

研究種目：	基盤研究 (B)
研究期間：	2007~2009
課題番号：	19340122
研究課題名 (和文)	多結晶ダイヤモンドを用いたコア条件下の超高压高温実験に基づくコアの物質科学的研究
研究課題名 (英文)	Materials science study of the Earth's core based on the high-pressure and high-temperature experiments under core condition using polycrystalline diamond.
研究代表者	
	八木 健彦 (YAGI TAKEHIKO)
	東京大学・物性研究所・教授
	研究者番号：20126189

研究成果の概要 (和文) : 多結晶ナノダイヤモンドおよび通常の単結晶ダイヤモンドをアンビル材として用いたダイヤモンドアンビルと、レーザー加熱およびシンクロトロン放射光とを組み合わせ、地球の核に相当する超高压高温条件下でのX線回折実験を行う技術を開発した。それを用いて、鉄とキセノンの反応を 155GPa、3000K の高压高温条件まで調べた。両者はこの条件下でも全く反応しないことから、従来地球科学で大きな課題とされてきたキセノン欠損の原因が、コアにあると考えることは難しいことを明らかにした。

研究成果の概要 (英文) : Experimental techniques to make X-ray diffraction study under the condition of the Earth's core was developed using diamond anvil by employing both nanocrystalline diamond and single crystal diamond as anvil materials. Reaction of iron and xenon was studied up to 155 GPa and 3000K using this technique. No reaction between these two materials was observed up to the highest pressure, which suggest that the origin of the "missing xenon" should be found somewhere outside of the core.

#### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：高压、ダイヤモンドアンビル、多結晶ダイヤモンド、コア、キセノン

#### 1. 研究開始当初の背景

申請者のグループは長年、ダイヤモンドアンビルを用いた超高压高温実験技術の開発を進めてきた。レーザー加熱やシンクロトロン放射光と組み合わせることにより、メガバール領域でのX線その場観察実験技術を確立し、高い成果をあげることができた。申請者らが建設した SPring-8 のレーザー加熱装

置はその後さらに改良が加えられ、SPring-8 放射光の質の高さと相まって国際的にもトップレベルの装置となり、固体地球科学の分野で世界をリードするポストペロフスカイト相の発見という大業績につながったのは記憶に新しい。しかし華々しく拡大されてきた P-T 条件も、ここに来てアンビル材として用いられているダイヤモンドそのものの機

械的強度の限界に起因すると思われる壁が見えてきた。今まではアンビル形状やガスケット材を工夫することにより、圧力温度領域の拡大が図られてきたが、300GPaを越す超高压領域で高温にすると、アンビルそのものの強度低下による破壊が起これ、これを克服することは容易ではない。そこで着目したのが、最近愛媛大入船グループにより開発された、「HIME ダイヤ」と名付けられた人工多結晶ダイヤモンドである。この物質はナノサイズのダイヤモンド粒子をバインダー無しで焼結させたもので、粒界が障壁となって格子欠陥が移動しにくいいため、特に高温において単結晶ダイヤモンドよりも硬いとされている。ただ加工が難しく、色も褐色なため、従来のようなレーザー加熱ダイヤモンドアンビル実験技術が使えるのか否かがまだ明らかになっていない。そこで本研究では、この新しいアンビル材料を有効に利用する実験技術確立し、それを用いて地球のコアに関する物質科学的研究を大幅に進展させることをめざした。

## 2. 研究の目的

本研究は、最近新たに開発されたナノ多結晶ダイヤモンド「HIMEダイヤ」をアンビル材料として用い、従来の限界を越す超高压高温条件下でのX線実験技術を開発すると共に、地球の中心核に対応する130万気圧以上の超高压高温下での実験を通して、物質科学的な側面から中心核の構造解明に取り組むことを目的としている。ダイヤモンドアンビル技術は近年大きな発展を遂げ、室温では地球の中心圧力に対応する超高压発生が報告されているが、高温の同時発生には至っていない。これは超高压下で高温実験をすると、アンビル自身の温度上昇も避けられないため機械的強度が低下して、アンビルが破壊されるためと考えられている。本研究ではこの問題を、今まで使われてきた単結晶ダイヤモンドの代わりに、より高い強度を持ち特に高温での強度低下が小さいことが明らかになってきた「HIMEダイヤ」と名付けられた人工多結晶ダイヤモンドをアンビル材として用いることにより克服しようとするものである。そうして得られた超高压高温X線実験技術を駆使し、地球のコアに対応する超高压高温下で、コアの構成物に関する実験的研究を行い、その組成や成因の解明を進めることを最終的な目的としている。中心核に関する未解決の問題は多々あるが、本研究では特に不活性ガスの中でキセノンが太陽系の存在度に比較して現在の空気中では異常に少ない、いわゆる“Missing Xenon”問題に関連して、キセノンもコアの条件下では金属化することから、鉄と反応を起こしてコア中に溶け込んでいるのではないか、という仮説に対して、実験的な検

証を試みた。

## 3. 研究の方法

初年度はまずHIMEダイヤを用いた基本的な超高压発生、レーザー加熱の実験を行った。このHIMEダイヤは、通常のダイヤモンドよりも硬くてきわめて加工が難しいので、レーザー加工を大幅に取り入れた新しい加工方法を確立する必要があった。通常のダイヤモンドアンビルと同様の形にHIMEダイヤを整形・研磨し、SPRING-8で高温高压X線その場観察を行いながら、圧力発生、温度発生の実験を繰り返した。また2年目以降は多結晶ナノダイヤが、完全に等方的な力学的性質を持つ素材で劈開を持たないという特徴を生かし、従来の単結晶ダイヤモンドでは不可能だった先端が球状のアンビルを作成し、さらなる超高压の発生を試みた。300GPa領域での相転移の存在が計算物理により予言されている $\text{Al}_2\text{O}_3$ を試料として、SPRING-8でX線により発生圧力とアンビル形状及び内部の圧力分布を測定しながら実験を行った。また、これらの実験で明らかになったレーザー加熱の問題点を克服するために、従来のYAGレーザーより小さいスポットに集光することが可能で、かつ出力の安定度も高いファイバーレーザーを購入して立ち上げ、それを使って加熱方法の改良を物性研のレーザー光学系を用いて進めるとともに、SPRING-8での実験も行った。これらの経験を総合して、マルチメガバル領域での超高压高温X線その場観察実験技術の開発を進めた。

これらの技術開発が一定の段階まで進展したところで、実際に鉄を試料として超高压高温X線実験を行い、その地球核条件下における相平衡関係や結晶構造の解明を進めた。またそれと共に、“missing xenon”の問題解明のため、Xe-Fe系のメガバル領域における超高压その場観察実験も行った。キセノンはきわめて高価なガス状試料のため、それを高密度にしてダイヤモンドアンビルの試料室に充填するには、新たなサンプリング技術の開発が必要となり、液化充填装置を開発してその問題をクリアしたうえで、鉄とキセノンを試料室に入れてコアの圧力領域まで加圧、加熱し、新たな化合物の生成や固溶体の生成の有無をX線その場観察により調べた。これらの実験結果にもとづき、コア中にXeが取り込まれているか否かについての議論を行った。

## 4. 研究成果

まず、ナノ多結晶ダイヤモンド「HIMEダイヤ」を用いて、コア条件下での超高压高温X線回折実験を行う技術を確立することができた。加工に関しては、短パルスの赤外レーザーを用いることにより、きわめて効率的に素

材からアンビルに整形する技術が確立された。単結晶ダイヤモンドの場合は、レーザーで切った先端から劈開による割れ目が成長することがしばしばあるが、HIME ダイヤの場合はこのようなことが見られず、より硬いにもかかわらずレーザーによる加工はかえって容易な位である。レーザーで切断したあと研磨によりアンビルに仕上げるが、より時間はかかるものの、この研磨も充分精密に行えることが明らかになった。また先端が球状になったアンビルの成型にも成功した。これにより、今後多様な形のアンビルをデザインすることが可能になると思われる。これらのアンビルを用いて超高压発生実験を繰り返し、メガバールの発生はできたものの、アンビルの破壊によって単結晶ダイヤを用いた実験より高い圧力を出すことはできなかった。硬さ試験により HIME ダイヤの素材は単結晶ダイヤより硬いとされているものの、完全に一樣な素材を作ることは容易ではなく、微小な欠陥から破壊が起こるようで、まだ製造方法に改良の余地があることを示している。

レーザー加熱法に関しても種々の試みを行い、単結晶ダイヤに比較してかなり色が濃いものの、レーザー光は充分透過し、メガバール領域でも数千°Cまで加熱が可能なことを示した。アンビルそのものの熱伝導率が単結晶ダイヤに比較して非常に低いため、試料の断熱に関してはより有利になることが期待される。ファイバーレーザーを用いることにより、従来広く使われている YAG レーザーに比べてより小さなスポットを加熱することが可能なことも示され、マルチメガバールにおける加熱には特に有効だと期待される。これら HIME ダイヤを用いた実験技術の開発結果に関しては、協力しながら実験を進めた愛媛大グループとの共著で次の2つの論文にまとめられている。

Application of nano-polycrystalline diamond to laser-heated diamond anvil cell experiments, H. Ohfujii, T. Okada, T. Yagi, H. Sumiya, and T. Irifune, *High Pressure Res.*, 30 142-150 (2010)

Laser heating in nano-polycrystalline diamond anvil cell

H. Ohfujii, T. Okada, T. Yagi, H. Sumiya and T. Irifune, *J. Physics, Condensed matter* (2010)

また、キセノン-鉄系のメガバール下におけるふるまいに関しては、155GPa、3000Kまでの領域での研究を行うことができた。まずキセノンを低温で液化し、CCD カメラでモニターしながらダイヤモンドアンビルの試料室に充填する新たに開発した装置を用いて、予め純鉄の箔を入れた試料室にキセノンを充填し、SPring-8 の BL10 ステーションでフ

ィバーレーザーを使って加熱しながら X 線による観察を繰り返した。従来このような実験は約 50GPa までに行われていたものの、キセノンが金属化する 120GPa 以上の圧力領域では全く行われておらず、キセノン金属化によりその振るまいが全く変わる可能性が指摘されていた。しかし本研究により、キセノンが金属化する 120GPa 以上でも、新たな化合物は全く生成されず、両相の体積変化から固溶も全く起きないことが明らかにされた。これは同じ hcp 構造の金属になるといっても両者の体積が倍以上異なっているためと考えられ、常圧での合金生成に関する法則、ヒュームロザリー則からしても、固溶が起きないのはもっともであると結論づけられた。この結果から、従来提唱されてきた、“missing xenon”がコアにキセノンが溶け込んでいるために起きたとする説は、ほぼ可能性が無いことが明らかにされた。この研究結果は、次の論文にまとめて発表された。

No reactions observed in Xe-Fe system even at Earth core pressures, D. Nishio-Hamane, T. Yagi, N. Sata, T. Fujita, and T. Okada. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L04302 1-4 (2010)

またこれ以外にも、下部マントルの鉱物学を考えていく上で重要となる  $\text{TiO}_2$  や  $\text{FeTiO}_3$  のふるまいについても、50GPa 以上の圧力領域までの高温高压 X 線その場観察実験が行われ、それぞれ従来の研究結果を覆す新たな相関係が明らかにされ、次の論文に結果がまとめられた。

The stability and equation of state for the cotunnite phase of  $\text{TiO}_2$  up to 70 GPa, D. Nishio-Hamane, A. Shimizu, R. Nakahira, K. Niwa, A. Sano-Furukawa, T. Okada, T. Yagi, and T. Kikegawa, *Phys. Chem. Mineral.*, 37, 129-136 (2010)

High pressure phase behavior in  $\text{FeTiO}_3$ : decomposition into  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_{0.5x})\text{O}$  and  $\text{FeTi}_3\text{O}_7$ , D. Nishio-Hamane, T. Yagi, M. Ohshiro, K. Niwa, T. Okada, *Phys. Rev. B*. submitted.

#### 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 28 件)

1. N. Nishiyama, T. Yagi, S. Ono, H. Gotou, T. Harada, T. Kikegawa, Effect of incorporation of iron and aluminum on the thermoelastic properties of magnesium silicate perovskite, *Phys. Chem. Minerals*, 査読有、34 巻、2007、131-143
2. S. Machida, H. Hirai, T. Kawamura, Y. Yamamoto and T. Yagi, Raman spectra of

- methane hydrate up to 86GPa, *Phys. Chem. Minerals*, 査読有、34 巻、2007、31-35
3. K. Kusaba, T. Yagi, J. Yamaura, N. Miyajima and T. Kikegawa, Single-crystal to single-crystal phase transition with a large deformation in Zn(OH)<sub>2</sub> under high-pressure, *Chem. Phys. Lett.*, 査読有、437 巻、2007、61-65
  4. T. Okuchi, M. Takigawa, J. Shu, H.-K. Mao, R. Hemley, and T. Yagi, Fast molecular transport in hydrogen hydrates by high-pressure diamond anvil cell NMR, *Phys. Rev. B*, 査読有、75 巻、2007、144104 (1-5)
  5. T. Yagi, E. Iida, H. Hirai, N. Miyajima, T. Kikegawa, and M. Bunno, High-pressure behavior of a SiO<sub>2</sub> clathrate observed by using various pressure media, 査読有、75 巻、2007、174115
  6. K. Niwa, T. Yagi, K. Ohgushi, S. Merkel, N. Miyajima and T. Kikegawa, Lattice preferred orientation in CaIrO<sub>3</sub> perovskite and post-perovskite formed by plastic deformation under pressure, *Phys. Chem. Minerals*, 査読有、34 巻、2007、679-686
  7. M. Hasegawa, K. Niwa and T. Yagi, Synthesis of new La nitrides at high pressure and temperature, 査読有、141 巻、2007、267-272
  8. H. Hirai, S. Ohno, T. Kawamura, Y. Yamamoto, and T. Yagi, Changes in vibration modes of hydrogen and water molecules and in lattice parameters with pressure for filled-ice hydrogen hydrates, *J. Phys. Chem. C*, 査読有、111 巻、2007、312-315
  9. K. Ohgushi, Y. Matsushita, N. Miyajima, Y. Katsuya, M. Tanaka, F. Izumi, H. Gotou, Y. Ueda and T. Yagi, CaPtO<sub>3</sub> as a novel post-perovskite oxide, *Phys. Chem. Minerals*, 査読有、35 巻、2008、189-195
  10. H. Hirai, K. Konagai, T. Kawamura, Y. Yamamoto and T. Yagi, Phase changes of solid methane under high pressure up to 86 GPa at room temperature, *Chem. Phys. Lett.*, 454 巻、2008、212-217
  11. A. Sano, T. Yagi, T. Okada, H. Gotou, E. Ohtani, J. Tsuchiya and T. Kikegawa, X-ray diffraction study of high pressure transition in InOOH, *J. Mineralogical and Petrological Sciences*, 査読有、103 巻、2008、152-155
  12. H. Hirai, N. Takahara, T. Kawamura, Y. Yamamoto, and T. Yagi, Structural changes and preferential cage occupancy of ethane hydrate and methane-ethane mixed gas hydrate under very high pressure, *J. Chem. Phys.*, 査読有、129 巻、2008、224503 (1-7)
  13. S. Machida, H. Hirai, T. Kawamura, Y. Yamamoto, and T. Yagi, Structural changes of filled ice Ic structure for hydrogen hydrate under high pressure, *J. Chem. Phys.*, 査読有、129 巻、2008、224505 (1-5)
  14. 丹羽健、八木健彦、宮川千絵、松田准一、高圧下における SiO<sub>2</sub> メルトへの希ガス溶解度、高圧力の科学と技術、査読有、18 巻、2008、44-54
  15. 八木健彦、高温高圧 X 線実験の発展と地球深部物質の研究、高圧力の科学と技術、査読有、18 巻、2008、160-169
  16. 岡田卓、八木健彦、丹羽健、DAC を用いた MgGeO<sub>3</sub> ポストペロブスカイト相の塑性変形実験と選択配向の観察、高圧力の科学と技術、査読有、18 巻、2008、244-253
  17. 八木健彦、惑星物質の極端条件下における結晶学、日本結晶学会誌、査読有、51 巻、2009、83-87
  18. T. Yagi, Post-perovskite phase: Findings, Structure and Property, *Physics and Chemistry of the Earth's Interior: Crust, Mantle and Core*, 査読有、巻なし、2009、185-189
  19. D. Nishio-Hamane, M. Katagiri, K. Niwa, A. Sano-Furukawa, T. Okada, T. Yagi, A new high-pressure polymorph of Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: implication for high-pressure phase transition in sesquioxides, *High Pressure Res.*, 査読有、29 巻、2009、379-388
  20. D. Nishio-Hamane and T. Yagi, Equations of state for postperovskite phases in the MgSiO<sub>3</sub>-FeSiO<sub>3</sub>-FeAlO<sub>3</sub> system, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 査読有、175 巻、2009、145-150
  21. Y. Sueda, T. Irifune, T. Sanehira, T. Yagi, N. Nishiyama, T. Kikegawa, and K. Funakoshi, Thermal equation of state of CaFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-type MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 査読有、174 巻、2009、78-85
  22. N. Miyajima, T. Yagi, and M. Ichihara, Dislocation microstructures of MgSiO<sub>3</sub> perovskite at a high pressure and temperature condition, *Phys. Earth Planet. Interiors*, 査読有、174 巻、2009、153-158
  23. L. Miyagi, S. Merkel, T. Yagi, N. Sata, Y. Ohishi and H.-R. Wenk, Diamond anvil cell deformation of CaSiO<sub>3</sub> perovskite up to 49 GPa, *Phys. Earth Planet. Interiors*, 査読有、174 巻、2009、159-164
  24. H. Hirai, K. Konagai, T. Kawamura, Y. Yamamoto and T. Yagi, Polymerization and diamond formation from melting methane and their implications in ice layer of giant planets, *Phys. Earth Planet. Interiors*, 査読有、174 巻、2009、242-246
  25. A. Sano-Furukawa, H. Kagi, T. Nagai, S. Nakano, S. Fukura, D. Ushijima, R. Iizuka, E. Ohtani, and T. Yagi, Change in compressibility of δ-AIOOH and δ-AIOOD at high pressure: A study of isotope effect and hydrogen-bond symmetrization, *Am. Mineral.*, 査読有、94 巻、2009、1255-1261
  26. H. Ohfuji, T. Okada, T. Yagi, H. Sumiya, and T. Irifune, Application of nano-polycrystalline diamond to laser-heated diamond anvil cell experiments, 査読有、30 巻、2010、142-150
  27. D. Nishio-Hamane, A. Shimizu, R. Nakahira, K. Niwa, A. Sano-Furukawa, T. Okada, T. Yagi, and T. Kikegawa, The stability and equation of state for the cotunnite phase of TiO<sub>2</sub> up to 70 GPa, *Phys. Chem. Mineral.*,

査読有、37 卷、2010、129-136

28. D. Nishio-Hamane, T. Yagi, N. Sata, T. Fujita, and T. Okada, No reactions observed in Xe-Fe system even at Earth core pressures, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有、37 卷、2010、L04302 (1-4)

[学会発表] (計 54 件)

1. 篠崎彩子、平井寿子、八木健彦、マントル物質と水、メタン流体の高温高压下での反応と挙動、地球惑星科学連合大会、2007 年 5 月 19-24 日、幕張
2. 末田有一郎、八木健彦、佐多永吉、大石泰生、亀卦川卓美、Phase transforms of aluminous phases、地球惑星科学連合大会、2007 年 5 月 19-24 日、幕張
3. 角谷均、中本有紀、清水克哉、入舩徹男、八木健彦、ナノ多結晶ダイヤモンドの特性と DAC 用アンビルへの適用、第 48 回高压討論会、2007 年 11 月 20 日、倉吉
4. 八木健彦、岡田卓、大藤弘明、入舩徹男、亀卦川卓美、佐多永吉、ナノ多結晶ダイヤモンドを用いたレーザー加熱超高压高温実験、第 48 回高压討論会、2007 年 11 月 20 日、倉吉
5. 藤田尚行、八木健彦、岡田卓、後藤弘匡、ダイヤモンドアンビル用 Xe 充填装置の開発、第 48 回高压討論会、2007 年 11 月 21 日、倉吉
6. 岡田卓、八木健彦、丹羽健、亀卦川卓美、 $MgGeO_3$  ポストペロブスカイトの選択配向—相転移生成によるものと塑性変形によるもの—、第 48 回高压討論会、2007 年 11 月 22 日、倉吉
7. 篠崎彩子、平井寿子、近藤忠、八木健彦、マントル物質と水、メタン流体の高温高压下での反応と挙動、地球惑星科学連合大会、2008 年 5 月 25-30 日、幕張
8. 岡田卓、八木健彦、丹羽健、Lattice preferred orientations in post-perovskite-type  $MgGeO_3$  formed from different pre-Phases ( $MgGeO_3$  ポストペロブスカイトの選択配向)、地球惑星科学連合大会、2008 年 5 月 25-30 日、幕張
9. 町田真一、平井寿子、八木健彦、水素ハイドレートの分子間相互作用と高压安定性、地球惑星科学連合大会、2008 年 5 月 25-30 日、幕張
10. 藤田尚之、八木健彦、小倉敏博、Xe-SiO<sub>2</sub> 系の高温高压下のふるまい、日本鉱物科学会 2008 年年会、2008 年 9 月 22 日、秋田
11. 篠崎彩子、平井寿子、近藤忠、八木健彦、マントル条件下でのメタンからの高次炭化水素の生成 Formation of long polymerized hydrocarbons from methane molecules under the Earth's mantle condition、日本鉱物科学会 2008 年年会、2008 年 9 月 20-22 日、秋田
12. 片桐聖智、八木健彦、浜根大輔、丹羽健、 $Ti_2O_3$  の高温・高压相転移、第 49 回高压討論会、2008 年 11 月 12 日、姫路
13. 浜根大輔、八木健彦、藤野清志、 $MgSiO_3$ - $FeSiO_3$ - $FeAlO_3$  系におけるボス

- トペロブスカイト相の圧縮率、第 49 回高压討論会、2008 年 11 月 12 日、姫路
14. 佐野亜沙美、八木健彦、岡田卓、後藤弘匡、亀卦川卓美、歪んだルチル型構造をとる水酸化物の圧縮挙動、第 49 回高压討論会、2008 年 11 月 14 日、姫路
  15. 岡田卓、八木健彦、浜根大輔、 $MgGeO_3$  ポストペロブスカイト相転移圧力に及ぼすナトリウム及び 3 価鉄の影響、第 49 回高压討論会、2008 年 11 月 13 日、姫路
  16. 篠崎彩子、平井寿子、近藤忠、八木健彦、マントル条件下でのメタン重合および解離水素とカンラン石との反応、第 49 回高压討論会、2008 年 11 月 14 日、姫路
  17. 藤田尚行、八木健彦、小暮敏博、Xe-SiO<sub>2</sub> 系の高圧化のふるまい、第 49 回高压討論会、2008 年 11 月 14 日、姫路
  18. 町田真一、平井寿子、後藤弘匡、榊原俊郎、八木健彦、低温液化水素充填装置の開発、第 49 回高压討論会、2008 年 11 月 14 日、姫路
  19. 篠崎彩子、平井寿子、鍵裕之、浜根大輔、近藤忠、八木健彦、マントル条件下におけるメタンの分子重合と解離水素のカンラン石への影響、地球惑星科学連合大会、2009 年 5 月 16-21 日、幕張
  20. 岡田卓、八木健彦、浜根大輔、エジリンの高圧相関係と  $MgSiO_3$  ポストペロブスカイト相転移圧力に及ぼすエジリン成分の影響、地球惑星科学連合大会、2009 年 5 月 16-21 日、幕張
  21. 浜根大輔、岡田卓、八木健彦、Phase transition in  $TiO_2$  at high pressure and the bulk modulus of  $TiO_2$  polymorphs ( $TiO_2$  の高压高温相転移および高压相の体積弾性率)、地球惑星科学連合大会、2009 年 5 月 16-21 日、幕張
  22. 町田真一、平井寿子、川村太郎、山本佳孝、八木健彦、水素ハイドレートの同位体効果と分子間相互作用、地球惑星科学連合大会、2009 年 5 月 16-21 日、幕張
  23. T. Okada, M.I. Erements, I.A. Troyan, T. Yagi, Ionic conductivity of ice at high pressures and temperatures, Joint AIRAPT-22 & HPCJ-50 International Conference on High Pressure Science and technology, July 26-July 31, 2009, Tokyo
  24. D. Nishio-Hamane, M. Katagiri, T. Yagi, Th<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-type polymorph in  $Ti_2O_3$  under high pressure, Joint AIRAPT-22 & HPCJ-50 International Conference on High Pressure Science and technology, July 26-July 31, 2009, Tokyo
  25. A. Sano, T. Yagi, T. Okada, H. Gotou, H. Kagi, T. Nagai, T. Kikegawa, Change in compression in  $M_3+OOH$  oxyhydroxide and implication for hydrogen bond symmetrization, Joint AIRAPT-22 & HPCJ-50 International Conference on High Pressure Science and technology, July 26-July 31, 2009, Tokyo
  26. T. Irifune, T. Kunimoto, F. Isobe, T. Shinmei, H. Ohfuji, N. Nishiyama, A. Kuri, H. Sumiya, T. Yagi, Synthesis of nano-polycrystalline

- diamond in large-volume multianvil apparatus and its application to various types of high-pressure apparatus, Joint AIRAPT-22 & HPCJ-50 International Conference on High Pressure Science and technology, July 26-July 31, 2009, Tokyo
27. S.Machida, H.Hirai, T.Kawamura, Y.Yamamoto, T.Yagi, Structural Changes and Intermolecular Interactions of Filled Ice Ic Structure for Hydrogen Hydrate under High Pressure, Joint AIRAPT-22 & HPCJ-50 International Conference on High Pressure Science and technology, July 26-July 31, 2009, Tokyo
  28. K.Kusaba, T.Yagi, J.Yamaura, T.Kikegawa, Structural consideration of single crystal - single crystal transition in  $Zn(OH)_2$ , Joint AIRAPT-22 & HPCJ-50 International Conference on High Pressure Science and technology, July 26-July 31, 2009, Tokyo
  29. H.Hirai, N.Takahara, T.Kawamura, Y.Yamamoto, T.Yagi, Changes in structure and preferential cage occupancy of ethane hydrate and methane-ethane mixed gas hydrate under high pressure, Joint AIRAPT-22 & HPCJ-50 International Conference on High Pressure Science and technology, July 26-July 31, 2009, Tokyo
  30. A. Shinozaki, H. Hirai, H. Kagi, D. Hamane, T. Kondo, T. Yagi, Polymerization of methane molecules and release of hydrogen under the Earth's mantle conditions, Joint AIRAPT-22 & HPCJ-50 International Conference on High Pressure Science and technology, July 26-July 31, 2009, Tokyo
  31. K.Niwa, H.Ikegaya, M.Hasegawa, T.Yagi, Glass-Formation and Crystal Growth of group 14 Oxides under High Pressure, Joint AIRAPT-22 & HPCJ-50 International Conference on High Pressure Science and technology, July 26-July 31, 2009, Tokyo
  32. 岡田卓、八木健彦、浜根大輔、 $NaFe_3Si_2O_6$  の 85GPa までの高圧相関係：エジン組成ペロブスカイトの存在、日本鉱物科学会 2009 年年会、2009 年 9 月 8-10 日、札幌
  33. 浜根大輔、八木健彦、岡田卓、藤田尚行、コア条件下における Fe-Xe 系のふるまい、日本鉱物科学会 2009 年年会、2009 年 9 月 8-10 日、札幌
  34. 浜根大輔、八木健彦、 $MgSiO_3$ - $FeSiO_3$ - $FeAlO_3$  系におけるポストペロブスカイト相の圧縮挙動とバルク音速、日本鉱物科学会 2009 年年会、2009 年 9 月 8-10 日、札幌
  35. 浜根大輔、片桐聖智、八木健彦、 $Ti_2O_3$  における  $Th_2S_3$  型多形への高圧相転移：セスキ酸化物における新たな高圧構造、日本鉱物科学会 2009 年年会、2009 年 9 月 8-10 日、札幌
  36. 瀬戸雄介、浜根大輔、岡田卓、八木健彦、永井隆哉、高圧下における  $CO_2$  (V) の構造、日本鉱物科学会 2009 年年会、2009 年 9 月 8-10 日、札幌
  37. 中村ひとみ、八木健彦、浜根大輔、岡田卓、 $Fe_2O_3$  の高温高圧下における相転移、日本鉱物科学会 2009 年年会、2009 年 9 月 8-10 日、札幌
  38. 入船徹男、磯部太志、新名亨、仲本麻理子、河野義生、大藤弘明、西山宣正、栗尾文子、木村正樹、角谷均、鍵裕之、八木健彦、超高硬度ナノ多結晶ダイヤモンドの合成とその特性・応用、日本鉱物科学会 2009 年年会、2009 年 9 月 8-10 日、札幌
  39. H. Hirai, M. Honda, T. Kawamura, Y. Yamamoto, T. Yagi, Stability of  $CO_2$  hydrate under very high pressure and low temperature, 2009 AGU Fall Meeting, December 14-18, 2009, San Francisco, USA
  40. T. Yagi, D. Nishio-Hamane, N. Sata, T. Fujita, T. Okada, Behavior of Xenon-iron system under core pressure, 2009 AGU Fall Meeting, December 14-18, 2009, San Francisco, USA
6. 研究組織
- (1)研究代表者  
八木 健彦 (YAGI TAKEHIKO)  
東京大学・物性研究所・教授  
研究者番号：20126189
  - (2)研究分担者  
岡田 卓 (OKADA TAKU)  
東京大学・物性研究所・助教  
研究者番号：90343938  
末田 有一郎 (SUEDA YUICHIRO)  
東京大学・物性研究所・研究機関研究員  
研究者番号：20422446  
入船 徹男 (IRIFUNE TETSUO)  
愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・教授  
研究者番号：80193704
  - (3)連携研究者
  - (4)研究協力者  
後藤弘匡 技術専門職員  
丹羽健 博士課程学生  
佐野亜沙美 学振特別研究員  
浜根大輔 学振特別研究員  
藤田尚行 修士課程学生  
片桐聖智 修士課程学生  
佐藤友子 ISSP リサーチフェロー  
飯塚理子 博士課程学生  
中村ひとみ 修士課程学生  
石橋高 嘱託研究員