

加速器質量分析の近年の進歩と将来展望

2026年
迎春



登壇者

ささ 笹	きみ 公	かず 和	氏 ¹⁾
ふじ 藤	た 田	な つ	奈津子氏 ²⁾
おお お	もり 森	たか ゆき	貴之氏 ³⁾
まつ まつ	し 四	ゆう 雄	騎氏 ⁴⁾
みや みや	はら 原	ひろ ひろ	子氏 ⁵⁾
お お	わり わり	さと さと	聡子氏 ⁶⁾
尾 尾	張 張	ひろ ひろ	之氏 ⁷⁾
まつ まつ	崎 崎	浩 浩	

司会者

【2025年8月12日(火)対面開催】

—自己紹介—

松崎 本日はお忙しい中お集まりいただきまして、ありがとうございます。

今回のテーマの加速器質量分析は、同位体の分析において極めて高感度な、他に類のない測定手法です。今日は加速器質量分析をリードしている研究者の皆さんにお集まりいただきました。

私は、東京大学総合研究博物館タンデム加速器研究施設 MALT (Micro Analysis Laboratory, Tandem accelerator, The University of Tokyo) の松崎浩之と申します。学位を取る研究の時点から加速器質量分析とかかわってきて、検出器の開発等も含めて、わが国で加速器質量分析が実用化されていく過程と共に学んできました。

MALT は共同利用施設でもありますが、いろいろ

な分野の研究者に使っていただいて、加速器質量分析の応用分野の研究を広げたい、進めたいと思ってやってきました。加速器質量分析は、 ^{14}C を使った年代測定¹⁾ が最も重要で最も利用されていますが、MALT では ^{14}C 以外の核種の応用研究を支えてきたと自負しています。

個人的に思い入れがあるのが ^{129}I という核種で、2000 年代の初めぐらいにはわが国のパイオニアとして実用化を果たしました。それ以来、 ^{129}I は MALT では重要な利用核種となっています。福島第一原子力発電所事故による環境影響評価の研究にもだいに利用していただきました。

MALT は、もう 30 年ぐらい動いていまして、装置としてはかなり老朽化していますが、まだまだ利用していただいている研究者はたくさんいますし、かなりの稼働率でデータを出している状況ですので、加速器質量分析の今後の発展にも貢献していきたいと思います。

笹 筑波大学の放射線・アイソトープ地球システム研究センター応用加速器部門の部門長をしております笹です。数理物質系物理学域という物理の学科にも所属しています。

私は、もともと加速器をつくる研究、加速器開発の研究室の出身で、線形加速器の開発をしていまし

- 1) 筑波大学数理物質系 物理学域 放射線・アイソトープ地球システム研究センター 応用加速器部門
- 2) 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター 年代測定技術開発グループ
- 3) 東京大学総合研究博物館 放射性炭素年代測定室
- 4) 京都大学 防災研究所 地盤災害研究部門 山地災害環境研究分野 理学研究科 地球惑星科学専攻地球物理学分野 協力講座 兼任
- 5) 沖縄科学技術大学院大学 (OIST) 太陽地球環境・気候ユニット
- 6) 東京海洋大学学術研究院 海洋資源エネルギー学部門
- 7) 東京大学総合研究博物館 タンデム加速器研究施設

1) 放射性炭素年代測定のうち、試料中の ^{14}C の数そのものを直接数えるのが加速器質量分析法 (AMS 法)。



笹 公 和 氏

た。1999年に筑波大学に就職して、そこから、12UDペレトロンタンデム加速器という国内で2番目に大きかった12MVのタンデム静電加速器を使って、 ^{36}Cl のAMSを、長島泰夫先生、関李紀先生方と共にやっておりました。私は主に ^{36}Cl の開発、同位体比 10^{-15} レベルで測定するというものの開発を行っていました。最初の研究は、 ^{36}Cl を用いた広島原爆のDS02²という被ばく線量の推定方式の検証実験で、環境、年代測定とは違う研究をやっておりました。

ただ、12UDタンデム加速器は2011年の東日本大震災で倒壊してしまい、5年ぐらいかけて復興経費により6MVタンデム加速器の導入、及び、ビームラインの設計、開発を担当しました。6MVタンデム加速器は2016年から稼働しており、現在はそれを用いたAMSの開発を行っています。測定核種は ^{14}C 等ほとんどの核種に対応できますが、いま主に行っているのは ^{36}Cl と ^{129}I の測定手法の高性能化・高効率化を求める開発や応用研究です。

藤田 日本原子力研究開発機構東濃地科学センターの藤田です。

もともと加速器質量分析はやっていなくて、学生ときはイオンビーム分析とイオンビームの素過程の研究をして学位を取りました。2014年に東濃地科学センターへ転籍し、そこから初めて加速器質量分析に携わっています。イオンビーム分析としての



藤 田 奈 津 子 氏

教科書的な加速器質量分析は知っていましたが、実際にやるのは初めてで、AMS以外のイオンビーム分析とは加速器の使い方に大きな違いがあり、ビームの調整の方法も結構大変だったので、最初は慣れるのに苦労したという経緯があります。

いろいろな核種の測定を開発するのと並行して、私みたいな素人でも簡単にできるAMSがないか、装置を小型化させる研究も進めてきました。いまは、炭素専用器になりますが、東濃地科学センターだけの技術で2m弱四方の装置開発を進めています。

あとは、前処理技術の開発、いろいろな核種の測定を順調にできるように、学生時代のイオンビーム分析の技術も使いながら開発を進めています。

大森 東京大学総合研究博物館の大森貴之です。

専門は放射性炭素年代測定です。高校生の頃、千葉県にある国立歴史民俗博物館が大きな研究プロジェクトを行っていて、弥生時代、縄文時代の真の年代がいつなのかという研究を進めている最中で、放射性炭素(^{14}C)が考古学の定説を覆したというニュースがありました。それを見て、これをやれば目立てるな(笑)、考古学者をひねってやろうと思って、年代測定に興味を持ちだし、大学で化学を専門としながら、質量分析とは何か、化学分析とは何か学んできました。

実際に研究を始めたのは、トルコの考古学の遺跡の発掘調査や、得られた試料を年代測定したりするというかわり合いからです。

総合研究博物館の中でも、松崎さんはMALTですが、僕は放射性炭素年代測定室と言われる放射性炭素のAMSに特化した施設に所属しています。同

2 原爆の個人被曝線量を推定するシステム。放影研が1957年にT57Dを発表後、T65D、DS86と見直した。その後、中性子による放射化物の測定値とDS86の計算値が異なることから2002年に再評価されDS02を導入。



大森貴之氏

じく共同利用施設で、国内外から共同研究の依頼を受け付けて、そこで年代測定、編年研究、年表をつくるサポートをするのが日々やっている研究活動です。

私自身も、研究プロジェクトを持たせていただいていた、海外だとメソアメリカ³や、南米のパルー等の地層を掘削して、得られたサンプルから古気候を復元したり、国内だと福井県にある水月湖⁴の地層を分析したり、海だと別府湾⁵等のフィールドにも出て研究しています。プロジェクトを進めながら手法も開発していて、AMSとは異なるPIMS⁶という新しい分析技術も導入して、より活発に、新しい質量分析の世界を開いていければと考えています。

松四 京都大学防災研究所の松四と申します。地形学という分野で、主に斜面災害の研究をしています。私は、筑波大学の出身で、東京大学でのポストドクを経て、2011年に京都大学に移りました。地形学では、宇宙線由来の核種を使って地形の変化を調べます。地形変化は常に土砂の移動を伴いますので、土砂災害の予測にも応用が利きます。

筑波大にいた頃は、笹さんが言われていた先代の

3 メキシコ中央部から中央アメリカにかけて存在した古代文明。

4 福井県美浜町と若狭町に位置する三方五湖の中で最大の面積を持つ二重底の湖。湖底には7万年分の地層「年縞」が存在。

5 最も新しい地質時代である人新世（Anthropocene）の世界標準模式地及び補助模式地の有力候補として別府湾海底堆積物が挙げられている。

6 陽イオン質量分析（PIMS：Positive Ion Mass Spectrometry）。電子サイクロトロン共鳴イオン源（ECRIS）を用いて生成した正の炭素イオンを数十kVで加速し、荷電変換セルで負の炭素イオンに変換して質量分析を行う方式。



松四雄騎氏

12UDの加速器で方解石の中の³⁶Clを測っていて、MALTでは石英の中の¹⁰Beを測定していました。これらを使って、山地の地形が変化する仕組みを理解し、斜面災害の発生予測に活かすという研究をしてきました。

今後ますます宇宙線由来同位体の分析のような理学的なアプローチに基づいた斜面災害予測の実用化に向けて、工学的、あるいは実用的な応用の分野に橋渡しをして、研究を政策転換していきたいと思っています。

宮原 沖縄科学技術大学院大学に4月に移りました宮原と申します。

私は、宇宙放射線や太陽の物理が専門です。太陽や宇宙放射線は非常に長いスケールの変動があるのですが、望遠鏡による直接観測データは長いものでも400年ぐらいのデータしかありません。宇宙放射線に至っては、80年ぐらいしかデータがありません。太陽活動を過去にさかのぼって調べるためには、年輪の¹⁴Cや堆積物の¹⁰Beのデータを使う必要があります。

太陽は、数百年に1回活動がすごく弱くなってしまうんですが、なぜそういう時代が来るかという問題は長らく解けていません。そういうものがどういうプロセスで起きるか見るときに、太陽の活動の基本的な周期として11年周期というのがあって、その長さが太陽内部の状態を知る手がかりになります。11年周期を見るためには、1年分解能というのがものすごく大事になってくるので、1年分解能のデータを増やして、より詳しく見たいということをやっとやっています。



宮原ひろ子氏

11年周期は、実際には9年だったり、長いときには16年等伸び縮みしますが、木の年輪の他にアイスコア⁷の分析もやってみたりしましたが、最近ではトラバーチン⁸も結構いいデータが取れるかもしれないということで挑戦しています。

尾張 東京海洋大学海洋資源エネルギー学部門に所属している尾張と申します。

私は学部・修士では日本海のメタンハイドレート、水とメタンからできる氷状の結晶を研究対象にしていました。海洋堆積物から水を絞って抽出して、その化学分析からどれだけハイドレートがそこにあるか、どれだけ分解しているかという化学的な観点から量の評価や、短期的にどう変動するのかという研究をしていました。加速器を利用したヨウ素の研究自体を始めたのは博士のときからです。メタンは、有機物が海底に降り積もって、微生物や熱によって分解されることで生じます。ヨウ素は生物親和性がすごく高いので、藻類等の海水中の生物の体内に吸着されて、生物の死後、有機物として海底面に降り積もります。有機物は、埋没過程で分解されるので、そのときに、有機物に吸着されていたヨウ素がメタンと一緒に海底下の間隙水中に溶存します。間隙水中のヨウ素の濃度を調べてみると、メタン濃度と非常に強い正の相関が見えるということがメタンハイドレートの海域調査から分かってきています。

7 南極内陸部から掘削した氷サンプル「アイスコア」から¹⁰Beの変動を読み解く。

8 炭酸泉を起源とする表層水から炭酸カルシウムが沈殿したもの。雨期等で土壌粒子の流入が増すと年層が形成される。氷床の年層と異なり圧縮の影響を受けない。



尾張聡子氏

そこから、間隙水中に存在し、長半減期を持つ放射性同位体¹²⁹Iに着目しました。半減期が1570万年と非常に長いため、地質学的に時間軸が非常に長い堆積物コア試料に対しても時間軸を入れることができるかもしれない、また、海底下に存在するメタンの起源に間隙水のヨウ素の同位体比から、メタンに対しても時間情報を与えられるかということで、ヨウ素の濃度や同位体比の研究を博士から始めました。

海洋堆積物中のヨウ素は、基本的に水に溶けて間隙水中を移動しています。日本海のメタンハイドレートが胚胎する地域⁹や、沈み込み帯という海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込む場所では、断層や地質構造に沿った水の移動が非常に活発なので、水やメタンのトレーサとして¹²⁹Iやヨウ素自体をツールとして使っていました。

博士を取ってからは、東京海洋大学に着任して、海洋資源系の研究を始めましたが、メタンだけではなく、ヨウ素にも着目しています。現在、世界で利用されているヨウ素生産量はチリと日本で約9割を占めていて、ヨウ素鉱床の分布は全球的に非常に不均質であると考えられています。どうしてそういう鉱床が不均質にできるのか、どうやったら鉱床として発達していくのかというプロセスに興味を持ち、ヨウ素がどう濃集するかという研究にも取り組んでいます。

9 鳥取沖、新潟県上越市沖の海鷹海脚北東部、同じく海鷹海脚中西部、上越海丘、最上トラフの5海域。



松崎浩之氏

—¹⁴C の話題—

松崎 加速器質量分析といえば¹⁴Cですが、¹⁴Cによる年代測定は、考古学の発掘等の調査においては必須の測定項目の1つです。しかし、¹⁴Cは年代測定以外にも多くの研究で利用されています。¹⁴Cで最近どういう研究トピックが話題になっているか、宮原さんに、ご自身の研究も含めてご紹介いただきます。

宮原 太陽はガスでできた、ただの球体というか天体ですが、その活動に、11年周期もあるし、長いところで2000年ぐらいの周期的な変動があることが分かっています。長周期の変動は、¹⁴Cの分析から分かったことですが、なぜ起こるかというのは、タイムスケールが長すぎて直接的な観測データからは探り得ない。

11年周期というのが基本のリズムで、この伸び縮みが太陽内部の大循環と関係しているので、11年周期を¹⁴Cでつぶさに見ていくと、内部で起こっていることがトレースできるのです。なぜ活動が変わるのかというプロセスへの1つの手がかりを得ることができると考えています。

長期的な変動が起こることで、数十年ぐらい太陽の活動が極端に弱くなるという時代が時々発生する。そういう時代に地球では小氷期が起こったりして社会的な影響も大きそうだということもあって、予測できるようにしたいというのが1つのモチベーションになっています。

11年周期の伸縮を見る場合に大事な1年分解能

は、年輪の¹⁴Cを調べるのが1番確実な手法です。ただ11年周期は本当に微弱な変動なので、精度との戦いで、何とか高精度を達成するため、2010年ぐらいから山形大学の門叶冬樹先生にお願いして一緒に研究してきています。1番いいときで0.3%くらい出せるようになって、周期がきれいにトレースできるようになったので、おもしろいデータが取れつつあります。

1番伸びたケースだと、太陽の活動がすごく下がって黒点が消える直前に16年周期というのが見つかりました。長い周期は、太陽内部の大循環が遅くなっていたことを意味します。遅くなると黒点が消える、という前後関係は、太陽物理にとって大事な手がかりになります。

太陽に関連したトピックでいうと、2011年に名古屋大学の三宅さん¹⁰が¹⁴Cのデータから巨大な太陽フレアを発見しました。基本的には銀河宇宙線がつくる¹⁴Cですが、突発的にもものすごいスケールの太陽フレアが起きたときにも、¹⁴Cができてしまう¹¹。西暦775年の年輪のところでもものすごく大きなジャンプ（生成率の急上昇）が見つかった。これは銀河宇宙線ではないし、γ線バーストでもない、どうも太陽のフレアらしいということが分かってきたので、太陽の活動のサイクルとはまた別にフレアの探索がかなり活発に行われるようになっていきます。

1万年間で3~4回は大スケールのフレアが起こっていることが分かってきました。実は、その10分の1の規模、それでも社会に甚大な影響を及ぼすレベルですが、本当はそういうものが10倍ぐらいの頻度で起こっているはずですが、¹⁴Cの変動（スパイク）は、どうしても大気循環の影響で信号が鈍ってしまうので、10分の1となるとかなり検出が厳しくなってきます。

そうなったときに、山形大学と進めてきた高精度化が役に立つとかいうか、いままでは見えなかったようなフレアが結構見つかり始めてきているという状

10 2012年名古屋大学宇宙地球環境研究所に所属する三宅美沙氏らの研究チームは、屋久杉年輪を調査したところ、西暦774~775年にあたる年輪から宇宙線増加現象に起因する¹⁴C濃度の異常上昇（¹⁴Cスパイク）を発見。三宅イベントと呼ばれる。

11 太陽面爆発に伴って発生する太陽高エネルギー粒子が地球に降り注ぐと、大気で¹⁴Cや¹⁰Be、³⁶Clをはじめとする宇宙線生成核種がつくられる。樹木年輪の¹⁴Cや氷床コアの¹⁰Be、³⁶Clは過去の極端太陽面爆発の指標として利用できる。

況になっています。逆に言うと、低い精度だとフレアが紛れている可能性が排除できず、正確なサイクルが辿れない。

これからものすごくいい精度でじゃんじゃん測るとフレアの理解が大きく進むし、太陽の大循環も理解が進むということで、何とかマシンタイムが増えるといいなと思っています（笑）。

太陽フレアは完全にランダムに起こるものではなくて、起こりやすいタイミングもあるはずで、太陽ダイナモ¹²がちょっと変になっていると起こりやすいとか、起こりにくいとか、そういうこともあるはずなので、両方を比べるのは宇宙天気的な研究という意味でも意義があるので、ぜひその2本立てを今後進めたいと思っています。

松崎 ありがとうございます。太陽の周期性が太陽内部の構造や運動とかかわっているという一方で、太陽を理解するためには、モデルワークというか、実際に何が起きているかという研究も進んでいると思います。そのあたりはどうでしょう。

宮原 いま京や富岳といったすごいスーパーコンピュータで太陽を丸ごと精密に計算することができるようになってきています。日本はその分野を世界でリードしていて、名古屋大学の堀田先生¹³という若手のバリバリの研究者が、精密な太陽をつくってみるというのを頑張っている。太陽が持っているいくつかの現象、例えば差動回転¹⁴が再現できたりというところまでできていますが、大循環の再現やその変動はまだ難しいところがあります。

松崎 それは、AMS で得られた細かいデータがモデルへの条件として非常に有用になりますね。

宮原 はい。太陽の活動が変わる仕組みとして、太陽の表面でランダムに起こる現象によってたまたま太陽の活動が下がる説と、私自身も大事なのではないかと思っている大循環が変化するからという大きく分けて2つの説があります。¹⁴Cのデータを詳しく見てみると、どうも大循環が大事というのが見えてくるので、今後モデルで大循環の変化を再現してもらったり、なぜそういうことが起こるのかを調

べたりできれば、と議論しているところです。

人工衛星での恒星の観測も結構進んできていて、太陽以外の恒星を詳しく見ると、遠くの太陽に似たような天体でかなり激しいスーパーフレアが起きていることも分かってきています。

藤田 この前、太陽フレアが起きましたね。この前といっても去年（2024年）ですが（笑）。

宮原 2024年の5月のは、規模としては大したことなかったんです。ところが、あのときは8回連続して起きました。そうすると、太陽フレアがわっと光ってから磁場が地球に向けて伝搬してくるわけですが、磁場が連続で押し寄せたので、日本でもオーロラが愛知ぐらいまでカメラに映りました。

松崎 遠い太陽ですが、意外とわれわれの身近な生活に直結してくる問題で議論が尽きないと思います。順序が逆になってしまったかもしれませんが、放射性炭素（¹⁴C）年代測定では、どのようなトピックが話題になっていますか。

大森 放射性炭素年代測定のコミュニティーは、放射性炭素を使って、年代測定をいかに正しくいろいろな研究に役立てるかというところが至上目標というかゴールになっています。高精度化と装置をよくしていこうと小型化したり、データを大量に生産できるようにスループットをよくする、あとは、だれでも扱えるユーザーフレンドリーという2つの柱があると思っています。

樹木を使った年代測定はすごくホットで、放射性炭素の専門の国際学会をやっている、1週間のうち1日はフルで世界各地の樹木を使って、様々な時代を対象に宇宙から来る放射線の影響がどの程度あるのか調べるようなセッションが組まれるぐらい着目されています。西暦775年の三宅イベントと言われている強い放射性炭素のスパイクが見えている現象を活用すると、誤差なく地層の年代、あるいは考古学の遺跡の年代が分かるようになります。地質、地層、遺跡の中から見つかった樹木年輪の中にスパイク状の放射性炭素のシグナルがあれば、それが774～775年近辺であるということが分かるわけなので、それを使って前後の地層の年代や文化的な年代の決定に役立てる。1つのセッションが立って、1日みんなで議論するようなレベルでどういうスパイク、放射性炭素のシグナルがあるか探すということがいまでも盛んにされています。

12 太陽磁場を生成する磁場の生成機構。黒点数の増減のような太陽の周期活動の駆動点。

13 堀田英之氏（名古屋大学宇宙地球環境研究所総合解析研究部）

14 太陽内部の熱対流や磁場の影響で赤道付近が極よりも速く自転する現象。

ところで、放射性炭素年代測定では、 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 同位体比測定値から、半減期によって算出される年代（これを放射性炭素年代という）を、正しい暦年代に補正するということが行われています。というのも、過去の宇宙線強度、つまり ^{14}C の生成率は、太陽活動や地磁気の変動を受けて、変化しているからです。この暦年補正を行うために、国際的に合意された過去 5 万年までの時系列データ、すなわち較正曲線、IntCal¹⁵ があります。IntCal を使うことによって、放射性炭素年代を暦年代に直すことができます。かつては、IntCal は世界共通の補正用データベースだったんですが、最近になって、放射性炭素年代と暦年代のずれは、地域差があることが指摘されてきました。これは、もともと ^{14}C の生成率が、緯度依存性があることに加えて、大気循環による混合が、地域や気候状況によって不均質におこり、 ^{14}C 濃度に空間的な“むら”が生じるためです。

^{14}C 生成率の地域差に関しては、日本の放射性炭素を使った樹木年輪の研究は世界的にも牽引役で、非常に進んでいる。日本は 1 年ごとの樹木の年輪がたくさんあります。較正曲線 IntCal の基礎となるデータの拡充というのも 1 つのトピックになっていて、1 年分解能のデータというものが、世界中で測定されている。世界中のより多くの樹木年輪データを統合して、より正確な年代測定ができるような枠組みが 2026 年 IntCal26 の公開を目指して整いつつあるという状況です。

IntCal26 がどのようなものになるかというところ……。地域や時代ごとのデータが提供され、つまり、どういうフィールドから出てきたデータで、どの時期が較正されているかという情報も提供できるようになります。それによって、地域差や、時代によって特徴的な変化を見せるようなケースでも、暦年較正を行う研究者がそれぞれで判断できるようにデータベースが整備され、各自検証ができるような、各自利用していただきみたいな形になると思います。どうしても一本化は難しいので、多様な形に細分化して、そのまま提供するという方法に舵を切ったという形

15 ^{14}C 年代測定法で得られた年代を、地球磁場、太陽フレア、超新星爆発等に起因する宇宙線強度の変動を反映した国際的な較正曲線。海洋の占める面積比率や炭素循環システムが異なる北半球 (IntCal20)、南半球 (SHCal20)、海洋 (Marine20) がある。

ですね。

— ^{10}Be の話題（関連して ^{26}Al ） —

松崎 宇宙線生成核種の加速器質量分析への応用として ^{10}Be という核種があります。これは、おそらく ^{14}C に次いで利用が多い核種なのではないかと思います。大気中で生成する ^{10}Be も多く利用されていますが、ここでは、直接地殻中にできる宇宙線生成核種としての ^{10}Be に焦点を当ててみたいと思います。

日本語で何と言うかはあまり定まっていないと思いますが、in situ と言ったり、TCN¹⁶ と言ったりしていますが、地形の変化の評価に非常に有用な核種の利用法ということで、松四さんがずっと研究されています。

松四 鉱物中の ^{10}Be は、主に中性子が照射されることによって結晶の中に生成して、蓄積するという核種¹⁷ ですが、その使い方には主に 2 パターンあります。1 つは、露出年代測定といいまして、どれくらいの核種が地表近傍の鉱物の中に蓄積しているのかという濃度を宇宙線への曝露時間に読み替えるというやり方です。どれくらいの期間宇宙線にさらされていれば、その濃度に達することができるかということで、その地形が突如形成されてからどれくらいの時間経過したかということが分かるようになっていきます。

もう 1 つは、地形の風化・侵食速度を測るというものです。宇宙線は、地表に同位体をつくることで、ある意味、無色の地面に色を付けようとしていることができます。宇宙線生成核種の濃度という地表に塗られる色は、定常的に地面が削られて、物が失われていくという環境では、どこまでも濃くなるわけではありません。濃い色まで染まっているのか、それとも薄い色で定常になっているのかで、どれくらいの速度で風化・侵食されて物を失っている

16 宇宙線照射によって地球表層にて生成される安定及び放射性核種 (Terrestrial Cosmogenic Nuclides)。

17 宇宙線が物質に当たった場合、ほとんどは新しい同位体 (宇宙線生成核種) を生成する反応を起こす。宇宙線が鉱物中の ^{16}O 及び ^{28}Si に当たると ^{10}Be と ^{26}Al が生成されるため、それらを測定することで、特定の表面が露出していた期間、埋没していた期間、その場の地形や流域が侵食された速度を知ることができる。



座談会風景

のかということが結果的に分かるというアプローチです。

1つ目の露出年代測定は、例えば斜面の崩壊堆積物に適用すれば、どのような規模のものが、どのような頻度で起こってきたかを調べたり、過去の気候変動に対してどれほどのラグタイムを持って斜面の変動が起こっていたかを解析したりすることができます。また、段丘のような気候変動に伴って化石化した地形がいつごろ成立したのかという地形変化の履歴を編む、これを編年といいます。そのツールとして使われます。

2つ目の使い方では、私は、まず山地の斜面を覆う風化物がどれくらいの速度で蓄積するかを調べています。斜面の崩壊は風化したものが崩れ落ちることによって起きるものですから、どういう場所にどれくらいの厚みの風化生成物が載っているか、宇宙線生成核種のデータから得られる風化速度に基づく計算で推定することで、斜面崩壊の場所や規模の予測に役立てられます。

もう1つ、別のアプローチとしては、川を流れて

いる砂を分析するというものがあります。その砂は水流の作用によってよく混合されて流れてきているので、その中に入っている石英の中の ^{10}Be を測ると、試料を採った場所から上流側の空間平均的な侵食速度が分かります。侵食速度に流域面積を掛け算すると土砂の生産量となります。これは砂防の分野で重要なパラメータで、ダム等の河川構造物をつくる際にどれくらいの耐用年数となるかを推定するときに参考になる有用な情報となります。

石英中の ^{10}Be は、千年から万年ぐらいの時間スケールでの年代値や平均侵食速度が分かるという、地形学の中でのツールとしてはユニークな位置づけになっています。今後、試料の化学処理環境や測定手法の改良で分析の感度と確度を更に上げて、より若い試料、もっと侵食速度の速い試料を測れるようにしたいと思っています。

松崎 ぜひやっていきましょう。近年、*in situ*の手法は結構原子力立地、あるいは埋設処分地の選定の評価にも使われているという話を聞きますが、そのへんの現状はいかがでしょうか。

松四 日本では、2011年の震災以来、活断層が原子力施設の敷地内にあるかどうかということが立地上の大きな問題とされて、ある断層が本当に活動的であるかどうかということを見極める精度の高い手法が求められるようになりました。断層が上下方向の成分を持って変位すると、周囲の地表の侵食速度もそれに対応して変化しますから、過去の研究としては、 ^{10}Be を使って得られる地形の侵食速度が、不連続的に空間変化することに基づいて、活動的な断層の存在を推定するというものが存在していました。こうしたアプローチの精度を高めようとするとき、1つには、もっと小さな空間スケールで、断層を挟んだ両盤側の侵食速度が同一であるかどうかを調べることで、その断層に上下方向の変位があったかどうかを判定できる可能性が出てきます。いろいろな条件の断層をまたぐような測線をつくって地盤の ^{10}Be を測ったときに、地表でも地中でもいいのですが、 ^{10}Be 濃度の水平方向や深度方向の分布に不連続があるかどうかを検証することで、 ^{10}Be の蓄積時間スケール内に断層の活動があったかどうかを検出するという新しい方法論を提示できるかもしれません。

もう1つ、バックエンドのほうで、放射性廃棄物の地層処分に際して、長い時間スケールで地質環境の長期安定性を評価する必要があるわけですが、それには ^{10}Be の単純な侵食速度の定量化というアプリケーションでは時間スケールが足りない可能性があります。現在活発に侵食されている場の ^{10}Be を分析するだけでは、数万年程度しか履歴をさかのぼれず、数十万年以上の時間スケールの地形発達を調べたいというニーズに応えられないという結果になると思います。ただし、例えば大深度のボーリングコアを使って、過去に山地から侵食・運搬されてきた堆積物の ^{10}Be を測ると、過去の侵食速度を推定することができます。私のところでは、大阪湾や琵琶湖の大深度ボーリングコアを使って100万年前以降の近畿の山地の侵食速度がどれくらいであったのか復元する研究をしています。そのデータがあれば、いまの山容と侵食速度の空間的な対応関係を合わせて考えることで、100万年の時間スケールで、その場がどのような地形の発達と侵食速度の変化を経てきたのか、どういう地質環境の変遷を遂げてきたかという実証が可能になります。

松崎 これは大変有用なアプリケーションなので、もっといろいろな人に使ってほしいですね。

松四 そうですね。もっと分析が簡単になれば良いのですが。AMSは非常に確立されていて、1試料につきおおむね1時間以内に測定が終わりますが、試料を取ってきてからAMSのターゲットをつくるまでにかなりの時間と労力を要していますので、そこをもっと簡便化できるような方法を考えていきたいです。

— ^{129}I の話題 (関連して ^{36}Cl , アクチノイド) —

松崎 次は ^{129}I という核種の話題に移りたいと思います。

^{129}I は、天然にもできますが、原発由来のフィッシュンプロダクト(核分裂生成物)の核種でもあって、人為的な核利用に関する研究に利用されることが多いです。特に福島原発事故が起こったあとに、様々な放射性核種が環境中に分布しましたが、 ^{129}I はまさに核燃料から燃焼に伴って生成される核種で、どのように分布しているかというのが事故の規模を評価する、あるいは住民の健康被害を評価するうえでも大変重要なデータとなっています。東京大学、筑波大学が協働で様々な土壌の分析等を行ってきました。

もう1個、 ^{36}Cl は、直接フィッシュンプロダクトというわけではないですが、放射化、つまり中性子がたくさん発生したときにできる核種であって、これも核活動に関する評価としては有用な核種だと思います。

笹 ^{129}I は東京大学が先駆けで、特に ^{129}I が重要になったのは、 ^{131}I の代替の指標として使えるためです。福島原発事故のあと、土壌や降水の中の ^{129}I を測定しました。原発事故で放出された放射性核種の中でも、 ^{131}I は甲状腺にたまりやすく、健康に大きな影響を与える核種なのですが、半減期が短くあとからの測定が難しい核種だったということで、 ^{131}I のプロキシとして ^{129}I を測定しました。これは、松崎さんが中心となって進めていました。

松崎 もともとチェルノブイリ事故のあと数年たってから、甲状腺疾患が発生する子どもがたくさん増えたことから、 ^{131}I が影響を与えたのではないかという経験があり、福島の事故が起きた際に、学

習院大学の村松康行先生が、すぐ ^{131}I に注目しました。しかし、 ^{131}I は半減期が 8 日と短くて、直接 ^{131}I を測るには時間とスピードが足りなかったのです。それに代わる核種として ^{129}I に注目したわけです。同位体で、しかもフィッシュンプロダクトとして ^{131}I と ^{129}I が同時にできるので、環境中での挙動が同じで、 ^{129}I のほうは半減期が 1570 万年と長いので環境中に残るということで、事故直後の ^{131}I の分布をそのまま ^{129}I が記録していることから、 ^{129}I の分布を調べたということになります。

この取組みは、村松先生が文科省に提案して認められ、AMS の面で東大が全面的に協力した形です。筑波大学も事故直後から独自に様々な核種測定を実施していましたが、 ^{129}I の測定に関しては、協力して進めました。

笹 ^{129}I は、原子力事故のときに非常に重要な核種になるのかなと思います。もともとのバックグラウンドがどのくらいだったか把握しておかなければいけないので、いま日本の土壤中に ^{129}I がどのくらいあるのか調べることが、先々もし万が一のことが起きたときに重要になると思います。

あと、 ^{129}I については、ハイドレートのお話があると思いますが、ヨーロッパのセラフィールド等の再処理工場で放出されているということで、バックグラウンドレベルとしてはいまだいぶ上がってきていて、天然の ^{129}I を検出するのは難しくなっています。

松崎 ^{129}I は、事故以外に、核実験、それから使用済み核燃料の再処理工場からも漏出してしまっていて、いろいろな利用方法があります。その影響自体を評価するのももちろん大事ですが、海洋循環のトレーサや、大気を通じた核種の移行を評価することにも使えると思います。例えばアイスコアの中に ^{129}I 、もしくは ^{36}Cl の核実験系のピーク等が検出されていますし、しかも、北半球のグリーンランドのアイスコアと南極のアイスコアでピークの大きさがかなり違うことから、南北非対称な挙動を評価するといったこともできます。

^{129}I は、人為起源のもの以外に天然環境、すなわち宇宙線生成核種としても生成しています。それから、天然に存在する ^{238}U の自発核分裂においても生成しています。こういった天然の ^{129}I は、現在の地球環境では人為起源の ^{129}I が発生していますのでな

かなか検出は難しいですが、深海や堆積物中で検出できるので、この核種を用いた応用研究も一部で行われています。

そうした研究を進めているパイオニアの 1 人として、尾張さんの研究をご紹介いただきたいと思います。

尾張 もともと ^{129}I は長半減期を持っているので例えば、海洋下数百 m、1500 m ぐらいまで掘った非常に長い時間軸を持った地質コアに対して応用が可能です。ヨウ素の同位体比から海洋堆積物中の間隙水の相対的な年代を出すことができると考えています。ただし、海底表層部は人為起源の ^{129}I によって、ヨウ素同位体比がかなり高くなっています。そしてそれが生物擾乱等にかき混ぜられることによって、表層数 m では、連続して非常に高い同位体比が検出されます。

生物擾乱のその下、例えば数百 m から 1000 m ぐらいまで掘ってみると、非常に低い同位体比を保ったまま、深度とともに変動が見られるので、それには何か意味があるのではないかと考えています。同位体比の変動を絶対年代に直せるかはまだ分かりませんが、古い、新しいという相対的な年代指標として、メタンや間隙水の起源を明らかにできないかということにヨウ素を応用しています。

ただし、海洋の間隙水中のヨウ素の同位体比 ($^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$) は、 10^{-13} レベルで非常に低いので、加速器でないとどうしても測れない。それから海洋を数百 m、数千 m 掘るのは、莫大な費用がかかるので、試料が限られています。データを大量に蓄積しようとするとなかなか難しい。絶対年代としてヨウ素を使えるかどうかの検討には、まだ十分といえる程データの蓄積が揃っていないのが現状です。

また、ヨウ素同位体比の初期値としてどういう値を使えばいいのかというのでも検討する必要があります。過去の研究では堆積物自体の初期値が発表されています。しかし、例えば 1960 年以降の水爆実験や原子力発電所事故に由来する人為起源の ^{129}I によって、海底表層の間隙水のヨウ素同位体比も上がっています。そのため、自然起源と人為起源をどのように切り分け、相互の影響をどう評価するか、今後しっかり明らかにしていく必要があると考えています。

ただ、資源としてヨウ素を見たときに、今、話題



座談会風景

になっているペロブスカイト¹⁸等工業的な利用法だけではなく、医療や乳幼児の発達にもヨウ素は必要なので、人類に永続的に必要な資源としてヨウ素は重要です。そうした資源としてのヨウ素がどのように鉱床として発達してきたかを考えるときに、長い半減期を持つ放射性同位体を利用できることは大きな利点です。地質学的な、長い時間スケールで物を考える場合に、非常に有効なツールだと考えております。

松崎 ありがとうございます。冒頭で、私も個人的に¹²⁹Iに思い入れがあると申し上げましたが、もしかしてヨウ素の同位体を使ってメタンハイドレートの年代測定ができるのではないかということから、非常にロマンを感じて分析手法の開発に取り組んでいます。

メタンハイドレートを産出するサイトにはヨウ素も非常に濃縮している。おそらく海水、もしくは堆積物起源ですが、周りの海水に比べると非常に濃縮しているといういろいろな不思議な現象がある。たぶん有機炭素と密接なつながりがあって、もしかするとグローバルな炭素循環における1つのプロキシとしてヨウ素が使えるのではないかという夢がありますので、共に研究していければいいなと個人的には考えています。

松四 いま海洋のお話が出ましたが、陸上ではヨウ素はどういう挙動になっているのでしょうか。人為起源の¹²⁹Iが地表に降下して分布していると思いますが、ヨウ素は有機物親和性が高く、かつ、水

に付随して移動するというお話もありましたね。ということは、地表近傍の生物相に人為起源のヨウ素が残留しやすかったり、天水が浸透していくところでは初期値に相当するヨウ素の状態ではなくなっていたりしていると思います。そういう分布の実態はどうなっているのでしょうか。

松崎 よく分かっていないと思います。ヨウ素は生物親和性が高いといいながら、実際に生きている動植物にはあまり入っていません。しかも、天水中や河川水中のヨウ素濃度は極めて低い。にもかかわらず、土壌中には結構濃縮している。量的に、あるいは時間スケールの、数理モデルといいますか、そういうものではまだ十分にヨウ素循環を説明できていないというのが私の考えです。いま陸源のヨウ素のお話が出ていますが、何かコメントはありますか。

尾張 海に関してだと、大陸縁辺域は陸源の堆積物が入ってくるということと、河川から栄養塩が入ってきていて、生物生産も非常に高いことから、陸源に由来するものが直接ヨウ素を運んできてくる可能性もある。それから陸地が周りにないような貧栄養の深海底環境だと、堆積物がゆっくり降り積もっていて、その種類や堆積速度も違います。おそらくこうした環境の違いは、堆積物中に取り込まれるヨウ素の量や同位体比の違いとして現れるのではないかと考えています。

松四 そこで、¹²⁹I存在量もしくは同位体比(¹²⁹I/¹²⁷I)という切り口で新しい見方といいますか、新しい理解が開かれる可能性もあるわけですね。

松崎 そう。ただ、人為起源のものは、その場所、場所によって非常に同位体比のレベルがバラエティに富んでいる。ですから、例えば、同位体比の違いが観測された場合に、それがヨウ素の移動や混合で生じたものなのか、単に汚染の違いによるものなのかという切り分けが極めて難しいですね。まだまだ研究することがいっぱいあります。

—新技術の開発—

松崎 次に、加速器質量分析の技術的側面に焦点を当ててみたいと思います。加速器質量分析は、質量分析の一種ですが、加速器によってイオンを高エネルギー、実際には核子当たり MeV 程度のエネル

18 灰チタン石という結晶構造を生かして圧電材料として応用後、太陽電池にも応用。国は次世代太陽電池と位置づけ量産技術の確立、需要の創出、生産体制の整備を三位一体で進行中。

ギーに加速します。

この加速したエネルギーは何がいいかといいますと、質量分析で感度に制限するものとして、宿命的に同重体の干渉がありますが、エネルギーを使って物質との相互作用で同重体間の違いを見出すことによって、同重体を分けるということができます。

また歴史的に加速器質量分析は負イオン源を使ってタンデム加速器と組み合わせるという形が発展してきました。 ^{14}C を測定するために、同重体の ^{14}N の電子親和力が負であるので負イオンをつくりにくいという性質があって、負イオン源を使うことによって、自動的に ^{14}N の妨害を排除することができるという大きなメリットがあることから、負イオンとタンデム加速器という組み合わせが発展してきました。

ただし、従来の加速器は非常に大型のもので、いろいろな面でコストもかかる。 ^{14}C を測ることに着目した場合に、 ^{14}N の妨害がないので、あとは同重の分子イオンの排除が重要です。加速器質量分析においては、 ^{14}C と同じ重さの分子イオンである $^{12}\text{CH}_2$ や ^{13}CH は、タンデム加速器の荷電変換で壊して排除しています。荷電変換はガスに負イオンをぶつけて電子をはぎ取ることによって起こしますが、そのプロセスで分子イオンも壊すということを利用して

^{14}C を測定するためには、とにかく分子イオンを壊せばいいということで、エネルギーはもっと小さくても大丈夫だということが分かってきて、これがAMS装置の小型化につながりました。そして、2000年代の終わりぐらいに500 kVぐらいの小型のタンデム加速器が出てきました。扱いも非常に楽になりますし、消費電力も少ないということで、世界中に広がっていったというのが、加速器質量分析を技術的な面から見たときの1つの流れです。

小型化という流れがある一方で、大型の加速器が必要な場合もありますが、そのへんは、実際に大型の加速器を運用されている笹さんに解説をお願いします。

笹 AMSとして、様々な核種を分析しようとする場合ですと、エネルギーを高くして感度を高めるには大型の加速器の利点は確かにあります。しかし、大型になると様々なコンポーネントが複雑になってきて、その変動が測定に影響を与えるということで、

高精度という面からは小型化を図っていくのがいいと思います。

日本は加速器が好きで、加速器の台数が非常に多いです。筑波大学では大型のAMS装置は5MVが3台、6MVが1台ありますが、多核種分析用のAMS装置ということで、 ^{14}C も測れますが、どちらかというとき重い核種、特に ^{10}Be や ^{129}I 、 ^{36}Cl 等を測るのであれば、感度を高めるという観点からしてもなるべく大きいほうがいいのかなと思います。

^{36}Cl を測るには、5MVでもできるはずですが、6MVレベルが必要ではないか。 ^{36}Cl を測らないのであれば、3MVでもいいのではないか。たぶん5MVも要らないのではないか。そこらへん、藤田さんはどう考えていますか。

藤田 東濃には、数台加速器があります。5MVの装置が1997年に入っていて、それでは炭素、ベリリウム、アルミニウム、ヨウ素を測定していて、塩素は開発中という状況です。2019年に300 kVの多核種用加速器を入れて、それは、同じく炭素、ベリリウム、アルミニウム、ヨウ素の4核種が測れる状態ですが、一応モデル計算上は5MVと遜色ないバックグラウンドを謳っています。

しかし、5MVと300 kVを持っていると、確実に5MVのほうが性能としていいです。少なくともヨウ素に関しては5MVのほうがバックグラウンドは優れています。もちろんどこを目指すのかにもよるとは思いますが。

笹 どの程度の精度と感度を目指すのかで選ぶ。

藤田 はい。だけど、5MVは重要だと改めて思っています。

笹 加速器の大きさに従って、設置面積や維持のコスト、携わる人の多さもあるので、どこを選ぶかですよね。感度や精度、どういう核種を測るのか、どこらへんまで置けるのかということで総合的に考えるしかないのかなと。

松崎 小型化の話ですが、先ほどは50 kVの装置を開発中とおっしゃっていましたが。

藤田 引出電圧だけで50 kVです。だから、加速器と言われるところがなくて、ただの質量分析器です。

そこがポイントになっていて、ストリッパー、荷電変換を行うところでガスを使って分子を壊すけれどガスをいかに漏らさないかというところで、小型化がなかなかできないという感覚がいままであった

ところ、ガスを使わなければいいのではないかという発想で研究を進めています¹⁹。東濃地科学センターは名前のとおり地学、地質学、地理学の人たちが多くて、実は物理屋さんほとんどいないようなところ。そこの人たちは、地層の年代を測定するという研究をされていますが、実際に皆さん地面を掘ってトレンチ調査を行って試料をたくさんラボに持って帰ってきて、ラボで前処理を行って、測定して、結果を見て、思ったのと違うデータが出てしまったとなると、また振り出しに戻ってもう1回やるという大変な時間と労力がかかる研究をされている人が多いです。

もし開発している小さいものをその場に持って行って、夜の間に測定しておいて、だいたいの目安、例えばこちらが新しくこちらが古いという予想は合っているのか、等が分かれば、次の日はこちらをやってみようという、決まった調査の時間内で効率よく調査できることを助けるのが、東濃地科学センターでのわれわれの最終的な目標だと思っています。

更に、最近だと、バイオベース度という測定が必要になっていて、それはヨーロッパで盛んだと思いますが、ヨーロッパでは20%以上バイオが混ざったプラスチックを使うことが目標になっているそうです。

石油由来の中には¹⁴Cは含まれておらず、バイオの中には現在の¹⁴Cが100%なので、それらを混ぜてやることで、いったい¹⁴Cが何%含まれているかがバイオベース度といいますが、その測定がAMSでしかできないので、こういう小型の装置を開発することで、ざっくり何%、例えば25%以上なのか50%以上なのかというのは簡単に見ることができると思います。そういうさっさと測りたい、試料はめちゃめちゃ多いけれども、そこまで精度を求めているものに対して、こういう小型のものが有効なのかと思います。

松崎 特許も出されていて、日本発の技術ということで、大変期待しております。

それでは、¹⁴Cなのに正イオンを使うPIMS、

Positive Ion Mass Spectrometry というものが最近世の中に出てきていますが、その開発にも携わっている大森さんから、なぜポジティブイオンを使うのかというあたりを紹介していただけますか。

大森 はい。PIMSは陽イオンの質量分析になりますが、既存のAMSに対してより効率的に同位体を測れるから陽イオンを使おうというよりは、より迅速に分析できるようなシステムに着目した観点で開発が進んでいます。

既存のAMSで年代測定をしようとしたときに、どんなに急いでも試料調整からAMSでデータが出てくるまで1週間、もしくは2週間ぐらいで40個出すのが現状速度ではないかと思いますが、PIMSについては前処理を含めて1日で50個データが生産できるといった、これまでの手法とは違う圧倒的な、大きなアドバンテージがあります。

今までの方法だと放射性炭素では分析試料をいったん燃やしてCO₂、二酸化炭素にして、それを純化させて、固体のターゲット、グラファイトにして、装填して分析します。この作業がどうしても時間がかかる、人もかかるといったデメリットもありますが、PIMSについては、電子サイクロトロン共鳴(ECR)²⁰という現象を使って、CO₂をそのままイオン化できます。CO₂はただ物を燃やせばつくれるわけなので、それを直接導入して、オンラインで分析できるというところにメリットがあります。

ECRを使って質量分析をするという試みは、1970年ぐらいから既にあって、昔から注目はされてきましたが、安定したビームを維持して、同位体の分析に活用できないということで、実用化には至っていません。

PIMSの実現には、安定したECRイオン源の開発も大きいと思います。

ECRの中に入れた二酸化炭素は、サンプルから生成した二酸化炭素が完全に分解されるので、非常に効率がよい。そのまま質量分析できるということで、圧倒的な迅速性を誇ります。迅速分析は今後の研究手法の1つのトレンドになってくると思いますので、小型で迅速に分析できるPIMSの重要性は今後ますます注目されていくだろうと思っています。

19 機器の詳細は2025年10月号(No.801)本誌展望欄の“超小型AMSの実現に向けた結晶表面ストリッパー法の開発”を参照。https://www.jrias.or.jp/pdf/2510_TENBO_JINNO_HOKA.pdf

20 電子サイクロトロン共鳴(Electron Cyclotron Resonance)、イオン源で陽イオンを生成。

松崎 データ生産量が増大することによって、どういう新しい展望が開けるのでしょうか。

大森 現状、PIMS における測定精度は、既存の方法とあまり変わらないです。ですが、すごく大量のデータを生産できるというところがポイントです。

これまでは放射性炭素そのまま得られる時間の解像度が年代幅にして 100~200 年、数百年レベルで提供されていました。その中で、地層において絨毯爆撃みたいにしてたくさんのデータを測定して、統計的に解釈し直すことによって、年数的に 1 年を切るような時間解像度で年代と時系列のモデルを組むことができます。これまで地質で扱っていた気候の変化の時間スケール、モードの変化等から、いまわれわれが直面しているような短期的にすごく雨がたくさん降った、ものすごい猛暑が数日間続いたといったものまで見ていけるようなデータを提供できるようになるというところに大きな価値を感じています。

PIMS は原理的に ECR チャンバーの高周波をうまく調整することによって、放射性炭素以外の核種でも気体分子として導入できれば利用できる、そのほかの核種にも迅速分析できるような将来像もあると言われています。

松崎 ありがとうございます。様々な新しい技術的なトレンドを見てきましたが、ここまでのお話は、ある意味、効率を高めることによって、研究の新しいフェーズを拓く、という方向でした。一方で、さきほどの宮原さんのお話にもありましたように、非常に高精度な測定をやることによって、研究の質を変えていくという方向もあると思います。高精度化は基本的に統計精度を高める、すなわちカウント数を稼ぐ、というのが 1 つの方向です。しかし現状の AMS では、これ以上の高精度を求めると、これはある程度長時間の測定を行うことになり、そうすると今度はシステムの安定性が精度の限界を決めることになってしまいます。この意味で、システムのコンポーネントの少ない小型の装置はより安定化しやすい、という笹さんのご指摘でした。そんなシステムのコンポーネントの中でも、イオン源が結構大事だと思っています。イオン化効率と安定性の向上は、効率と精度の両方に効きます。 ^{14}C の AMS がどんなに小型化しても、イオン源は同じものを使ってい



座談会風景

ますしね。

笹 同意します。核種によらず、イオン源のイオン化効率と安定性はとても重要です。

大森 PIMS はそこも安定しています。PIMS は安定した ECR イオン源があつてこそ、成り立っているということです。

—人類が直面している課題への貢献—

松崎 今後の展望ということで、人類が直面する課題に AMS がどう貢献していくかという大きな風呂敷を広げようと思います。例えば宮原さんの研究で目指すところを語ってください。

宮原 もともと太陽の研究をしてきて、AMS でデータを取ってきていましたが、データが取れば取れるほど地球の気候変動との相関がどんどん見えてきます。いま、例えば気候変動予測や天気予報も太陽の影響は全く入っていませんが、なぜ入っていないかという、相関は見えるけれども、まだメカニズムは解けていない。そこが解ければ、そういう予測モデルにも組み込めるだろうと思っています。

これまでは、太陽と地球をつなぐものは、光であつて、地球にどれくらい届いて、それが気候システムにどう影響するかという観点が主だったのが、最近では、地球を取り巻く放射線環境が大事かもしれない、そしてそれをコントロールする存在として太陽の磁場活動や太陽圏の磁場環境が大事かもしれないという視点が加わりつつあります。そもそもの宇宙線のソースとなる銀河の環境が変わることによっても線量が変わる。放射線環境というのはいろいろな時間スケールで変わってくるわけですが、更に言うと、地球側も地磁気変動するので放射線環境が最終的

に三次元的に変わってきますが、そういう要素が気候変動を理解するうえで結構大事な要素になってくるかもしれないというのが少し見えてきつつあります。そういう意味で、地磁気の変動は数万、数十万年のスケールですから、そもそもの地球を取り巻く環境がどうなっているかを見るうえで、より古い時代にさかのぼれる AMS が果たす役割は大きいと思います。

松崎 ありがとうございます。尾張さんは、今後どういう研究をしていきたいと考えていますか。

尾張 メタンハイドレートは、数十年前ぐらいから非在来型の資源として着目され始めました。ハイドレートは 1 m^3 の中に 164 倍の体積のメタンをため込むことができるので、メタンのリザーバーとしては非常に大きなインパクトを持っています。また一方で、気候変動によって海水準が変わると、メタンハイドレートが一気に分解して、温室効果を持つメタンが海水や大気に一気に放出される可能性も明らかになっています。メタンハイドレート自身は、メタンができた場所とそれがハイドレートとして存在する場所は海底下の全く別の場所に起源があったりするので、流体に乗ってメタンがどこまで移動して、どこでハイドレートとして発達して、それらがどれくらいの量のメタンを貯蔵しているのかということを知るには、やはり ^{129}I という長い時間軸を持ったトレーサのようなものがが必要です。ハイドレートを資源としてだけではなくて、環境を変動させる可能性のあるものとして、ヨウ素とメタンを組み合わせ、そういういままでとは違った観点からメタンの挙動を見ていきたいと思っています。

あとは、絶対年代としてヨウ素の同位体比をどう換算していくかというのは、海底下のデータがまだ少ないことが課題です。同位体比の初期値は地球ができてから均一だったのか、海域によって初期値が違ったのかという検証もできたらいいなと考えています。

松崎 ぜひ一緒にやりましょう。

装置側として、将来的にどんな展望が期待されますか。

笹 装置側からは、小型化を図るときに技術的には藤田さんの表面ストリッパーや PIMS に期待して

います。あと、LPD²¹の研究が最近進んでいますので、小さい加速器で先ほど問題になった ^{36}Cl 等を高感度で測ることができるような技術開発が日本でも進められていくのではないかと思います。

^{14}C から ^{129}I まで一般的な AMS の測定対象核種以外にも、いま筑波大では ^{210}Pb 、 ^{135}Cs 等の新たな核種の測定手法の開発を進めていこうと考えています。

日本にある AMS 装置は、いま 14 台、新たに入る PIMS を含めると 16 台という報告がありました。2022 年の時点で W. Kutschera 先生の報告では、韓国が 8 台、中国が 30 台で圧倒的。昔は AMS の分野においてアジア圏では日本が圧倒的に進んでいて、世界トップレベルだったと思いますが。

大森 先月（2025 年 7 月）聞いたときに、中国は 50 台で、韓国は 14 台。

笹 そうですか、中国が 50 台と韓国が 14 台。そのうち確か半分ぐらいがスイスの Ionplus という新しいメーカーの AMS 装置で、実は日本にはまだ 1 台も Ionplus の装置は入っていません。装置側としては、新しい機器の導入をどう進めていくのかというのは検討すべきではないか、と思います。

PIMS が 2 台入るという話がありますが、日本の AMS は老朽化が進んでいて、筑波大はまだ新しいですが、だいたい古いタイプになってきていて、いまは中国、韓国に逆転されつつあるので、われわれ装置側の人間としても新しい装置をどう導入していくのか検討していかなければいけないと思っています。

松崎 ありがとうございます。ただ装置を入れればいいということでもないと個人的には思っています。

笹 そうですね。それをどう活用していくかが重要です。

松崎 最後に松四さんに、装置とアプリケーションという観点から将来展望について総括をお願いします。

松四 私が大学生だった頃より昔は、地球表層科学というのは、例えば大気科学、森林科学、土壌学、地形学、水文学、地質学と別々の学問に分かれていました。また、科学的な知見を出す側か使う側かと

21 レーザー光脱離法 (Laser Photo Detachment)

いう観点では、基礎的理学としての地球科学と、応用工学としての環境工学も分かれていたという印象がありました。いまは、それを全部合わせて地球表層科学という統合的な分野をつくりましょうというのが現代的な潮流となっているかと思います。

最近では、更にその潮流を深化させる動きが強化されていまして、クリティカルゾーンというダブルミーニングの言葉がキーワードになっています。界面のという意味と、重要な・不可欠なという意味の2つですが、要するに、大気圏と水圏と地圏と生物圏が合わさった地球表層の環境のことを言っているわけですね。そこでは、いろいろな生物地球物理化学的なプロセスが生じて、いま私たちの目に見える様々な現象につながっています。これら自然圏との対峙の仕方を、人間が右往左往して探っているという側面もありますが、地球表層のクリティカルゾーンに人間圏つまり、人間社会が成り立つ生存基盤がつくられているわけです。

AMS というのは、人類の生存基盤たるクリティカルゾーンの中で起こっているいろいろなプロセスをトレーシングするための同位体を定量分析するという非常にユニークなツールになっていると思います。今後もそういう時間と空間の多様な階層をまたぐことのできる、それから、つなぐことのできるエ

ビデンスを導入するという役割を担っていくべきなのではないかと思います。

「論より証拠」をモットーとする研究者集団の中で、こういうことがやりたい、こういうデータを出したい、というニーズがあって、それに対して装置開発側の研究者が応えていくという協働関係を保っていくと、今後の更なる発展が期待できるでしょう。

新しい装置の導入には経済的な面での苦しさもありますが、確かなデータに基づくサイエンスを追及する私たちの姿勢が今後も継続されて、科学研究が人間圏の持続可能性に寄与できるという未来が待っているということを提示することができれば、必要な研究資金は供出していただけるかもしれません。それは国かもしれないし、これからは企業と研究機関がダイレクトにかかわっていくということがあるのかもしれませんが、社会の中にも地道な研究の重要性を訴えていくことが必要なのかなと思います。こういうことに賛同いただけるコミュニティを維持して、盛り上げていきたいと思います。

松崎 ありがとうございます。良いまとめをいただきましたので、話し足りないことはたくさんあると思いますが、これで終了ということにしたいと思います。皆さん、どうもありがとうございました。(拍手)

新春座談会特集ページのご案内

過去に本誌で掲載した新春座談会（2001年～）を
まとめてご覧いただける特集ページを開設しました。

⇒ <https://www.jrias.or.jp/books/cat3/news/203.html>

