

海洋・地球科学分野における質量分析技術報告書

—機器共用から切り拓く新しい海洋・地球のサイエンス—

Pushing the Boundaries of Ocean and Earth
Sciences through Mass Spectrometry

— Building a Shared Infrastructure for Next-Generation
Ocean and Earth Researches

2025 年 6 月

海洋・地球科学分野における質量分析技術報告書編集委員会

英文概要

The assessment of terrestrial water, organics and minerals by key elemental/isotopic analyses provides important insights into the origin, evolution and future of the Earth and its oceans. Recent advances in mass spectrometry have greatly improved the detection of trace elements (ppm to ppb levels) and isotope ratios (differences in abundance) in minerals and organics, enabling the identification of substances that could not be detected by conventional methods. Consequently, the utilization of mass spectrometers in earth and marine sciences is of crucial importance, as they facilitate precise trace element and isotope analysis.

This report provides an overview of the technical background, practical applications and potential instrumental advances of mass spectrometers and its components. The integration of these analytical methods with *state-of-the-art* sample preparation techniques enables a more comprehensive understanding of environmental change and facilitates the prediction of the future of our Earth and oceans.

謝辞

本報告書の公表にあたり、以下の方々へのヒアリング・意見聴取や査読をしていただいた。
ここに感謝の意を表します。

名古屋大学 大学院 環境学研究科 地球環境科学専攻 地球化学 日高 洋 教授
国立研究開発法人科学技術振興機構・研究開発戦略センター 永野 智己氏
早稲田大学・研究戦略センター 丸山 浩平 教授
島津製作所 櫻井 久雄氏、夏原 正仁氏、奥村 大輔氏、西口 克氏
東京大学 総合研究博物館 松崎 浩之 教授

目次

- 1 はじめに
- 2 質量分析概要（海洋・地球科学における視点）
- 3 海洋・地球科学における質量分析の応用例
 - 海洋化学
 - 地球化学
 - 惑星科学
 - 鉱物学
 - 考古学
- 4 機器概要
 - 4.1 二次イオン質量分析法 (SIMS: Secondary Ion Mass Spectrometry)
 - 4.1.1 NanoSIMS (ナノスケール超高感度・高解像度走査型二次イオン質量分析装置)
 - 4.1.2 SHRIMP (Sensitive High-Resolution Ion Microprobe)
 - 4.2 安定同位体比質量分析計 (Isotope Ratio Mass Spectrometer, IRMS)
 - 4.3 加速器質量分析計 (Accelerator Mass Spectrometry, AMS)
- 5 今後の技術開発のポイント
- 6 機器共用から切り拓く新しい海洋・地球のサイエンス
- 7 研究現場から提案する機器共用の枠組みで達成・解決したい点
- 8 おわりに

海洋・地球科学分野における質量分析技術報告書

本文

1. はじめに

海洋・地球科学とは、水、岩石、大気、生物など地球上および内部のあらゆるものを研究対象とする。つまり、水－岩石－大気－生物間の物質循環を元素・同位体の存在量と状態、化学種の変化を通して定量的に理解する必要がある。観測、計測と分析技術の進展とともに、一次情報として高精度、かつ定量的な物質科学的情報が多量に得られるようになった結果、海洋・地球科学が進展した。

海洋および地球の起源と成り立ちを解明することは、地球システムの海洋・気候変動などの未来予測に直結している。その未来予測を基にすれば、持続可能な生活を実現するために必要な環境条件や要素を定量的に評価できるようになる。この目的を達成するためには、海洋と地球を構成する物質（サンプル）を広範囲かつ継続的に収集し、詳細な分析を行うことが不可欠である。

海洋・地球科学における微量成分は大きく分けて 2 種類ある。一つは、地球環境において主要元素（酸素、シリコン、アルミニウムなど）と比較して低濃度（ppm から ppb レベル）で存在する元素のことであり、もう一つは数桁にも存在量が異なる同位体の存在である。このような微量成分の高感度・高精度な分析技術、特に質量分析法の発展により、従来では測定が困難であった極微量の元素や同位体比、そして有機物の検出が可能となる。

海洋・地球から得られる物質は、固体、液体、気体の三相から成り、相互に複雑に作用しながら時間とともに化学的および物理的に変質することが多い。一方、特定の条件下では過去の環境記録が保存され、これによって歴史的な環境変動や物質進化の痕跡を追跡することが可能である。物質は単一相だけでなく、多相系を形成することが一般的であり、このため分析には高度な技術が求められる。

例えば、固体サンプルでは、サブミクロスケールでの鉱物と有機物の相互作用、鉱物組織内の空隙に存在する液体や気体、鉱物内外での主要および微量元素の拡散による不均質な分布、鉱物間や鉱物-水系での化学反応などが関与する。これらを解析するためには、化学成分の種類およびその量を高精度・高感度で定量的に測定する技術が必要であり、特定の成分を選択的に分離して検出する手法の開発も重要である。さらに、サンプルの物理的・化学的状态や測定対象の物質に加え、元素の同位体比の変動も考慮する必要がある。同位体はその存在比が異なるため、対象物質に応じた最適な検出方法を選定することが求められる。分析手法としては、定性分析による成分同定と

定量分析による特定成分の定量的評価を組み合わせ、サンプルのもつ詳細な化学組成、過去の環境変動やその起源を明らかにすることが求められる。

理想的な分析手法は、マルチスケール・多様な形態に対応可能なものであり、高精度・高感度・高解像度を備えているべきである。しかし、現時点で万能の分析ツールは存在しない。多様なサンプルに対応するためには、目的を明確化し、それに基づいて最適な分析手法と機器を選定する必要がある。さらに、分析手法に加えて、サンプルの前処理に関してもラボごとに独自のノウハウがあり、一般的に確立された方法から特定のハウスルールに至るまで、さまざまな手法が存在することにも留意しなければならない。

本分野に限らず、研究設備および分析機器は、あらゆる科学技術イノベーション活動を支える基盤的インフラとして極めて重要な役割を担っている。現在、このような研究基盤の在り方については、各種審議会や研究基盤 EXPO 等の場において、研究機関の経営層、リサーチ・アドミニストレーター（URA）、技術職員、そして研究者が一体となり、多角的な議論が展開されている。

本報告書では、海洋・地球科学分野における強力な分析手法の一つとして、同位体を含む微量成分分析を可能とする「質量分析法」とその技術的背景に焦点を当て、それぞれの特徴と適用事例をまとめる。さらに、今後の質量分析に係る機器開発、および技術的進展を踏まえた上で、海洋・地球科学分野に関する発展的応用を中心に議論する。また、海洋・地球科学分野における初学者をはじめ、先端的な分析法の導入を考える研究者、分析機器の設計・開発を業務とする民間分析企業の技術開発者、ならびに研究機関に所属する技術系職員および研究者、さらに研究基盤・環境整備に携わる事務系職員、行政系職員を主たる読者層として想定している。

2. 質量分析概要（海洋・地球科学における視点）

質量分析法は、物質の質量と組成を解析するための技術であり、海洋・地球科学分野においては、物質の化学組成や同位体比を測定するために広く用いられる。この質量分析は、サンプルをイオン化し、その質量対電荷比（ m/z 比）を測定することで、分子構造、分子量、固体試料中の特定成分の分布とその濃度、化学種の特定などを正確に決定することができる。この手法は、固体、液体、気体の全ての相に適用可能な分析技術であり、海水、土壌、鉱物、さらには大気中の微量成分の分析において不可欠なツールである。

質量分析法の基礎は、イギリスの物理学者トムソンの研究に遡る。1912 年、トムソンは陰極線管を用いて電子の質量と電荷の関係を測定し、物質を構成する元素の m/z 比を測定する技術を確立した。そして、1920 年代には、異なる同位体を分離する技術が開発され、物理化学や地球科学をはじめとする多くの分野で広く応用されるようになる。1950 年代、四重極質量分析計の登場により、質量分析の精度と分解能が飛躍的に向上した。さらに、二重収束型質量分析計（セクター型）の

開発により、より高い質量分解能を実現できるようになった。これらの技術革新により、より精密な質量測定が可能となり、後の質量分析技術の発展を大きく促進することとなった。それ以外にも、飛行時間型質量分析計（TOF 型：Time-of-Flight）や「Orbitrap」質量分析計などが開発され、小型化、高質量分解能化など、計測する対象と精度、確度に応じた質量分析計の発展が続いている。

質量分析では、計測する試料形態（気体、液体、有機物と鉱物など固体）により試料導入法とイオン化法は大きく異なる。試料導入は、GC（ガスクロマトグラフ）や HPLC（高速液体クロマトグラフ）などの分離分析装置を介する場合と、直接試料を装置に導入する方式に大別される。イオン化は、電子イオン化、化学イオン化、エレクトロスプレーイオン化、マトリクス支援レーザー脱離イオン化、誘導結合プラズマ、レーザーやイオンの照射によるイオン化などが挙げられ、試料形態により使い分ける。

質量分析において標準物質は、機器の校正、測定精度の管理、および結果の信頼性を担保するうえで不可欠である。標準物質とは、特定の元素濃度や質量などが高精度に決定された物質であり、これを基準として用いることで、測定結果の正確性および定量性を保証することが可能となる。このため、米国立標準技術研究所（NIST）、国際原子力機関（IAEA）、各国の地質調査所（例：日本の GSJ、米国の USGS）などが、高精度な分析装置を用いて世界各地の水、ガス、岩石などを分析し、標準物質として世界中の研究者に供給している。

標準物質の利用には以下の利点がある。

- ① 標準物質を用いることで、装置の感度や質量精度を調整・校正することが可能となり、信頼性の高い測定値が得られる
- ② 分析手順や機器の操作の再現性の評価
- ③ 既知の値と測定値との差異から、測定誤差を定量的に評価でき、測定結果の信頼性の根拠となる
- ④ 標準物質の多くは国際標準に基づいて特性が決定されており、異なる研究機関で得られた測定結果との比較を可能とする
- ⑤ 濃度が既知の標準物質を用いて検量線を作成することで、未知試料中の成分濃度を定量的に評価できる

一方、分析対象により標準物質も多岐にわたる、あるいはマルチスケール分析に対応せねばならない（グラム単位での均質性から、ミクロンスケールでの均質性まで求められる場合もある）などの理由から、ラボ毎に標準物質の作成も行われている。今後は、これら独自の標準物質を用いたラボ間のデータ比較なども検討せねばならないと考えられる。

質量分析法は、非常に高い精度と解像度を持ち、複雑なサンプルの構造解析や定量分析を行うための強力なツールである。この技術の発展により、海洋・地球科学だけではなく、惑星科学、環境、医薬、食品、生命科学など、多岐にわたる分野で活用されている。一方、それらの信頼性を担保するのは分析装置だけではなく、定量性などを担保する標準物質の存在も欠かせない。

3. 海洋・地球科学における質量分析の応用例

微量成分・同位体分析を主とする質量分析法は、海洋・地球科学において広範囲に応用されている。具体的な応用例としては以下が挙げられる。図 1 に代表的な研究成果を列挙した。

- 海洋化学：海水中の主要元素、微量金属、栄養塩、有機化合物の定量分析は、海洋における生物地球化学的循環の解明に不可欠である。極微量元素および放射性炭素の同位体比の高精度測定は、海洋中の物質輸送過程の解明や、人為起源・自然起源の元素フラックスの評価に重要である。また、海洋環境における汚染物質の動態解析に加え、その拡散・蓄積メカニズムの解明にも資する。例えば、鉄やマンガンの分布解析を通じて微量栄養塩としての役割や沈降・溶解過程を解明し、鉛やストロンチウムの同位体比分析によって大気や海洋の物質輸送過程を理解することができる。また、海洋中の溶存有機物や粒子状有機物の窒素、炭素、水素同位体比を測定することで、生物起源や地球化学的なプロセスの理解が深まる。特に、メタンやアミノ酸などの有機分子の同位体組成は、微生物活動（炭素や窒素固定のメカニズムとそれらの代謝活性）や地球全体の炭素循環の解明に重要な役割を果たす。
- 地球化学：地球表層および内部の物質循環を解明するために、水試料、鉱物、氷床コアなどを対象とした安定同位体（酸素、炭素、窒素、硫黄など）および放射壊変起源同位体の高精度分析が行われている。これにより、過去の高気候・古環境の復元が可能となり、地球表層における物理化学的プロセスの理解が進むとともに、地球進化のシナリオ構築にも寄与する。地球表層の岩盤は、風化と侵食の過程により、その化学的・物理的性質が変化することが知られている。例えば、造岩鉱物に含まれる宇宙線生成核種（ベリリウム-10、アルミニウム-26 など）の存在度を正確に計測することで、岩盤の風化速度を定量的に評価する手法が確立されている。宇宙線生成核種は、岩石が地表にさらされる期間や風化の進行を定量的に議論可能な指標となるため、この手法は地球表層における水や土壌の循環に伴う諸現象の理解に大きく貢献し、地球環境の維持機構や地殻変動のメカニズムの解明に役立つ情報を提供する。したがって、風化と侵食の進行を定量的に把握することは、物質循環や地形形成の過程解明にとどまらず、将来的な環境変化や地形災害の予測にも役立つと期待されている。
- 惑星科学：隕石に含まれる鉱物や有機物の主要・微量元素組成、およびそれらの同位体組成は、太陽系最初期における物質進化プロセスの解明に寄与する。さらに、小惑星、月、彗星

などの地球外試料（リターンサンプル）に対する化学・鉱物学的解析を通じて、地球外天体における地質プロセスや表層環境の変遷、さらには鉱物-有機物の共進化過程を明らかにすることができる。これにより、地球の水や生命の起源物質に関する重要な示唆が得られつつある。また、質量分析技術は惑星探査機にも搭載され、月、火星、それ以遠の惑星系における探査に活用されている。今後の惑星探査ミッションにおいても、この技術は太陽系と構成する惑星、小惑星などの成因や進化過程、さらにはその起源を解明するうえで重要な役割を果たす。

- 鉱物学：鉱物および岩石試料の微量元素組成および同位体比（水素、酸素、鉛、ストロンチウム、ネオジムなど）の高精度測定は、地球内部における揮発性元素の分配挙動やマントル-地殻相互作用の解明、さらには初期地球環境の復元に不可欠である。例えば、サブミクロンスケールでの同位体分布測定は、鉱物の成因や年代を高解像度で取得する手法として有効であり、地球および惑星の形成・進化過程の理解に貢献する。特に、100 マイクロメートル程度のジルコン鉱物の高精度・高空間分解能 SIMS 分析技術の発達により、各大陸地殻の年代、生命の誕生の年代、ひいては地球の年齢の研究に大きな進展がある。
- 考古学：考古遺物の年代決定、物質の起源特定、古代の食文化や環境の復元、考古材料の成分解析などにおいて、質量分析は不可欠な分析手法となっている。例えば、高感度で放射性炭素（ ^{14}C ）を計測することで、遺物の年代を精度良く推定できる。例えば、従来の β 線計測法と比較すると、加速器質量分析（Accelerator Mass Spectrometry, AMS）では、試料がごく微量でも計測可能なため、年代推定精度を向上させるとともに、試料の破壊を最小限に抑えることができる。この特性により、貴重な考古学試料の研究に適している。さらに、骨や歯のコラーゲンに含まれる炭素、窒素、酸素、ストロンチウムの同位体比を分析することで、古代の食生活や環境を復元することができる。例えば、炭素、窒素同位体比は食物の摂取傾向を示し、ストロンチウム同位体比はコメなどの生育地を推定する手がかりとなる。また、青銅器や鉄器の鉛同位体比を分析することで、金属原料の産地を特定し、古代の交易ルートや金属資源の流通経路を解明することができる。これらの手法を組み合わせることで、より包括的な歴史的知見が得られる。

上の例に挙げたように、質量分析法は海洋・地球科学に関連するさまざまなサイエンスで極めて重要なツールであり、過去の環境変動の解析から未来の環境予測まで、幅広い領域で応用されている。同時に、分析機器メーカーとの協働による、機器のコンフィグレーション、検出器、前処理を含むシステムの開発が精力的に行われてきた。

地球外物質の起源と海藻への重金属の濃集を同位体と元素の分布から読み解く

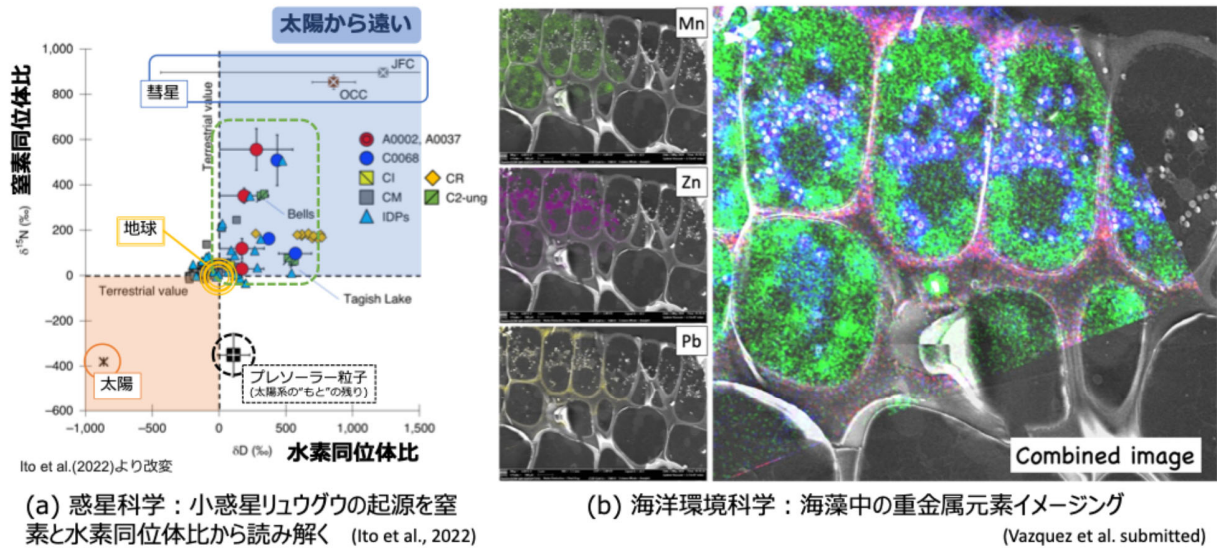


図1-1. NanoSIMSによる代表的な海洋・地球試料の分析結果

脊椎骨や眼球に記録された履歴をアミノ酸窒素同位体比で読み解く

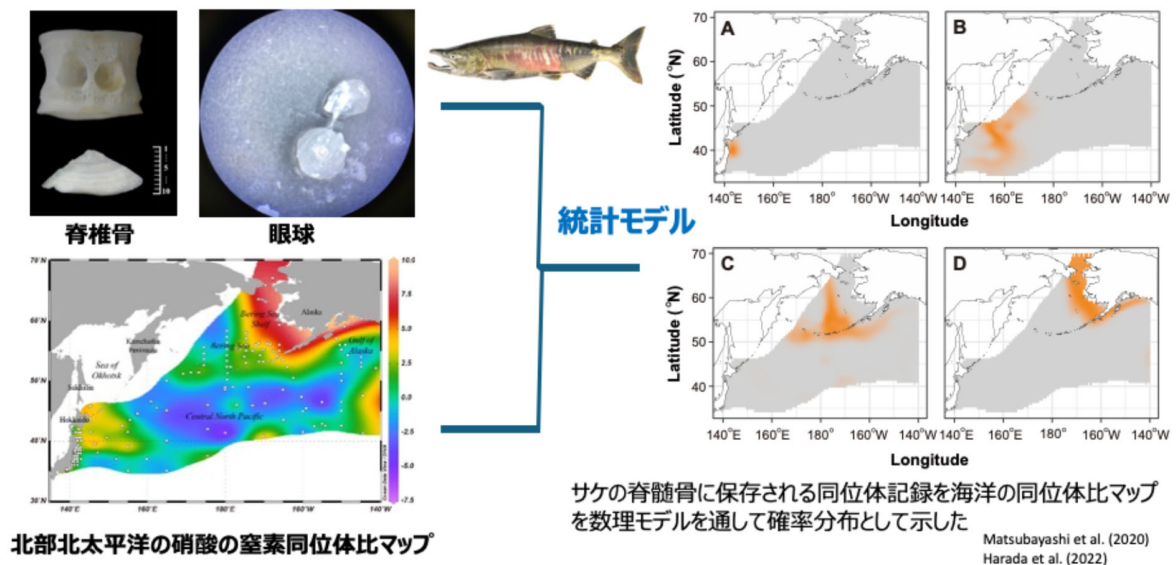


図1-2. 安定同位体比質量分析計 (IRMS)による海洋生物の回遊経路復元 (シロザケ)

極域氷床の安定性

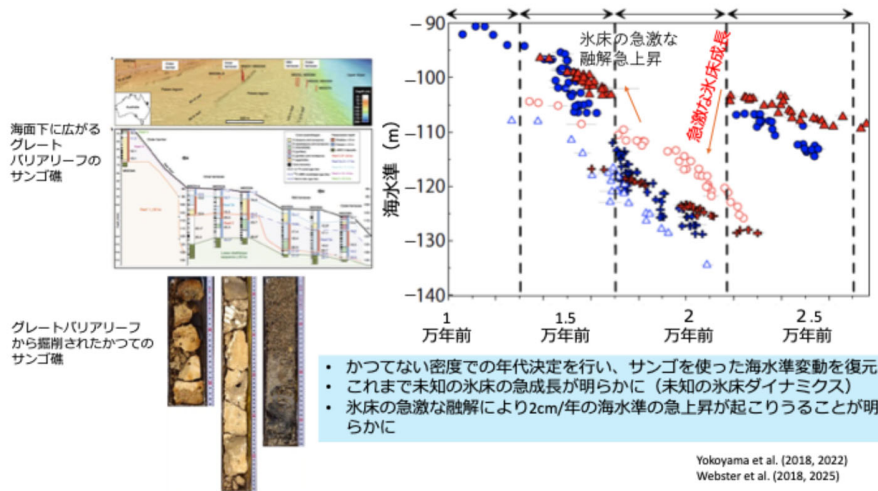
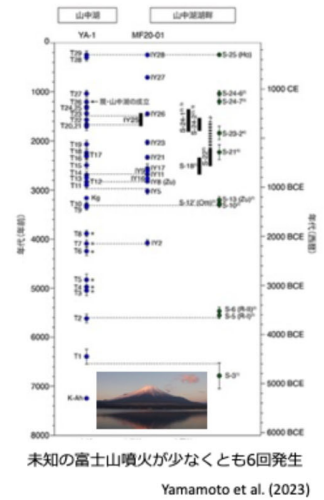
富士山の過去の噴火履歴を
山中湖の湖底堆積物から復元

図1-3. 加速器質量分析計 (AMS) による氷床ダイナミクス、火山履歴復元の研究

ゴンドワナ大陸形成モデルの見直し

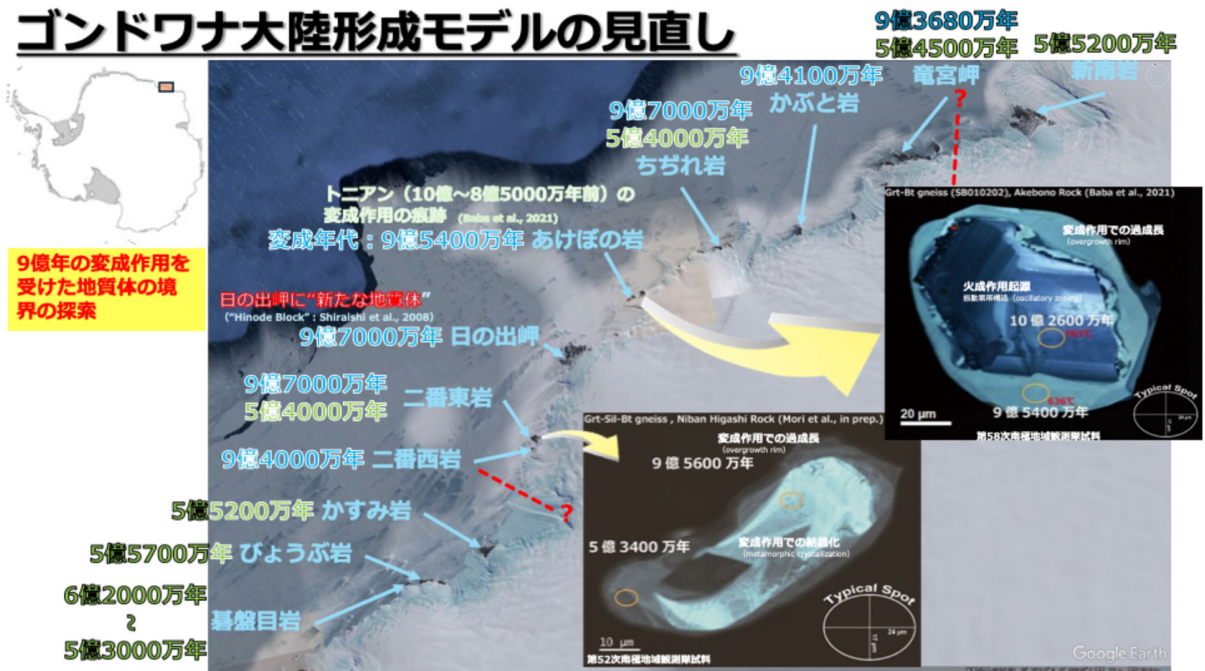


図1-4. SJRIMPによるジルコン年代と大陸形成の研究

4. 機器概要

4.1. 二次イオン質量分析法 (SIMS: Secondary Ion Mass Spectrometry)

二次イオン質量分析法は、マイクロメートルスケールの微小領域において ppb (10 億分の 1) レベルの極めて高感度な元素および同位体分析を可能とする質量分析手法である。簡単に SIMS の原理を記すと、数十 keV のエネルギーで加速し収束させた一次イオンビームを試料表面に照射し、最表面から運動量と運動エネルギーに応じて放出される二次イオン、中性子や光子などのうち、試料の構成元素に基づいた二次イオンのみを質量と電荷比に応じて分離・検出する手法である。その原理に基づき、試料表面の化学組成や同位体組成を計測することができることとなる。一次イオンビームにより試料表面がスパッタされていくので、分析を続けると表面からの深さ方向分析が、さらに一次イオンビームを走査することで面分析が可能になる。

SIMS の特徴を以下にまとめる。

- (1) μm スケールの領域から ppb (10 億分の 1 グラム) レベルの高い検出感度で計測できる (高感度・高空間分解能での分析)
- (2) nm スケールの分解能での深さ方向分析が可能 (三次元分析への拡張)
- (3) 水素からウランまでのほぼ全元素の分析が可能 (元素毎のイオン化効率の違いに留意)
- (4) 高い質量分解能での同位体比分析が可能

通常、試料の構造的特徴を明らかにするために、電子顕微鏡による記載 (元素分析結果、微細構造組織観察などを組み合わせた試料表面の記載) を行った後、SIMS を用いた高精度な局所分析が実施される。1990 年代には、SIMS によるパーミル (千分の 1) レベルでの高精度な局所同位体分析技術が著しく進展した。セクター型 SIMS にファラデーカップ型検出器を複数搭載することにより、超高精度計測が実現し、サブパーミルレベルでの同位体比測定が可能となった。

地球化学分野では、岩石・鉱物試料に対する局所的 (サブミクロンスケールレベル) な同位体組成および微量元素分析に広く適用されてきた。例えば、マグマの分化プロセス、鉱物の成長履歴、流体の移動の解明、初期太陽系物質の形成年代決定、地球内部の物質循環やプレートテクトニクスに伴う元素の移動の素過程を定量的に評価する手法として重要性が高まっている。今後も SIMS は、地球化学分野における微量元素・同位体比分析の基盤技術として利活用されることは間違いなく、地球の進化過程、マントル・地殻相互作用、気候変動に伴う環境変化などの解明に向けて、その応用範囲が拡大すると期待される。

SIMS では、さらなる空間分解能および質量分解能の向上を目的とした技術開発が進んでいる。特に、飛行時間型 SIMS (Time-of-Flight SIMS, TOF-SIMS) は、高い質量分解能と高質量範囲の同時検出が可能であり、地球惑星化学においては有機物の解析に主として活用されている。近年では、超高質量分解能を有する Orbitrap-SIMS が開発され、従来の SIMS では困難であった分子レベ

ルでの高精度・高質量分解能での分析が可能となってきた。これら異なる能力を持つ SIMS を縦横に駆使することで、海洋・地球試料における有機物—無機鉱物間の共進化などの複雑系の解析が期待できる。

4.1.1. NanoSIMS（ナノスケール超高感度・高解像度走査型二次イオン質量分析装置）

SIMS（二次イオン質量分析法）には、走査型（Scanning SIMS）と投影型（Imaging SIMS）の 2 つのモードが存在する。走査型 SIMS では、一次イオンビームを微細に絞り、試料表面を走査しながら生成される二次イオンを検出する。この手法は、サブミクロンスケール程度の高い空間分解能を要する定量・定性分析に適しており、微小領域の元素・同位体組成を詳細に解析できる。一方、投影型 SIMS では、均質な一次イオンビームを照射し、発生した二次イオンを光学顕微鏡のように元の位置情報を保持したまま検出する。この方法により、試料全体の同位体組成や微量元素の分布をサブミクロンスケールで可視化し、試料の組織構造との対応関係を明確に示すことが可能である。さらに、SCAPS（CMOS 型二次元イオン検出器）を用いた新たなイメージング手法の開発により、投影型 SIMS の定量的イメージング精度が向上した。いずれの技術も、試料内の微量元素や同位体分布を高精度かつ高い空間分解能で可視化することを可能にする。

AMETEK 社 CAMECA が開発した NanoSIMS（nano-scale secondary ion mass spectrometry, 図 2）は、高感度（数 ppm～ppb）と高空間分解能（50～100 nm）を両立した走査型二次イオン質量分析装置である。NanoSIMS の開発は、1985 年にフランスの CAMECA 社の Hillion 氏とパリ大学の Slodzian 博士らによって開始され、2000 年代初頭には医学・創薬分野（ハーバード大学メディカルスクールの Lechene 博士）および宇宙地球化学分野（ワシントン大学セントルイス校宇宙科学科の Zinner 博士）において実用化された。日本国内では、物質・材料研究機構、東京大学大気海洋研究所、JAMSTEC 高知コア研究所、東京大学農学部、産業技術総合研究所、東レリサーチセンターに設置されている。

NanoSIMS は、セシウムイオン源、あるいは酸素イオン源（デュオプラズマトロン型、またはプラズマ型ハイペリオン）を用いた微細な一次イオンビームを利用し、最小 50 nm のビーム径で試料表面を走査する（一般的な運用では 100～150 nm）。試料表面に垂直に一次イオンを照射し、スパッタリン

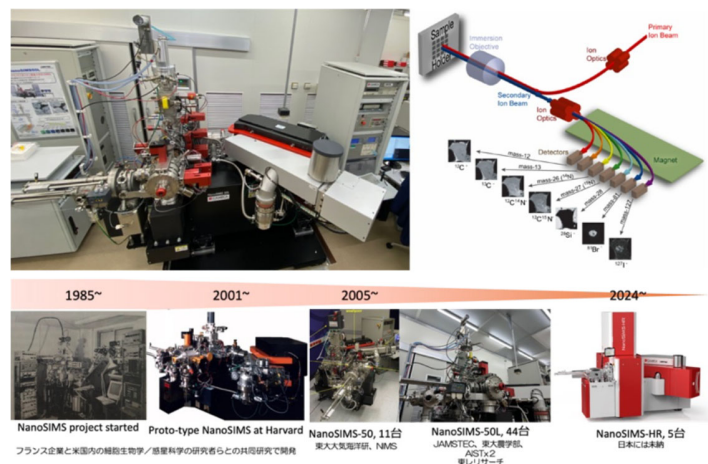


図 2. JAMSTECに設置されたNanoSIMS 50L

グにより発生した二次イオンを垂直方向に引き出す光学系を採用している。さらに、Mattauch-Herzog 型の二次イオン光学系と、多重検出器（7 つの二次電子増倍管のうち 1 つは固定、6 つは可動式）を備えたマルチコレクションシステムを搭載し、最大 7 種類の二次イオンを同時に検出できる。この装置では、一次イオンビームを数十 μm 四方の領域で走査し、ピクセルごとに二次イオン強度を輝度情報として記録することで、元素・同位体の二次元分布を定性的・定量的に可視化する。なお、定量イメージングには濃度既知の標準物質を用いたキャリブレーションが必要となる。

NanoSIMS の空間分解能は一次イオンビームの直径に依存し、最小 50 nm での解析が可能である。この特性により、数 μm サイズの細胞内構造や隕石中の微細構造を解析することができる。総じて、NanoSIMS は従来の光学顕微鏡では観察できない試料表面の元素・同位体組成のマッピングを実現し、サブミクロンスケールでの詳細な化学的情報を取得できる点が最大の特長である。

新規開発項目として現在挙げられているのが、新規イオン源と液体窒素温度まで冷却可能なクライオステージである。イオン源は、セシウムと酸素が一般に使用されているが、両方ともに次世代高輝度イオン源の開発が精力的に進められているものの、機器への搭載までには 10 年程度かかることが予想される。クライオステージは、2024 年に発表された NanoSIMS-HR にオプションとして搭載されており、海洋・地球試料のうち、流体包有物や熱に弱い有機物などのその場分析に有用である。

4.1.2. SHRIMP (Sensitive High-Resolution Ion Microprobe)

高感度高分解能イオンマイクロプローブ (Sensitive High Resolution Ion Microprobe, SHRIMP, 図 3) は二次イオン質量分析計の一機種で、一次イオンビームを微細に絞り試料表面の分析を行う走査型 (Scanning SIMS) に相当する。特に、ビームを細く収束させて微少な領域のスポット分析を行うことを得意とすることから「イオンマイクロプローブ」と称される。SHRIMP は、二次イオン質量分析計の中では大型機器に類され、試料表面から検出器までの二次イオンの総飛行距離は約 7 m、総重量は 12 トン以上に及ぶ。大型のマグネット部を有し、重元素に対しても高い質量分解能（例えば、 ^{208}Pb に干渉する質量数 208 の複合化合物 ($^{176}\text{Hf}^{16}\text{O}_2$ や $^{180}\text{Hf}^{28}\text{Si}$ など) の同重体を分解可能) をもつ。

SHRIMP の開発は、1960 年代のアメリカ合衆国における最初期の「イオンプローブ」の開発によって局所領域における定量分析機器の開発の機運が高まる中、1973 年にオーストラリア国立大学 Research School of Earth Sciences にて William Compston 教授を中心として始



図 3. 国立極地研究所に設置されたSHRIMP-II

動した。当時の二次イオン質量分析計は、微量元素を検出できないほど低感度であり、また同重体干渉を避けることができないほど低質量分解能であった。このことから Liebl (1967)が報告したイオンプローブ質量分析計を発展させた、「高感度で高質量分解能のイオンプローブ質量分析計」が開発のコンセプトとなった。1980 年に一号機である SHRIMP-I が完成し、1992 年からオーストラリア国立大学およびオーストラリアサイエンティフィックインスツルメンツ (ASI) による SHRIMP の製品化に向けた開発が始まった。翌 1993 年より製品版 SHRIMP (SHRIMP-II) の導入が始まり、1996 年に広島大学へ日本国内で初めて導入された。現在では国立極地研究所設置の 2 台を含む 19 台が世界で稼働中である。

SHRIMP の質量分析部には、静電場アナライザ・四重極レンズ・磁場の組み合わせた二重収束型デザイン (cylindrical electric sector field-quadratic field lens-homogeneous magnetic sector field, CQH) が採用されている。設計を担当した Steve Clement 博士が採用したこの CQH 型質量分析計のデザインは、1974 年に大阪大学の松田久教授により提案された設計で、二次イオンの収差を最小限に抑える点等が評価され、SHRIMP の高い二次イオン透過率 (高感度) の実現に繋がっている。SHRIMP-II から派生した設計として、質量分析部の磁場と静電場アナライザを逆転させ質量分解能を向上させた単一検出器型の SHRIMP-RG (Reverse Geometry) や、軽元素安定同位体分析特化のために試料室が高真空化した多重検出器型の SHRIMP-SI (Stable Isotope)、SHRIMP-SI を基盤として電気系統を大幅に刷新した新機種 SHRIMP-IV の開発が続けられている。

SHRIMP は酸素イオン (O_2^+ , デュオプラズマトロン) またはセシウムイオン (Cs^+) をおよそ数〜20 マイクロメートル径に収束させ、一次イオンビームとして利用する。一次イオンビームを試料表面に斜め 45° の角度から照射すると、スパッタリングが発生し、表面から約 1〜2 マイクロメートルの深さまで掘り進められる。スパッタリングで発生した二次イオンは試料表面と垂直方向に引き出され、前述の松田 CQH 型の二次イオン光学系へと導入される。検出器は単一検出器型と多重検出器型があり、それぞれファラデーカップまたは二次電子倍增管を使用する。静電場アナライザに設置されたスリットを調整して二次イオンのエネルギーフィルタリングを行うエネルギーフィルター法、または試料室及び検出器に設置された各スリットを調整する高質量分解能法によって、同重体干渉を低減 (分離) する。多重検出器型の場合、3 つまたは 5 つの検出器 (通常の多重検出器 (MC) と発展型多重検出器 (Advanced MC, AMC) がある) を有する。

SHRIMP は大型の磁場と二次系における二次イオンの収差の抑制による高質量分解能と高二次イオン透過率 (高感度) とを合わせもつことで、数 ppb 以下の濃度を高精度かつ高確度で分析することを可能とする。こうした特性を活用して、ジルコン等の鉱物中に微量に含まれる元素を分析するウラン-鉛放射年代測定や微小なダスト中の放射性同位体分析による環境評価等に適用されて

いる。簡潔にまとめると、SHRIMPは微小試料中の微量元素を高効率で検出し、分析することを得意とする。

4.2. 安定同位体比質量分析計 (Isotope Ratio Mass Spectrometer, IRMS)

IRMSは、気体あるいは固体中に含まれる特定の元素の安定同位体比（たとえば、炭素は $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比、窒素は $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比、鉄は $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ 比など）を高精度で測定する機器である（図4）。気体と固体では、導入部とイオン源が多少異なるが、いずれも複数の検出器を備えた磁場型の質量分析計である。気体用のIRMSはThermo Fisher Scientific社とElementar社のほぼ寡占状態にあり、日本の科学機器メーカーでは日立製作所が細々と製造しているのみである。本装置は1990年代以降、多様な前処理装置（元素分析計やガスクロマトグラフィーなど）をオンラインで直接繋いだものが主流となり、わが国を含む世界中の研究機関や大学に多数納入されている。

多様な形態の試料が測定可能な元素分析計/IRMSについては、市販製品を用いると、炭素や窒素にして数十マイクログラムの試料量が必要であるが、JAMSTECで開発された方法を用いると約3桁少ない数十ナノグラムでの測定が安定的に可能である。ガスクロマトグラフィー（GC）を前処理装置とするGC/IRMSは、1990年頃開発・販売され、比較的低い蒸気圧をもつ有機化合物に応用されてきた。前処理が比較的簡便であることなどから広く応用される一方、官能基をもつ化合物や複素環のような分子はあまり得意としない。

前述のNanoSIMSは二次元の元素・同位体比分布を可視化する分析機器であり、IRMSは微量試料の測定が可能な分析機器である。JAMSTECに設置している両機器の特徴をそれぞれ活かして、多様な物質の集合体である自然界から特定の成分を取りだして、その安定同位体比を測ることができる。これにより、海洋や地球といった自然の中での分子レベルまでの動きを詳細にわたって追跡することが可能になり、天然ガスの起源、食物連鎖、真贋判定解析に至るまで多様な応用研究が展開されている。

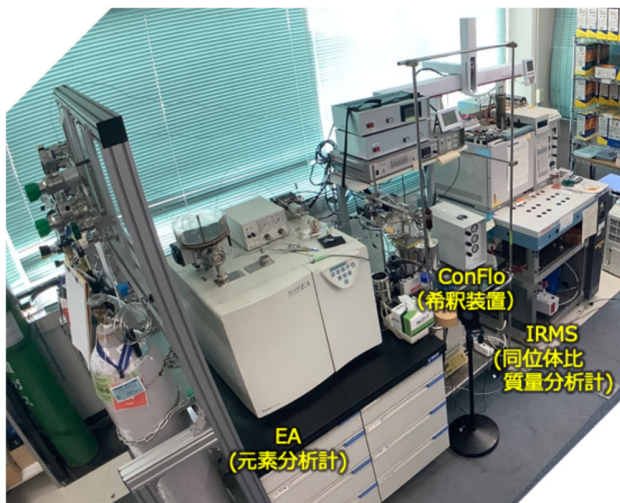


図4. JAMSTECに設置された安定同位体比質量分析計

4.3. 加速器質量分析計 (Accelerator Mass Spectrometry, AMS)

AMSシステムは、加速器を組み込んだ質量分析計である。ピコ（ 10^{-12} ）グラムからフェムト（ 10^{-15} ）グラムもしくはそれ以下の、天然での存在度が極めて低い長半減期の放射性核種の検出がで

きる装置である。希少存在の同位体をイオンカウントで計測し、豊富な安定同位体を電流計測で行い、高精度分析を行う。そのため、中程度の同位体比 ($10^{-4} \sim 10^{-8}$) は測定が難しい。存在度が極めて限られた核種の分析を行うため、AMS での分析では、微量成分を完全に分離し計測する。

AMS の基本構成は“負イオン源”と“タンデム加速器”の組み合わせである。タンデム加速器を用いる AMS では、負イオンを入射する必要があるため、一般的には、セシウムスプッター型固体負イオン源が使用される。負イオン源を採用することで、AMS で致命的な妨害となる同重体の多くを取り除くことができる。例えば、炭素-14 測定での窒素-14 やアルミニウム-26 測定でのマグネシウム-26 などがそれにあたる。タンデム加速器は、イオンの入口と出口がグランド電位であり、中央部（ターミナルと呼ばれる）が MV 程度の高電圧とされている。入射した負イオンはターミナルに向けて核子あたり MeV 程度まで加速される。ターミナルで荷電変換が行われ、正イオンとなると、出口に向けて再度加速される。このように 2 段階の加速が行われることからタンデム加速器と呼ばれている。荷電変換の際に、同重体である分子イオンも分解されるため、後段の質量分析系で取り除くことができるため、目的核種のみを高感度に計測できる。AMS の出現により炭素-14 年代測定の応用が拡充したが、近年、小型の AMS が使われるようになり、さらにその応用範囲が拡大した。



図 5. 東京大学大気海洋研究所に設置された
シングルステージ加速器質量分析計

東京大学大気海洋研究所に設置されているシングルステージ AMS は、前述の 2 段階加速を行わず、加速電圧も 240 kV と比較的低くすることによって、安定的な分析が可能となり、多数試料の高精度分析や微量試料の分析が可能になった（図 5）。その結果、海洋循環の分解能分析や特定有機化合物やアミノ酸といった炭素循環の研究に広く応用されている。

近年、計測するイオンのイオン化効率をより高くする正イオン源の開発も進んでおり、ECR イオン源など、ガスを導入することが可能なガスイオン源の注目が高まっている。例えば、生物地球化学的に重要な炭素-14 の分析には、これまで試料をいったん二酸化炭素に変換した後、グラファイトにする必要があったが、ガスイオン源を用いることで二酸化炭素を直接導入できるため、グラファイト化の過程が不要となり、分析効率と試料の少量化を達成することができる。しかし、正イオンの生成では、同重体の窒素-14 が抑制できないため、加速後に、正イオンから負イオンへの荷電変換を必要とする。ECR イオン源自体のイオン化効率は高いものの、この荷電変換効率が低いいため、いまだグラファイト試

料を使ったイオン源の優位性を上回るに至っていないなどの問題点もあるため、今後の開発が待たれる。

5. 今後の技術開発のポイント

質量分析装置は、試料導入、イオン化、質量分離、検出という4つの機能から構成される。個別のコンポーネントである試料導入部、イオン源、質量分析部、検出器、解析用ソフトウェア、それぞれの開発を進め、一つの装置としての完成度を高めることが重要である。また、個々のコンポーネントを他の分析機器へ展開する視点も不可欠である。本報告書では、4つの大型質量分析装置を取り上げた。性能向上のために以下のような技術の高度化が研究の現場から期待され、実際に、研究のニーズに合わせた個別のコンポーネントが企業と研究者、あるいは共同で、開発されている。

- (1) 高解像度化：イオン源そのものの性能向上（高輝度のイオン源、測定対象元素のイオン化をさらに促進する新規イオン源）が考えられる。
- (2) 高感度化：測定対象元素のイオン化効率の向上（イオン源も含む）、イオンの機器内透過率の向上、検出効率の向上などが考えられる。
- (3) 高スループット化：試料導入に係るオートサンプラー、マルチモーダル・全自動解析ソフトウェアなどが考えられる。

こうした個別のコンポーネントの技術の進展により、海洋・地球科学における微量成分分析は、より高精度かつ包括的なデータ取得が可能となり、新たな科学的知見の獲得が期待される。特に、微量有機物の検出と同位体分析は、海洋の生物地球化学サイクルの解明に貢献し、気候変動や生態系変化の予測に役立つ。

さらに、リアルタイム解析や装置の超小型化が進むことで、あらゆるフィールドでの「その場分析」が実現しつつある。例えば、数センチ角の MEMS-GC や、約 5 センチ角の ToF 型質量分析装置、宇宙用の高圧電源システムとギガビット通信システムが開発されつつあり、惑星探査機、潜水艦、国際宇宙ステーション（ISS）などの密閉空間での気体分析に活用が期待される。これらの技術を応用することで、将来的には AUV（自律型無人潜水機, Autonomous Underwater Vehicle）に搭載し、広範囲な海域の科学調査、火山や環境モニタリングの精度向上、広範囲でのマルチデータ取得が可能となる。

一方、質量分析は、試料を破壊する手法だけではなく、非破壊で元素や同位体比を分析する技術の開発も進められている。代表的な手法として、キャビティリングダウン分光法、ラマン赤外分光法、核磁気共鳴法（NMR）などがある。また、放射光施設を活用したレーザコンプトン散乱ガンマ線を用いた非破壊同位体識別技術（鉛同位体のイメージングなど）も開発が進んでいる。

今後の各分析装置に関わる技術革新とともに、AI や自動化、遠隔操作のさらなる発展が組み合わさることで、より効率的なデータ取得と解析が進み、海洋・地球の理解が深まることが多いに期待できる。

6. 機器共用から切り拓く新しい海洋・地球のサイエンス

文部科学省は、共同利用・共同研究拠点（共共拠点）、先端的な研究を推進する場として、国内外の多様な研究を牽引する駆動力となっている。同時に、設備サポートセンター整備事業（2011～2020 年度）やコアファシリティ構築支援プログラム（2020 年度～）など研究機器の共用事業を並走させ、機器・設備の一層の共用化を進めている。共共拠点およびこれらの事業が、効果的に連携することで、研究に携わる誰もが必要とする最先端～汎用機器を障壁なく利用できる環境が、国内の研究機関各所に整えられつつある。これら機器・設備の共用を通じ、異分野との融合研究の促進や新学術領域への拡がりをもたらされている。物質の化学計測は多くの分野に必須の科学プロセスであり、その必要性は将来も減じることはない。また、計測・分析技術は時代とともに先鋭化しているため、その維持管理エフォートやコスト（人材も含む）が上昇し続けていることを考えると、機器共用は自然な流れである。

これまでの機器共用に関するプログラムは、大学を中心とするもの（共共拠点、設備サポートセンター、コアファシリティなど）や、類似あるいは相補的な分析能力を持つ研究機器群（プラットフォーム事業）を対象としたものが多い。機器・技術の開発および運用を長年にわたり着実に遂行してきた大学と国研が連携し、サイエンスの目的達成に向けて、複数の研究機関に所属する研究者が相互に協力しつつ機器を共用する枠組みは、これまでにあまり前例のない試みである。例えば、本報告書において取り上げた質量分析装置群は、単一の試料に対して相補的な分析情報を提供しうるものであり、これらのデータを統合的に活用することにより、試料の起源や進化過程を多角的な観点から検討することが可能となると期待される。今後研究力の底上げ、若手を含む人材育成と機器運用の持続性、各サイエンスコミュニティとの連携を考えると、広範囲なサイエンスをカバーしうる研究機器とそれらを駆使する第一線の研究者とアイデアを形にする技術者、そして分析手法・開発のアイデアを共有する新しい連携（単一の研究機関ではなく、複数の研究機関連携による人材交流など）を進める必要がある。

共創から生まれる研究アイデアを実現するために、部品・構成要素単位でのアップデートや試作機の開発と、それらの積極的な調達を実現すべきである。そのためには、分析機器企業との積極的な対話、たとえば R&D 部門や大学の技術職員との共同研究など、今後 20 年のサイエンスの動向を見据えた機器開発を積極的に進められる研究者と研究部門の体制が必要であろう。質量分析装置の場合は、イオン源、イオン化方式、質量分析部、真空装置、検出器といったハード、またデータの

取得に関わる信号強度の読み出し、データ解析などソフトに関わる面が部品・構成要素として考えられる。これらの構成要素は、数年単位でアップデートされる場合も多く、既存の機器の高度化が行われている。これら構成要素は、海外ベンチャー発が多く、テスト段階から先鋭的な分析研究に使用されて成果創出につながり、大手のメーカーへの技術買収、あるいは互換性を持った形で市場投入のケースもある。その後、既存機器へのレトロフィット、あるいは次世代機器として大手メーカーから市場に出される場合も多く、価格の高騰による購入の難しさと国内には数年遅れでの導入となるため世界のサイエンスの潮流から後塵を排するケースが散見される。機器共用を進めることで新しいサイエンスの潮流を日本から生み出し、世界をリードしていくことを目指すべきである。

今後も『新たな価値を創造する研究の場』として大学と研究所を持続的に機能させるためには、研究に携わる人材の確保と育成、機器および設備の持続的な運営、積極的な情報発信とファンドレイズが求められる。具体的には、技術者、分析支援者、アドミン、URA などの多様な人材の役割を重視し、適切に配置することが重要である。国内外の次世代に向けて研究成果や取り組みを積極的に発信し、安定的な資金調達のための効果的なファンドレイズを行わなくてはならない。これらの取り組みには、サイエンスの潮流や国際情勢が大きく影響する。特に、為替レート的大幅な変動により海外製装置や部品の適正価格での導入が困難になる可能性があるため、国内製装置の開発に向けた企業との連携が重要な役割を果たす。さらに、10 年単位の長期的な視野で、研究機関の研究・経営戦略と密接に関連する機器の戦略的な導入・高度化・更新を行い、経営層およびコミュニティとの対話を通じて機器導入の方針を策定する必要がある。また、国際的な科学の潮流に迅速に対応するための 2 年程度の柔軟な短期目標をたて、長期的ビジョンと短期目標の両立が求められる。そして、これらを統合し、持続的かつ戦略的に研究機関を運営していく必要があると考えられる。

機器共用の場が、新たな学術的知見の創出を促進する研究基盤として機能するとともに、多様な関係者が当該基盤および共用機器を介して連携することにより、革新的な発想が誘発されることが期待される。こうして得られた多角的な視点とアイデアに基づき、部品・構成要素レベルでの改良や試作機の開発が、研究者－技術者－分析機器会社の連携のもと着実に進展し、それらの成果を迅速かつ柔軟に調達・運用することによって、新しい海洋・地球科学の地平が力強く切り拓かれることが強く望まれる。

7. 研究現場から提案する機器共用の枠組みで達成・解決したい点

- (1) 機器情報の統一フォーマット：一つの機器の情報が多様な様式や不統一な情報で所有されている場合が多く、データ更新や機関の評価の際に必要な情報が適切に集約されないことが課題となっている。さらに、文科省などの事業ごとに用語の定義が異なることも多く、現状把握に時間と労力が費やされる。多重のデータ定義は弊害しか生まず、担当部門や担当者の負担が増大

する。そのため、できる限り「従来通りの手法」や「自部署のルール」を撤廃し、スムーズな機器共用を機関横断で進める必要がある。

- (2) 機器共用（サイエンス）のデータに関する経営戦略化：局所最適化にとどまらず、業務や事業全体で必要となるデータを参画機関全体で規格化し、機関が連携した専門部局が包括的なデータマネジメントを行うデータベースの概念が必要である。
- (3) 共用システムの利用料の適正価格設定：一つの例として、海洋研究開発機構・高知コア研究所では、NanoSIMS の受託分析の利用料金は、民業圧迫の懸念や公財の偏利的使用への配慮から、従来は利用料金に利益を上乗せしない方針が取られている。一方、産官学連携が活発化する中で、研究機関ごとに事務運営・管理費（いわゆる間接経費）を事業運営費として計上することは一般化してきたが、未だ実費の範囲を超えない場合が多い。適切な外部資金獲得手段として、「付加価値」を考慮した料金体系の見直しが求められる。具体的には、機器が必要なタイミングで利用できることや、研究機関の人的・機器的リソースやサイエンスに基づいた的確なアドバイスといった付加価値の対価を料金に反映する方法が考えられる。
- (4) 研究開発マネジメント人材の確保：本枠組みにおける機器共用の推進にあたっては、機器の利用支援に従事する技術職員の雇用・育成に加え、経営戦略の視点を持ち、研究機関の有する資源やコンテンツを有機的に結びつけ、発展させるアドミニストレータの存在が不可欠であると考えられる。こうした人材には、研究プロジェクトの企画立案に始まり、体制の構築、外部資金の獲得、進捗の管理、内外関係者との折衝・調整、そしてプロジェクトの最終評価に至るまで、幅広い業務を担うことが求められる。加えて、研究設備や機器の維持管理・高度化・有効活用に関しても、自機関の技術職員と緊密に連携しながら、戦略的に実行する能力が必要である。

8. おわりに

本報告書が示すように、観測・計測・分析技術および機器は、新たな原理の発見や検証、分野横断的な連携の促進、さらには新領域の創出において、極めて重要な役割を果たしてきた。研究者個人のみならず、研究コミュニティはその意義を深く認識しており、今後も、技術革新とそれに伴う研究アイデアの展開が相乗的に進むことで、新たな海洋・地球科学の地平が切り拓かれることが強く期待される。

本報告書を契機として、これらの分析技術に関心を寄せる若手研究者や異分野の研究者・技術者が新たに参画し、分野を超えた連携と創発的な議論が促進されることを願う。そうした出会いの中からイノベーションが生まれ、新たな科学的知見が創出されることは、関係者にとって大きな喜びである。

今後、本報告書の内容は、学会等のさまざまな場で発信していく予定である。あわせて、関心を持つ機器開発担当者や関連企業とも積極的に連携を図り、計測・分析技術分野における課題や、機器開発・共用に関する諸課題について、建設的な議論を進めていきたい。また、本稿で取り上げることのできなかった技術についても、今後、新たな協力者を得て検討を深め、さらなる発展につながることを期待している。

海洋・地球科学分野における質量分析技術報告書編集委員会
Editorial Board for the Ocean and Earth Sciences Mass
Spectrometry Report

委員名簿

(50 音順)

伊藤元雄	国立研究開発法人海洋研究開発機構 政策研究大学院大学
大河内直彦	国立研究開発法人海洋研究開発機構
乙坂重嘉	東京大学・大気海洋研究所
堀江憲路	大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所
横山祐典	東京大学・大気海洋研究所

2025 年 6 月 12 日

参考文献

1. 関連団体

- ① 質量分析学会同位体比部会 <https://mssj.jp/society/branch/isotope.html>
- ② JAIMA 一般社団法人 日本分析機器工業会 <https://www.jaima.or.jp/>

2. 参考文献・報告書¹

- ① マイクロビームアナリシス・ハンドブック | Ohmsha
- ② 先端計測分析技術に関する俯瞰報告：文部科学省
- ③ 研究開発基盤部会 (第 29 回) 配布資料：文部科学省
- ④ 研究環境基盤部会 (第 118 回) 配付資料：文部科学省資料 1-2 中規模機器WG説明資料
- ⑤ 人材委員会 研究開発イノベーションの創出に関わるマネジメント業務・人材に係るワーキング・グループ：文部科学省
- ⑥ 計測横断チーム調査報告書 計測の俯瞰と新潮流 | 戦略提案・報告書 | 研究開発戦略センター (CRDS)
- ⑦ 研究機器・装置開発の諸課題 ―新たな研究を拓く機器開発とその実装・エコシステム形成へ向けて― (市場動向・海外政策動向アップデート版) (―The Beyond Disciplines Collection―) | 戦略提案・報告書 | 研究開発戦略センター (CRDS)

1

- ① <https://www.ohmsha.co.jp/book/9784274504969/>
- ② https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu17/houkoku/1368123.htm
- ③ https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu28/siryo/mext_00020.html
- ④ https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/010/siryo/1417785_00029.htm
- ⑤ https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu10/005/
- ⑥ <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2018-RR-03.html>
- ⑦ <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2024-RR-03.html>