

宇宙塵模擬粒子によるシリカエアロゲルへの超高速衝突トラックの形態解析： ターゲット密度依存性（第2報）

田端 誠^{1,2}, 長谷川 直¹, 小野瀬 直美³

¹宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ²千葉大学大学院 理学研究科,

³宇宙航空研究開発機構 研究開発本部

1. 研究目的

地球低軌道上の宇宙塵やスペースデブリの非破壊捕集材料として、シリカエアロゲルは国内外の複数のミッションで実績がある（例えば日本においては JAXA の「MPAC」実験[1]）。JAXA の「はやぶさ」や、NASA の「Stardust」探査機に代表されるような、地球外物質の地球上へのサンプルリターンは、太陽系形成や生命誕生の起源を研究する上で重要な知見を我々にもたらす。地球周回軌道上の飛翔体（例えば国際宇宙ステーション）や、天体探査機のフライバイによる宇宙塵のサンプリングでは一般に、微小粒子（粒径数 μm から数十 μm ）が捕集材へ超高速（速度数 km/s ）で衝突する。このような条件のもと、宇宙塵をほぼ非破壊で捕集するためにはエアロゲルが有用な材料であり、特に「シリカ」のエアロゲルは超低密度に製造可能であるとともに、可視光に対する透明性から内部に捕獲される微小粒子の視認が容易であるため、宇宙塵捕集材として最適であると考えられる。実際、Stardust ではシリカエアロゲルを捕集材とし、Wild2 彗星をフライバイすることにより、その塵サンプルの捕集と地上回収に成功した[2]。

Stardust により捕獲された彗星塵に対しては、これまでに様々な手法による分析が行われている。エアロゲルに形成された超高速衝突痕（トラック）の末端に残された微粒子だけでなく、衝突トラックの内壁面も化学的分析の対象である。これは揮発性の高い彗星塵成分が衝突トラック形成時にその壁面に付着したと考えられるためである。捕獲微粒子の分析のみならず、衝突トラックの形態学的解析も活発に行われており、軽ガス銃等を利用した室内較正実験が有効な研究手段となっている。日本人研究者らにより、衝突トラックの形態解析をもとにした彗星塵の成分や密度の推定に関する研究も実施されている[3]。一方国内では、東京薬科大学および JAXA を中心として、国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」の曝露部を利用する宇宙塵のサンプルリターン実験「たんぼぼ」の準備を推進している。これは日本初のアストロバイオロジー宇宙実験であり、一定期間宇宙空間に曝露したシリカエアロゲルを地上に回収し、地球低軌道まで到達している可能性のある地球由来の微生物の検出や、宇宙塵中の有機物の分析を目指す。これにより、生命の地球—宇宙間の双方向伝播の可能性を検証する試みである。たんぼぼモジュールの主要素となる宇宙塵捕集材エアロゲルは、超低密度（ 0.01 と 0.03g/cm^3 の 2 層構造）かつ疎水性であり、筆者(M.T.)が千葉大学において開発・製造した。たんぼぼモジュールは「こうのとり（HTV）」4 号機に搭載されて 2013 年度に H-IIB ロケットで打ち上げられる見込みである。たんぼぼワーキンググループでは室内模擬実験として、微生物を含浸させた粘土粒子や、隕石の微粒子をエアロゲルに衝突させ、捕獲された粒子の分析を実施している[4]。また、JAXA による次期火星複合探査計画では、高層大気を漂う微粒子のエアロゲルによる無着陸サンプルリターンプラン「MELOS/MASC」に実現に向けた

開発が進められている。サンプリング中の火星希薄大気による衝撃加熱を模擬したシリカエアロゲルの捕集性能の評価の他、耐加熱性に優れたカーボンエアロゲルの導入が検討されている[5]。さらに、地球外生命探査として、土星の衛星であるエンセラダスをフライバイすることにより、極域から噴出するプルーム中の氷微粒子をサンプルリターンする将来構想もある。

本研究の目的は第一に、上記の日本で準備・検討中の宇宙塵サンプルリターンミッションで利用するエアロゲル宇宙塵コレクターをデザインする上で、基盤となりうる一貫性のある微粒子の超高速衝突トラックデータを取得することである。すなわち、利用が想定される様々な密度のエアロゲルをターゲットとする実験を実施し、衝突トラックの形態学的な解析により、エアロゲルコレクターの性能評価に結びつける。第二に、様々な密度のエアロゲルに形成される衝突トラックを系統的に解析することにより、超多孔質低密度材としてのエアロゲルへの超高速微粒子の貫入過程の物理の理解に資する情報を取得することである。我々は日本独自の製法で非結晶質のシリカエアロゲルを開発しているため、その物性が製法に依存する可能性は否定できない。したがって、今後進める宇宙実験において千葉大学製のエアロゲルを利用する上で、我々自身がエアロゲルを製作し、較正実験を実施することに意義がある。

2. 実験・解析手法

2.1. 飛翔体加速器

JAXA 宇宙科学研究所・スペースプラズマ共同利用の新型 2 段式軽ガス銃を利用した。特に低密度のエアロゲルは収縮を防ぐため、ショット後の復圧の速度に注意を要する。標準ターゲット真空チャンバーの下流側にシャッターを備えた中型ターゲット真空チャンバー（施設備品）を接続し、銃身側とは独立に復圧ができるようにした。ショット時の真空度は約 10Pa であり、大気圧までの復圧には 20—30 分をかけた。シャッターを利用することにより、エアロゲル側のチャンバーが復圧中でも、銃身側は次のショットの準備が可能である。

2.2. ターゲット（エアロゲル）

衝突ターゲットは千葉大学で製造した疎水性のシリカエアロゲルである（図 1）。エアロゲルの製法は、昨年度スペースプラズマ研究会の講演集に詳しい[6]。また、文献[7]にも記載されている。本研究のために準備したエアロゲルタイルの密度は、0.01, 0.02, …, 0.06g/cm³ の 6 通りと、0.01 と 0.03g/cm³ の二層一体型（各層の厚さ 1cm）である。典型的なサイズが 10×10×2cm³ であるエアロゲルタイルから約 3cm 角のサンプル片をフェザーにより切り出し、特製の 4 連装エアロゲルホルダーに装填した。これにより、1 ショットにつき最大 4 種類のエアロゲルを露出でき、解析可能な衝突トラックが得られない失敗ショットをなくして実験の効率化を図るとともに、衝突速度条件の揃ったサンプルを得ることが可能となった。

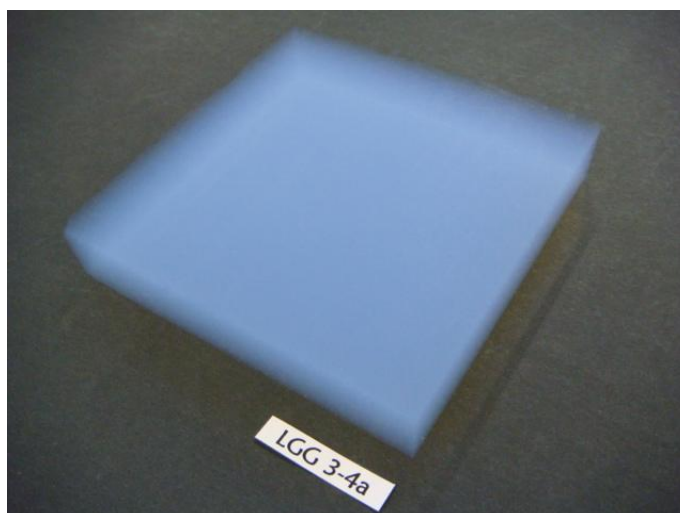


図 1: 0.03g/cm³ シリカエアロゲル (11×11×2cm³)

2.3. プロジェクトイル

宇宙塵模擬粒子として、施設備品であるソーダライムガラス粒子（Thermo SCIENTIFIC）を選択した。密度が 2.5g/cm^3 と天然の宇宙塵に近いこと、先行研究でもよく用いられ、データの比較ができること、粒径が揃っており、かつ異なる粒径が利用できることが理由である。粒子は 2 分割サボに封入して射出した。1 つのエアロゲルターゲットに対して 3 つ以上の衝突トラックが得られ、かつトラック同士が重なりにくく、異なる粒径が利用できることが理由である。粒子は 2 分割サボに封入して射出した。1 つのエアロゲルターゲットに対して 3 つ以上の衝突トラックが得られ、かつトラック同士が重なりにくく、異なる粒径が利用できることが理由である。粒子は 2 分割サボに封入して射出した。1 つのエアロゲルターゲットに対して 3 つ以上の衝突トラックが得られ、かつトラック同士が重なりにくく、異なる粒径が利用できることが理由である。

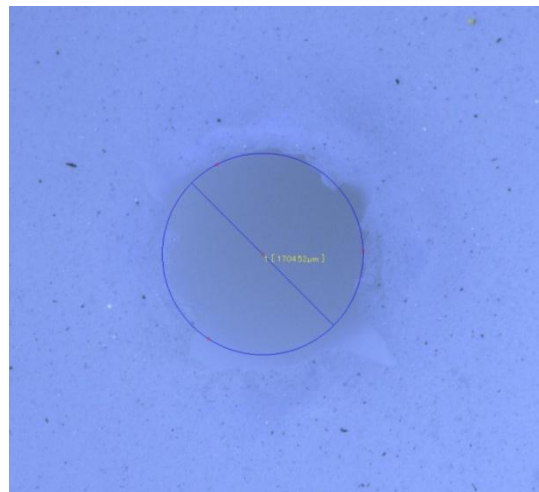


図 2: 貫入口撮像例

2.4. 衝突トラック形態解析

衝突トラックの観察には施設備品のデジタルマイクロスコープ VHX-1000（KEYENCE）を利用した。倍率 5 倍での入射面観察で各トラックに ID を付したのち、貫入口をその大きさに応じて 50-1000 倍で撮影した（図 2）。トラック全体像は入射方向と垂直な側面から 30 倍で撮影した（図 3）。撮影した画像より、デジタルマイクロスコープの計測機能を利用して、以下のパラメータを抽出した：貫入口径（ D_E ）、最大径（ D_M ）、貫入長さ（ L ）。また図 3 に示されているようにトラックを貫入方向にいくつかの区画に分割し、各区間を円錐台とみなすことにより、体積（ V ）を概算できる。

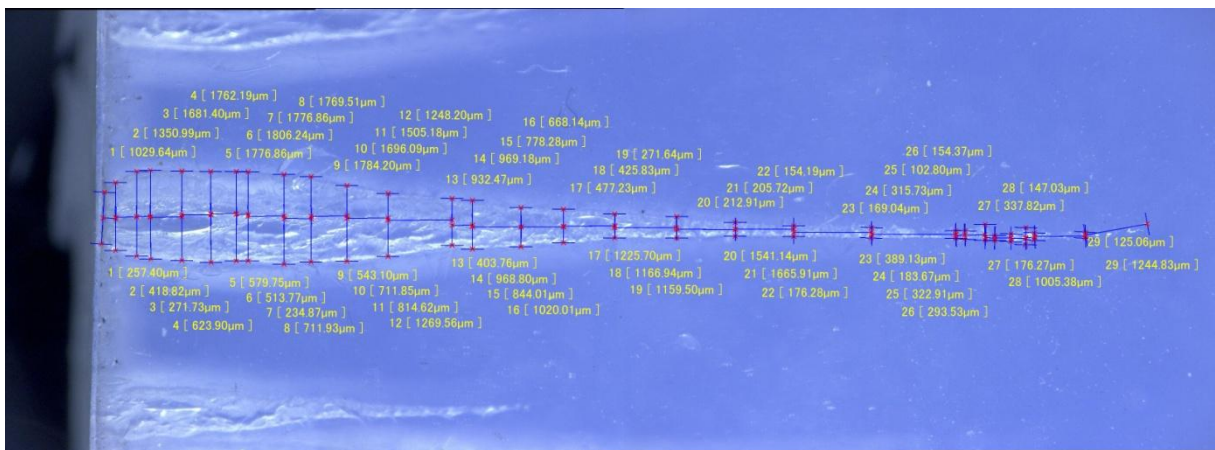


図 3: トラック全景撮像例

3. 実験の進捗状況

2010 年度および 2011 年度に計 4 スロットのマシントイム、10 日間の実験を実施した。総ショット数は 40 で、そのうちガス銃の撃ち損じ（サボ分離失敗）は 1 ショットのみだった。目標速度 2, 4, 6km/s それぞれの平均値の $\pm 5\%$ を許容した結果、速度超過あるいは不足で除外されたショットは 4 ショットであった。また、露出したエアロゲルのいずれにも解析可能な衝突トラックが得られなかったショットは 5 ショットのみである。以上より有効ショ

ット数は 30 で、54 通り (=エアロゲル密度 6 通り×速度 3 通り×粒径 3 通り) のサンプルを取得した。これらのショットで同時に、密度 0.01 と 0.03g/cm³ の二層一体型のエアロゲルのテストも実施し、初期解析結果を報告している[7]。この結果より、たんぼぼ実験のエアロゲルの仕様が決定され、2011 年の春から秋にかけてエアロゲルのフライトモデルを製造した。

4. 解析結果（先行研究との比較）

現在までに、54 通りのサンプルのうち約半数の衝突トラックの初期解析が終了している。未だデータの全貌は見えないが、部分的にプロットを描くことはできる。本稿では、先行研究[8]との比較を行ってみる。先行研究[8]は、Stardust の衝突トラックの室内較正実験を実施しており、本研究と同様に、二段式軽ガス銃を用いて粒径の異なるソーダライムガラス粒子（12, 35, 64μm）をシリカエアロゲルに撃ち込んでいる。本研究と異なる点は、衝突速度を Stardust の Wild2 彗星へのフライバイ速度である 6.1km/s に固定していることと、いわゆる Stardust グレードのエアロゲルを用いていることである。Stardust のエアロゲルは親水性であり、3cm の厚さに対して表面付近は 0.005g/cm³、底部は 0.05g/cm³と密度の勾配がついている。微粒子のエアロゲル表面への衝突時の衝撃圧を緩和するために、一般にエアロゲル表層の密度は小さい方がよいと考えられている。

図 4—6 に、衝突微粒子の粒径と、それぞれ衝突トラックの貫入長さ、貫入口径、最大径の関係を示す。衝突速度は平均 6.0km/s である。それぞれのプロットにはエアロゲルの密度 0.01, 0.02, …, 0.06g/cm³ に対応する 6 つのデータセットがある。また、一点鎖線で先行研究[8]のベストフィット曲線を示している（フィット関数が 2 種類ある場合は双方を示してある）。図 4 の貫入長さに関して、先行研究[8]は我々の 0.03g/cm³ の結果と良い一致を示した。これは密度勾配が付いた Stardust エアロゲルが平均密度 0.03g/cm³ のように振る舞うことを示していると考えられる。一方、図 5 および 6 の貫入口径および最大径は、我々の 0.06g/cm³ の結果とほぼ一致した。貫入口径と最大径は、エアロゲルの衝突表面付近で測定されるため、本来、我々の 0.01g/cm³ の結果に近くなるはずである。エアロゲルの製法に起因する微細構造の違いを反映しているとも考

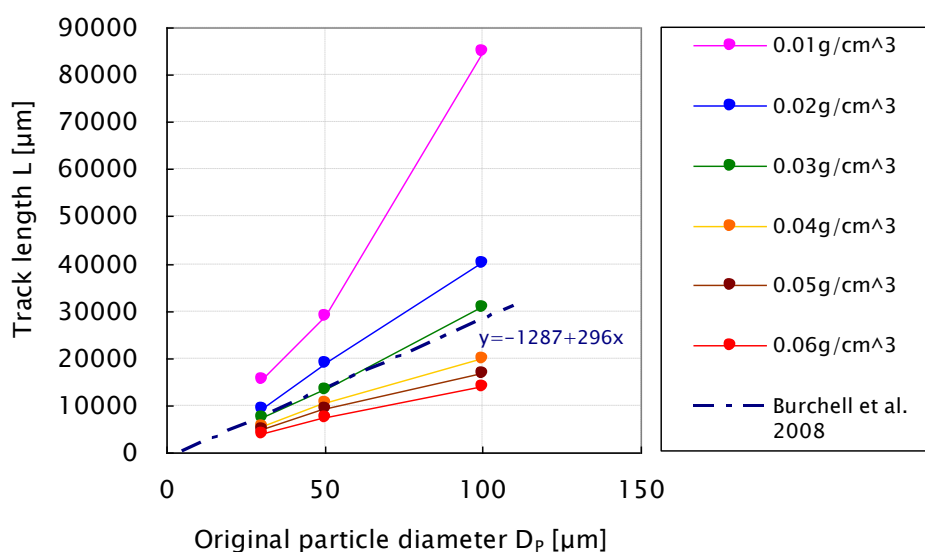


図 4: 衝突微粒子径と貫入長さの関係

えられるが、この 0.01 と 0.06g/cm^3 の違いは大きく、実際に Stardust エアロゲルの表面付近が我々の 0.06g/cm^3 のエアロゲルと同等であると考えられる。この理由として、Stardust エアロゲルは親水性であるため、実験時に吸湿して密度が増加していたのではないかと推測される。Stardust 探査機に搭載されたエアロゲルは一定期間、惑星間空間の高真空に曝されたのちに彗星塵のサンプリングを行っている。室内で Stardust の衝突トラックの較正実験を実施する際には、この吸湿の影響を考慮すべきであることを本研究は提起する。

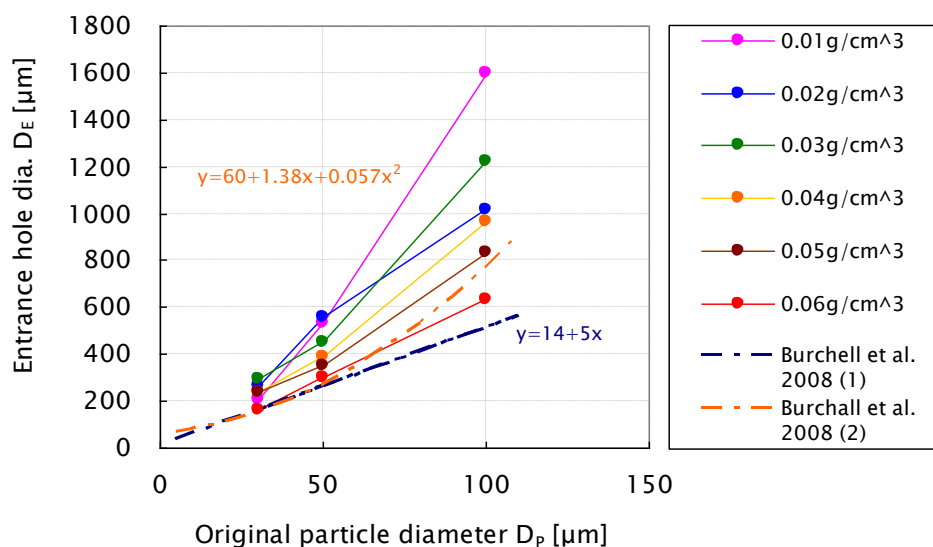


図 5: 衝突微粒子径と貫入口径の関係

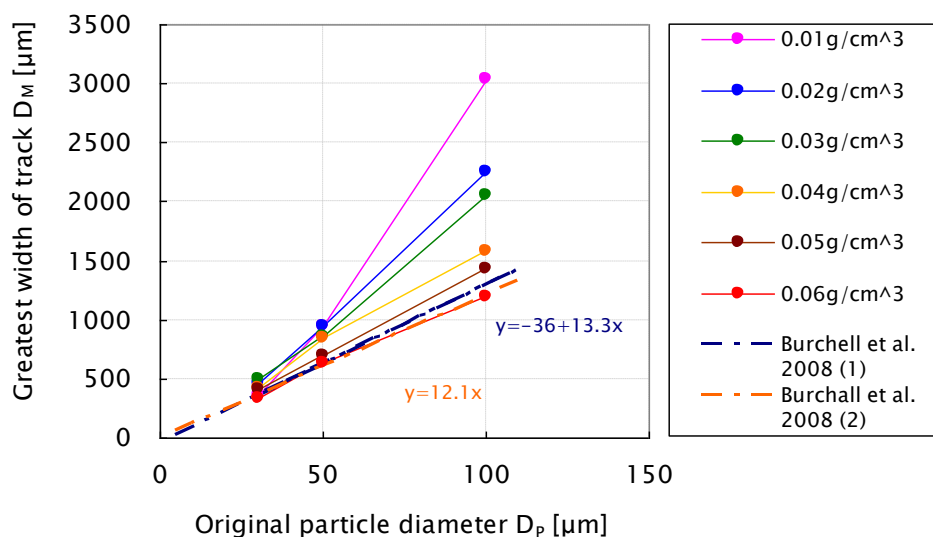


図 6: 衝突微粒子径と最大径の関係

参考文献

- [1] Y. Kitazawa, et al., in: Proceedings of International Symposium on SM/MPAC&SEED Experiment, JAXA Special Publication, JAXA-SP-08-015E, 2009, p. 49.
- [2] D. Brownlee, et al., Science 314 (2006) 1711.
- [3] 門野敏彦, et al., エアロジェルに残されたトラック形状に対する入射粒子密度の依存性, 平成 22 年度スペースプラズマ研究会・講演集, 40.
- [4] 横堀伸一, et al., 鉱物、有機物、微生物の高速衝突による変性の研究, 本講演集.
- [5] 小澤宇志, et al., 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, 本講演集.
- [6] 田端誠, et al., 宇宙塵模擬粒子によるシリカエアロゲルへの超高速衝突トラックの形態解析：ターゲット密度依存性, 平成 22 年度スペースプラズマ研究会・講演集, 41.
- [7] M. Tabata, et al. Biological Sciences in Space 25 (2011) 7.
- [8] M.J. Burchell, et al. Meteoritics & Planetary Science 43 (2008) 23.