

地球惑星物質総合解析システムの構築と応用

岡山大学 惑星物質研究所教授 中村 栄三 (The Pheasant Memorial Laboratory, PML)

要 旨 地球惑星物質科学の醍醐味は、太陽系形成から現在に至るまでの約 46 億年間にわたる物質進化の過程を、 $\sim 10^{15}$ m のサイズを持つ広大な太陽系空間における元素（原子：サイズ $\sim 10^{-10}$ m）の分布から物理化学的に解き明かすことにある。本稿では、物質を構成する元素およびその同位体の分布と、絶対年代測定の精緻な組み合わせを可能とする「地球惑星物質総合解析システム (CASTEM)」と、このシステムを活用した小惑星探査機「はやぶさ」回収試料の分析結果、そして「はやぶさ 2」が持ち帰る小惑星リュウグウ回収試料の解析戦略等について紹介する。（本稿は、2019 年 11 月 23 日に開催された弊社主催「先端分析技術シンポジウム 2019」での特別講演を基に構成したものです。）

1. はじめに

惑星物質研究所は岡山大学に属しているが、私たちは鳥取県の田舎温泉町で仙人のような研究生活を送っている。

東レリサーチセンターのような民間企業と私たちアカデミアとでは、分析に対する考え方が正反対と断言していいほど異なるが、両者の能力 (Discipline) を有機的に融合させることができれば、どこも追従できないより魅力的な分析体制をつくり上げることができるはずだ。

今回、「地球惑星物質総合解析システム : Comprehensive Analytical System for Terrestrial and Extraterrestrial Materials (CASTEM)」を紹介し、我々がそれをどのようにして構築し、どのような考えで展開しているかをご理解いただければ幸いである。

2. 岡山大学惑星物質研究所

私たちの研究所は、鳥取市と米子市の中間に位置する倉吉市の南方、人形峠に近い三朝町にある (図 1)。



図 1 岡山大学惑星物質研究所の概要

有名なものといえば、カニと温泉の他には二十世紀梨くらいしかない。三朝温泉に入りながらのんびりと研究していると思われるかもしれないが、この温泉の存在こそが我々の研究所をつくるきっかけだった。

1898 年、キュリー夫人がラジウムを発見し、これが非常にパワーに富む放射性核種だと判明し、全世界的にラジウムブームが巻き起こった。日本でも放射能や原子核をめぐる研究が進展した 20 世紀前半は希望に満ちた時代であった。

当時、医師を育成する機関は、中国・四国地方には岡山医学専門学校のみだったが、その先生が日本最強の放射能温泉である三朝温泉に目をつけ、ラジウムがどのように人体に効くのかを調べるために岡山医科大学三朝温泉診療所を開設したのが1939年である(図2)。土地と建物は当時の三朝村から譲り受けた。



図2 岡山大学惑星物質研究所の変遷

その後、岡山医科大学放射能泉研究所への改組・増設を経たのちに、1951年に温泉を医学・基礎科学の両面から研究する文部省認可の岡山大学附置温泉研究所となった。温泉研究所はそれから34年間続いたが、プライドの高い医師とわがままな地球科学の研究者が東京などの都会から集まってきて、研究分野が大きく異なるのにもかかわらず極めて閉鎖的な環境で一緒に仕事をしたので、次第に仲違いしたのは必然だった。結局、研究アクティビティが低下し、文部省からの解体勧告を受け、1985年に医療センターと地球内部研究センターに分割された。

私がパリから赴任したのは、その改組から2年後の1987年秋だ。今日、当時を振り返ると、私は騙されて来たのではないかと後悔の念を抱いたほどだ。当時の環境は研究者にとって悲惨な状況だったからだ。

研究センターは全国共同利用施設とされ、全国の地球科学の研究者に技術を提供することが職務になっていたため、自分たちの研究ができないと、センター全体が意気消沈していたのである。そこで、将来を見据えて変化と発展を継続させるため、あえて10年という時限を組織に課し、そのミッションと名称をアップデートする改組を繰り返し実行してきた。

このような試練を経て、2016年に惑星物質研究所として再び研究所に振り返ることができた(図2)。こう

株式会社 東レリサーチセンター

した過程を経て、研究所は温泉や岩石・鉱物などの分析化学的な実験を中心とした活動から、より普遍的な物質科学的な学問を実践する場へと進化し、現在に至っている。

3. 宇宙の始まりから現在まで

宇宙は138億年前のビッグバンに始まり、その後36万年でほぼ全ての水素がつくられた(図3)。水素原子には質量があるので引力が働く。こうして最初の星、ファーストスター(原始恒星)が誕生した。

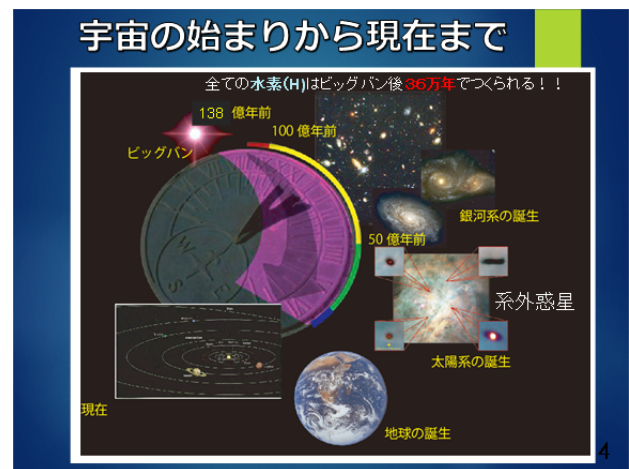


図3 宇宙の始まりから現在まで

その後、複数の巨大な恒星が形成され、恒星内部での核融合によって元素周期表の鉄までの核種が合成された。超新星爆発(スーパーノヴァ)によって合成された核種が宇宙空間にばら撒かれ、さらに多くの恒星が形成された。宇宙空間を構成する基礎物質は、これらの原子核反応過程が繰り返されることによって形成されたのだ。この過程で、無数の銀河系が形成され、恒星を周回する惑星を伴った惑星系が誕生した。

ハッブル宇宙望遠鏡で撮ったオリオン座付近の画像には、中心が明るく周りが暗い楕円状の構造が確認できる。これはおそらく太陽系に似た惑星系の形成期だろう(図3)。

その後、地上の天体望遠鏡を用いた視線速度法による太陽系外惑星の観測が始まり、現在では宇宙望遠鏡で系外惑星を探索する時代になった。その結果、今までに4,000個以上の系外惑星が見つかった。2019年のノーベル物理学賞を受賞したのは、このような系外惑星を観察する技術をつかった二人の天文学者だ。それ以前の惑星形成論はあくまで理論に基づいたもの

であり、京都大学の林忠四郎先生が中心となって世界をリードしていた。

しかし現在では、実際に望遠鏡で天体を観察しながら「どこにどれだけ惑星が存在するのか」、「それらはどのような状態にあるのか」、「生命が存在できる領域（ハビタブルゾーン）はあるのか」など、より具体的な研究課題が活発に探求されている。

ビッグバンからおよそ 100 億年後、太陽に続いて地球が誕生し、私たちは現在その上で暮らしている。我々は、時間のフロント（最前線）にいる。ここで皆さんにお会いしていること自体、宇宙の時間のフロントでの出来事なのだ。

未来を予測することはなかなか難しいが、現在から過去の現象（歴史）を物理化学的に理解することは、ある程度可能だ。現存するすべての物質は、周期表中の各元素（原子）（図 4）の混ざる度合の違いによってできている。重要なのは、「元素のブレンド比は多様で、それがどのような状態で、いつどのような過程でできたのか」を理解することだ。これこそが私たちが研究していることだ。



図 4 元素周期表（宇宙の進化の結果）

図 5 は、「地球・宇宙の物質科学的現在」を行列式に見立てて単純化したイメージ図だ。過去の状態は、同位体組成、化学組成、構造など、何でも構わない。これが一定の時間内（ Δt ）において、ある状態から別の状態に変わるプロセス（ P ）がイベント（出来事）である。このイベントがいくつも積み重なった結果が現在の状態であり、私たちはこの歴史プロセスを分析・解析している。

この連立方程式を解くのは容易ではない。非常に尖った単一的な手法で解析しようとしても、極めて大き

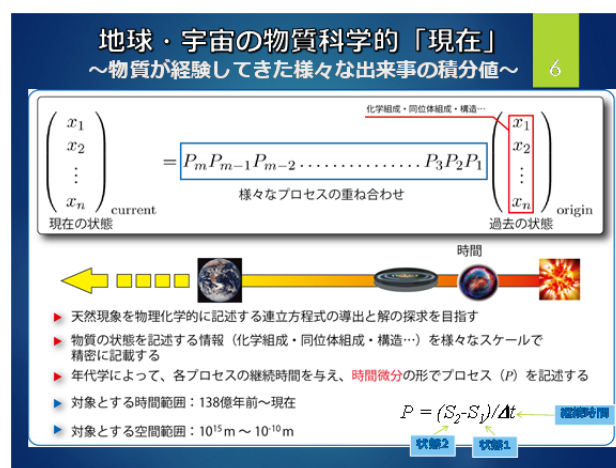


図 5 地球・宇宙の物質科学的「現在」

な複雑系の方程式は解けない。そこで図 5 で示すように、多次元的な情報として記述される年代の異なる事象を精密に探索し、それを基に時間・空間・状態の関数であるプロセスを解くのが私の流儀である。

ここで重要なのは時間だ。一般に、物理学分野の人たちはあまり時間の流れを気にしない。時間を気にしはじめると一層複雑になって手に負えなくなるので、彼らはなるべく時間に依存しない状態を理解しようとするのだ。しかし、時間の経過に伴う状態変化を考慮に入れなければ、私たちは宇宙や太陽系の歴史を厳密に語ることはできないだろう。

対象とする範囲は、時間が 138 億年前から現在まで、空間が太陽系の一番外側「オールトの雲の端（ 10^{15} m）」から TEM で解析できる原子サイズ（ 10^{-10} m）となるうか。こうした試みを実現するために、私は三つのディシプリン（Discipline）を掲げている。「読み解く、時を刻む、再現実験」である。

ある物質の経験したプロセスを解析する場合、例えば岩石なら採取し、肉眼で見ることから始める。そして光学顕微鏡や電子顕微鏡で観察するなど、さまざまな空間スケールで岩石に記録された情報を記述する。これが「読み解く」である。

次に、太陽系形成から現在に至るまでの 46 億年の長い歴史において、いつそれができたのかという時間（または時代）を探索する必要がある。そうしなければ、状態変化を時間微分した形を介して物理化学的に理解することはできないからだ。これが「時を刻む」である。

最後に、「読み解く、時を刻む」だけでは地球惑星物質が形成された条件を理解することは難しいので、温

度・圧力・化学組成などの必要条件を満たす「再現実験」を行う必要がある。例えば岩石の場合では、それがどのような温度、圧力、化学組成でできたのか、酸素雰囲気はどうなっているかなどを実験的に検証するのだ。これが「再現実験」である。

すなわち、「再現実験、読み解く、時を刻む」の三つのディシプリン（図 6）を組み合わせれば、考えられるほとんどの基本的な物質科学的な情報を三朝の田舎から発信することができる。これこそが地球惑星物質科学の研究所の使命だと考えたのである。たとえ鳥取県の田舎にあったとしても、三つのディシプリンに基づく地球惑星物質科学を先導することができるのなら、世界中から多くの科学者や学生が三朝を訪れるだろう！と確信するに至ったのである。

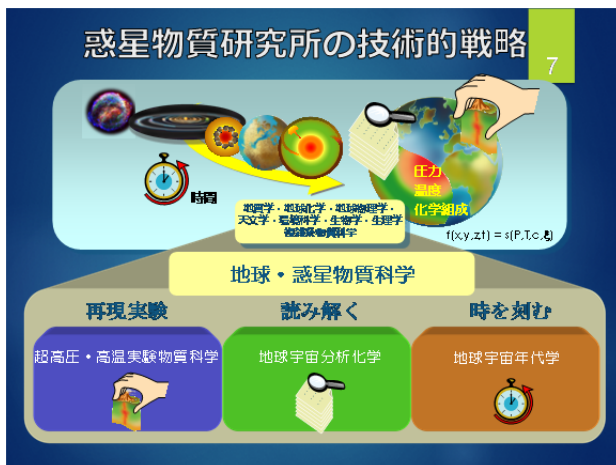


図 6 惑星物質研究所の技術的戦略

4. 地球惑星物質総合解析システム

1987 年秋、私が研究センターに赴任した時点において稼働していたおもな分析機器は、表面電離型の質量分析計 (TIMS) が 1 台、他には光学顕微鏡や X 線回折装置、簡単なガスや水の分析装置のみだった。これらの分析機器だけでは研究を思うように進めることができないので、「必要な化学分析用クリーンルームを自作し、分析機器を導入するしかない」と決心し、次から次へと夢を語りながらさまざまな分析機器を導入していった。

ここで重要なのは、単に分析機器の数を増やすのではなく、もともと分析目的の異なる装置が互いの歯車を通じてトルクを与え合いながら結び付き、全体として一つの時計のように機能する分析装置システムを構

株式会社 東レリサーチセンター

成することである（図 7）。こうしたシステムがない限り、非常に長い歴史における変化や事象を物理化学的・定量的に理解するうえでの不可欠な総合的な情報を抽出することは不可能である。



図 7 地球惑星物質総合解析システムの概要

図 8 に示すように、われわれはさまざまな試料を扱う。例えば、「ハンマーでたたいて採取したアイスランドの溶岩」、「はやぶさがタッチダウンした場所の微粒子」、「中脾腫患者の片肺を全摘手術して乾燥させた検体」、「空から降ってきた隕石」など、興味が沸けば何でも研究対象物になる。



図 8 宇宙から原子まで～シームレススケール解析～

通常、まず試料を肉眼で観察してから切断して断面を磨く。そしてこれを光学顕微鏡、ラマン分光、FT-IR など、研究対象物に対して非破壊的で物理化学的な影響の小さい手法を順に適用しながら解析する。

さらに、電子顕微鏡 (SEM) や X 線マイクロプローブ (EPMA)、LA-ICP-MS、二次イオン質量分析計 (SIMS) などを用いて複層的に情報を読み取る。

これらのビーム（プローブ）を用いた局所分析によっても得ることのできない情報は、化学的に元素を単離して TIMS、ICP-MS、ガス用質量分析計（IRMS）等を用いて濃度と同位体組成を決定する。この方法でプローブ分析用のマトリックス類似標準試料を作成できる。いずれにしても分析機器の特徴を最大限に活かすことが重要なのだ。

このような創意工夫により、われわれは目に見えるスケールから、やろうと思えばサブナノメータスケールまで、どのような物質であっても空間的にシームレスに分析できる（図 8）。また、同一試料を用いて年代（時間情報）を決定できることもわれわれの強みだ。

当然、今までにない情報が欲しくなる。その際は、新しく技術を開発し、これを CASTEM に加えればよい。本質的に重要なことは、何を理解したいか、何をやりたいかという、Curiosity（好奇心）に尽きる。

研究所は、現在に至るまでにさまざまな困難に直面した。とりわけ、2016 年 10 月 21 日に発生した鳥取県中部地震による影響は甚大であった。強烈な直下型の地震であったため、重量のある大型の分析機器でさえ垂直に浮き上がって落下したため、修復不可能なダメージを被った（図 9）（どういうわけか日本電子製の SEM や EPMA、TEM はほとんど壊れなかった）。



図 9 CASTEM の分析・解析能力

被災総額は約 26 億円に上った。文部科学省や大学と粘り強く交渉した結果、幸いにも 2018 年 12 月までに、壊れた装置をすべて最新のものに更新することができた。さらには、それまでは無機物を中心に研究を進めていたが、HP-LC-Orbitrap 質量分析計（MS）や GC-MS など有機物用の分析機器を新たに導入し、より強力な CASTEM へと進化させることができた。

今日では、極めて低いブランクで 74 の元素の定量分析をルーチンとして実施している。また、多様な手法を駆使する 20 種類以上の元素の精密同位体分析に加え、10 種類の放射性同位元素を用いる年代測定を行っている。

研究目的に沿ってこれらの分析を総合的に組み合わせることで、われわれはより確度の高い議論ができるようになったのである。

5. 小惑星探査機「はやぶさ」回収試料

小惑星探査機「はやぶさ」は、2003 年の打ち上げから 2010 年の地球帰還までに想定外の多くのトラブルに遭遇した。だが、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所（JAXA/ISAS）のエンジニアたちは柔軟な想像力と的確な判断力を発揮して「はやぶさ」を地球に帰還させ、小惑星イトカワの試料を人類にもたらした。

「はやぶさ」はイトカワでの最初のタッチダウンの際、サンプリングを試みたがうまくいかなかった。そのときスラスターという 12 個あるケミカルエンジンの一部はすでに作動せず、姿勢制御を行うジャイロ（リアクションホイール）も壊れていた。

このような最悪な状況において、プロジェクト・マネージャー川口淳一郎氏は強烈なリーダーシップを発揮し、再度、タッチダウンに挑んだ。「はやぶさ」はこの 2 回目のタッチダウンの後、イトカワの表面で 3 回バウンドしたことが、のちの解析から明らかになった。その後、「はやぶさ」は自動的にスラスターを全開にしながらイトカワの表面から離れてセーフモードに入った。ところが、通信が途絶えて 3 カ月間も行方不明になった。

当初の計画では、タッチダウンした瞬間にサンプリングホーンの内側からタンタル製の弾丸をイトカワの表面に打ち込み、この弾丸が破砕する際に巻き上がる粒子をカプセルに格納する予定だった。しかし、実際には弾丸は発射されなかった。というのは、「はやぶさ」のプログラムに不具合が存在したため、発射しようとしてもできなかったのだ。プログラムの不具合はミッション完了後の調査で明らかになった。

小惑星イトカワは、短径がおおよそ 200 メートル、長径がおおよそ 500 メートルの小天体であり、表面重力は極めて小さく、大気と磁場がないため、宇宙空間に直接さらされている（図 10）。このような宇宙環境にあ



図 10 「はやぶさ」試料の環境

る天体を訪れたのは、人類史上、「はやぶさ」が初めてだ。

遮るものがないイトカワの表層は、長期間にわたって、微小隕石や太陽からの水素やヘリウムなどのさまざまな粒子の影響を受けている。言い換えると、イトカワは宇宙環境に直接さらされた物質を、物質科学的に理解するための最高の実験場なのだ。

サンプリングのための弾丸の発射に失敗したことは、逆に取ればわれわれにとって大きな幸運であった。なぜなら、火薬による汚染が回避できたからだ。従って、「はやぶさ」が獲得したサンプルは、たとえそれが微小かつ微量だったとしても、人類がこれまでに手にしたことのない小惑星の表層物質であり、学術的に極めて重要だった。

地球に帰還した「はやぶさ」は大気圏に突入した後、大気との摩擦で燃え尽きたが、サンプルを格納したカ



図 11 再突入カプセルの発見・回収

プセルは、オーストラリアのウーメラ砂漠に計画通りに無事着地した(図 11)。現在帰還中の「はやぶさ 2」のカプセルも今年 12 月に同じ砂漠に着地する予定だ。

回収されたカプセルは、宇宙科学研究所に設置された「はやぶさ試料キュレーションシステム」に運ばれた。

「試料が入っているはずの」サンプルコンテナが開封されたが、肉眼では何も確認できなかった。関係者一同が落胆していたところ、一人の科学者が意を決してテフロン製のヘラでサンプルコンテナの底を擦ると、何と数粒の微粒子がくっ付いていたのである。その後、「はやぶさ」のサンプルコンテナからは数多くの微粒子が回収された。私たちはそれらのうち大きさが 50～70 μm の 5 粒の微粒子を譲り受け、三朝の CASTEM を用いて詳細な初期分析を行った(図 12)。

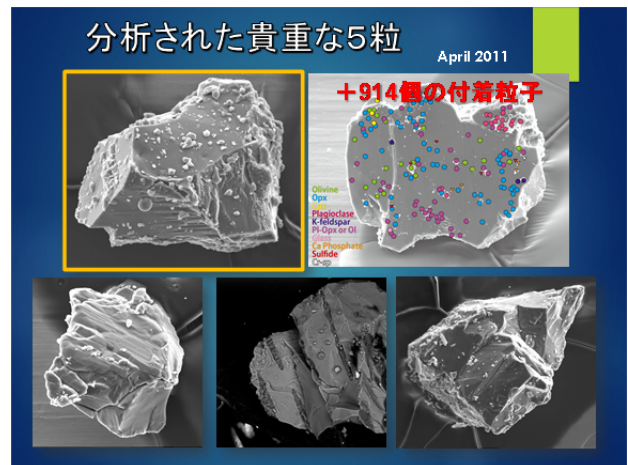


図 12 「はやぶさ」回収試料

イトカワの表面は微粒子からなるレゴリス(堆積層)で覆われている。レゴリスを構成する 5 粒の微粒子がわれわれの手に届いたのだ。物体同士の高速衝突で破碎されて形成されたと考えられるこれらの微粒子は、それぞれに特徴があった。

われわれ以外の初期分析担当チームは隕石との比較に熱心だったが、三朝では独自の観点から解析を進めた。粒子の表面にたくさん付着している微細粒子に着目したのである。粒径 1 μm 程度の粒子 914 個のサイズと化学組成(鉱物相)を決定したのだ(図 12)。このような手間のかかる作業を実施したのは世界中で私たちだけだった。その成果として、統計学的に意味のある解析を実現し、イトカワの表面で起こっている超高速衝突現象に関する理解が深まった。

それらの成果を紹介する。粒子の表面を拡大して観

察すると、割れ目に沿って溶けたようなものが付着していることがわかる（図 13）。これはメルトが急冷して固まったものである。

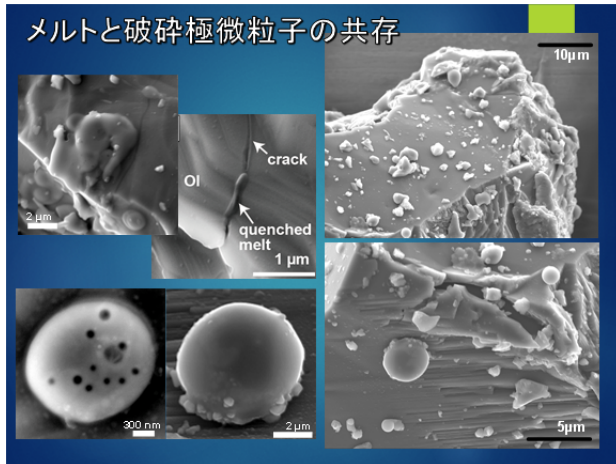


図 13 メルトと破碎極微粒子の共存

さらに極端な付着物として、1μm 以下の真球に近い粒子の一部に、数多くの発泡痕を持つものがあった（図 13）。どの微粒子の表面にも、同じように鉱物が溶けて球になったものが数多く付着していた。これには非常に驚いた。

ナノメーター・クレーターという面白いものも発見した（図 14）。カンラン石の表面にある直径 200 nm 前後のクレーターの縁には、溶けて表面張力によって丸く固まったガラスが数珠のように張り付いていた。穴の大きさはせいぜい 200 nm なので、10~20 nm の微粒子が超高速で衝突したことによってできたクレーターだと考えた。

形状がミスタードーナツの人気商品「ポン・デ・リング」とよく似ているので、私はこれを「ポン・デ・

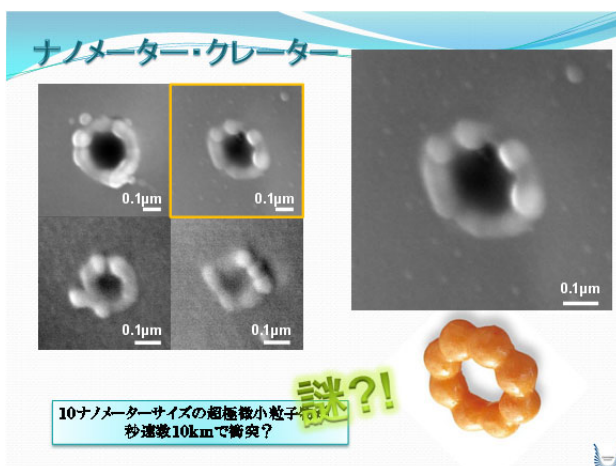


図 14 ナノメーター・クレーター

リング・クレーター」と命名した。ドーナツでならこの形状をつくれるが、カンラン石の表面でどうやって「ポン・デ・リング」がつくられたのだろうか。

10~20 nm サイズの物体が衝突することによって、このような珪酸塩鉱物の融解を伴うクレーターが形成されるには、少なくとも数 10 km/秒以上の速度が必要だ。この形状は、衝突の瞬間にイトカワ粒子の表面において、プラズマ、ガス、メルト、珪酸塩（カンラン石）の 4 相が共存する条件が達成されたことも物語っている。

太陽系において 20 nm 以下の超微粒子を太陽光圧によって数 10 km/秒まで加速させることは難しい。可視光の波長は数 100 nm 以上であり、それよりはるかに小さい 20 nm 径の粒子に対しては、暖簾に腕押しであり、十分に加速させることができない。したがって、太陽系外から超高速で飛来してきた微粒子がポンデリング・クレーターをつくったのではないだろうか。そのような飛翔速度を生み出せるのは超新星爆発（スーパーノヴァ）以外に思いつかない。理論的には、スーパーノヴァなら、10~20 nm 径の超極微粒子を 1000 km/秒程度まで加速させることが可能だという。いずれにせよ、真相はまだ謎である。

サンプルリターンでないと得られない小惑星の表面と宇宙環境に関する重要な観察を行った後、引き続き同じ試料を用いて微粒子内部の解析に取り組んだ。

集束イオンビーム試料加工装置（FIB）を使ってイトカワ粒子を 3 枚にスライスし、中央の厚さ約 10 μm の板状試料の切断面を上にして、柔らかい金属インジウムに埋包した（図 15）。

切断面を琢磨して表面の汚染を物理的に除いた後、超清浄クリーンルームで低濃度のフッ化水素酸や硝酸

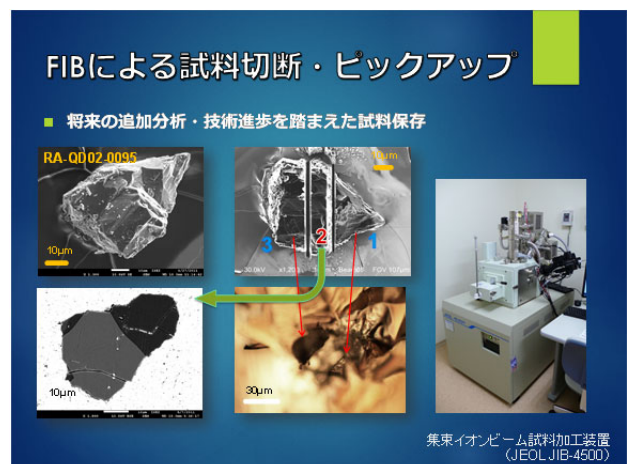


図 15 FIB による試料切断・ピックアップ

で化学的に表面を処理することにより、想定しうるコンタミネーションを限りなく排除した試料を作成した。この下準備によって光学顕微鏡による反射光観察や、平滑で理想に近い表面状態で電子顕微鏡や SIMS などによる確度の高いプローブ分析が可能となった。

電子顕微鏡で見ると、粒子には斜長石やカンラン石など、お馴染みの鉱物が含まれていた。鉱物組み合わせは、地球上に最も頻繁に落下する普通コンドライト隕石の構成鉱物とそっくりだった (図 16)。ようするに、イトカワは普通コンドライト隕石質の岩石からできているのだ。

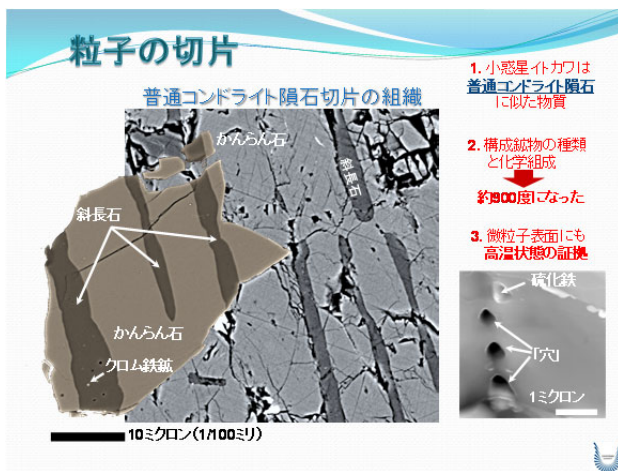


図 16 粒子切片の電子顕微鏡像

コンドライト隕石の中にはコンドリュールという 1mm 以下の球状の粒子が含有されており、それは初期太陽系において 1,500~1,900 °C の高温から急冷されて形成されたと考えられている。イトカワの試料で観察された微粒子はその一部だろう。

構成鉱物の化学組成や組織などを分析し、熱力学的な化学平衡論を当てはめれば形成温度を推定できる。こうした解析の結果、太陽系初期に太陽付近で溶けた珪酸塩の液滴が急冷されて固結し、その後再び 900 °C 近くまで加熱されたことがわかった。さらに、粒子の破断面に観察された 500nm 程度の穴は、イトカワが再加熱して硫化鉄が蒸発して生じたことも判明した (図 16)。小さな微粒子の切片からわかったこうした結論は、隕石研究を専門とする他の初期分析チームの報告とも整合的であった。

イトカワで採取された微粒子が地球起源の混染の結果でないことを最終的に確認するには、その起源識別に最適のトレーサーとなる酸素同位体組成を求める必要がある。高感度・高質量分解能二次イオン質量分析

装置 (HR-SIMS) Cameca IMS-1270 (2016 年鳥取県中部地震によって全損) によって、精密に内製した同位体用標準試料を使って直径 10μm 以下の領域の局所酸素同位体測定を行った (図 17)。



図 17 地球外物質検定 (二次イオン質量分析)

測定の結果、微粒子は地球物質とは異なる同位体組成を持つことが確認された。間違いなく小惑星起源であることが示されたのだ。

さらに同じ試料を用いて、ハロゲン、水素、リチウム、ホウ素などの軽元素を分析し、最後にレアアース (希土類元素) などを含めた微量元素の測定を行った (図 17)。

粒径 50μm 前後の微粒子一粒から、これほど総合的な分析データが得られたのは、もちろん世界初の快挙だった。解析した全 5 粒から得られた分析結果を基に小惑星イトカワの歴史を読み解くと、図 18 のようになる。

まず、太陽の近くで 2,000 °C 近くまで温度が上がって惑星間ダストが熔融し、急冷したものが集積した (普

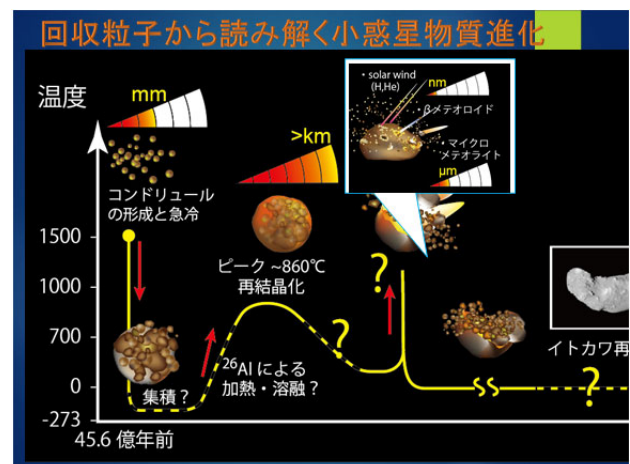


図 18 回収粒子から読み解く小惑星物質進化

通コンドライト母天体の形成、直径 100km 以上) のが 45.6 億年前 (年代測定ができていないために確実ではない) である。

その後、母天体中の消滅核種の ^{26}Al の壊変熱によって再度 900 °C 近い温度上昇を経験したのち、二つの小天体が衝突・破砕された。

そしてその破砕してばらばらになった岩片が再集積して瓦礫が積みあがった (ラブルパイル) 構造を持つイトカワが形成されたと考えた。

ただしこの時点では、衝突がいつ起こり、どのようなメカニズムで岩片が集積したのかはまだ理解できなかった。太陽系の宇宙空間において小さな岩片同士の引力だけでイトカワのような数百 m 規模の小惑星がどのようにして形成され、どれくらい存在できるのかななどの疑問は尽きない。こうした疑問は、次に紹介するチェリャビンスク隕石の分析結果と関連付けて議論する。

イトカワ微粒子の初期分析を通じて、私たちが得た最大の成果は、宇宙空間において太陽風や宇宙塵などの非常に小さな物質が超高速で運動し、衝突していることを物質科学的に初めて認識できたことだ。衝突で破壊された微粒子や溶融物はイトカワの表面に残ることもあるが、重力が極めて小さいため、その大半は宇宙空間に放出され、再び宇宙塵になる。このようなことが繰り返し起こっているのなら、10 億年後には、イトカワは姿を消すことになるだろう。

6. ロシア・チェリャビンスク州落下隕石

2013 年 2 月 15 日、ロシアに大きな隕石が白煙をなびかせながら、雪の積もった氷結した湖面に落下した。直径 1m 弱の岩の塊は氷を突き破り、湖面に直径 8m の円形の穴をあけて水底に沈んだ。この岩体は 2 年後に回収され、現在はチェリャビンスク州の博物館に展示されている。

雪上から発見された数多くの隕石片の表面は大気圏突入時に空気との摩擦で表面が溶融して真っ黒であった (図 19)。

隕石片になる前は大きさが直径約 20m、重さが 13,000 トンの岩の塊だったと思われるこの隕石は、69,000 km/時の速度で大気圏に突入したと推定されている。高度約 30 km で爆発四散し、そのときの衝撃波で約 1,500 人が怪我をしたという。



図 19 ロシア・チェリャビンスク州隕石落下

落下直後に純白の雪で覆われた地表で回収されたこれらの真っ黒な岩石片が直径 20m の小天体の一部だったことは間違いない。そこで私たちは、回収された数 cm サイズの隕石片の岩石学的性質を観察することは、地球表層の露頭のスケールから情報を得る地質学の手法を応用できると考えた。そこで、その元の岩塊全体の正体を探るための詳細な解析を開始した。

落下してから一ヵ月以内にロシア人科学者を通じて入手した十数個の隕石を切断して内部を肉眼で観察すると、隕石は、白い部分、黒い部分、そして両者が混ざったような部分から構成されていた。

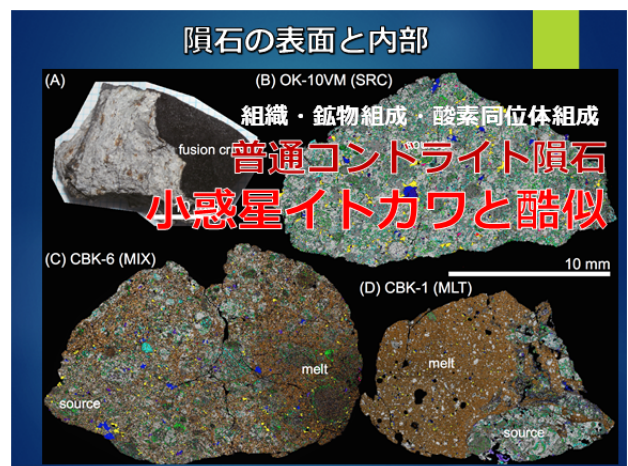


図 20 EPMA コンポジションマッピングによる隕石の内部

電子顕微鏡による組織観察ならびに EPMA によるコンポジションマッピング (図 20)、構成鉱物相解析、SIMS による酸素同位体分析などの結果、白い部分は普通コンドライト隕石に分類され、地球上で最も多く発見されている隕石の一つであることがわかった。ま

た、その化学的な特徴はイトカワの微粒子と酷似していた。一方、黒い部分は白い部分と明瞭な境界を持ち、黒い部分には発泡を伴った球状の硫化鉄やカンラン石の溶け残りの結晶が存在していた。

これらの特徴は明らかに大気圏突入以前に宇宙空間で熔融現象を起こして急冷したことを示している。熔融によって形成されたメルトの急冷相は不均質な産状を示し、メルトの量比が多い部分では、メルトのプールが形成されていた（図 20）。

では、このメルトはどのようにして形成されたのだろうか？「イトカワ」微粒子とは異なり、この隕石の場合では、メルト相の分離・分析に必要な試料が十分にある。高温で同位体平衡に達したことが期待できるため、われわれは TIMS による Rb-Sr 法を用いて年代測定を試みた。その結果、約 3,000 万年前に融解によるメルトが形成されたことが明らかになった（図 21）。

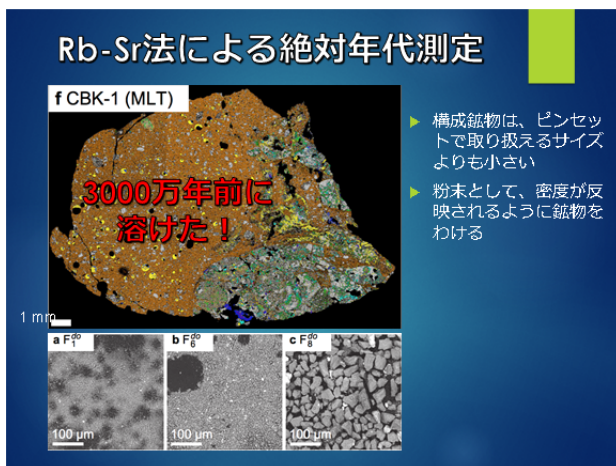


図 21 Rb-Sr 法による絶対年代測定

岩石のメルトが集中する付近には非常に細いメルト脈があり、その内部には、ワズレアイト、リングウッドアイト、マスケリナイトなどの超高压相が残っていた（図 22）。これらの観察からは、約 20 万気圧、2,000 °C まで温度が上がったために局所的に融解したことが読み取れる。

このような小領域での極端な条件は、瞬間的な「衝突」によってのみ生じ得る。3,000 万年前に小惑星クラスの大きな二つの物体が 5 km/秒以上の超高速で衝突した結果、衝突面付近で部分的にメルトが形成されたのだろう。この値は想像していた年代（初期太陽系の形成期）より著しく若く、ほぼ最近の現象とみなすことができる。

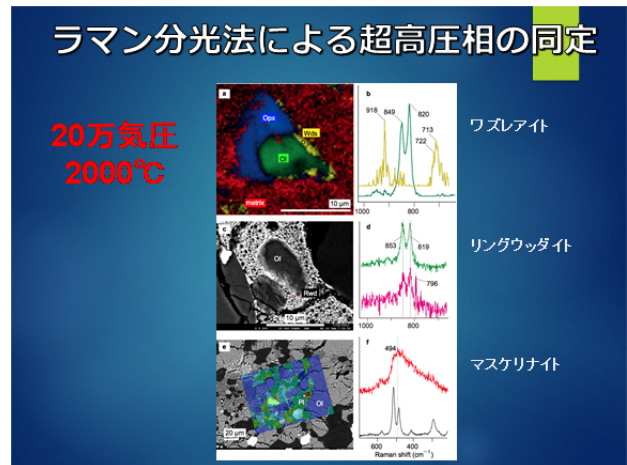


図 22 ラマン分光法による超高压相の同定

小惑星イトカワから読み解いた小惑星の進化史にこの現象を強引に当てはめると、3,000 万年前の衝突によって直径 100 km 以上の天体が破壊されてばらばらになり、その後、個々の岩塊の引力の相互作用によって集積した瓦礫構造を有する 500m 程度の「イトカワ」が誕生したということになる（図 23）。

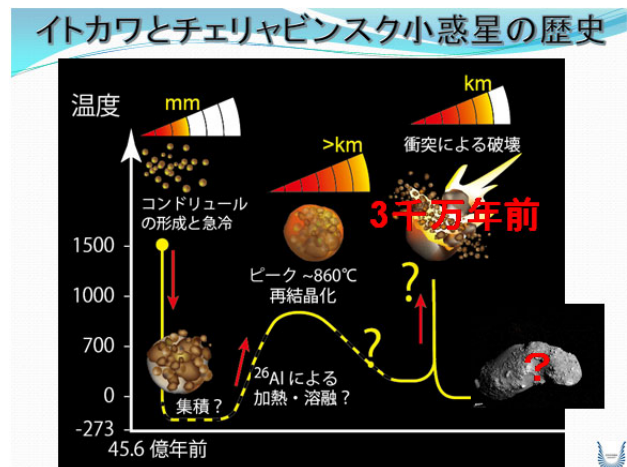


図 23 イトカワとチェリャビンスク小惑星の歴史

小惑星帯における衝突・破壊・集積が極めて短時間で小規模に起こりうるのかという疑問を抱いていたところ、私たちは幸運にもチェリャビンスク隕石の解析から大きなヒントを得ることができたのである。

私たちは、融解部分と未融解部分をそれぞれ隕石から分離し、窒化珪素乳鉢を用いて均質な粉体試料をつくり、四重極型 ICP-MS、高分解能 ICP-MS、マルチコレクション(MC)-ICP-MS、原子吸光、XRF などを用いて、全岩化学分析を行った（図 24）。

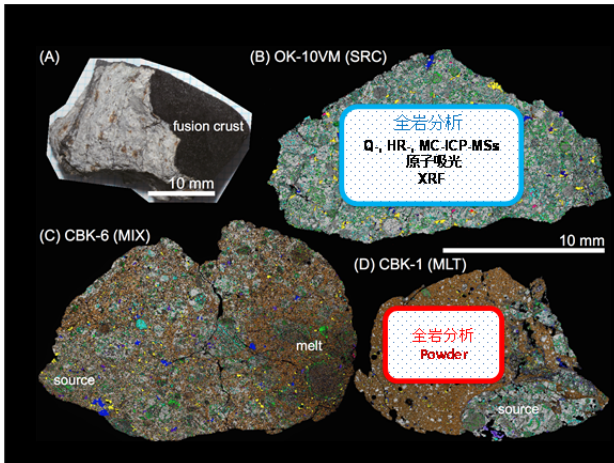


図 24 全岩分析

その一方で、EPMA や SIMS などの局所プローブ分析装置を使って構成鉱物中の水素の量や主要・微量元素の濃度を測定した。これらの数値に鉱物モード組成（量比）を掛けると、全岩化学組成を算出できる（図 25）。

全岩の実測値と局所分析による計算結果を比較すると、計算によって得られた水素とリチウムの量が分析誤差を大きく超えて著しく不足していた（図 25）。

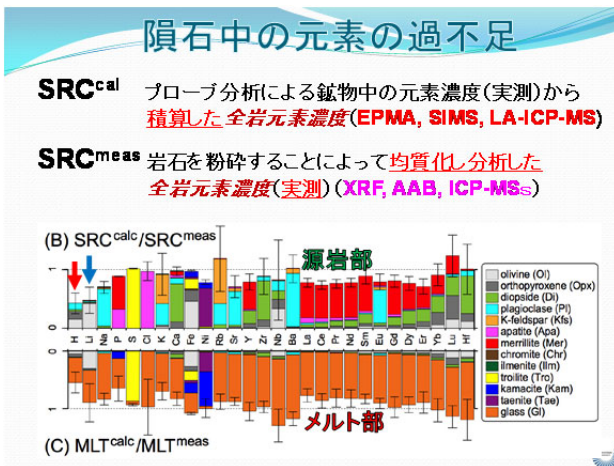


図 25 隕石中の元素の過不足

つまり、局所分析では水素やリチウムを含む微細な鉱物を見逃している可能性があったのだ。われわれは数ヶ月にわたって不一致の原因 (Missing reservoir) を追求した。鉱物組成から推定できる衝突融解前の水素の量は 20 ppm。一方、全岩組成から得られる衝突融解後の水素の量は 100 ppm。5 倍もの違いがあったのだ（図 26）。そこでまず、局所分析で水を大量に含む鉱物を見落としていたのではないかと疑った。

チェリャビンスク隕石中の水(H)の量

- 破壊前 20 ppm (鉱物中)
- 破壊後 100 ppm (全岩中) 5倍に増える！

大気圏突入前の大きさ 約20メートル

無重力に近い

真空の宇宙で

水を加えることは出来ない！

水はどこに？

図 26 チェリャビンスク隕石中の水 (H)の量

宇宙空間においてチェリャビンスク隕石の元となった 20 m サイズの岩塊に水が入り込むとは考え難い。なぜなら、岩塊の重力は極めて微弱で、超高真空の宇宙空間において外部から十分な量の水を集積することは困難だからだ。だが、水がチェリャビンスク隕石のどこかに隠れていることは間違いない！

気合を入れて水を探すと、鉄・ニッケル合金のカマサイトが水と反応した組織（コロフォーム構造）が見つかった。この組織には水素が 6,000～10,000 ppm 含まれていた。

しかし、リチウム濃度は 1～2 ppm であり、周りのカンラン石や輝石中のリチウム濃度と同程度でしかない。宇宙空間で水と反応してこのような構造ができたことはわかったが、これではリチウムの不足を説明できない。リチウムはどこにあるのか？ 次は「リチウムを探せ！」という無理難題に挑むことになった。

試行錯誤するうちに、局所分析用の琢磨試料を準備する際に、研磨剤の水サスペンションを用いることに

リチウムを探せ！

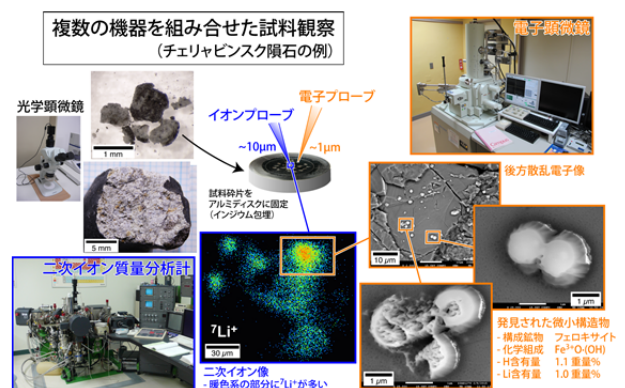


図 27 リチウムを探せ！

Toray Research Center, Inc.

よって試料調製の際にリチウムが溶脱した可能性があることに気づいた。そこで、隕石の小塊をハンマーで軽く叩いて割り、なるべく平滑な表面を持つ 2~3mm サイズの岩片を拾い出してインジウムに押さえつけて埋め込んだ試料を調製した (図 27)。

金で蒸着後、SIMS の O⁻一次イオンビームで試料表面を走査することによってリチウム (⁶Li と ⁷Li) に富んだ場所を 2 次元的に探索した。その結果、高いリチウムイオン・シグナルを示すホットスポットが検出されたので、直ちに SEM で表面を観察した (図 27)。

すると、カンラン石の割れ目の面上に、厚さ約 0.8μm、直径約 1μm の水酸化鉄の一種であるフェロキサイトからなるドーム状の物体が見つかった (図 27)。フェロキサイトは極めて不安定な鉱物であり、地球上では海洋底の熱水噴気孔付近などの特殊な環境でのみで産する。隕石でフェロキサイトが確認されたのは初めてのことだった。そして、そのドームには、リチウムが約 10,000 ppm (1.0 wt%)、水素が 11,000 ppm (1.1 wt%) 含まれていた。これで水素もリチウムもすべてマスマバランスがとれ、“Missing reservoir” に決着がついた (やれやれ)。

次は、リチウムに富んだ水酸化鉄が衝突破壊後の小天体中においてどのように形成されたかを説明しなければならない。先ほど述べたように、一般常識では宇宙空間で 20m 程度の小さな岩塊に水を外から付け加えることは困難である。そもそも、超高真空の宇宙空間のどこに水があるのか？

そうしたことを思いめぐらすうちに、彗星の核 (コア) の関与を思いついた。彗星の核は、およそ 8 割が水の氷であり、残りは、固体の二酸化炭素と一酸化炭素、そしてその他のガスや塵からなる (図 28)。この



図 28 彗星の核に捕獲？

ような氷の塊とチェリャビンスク隕石の元となった岩塊が衝突したらどうなるのだろうかと考えていた矢先、チェリャビンスク隕石の窒素同位体測定結果を記した論文があることに気付いた。

この論文では、200℃以下で回収された非常に重い窒素同位体の組成は、地球大気による汚染の結果と解釈されて議論から除かれていた。ところが実際には、隕石の窒素同位体の組成は彗星のそれとよく似ていたのである。生物による同位体分別作用を考慮しても、地球上ではこのように重い窒素同位体組成を作ることができないのだ。さらには、望遠鏡によるスペクトル観測からは、彗星の窒素同位体の組成は著しく重いことがわかっている。また、チェリャビンスク隕石の水素同位体は木星系の彗星の核のそれとほぼ一致している。以上のことから、チェリャビンスク岩塊に水を供給したキャリアは彗星の核ではないかと考えたのである。

ESA (欧州宇宙機関) が 2004 年に打ち上げた探査機は、10 年かけてチュリモフ・ゲラシメンコ彗星の核に到達した (Rosetta 計画)。



図 29 彗星核に取り込まれた岩塊？

彗星の核の近傍から撮影した画像を見ると、氷が昇華して宇宙空間にジェットとして放出されている様子が明瞭に見て取れる (図 29 右)。核は昇華によって徐々に小さくなっていくのだ。

接近した画像からは、氷の平原に数十メートルサイズの数体の岩の塊が確認できる (図 29 左)。彗星は、太陽系内を周回している間に、小天体の破片に衝突してこれらの岩の塊を捕獲したのだろう。

そこで、直径 10 km 超のある程度大きな氷の塊に、数 km/秒の速度でチェリャビンスク岩塊サイズの直径 20m の小天体が衝突する計算実験を行い、その際の温

小惑星（20m径）と彗星核の衝突 発生する衝撃波によって到達する最高圧力と温度

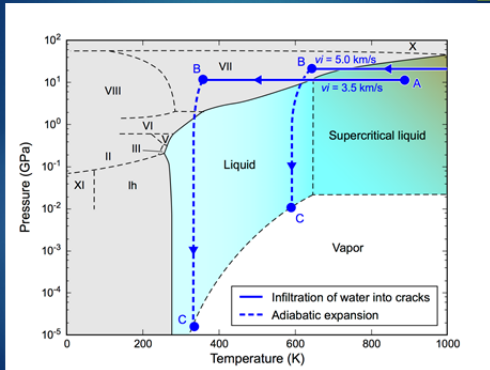


図 30 小惑星（20m 径）と彗星核の衝突

度・圧力の変化に伴う水の相変化を検討した（図 30）。

その結果、小惑星帯での小天体の平均相対速度が 5km/秒の場合、取り込まれた岩石の周りの氷は高温高圧のため“Supercritical fluid”（超臨界水）になることがわかった。粘性が非常に低くて気体に近い物性を持つ超臨界水は、化学反応性が極めて高い。衝突で発生した超臨界水は、岩石の割れ目に沿って容易に侵入する。

そこで私たちは次のように解釈した。侵入した超臨界水は周りの鉱物と反応することによって鉄やリチウムに富んだ流体を形成した。その後、氷（水分子）の昇華による元素の濃縮によって水酸化鉄を主体とする著しく水素とリチウムに富んだ微小構造物を形成した。

まとめると、図 31 に示すように、約 3,000 万年前に二つの小惑星衝突によってチェリャビンスク岩塊を含む破壊岩体が形成され、その後に、彗星が高速で破碎帯域に突入することによって、核が破壊岩体を衝突捕獲した。

3,000 万年前の 2 つの天体の衝突の際に形成された割れ目に加えて、彗星の核との衝突の際にできた割れ

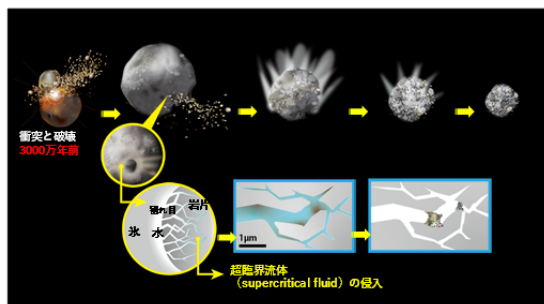


図 31 3000 万年前の二つの天体の衝突と破壊

目に超臨界の水が入り込み、無数の細かな割れ目がある表面と化学反応を起こして、水素とリチウムに富んだ特徴的な鉱物がつくられた。

さらには、彗星の核の昇華が続いて体積が減少することによって、中に入っている岩塊が残り、最終的には瓦礫状構造になったのだろう。

7. 「はやぶさ 2」のミッション

これまで説明したように、小惑星イトカワとチェリャビンスク隕石の研究を関連付けることによって、「はやぶさ 2」が訪れた小惑星リュウグウを含む瓦礫状構造をもつ地球近傍型の小惑星の形成モデルを提示することができる。

「はやぶさ 2」のおもなミッションは、地上の天体望遠鏡によるスペクトル解析によって有機物が多いと推定される小惑星を訪れ、地球の汚染をまったく受けていない有機物を含む試料を宇宙から持ち帰ることだ（図 32）。このミッションにより、太陽系初期の有機物と鉱物などの無機物質との成因的關係が明らかになるだろう。

はやぶさ 2

2014年12月3日 「はやぶさ 2」打ち上げ

2018年 6月27日 リュウグウ到着

- ✓ 小型ローバ（MINERVA-II）、小型着陸機（MASCOT）を投下、表面の直接観察
- ✓ 探査機を表面にタッチダウンさせ、表面物質を採取
- ✓ 衝突装置によって人工クレータを作り、小惑星内部の観察と地下物質の採取

2019年11月13日 リュウグウ出発

2020年末 地球帰還

2021年前半 回収試料初期分析実施

惑星物質研究所が初期総合分析を担当

図 32 「はやぶさ 2」ミッションの概要

有機物を含む地球外物質は、隕石として地球にもたらされるが、有機物が大量に含まれているとしても、隕石が大気圏に突入する際に有機物が選択的に燃え尽きることが考えられる。したがって、リュウグウのような有機物に富む小天体からのサンプルリターンは、われわれが手にしたことのない未知の物質に関する科学的情報をもたらすのではないだろうか。

リュウグウ到着後の「はやぶさ 2」は、起伏に富んだ地形に翻弄されながらも、プロジェクト・マネージ

ヤー津田雄一氏のリーダーシップのもと、極めて挑戦的なミッションを実行し、期待以上の著しい成果を収めたことも付記しておく。

「はやぶさ2」は、2基の小さなローバー（ミネルバ2）をリュウグウの表面に投入し、ホッピングしながら近接撮影を行い、ゴツゴツとした険しい地表の様子を地球に伝えることに成功した。さらに、赤外分光顕微鏡などの科学観測機器を搭載したランダー（MASCOT）の投入にも成功し、鉱物の産状などについてのデータを取得し、成功裏にその役割を終えた。

「はやぶさ2」がリュウグウ近傍に到達して初めて分かったこととして、リュウグウの地表面は荒々しい。一時はタッチダウンの実施を躊躇するほどで、タッチダウンに適した平坦な地表は限られていた。長い時間をかけて安全な着陸地点を模索した末、ピンポイントのタッチダウンを実行した。

一回目の挑戦では、タッチダウン直後に予想外の無数の岩片の巻き上がりに遭遇するが、無事に成功した。

二回目の挑戦では、金属塊（インパクター）を高速でリュウグウの表面に衝突させて形成した人工クレーター付近に再びタッチダウンすることによって、金属塊の衝突によって巻き上がった地下物質のサンプリングに成功した。得られたデータからは、2回とも試料の回収に成功していると考えられる。

小惑星イトカワとリュウグウ

・どちらも地球近傍物体（NEO）

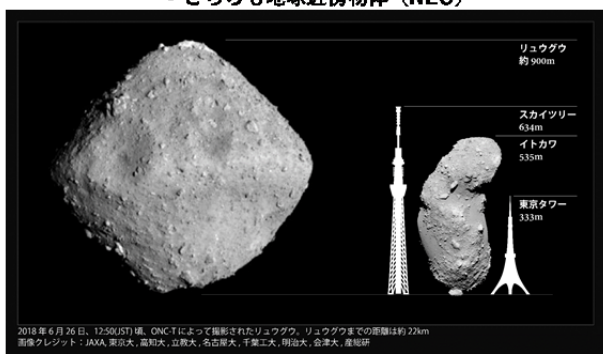


図 33 小惑星イトカワとリュウグウ

「はやぶさ2」は予定されていたすべての任務に加えて精密重力測定などの予定外の運用も実施し、2019年11月13日にリュウグウを出発して地球への帰路についた。2020年12月初めには地球に帰還し、2021年初頭から初期分析が開始される見込みだ。

私たち岡山大学惑星物質研究所 PML は、宇宙科学株式会社 東レリサーチセンター

研究所と連携協定を締結し、初期総合分析を実施するフェーズ2 キュレーション施設（Phase 2 Curation Facility）として回収試料の解析に向けて、有機物を含むあらゆる物質に対する総合的な分析技術の構築を進めている。

リュウグウは、自転軸に垂直方向に算盤玉のように広がった二つの円錐体を重ねたような形状の直径約900mの小天体だ（図33）。

表面には、隕石が衝突した痕跡（クレーター）が200ヵ所以上ある。このように小さな天体に大小さまざまなクレーターが存在することは、最近まで衝突が頻繁に続いたことを意味する。どうやら太陽系空間を周回していると、このような小天体でも、かなりの確率で小岩塊との衝突が起こるようである。

「はやぶさ2」のタッチダウン時の様子を紹介する。ターゲット・マーカーといってソフトボール大のレーザ光を反射するボールをより安全な目的地点付近に落とし、それを基準に精度よくタッチダウンする。

一回目のタッチダウンに際し、実行を躊躇する声も上がったようである。というのは、先ほど述べたようにリュウグウは想定外の非常に荒々しい地形であったため、探査機が大きな岩と衝突する危険性があったからだ。だが、「はやぶさ2」のチームはタッチダウンできる可能性のある場所を徹底的に探索して、候補地を2つに絞り込んだ（図34）。

はやぶさ2試料採取地点の選択

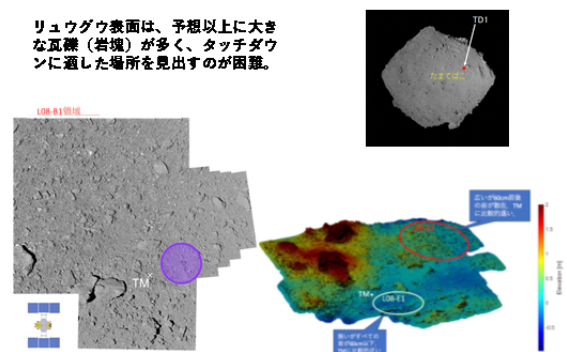


図 34 「はやぶさ2」試料採取地点の選択

面白いことに、彼らは探査機の制御精度を検討したうえで、ターゲット・マーカーに近いが狭くて難しいほうを選び、タッチダウンを見事に成功させた（図35）。その直後、プロジェクト・マネージャーから「手土産」は手に入れた」とのメールを受け取ったときの感激は

今でも忘れられない。

一回目のタッチダウンでは、タッチダウンした瞬間にサンプリングホーン内部に仕掛けられた銃から弾丸を発射してリュウグウの表面を破壊し、試料を採取してからすぐにスラスターを噴いて上空めがけて退避した。まさに「隼」である。

はやぶさ2試料採取の様子



図 35 「はやぶさ 2」試料採取の様子

そのときの動画を見ると（図 35）、リュウグウの表面の色は全体的に白っぽい、舞い上がった板状の物体は、タッチダウン直後は探査機の陰の影響から全体が黒く見えたが、探査機から離れるにつれて物体の回転に伴って白・黒と色変化することがわかる。

このことからリュウグウの表面は白っぽい、内部は黒いことが示唆される。これは従来考えられてきた隕石（珪酸塩鉱物）の宇宙風化による光の反射率の変化では説明できないのではないかと直感した。

前述した小惑星イトカワのように、空気も磁場もない宇宙環境では、太陽風による宇宙風化が激しく、小惑星の表面は高速で飛来する水素やヘリウム粒子の衝突に曝されている。その結果、隕石の構成鉱物の大半を占める珪酸塩鉱物中の鉄イオンは還元され、ナノメートル・サイズの鉄の粒子が形成される。そのため、珪酸塩で構成される物質のほとんどは、宇宙風化によって反射率が下がって黒っぽくなるはずだ。しかし、リュウグウでは宇宙風化で黒いはずの表面は白く、宇宙風化の影響を受けにくい内部は黒い。これは従来の宇宙風化の理屈に合わない。

リュウグウを構成する物質は、当初の想定とは異なるのではないかと考えはじめていたところ、アスファルトなどの真っ黒な高分子有機物に水素やヘリウム粒子を照射するとグラファイト粒が形成されるため、

反射率が上がって白っぽくなるという実験論文を発見した。

そもそもリモートセンシングによって有機物の多い小惑星とされたリュウグウで期待される構成物質は、炭素質コンドライト隕石に類似したものであった。その炭素含有量は3%程度であり、残りの97%は珪酸塩鉱物や硫化物からなる。したがって、炭素質コンドライト様の物質の場合、宇宙風化によって反射率が減少して黒っぽくなるのが推定される。一方、有機物が100%に近い場合なら、反射率が上昇し白っぽくなる（図 36）。

宇宙線による小惑星表面の宇宙風化

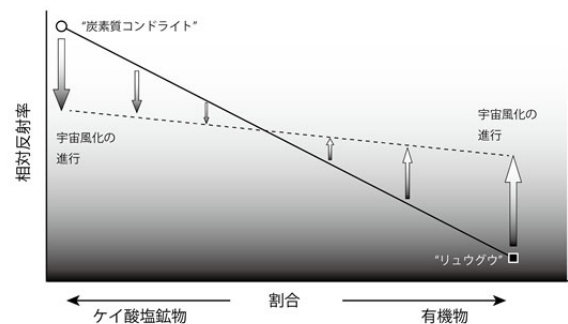


図 36 宇宙線による小惑星表面の宇宙風化

この関係からは、リュウグウの表面の宇宙風化による反射率の変化は両者の重量比の変化によって説明できる。マスバランスを計算すると、リュウグウは60%以上の有機物から構成されていることになる。

われわれはこの予測を国際学術誌に”Hypothesis Paper”として投稿した。査読は終了し、公表直前となっている。「はやぶさ 2」が持ち帰る試料を実際に分析すれば、この仮説を物質科学的に検証できる。われわれ自身で自分たちの予測を検証できることが今から楽しみでならない。

リュウグウの算盤玉のような形態はどのようにしてできたのだろうか？

氷上で回転するスケーターは、はじめは腕を広げているが、次第に腕を曲げて体に近づけることによってスピンの速度を上げる。スピンの速度が上がるのは回転半径が小さくなるからだ。

チェリャビンスク隕石の解析を踏まえると、リュウグウの起源は、太陽系内を周回する彗星の核による岩塊の捕獲によるものであり、彗星が太陽に接近した際

の核を構成する氷の昇華によって、捕獲された岩塊が中心へと集まって瓦礫状構造を形成し、有機物の濃縮がなされるであろう。その際、当然ながら核体積（核半径）の減少が起き、角運動量が保存されるのなら、氷を失った現在のリュウグウは、当初よりはるかに大きなスピン速度を得るはずだ。

リュウグウの形状についても、次のように説明できる。スピン速度が上がれば、スピン軸に垂直な方向である赤道付近に最も遠心力が働く。だからこそ、リュウグウの形状は算盤玉状になったのではないか（図37）。

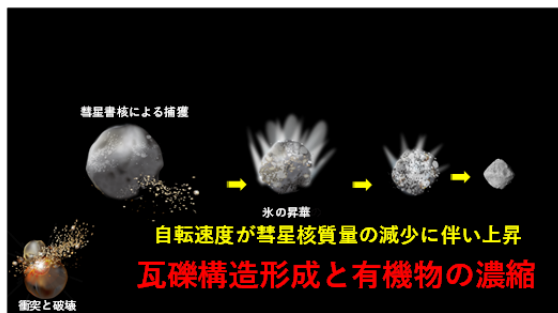


図37 瓦礫構造形成と有機物の濃縮

「はやぶさ2」が持ち帰る試料が、著しく有機物に富んだ物質であるなら、「なぜ、そのような隕石が地球上で発見されていないのか?」、「宇宙空間でどのような有機物がいかなる状態で存在するのか?」、「500℃以下の低温で安定な有機物と千数百度の高温で形成された鉱物は、いつどのようにして共存するようになったのか?」など、さまざまな疑問に迫る物質科学研究を展開することができる。これらの疑問に迫ることこそが、サンプルリターン・ミッションの最大の醍醐味だろう。

8. 生命の起源

人類最大の学術的興味の一つである「生命の起源」を考えるにあたり、生命の材料物質は約46億年前の地球誕生以降に、アミノ酸やその他の有機物として宇宙から降ってきたという仮説が有力視されている（図38）。このような生命起源の有機物質に関する情報入手という観点からも、「はやぶさ2」が持ち帰る試料の詳細解析への期待が高まっている。

誕生直後の地球は、微惑星のじゅうたん爆撃によって形成されたマグマの海（マグマオーシャン）に覆わ

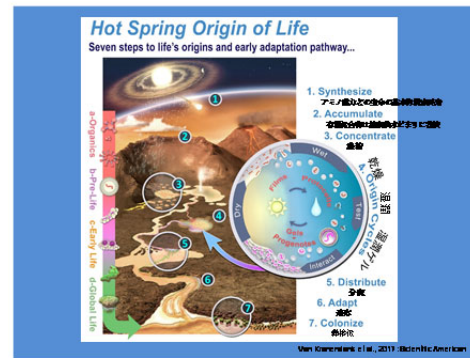


図38 Hot Spring Origin of Life

れ、上空数100 kmまで高温の水蒸気と二酸化炭素に取り囲まれていたと考えられている。

やがて微惑星の衝突が収まり、地球の表面温度が下がると、地殻が形成され、水蒸気は水となり、40億年前には、地球の表面は海で覆われるようになった。ちなみに、西オーストラリアの岩石からは、44億年前のジルコンが発見されている。この時点ですでに地殻が形成されていたという可能性も指摘しておきたい。

しかし現時点では、このような過酷な環境下ですでに生命が発生していたかどうかはわかっていない。現在確認されている地球最古の生命の痕跡は、西オーストラリア・ピルバラ地域に産する35億年前の温泉堆積物中から発見されたバクテリア様の化石である。

近年、生命の起源説の潮流は、海底熱水噴出孔起源説から陸上温泉場説に移りつつある。なぜなら、海底熱水孔の周囲は大量の水（海）であり、必然的に生命誕生に必要な分子は希釈・拡散せざるをえないからだ。

前者の説では、化学反応の進展によって細胞膜や代謝系といった生命に不可欠な構造を形成することは難しい。一方、後者の説では、陸上の火山性の温泉から派生する無数の貯留池（プール）は、化学反応を促進させるための熱エネルギーに加え、干上がったり湿ったりを繰り返す乾湿サイクルが存在し、このサイクルから生じる分子種やイオンの濃縮と環境擾乱にともなうエネルギー変化によって、化学的な多様性を形成、増進させることができる。

図38で示すように、宇宙から降ってきた生命の基本的な構成要素であるアミノ酸などの有機物は、火山性の熱水活動（温泉）に取り込まれ、陸上の温泉水の乾湿サイクルを経て生命の元となるスープがつくられたのではないかと考えられている。そしてこのスープの中で鎖状の核酸などの重合体が合成され、さらに膜で囲まれた原始的な

細胞（プロトセル）が形成されたというのが、現時点での生命誕生の有力なモデルである。

9. 火星の生命探査

地球の生命が陸上の温泉で誕生したとすると、火星はどうだったのだろうか？（図 39）



図 39 火星で生命の痕跡を探す、どうやって？

約 43 億年前、火星の北半球は海に覆われていたと考えられている。地球のようなマントル対流によって駆動するプレートテクトニクスは認められておらず、海洋地殻を形成する中央海嶺やそれともなう海底熱水噴出孔は地質学的に確認されていない。

もし、生命誕生に海洋底での熱水噴出孔が必要だったのなら、火星で生命が誕生した可能性は低い。しかしながら、火星にも地上の温泉に必要なマグマ活動と水が存在していたことを考慮すると、火星でも生命が生まれた可能性は高いのではないだろうか。

2008 年、NASA の火星探査車（ローバー）「スピリット」により、Columbia Hills（図 40）の Home Plate（野球のホームベースに似た台地）付近には、火山性噴気孔と思われる硫酸塩の溶脱した丘や、温泉または間欠泉の熱水沈殿物と考えられるシリカ堆積物が広範囲に存在することがわかった。

とくに、搭載した熱赤外分光光度計（Mini-TES）を用いた水を含んだ潜晶質のオパールシリカ（Opaline silica; $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ）層の発見により、火星における生命の発生と保存の可能性は著しく高まった（図 41）。

この堆積物はスポンジ状であり、直径 5 mm 程度の手の指が乱立するような手指状の特徴的な構造を持っている（図 42 左）。表面は滑らかだが、内部は空隙が

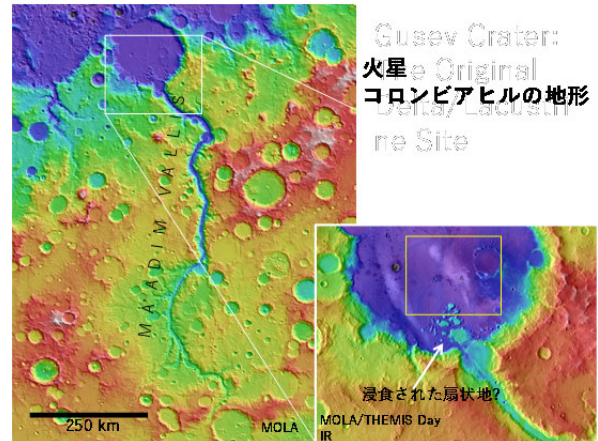


図 40 火星コロンビアヒルの地形



図 41 Home Plate Opaline α

多い。ローバーの車輪で掘り起こされて露出した地下に埋もれていた部分の内部構造は表面と同様であるため、この構造は砂嵐で削られてできたものではなく、元々の構造である。

これと同様の化学組成と形態を持つシリカ堆積物は、アメリカのイエローストーンやニュージーランドのタ

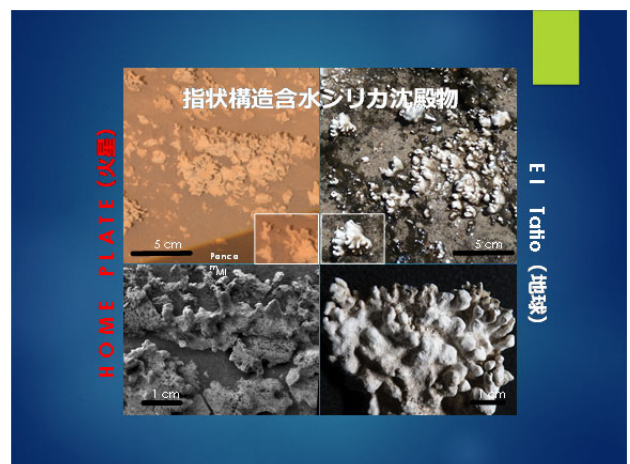


図 42 指状構造含水シリカ沈殿物

ウポ火山地域などの温泉地で普遍的に認められる。また、降水量が極端に少なく、強烈な紫外線に曝される標高約 4,300 m のチリ・アタカマ砂漠に位置する El Tatio 間欠泉には、手指状のシリカ堆積物の層が形成されており、これは火星の Home Plate 付近にあるものと酷似している（図 42 右）。

間欠泉は、噴出口から定期的に多くの化学種を溶かし込んだ高温の水を地表に吹き上げ、この温泉水は冷えながら下流へと流れ、多くのプール群をつくる。

噴出が止まると、地表では乾燥が始まる。温泉水と大気境界付近では、溶存物質が析出でき、プールには晶出沈殿物が堆積する。すなわち、間欠泉は湿潤と乾燥を繰り返し、周囲に特徴的な化学沈殿物を形成する。

El Tatio 間欠泉に産する手指状シリカ沈殿物を伸展方向に切断して観察すると、珪化したシアノバクテリア（藍藻）の死骸や火山岩起源の微細な鉱物やガラスなどからなる破碎微粒子が混在する層が重なり合い、空隙に富んだ微細層状の構造を持つマイクロストロマトライトを形成していることがわかる。

これはオーストラリアのシャーク湾などの限られた環境において、シアノバクテリアがつくりだす直径 1m を超えるドーム状のストロマトライトと基本的に同じ構造を持つ。シアノバクテリアは、地球上で最初に生まれた酸素発生をともなう光合成細菌であり、高温・高塩分濃度、乾湿循環、高紫外線など、過酷な環境でも生息できるうえ、自ら珪化層を形成することによって生存環境を構築する。

このようにして形成されるマイクロストロマトライトは、最終的にシアノバクテリアの形態を保存する極めて特徴的な珪酸を主成分とする硬い岩石になる。

もし、「スピリット」によって観測された火星の手指状シリカ堆積物が地球の El Tatio 間欠温泉のマイクロストロマトライトと同様にバクテリアが関与した生成物であるなら、その中に生命の痕跡を形態として見出すことができるであろう。

ただし火星の場合、地球に比べて非常に磁場が弱い上に希薄な大気（地球の 1/100 の大気圧）しか持たないため、地上における紫外線の影響は、地球のそれに比べて著しく大きい。したがって、たとえ生命起源の有機物が形成されたとしても、紫外線によって破壊され、現在では単純な低分子量の分子種となっているため、有機物が生命存在の直接的な証拠にはならない

だろう。

生命が誕生した可能性の高い Columbia Hills の地質年代は、約 35 億年前と推定される。地球でさえ 16 億年よりも古い生物由来の有機物は発見されていないことを考慮すれば、形態に加え、生命活動に関連する変質・変成に耐えうる有機物に代わる新たな化学的バイオマーカーを開発する必要がある。私たちはその準備を進めている。

その一つがホウ素同位体だ（図 43）。ホウ素は生命の起源に大きくかかわっていると考えられている。温泉水から原始的な RNA をつくるには、リボースが必要だが、そのままでは重合を重ねるだけでアスファルトのような粘度の高い高分子にしかならない。しかし、ホウ素が十分に存在する系では、ホウ素はリボース分子として RNA の形成反応と安定化に寄与することが知られている。

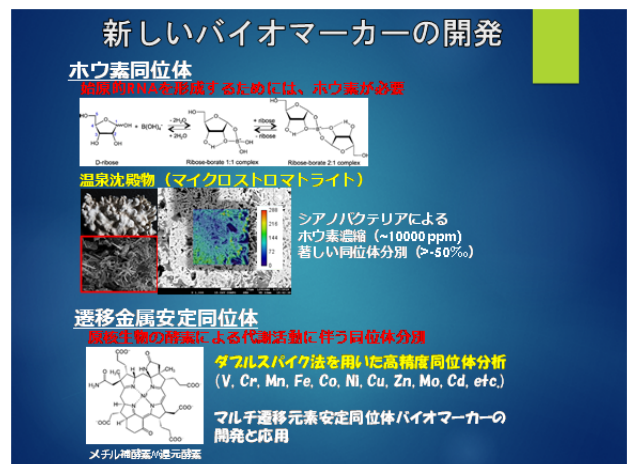


図 43 新しいバイオマーカーの開発

さらに、最近の発見として、ホウ素は生命の起源や太古代の生物の痕跡を明らかにするために非常に重要な元素としての可能性を秘めていることがわかった。

予察的に El Tatio 間欠泉の手指状シリカ沈殿物のホウ素の含有量とホウ素同位体の組成をそれぞれ SIMS と TIMS で測定したところ、珪化したシアノバクテリアには 10,000 ppm もの大量のホウ素が含まれ、 -50% と極めて低いホウ素同位体を示した（図 43）。これは明らかに生物学的な同位体分別を示していると考えられ、ホウ素のバイオマーカーとしての可能性を示している。現在、そのメカニズムの解明に取り組んでいるところだ。

もう一つの新たな化学バイオマーカーは、遷移金属の安定同位体である（図 43）。高分子有機化合物であ

る酵素と結合して触媒機能を発揮する遷移金属は、生物の成長や生命維持に必須の微量元素である。

原核生物の酵素分子の中心には、Ni や Cr などの遷移金属が組み込まれており、代謝活動でわずかながら同位体分別を起こす。しかし、その程度が極めて小さいため、分析が困難だったが、最近の MC-ICP-MS の進化にともない遷移金属元素の高精度同位体分析が可能になりつつある。

私たちは多くの遷移金属の化学的単離を試み、ダブルスパイク法を用いて MC-ICP-MS における装置による同位体分別の補正を行うことによって、高精度同位体分析を可能にしている。これらの遷移金属の安定同位体に加えホウ素同位体や炭素・窒素同位体を組み合わせ、現在の間欠温泉シリカ沈殿物（マイクロストロマトライト）に適用することが次のステップだ。その結果を踏まえ、バイオマーカーとしての評価を行い、生物学的な同位体分別メカニズムを明らかにする必要がある。

これらのステップを経た後、変質を含む続成作用や変成作用に対して「頑強なバイオマーカー」としての適応性を評価してから、地球最古の 35 億年前の間欠泉堆積岩の解析に応用する予定である。

もし、「スピリット」が火星の Columbia Hills の Home Plate 付近で発見した手指状のオパーリンシリカの塊を採集して地球に持ち帰ることができれば、私たちは先ほど述べた新たなバイオマーカーを用いて火星生命の有無を明らかにできるに違いない。

私たちはこの目的に特化した火星生命物質のサンプルリターン計画（LifeSprings）の実現に向けて動き出した。

日本の 30 歳前後の若い宇宙エンジニアたちがこの計画に（図 44）に興味を示し、手弁当で Home Plate からのサンプルリターンを実現するシステムの検討を開始したことは喜ばしいかぎりであり、われわれ地球惑星科学者に大きな勇気を与えている。

NASA が計画している Mars2020 から始まる大型のサンプルリターン計画では 8000 億円近くの予算が見込まれている。一方、われわれが目指すのは、「スピリット」によって詳細な地質がすでに確認された地点に赴き、ごく限られた量（数グラム）の特定の試料を採取して地球に持ち帰るだけの極めてスリムな計画だ。軽量かつ単純な探査システムを構成することで、NASA の予算よりも一桁以下で実施できるに違いない。

今後 10-15 年以内にこの計画を実現させ、火星から持ち帰る試料を CASTEM で詳細に分析・解析することによって地球以外の天体において生命が誕生し、生物が活動したことを実証できれば、宇宙における生命の普遍性が明らかになり、人類にとって極めて意義の高いミッションになると確信している。



図 44 火星からのサンプルリターン計画

中村 栄三（なかむら えいぞう）

岡山大学 惑星物質研究所 PML 教授