

LaserProbe-ICP-MS を用いた ジルコンのウラン-鉛年代測定

平田 岳史¹⁾・ロバート ネスビット²⁾

1. はじめに

最近の分析機器の進歩には、目をみはるものがあります。分析に必要な操作はより簡略化され、より少量の試料(あるいはより微小領域)から、微量元素の存在度や同位体組成に関する情報が得られるようになりました。コンピューターによる装置制御・高速データ処理などにより装置はブラックボックス化しましたが、装置のしくみ、測定の原理、そして測定上の問題点を正しく理解していれば、得られる情報の質や量は飛躍的に向上します。これまでベールにつつまれていた地球科学的試料の複雑な形成・進化の歴史を、より詳細に議論することが可能になってきました。

1980年代からめざましく進歩した分析技術の一つとして局所同位体分析技術があります。局所同位体分析技術の進歩は、地球科学の分野に直接的なインパクトを与えました。“たった一粒の鉱物から年代を決定できるようになった”, というのは一つの代表的な例だといえます。しかし、局所同位体分析がもたらした最も大きなインパクトは、“一つの鉱物粒子が多段階にわたって成長している場合、そのおのおの年代を決定することができる”という点や、“鉱物中の包有物や汚染されている可能性の高いアモルファス部分を避けて分析することができる”という点にあるといえます。つまり、局所同位体分析により、鉱物本来の情報のみを取り出すことが出来るようになったのです。

サウザンプトン大学では、EC Grant BRITE-EU-RAM II プロジェクトにより、10ミクロン領域の微量元素同位体分析法の開発を進め、現在この分野に

おけるトップクラスの研究が行われています。本稿では、サウザンプトン大学におけるこれまでの研究でどのような分析が可能になったかを、ジルコンのウラン-鉛年代測定を例に挙げて紹介していきたいと思えます。

2. ウラン-鉛年代測定法によるジルコンの年代測定

原子核壊変を利用した年代測定法(原子核時計とよばれる)は、試料の絶対年代を決定する重要な手法です。地球科学的試料の年代測定に広く用いられているK-Ar法、Rb-Sr法、Sm-Nd法、Re-Os法は、それぞれカリウム-40の殻外電子捕獲(EC)、ルビジウム-87の β -壊変、サマリウム-147の α 壊変、レニウム-187の β -壊変を利用したものであり、親核種と娘各種の存在比および娘核種の同位体成長を分析することにより試料の絶対年代を決定することができます。

ウラン-鉛法は、ウランの原子核壊変による鉛同位体成長を利用した年代測定法ですが、この年代測定法は、他の年代測定法にはないユニークな特徴もっています。それは、同じ親元素から二つの違う経路を通り同じ娘元素に壊変する、ということです。つまり、ウラン-鉛系では、天然に存在するウラン-235およびウラン-238は、それぞれ原子核壊変を繰り返し、最終的に、それぞれ鉛-207および鉛-206になります。この特殊性によりウラン-鉛年代測定法では、娘元素(鉛)の同位体組成を測定するだけで試料の年代を算出することができます。つまり試料が二次的な変性作用を受けていなければ、

1) 元所員, 現東京工業大学理学部
2) サウザンプトン大学地質学教室

$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 同位体比を測定するだけで試料の年代を求めることができます。また、試料が形成された後に放射性起源の鉛(ウランの壊変でつくられた鉛)が二次的に失われた場合でも、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ プロット(コンコーディアプロット)により、試料が形成された年代、および二次的に鉛が失われたかどうか、また鉛が失われたのであればそれはいつのことか、を求めることができます。これは、U-Pb 年代測定法の最大の利点であると言えます(ウラン-鉛年代測定法の詳細については、柴田, 1990, 牧嶋・中村, 1993を参照してください)。

この年代測定法の利点を最大限に引き出すことができる試料の一つがジルコンです。一般にジルコンは親核種であるウランの存在度が高いうえに、初生鉛(放射性起源でない鉛)存在度が非常に低く、ウラン-鉛年代測定法に最も適した試料のひとつです。また、ジルコンは、普遍的に存在する鉱物でありながら試料自体の安定性も高く(岩石の酸分解では、ジルコンは最も溶解しにくい鉱物の一つである)、地質年代を通じてウラン-鉛壊変系を閉鎖系に保ちます。このため、地球形成初期の地球科学的情報を引き出す目的で、多くの研究者がジルコンのウラン-鉛年代測定法を利用してきました。

ウラン-鉛年代測定法はジルコンの年代測定に対して非常に有用な手段ですが、実際にウラン-鉛年代測定法を適用してみると、ジルコンが放射性起源の鉛を失っていたり、ジルコン粒子がゾーニングを受けていたり、また、ジルコンの成長が多段階にわたっており、中心部と外部で年代が異なっている場合などが少なくないことが分かります。また、ジルコン粒子に存在する“ひび”に沿って、放射性起源でない鉛が汚染していることも明らかになり、ジルコン粒子を酸で分解し、鉱物全体の平均的な同位体組成を求める方法では、ジルコンの厳密な形成年代を読み出せないことがわかりました。つまり、より厳密な地球科学的議論を行うためには、粒子全体の平均的な同位体組成ではなく、粒子の局所同位体組成を決定する重要性が強く認識されたのです。局所同位体分析の重要性を認識していたオーストラリア大学の Compston らのグループは、いち早く高感度・高分解能の二次イオン質量分析法の開発を進め、これまでに他の追従を許さない数々の目覚ましい成果をあげてきました(柴田, 1990; 牧嶋・中村,

1993)。局所同位体分析を用いることにより、より詳細で厳密な地球化学的議論が可能となった最も直接的な例がジルコンのウラン-鉛年代学的研究なのです。

3. 高周波誘導結合プラズマイオン源質量分析計

高周波誘導結合プラズマ質量分析計(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS)は、大気圧アルゴン高温プラズマをイオン源として用いた高感度の元素存在度・同位体組成分析装置です。分析試料を真空容器内に導入する必要がないため、分析操作の簡便化・迅速化が可能となり、半導体、新素材、環境、そして地球科学試料の微量元素存在度および同位体組成分析に広く用いられてきました。ICP-MS が開発されて10年以上になりますが、その間の性能の向上には目をみはるものがあります。

ICP-MS の市販が開始された1983年当時の感度が、溶液感度として約200 kcps/ppm(1 ppmの溶液で毎秒20万カウントの信号強度)であったのに対し、最新のICP-MSでは、同じく溶液感度でおよそ1 Gcps/ppm(1 G=10⁹, 1 ppmの濃度で毎秒10億カウント)にまで向上しています。これは、溶液試料中の1 ppq(10⁻¹⁵ g/g)といった超微量元素の直接検出が可能であることを意味します。

しかし、これだけの高感度はほんとうに必要なのでしょうか。最近まで著者らは、ICP-MSの性能は単に感度だけでなく、やや専門的な話になりますが、元素検出感度の質量依存性、マトリックス効果、スペクトル干渉などの問題の解決、検出器の信号直線性、短時間・長時間安定性、操作性、メンテナンス性の向上といった総合的な定量分析能で決まると考えていました。これはエンジンのパワーだけではF1レースに勝てないことに例えることができます(宇都浩三氏談)。他にも解決すべき問題点が数多く残っているのにもかかわらず、ただ感度の向上のみを行うのはICP-MSの性能向上といえるのだろうか、と。しかし、今では筆者らの考えは全く違ったものになっています。つまり、「ICP-MSの定量分析能の向上には感度の向上が不可欠である」とわれわれは考えるようになりました。われわれがこのように考え方を変えた背景には、レーザーアブレ

ーション(Laser Ablation)法からの高感度化の強い要請がありました。

4. レーザーアブレーション法

ICP-MS は、原子吸光法(AA)やICP-AES(ICP発光分光分析法)と同じく、溶液試料の分析法の一つとして開発されました。ICP-MSの登場により、遷移元素の一部(プラズマに使用されているアルゴンと、水分子中の水素、酸素原子が複雑に結びついた分子イオンによる質量スペクトル干渉を受ける元素)を除けば、元素検出感度が一気に2桁~3桁以上向上しました。ICP-MSが開発された当初は、主として水溶液試料の分析に用いられてきましたが、ICP-MSの高い元素検出感度および分析処理能力(分析の迅速性)を固体試料にまで拡張すべく、ICP-MSが開発された数年後にはレーザーアブレーション(Laser Ablation)法が導入されました(Gray, 1985)。

レーザーアブレーション法とは、固体試料表面に

レーザー光を照射し、試料を瞬時に“蒸発”させ、その蒸発した試料を直接ICP(アルゴン高周波誘導結合プラズマ)に導入し、元素存在度や同位体組成を分析する方法です。試料を分解・溶液化する必要がないため分析が迅速であり、また分析前処理にともなう分析元素の汚染の可能性が低くなるという利点を有しています。さらに、レーザービームを絞り込むことにより試料の局所部分の化学組成・同位体組成分析を行うことが可能です。

レーザーアブレーション法の開発当初のレーザービーム径は400 μm 程度であり、主として固体試料のバルク組成分析、あるいは大きな鉱物の主成分および微量元素組成を分析する方法として広く用いられていました(Gray, 1985; Arrowsmith, 1987; Imai, 1990, 1992)。ただし、400 μm 程度のレーザービーム径では、局所分析法としての空間分解能は十分だとは言えません。レーザービームをさらに絞り込むことは技術的には十分可能でしたが、ビームの絞り込みはサンプリング量の減少につながるため、絞り込めるビームサイズは、ICP-MSの検出感度からの

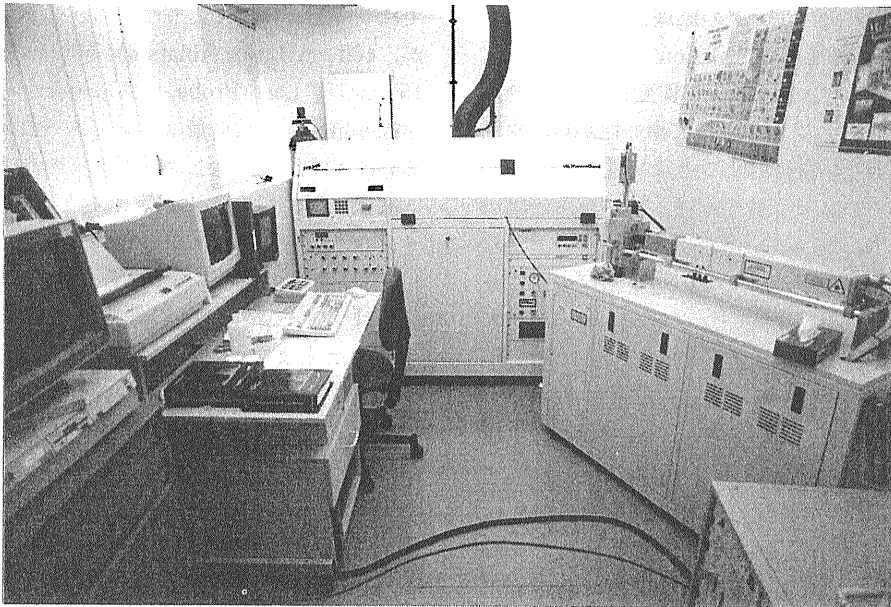


写真1 サウザンプトン大学地質学教室のICP-MS

中央にあるのがICP-MS本体。右側にレーザー本体(波長266 nm紫外レーザー, Nd-YAGの4倍高調波)、左に制御用コンピューターが見える。現在、ICP-MSにより求めたデータをオンラインで処理し、希土類元素パターンなどをリアルタイムで表示するシステムを開発中である(左端に見える二台目のコンピューターはこのためのもの)。これにより装置の感度ドリフト(長時間安定性)を元素ごとにリアルタイムでモニターでき、また得られた結果からすぐに希土類元素パターンを作図し、結果の質を評価することができる。

第1表 クレーターサイズと試料サンプリング量

レーザータイプ	クレーターサイズ	サンプリング量*
Laser Ablation	300~400 μm	=1
LaserProbe	30~60 μm	0.0034
Southampton UV LaserProbe	10~15 μm	0.000053

* レーザー照射により掘り出される試料量。クレーターの深さは、クレーター直径に等しいと仮定。400 μm でのサンプリング量で規格化してある。

強い制約を受けました。ICP-MSの装置改良が進み、ICP-MSの元素検出感度が向上すると、レーザービーム径を絞り込むことが可能となり、30~60 μm 程度の試料サンプリングが可能となりました。このビームサイズになると、試料の特定の領域の元素・同位体分析が可能となり、“LaserProbe”あるいは“Laser MicroProbe”と呼ばれるようになりました。非常に漠然とした区分ではありますが、ビームサイズに応じて、“Laser Ablation法”（ビームサイズ60 μm 以上で、主としてバルク分析を目的としている）および“LaserProbe法”（ビームサイズ60 μm 以下で、局所分析を目的としたもの）と区別されています（サンプリングの原理には両者に違いはなく、いずれも“Laser Ablation”です）。

レーザービームを30~60 μm 程度にまで絞り込むことができれば、ジルコンの鉱物一粒から、ウラン-鉛同位体情報を引き出すことは可能です。しかし、前述の通りジルコン粒子には、粒子が多段階で成長していたり、ゾーニングを受けていたり、ひびがあったり、不純物が混入しているものが少なくなく、粒子全体にわたって均一なジルコン粒子は非常に少ないと言えます。したがって、ジルコンの局所同位体分析においては30~60 μm 程度のレーザービーム径では、まだ空間分解能は十分だとは言えません。そこで、サウザンプトン大学では、ECによる研究プロジェクト(BRITE-EURAM II)により、10 μm にまでビーム径を絞り込んだ次世代のレーザーアブレーション-ICP-MS法の開発に着手したわけです。

5. サウザンプトン大学地質学教室 ICP-MS

サウザンプトン大学のBRITE-EURAM IIプロジェクトは、英国ICP-MSメーカーのFisons/VG

との共同研究として進められました。サウザンプトンのICP-MSを写真1に示します。

試料の局所部分のサンプリングには、波長266 nmの紫外レーザー(Nd-YAGレーザーの4倍高調波)を用いました。紫外レーザーを用いることによりレーザービームを絞り込むことが可能となり、クレーター径10~15 μm 程度のサンプリングが可能となりました。レーザービームを絞り込むと、当然のことながらサンプリングされる試料量は減少します。ここで、レーザービームを絞り込むことにより、サンプリングされる試料量がどれだけ減少するかを簡単に見積もってみましょう(第1表)。ここではレーザー照射によりつくられるクレーター直径が、400 μm (Laser Ablation)、60 μm (LaserProbe)、15 μm (UV LaserProbe)である場合を考えます。

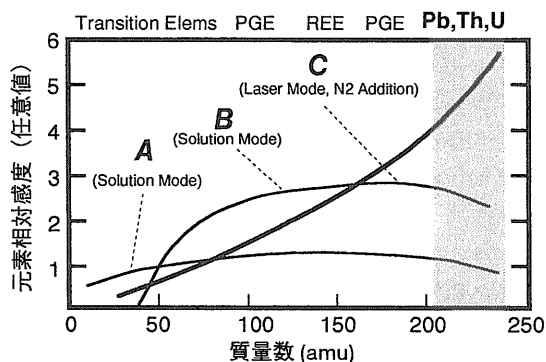
掘り出される試料量はクレーターの体積に比例するわけですから、もしクレーターの深さがクレーター直径と同じであると仮定すると(厳密には実際のクレーターの深さは試料の化学組成やレーザーパワー、レーザー照射時間に依存します)、サンプリング量はクレーター直径の3乗に比例すると考えることができます。第1表から、60 μm のクレーターサイズでは、採取される試料量は400 μm の場合の300分の1になりますので、400 μm のものと同等の分析元素信号強度を得るためには、装置としておよそ300倍の検出感度が必要であることとなります。さらに、クレーターを絞り込んで15 μm の空間分解能を得ようとする、装置の感度としてはクレーターサイズ60 μm の場合のさらに60倍以上(400 μm の場合の20,000倍以上)の感度が必要となります。当たり前のことですが、より小さな領域から元素存在度や同位体情報を引きだそうとすると、より高い装置検出感度が必要となるわけです。

BRITE-EURAM IIプロジェクトでは、ICP-MS

本体の高感度化も行いました。高感度化のための主な改造点は、プラズマインターフェイス部分および窒素ガス混合です。

プラズマインターフェイスとは大気圧のプラズマから分析元素イオンを高真空領域内に引き込むための部分で、装置の分析性能を決定する重要な部分の一つです。通常の ICP-MS は、プラズマインターフェイス部分が二段あるいは三段の差動排気システムとなっており、大気圧のプラズマイオン源から、段階的に圧力を下げていき、最終的に高真空(10^{-6} Torr 程度)の質量分析室に分析元素イオンを導入します。プラズマインターフェイスの改良ポイントは、いかにして中性粒子を取り込まずにイオンのみを効率よく抽出するか(元素感度および分子イオンの生成率を決定する)にあるといえます。

サウザンプトン大学の ICP-MS では、このインターフェイス部分に、排気量の大きなポンプ(通常、毎分25リッターの排気量のところを、毎分100リッターのポンプを使用)を配置し、差動排気システム1段目の真空度を高めました。これにより、質量数60を越える元素について検出感度がおよそ一桁向上し、溶液感度としておよそ400 Mcps/ppm~1 Gcps/ppm の元素検出感度が得られるようになりました。検出感度が高くなったのは、インターフェイス部分での真空度が高くなったことにより、イオンの衝突・散乱が抑えられ、分析元素イオンの透過効率が向上したためと説明できます。しかし、全ての元素について透過効率が向上したわけではなく、アルゴン(プラズマを形成しているガスであり、インターフェイス部分では最も数の多いイオンである)より質量数の小さな元素については、むしろ透過効率が低下し、検出感度は低くなっています(第1図(B))。これは、インターフェイス部分で最も数の多いアルゴンイオンがつくる空間電位により(小さな領域に数多くのプラスイオンが集中することにより、その領域の電位が高くなる)、アルゴンよりも軽いイオンが軌道からはじかれてしまい(Space Charge Effect といいます)、透過効率が低くなってしまいます。インターフェイス部の真空度を高めると、アルゴンよりも質量数の小さな元素については ICP-MS での検出感度が低下しますが、これらの元素の多くについては、ICP 発光分光法(ICP-AES)や、蛍光 X 線分光分析法(XRF)といった確



第1図 ICP-MS の元素相対感度

装置の検出感度を分析元素の質量数に対してプロットした。A:標準の装置構成(溶液モード)で得られる感度特性で広い質量数範囲においてフラットな値を持つ。定性分析・多元素同時分析に適している。B:インターフェイスの真空度を高めた装置の感度特性(溶液モード)。重元素の検出感度は10倍以上高くなるが、アルゴン(質量数40 amu)よりも軽い元素では元素検出感度は低くなっている(アルゴンより重い元素についてはフラットな感度特性が得られていることに注意されたい)。C:サウザンプトンのレーザー分析用 ICP-MS の感度特性。アルゴンガスに窒素を混合し、さらに重元素の感度を高めている。こうして得られた感度特性は、重元素で跳ね上がったものとなっている。

立された分析法により十分信頼性の高いデータが出せるため、地球科学試料に限れば軽元素の元素検出感度の低下はさほど問題にならないと言えます(ちなみにサウザンプトンの ICP-MS はバルブの開閉のみでインターフェイス部分のポンプの排気量をスタンダードのものに戻すことができ、必要に応じて軽元素の感度を高めることもできます。第1図(A))。

さらにサウザンプトン大学の ICP-MS は、レーザーアブレーション法による分析に際して、キャリアガスに窒素を混合することにより重元素の検出感度をさらに高めています。混合する窒素の量はごく僅か(流量0.4 ml/min.程度)ですが、質量数100を越える重元素については元素検出感度はファクター2~5倍程度向上します(第1図(C))。

カナダのFengらのグループは、NIST610ガラス標準試料中の鉛・ウランに対して、30~60 μm のビームサイズにおいて固体濃度で100~200 cps/ppm の元素検出感度を得ています(Feng et al., 1993)。これに対してサウザンプトン大学のLP-ICP-MS(LaserProbe-ICP-MS)システムでは、さら

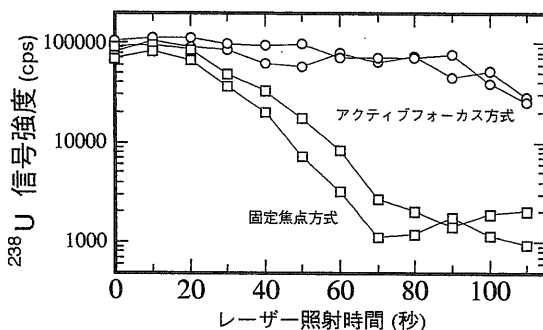
にビーム径の小さな10~15 μm のクレーターサイズから同等の感度を得ることができました(Hirata and Nesbitt, 1994). 第1表の試料サンプリグ量から見積ると、これは、サウザンプトン大学のICP-MSの装置検出感度が従来のものより60倍以上向上していることとなります(第1表参照). サウザンプトン大学のICP-MSでは、真空インターフェイス部分の真空度を高め、キャリアガスの窒素を混合することにより鉛・ウランといった重元素の検出感度を高めているため、10~15 μm のクレーターにおいて、従来の装置と同じ分析元素信号強度を得ることができたわけです。

6. LP-ICP-MSによるジルコンのU-Pb年代測定

クレーターサイズが30 μm であるのと15 μm であるのとでは大きな違いがあります。一般に産出されるジルコン粒子の多くは40~50 μm サイズのものです。したがって、このサイズのジルコンであると、30 μm のレーザービームでは一箇所からのサンプリグしかできませんが、15 μm のビームなら3~4箇所からのサンプリグが可能となり、一つの鉱物粒子から粒子全体を反映したと考えられる同位体データを統計的に算出することができます。また、前述の通り、多段階で成長したジルコンや、起源が異なる鉛が汚染している可能性の高いひび、アモルファスな部分を避けて同位体情報を引き出すことが可能となります。こうして、サウザンプトン大学のICP-MSシステムは、ジルコンのU-Pb年代測定に際して、十分な空間分解能が達成できました。

しかし、いざ使ってみると、サウザンプトンの紫外レーザーシステムは、実試料の分析、特にビームを一箇所に固定したままの局所同位体分析に際して問題を含んでいたことがわかりました。それはレーザービームのフォーカスの問題です。

サウザンプトンのレーザーシステムでは、照射ポイントの詳細に観察できるように高倍率(400倍)の光学系を用いています。顕微鏡で、高倍率のレンズを用いるとフォーカスが難しくなる(被写界深度が浅くなる)のと同じ原理で、紫外レーザーのフォーカスに用いられている光学系も、レーザービーム焦

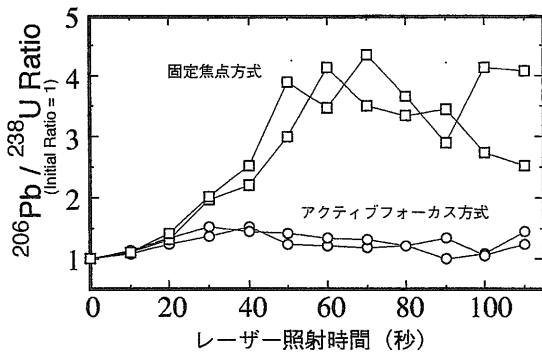


第2図 レーザーアブレーションによる分析元素信号の減衰

レーザー照射を続けると試料が削られ、レーザービームの焦点がずれ、レーザーのパワー(光密度)が減衰する。その結果、サンプリグされる試料量が減少し、分析元素信号強度が減衰する。レーザービームを絞り込んだサウザンプトンの紫外レーザーシステムでは信号の減衰が顕著に現れ、80秒間のレーザー照射により信号強度は照射開始時の1/100程度にまで減衰してしまう(a)。これに対し、アクティブフォーカス方式では、レーザービームのパワー減衰を最小限に抑えることができるため、信号強度の減衰が小さい。

点を合わせるためには対物レンズと試料表面の距離を厳しく制御しなければなりません。固定した試料表面に焦点を合わせることはそれほど難しいことではありませんが、問題はレーザー照射に伴い試料が“掘れていく”ため、時間とともにレーザービームの焦点がずれていくことです。レーザーの焦点がずれると、レーザーパワー(光密度)が減衰し、試料表面からサンプリグされる試料量が減少します。つまり、レーザー照射を続けていくと、結果として時間経過とともに分析元素の信号強度が減衰してしまいます。この現象はどのレーザーを用いても観測されるものですが、絞り込んだレーザービーム(高倍率の光学系)を用いた場合にこの現象は顕著に現れます。我々の紫外レーザーシステムでは、同一スポットでレーザー照射を続けると、80秒間の照射で、信号強度は照射開始直後の1/100にまで減衰してしまいます(第2図(a))。つまり、このままのシステムでは、実質的にデータ積算に使える時間は、たかだか60秒となってしまうのです。

信号の減衰の主な原因が、“試料掘削”によるレーザービーム焦点のずれであるなら、レーザーの焦点を常に合わせておけば信号の減衰は抑えられるこ



第3図 レーザーサンプリングの際の元素分別効果
レーザーアブレーション法では、試料表面からのレーザーサンプリングに際して元素の揮発性の違いによる分別(Ablation Fractionation)が起こる。鉛とウランの場合では、レーザー照射にともない、鉛(揮発性元素)とウラン(難揮発性元素)のみかけ上の存在比が変化する(a)。これに対し、アクティブフォーカス方式では、元素の揮発性の違いに起因する分別効果を最小限に抑えることができる。第2図、第3図の測定では、データの再現性を確かめるために同一条件で繰返し2回測定を行っている(Hirata and Nesbitt, 1994)。

とになります。そこで、レーザー照射に合わせて試料ステージを持ち上げ、常にレーザービームがクレーターの“底”に合うようにして測定を行えば、信号強度の減衰を抑えられるはずで(この方式をアクティブフォーカス法, Active Focus Techniqueと言います。Hirata and Nesbitt, 1994)。第2図(b)から分かる通り、アクティブフォーカス法を用いることにより信号強度の減衰を最小限に抑えることができました。これにより、一つのサンプリングスポットから、複数回の信号積算が可能となり、得られる情報量及びデータの信頼性が向上しました。 ^{207}Pb を固体濃度で5 ppm以上存在する試料については、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 鉛同位体比分析において0.7~1.5%程度の分析精度が得られるようになりました。この分析精度は、Fengら(1993)が報告した値(クレータサイズ30~60 μm)と同等のものです。

$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 同位体比が測定できれば、試料の $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代(apparent age, 詳細については牧嶋・中村, 1993を参照)を算出することができます。“ $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代”は、ウランや鉛を定量することなく鉛の同位体組成を測定するだけで試料の年代が決定できる、という優れた特長を有しています

が、試料が二次的な変成を受けていて、進化の途中で鉛を失う事件を経験している場合、“ $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代”は正しい試料形成年代を与えません。従って、ジルコンの正しい年代情報を得るためには、試料が放射性起源の鉛を失うような二次的な事件を経験したかどうかを調べる必要があります。このためには、“ $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ”だけでは不十分であり、ウランと鉛の存在比($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 比)を分析する必要があります。 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 同位体比に加えて、ウランと鉛の存在比を同時に測定することができれば、二次的な事件(鉛をロスした事件)があったか否か、また鉛ロスが起こったとすればそれはいつごろの出来事だったのか、を知ることができます(詳細については、地質ニュース1990年5月号12ページ、豆辞典「コンコーディア図」を参照してください)。

しかし、レーザーアブレーション法で鉛とウランの存在比を分析してみると、また別の問題を含んでいることが分かりました。レーザーサンプリングの際の元素分別(Fractionation)の問題です。

レーザーアブレーションでは、レーザーサンプリングの際に、主として元素の揮発性の違いに起因した元素分別が起こります(これをAblation Fractionationと言います)。極端な場合は、得られる信号強度は固体試料化学組成を直接反映したものでないことがあるといわれ(Arrowsmith, 1987)、揮発性の異なる元素を分析する場合に問題となります。相対的には鉛は揮発性元素であり、ウランは難揮発性元素に分類されますので、Pb/U存在比は、Ablation Fractionationの影響を強く受けます。第3図(a)にレーザーアブレーションにより得られたウランと鉛の信号強度比($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$)の経時変化を示します(分析に用いた試料はNIST610ガラス標準試料です)。この図から、レーザー照射を続けていくと鉛/ウラン比が見かけ上、高くなっていくことがわかります。

この現象は次のように説明できます。レーザー照射開始直後は、レーザービームは試料表面に焦点が合っており、小さな領域に単位面積(1平方センチ)あたり 10^9 ワットという大きなパワーが集中していて、試料は瞬時に蒸発・原子化・プラズマ化されます。この段階では、試料は物理的に“掘り出される”ものと考えることができ、元素の揮発性の違いによ

る分別は殆ど起こりません。しかし、レーザーサンプリングによる“試料掘削”が進むにつれて、ビーム焦点がずれ、単位面積当りのレーザーパワーは激減します。焦点のずれたレーザービームは試料を物理的に掘削するだけのエネルギー密度を持ち合わせず、レーザーのエネルギーの大半は試料の加熱に使われてしまいます。こうなると、試料からの分析元素放出機構は試料の加熱になりますので、揮発性の違いによるサンプリング量の違いが現れます。揮発性の高い鉛は試料からでてきますが、難揮発性であるウランは試料から放出されず、鉛/ウラン比が試料組成と異なる値として観測されるわけです(第3図(a))。このアブレーションの際の元素分別に対しても、アクティブフォーカス法が有効に働きます。つまり、アクティブフォーカス法では、常にレーザー焦点を試料のサンプリングポイントに合わせてい

るため、レーザーの光子密度が減衰せず、高エネルギーでの試料アブレーション(物理的に掘り出すサンプリング)が可能となり、分析元素の揮発性の違いによる分別を抑えることができるわけです(第3図(b))。

アクティブフォーカス法により、レーザーサンプリングの際の元素分別は抑えることができましたが、元素の質量分別は、質量分析計内でも起こります。装置(ICP-MS)内でのU/Pb比の質量分別効果は、ひとマス(1 amu)あたりの分別効果は小さいのですが、鉛とウランは質量数が離れているため、測定に際してこの効果は無視できません。質量分析計内の質量分別効果(典型的な分別補正係数はおよそ0.7~1.2%/amu程度である)は、NIST610ガラス標準試料(ウランと鉛の存在度が正確に決定されている)を用いて見積もることができます。NIST610

第2表 南極産ジルコン(PMA7)*のウラン-鉛年代測定結果(Hirata and Nesbitt, 1994)

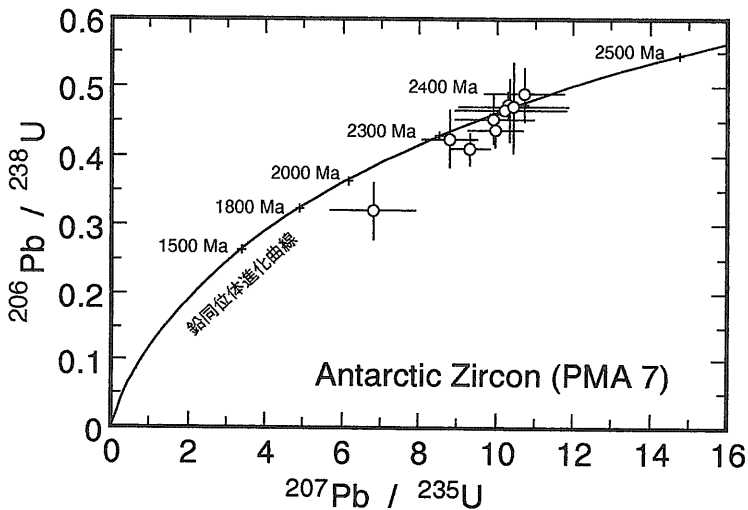
試料番号	206-Pb / 238-U System		207-Pb / 235-U System		207-Pb / 206-Pb System	
	206-Pb / 238-U比	年代 (Ma)	207-Pb / 235-U比	年代 (Ma)	207-Pb / 206-Pb比	年代 (Ma)
No. 2s	-	-	-	-	0.1567±0.0027 (1.8%)	2420±29
No. 6s	-	-	-	-	0.1540±0.0029 (1.9%)	2391±33
No. 7s	0.4376±0.0239 (5.5%)	2340±106	9.977±0.716 (7.2%)	2433±64	0.15748±0.00092 (0.58%)	2429±10
No. 8s	0.4667±0.0448 (9.6%)	2469±194	10.37±1.44 (14%)	2468±121	0.1550±0.0012 (0.77%)	2402±13
No. 13	0.4704±0.0651 (13%)	2485±280	10.43±1.41 (14%)	2474±118	0.15542±0.00121 (0.78%)	2406±14
No. 16	0.4536±0.0353 (7.8%)	2411±155	9.94±1.01 (10%)	2429±90	0.15595±0.00081 (0.52%)	2412±9
No. 9s	0.3197±0.0415 (13%)	1788±200	6.81±1.11 (16%)	2087±136	0.14826±0.00173 (1.2%)	2326±20
No. 10s	0.4098±0.0221 (5.4%)	2214±100	9.304±0.522 (5.6%)	2368±51	0.15765±0.00236 (1.5%)	2431±26
No. 11s	0.4248±0.0415 (9.8%)	2282±185	8.790±0.707 (8.1%)	2316±71	0.15525±0.00184 (1.2%)	2405±20
No. 12s	0.4901±0.0383 (7.8%)	2571±164	10.73±1.02 (9.5%)	2500±84	0.14942±0.00238 (1.6%)	2339±27
No. 13s	0.4735±0.0192 (4.1%)	2499±83	10.284±0.444 (4.3%)	2461±39	0.15666±0.00179 (1.1%)	2419±20
SHRIMP	0.43 - 0.46	2378±47	9.4 - 10.0	2404±26	0.150 - 0.159	2440±12

* 試料およびSHRIMPデータ提供はRennes大学Jean-Jacques Peucat氏による。

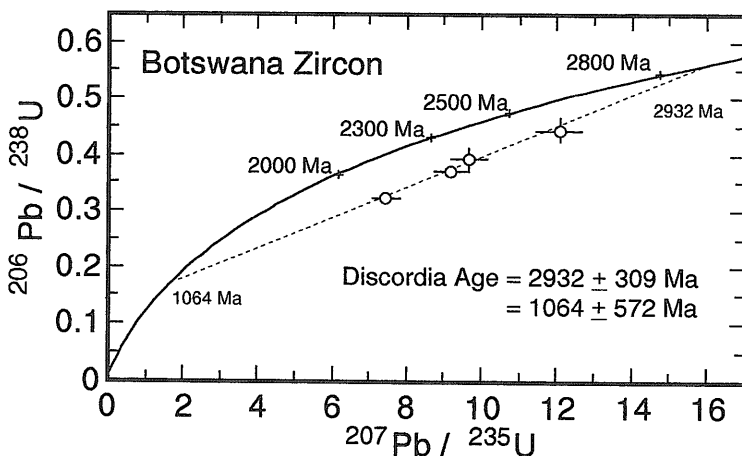
第3表 ボツワナ産ジルコン*のウラン-鉛年代測定結果(Hirata and Nesbitt, 1994)

試料番号	206-Pb / 238-U System		207-Pb / 235-U System		207-Pb / 206-Pb System	
	206-Pb / 238-U比	年代 (Ma)	207-Pb / 235-U比	年代 (Ma)	207-Pb / 206-Pb比	年代 (Ma)
M1-1	0.3923±0.0486 (12%)	2133±221	9.67±1.86 (19%)	2404±163	0.16951±0.00227 (1.3%)	2553±22
M1-2	0.4446±0.0355 (8.0%)	2371±157	12.07±1.06 (8.8%)	2610±79	0.17579±0.00231 (1.3%)	2614±21
TIMS	0.38 (M1)	-	8.9 (M1)	-	0.1692 (M1)	2650
NM1-1	0.3695±0.0418 (11%)	2027±194	9.18±1.31 (14%)	2356±123	0.18594±0.00147 (0.79%)	2707±13
NM1-2	0.3240±0.0431 (13%)	1809±207	7.44±1.15 (16%)	2166±129	0.17050±0.00243 (1.4%)	2563±23
TIMS	0.43 (NM1)	-	9.95 (NM1)	-	0.16926 (NM1)	2650

* 試料提供およびTIMS測定はLeeds大学Martin Dobson氏による。



第4図 南極産ジルコンのウラン-鉛コンコードィアプロット。一つのジルコン粒子を除けば、南極産ジルコンのウラン-鉛データは、鉛同位体進化曲線上にプロットされ、これらの試料がその進化の途中で鉛をロスすることがなかったことを意味する。鉛のロスがないため、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ から算出される年代は一致し、2,400 Maを示した (Hirata and Nesbitt, 1994)。



第5図 ボツワナジルコンのウラン-鉛コンコードィアダイアグラム。ボツワナのジルコンは、鉛進化曲線から離れたところにプロットされ、進化の途中で鉛のロスがあったことを示している。測定結果の回帰計算によれば、試料の形成年代は2,900 Ma、鉛を失った事件はおよそ1,000 Ma前に起こったことを示している (Hirata and Nesbitt, 1994)。

により求めた質量分別補正係数を未知試料の質量分別効果の補正に用いました。同一の元素内での質量分別効果(同位体差別効果, Mass Discrimination Effect)は、鉛同位体比($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比)については、一般的に0.5~1%/amu程度であり、分析精度(0.5~1.5%程度)よりも小さいため、なんら補正を行う必要はありませんでした。では、以上の分析方法を用いて、実際のジルコン試料についてウラン-鉛年代を測定した例を紹介して行くことにしましょう。

南極産(PMA7)およびボツワナ産(M1, NM1)のジルコンについて得られた結果を第2表および第3表に、また、得られた結果をコンコードィア図上にプロットしたものを第4図、5図に示します (Hirata and Nesbitt, 1994)。南極産ジルコンについて得られた $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代(apparent age)、 $^{206}\text{Pb}/$

^{238}U 年代、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年代は、高感度二次イオン質量分析計(Sensitive High Resolution Ion Microprobe, SHRIMP)により得られた年代と非常によく一致を示していることがわかります。また第4図から、一つのグレインを除いて殆どのグレインが鉛同位体進化曲線上にプロットされており、二次的な鉛のロスが起こらなかったことを示しています。一方、第5図からわかる通りボツワナ産のジルコンについては、鉛進化曲線上にはプロットされず、二次的な鉛のロスが起こったことを示しています。測定点の回帰計算から、試料の年代は2,900 Ma、鉛を失ったのが1,000 Ma前のことであることがわかります。ボツワナ産のジルコンについては、二次的な鉛のロスがあるため、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代と、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年代、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年代は一致しません。

サウザンプトンの ICP-MS では、500 Ma を越え

る古い試料については5%程度の精度で $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代が決定できるようになりました。しかし、これより若い試料に関しては、a)ウランの放射性起源の鉛存在度が低くなること、およびb) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 同位体比の変動が小さくなること、などの理由により $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 同位体比により正確に試料の“apparent age”を決定することは難しくなります。そこで重要となるのが $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比による年代測定です(勿論、二次的に放射性起源鉛のロスを経験した試料には適用できない)。

京都フィッシュントラックの檀原氏から提供していただいたLMR(Lake Mountain Rhyodacite)試料について $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 法による年代測定を試みました。6つのグレインに対して得られた結果を重み付平均により計算すると、試料の $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年代は 362 ± 7 Maとなり、文献値368 Maと非常によい一致を示しました。一方、LMR試料について $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 同位体比から計算した“apparent age”は 167 ± 83 Maとなり、文献値と合いません。この実験結果は、若い試料に対しては $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代よりもむしろ $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年代の方が正確な年代を与えることを示唆しています。

7. おわりに～LP-ICP-MSはどこまでSHRIMPに近づいたか？

さて、LP-ICP-MSにより、 $20 \mu\text{m}$ 以下の局所領域から試料の同位体情報を引き出すことが出来るようになりました。1980年代後半から現在に至るまで、局所分析法を用いたジルコンの一粒のU-Pb年代学的研究で最も画期的な成果をあげたグループは、オーストラリア国立大学の研究グループであるといえます。世界最古のジルコンや世界最古の岩石の発見といった華々しい成果をあげています(柴田, 1990, 牧嶋・中村, 1993)。このグループが局所同位体分析の武器として用いたのは、SHRIMPとよばれる高分解能二次イオン質量分析計です。彼らの成果によって、二次イオン質量分析計は一躍注目を集めることとなりました。この項では、LP-ICP-MSがどこまでSHRIMP(SIMS)に近づいたかを考えてみることにしましょう。ジルコンの分析を例にとってSHRIMPとサウザンプトンのLP-ICP-MSの性能を比較したものを第4表に示します。

まず、試料の前処理ですが、サウザンプトン大学のLP-ICP-MSによる分析では、試料は両面テープ(鉛が入っていないことを確認済)に張り付けただけで、研磨などの操作は加えませんでした。これは、LP-ICP-MSによる分析では、レーザーサンプリングの効率は試料の表面状態に殆ど左右されず、また、レーザーサンプリングでは、掘削速度が大きいため、研磨により試料内部を露出させなくても試料の内部からのサンプリングが可能なためです。LP-ICP-MSによる分析では、試料の研磨等の前処理は、試料を鉛で汚染させる可能性をいわずらに高めるだけなので、試料は両面テープにより固定するだけとしました(SIMSによる測定では、試料を研磨した上に、試料表面に電導性を持たせるために金コーティングを施さねばならず、鉛汚染に対する十分な注意が必要となります)。

次にビームサイズですが、両者の間に大きな違いはないと言えます。ただし、LP-ICP-MSにおける試料の“掘削”速度はSIMSのものに比べ桁違いに大きく(100倍以上)、深さ方向の分析に関してはSIMSはLP-ICP-MSと比較して数桁高い分解能力を有しています。

元素検出感度ですが、この表を見る限りではLP-ICPMSの方がSHRIMPよりも高感度であることとなります。しかし空間分解能のところでも述べた通り、試料の掘削速度が両者で大きく異なっていることに注目してください。LP-ICP-MSの場合、およそ $0.5 \mu\text{m}/\text{sec}$ の早さで試料が掘れていきます。小さなジルコン粒子であれば数分間の照射で、レーザービームは試料を貫通してしまいます。つまり、LP-ICP-MSでは一度に多くの試料を掘り出しているため、強い信号強度が得られるのです。したがって、もし、“同じ量の試料をサンプリングする”という条件をつければ、トータルとして得られる分析元素カウント数はSHRIMPの方が高くなります。感度の欄でLP-ICP-MSの方がSHRIMPよりも大きな値を持ちながらも、長所・短所の項でSHRIMPが高感度、LP-ICP-MSが感度が低いと書いたのはこのためです。ただし、単位時間あたりに得られる信号強度が高い分だけ、分析に必要な時間(積算時間)はLP-ICP-MSの方が短くてすみ、ICP-MSの利点のひとつであった分析の迅速性は失われていません。

第4表 ジルコンのウラン-鉛同位体分析における SHRIMP と LP-ICPMS の性能比較

項目	SHRIMP* Sensitive High Resolution Ion MicroProbe	Southampton LP-ICPMS (UV Laser MicroProbe)
試料形態	樹脂による固定および研磨	両面テープによる固定
ビームサイズ	20 μm	10~15 μm
感度	50cps/ppm*	150cps/ppm
測定時間	スポットあたり10分程度	スポットあたり3分程度
分析精度	0.2~0.7%	0.7~1.5%
質量分別補正	ジルコンスタンダード	ガラス標準試料 (NIST610)
長所	高感度・高精度同位体分析	定量性が高い (多元素同時定量が可能) 標準物質選択の自由度が広い
短所	装置が高価	感度が低い 分析精度が十分でない

* SHRIMP Data on Zimbabwe Zircon (R. W. Nesbitt) から推定。

分析性能として、LP-ICP-MS と SHRIMP で大きな差があるものの一つに分析精度をあげることができます。サウザンプトンの ICP-MS (四重極質量分析計を用いたもの) と SHRIMP を比較すると、分析精度の上では SHRIMP が決定的に勝っています。LP-ICP-MS を用いてジルコンのウラン-鉛同位体分析を行っているとき、分析精度の上で SHRIMP がいかに素晴らしい装置なのかよくわかります。現段階では、LP-ICP-MS は、実用的には十分な分析性能が達成できていますが、空間分解能と分析精度においては、SHRIMP が優位にあるといえます。

質量分別 (Mass Fractionation) の補正ですが、LP-ICP-MS も SHRIMP も単位質量数あたりの補正係数はそれほど大きくないのですが、Pb/U 存在比分析においては、鉛とウランの質量数が 30 amu 程度離れているため質量分別効果は無視できません (LP-ICP-MS も SHRIMP も $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 同位体比については補正を行っていない)。質量分別の補正は、LP-ICP-MS では、NIST610 ガラス標準試料を用いています。ジルコンとガラスでは、試料マトリックスに大きな違いがありますが、ICP-MS の場合、試料のサンプリング (レーザーアブレーション) とイオン化が独立に行われるため (実質的にポストイオン化とみなすことができる)、質量分別が試料のマトリックスに大きく依存しないという特長もっています。このため、標準試料の選択自由度が増し、試料中の鉛・ウラン存在度や不均一性の評価が容易なガラス標準試料を用いることが出来るのです。SIMS (SHRIMP) においては、試料サンプリングと

イオン化が同時に行われるため、質量分別の補正を行うための標準試料は未知試料と同じマトリックスを持っている必要があります。SHRIMP のグループは、標準試料としてスリランカ産の宝石ジルコンを用いています。いかに最良の標準試料を手に入れる (見つけ出す) かが、SIMS のデータの質を決定する最大の要因となっています。牧嶋・中村 (1993) が指摘しているように、表面電離型質量分析計といった信頼性の高い分析手法を用いて標準試料を徹底的に評価する必要があるのです (オーストラリア大学のグループは、現在でもなお、表面電離型質量分析計による U-Pb 年代測定を並行して行っています)。サウザンプトン大学の ICP-MS では、質量分別効果が試料のマトリックスに依存しない、という利点を拡張すべく、モナザイト一粒の U-Pb 年代測定を開始しました。この分析においても、質量分別の補正に際してはガラス標準試料 (NIST610) を用いています。LP-ICP-MS で得られる分析精度は、SHRIMP のものと比較するとやや劣りますが、ICP-MS の広い分析汎用性を活かした応用例はたくさんあるのです。

最近の質量分析計の進歩には目をみはるものがあります。ここ数年で、SIMS (二次イオン質量分析計) と ICP-MS の双方において、局所同位体分析技術において大きな進歩がありました。磁場型質量分析計を利用した同時検出法 (マルチ検出方式) の実用化です。マルチ検出方式は、同位体分析精度を飛躍的に向上させることができる最も有効な手段です (平田, 1993)。SIMS で用いられているイオン衝撃イオン化や ICP-MS で用いられているプラズマ

熱・衝突イオン化は、いずれも生成イオンのエネルギーの広がりが大きく、いずれのイオン化方式もイオン源としては優れたものとはいえません(平田, 1993)。このため、イオン光学や真空技術的な問題から、これらのイオン源に対してはマルチ検出法がなかなか取り入れられませんでした。しかし、最近の質量分析計の進歩により、ICP-MS と SIMS の双方においてマルチ検出化が実用化されつつあります。

まず、SIMS に関してはフランスの Cameca 社が IMS1270 という高分解能 SIMS においてマルチ検出方式の装置を市販し始めました(森下, 1993)。一方、ICP-MS に関しては英国 Fisons/VG 社がマルチ検出方式の装置を市販しはじめました(日本の JEOL 社やドイツの Finigan/Mat 社もマルチ検出方式の ICP-MS の開発を行っています)。ICP-MS のマルチ検出器の装置に関しては、レーザーアブレーションとの組み合わせにより固体試料から直接高精度鉛同位体分析を行った例が既に報告されており(Walder et al., 1993)、得られた同位体分析精度は四重極質量分析計タイプの ICP-MS をはるかに越えたものでした。マルチ検出方式に関しては、ICP-MS が SIMS に比べて一步先行している感がありますが、SIMS においてもマルチ検出方式による高精度同位体データが報告されるのも時間の問題だと思われます。SIMS のマルチ検出化の実用化を遅らせているのは、同位体分析を高分解能モードで行わなければならないことにあると思われます。つまり、SIMS では質量スペクトル干渉となる分子イオン信号の生成率が高いため、正確な同位体組成を分析するには、分析同位体と干渉信号を高分解能モードで相互に分離する必要があります(これに対し、ICP-MS では分子イオンの生成率が低いため、低分解能モードで同位体のマルチ検出が可能です)。高分解能モードでのマルチ検出方式は、表面電離型質量分析計のような質の高いイオン源(生成イオンのエネルギー分布が狭い)を備えた質量分析計でさえ報告例がありません(ただし表面電離型質量分析計では、元素の逐次イオン化が可能であるので高分解能モードはあまり必要とならないという理由もあります)。生成イオンのエネルギー制御や磁場の安定性といった問題点が解決され、SIMS においてマルチ検出方式が可能となれば、SIMS においても高

精度同位体分析が可能となるので、空間分解能において絶対的に優位にある SIMS は LP-ICP-MS に比べてはるかに強力な武器となるでしょう。

地質調査所にも高分解能 SIMS が導入されることが決定しました。導入される予定の SIMS はマルチ検出器を備えたものであり、局所同位体分析を行うにあたっては、森下氏が地質ニュースの中で述べているように、“究極の分析法”となる可能性を秘めています(森下, 1993)。マルチ検出が可能となれば、現行の SHRIMP をはるかにしのぐ性能が得られることは間違いありません。LP-ICP-MS がどれだけ SHRIMP に近づいたか、などと流暢なことを言っているのも今のうちかもしれません。

地質調査所は、SIMS だけでなく、固体表面電離型質量分析計、希ガス用質量分析計、軽元素用質量分析計を備えた機関となります。地球科学試料のバルク分析から局所分析に至るまでを広くカバーすることができるわけです。これらの質量分析計を有機的に機能させることにより、地質調査所は同位体分析の COE (Centre of Excellence) といえる存在になることは間違いありません。

本研究は EC Grant BRITE-EURAM II (CEC, Contract No. BRE-CT92-0299) および Natural Environmental Research (GR9/609) により進められました。本研究で分析したジルコン試料、PMA7、BOT13、LMR は、それぞれ J. J. Peucat 博士(フランス Rennes 大学)、M. Dodson 博士(英国 Leeds 大学)、檀原徹博士(京都フィッシュントラック)からいただきました。本稿を仕上げるにあたり、北里大学・島村匡教授、名古屋大学・田中剛教授に様々な貴重な助言を頂きました。また、査読の方には文章の推敲も含めて数多くの貴重な意見をいただきました。ここで感謝いたします。

参考文献

- Arrowsmith, P. (1987): Laser Ablation of Solids for Elemental Analysis by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Anal. Chem.*, **59**, 1437-1444.
- Feng, R., Machado, N., Ludden, J. (1993): Lead Geochronology of Zircon by LaserProbe-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LP-ICPMS). *Geochim. Cosmochim. Acta*, **57**, 3479-3486.
- Gray, A. L. (1985): Solid Sample Introduction by Laser Ablation for Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Analyst (London)*, **110**, 551-556.

- 平田岳史(1993) : 高周波誘導結合プラズマイオン源質量分析計 (ICP-MS)による高精度同位体組成分析. 地質ニュース, 469号, 7-17.
- Hirata, T. and Nesbitt, R. W. (1994): The Application of Laser Probe-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry to U-Pb Isotope Geochronology of Zircon. Submitted to *Geochim. Cosmochim. Acta*.
- Imai, N. (1990): Quantitative Analysis of Original and Powdered Rocks and Mineral Inclusions by Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 235, 381-391.
- Imai, N. (1992): Microprobe Analysis of Geological Materials by Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 269, 263-268.
- 森下祐一(1993) : SIMSによる高感度・高分解能同位体分析—欧州における研究の最新動向を探る—. 地質ニュース, 469号, 33-42.
- 牧嶋昭夫・中村栄三(1993) : ジルコンをめぐる最近の話題-I. U-Pb法によるジルコン年代学, 岩鉱, 88, 499-516.
- 柴田賢(1990) : 最古の岩石, その後—アミツオク片麻岩からアキヤスタ片麻岩へ, 地質ニュース, 429号, 6-12.
- Walder, A. J., Abell, I. D., Platzner, I., Freedman, P. A. (1993): Lead Isotopic Ratio Measurement of NIST610 Glass by Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Spectrochim. Acta*, 48B, 397-402.
-
- HIRATA Takafumi and Robert W. NESBITT (1994): Uranium-Lead Geochronology of Zircon by LaserProbe-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry.
-
- 〈受付 : 1994年 3月16日〉

地熱開発促進調査「阿蘇山西部」地域のボーリングコアを地質調査所が取得

地質調査所は, 新エネルギー・産業技術総合開発機構が地熱開発促進調査「阿蘇山西部」地域において掘削したボーリングコアを, 全量取得しました. コアを取得したのは以下の10坑井です(カッコ内は掘削深度).

N3-AS-1(1,000 m), N3-AS-2(1,200 m), N4-AS-3(1,800 m), N4-AS-4(1,200 m), N4-AS-5(1,200 m), N5-AS-6(1,700 m), N5-AS-7(1,700 m), T-1(400 m), T-2(400 m), T-3(400 m).

このボーリングコア試料の詳細については下記の担当者へお問い合わせください.

地殻熱部地殻熱探査課 阪口 圭一

〒305 茨城県つくば市東1-1-3

Tel : 0298-54-3695, Fax : 0298-54-3533, e-mail : sakaguch@gssj39.gsj.go.jp