

スターダスト～ミクロの目で見える彗星の姿～ 回収から一次分析まで

中村圭子¹, マイケル・ゾレンスキー¹, スターダスト一次分析チーム

(要旨) 彗星には惑星系誕生・生命の起源にまつわる謎を解く鍵が隠されている。その鍵を我々はついに手に入れたスターダストで捕獲された彗星塵は平均 $5\mu\text{m}$ かつシリカエアロジェルに包埋されているため取り扱いが極めて困難で、マイクロサンプルハンドリングに熟達していない限り貴重な地球外試料を紛失してしまい、研究成果を得るまでに至らない。しかしながら、的確な試料作成を経て彗星塵が各研究機関に提供されれば、近年の微小領域分析技術の飛躍的な発達によりバルク化学組成、鉱物、有機分析、同位体分析に至るまでのデータを彗星塵ひと粒から得ることができる。本稿ではスターダスト彗星塵・星間塵の回収、キュレーション作業を解説する。

1. はじめに

NASAの彗星探査機スターダストは、打ち上げから4年後の2004年1月、ヴィルト2彗星(81P/Wild2)に接近し彗星塵を回収。2006年1月15日、彗星試料カプセルはアメリカ・ユタ州ソルトレイク市郊外にある空軍基地に無事帰還した。これにより人類は月に遠から初めて地球外固体物質を自らの手で手に入れた。

2. エアロジェルによる彗星塵捕獲

スターダスト探査機(図1)からテニスラケットのように突き出ている彗星塵捕獲トレイには $2 \times 4\text{ cm}$ 、深さ 3 cm のシリカエアロジェルが132個並んでおり、秒速 6 km 以上という高速で飛んでくる彗星塵がこの特殊なスポンジ状タイルに突き刺さり回収する仕組みになっている。エアロジェルタイルは彗星塵捕獲には最適な物質なのだが、鋭いカミソリ刃の先端で押さえつけただけで粉々に砕け散ってしまうほど脆い。多孔質で99.8%が空隙、つまりほとんど重さのない煙を固

形にしたものだとお考え頂きたい。また液体に触れると小さな高野豆腐のかけらのように白く縮んでしまう。真冬のユタの砂漠でカプセルが風雨・吹雪にさらされ、カプセル内部に水分が入り込みエアロジェルを破壊してしまうことが心配されたが、カプセル帰還の際は、ユタの夜空は晴れ上がりカプセルは見事な火球となって我々の眼を楽しませてくれた。

スターダスト帰還二日後、カプセルはテキサス州ヒューストンのNASAジョンソン宇宙センターに空輸された。スターダスト試料専用の無塵室内で、彗星塵捕獲トレイを保護しているキャニスターは開封され、予想を上回る数の彗星塵衝突・通過痕(彗星

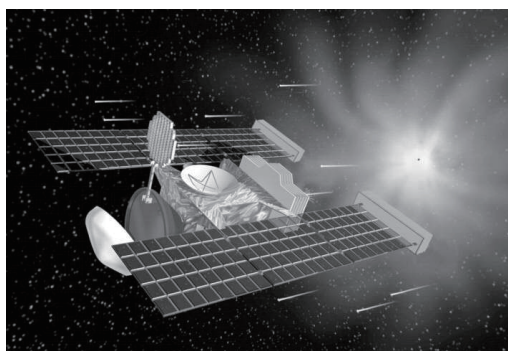


図1: ヴィルト2彗星に接近し彗星塵を捕獲するスターダスト探査機。想像図(NASA/JPL)。

1. NASA ジョンソン宇宙センター・地球外物質探査科学部門

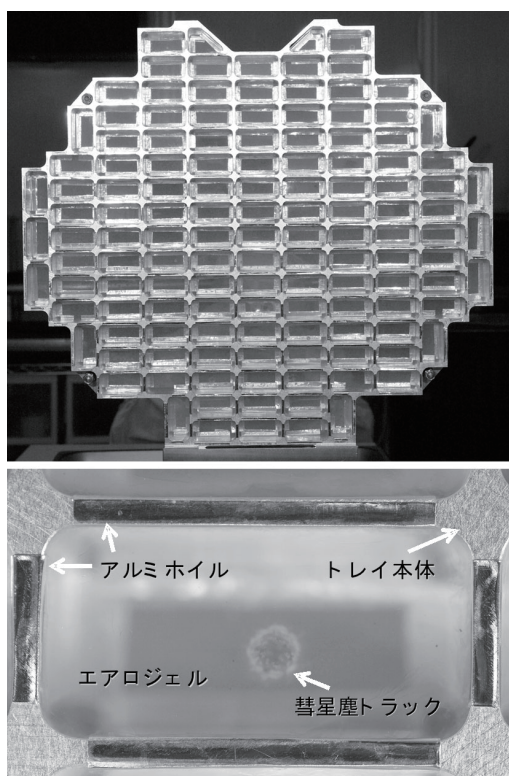


図2：レベル1フォト・ドキュメンテーション。キャニスター開封直後の状態をスティルカメラで撮影。図下：肉眼でも確認できる大きさの彗星塵トラック（直径5 mm以上）が11個確認できた（NASA/JSC）。

塵トラック）が肉眼でも確認できたのである（図2）。驚くべきことにエアロジェルタイルは探査機打ち上げ時のロケットの振動，さらには試料カプセルの地上落下時の衝撃にも耐え，1つも脱落することなく，ほぼ無傷の状態でトレイに収まっていた。また，スターダストのエアロジェルの密度は予測されていた彗星塵の速度と大きさに合わせて深部ほど密度が濃くなるように設計されていたため，エアロジェルタイルを貫通している彗星塵トラックは一つもなかった。

エアロジェルから彗星塵試料を取り出す前に，高倍率光学顕微鏡を搭載したスキャンニング装置を使って4段階にわたる詳細な写真撮像・記載解析作業が行われた。これらの画像・記載データは，NASAジョンソン宇宙センターのスターダスト彗星塵サンプルカタログ・ウェブサイト上で誰でも閲覧することができる。

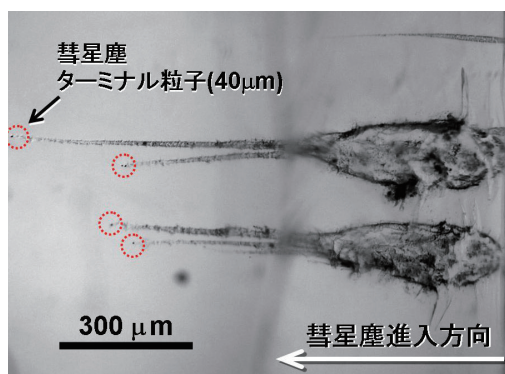


図3：レベル3フォト・ドキュメンテーション。エアロジェルタイル側面から撮影することで，トラックの形状，深さ，位置，彗星塵ターミナル粒子の個数・大きさを記載できる（NASA/JSC）。

エアロジェルタイルは側面と裏面の一部をアルミホイルで覆われており，背面からアルミホイルを引き抜く形で，1つずつ慎重にトレイから取り外される。2007年9月現在まででトレイから取り出されたエアロジェルタイルは30個。ジョンソン宇宙センターに万が一のことがあった場合に備えて，取り出されたエアロジェルタイルのうち10個はニューメキシコ州ホワイサンズ空軍基地内の核シェルター内で，その他の世界的遺産ともいえる地球外物質とともに大切に保管されている。

トレイ表面に露出しているアルミホイル（幅3 mm，長さ3 cmまたは1.5 cm）にも彗星塵の衝突クレーター多数見つかっている [1]。これらクレーターの多くは直径数十 μm と小ぶりだが，クレーター内部には，彗星塵物質がこびりついており，酸素16に富むプレソーラー粒子も検出されている [2]。

3. 彗星塵トラック

図3は，エアロジェルタイル取出し後，タイル側面から撮像したもので，3つの彗星塵トラックが確認できる。下部2つのバルブ型トラックは，彗星塵がエアロジェルとの衝突後，摩擦によって通過経路上に多数の細かな彗星塵粒子が剥がれ落ちて，すすけているように見える。その際，彗星塵は摩擦熱によって一気に

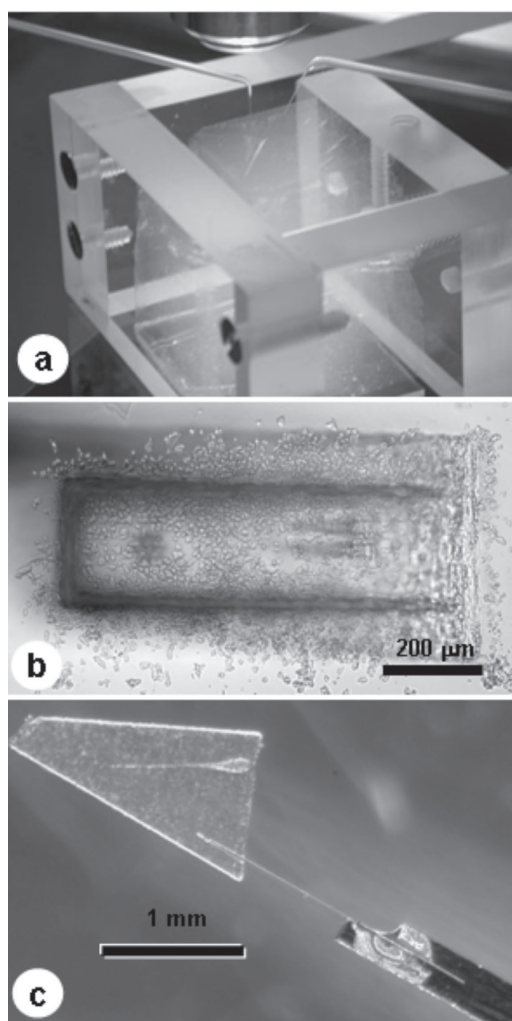


図4：キーストーンシステム。(a) コンピューター制御された2本のガラス針がエアロジェルに細かい穴を開ける。右側の針がアンダーカット。左がサイドカット。(b) キーストーン作成後のエアロジェルタイルを上から見た図。サイドカットが逆コの字を描いている。その左中央部に見えるのが彗星塵トラックの入り口。右側の2つの穴にマイクロフォークリフトが差し込まれる。(c) マイクロフォークリフトに載せられたキーストーン。長さ900 μm のトラックが見える。(カリフォルニア大学バークレー校, NASA/JSC)

過熱され、内部の揮発性物質が蒸発し、エアロジェルを膨張させている。その後、最も硬くて大きい粒子(ターミナル粒子)だけが枝分かれしながらも直進し、ついに減速して停止する。図3の左側にはそれらの生き残り粒子が確認できる(赤点線円)。それに比べ、図

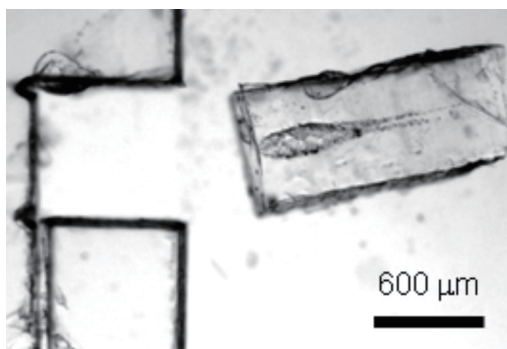


図5：クイックストーンシステムで切り出された彗星塵トラック。

3 上部のキャロット型トラックは、もともとの彗星塵が細かな粒子の集合体ではなく、小さな一固体だったのであろう。トラック上には彗星物質はあまりみうけられない。

4. 彗星塵トラックの切り出し

写真撮影・記載作業が終了すれば、科学分析のために彗星塵をエアロジェルタイルからとりださねばならない。しかし、彗星塵の大きさは平均5 μm 、彗星塵トラックの長さも平均で300 μm と非常に小さい。さらに先にも述べたように、エアロジェルは鋭利なナイフで切ることも研磨することも容易でない。このため、数種類のスターダスト試料用エアロジェル切断装置が新たに開発された。ここではキーストーンシステム[3]とクイックストーンシステム[4]を紹介する。

4.1. キーストーンシステム：サブミクロン単位で制御できる「縫わないミシン」だと思えていただきたい。鋭い硬化ガラス針(先端径1 μm)2本がコンピューターで動作をプログラミングされた2台のマイクロマニピュレーターに取り付けられている(図4a)。それらのガラス針がゆっくりと、しかし次々とミシンの要領で深さ1 μm の穴をエアロジェルに開けてゆく。トラックの深さ・サイズにもよるが、ガラス針がエアロジェルを5~50万回程度叩いた頃には、それらの無数の小さな穴がトラックの周りに連続的な溝を作り、トラックを切り出す仕組みになっている(図4b) [3]。

切り出されたトラックは、マイクロフォークリフトに載せることにより持ち運ぶことが可能になり（図4c）、放射光を利用したトモグラフィーやバルク組成分析にそのまま利用することができる[5]。

4.2. クイックストーンシステム：ダイヤモンド製のマイクロブレードに超音波振動を与えることにより、エアロジェルを押さえつけることなく切断できる装置である[4]。1つのトラックを切り出すのに数時間から数日かかるキーストーンシステムに比べ、クイックストーンシステムは短時間でトラックを切り出せるため、数mm単位の比較的大きなトラックの切り出しに適している（図5a）。

5. 彗星塵粒子の取り出し

キーストーン・クイックストーンを利用して切り出されたトラック単位のサンプル分析が終了すると、サンプルは一旦スターダストキュレーション施設に返還され、さらなるサンプルプロセッシングに取り掛かる。クイックストーンシステムは、エアロジェルに与えるダメージもわずかであるため、図6のように大きな彗星塵トラックの一部を切り出すこともできる。このような多数の彗星塵を含むサンプルは、試料が表面に露出していないと測定できない有機分析[6,7]などの非破壊測定施設に送られ、測定後再度キュレーション施設に返還される。

トラック内部において、実体顕微鏡下でエアロジェルと分別できる程度の大きさを持つ彗星塵（5 μ m以

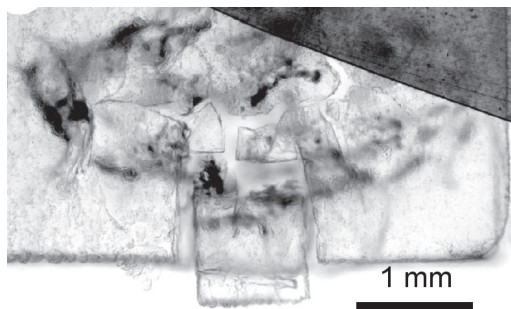


図6：クイックストーンシステムでブロック状に切り出された彗星塵トラックの一部。

上）は、手作業で取り出される（図7）。図7b,cは彗星塵トラックのターミナル部分（図7aボックス）を偏光顕微鏡で撮影・拡大したものである。透過光下では圧縮されたエアロジェルなども確認できるが、反射クロスポーラー（暗視野）の下では結晶質物質のみが輝いて見える。このようにしてターゲットを絞り、硬化ガラス針で数時間かけて手作業で彗星塵を掘り出す（図7d）。取り出された彗星塵粒子も、周りにエアロジェルがまわり付いていることがあるが、反射クロスポーラー下ではサンプルのみが確認できる（図7e,f）。

取り出された彗星塵粒子は、バルク鉱物分析[8]、顕微赤外分光[9]などの非破壊分析法で測定されたのち、再度スターダストキュレーション施設に返還され、さらに細分されてゆく。

6. ウルトラミクロトーム～超膜薄片作成法

ウルトラミクロトーム法とは、鋭利なダイヤモンドナイフを用いてサンプルを削切し、厚さ40～200 nmの超膜薄片を作成する方法である。大きさ10 μ mの彗星塵粒子ならば、100枚以上の薄片を作成することが可能で、たった一粒の彗星塵試料を複数の研究者に分配することができる。つまり、ウルトラミクロトーム法を用いることで、一粒のサブミクロンスケールの彗星塵試料に複数の分析手法を応用することが可能になるのである。さらには、非破壊法である透過型電子顕微鏡（TEM）を用いて薄片上の全ての物質を結晶構造解析・化学組成分析した後、全く同じ薄片を用いて極微小領域を分析できるイオンプローブ二次イオン質量分析計（NanoSIMSなど）で同位体分析すれば、どの鉱物が同位体異常のキャリアであるかがナノスケールで断定できる[10]。

先の顕微赤外分析で有機物が確認された彗星塵サンプルは、硫黄に包埋してからウルトラミクロトーム法で薄片にすることにより、エポキシ樹脂による有機汚染の可能性を除去することができる。硫黄は常温で蒸

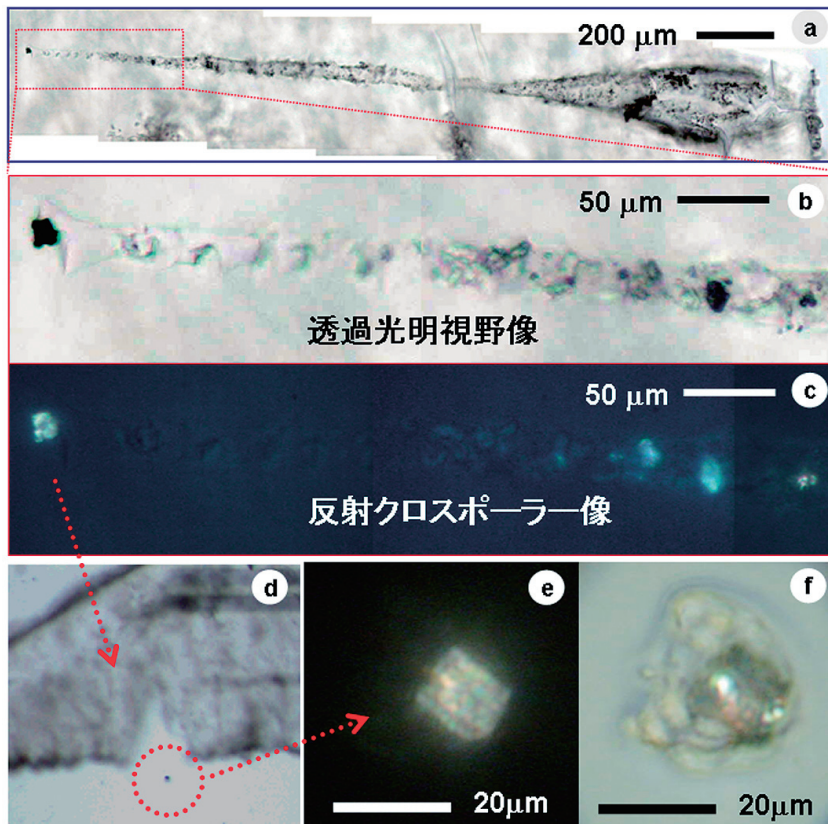


図7：(a) キーストンシステムで切り出された彗星塵トラック。(b,c) 図7aのボックス部分の拡大。(d) ターミナル粒子を取り出した際のビデオキャプチャー像。円内は取り出された後の粒子。(e) エアロジェルから取り出された後のターミナル粒子。反射クロスポーラー暗視野像。(f) ターミナル粒子。透過光明視野像。粒子にまわり付いているエアロジェルがみえる。

発するため、薄片作成後に残った粒子を取り出し、バルク同位体測定などに応用することもできる [2]。

大きな彗星塵粒子を取り除いたあとのトラックにも、多数の細かな彗星塵粒子が含まれている。また小さすぎて粒子が取り出せないトラックもある。そのようなトラックはキーストンごと平坦圧縮し、アクリル・エポキシなどの樹脂で包埋され、粒子サンプルと同様にウルトラマイクロトム法で薄片にすることができる [11]。

トラックを含んでいないエアロジェルももちろん貴重である。希ガス分析のほかに、有機物分析等のスタンダードとしても用いられる。

7. 星間塵捕獲トレイ

太陽系は銀河系内部を移動しており、その進行方向（いて座方向）から星間塵が秒速26 km以上の速さで太陽系内に流れ込んでいることを、太陽極域探査機ユリシズが発見した [12]。木星探査機ガリレオもまた、このinterstellar dust streamの存在を確認している。スターダスト探査機の彗星塵試料捕獲トレイの裏側には、124個の星間塵捕獲用のエアロジェルタイルが取り付けられている。スターダスト探査機はヴィルト2彗星に向う旅の途中で合計6ヶ月間、星間塵捕獲トレイを星間塵ストリームにかざした。それにより、45～100個の星間塵が捕獲できると計算されている。問

題は、星間塵の大きさが $0.001 \sim$ 数 μm と小さいため、形成されるであろうエアロジェル内のトラックも大きくても数十 μm 、研究者たちがしらみつぶしに探しても、一つのトラックを見つけるのに何ヶ月もかかってしまうかもしれない。そこで考案されたのが STARDUST@HOME である。これまでのべ2万4千人もの "Duster" と呼ばれる一般市民ボランティアたちが、「バーチャル顕微鏡」を操って、20の星間塵トラック候補を発見している。バーチャル顕微鏡とは、STARDUST@HOME ウェブサイト上の、仮想顕微鏡のことである。コンピューターで制御された自動偏光顕微鏡で、 $480 \times 360 \mu\text{m}^2$ (塩粒と同じくらいの大きさ) の範囲をエアロジェルの表面から深さ100 μm までフォーカスを徐々に変えながら40枚撮影する。この連続写真のスタックを動画としてつなぎ合わせ、コンピューターのマウスに応じて動画が動くように設定することで、まるでPCスクリーンを見ながらフォーカスを変化できる仮想顕微鏡が完成する。これまで4千万動画が作成され、ダスター達によって調べつくされた。これは星間塵捕獲トレイ面積の約40%に当たる。現在ジョンソン宇宙センターでは、星間塵捕獲トレイのフライトモデルを用いて、サブミクロンサイズのトラック切り出し作業の予行演習が行われている。実際に捕獲された星間塵をエアロジェルから取り出し、初期分析が始まるのは2008年月中旬になるであろう。

8. 彗星塵サンプルの初期分析

彗星塵試料分析にあたっては、隕石鉱物学者から有機化学者まで世界9カ国180人の研究者が招集され、スターダストの一次分析が開始された。鉱物・岩石学、分光学、バルク組成、有機分析、同位体分析、衝撃物理解析の6つのチームに分かれ、これまで研究上ではしのぎを削り合ってきたライバル研究者同士が、あらゆる手法を駆使し、10 μm ほどの塵一粒から全ての情報を引き出すこと8ヶ月。徐々に彗星が真の姿を顕した [13]。彗星塵からは数種類の有機物がこれまで検出

された [6]。有機物の中には絶対零度に近い環境、つまり低温の星間雲でしか形成され得ない水素・窒素の同位体異常が見られた [2]。これはヴィルト2彗星の中の有機物の中には原始太陽系星雲の源である分子雲の情報をとどめているものがあると解釈できる。ヴィルト2彗星は、数十 nm の細粒の鉱物 (最大のものでも1 μm 程度) が寄り集まって出来ている。主鉱物である輝石・カンラン石の組成をみるとマグネシウム、鉄の含有量が幅広いばらつきがある [14]。これはそれらの鉱物が出来上がった原始太陽系星雲ガスの組成の不均一さを意味している。輝石・カンラン石の酸素同位体測定の結果を見てみると、際立って異なる酸素同位体異常を示さないことから、ヴィルト2彗星はまさしく太陽系に属しているということがわかる。その一方で、彗星塵の中からは2000°C以上の高温状態つまり原始太陽の近傍でないとい形成され得ない鉱物 (カルシウム、アルミニウムに富む酸化物) も発見されたのである [14]。これは「Xウィンド」[15] と呼ばれる原子惑星系円盤の中心星から噴出する超音速の双極流によって、中心星近くで出来た固体が、彗星が誕生したカイパーベルトあたりまで到達したことを裏付ける証拠と言える。原始太陽系での予想を超える大規模な物質の大循環が起っていたのだ。これまで彗星は、「低温物質が寄り集まり、凍って出来た天体」と考えられてきたが、少なくともこのヴィルト2彗星に関しては、この定説が完全には当てはまらないことがわかった。詳しくは、本誌に掲載されている初期分析チームメンバーとして活躍された日本人研究者の皆さんの論文をご覧ください。

これまで分析された彗星塵は持ち帰られた全試料の0.1%にも満たない。ミクロスケール・ナノスケールで、これからもまだまだ彗星の分析は進んでゆく。どんな謎が解明されるのか、これからの彗星塵分析に期待いただきたい。

参考文献

1. Horz, F. et al., 2006, Science 314, 1716.
2. McKeegan, K. D. et al., 2006, Science 314, 1724.
3. Westphal, A. J., et al., 2004, Meteorit. & Planet. Sci. 39, 1375.
4. Ishii, H. A. and Bradley J. P., 2006, Meteorit. & Planet. Sci. 41, 233.
5. 中村智樹ほか, 2007, 遊星人 本号.
6. Sandford, S. A. et al., 2006, Science 314, 1720.
7. Clemett, S. J. et al., 2006, LPSC 38, 1338.
8. Flynn, G. J. et al., 2006, Science 314, 1731.
9. Keller, L. P. et al., 2006, Science 314, 1728.
10. 伊藤元雄, メッセンジャー・スコット, 2007, 遊星人 本号
11. Matrajt, G. and Brownlee D. E., 2006, Meteorit. & Planet. Sci. 41, 1715.
12. Grün, E. et al., 1993, Nature 362, 428.
13. Brownlee, D. et al., 2006, Science 314, 1711.
14. Zolensky, M. E. et al., 2006, Science 314, 1735.
15. Shu, H. et al., 1996, Science 271, 1545.

参考. スターダストカタログ

レベル1～4のフォト・ドキュメンテーション試料およびスターダストのサンプル作成に際して撮影された写真・記載はすべてNASAジョンソン宇宙センターのスターダストキュレーション・ウェブサイトにて閲覧・ダウンロードが可能である。エアロジェルタイル別、彗星塵トラック別などの項目に分かれており、カタログとして検索することができる。またスターダスト彗星塵試料を分析してみたい方にはプロポーザル内容に応じた形状の試料が無償で6ヶ月間提供される。その際の申請方法・ガイドラインなどもサイト内に記載されているので、ご参考いただきたい。

<http://curator.jsc.nasa.gov/stardust/>

ご自分でエアロジェル内の星間塵トラックを見つけたいという方は、今からでもStardust@homeのダスター要員としてサインアップし、バーチャル顕微鏡を操ることができる。ダスター同士のBBSでの議論も盛んで、コンテスト形式になっているので星間塵捜査の中毒になってしまう場合もあるので注意。

<http://stardustathome.ssl.berkeley.edu/>