

火星ダストサンプルリターンに向けたエアロゲル 撃ち込み試験検討

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

Abstract

A study of capturing Martian dust particles using aerogel in Mars atmosphere was carried out for the Mars Aero-flyby Sample Collection mission. Light gas-gun experiments have been conducted to investigate characteristics of silica and carbon aerogel as well as the effect of aerogel heating when a dust particle penetrates aerogel. 10-30 μm -sized alumina and montmorillonite particles were tested for both normal and heated aerogel test pieces. It was found that both alumina and montmorillonite particles can be successfully captured although aerogel heating slightly influences track distances. In addition, using carbon aerogel target with 0.15 g/cm^3 density, track lengths of 30 μm -sized particles are generally shorter than 1 mm.

1. 目的および背景

現在, 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. ダストサンプルは, 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おり, このような物性の粒子捕獲に適し, かつ MASC 飛行環境にも適したサンプリングシステムの開発がミッションの実現に向けて必要不可欠である.

MASC ミッションでは, 弾道係数等の条件を考慮した結果, 図 1 に示すようなノーズ半径 0.35 m, 半頂角 20 度, 底面半径 1.5 m の sphere-cone 型の機体形状²⁾が提案されている. また, エアロゲルを搭載したリトラクタブル採取器を機体後方に設置し, サンプリング高度において採取器を開き, ダストサンプルを捕獲する計画である. 採取器には断面積が $13 \times 13 \text{ mm}^2$ のエアロゲルセグメントを 12 個搭載予定であり, すなわち全エアロゲル断面積は約 20 cm^2 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. 浮遊している火星ダストを捕獲することは, 火星の平均的な地殻成分の研究において非常に重要であるとともに, サンプルリターンすることにより, 将来的な成分分析が可能になる. 探査機のサンプリング高度における速度は秒速 4-5 km と推定さ

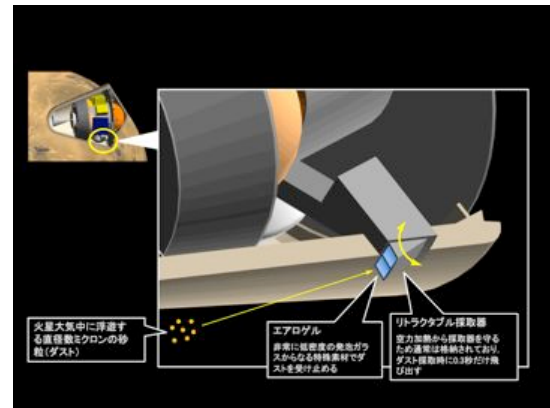


図 1 MASC プロジェクトに向けて提案された高弾道係数を有する機体形状およびサンプル採取器

れており, まず各高度におけるダストサンプルサイズ, サンプル数を検討した. その結果を表 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, 平均的なモデルであった Tomasko モデル⁴⁾を本稿では採用した.

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}

表 1 に見られるように高度 30 km において, サンプリング時間が 20 秒以上であれば $5 \mu\text{m}$ サイズの粒子を約 50 個, $10 \mu\text{m}$ サイズの粒子を約 12 個捕獲することが可能である. 我々はこれまで 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火星ダストキャプチャを検討⁵⁾してきた. 火星大気密度は地球の 1%以下であるが, 大気中で粒子を捕獲するため, サン

ルコレクター表面は加熱率0.08 MW/m²程度の熱環境に曝される。我々はこれまでアーク風洞加熱試験等を行い、シリカエアロゲルの熱耐性を検証してきた。結果として、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2に示すように火星ダスト採取器として3種類の捕獲媒体を開発し、比較検討する。本稿では、(1)シリカエアロゲル及び(2)カーボンエアロゲルの軽ガス銃(LGG)撃ち込み試験結果を報告する。将来的には、(3)カーボン・シリカ二層エアロゲルサンプルコレクターの開発を目指す。

2. 研究手法

2.1. 軽ガス銃撃ち込み手法

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。図3に試験のイメージを示す。まず、比較検証を行いやすい30μm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10μmサイズに分級してある。シリカエアロゲル試験片は、密度0.02, 0.03, 0.04 g/cm³の3種類を用い、カーボン

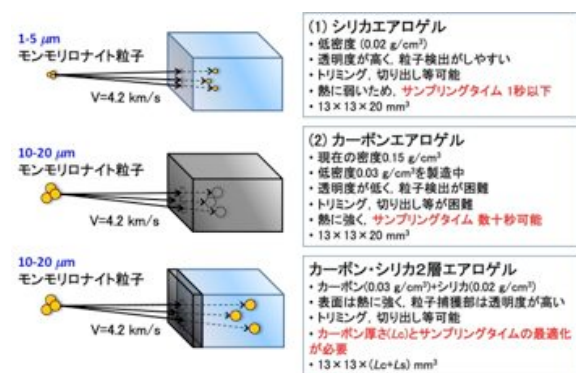


図2 火星ダスト採取器のイメージ

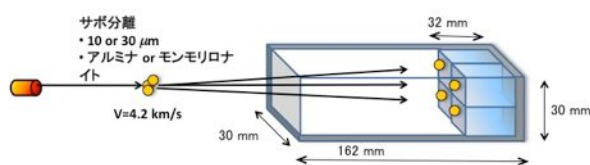


図3 エアロゲル撃ち込み試験のイメージ

エアロゲル試験片の密度はおよそ 0.15 g/cm³である。シリカエアロゲルに関しては、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。エアロゲルホルダーにトリミングされた13×13×20 mm³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小チャンバーの撃ち込み中心にセットする。約0.5 mgの撃ち込み粒子をプロジェクタイル・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、捕獲粒子数を調節する。撃ち込み粒子の速度は、高度35 kmにおけるMASC機体速度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。シリカエアロゲル撃ち込み分析は、第一にデジタルマイクロスコープ(VHX-1000, Keyence)もしくは光学顕微鏡で粒子のトラックを撮影し、貫入距離、トラック形状、粒子サイズ等を分析する。第二に、エアロゲル中に捕獲された粒子を切り出す。粒子サイズが10~30 μmサイズの本稿ではマニュアルハンドリングでピッキングを行う。第三に、切り出された粒子に対してSEM(走査型電子顕微鏡)/EDS(エネルギー分散型X線分光装置)分析を行い、表面形状、粒子サイズ、主要元素組成を検証する。カーボンエアロゲル撃ち込み分析は、マイクロスコープによる観察が困難であるため、X線CTにより、貫入距離、トラック形状、粒子サイズ等を分析する。

3. 結果と考察

3.1. エアロゲル撃ち込み試験結果

軽ガス銃撃ち込み試験では、3種類の撃ち込み粒子：(1)30μmアルミナ、(2)30μmモンモリロナイト、(3)10μmモンモリロナイト、を使用した。ターゲットは、初めにシリカエアロゲル、次にカーボンエアロゲルを使用した。撃ち込み速度誤差は、±0.3 km/s程度であった。30μm粒子は、半径約20 mm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。エアロゲルに衝突した粒子は、エアロゲル撃ち込み表面に貫入口、サイドから粒子トラックを目視で確認することができる。エアロゲルに捕獲された粒子をデジタルマイクロスコープで観察し、トラック形状、貫入距離Lを計測した。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

レータ型(crator-shaped)等も多数確認できる。また、図 4に見られるようにモンモリロナイト粒子の場合、貫入過程で小さい粒子が分離するトラックも存在する。トラックの入口径は主に粒径の 10 倍程度である。

次に、シリカエアロゲルに対する平均貫入距離 L を式(1)のような改良 Horz モデル⁶⁾の結果と比較した。

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

アルミナ粒子の場合、形状が球形に整っているため L_{ref} を 4.0 として実験と解析結果を比較した。その結果を図 5に示す。表面加熱の貫入距離への影響はそれほど大きくなく、シリカエアロゲルの密度依存性は実験と解析で良い一致が得られた。モンモリロナイト粒子の場合、形状がいびつであり、また途中で小さい粒子の分離等が生じるため、 L_{ref} を 2.071 として比較した。その結果を図 6に示す。30 μm の場合、トラック長はおよそ 3 mm であり、実験と解析結果は良い一致が得られた。しかし、10 μm の場合、実験の方が解析結果より短い傾向にあり平均トラック長はおよそ 0.5 mm であった。2 μm 以下の粒子のトラック長は 0.3 mm 以下であると予測される。

さらに、エアロゲルから粒子サンプルをマニュアルで切り出し、SEM/EDS 装置で表面状態や主要元素組成を分析した。アルミナ粒子の場合、きれいな球形であり、アルミナ成分の O と Al が検出された(文献 7 参照)。ただし、加熱されたエアロゲルから切り出された粒子は、表面が荒れているサンプルが多く、その部分では Si が検出され、溶解したエアロゲルが付着していることが確認された。30 μm 、10 μm モンモリロナイト粒子サンプルも同様にシリカエアロゲルから切り出され、図 7のように SEM/EDS 分析を行った。モンモリロナイトの化学式は $(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ であり、粒子形状はいびつである。EDS 分析では、主に O、Mg、Al、Si、Ca が検出され、部分的にはシリカエアロゲルが付着している粒子も存在するが、撃ち込み前と同様の成分である部分も確認できる。その結果、10 μm 以上の火星ダストは熱変成・熱分解せずに粒子を捕獲できることがわかった。

3.2. X線 CT 分析

撃ち込み後のエアロゲルに関して、X線 CT 分析を行った。シリカエアロゲルの側面写真である図 8 にみられるように、X線 CT 分析結果から 3 次元的にトラック形状や粒子位置を把握することができ

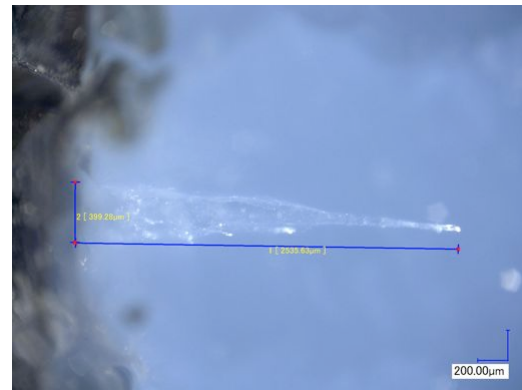


図 4 30- μm モンモリロナイト粒子のトラック写真 (シリカエアロゲル, 0.03 g/cm³, 加熱有)

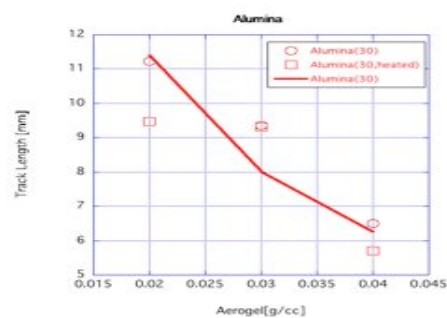


図 5 アルミナ粒子 (30 μm) のシリカエアロゲル貫入距離の比較: 実験値[加熱無(円), 加熱有(四角)], モデル(線)

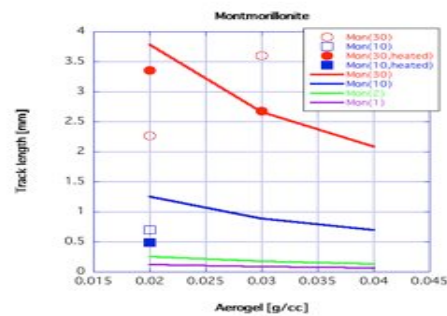


図 6 モンモリロナイト粒子のシリカエアロゲル貫入距離の比較: 実験値(シンボル), モデル(線)

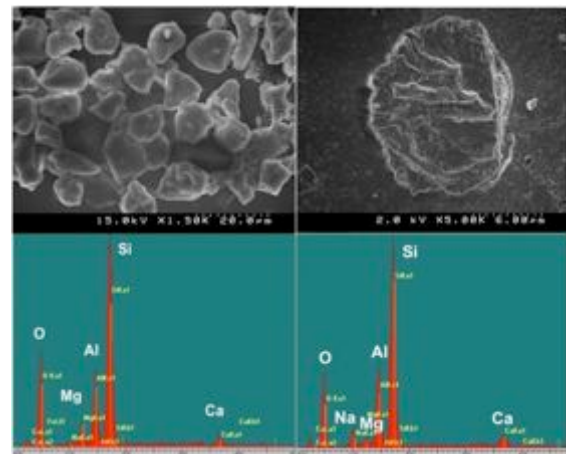


図 7 SEM/EDS 分析比較: 撃ち込み前(左), 撃ち込み後(右)の 10 μm モンモリロナイト粒子

る。その結果、 $30\mu\text{m}$ アルミナ粒子をシリカエアロゲルに撃ち込んだ場合、平均貫入距離が $8\sim 9\text{ mm}$ であるのに対して、カーボンエアロゲルの場合(カーボンエアロゲルの側面写真図 9参照)は $50\sim 300\ \mu\text{m}$ の範囲であり、最長でも 3.6 mm であることがわかった。 $10\mu\text{m}$ モンモリロナイト粒子が撃ち込まれたカーボンエアロゲルでは、主なトラック長は $10\sim 100\mu\text{m}$ であり、最長 $181\mu\text{m}$ であった。従って、カーボンエアロゲルの実用化に向けて低密度化は必要不可欠であり、今後カーボンエアロゲル厚さとサンプリング時間の最適化を検証する必要がある。

4. おわりに

MASC ミッションの実現に向けて、火星ダストサンプルコレクターを開発中である。 $10\mu\text{m}$ クラスの粒子捕獲を目指して、本稿ではシリカエアロゲルに加えて世界で初めてカーボンエアロゲルへの軽ガス銃エアロゲル撃ち込み試験を実施し、その捕獲性能を検証した。シリカエアロゲルは、 $10\sim 30\mu\text{m}$ クラスの火星ダスト捕獲媒体として最適だが、MASC 熱環境下ではサンプリング時間が 1 秒以下に制限されてしまう。カーボンエアロゲルでは、より長い時間サンプル捕獲が可能である。しかし、現状では火星ダストの貫入距離が 0.3 mm 以下であるため、カーボンエアロゲルの低密度化を図り、その捕獲性能を向上させる必要がある。

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、畠山義清博士、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、

マイクロトー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) Takayanagi, H., Suzuki, T., and Fujita, K., "Feasibility Assessment of Nonstop Mars Sample Return System," AIAA paper 2010-0627, Orlando, FL, Jan. 4-7, 2010.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Ozawa, T., *et al.*, "Investigation of Martian Dust Sample Capture toward Mars Aero-flyby Sample Collection Mission," ISTS Paper 2011-k-17, 28th International Symposium on Space Technology and Science, Okinawa, Japan, June 5-12, 2011.
- 6) 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.
- 7) Ozawa, T., *et al.*, "Study of Micron-sized Martian Dust Sample Capture Using Aerogel," AIAA Paper 2012-0876, Nashville, Tennessee, Jan. 9-12, 2012.

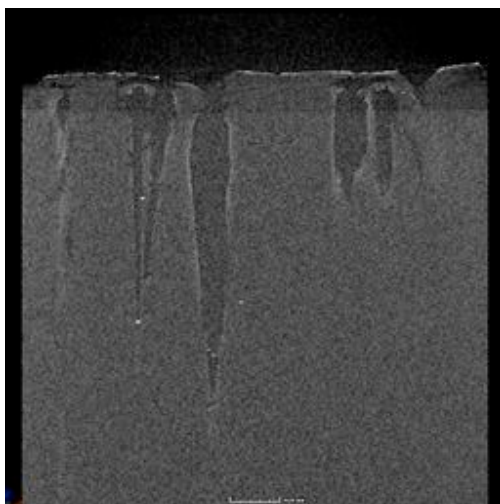


図 8 X線CT分析： $30\ \mu\text{m}$ アルミナ粒子、 $0.03\ \text{g/cm}^3$ シリカエアロゲル。

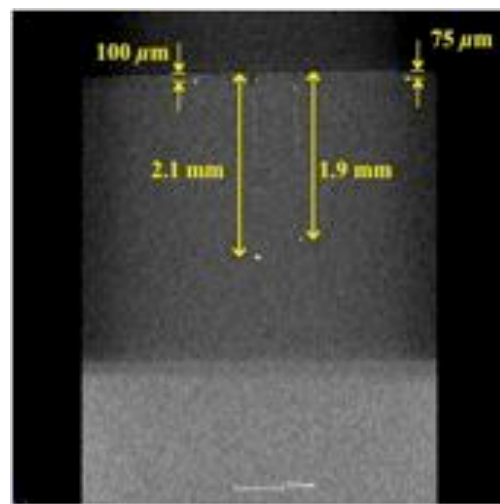


図 9 X線CT分析： $30\ \mu\text{m}$ アルミナ粒子、 $0.135\ \text{g/cm}^3$ カーボンエアロゲル。