幸教授、佐藤剛士氏、軽ガス銃撃ち込み試験に協力していただいた小野瀬直美博士、X 線回折分析 (XRD) に協力していただいた青木卓哉博士、X 線 CT 分析に協力していただいた皆様、マイクロトミング作業をご教授していただいた山岸明彦教授、船木健司氏にあらためて感謝の意を表明したい。また、サンプリングに関してアドバイスしていただいた矢野創博士、橘省吾教授、MASCWG の皆様に感謝の意を表明したい。

参考文献

- 1) Fujita, K., *et al.*, “Conceptual Study and Key Technology Development for Mars Aeroflyby Sample Collection,” IAC-11.a3.3a.3, 62nd International Astronautical Congress, Cape Town, South Africa, October 3-7, 2011.
- 2) Ozawa, T., Suzuki, T., Takayanagi, H., and Fujita, K., “Investigation of Martian-Dust Drag and Heat Transfer for Mars Sample Return Mission,” *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 25, No. 3, pp. 341–353, 2011.
- 3) Tomasko, M. G., Doose, L. R., Lemmon, M., Smith, P. H., and Wegryn, E., “Properties of Dust in the Martian Atmosphere from the Imager on Mars Pathfinder,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. E4, pp. 8987–9007, April 1999.
- 4) Kitazawa, Y., Fujiwara, A., Kadono, T., Imagawa, K., Okada, Y. and Uematsu, K., “Hypervelocity Impact Experiments on Aerogel Dust Collector,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. E9, pp. 22035–22052, 1999.
- 5) Ozawa, T., Suzuki, T., Okudaira, K., Mikouchi, T., Kurosawa, K., Takayanagi, H., Sugita, S. and Fujita, K., “Investigation of Martian Dust Sample Capture toward Mars Aero-flyby Sample Collection Mission,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, 2012 (accepted, 2012/4/11).