

「質量分析で拓く宇宙・地球科学の最前線 ～地球惑星科学における装置開発の重要性～」講演会の報告

寺田 健太郎¹，豊田 岐聡²

1. はじめに

太陽系の物質は、驚く程に同位体比が均質である。逆に、この地球化学的な特徴(大前提)を利用して、0.01 – 0.1%程度の同位体比の違い(同位体異常)を検出することで、

〔1〕物質起源の同定

隕石母天体の推定，地球規模の大規模物質循環の指標(トレーサー)，生物起源・非生物起源の判定，食生解析など

〔2〕核反応や放射壊変の情報

元素合成の情報，放射元素を用いた年代情報，宇宙線による核破碎反応，太陽風照射履歴の情報など

〔3〕物理的・化学的・生物学的分別過程に関する情報

蒸発・凝縮，光合成などの情報，古環境における海水温情報の復元など

を紐解く事ができる。概して、このような同位体は化学的特性が似ているため化学分離による分析は難しく、質量の違いで分離する手法【質量分析】が一般的である。本講演会では、「質量分析で拓く宇宙・地球科学の最前線」と題し、宇宙科学・惑星科学・地球科学の最前線で活躍する研究者に、これまで分かってきたこと、直面している問題点、それを克服するにはどのような装置開発が必要か、などについて分かり易く解説していただいた(表1)。



図1：豊田によるプレゼンの1コマ。「阪大質量分析グループの歴史」について。

2. 講演内容ほか

まず始めに、篠原厚・理学研究科長より開会の挨拶があり、その後、豊田による本講演会の趣旨説明、および大阪大学の質量分析学の歴史のレビューがあった(図1，図2)。惑星科学分野においてはあまり知られていないが、阪大の質量分析グループは、1930年代後半に国内で最初に質量分析装置を開発して以来、長い装置開発の歴史があり、二重収束質量分析装置『CQH^[注1]』や、「8」の字型のマルチターン飛行時間型質量分析計『MULTUM^[注2]』のような独創的なイオン

注1. CQHとは、松田久らによって開発された二次二重収束質量分析計である。円筒電場(cylindrical electric sector)と四重極レンズ(quadrupole-lens)と一様磁場(homogeneous magnetic sector)からなるシステムで、電場と磁場の間に四重極レンズを入れることで6個の2次収差係数を小さくしている。

注2. MULTUMとは、イオンを同一飛行空間で複数回周回(マルチターン)させることで飛行距離をかせぎ、小型でありながら高分解能が得られるマルチターン飛行時間型質量分析計である。飛行時間型としては世界最高の質量分解能35万を達成し、世界的に非常に高く評価されている。

1. 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

2. 大阪大学大学院理学研究科附属基礎理学プロジェクト研究センター
terada@ess.sci.osaka-u.ac.jp

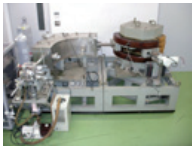
質量分析の歴史		
世界の動向 放物線型質量分析器 (J.J. Thomson, 1912) 方向収束質量分析器 (Dempster, 1918) 速度収束質量分析器 (Aston, 1919) 装置の改良, 同位体測定 (Aston) 二重収束質量分析器 (Dempster, 1935) 原子質量の精密測定, 同位体分離・濃縮, 地質年代測定法の確立, 炭化水素混合物の測定 飛行時間型質量分析計 (Stephens, 1946) 高精度原子質量測定, 高分解能装置の開発 Bainbridge (10万), Nier (6万) など 四重極, イオントラップ (Paul, 1953) スパッター源, CI, FDなどのイオン化法 GC/MS 有機化合物の測定 SIMS フーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴質量分析計 (Marshall, 1976) 生体高分子の測定 ESI (Fenn, 山下, 1984) LD MALDI (Hillenkamp, 田中, 1991) プロテオーム, メタボローム オービトラップ (Makarov, 1999)	1910年代	阪大質量分析グループの歴史  国内初の質量分析装置 (Bainbridge-Jordan型) マグネットは国立科学博物館に寄贈 日本初の質量分析装置 Bainbridge-Jordan型 (浅田, 奥田, 分解能8000, 1939)  緒方・松田型 終戦後~1951年, 分解能90万, 61年の第二宮戸台風時に中之島で水没。64年に豊中に移動して改良型を再製作。分解能40万~50万をつねに発揮 緒方-松田型 (緒方, 松田, 分解能90万, 1951)  r-1 磁場型の世界最高分解能120万を達成 阪神大震災で破壊。国立科学博物館に寄贈 大分散質量分析器 r ¹ (松田, 世界最高質量分解能120万, 1968) おろち (緒方, 分解能80万, 1969) CQH (松田, 分解能24万, 1972) 三次近似イオン軌道計算ソフトTRIO (松尾, 1976)  CQH 短寿命核の測定用に開発。その後、生体高分子やクラスターの測定に活用 六重収束飛行時間型質量分析計 (桜井, 1985) GEMMY (松田, 1988)  GEMMY マグネットが9tある大型装置。蛋白質の測定を狙って開発 1990年代 MULTUM (豊田, 1998)  六重収束飛行時間型質量分析計 直径40cmで飛行距離1.7m。六重収束のイオン光学系、分解能2000。
	1920年代	
	1930年代	
	1940年代	
	1950年代	
	1960年代	
	1970年代	
	1980年代	
	1990年代	
	2000年代	

図2: 質量分析の歴史.

光学系の装置開発を行ってきた。

次に寺田が、まさに阪大質量分析グループが1970年代に考案したCQH型のイオン光学系をもつ年代分析装置SHRIMP (Sensitive High Resolution Ion Micro Probe) で見えてきた太陽系年代学の新しい視点と、現行の2次イオン質量分析計SIMSの問題点を紹介し

た。筆者は前職・広島大学で日本で初めてのSHRIMPを立ち上げ、以来17年にわたって岩石・隕石試料の局所U-Pb年代分析を行ってきた経験がある。

丸岡照幸氏は、独自の軽元素・質量分析計の装置開発と、それをを用いた生物活動を読み解くツールとしての同位体分析の可能性について示した。炭素同位体・

表1：講演会「質量分析で拓く宇宙・地球科学の最前線」のプログラム。

「質量分析で拓く宇宙・地球科学の最前線 ～地球惑星科学における装置開発の重要性～」

【日時】 2013年12月20日（金）13:00-20:00頃

【場所】 大阪大学大学院理学研究科H棟701号室（セミナー室A）

【世話人】 寺田健太郎、豊田岐聡（阪大理）

13:00-13:15 篠原厚（阪大理・研究科長） はじめに

豊田 岐聡（阪大） 阪大で開発されてきた質量分析装置

13:15-14:00 寺田健太郎（阪大） 局所絶対年代分析で拓く太陽系の歴史

14:00-14:45 丸岡 照幸（筑波大）生物活動を読み解くための同位体分析

14:45-15:30 角野 浩史（東大） 噴火に伴う火山ガスの同位体組成変動

<休憩>

16:00-16:45 佐々木 晶（阪大） 探査機 on-site 質量分析が拓いた太陽系科学

16:45-17:30 橘 省吾（北大） はやぶさ2：近地球C型小惑星リターンサンプルに我々は何を問いかけるか

17:30-18:15 矢野 創（JAXA） 将来の深宇宙探査構想における、その場質量計測・帰路試料分析の重要性

18:15-20:00頃 Closing & 立食懇親会

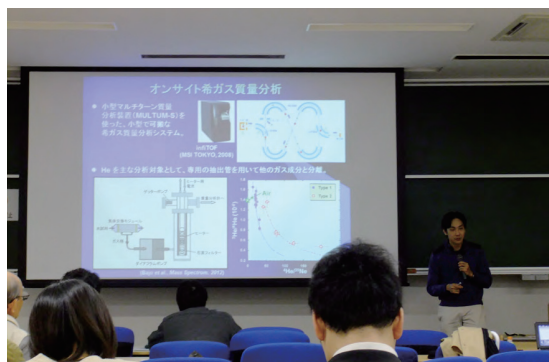


図3：角野氏によるプレゼンの1コマ。「on-site質量分析の重要性」について。

窒素同位体比を組み合わせると食物連鎖の生態系を読みとくことできるというのは、筆者には目から鱗であった。

角野浩史氏（東大）からは、火山噴火直前のヘリウム同位体比の変動などについて紹介があり、火山周辺地域における火山ガス・温泉ガスの同位体組成連続モニタリングの重要性、さらには、そのためのポータブルなオンサイト質量分析装置の開発の重要性が述べられた（図3）。

休憩をはさみ、後半のセッションでは、主に惑星探査の観点から3つの講演があった。まず、「on-site 質量分析が拓いた太陽系科学」と題し、佐々木晶氏（阪大）に、歴代の火星・金星・彗星探査機に搭載された質量分析装置が明らかにしたハイライト研究をレビューしていただいた。

橘省吾氏（北大）は「はやぶさ2で明らかにされるサイエンス」と題し、C型小惑星からのリターンサンプル分析の重要性と、分子雲→初期太陽系円盤→微惑星→地球型惑星という流れの中で、地球にもたらされる以前の生命材料の進化を追う事的重要性を説いた。

最後に、矢野創氏（JAXA）より、将来の深宇宙探査構想では、雪線を越えた外惑星領域での有機物・揮発成分の高精度分析が主要課題の一つであることが強調された。そのうえで「その場」あるいは地球への帰路中の質量計測の重要性と、探査機搭載に向けた次世代質量分析計の開発要素（完全電離、高分解能、汚染管理、軽量化、小型化、省電力など）が示された。氏の講演において、当講演会では初めての「アストロバイオロジー」という単語が出ると、惑星科学を専門としない聴衆も多くが魅了され、講演会の熱気は最高潮に達した（図4）。

聴衆は約60名で、学内はもとより、全国から参加者があった。また、Twitterやfacebookで宣伝したこともあり、地元の高校生や、科学館の学芸員、高校の理科教諭、私が教養教育で電磁気学を教えている医学部生達も参加してくれたことは望外の喜びであった。懇親会では、物理系、化学系、生物系の学生や教職員が参加し講演者を囲んで活発な議論が行われ、地球惑星科学への関心の高さ、期待の大きさを感じることができた。元来、地球惑星科学は学際領域分野であり、古典的学問体系でいう所の物理・化学・生物・地学の英知を結集し、初めて解き明かされていく研究分野で



図4：矢野氏によるプレゼンの1コマ。「アストロバイオロジーとは…」について。

ある。講演会后、学外からの参加者の一人がtwitterで「分野(専攻)間の垣根に捉われず、純粋にサイエンスへの興味だけでオール阪大でサポートしあうチームワークの良さが、会場からのコメントに窺えたのが印象的でした」というつぶやきがあったことは嬉しい限りである。そのような場が、短時間であっても実現できたことは本望であり、今回の講演会が今後の学際共同研究のきっかけになればと願っている。

3. おわりに

現在、全国の地球惑星科学系の大学・研究所において、2次イオン質量分析系(SIMS)、ガスクロマトグラフィー質量分析計(GC-MS)、飛行時間型質量分析

計(TOF-MS)、表面電離型質量分析計(TIMS)、誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS)など、様々な市販の質量分析計が利用されている。この事は、元素分析・同位体分析が地球惑星の諸現象を解き明かす非常に強力なツールであることを意味する。一方で、火山や深海底などでのオンサイト同位体分析や、はやぶさ微粒子やプレソーラー粒子の重元素同位体分析など、現行の分析技術では困難なサイエンスに直面しているのも事実である。今後、新しいサイエンスを切り拓くには、汎用の市販の装置では不十分で、研究対象に特化した独自の装置が不可欠である。

大阪大学理学研究科では、世界的にみてもユニークで長い伝統と実績をもつ質量分析学を「扇の要」とした組織改編を行い、2011年に基礎理学プロジェクト研究センターを新設した。現在、【これまで見えなかったものを観よう】を合い言葉に、学内外の研究機関、産学界と連携しながら、「ニーズ(最先端理学研究)とシーズ(最先端技術開発)のマッチングによるフロンティア研究」を推進しはじめたところである(図5)。今後、皆様のご支援、ご声援を頂ければ大変有り難い。

4. 謝 辞

本講演会は、大阪大学未来研究イニシアティブ・グループ支援事業「MULTUMで切り拓くオンサイトマススペクトロメトリー」により支援されました。

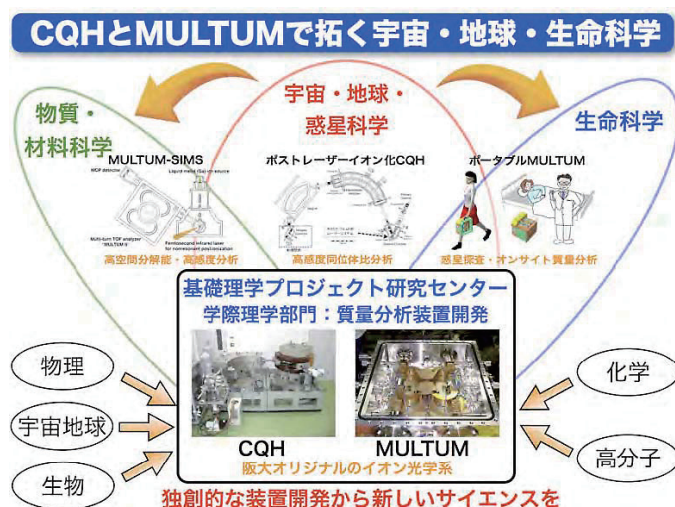


図5：「ニーズ(最先端理学研究)とシーズ(最先端技術開発)のマッチングによるフロンティア研究」構想図。