

# 放射光による彗星塵衝突トラックの非破壊分析

土山 明<sup>1</sup>，中村智樹<sup>2</sup>

(要旨) 放射光を用いたマイクロトモグラフィ撮影とX線蛍光分析により，彗星塵捕獲時にシリカエアロジェル中に形成された衝突トラックの3次元構造（長さ・幅・体積など）の定量的な解析と，彗星塵粒子の元素組成及びその分布を求めた．エアロジェルに突入した塵は多くの破片にわかれ，分岐したトラックの終端にある比較的大きな粒子だけでなく，トラック内壁にも微細な粒子が広く分布していた．トラック内部から塵に由来する多量の鉄が検出され，その総量は突入した彗星塵粒子の質量と関係している．3次元構造解析から求めたトラックの体積が突入粒子の運動エネルギーに比例すると仮定する事で，彗星塵は低分子有機物や氷などの高揮発性物質を含むことが示唆され，それがトラックのバルブ状部分の形成に寄与したと考えられる．今後，より多くのトラックについて同様の研究をすすめることにより，トラック形成の物理と突入粒子の再現に迫ることができる．

## 1. はじめに

スターダスト探査機は木星族彗星であるヴィルト2彗星に接近して，彗星塵を採取し地球に持ち帰った[1]．彗星塵は探査機との相対速度が6.1 km/秒と大きいため，エアロジェルと呼ばれる超低密度多孔質シリカガラス (5-50 mg/cc) を用いて捕獲された[2]．エアロジェルに突入した彗星塵は衝突トラックと呼ばれる細長い空隙を作り，粒子は最大数十 $\mu\text{m}$ 以下の多くの破片にわかれて捕獲されていた．そのため，突入した彗星塵そのものを再構成することには非常に困難を伴うが，初期分析の結果，彗星塵は脆くて微細な粒子と比較的大きな結晶性のよい粒子の集合体であり[3,4]，彗星塵全体の化学組成はCIコンドライトと大差ないことがわかった[5]．

彗星塵の衝突トラックは，入口付近のズングリとしたバルブ（電球）状の部分とその先の細いトラックからなる（例えば図1 a）．バルブは脆くて微細な粒子の

集まり（無水惑星間塵的なもの）が突入時に破壊して形成され，強度の高い結晶性粒子が奥まで侵入して細長いトラックを作ったと考えられている[3,6]．

本稿では，国際共同研究で行われた彗星塵試料初期分析の一環として，筆者らを中心とした日本の初期分析グループがおこなった衝突トラックの3次元構造解析と元素組成分析，及びその分布に関する研究結果[7]についての概要を述べる．また，2006年12月をもって初期分析が終了した後も，本稿に述べるテクニックを使用して更なる詳細分析は現在も進行中であり，機会があればまた紹介したい．

## 2. 実験

NASAジョンソンスペースセンターのスターダスト・ラボラトリー[2]において，塵捕獲器から取り出されたエアロジェルは彗星塵試料とそのトラックを含むように，キーストーンと呼ばれるおおよそ1mm程度の大きさの3角形の平板に切り出された（図1 b）．我々のグループは，初期分析で4つのキーストーン

1. 大阪大学大学院理学研究科

2. 九州大学大学院理学研究院

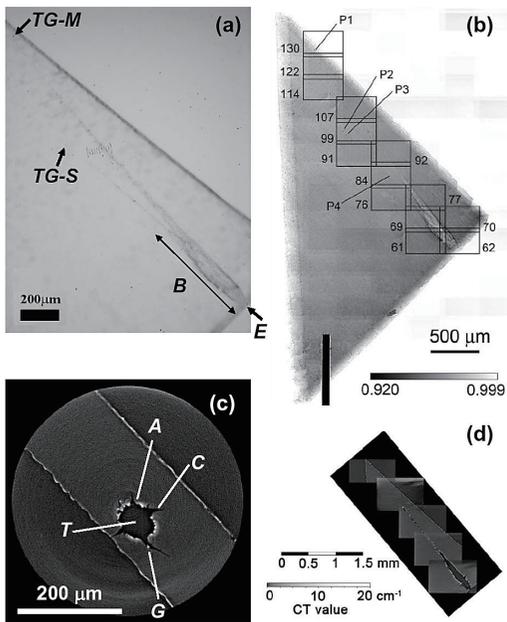


図1: トラック68(スカイロケット)の分析例。(a) キーストーンに含まれる彗星塵とその衝突トラックの光学顕微鏡写真。E: トラック入口, B: パルプ状の部分, TG-M: メイントラックの終端粒子, TG-S: サブトラックの終端粒子。(b) キーストーン全体のX線透視像(ラジオグラフィ)とX線蛍光分析箇所(四角で囲んだ領域および大きな突入粒子破片:P1-P4)。(c) CT像の一例(T: トラック空隙, A: 高密度化したエアロジェル, C: 放射状クラック, G: 粒子破片)。(d) 3次元CT像をもとに, 画像処理により求めたトラックの伸長方向の断面像。

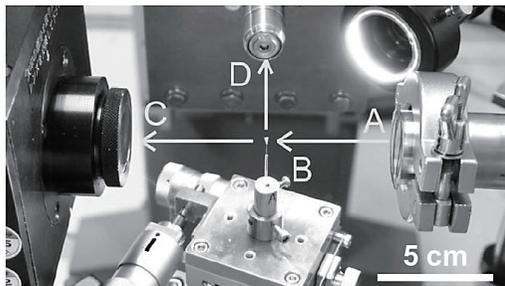


図2: 実験装置(Spring-8のビームラインBL47XU)。A: X線ビーム入射口, B: サンプルステージ, C: X線像検出器(トモグラフィー), D: 蛍光X線検出器。サンプルステージの正方形の一辺が5 cm。

の衝突トラックのマイクロトモグラフィーによる3次元内部構造撮影とX線蛍光分析をSPring-8放射光施設でおこなった。本施設における実験の最大の特徴は, サンプルステージに搭載したキーストーンの位置

を変えることなく, 高空間分解能マイクロトモグラフィー撮影とX線蛍光分析をおこなうことにある(図2)。これらによりトラックの3次元構造の定量的な解明と, トラック内部に存在する彗星塵由来の様々な元素の分布を求めることができる。

分析に先立って最初にトラック全体のX線投影像撮影をおこない(ラジオグラフィ)(図1b), トラック形成時に分裂してしまった塵粒子のなかでも比較的大きな塵粒子( $\sim 10 \mu\text{m}$ )の位置を確認し, X線蛍光分析をおこなう領域を決定した。次に, その領域をX線蛍光法により12元素(S, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni, Zn, Cu, Ga, Ge, AsおよびSe)の分析をおこなった。Siはエアロジェルの主要成分であるため, またMgなどSi以下の軽元素は大気と試料自身による吸収が大きいため測定できなかった。その後, トモグラフィー撮影をおこない(実効空間分解能は約 $1 \mu\text{m}$ )(図1c), スライス像(CT像)を積み重ねることによって3次元像を得た(図1d)。長いトラックは一度にすべてを撮影できないので, 位置をずらして複数回撮影して, 画像処理によりこれらを3次元的に繋げた。得られた3次元像は, 独自に開発した3次元画像処理ソフトウェアSLICE [8]を用いた画像解析により衝突トラック長さ・幅・体積などの定量的なデータを得た。分析した4つのトラックのうち1つは破損していたので, 残り3つのトラックについて解析をおこなった。これらは, その形状により「ゴボウ」(図3a, 長さ $940 \mu\text{m}$ ), 「ナメクジ」(図3b, 同 $120 \mu\text{m}$ ), 「スカイロケット(ロケット花火)」(図3cとd, 同 $2640 \mu\text{m}$ )と名づけられた。

### 3. CT像による衝突トラックの3次元形状解析

図1cに示したCT像において, 塵粒子による衝突トラックは周囲よりもより暗く写った空隙として表示される。トラック壁面のほとんどの部分には, 粒子突入による衝撃波によって融けたか, あるいは圧縮されて高密度化したエアロジェルが明るく写っている。また, この高密度化したエアロジェルの壁を突き破って, ク

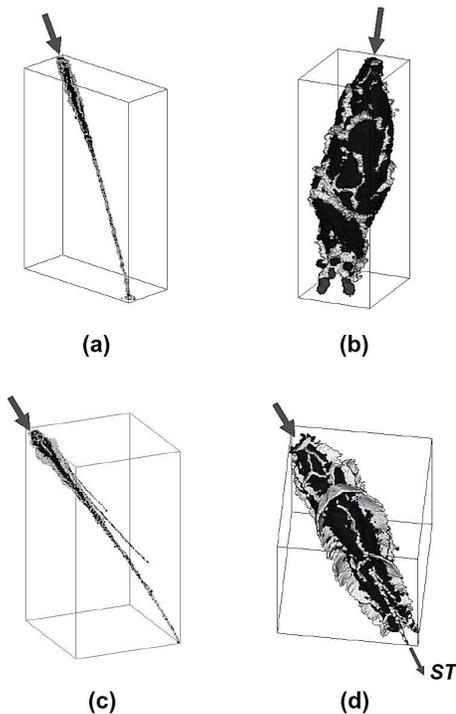


図3：トラックの3次元形状を示す鳥瞰図。矢印は突入粒子の入口を示す。(a)トラック46(ゴボウ)トラック長：940  $\mu\text{m}$ 。(b)トラック67(ナメクジ)トラック長：120  $\mu\text{m}$ 。(c)トラック68(スカイロケット)トラック長：2640  $\mu\text{m}$ 。(d)スカイロケットのバルブ部分の拡大図。矢印STはサブトラックの射出方向を示す。

トラックが放射状に発達している。突入してきた粒子の破片は、孤立した明るい粒子として、トラック終端(終端粒子)、トラック壁や放射状のクラック内に存在している。これらのトラック構成要素を画像より抽出し、トラックの3次元外形を求めた。ゴボウは細長いキャロットタイプのトラックでややカーブしている(図3a)。ナメクジはバルブのみからなっており、その終端に複数の終端粒子が存在している(図3b)。スカイロケットもキャロットタイプのトラックであり、ゴボウ同様にメイントラックはややカーブしている。また、バルブ部分の先、または途中から複数の細長いトラックが分岐している。分岐したトラックの終端にはすべて粒子破片が認められる(図3c)。粒子破片は終端だけでなく、バルブ内部や細長いトラック壁、さらにク

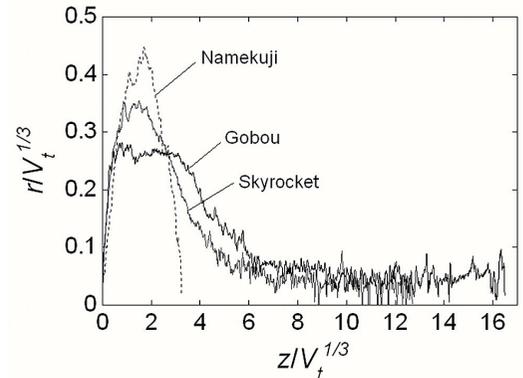


図4：定量的なトラックの形状。入口からの距離、 $z$ 、の関数としての半径、 $r$ 、が、それぞれトラック体積、 $V_t$ 、の1/3乗で規格化してある。キャロットタイプのトラックであるゴボウとスカイロケットもバルブ部分が発達していることがわかる。

トラック全体にわたり広く分布している。1枚のCT像で放射状のクラックと見えたものは実際にはU字状になっており、その中心部からサブトラックが分岐して行くことがわかる(図3d)。

得られたCT像より、トラック入口からの距離(深さ)におけるトラック空隙の断面積を得ることができる。これにより、衝突トラックの体積だけでなく、その断面を円相当径で近似することによりトラック形状を定量的に求めることができる。体積の1/3乗で規格化した定量的なトラック形状を図4に示す。いずれのトラックも入口は狭く、その奥で広がってバルブを作っていることがわかる。

#### 4. 化学組成・元素分布とトラック形状との比較

X線蛍光分析によって12元素全てが測定できたトラックはスカイロケットのみであり、他の2つは微量元素濃度が分析機器の検出限界以下であったためFeあるいはNiのみ測定した。スカイロケットのバルブ領域にはFeが多く存在し、バルブ内部全域に多くの微細粒子破片が存在していることがわかる。分岐したトラックの終端に存在する比較的大きな粒子破片にもFeが存在しており、トラック全域から求められた総鉄量のうち32%を占めていることがわかった。化学組

成のデータの詳細は文献 [5] に初期分析結果の一部として掲載されている。

トラックの総鉄量は突入粒子のもつ Fe の質量そのものなので、元の塵粒子が太陽系平均元素組成を持つと仮定すると、塵粒子の質量が推定できる。彗星塵のエアロジェルへの突入速度は一定とみなすことができるので、塵粒子の運動エネルギーはその質量のみの関数となる。トラックの体積は運動エネルギーに比例する [9] と考えると、総鉄量とトラック体積の比は一定にならなければならない。しかしながら、バルブのみからなるナメクジ (図 3 b) はこの比が有意に小さく、他の 2 つのトラックと比べて相対的に Fe に乏しいことがわかった。

彗星塵を (1) 無水惑星間塵的な脆くて微細な粒子の集まり、(2) CAI やコンドリュールに類似した鉱物の集合体からなる結晶質粒子 [3, 4]、(3) 低分子の有機物や氷などの高揮発性成分の集合体と仮定しよう。上記それぞれの成分に関してトラック体積が運動エネルギーに比例し、さらにこれらの間に加成性があるすれば、総鉄量とトラック体積の比の比較から、彗星塵粒子には高揮発性成分が存在する必要がある、それはナメクジに最も多く含まれていることが予想される。このことは、バルブ形成には (1) の微細粒子集合体だけでなく、衝突時に失われた (3) の高揮発性成分が寄与している可能性を示唆しているが、今後より多くのトラックの分析が必要であろう。

## 5. まとめ

以上のように、放射光を利用したマイクロトモグラフィと X 線蛍光分析を用いることにより、非破壊で彗星塵の衝突トラックの 3 次元構造と元素組成・分布を得ることができた。今後、多くの衝突トラックについて研究をすすめることでトラック形成の物理と突入した彗星塵粒子の再現に迫ることができると考えられる。

## 謝 辞

地球外サンプルが採取され、人間の手で分析できるのは、アポロ計画やルナ計画によってもたらされた月のサンプル以来、おおよそ 30 年ぶりのことである。このような機会に参加できたことは、本当にありがたいことである。キーストーンの実物を最初に見たとき、これが宇宙を旅して彗星から地球に帰還したサンプルなのかと胸踊り感激したことは、生涯忘れられないであろう。アメリカの惑星探査の実力とサイエンスの懐の深さを改めて感じた。このような機会を与えていただいた 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したい。また、共同研究者である、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)、岡崎隆秀、飯田洋祐氏 (以上大阪大学)、赤木剛博士、城後香里氏 (以上九州大学) に感謝する。SPring-8 における実験では、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。

## 参考文献

- [1] Brownlee, D. et al., 2006, *Science* 314, 1711.
- [2] 中村 圭子, マイケル・ズレンスキー, 2007, 遊星人 本号.
- [3] Zolensky, M. et al. 2006, *Science* 314, 1735.
- [4] Nakamura, T. et al., 2007, *Meteorit. & Planet. Sci. (Stardust Special Issue)*, in press.
- [5] Flynn, G. F. et al., 2006, *Science* 314, 1731.
- [6] Hörz, F. et al., 2006, *Science* 314, 1716.
- [7] Tsuchiyama, A. et al, 2007, *Meteorit. & Planet. Sci. (Stardust Special Issue)*, under revision.
- [8] 中野 司ら, 2006, 財団法人高輝度光科学研究センター. Slice Home Page (web), <http://www-bl20.spring8.or.jp/slice/>
- [9] Kadono, T., 1999, *Planet. Space Sci.* 47, 305.