

ヴィルト 2 彗星粒子に含まれる有機物の化学特徴

藪田ひかる¹，スターダスト 1 次分析有機物チーム

(要旨) スターダストミッションの有機分析部門では、ヴィルト 2 彗星粒子に固有の有機物を検出する目的で、地上の最先端微小分析技術（走査型透過X線顕微鏡，X 線吸収端近傍構造，顕微赤外，顕微ラマン，2 次イオン質量分析）が適用された。検出された有機物は主に、窒素・酸素を豊富に含む多種の官能基あるいは脂肪族炭素から構成され、その組成は試料によって多様であった。一方で芳香族炭素の縮合の程度は低く、熱変成を殆ど受けていないことが示唆された。また重水素Dと¹⁵Nに富み、彗星粒子に固有の有機物であると判断できる確かな証拠が得られた。個別に分析が行われたアミノ酸の種類と存在量は極めて少なかった。多環式芳香族炭化水素(PAHs)は 1 環から 6 環からなる分子が同定され、環の数が多い分子ほどその相対量は減少する分布を示した。

1. はじめに

彗星中の有機分子は、これまでも彗星のコマを種々の分光法で観測することによって検出されてきた。それらはメタノール (CH_3OH)、ホルムアルデヒド (HCHO)、シアン化水素 (HCN)、メタン (CH_4)、ギ酸 (HCOOH) などをはじめ多種の揮発性分子を含み、水 (H_2O)、一酸化炭素 (CO)、二酸化炭素 (CO_2)、アンモニア (NH_3) などと共に彗星氷の成分であることが分かっている [1]。これらの分子は、2005 年のデープインパクトミッションによってテンペル 1 彗星の内部からも検出された [2]。一方で、彗星中の有機成分はこれらの揮発性分子だけではないことも指摘されてきた。ベガ 1, 2 およびジオット探査機がハレー彗星中の粒子の質量分析を行った結果、彗星粒子は難揮発性有機物とケイ酸塩の混合物であることが判明し、豊富な炭素 (C)、水素 (H)、酸素 (O)、窒素 (N) を表す「CHON 粒子」の名称も生まれた [3, 4]。後に Greenberg [5] により、彗星を構成する成分は水、ケ

イ酸塩、難揮発性有機物の 3 成分、そして少量の中揮発性および揮発性分子であると提唱された。特に、主要成分の 1 つと考えられた難揮発性有機物を従来の分光観測で検出するのは技術的に困難であったため、この意味でも彗星粒子を地上に持ち帰って分析することの必要性が長く求められてきた。

地上での地球外物質分析において、試料に固有の成分と地上由来の汚染との区別は必要不可欠である。スターダストミッション有機分析部門ではこの点を最大の課題とした。例えば、カプセルの通気孔付近から採取した大気、カプセル着陸地点の土壌、カプセル表面の塗料およびエアロジェルトレイ前方に置かれたアンテナの塗料、ウィットネスクーポンや未飛行の予備エアロジェル [6] といったバックグラウンドの有機分析に相当な時間と労力が払われた [7]。併せて、彗星塵がエアロジェルに捕獲された際に起こりうる、有機物の変成についての検証実験も事前に実施された [7]。この上で、地上の様々な分析法がヴィルト 2 彗星粒子中の有機物を同定するに至り、それらの化学構造や同位体組成に関して着目すべき情報を提供することができた。同時に、未だ不確かな汚染の存在や有機物の

1. Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington, USA.

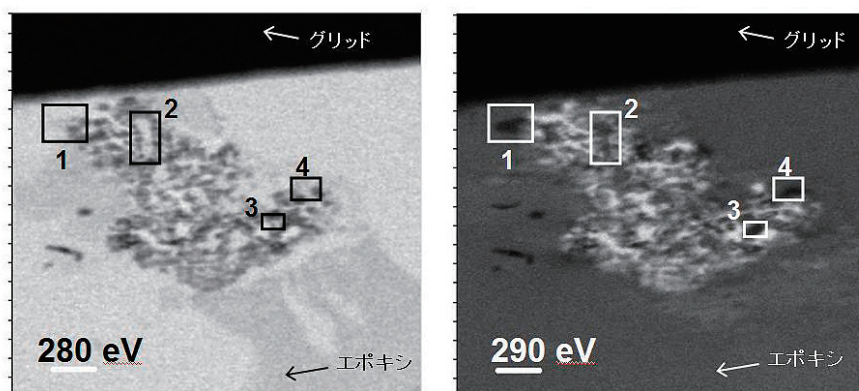


図1: (a) 280 eV と (b) 290 eV で各々走査したヴィルト2彗星粒子 (トラック 35, グレイン 16) の STXM イメージ (20 x 20 μm)。四角 1 ~ 4 で示した領域が有機物。

変成の問題も残っているのも事実であるが、本論文では、各分析項目においてヴィルト2彗星粒子中の有機物が試料に固有であると決定された根拠、および検出された有機物とこれまでに研究された隕石や惑星間塵 (IDP) 中の有機物との比較を明確に表しながら、現段階で明らかにされたヴィルト2彗星の有機化学的特徴を述べる。

2. 分析項目と分析法

スターダスト1次分析で実施された有機分析法は次の通りである。

- (1) 構造分析 (走査型透過X線顕微鏡-X線吸収端近傍構造 (STXM-XANES), 顕微赤外分光分析 (FTIR), 顕微ラマン分光分析)
- (2) 同位体分析 (2次イオン質量分析 (SIMS, Nano SIMS))
- (3) アミノ酸分析 (液体クロマトグラフィー/飛行時間型質量分析 (HPLC/TOF-MS))
- (4) 多環式芳香族炭化水素 (PAHs) 分析 (二段階レーザー脱離・イオン化質量分析 (L2MS), 飛行時間型2次イオン質量分析 (TOF-SIMS))

3. 結果と考察

3.1. 構造分析

3.1.1. STXM-XANES

有機物のXANESは、C, N, O原子のそれぞれの内殻吸収端近傍でX線エネルギーを走査しながら光の吸収強度を測定する方法である。光源は軟X線領域 (200–800 eV) の放射光が用いられる。有機物中のC, N, O原子が軟X線を吸収すると原子の内殻軌道から空軌道 (例: π^* 軌道, σ^* 軌道) へ電子が励起する。この時にとりうる励起状態は原子間の結合つまり分子の性質によって異なり、X線スペクトルの吸収端近傍領域に微細構造として現れる。これに空間・エネルギー分解能の高いSTXMを組み合わせることで、試料の微小領域 (サブミクロンスケール) における有機物の官能基の分布を定性・定量的に評価することができる。ヴィルト2彗星粒子試料は、エポキシ樹脂、シアノアクリレート樹脂、あるいは硫黄で埋包後、ウルトラマイクロームで120–140 nmの薄片にしたものをTEMグリッドに乗せた状態でSTXM-XANES分析用に配分された。

図1に、2つの異なるX線エネルギーで取得したヴィルト2彗星粒子のSTXMイメージを示す。粒子中か

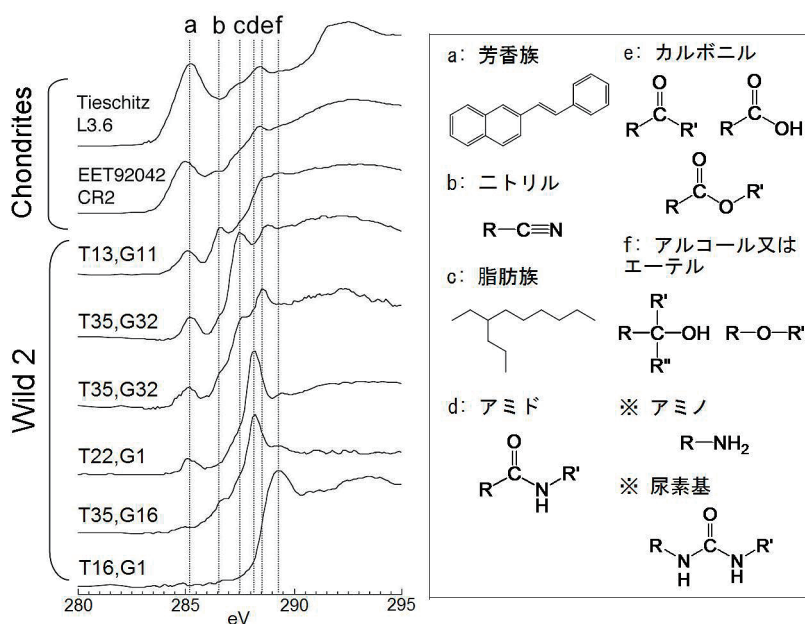


図 2： ヴィルト 2 彗星粒子と、コンドライト隕石 (CR2, L3.6) 中の不溶性高分子量有機物の C-XANES スペクトル。T：トラック，G：グレイン。ピーク a：芳香族炭素 またはオレフィン (～285 eV)，b：ニトリル (～286.7 eV)，c：脂肪酸炭素 (～287.5 eV)，d：アミド (～288.2 eV)，e：カルボニル (～288.5 eV)，f：アルコールまたはエーテル (～289.5eV)。図の出典 [7]。

ら有機物を見分けるには、炭素の吸収端より低いエネルギーでは吸収せず (図1a, 白色部)，吸収端以降のエネルギーで吸収する (図1b, 黒色部) といった相違が見られる部分を探す。このような部分を，C，N，O原子の各吸収に相当するエネルギー領域でC-，N-，O-XANES分析した。図2は6種のヴィルト 2 彗星粒子のC-XANESスペクトルである [7, 8]。試料によってそれぞれ異なるスペクトルが得られた。多量の窒素原子を含む官能基 (アミド，ニトリルなど) と酸素原子を含む官能基 (カルボニル，アルコールまたはエーテル)，そして脂肪酸炭素が，様々な割合で検出された。これらの官能基に比べ，芳香族炭素の割合は少なかった。さらにN-XANESスペクトルからアミド，ニトリルに加えアミノや尿素等の官能基も混在していることが予想された [8]。コンドライト隕石中の不溶性高分子量有機物では芳香族炭素が全有機炭素のうち最も高い割合を占め，窒素や酸素を含む官能基は相対的に少ないことが知られるが (図2および [9])，ヴィルト 2 彗星粒子の有機物の組成は隕石有機物のものとは大きく異なることが分かった。

く異なることが分かった。

彗星粒子中の有機物のC-XANESスペクトルは，エアロジェル，エポキシおよびシアノアクリレート樹脂の各スペクトルとははっきり異なることを確認した。エアロジェルは固体 ^{13}C ， ^{29}Si -核磁気共鳴 (NMR) でも分析され0.25%–数%の炭素を含むことが分かったが，その多くはSiに結合したアルキル鎖の形で存在しており，彗星粒子に固有の有機物とは区別された [7, 8]。

図3に，各試料のXANESスペクトルから見積もった，ヴィルト 2 彗星粒子の有機物のN/C，O/C比の分布を示す [7, 8]。これらの比の多くはコンドライト隕石中の有機物およびハレー彗星粒子の値 [7] を上回り，試料間で類似性がなく非常にばらついていたので，ヴィルト 2 彗星粒子の有機物の前駆物質は単一ではなく複数の寄与があると考えられた。

なお，XANES分析において有機物が検出された試料は全てバルブ型のトラックで，ターミナルパーティクル [6] からは有機物は検出されていない。

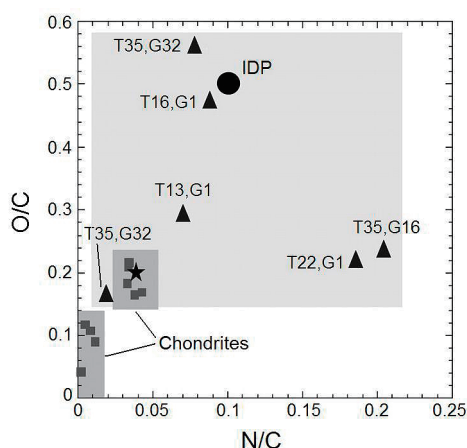


図3: XANES スペクトルから見積もった、ヴィルト2彗星粒子中の有機物の N/C - O/C プロット [7, 8]。T: トラック, G: グレイン。▲: ヴィルト2彗星粒子, ■: 炭素質コンドライト中の不溶性高分子量有機物, ●: 無水 IDP, ★: ハレー彗星。図の出典 [7]。

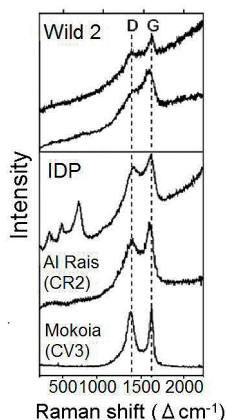


図4: ヴィルト2彗星粒子 (トラック 35, グレイン 30(上) とトラック 13, グレイン 1(下)), 炭素質コンドライト (CV3, CR2) 中の不溶性高分子量有機物, および IDP のラマンスペクトルにおける D-バンド (~1360 cm^{-1}) と G-バンド (~1580 cm^{-1})。図の出典 [7]。

3.1.2. 顕微FTIR

ヴィルト2彗星粒子の有機物の検出はFTIRでも行われ、官能基の定性結果は3.1.1.の記載を支持した。本文では内容の重複を避けるためその詳細は省略する。FTIR分析では、トラックの先頭から末端までの全体部分を観察することによって、2つのトラック試料における有機物分布を比較した。その結果、一つのトラック (トラック59) ではOHやC=Oなどの官能基

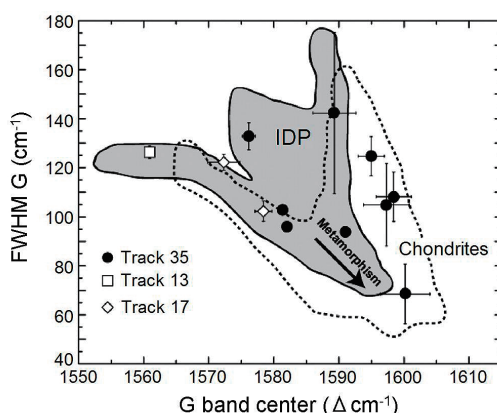


図5: ヴィルト2彗星粒子 (●: トラック 35, □: トラック 13, ◇: トラック 17), 炭素質コンドライト中の不溶性高分子量有機物 (点線で囲んだ部分), IDP (実線の灰色の部分) の G-バンドラマンパラメータ (位置 (G band center) vs. 半値幅 (FWHM G)) プロット。図の出典 [7]。

の赤外吸収がトラックの広い部分に渡って検出されたが、もう一つのトラック (トラック61) ではエアロジェル由来のC-H (3.1.1.参照) 伸張振動以外の吸収は全く検出されなかった。互いに類似した長さのトラックはおそらく類似の衝撃エネルギーを受けて形成されたものとするならば、これら2つのトラックの赤外吸収に見られる相違は、トラック59で検出された官能基は彗星塵がエアロジェルに捕獲された際の衝撃反応でエアロジェル中の炭素から2次的に生成したものではないということを示唆している。

3.1.3. 顕微ラマン

一般に、分子量の高い有機物のラマンスペクトルでは、高度に共役した sp^2 炭素の平面構造に由来するG-バンド (~1580 cm^{-1}) と、様々な化学結合が入り混じった無秩序な構造に由来するD-バンド (~1360 cm^{-1}) が現れる。ラマン分析では、測定操作による有機物試料の変性を避けるよう配慮しなければならない。そこで実際の測定を行う前に、コンドライト隕石中の有機物で試験を行い、できる限り弱い強度のレーザー出力 (55 μW) が適用された。

ヴィルト2彗星粒子のラマンスペクトル (図4) [7] では、比較的なだらかで幅広いD-, G-バンドが現れ

た. これは, IDPや, 殆ど変成を受けていないCR2コンドライトの不溶性高分子量有機物のスペクトルに似ていた. 一方で, 熱変成を受けたCV3コンドライトの不溶性高分子量有機物が表す鋭いD-, G-バンドとは明らかに区別された. これらのスペクトルを, G-バンドの位置と半値幅で評価したところ, 大部分の彗星粒子試料の値はIDPおよび始原始的な炭素質コンドライト(CR, CI, CM)の値の範囲内に位置した(図5) [7]. すなわち彗星粒子中の有機物もIDPや始原始的な炭素質コンドライト中の有機物と同程度に無秩序な構造を持ち, 殆ど熱変成を受けていないことが示された. このことはXANES分析によって結論づけられたように, 芳香族炭素に乏しい一方, 窒素や酸素原子を含む炭素または脂肪族炭素に富んだ構造を裏づけるようであった. 図5中のプロットにばらつきがある傾向もまた, XANES分析からの結論に同じく有機物の構造や組成の多様性あるいは複数の前駆物質による寄与をおそらく反映しているのだろう.

3.2. 同位体分析

ヴィルト 2 彗星粒子の水素同位体比はSIMSにより分析された. 5試料中3試料のD/Hが標準平均海水(SMOW)のD/H比より3倍高く, δD の異常濃集領域(Hotspots)は最高で $2200 \pm 1000\%$ (領域の大きさはサブミクロンスケール)であった [10]. Dに富んだ水素の分布は全て炭素の分布と相関していたので有機物由来と判断された. またこれらの値はIDP [11] や炭素質コンドライト中の不溶性高分子量有機物 [12], 長周期彗星の H_2O のD/H比の範囲内には含まれたが(図6), 彗星起源の可能性が強いクラスターIDPのHotspot (例: $\delta D = 24800 \pm 1500\%$ [11]), CR2コンドライト中の不溶性高分子量有機物のHotspot ($\delta D = 19400 \pm 4600\%$ [12]), および彗星水のHCN [13]の値に比べるとかなり低かった. このヴィルト 2 彗星粒子の水素同位体比の低さが隕石またはIDPとの起源的相異を示唆しているのかは現時点では明らかでない. 可能性の一つとしては, 彗星塵がエアロジェリに捕獲

された際の熱で同位体分別が起こったのが水素同位体比を低くした原因であると考えられている [10].

ヴィルト 2 彗星粒子の窒素同位体比はNanoSIMSにより分析された [7, 10]. 窒素は CN^- として検出されるのでどの値も有機物に由来する. 多くの試料の $\delta^{15}N$ は0‰ (大気)の値)に近かったが, 幾つかの試料の $\delta^{15}N$ は+100–+500‰まで達し, 無水IDPが示した $\delta^{15}N$ の範囲 [11]と類似した. さらにそのHotspotsは最高で $1300 \pm 400\%$ (領域の大きさはサブミクロンスケール)で, 無水IDP ($\delta^{15}N = 1270\%$)やCR2コンドライト中の不溶性高分子量有機物 ($\delta^{15}N = 1770 \pm 280\%$)のHotspotsに近い値を示した [11, 12].

以上のD, ^{15}N に富んだ同位体組成は彗星粒子に固有の有機物であると判断できる確かな証拠を提示した (詳しくは [14]を参照).

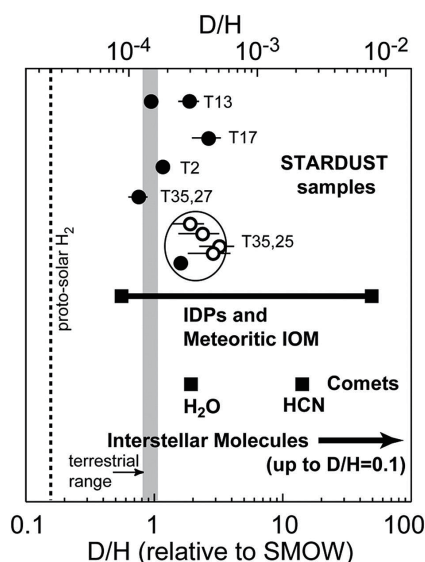


図 6: ヴィルト 2 彗星粒子の水素同位体比分布. T: トラック. ●: バルク測定値, ○: 1 粒子内の多領域 (サブミクロンスケール) における測定値. Meteoritic IOM: 炭素質コンドライト中の不溶性高分子量有機物. 図の出典 [10].

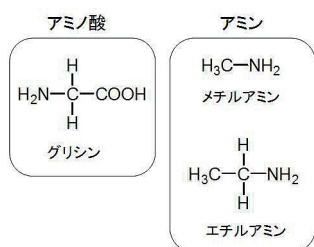


図7：ヴィルト2彗星粒子のHPLC/TOF-MS分析から同定された、グリシン、メチルアミン、エチルアミンの構造式。

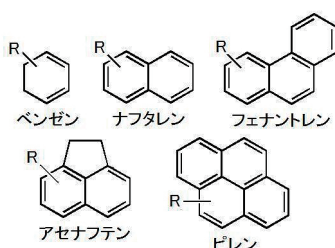


図8：ヴィルト2彗星粒子のL²MS分析から主に同定された、PAHsの構造式。RはPAHsに置換するアルキル基 (C₁ - C₄) 又は水素原子を示す。

3.3. アミノ酸と関連化合物の分析

アミノ酸は、地球外有機物と生命の起源の研究において長く興味を持たれてきた有機化合物の一つであり、従来より確立された溶液抽出法は今日に至りアミノ酸を個別に同定・定量することができる唯一の分析技術ということで、スターダストミッションでも適用された。ヴィルト2彗星粒子のアミノ酸分析においては、キーストーン [6] を熱水抽出し、抽出液を加水分解するものと加水分解しないものに分け、HPLC/TOF-MSで分析した [7, 15] (注：粒子中に遊離に存在するアミノ酸を取り出すには熱水抽出だけでよいが、他の分子と結合した状態で存在するアミノ酸を取り出すには、H⁺ (塩酸) を付加させることでその結合を切断する必要がある。この操作を加水分解という)。併せて、ブランク分析として、エアロジェルだけ (ウィットネスクーボンと未飛行の予備エアロジェル) を同様の手順で抽出・分析し、両者を比較した。

キーストーンを加水分解した画分から検出されたグリシンと、メチルアミン、エチルアミン (図7) の濃度は、ブランク分析で若干量検出されたそれらの濃度を大きく上回っていたため、おそらく彗星粒子に固有であると結論された。グリシンは分子量が最も小さいアミノ酸である。一方、 γ -アミノ酪酸、エタノールアミン、 ϵ -アミノ-n-カプロン酸はキーストーンとブランク分析の両方において同レベルの濃度で検出されたことから、これらは地上からの汚染であろうと判断された。また、キーストーンからはL-アラニン、 β -アラニンも検出されたが、L-アラニンの光学異性体であるD-アラニンが検出されなかった点で、アラニンが地球外起源であると認めるには及ばなかった。メチルアミン、エチルアミンの濃度 (~ 35 nmol / g aerogel) はグリシンの濃度に比べて非常に高かった。キーストーンを加水分解しなかった画分からはアミノ酸もアミンも検出されなかった。つまり、本分析で検出されたアミノ酸とアミンは、遊離の状態ではなく、他の分子と結合した状態で存在する可能性が示唆される。このことは、アミノ酸やアミンの前駆体となりうるニトリル、アミドなどの様々な窒素官能基がXANESスペクトルから検出された結果と一致する。

本結果は、種々の炭素質コンドライトから豊富に検出されているアミノ酸の分布特徴とは対照的であった。個々のアミノ酸の炭素・水素・窒素同位体比から、炭素質コンドライト中のアミノ酸の多くは地球外起源であることが証明されている [16]。ヴィルト2彗星粒子から検出されたグリシンとアミンについても今後個別炭素・窒素同位体分析を行い、地球外起源であるかどうかを確認することが残された課題となっている。

3.4. 多環式芳香族炭化水素(PAHs)分析

ヴィルト2彗星粒子のL²MSスペクトルでは、78–300 amuの範囲、つまり1環 (C₆H₆) から6環 (C₂₄H₁₂) までのPAHsに相当する質量数のピークが得られた。主に、ナフタレン (2環)、フェナントレン (3環)、ピレン (4環) とそれらのC₁–C₄ アルキル同族体 (図

8) に相当するピークが検出された [7]。また、彗星粒子やIDPからはPAHs だけでなく酸素や窒素が置換した芳香族化合物を推測させるピークも検出された。TOF-SIMS分析からも、2環から6環までのPAHsの存在を示唆する2次イオンが検出された [7]。環数が多いPAHsほどその相対量は減少していく傾向を示した。上記のように、2つの分析法による結果は類似し相補的であった。またこれらの結果は炭素質コンドライトやIDPの L^2MS スペクトルにもおおかた似ていた。ただし、炭素質コンドライト中のPAHsは溶液抽出で得られる可溶性化合物を指し、隕石中の不溶性高分子量有機物を構成する芳香族炭素とは区別される。この点で、 L^2MS や TOF-SIMS による分析では、同定されたPAHsが彗星粒子中に単独に存在する分子として検出されたのか、高分子量有機物の成分として（レーザーやイオンパルスによる分解生成物として）検出されたのかは分からない。3.3の章でも触れたように、その分子が遊離で存在するのか、他の分子との化学結合を介して存在するのかという識別は、有機物の化学進化研究においてその分子の起源や生成過程を理解するためには重要である。

4. 彗星塵捕獲時の衝撃による有機物変成の可能性

彗星塵がエアロジェルに捕獲された際の衝撃熱による影響は、熱作用に比較的高感な有機物にとっては無視できない問題である。ヴィルト 2 彗星粒子の鉱物・岩石学分析では、同一トラック内で激しく変成を受けた成分から本来の化学状態を保った成分まで多様に存在することが指摘されており、有機物の熱変成の度合いについても一概に結論づけることは容易でない。

エアロジェルによる彗星塵捕獲を模した室内実験では、ココア粉末とソーダ石灰ガラス球粒の混合物を用いて有機物の変成を検証している（詳しくは[7], [17]を参照）。本実験によると、試料のエアロジェル貫入後、全ての有機物はバルブ型のトラックに伴って分布し、ターミナルパーティクルのガラス粒からは検出されな

かった。ヴィルト 2 彗星粒子のXANES分析においても有機物が検出されたトラック試料は全てバルブ型であり、両結果は一致している。この分布傾向から、捕獲時に有機物の一部は蒸発し消失した可能性が指摘されている。

室内実験ではまた、エアロジェル貫入後のココア粉末の化学構造には結合の開裂や形成が見られているので、実際のヴィルト 2 彗星粒子中の有機物についても比較的不安定な官能基の消失や変化が起こった可能性がある。また3.2. 章で述べたように、ヴィルト 2 彗星粒子中の有機物の水素同位体比が炭素質コンドライトやIDPのHotspotsの値ほど高くはないものが多い原因の一つにも衝撃熱による影響が考えられている。

しかしながら、ヴィルト 2 彗星粒子中から検出された有機物が大規模な熱変成を受けたという決定的な証拠は見出されていない。一般に有機物は加熱によって芳香族化が進行するが、3章で既述のようにヴィルト 2 彗星粒子中の有機物中の芳香族炭素の割合は相対的に低かった。さらに多種の窒素・酸素官能基が検出されたことから、炭素質コンドライト中の有機物に比べて不安定な組成を保持していることも分かった。ヴィルト 2 彗星粒子中の有機物の窒素同位体比は炭素質コンドライトやIDPの値と近いことが示された。C=Oなどの酸素官能基はエアロジェル由来の炭素（Si-CH₃）の酸化で生じたのではないことが議論された。これらの諸結果からはむしろ始原的な地球外有機物の化学特徴が表れている。

推測の域にとどまる議論になるが、激しい衝撃熱を受けた有機物は消失し検出されなかった一方で、トラックに残存し検出された有機物は、強度の変成からは免れたのかもしれないという可能性も考えられる。

鉱物と有機物とは熱の伝わり方も異なる。また分子の構造や大きさによっても変成の仕方は様々である。これらの条件の違いによる変成の度合の多様性を明らかにするために、試料分析と室内実験とのさらなる協調が図られることが期待される。

5. まとめ

- (1) ヴィルト 2 彗星粒子から検出された有機物は窒素と酸素に富んだ多様な官能基および脂肪族炭素を含み、芳香族炭素の割合が相対的に少なかった。各官能基の存在の有無と割合は試料によって様々であった。これらの構造特徴はコンドライト隕石中の不溶性高分子量有機物のそれとは対照的であった。
- (2) ヴィルト 2 彗星粒子から検出された有機物の構造は芳香族化が進行していないことから、熱変成を殆ど受けていないことが示された。この度合いはIDPや始原始的な炭素質コンドライト中の不溶性高分子量有機物と同程度であると評価された。
- (3) ヴィルト 2 彗星粒子の水素・窒素同位体比の最大値は炭素質コンドライトやIDPの各同位体比の範囲内に入り、彗星粒子に固有の有機物であると判断できる証拠を提示した。
- (4) ヴィルト 2 彗星粒子から検出されたアミノ酸はグリシンだけだった。併せてアミンが比較的多量に検出された。本結果は、炭素質コンドライトから検出されたアミノ酸の種類・存在量が豊富であることとは異なった。
- (5) ヴィルト 2 彗星粒子から検出されたPAHsの分子量は1環から6環までの化合物に相当し、環数が多いPAHsほどその相対量は少なかった。PAHsの種類と分布は炭素質コンドライトやIDPから検出されたものと類似した。

総じて、ヴィルト 2 彗星粒子の有機物の化学特徴は非常に不均一であった。この結論は、スターダストのあらゆる分析部門によって明らかにされたヴィルト 2 彗星粒子の各成分に共通して言えるようである。他の分析部門による結果でも考察されているように、おそらく太陽系星雲中で起こった物質の大規模な混合により複数の前駆物質や様々な化学反応がもたらされたことが、有機物にも反映されているのではないかと考え

られる。

謝 辞

本総説の内容は、2006年12月掲載のScience誌 [7] に発表されたヴィルト 2 彗星粒子有機分析の結果に基づく。スターダストミッションに関わった全ての方々にお礼申し上げます。著者の研究指導者であるGeorge D. Cody, Conel M. O' D. Alexander両氏 (Carnegie Institution of Washington, USA) には、スターダストミッション一次分析チームへ参加する貴重な機会を頂きました。また、本論文を執筆する機会を与えてくださいました三河内岳氏 (東京大学) と、本稿に関して有益なコメントをくださいました中村圭子氏 (NASA, USA) に深く感謝致します。遊星人編集幹事のはしもとじょーじ氏 (神戸大学) には本論文の図作成において適切な助言を頂きました。

参考文献

- [1] Ehrenfreund, P. et al. 2002, Repts. Prog. Physics 65, 1427.
- [2] Mumma, M. J. et al. 2005, Science 310, 270.
- [3] Kissel, J. et al. 1986a, Nature 321, 280.
- [4] Kissel, J. et al. 1986b, Nature 321, 336.
- [5] Greenberg, J. M. 1998, Astron. Astrophys. 330, 375.
- [6] 中村圭子. 遊星人. 本号.
- [7] Sanford, S. et al. 2006, Science 314, 1720.
- [8] Cody, G. D. et al. 2007, Meteor. Planet. Sci. in press.
- [9] Cody, G. D. and Alexander, C. M. O' D. 2005, Geochim, Cosmochim, Acta. 69, 1085.
- [10] McKeegan, K. D. et al. 2006, Science 314, 1724.
- [11] Messenger, S. 2000, Nature 404, 968.
- [12] Busemann, H. et al. 2006, Science 312, 727.
- [13] Meier, R. et al. 1998, Science 279, 1707.

- [14] 伊藤元雄. 遊星人. 本号.
- [15] Glavin, D. P. and Dworkin, J. P. 2007, LPS
XXXVIII Abstract#1052.
- [16] Pizzarello, S. et al. 2006, Meteorites and the
Early Solar System II. (eds. Lauretta D. S. and
McSween, H. Y., Jr.) Univ. of Arizona., USA,
pp. 628-651.
- [17] 奥平恭子. 遊星人. 本号.