^{特集「初期太陽系物質科学の最前線」} 高精度・微小領域酸素同位体局所分析の取り 組み

牛久保 孝行

2010年7月12日受領, 2010年11月3日受理.

(要旨) 二次イオン質量分析計はミクロンスケールの微小な試料の同位体比分析が可能である.ウィスコン シン大学では、二次イオン質量分析計を用いた酸素同位体比分析の高精度化に取り組み、約15ミクロン径 のイオンビームを用いて±0.2‰,約2ミクロン径のイオンビームを用いて±1‰の分析精度(いずれも標準 試料分析値の分散,2SD)を達成した.これらの分析法を用いて、4億7千万年前の堆積岩から回収された隕 石由来のクロマイトや、NASAのスターダスト探査機によってWild 2彗星から持ち帰られた彗星コンドリ ユールの酸素同位体比の特徴を明らかにした.

1. 初期太陽系物質の酸素同位体

酸素は太陽系で水素とヘリウムに次いで3番目に多 い元素で、3つの安定同位体、16〇(99.76%)、17〇(0.04%)、 ¹⁸O(0.20%)がある。酸素は難揮発性の酸化物や珪酸塩 鉱物(例えばZrO₂, Al₂O₃, Mg₂SiO₄など)から有機物, 揮発性の高い水(H₂O)や一酸化炭素(CO)まで、多様 な物質に幅広い温度・圧力条件下で安定して存在する. そのため酸素は、原始太陽系星雲でのガス組成の変化 や塵とガスとの反応、微惑星の集積後の熱変成や水質 変成、惑星形成後の分化や表層環境の変化、といった 太陽系の形成・進化の様々な過程に関わり、その度に 太陽系物質の酸素同位体比組成は変化(多様化と均質 化)を繰り返してきたと考えられる。初期太陽系物質 の酸素同位体比を測定することで、その物質が形成し た環境やその場に存在したガスや塵の酸素同位体比の 痕跡を知ることができる。こうした情報は、太陽系の 形成過程と太陽系物質の進化を理解するうえで、重要 な手がかりにひとつになることが期待される.

初期太陽系物質の酸素同位体比組成の概略を図1に 示す.酸素同位体比は標準海水(VSMOW)を基準とし た千分率(‰)で表示される(δ¹⁸O, δ¹⁷O). 殆どの地



図1: 初期太陽系物質の酸素同位体組成の概略図. コンドライト 隕石の包有物(コンドリュールやCAI, COSなど)は傾き約 1の線の沿うようにして広い範囲に分布している. 隕石母 天体(微惑星)や地球や火星にも,小さいながらも有意な 酸素同位体比の違いがあることが知られている. TF:地球 物質の典型的な同位体比分別線(Terrestrial Fractionation line), R:Rコンドライト,O:普通コンドライト,C:炭素 質コンドライト, HED:HED分化隕石.

球物質は典型的な傾き約1/2の同位体比分別線 (Terrestrial Fractionation line; δ^{17} O=0.52× δ^{18} O)上 に分布する.一方で,多くの地球外物質がTerrestrial Fractionation lineから外れた酸素同位体比組成を持つ

^{1.} ウィスコンシン大学マディソン校 ushi@geology. wisc. edu

ことが知られている。 地球外物質のTerrestrial Fractionation lineからのずれの大きさを表す指標とし て Δ^{17} O 値 (= δ^{17} O-0.52 × δ^{18} O)が用いられることがあ る。始原的なコンドライト隕石の小さなCAI(CaやAl に富む包有物) やコンドリュール. Cosmic Svmplectite(COS,磁鉄鉱(Fe₃O₄)と鉄ニッケル硫化 物の微細結晶集合体)では、全体で200‰以上の酸素 同位体比の変動がみられ、しかも質量に依存した同位 体比分別直線(傾き約1/2)とは明らかに異なる傾き1 の線上に分布している。また、小惑星に由来する様々 な隕石母天体や、地球や火星などの惑星の間にも酸素 同位体比に僅かではあるが有意な違いがあることが知 られている.太陽系物質の酸素同位体比の不均一性や 分布がどのようにして形成されたのか、時間や空間分 布がどうだったのか、理論・実験・分析の面から様々 な議論がなされている[1].

本稿では、アメリカ、ウィスコンシン大学の WiscSIMS Laboratoryで行われている、二次イオン 質量分析計(SIMS)を用いた酸素同位体比局所分析法 の精度向上のための取り組みと、初期太陽系物質へ適 用した2つの例について紹介する.二次イオン質量分 析計は、加速したイオン(一次イオン)を収束させて試 料に照射することで試料表面の物質をはじき飛ばすよ うにしてイオン化(二次イオン)し、質量分析を行う機 器である(図2).セシウムイオン源(Cs⁺)と酸素イオ ン源(O)を使い分けることで、陽イオン化しやすい物 質(例えばマグネシウムやカルシウム)と陰イオン化し やすい物質(例えば酸素や炭素)の両方とも分析できる

ことや、イオンビームを絞ることで10ミクロン前後 の領域の同位体比や微量元素濃度の分析ができること から、コンドライト隕石の包有物など、小さな試料や ミクロンスケールで大きな同位体比の不均一が予想さ れる試料などの研究に用いられている。特に初期太陽 系物質の酸素同位体比の研究において、二次イオン質 量分析計の果たした役割は極めて重要である。図1に おける傾き1の分布の両端である極めて¹⁶〇に富む a006コンドリュール(δ^{18} O ~ δ^{17} O ~ - 75‰)[2]や太 陽系の始原的な水の酸素同位体比組成(δ^{18} O ~ δ^{17} O ~180‰)を反映していると考えられるCOSの発見 [3.4]、太陽風の酸素同位体比分析[5.6]、太陽系物質の 素材となったであろう珪酸塩プレソーラー粒子の発見 [7]等、太陽系の形成を考える上で鍵となる物質の酸 素同位体比は、二次イオン質量分析計により分析され たものである、しかも、これら重要な研究に多くの日 本人研究者が関わっていることは特筆するに値する.

2. 一つ一つのデータを評価する ということ

ウィスコンシン大学のWiscSIMS Laboratoryでは, マルチ検出器を搭載した二次イオン質量分析計 CAMECA IMS 1280(図2(a))を用いて,地球物質や 地球外物質の同位体比や微量元素濃度分析を行ってい る.二次イオン質量分析計はU-Pb年代測定や微量元 素分析などに広く用いられてきたが,WiscSIMSでは 安定同位体(酸素,炭素,硫黄,珪素など)の高精度分 析技術に特化し,累帯構造を持つ鉱物試料のマイクロ



図2: (a) 二次イオン質量分析計 (CAMECA IMS 1280)の概略図. (b) 検出器付近の拡大図. ([8]から加筆修正)

スケールの同位体比の変動などを調べることで,地球 科学や惑星科学の研究においてバルク分析では得られ なかった新しい知見を得ることを目指している[8]. 地球外物質の酸素同位体比分析では,3つの検出器を 使用して酸素の3同位体イオン強度を同時に計測し, 分析中の二次イオン強度の僅かな揺らぎの影響を最小 限に抑えている(図2(b)).

初期太陽系物質では、微細な構造を持ち同位体比が 均一でないことが予想されるものや、試料そのものが ごく少量しかない場合がある.とりわけ、ミクロンス ケールの分析を得意とする二次イオン質量分析計に期 待されるのは、そうした"制約付き"の試料を分析す ることであろう、二次イオン質量分析計による分析は 微小領域とはいえ破壊分析である.試料によっては複 数のデータを取得し再現性を確認することが難しい場 合も考えられるので、一つ一つのデータにどの程度の 誤差があるのかを評価する必要がある.

珪酸塩や酸化物の酸素同位体比分析では、酸素イオ ンの生成量が多く充分な量のイオンを検出できるため、 大抵の場合は、イオン検出数からくる統計誤差よりも、 検出器のS/N比や感度の変化など分析器の安定性か らくる変動の方が大きい. そこで、頻繁に標準試料を 分析して分析器の状態を確認しつつ、未知試料の分析 は前後の標準試料の分析値で規格化する方法を採用し ている[9]. 例えば, (標準試料4分析)+(未知試料10 分析)+(標準試料4分析)+(未知試料10分析)…という 具合に分析を行う. 一つ一つの未知試料分析データの 不確定性には、未知試料分析の前後に行った標準試料 分析値の分散(Standard Deviation, SD)を採用してい る. 分散を分析回数の平方根で割った標準誤差 (Standard Error of the Mean, SE)は、一つ一つのデ ータの不確定性の評価としてはふさわしくないと考え ている.効率良く分析を行うため、未知試料と標準試 料は一緒に埋めて研磨することを推奨しているが、薄 片試料などそれができない場合には、標準試料の薄片 を別に準備して交互に分析している.

二次イオン質量分析計の分析では、試料表面の形状 や、試料ホルダーで試料がマウントされている位置に よっても同位体比分析値にずれが出ることがある.こ のずれは、一箇所に埋めた標準試料を分析する限り決 して認識されることがないので見過ごされがちである. 様々なテスト分析の結果、標準的な1インチの試料ホ ルダーを使う場合,標準試料と未知試料共に試料ホル ダーの中心から半径5mm以内に埋め,表面の凹凸(た とえばエポキシと試料の段差)を数ミクロン以内に抑 えれば,試料表面形状による同位体比分析値(δ¹⁸O) のずれは,分析精度と同程度の±0.3‰の範囲内に収 まることが確かめられている(詳しい要件やテスト分 析の結果については[8,9]を参照していただきたい). また,高精度分析の要件に合うように準備された試料 では,試料ホルダーを交換しても分析値にずれが出な いことを確認している[9].未知試料と標準試料が一 緒に埋めてあることが高精度分析の必須条件であると 考え,無理をして標準試料を不適切な位置に埋めたり, 試料表面に凹凸をつけたりしてしまうことは明らかに 間違いである.

次に、こうした取り組みを踏まえ、筆者が分析技術 開発を担当した2つの研究例について紹介する。

3. 隕石化石(Fossil Meteorite) の母天体の推定

まず,酸素同位体比の高精度分析に取り組んだ例として,古生代に地球に降着した地球外物質の起源に関 する研究を紹介する.

スウェーデン南部の約4億7千万年前(古生代オルド ビス紀)の石灰岩層から化石化した隕石が大量に発見 された. 隕石化石中に残されていたコンドリュールの 形状や、変成されずに保存されていたクロマイト (FeCr₂O₄)粒子の大きさや主成分元素濃度などから, 見つかった隕石化石は全てLコンドライトと推定され た[10]. Lコンドライトとは普通コンドライトの一種で、 H. L. LLの3つに分類されている. さらに、隕石化石 が見つかったスウェーデン南部の石灰岩層のほか、同 時期に堆積したと推定されるスウェーデン南部の別の 石灰岩層や中国南部の石灰岩層に、隕石化石から見つ かったクロマイトと良く似たクロマイトが濃集してい ることがわかった、このことは、約4億7千万年前に 地球外物質の降着量が全球的に増大したことを示唆し ている[11]. 石灰岩中のクロマイト粒子の殆どは、恐 らく微隕石の形で降着したと考えられる. 石灰岩中の クロマイト粒子の主成分元素組成や形状の分布は、隕 石化石のものとほぼ一致するが、一つ一つのクロマイ ト粒子がLコンドライト的かどうかを判断するのはき わめて難しい.しかし、酸素同位体組成のΔ¹⁷O値で



図3: (a)約4億7千万年前の石灰岩層から回収されたクロマイト 粒子の走査電子顕微鏡写真.上段は酸素同位体比分析前, 下段は酸素同位体比分析後の様子.右下の画像に示した粒 子の上側の分析孔の分析では、分析中に試料を突き抜け てエポキシに到達してしまったため、データは破棄されて いる.(b)クロマイト粒子のZnO含有量とΔ¹⁷0値.欄外に 3種類の普通コンドライト(H,L,LLコンドライト)の典型 的な酸素同位体比の範囲を示す.クロマイト粒子は元素組 成に若干の違いが見られたが、酸素同位体比はいずれもL コンドライトの酸素同位体比と調和的であった.FMC:隕 石化石から回収されたクロマイト粒子(Fossile Meteorite Chromite grains),SEC:堆積岩から回収されたFMCと 良く似た組成のクロマイト粒子(Sediment-dispersed Extraterrestrial Chromite grains).([12]から加筆修正)

あれば、クロマイト粒子が結晶成長をした隕石母天体 と同じ値を持つ可能性が高いことと、隕石母天体の種 類ごとに特徴的なΔ¹⁷O値を持つ(例えば炭素質コンド ライト(図1の記号C)なら<0‰,普通コンドライト(図 1の記号O)のH, L/LLならそれぞれ~0.7‰, 1.0~ 1.4‰)ことから, クロマイト粒子の起源を推定できる 可能性が高い. そこで, Philipp R. Heck博士らと協力 し, 個々のクロマイト粒子の酸素同位体比が全てLコ ンドライト的であるか, それとも多様な隕石母天体を 起源に持つのかを, 酸素同位体比を用いて検証する研 究を行った[12].

分析の標準試料にはレーザー・フッ素化法で酸素同 位体比を求めた南アフリカ産クロマイト(UWCr-2, δ^{18} O=4.59±0.17‰, 2SD)を用いた,分析した試料は, スウェーデン南部(Thorsberg)とスウェーデン中央部 (Gärde)の石灰岩採石場で見つかった12個の隕石化石 のクロマイト粒子,同じ採石場の石灰岩から回収され たクロマイト粒子、中国湖北省宜昌市近郊(Puxi River)の石灰岩層から回収されたクロマイト粒子(い ずれも約4億7千万年前の地層のもの)のほか、比較と して普通コンドライト(Hessle (H5), Guareña (H6), Ergheo (L5), St-Séverin (LL6))の研磨試料を作成し、 研磨面で見つかったクロマイトを分析した.分析には 直径約15ミクロン、強度5nA、20kVに加速されたセ シウムイオンビームを用いた。試料から出た酸素イオ ン(¹⁶O⁻¹⁷O⁻¹⁸O⁻)は、10kVに加速され、静電場と磁 場を使って質量分別された後に別々のFaradav Cup 検出器で同時に計測した。それぞれの分析点で¹⁶OH 分子イオンの強度を計測し、¹⁷Oイオンに対する¹⁶OH 分子イオンの補正が0.5‰を超えるデータは除外した (分析条件については[12]に詳しい).また、分析点を 走査型電子顕微鏡で観察し、大きな亀裂や包有物、エ ポキシを含む分析点のデータは除外した(図3(a)).

標準試料の分析の再現性は、 δ^{18} Oで約±0.3‰, Δ ¹⁷O値で約±0.2‰ (共に2SD)であった.また,普通 コンドライトのクロマイトの分析値は Δ^{17} O値で0.68 ±0.15‰ (Hessle(H5)), 0.67±0.18‰ (Guareña (H6)), 1.09±0.13‰ (Ergheo (L5)), 1.24±0.10‰ (St-Séverin (LL6)) (誤差は複数分析データの2SE)で,全岩の文 献値と誤差の範囲で一致した.以上から、クロマイト の酸素同位体比を分析することで少なくともHコン ドライト(Δ^{17} O ~ 0.7‰)とL/LLコンドライト(Δ ¹⁷O=1.0~1.4‰)を有意に見分けられることが確かめ られた[12].

図3に隕石化石のクロマイト粒子(Fossile Meteorite Chromite, FMC)と石灰岩から回収されたクロマイト

粒 子(Sedimentary-dispersed Extraterrestrial Chromite, SEC)のΔ¹⁷O値を示す[12]. 分析前には, 4億7千万年間も石灰岩中に埋蔵されていたこと、ク ロマイト粒子の主成分元素組成(主にFeOとZnO)に 若干ではあるが有意な違いが見られたことから、変成 作用によって元の酸素同位体比がみだされてしまって いることが懸念された.しかし、組成の違いや産出地 (スウェーデンvs中国),産状(隕石化石vs堆積岩)に 関係なく分析した全てのクロマイト粒子がΔ¹⁷O=1.0 ~1.3%という値を示し、Lコンドライトの酸素同位 体比と調和的であることがわかった.以上から、(a)4 億7千万年前の石灰岩層から回収されたクロマイト粒 子は元の酸素同位体比を保持している、(b)スウェー デンや中国の石灰岩層で確認されたクロマイト粒子の 濃集は、Lコンドライト的な酸素同位体比を持つ地球 外物質の降着量が一時的に増大したことを示している. と解釈している、これは、約4億7千万年前に何らか の原因でLコンドライト母天体が破砕され、その時に できた大量の破片が速やかに地球領域まで運ばれ、地 球に大量に降着したという説を支持する結果となって いる

4. 彗星コンドリュールの酸素同位体比 分析

4.1 極微小領域分析の取り組み

次に、1~3ミクロンのセシウムビームを用いた極 微小領域の酸素同位体比分析の取り組みを紹介する。 極微小領域の酸素同位体比分析は、微細な層構造や結 晶中の包有物,粉末等の研究に対する期待が高く, 2006年から分析法の開発と改良に取り組んでいる。1 ミクロンよりも小さな構造や試料の分析には NanoSIMSという優れた分析機器があることから (NanoSIMSについては, 例えば[13]や本特集号の[14] に詳しい). ウィスコンシン大学では、直径1~3ミ クロンのセシウムイオンビームを用いて1‰の精度で 酸素同位体比分析を行うことを目途にして開発を行っ てきた.図4に地球の高度変成岩のジルコン(ZrSiO₄) の酸素同位体比を分析した際に、セシウムイオンによ って削られてできた分析孔の断面写真を示す. 大きさ 約0.5×1.0ミクロン(深さ約1ミクロン),約2pAのセ シウムイオンビームを用いて約24分間の分析を行い.

酸素2同位体比(¹⁸O/¹⁶O)で±2.0‰ (2SD)の再現性を 得た[15]. 現在は,酸素2同位体比分析では2×3ミク ロン,約20pAのセシウムイオンビームを用い,10分 弱の分析で±0.7‰ (2SD)の再現性を得るのが標準と なっている[9].

初期太陽系物質の酸素同位体比を分析する場合,地 球物質のようにTerrestrial Fractionation line上に分 布することが仮定できないので(図1),酸素の安定同 位体の中で最も存在量の少ない¹⁷Oを含めた酸素3同 位体比分析(¹⁶O,¹⁷O,¹⁸O)が必要となる.¹⁷Oのイオ ンを充分な量検出するためには地球試料の酸素2同位 体比分析(¹⁶Oと¹⁸O)よりも強いセシウムイオンビーム が必要であり,極微小領域の分析が難しい.地球試料 の酸素2同位体比分析の経験を基づき,極微小領域の 分析技術を地球外物質の酸素3同位体比分析に応用す る試みを初めて行ったのが,NASAのスターダスト 探査機により回収された彗星コンドリュールの酸素同 位体比分析であった[16,17].これは中村智樹博士,野 口高明博士,土、山明博士らとの共同研究として行わ れた.

4.2 彗星コンドリュールを分析する

コンドリュールは主にオリビン((Mg.Fe)₂SiO₄)や パイロキシン((Mg,Fe,Ca) SiO₃)等の珪酸塩鉱物とガ ラスからなる直径数百ミクロン程度の球粒で、火成岩 的な組織と鉱物組み合わせを持つことから、原始太陽 系星雲内で珪酸塩が融解するほど加熱された後に急冷 却してできたと考えられている。コンドリュールはコ ンドライト隕石に普遍的に、かつ大量に含有されてい ることから、少なくとも現在の小惑星帯領域(3~5 天文単位)ではコンドリュールを形成した高温プロセ スは頻繁に起きていたと考えられている。一方で、海 王星よりも遠い軌道(>30天文単位)を回る太陽系外縁 天体が形成する領域では、コンドリュールを形成した ような高温プロセスは起きなかったであろうと考えら れている. そのため、太陽系外縁天体が起源と考えら れる短周期彗星には、コンドリュールの存在は予想さ れていなかった.

NASAのスターダスト探査機は,短周期彗星Wild 2に接近し,貴重な彗星の塵試料を地球に持ち帰った. 回収された彗星の塵試料からは,20ミクロン程度と 小さいながらもコンドリュールに良く似た火成岩的な



図4: ジルコンの酸素2同位体比分析後の分析孔の走査電子顕微 鏡写真.約2pAのセシウムイオンビームを用いて約24分間 の分析後,FE-SEMに備え付けられたガリウムイオンビー ム(FIB)を用いて分析点を切断し断面を観察した.([15]か ら加筆修正)

組織を持つ結晶質物質(彗星コンドリュール)が見つか った.そこで,この予想外の存在である彗星コンドリ ュールの起源を知るための手段の一つとして,微小領 域分析技術を生かして酸素同位体比分析を担当するこ とになった(彗星の塵試料の初期分析から彗星コンド リュールの発見,観察のための技術開発の経緯等は [17]に詳しい).

分析試料が非常に小さいため、6mmのエポキシデ ィスクに彗星コンドリュール試料と標準試料を埋めて 研磨し、特製の7つ穴ホルダーに装着して分析する方 法を用いた、分析法の打ち合わせの後、速やかにオリ ビン粒子を用いた模擬試料が作成され7つ穴ホルダー を使ったテスト分析が行われた. その結果. 6mmの エポキシディスクの中心から半径0.7mmの範囲に試 料が埋められている限り、±1‰ (2SD)の精度と確度 で分析できることがわかった. 彗星コンドリュールの 分析は、試料を持参した中村博士と共同で行った.分 析には1.5×2.5ミクロン、強度13pA、20kVに加速さ れたセシウムイオンビームを用いた. 試料から出た酸 素イオン($^{16}O'$, $^{17}O'$, $^{18}O'$)は、10kVに加速され、 Faraday Cup $\binom{16}{0}$ と Electron Multiplier $\binom{17}{0}$ $\binom{18}{0}$ 検 出器で同時に計測した.¹⁷Oイオンに対する¹⁶OH分子 イオンの寄与は概ね0.2‰未満であった. 図5に彗星 コンドリュール(Torajiro)の酸素同位体比分析の結果 を示す[16]. 数ミクロンの細粒のオリビンやパイロキ シン結晶からなる彗星コンドリュールは、炭素質コン



図5: (a) スターダスト探査機により短周期彗星81P/Wild 2から
回収された彗星コンドリュールの走査電子顕微鏡写真.
(b) 酸素同位体比分析後の走査電子顕微鏡写真.
(c) 彗星
コンドリュール(Torajiro)の酸素同位体比データ.
([16]から加筆修正)

ドライトのコンドリュールと良く似た酸素同位体比組 成を持つことがわかった.さらに,別の彗星コンドリ ュール(Gozen-sama)は酸素同位体比が不均一で,る ¹⁸O~ 5¹⁷O~ -50‰近い大きな同位体比異常を持つ オリビン結晶が含まれていることがわかった.火成岩 的な組織を持ちながら酸素同位体比に不均一が見られ ることや,組織中にガラスが存在することは,短い時 間で加熱と急冷却するコンドリュールの形成過程と調 和的である.また,分析した3つの彗星コンドリュー ルの酸素同位体比が,いずれも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一致している. 短周期彗星や太陽系外縁天体が形成する領域では,コ ンドリュールを形成するだけの充分な熱源が無いと考 えられることから,彗星コンドリュールは,炭素質コ ンドライトのコンドリュールが形成された小惑星帯外 縁部から海王星の外側まで何らかの機構で運ばれ,母 天体に集積したのではないかと考えている[16].

4.3 さらなる分析技術の向上を目指して

彗星コンドリュールのように、100ミクロンに満た ない小さな粒子をエポキシに埋めて研磨する場合.小 さなエポキシディスクを作成することは (a)研磨面の 表面積が小さく取り扱いが楽である。(b)小さな試料 を個別に研磨することで試料毎に適切な研磨面を出す ことができる。(c)使用するエポキシの量を最小限に 抑えることでエポキシからの脱ガスによる¹⁶OHイオ ン(¹⁷Oイオンの妨害イオン)の生成量を抑制できる。 といった利点がある.一方で、複数穴のサンプルホル ダーは分析の際の試料表面電場をゆがめてしまい、分 析精度が悪くなる可能性があるといった問題点もある. そこで、現在WiscSIMS Laboratoryでは、中嶋大輔 博士が試料の取り扱いと分析精度の向上を目指して. サンプルホルダーの改良と詳しい性能検査に取り組ん でいる[18]. また、分析の際に試料表面を観察する CCDカメラの画質を向上させ、より精密に分析点を 決定できるようにするため、カメラの光源を赤みがか ったハロゲンランプから青色ダイオードへと変更した. 光源の波長が短くなり、かつ色収差が軽減されたこと で、CCDカメラの空間分解能が約3ミクロンから約2 ミクロンへと向上した[19].

極微小領域分析は,様々な組成や組織をもつ試料へ の適用が行われており,分析上の工夫や試料の取り扱 いに関する経験はさらに蓄積されていくと思われる. こうした経験を礎にしてさらなる分析法の改善を行い, その成果をお伝えしていくことができればよいと考え ている.

5.おわりに

コンドライト隕石や宇宙塵などの初期太陽系物質は ミクロンスケールの複雑な構造を持つものがある.ま た,探査機等によって回収される試料は,限られた量 の試料から最大限の知見を得ることが求められる.二 次イオン質量 分析計を用いた微小領域局所分析法は, こうした貴重な試料の同位体比や微量元素の情報を調 べ,初期太陽系物質の起源や太陽系の形成過程を理解 するために適した手法であると考える. 上に述べた2つの研究事例から筆者が実感したのは, それぞれの分野におけるエキスパートである複数の研 究者が,同一の研究目的の達成に向けて共同作業を行 うことが極めて重要だということである.共著者の誰 一人が欠けても,ここで述べたような結果はまず得ら れなかったであろう.本特集号が,今後こうしたいく つもの"研究者の輪"を形成するきっかけになればよ いと願っている.

謝 辞

木多紀子博士,中嶋大輔博士,中村智樹博士には原 稿の作成に際して助言をいただきました. 査読してい ただいた橘省吾博士には多くの建設的なコメントをい ただきました.分析法の開発に際して木多紀子博士と John W. Valley博士から多くの協力と助言を受けまし た.分析法の開発にはNASA(NNX09AC30G)とNSF (EAR05-09639)の助成を受けています.ウィスコンシ ン大学WiscSIMS LaboratoryはNSFの共同利用施設 として助成を受けています(EAR03-19230, EAR07-44079).

参考文献

- Yurimoto, H. et al., 2007, in Protostars and Planets V, 849.
- [2] Kobayashi, S. et al., 2003, Geochemical Journal 37, 663.
- [3] Sakamoto, N. et al., 2007, Science 317, 231.
- [4] 坂本直哉, 2009, 遊星人 18, 25.
- [5] Hashizume, K. and Chaussidon M., 2005, Nature 434, 619.
- [6] McKeegan, K. D. et al., 2010, LPSC XLI, #2589 (abstract).
- [7] Nagashima, K.et al., 2004, Nature 428, 921.
- [8] Valley, J. W. and Kita, N. T. 2009, Mineralogical Association of Canada Short Course 41, 19.
- [9] Kita, N. T. et al., 2009, Chemical Geology 264, 43.
- [10] Schmitz, B. et al., 2001, Earth and Planetary Science Letters 194, 1.
- [11] Schmitz, B. et al., 2008, Nature Geoscience 1, 49.
- [12] Heck, P. R. et al., 2010, Geochimica et Cosmochimica

Acta 74, 497.

- [13] 伊藤元雄, メッセンジャー・スコット, 2007, 遊星 人 16, 308.
- [14] 藤谷渉ほか, 2010, 遊星人本特集号
- [15] Page, F. Z. et al., 2007, American Mineralogist 92, 1772.
- [16] Nakamura, T. et al., 2008, Science 321, 1664.
- [17] 中村智樹ほか, 2009, 地球化学 43, 143.
- [18] Nakashima, D. et al., 2010, LPSC XLI, #2259 (abstract).
- [19] Ushikubo, T. et al., 2010, Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement 74, A1069 (abstract).