

特集「スターダスト探査が解き明かす原始太陽系の姿」 スターダスト探査が解き明かす 原始太陽系の姿

三河内 岳¹

(要旨) スターダスト探査は、ヴィルト 2 彗星から放出された塵試料を地球に持ち帰った、NASAによるサンプルリターンミッションである。試料の分析には、日本を初めとする多くの国の研究者が参加した。長年にわたり研究されてきた塵試料前処理法の開発、室内実験、地上汚染対策が基盤となり、6つの初期分析チーム（化学組成・赤外分光・鉱物岩石・同位体・有機物・衝突クレーター）が協調して、彗星塵に固有の成分を検出することに成功した。その結果、原始太陽系星雲の太陽近傍で形成されたケイ酸塩鉱物などの高温物質が、Xウィンドにより原始太陽系円盤外縁部まで運ばれ、極低温環境を起源とする有機物などの成分と混合するような大規模な物質移動が原始太陽系星雲の形成初期に起こったことを支持する証拠が得られた。

「1粒1億円」。このフレーズは後の中村智樹氏らの論文 [1] にも登場するが、低コストとは言え約2億ドルのミッションであったスターダスト探査がいかに貴重な地球外試料を持ち帰ったかを端的に表している。スターダスト探査は、NASAが実施した彗星塵のサンプルリターンミッションである [2]。実際には、優に1万個を越える数の塵の捕獲に成功したので単価としては下がる計算になるが、その価値は決して下がるものではない。これまでに、地球外の天体からサンプルリターンされていたのはアポロ・ルナ探査による月試料だけであったが、人類は実に40年ぶりに新たな天体の試料を取得した。しかも、それは太陽系を作ったと考えられる約46億年前当時の原材料を冷凍保存した状態であることが期待される試料だったのである。

1999年に打ち上げられたスターダスト探査機は、2004年1月にヴィルト2彗星の核までわずか230キロ程まで接近し、彗星のコマを構成する塵をシリカエアロジェルと呼ばれる極低密度の物質で採集した [3]。その後、エアロジェルを格納したカプセルは、2006年1月に無事に地球に帰還し、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送られた。エアロジェル中の塵試料は、各分析に適した様々な試料調整が施された後、速やかに世界中の初期分析チームの研究者に分配され、約半年間超にわたり集中的に分析が行なわれたのである [4]。そのメンバーの数はおよそ200名近くにも上る。これは世界9カ国100機関以上にわたる人数であるが、この中に日本人は17名含まれている [4]。全体の割合としては、1割にも満たないが、この数字以上に、日本人の研究者が果たした役割は大きい。初期分析は、「化学組成分析」、「赤外分光分析」、「鉱物・岩石学分析」、「同位体分析」、「有機物分析」、「衝突クレーター解析」の6つのサブチームに分かれて行なわれた。この中で、日本人研究者はすべてのチームに名前を連ねている。特にNASAジョンソン宇宙センターの中村圭子氏はサンプル回収から試料準備、配分、分析まですべてに関わっており、今回のスターダスト探査では重要な役割を演じた。本特集では、この6つのサブチームによる初期分析結果をなるべく網羅するように7編の論文の掲載を企画した。

彗星塵は、エアロジェルに捕獲された後に衝突トラックに沿って多数に分かれている。エアロジェル中に

1. 東京大学大学院理学系研究科

存在する個々の塵粒子は最大でもせいぜい30ミクロンの大きさしかないため、これらの塵粒子をハンドルして分析するのは容易なことではない [1]。実際の試料分析は、試料の前処理があって初めて可能となる。中村圭子氏らの論文 [5] では、NASA ジョンソン宇宙センターにあるスターダストのラボで、エアロジェルに埋まった塵を特殊な装置でトラックごと取り出してキーストーンを作製する方法や、エアロジェルからいかにして塵を取り出し、分析用試料とするかの技術が紹介されている。また、微量の試料から最大限の結果を引き出すため、塵試料の詳しいカタログ作りにも重点が置かれた点が説明されている。

近年の微小領域の分析技術は革新的に進展しており、わずか1ミクロンの塵1粒からでも非常に多くの物理・化学的情報を引き出すことができる [6]。放射光を使った分析は、彗星塵のような微量の試料の分析に絶大な威力を発揮する。国内には、高エネルギー加速器研究機構とSPRING-8という2つの大きな放射光実験施設が存在し、共に今回の彗星塵試料の分析に使われた。土山明氏らと中村智樹氏らの論文では、放射光による蛍光X線分析とトモグラフィー分析で、衝突トラックの3次元構造と個々の彗星塵粒子の元素組成および分布を調べた結果がまとめられている [1, 7]。様々な形状をした衝突トラックの中でも特徴的なのは、突入口付近にバルブ状の部分があり、その先に細いトラックが続いているタイプであるが、本分析から、このバルブ状の部分は有機物や氷などの揮発性物質によって形成されたことが示唆されており興味深い [7]。これは、彗星塵中の有機物の分析結果や室内衝撃実験の結果と実際に一致するようである [8, 9]。また、放射光を用いたX線回折およびトモグラフィー分析の結果では、結晶質の彗星塵が多数発見されており、ケイ酸塩鉱物と金属鉄粒子が密に詰まった構造をしていることが明らかになっている [1]。特にX線回折については、初期分析チームでは日本人研究者しか行なっておらず、塵の非破壊分析に非常に有用であった。留岡和重氏らが透過型電子顕微鏡で分析した結果では、結

晶質の塵は、主にカンラン石、輝石、鉄ニッケル硫化物、鉄ニッケル金属からなることが分かった [10]。これらの成分は始原始的な隕石に見られるコンドルールと類似しており、放射光による分析結果と一致している [1]。カンラン石と輝石は不均質な化学組成を持っており、最も未分化なコンドライト隕石や無水の惑星間塵に近いことから、ヴィルト2彗星の塵は、非晶質の星間物質のようなものではなく、コンドライトに似た成因であることが指摘されている。これらの岩石・鉱物学的分析では、これまでに多数の塵が分析されているが、水質変成によって形成される蛇紋石などの含水鉱物は見つかっていない。

放射光はまた、有機物の構造分析にも適用された。藪田ひかる氏は、軟X線を用いた走査型透過X線顕微鏡 (STXM) とX線吸収端近傍構造解析 (XANES) により、ヴィルト2彗星塵試料に含まれる有機物の微小領域における官能基の組成を定性・定量的に評価した [9]。検出された有機物は主に窒素・酸素を含む種々の官能基あるいは脂肪族炭素から構成され芳香族炭素の割合は低いことが明らかとなった。これらの結果からは、彗星塵中の有機物の構造が炭素質コンドライト中の有機物に比べて不均一であることが示された。また、有機物分析サブチームで実施された諸分析 (ラマン、赤外、個別成分分析等) も併せて紹介されており、複数の結果が共に、始原始的な地球外有機物の化学特徴を反映していることが理解できる。

彗星塵試料の同位体組成の分析は、無機物・有機物にかかわらず、ヴィルト2彗星成分の起源を探る上で非常に重要である。塵試料の同位体分析には、サブミクロン領域の同位体比測定ができる二次イオン質量分析 (SIMS) およびNanoSIMSが用いられた。伊藤元雄氏らによるNanoSIMSを使った塵試料の同位体マッピングによると、彗星塵を構成する個々の鉱物の酸素同位体組成は、これまでに得られている太陽系内物質と非常に近いと報告されている [11]。太陽系外起源のプレソーラー粒子は、これまでのところ1つしか発見されておらず、この粒子は赤色巨星由来のものと解

積されている。有機物の水素、炭素、窒素同位体分析では、水素と窒素の同位体異常が検出され、太陽系形成以前の冷たい分子雲ガスの情報を保持しているものが含まれている可能性が指摘されている。

以上のように、ヴィルト2彗星塵に含まれる諸成分について多くの結果が得られた。併せて、これらの分析結果を正当に評価するには彗星塵がエアロジェルに捕獲された際に起こりうる成分の変成やコンタミネーションについての室内模擬実験による検証が必要となる。実際に、捕獲時の熱の影響でエアロジェルのシリカとコンタミネーションを起こしている塵は相当数に上る[1, 10]。奥平恭子氏はケイ酸塩鉱物粒子などを加速器でエアロジェルに撃ち込み、回収試料の分析から変成の度合いの評価を行っている[8]。蛇紋石などの層状ケイ酸塩鉱物を用いた実験結果によると、彗星塵の捕獲時の条件と同じ毎秒6キロで粒子試料を撃ち込んだ場合でも、含水鉱物は完全には失われずに残っていたことから、ヴィルト2彗星の塵には層状ケイ酸塩は元よりほとんど含まれていなかったようである。また、有機物はこのような熱変成の影響に敏感であり、衝撃実験でも有機物の量的な変成（消失）の可能性が指摘されている。しかし、試料分析で検出された有機物の分子構造や同位体組成には熱変成の影響を明示する証拠は検出されていないため、塵試料中に残存した有機物については、激しい変成は免れたのかもしれない[9]。

このような多種の分析結果からは、ヴィルト2彗星塵には、高温での生成物であるカンラン石、輝石などのケイ酸塩鉱物と低温での生成物である有機物などの両方が含まれていることが分かった。特に炭素質コンドライトに含まれる難揮発性包有物(CAI)と類似した鉱物が見つかり、同位体組成にもその傾向が見られるのは、ヴィルト2彗星に原始太陽近傍の高温環境(> 2000K)で形成された物質が含まれている強い証拠である[4, 10, 11]。また、ケイ酸塩鉱物のほとんどが太陽系の同位体組成を持っており、有機物に関しては、極低温(～20K)の星間分子雲を起源とするものが含

まれている。このような結果を整合的に説明するには、Xウィンドモデルによる解釈が有力と考えられる[12]。このモデルでは、原始太陽系星雲の太陽近傍で形成されたケイ酸塩鉱物のような高温物質が、Xウィンドにより原始太陽系円盤外縁部まで運ばれ星間分子雲起源の有機物と混合するプロセスを説明している。スターダスト探査により、原始太陽系星雲の形成初期にそのような大規模な物質移動があったことを示す物的証拠が初めて見つかったと言えよう。

また、スターダスト探査では彗星塵の捕獲に先立って、星間塵の採集も行った。星間塵は、そのほとんどがサブミクロンの大きさと彗星塵よりも小さい上に、採集された数もはるかに少なく、エアロジェル中から探し出すのが非常に難しい。そのため、一つのラボでその作業を行うには膨大な時間を消費してしまう。そこで、インターネット上に“バーチャル顕微鏡”を設置したStardust@Homeでは、世界中の誰でも個々のコンピュータから星間塵探しに協力できるユニークな方法を実施している[5]。これらの試料も近い将来に分析に回される予定で、その成果もこれから大いに期待される。

彗星の科学は、ハレー彗星の探査を契機に大きく飛躍した。近年では、ディープインパクトによるテンペル1彗星の探査で、物質科学の側面に大きな発展の機会が訪れた[13]。そしてスターダスト探査では、ヴィルト2彗星の塵を地上に持ち帰り、最先端の微小分析技術を適用したことによって彗星の物質科学を新たな次元に引き上げた。テンペル1彗星とヴィルト2彗星では、含水鉱物の存在の有無に大きな違いが見出されたように、今後、物質科学的方法をより一層活用し、彗星物質の多様性を解き明かしていくことが求められる。

筆者は、学部時代に彗星の物質科学がやりたいと思い、そのようなテーマで卒業論文ができないかと考えたりしたが、当時の先生方には「荒唐無稽」と一蹴されてしまった。それから(わずか!)15年ほどの時を経て、実際に自分の手で、本物の彗星の塵

を分析することができることを思うと隔世の感がある。しかし、この15年の間で、惑星間塵や始原的な隕石の分析、原始惑星系円盤についての理論研究や赤外線観測などにより、原始太陽系星雲の物質科学は飛躍的に進展した。このような学問的背景を経て、今の時代に彗星塵の分析ができるのは千載一遇のタイミングであったのではないかと感じる。スターダスト探査に続き、今後は日本が実施するはやぶさの小惑星サンプルリターンミッションが予定されている。ここで紹介したスターダスト探査を契機にますます太陽系物質の科学が進展して行くことを願ってやまない。

本特集のきっかけとなったのは、地球惑星科学連合2007年大会での「始原惑星物質研究の新展開：スターダスト+ α 」特別セッションの開催である。筆者と共同でコンビーナーとして協力して頂いた中村智樹准教授（九州大）、土山明教授（大阪大）、向井正教授（神戸大）の3名と遊星人での本特集を提案して頂いた田中秀和准教授（北海道大）には深く感謝する。また、このセッションにアメリカより伊藤元雄博士、中村圭子博士（以上、NASAジョンソン宇宙センター）、薮田ひかる博士（カーネギー研究所）の3名が参加・発表してくれた。これら3名の方は、本特集でも快く原稿執筆を引き受けてくれた。あわせて感謝したい。特に薮田氏は、有益な査読により的確に原稿を改訂して頂いた。また、本特集に執筆を快諾してくれた留岡和重教授（神戸大）、奥平恭子博士（宇宙研）にも感謝する次第である。最後に、スターダスト探査への参加を誘ってくれたMichael Zolensky博士（NASA ジョンソン宇宙センター）にも御礼を申し上げたい。

参考文献

- [1] 中村智樹ほか, 2007, 遊星人 本号.
- [2] Stardust Homepage: <http://stardust.jpl.nasa.gov/home/index.html>
- [3] Brownlee, D. E. et al., 2004, Science 304, 1764.

- [4] Brownlee, D. E. et al., 2006, Science 314, 1711.
- [5] 中村圭子, ゴレンスキー・マイケル, 2007, 遊星人 本号.
- [6] Zolensky, M. E. et al., 2000, Meteorit. Planet. Sci. 35, 9.
- [7] 土山明, 中村智樹, 2007, 遊星人 本号.
- [8] 奥平恭子ほか, 2007, 遊星人 本号.
- [9] 薮田ひかる, スターダスト1次分析有機物チーム, 2007, 遊星人 本号.
- [10] 留岡和重ほか, 2007, 遊星人 本号.
- [11] 伊藤元雄, メッセンジャー・スコット, 2007, 遊星人, 本号.
- [12] Shu, F. H. et al., 1997, Science 277, 1475.
- [13] Lisse, C. M. et al., 2006, Science 313, 635.