

同位体組成からわかる彗星塵の形成環境 —NanoSIMSによる同位体イメージング—

伊藤元雄¹, スコット・メッセンジャー¹

(要旨) NanoSIMSを用いた二次元同位体イメージング法によりヴィルト2彗星塵試料中の各相(数十から数百nmの細粒の鉱物や炭素質物質)の高精度・高空間分解能同位体測定を行った。その結果、ほとんどの試料の水素、炭素、窒素、酸素の同位体組成は太陽系固体物質のこれまでの研究結果と非常に近かった。酸素同位体組成が際立って異なる事が特徴である太陽系前駆物質(プレソーラー粒子)は彗星塵中に1つしか発見されず、その存在は非常に稀である事がわかった。しかしながらサブミクロンスケールレベルでみると、炭素質物質の中に極低温(~20 K)の星間分子雲内での化学反応により形成されうる水素と窒素の同位体異常が見られた。これにより、ヴィルト2彗星を構成する炭素質物質の中には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あると解釈できる。以上の事は、原始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の外縁部まで飛ばされ、そこにあった星間分子雲起源の有機物質と混合するプロセスがあった事を示唆している。

1. はじめに

これまで地球外物質として我々科学者が実験室で化学的に分析してきたものには、地球に落ちてくる隕石、アポロとルナ計画で採取された月の石、成層圏から回収される惑星間塵(Interplanetary Dust Particles, IDPs)、南極やグリーンランドの雪氷中から採集される微隕石(Micro-Meteorites, MMs)、そしてLDEF(Long Duration Exposure Facility)という衛星軌道上に長期間設置してある実験施設で回収した宇宙塵がある。NASAの彗星探査機スターダストは人類初となる彗星塵のサンプルリターンミッションとして1999年に打ち上げられた。2004年に地球から約3億9千万キロ離れた火星と木星の間にあるヴィルト2彗星(81P/Wild2)を構成する彗星塵を採取し、2006年1月に彗星塵を地球まで持ち帰ることに成功した[1]。それはルナ24号が1976年に持ち返った月試料以来、30年

ぶりに人類が自ら掴み取った地球外物質である。

彗星は太陽系形成時に存在した揮発性物質と岩石質の塵が集まってできたものであり、その核は水で覆われた小さな岩石および有機物の塵を含む集合体であると考えられている。氷の80%以上は水(H₂O)からなり、その他には一酸化炭素(CO)、二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、また微量成分としてアンモニア(NH₃)やシアン化水素(HCN)などが確認されている。融点が非常に低い一酸化炭素(融点=-205℃)やアンモニア(同-77℃)が氷の状態で存在することから、彗星は形成以来極低温のまま46億年の間その状態を保っているとされる[2, 3]。そのため太陽系内部で最も古い起源物質を保持している可能性の高い天体であると考えられている。彗星塵試料を化学的な手法で分析することができれば、太陽系の起源物質、さらに星間雲から惑星の形成に至るまでの太陽系46億年の物質化学進化を解明できるであろう。

1. NASA ジョンソンスペースセンター

2. 同位体を用いた地球外物質の研究

地球や月の石、隕石などの太陽系固体物質に含まれる多くの主要元素、例えばケイ素、マグネシウム、アルミニウムやカルシウムなどは蒸発や凝縮などの化学反応に伴いそれらの元素組成は大きく変化するが、同位体比の変動は小さい事が知られている。

しかしながら始源隕石中には同位体比が太陽系の平均から著しく異なるサブミクロンスケールの物質が多く僅かに存在することが知られている [4]。これらは太陽系が形成される前の情報を持つ粒子“プレソーラー粒子”と呼ばれる。太陽系を作ったもとの元素は超新星や赤色巨星など様々に異なった環境下で合成され、同位体的に著しく不均一な状態から出発した事を示す証拠になっている [例えば5]。太陽系固体物質が持つ均一な同位体組成は、太陽系形成時、あるいはそれに先立って大規模な物質の攪拌が起こったことを意味する。このような例からもわかるように地球外物質の同位体組成を測定する事は、その起源や形成過程を評価するインジケータとして重要な役割を果たしている。

彗星の同位体組成を直接測定した研究は非常に少ない。主として地上からの分光観測により得られるCN（可視光スペクトル）やHCN（電波）の領域の波長を詳しく解析することで、炭素($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)と窒素($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)同位体比を得る研究が行われている。これまでにオールト雲起源のヘル・ボップ彗星やカイパーベルトに起源をもつデヴィコ彗星、木星族彗星に分類されるハッセル彗星など6つの彗星についての研究が報告されている [6-8]。唯一の直接測定として1986年に探査機ジョットに搭載された飛行時間型質量分析器によりハレー彗星の水素(D/H)、酸素($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)、硫黄($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$)の同位体測定が報告されている [2, 9-10]。

ヴィルト2彗星から捕獲された彗星塵の水素、炭素、窒素、酸素の同位体組成を測定することで、a) 彗星の地上観測データ、及び隕石や宇宙塵などの太陽系固

体物質から得られた特徴的な同位体分布との比較、b) 地球内外の有機物（炭素質物質）の同位体組成との比較、c) 彗星は太陽系の平均同位体組成から著しく異なった同位体組成を持つ星間塵を含むか、そしてd) 原始惑星系円盤における物質化学進化と物質循環の解明、などについて新たな知見を与えてくれるものと期待できる。

3. 二次イオン質量分析法による同位体分析

二次イオン質量分析法 (Secondary Ion Mass Spectroscopy, SIMS) とは、数十 keV のエネルギーで加速し収束させた一次イオンビームを試料表面に照射し、その表面から運動量と運動エネルギーに応じて放出される二次イオン、中性原子、電磁波や光子などのうち、試料の構成元素に基づいた二次イオンのみを質量と電荷比に応じて分離・検出して、試料表面の化学組成や同位体組成を分析する測定法である。一次イオンビームにより試料表面がスパッタされていくので、分析を続けると表面からの深さ方向分析が、さらに一次イオンビームを走査することで面分析が可能になる。

本特集号 [11] によれば、ヴィルト2彗星から得られた彗星塵は数十から数百nmの細粒の鉱物や炭素質物質が寄り集まってできている。そのようなサブミクロンスケールの試料の同位体組成を測定するために主としてNanoSIMS (CAMECA社NanoSIMS 50/50L) を使用した。NanoSIMSは高感度（数ppm-ppb）と高空間分解能（50-100 nm）を両立した走査型二次イオン質量分析器である。最大の特長として数十 μm の領域の同位体組成分布を100 nm以下の空間分解能でかつ定量的な情報をもつイメージとして最大7つまで同時に取得できることにある。この特長を活かして数 μm 以下の領域の同位体組成二次元分布を定量的にイメージとして取得することができる。その他、局所高精度同位体組成分析には大型の扇形磁場を持つIMS-1270型二次イオン質量分析器が用いられた。

4. 同位体測定の結果

4.1. 高融点鉱物の存在とその酸素同位体組成

彗星塵を構成する鉱物は主として細粒のカンラン石と輝石（エンスタタイト）であった [11]. また非常に興味深い事に, "Inti" と名づけられた彗星塵にはカルシウムとアルミニウムを主要元素とする鉱物（メリライト, アノーサイトとスピネル）を含んでいた [11]. これらの鉱物は融点が1000 °C以上と非常に高いため, 原始太陽系星雲では非常に限られた高温の場所でしか形成できない. 特に難揮発性元素であるカルシウムとアルミニウム成分に富む鉱物からなる固体物質は, 一般にCAI (Ca-Al-rich inclusions) と呼ばれ, 始源隕石中に特異的に存在する. CAIの年齢は鉛-鉛系の年代測定法によると45.67億年であり, 太陽系最古の物質である [12]. そのためCAIは太陽系形成初期の頃に起こった様々な熱的プロセスやタイムスケールについての情報を保持している. このCAIの類似鉱物が彗星塵試料中に発見された事で, これまで蓄えられてきた隕石の酸素同位体宇宙科学の結果と結びつける事が可能になり, 原始太陽系星雲での物質化学進化と彗星の形成過程とを同時に考えられるようになるであろう.

表1と図1 (a) に1270型二次イオン質量分析器を使用した局所分析による彗星塵試料中のエンスタタイト, カンラン石と "Inti" の鉱物集合体の酸素同位体分析結果を示した [13]. エンスタタイトの酸素同位体組成は図1 (a) に示すように地球型分別直線 (TF) に沿って分布していることがわかる. 細粒の彗星塵は局所同位体分析に使用したビーム径よりも小さいために試料そのものだけを測定しておらず, 試料周囲の物質（アクリルやエアロジェル）もまた同時に測定している可能性が高い. そのため測定値は, 試料自身の酸素同位体組成と周囲の物質の同位体組成と混合した値として得られていると考えられる. カンラン石の分析値についても同様の影響を多少受けている (表1).

以上のことを考慮してもエンスタタイトとカンラン石の酸素同位体組成は太陽系平均とほぼ一致していることから, これらの鉱物は太陽系内で形成されたと解釈できるであろう.

では "Inti" についてはどうであろうか. スピネル, アノーサイトとメリライトを区別して測定する事ができなかったため, 測定結果は各鉱物の酸素同位体組成の平均値として考える事にする. その結果 "Inti" の構成鉱物は, 始源隕石に特徴的に含まれるCAIと同じく¹⁶O成分にのみ約4 %富む酸素同位体組成を示した (図1 (a) の左下に集中している). このことは "Inti" のCAI鉱物は, 隕石のCAIと同じ起源を持ち, 同様の形成過程を経てきたと解釈しても差し支えないだろう.

Shuら [14] はXウインドのような超音速のガス流により原始惑星系円盤中に存在するミリメートルサイズの固体物質は, 中心星の近傍から数天文単位離れた場所へ運ばれる事を示した. 原始惑星系円盤の最も内側に存在する活動的な原始太陽からの熱放射によりCAIのような難揮発性物質を蒸発または溶融させる高温領域が存在し, そこで熱変成を受けた物質はXウインドにより中心から数天文単位離れた低温領域まで運ばれた. このプロセスに基づいた原始惑星系円盤の内部と外縁部を結ぶ物質循環が, 太陽系固体物質の形成過程に大きく関わっていた証拠が始源隕石中に発見されている [15]. 従って彗星塵 "Inti" の鉱物組成とその酸素同位体組成は, 上記のXウインドによる原始太陽系内の物質循環モデルを強く示唆している.

図1 (b) の縦軸, 横軸はそれぞれ¹⁷O/¹⁶Oと¹⁸O/¹⁶Oと図1 (a) と同じであるが, およそ3桁にわたり同位体比が異なる事が見て取れる. 図中の灰色の丸は全てNanoSIMSによる個々のプレソーラー粒子の酸素同位体組成分析結果を示している [5]. この粒子らが示す酸素同位体比の大きな散らばりは, それぞれが異なる元素合成の過程を経て生成されたと解釈されている. 図中の黒丸は, 彗星塵試料から見つかった唯一のプレソーラー粒子 (おそらく酸化物かケイ酸塩鉱物)

表 1: 酸素同位体の SIMS による局所分析結果 (エアロジェル, 地球産のエンスタタイト, スターダスト彗星塵試料, ハレー彗星)

試料	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ (‰)	$\delta^{17}\text{O}_{\text{SMOW}}$ (‰)	
地球試料			
エアロジェル	-1.1 ± 0.1	-0.5 ± 0.1	2回測定 of 平均
輝石 (エンスタタイト)	5.8 ± 0.3	3.0 ± 0.3	16回測定 of 平均
アクリル	-33.5 ± 0.5	-19.5 ± 1.2	彗星塵試料を埋め込んだアクリル
彗星塵試料			
C2027, 2, 69, 1, 0	-0.3 ± 0.4	-0.8 ± 0.9	輝石 (エンスタタイト)
	4.5 ± 0.4	-0.1 ± 0.9	
	1.1 ± 0.4	-1.1 ± 1.1	
	-5.2 ± 0.6	-3.8 ± 1.7	
	-6.9 ± 0.5	-4.9 ± 1.2	
C2115, 1, 22, 0 (Track22)	-1.7 ± 1.2	-1.5 ± 1.6	カンラン石と少量の輝石 (エンスタタイト) を含む
	2.2 ± 1.2	0.4 ± 1.7	
	-6.0 ± 1.1	-2.6 ± 1.7	
C2054, 4, 25, 1, 0 (Track25, "Inti")	-39.5 ± 1.0	-39.4 ± 4.3	run 1
	-40.9 ± 1.3	-40.5 ± 1.6	run 2
	-36.1 ± 2.4	-38.7 ± 3.8	run 1
	-41.6 ± 1.3	-42.0 ± 2.5	run 2
ハレー彗星	12 ± 75	N/A	直接測定 [9, 10]

測定した同位体比の記述は基準として用いる国際標準値との相対的な表記 δ 値で表す。同位体のずれを δ 値で表す場合、 $\delta^{17\text{ or }18}\text{O} = [({}^{17\text{ or }18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{測定試料}} / ({}^{17\text{ or }18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{国際標準値}} - 1] \times 1000$ で定義され、単位は千分率 (per mil, ‰) である。 δD , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ についても同様の式で表す。

の酸素同位体組成である。この粒子のもつ酸素同位体組成は ${}^{17}\text{O}/{}^{16}\text{O} = (1.01 \pm 0.20) \times 10^{-3}$, ${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O} = (1.77 \pm 0.24) \times 10^{-3}$ である。この値を様々な隕石や宇宙塵から発見されているプレッシャー粒子の酸素同位体比と比較した場合、グループ 1 というカテゴリに分類される。このように ${}^{18}\text{O}$ 成分が比較的太陽系平均に近く、 ${}^{17}\text{O}$ 成分に大きく富む組成をもつ粒子は赤色巨星由来のものだと解釈される [5]。

ハレー彗星の酸素同位体比 (${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$) はジオット探査機により直接測定をした報告 [9-10] により $\delta^{18}\text{O} = +12 \pm 75$ ‰ (二つの値の平均値: -38 ‰ から $+62$ ‰) という値が得られている。しかしながら機器の関係上 ${}^{17}\text{O}/{}^{16}\text{O}$ 比は測定されていない。

4.2. 炭素質物質中の水素, 炭素, 窒素同位体組成

NASA ジョンソン宇宙センター所有の NanoSIMS

50L と透過型電子顕微鏡 (TEM) による彗星塵試料の典型的な測定結果を図 2 に示す [16 からの引用]。 $6 \times 10 \mu\text{m}$ の大きさの彗星塵試料 “Ada” は細粒の鉱物や有機物から構成されている (図 2 (a))。試料の右上から左下に向かい一方に細かい亀裂が無数に規則正しく、かつ平行に入っている、これは試料を薄く切断した時に入ったものであろうと考えられている。図 2 (b) に NanoSIMS による $\delta^{15}\text{N}$ 同位体イメージを示す。同時に取得した ${}^{16}\text{O}$ 同位体イメージを元に “Ada” 本体以外の部分はマスクをかけている。 $\delta^{15}\text{N}$ 同位体イメージには多くの不均一同位体分布が確認できる。これは試料表面の凹凸の影響によるものや、二次イオン強度が低いために見かけ上同位体比の異常として見える部分が多い。我々は、選択した領域の $\delta^{15}\text{N}$ 値が塵全体の平均値から有意に異なる (2.5σ 以上の差) 場合のみを、その領域は ${}^{15}\text{N}$ 成分に富む窒素同位

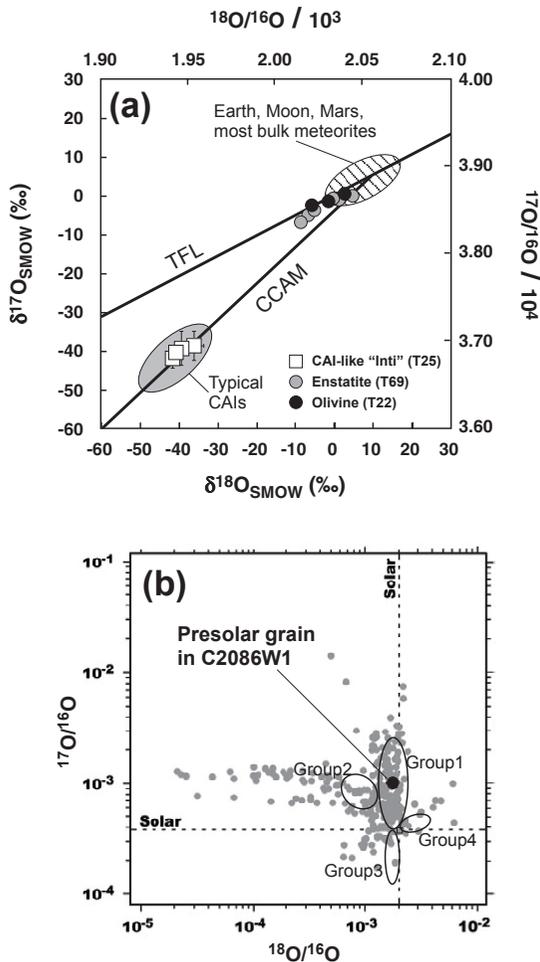


図1: (a) 塵試料から得られたカンラン石 (T22, Olivine), エンスタタイト輝石 (T69, Enstatite) と CAI 鉱物 (T25, "Inti") の三酸素同位体プロット。酸素は太陽系固体物質の殆どを占める主要成分元素であり, 原始太陽系星雲の形成環境を調べる上で非常に重要なトレーサーである。酸素は ^{16}O (99.762%), ^{17}O (0.038%), ^{18}O (0.200%) の3つの安定同位体を持ち, その存在比は太陽系形成時から変化していない。地球の物質の酸素同位体比は三酸素同位体プロット上の傾きが約0.5の直線上にちらばる(地球型分別直線: TFL, Terrestrial Fractionation Line)。しかし CAI の酸素同位体比は地球とは全く異なる線上にのる [20] (CCAM, Carbonaceous Chondrite Anhydrous Minerals)。この値は地球の標準海水 (Standard Mean Ocean Water) と比較して, 試料がどのくらい ^{16}O 成分に富んでいるか, また少ないかを示す。TF 線上を同位体比が動く事は, 蒸発や凝縮, 溶融や再結晶, 拡散, 化学反応などの通常同位体効果を伴う過程を経て変動していることを意味する。一方, 傾きが0.5以外の直線は起源の異なる2成分の混合を意味する。このプロットにより異なる起源を持つ原材料物質の区別と同一起源物質の質量分別過程という2つの情報が明確に識別できる。地球や月, 火星, 多くの隕石の酸素同位体組成は右上の比較的狭い領域に集中している事と比較すると, CAI の持つ酸素同位体組成の特徴がよくわかる。

(b) 三酸素同位体プロットを対数軸で表示した。数多くの灰丸は, これまでに隕石から抽出されたプレソーラー粒子の酸素同位体組成を示している。スターダスト試料そのものからではなく, エアロジェル捕獲器に彗星塵が衝突してきたクレター周囲の彗星塵残査からプレソーラー粒子が発見された [13]。 $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ の点線と $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ の点線との交点が標準海水の値になる。図中のグループ1-4の楕円は異なる元素合成のカテゴリを示している。(a) のグラフの範囲は交点の位置にある小さい□である。いかにプレソーラー粒子のもつ酸素同位体組成は太陽系平均から著しく異なるのかわかる。

体比をもつと定義している。図2 (c) にNanoSIMS による ^{16}O 同位体イメージ上に $\delta^{15}\text{N}$ 値の過剰がみられる炭素質物質の領域のみを示した。図2 (a) のTEMの観察像とNanoSIMSによる ^{16}O 同位体イメージは, "Ada" 本体の形状を良く現していることがわかる。図中の矢印で示した場所には炭素質物質がTEM観察とNanoSIMSの $^{12}\text{C}/^{14}\text{N}$ 同位体イメージの両方で確認され, $\delta^{15}\text{N}$ の過剰 ($\delta^{15}\text{N} = 550 \pm 70 \%$) を示した。

彗星塵試料 "Febo" からの二つの薄片を測定した [16]。最初の薄片からは数百nmの大きさで環状に分布する ^{15}N 成分に富む領域 ($\delta^{15}\text{N} = 420 \pm 160 \%$) が発見された。もう一方の薄片を測定したところ, 炭素質物質の領域に明らかに窒素に富む領域が5カ所見つ

かった。4ヶ所はそれぞれ N1 ($\delta^{15}\text{N} = 639 \pm 28 \%$), N2 ($\delta^{15}\text{N} = 518 \pm 71 \%$), N3 ($\delta^{15}\text{N} = 479 \pm 21 \%$), N4 ($\delta^{15}\text{N} = 591 \pm 28 \%$) と ^{15}N 成分に富んでいた。しかし1カ所のみ N5 ($\delta^{15}\text{N} = -20 \pm 32 \%$) と太陽系平均組成と同じ値を示した。これは惑星間塵で見られる典型的な値であり, 初期分析結果 [13] ともよく一致している。

彗星の大部分は炭素, 水素, 酸素, 窒素からなる [2-3]。しかしながら, "Febo" や "Ada" に含まれる炭素の量は予想された量よりも非常に少なかった。これは試料作成時の影響のためか, または彗星塵が秒速6キロでエアロジェルに捕獲された時の衝撃で炭素質物質が蒸発してしまったためかもしれない。炭素同位体

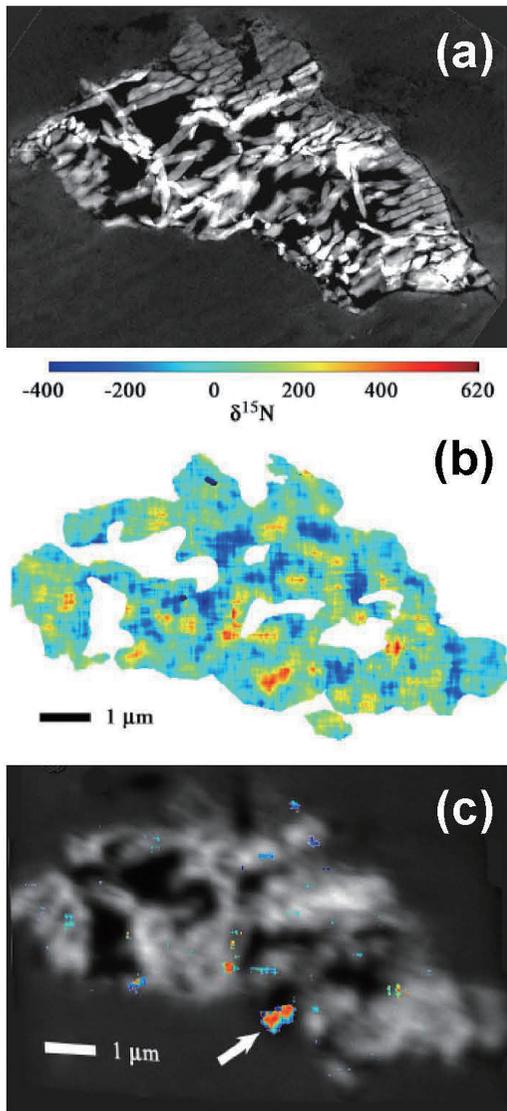


図2：(a) スターダスト彗星塵試料“Ada”の透過型電子顕微鏡 (TEM) 写真。(b) NanoSIMS による $\delta^{15}\text{N}$ の同位体イメージ。(c) ^{16}O 同位体イメージと $\delta^{15}\text{N}$ をオーバーラップさせた図。図中の矢印で示した場所は炭素質物質し、そこに $\delta^{15}\text{N}$ の大きな窒素同位体比過剰がある。

組成は初期分析結果 [18] と同様に太陽系平均組成と誤差の範囲内で一致した。

サブミクロンスケールの炭素と水素が濃集している部分が“Febo”に見つかり、その領域の水素同位体組成は $\delta\text{D} = 17,300\text{‰}$ であった。この値は [13] の報

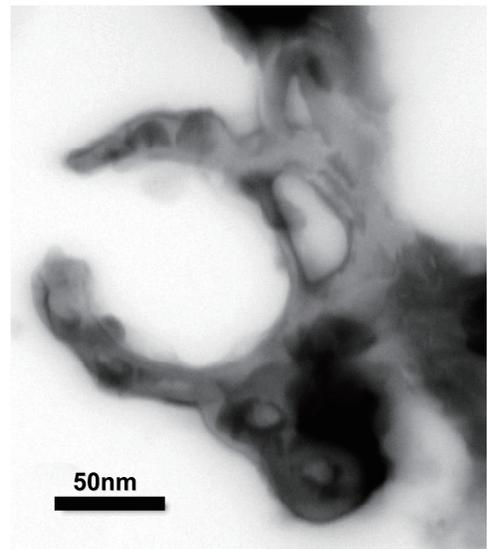


図3：タギッシュ・レイク隕石から発見された有機環状包有物 (Organic Globules, 中村圭子博士提供) の TEM 像。この環状の物質と良く似た形状の $\delta^{15}\text{N}$ 同位体イメージが“Febo”から得られた。Organic Globules については [19] を参照の事。

告値 ($\delta\text{D} = 2,000 \pm 900\text{‰}$) よりも非常に大きい値であり、最近始源隕石中の有機物に見つかった $\delta\text{D} = 19,000\text{‰}$ [17] やヘール・ボップ彗星の HCN 水の $\delta\text{D} = 13,300\text{‰}$ [18] と良い一致を示している。このように非常に重水素に富む同位体比を持つ有機物の存在は、星間分子雲などの極低温条件下での有機物の形成を示唆している [17-19]。

“Febo”中の炭素に富む物質の大きさと窒素同位体比の値は惑星間塵や隕石から発見されている同位体異常を持つミクロスケールの炭素質物質の同位体的特徴と非常に良く一致している。特に同位体イメージで確認できた ^{15}N 成分に富む環状の炭素質有機物はタギッシュ・レイク炭素質隕石中に発見された有機環状包有物 (Organic Globules, 図3) とその大きさ、形状、そして同位体組成の特徴 (窒素同位体比は ^{15}N 成分に富む $\delta^{15}\text{N} > 200\text{‰}$ 、水素同位体比は D 成分に富む $\delta\text{D} > 1000\text{‰}$ 、炭素同位体は太陽系組成に近い) に良く一致している [19]。この同位体組成分布の組み合わせをもつ有機物質は 20 K 以下の極低温における

化学反応により形成され、原始太陽系星雲では冷たい星間分子雲がその候補にあたる [19]。このことから、彗星の有機物は重水素に富む星間分子を起源物質として、星間分子雲という非常に温度の低い場所での形成が示唆される。

可視光や電波などスペクトル観測により、いくつかの彗星について窒素と炭素の同位体組成が報告されている [2, 6-8]。ここで、それらの値と“Febo”及び“Ada”二つの彗星塵を比較してみよう。“Febo”と“Ada”には ^{15}N 成分に富む組成 ($\delta^{15}\text{N} = 480\text{-}640\text{ ‰}$)があったが、可視光スペクトル (CN) 観測から計算されたヘール・ボップ彗星とリニア彗星の $\delta^{15}\text{N} = 940\text{ ‰}$ ($^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 140 \pm 30$) ほどは大きくなかった [6]。最近観測された同じ木星族のハッセル彗星 ($^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 140 \pm 15$) と比較しても同様の傾向が見られる [7]。この事はヴィルト 2 彗星中の有機物は、観測された他の彗星よりも比較的窒素同位体組成が軽い事を意味しているのかもしれない。一方、ヘール・ボップ彗星の電波観測による HCN サブミリメートルの波長から求められた窒素同位体組成が $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 330 \pm 98$ ($\delta^{15}\text{N} = -180\text{ ‰}$) という非常に ^{15}N 成分に乏しいものであったという報告もある [8]。これが彗星内の不均一な同位体組成分布を反映しているのか、それとも同定される窒素の元となる分子 (HCN と CN) が異なるためなのかはよくわかっていない。しかしながら宇宙塵や起源隕石中の有機物の窒素同位体組成も非常に大きな分布 ($^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 70\text{-}230$, $\delta^{15}\text{N} = 200\text{-}3,000\text{ ‰}$) を持つ事が知られている。この事は、原始惑星系星雲外縁部で有機物が形成される時の起源物質が同位体的に非常に不均一であったためと解釈されている。彗星の観測値と今回の測定値が示す大きな不均一分布もまた起源物質の同位体的な不均質さを反映しているのかもしれない。

5. まとめ

彗星塵の鉱物および有機物中の水素、炭素、窒素、

酸素同位体組成分析から現在までにわかったことを列挙すると以下ようになる。

- (a) 彗星には太陽系前駆物質であるプレソーラー粒子の存在は非常に稀であった。また彗星塵の主要鉱物のエンスタタイトとカンラン石の酸素同位体組成分析結果から、それらは太陽系内で形成された事を示唆している。
- (b) 彗星塵試料中にカルシウムとアルミニウムを主成分とする難揮発性元素からなる鉱物の集合体が存在した。この鉱物組み合わせは起源隕石に特異的に含まれる CAI と一致している。その酸素同位体組成は CAI と同程度だけ ^{16}O 成分にのみ約 4% 程度富んでいた。これらの事は太陽近傍の高温領域で形成された高融点鉱物が、ジェット流により原始太陽系星雲の外縁部まで運ばれるという X ウィンドモデルに基づく物質循環が初期太陽系形成時にあったことを示している。
- (c) 彗星塵の有機物の水素と窒素の同位体比は太陽系平均とは大きく異なったが、その一方で炭素同位体は太陽系平均値であった。この事は有機物の起源物質には重水素に富む星間分子が関与している事と、極低温の星間分子雲内における化学反応がその形成メカニズムとして考えられるという事を示唆している。
- (d) 原始太陽系の熱い中心部において形成された鉱物塵は X ウィンドによりカイパーベルト付近の冷えた領域まで飛ばされ、有機塵と混ざり合い固化した。その場所はヴィルト 2 彗星や他の木星族彗星が最終的に集積した場所と考えられる。

我々の住む太陽系が形成され 46 億年経った。初期の頃の物質化学進化についての情報を持つ物質を手に入れるのは非常に困難であるため、地球の石や隕石、惑星間塵など様々な試料から得られた情報を組み合わせることで徐々に紐解いている。今回のターゲットであったヴィルト 2 彗星、またイトカワなどの小惑星やカイパーベルト天体は、太陽系内で現在わずかに存在

する微惑星や原始惑星である。これら太陽系小天体の物質を直接探査する事で断片的だった情報を繋げられると考えている。2010年にイトカワからサンプルを持ち帰ると期待される探査機「はやぶさ」,そして「はやぶさ2」計画をはじめとして、アメリカ、欧州、中国、インドと次々に宇宙に探査機を送る計画が発表されている。探査機の開発から試料の分析に関わる全ての人々の努力により太陽系の失われた過去の破片が見つかるに違いない。その破片を繋ぎ合わせる事で太陽系形成以来46億年の歴史が描けるようになるだろうと筆者は多いに期待している。

6. 謝辞

NASAのスターダスト探査に携わった全ての人々にこの場をお借りしてお礼を申し上げます。本稿に対して有意義なコメントをいただいた中村智樹准教授(九州大学)に感謝いたします。最後に本稿を執筆する機会を与えて下さいました三河内岳博士(東京大学)にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Brownlee, D. et al., 2006, *Science* 314, 1711.
- [2] Crovisier, J. and Bockelée-Morvan D., 1999, *Space Sci. Rev.* 90, 19.
- [3] Jessberger, E., 1999, *Space Sci. Rev.* 90, 91.
- [4] Anders, E. and Zinner E., 1993, *Meteoritics* 28, 490.
- [5] Nittler, L. et al., 1997, *ApJ.* 483, 475.
- [6] Arpigny, C., et al. 2003, *Science* 301, 1522.
- [7] Hutsemékers, D. et al., 2005, *A&A.* 440, L21.
- [8] Ziurys, L. M. et al., 1999, *ApJ.* 527, L67.
- [9] Balsiger, H. et al., 1995, *JGR.* 100, A4, 5827.
- [10] Eberhardt, P. et al., 1995, *A&A.* 302, 301.
- [11] 中村智樹ほか, 2007, *遊星人* 本号.
- [12] Amelin, Y. et al., 2002, *Science* 297, 1678.
- [13] McKeegan, K. D. et al., 2006, *Science* 314, 1724.
- [14] Shu F.H. et al., 1997, *Science* 277, 1475.
- [15] Itoh, S. and Yurimoto H., 2003, *Nature* 423, 728.
- [16] Matrajt, G. et al., 2007, *MaPS*, Accepted.
- [17] Busemann, H. et al., 2006, *Science* 312, 727.
- [18] Meier, R. et al., 1998, *Science* 279, 842.
- [19] Nakamura-Messenger, K. et al., 2006, *Science* 314, 1439.
- [20] Clayton, R. N. et al., 1973, *Science* 182, 485.