

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23684038

研究課題名(和文) マルチメガバール領域における基礎物性データの取得～地球からスーパーアースへ

研究課題名(英文) Physical properties of terrestrial planet's components at multi-megabar range; Implication for the Super-Earth's interior

研究代表者

境 毅 (Sakai, Takeshi)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・助教

研究者番号：90451616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：地球型岩石質惑星のマントル構成物質である酸化物(MgO , Al_2O_3)・ケイ酸塩($MgSiO_3$, $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$)、および核の構成物質である鉄系物質(Fe , $Fe-Ni$, $Fe-Ni-S$, $(Fe,Ni)_3S$)について、地球の数倍の質量をもつスーパーアース内部の議論に適用可能な数100万気圧(マルチメガバール)領域での状態方程式を明らかにした。また従来の高圧発生技術の限界を打破すべく、新しい高圧力発生手段として2段式加圧型ダイヤモンドアンビルセルの開発を行い、300万気圧以上の圧力を発生することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The equations of state at multi-megabar range of oxide (MgO , Al_2O_3), silicate ($MgSiO_3$, $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$), and iron alloys (Fe , $Fe-Ni$, $Fe-Ni-S$, $(Fe,Ni)_3S$) are established. These equations of state are applicable to the discussion of the internal structure of Super-Earth which has a few times mass of the Earth. Moreover, the double stage micro-paired diamond anvils are newly developed, and it successfully generates over 300 gigapascal.

研究分野：超高压地球惑星内部科学

キーワード：レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセル 2段式加圧型ダイヤモンドアンビルセル ポストペロブスカイト マルチメガバール 状態方程式 スーパーアース

1. 研究開始当初の背景

地球の核マントル境界圧力は 136 万気圧、地球の中心圧力は 365 万気圧である (1 万気圧は 1 GPa)。地球の深部で何が起きているのかを明らかにするために、高圧力実験によってこのような高圧力状態が実験室に再現され、物質の振る舞いが調べられている。数 100 GPa (マルチメガバール) での実験は非常に困難であり、研究例が少なかったが、近年では実験技術の向上により地球の核を対象として 200 GPa 以上での実験がいくつか行われるようになった (e.g. Sakai et al. 2011 GRL)。

一方惑星科学の分野では、Queloz et al. (2009) による地球と似た平均密度を持つ系外惑星 (太陽系の外に存在する惑星) の発見を皮切りに、地球と似た岩石型の系外惑星の発見が相次ぐようになった。これらの系外惑星のうち特に地球の 2~10 倍の質量を持つものはスーパーアースと呼ばれている。これらスーパーアースの内部はその大きさゆえに、地球よりはるかに高い圧力状態にあり、マントルだけでも 1000 GPa に達し得る。内部構造がどうなっているのかは興味深いテーマであったが、スーパーアースを対象としたそのような高圧力下における物質の実験データは全くないというのが現状であった。従って、地球のマントル圧力を超える領域においても、酸化物やケイ酸塩に関する高圧実験の必要性が高まっていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、スーパーアースを対象とした超高圧領域での基礎物性データの取得である。具体的には、地球やスーパーアースを構成する物質について、数 100 GPa 領域での体積 (密度) 測定を行い、圧力に対する体積の挙動、すなわち状態方程式を確立することを目的とする。本研究では、マントルを構成する (1) 酸化物およびケイ酸塩の状態方程式と、核を構成する (2) 鉄系合金の状態方程式に関する研究を行った。また一方で、上述のようにスーパーアースの内部圧力は従来の高圧力実験の範囲を大きく超えているため、(3) 高圧発生技術開発も同時に行った。

3. 研究の方法

(1) 酸化物およびケイ酸塩の状態方程式

(2) 鉄系合金の状態方程式

高圧力の発生にはダイヤモンドアンビルセルを用いた。高圧力下の試料の格子体積を粉末 X 線回折法により求めた。X 線回折実験は大型放射光施設 SPring-8 の BL10XU において行った。また試料にレーザー光を照射することで高温を発生し、高温高圧下でのデータを取得するとともに、アニーリングにより試料中の一軸応力を緩和し、常温下でも質の良いデータを取得するように努めた。詳細は Sakai et al. (2011, 2012, 2014) を参照されたい。

(3) 高圧発生技術開発

従来のダイヤモンドアンビルセルの中に、さらに小さなダイヤモンドアンビル (マイクロアンビル) を組み込む、2 段式加圧を行った。マイクロアンビルは集束イオンビーム加工装置を用いて作成した。この際、あらかじめ数 10 μm の厚さの単結晶ダイヤモンド薄板およびナノ多結晶ダイヤモンド薄板をそれぞれ用意し、薄板から切り出す形でマイクロアンビルの整形を行い、デポジション機能により 1 段目のダイヤモンドアンビルに固定した。2 段式加圧に関する報告はこれまで 1 件のみ (Dubrovinsky et al. 2012) あったが、実験の再現性の難しさおよび結果の信頼性の問題がありその後全く報告が無かった。本研究では、集束イオンビーム加工装置によるマイクロアンビルの形状制御、上下一体型マイクロアンビルの開発、SPring-8 における X 線マイクロビームによる圧力分布の評価などを行い、先行研究の問題点を克服し再現性・信頼性ある実験を可能にした (Sakai et al. 2015)。

4. 研究成果

(1) 酸化物およびケイ酸塩の状態方程式

MgO

最も単純かつ基本的な MgO に関して、圧力スケールとして広く使われている白金 (Pt) とともに加圧実験を行い、308 GPa までの圧縮に成功した。この圧力は 2.5 倍の質量のスーパーアースマントル最下部に相当する。レーザーアニーリングにより MgO および Pt の試料室中の応力状態を表す St 値は全ての圧力条件で 0.005 以下に抑えることができた。また計算された一軸応力の値は MgO、Pt とともに全ての圧力条件で 6 GPa 以内であり、最高圧力 308 GPa における Pt の一軸応力は 0.5 GPa であった。このことから、ほぼ準静水圧環境での圧縮に成功し、質の良いデータを取得することができたと考えられる。先行研究によるデータからの外挿では 300 GPa 領域での体積については、3 次の Birch-Murnaghan の状態方程式を使うか Vinet の状態方程式を使うかによって大きなばらつきがあったが、今回実験で直接測定したデータでキャリブレーションすることにより、状態方程式モデルによる違いは殆どなくなり整合性あるものとなった。これらの状態方程式は、 $V/V_0=0.49$ 程度 (圧力で 500 GPa 程度) までは 7 GPa 以内 (約 1.4% 以内) で一致した。MgO は 400~500 GPa 程度の圧力で NaCl 型から CsCl 型への相転移が予想されているが、今回の結果は相転移前の圧力まで一定の精度で適用可能と思われ、スーパーアースのマントルの密度構造などの議論に有用であることが期待される (Sakai et al. in prep.)。

Al₂O₃

基本的な酸化物単成分の一つである Al₂O₃ について、329 GPa (圧力スケールによっては 361 GPa) までの圧縮に成功した。Al₂O₃ は 177

GPa 以上において CaIrO_3 型の結晶構造を示し、この構造は約 330 GPa、2000 K までの温度圧力範囲で安定であることが分かった。この構造について 177 GPa から 329 GPa までの体積データに対して 3 次の Birch-Murnaghan の状態方程式、または Vinet の状態方程式でフィッティングし、各種状態方程式のパラメータを得た。 CaIrO_3 型の Al_2O_3 は 370 GPa 程度の圧力で U_2S_3 型への相転移が予想されているが、今回の結果は相転移前の圧力まで一定の精度で適用可能と思われる (Sakai et al. in prep.)。

MgSiO₃

地球型惑星のマントルの主要構成物質である MgSiO_3 は、マントル最下部において CaIrO_3 型の結晶構造を示し、ペロプスカイト構造 (Pv 相) から相転移を起こすことからポストペロプスカイト相 (PPv 相) と呼ばれている。この相は地球においてはマントル最下部に約 200 km の層を形成するにすぎないが、スーパーアースのマントルにおいてはそのほとんどを占める主要相であると期待される。本研究ではこのポストペロプスカイト相に関して 265 GPa までの圧縮データを取得し、各種状態方程式のパラメータを得た。高圧下の物質の状態方程式としては極限圧縮環境下でより物理的な意味を持つ AP2-EoS モデル (Holzapfel, 1998) と Keane-EoS モデル (Keane, 1954) を適用した。得られた状態方程式を用いて 1000 GPa、6000 K までの圧縮挙動および各種物性値について算出した。一方で、第一原理計算による 1000 GPa、6000 K までの圧縮挙動を求め、比較検討した。AP2-EoS を基準とした場合、Keane-EoS および第一原理計算による圧縮挙動 (体積) は 1000 GPa、6000 K まで $\pm 1.5\%$ 以内に納まっており、広範な温度圧力範囲で実験モデルと理論モデルに一定の整合性があることを明らかにした。また、Pv 相に関する先行研究と比較することで、Pv-PPv 相転移に伴って密度が約 1.2(3)% 増加することが分かった。これは先行研究の結果 (+1.5(5)%) とも整合的である (Komabayashi et al. 2008)。また、高温条件下においてバルク音速が約 1.3(4)% 減少することを初めて実験的に明らかにした。

スーパーアースの内部構造の推定には MgSiO_3 の状態方程式に基づく天体の Mass-Radius 関係が用いられる (e.g., Pepe et al. 2013)。ここで用いられている MgSiO_3 の状態方程式は Caracas and Cohen (2008) の 180 GPa までの第一原理計算結果を高圧力領域に外挿して用いられている。これに対し 200-300 GPa 領域 (2-2.5 倍の質量をもつスーパーアースマントル下部に相当) において、本研究で実測により得られた状態方程式 (図 1) は、2% 程大きな体積を示す。この結果は、 MgSiO_3 単成分での Mass-Radius 関係が変化し、スーパーアースの内部構造が従来の予測よりマントル部分が若干少なくなる方向に修正さ

れることを意味している。本研究の状態方程式は、より確からしい MgSiO_3 単成分 Mass-Radius 関係を与え、スーパーアース内部構造の推定において、より信頼性の高いモデルを提供する (Sakai et al. in prep.)。

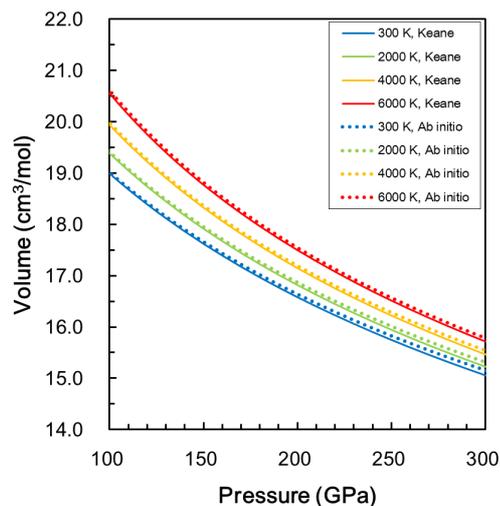


図 1. CaIrO_3 型 MgSiO_3 の圧縮曲線

$\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ pyrope

マントル側のケイ酸塩において Al 成分が物性に与える効果を見るために $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ パイロップ組成のポストペロプスカイト相を 185 GPa、3000 K において合成した。185 GPa における MgSiO_3 および Al_2O_3 組成のポストペロプスカイト相と体積を比較すると、 MgSiO_3 単成分 (Al_2O_3 成分 0%) を基準としたとき、パイロップ組成 (Al_2O_3 成分 25%) は +0.1%、 Al_2O_3 単成分 (Al_2O_3 成分 100%) は +0.6% となった。ここで Al_2O_3 成分が増加するにしたがって、体積が増加する関係が見取れるが、その関係は単純な線形関係ではなく、やや下に凸の放物線を描くことが明らかとなった。 (Sakai et al. in prep.)

(2) 鉄系合金の状態方程式

Fe-Ni-S

335 GPa (圧力スケールによっては 370 GPa) までの圧縮データに基づき、純鉄や $\text{Fe}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}$ の密度と比較することにより、地震学的に測定されている地球の内核の密度は 5 wt.% のニッケルと 5.7 wt.% の硫黄が鉄に固容することで説明可能であることを示した (Sakai et al. 2012 JGR)。

(Fe,Ni)₃S

141 GPa、1590 K までの温度圧力範囲において Fe-FeS 系の中間化合物である $(\text{Fe}_{0.89}, \text{Ni}_{0.11})_3\text{S}$ の圧縮挙動・安定性について明らかにした。地球の核マントル境界圧力における密度の比較を、純鉄や $\text{Fe}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}$ の密度と比較することにより地球の外核の密度は 7.4-13.1 wt.% の硫黄で説明できることを示した (Sakai et al. 2011 AM)。

Fe および Fe-Ni

地球型惑星の核の主要構成物質である Fe および $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ 合金の状態方程式について先行研究との比較や種々のエラーの検討など、詳細な議論を行った。圧力スケールの問題を加味すると、329 GPa, 5000 K において $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ 合金は Fe に比べて 7.3-7.8%ほど小さな体積弾性率を示す。また同条件において、地球の内核の密度は、Fe に対しては 3.4(1)-5.1(1)%、 $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ 合金に対しては 4.7(1)-6.5(2)% 小さいことが分かった (Sakai et al. 2014 PEPI)。

(3) 高圧発生技術開発

2 段階加圧型ダイヤモンドアンビルセル

単結晶ダイヤモンドおよびナノ多結晶ダイヤモンドを素材として、集束イオンビーム加工装置を用いて 3 ミクロンの先端径を持つマイクロアンビルを作成することに成功した(図2)。上下一体型で作成するという新しいアイデアにより非常に小さいマイクロアンビル先端のアライメント問題を克服した。再現性ある高圧発生実験が可能になり、最大で 337 GPa までの圧力発生に成功した。実験の再現性が向上したことにより、マイクロアンビルの形状や素材、1 段階目で発生する封圧の向上など各種項目の最適化を目的とした技術開発が引き続き可能で、この手法によるさらなる高圧力の発生が期待される。この結果は、Review of Scientific Instrument 誌に掲載され、Editor's Picks (編集者が選ぶ注目論文) にも選出されており、国際的にも注目を集めている (Sakai et al. 2015 RSI)。

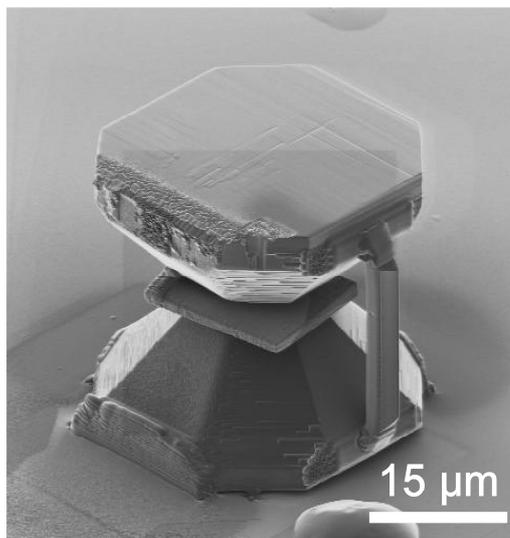


図2. 単結晶ダイヤモンドマイクロアンビル

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 17 件)

1. Sakai, T., T. Yagi, H. Ohfuji, T. Irifune, Y. Ohishi, N. Hirao, Y. Suzuki, Y. Kuroda, T. Asakawa, T. Kanemura, High-pressure generation using double stage micro paired diamond anvils shaped by FIB, Rev. Sci. Instr.,

86, 033905, DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4914844>, 2015. 査読有り

2. Sakai, T., S. Takahashi, N. Nishitani, I. Mashino, E. Ohtani, and N. Hirao, Equation of state of pure iron and $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ alloy up to 3Mbar, Phys. Earth Planet. Inter., 228, 114-126, DOI:10.1016/j.pepi.2013.12.010, 2014. 査読有り
3. Kamada, S., E. Ohtani, H. Terasaki, T. Sakai, S. Takahashi, N. Hirao, and Y. Ohishi, Equation of state of Fe_3S at room temperature up to 2 megabars, Phys. Earth Planet. Inter., 228, 106-113, DOI:10.1016/j.pepi.2013.11.001, 2014. 査読有り
4. Kamada, S., E. Ohtani, H. Fukui, T. Sakai, H. Terasaki, S. Takahashi, Y. Shibazaki, S. Tsutsui, A. Q. R. Baron, N. Hirao, and Y. Ohishi, The sound velocity measurements of Fe_3S , Am. Mineral., 99, 98-101, doi: 10.2138/am.2014.4463, 2014. 査読有り
5. Miyahara, M., E. Ohtani, A. Yamaguchi, S. Ozawa, T. Sakai, N. Hirao, Discovery of coesite and stishovite in eucrite, Proc. Natl. Acad. Sci., DOI:10.1073/pnas.1404247111, 2014. 査読有り
6. Ohira, I., E. Ohtani, T. Sakai, M. Miyahara, N. Hirao, Y. Ohishi, M. Nishijima, Stability of a hydrous δ -phase, $\text{AlOOH-MgSiO}_2(\text{OH})_2$, and a mechanism for water transport into the base of lower mantle, Earth Planet. Sci. Lett., 401, 12-17, DOI: 10.1016/j.epsl.2014.05.059, 2014. 査読有り
7. Mashino, I., E. Ohtani, N. Hirao, T. Mitsui, R. Masuda, M. Seto, T. Sakai, S. Takahashi, S. Nakano, The spin state of iron in Fe^{3+} -bearing Mg-perovskite and its crystal chemistry at high pressure, Am. Mineral., 99, 1555-1561, 2014. 査読有り
8. Fukui, H., T. Sakai, T. Sakamaki, S. Kamada, S. Takahashi, E. Ohtani, and A.Q.R. Baron, A compact system for generating extreme pressures and temperatures: an application of laser-heated diamond anvil cell to inelastic X-ray scattering, Rev. Sci. Instrum. 84, 113902, doi: 10.1063/1.4826497, 2013. 査読有り
9. Ohtani, E., Y. Shibazaki, T. Sakai, K. Mibe, H. Fukui, S. Kamada, T. Sakamaki, Y. Seto, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron, Sound velocity of hexagonal close-packed iron up to core pressures, Geophys. Res. Lett., 40, 1-6, doi:10.1002/grl.50992, 2013. 査読有り
10. Miyahara, M., S. Ozawa, E. Ohtani, M. Kimura, T. Kubo, T. Sakai, T. Nagase, M. Nishijima, N. Hirao, Jadeite formation in shocked ordinary chondrites, Earth Planet. Sci. Lett., 373, 102-108, doi: 10.1016/j.epsl.2013.04.023, 2013. 査読

有り

11. Miyahara, M., S. Kaneko, E. Ohtani, T. Sakai, T. Nagase, M. Kayama, H. Nishido, N. Hirao, Discovery of seifertite in a shocked lunar meteorite, Nature communications, DOI: 10.1038/ncomms2733, 2013. 査読有り
12. Sakai, T., E. Ohtani, S. Kamada, H. Terasaki, N. Hirao, Compression of $\text{Fe}_{88.1}\text{Ni}_{9.1}\text{S}_{2.8}$ alloy up to the pressure of Earth's inner core, J. Geophys. Res., 117, B02210, 2012. 査読有り
13. Kamada, S., E. Ohtani, H. Terasaki, T. Sakai, M. Miyahara, Y. Ohishi, N. Hirao, Melting relationships in the Fe-Fe₃S system up to the outer core conditions, Earth Planet. Sci. Lett., 359-360, 26-33, 2012. 査読有り
14. Terasaki, H., E. Ohtani, T. Sakai, S. Kamada, H. Asanuma, Y. Shibazaki, N. Hirao, N. Sata, Y. Ohishi, T. Sakamaki, A. Suzuki, K. Funakoshi, Stability of Fe-Ni hydride after the reaction between Fe-Ni alloy and hydrous phase ($\delta\text{-AlOOH}$) up to 1.2 Mbar: Possibility of H contribution to the core density deficit, J. Geophys. Res., 194-195, 18-24, 2012. 査読有り
15. Shibazaki, Y., E. Ohtani, H. Fukui, T. Sakai, S. Kamada, D. Ishikawa, S. Tsutsui, A.Q.R. Baron, N. Nishitani, N. Hirao, K. Takemura, Sound velocity measurements in dhcp-1 FeH up to 70 GPa with inelastic X-ray scattering: Implications for the composition of the Earth's core, Earth Planet. Sci. Lett., 313-314, 79-85, 2012. 査読有り
16. Sakai, T., E. Ohtani, H. Terasaki, S. Kamada, N. Hirao, M. Miyahara, M. Nishijima, Phase stability and compression study of $(\text{Fe}_{0.89}\text{Ni}_{0.11})_3\text{S}$ up to pressure of the Earth's core, Am. Mineral., 96, 1490-1494, 2011. 査読有り
17. Asanuma, H., E. Ohtani, T. Sakai, H. Terasaki, S. Kamada, N. Hirao, Y. Ohishi, Static compression of $\text{Fe}_{0.83}\text{Ni}_{0.09}\text{Si}_{0.08}$ alloy to 374 GPa and $\text{Fe}_{0.93}\text{Si}_{0.07}$ alloy to 252 GPa: Implications for the Earth's inner core, Earth Planet. Sci. Lett., 310, 113-118, 2011. 査読有り

〔学会発表〕(計 81 件)

以下、主要 14 件のみ掲載 (招待講演 5 件、基調講演 1 件)

1. Sakai, T., Dekura, H., Hirao, N., Equation of state of MgSiO_3 post-perovskite, AGU Fall Meeting 2013, Moscone center, San Francisco, California, USA, December 15-19, 2014.
2. Sakai, T., Simultaneous volume measurement of MgO and Pt up to 3 Mbar, The Sixth Meeting of Research Consortium on High-pressure Research, Kumamoto

University, Kumamoto, Kumamoto, Japan, September 25-27, 2014 (INVITED).

3. Sakai, T., Dekura, H., Hirao, N., Equation of state of MgSiO_3 post-perovskite: Implications for the internal structure of super-Earth, AOGS 2014 11th Annual Meeting, Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Hokkaido, Japan, July 28-August 1, 2014.
4. Akagi, S., Sakai, T., Hirao, N., Equation of state of $(\text{Fe,Ni})_3\text{S}$ phase - Implications for Mars internal structure, Japan Geoscience Union Meeting 2014, Makuhari messe, Chiba, Chiba, Japan, April 28-May 02, 2014.
5. Sakai, T., Takahashi S., Nishitani N., Mashino I., Ohtani E., Hirao N., Equations of state of iron and $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ alloy. Workshop on Elasticity and Iron, Hotel Wakamizu, Kobe/Takarazuka, Hyogo, Japan, February 25-27, 2014.
6. Sakai, T., Nickel effect on the density and bulk modulus; Implication for the terrestrial planet's core, The 3rd Global-COE international symposium on Deep Earth Mineralogy in conjunction with TANDEM 2013, Green hall and Nanka Memorial hall at Ehime University, Matsuyama, Ehime, Japan, March 4-6, 2013.
7. Sakai, T., Phase stability and equation of state of Fe-Ni-X at Multi Mbar pressures, CECAM workshop "New insights on metals under extreme conditions", Institut Henri Poincaré, Paris, France, December 13-15, 2012. (INVITED)
8. Sakai, T., Takahashi, S., Nishitani, N., Mashino, I., Ohtani, E., Hirao, N., Equation of state of Fe and Fe-Ni alloy at multi-megabar, AGU Fall Meeting 2012, Moscone center, San Francisco, California, USA, December 3, 2012. (INVITED)
9. Sakai, T., S. Takahashi, N. Nishitani, I. Mashino, E. Ohtani, N. Hirao, Equations of state of core materials; implication for the core composition., G-COE International Symposium "Achievements of G-COE Program for Earth and Planetary Dynamics and the Future Perspective, sendai city war reconstruction memorial hall, Sendai, Miyagi, Japan, September 25-28, 2012. (INVITED)
10. Sakai, T., E. Ohtani, N. Hirao, Equation of state of Fe-Ni Alloy at multi-megabar pressure, Joint 2012 COMPRES Annual Meeting and High-Pressure Mineral Physics Seminar-8, Granlibakken Lodge, Lake Tahoe, California, USA, July 9-13, 2012.(Keynote)
11. Sakai, T., E. Ohtani, H. Terasaki, S. Kamada and N. Hirao, Sulfur content in the core, Joint symposium of Misasa-2012 and

Geofluid-2, Blancart Misasa, Misasa, Tottori, Japan, March 18-21, 2012. (INVITED)

12. Sakai, T., Takahashi S., Shibasaki Y., Kamada S., Terasaki H., Ohtani E., The effect of light elements on Earth's core properties., 9th International Workshop on Water Dynamics, Sendai international center, Sendai, Miyagi, Japan, March 7-9, 2012.
13. Sakai, T., N. Nishitani, E. Ohtani, N. Hirao, The compression study of MgO up to 3Mbar, American Geophysical Union Fall Meeting 2011, MR41A-2098, Moscone Convention Center, San Francisco, California, USA, December 5-10, 2011.
14. Sakai, T., E. Ohtani, N. Hirao, Y. Ohishi, Phase relation of Fe-Ni-Si alloy up to 3 Mbar, Japan Geoscience Union Meeting 2011, SIT003-12, Makuhari messe, Makuhari, Chiba, Japan, May 22-27, 2011.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況(計0件)
- 取得状況(計0件)

〔その他〕

Editor's Picks from Review of Scientific Instruments
<http://aip-info.org/1XPS-3F8OF-45C9QM85A7/c.r.aspx>

6. 研究組織

(1)研究代表者

境 毅 (Sakai Takeshi)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・助教

研究者番号：90451616