



東北大学



平成23年8月26日

東北大学

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

放射光技術で解明した小惑星イトカワの形成の歴史

【発表のポイント】

- 放射光 X 線回折分析^{*1}により、小惑星イトカワの微粒子サンプルの鉱物組成を世界で初めて分析した
- イトカワは、LL4~6 コンドライト隕石に類似した物質でできている
- イトカワの母天体の中心部分は、かつて約 800℃まで上昇し、衝突現象と再集積により、現在のイトカワになった

1. 概要

東北大学大学院理学研究科・理学部地学専攻中村智樹（なかむら ともき）准教授らは、高解像度電子顕微鏡や大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構（鈴木厚人機構長：KEK）と大型放射光施設 SPring-8^{*2}の放射光 X 線を用いて独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）の小惑星探査機はやぶさ搭載の帰還カプセルにより持ち帰られた微粒子サンプルを分析し、小惑星イトカワの物質構成と形成の歴史を世界で初めて解明しました。

イトカワのように地球近傍に接近する小惑星は、太陽系形成の初期において原始太陽系星雲を構成するダストが集積し、太陽系で初めて誕生した微小天体であると考えられています。従って、小惑星のサンプルを分析することにより、太陽系形成当時の鉱物組成を知ることができます。また熱的変成の履歴を調べることにより、小惑星の形成史を知ることができ、惑星形成の初期段階についての知見を得ることができます。地球に飛来する隕石の多くは、小惑星から飛来していると考えられてきましたが、本当に小惑星起源かどうかを確認することができます。

今回、小惑星探査機はやぶさが持ち帰った小惑星イトカワ表面の微粒子サンプル 38 個（粒径 30~150 ミクロン）について、放射光 X 線回折分析（図 1）と高解像度電子顕微鏡分析（図 2）を用いて詳細な鉱物学的研究を行いました。その結果、この 38 粒子は LL コンドライト^{*3}のかけらであることが確定しました（図 3）。また 38 粒子には、天体内部で高い温度で加熱された粒子とそうでない粒子があることがわかりました（図 2）。すべてのデータを総合することにより、小惑星イトカワの起源と形成過程に関して以下の事柄を解明することができました（図 4）。

『イトカワの母天体の大きさは直径 20km 程度と考えられ、中心部分の温度は約 800℃まで上昇し、その後、ゆっくりと冷えた。その後、大きな衝突現象が起き、飛び散った破片が再集積したものが現在のイトカワとなった。』

今回の成果は人類史上初めて得られた地球近傍小惑星のサンプルの初期分析による

ものであり、今後、詳細な分析を続けていくことで、初期太陽系における微小天体形成のプロセスや天体形成後の表層物質の変成過程などの解明が加速するものと期待されます。

なお、この研究成果はイトカワのサンプルを他の手法により分析した他の 5 編の論文とともに、米国の科学誌 *Science* の「イトカワ特集号」として 8 月 25 日（現地時間）にオンライン版に掲載されました。

2. 研究開発の背景と目的

地球に飛来する隕石は、その化学組成が揮発性元素を除き太陽の化学組成に近いことから、太陽系で最も未分化で原始的な物質であると考えられています。隕石の反射スペクトル^{*4}が小惑星のそれと似ていることから、隕石は小惑星から飛来してきていると考えられてきました。しかし、隕石と小惑星の反射スペクトルの細部が合わず、本当に隕石が小惑星から飛来しているのかはこれまで不明でした。中村准教授らの研究グループでは、小惑星探査機はやぶさが回収した S 型小惑星イトカワの微粒子を放射光 X 線回折分析などによる鉱物学的研究を行うことにより、反射スペクトルで予想された LL コンドライト隕石物質に類似しているかを突き止める研究を行いました。

3. 研究の手法

放射光 X 線回折分析により、完全非破壊で微粒子内部に存在する鉱物の種類と割合を知ることができます。中村准教授らは KEK 放射光科学研究施設フォトンファクトリー(PF)の BL-3A において小惑星イトカワの微粒子（粒径 30~150 ミクロン）一粒一粒をガンドルフィカメラ^{*5}に設置し、単色化された放射光 X 線（波長約 2 Å 程度）を照射しました。X 線回折により微粒子から生じた回折 X 線をガンドルフィカメラ内のイメージングプレートに記録し、微粒子の構成鉱物の情報を得ることに成功しました。使用した BL-3A は PF にある硬 X 線ビームライン中で最高強度の X 線を利用でき、微量試料を検知することができます。また、高強度であることから分析時間も短縮され、一微粒子の測定時間は 10~30 分程度で高解像度の X 線回折データを得ることができました。KEK で分析を行った結果を精査し、斜長石が多く含まれる試料については、さらに SPring-8 内に設置された物質・材料研究機構のビームライン (BL15XU) にて詳細な X 線回折分析を行いました。なお、SPring-8 では田中雅彦氏（現 物質・材料研究機構）が改良を行った高分解能ガンドルフィカメラを用い、田中氏とともに分析を行いました。

4. 得られた成果

38 粒子の X 線回折分析を行った結果、イトカワ粒子を構成する鉱物は、カンラン石が最も多く、次にカルシウム (Ca) に乏しい輝石、Ca に富む輝石、斜方石、量は少ないが良く含まれる鉱物として、トロイライト (硫化鉄)、テーナイト (鉄ニッケル金属)、クロマイトなどがあることがわかりました。この鉱物組み合わせは地球岩石にはなく、コンドライト隕石特有のものです。また、カンラン石が最も存在度が高いということは、電子顕微鏡を用いた分析とも整合的であり、イトカワ微粒子が LL コンドライト的物質であることを示しています。この結果は、小惑星イトカワが太陽系の最も始原的な物質で構成されているということを示す重要な成果といえます。

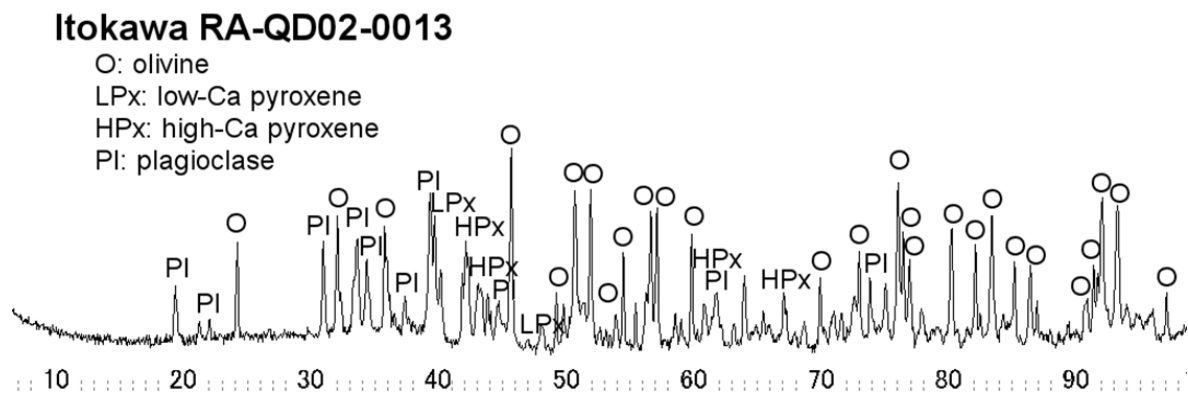


図 1 : KEK フォトンファクトリーの放射光を用いて取得したイトカワ微粒子の X 線回折パターン
完全非破壊で微粒子(100 ミクロン程度)内部に存在する鉱物の種類と存在度を知ることができる。
この粒子の場合、主な構成鉱物がカンラン石 (O)、Ca に乏しい輝石(LPx)、Ca に富む輝石(HPx)、
斜長石(Pl)であることがわかる。

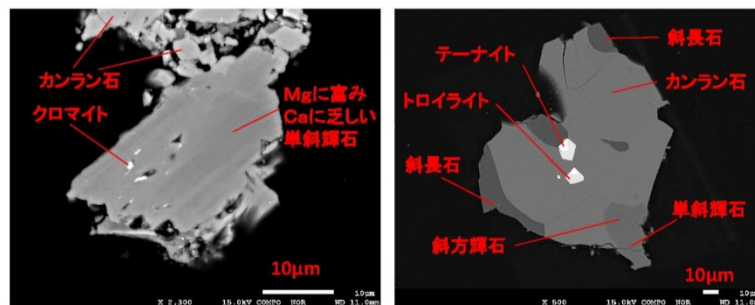


図 2 : 天体内部での加熱の影響が少ない LL4 粒子(左)と加熱の影響が大きい LL5 - 6 粒子(右)
の電子顕微鏡画像
左図の Mg に富み Ca に乏しい単斜輝石には暗い部分と明るい部分が存在し、これは結晶内部
での元素分布の不均一性を示す。一方、右図の結晶にはそのような不均一性は存在しない。

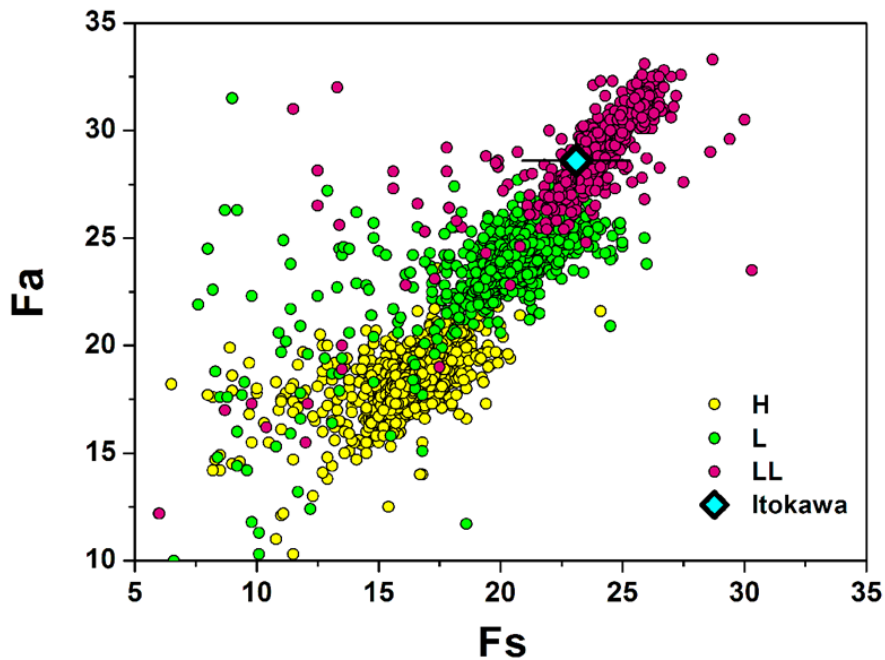


図 3：電子顕微鏡で分析した 38 粒子に含まれるカンラン石とカルシウムに乏しい輝石の平均化学組成

Fs とは、カルシウムに乏しい輝石中の鉄/(鉄+マグネシウム)モル比 (単位はパーセント)。Fa とは、カンラン石中の鉄/(鉄+マグネシウム)モル比 (単位はパーセント)。

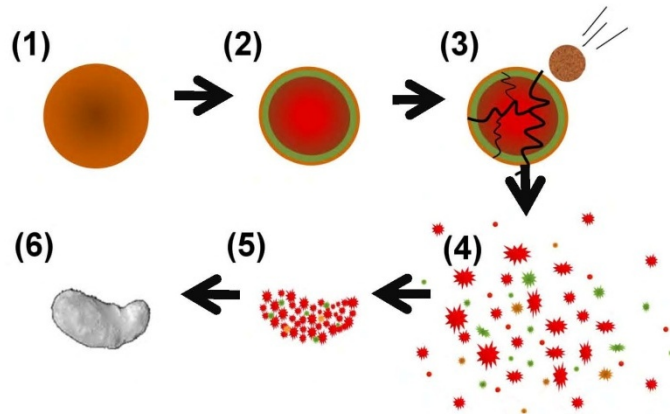


図 4：イトカワの形成史

(1)原始太陽系星雲でコンドリュールなどの起源物質が集積し、イトカワの母天体を形成。(2)直径約 20km に成長し、天体内部が 800℃ 程度まで加熱。赤は高温部分(LL5-6)。緑は低温部分(LL4)で、起源物質の情報を残している。(3)天体が冷却後、イトカワ母天体上で大きな衝撃現象が起こり、天体を破壊。(4)破壊された天体のかげらは、ほとんどが宇宙空間に散逸。(5)一部のかげらが再度集まり、イトカワを形成。LL3-6 の角礫岩形成。(6)宇宙風化作用が進行し、現在のイトカワへ進化。

5. 今後の予定

本研究成果は、小惑星探査機はやぶさがイトカワに2回目にタッチダウンした際に得られた試料を分析した結果によるものです。今後は、1回目にタッチダウンした際に得られた試料に対し、同様の放射光を用いたX線回折分析を行い、2回目のタッチダウンに得た試料の鉱物学的特徴と比較検討を行う予定です。これにより、小惑星イトカワ表層物質の、場所による均一/不均一性を調べることができます。この視点は、イトカワの細粒領域（ミューゼス地域）がどのようなプロセスで形成されたかを知る上で、重要な証拠になると考えられています。

【用語解説】

※1 放射光 X線回折分析

ほぼ光速で進む電子の進行方向に対し、磁石などによって曲げると発生する極めて強度の強い電磁波を「放射光（シンクロトロン放射）」と呼ぶ。放射光のうち、ある波長領域のX線を利用して、その回折パターンから微粒子に含まれる鉱物の種類とその割合、結晶の向きなどを決定することができる。また、結晶中の原子間距離などを調べることで鉱物が作られた環境を知る手掛かりが得られる。特に、放射光X線は強度と平行度が高いので、回折ピークをシャープにして、測定精度を上げることができる。

※2 大型放射光施設 SPring-8

兵庫県にある大型放射光施設。「放射光（シンクロトロン放射）」を提供する共同利用施設。国内外の研究者の共同利用施設として、物質科学・地球科学・生命科学・環境科学・産業利用などの分野で利用されている。

※3 LLコンドライト

隕石はその成分により、石質隕石、石鉄隕石、鉄隕石に分けられるが、石質隕石のうちコンドリュールという主にケイ酸塩鉱物（カンラン石、輝石）から成る、直径約1mm程度の大きさの小球体を含むものをコンドライトと呼ぶ。コンドライトは、金属鉄の含有率や珪酸塩鉱物中の鉄の含有率などでさらに5つの種類（Eコンドライト、Hコンドライト、Lコンドライト、LLコンドライト、炭素質コンドライト）に分類されるが、そのうちH、L、LLコンドライトの3種をまとめて「普通コンドライト」と呼んでいる。さらにそれぞれのコンドライトの熱変成度に応じて3から6までの数字を付加して分類する。

※4 反射スペクトル

光が物質表面で反射する際の波長ごとの反射率の違いによる強度分布のこと。小惑星が太陽光を反射する様子を地上から観測することで、色、アルベド（反射能）、

反射スペクトルの違いから大きく炭素質（C型）、ケイ素質（S型）、金属質（M型）に分類される。

※5 ガンドルフィカメラ

微小試料（直径 5～200 ミクロン）の X 線回折分析を行う X 線カメラである。試料は、極細（直径約 5 ミクロン）の炭素質ファイバーの先端に固定され、カメラ内部に設置される。カメラ内部は真空に保たれ、カメラのコリメータで絞られた直径 300 ミクロンの放射光がカメラ内の試料に照射される。試料は、カメラ内部で歳差回転をしており、様々な試料面が X 線に対して露出される。試料の回折 X 線は、カメラ内に設置されたイメージングプレートに記録される。その結果、複数の鉱物から構成される微小試料の鉱物種、割合を知ることができる。

【本件に関する問い合わせ先】

（研究内容について）

東北大学大学院理学研究科・理学部

地学専攻 准教授 中村 智樹（なかむら ともき）

TEL:022-795-6651

E-mail: tomoki@m.tohoku.ac.jp

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

物質構造科学研究所 准教授 中尾裕則（なかお ひろのり）

TEL: 029-879-6025

E-mail: hironori.nakao@kek.jp

（報道担当）

東北大学大学院理学研究科・理学部 教育研究支援部 広報室

陶山 香奈子（すやま かなこ）

TEL:022-795-6708

Email : suyama@mail.sci.tohoku.ac.jp

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

広報室 室長 森田洋平（もりた ようへい）

TEL: 029-879-6047 E-mail : press@kek.jp