

平成16年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

ふりがな		おおたに えいじ				所属研究機関・ 部局・職		東北大学・大学院理学研究科・ 教授	
研究代表者 氏名		大谷 栄治							
研究 課題 名	和文	地球核とマントル・核境界の超高压地球科学							
	英文	Ultra-high pressure earth science of the core and mantle-core boundary							
研究経費		平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	総合計		
16年度以降は内約額 金額単位：千円		29,300	26,800	14,400	6,100	6,100	82,700		
研究組織（研究代表者及び研究分担者）									
氏名		所属研究機関・部局・職		現在の専門		役割分担（研究実施計画に対する分担事項）			
大谷 栄治		東北大学・大学院理学研究 科・教授		実験岩石学		研究の統括・高压実験			
近藤 忠		東北大学・大学院理学研究 科・助教授		地球物性学		高温高压実験			
鈴木 昭夫		東北大学・大学院理学研究 科・助手		実験鉱物学		高温高压実験			
久保 友明		九州大学・大学院理学研究 院・助教授		実験鉱物学		高温高压実験・試料分析			
当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）									
<p>この研究では、地球核とマントルと核の境界部の状態、形成過程を高温高压実験に基づいて明らかにするために以下の課題についての研究を行うことを目的にしている。第一に、金属鉄・軽元素系の合金について高压下での相転移の様式を解明し、それらの状態方程式を決定し、その結果にもとづいて、地球核に含まれる軽元素の種類と量を推定すること。第二に、核マントル境界の実体を解明するために、金属鉄とペロブスカイト、玄武岩やカンラン岩などのケイ酸塩他結晶体との反応の有無を明らかにすること。第三に核の形成過程を解明するために、初期地球のマグマオーシャンの高温高压環境のもとで、金属鉄と下部マントル鉱物やマグマとの遷移金属元素や酸素や珪素などの軽元素の分配実験を行い、遷移金属と軽元素のマントル存在度が高温高压下での核とマントルの化学平衡によって説明可能か否かを明らかにすることである。これらの研究を総合して、核の構造と物性、形成と進化過程を解明する。</p>									

これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

ダイヤモンドアンビル高圧装置とマルチアンビル高圧装置を用いた実験によって、核および核マントル境界での相転移と反応、核の形成期の反応を明らかにした。これまでに行われた実験結果は以下のようにまとめることができる。

(1) 核マントル境界で相転移の可能性を検証するために、下部マントルの代表的鉱物である(Mg,Fe)O系に関してレーザー加熱法と放射光を用いた高温高圧X線その場観察実験を行った。(Mg,Fe)OやFeOは100万気圧・2000Kの条件下でもNaCl構造が安定であることを見出し、これまで報告されていたFeO端成分側で出現するNiAs相・及び金属相が、5%-20%のMg成分を含んだ組成ではNiAs相が観察されず、下部マントル条件下では岩塩構造相が安定であることを見出した。

(2) 鉄-珪素合金について室温下で、地球核内部の条件である約200万気圧までの圧縮曲線を得た。その結果、珪素が入ることによって鉄珪素合金は純鉄よりも非圧縮的に（硬く）なることが明らかになった。したがって、珪素は、内核の鉄にくらべて低い密度と比較的速い地震波速度を説明することができ核中に存在する軽元素の有力候補である（図1）。

(3) 核の軽元素の候補として有力な水素と鉄の合金について高圧力下での圧縮特性を室温下80万気圧まで調べた結果、dhcp構造の鉄水素化合物が磁気転移と考えられる圧縮曲線の異常を示すことを見出し、これまで報告されていた鉄水素化合物が純鉄よりも圧縮しやすくなるとの結果に対して、更に高圧下では逆に非圧縮的挙動を示すことを示した。その結果を用いると、地震波解析で得られた核の密度を説明する核内部の水素量は、核の軽元素がすべて水素であると仮定しても、水素量が6-20 atm%と少なく従来の推定値の1/3程度であることが明らかになった（図2）。また、鉄と水がマントル内部で反応し、FeOとFeHに分解することを明らかにした。また、FeNi合金と水素、そして水の反応を始めて明らかにした。FeNi合金の反応は純鉄の反応とは異なることを明らかにした。

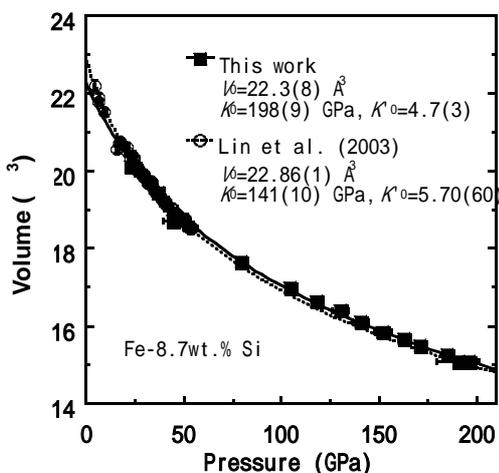


図1. Fe-8.7wt.%Si合金の圧縮曲線

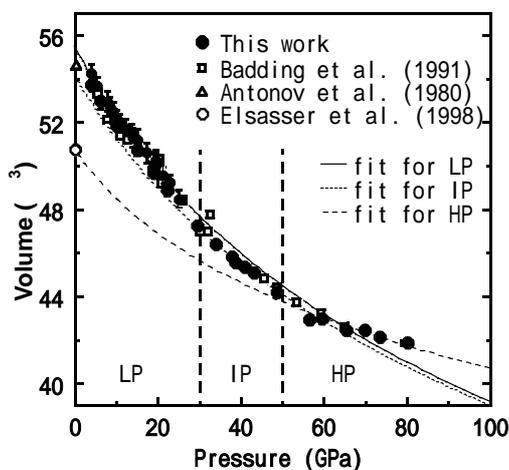


図2. FeHの圧縮曲線の異常

(4) マルチアンビルによる実験においては、圧力約30GPaのもとで約3000 Kまでの条件でMgSiO₃ペロブスカイトと金属鉄との反応を明らかにした。そして、MgSiO₃ペロブスカイトと金属鉄が反応しマグネシオプスタイトが生じ金属鉄メルト中にSiとOが溶解する反応を確認した。この反応は大きな圧力・温度依存性があり、酸素分圧一定のもとで高温で多くのSiとOを溶解する。また、圧力の増加とともにSiとOの溶解量が減少する。この結果から、断熱的な温度プロファイルに従う核の分離に伴って、鉄中へのSiとOの溶解が進むことが明らかになった。

(5) 地球の起源物質のモデルである炭素質コンドライト(Allende chondrite)について、30GPaまでの相変化を明らかにした。この隕石のFe-Ni-S系のソリダス・リキダス、ケイ酸塩の相転移と溶融関係を明らかにした。25GPaにおいても約1600 K程度で金属成分が融解する。また、ケイ酸塩成分の融点は2000 K付近であり、ペリドタイト組成よりも3~4GPaも低圧の25GPaでもMgSiO₃ペロブスカイトがリキダス相になることが明らかになった。

特記事項 (これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。)

これまでの研究において、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見などとして、特記すべき点は以下のようである。

- 1) Fe-H系の圧縮実験をこれまでの最高の圧力である80GPaまでの実験を行った。その結果、圧力50GPa以上で、体積弾性率が大きくなる圧縮特性の異常が認められた。最近の第一原理計算では、鉄水素化物FeHにおいては、50GPa以上でフェロマグネチックからノンマグネチックへの磁性転移が存在し、その結果、体積弾性率(堅さ)が大きくなることが示されている。我々の実験結果は、理論的に予想されている磁気転移とそれに伴う体積弾性率の増加という現象が、実際に実験的に確認された可能性を示している。今後、磁気的特性やメスバウア分光法などを適用して、磁気相転移の存在の可能性を検証する計画である。このような相転移が地球深部での鉄水素系で起こり得るならば、鉄水素化物は核の条件では大きな体積弾性率を持ち、これまでの予想よりも少ない水素の量で核の密度と体積弾性率を説明できる。(Hirao, et al., 2004, *Gephys. Res. Letters.*, in press)
- 2) 金属鉄と水(H₂O)の反応を84GPaまで明らかにした。その結果、10GPaを超える高圧下で、1000K以上の高温で、金属鉄と水が反応し、鉄水素化物と酸化鉄が生成することが実験的に明らかになった。この反応は、地球の集積時の初期地球内部で生じていた可能性がある。この反応によって、コアの軽元素として水素が鉄に溶解することが明らかになった。現在の下部マントルの条件でも、このような鉄水反応が起りうるということが明らかになった。(Ohtani, et al., 2004, *Phys. Chem. Min.*, 2004 submitted)
- 3) マルチアンビルを用いて約30GPa、3000K程度の条件を実現し、下部マントルの代表的な鉱物であるMgペロプスカイトと金属鉄の反応を見出した。すなわち、金属鉄中にシリコンと酸素が溶け込み、マグネシオプスタイト(MgFe)Oが生成する反応を見出した。そして、この反応の温度依存性と酸素分圧依存性を明らかにした。これまで、ダイヤモンドアンビルの実験では、反応の有無についての矛盾する報告がなされていた。今回の実験によって、鉄とMgペロプスカイトの間の明瞭な反応の存在が確認され、この反応の温度・圧力・酸素分圧依存性によって、これまで矛盾すると考えられてきたダイヤモンドアンビルセルの実験結果を解釈できることを示した。(Kawazoe and Ohtani et al., 2004, *Geohys. Res. Lett.*, 2004 submitted)

研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(発表予定のものを記入することも可能。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。)

学術誌等に発表・発表予定論文

1. Ohtani, E., Kondo, T. et al., Iron-water reaction at high pressure and temperature, and hydrogen transport into the core, *Phys. Chem. Minerals.*, submitted (2004).
2. Kawazoe, T. and Ohtani, E., Reaction between liquid iron and Mg-perovskite: Implication for core formation in deep magma ocean and light elements in the Earth's core, *Geophys. Res. Lett.*, submitted. (2004).
3. Asahara, Y., Kubo, T., and Kondo, T., Phase relations of a carbonaceous chondrite at lower mantle conditions, *Phys. Earth Planet. Inter.*, in press (2004).
4. Hirao, N., Kondo, T., Ohtani, E., et.al., Compression of iron hydride to 80 GPa and hydrogen in the Earth's inner core, *Geophys. Res. Lett.*, in press (2004).
5. Hirao, N., Ohtani, E., et al., Equation of state of iron-silicon alloys to megabar pressure, *Phys. Chem. Minerals*, in press (2004).
6. Kondo, T., Ohtani, E., et.al, Phase transitions of (Mg,Fe)O at megabar pressures, *Phys. Earth Planet. Inter.*, in press (2004).
7. Ohtani, E., Litasov, K.D., et.al., Water Transport into the Deep Mantle and Formation of a Hydrous Transition Zone, *Phys. Earth Planet. Inter.*, in press, 2004.
8. Sano, A., Ohtani, E., et.al., In situ X-ray observation of decomposition of hydrous aluminum silicate AlSiO_3OH and aluminum oxide hydroxide $\delta\text{-AlOOH}$ at high pressure and temperature. *Phys. Chem. Solids.*, in press. (2004).
9. Kubo, T., Ohtani, E., et.al., Nucleation and growth kinetics of the α - β transformation in Mg_2SiO_4 determined by *in-situ* X-ray observations, *American Mineralogist*, 89, 285-293 (2004).
10. Litasov, K. and Ohtani, E., Hydrous lower mantle: The water source for wetplumes, *8th International Kimberlite Conference long abstract* (2004).
11. Kimura M., Chen M., Yoshida T., El Goresy A. and Ohtani E., Back-transformation of high-pressure phases in a shock melt vein of an H-chondrite during atmospheric passage: Implications for the survival of high-pressure phases after decompression, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 217, 141-150 (2004).
12. 大谷栄治, 相平衡: 鉱物の相関係から推定されるその生成環境, *岩石鉱物科学*, 32, 144-146 (2003).
13. Ohtani, E., Toma, M, et.al., In situ X-ray observation of decomposition of super hydrous phase B at high pressure and temperature. *Geophys. Res. Lett.*, 30 No.2, 1029, doi:10.1029/2002GL015549 (2003).
14. Suzuki, A. and Ohtani, E. (2003): Density of peridotite melts at high pressure, *Phys. Chem. Minerals.*, 30: 449-456, doi 10.1007/s00269-003-0322-6.
15. Vanpeteghem, C.B., Ohtani, E., et al, The equation of state of NAL phase and Al content in the lower mantle, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 138, 223-230(2003).
16. Vanpeteghem, C.B., Ohtani, E., The compressibility of phase Egg AlSiO_3OH : equation of state and role of water at high pressure, *American Mineralogist*, 88, 1408-1411 (2003).
17. Litasov, K. and Ohtani, E., Hydrous solidus of CMAS-pyrolite and melting of mantle plumes at the bottom of the upper mantle. *Geophys. Res. Lett.*, 30, No.22, 2143, 10.1029/2003GL018318 (2003).
18. Litasov, K. and Ohtani, E., Hydrous lower mantle: The water source for wetplumes, *8th International Kimberlite Conference long abstract* (2003).
19. Litasov, K., Ohtani, E., et al., Water solubility in Mg-perovskites and water storage capacity in the lower mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 211: 189-203 (2003).
20. Litasov, K., and Ohtani, E., Stability of hydrous phases in CMAS-pyrolite- H_2O system up to 25 GPa. *Phys. Chem. Mineral.*, 30: 147-156 (2003).
21. Reid, J.E., Poe, B.T., Rubie, D.C., Suzuki, A., et al., The viscosity of $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ liquid at pressures up to 13 GPa., *Phys. Earth Planet. Inter.*, 139, 45-54 (2003).
22. Vanpeterghem, C.B., Ohtani, E., et al, The Compressibility of hexagonal Al-rich NAL phase: similarities and differences with calcium ferrite-type (CF) phase with implications for the lower mantle., *Phys. Earth Planet. Inter.* 138, 223-230 (2003).

国際会議、学会等における主な発表状況

(2003年6月30日 7月11日, IUGG2003 (札幌 ロイトンホテル))

- ・ Ohtani, E., Sano, et.al., Post-Garnet Transformation in wet MORB and dynamics of slabs, JS05/04A/A04-004.

(2003年9月7日-12日, Goldschmidt 2003 (くらしき作陽大学))

- ・ Hirao, N., Ohtani, E., et al., Iron-nickel alloy-water reaction under high pressure and high temperature. A149.
- ・ Ohtani, E., Kawazoe, T., et al., Reaction and separation of metal and silicate in the early Earth, and light elements in the core, A355.

(2003年9月14日-16日, International Workshop on High-pressure Mineral Physics and Geochemistry (Spring8))

- ・ Asahara, Y., Ohtani, E., Kondo, T., and Kubo, T., Phase relations of the Allende meteorite at lower mantle conditions.

(2003年12月17日-12日, AGU Fall Meeting, アメリカ, サンフランシスコ)

- ・ Ohtani, E. and Kubo, T., Phase relations and phase transformation kinetics of the subducted oceanic crust and the seismic reflectors in the lower mantle. T21A-05.
- ・ Hirao, N., Ohtani, E., et al., Equation of state of iron-silicon alloys to Megabar pressure: Implication for the Earth's Core. T11C-0399.