

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2013

課題番号：21244082

研究課題名(和文)地球内部進化に果たすマグマの役割

研究課題名(英文)Role of magma in chemical evolution of the Earth

研究代表者

高橋 栄一(Takahashi, Eiichi)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40144779

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,500,000円、(間接経費) 10,650,000円

研究成果の概要(和文)：地球の70%を占めるマントルはMgOに富むカンラン岩、30%は金属核からできている。地殻をつくる玄武岩はマントルの部分融解によりできたマグマが分離上昇し、地表付近で固まったものである。地球内部進化(化学分化)にマグマ(融解現象)が果たした役割は極めて大きい。本研究では地球形成時に起きたマグマオーシャンの結晶化作用を各圧力で実験的に再現し、マグマと結晶間の微量元素の分配係数の圧力依存性をPC-IR図上で定式化することに初めて成功した。我々は微量元素分配係数の示す圧力依存性を説明しえる理論を提案した。

研究成果の概要(英文)：The Earth consists of 70% of MgO-rich peridotite (mantle) and 30% of Fe-Ni-rich metallic core. Basalt which is the main component of the Earth's crust is formed by partial melting of the mantle peridotite. Role of magma (melting phenomenon) has played very large role in the Earth's interior evolution (chemical differentiation). We have carried out high-pressure experiments and succeeded for the first time to reproduce experimentally the pressure dependence of the partition coefficient of trace elements between crystals and magma (PC-IR diagram). We proposed a theory that explains the pressure dependence.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：地球 マントル マグマオーシャン 元素分配 圧力依存性

1. 研究開始当初の背景

マントル物質の融解実験は世界の研究者の手で進められてきた。しかし 1980 年代前半までは、カンラン岩のソリダス (固相線) 付近で生じるマグマの化学組成が解明されたのみで、その圧力も 3 万気圧 (3GPa) 以下に限られていた (Takahashi & Kushiro, 1983)。高橋は、地球型惑星の形成過程とその内部進化を解明することを目標に、カンラン岩の融解実験をソリダスからリキダスにいたる全温度範囲でしかも下部マントルにいたる圧力範囲で解明することを目指して、大型マルチアンビル装置の実験技術開発に努めた。その結果、35 億年以前のコマチアイトマグマの起源がカンラン岩の 5GPa 以上での高圧融解によることが先ず明らかとなり (Takahashi & Scarfe, 1985 Nature)、続いて、マントルカンラン岩そのものが原始地球マグマオーシャンの固結物である可能性を提案するなど (Takahashi 1986, 1987, 1990, 1993, 2000)、地球史全体を通じてマグマの果たしてきた役割がこれまでの理解より遥かに重大であることを明らかにした。

2. 研究の目的

コンドライト隕石に基づく従来の全地球化学組成モデルに基づいて、地球は水素、炭素などの揮発成分が極端に不足した LOSIMAG C1 (Hart, 1984) 組成であると考えられてきた。しかしながら、東工大井田グループら現代の惑星形成理論では、離心率の低い惑星軌道を説明するため、地球型惑星の形成末期まで水素に富む Solar nebula が存在したことが必要とされ、地球の水の起源として、Ikoma & Genda (2006 Atrophys. J) Genda & Ikoma (2008 ICRUS) は Solar nebula の主成分である水素とマグマオーシャン中の FeO との化学反応により生じた可能性を示した。このモデルによれば地球は H₂O に富むマグマオーシャンに覆われて誕生したことになり、その場合、Fukai (1984 Nature), Okuchi (1998 Science) らが主張したように、地球中心核に大量の水素が取り込まれたことが不可避である。

本研究の目的は高橋研の高温高圧実験装置とこれまで蓄積したノウハウを生かして、地球形成時のマグマオーシャンの結晶分化を解明する事。および地球形成から現在に至るマントルの化学分化にマグマの果たした役割を解明することである。

3. 研究の方法

東工大高橋研究室の高圧実験室 (Magma Factory) にあるマルチアンビル型高圧発生措置、ピストンシリンダー装置および内熱式ガス圧装置を用いて、原始地球マグマオーシャンの再現実験を行い、多量の水素・炭素存在下での核とマントルの化学分別モデルを構築する。また、マントルブルーム内部でリサイクルした海洋地殻と周囲のカンラン岩

が反応融解するプロセスを高圧実験とハワイ火山の活動史観察から定量的にモデル化する。高輝度放射光施設 Spring-8 を用いて X 線その場回折実験を行い、高圧相平衡関係を解析する。回収した実験試料を東工大の電子線マイクロプローブを用いて化学分析する。

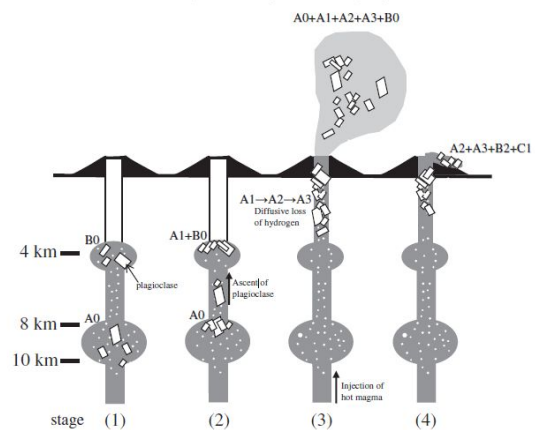
4. 研究成果

平成 21 年度

本科学研究費を用いて含水鉱物及び無水鉱物 (nominally anhydrous mineral) 中の OH および H₂O の検出と定量分析のための技術開発を行った。いくつかの装置メーカーを訪問して分析性能を比較し、平成 21 年 3 月に東京工業大学に導入した全真空型の顕微 FT-IR 装置を本科学研究費で導入した。これにより地球内部進化に重要な役割をはたして H₂O を定量的に解析できるようになった。

平成 22 年度

本科学研究費を用いて平成 21 年 3 月に東京工業大学に導入した全真空型の顕微 FT-IR 装置を用い、平成 22 年度は含水鉱物及び無水鉱物 (nominally anhydrous mineral) 中の OH および H₂O の検出と定量分析のための技術開発を行った。従来の FTIR 装置では光路中にある大気中の H₂O および CO₂ の吸収スペクトルのために邪魔されて測定が困難であった 10ppm 以下の OH および H₂O の分析が可能となった。



(図-1: Hamada et al. 2011, EPSL)

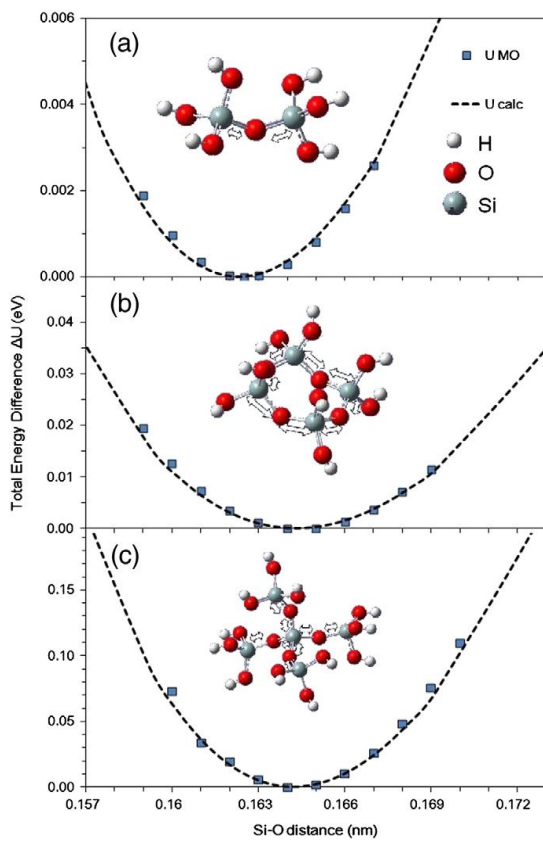
浜田らは、この全真空型の顕微 FT-IR 装置を用いて、斜長石中の微量の含水量の定量分析によるマグマ脱水過程を解明した。さらに、マントル無水鉱物間の水の分配係数決定 (Sakurai ほか 2011, 2012 地殻流体国際会議) など多くの研究成果を出すことにつながった。櫻井の研究は EPSL 誌に 2014 年 5 月に掲載が決まった。

さらに、平成 22 年度は地球初期進化に果たしマグマオーシャンの結晶化を定量的に議論するためカンラン石とペリドタイトマグマ間の微量元素の分配係数の圧力依存性を決定した (Imai ほか 2010 ゴールドシュミッ

ト会議)。その結果、PC-IR 図で表現する分配係数に系統的な圧力依存性があることを世界で初めて実証した。さらに初期地球化学分化における H₂O など揮発成分の役割を研究するため、これまで未解明であった Fe-H 系の相平衡と融点の圧力依存性を Spring-8 放射光での X 線その場観察実験により世界で初めて明らかにした (Imai ほか 2010 高压討論会)。

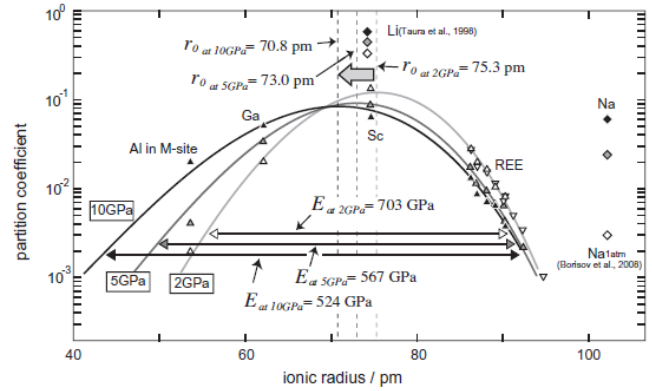
平成 23 年度

高橋研大学院生 (現在は岡山大学博士課程) の則竹はシリケートメルト構造の圧力変化を Spring-8 の高压その場 X 線回折実験および分子動力学計算で解析し、NaO-SiO₂ 系メルトの構造変化に関する研究を Noritake et al (2012) として発表した。



(図-2 Noritake et al. 2012, *J. Non-Cryst. Solids*,)

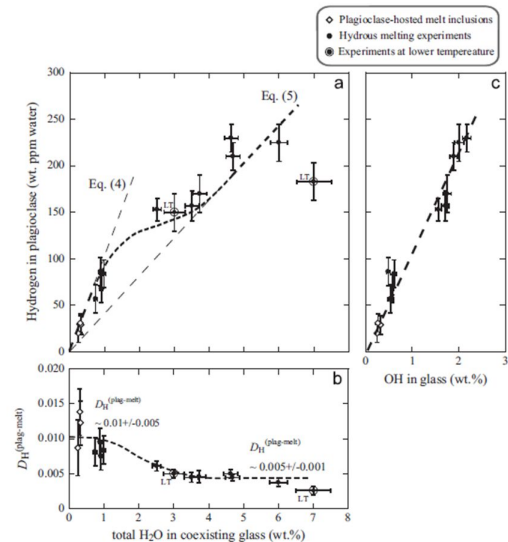
また平成 23 年度は地球初期進化に果たしマグマオーシャンの結晶化を定量的に議論するため、鈴木らは鉱物とペリドタイトマグマ間の微量元素の分配係数の圧力依存性を決定し、その成果は国際誌 *Phys. Earth Planet Inter* に 2 編の論文として発表した (Suzuki et al, 2012, Imai et al, 2012)。



(図-3 Imai et al, 2012 *PEPI* カンラン石の 6 配位席を置換する 3 価イオンの PC-IR 図の圧力依存性を示す実験結果)

平成 24 年度

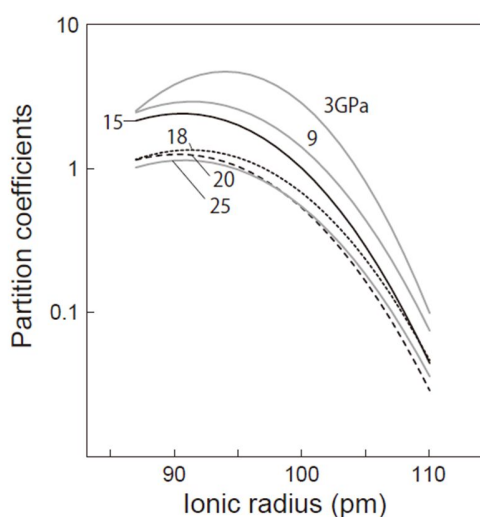
全真空型の顕微 FT-IR 装置を用い、平成 24 年度は含水鉱物及び無水鉱物 (nominally anhydrous mineral) 中の OH および H₂O の検出と定量分析のための技術開発を行った。従来の FTIR 装置では光路中にある大気中の H₂O および CO₂ の吸収スペクトルのために邪魔されて測定が困難であった 10ppm 以下の OH および H₂O の分析が可能となった。浜田らは水の濃度が異なる出発物質を用いて斜長石と玄武岩メルトの水素の分配実験を行い、分配係数の濃度依存性を世界で初めて明らかにした (Hamada et al. 2013)。



(図-4 Hamada et al. 2013 *EPSL*)

地球マグマオーシャンの結晶化作用を実験的に再現するために、鈴木と大学院生の今井はマルチアンビル装置を用いてマントル深部に相当する温度圧力条件で微量元素の分配実験を行った。これらの研究の結果、従来圧力による変化はないと考えられてきた結

晶とシリケートメルトの微量元素分配係数に明瞭な圧力依存性があり、高圧になると特定の結晶の配位置換席に入る元素の分配係数のイオン半径依存性が小さくなることが明らかになった。これは結晶席の「見かけヤング率」が高圧になると低下する（柔らかくなる）ことを意味するがそれは結晶全体が「圧力効果で圧縮されることと矛盾している。Imai et al, 2012 はこれまで無視されてきたメルト中のイオン席のヤング率を導入することによりこの矛盾を解消できることを示した。この結果、マグマオーシャンの広い圧力範囲のもとでの微量元素分配係数の圧力依存性を推定する道が開けた。



(図-5 ザクロ石の12面体席を置換する微量元素のPC-IR図の圧力依存性、今井崇暢博士論文2014年3月東工大より)

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 7件)

- 1.*Sakurai M., N. Tsujino, H. Sakuma, K. Kawamura, E. Takahashi, Effects of Al content on water partitioning between orthopyroxene and olivine: Implications for lithosphere-asthenosphere boundary, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2014. 印刷中、査読有
- 2.*Hamada, M., M. Ushioda, T. Fujii, E. Takahashi Hydrogen concentration in plagioclase as a hygrometer of arc basaltic melts: Approaches from melt inclusion analyses and hydrous melting experiments, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **365**, 253-262, 2013. 査読有
- 3.*Imai T., E. Takahashi, T. Suzuki, T. Hirata Element partitioning between olivine and melt up to 10GPa: implication for the effect of pressure, *Phys. Earth Planet. Inter.*, vol. 212-213, p.64-75, 2012.

doi.org/10.1016/j.pepi.2012.09.001 査読有

- 4.*Noritake, F., K. Kawamura, T. Yoshino, E. Takahashi, Molecular dynamics simulation and electrical conductivity measurement of $\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{SiO}_2$ melt under high pressure; relationship between its structure and properties *J. Non-Cryst. Solids*, **358**, 3109-3118, 2012. 査読有
- 5.*T. Suzuki, T. Hirata, T. Yokoyama, T. Imai and E. Takahashi, (2012) Pressure effect on element partitioning between minerals and silicate melt: involved with melting of basalt up to 20 GPa, *Phys. Earth Planet. Inter.*, vol. 208-209, p.59-73. doi.org/10.1016/j.pepi.2012.07.008 査読有
6. *Hamada, M., T. Kawamoto, E. Takahashi, T. Fujii, Polybaric degassing of island arc low-K tholeiitic basalt magma recorded by OH concentrations in Ca-rich plagioclase, (2011) *Earth and planetary Science Letters*, 308, 259-266, doi:10.1016/j.epsl.2011.06.005 査読有
- 7.Tomiya A.*, E. Takahashi, N. Furukawa, and T. Suzuki (2010) Depth and Evolution of a Silicic Magma Chamber: Melting Experiments on a Low-K Rhyolite from Usu Volcano, Japan *J. Petrology* vol.51, no.6, 1333-1354; doi:10.1093/petrology/egq021. 査読有

〔学会発表〕(計 15件)

1. Role of Water in Arc Basalts: case studies in Miyakejima, Fuji and some other volcanoes Eiichi Takahashi, Masashi Ushioda, Kenta Asano & Toshiro Suzuki Geofluid-3 国際シンポジウム 招待講演 2014年2月28日 3月3日 東京工業大学デジタル多目的ホール
2. Magma feeding system of Fuji volcano, Japan E. Takahashi, K. Asano and J. Nakajima Goldschmidt 国際会議 2013年8月28日 3月3日 フィレンツェ、イタリア
3. Deep magma feeding system of Fuji volcano, Japan E. Takahashi, J. Nakajima and K. Asano IAVCEI 国際火山学会 2013年7月20日 7月24日 鹿児島県民交流センター
4. LF-earthquakes, S-wave reflectors and Arima-type Brine: A model for Geofluid circulation in arc crust Eiichi Takahashi 地球惑星科学連合大会 招待講演 2013年5月19日 5月24日 幕張メッセ
5. Deep magma feeding system of Fuji volcano, Japan E. Takahashi, K. Asano,

- J.Nakajima 米国地球物理学連合秋季大会
2012年12月3日 12月7日 モスコーン
センター サンフランシスコ
6. 島弧玄武岩マグマの含水量・岩相・火山活動様式：三宅島火山・富士火山を例として
高橋栄一・潮田雅司・浅野健太 鉱物科学
会 招待講演 2012年9月19日 9月21
日 都大学吉田キャンパス
7. 島弧玄武岩マグマの含水量について：伊豆
大島、三宅島、富士ならびに東北日本弧火
山からの考察 高橋栄一、浜田盛久、潮田
雅司、浅野健太 地球惑星科学連合大会
招待講演 2012年5月20日 5月25日 幕
張メッセ
8. Possible Role of Hydrogen in the Earth
Core Eiichi Takahashi and Takamasa Imai
米国地球物理学連合秋季大会 2011年12月
10日 モスコーンセンター サンフラン
シスコ
9. Role of Hydrogen in the Earth's core
E. Takahashi and T. Imai IUGG2011
International Union of Geophysics and
Geodesy 2011年7月2日メルボルンコン
ベンションセンター
10. Melting in the asthenosphere beneath
old oceanic plate E. Takahashi 招
待講演 IUGG2011 International Union of
Geophysics and Geodesy 2011年7月1日
メルボルンコンベンションセンター オ
ーストラリア
11. Origin of Arima-type Brine, E.
Takahashi 招待講演 First
International Symposium on Geofluids:
Geofluid Processes in Subduction Zones
and Mantle Dynamics 2011年3月17-19日
東京工業大学デジタル多目的ホール(震災
により書面開催)
12. 三宅島火山：大船戸期玄武岩の融解実験
と酸素雰囲気制御 潮田雅司・高橋栄一・
鈴木敏弘・浜田盛久 火山学会秋期大会
(2010年10月9日) 京都大学
13. カンラン石、メージャライトガーネット/
ペリドタイトメルト間における分配係数
の圧力依存性 今井崇暢、高橋栄一、鈴木
敏弘 平田岳史 日本地球化学会年会 立
正大学 2010年9月15日
14. 沈み込み帯深部に存在する流体の化学組
成：実験的アプローチ 高橋栄一 地球惑星
科学連合大会 招待講演 2010年5月26日
幕張メッセ
15. Water content of Miyakejima Basalt:
Melting Experiments of basalt from
Miyakejima volcano, Japan M. Ushioda, E.
Takahashi, T. Suzuki 地球惑星連合大会
(2010年5月25日) 幕張メッセ
- 〔その他〕
ホームページ等
<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/takahashi/index.html>
<http://www.geofluids.titech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 栄一 (TAKAHASHI Eiichi)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：40144779

(2) 研究分担者

浜田 盛久 (HAMADA Morihisa)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス領域・研究員
研究者番号：60456853

鈴木 敏弘 (SUZUKI Toshihiro)
東京工業大学・大学院理工学研究科・研究
員
研究者番号：40235974