

初期太陽系における固体物質の生成と進化： 惑星科学フロンティアセミナー 2019参加報告

田崎 亮¹

1. はじめに

今年の惑星科学フロンティアセミナーは、旭川から北へ約40 kmの場所に位置する剣淵温泉レークサイド桜岡において開催された。今回は立命館大学/中国科学院広州地球化学研究所の土山明氏を講師に迎え、「初期太陽系における固体物質の生成と進化」というテーマで2日間、朝から夕方までご講演いただいた。今年も全国から学生・ポストク・スタッフら総勢25人が参加し、活発な議論が行われた(図1, 図2)。講義内容の詳細は、後日講義ノートや講義動画が公開されるため、そちらに譲るとして、ここでは筆者の視点から講義のハイライトを簡単に紹介する。

2. 講義概要

講義の内容は、次の3つのパートに分類できるであろう:「鉱物・隕石入門」、「始原物質の分析・再現実験」、そして「リターンサンプルの分析」。以下では、筆者のメモを参考に、それぞれのパートについて簡単に紹介する。

2.1 鉱物・隕石入門

(1) なぜ鉱物なのか?

「鉱物とは天然に産出する単体・化合物である。」講義は鉱物を定義することから始まった。鉱物を調べることで、その化学組成や結晶構造、またはその鉱物が経た履歴といった情報を読み解くことができる。実際に、隕石や惑星間塵に含まれる鉱物を調べることで、

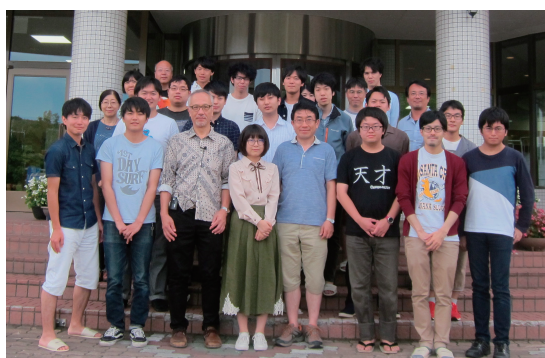


図1：参加者の集合写真。



図2：講演中の様子。イトカワ粒子に宇宙風化作用の痕跡として残るブリスターの形成実験について話す土山氏。

太陽系の天体がいつ、どこで、どのようにできたのか、こうした謎を紐解くことができるのである。これこそがまさに本講義のメインテーマであった。

(2) 隕石の分類と母天体

次に、隕石に関する基本事項が紹介された。隕石は、その化学組成や岩石学的なタイプによって様々な種類に分類されている。地球に落下してくる隕石の約8割

1. 東北大学大学院理学研究科天文学専攻
rtazaki@astr.tohoku.ac.jp

はコンドリュールと呼ばれるmmサイズの球状の組織を含むコンドライト隕石である。さらに、コンドライト隕石は普通コンドライトや炭素質コンドライトなどに分類される。さて、こうしたコンドライト隕石はどこから来たのだろうか。コンドライト隕石中の組織を保つためには、母天体で分化が起ってしまったはいけない。そのため、天体サイズの比較的小さな小惑星が母天体だと考えられている。また、小惑星帯の天体のスペクトルとの対応から、普通コンドライト隕石の母天体はS型小惑星、炭素質コンドライト隕石の母天体はC型小惑星であると考えられている。なお、前者の対応関係は、2.3節で述べるように、はやぶさ探査機のリターンサンプルによって検証された。

(3) 太陽系物質の二分性

隕石の分析にまつわる最新の話題の一つとして、太陽系物質の二分性の話題が取り上げられた。近年、コンドライト隕石は炭素質のものと非炭素質のものと異なった同位体比を持つことが指摘された[1]。異なる物質的性質を示す母天体の存在は、初期太陽系においてそれぞれの天体形成領域が分け隔てられていた可能性を示唆する。この発見に対して、現在世界中のグループによって更なる研究が進められているところである。惑星形成論の研究を行なっている筆者にとっても非常に興味深い話であり、今後の研究の展開に注目したい。

2.2 始原物質の分析・再現実験

講義は次第に、土山氏の行ってきた数々の実験や分析の話題に移っていった。ここでは、そのうちのコンドリュールとGEMS(Glass with embedded metal and sulfides)粒子の再現実験について紹介する。

(1) コンドリュール再現実験

コンドリュールは球形の粒子であり、これらは原始太陽系星雲におけるコンドリュール前駆物質の融解イベントによって球形になったと考えられている。また、コンドリュールの組織にはいくつかの種類(斑状組織、棒状、放射状など)がある。多様なコンドリュールの形成条件を明らかにするために、講義では土山氏が行なった再現実験が紹介された[2]。その結果、融解の完全性、冷却率の違い、ガスの組成といった条件に応じて形成されるコンドリュールの組織が変化し、実際に隕石で見られる組織を再現可能であること指摘し

た。コンドリュールの組織の作り分けの条件は明快であり、印象的であったが、その一方で、全ての実験で整合的な結果が得られているわけではないという点について会場では議論が巻き起こった。

(2) GEMS粒子の起源

彗星由来だと考えられる種族の惑星間塵にはGEMS粒子と呼ばれる非晶質珪酸塩の粒子が含まれている。GEMS粒子の特徴は、大きさ約100-500 nmの非晶質珪酸塩粒子に鉄や硫化鉄などのナノ粒子が埋め込まれている点にある。GEMS粒子の起源を巡って2つの説が論争中である。一つは「星間塵説」であり、GEMS粒子は星間空間で結晶質珪酸塩が非晶質化したものという説である[3]。この説の主な根拠は、GEMS粒子の赤外線スペクトルが星間塵のものと類似していること、GEMS粒子中に微小結晶が含まれていることが挙げられる。もう一つは「太陽系起源説」であり、GEMS粒子は原始太陽系星雲においてガスから直接凝縮したという説である[4]。こちらの主な根拠は、GEMS粒子の多くは太陽組成を持っているという点、GEMS粒子表面の鉄が硫化している点、などが挙げられる。

土山氏らの研究グループでは、GEMS粒子はそもそも凝縮で形成可能なのか？可能ならどのような条件が必要か？という疑問に答えるべく、GEMS粒子の凝縮による再現実験が行われてきた[5]。講義では、こうした実験を通して明らかになってきたGEMS粒子の凝縮過程が議論され、GEMS粒子の太陽系起源説を支持する結果が紹介された。

さて、GEMS粒子の中には、同位体異常を示すいわゆるpre-solar GEMSが少数ながらも存在する(168個中4個)。これらは晩期型星の星周領域で凝縮したものと考えられる。pre-solar GEMS粒子の研究は、星間塵の磁場への整列過程や、星間空間における「鉄の行方不明問題(Iron-missing problem)」と関連するため重要である。GEMS粒子の再現実験やその分析は、彗星の起源の理解だけでなく、星間空間の研究においても非常に重要であるといえよう。

(3) 初期太陽系固体物質の形成・進化の統一的理解に向けて

講義では次に、始原的な炭素質コンドライト隕石に含まれるマトリクスが話題となった。このマトリクスは主に非晶質珪酸塩で構成されており、GEMS粒子との物質的な類似性がある。そこで土山氏は、講義でこ

れまでに出てきた話題(2.1(3)節, 2.2(1)節, 2.2(2)節)を統合し、原始太陽系星雲における固体進化に関する新たな仮説を紹介した。それは炭素質コンドライト隕石のマトリクス、GEMS粒子、そしてコンドリュールは実は同様の加熱イベントで形成されたのではないか、という仮説である。要するに、原始太陽系星雲における局所的な加熱イベントによって、固体が完全に蒸発した領域では、その後の再凝縮によってGEMS粒子や炭素質コンドライト隕石のマトリクスが形成され、固体が融解する温度に留まった領域ではコンドリュールが形成されるという案がある。この仮説を言い換えると、従来GEMS粒子の形成領域として太陽近傍の高温領域が想定されていたが、必ずしもその必要はないという指摘でもある。こうしてできた物質が集積して炭素質コンドライト隕石の母天体となり、また物質が低温領域に輸送されたものは隕星となる。この仮説は、原始太陽系星雲における大規模な物質循環を必要とせず(ただしCalcium-aluminum-rich inclusionsは例外)、その意味で2.1(3)節に述べた太陽系物質の二分性の観点とも調和的である。もちろん、この仮説は今後さらなる検証が必要となるであろう。事実、この仮説に関して、講義中や懇親会において実に多くの議論が交わされた。

この仮説の真偽はさておき、隕石の分析や、始原物質の再現実験の視点を統合し、初期太陽系星雲で起こった一連の現象を探るこのプロセスこそ、本講義「初期太陽系における固体物質の生成と進化」の一つのハイライトであったと筆者は思う。

2.3 イトカワのリターンサンプルの分析

もう一つの講義のハイライトは、やはりリターンサンプルに関する話題であろう。はやぶさ探査機が小惑星イトカワから地球に持ち帰った粒子の入ったカプセルの回収や、イトカワの粒子の分析について、当時の思い出話や苦労話を交えて紹介された。

まず初期の分析に関して、X線トモグラフィーを用いたイトカワの粒子の鉱物の同定が議論された[6]。特に、複数のエネルギーバンドでX線トモグラフィーを行うことで鉱物を同定する手法が紹介された。こうした分析を経て、イトカワ(S型小惑星)の粒子の物質的性質は普通コンドライトのものと整合的であることが判明し、S型小惑星が普通コンドライト隕石の母天

体であることが明らかになった。さらに、イトカワの粒子の表面に宇宙風化の痕跡であるプリスターが発見された。宇宙風化は太陽風の照射により、粒子表面に鉄のナノ粒子が析出する現象であり、スペクトルの暗化・赤化を引き起こす。この宇宙風化作用によって、普通コンドライト隕石とS型小惑星の可視光・近赤外線スペクトルの違いが説明可能であることもわかってきた。

講義は最後に、はやぶさ2探査機が現在探査中のC型小惑星リュウグウのリターンサンプルへの期待が述べられ、講義は無事に終了した。

3. 最後に

講義では、スライドによる説明に加えて、実際に鉱物標本(カンラン石、単斜輝石、頑火輝石、磁硫鉄鉱、斜長石、鉄隕石の薄片、炭素質コンドライト)や3Dプリンターで作成したイトカワの粒子の模型が回覧されるなど、参加者が手にとって物質を観察する場面もあった。また、科学的な議論に加えて、様々な室内実験でのハプニングなどもユーモアを交えて紹介され、室内実験や分析の話題に馴染みのない筆者でも、その様子を身近に感じることができた。

さて、ここでは紹介しきれなかった話題も数多くあるため、本記事の講義概要を読んで興味をお持ちになった方は是非、講義動画や講義ノートをご覧頂ければと思う。最後に、二日間を通して非常に熱い講義をしていただいた土山氏と、本セミナーを企画いただいた世話人の皆様に深くお礼を申し上げたい。ありがとうございました。

参考文献

- [1] Warren, P. H., 2011, E&PSL 311, 93.
- [2] Tsuchiyama, A. et al., 1980, E&PSL 48, 155.
- [3] Bradley, J. P. and Dai, Z. R., 2004, ApJ 617, 650.
- [4] Keller, L. P. and Messenger, S., 2011, GeCoA, 75, 5336.
- [5] 松野淳也ほか, 2015, 遊星人 24, 2.
- [6] Tsuchiyama, A. et al., 2011, Science 333, 1125.