

小惑星探査のための質量分析装置

青 木 順

1 はじめに

宇宙については科学的に未解明な事象がまだ多くあり、我々人類が生活する太陽系についてもその起源や成り立ちは十分に解明されていない。地球を含めた惑星の形成過程や固体物質の物質科学的な進化、さらには生命の起源となる有機物の生成といった解明すべき課題が残されている。このような問題を解明する手掛かりは、太陽系形成初期の情報が残っている始原的天体に求めることができる。近年、このような始原的天体の探査ミッションとして、はやぶさによる小惑星イトカワの探査やロゼッタによる Churyumov-Gerasimenko 彗星の探査といったミッションが成果を上げている。さらに、はやぶさ2が目的地である小惑星リュウグウに到着し、サンプル採取ミッションの順調な進捗状況のニュースが折に触れて届けられており、現在も、次の小惑星探査ミッションが JAXA 宇宙研を中心とした研究グループによって検討・立案されている。このような小惑星探査の目的は、太陽系の形成および進化の過程を明らかにすることにあるが、そのためにはなるべく形成時のままの状態を保ったサンプルに含まれる始原的な痕跡を調べる必要がある。大きな惑星の場合、その重力の大きさから地殻作用や、地表面の気体による気象現象があり、それらの現象は試料の状態を決定的に変えてしまう。したがって、太陽系の初期形成時に生成した石ころや砂つぶ状の物質が少量だけ集まった小惑星であればそのような変成のリスクがないので、始原的な痕跡を残しており探査の目標として適している。さらに、試料を変成させる要因は他にもあり、太陽に近いほど光や太陽風によって物質の変成が起こりやすくなる。したがって、原始太陽系の痕跡は太陽から遠い場所、太陽系の外側の天体ほどより状態よく保存されている。特に、有機化合物の生成に大きな役割を果たしていると考えられている水が保存されることは重要である。宇宙空間で水が揮発せずに存在できる太陽からの距離である 2.7 AU（この境界線は雪線と呼ばれている）以遠では始原的な状態で水が保存されており、この雪線を超える長距離探査が太陽系形成史の解明する上で大きな意味を持つ。

これまで、はやぶさシリーズが着陸した小惑星の太陽からの距離はおおよそ 1.5 AU 以内と雪線の内側であったのに対し、次期探査では雪線の外側にある小惑星を目

指している（図 1）。具体的には、木星の軌道上のラグランジュ点と呼ばれる重力と遠心力が釣り合い、小天体が軌道的に安定して存在しやすい場所にあるトロヤ群と呼ばれる小惑星群を目指し、この中の小惑星の一つに着陸探査することを目標としている。木星軌道は 5.2 AU であり、十分に雪線の外側であるが、地球からの距離が遠い。そのため、これまでのはやぶさシリーズに比べてミッション時間が長くなり、到着までに約 12 年を要し復路も同じ時間がかかる。サンプルリターンのみを行うと仮定した場合には、サンプルを持ち帰り研究成果が出るまでに 25 年以上の年月がかかる。宇宙の研究というのは一般に長期的な時間感覚で進むものであるが、さすがに長すぎるミッション期間になる。したがって、次期プロジェクトでは小惑星上でのオンサイトの分析に主眼を置くことで、10 年後（これでも十分長いという声もあるかと思われるが）の小惑星到着時にまず測定データを得ることができるよう計画している。ここで^{そじょう}上がるのが、オンサイト分析のためにどのような計測機器を持って行くのかという選択である。これを決めるために参考となるのが、現在地球上の研究室で行われている分析の中で、小惑星上で予定されている分析ともっとも類似性があるはやぶさサンプルや隕石の分析である。ここで主に使用されている手法として、質量分析、

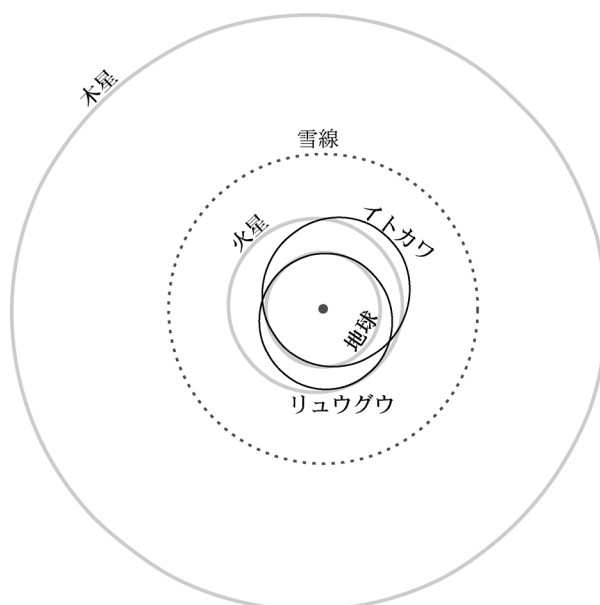


図1 太陽系における位置関係

分光, NMR などがあげられる¹⁾²⁾。計測機器として小惑星探査機への搭載を考えた場合に、もっとも重要な制限事項はサイズと重量である。この制限を考慮すると、質量分析の場合には四重極型や飛行時間型のような小型のタイプに限られ、分光の場合には可視光の周辺領域でレーザーなどのコンパクトな光源を使用する小型のタイプに限られることになる。NMR については、現状では探査機に搭載できるようなサイズのものは存在しない。探査機への搭載可能性のある質量分析と分光の特徴を非常に大まかに比較すると、質量分析は得られる情報量は多いが直接測定が必要で、分光は得られる情報量は少ないが間接測定が可能である点が挙げられる。情報量に関しては、年代測定で重要となる同位体の情報は質量分析でないと得られない。計画しているミッションでは小惑

星に着陸して分析を行うので、採取したサンプルを直接的に測定可能であるため、その利点を活かすことができる質量分析をメインの計測機器に選定した。質量分析装置であれば、太陽系形成過程の解明に重要な同位体分析と、生命の起源の新たな鍵を握るとされる宇宙で生成された有機物の分析を一つの装置で行うことが可能である。

宇宙探査機に搭載する機器に対しては、数々の厳しい制限が課せられる。サイズと重量や消費電力に加えて、振動、温度、真空環境、放射線といった、地球上とは異なる様々な制限事項がある。質量分析装置に関しては、地球上では様々な種類が実用化されているが、一般にはサイズの大きいものほど性能が良いという関係が成り立っている(図2)。これまで宇宙用としては、サイズが最も小さいタイプである四重極型がもっぱら使われてきた。しかし四重極型では質量分解能が数百までしか出せないため、これによる分析から得られる情報には限界があり、より高性能な質量分析装置が求められている。

2 多重周回飛行時間型質量分析計～MULTUM～

大阪大学の質量分析グループは、1930 年代後半に国内で最初の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)や、多重周回飛行時間型質量分析計(MULTUM)のような革新的な質量分析装置の開発を行ってきた。特にMULTUMは、先述の彗星探査機ロゼッタ搭載用の小型質量分析計として開発が始まった経緯があり、従来の

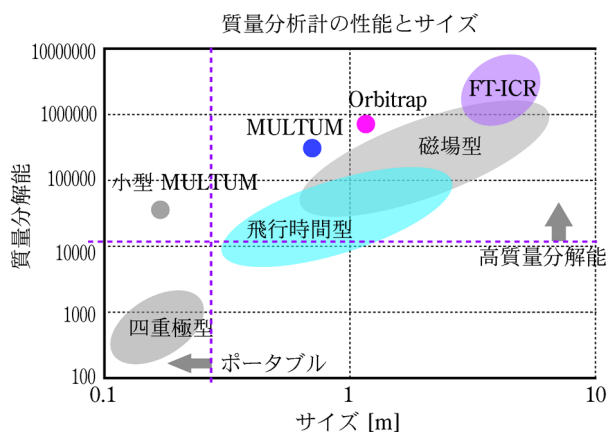


図2 質量分析装置の性能とサイズの関係

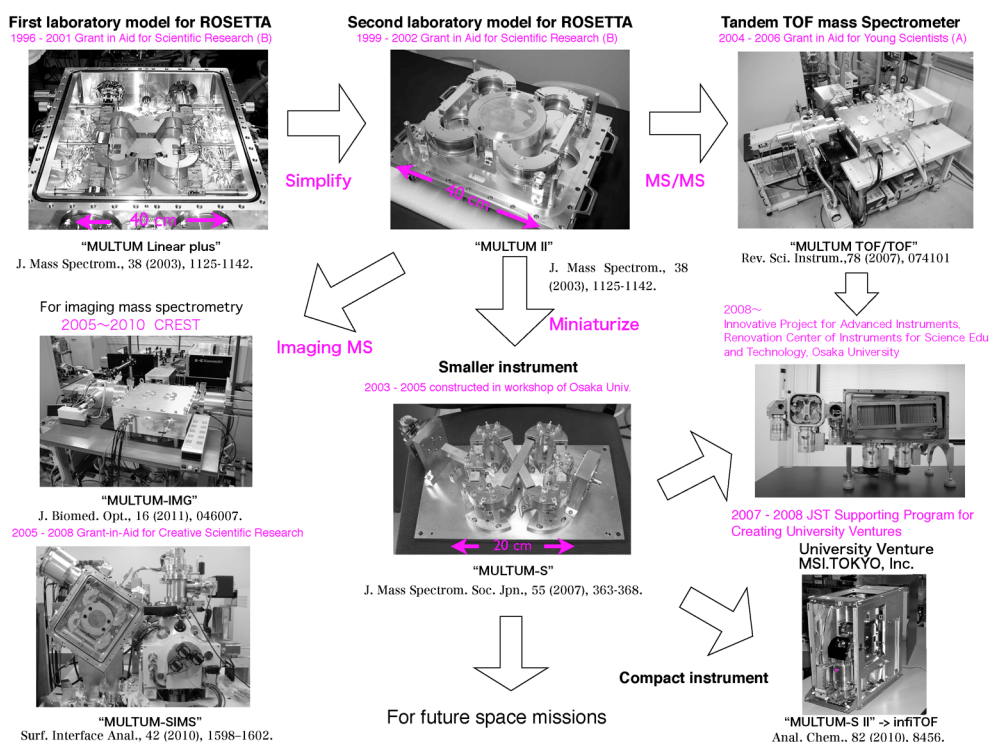


図3 大阪大学質量分析グループにおけるMULTUM開発過程

サイズと性能の関係則を超えることを目指した新しいタイプの飛行時間型質量分析計である。図3に阪大におけるMULTUMシリーズの開発過程を示す。飛行時間型質量分析計ではイオンの飛行距離が長いほど高い質量分解能が得られるが、多重周回飛行時間型質量分析計では同一軌道を複数周回させることで、小型・軽量でありながら長い飛行距離を実現している³⁾。MULTUMのイオン軌道は、8の字状の形状であり、イオンは電場によって制御されている。イオンを周回させるため、扇型電極により四つのトロイダル電場が生成されている。また、この多重周回軌道への入射と出射についてもパルス電場のスイッチにより実現しており、MULTUM-Sと呼ばれる小型モデルに採用されている光学系では入出射用にさらに2組の扇型電極が追加で用いられている。MULTUMの光学系では、多重周回による収差の蓄積により分解能と透過率が低下しないように、大阪大学で

構築してきたイオン光学系の知見に基づき、イオンが1周回後に周回前と全く同じ状態に戻ってくる「完全収束条件」を実現するように設計されている。これにより、空間・時間的に発散することなくイオンを周回させることが可能となった。MULTUM-S IIの光学系を採用した市販モデルでは、図4に示したように分析部の電極サイズが20 cm×20 cm、真空系と電源系を含んだ装置全体のサイズが50 cm×30 cm×60 cm、重量が35 kgとなっている。この高い質量分解能を利用して、前処理なく同一整数質量成分の影響を劇的に軽減できることから、オンサイトでの同位体比分析技術として大きな期待が持たれている。例えば図5に示した小型MULTUMを用いた水の測定による同位体分析では、質量分解能が $m/\Delta m \sim 18000$ で、 m/z 19付近にある、 H_2^{17}O (m/z 19.0148), HDO (m/z 19.0168), H_3^{16}O (m/z 19.0184)のピークを分離して測定することが可能である。

3 小惑星探査機搭載用の質量分析システム

小惑星上でのオンサイトのために計画している質量分析システムは、MULTUMを質量分析部として、さらに小惑星表面からサンプルを採取するサンプリングシステムと、サンプルを質量分析部に導入する前に簡単な前処理を施す部分によって構成される。図6に小惑星に着陸して実施するオンサイト分析の測定シーケンスを示す。まず小惑星表面の砂粒状サンプルを捕集するため、はやぶさシリーズでも使用されている、弾丸を衝突させてそれにより飛散したサンプルを捕集する方式を採用している。さらに、小惑星の表面は太陽風や光で変成している可能性があるので、1 m程度の地下からのサンプリングも試みる。これには気体圧を利用した伸縮性のドリルを利用する。サンプラーで捕集したサンプルはいくつかのサンプルボックスの中に一時的に納められる。サンプルボックスにはそれぞれヒーターがついており、測定時に個別に加熱（ $\sim 300^\circ\text{C}$ ）することでサンプルが

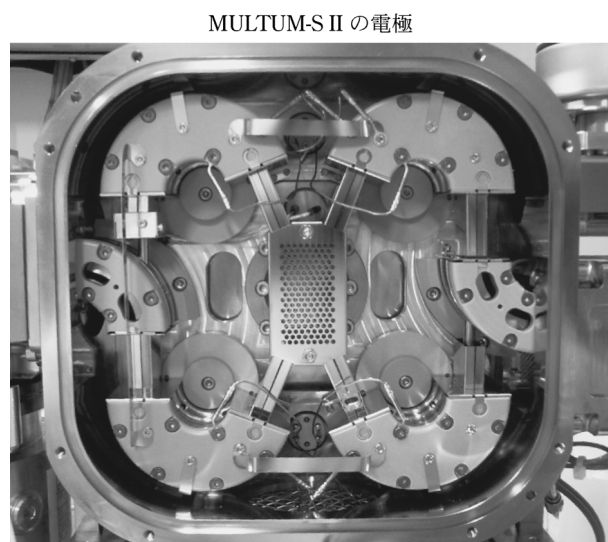


図4 MULTUM-S IIの電極

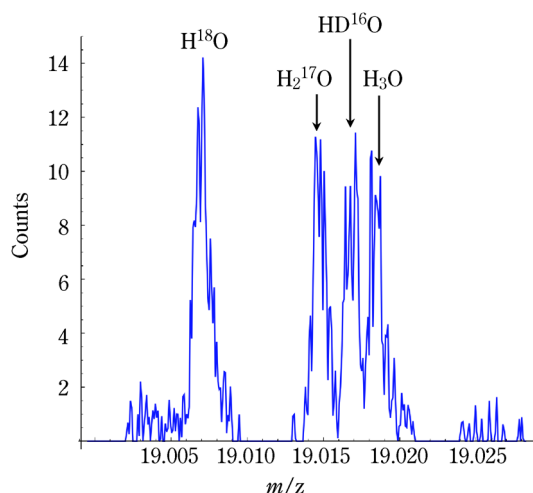


図5 水の同位体の質量スペクトルの測定結果

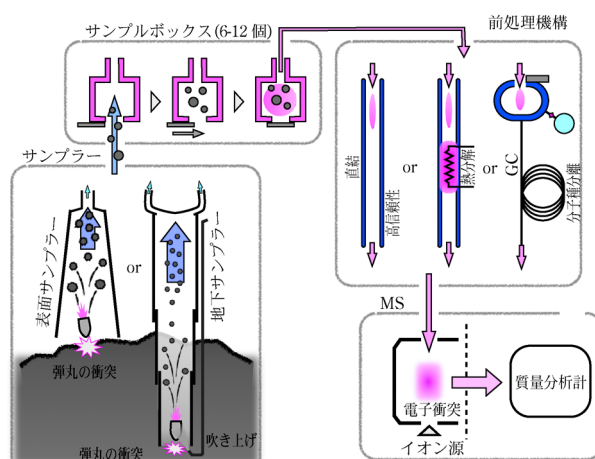


図6 小惑星でのオンサイト質量分析シーケンス

ら揮発性の高い成分を気化させる。気化させたガス成分は質量分析計に直接導入する経路のほかに、二つの前処理機構のどちらかを經由して質量分析計に導入することもできる。前処理機構の一つは、経路上に高温加熱部分（～1500℃）を設けることでサンプルガスを熱分解して原子や低分子へと分解することが可能で、その後に質量分析計へ導入し同位体分析を行う。もう一つはGCを經由するもので、より詳細な有機物の分析を可能にする。質量分析部へと導入されたサンプルガスは電子イオン化(EI)法によりイオン化され、MULTUMへと導入される。質量分析計において、サンプルを気化させて導入する手法や熱分解する手法は実験室で用いる市販装置では一般的な手法であるが、小惑星表面という宇宙空間の条件下での実施手法は確立されておらず、基礎原理から実証していく必要がある。

4 おわりに

小型の質量分析システムは、地上モデルでは十分に動作する装置が開発できているが、宇宙で使用することを考えた場合には、まだ開発しなければならない要素が山積している。現在、大阪大学質量分析グループでは、JAXA 宇宙研と協力して、宇宙用オンサイト質量分析

システムの実現のための開発を進めている。このような小型の質量分析装置は宇宙での探査ミッションにおける利用のみならず、地球上でも飛行ドローンを用いた火山ガスのリアルタイム分析、車輦を用いた土壌ガスや温室効果ガスのキャラバン分析、無人潜水艇を用いた深海底探査のオンサイト分析など、幅広い分野への応用が期待される。

文 献

- 1) H. Yurimoto et. al.: *Science*, **333** (6046), 1116 (2011).
- 2) H. Yabuta: *Res. Org. Geochem.*, **23/24**, 73 (2008).
- 3) 豊田岐聡, 新聞秀一, 青木 順, 石原盛男: *J. Mass Spectrom. Soc. Jpn.*, **60** (6), 87 (2012).



青木 順 (Jun Aoki)

大阪大学大学院理学研究科基礎理学プロジェクト研究センター（〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-1）。京都大学大学院人間環境学研究科博士課程修了。人間・環境学博士。《現在の研究テーマ》イメージング質量分析装置や小型マルチターン質量分析装置の開発。

E-mail: ajunmail@mass.phys.sci.osaka-u.ac.jp

原 稿 募 集

トピックス欄の原稿を募集しています

内容：読者の関心をひくような新しい分析化学・分析技術の研究を短くまとめたもの。

執筆上の注意：1) 1000 字以内（図は 1 枚 500 字に換算）とする。2) 新分析法の説明には簡単な原理図などを積極的に採り入れる。3) 中心となる文献は原則として 2 年以内のものとし、出所を明記する。

なお、執筆者自身の文献を主として紹介する

ことは御遠慮ください。又、二重投稿は避けてください。

◇採用の可否は編集委員会にご一任ください。原稿の送付および問い合わせは下記をお願いします。

〒141-0031 東京都品川区西五反田 1-26-2

五反田サンハイツ 304 号

(公社) 日本分析化学会「ぶんせき」編集委員会

〔電話：03-3490-3537〕