

放射光によるスターダスト粒子の非破壊分析

中村智樹¹，三河内岳²，土山 明³

(要旨) ヴィルト 2 彗星から回収した塵に放射光を照射し，X線回折およびトモグラフィー分析を行った．その結果，彗星を構成する塵は，彗星形成以前の宇宙線照射の影響で非晶質化しているという予想に反し，結晶質の彗星塵が多数発見された．結晶質の塵は1～5 ミクロン程度の無水ケイ酸塩鉱物と金属鉄粒子が，隙間なく密に詰まった構造をしている．一部の結晶質の塵は火成岩の組織を示し，彗星形成以前に高温に加熱され溶融したことがわかった．これら火成岩の塵は，始原隕石に見られるコンドリュールと組織，鉱物組み合わせ，鉱物化学組成が類似することが判明した．

1. はじめに

塵は小さく，目で見えない．ちょっと風が吹いたり，静電気がひどいとすぐに飛んでいってしまい，無数の地球塵と混ざってしまうともう回収不可能である．中村は長年地球で回収される惑星間塵の研究を行い，塵の取扱いには習熟していたが，今回のスターダストの塵をNASA ジョンソン宇宙センターでエアロジェルから取り出すときは，「一粒一億円」のフレーズが頭をよぎり，そのため手がフリーズし最初は苦労した．地球の岩石や隕石とは異なり，塵を分析の土俵に上げるまでに，実は結構苦労している（本特集の中村圭子さんらの記事 [1] を参照）．太陽系の初期状態の情報満載の彗星の塵は，科学的には比類なき貴重品である．当然地球上で最高感度の分析法を網の目のように組み合わせて，さまざまな科学情報を得なければならない．塵を壊さず情報を得られれば，それに越したことはない．本解説記事では，強い光（放射光）を塵に当て，光と塵中の元素との相互作用を利用して，塵を構成する鉱物種の特定やその性質，さらに塵内部の三次元構

造を完全非破壊で調べた結果をできる限りわかりやすく紹介する．本稿で示す結果は，国際共同研究で行われた彗星塵の初期分析の期間に得られたもので，すでに公表されている [2-5]．したがって，分析の詳細を知りたい方はそちらを参照されたい．初期分析後の詳細分析は現在進行中で，今後別の形で公開される．

2. 彗星塵の構成物質と三次元構造

この項目では塵一粒ごとの構成物質（結晶質物質と非晶質物質）と塵内部の三次元構造について解説する．中村＋土山のグループは，初期分析で28個の彗星塵を分析した．そのうち24個は一つの大きな衝突痕から得られた塵である．この衝突痕（図1a）は長さが11.8 mmもある．彗星塵の入り口近傍が大きく膨らみ，その後細くなり最後に大きな塵が止まっている．入り口近傍が膨らんでいるのは，彗星粒子がエアロジェルに飛び込んですぐに摩擦熱で昇温し，揮発性物質が爆発的に蒸発したためと思われる．サブミクロンから30ミクロン程度の多数の塵が，この衝突痕全体に分布している．図1bや図1cに示すように，衝突痕内部の様々な場所から，24個の塵を取り出した．残りの4個の塵

1. 九州大学大学院理学研究院

2. 東京大学大学院理学研究科

3. 大阪大学大学院理学研究科

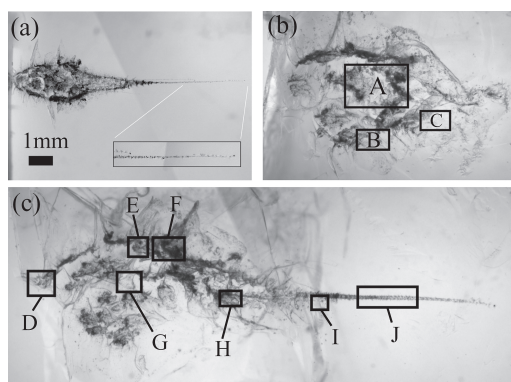


図1：エアロジェル内の彗星塵の衝突痕（トラック35）。
(a) 全体像。塵は図左側から突入した。(a)の衝突痕を2つに切断した一方(b)と他方(c)。A～Jの場所から、1箇所につき数個ずつ塵を取り出した。

は別の大きな衝突痕から取り出した。日本に持ち帰り、高エネルギー加速器研究機構およびSPRing-8の放射光施設で、細く絞り集光した放射光（約6 KeV）を塵に照射し、X線回折実験を行った。その結果、すべての塵から回折線が確認され、結果を検討すると、塵は大きく2つのタイプに分類されることがわかった。結晶質タイプと非晶質物質に富むタイプである。それぞれのタイプから2個ずつ選び（計4個）、SPRing-8でトモグラフィー分析を行い塵内部の三次元構造を調べた。

2-1. 結晶質タイプの彗星塵

初期分析で分析した28個の彗星塵のうち3個がこのタイプの塵であった。図1bと図1cのC, B, Jから各1個ずつ見つかった。Cから見つかった塵の内部構造（図2a, b）と鉱物組み合わせ（図2c）を示す。大きさ20ミクロン程度のこの塵は、Mgに富むカンラン石と輝石、金属鉄（カマサイト）で構成されている。それぞれの結晶からの回折線は極めてシャープで、高い結晶度を示している（図2c）。内部構造を見てみると、数ミクロン程度のカンラン石の周りを輝石が取り囲む組織を示し、構成粒子間にはほとんど隙間がない（図2a, b）。この組織は始原隕石中のコンドリュールに良

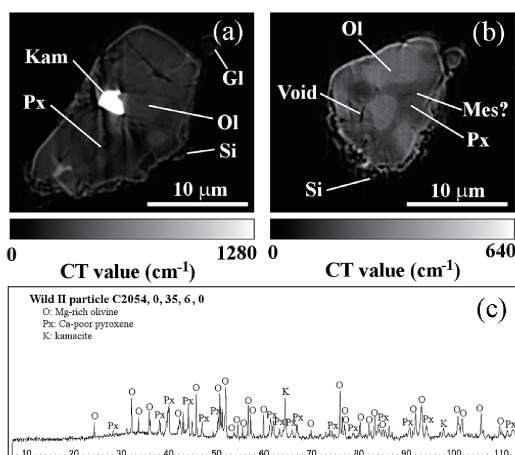


図2：結晶質タイプの彗星塵。(a), (b) 一つの塵の、異なる場所のX線CTによる断面像。Ol: カンラン石, Mes: メソスタシスガラス, Px: 輝石, Si: シリカ, Kam: 金属鉄, Void: 空隙, Gl: ガラスファイバー (c) X線回折パターン。横軸は回折角。

く見られる組織で、poikiliticまたはporphyriticとよばれる組織である。この組織は部分熔融した高温（摂氏1500度以上）のメルトが結晶化すると形成される。塵の断面の連続写真を図3に示す。塵全体が同様の火山岩の組織を示す。以上の分析結果から、この塵は形成時に高温に加熱され、部分熔融を経て形成されたと考えられる。回折線の回折角とCT像のコントラストから、この塵に含まれるカンラン石のMg/(Mg+Fe)比は約0.8と見積もられ、この比を始原隕石中のコンドリュールのカンラン石と比較すると、比較的鉄に富むタイプIIのコンドリュールに含まれるものに近い。このようなコンドリュールの一部と考えられる塵は、中村+土山の初期分析で2個、現在進行中の詳細分析でも複数見つかった。

後述するが、スターダスト探査機により捕獲された塵の多くは、捕獲時のエアロジェルへの衝突の際に加熱され熔融している。しかしながら、熔融した塵と異なり、結晶質タイプの塵はエアロジェルと混合せず、また急加熱急冷に特徴的な発泡した組織が見られない。したがって、結晶質タイプの塵は捕獲時に熔融しなかったと考えられる。また、彗星形成後に彗星内部で熔融したとも考えにくい。したがって、火成岩の組織を

示す結晶質の塵が部分熔融したのは、彗星形成前であると考えられる。太陽から遠く離れた彗星形成領域には、様々な組成の極微小のケイ酸塩鉱物やCAIに似た粒子 [3, 4] とともにコンドリュールに似た部分熔融を経て形成された粒子が存在していたことになる。今後の詳細な研究で、部分熔融した結晶質の塵がコンドリュールの一部であることが証明されれば、コンドリュールは形成期の太陽系に広範囲に分布していたことになる。

2-2. 非晶質物質に富むタイプ

分析した28個の彗星塵のうち25個がこの非晶質物質に富むタイプ（以下、非晶質タイプとする）であった。このタイプの塵の大きな特徴は、X線回折実験で強いケイ酸塩鉱物の回折線が検出されないということである。金属鉄や鉄硫化物の回折線は、強さやシャープさは塵ごとに異なるが、ほとんどの塵から検出される。塵の内部構造を見ると、金属鉄や鉄硫化物の微粒

子の他に、空隙率の高い多孔質な物質が大部分を占める（図4 a, b）。X線回折パターン（図4 c）には、この多孔質な物質に相当する回折線が確認されない。したがって、この多孔質な物質は非晶質である。さらに、X線回折パターン（図4 c）に確認される金属鉄の回折線は、通常のFeNi金属（カマサイト）よりも1%程度面間隔が縮んだ位置に現れている。検討した結果、この金属鉄には金属シリコンが含まれ、その結果面間隔が縮んだと推定した。その後、この非晶質タイプの塵を高分解能透過型電子顕微鏡で観察した結果、金属鉄にシリコンが含まれていることと、多孔質な物質はシリカ（ SiO_2 ）に富むことが確認された [4]。以上の分析結果をまとめると、非晶質タイプの塵は捕獲時にエアロジェルとの摩擦熱で加熱され、エアロジェルのシリカと混合熔融した。その際に発泡すると同時に一部のシリカが還元され熔融した金属鉄と合金を作ったと考えられる。非晶質タイプの塵の断面を電子顕微鏡（EPMA）で主要元素定量分析を行ったところ揮発性

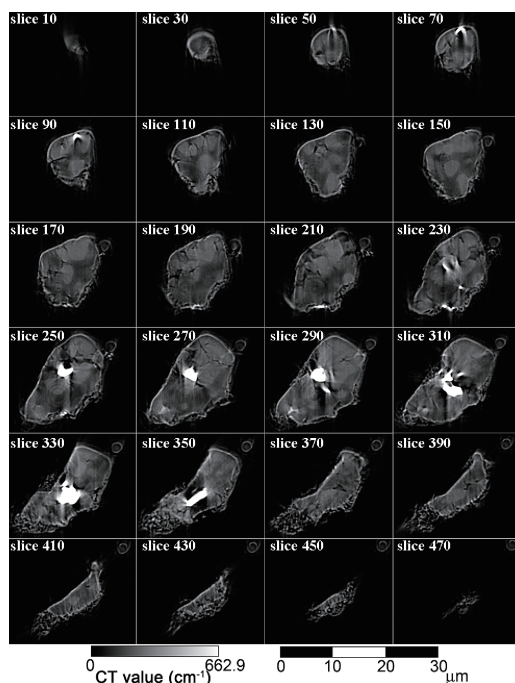


図3：図2の結晶質の塵の連続断面写真。構成物質は図2a, bを参照。

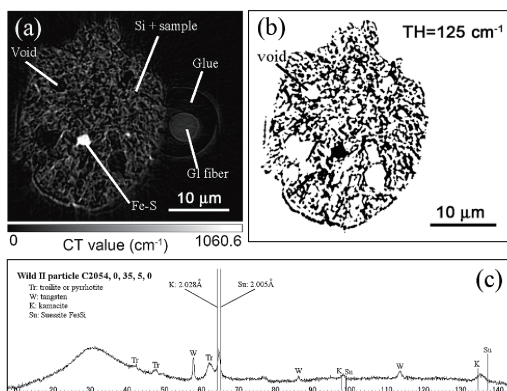


図4：非晶質物質に富むタイプの彗星塵。(a) X線CTによる断面像。FeS: 鉄硫化物, Gl fiber: 塵を支えるガラス棒, Glue: 接着剤, Si+sample: シリカと彗星塵の混合物, Void: 空隙 (b) (a)図を二値化して空隙部分(白)を見やすくしたもの。(c) X線回折パターン。横軸は回折角。金属鉄の回折位置にFeNi金属(K)とFeSi金属(Su)の回折位置を示す。塵の金属鉄の回折線の位置は明らかにFeNi金属よりも高角(低結晶面間隔)側に出現している。タンゲステン(W)は、塵を取り扱うタンゲステン針由来で、彗星の物質ではない。

に富むSを除き, Mg, Ti, Al, Mn, Cr, Fe, Niなどの元素がほぼ太陽組成を示すことがわかった [2]. Sが欠損しているのは, 捕獲時の加熱による蒸発と考えられる (本特集号の留岡さん他の記事 [6] を参照)。このことは, 非晶質タイプの塵は, 熔融前は無数の微粒子で構成され全体として太陽組成を持っていたことを強く示唆する。一方, このタイプのSiの濃度は太陽組成よりも約1桁濃集しており, 彗星物質とエアロジェルが1:10の割合で混合して熔融したことを示す。

一方, 非晶質タイプの塵のいくつかは, 結晶性の高いSiを含まない金属鉄と鉄硫化物の回折線と, それと同時に, 弱いながらもケイ酸塩鉱物の回折線を示すものがある。これらの塵は, 他の完全熔融した塵と異なり, 比較的溶融度が低いことが推定される。今後の研究が待たれるが, これらの塵には無水惑星間塵のような多孔質な微粒子の集合体が保存されている可能性がある。

3. 彗星塵中の微小領域X線回折

三河内のグループは, 放射光のビームを直径1.6ミクロンにまで絞って, 塵の中のさらに細かい部分のX線回折実験を行った。X線回折には, いくつかの手法があるが, 我々が行なったのは, 放射光白色X線を用いたラウエ法と呼ばれるもので, 単結晶から回折された像が斑点のように写されるものである。実験を行ったのは, 高エネルギー加速器研究機構 (放射光科学研究施設BL-4B1) で, 得られた回折像を解析することで, 構成鉱物の結晶構造が分かり, 化学組成を推測することもできる。また, 塵の中での異なった場所を分析することで, その塵がどのくらいの大きさの結晶でできているかの推測も可能である。これまでに16個の彗星塵を分析した結果, 結晶質と非晶質の塵の割合はおおよそ半々であった。2章の結果よりも結晶質のものの比率が高いが, これは, 様々なトラックの「ターミナル粒子」と呼ばれる, トラックの一番先端まで到達した大き目の粒子を選択的に多く分析した結果である。ターミナル粒子には, 結晶質のものが多くことが

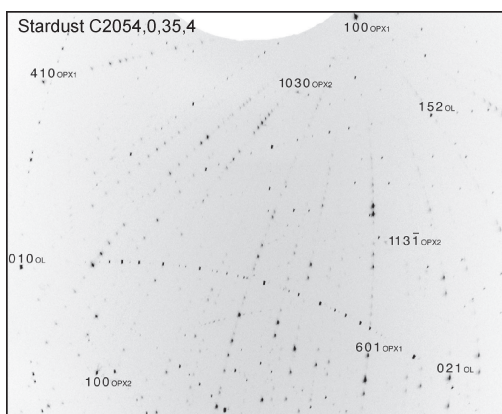


図5: ラウエ法を用いた単結晶X線回折で得られた写真。この写真には, カンラン石1つ (OL) と斜方輝石2つ (OPX1とOPX2) の回折パターンが写っている。いくつかの回折点の脇に指数が示されている。

分かっている [3]. 例えば, 分析した塵の1つからは, 図5に示されるような回折像が得られた。この塵は中村+土山のX線回折およびトモグラフィ分析で火成岩的組織を示すことが分かっている。解析の結果, この写真には, 合計3つの単結晶から回折された像が写っていることが分かった。1つがカンラン石で, 2つが斜方輝石である (図5)。得られた結晶構造から推定すると, カンラン石, 斜方輝石ともにMg/(Mg+Fe)比は約0.9であった。結晶質の塵の場合は, 分析位置を2.3ミクロンでもずらすと, 得られる回折点のパターンは異なる場合がほとんどであった。これは, 塵を構成する結晶のサイズが2.3ミクロン以下の多結晶体であることを示しており, 電子顕微鏡で得られた分析結果 [2, 6] や2章の結果と調和的である。オリビンとパイロキシンの他に, 解析で存在が明らかになった結晶は, トロイライトと呼ばれる鉄の硫化物であった。この鉱物もヴィルト2彗星の塵からは多く見つかっている [2]。また, SPring-8でも単結晶X線回折実験を行ない, サブミクロンにまで絞った放射光で4個の塵を分析した。結晶質のものは1つだけであったが, 解析の結果, この結晶はトリディマイトと呼ばれるシリカ鉱物であることが分かった。結晶のサイズはやはり2.3ミクロン以下と考えられる。トリディマイトは,

惑星物質には稀にしか見られない鉱物だが，他の初期分析チームが分析した塵からも見つっている。

4. まとめ

以上のように，放射光を用いることにより，非破壊で彗星塵の構成物質や内部構造を詳細に知ることができる。最近の高エネルギー加速器研究機構，SPring-8の両施設の光学系の進化は目ざましく，我々には大きな追い風になっている。しかしながら，放射光分析だけでは鉱物組成，元素組成，化学状態は判明するが，同位体比や超微細構造の情報が取れない。今後は効率よく，放射光分析とその他の分析を組み合わせ，彗星塵を地上で回収される始原隕石や惑星間塵と総合的に対比することが望まれる。

謝 辞

我々がスターダスト彗星塵を研究できるのは，アメリカ合衆国の皆様のおかげである。「一粒一億円」に投資したのは，我々でなく彼らである。また，我々に試料を配布する決定をしたDon Brownlee博士をはじめとする初期分析チームリーダーに感謝する。本解説記事中の2章は赤木剛博士（九州大学），上杉健太郎，鈴木芳生，竹内晃久博士（以上SPring-8），中野司博士（産総研），野口高明博士（茨城大学），3章は，萩谷健治博士（兵庫県立大学），大隅一政博士，Michael Zolensky博士（以上NASAジョンソン宇宙センター）との共同研究の成果をもとにまとめた。記して感謝する。高エネルギー加速器研究機構，SPring-8の実験では，多くのビームラインスタッフや様々な大学の研究者，大学院生に協力していただいた。心より感謝する。また，査読者の富岡尚敬博士（神戸大）は，本稿を分かりやすく改訂してくれた。併せて感謝したい。

参考文献

- [1] 中村 圭子, マイケル・ズレンスキー, 2007, 遊星人 本号.
- [2] Nakamura, T. et al., 2007, Meteorit. & Planet. Sci. (Stardust Special Issue), 印刷中.
- [3] Zolensky, M. E. et al., 2006, Science 314, 1735.
- [4] Brownlee, et al. 2006, Science 314, 1711.
- [5] Rietmeijer, F. J. M. et al., 2007, Meteorit. & Planet. Sci. (Stardust Special Issue), 印刷中.
- [6] 留岡 和重ほか, 2007, 遊星人 本号.