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

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

我々は、東京薬科大学および宇宙航空研究開発機構(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」を利用する宇宙塵のサンプルリターン実験「たんぽぽ」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、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。「たんぽぽ」装置の主構成要素となる宇宙塵捕集材は、筆者(M.T.)が千葉大学において開発し た超低密度・疎水性シリカエアロゲルであり、「こうのとり」4 号機に搭載されて 2012 年度に打ち上げられる見込 みである。

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。さらに現在では、同じくエアロゲルを利用して彗星塵のサンプルリターンを成し遂げた NASA の Stardust に関わる研究の進展に伴い、エアロゲルに形成される超高速微粒子による衝突トラックの形態学的 解析、および捕獲粒子に対する多様な手法による分析は、惑星科学分野の重要な研究テーマとして捉えられ ている。先行研究では、Stardust の較正実験として、特定の密度のエアロゲルに対して様々な種類(密度) の粒子を入射させ、衝突トラックの解析が実施されている[1]。また、微生物や有機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入射させ、捕集粒子を摘出しての分析が「たんぽぽ」ワーキンググループによって行 われている[2]。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」が検討されている。サンプリング中に火星希薄大気に衝撃加熱された エアロゲルの捕集性能の評価も今年度から実施されている[3]。

本研究の目的は第1に、「たんぽぽ」を含む日本の次世代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2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。次章に示すように、我々は独自の製 法でシリカエアロゲルを開発しているが、非結晶質であるがゆえに、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、日本が独自に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、較正実験に供することに意義がある。

2. シリカエアロゲル(衝突ターゲット)の製作

シリカエアロゲルは、分散媒を含有するゼリ ー状のシリカ湿潤ゲルを合成し、それを超臨界 相下で分散媒を抽出(超臨界乾燥)するこ とで得られる無色透明な固体である[4]。空隙 率は 99%以上であり、大気雰囲気下での光 学特性は空気のそれに近く、断熱性も高い。 分散媒としては例えばエタノールが用いられる。

湿潤ゲルの合成法としては、Single-step 法と Two-step 法が知られているが、後者の 方が一般的である。日本においては、第3の製 法とも言うべき KEK 法が、1990 年代に高エネ ルギー加速器研究機構 (KEK) とパナソニック



図 1: 2 層一体型エアロゲル (9×9×2cm³)

電工の共同で、素粒子実験で利用するチェレンコフ輻射体として開発された。現在は開発環境を千葉大学に移して研究が進められており、我々独自の製法となっている。KEK 法の特徴は、メチルシリケート 51 という市販の試薬を利用することにより、湿潤ゲルの合成過程を簡素化したこと、および、そのままでは乾燥材シリカゲルと同様に吸湿性の高いエアロゲルを疎水化処理することで、経年劣化を防いでいることである。超臨界乾燥は、分散媒を液化炭酸に置換してから抽出する方法が現在の主流であるが、超臨界抽出装置の運用が容易であるという観点から、本研究に供するエアロゲルは、製作過程で分散媒として利用するエタノールを直接抽出する方式を用いた。1 バッチの製作過程は次のようになる:

1. 湿潤ゲル合成 2. 熟成 3. 前洗浄 4. 疎水化 5. 後洗浄 6. 超臨界乾燥。 前洗浄と後洗浄はそれぞれ、湿潤ゲル合成と疎水化で生じる副生成物を多量のエタノールに繰り返し浸漬する ことにより取り除く作業である。全工程で約1ヵ月を要する。

エアロゲルのバルク密度は、湿潤ゲル合成の試薬配合比で制御できる。実際には、製作過程での体積収縮 率を加味して試薬配合比を決定する。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通りで、典型的な大きさは、10×10×2cm³である。また、湿潤ゲルの合成過程で異なる密 度のエアロゲルを積層することも可能である(図1)。「たんぽぽ」計画でベースラインとして採用を予定している 0.01g/cm³と0.03g/cm³の2層一体型(各層の厚さ1cm)のエアロゲルも準備した。

3. 実験·解析手法

3.1. 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、復圧中も銃身側は次のショットの準備が可能である。

3.2. プロジェクタイル

宇宙塵模擬粒子としてソーダライムガラス粒子(Thermo SCIENTIFIC)を選択した。密度が2.5g/cm³ 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(施設備品)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合わないようにサボに封入する粒 子の量(重量を計測)には注意を払った。粒径は 30.1±2.1µm、49.9±3.0µm、97.6±4.9µm の 3 通 り、射出速度は 2km/s、4km/s、6km/s の 3 通りである。

3.3. ターゲット(エアロゲル)

密度は 0.01g/cm³, 0.02g/cm³, …, 0.06g/cm³ の 6 通り、および 0.01g/cm³+0.03g/cm³ の 2 層一体型の計 7 通りである。実験条件は(ターゲット密度 7 通り)×(粒径 3 通り)×(衝突速度 3 通り) =63 通りあり(垂直入射に限定する)、効率的に実験を進められるように 4 連装エアロゲルホルダーを製作し た(図 2)。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すとともに、衝突条件の揃ったサンプ ルを得ることが可能となる。製作したエアロゲルの典型的な サイズは 10×10×2cm³であるので、サンプルホルダーに 挿入できるよう約 3cm 角にフェザーにより切り出した。低 密度のエアロゲルの場合、衝突トラックが長くなることが予 想されるため、エアロゲルの長辺方向に粒子が貫入するよ うに設置した。また、製作したままのエアロゲルの表面や側 面はなめらかであり、内部視認性に優れている。一方、フェ ザーにより切断した面は凸凹してトラック観察の弊害となる 可能性がある。実験に供するエアロゲルは十分な数量を 製作したので、コーナー部分からのみ切り出しを行った。 3.4. 衝突トラック解析

衝突トラックの観察にはデジタルマイクロスコープ VHX-1000(KEYENCE、施設備品)を利用した。倍 率10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100-1000倍で撮影した (図3)。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4)。撮影した画像より、デジタルマ イクロスコープの内部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4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、各区間を円柱状の回 転体とみなすことにより、体積(V)を概算できる。



図 2: 4 連装エアロゲルホルダー



図 3: 貫入口撮像例



図 4: トラック全景撮像例

4. 実験の進行状況と解析結果

予定している全 63 通りの衝突条件のうち、2010 年度は 45 通りのサンプルにおいて解析可能なサンプルを 取得した。そのうち 16 通りのサンプル(50 トラック)においてトラック形態パラメータの抽出が完了している。

データの取得が未だ断片的であるので、本 稿ではプレリミナリーなプロットを図 5,6 に示す。 図 5 は、50µm の粒子の貫入長さ (L) を 衝突速度別に、エアロゲルの密度の関数とし てプロットしたものである(衝突速度 6km/s の場合はエアロゲル密度 0.02g/cm³と 0.03g/cm³の2点のみ)。エラーバーは、標 準偏差を解析トラック数の平方根で割った値 で示している。いずれの速度でもエアロゲルの 密度が大きくなるにしたがって、貫入長さは単 調に減少することがわかる。速度 2km/s より も 4km/s の場合の方が貫入長さが大きいが、 速度6km/sの場合は4km/sとほとんど変わ らないことが判明した。図6は同様に、衝突ト ラックの最大径(D_M)をプロットしたものであ る。衝突速度が一定の場合、最大径のエアロ ゲル密度依存性は小さいことがわかる。また、 衝突速度の推定には、貫入長さよりも最大径 の方がよい指標になると言える。

「たんぽぽ」で採用を予定している2層一体型のエアロゲルに粒径 30µm の粒子を速度 6km/sの速度で衝突させた結果、2cmの厚 さ以内で粒子の捕獲に成功した(図7)。こ







図 6: エアロゲル密度とトラックの最大径の関係

の衝突条件は宇宙ステーション上で十分想定されるものであり、30µmの粒子であれば摘出しての分析が可能である。これにより、2011 年 4 月からのフライトモデルの製造にあたっては、この密度 0.01g/cm³ +0.03g/cm³のタイプのエアロゲルを採用することに最終決定した。



図 7: 2 層一体型エアロゲルに捕獲された粒子

謝辞

本研究の実施にあたり、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。また、シリカエアロゲルターゲットの製造にあたり、千葉大学の河合秀幸准教授、高エネルギー加速器研究 機構の足立一郎准教授にご協力頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

[1] 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, 本講演集録.

- [2] 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, 本講演集録.
- [3] 小澤宇志 et al., 火星無着陸サンプルリターンに向けたエアロゲルサンプルキャプチャ検討, 本講演集録.
- [4] 田端誠 et al., 宇宙塵捕集材シリカエアロゲルの開発の現状, 第 11 回宇宙科学シンポジウム, 講演 後刷集 P7-035 (http://ae86.eng.isas.jaxa.jp/sss11/).