

# スターダストが回収したヴィルト2彗星塵の 鉱物科学：透過電子顕微鏡による研究

留岡和重<sup>1</sup>, 富岡尚敬<sup>1</sup>, 大西市朗<sup>1</sup>

(要旨) ヴィルト2彗星塵試料の鉱物科学的特徴を、我々が行った透過電子顕微鏡による研究の結果を中心に解説する。調べた試料の内、彗星塵固有と思われる試料は主にカンラン石、輝石、Fe-Ni硫化物、Fe-Niメタルからなる。カンラン石、輝石の化学的特徴は、変成度の最も低いコンドライト隕石および無水惑星間塵のものに近い。これらのケイ酸塩から、多様な熱履歴を経た証拠、また高速度衝突の痕跡が見出された。これまで得られた分析結果を総合すると、ヴィルト2彗星粒子は、星間物質よりコンドライトと似た成因を持つ可能性が高い。それらの結果は、太陽系の起源および星間物質に関する新たな根本的な問題を提起しつつある。

## 1. はじめに

2006年1月15日、探査機スターダストは人類史上初めて彗星の塵を地球に持ち帰った。これは月岩石以来、史上2番目の地球外天体からのサンプルリターンである。スターダストは1999年に地球を旅立った後、2004年1月に、P81/ヴィルト2彗星に234 kmの距離まで接近し、彗星核(径は約4.5 km)の詳細な画像を撮影すると同時に、彗星核から放出される塵を採取した[1]。捕えた塵は大きさが1 ~ 300  $\mu\text{m}$ 、その数は10,000個以上、総質量は $3 \times 10^{-4}$  gにのぼると見積もられている[2, 3]。この量は、過去35年間研究されてきた地球成層圏で採取された惑星間塵(IDP)の総質量に匹敵する。

ヴィルト2は木星族彗星の一つであり、海王星の軌道(約30 AU)より外側のカイパーベルトで形成され、そこに長い間存在していたが、数百万年前から太陽に近づき始め、ごく最近、木星への接近によって太陽系内側への軌道をとるようになったと考えられている[2]。大部分の隕石の供給源と考えられる小惑星は、約46億年前の太陽系生成期に太陽に近い高温領域で形

成されたのに対し、彗星は太陽からはるか遠い低温領域で形成されたと考えられている。スターダストのサンプルリターンによって、我々は、太陽系外縁部を源とすることがはっきりとしている物質を初めて手にしたことになる。

スターダストの地球帰還後直ちに、回収試料は初期分析のため、世界中の総数187名の研究者達に送られ、まさに世界の科学者総力による研究が始まった。初期分析は「赤外分光学」、「化学組成分析」、「鉱物・岩石学」、「同位体分析」、「有機物分析」、「衝突クレーター解析」の6チームで行われた。我々、神戸大学のグループは鉱物・岩石学チームに属し、透過電子顕微鏡(TEM)による鉱物・岩石学的分析を担当した。初期分析の最初の成果は、2006年12月にサイエンス誌に発表された7つの論文[2-8]にまとめられている。さらに現在、個々のグループのより詳しい研究結果がMeteoritics & Planetary Science誌の特集号としてまとめられつつある。この小文では主に我々の結果を中心に紹介する。

## 2. エアロジェル内の粒子トラック

彗星から放出される粒子は、6.1 km/sの相対速度

1. 神戸大学大学院理学研究科・地球惑星科学専攻

で探査機スターダストに飛び込んで来る。その粒子を、超低密度( $0.01 \sim 0.05 \text{ g/cm}^3$ )で多孔質(空隙率99.8%)のシリカ・エアロジェルという物質によって捕捉する。粒子の衝突によって、エアロジェル内に長さ $<1 \sim$ 数mmの細長く、先が細い穴(トラック)ができる。スターダストには大きさ $4 \times 2 \times 3 \text{ cm}$ の直方体のエアロジェル・セルが132個搭載されており、それらに長短様々のトラックが存在する。一つ一つのトラックには先端だけでなく、側壁全体にわたって径が $<1 \mu\text{m}$ から数十 $\mu\text{m}$ (大部分は $<10 \mu\text{m}$ )の粒子が多数分布している。シンクロトロンX線蛍光分析 [7, 8] によると、試料の65 ~ 90%はトラック側壁に、10 ~ 35%はトラックの先端に存在すると見積もられている。

実は、エアロジェル・セルの枠に敷いたアルミフォイルにも彗星粒子の衝突によるクレーターがたくさんできており、衝突した粒子の残留物が存在する。これらのクレーターや残留物に関する分析も行われているが [2, 6, 7], それらの結果についてはここでは扱わない。

エアロジェルは、高速で飛び込んで来る粒子をできるだけ変化させずに捕捉する目的で作られたものだが、実際には粒子は様々な変化を受ける。ヴィルト2粒子の場合、その変化は当初予想していたより大きいようである。それゆえ、ヴィルト2粒子の研究では、個々の粒子が、エアロジェルへの突入によってどのように変化したかを見極めることが一つの重要な課題である。彗星粒子の大部分は、もとは単体の粒子ではなく、弱くくっつき合った微粒子の集りと考えられるが、エアロジェルへの突入によってばらばらに分解する。また、加熱によって溶融、蒸発し、さらに溶融したエアロジェルと混合する。実はエアロジェル自体にも、Si, O以外に、微量ではあるが様々な物質が混入しているため、特にエアロジェルとの混合は試料分析上非常に厄介な問題である。

### 3. ヴィルト2彗星粒子のバルク組成と主要構成物

上記のように、エアロジェルによって捕捉した試料は個々のトラック全体にわたって分布しているため、突入した彗星粒子のバルク組成を知るには、トラック全体の分析が必要である。シンクロトロンX線蛍光分析、飛行時間型二次イオン質量分析計 (TOF-SIMS) などを用いて、23のトラックおよび7つのアルミフォイル・クレーターの残留物を測定した結果、Mg, Si, Mn, Fe, Ni, Ca, Tiなどの主要な元素に関しては、ヴィルト2粒子のバルク組成は、隕石の中で最も原始的なCI炭素質コンドライトの組成に近い [7]。

鉱物・岩石学チームによる初期分析では、エアロジェル・セルから取り出した26のトラックについて詳しく調べられた。これらのトラックは、トラック長が平均的なものからランダムに選ばれたものである。その内、8つはカンラン石  $[(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4]$ 、7つはCaに乏しい輝石  $[(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3]$ 、3つはカンラン石と輝石両方、そして、残りの8つは他の鉱物(主にFe-Ni硫化物)が主な構成物であった [8]。つまり、ヴィルト2彗星粒子のほとんどは、結晶質鉱物を主とするものであると思われる。これらの鉱物はいずれもコンドライト隕石、また無水IDPの主要構成物である。

我々、神戸大学のグループは、NASAから受け取った9つのヴィルト2試料を、TEMを用いて調べた。試料はいずれもウルトラミクロームによって作られた、平面の大きさ $1.1 \times 0.2 \mu\text{m} \sim 23.0 \times 11.0 \mu\text{m}$ 、厚さ70 ~ 100 nmの薄片である。1つの試料につき1 ~ 6枚、合計28枚の薄片を調べた。その結果、それらの試料は主に次の3つのグループに分けられることがわかった：(1) ケイ酸塩に富むグループ (3つ)、(2) Si-Oガラスに富むグループ (4つ)、(3) いずれにも当てはまらない異常なグループ (2つ)。(1) の試料はいずれもトラックの先端から、(2) の試料はトラックの側壁から回収された。(3) の試料は何らかの汚染物質が混入している可能性がある。以下の4 ~ 7節では (1)、(2)

に分類される7つの試料の結果について紹介する。

ヴィルト2 粒子には様々な有機物が含まれており、それらの分析も行われているが [4]、本稿では有機物については扱わない。

## 4. TEMによる観察・分析

### 4.1 ケイ酸塩に富む試料

試料C2115-24-22-1-8は、我々が調べた試料のうち唯一バルクの化学組成がコンドライト隕石のものに近い。大部分はカンラン石（大きさ $0.2 \sim 2.0 \mu\text{m}$ ）からなり、少量のCaに富む輝石（ディオブサイド,  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ）、そしてSi, O, Al, Na, Kに富むガラスを含む（図1）。カンラン石は、粒子ごとにファヤライト（Fa）成分（ $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  比に対応）が $\text{Fa}_9 \sim \text{Fa}_{36}$ という広い範囲で異なる。つまり、組成が $1 \mu\text{m}$ 以下のスケールで不均質である。また、カンラン石粒子の一つが、高密度（約 $10^{10} \text{cm}^{-2}$ ）の $[001]$ 方向の直線状らせん転位を持つことがわかった（図2）。このような高密度の転位は低温における高速変形に特有のものであり、衝撃によってできた可能性が高い。

試料FC13-0-17-1-3（通称「バレンタインハート」）

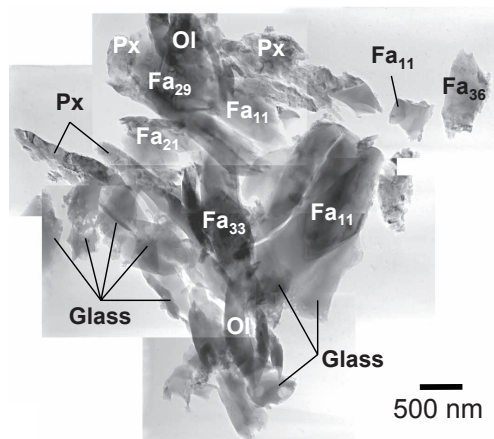


図1：ケイ酸塩に富むヴィルト2試料C2115-24-22-1-8のTEM像。カンラン石（Ol, Fa）、Caに富む輝石（ディオブサイド, Px）、Si-O-Al-Na-Kに富むガラス（Glass）からなる。カンラン石は、粒子ごとに $\text{Fa}_{11} \sim \text{Fa}_{36}$ の範囲で組成が異なる。

は、主にCaに乏しい輝石（大きさ $0.3 \sim 1.5 \mu\text{m}$ ）と少量のカンラン石（ $0.2 \sim 1.0 \mu\text{m}$ ）、Caに富む輝石（オーチャイト）からなる。径が $10 \mu\text{m}$ 程度のこの微小な試料の中に、Caに乏しい輝石とCaに富む輝石が共存している事実は興味深い（図3）。電子線回折によって、Caに乏しい輝石は斜方晶系のエンスタタイトであることがわかった（図3）。カンラン石のFeの含有量（ $\text{Fa}_{30} \sim \text{Fa}_{50}$ ）は、これまで報告されている他のヴィルト2カンラン石に比べて非常に高い。その他に少量のFe-Ni硫化物微粒子（ $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ ）が含まれている。

試料C2027-2-69-1-4は他の試料と異なり、外形は丸みを帯びており、内部はコア、内側リム、外側リムからなる累帯構造を示す（図4）。コアはCaに乏しい輝石（エンスタタイトおよびピジョナイト、大きさ $0.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ ）からなり、少量のカンラン石

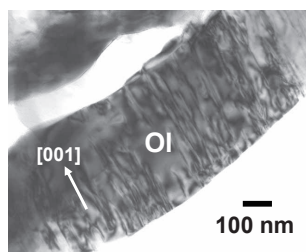


図2：試料C2115-24-22-1-8中の高密度転位を持つカンラン石粒子。転位は $[001]$ 方向の直線状らせん転位。転位密度は約 $10^{10} \text{cm}^{-2}$ 。

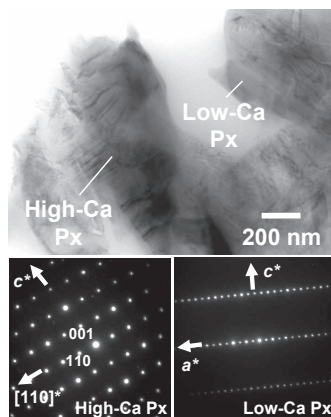


図3：試料FC13-0-17-1-3中のCaに富む輝石（High-Ca Px）、Caに乏しい輝石（Low-Ca Px）とそれらの電子線回折図。Caに富む輝石はオーチャイト。Caに乏しい輝石は斜方エンスタタイト。

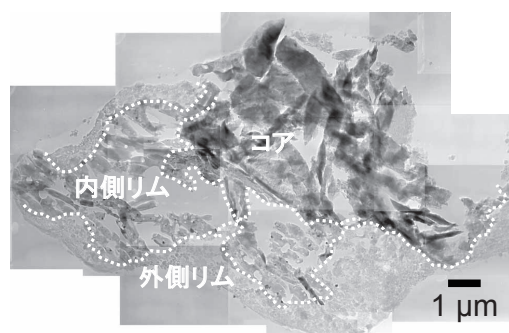


図4：コア、内側リム、外側リムからなる累帯構造を示す試料 C2027-2-69-1-4。外形は部分的に丸みを帯びている。

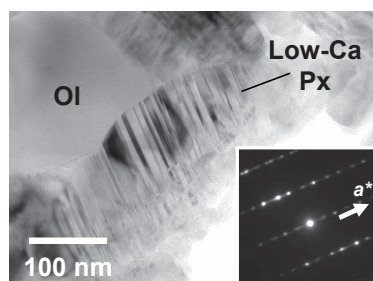


図5：試料 C2027-2-69-1-4 のコア中の単斜エンスタタイト (Low-Ca Px) とカンラン石 (Ol)。単斜エンスタタイトは不規則積層構造を示す。右下は単斜エンスタタイトの電子線回折図。a\* 方向に積層不整による散漫散乱が見られる。

( $\text{Fa}_{19} \sim \text{Fa}_{24}$ ) を含む。このエンスタタイトは、試料 FC13-0-17-1-3 の斜方エンスタタイトとは異なり、不規則積層構造を持つ単斜晶系のエンスタタイトである (図5)。このような単斜エンスタタイトは、コンドライト、IDP に一般的に見られる種類の輝石である。内側リムは Mg, Fe を含む Si-O ガラスからなる板状粒子が並列した組織を持ち、それらの粒子は Fe-Ni 硫化物・金属の微粒子 (径 5 ~ 150 nm) および気泡の跡と思われる丸い穴 (径 10 ~ 300 nm) を含んでいる (図6)。外側リムは純粋な Si-O ガラスからなる。これは融けたエアロジェルと思われる。

## 4.2 Si-O ガラスに富む試料

C2004-1-44-4-4, C2054-0-35-16-6, C2054-0-35-44-3, C2054-0-35-53-3 の 4 つの試料は、いずれも Mg, Fe を

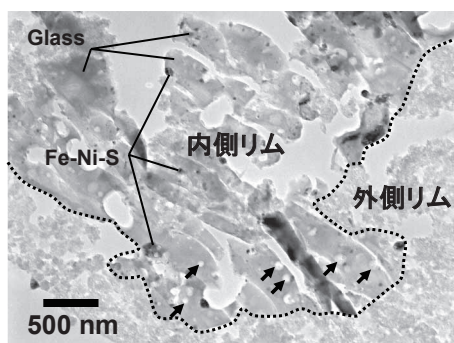


図6：図4の中央下部分の拡大。試料 C2027-2-69-1-4 の内側リムと外側リムの境界が、黒い破線で示してある。内側リムは、Mg, Fe を含む Si-O ガラス (Glass) からなる板状粒子が並列した組織を示す。Fe-Ni 硫化物・金属の微粒子 (Fe-Ni-S) および気泡の跡と思われる丸い穴 (矢印) を含んでいる。

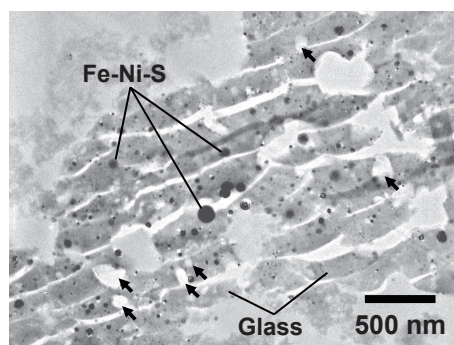


図7：試料 C2004-1-44-4-4 の Mg, Fe を含む Si-O ガラスからなる板状粒子。全体的に Fe-Ni 硫化物・金属 (Fe-Ni-S) の微粒子および気泡の跡と思われる丸い穴 (矢印) を含む。この組織はマイクロームによるスライスの過程でできたもの。

わずかに含む Si-O ガラスで主に構成されている (図7)。全体的に Fe-Ni 硫化物・金属の微粒子 (径 5 ~ 300 nm) および気泡の跡と思われる丸い穴 (径 20 ~ 300 nm) を含む。このガラスは、しばしば板状粒子が並列した組織を示す (図7)。この組織はウルトラマイクロームで薄片を作るときにできた人工的なものである。それゆえ、並列した板状粒子は、もとは Si-O ガラスの大きな粒子であったと思われる。これらの試料は、トラック側壁から回収されているヴィルト 2 試料中では最も一般的に見られる種類である。



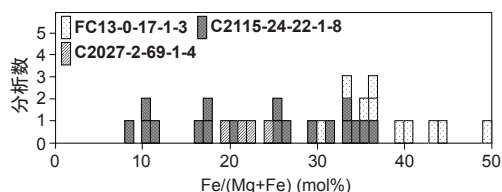


図8：ケイ酸塩に富む試料中のカンラン石の  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  比分布。

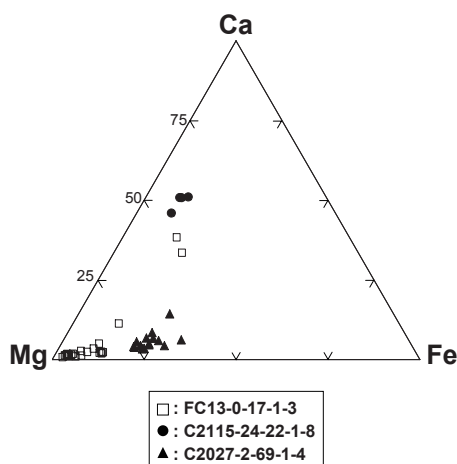


図9：ケイ酸塩に富む試料中の輝石の化学組成のCa, Mg, Feに関するプロット (atomic%)。

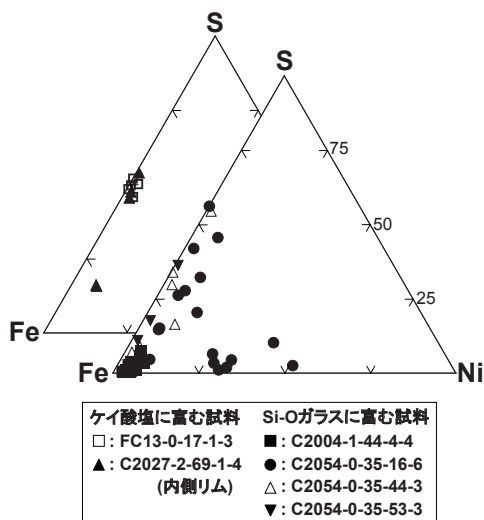


図10: Fe-Ni-S粒子のFe, S, Niに関するプロット (atomic%)。

## 5. ケイ酸塩に富む試料：コンドライト隕石，IDPとの比較

### 5.1 カンラン石

カンラン石は、一部の含水隕石を除いて、コンドライト隕石を構成する最も主要な鉱物である。3つすべてのケイ酸塩に富むヴィルト2試料のカンラン石がFeに富み、その $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 比は試料間、そしてカンラン石粒子間で大きく異なることがわかった(図8)。この $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 比の変動幅(0.09～0.5)は、無水IDPおよび炭素質コンドライトのカンラン石のものに相当する[8, 9]。コンドライトのカンラン石の $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 比は、隕石母天体における熱変成度と関係しており、熱変成度が高いほどFe, Mg原子の拡散による平衡化が進み、均質化する。このヴィルト2カンラン石の不均質性は、コンドライトで言うところ、最も変成度の低いタイプ3.0～3.3に相当する。このことは、これらのヴィルト2粒子が形成された後、彗星内で熱変成の影響をほとんど受けていないことを意味している。

試料C2115-24-22-1-8中のカンラン石粒子から見つかった高密度らせん転位の組織(図2)は極めて興味深い。というのは、このような組織は、少なくとも27 GPa以上の衝撃圧力により形成されると考えられる[10]からである。エアロジェル突入の際に発生する衝撃圧力は約1 GPaと見積もられており[11]、この程度の圧力ではこのような高密度の転位はできないと考えられる。それゆえ、この転位組織は、ヴィルト2粒子がスターダストに捕捉される以前に高速度衝突を受けたことによってできた可能性が高いことを意味する。2004年にスターダストがヴィルト2に接近した際に撮影した彗星核の画像によって、その表面にさまざまな円形の窪みがあることが示された[1]。それらは衝突によってできたクレーターという説があるが、まだはっきりしたことはわかっていない。今回、ヴィルト2のカンラン石に観察された高密度の転位は、これ

らの窪みが衝突によってできたこと示す証拠となるかもしれない。

## 5.2 輝石

輝石は3つのケイ酸塩に富む試料すべてに含まれており、それぞれの試料の輝石の種類と化学組成は非常に異なっている（図9）。いずれの輝石もコンドライト隕石には一般的に見られる種類のものであるが、たった3つの微小な試料の中に4つもの異なる種類の輝石が見つかったことは、筆者達には少なからぬ驚きであった。特に、同じエンスタタイトでも、構造の異なる二つの多形（斜方と単斜）が見つかったことは興味深い。というのは、斜方エンスタタイトは、600℃以上の高温からゆっくりと冷やされるときにできるのに対し、単斜エンスタタイトは、1000℃以上の高温から急冷されるときにできることが知られているからである[12]。それゆえ、このようなエンスタタイトの多形存在は、ヴィルト2粒子には、ケイ酸塩形成時の熱履歴、特に高温からの冷却履歴が非常に異なるものが存在することを意味している。ただし、単斜エンスタタイトについては、現在のところ、エアロジェル突入時に高温になり、急冷されてきた可能性は否定できない。

## 5.3 Si-Al-Naに富むガラス：コンドリュールの名残？

試料C2115-24-22-1-8からは、カンラン石、Caに富む輝石（ディオプサイド、 $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ）と共存するSi, O, Al, Na, Kに富むガラスが見つかった（図1）。このガラスは、化学組成（特にAl, Na, Kを含むこと）が融けたエアロジェルやSi-Oガラスに富む試料中のガラスとも異なっていることから、彗星塵固有のものである可能性がある。コンドライト隕石では、コンドリュールの斑晶の間を埋めるメソスタシスに、Al, Na, Caに富む斜長石に近い組成のガラスが存在する。このガラスは、コンドリュールが高温の溶融液から冷却されるとき、カンラン石や輝石の斑晶ができたあとに残ったO, Si, Al, Na, Caに富む液が固結したも

のである。試料C2115-24-22-1-8のガラスがコンドリュールのメソスタシスに相当するものとしたら、この試料そのものがコンドリュールと関係がある、あるいはコンドリュールの一部であることが考えられる。特にこの試料にディオプサイドが共存していることがその可能性を支持する。というのは、コンドリュールのメソスタシスには、冷却の際にできる細粒のディオプサイドがしばしば共存するからである。

## 5.4 コアーリム累帯構造

試料C2027-2-69-1-4は、トラックの先端粒子の状態をよく保存していると考えられ、その内部のコアーリム累帯構造（図4）は、彗星粒子が捕捉される際に、エアロジェルとの反応でどのように変化するかを知る手がかりを与えてくれる。

おそらくコアのCaに乏しい輝石は融け残りの彗星粒子であり、外側リムのSi-O ガラスは融けたエアロジェルであろう。一方、内側リムは融けた輝石とエアロジェルが混ざり合ってきたと思われる。そうだとすると、内側リムは輝石の融点（約1300℃）以上に熱せられた可能性が高い。彗星粒子に含まれていたFe-Ni硫化物およびメタルは、共融点が輝石に比べて低い（約950℃）ため、選択的に熔融し、細かい液滴となって融けた内側リム内に取り込まれたと思われる。そのとき同時に、エアロジェル内の微小な孔の中の気体と、硫化物中のSの気化によって気泡が形成されたのであろう。したがって、このコアーリム累帯構造は、彗星粒子がエアロジェルに突入するとき、粒子内に発生した外側から内側への温度勾配に対応していると思われる。

## 6. Si-Oガラスに富む試料の成因

Si-Oガラスに富む試料は、上述のように、スターダスト回収試料の内、特にトラック側壁に沿って最も一般的に見られる物質である（文献[8]ではFig. 1Aで示されている）。初期分析では、この物質は、IDPに

見られる「Fe-Niメタル・硫化物微粒子を含むケイ酸塩ガラス [“GEMS” (Glass with Embedded Metal and Sulfides)]」と組織、化学組成がよく似ていることで注目された [8, 13]. GEMSは、星間塵が星間空間でイオン照射を受けて非晶質化した、極めて始原的な物質だと考えられている [13].

Si-Oガラスに富む試料に関して特に注目すべきことは、これらに共通の物質が、上記のC2027-2-69-1-4の内側リムを構成している物質と、組織、化学組成が非常に似通っていることである (図6と図7を比較してほしい). これら4つの試料に共通のSi-Oガラスは、C2027-2-69-1-4の内側リムと同様に、彗星粒子がエアロジェルへ突入する際に、その中のケイ酸塩が一部融けて周りの融けたエアロジェルと混ざり合ってきたと我々は考えている. それゆえ、Si-Oガラスに富む試料は純粋に彗星固有のものではないと思われる.

## 7. Fe-Ni-S微粒子

Fe, Ni, S からなる微粒子は、初期分析で調べられたヴィルト2試料中に、量は少ないが、最も一般的に含まれる物質である. Zolensky et al. [8] によると、ヴィルト2試料中のFe-Ni-S 微粒子の約半数はFeSに近い組成を示す硫化物であるが、残りはFeSからFeへ至る組成を示す. 彼らは、これは、彗星粒子のエアロジェル突入の際の加熱によって、硫化物から揮発性の高いSが抜け、メタルが形成したことによるものであり、硫化物からSが抜ける割合は加熱の度合いに関係しているとしている.

我々が調べた試料では、Fe-Ni-S微粒子は、2つのケイ酸塩に富む試料と4つすべてのSi-O ガラスに富む試料に含まれていた. それらの内、エアロジェル捕捉の際の加熱が最も少ないと思われるケイ酸塩に富む試料FC13-0-17-1-3のFe 硫化物粒子は、すべて組成がFeSに近い (図10). それに対し、もう一つのケイ酸塩に富む試料C2027-2-69-1-4の内側リムには、FeSに近い組成の硫化物とFeS-Feの中間的組成を示す粒子が存

在する (図6, 10).

一方、4つのSi-O ガラスに富む試料のFe-Ni-S粒子は、試料ごとにかかなりの違いを示す. C2054-0-35-44-3とC2054-0-35-53-3のFe-Ni-S粒子は、FeS-Feの中間的な組成を示すのに対し、C2054-0-35-16-6のFe-Ni-S粒子はFeS-Fe-FeNiの範囲で様々な組成を示す (図10). これら3つの試料が同一トラックから回収されたことを考慮すると、一つのヴィルト2粒子でも、その中に含まれる硫化物 (あるいはメタル) には様々なFe/Ni比を持つものが存在することがわかる. これら3つの試料とは対照的に、C2004-1-44-4-4のFe-Ni-S粒子は、ほとんど全てFeに富むメタル (カマサイト) である (図10). Sの損失が捕捉の際の加熱によるとすると、C2004-1-44-4-4は、今回我々が調べたFe-Ni-S粒子を含む6つの試料の中で最も強く加熱されたことになる.

## 8. CAI類似の試料

我々が調べた試料ではないが、これまで報告されているヴィルト2試料の中で特に注目されているのはトラック25の先端粒子 (通称「インティ」) である [8]. この試料は、アノーサイト、Ca-Al-Tiに富む輝石、メリライト、スピネル、コランダムなど、炭素質コンドライトの難揮発性包有物 (CAI) に特有の鉱物からなる. CAIは、原始太陽系星雲が形成されて間もない頃、1300 ~ 1800 Kの熱いガスから凝縮してできた固体粒子の集合物だと考えられている. さらに、この試料から<sup>16</sup>Oに富む酸素同位体異常が見つかった [5]. このような酸素同位体異常は、炭素質コンドライトのCAI鉱物には一般的に見られるものであるが、ヴィルト2試料からはこの試料が初めてである.

ヴィルト2試料からCAI類似の物質が見つかったことは、ヴィルト2彗星と炭素質コンドライトが成因的に密接な関係にあることを強く示唆すると同時に、彗星の中に非常に高温でしかできない物質が含まれていることを示す、という意味で極めて興味深い.

## 9. おわりに

初期分析で調べられたヴィルト2試料はまだ回収試料全体のごく一部に過ぎず、個々の試料が小さいことから、得られるデータや情報はまだ非常に限られている。それにもかかわらず、これまで得られた研究結果を見渡して見ると、既に幾つかの興味ある問題が浮かび上ってくる。

筆者らがまず思うことは、ヴィルト2粒子と始原的コンドライトとの類似性である。ヴィルト2粒子の主要な構成物であるカンラン石、輝石、Fe-Ni硫化物は、いずれもコンドライトの主要な構成物である。本稿でも示したように、これらの鉱物の化学組成的、構造的特徴は驚くほどよく似ている。その他にも、CAI鉱物をはじめとして、コンドライトに特有な鉱物が多く見つかっている。同位体組成の上でも、コンドライトのものと大きな違いは認められない [5]。これらのことを総合すると、ヴィルト2彗星は、コンドライトの中で最も始原的な炭素質コンドライトと共通の原材料から、似通ったプロセスで形成された可能性が高い。

彗星が太陽系生成期にできた微惑星の名残であれば、このようなことは予想されたことではあるが、その構成物が具体的に明らかになってきた今、新たに大きな問題が提起されつつある。それは、原始星雲形成期における大規模な物質移動の問題である。カンラン石、輝石、CAI 鉱物は、いずれも1300 K以上の高温プロセスによって形成されるものであり、そのような高温条件は、彗星ができた太陽系外縁部では起こりえないと考えられる。それゆえ、ヴィルト2粒子中のこれらの鉱物は、太陽近傍の高温領域で隕石鉱物と一緒につくられた後、30 AU以上も遠い外縁部に運ばれたのではないか、ということが議論され始めている [2]。つまり、これらの高温起源鉱物の存在は、原始星雲形成期に、そのようなスケールの非常に大きな物質移動があったことを示す証拠だと考えられているのである。

もう一つの問題は、ヴィルト2粒子には星間物質の

痕跡が見られないことである。特に天文学者の間では、「彗星は星間物質が集まってできた」というのがこれまでの有力な説である [2]。しかし、ヴィルト2粒子の大部分の構成物の同位体組成は隕石やIDPのものに近く、星間塵に予想されるような大きな異常は示さない [5]。また、多くの天文学者が考えるように、「彗星中のケイ酸塩は、もとは非晶質であったケイ酸塩が焼きなまされ、結晶化した [2]」ことを支持する鉱物学的証拠も見つかっていない。彗星は本当に星間物質が集まってできたのであろうか。今春、ヒューストンで開かれた月惑星科学会議では、この問題に関して天文学者達の間で熱い議論が交わされていた。

さらにもう一つの問題は、多くの人達が彗星にあると予想していた含水鉱物など、水の作用に関係する物質がヴィルト2試料からは一切見られないことである。これはディープインパクト探査で得られたテンペル1彗星の研究結果 [14] とも、大きく異なっている。水の作用に関係する物質は、エアロジェルによる捕捉の際の加熱によって変化して見つからないだけなのか、あるいはヴィルト2にはそもそも水の作用はなかったのか、はまだわかっていない。

探査機スターダストが持ち帰ったヴィルト2粒子の研究はまだ始まったばかりである。それにもかかわらず、既に多くの興味深いデータを生み出している、と同時に、太陽系の起源、そして星間物質に関する新たな根本的な問題を、我々に提起してくれているのは間違いない。今後のさらなる成果が待ち遠しい。

## 謝 辞

ヴィルト2彗星塵という貴重な試料を研究する機会を与えていただいたNASA、および試料に関する様々な情報を共有させていただいたスターダスト初期分析チームの方々に感謝します。また、本稿に対して有益な助言をいただいた査読者の三河内岳氏に感謝します。



## 参考文献

- [1] Brownlee D.E. et al., 2004, Science 304, 1764.
- [2] Brownlee D. et al., 2006, Science 314, 1711.
- [3] Hörz F. et al., 2006, Science 314, 1716.
- [4] Sandford S.A. et al., 2006, Science 314, 1720.
- [5] McKeegan K.D. et al., 2006, Science 314, 1724.
- [6] Keller L.P. et al., 2006, Science 314, 1728.
- [7] Flynn G.J. et al., 2006, Science 314, 1731.
- [8] Zolensky M.E. et al., 2006, Science 314, 1735.
- [9] Brearley A.J. & Jones R.H., 1998, in Planetary Materials, Mineralogical Society of America, 398 p.
- [10] Ashworth J.R., 1985, Earth and Planetary Science Letters 73, 17.
- [11] Kitazawa Y. et al., 1999, Journal of Geophysical Research 104 (E9) , 22035.
- [12] Smyth J.R., 1974, American Mineralogist 59, 345.
- [13] Bradley J.P., 1994, Science 265, 925.
- [14] Lisse et al., 2006, Science 313, 635.