三河内 岳 (東大・理)、立川 統 (極地研)、萩谷 健治 (兵庫県大)、

大隅 一政(NASA ジョンソン宇宙センター)、マイク・ゾレンスキー(NASA ジョンソン宇宙センター)

1. はじめに

スターダスト探査は、2004 年1月に Wild 2 彗星の核に約 240 キロまで接近して彗星塵を採集し、2006 年1月に地球にサンプルリターンさせることに成功した NASA による野心的なミッションである (Brownlee et al., 2004)。彗星は太陽系で最も始原的な天体の一つと考えられていることから、彗星物質を直接分析す ることは、太陽系形成についての重要な情報を与えてくれることが期待される。しかし、採集された塵は、 最大でも数十µm の大きさしかないために、各種の微小領域分析を駆使して最大限の科学的情報を引き出す ことが必要となる。これまでに我々は、約 30 個の Wild 2 彗星塵を電子顕微鏡及び放射光を用いた単結晶 X 線回折法を用いて分析して来たので、その結果をここで簡単に紹介する。

2. 試料と分析手法

本研究により分析を行なった試料は、大きく分けて4種類の形態を取っていた。(1)透過型電子顕微鏡 用のマイクロトーム超薄切片、(2)これらの切片を取った後に残る "potted butt" と呼ばれるもの、(3) ガラス棒の先端に接着剤で塵を接着したもの、そして、(4)直径1インチの円形スライドガラス上に接着 剤で固定したものである。(1)のマイクロトーム超薄切片に対しては、走査型電子顕微鏡(SEM)及び透 過型電子顕微鏡(TEM)を、(2)の "potted butt" に対してはSEMを、(3)のガラス棒の試料について は放射光X線回折を、(4)のスライドガラス上試料に対しては、放射光X線回折とSEMでの分析を行なっ た。SEM (FEG-SEM Hitachi S4500)、TEM (JEOL JEM 2010)の分析とも東京大学・大学院理学研究科・ 地球惑星科学専攻で行なった。また、放射光単結晶X線回折は、高エネルギー加速器研究機構・放射光研究 施設BL-4B1及びSPring-8のBL47XUの2カ所の放射光施設で行なった。高エネ研では、マイクロピンホール によりビーム径を1.6 µmまで絞り、Laue法を用いて測定した (Ohsumi et al., 1991)。また、SPring-8では、 ビーム径は、約1 µmで、ビームエネルギーが30 keVで振動写真を撮影した。

3. 結果

3.1. 電子顕微鏡

分析した試料の多くは、非晶質のシリカで形成されており、100 nm 程の鉄ニッケル金属もしくは硫化物 の球状の粒が散らばっていた。これらの試料には小さな空隙が普遍的に見られることから、エアロジェルに よる彗星塵の捕獲の際に溶融したことが示唆される。結晶質の試料もいくつか見られたが、構成物はほとん どカンラン石と輝石であった(図1)、これらの結晶は通常 1 µm 以下のサイズであった。カンラン石・輝 石とも化学組成は、ばらついており(mg#=0.6-1)、Zolensky et al. (2006)による初期分析の結果と調和的 であった。FEG-SEM に付属した電子線後方散乱回折装置(EBSD)で、マイクロトーム超薄切片の分析を 行なったが、1 試料しか回折パターンが得られなかった。この試料は、オージャイトであった。おそらく、 マイクロトーム超薄切片の表面は、EBSD パターンが得られる程スムーズではないためと考えられる。その 他で、特異な結晶質の物質もいくつか見出された。"potted butt"である FC12,0,16,3,0 には、1.5 x 2.5 µm ほ どのカリ長石組成の物質が見つかった。EBSD による分析を試みたが、パターンは得られなかった。 FC6,0,10,7,23 は、主にカンラン石と輝石(mg#=0.70-0.95)から成るが、Mg-Fe 炭酸塩(breunerite)が見 つかった(図2)。この炭酸塩は、~200 x 300 nm の部分に存在しており、非晶質シリカと鉄硫化物を伴っ ている。リング状の電子線回折パターンから、非常に細かい粒子の集合体と考えられる。また、FC6,0,10,7,23 には、Mg に富んだクロマイトも含まれている。C2027,2,69,1,6 には、~100 nm の酸化亜鉛が見られ、 FC2027,2,69,5,0 には、Zr に富む物質も見られたが、これらはコンタミネーションだと考えられる。

3. 2. 放射光 X 線回折

電子顕微鏡で分析された試料の多くが非晶質だったように、放射光 X 線回折でも結晶質の物質は多く見つ からなかった。C2054,0,35,4 粒子(サイズ約 10 µm)の中心付近から得られたラウエ写真は、カンラン石 1 粒と斜方輝石 2 粒でうまく指数を付けることができた。構造の精密化を行ったところ、得られた化学組成 は、カンラン石が、(Mg_{0.89}Fe_{0.11})₂SiO₄ で、斜方輝石が、(Mg_{0.90}Fe_{0.10})SiO₃であった。同様に、C2067,1,111,4 はカンラン石が含まれており、(Mg_{0.59}Fe_{0.41})₂SiO₄ という鉄に富んだ組成であることが分かった。SPring-8 で分析した C2004,1,44,2 は、パウダーリングが観察され、解析の結果、鉄のケイ化物であることが分かっ た。これは、電子顕微鏡の観察で見られたように、非晶質シリカに伴う金属鉄に相当するものと考えられる。 また、唯一、回折点が得られた C2126,2,68,1,0 であるが、解析の結果、トリディマイトであることが分か った。トリディマイトは、量は少ないものの、他のスターダスト粒子からも見つかっている。

4. 考察

分析した多くの塵は、非晶質のシリカからなるものであり、これは他のグループとの報告とも一致してい る (Zolensky et al., 2006)。シリカエアロジェルを用いた彗星塵の捕獲の際に、高温となり、彗星塵とシリ カが混合したものと考えられる。しかしながら、結晶質の塵の解析結果から、サブミクロンのカンラン石と 輝石が Wild 2 彗星の主要構成鉱物であることが明らかになった。また、我々の分析では、Mg-Fe 炭酸塩、 Mg に富んだクロマイト、トリディマイトを発見した。特に、炭酸塩の発見は重要である。今回見つかった 炭酸塩は、非晶質のシリカと鉄硫化物と共存していたことから、元々Wild 2 彗星に含まれていた物質と考え られる。Wild 2 彗星では、他の塵からも小量ながら炭酸塩が見つかっているが、いずれも Ca 炭酸塩であり、 コンタミネーションと考えられている (Wirick et al., 2007)。Mg-Fe 炭酸塩は、含水の IDP (Tomeoka and Buseck, 1986; Gaetani et al., 1990) から見つかっているが、今回スターダストサンプル中から見つかったも のとは、産状やサイズが異なっている。これまでに、Wild 2 彗星試料中からは、層状ケイ酸塩鉱物は見つか っていないが、含水 IDP では、炭酸塩と層状ケイ酸塩鉱物は共存していることが多い (Tomeoka and Buseck, 1986; Gaetani et al., 1990)。さらに、これまでの分析の結果からは、Wild 2 彗星試料は、無水の IDP と最も 似ていることが指摘されている (Zolensky et al., 2006)。今後、より詳細に Wild 2 彗星中の炭酸塩の存在を 検証していく必要がある。

また、本研究の結果、放射光 X 線回折もスターダスト試料のような小量で貴重なサンプルの非破壊分析に は有効であることが分かった。SEM-EDS や TEM-EDS を用いた化学組成分析では、ビーム径が試料サイズ よりも大きくなってしまい、正確な化学組成が得られない可能性があり得る。その点、独立で結晶学的手法 により化学組成を見積もることができる放射光単結晶 X 線回折は重要である。

本研究で見つかった結晶質の物質は、Mg-Fe 炭酸塩鉱物以外は、すべて高温で形成されたものである。この結果は、彗星の構成物のうちのいくつかのものは、太陽の近傍で形成され、太陽系外縁部に運ばれ、そこで彗星が形成されたというモデルと調和的である (Brownlee et al., 2006; Zolensky et al., 2006)。

<文献>

Brownlee D. E. et al. (2004) Science 304: 1764-1769.
Brownlee D. E. et al. (2006) Science, 314, 1711-1716.
Germani M. S. et al. (1990) Earth and Planet. Sci. Lett., 101, 162-179.
Ohsumi K. et al. (1991) Jour. of Applied Crystallography 24: 340-348.
Tomeoka K. and Buseck P. R. (1986) Nature, 231, 1544-1546.
Wirick S. et al. (2007) Lunar Planet. Sci., XXXVIII, Abst#1338.
Zolensky M. E. et al. (2006) Science, 314, 1735-1739.



図1 C2027,2,69,1,6の透過型電子顕微鏡写真。鉄に富んだカンラン石と輝石から成っている。EDS に よる分析結果からこのカンラン石の組成は Fo₆₉ である。電子線回折パターンからこの結晶がカンラン石 であることが分かる。



図2 CF6,0,10,7,23 の透過型電子顕微鏡写真。Mg-Fe 炭酸塩鉱物から成っている。EDS による分析結 果からこの炭酸塩には、Ca が含まれないことが分かる。リング状の電子線回折パターンからこの結晶 が細粒の結晶の集合体であることが分かる。