

## 時を測る化学

## —同位体がつなぐ基礎科学と最先端技術—



若 者

伊 藤 健 吾\*

Chemistry of Time: Isotopes Connecting Basic Science and Cutting-Edge Technology

Key Words: geochemistry, isotope chemistry, geochronology, ICP-MS, TIMS

## はじめに

筆者は2025年4月より大阪大学大学院工学研究科に着任し、同位体化学・地球化学を専門として研究と教育に携わっています。これまで天然試料を対象に同位体分析や放射年代測定の研究を行ってききましたが、大阪大学での研究生生活は、これまで培ってきた手法を基盤にしつつ、新しい分析装置や研究領域に挑戦する契機となっています。本稿では、これまでの研究を振り返りつつ、大阪大学での活動を通じて基礎科学と応用的視点の両立について考える機会となったことを述べたいと思います。

## 放射年代測定との出会い

放射性同位体を活用した年代測定法は、太陽系や地球の歴史における出来事の順序や因果関係を解明する上で不可欠な手法です。鉱物などの地質試料が「いつ」形成されたかを明らかにすることで、惑星形成から生命進化に至る多様な現象の時間軸を確立できます。この方法は、放射壊変する親核種と、その生成物である子孫核種の存在度比を計測することに基づき、精密な同位体比の測定を必要とします。そのため、年代測定法の発展は質量分析法の進歩と表裏一体であり、両者は相互に影響しながら進展してきました。太陽系の起源（45.67億年前）や恐竜絶滅を示すK-Pg境界（6600万年前）など、地球・

惑星史を画する主要な年代は、質量分析を用いた放射年代測定によって確立された成果です。

私がこの学問分野に初めて出会ったのは、学部での地球化学の授業でした。この学問が、鉱物や岩石に刻まれた微細な化学情報から地球や惑星の過去を読み解けることに深く魅了されました。中でも、放射年代測定に関する教科書、年代測定概論<sup>1)</sup>は今も座右の書として手元にあり、折に触れて読み返しています。鉱物に記録された元素比や同位体比といった化学情報から、生成の「時」という物理量を直接的に取り出せる——その理論の明快さに心を奪われ、「この研究を自分もやってみたい」と強く思ったことを今でも鮮明に覚えています。

## 低ウラン濃度鉱物の年代測定：大学院での研究生生活

私は大学院修士課程および博士課程を、宇宙地球化学と年代学を専門とする飯塚毅先生のもとで過ごしました。想定外の大学院合格という出発ではありましたが、学部時代に最も心惹かれた分野で、同位体分析の技術と思想を一から叩き込んでいただきました。“神は細部に宿る”という言葉のとおり、わずかな異変や「なぜ？」を大切にする姿勢は、今も私の研究の中心にあります。常に温かくも鋭いご指導に支えられ、研究に没頭できた日々に心より感謝しています。

大学院に進学して最初に取り組んだテーマは「極低量のウランおよび鉛の同位体分析」でした。ウランの放射壊変を利用するウラン-鉛、鉛-鉛年代測定法は地球科学において最も広く用いられる年代決定法であり、数十億年にわたる地球・惑星の歴史を解明する基盤となっています。ウランは岩石-メルト間で液相に選択的に分配されるため、地殻上部や火山岩には比較的高濃度で存在しますが、深部の岩石では非常に少なくなり、年代測定法の適用が難しく



\* Kengo ITO

1994年3月生まれ  
 東京大学大学院 理学系研究科  
 地球惑星科学専攻博士課程 (2023年)  
 現在、大阪大学大学院 工学研究科  
 環境エネルギー工学専攻  
 助教 博士 (理学)  
 専門/地球化学、質量分析  
 TEL : 06-6879-4099  
 E-mail : kengo@see.eng.osaka-u.ac.jp

なります。私は、そうした「ウランがほとんど含まれない岩石」でも年代を決定できるよう、極めてわずかなウランと放射壊変によって生じた鉛を正確に取り出し、測定する方法の開発に挑戦しました。

この研究で最も困難だったのは、試料中にごくわずかな含まれない一次的なウランと鉛を、他の成分から選択的に取り出すことでした。分析対象の量は数十ピコグラム (pg:  $10^{-12}$  g) オーダーと極めて微量であり、わずかな汚染でも結果に影響するため、実験器具の徹底洗浄や超高純度試薬の整備など、ラボ全体の汚染管理 (ブランク管理) が不可欠でした。さらに、地質試料は形成後に風化などの影響を受け、二次的に元素が出入りするため、正確な年代を求めには一次成分のみを抽出する必要があります。私はこの課題に対して酸浸出法 (acid leaching method) を用い、鉱物表層から二次成分を段階的に溶解除去することで、鉱物内部に保持された初生のウランと鉛を抽出するプロトコルを構築しました<sup>2)</sup>。電子顕微鏡観察と浸出液の組成分析を組み合わせた系統的検討により、1年半にわたる試行錯誤の末、この手法の有効性を実証することができました。

### 米国での挑戦：若手研究者海外挑戦プログラム

手法の開発を終え、私が挑戦したのは主要構成鉱物 (造岩鉱物) である鉄チタン酸化物や輝石のウラン-鉛年代測定でした。これらはウランを僅か  $10\text{--}100\text{ ng g}^{-1}$  しか含まない一方、鉛よりもウランを選択的に取り込む性質から、年代記録の担い手として有望です。極微量のウランと鉛を扱うため、同位体濃縮トレーサであるダブルスパイクを組み合わせた表面電離型質量分析法 (ID-TIMS) を用い、試料調整から測定まで徹底したクリーン環境とウランや鉛の濃縮同位体を使用できる分析環境が必要になります。こうした設備の構築は国内では難しく、日本学術振興会「若手研究者海外挑戦プログラム」に採択され、海外での実験に踏み出しました。

当初はオーストラリアでの研究を予定していましたが、コロナ禍による国境封鎖で計画は頓挫。事態は収束の兆しを見せないまま半ば諦めかけていたところへ、幸運にも米国・カリフォルニア大学デービス校の Qingzhu Yin 先生の研究室で受け入れていただくことになりました。世界最高水準の鉛同位体分析環境<sup>3)</sup>のもと、国内で整備した塩酸分解法を適

用し、半年間で 98 件の同位体比測定と貴重な月試料 2 つを含む 4 試料の年代測定に成功しました。初めての TIMS 運用に手探りで取り組みながらも、Yin 先生や滞在中に合流した Yuri Amelin 先生、同世代の研究者たちと議論を重ねる中で、分析哲学やデータ解釈の考え方を深く学ぶことができました。

現地での経験を通じて、日本の研究基盤は世界の舞台でも十分に戦えることを実感する一方、人的な交流と議論の機会が研究を大きく前進させることを痛感しました。また、受入れ先で聴講した講義で、学生たちが熱心にノートを取り、講義の合間にも矢継ぎ早に質問を投げかける——そのハングリーさにも強い刺激を受け、「外に出て学ぶ意義」を体感しました。世界各地の研究者が同じ机を囲み、異なる視点を出し合いながら新しい方法を模索する現場に身を置いたことが、今の研究姿勢の確かな土台となっています。

### レーザー局所同位体分析との出会い：博士研究員時代

博士課程では主として試料全体を溶解して分析するバルク分析に取り組んできました。この方法は試料量を確保できるため高精度分析に有利である一方、組織情報が失われやすいこと、また分析に時間を要することが課題です。近年は、位置情報を保持したまま微小領域を測る局所分析が急速に発展しており、博士研究員時代に平田岳史先生のもとでレーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析法 (LA-ICP-MS) に携わる機会を得ました。

まず驚いたのは検出能と空間分解能の両立です。レーザーの繰返し周波数やアブレーション条件を最適化すると、低~サブ  $\text{ng g}^{-1}$  までの元素マッピングが実現可能であり、 $\text{ng g}^{-1}$  オーダーで放射起源鉛を含む鉄チタン酸化物やカルシウムリン酸塩でも、溶液化せずに局所の同位体情報を取得できることを実感しました。岩石・鉱物は組織が履歴を語ります。中心と縁辺の年代差や、拡散・変質による二次改変などを像として捉え、狙点から同位体比を高精度に取り出すことで、得られた年代の解釈の一貫性を大きく高めることが可能になりました<sup>4)</sup>。

研究室では、短パルス化 (フェムト秒化) や小径ビームによる高空間分解能化、LA に伴うナノ粒子計測、低デッドボリュームセルによる洗い出し時間短縮やイメージングソフトウェアの開発など、ハー

ド・ソフト両面の高度化が進められていました。私はこれらを基盤に、走査で得た元素・同位体の空間分布を年代解釈に結びつけるイメージング年代測定(ハイブリッド年代学)に注力し、さらに深さ方向へ拡張した3Dイメージングにも取り組みました。試料の削り出しやシグナル積算時間にはなお改良の余地がありますが、包有物や微量成分の3D分布、拡散プロファイルの再構成は実用域に近づいています。

将来展望として、(i) 飛行時間型(ICP-TOF-MS)との組み合わせによる高速イメージング、(ii) タンデム型(ICP-MS/MS)での反応ガス活用による多原子干渉の抑制(ハロゲン等の感度改善)、(iii) 分流による濃度×同位体比の同時計測が挙げられます。これらを統合することで、「元素×同位体×時間」の多次元イメージングが可能となり、局所同位体分析は年代学・プロセス解析の両面で一段深い解像度に到達できると考えています。

こうした技術開発を支えたもう一つの“研究装置”は、週末の円卓でした。平田先生や個性豊かなメンバーと大学近所の中華店で皿を囲み、食後にアイスを手研究談義から笑い話まで花を咲かせる——その一皿分の時間が、発想を整え日々の分析を前進させる確かな推進力となりました。楽しく濃密な議論の場をともに過ごせたことに、心から感謝いたします。

#### 大阪大学工学研究科・藤井研究室への着任

2025年4月より大阪大学大学院工学研究科・量子システム化学工学領域(藤井俊行先生)に着任いたしました。藤井研究室では、溶液および界面での配位反応・分配・同位体効果のメカニズムを量子化学と実験で記述し、得られた知見を放射性廃棄物の処理や同位体分離の設計・最適化へと応用しています。私はこれまで、天然試料中の極微量ウランや鉛の同位体比を精密に測定する研究に従事してきました。新たな環境では、同位体比の分別が生じる物理化学現象そのものを解き明かす立場へと大きく視点を転じています。しかしながら、支える実験プロセスや分析技術の基盤は共通しており、これまで磨いてきた同位体分析の経験が、今の研究の大きな原動力となっていると実感しています。同位体研究は、環境・原子力・宇宙といった幅広い領域に応用可能なポテンシャルを秘めています。私はその基礎学理

の探求を通じて、これら分野をつなぐ「同位体の共通言語」を拓いていきたいと考えています。

また、大阪大学は質量分析計開発の拠点でもあり、私は「装置を使う立場」から「装置を作る立場」へと挑戦を始めました。現在は、小型で堅牢かつ機動性の高い発光分析(LIBS) + 質量分析計の新規開発に取り組んでいます。未知の環境下でも信頼性高く測定できる次世代装置を自らの手で実現し、基礎研究と応用展開の双方に貢献したいと考えています。

#### おわりに

地球化学への学部での出会いから大学院、海外での挑戦、そして大阪大学での新たな歩みに至るまで、常に多くの先生方・共同研究者・学生の皆様に支えられてきました。あらためて深く感謝申し上げます。これまで培った同位体分析を基盤に、環境・原子力・宇宙分野に資する同位体化学・年代学を一層推進していきます。同時に、これまでの国際協働の経験を深化させ、その成果を国内外へ積極的に展開し、視野と技術を磨き続けたいと考えています。「時を測る化学」を合言葉に、同位体という共通言語で基礎と応用、国内と海外、学理と装置開発を橋渡ししながら、一歩ずつ前進してまいります。

#### 謝辞

末筆ながら本稿執筆の機会をいただきました大阪大学大学院工学研究科の藤井俊行教授、ならびに「生産と技術」関係者の皆様方に厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 兼岡一郎 (1998) 年代測定概論. 東京大学出版会.
- 2) Ito, K. T. M., Hibiya, Y., Homma, Y., Mikouchi, T., and Iizuka, T. (2019). The promise and potential pitfalls of acid leaching for Pb-Pb chronology. *Chemical Geology*, 525, 343-355.
- 3) Amelin, Y. and Yin, Q. Z. (2025). Recent progress and future prospects of the early solar system chronology. *National Science Review*, 12(9), nwaf281.
- 4) Ito, K. T. M., Niki, S., Hasegawa, H., Kurihara, K., Morohoshi, T., Mikouchi, T., Hirata, T., Bizzarro, M., Iizuka, T. (2025). Long-lasting

thermal activity on the brachinite parent body revealed by mineralogy, REE chemistry, and U-Pb dating of Ca-phosphates in Northwest Africa

10932. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 402, 173-187.

