地球化学 **43**, 143-153 (2009) Chikyukagaku (Geochemistry) **43**, 143-153 (2009)

総説

スターダスト探査機により回収された 短周期彗星81P/ビルド2のコンドリュール

中 村 智 樹*·野 口 高 明**·土 山 明***·牛久保 孝 行****

木 多 紀 子****・ジョン・バレー****・マイケル・ゾレンスキー*****

嘉数勇基*·坂本 佳奈子*·增尾 悦子***
上杉 健太朗******・中野 司******

(2009年3月3日受付, 2009年5月12日受理)

Chondrules in short-period comet 81P/Wild 2 recovered by the Stardust mission

Tomoki Nakamura^{*}, Takaaki Noguchi^{**}, Akira Tsuchiyama^{***}, Takayuki Ushikubo^{****}, Noriko T. Kita^{****}, John W. Valley^{****}, Michael E. Zolensky^{*****}, Yuki Kakazu^{*}, Kanako Sakamoto^{*}, Etsuko Mashio^{***}, Kentaro Uesugi^{******} and Tsukasa Nakano^{*******}

* Department of Earth and Planetary Science, Faculty of Science, Kyushu University, Hakozaki, Fukuoka 812-8581, Japan

* *	The College of Science, Ibaraki University,
	2-1-1 Bunkyo, Mito 310-8512, Japan
* * *	Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science,
	Osaka University, Toyonaka 560-0043, Japan
* * * *	Department of Geology and Geophysics, University of Wisconsin-Madison,
	Madison, WI 53706-1692, USA
* * * * *	KT NASA Johnson Space Center, Houston, TX 77058, USA
* * * * * *	Japan Synchrotron Radiation Research Institute,
	SPring-8, Sayo, Hyogo 679-5198, Japan
* * * * * * *	Geological Survey of Japan, Advanced Industrial Science and Technology,
	Tsukuba 305-8567, Japan

Many small rock particles have been successfully recovered from a short-period comet 81P/ Wild 2 by the Stardust mission. They are believed to be very primitive dust at outer regions of the protoplanetary disk, because short-period comets originally formed as Kuiper-belt objects that currently locate at 30-50 AU from the Sun. Chondrules are sub-millimeter to millimeter

*	九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門	* * * * * *	財団法人高輝度光科学研究センター		
	〒812-8581 福岡市箱崎6-10-1		$\mp 679 - 5148$	兵庫県佐用郡佐用	町光都1-1-1
* *	茨城大学理学部理学科	* * * * * * *	* 独立行政法/	產業技術総合研究	所地質情報
	〒310-8512 水戸市文京2-1-1		研究部門		
* * *	大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科専攻		₹305-8567	つくば市東1-1-1	中央第7
	〒560-0043 豊中市待兼山町1-1				
* * * *	Department of Geology and Geophysics,				
	University of Wisconsin-Madison				

***** KT, NASA Johnson Space Center

size objects formed in the inner protoplanetary disk by total or partial melting of silicate-rich dust particles. They are a major constituent of chondrites from asteroids. Among the particles from the comet Wild 2, we found pieces of chondrules that show igneous texture and have mineral compositions and major and most minor element concentrations very similar to chondrules in primitive meteorites derived from asteroids. Oxygen isotope ratios are highly heterogeneous from -50 to +5% in $\delta^{18}O_{\text{SMOW}}$ and plotted nearly along the slope = 1 mass independent fractionation line in the oxygen three isotope diagram, which characterizes chondrules in carbonaceous chondrites that comprise middle to outer asteroid belt. These observations suggest that the particles are pieces of chondrules formed through the least degree of melting, crystallization, and elemental and isotopic equilibration at high temperatures. The presence of chondrules in a short-period comet from the Kuiper belt indicates that chondrules migrated from hot inner regions to cold outer regions of the disk and spread widely over the early solar nebula.

Key words: Stardust, 81P/Wild 2 comet, Chondrule, Synchroton radiation, Oxygen isotope ratio

1.序 章

1.1 スターダスト計画による彗星試料回収

1999年にフロリダからデルタロケットで打ち上げ られたスターダスト探査機は、2004年1月に短周期彗 星81P/ビルド2に約200 km のところにせまり,彗星 から飛来する微小な塵を超低密度物質エアロジェルに 打ち込ませ回収することに成功した。エアロジェルは 空気の約3倍程度の超低密度で純粋なシリカでできて おり,探査機に向かって秒速6kmで近づく塵を確実 に捕獲するために開発された。塵を載せた探査機は 2006年1月に地球に近づき、エアロジェルが格納され たカプセルが米国ユタ州に投下され回収された。その 直後から初期分析が行われ、数ヵ月後のヒューストン での月惑星科学会議にて最初の報告がなされ、約10ヵ 月後に初期分析の成果がプロジェクトリーダーのブラ ウンリー博士の企画によりサイエンス誌に特集号とし て出版された(Brownlee et al., 2006: Zolensky et al., 2006など)。その後は詳細分析の期間に入り、各研究 グループはさまざまな成果を挙げている。

短周期彗星は太陽系外縁部の低温領域カイパーベル トで形成された天体で,始原的なケイ酸塩物質に加え て氷や有機物を含み,太陽系の起源物質としての特徴 を残していると考えられている。小惑星(始原的隕石 母天体)が太陽系の内側(3~5 AU)の原始惑星系円 盤の進化過程を記録している物質であるの対し,カイ パーベルト天体は外縁部(30~50 AU)の円盤の進化 過程を記録している。したがって,原始惑星系円盤全 域の固体物質や小天体の形成進化を理解するには,隕 石研究と同時に外縁天体起源が明らかな始原物質の研 究を推し進める必要がある。地球の高層大気で回収さ れた無水惑星間塵は,小惑星起源の始原隕石と異なる さまざまな物質科学的特徴を示すため,太陽系の外縁 天体である彗星起源でないかと考えられてきた。しか しながら,無水惑星間塵が本当に彗星から飛来したこ とを示す決定的な証拠は,実際に彗星の塵を回収しな ければ得られないことは明らかであった。したがっ て,スターダスト探査機が回収した本物の彗星塵が, 無水惑星間塵のような物質であるかどうか,初期分析 の成果に関心が高まった。

1.2 初期分析から現在に至るまでの成果

人類が初めて手にした彗星塵サンプルからは,予想 された始原的な物質だけでなく,予想外の成果も得ら れた。彗星塵の化学組成は CI コンドライトに近いこ と(Flynn et al., 2006; Stephan et al., 2008a, 2008b; Leitner et al., 2008),結晶質の物質が多く含まれ, 主要な鉱物はオリビンとパイロキシンであり,それら の鉄マグネシウム比は非常に広い範囲にわたること

(Zolensky et al., 2008a; Tomeoka et al., 2008),赤 色巨星起源と考えられる δ^{17} Oの大きな過剰を示 すプレソーラーケイ酸塩粒子が存在すること (Stadermann et al., 2008),同様に赤色巨星起源と 考えられるSiとCの同位体異常を示すプレソーラー SiCが存在すること(Messenger et al., 2009),高温 凝縮物であるCaとAlに富む難揮発性包有物(CAI) が含まれ、その酸素同位体比は大きな負の異常をしめ すこと(Zolensky et al., 2006; McKeegan et al., 2006),そのCAI内部にTiNの微結晶が包有物とし て存在しTi³⁺/Ti⁴⁺比が高いことから太陽近傍の低 い酸素分圧下で形成された可能性があること (Brownlee et al., 2008),有機分子は直鎖状のもの が芳香族に比べて卓越していること (Cody et al., 2008),メチラミンやエチラミンといったアミノ酸が 検出され、それらは氷粒子表面でアンモニアとメタン /エタンから合成された可能性があること (Glavin et al., 2008),サブミクロン粒子が集合した細粒物質は エアロジェル突入時にほとんどが溶融してしまったが (Rietmeijer et al., 2008),一部が溶けずに残ってお り,溶け残りの部分には炭素質物質が濃集した領域が あり高いる¹⁵N を示すこと (Matrajt et al., 2008),な どが特筆する成果として挙げられる。

彗星は水や一酸化炭素などの氷とケイ酸塩物質が共 存している。彗星からは氷も岩石微粒子とともに放出 されているが、氷はエアロジェルに突入するまでの飛 行中や突入時の加熱で蒸発してしまったと考えられ る。彗星中で氷と鉱物が反応し、含水鉱物や炭酸塩鉱 物が形成された可能性があるが、現在までのところそ れらの二次鉱物が存在する明確な証拠は得られていな い。含水鉱物が存在していないという点で、彗星の構 成物質は上述した無水惑星間塵と強い共通点がある。 スターダスト計画の試料回収に先行して、ディープイ ンパクト計画ではテンペル1彗星に銅製のインパク ターを衝突させ、舞い上がった彗星の塵を衛星や地上 から観測した。その結果、太陽光が当たっている表面 の温度は約60°Cまで上昇しているという報告 (Sugita et al., 2005) や, インパクターの衝突で生 じた彗星の塵の赤外分光分析により、含水鉱物(スメ クタイト)がある可能性も指摘された(Lisse et al., 2007)。この結果はスターダスト回収粒子から含水鉱 物が見つからないことと矛盾する。これは彗星内部で の水質変質の程度は彗星ごとに異なるか、またはス ターダスト回収粒子はエアロジェルへの突入時の加熱 で含水鉱物が脱水分解してしまった可能性が考えられ る。しかしながら、後者については、含水鉱物を人工 的にエアロジェルに打ち込んだ模擬実験により、突入 時での加熱では含水鉱物は脱水分解しないことが示さ れている (Noguchi et al., 2006)。 突入時の加熱温度 は、突入する物質を構成する粒子サイズと空隙率とに 相関があり(Hörz et al., 2006), 高空隙率で微小粒子 の集合体である塵は突入時に高温に加熱され完全溶融 してしまうため、もともと含水鉱物を含んでいたかど うかわからない。しかしながら、低空隙率でかつ粗粒

な試料は溶融しておらず,それらの試料に含まれるケ イ酸塩ガラス部分が含水鉱物化していないことがわ かった(Nakamura et al., 2008a)。ケイ酸塩ガラス 部分は水質変質に非常に弱いことが知られている (Rubin et al., 2007)ので,ビルド2彗星中における 水質変成の程度は低く含水鉱物は存在しないか,また は非常に低い存在度であると考えられる。

2. 彗星の塵のハンドリングと分析手法

我々は日米欧の研究者で組織された国際チームの一 員として初期分析に参加し, 高エネルギー加速器研究 機構や SPring-8の放射光を利用した非破壊分析を行 い、彗星塵の構成鉱物や内部三次元構造を特定した (Nakamura et al., 2008b; Rietmeijer et al., 2008; Tsuchiyama et al., 2009)。彗星の塵は中村智樹が米 国テキサス州にあるジョンソンスペースセンターを訪 問し, 直接エアロジェルから塵を取り出して日本に持 ち帰るか、またはジョンソンスペースセンターの中村 圭子博士が取り出した塵を日本へ配送してもらうかの どちらかである。中村圭子博士は塵をエアロジェルか ら取り出し, 塵を分析可能な状態に前処理して各国の 研究者に送付する仕事を一手に請け負っており、研究 者としての寄与に加えスターダストの物質科学的研究 に欠かせない重要な役割を果たしている(Zolensky et *al.*, 2008b).

初期分析が終了し2007年度から国際公募研究の期 間に入り、現在我々はFig.1に示す多段階分析を行 い、個々の彗星塵の物質科学的特徴を把握し、その形 成起源を調べている。我々の分析法の特徴は、第一段 階で放射光による分析を行い, 非破壊でその特徴を把 握し、下流の詳細分析を行うかどうかの「優先順位」 を確定できることにある。多段階分析を構成する実験 法のうち,放射光X線回折(担当:中村ほか)と放 射光マイクロトモグラフィー(担当:土山ほか)は, それぞれの担当が約10年の期間をかけて超微小物質 (「スターダスト」や「はやぶさ」 試料など) 分析に 対応できるよう進化させてきた分析法である。また, ウィスコンシン大の二次イオン質量分析計 (SIMS) を用いた酸素同位体分析は、本研究のために極微小領 域分析法(担当:牛久保,木多ほか)を開発し,2ミ クロン程度の領域を1‰(2SD)の精度で測定するこ とが可能になった。Fig. 1に示す分析手法で,現在ま でに約60試料の塵を分析した。



Fig. 1 A schematic illustration showing the flow of analysis and sample processing. The sample is first analyzed by synchrotron radiation non-destructively and then by electron microscopes and finally by secondary-ion massspectrometer (SIMS).

3. 彗星コンドリュールの物質科学的特徴 と形成過程

コンドリュールはコンドライト隕石に特徴的に含ま れる(最大80 vol.%),直径約1 mm 以下のケイ酸塩 液滴の急冷物質であると考えられる (Brearley and Jones, 1998)。コンドリュールが小惑星起源のコンド ライト隕石に多産するという事実は、原始惑星系円盤 の内側領域でケイ酸塩物質を溶融させるような高温過 程が頻発していたことを示す。我々は分析したビルド 2彗星の塵60試料に、コンドリュールの一部と考えら れる塵を6試料発見した。それらのうち4試料につい てはすでに報告済み (Nakamura et al., 2008a) であ り,残り2試料については現在詳細分析を実行中であ る。本稿では報告済みの4試料について、そのうち特 に比較的大きな試料である2試料について、未公表の データを含めて詳細に解説する。Fig.2に一例を 示す。大きさ約20ミクロンのこの試料(Torajiro: C2054, 0, 36, 6, 0) は部分溶融を経て形成されたコン ドリュールに典型的に見られる斑状(ポーフィリ ティック) 組織を示し (Fig. 2(A), (B)), 構成鉱物 組み合わせもコンドリュールと同様で、Fe/Mg比が ほぼ均質なオリビン (Fo⁸⁰),不均質なパイロキシン (En⁸⁶Wo³~En⁷⁹Wo⁵),鉄ニッケル金属,クロムスピ ネル (Cr/Al=0.82),およびSiとAlに富むガラスで ある (Fig. 2(B))。その火成岩的な組織,構成鉱物組



Fig. 2 (A) A computed tomography (CT) image of Torajiro showing non-porous mineral assemblage with various contrast. (B) A backscattered electron (BSE) image taken by a field-emission scanning electron microscope (FE-SEM). Torajiro exhibits porphyritic texture consisting of olivine, low-Ca pyroxene, Cr spinel, Fe-Ni metal and glass. Elemental compositions of the olivine and pyroxene are shown in Fig. 7 (A) and (B), respectively, and that of the glass is shown in Fig. 6 (C). A BSE image showing spots analyzedwith SIMS.

み合わせとその化学組成から、この試料は比較的鉄に 富むタイプ2のポーフィリティック・オリビンパイロ キシン・コンドリュール(type II POP)であると考 えられる。直径約2ミクロンのCsビームを用いた酸 素同位体比測定(Fig. 2(C))の結果、オリビンとパ イロキシンの同位体比は酸素3同位体図中で傾き約1 のCCAM ラインに沿って分布し、結晶粒子間に同位 体比の不均質があることがわかった(Fig. 3)。以上 の結果より、この試料はさまざまな元素組成、酸素同 位体組成の微粒子から構成される前駆物質が、ソリダ



Fig. 3 Oxygen three isotope plot of Torajiro, Gozen -sama and Gen-chan. Some of ¹⁶O-rich data from Gozen-sama are plotted outside of the diagram. Compositional regions of chondrules from various chondrite groups (carbonaceous: C, ordinary: O, Rumuruti: R, and enstatite: E) are also shown for comparison. TF: terrestrial fractionation line; CCAM: carbonaceous chondrite anhydrous mineral line; Y&R: Young and Russell line (Young and Russell, 1988).

ス温度(約1450°C)以上に加熱され,部分溶融して できたことが判明した。

さらにもうひとつの試料(Gozen-sama: C2081, 1, 108, 1, 0: Fig. 4)は全長1 cm を越す長い衝突痕の終 端粒子で,直径40ミクロンを越す分析した試料中最 大の試料である。典型的なポイキリテックな組織を示 し,低 Ca パイロキシンの中に丸い形状のオリビン2 つが含まれている(Fig. 4)。オリビン2つ(Ol-A と Ol-B)はどちらも Fo⁵⁵で,Mn,Ca,Crの含有量を 含めほぼ均一な化学組成を示す。また低 Ca パイロキ シンはオリビンとほぼ同一の Fe/Mg 比を示す(En⁵⁵ Wo¹)。CT 測定によりこの試料は球形の鉄ニッケル金 属包有物(直径数ミクロン程度)を複数含んでいるこ とがわかった。このことは、この試料の形成時に鉄 ニッケル金属が溶融する温度まで加熱されたことを示 す。酸素同位体比分析の結果,Torajiroをはるかに超 える大きな酸素同位体異常が確認され、なかでもOl-



Fig. 4 A BSE image of Gozen-sama consisting of two rounded olivine grains (olivine-A and olivine-B) and low-Ca pyroxene. The low-Ca pyroxene poikilitically encloses the olivine grains.

A と OI-B は大きく異なる同位体比を示した。OI-A は 中心が δ^{18} O = -50%の大きな負の異常をしめし,結 晶外縁部に向けて異常が小さくなるゾーニングを示し た。一方,OI-B の中心領域は δ^{18} O = +5%でほぼ均一 な値を示し (Fig. 3),OI-A との同位体比の差は55‰ に及ぶ。低 Ca パイロキシンの同位体比は δ^{18} O = +2‰で均一であった (Fig. 3)。オリビンとパイロキシ ン間で Fe/Mg 比がほぼ同一なのに対し,酸素同位体 比が異なるということは,Gozen-sama 形成時の加熱 で Fe-Mg に関しては平衡に近い状態になったが,酸 素同位体は非平衡なままであったことを示唆する。

以上の観察分析結果に基づいて,Gozen-sama 試料 の形成過程を定量的に考察した(Fig.5)。前駆物質 はOl-A(δ¹⁸O = -50‰),Ol-B(δ¹⁸O = +5‰),金 属鉄,平均組成が低Caパイロキシンであるケイ酸塩 物質であったと考えられる。この前駆物質の組み合わ せはGozen-sama が形成時に現在の大きさであった ことを仮定している。後述するように,形成時には現 在よりも大きく,かつ他の相(たとえば高Caパイロ キシンなど)を含んでいた可能性がある。その場合, 前駆物質の種類が増える可能性があるが,これから述 べる加熱温度や高温継続時間の議論に大きな影響はな い。前駆物質は加熱時に,金属鉄(カマサイト)と低 Caパイロキシンが溶融するが,オリビンが溶融しな い温度まで昇温し,ケイ酸塩メルトと鉄ニッケルメル トが不混和の状態であったと考えられる(Fig.5)。

147



Fig. 5 A schematic illustration showing formation process of Gozen-sama.

1700°C程度であればこの条件を満たす。溶融した Gozen-samaの周囲の星雲ガス中に酸素が存在すれ ば、ケイ酸塩メルトと星雲ガス間で酸素同位体交換が 起こったはずである。しかしながら、メルト中に金属 鉄が酸化されずに残っているので, Gozen-sama 周囲 のガスの酸素分圧は非常に低かったことが推定され る。一方, Gozen-sama 内部では、ケイ酸塩メルトと 溶け残りオリビンの間で同位体交換が起こった。この 同位体交換により、オリビンと周りのパイロキシンメ ルト間で Fe/Mg 比が均一化し、オリビンに酸素同位 体比のゾーニングが形成された。CT 分析より Ol-A は半径が4ミクロンのほぼ球状な結晶であることがわ かった。1700°Cで加熱された状態で、半径4ミクロ ンのOl-A内部のFe/Mg比が均一化し,酸素同位体 比が均一化しない高温持続時間を計算した。オリビン の Fe-Mg 相互拡散係数 (Dohmen and Chakrabort, 2007) は酸素の自己拡散係数 (Gérard and Jaoul, 1989) よりはるかに大きい。計算の結果, 4×10²秒 以上4×10⁵秒以下の加熱であれば、観察事実を説明で きることがわかった。X線回折分析より低 Caパイロ キシンは単斜晶系であることがわかった。このこと は、1000°C 以下のサブソリダスの温度領域で、Gozen -sama 試料は比較的急速に冷却されたことを意味す る。固体中の拡散速度は温度に大きく依存するので、 現在の Gozen-sama 試料の元素および同位体の分布 は,最高温度付近で急速に進行した拡散状態を保存し ていると考えられる。

上述した Ol-A 内部の Fe, Mg, O の拡散は, Ol-A が1700°C において現在と同じ半径(4ミクロン)で あったことを仮定している。しかしながら, 1700°C において Ol-A は現在よりも小さく冷却過程で半径4 ミクロンまで成長した可能性がある。この場合, 1700 °C の加熱時に溶け残った部分は酸素の組成ゾーニン グを示すが、新たに成長した部分は、高温溶液中で酸 素同位体比は均質化するので、ある界面を境に急激に まわりの低 Ca パイロキシンと同じ酸素同位体比を示 すはずである(例えば Yurimoto *et al.*, 1998)。結論 から述べると、Ol-A が1700°C において現在と同じ半 径であったかどうか、現在のデータでは判別つかな い。Ol-A の中心部が δ^{18} O = -50%であり、外縁部は δ^{18} O = +5%に近い値を示すのは判明しているが、現 在の研磨面において Ol-A は直径5ミクロン程度しか 残っておらず(Fig. 4)、直径約2ミクロンの Cs⁺ビー ムで詳細な Ol-A 内部の酸素同位体比分布を調べるの は困難だからである。

- 4. 彗星コンドリュールと小惑星(コンドラ イト隕石)コンドリュールの比較
- 4.1 彗星コンドリュールと小惑星(コンドライト 隕石)コンドリュールの比較

現在までに彗星コンドリュール6試料すべてに対す る放射光分析(X線回折とCT分析),6試料の研磨片 の電子顕微鏡観察,3試料の酸素同位体分析が終了し ている。小惑星起源コンドライト隕石のコンドリュー ル分類法を彗星のコンドリュールに適用すると、6試 料の内訳は, 鉄に乏しい type-I POP が4試料, type-I PP (ポーフィリティックパイロキシン) が1試料, type-II POP が1試料であった。個々の試料は直径15 ~40ミクロン程度で非常に小さく、コンドリュール として形成された際は現在よりも大きかった可能性は 高い。つまり、PPと分類された試料が形成されたと きは POP であったかもしれない。6試料のうち4試料 は Gozen-sama 試料が発見された大きな衝突痕から 発見された。内訳は type-I POP が3試料, type-I PP が1試料であり、4試料すべてに低 Ca パイロキシンが 含まれる。このパイロキシンの Fe/Mg 比は4試料でほ ぼ均一である。Gozen-sama 試料の説明で触れたよう に、低 Ca パイロキシンはコンドリュール形成時に溶 融した部分であり、元素組成は均一化する。したがっ て、同一衝突痕から発見された4試料の低 Ca パイロ キシンの組成が類似しているということは、これらの 試料は元はひとつのコンドリュールとして形成され彗 星に取り込まれ、その後彗星から放出されエアロジェ ルに捕獲された際に分裂したのかもしれない。

彗星コンドリュール (Torajiro, Gozen-sama, Genchan: C2081, 1, 108, 7, 0の3試料)の酸素同位体比は

同一試料内部の結晶粒子間の不均質が顕著であり, CCAM 線上に沿ってδ¹⁸O で-50から+5‰まで広く 分布する (Fig. 3)。しかし, 地球型分別直線 (TF ライ ン)を超えることはなく, TF ラインからのずれを示 $t\Delta^{17}O(=[\delta^{17}O] - (0.52 \times [\delta^{18}O])) は常にマイナス$ である。この酸素同位体比の分布は、炭素質コンドラ イトのコンドリュールの酸素同位体比の範囲と完全に 重なる (Fig. 3)。したがって, 彗星コンドリュール は小惑星帯内側に存在するエンスタタイトコンドライ ト (E型小惑星) のコンドリュール (δ¹⁷O~0) や普通 コンドライト (S型小惑星) のコンドリュール (δ¹⁷O >0)とは異なり、小惑星帯中央から外側部分に多く 存在する炭素質コンドライト(CやD型小惑星)の コンドリュールと密接な成因関係があることがわかっ た。現在,新たに2試料の彗星コンドリュールの酸素 同位体比を測定しているが、それらの結果も炭素質コ ンドライトのコンドリュールに近いものであった。

以上の分析結果より,彗星のコンドリュールは炭素 質コンドライトのコンドリュールと以下の点で類似し ている。(1)部分溶融で形成されたことを示すポー フィリテックまたはポイキリテックな組織を示すこ と,(2)主要鉱物は Mg に富むオリビンや低 Ca パイ ロキシン(主に単斜晶系)であること,(3)微量成分



Fig. 6 Composition of mesostasis glass in Torajiro, Lilly (C2054, 0, 35, 4), and Gen-chan. Compositional field of mesostasis in chondrules in chondrites (Brearley and Jones, 1998) are also shown.

として金属鉄、ガラス、高Caパイロキシン、斜長 石,クロムスピネルなどを含むこと,(4)メソスタ シスを構成するガラスはCa, Al, Siに富むこと (Fig. 6), (5)オリビンとパイロキシンの酸素同位体 比が傾き1のラインに沿って分布し、Δ¹⁷Oがマイナス であること。一方,彗星コンドリュールの以下の特徴 は、平均的な小惑星コンドリュールと異なる。(1)構 成鉱物が細粒(主に1~3ミクロン程度,最大10ミク ロン程度) であること、(2)オリビンとパイロキシン にMnやCrに富むものがあること(Fig.7(A), (B)), (3)酸素同位体組成がミクロンスケールで非常 に不均一なこと。これら3つの特徴は、複数回の溶融 を経たと考えられる平均的な小惑星のコンドリュール と異なり,彗星のコンドリュールは形成時の加熱の影 響が少なく、前駆物質の特性をより残した溶融回数の 少ない「第一世代」のコンドリュールである可能性が 高いことを示す。

4.2 彗星コンドリュールの形成と輸送過程

彗星にコンドリュールが存在するという事実は,太 陽系形成論やコンドリュールの起源に対して大きな制 約を与える。前駆物質を衝撃波により加熱し、コンド リュールを形成する「衝撃波」モデル (Iida et al., 2001など)では、加速されたガス分子(主に水素) が衝突することにより前駆物質が昇温する。しかしな がら,一般的な原始惑星円盤モデルでは,カイパーベ ルト領域のガス密度は極めて希薄で、かつ発生する衝 撃波速度も低い。Iida らの計算によると、半径0.1 mm のオリビン微粒子を融点以上に加熱できるのは、小惑 星帯より太陽に近い領域のみであり、太陽から遠く離 れたカイパーベルト領域ではほとんど温度が上がらな い (Iida et al., 2001)。衝撃波によらずとも,非常に 希薄なガスと塵の空間で、塵を融点(約1500°C)以 上に加熱する熱源は考えにくい。以上の考察より、コ ンドリュールをカイパーベルト領域で作るのは、ほと んど不可能であると考えられる。したがって、彗星コ ンドリュールは小惑星コンドリュール同様、原始惑星 系円盤の太陽に近い内側領域で形成され、その後に何 らかのメカニズムで円盤外縁部まで輸送されてきた可 能性が高い。

コンドリュールを円盤内側領域から外側領域に輸送 するモデルは、すでにいくつか提案されている。円盤 中心の原始太陽近傍に存在した高密度の電磁波で前駆 物質を加熱溶融しコンドリュールを形成し、その後プ



Fig. 7 MnO and Cr_2O_3 concentrations in olivine (A) and in pyroxenes (B) in Torajiro, Lilly (C2054, 0, 35, 4), and Gen-chan. Compositional field of olivine and pyroxene in chondrules in various types of chondrites (Brearley and Jones, 1998) are also shown.

ラズマの流れに沿ってコンドリュールを円盤の中心か ら外に運ぶ「Xウインド」モデル(Shu et al., 1997な ど)では、彗星コンドリュールが小惑星帯外部のC 型やD型小惑星(炭素質コンドライト)のコンド リュールにのみ類似し、小惑星帯内部のS型やE型 小惑星(その他のコンドライト)のコンドリュールと 異なるという事実をうまく説明できない。また、原始 惑星系円盤の赤道面内の乱流により、微小粒子を内側 から外側に運ぶ「アウトフロウモデル」(Ciesla, 2007など)においても、同様に彗星コンドリュール が炭素質コンドライトのコンドリュールのみに類似す るという点を説明できない。「X ウインド」も「アウ トフロウモデル」も、コンドリュールの酸素同位体比 に関係なく、サイズが小さいコンドリュールがより外 側に運ばれるメカニズムだからである。そもそもこれ ら2つのモデルでは、小惑星のコンドリュールの酸素 同位体比がコンドライトのタイプごとに異なる事実 (Clayton, 1993)や、それぞれのタイプのコンドラ イト隕石において、コンドリュールとマトリックス間 で化学組成が相補的な関係になっている(つまりコン ドリュールとマトリックスは同じ領域で形成された; Bland *et al.*, 2005; Hezel and Palme, 2008など)こと を説明することが困難である。本研究で我々が発見した「彗星にもコンドリュールが存在する」という事実は,現存する太陽系形成モデルに本質的な修正を求めるものである。今後,内惑星領域からカイパーベルト領域にコンドリュールが普遍的に存在することを説明できる,新しい理論の構築が待たれる。

5. 今後の展望

彗星コンドリュールのさまざまな物質科学的特性に ついて確定的な結論を得るには、コンドリュールを数 十個発見する必要があると考えている。我々のグルー プだけでなく、日欧米のほかの研究グループも今後発 見していくと考えられる。短寿命核種を用いた年代決 定により、彗星コンドリュールがいつできたのか、そ の時期は小惑星コンドリュールの形成年代範囲に入る のかどうか、さらに、年代、酸素同位体比、結晶の元 素分布などから、彗星コンドリュールが本当に「第一 世代」のコンドリュールであるかどうか、これらの点 を突き詰めていくことが、太陽系形成過程を原始惑星 系円盤全域のスケールで考えていく上で肝要であると 考えている。

謝辞

第一著者である中村は2000年に日本地球化学会奨 励賞をいただきました。それから長い時間が経ちまし たが、本稿はそのときの受賞記念論文のつもりでまと めました。本稿を作成する機会を与えて下さった圦本 尚義教授に深く感謝します。また、丁寧な査読をして いただいた永島一秀博士と国広卓也博士に感謝しま す。

引用文献

- Bland P. A., Alard O., Benedix G. K., Kearsley A. T., Menzies O. N., Watt L. E. and Rogers N. W. (2005) Volatile fractionation in the early solar system and chondrule-matrix complementarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102, 13755–13760.
- Brearley A. J. and Jones R. H. (1998) Chondritic meteorites. In: *Planetary Materials* (eds. J. J. Papike), pp. 3-1~3-398, Mineralogical Society of America.
- Brownlee D. E., Tsou P., Aleon J., Alexander C. M. O'D. and 181 additional authors (2006) Comet

81P/Wild 2 under a microscope. *Science* **314**, 1711–1716.

- Brownlee D. E., Joswiak D. J., Matrajt G., Bradley J. P., Ebel D. S. (2008) Ultra-Refractory attogram inclusions in comet dust - first condensates? *Lunar and Planetary Science Conference* 39, Abstract, #1878.
- Ciesla F. J. (2007) Outward transport of hightemperature materials around the midplane of the solar nebula. *Science* **318**, 613–615.
- Clayton R. N. (1993) Oxygen isotopes in meteorites. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 21, 114–149.
- Cody G. D., Ade H., Alexander C. M. O'D., Araki T., Butterworth A., Fleckenstein H., Flynn G., Gilles M. K., Jacobsen C., Kilcoyne A. L. D., Messenger K., Sandford S. A., Tyliszczak T., Westphal A. J., Wirick S. and Yabuta H. (2008) Quantitative organic and light-element analysis of comet 81P/Wild 2 particles using C-, N-, and O-μ-XANES. Meteoritics and Planetary Science 43, 353–365.
- Dohmen R. and Chakraborty S. (2007) Fe-Mg diffusion in olivine II: point defect chemistry, change of diffusion mechanisms and a model for calculation of diffusion coefficients in natural olivine. *Physics and Chemistry of Minerals* **34**, 409–430.
- Flynn G. J. et al. (2006) Elemental compositions of comet 81P/Wild 2 samples collected by Stardust. Science 314, 1731–1735.
- Gérard O. and Jaoul O. (1989) Oxygen diffusion in San Carlos olivine. Journal of Geophysical Research 94, 4119–4128.
- Glavin D. P., Dworkin J. P. and Sandford S. A. (2008) Detection of cometary amines in samples returned by Stardust. *Meteoritics and Planetary Science* 43, 399–413.
- Hörz *et al.* (2006) Impact features on Stardust: Implications for comet 81P/Wild 2 dust. *Science* **314**, 1716–1719.
- Hezel D. C. and Palme, H. (2008) Constraints for chondrule formation from Ca-Al distribution in carbonaceous chondrites. *Earth and Planetary Science Letters* 265, 716–725.

- Iida A., Nakamoto T., Susa H. and Nakagawa Y. (2001) A Shock heating model for chondrule formation in a protoplanetary disk. *Icarus* 153, 430–450.
- Leitner J., Stephan T., Kearsley A. T., Horz F., Flynn G. J. and Sandford S. A. (2008) TOF-SIMS analysis of crater residues from Wild 2 cometary particles on Stardust aluminum foil. *Meteoritics and Planetary Science* 43, 187–213.
- Lisse C. M., VanCleve J., Adams A. C., A'Hearn M. F., Fernández Y. R., Farnham T. L., Armus L., Grillmair C. J., Ingalls J., Belton M. J. S., Groussin O., McFadden L. A., Meech K. J., Schultz P. H., Clark B. C., Feaga L. M. and Sunshine J. M. (2007) Spitzer Spectral Observations of the Deep Impact Ejecta. *Science* **313**, 635–637.
- Matrajt G., Ito M., Wirick S., Messenger S., Brownlee D. E., Joswiak D., Flynn G., Sandford S., Snead C. and Westphal A. (2008) Carbon investigation of two Stardust particles: A TEM, Nano SIMS, and XANES study. *Meteoritics and Planetary Science* 43, 315–334.
- McKeegan K. D., Aleon J., Bradley J., Brownlee D., Busemann H., Butterworth A., Chaussidon M., Fallon S., Floss C., Gilmour J., Gounelle M., Graham G., Guan Y., Heck P. R., Hoppe P., Hutcheon I. D., Huth J., Ishii H., Ito M., Jacobsen S. B., Kearsley A., Leshin L. A., Liu, M., Lyon I., Marhas K., Marty B., Matrajt G., Meibom A., Messenger S., Mostefaoui S., Mukhopadhyay S., Nakamura-Messenger K., Nittler L., Palma R., Pepin R. Ο., Papanastassiou A. P., Robert F., Schlutter D., Snead C. J., Stadermann F. J., StroudR., Tsou P., Westphal A., Young E. D., Ziegler K., Zimmermann L. and Zinner E. (2006) Isotopic compositions of cometary matter returned by Stardust. Science 314, 1724-1728.
- Messenger S., Joswiak D., Ito M., Matrajt G. and Brownlee D. E. (2009) discovery of presolar SiC from comet Wild-2. Lunar and Planetary Science Conference 40, #1790.
- Nakamura T., Noguchi T., Tsuchiyama A.,

Ushikubo T., Kita N. T., Valley J. W., Zolensky M. E., Kakazu Y., Sakamoto K., Mashio E., Uesugi K. and Nakano T. (2008a) Chondrule like Objects in Short-Period Comet 81P/Wild 2. *Science* **321**, 1664–1667.

- Nakamura T., Tsuchiyama A., Akaki T., Uesugi K., Nakano T., Takeuchi A., Suzuki Y. and Noguchi T. (2008b) Bulk mineralogy and three dimensional structures of individual Stardust particles deduced from synchrotron X-ray diffraction and microtomography analysis. *Meteoritics and Planetary Sciences* 43, 247–259.
- Noguchi T., Nakamura T., Okudaira K., Yano H., Sugita S. and Burchell M. J. (2006) Thermal alteration of hydrous minerals during hypervelocity capture to silica aerogel at the flyby speed of Stardust. *Meteoritics and Planetary Sciences* 42, 357–372.
- Rietmeijer F. J. M., Nakamura T., Tsuchiyama A., Uesugi K. and Nakano T. (2008) Origin and formation of iron-silicide phases in the aerogel of the STARDUST mission. *Meteoritics and Planetary Sciences* 43, 121–134.
- Rubin A. E., Trigo-Rodriguez J. M., Huber H. and Wasson J. T. (2007) Progressive aqueous alteration of CM carbonaceous chondrites. *Geochimca Cosmochimca et Acta* **71**, 2361–2382.
- Shu F. H, Shang H., Glassgold A. E. and Lee T. (1997) X-rays and fluctuating X-winds from protostars. *Science* 277, 1475–1479.
- Stadermann F. J., Hoppe P., Floss C., Heck P. R., Horz F., Huth J., Kearsley A. T., Leitner J., Marhas K. K., Mckeegan K. D. and Stephan T. (2008) Stardust in Stardust? The C, N, and O isotopic compositions of Wild 2 cometary matter in Alfoil impacts. *Meteoritics and Planetary Sci*ence 43, 299–313.
- Stephan T., Rost D., Vicenzi E. P., Bullock E. S., Macpherson G. J., Westphal A. J., Snead C. J., Flynn G. J., SandfordS. A. and Zolensky M. E. (2008a) TOF-SIMS analysis of cometary matter in Stardust aerogel tracks. *Meteoritics and Planetary Science* 43, 233–246.
- Stephan T., Flynn G. J., Sandford S. A. and

Zolensky M. E. (2008b) TOF-SIMS analysis of cometary particles extracted from Stardust aerogel. *Meteoritics and Planetary Science* **43**, 285–298.

- Sugita S., Ootsubo T., Kadono T., Honda M., Sako S., Miyata T., Sakon I., Yamashita T., Kawakita H., Fujiwara H., Fujiyoshi T., Takato N., Fuse T., Watanabe J., Furusho R., Hasegawa S., Kasuga T., Sekiguchi T., Kinoshita D., Meech K. J., Wooden D. H., Ip W. H. and A'Hearn M. F. (2005) Subaru Telescope Observations of Deep Impact. Science 310, 274–277.
- Tsuchiyama A., Nakamura T., Okazaki T., Uesugi K., Nakano T., Sakamoto K., Akaki T., Iida Y., Jogo K. and Suzuki Y. (2009) Threedimensional structures and elemental distributions of Stardust impact tracks using synchrotron microtomography and x-ray fluorescent analysis. *Meteoritics and Planetary Sciences*, submitted.
- Tomeoka K., Tomioka N. and Ohnishi I. (2008) Silicate minerals and Si-O glass in comet Wild 2 samples: Transmission electron microscopy. *Meteoritics and Planetary Science* 43, 273–284.
- Young E. D. and Russell S. S. (1998) Oxygen reservoirs in the early solar nebula inferred from an

Allende CAI. Science **282**, 452–455.

- Yurimoto H., Ito M. and Nagasawa H. (1998) Oxygen isotope exchange between refractory inclusion in Allede and solar nebular gas. *Science* 282, 1874–1877.
- Zolensky M. E., Zega T. J., Yano H., Wirick S. and 71 additional authors. (2006) Mineralogy and petrology of comet 81P/Wild 2 nucleus samples. *Science* 314, 1735–1739.
- Zolensky M., Nakamura-Messenger K., Rietmeijer F., Leroux H., Mikouchi T., Ohsumi K., Simon S., Grossman L., Stephan T., Weisberg M., Velbel M., Zega T., Stroud R., Tomeoka K., Ohnishi I., Tomioka N., Nakamura T., Matrajt G., Joswiak D., Brownlee D., Langenhorst F., Krot A., Kearsley A., Ishii H., Graham G., Dai Z. R., Chi M. Bradley J., Hagiya K., Gounelle M. and Bridges J. (2008a) Comparing Wild 2 particles to chondrites and IDPs. *Meteoritics and Planetary Science* 43, 261–272.
- Zolensky M. E., Nakamura-Messenger K., Lisa Fletcher and Thomas See (2008b) Curation, spacecraft recovery, and preliminary examination for the Stardust mission: A perspective from the curatorial facility. *Meteoritics and Planetary Science* 43, 5–21.