

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21224013

研究課題名(和文) 超高压地球化学：地球中心核の化学進化

研究課題名(英文) High-pressure Experimental Geochemistry

研究代表者

平田 岳史 (Hirata, Takafumi)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10251612

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 145,200,000円、(間接経費) 43,560,000円

研究成果の概要(和文)：地球中心核の情報は、その大部分が隕石学あるいは地震学に基づくものであり、その形成過程、特に化学組成変化や形成年代に関する情報は非常に限定的なものであった。そこで本研究では地球中心核の形成に対して最も直接的かつ厳密な地球化学的制約条件を与えることを目的とした。この目的のために、100GPaを越える「超高压発生技術」と、10ミクロン以下の微小領域から正確な微量元素情報を引き出す「超微量元素分析技術」の開発・実用化を図った。本研究を通じて、10年後まで持続可能な世界最高レベルの分析体制の構築が図れたうえ、低圧から超高压条件において様々な金属元素の分配挙動を調べることができた。

研究成果の概要(英文)：It is widely believed that the formation of the Earth's core could induce dramatic changes in various geochemical and geophysical aspects of the Earth. Series of recent studies have revealed that the environmental condition for the Earth's surface can change through the core formation, and therefore, formation or evolution sequence of the Earth's core was still key issue to understand the overall evolutionary history of our planet. To decode the hidden formation sequence of the Earth's core, such as timing and duration of the core formation or possible changes in the chemical composition of the core, we have tried to derive direct elemental information concerning the distribution among the inner-core, outer-core and mantle using a combination of newly developed in-situ analytical technique and the sophisticated high-pressure experiments.

研究分野：数物計科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、地球宇宙化学、同位体・放射年代

キーワード：地球中心核 親鉄性元素 超高感度質量分析法 超高压実験 元素分配実験

1. 研究開始当初の背景

46 億年にわたる地球の形成と進化を理解する上で、最も根本的かつ重要な未解決問題の一つに「地球中心核」の形成がある。地球中心核の形成は、地球内部の成層構造進化を決定づける一因としてではなく、地球内部での物質循環（対流）過程を大きく変化させ、大陸地殻の成因さらには地球表層環境進化にも深く関与してきたと考えられている。最近では、地球中心核での物質対流（外核での溶融金属の対流）と地球表層環境変化の関係をより定量的に議論する試みが始まっており、地球中心核の物理的あるいは化学組成的な構造に関する関心が急速に高まっている。しかしこれまでに得られている地球中心核の情報は主として地震学に基づくものであり、物性や化学組成等の地球化学的情報は極めて限定的である。地球中心核の組成進化や形成過程を明らかにするには、地球化学的制約条件を付すことが最も直接的かつ有効な研究手段であり、これにより地球表層・大気までも含めた「46 億年にわたる全地球システムの進化」がはじめて議論できる。こうした地球進化過程における最も根本的かつ重要な未解決課題である「地球中心核の形成」に対して、最も直接的かつ厳密な地球化学的制約条件を与えるためには、100GPa を越える「超高压発生技術」と、10 ミクロン以下の微小金属質試料から正確な微量元素情報を引き出す「超微量元素分析技術」が不可欠であり、研究開始当時ではその何れもが達成できていなかった。共同研究者である廣瀬らはダイヤモンドを用いた超高压発生技術を独自に発展させ、世界最高の圧力発生に成功するとともに、研究代表者である平田は、超短パルスレーザープラズマ質量分析法を用いた全く新しい化学分析手法の実用化を進めてきた。こうした持続的かつ協力的な研究開発を通じて、世界に先駆けて「地球中心核の地球化学」を推進する技術基盤および研究体制が構築できた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、世界最高性能の超高压発生技術と超微量元素分析法を組み合わせることにより、人類未到領域（高压高温条件）での元素分配・物性挙動を調べることができ、従来の「外挿による科学」から「直接観察する科学」を実現することである。これにより、地球中心核から表層までを含めた「全地球規模での物質循環機構の理解」が飛躍的に進むものと期待できる。また長期的展望として、本研究を通じて得られた地球化学的データは地球内部での親鉄性元素の全地球規模での分配挙動・循環機構に関する基礎的知見を与えるため、最近国際的関心が高まっているレアメタル鉱床の成因等に対する応用展開も期待できる。さらに本研究で実用化する超高压発

生法や化学分析法は、将来的に新素材開発や金属・半導体試料の超微量元素分析を支える基盤技術となる潜在性もあり大きな社会的波及効果も期待できる。地球中心核という学術的要請の高い研究の推進と、それに続く工学的要素の高い研究開発を推進することで、10 年後まで持続可能な世界最高レベルの分析体制の構築を目指す。

3. 研究の方法

本研究は研究代表者の他、研究分担者 1 名、連携研究者 1 名の計 3 名で実施した。研究代表者である平田は分析装置の開発と試料の分析ならびに研究の総括を担当した。また平田は、紫外線・超短パルスレーザーの改良（波長変換、光学系特性の改善）を進めるとともに、本研究を通じて導入した次世代磁場型プラズマ質量分析計の立ち上げと性能評価、さらには高感度化およびイオン検出器の改良を行った。研究分担者である廣瀬は、超高压実験の世界的第一人者であり、本研究では超高压実験装置の開発及び試料調製（高压発生実験ならびに試料の回収）、超高压実験条件の最適化を担当した。連携研究者である小木曾は、地球内部での元素循環・マントル進化に関する専門家であり、本研究の実験進行および実験計画に関して様々な学術的助言や改善案の提案を行った。

本研究では地球中心核における元素分配実験という研究課題を目的に、その学術推進に必要な局所領域の超微量元素分析法の開発を行う。具体的な研究目標は、10 ミクロン領域から濃度 ppm レベルの白金族元素（および他の 9 種の親鉄性元素）の高感度局所分析法の開発を行い、親鉄性元素の分配挙動（超高压条件下での溶融相と固相間での分配係数の決定）とその圧力依存性（常圧から 150GPa 程度）を調べることである。また本研究では分配係数の圧力依存性だけでなく、元素の分配挙動に大きな影響を与える硫黄

(S)の影響も並行して調べた。分配実験に際して金属相中の硫黄濃度を 0 ~ 20wt% まで変化させ、分配係数の変化を調べた。

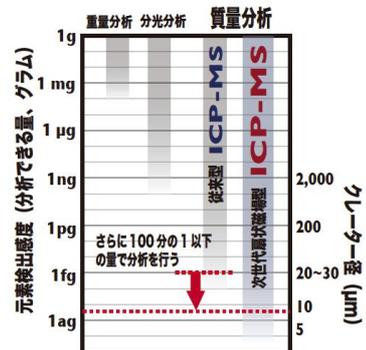


図1. 本研究で開発した次世代質量分析計と従来の分析技術の比較。磁場型質量分析計を応用することで10 ミクロン以下の空間分解能が達成できる。

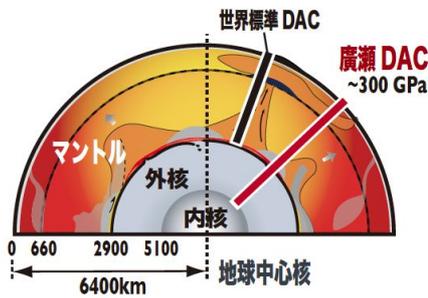


図 2. 本研究で実現可能な圧力と地球内部の対応

4. 研究成果

上記の研究目的を達成するために、本研究では分析手法の開発と、超高压実験に基づく微量金属元素の分配実験を行った。研究成果を研究計画に準じて区分すると、以下の6つに要約できる。各研究課題はそれぞれが独立したのではなく、相互に深く関連したものである。多くの場合、先に開発した開発要素を後の研究で最大限に活用している。

(1) フェムト秒レーザーアブレーション技術を組み合わせた次世代超高感度分析手法の開発

本研究では固体金属試料を超高压条件下で溶融させ、溶融部分と固体部分の間での微量成分元素の分配挙動（濃度比および同位体組成比）を定量的に調べる。得られる試料が微小サイズであることから、元素分析には超高感度分析が要求される。このため本研究では、多元素を同時に高感度で分析することができるプラズマ質量分析計（ICP-MS）を導入し、さらにその性能を強化した（図3）。まず磁場型質量分析計を用いることで、分析元素イオンを 6000 ボルト程度まで加速することが可能となり、イオンの収束特性や二次収差の影響を低減でき、質量分析計内で高いイオン透過効率と低バックグラウンド化が達成できた。さらに本研究では、従来の高感度イオン検出器に、イオン信号を間引く特殊なイオンレンズ（アッテネーターレンズ）を装着し、イオン検出器の検出可能範囲を従来の500倍まで高めた（図4）。これによりナノグラムの微量元素分析を行いつつ、同時に主成分元素についても正確な定量分析が可能となった。この高ダイナミックレンジイオン検出システムは分析拡張性が高く、広い分析要

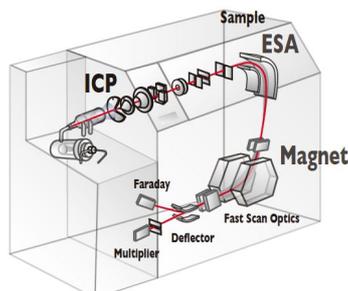


図 3. 本研究で導入した次世代型プラズマイオン源質量分析計

請に対応可能な「今後10年間は標準的なイオン検出法」になると期待されている（Sakata et al., 2014[論文投稿中]）。

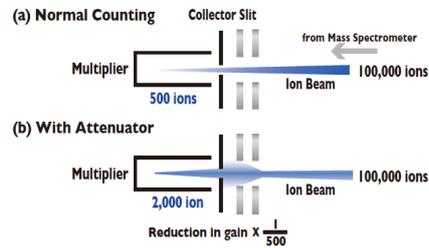


図 4. 本研究で実用化したアッテネーションイオン検出法
本研究では、検出器に導入されるイオンを“間引く”ための特殊なイオンレンズ（アッテネーター）を導入した。これにより、高い分析感度を維持したままで、主成分元素までを同時に分析できる広いダイナミックレンジが達成できた。

(2) ガルバノ光学系による多点同時アブレーション法の開発

本研究では、分析空間分解能として 5~10 ミクロンを目標としてきた。しかし超高压実験で得られる試料サイズが当初の予定に満たない場合も想定され、その場合、正確な化学分析が困難となる。この問題に対処するため本研究では、質量分析計の改良と並行して、2つのレーザー技術の開発を進めた。一つ目が多点同時サンプリングを可能とするガルバノ光学系の応用である（二つ目は次項で述べる液中レーザーアブレーション法の開発）。ガルバノ光学系は二枚の可動式レンズを利用したレーザー集光方式の一種であり、可動レンズによりレーザー照射点を高速で移動させることができる（図5）。これにより不規則な形状をした試料や、場所によって厚さが異なる試料でもサンプリング効率を最大限に高めることが可能となる。またガルバノ法を応用することで、内標準補正法や標準添加法などを用いた信頼性の高い定量分析が適用可能となるなど、分析の汎用性が飛躍的に向上した（Yokoyama et al., 2011）。このガルバノ光学系を応用することで、高压試料の溶融部分が分散した場合でも、複数の溶融部分から試料をアブレーションすることができ、正確な定量分析が可能となる。一方、複数のアブレーション点から試料を集めることができるため、各アブレーションポイントのレーザー径をさらに絞り込むことができるという特長も有する。このガルバノ光学系は、レーザーアブレーション分析での定量分析性能を非常に高めることから、様々な分野から注目

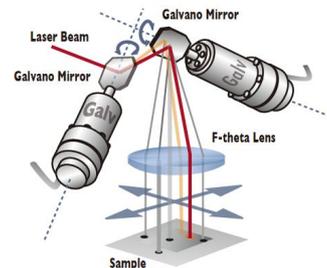


図 5. 定量性能を飛躍的に改善するガルバノ光学系の概念図
複数のスポットを同時にアブレーションすることが可能であり、空間分解能の改善や定量分析の拡張性が高まる。

から注目されており、これまでに同様の仕様のものが国内に2台導入され、広く活用されている。

(3)液中レーザーアブレーション法による局所同位体分析法の開発

本研究では、元素分配挙動に加え、超高压条件下での元素同位体効果の評価も試みた。従来のプラズマ質量分析技術では、マトリックス効果（試料の化学組成変化により分析元素の同位体組成がみかけ上変化する現象）により微小部分から正確な同位体組成情報を引き出すことが困難であった。この問題を解決するには、回収された試料から分析元素を化学的に抽出し、マトリックス組成を合わせる必要がある。そこで本研究では、試料の目的部分表面にごく薄い水層をつくり、液中でレーザー照射することで、試料を高回収率で水中に捕集する技術を開発した（液中レーザーアブレーション法：図6）。この方法では、空間分解能を低下させることなく、微小部分（5ミクロン程度）を定量的にサンプリングすることが可能である。また、回収される試料はナノパーティクル化されているため、酸処理が簡便かつ迅速であるうえ、必要に応じて化学分離処理が図れるなど分析学的利点も多い（Okabayashi et al., 2012）。液中レーザーアブレーション法を応用することで、例えば複雑な化学組成をもつ微小副成分鉱物や、隕石中の風化生成物といった不安定な化学形態をもつ成分から正確な鉄同位体組成情報を引き出すことができた（Okabayashi et al., 2014[論文投稿準備中]）。この液中レーザーアブレーション法は、地球化学試料だけではなく生体試料といった複雑な化学組成をもつ試料への応用も可能である。さらに、分析に際しては、プラズマ質量分析法に限らず、他の様々な分析機器（表面電離型質量分析計等）を活用できるため、様々な分析局面への応用が期待できる。

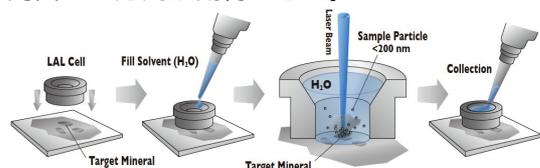


図6. 液中レーザーアブレーション法の概念図。固体分析試料面を超純水で覆い、その上から直接レーザー照射する。生成された試料エアゾール（ナノパーティクル）は水で捕集されるため、回収・分析処理等が可能となる。

(4)金属標準物質の合成と均質性の評価

本研究課題では、10ミクロン以下の微小金属質試料から正確な微量元素分析を行う超微量元素分析技術の実用化を目的の一つとしている。超高压実験を通じて得られた元素分配データを長く活用されるためには、信頼性の高い定量分析が不可欠である。しかし、本研究で注目する金属元素の多くは定量分析用標準物質が市販されていない。そこで本研究では、地球中心核の化学進化を調べる上で鍵となる15元素（Cr, Co, Ni, Cu, Ge, Mo, Ru, Rh, Pd, W, Re, Os, Ir, Pt, Au）を含んだ金属標準物質を独自に合成することとし

た。高純度金属粉末を秤量・混合し、アーク炉を用いた溶融により異なるニッケル含有量（5%および20%）の2種類の定量分析用固体標準物質を合成した。得られたボタン（図7左図）の均質性を調べたところ、いくつかの元素で不均質な分布がみられた（図7中央図）。そこで圧延・熱処理を繰り返すことで、10ミクロンスケールで均質な定量分析用固体標準物質を合成することができた（図7右図：Yokoyama et al., 2014[論文投稿準備中]）。均質な金属標準物質を用いることで、得られる元素分配データの国際的信頼性を向上できるうえ、圧力や化学組成等の変化に由来するわずかな分配係数の変化を正確に捉えることが可能となった。

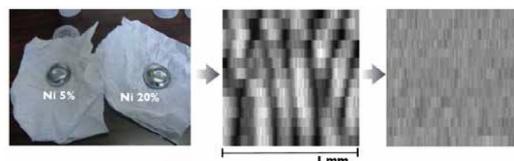


図7. 本研究で合成した2種類の金属標準試料（左図）アーク溶融だけでは不均質性があるため（中央図）、圧延・加熱処理する。得られた固体試料は10ミクロンスケールでの不均質は見いだされなかった。

(5)電気加熱導入法の開発

超高压実験では分析可能な試料サイズは5~10ミクロン程度である。また試料は化学組成的に不均質であることが多いため、これまでは精密同位体分析が困難であった。この問題に対し、本研究では液中レーザーアブレーションを開発した。しかしこのサンプリング法では回収できる試料量が少ないため、正確な同位体分析を行うためには、プラズマイオン源質量分析法のさらなる高感度化が不可欠であった。そこで本研究では、プラズマイオン源への試料導入効率を高めるために、電気加熱気化法（ETV法）の開発を行った（図8）。分析元素を塗布したレニウムフィラメントを電熱加熱し、分析元素を気化させる。気化した分析元素は、プラズマイオン源に直接導入する。導入効率が飛躍的に改善されるうえ、導入する元素形態が気体であるため、信号の安定性も高めることができ、高精度化に貢献した。従来のETV法では分析元素の気化をAr雰囲気下でおこなってきたが、本研究では熱伝導率の点で優れるHeを採用することで、気化効率を改善するとともに、プラズマ質量分析計で得られる信号を飛躍的に安定化させることに成功した（Okabayashi et al., 2014[論文投稿準備中]）。ま

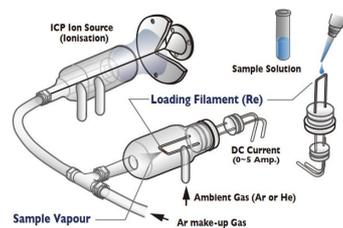


図8. 分析元素のダウンサイジングに有効な電気加熱試料導入法（ETV法）液中レーザーアブレーション法で回収できる分析元素量は少ないため、さらなる分析感度の向上が必要である。本研究では、電気加熱試料導入法を開発することでナノグラムレベルのタンクステンから高精度同位体分析が可能となった。

た分析元素の同位体分別の特長から、分析元素の化学形態に関する知見も引き出すことが可能となった。ETV 法を用いることで、従来の試料導入法に比べ 10 倍以上の高感度化が図れ、地球化学及び宇宙化学試料の精密同位体分析に応用が期待できる。ここで開発した ETV 法は国際的にも高く評価され、2013 年ゴールドシュミット国際会議にて国際地球化学試料分析賞 (IAG 賞) を受賞した。

(6) 様々な圧力条件での親鉄性元素分配実験

下部マントル鉱物である CaSiO_3 ペロフスカイトとメルト間における微量元素の分配実験を行った。特に実験試料中の鉱物相は 5 ミクロンを下回る領域であったが、2 ミクロンまで絞り込まれたレーザーを用いることで、固体液体両相を正確にサンプリングし分けることができた。また、このような微小領域においても濃度 ppm レベルの十分な定量分析が可能であった。マントル深部条件に相当する 90GPa, 4700K までの分配係数を決定した。Ba, Sr には正の圧力依存性が見られ、とくに不適合元素である Ba は 90GPa 以上では適合元素として振る舞うことが分かった。Sm, Nd の分配についてはマントル最下部条件では同等の分配係数になることが分かり、これは missing Nd 問題のリザーバーについての議論が進展することが期待される。一方で、高压条件下での鉄同位体分別実験も行った。微小試料から正確な同位体組成情報を引き出すことができたが、固相-液相間で有意な同位体組成変化は検出できなかった。鉄同位体の変動が小さかったことから、地球の核-マントル間での同位体分別に関しては再検討が必要なことが明らかとなった。

また、超高压下における溶融キセノン-溶融鉄の反応実験を行った。まず、本研究課題で導入した液化ガス充填装置を用い、液化キセノンを純鉄の箔とともに DAC の試料室に封入した。30GPa, 50GPa においてキセノン、鉄の融点よりも十分高温の 5000K まで加熱した。急冷後、常圧に回収された試料に対し本研究で開発した ICP-MS を用いて分析を行ったところ、溶融を被った鉄中に数千 ppm オーダーのキセノンが検出された。地球大気中の希ガス存在度はコンドライトのそれと比べて、キセノンのみが著しく欠乏している。本研究結果は地球中心核がキセノンのリザーバーとなっている可能性を始めて物質科学的に示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 8 件)

1. Michael E. Wieser, Norman Holden, Tyler B. Coplen, John K. Bohlke, Michael Berglund, Willi A. Brand, Paul De Bièvre, Manfred Groning, Robert D. Loss, Juris Meija, Takafumi Hirata, Thomas Prohaska, Ronny Schoenberg, Glenda O' Connor, Thomas Walczyk, Shige Yoneda and Xiang-Kun Zhu (2013) Atomic weights of the elements 2011 (IUPAC Technical Report) Pure and Applied Chemistry, 85, 1047-1078. (査読有)
2. Kei Ikehata, Takafumi Hirata (2013) Evaluation of UV-fs-LA-MC-ICP-MS for Precise In-situ Copper Isotopic Microanalysis of Cubanite, Analytical Science, 29, 1213-1217. (査読有)
3. Masaharu Tanimizu, Yoshiki Sohrin, Takafumi Hirata (2013) Heavy element stable isotope ratios : analytical approaches and applications, Anal. Bioanal. Chem., 405, 2771-2783. (査読有)
4. Takamasa Imai, Eiichi Takahashi, Toshihiro Suzuki, Takafumi Hirata (2012) Element partitioning between olivine and melt up to 10 GPa: Implications for the effect of pressure, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 212-213, 64-75. (査読有)
5. Kazumi Yoshiya, Manabu Nishizawa, Yusuke Sawaki, Yuichiro Ueno, Tsuyoshi Komiya, Keita Yamada, Naohiro Yoshida, Takafumi Hirata, Hideki Wada, Shigenori Maruyama (2012) In-situ iron isotope analyses of pyrite and organic carbon isotope ratios in the Fortescue Group: metabolic variations of a late Archean ecosystem, Precambrian Research, 212-213, 169-193. (査読有)
6. Takaomi D. YOKOYAMA, Toshihiro Suzuki, Yoshiaki Kon, Takafumi Hirata (2011) Determinations of REE Abundance and U-Pb age of Zircons using Multispot Laser Ablation-ICP-Mass Spectrometry (2011). Analytical Chemistry, 83, 8892-8899. (査読有)
7. Satoki Okabayashi, Takaomi D. Yokoyama, Yoshiaki Kon, Shinji Yamamoto, Tetsuya Yokoyama and Takafumi Hirata (2011) Evaluation of Laser Ablation in Liquid (LAL) technique as a new sampling technique for elemental and isotopic analysis using ICP-mass spectrometry, J. Anal. Atom. Spectrom., 26, 1393-1400. (査読有)
8. Tsuyoshi Iizuka, Tsuyoshi Komiya, Shuji Rino, Shigenori Maruyama, Takafumi Hirata (2010) Detrital zircon evidence for Hf isotopic evolution of granitoid crust and continental growth, Geochim. Cosmochim. Acta, 74, 2450-2472. (査読有)
9. Tsuyoshi Iizuka, Shun'ichi Nakai, Yu Vin Sahoo, Asako Takamasa; Takafumi Hirata, Shigenori Maruyama (2010) The tungsten isotopic composition of Eoarchean rocks: Implications for early silicate differentiation and core-mantle interaction on Earth, Earth Planet. Sci. Lett., 291, 189-200. (査読有)
10. Manabu Nishizawa, Hiroki Yamamoto, Yuichiro Ueno, Subaru Tsuruoka, Takazo Shibuya, Yusuke Sawaki, Shinji Yamamoto, Yoshiaki Kon, Kouki Kitajima, Tsuyoshi Komiya, Shigenori

Maruyama, Takafumi Hirata (2010) Grain-scale Iron isotopic distribution of pyrite from Precambrian shallow marine carbonate revealed by femtosecond laser ablation multi-collector ICP-MS technique: Potential proxy for the redox state of ancient seawater, Geochim. Cosmochim. Acta., 74, 2760-2778. (査読有)

11. Keitas Irisawa, Qing-Zhu Yin and Takafumi Hirata (2009) Discovery of non-radiogenic tungsten isotopic anomalies in the Allende CV3 chondrite, Geochemical Journal, 43, 395 - 402. (査読有)

12. Tsuyoshi Iizuka, Tsuyoshi Komiya, Simon P. Johnson, Yoshiaki Kon, Shigenori Maruyama, Takafumi Hirata (2009) Reworking of HADEAN crust in the Acasta gneisses, northwestern Canada: Evidence from in-situ Lu-Hf isotope analysis of zircon, Chemical Geology, 259, 230-239. (査読有)

[学会発表](計21件)

1. Takafumi Hirata (2014) Advanced development on in situ and bulk high-precision elemental and isotopic analyses (@Academia Sinica, Taipei) (2014年3月11日) 発表課題名: New generation laser ablation-ICPMS technique for age cytometry (基調講演)

2. 平田岳史 (2013) 第1回レーザーアブレーションワークショップ(@幕張)(2013年9月4日) 発表課題名: レーザーアブレーション ICP 質量分析計の基本原則(基調講演)

3. Takafumi Hirata (2012) Asia-Pacific Winter Conference 2012 (@Jeju, Korea) (2012年8月27日) 発表課題名: High-resolution Elemental and Isotopic Mappings for Single Zircon Grain using Laser Ablation-ICP-Mass Spectrometry (基調講演)

4. 平田岳史 (2011) 日本地質学会 (@水戸) (2011年9月10日) 発表課題名: 次世代高分解能レーザーアブレーション ICP 質量分析法の開発とその地質学的応用 (招待講演)

5. Takafumi Hirata (2011) Goldschmidt Conference 2011 (@Prague, Czech) (2011年8月15日) 発表課題名: Advances in Resolution and Accuracy of in-situ Determination of Isotope Ratios (基調講演)

6. Takafumi Hirata (2010) The international chemical congress of pacific basin societies (PACIFICHEM 2010) (@Honolulu, Hawaii) (2010年12月15-19日) 発表課題名: Non-traditional Applications of Laser Ablation Technique into the Earth Sciences (招待講演)

7. Takafumi Hirata (2010) The 3rd Asia-Pacific Workshop on Laser Ablation (China Univ. Geochimie, Wuhan) (2010年12月2-3日) 発表課題名: Laser Ablation-ICP-mass spectrometry (招待講演)

8. Takafumi Hirata (2010) Western Pacific Geophysical Meeting (WPGM@Taipei) 2010 (2010年6月24日) 発表課題名: In-situ Elemental and Isotopic Analyses using Femtosecond-Laser Ablation-ICP-mass Spectrometry for Geochemical Samples (招待講演)

9. 平田岳史 (2010) 第71回分析化学討論会 (2010年5月16日) 発表課題名: 無機質量分析法を用いた地球化学研究のグランドデザイン (招待講演)

演)

10. Takafumi Hirata (2009) MicroAnalysis Processes Time (MAPT2009@Edinburgh, UK) 発表課題名: NEW application of the femtosecond laser ablation technique for high-spatial resolution isotope geochemistry (基調講演)

[図書](計3件)

1. 平田岳史 (2011) 化学のブレイクスルー: 革新論文から見たこの10年の進歩と未来 (機器分析編) 化学同人.

2. Takafumi Hirata (2012) Advances in Laser Ablation-Multi-Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, pp. 93 - 112 (Chapter 4), Isotopic Analysis: Fundamentals and Applications using ICP-MS, Frank Vanhaecke and Patrick Degryse eds., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

[産業財産権]

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

平田研究室 (宇宙地球化学講座) ホームページ

<http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~web-geochem/Home.html>

超高压地球化学の紹介ホームページ

<http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~web-geochem/HighPressureGeochem.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田岳史 (Takafumi Hirata)

京都大学大学院理学研究科・教授

研究者番号: 10251612

(2) 研究分担者

廣瀬 敬 (Kei Hirose)

東京工業大学・大学院理工学研究科 (理学系)・教授

研究者番号: 50270921

(H21 H23: 研究分担者)

館野 繁彦 (Shogehiko Tateno)

東京工業大学・大学院理工学研究科 (理学系)・特任助教

研究者番号: 30572903

(H24 H25: 研究分担者)

(3) 連携研究者

小木曾 哲 (Tetsu Kogiso)

京都大学大学院人間・環境学研究科准教授
研究者番号: 60359172