



国立大学法人 愛媛大学  
 地球深部ダイナミクス研究センター  
 〒790-8577 松山市文京町2-5  
 TEL : 089-927-8197 (代表)  
 FAX : 089-927-8167  
<http://www.ehime-u.ac.jp/~grc/>

目 次

- ◆ センター長挨拶
- ◆ センター構成
- ◆ NEWS & EVENTS:
  - 門林さん (D1) が高圧討論会ポスター賞受賞
  - 柿澤さん (M2) が愛媛大学長賞受賞
  - 東大地震研究所と学術協定を締結
  - ESRF と学術協定を締結
  - PRIUS 期末評価結果と再認定
  - ヒメダイヤと導電性ダイヤによる新技術
  - 第3回 PRIUS シンポジウムを開催
- ◆ ジオダイナミクスセミナー
- ◆ 海外出張報告
- ◆ ALUMNI レポート No. 9
- ◆ 最新の研究紹介
- ◆ センター機器紹介 No. 30
- 先進超高压科学研究拠点 (PRIUS)
- 地球生命研究所 サテライト (ELSI-ES)

◆ センター長あいさつ ◆



入船 徹男

年明けから佳境を迎えた博士・修士論文、卒業論文の発表会に加え、3回生や「スーパーサイエンス特

別コース」学生の発表会もようやく一段落しました。大学教員としては一年を通じて最も忙しい時期のため、1月に発行を予定している本ニュースレターもこのところ遅れがちです。特に今年は、新年のご挨拶をするのがはばかられる時期になってしまいましたが、本年も宜しく願っています。

2001年4月に学内共同教育研究施設としてスタートしたGRCも、設立以来早や15年。この間研究面で多くの実績をあげるとともに、学生はもとより多数の博士研究員や教員などスタッフの「卒業生」を送り出しています。後者の多くは国内外で常勤の研究職を得て、地球深部科学関連分野の第一線で国際的にも活躍しています。

これら卒業生の現在の様子を紹介してもらうため、3年ほど前に本NLに「ALUMNI レポート」の欄を設けました。この間20名あまりのGRC卒業生に寄稿してもらっていますが、これまでは主に最近の博士課程卒業生や、異動した研究員・教員を中心に近況報告をお願いしてきました。今後はGRC設立当時のメンバーや、学部・修士課程の卒業生にも幅をひろげ、GRCの国内外ネットワークを一層強化できればと思います。

これまでのALUMNIレポートからわかるように、この間GRCでは大学などの研究機関とともに、超高压科学に関連する企業にも少なからぬ人材を輩出しています。超硬合金の開発や超高压装置用ダイヤモンドの加工、また超高压を利用した新しいセラミックス開発などの技術開発・研究分野で活躍するとともに、これらの製品を取り扱う代理店で研究者との橋渡しとして重要な役割を果たしている卒業生もいます。日本高圧力学会主催の年会である高圧討論会では、最近企業ブースの多くをGRC卒業生が担当し、展示場がさながらGRC同窓会の様相を呈している年もあります。彼らのうち何人かは博士課程の学生、あるいは社会人として博士号を取得し、企業における開発研究で重要な役割を担っています。

最近もGRC卒業生が開発した新しい超硬合金が、高压下中性子実験や放射光実験で用いられ、研究者から高い評価を受けています。彼らが開発した新素材を用いて我々が新しい実験技術の開発と先端的研究を行い、その結果を受けてさらに高度な製品の開発と様々な工業的応用が促進される。GRC卒業生の活躍により、企業との連携による正のフィードバックが生み出され、お互いに重要なパートナーとしていい関係をつくっていると感じています。

大学に設置された研究センターであるGRCでは、

先端研究の推進とともに科学技術の発展に貢献できる人材育成も重視しています。我が国の地球科学者がその発展に大きな貢献をした大容量超高压合成装置は、GRC が中心となって開発されたナノ多結晶ダイヤモンド（ヒメダイヤ）の成功の一つの契機に、国内外の様々な分野の研究機関や企業で導入がすすめられています。GRC では、地球深部科学や超高压科学分野の先端研究と若手研究者の育成を担うとともに、このように様々な方面で重要な役割を果たせる人材の育成にも努めたいと思います。



## ◆ センターの構成 ◆

(H28. 2. 1現在)

### ❖ 超高压合成部門

入船徹男 (教授)  
 大藤弘明 (准教授)  
 大内智博 (助教)  
 西 真之 (助教)  
 Steeve Gréaux (WPI研究員)  
 Wei Du (WPI研究員)  
 國本健広 (WPI技術研究員)  
 小島洋平 (特定研究員)  
 飯塚理子 (学振特別研究員)  
 石井貴之 (学振特別研究員) (H27. 4. 1～)

### ❖ 数値計算部門

土屋卓久 (教授)  
 亀山真典 (准教授)  
 土屋 旬 (准教授)  
 出倉春彦 (助教)  
 市川浩樹 (WPI研究員)  
 白石千容 (研究補助員) (H27. 4. 1～)

### ❖ 物性測定部門

井上 徹 (教授)  
 西原 遊 (准教授)  
 木村正樹 (助教)  
 境 毅 (助教)

### ❖ 量子ビーム応用部門

桑山靖弘 (助教)  
 木村友亮 (特定研究員)

### ❖ 教育研究高度化支援室 (連携部門)

入船徹男 (室長)  
 山田 朗 (リサーチアドミニストレーター)  
 新名 亨 (ラボマネージャー)  
 目島由紀子 (技術専門職員)  
 河田重栄 (技術補佐員)  
 林 諒輔 (技術補佐員)  
 内山直美 (技術補佐員) (H27. 5. 1～)

### ❖ 客員部門

客員教授 藤野清志  
 客員教授 角谷 均 (住友電気工業 (株) アドバンスマテリアル研究所技師長/フェロー)  
 客員教授 Yanbin Wang (シカゴ大学GSECARS 主任研究員)  
 客員教授 Ian Jackson (オーストラリア 国立大学地球科学研究所教授)  
 客員教授 Baosheng Li (ストニーブルック大学 鈹物性研究施設特任教授/ 高压実験室長)  
 客員教授 鍵 裕之 (東京大学大学院理学系研究科教授)  
 客員教授 八木健彦 (東京大学大学院理学系研究科特任研究員)  
 客員教授 舟越賢一 (CROSS東海利用促進部 主任研究員)  
 客員教授 市田良夫 (宇都宮大学名誉教授/ cBN&ナノ加工研究所・所長) (H27. 4. 1～)  
 客員教授 平井寿子 (H27. 4. 1～)  
 客員准教授 丹下慶範 ((公財) 高輝度光科学研究センター利用促進部門 研究員)  
 客員准教授 西山宣正 (ドイツ電子シンクロ トロンビームラインサイエンティスト) (H27. 4. 1～)

### ❖ GRC研究員・GRC客員研究員

※GRC研究員・GRC客員研究員はPRIUS設置に伴い、委嘱を休止しています。

### ❖ 事務

研究拠点事務課 (3F)  
 佐々木昇 (課長)  
 田窪 光 (チームリーダー)  
 宮本菜津子 (事務補佐員)  
 兵頭恵理 (研究補助員)  
 八城めぐみ (事務補佐員)  
 長野絵理 (事務補佐員)  
 上田瑠美 (研究補助員) (H27. 12. 1～)



## ◆ NEWS & EVENTS ◆

### ❖ 門林さん (M1) が第 56 回高压討論会でポスター賞を受賞

2015 年 11 月 10 日 (火) ～12 日 (木) に広島市で開催された日本高圧力学会主催の第 56 回高压討論会において、門林宏和さん (理工学研究科博士後期課程 1 年) が、ポスター賞を受賞しました。門林さんのポスタータイトルは「高温高压下に



におけるメタンハイドレートの状態変化」で、GRCの大藤弘明准教授、平井寿子客員教授、および産業技術総合研究所と高輝度光科学研究センターの共同研究者らとの成果を発表したものです。

門林さんらはメタンハイドレートの高温高圧環境における結晶構造の変化や安定性および分解生成物について、放射光を利用したその場 X 線回折やラマン分光、電子顕微鏡などを用いて詳しく調べました。その結果、メタンハイドレートが 35 GPa、300 °C 以上の条件下で水(氷)とメタンに分解し、メタンはさらにダイヤモンドと水素へと分解することを初めて明らかにしました。これらの研究成果は、メタンハイドレートに代表される様々なガスハイドレートの高圧物理挙動の理解に貢献するとともに、海王星や天王星などの氷天体の内部構造の推定にも新たな制約条件を与えると期待され、審査員にも高く評価されました。

#### ❖ 柿澤さん (M2) が愛媛大学長賞受賞



2015 年 11 月 18 日(水)、学長室で「平成 27 年度秋季愛媛大学学生表彰式」が開催され、柿澤翔さん(理工学研究科博士前期課程 2 年)が学長賞を受賞しました。愛媛大学学生表彰は、学術研究活動や課外活動等において、特に優秀な成績や功績を残したと認められる学生及び団体が表彰されるもので、今季は、柿澤さんの他に Abdul Kadir Muhammad さん(大学院理工学研究科博士後期課程

修了)、宇都宮結有さん(書道部・教育学部 3 年)の 3 名に学長賞が授与されました。

柿澤翔さんは、GRC の井上徹教授の指導のもと、本人が第一著者である論文が国際誌に掲載されるとともに、日本高圧力学会から「学生海外発表奨励金」、ヨーロッパ鉱物科学会(EMU)の優秀ポスター発表賞受賞、また「SPring-8 萌芽的研究支援課題」に採択されるなど、その顕著な活躍により今回の受賞となりました。

#### ❖ 東京大学地震研究所と学術協定を締結

GRC を中核とした新学術領域研究「核—マントルの相互作用と共進化」(領域代表:土屋卓久 GRC 教授)の発足を契機とし、同領域において重要な役割を果たしている東京大学地震研究所(以下地震研)との共同研究や人材交流を促進するため、平成 27 年 12 月に GRC と地震研との間で学術交流協定が締結されました。

本学術交流協定の発効により、超高压実験や第一原理計算を主要な手段とした GRC と、地震学や素粒子物理学を重要な手段として用いている地震研グループとの間の、先端的地球深部科学研究における連携が一層強まることが期待されます。本協定の締結を記念して、また新学術領域研究のアウトリーチ活動の一環として、平成 28 年 4 月 29 日に地震研所長の小原一成氏や同教授の田中宏幸氏、土屋 GRC 教授による一般公開講演会の開催が愛媛大学で予定されています。

#### ❖ ESRF と学術協定を締結

GRC とヨーロッパ放射光実験施設(ESRF)は、両者の研究者の交流と共同研究、とりわけ GRC で開発されたヒメダイヤを利用した先端研究の推進のため、平成 27 年 12 月に学術交流協定を締結しました。

ESRF は日本の SPing-8・米国の APS と並び、世界 3 大放射光実験施設の 1 つです。入船 GRC センター長と、ESRF の X 線吸収実験関連ビームライン責任者である Sakura Pascarelli 博士は、国際高圧力学会(AIRAPT)会長と秘書として同学会の運営にあたってきましたが、PRIUS が設立された平成 25 年度頃よりヒメダイヤを利用した高圧下 X 線吸収実験に関する共同研究を進めてきました。両者の協力関係を強化するため、平成 26 年に ESRF でのシンポジウムに招待された入船センター長と Pascarelli 博士との間で協定締結の検討が開始され、このたび両者の合意に至ったものです。ESRF グループからは PRIUS において 10 件以上の課題申請がなされており、本協定の締結により両者の共同研究と人材交流の一層の促進が期待されます。

#### ❖ PRIUS 期末評価結果と再認定

平成 25 年度に愛媛大学初の共同利用・共同研究

拠点として発足した PRIUS は、発足以来の活動が高く評価され、平成 28 年度からの国立大学法人第三期においても、引き続き超高压科学分野における拠点として文部科学省から認定を受けました。

認定当初は 40~50 件程度の共同利用・共同研究を想定していましたが、PRIUS が本格的な活動を開始して以来毎年 100 件あまりの課題を採択しており、その数は年々増えています。GRC の本務である地球科学分野以外の課題が約半数、また海外との共同研究も 4 割近くを占め、GRC の高度な実験装置・技術や数値シミュレーションなどを用いた国際的な共同研究活動が推進されています。GRC では PRIUS の運営とともにヒメダイヤを用いたプロジェクト研究、理工連携による超高压材料科学分野の大学機能強化のためのプロジェクト、また新学術領域研究を中心とした先端地球深部科学研究推進などを、当面の重点的課題として取り組む予定です。

#### ❖ ヒメダイヤと導電性ダイヤによる新技術



GRC が開発したナノ多結晶ダイヤモンド（ヒメダイヤ）と、物質材料研究機構が開発した超伝導ダイヤモンドを組み合わせることで、超高压下で容易に物質の電気伝導度の測定が可能なダイヤモンドアンビル装置（DAC）が開発されました。

超高压下での電気伝導度測定には、従来は単結晶ダイヤモンドに白金などの金属箔を電極に用いた DAC が用いられていましたが、この手法では金属箔の変形により電極が切れたりショートすることが多く熟練が必要でした。物質材料研究機構の高野義彦グループリーダーらは、GRC の入船センター長らとの共同研究で、ボロンをドーピングした超伝導ダイヤモンドを電極に使い、硬くて割れにくいヒメダイヤと組み合わせることにより、手軽に繰り返し使用が可能な装置を開発しました。この装置は今後超伝導物質の探査などに活用される予定です。

本研究は GRC が運用する共同利用・共同研究拠点 PRIUS における共同研究の一つの成果であり、平成 27 年度 PRIUS シンポジウムで発表されるとともに共同プレス発表も行われ、テレビ・新聞等で多くの報道がなされました。

#### ❖ 第 3 回 PRIUS シンポジウムを開催

GRC が運用する共同利用・共同研究拠点「先進

超高压科学研究拠点（PRIUS）」は、平成 25 年度に文部科学省から認定を受け、我が国の超高压科学分野における拠点としての活動をすすめています。この間、毎年全国の関連分野の研究者が集まり成果報告会を開催しており、今年も、2 月 23 日~24 日の 2 日間にわたり愛媛大学でシンポジウムが開催され、全国から約 60 名の研究者らにより最新の研究成果が発表されました。

シンポジウムでは地球深部科学にとどまらず、超高压実験分野を中心に、物性物理、化学、材料科学、生命科学など多様な分野の研究者による 16 件の口頭発表と 25 件のポスター発表が行われ、活発な議論が交わされました。また期間中に愛媛大学セ・トリアンでの懇親会や、GRC 及び学内他部局の教員やコミュニティーの代表者を委員とした拠点運営協議会（議長：井上徹 GRC 教授）が開催されました。共同利用・共同研究についての詳細は GRC ホームページをご参照下さい。

(<http://www.grc.ehime-u.ac.jp/prius>)

#### 第 3 回 PRIUS シンポジウム

日程：2016 年 2 月 23 日（火）13:00~24 日（水）

場所：愛媛大学総合研究棟 I 4F 共通会議室

（ポスター会場：セ・トリアンラウンジ）



#### ◆ ジオダイナミクスセミナー ◆

#### ❖ 今後の予定（詳細はHPをご参照下さい）

2 月

2/26 “Experimental investigation of methane hydrates dissociation under high pressure and temperature”  
Hirokazu Kadobayashi (Ph. D. student, Ehime University)

4 月

4/15 “Equation of state at multi-megabar pressure II”  
Dr. Takeshi Sakai (Assistant Professor, GRC)

4/22 “Density measurements of iron alloys at

high pressure and high temperature”  
Dr. Yasuhiro Kuwayama (Assistant  
Professor, GRC)

5月

5/6 “Phase relations of lunar crust to the Core-  
Mantle boundary: a clue to the location  
of the Earth’s Hadean crust ?”

Dr. Steeve Greaux (Postdoctoral  
Researcher, ELSI-ES, GRC)

#### ❖ 過去の講演

第431回 “Numerical simulations of thermochemical  
mantle convection with drifting  
supercontinent in two-dimensional  
cylindrical geometry”  
Akari Harada (MSc. student, Ehime  
University)

“Migration enthalpy and lattice diffusion  
in B2-type MgO”

Takafumi Harada (MSc. student, Ehime  
University) 2015. 12. 04

第432回 “The fate of sulfate mineral during  
subduction to the deep mantle”

Taku Fujii (Ph.D. student, Ehime  
University) 2015. 12. 11

第433回 “Mineralogical and crystallographical  
study on the microtexture and genesis of  
polycrystalline diamond, Carbonado”

Natsuko Asano (MSc. student, Ehime  
University) 2016. 01. 08

第434回 (Advanced Science Seminar)

“Elastic properties of hydrous bridgmanite”

Dr. Toru Inoue (Professor, GRC)

2016. 01. 22

第435回 (Advanced Science Seminar)

“First principles investigation of  
hydrous phases in earth’s deep interior”

Dr. Jun Tsuchiya (Associate Professor,  
GRC) 201. 01. 29

第436回 “Technical developments in high  
temperature generation with sintered  
diamond anvils”

Takeshi Arimoto (Ph.D. student, Ehime  
University)

“Melting relations in the MgO-MgSiO<sub>3</sub>  
system under the lower mantle  
conditions using a CO<sub>2</sub> laser heated

diamond anvil cell”

Satoka Ohnishi (Ph.D. student, Ehime  
University) 2016. 02. 05

第437回 “Some thermodynamic properties of  
larnite( $\beta$ -Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) constrained by high  
T-P experiment and or theoretical  
simulation”

Dr. Xiong Zhihua (Postdoctoral Fellow,  
GRC)

“Interior structure of Uranus and  
Neptune inferred from the melting  
curve of NH<sub>3</sub>”

Dr. Tomoaki Kimura (Postdoctoral  
Fellow, GRC) 2016. 2. 19

#### ➡ 海外出張報告 ◀

#### ❖ AGU 参加報告

アメリカ地球物理学連合 (AGU) の秋の学会がサンフランシスコのモスコーンセンターで 2015 年 12 月 14 日から 18 日まで開催され、GRC から学生 2 名を含む数名が参加しました。非常に大規模な学会であり、今回は約 24000 人参加し、セッション数は 1700 以上、5 日間で合計 23000 件以上の口頭・ポスター発表が行われました。私は Physics and Chemistry of Earth’s Deep Mantle and Core というセッションで高温高圧下における MgO-MgSiO<sub>3</sub> 系の熔融関係に関するポスター発表を行いました。MgO (ペリクレス) と MgSiO<sub>3</sub> (ブリッジマナイト) は下部マントルの主要鉱物ですが、これまで下部マントル最上部の圧力までしか熔融挙動は解明されていません。そこで私は高圧発生装置ダイヤモンドアンビルセルを用いて、MgO-MgSiO<sub>3</sub> 系のような透明体を直接加熱できる CO<sub>2</sub> レーザーで加熱することにより 60 GPa までの熔融実験を行い、最下部マントルにおいて MgO に富んだメルトが形成される可能性を報告しました。



地震波の研究からマントル最下部では部分熔融が生じていると考えられているため、本研究の結果は最下部マントルの構造を理解する上で非常に重要となります。発表では多くの研究者と議論することができ、貴重な意見も頂くことができました。他の研究も非常に興味深いものが多く、特に高压下での熔融実験を他組成で行っている研究が数件報告されており、結果だけでなく研究手法等に関しても得るものが多くありました。

学会の合間にサンフランシスコ市内を観光しました。この時期は雨季だと聞いていましたが、最終日以外天候に恵まれ、気温もそれほど低くなく過ごしやすい季節でした。サンフランシスコは坂の多い街として有名で、私の宿泊したホテルは坂の頂上に位置していたため非常に眺めが良かったのですが、会場からホテルまでの帰り道は苦行でした。街中をケーブルカーが走っているため交通の便が悪いわけではなかったのですが、サンフランシスコは非常に物価が高く、少しでも節約するために毎日汗だくで歩いて戻りました。市内北部のフィッシャーマンズワーフは観光地として非常に有名なエリアで、他大学の学生さんたちとクラムチャウダーを食べ、過去に刑務所として使用されていたアラカトラズ島のツアーにも参加しました。

私はこのAGUが初めての国際学会でした。普段参加している国内の学会はGRCの学生と行動することが多くなってしまおうのですが、本学会では他大学の方と接する機会が多く、研究分野が似ている学生と意見を交換しあうこともでき、非常に良い刺激となりました。また、英語での発表は自分の意見がなかなか伝わらなかったこともあり、自身の英語力の低さをあらためて痛感いたしました。今後、実験など研究だけでなく語学についても日々努力していきたいと思っております。(大西里佳 D2)

#### ❖ 日露共同研究シンポジウム参加報告

10月19日から26日にかけて、モスクワ大学地質学部で行われたシンポジウム「High-Pressure Mineralogy: Theory and Experiment」に参加しました。このシンポは前号のニュースレターでも紹介された日露国際共同研究事業のキックオフを兼ねており、ロシアを中心とした科学者と、日本からはGRCから4名、東大から2名が参加しました。私にとっては初めての海外訪問ということもあり、到着するまでは現地の治安や気候などとても心配していましたが、一昨年GRCに滞在していたKatyaさんの迎えもあり、また気候も(気温は真冬の松山と同じくらいでしたが)風がないぶん過ごしやすく感じました。街並みは重厚なレンガ造りや石造りの建物が目立ちましたが、モスクワ大地質学部の建物はまるでお城のようで夜間はライトアップもされるなど、旧ソ連時代の発展を強く印象づけるものでした。また敷地内へ入構の際には逐次身分証明書の提示を求められるなど、日本では考え

られないような厳戒な雰囲気でした。一旦内部に入ってしまうと食堂や売店などは充実していて、特に困るといったことはありませんでした。構内には学生の寮やゲストハウスもあり、物価の高いモスクワでは学生は無料で入居することができます。シンポジウムでは地球深部物質学や結晶学について様々な発表が行われました。私は3年生から継続して研究している多結晶ダイヤモンド、カーボナードについて、微細観察からその起源や生成プロセスについて考察し発表しました。カーボナードは黒色不定形の多孔質ダイヤモンドで、その特異な性質から宇宙空間生成説・隕石衝突説・マントル内生成説など様々な起源が議論されてきました。私は特に、カーボナードの微細組織や結晶方位分布、内部包有物について注目し、GRCの電子顕微鏡群を用いて多面的に観察を行ってきました。その結果、カーボナードの斑状組織が高過飽和流体中で形成された非平衡成長組織であることを明らかにし、また初めて結晶粒内に一次包有物(オンファス輝石)を見つけ、その生成に海洋地殻物質(エクログジャイト)が密接に関与している可能性を見出しました。発表後には参加者の皆さんから地球深部における当該環境の実在性や今後確かめるべき課題などについて様々な視点から指摘をいただくことができ、私にとって有意義な発表になりました。

シンポジウムの他にも18世紀に設立された世界最大級の鉱物博物館「A. E. フェルスマン鉱物博物館」の見学や、モスクワ郊外のチェルノゴロフカの実験施設の見学なども楽しみました。博物館ではロシア内外の様々な鉱物資料が所狭しと並べられており、巨大なパラサイト隕石も多数展示してあるなど、日本とは桁違いのスケールの大きさを感じました。一方、隅の方には愛媛県西条市・旧市ノ川鉱山の輝安鉱も収蔵してあり、見つけた時には遠い異国で友達に会ったかのような(?)妙な安堵感を覚えました。最終日にはNadyaさんとDahliaさんという2人のロシア人女性に赤の広場などモスクワ市内の観光名所を案内してもらいました。(特にDahliaさんはモスクワについてまるで「歩く博物館」のように詳しく、説明も引き込



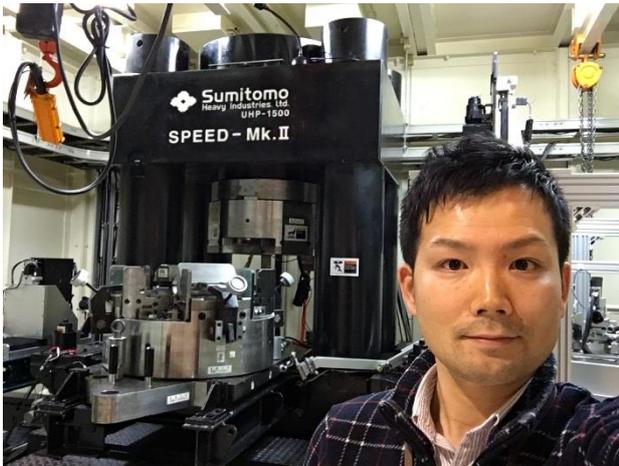
まれるようでした。)

濃密な日程でかつ日本とはかけ離れた環境であるモスクワ滞在はとてもヘビーでしたが、非常に刺激的な経験をする事ができました。また Katya さんをはじめ現地学生の英語力の高さと知見の広さを見せつけられ、自分はまだまだ頑張らなければと痛感しました。(浅野奈津子 M1)



## ➡ ALUMNI レポート⑨ ➡

### ❖ (公財) 高輝度光科学研究センター 利用促進部門 研究員 丹下慶範



2014年7月にGRCを離れ、早1年半が過ぎました。現在私は、1年程前にALUMNIレポートを執筆された肥後祐司さんと同じく、公益財団法人 高輝度光科学研究センターに所属し、大型放射光施設 SPring-8 で、マルチアンビルが設置された高温高压ビームラインBL04B1の担当者として働いています。

私がGRCにお世話になったのは、2005年の4月からでした。東京工業大学の高橋研究室で博士後期課程を修了した後、現在と同じくSPring-8に常駐してBL04B1でマルチアンビル装置の維持管理やユーザー支援を行う特定領域研究の研究員として採用されたのがきっかけです。2005年4月から2009年3月までの4年間、ほとんどをSPring-8で過ごしたのですが、GRC超高压実験グループのポスドク研究員として過ごさせていただきました。ちょうどその時期GRCには、同年代のポスドクとして前述の肥後さんや現在シカゴのAdvanced Photon Source (APS)で高压ビームラインの担当をされている河野義生さんらが在籍しており、切磋琢磨しながら楽しく研究に打ち込み、また一緒に遊び回ったのが懐かしく思い出されます。

2009年の1月からは松山に居を移し、その4月から一昨年現職に異動するまでの5年余りは助教へと立場を変え、引き続きGRCの一員として過ごさせていただきました。この間はGRCがグローバルCOEプログラムに採択されるなど、急速にとて

も大きな変貌をとげた時期でした。現在所属されている学生さんたちには想像もつかないかもしれませんが、教員、ポスドクの数が現在の1/3程度から一気に増え、センター内の環境は爆発的に変化しました。SPring-8から松山に赴任した際には、もともとGRCの一員であったにもかかわらず、その変化の大きさに浦島太郎のような気持ちになったのを憶えています。また一方で私が東京工業大学で学生だった頃、大学院生やポスドク研究員として一緒に教科書の輪読ゼミなどを行った土屋卓久教授や西原准教授、桑山助教らとは再び同僚になれ、同窓会のような懐かしい気分を感じつつ再び一緒に研究をする機会を持つこともできました。

さて、GRCで仕事をさせてもらうきっかけにもなり、私が博士課程より関わっているものに、焼結ダイヤモンドアンビルとマルチアンビル装置を用いた高温高压実験があります。本ニュースレターで話題に上ることもあるGRCのお家芸のひとつなので、馴染みのある方も多いと思いますが、地下660 kmから2900 kmまで広がる、地球下部マントルの実験的再現を大きなモチベーションとして開発が進められてきた実験技術です。

私が初めて焼結ダイヤモンドアンビルに触れたのは、2001年頃でした。当時私は東京大学物性研究所の八木研究室で修士の学生だったのですが、そこで、これまた後にGRCで再会することになる、現在ドイツ電子シンクロトロンで大型プレスビームラインを建設されている西山宣正さんのお手伝いとして実験させてもらったのが、初めての経験でした。当時はまだアンビルの大きさが小さく荷重限界が低かったこともあり、30-40 GPa程度が発生圧力の限界でした。その後東工大での博士課程、GRCでのポスドク時代における技術開発により80 GPaまでの発生を実現できたわけですが、最近では岡山大学の山崎大輔さんが110 GPaを超える圧力発生までをも可能されています。

現在GRCでは学生さんをふくめ、ごく当たり前のように50 GPaを超える高压下での実験が行えるようになっており、10年前に私がさんざん苦労したのが嘘のように、次々に実験データを積み上げて行くみなさんの姿を、頼もしく拝見しています。先々号のニュースレターで山崎さんも書かれていたとおり、ブリッジマナイトのポストペロプスカイト相転移まで、あともう少しです。GRCの学生さんが真っ先にポストペロプスカイト相を合成し(もちろんSPring-8で!)、現在の記録保持者でGRCの先輩でもある山崎さんをぎゃふんと言わせる日が来るのを、楽しみにしています。

### ❖ Bayerisches Geoinstitut (BGI), University of Bayreuth Postdoctoral Fellow, Zhaodong Liu

Time has gone about half a year since I got my Ph.D degree at Geodynamic Research Center



at September, 2015. I am still missing the great time for my study and life at Matsuyama, and I believe it is one of the best time during my life. Three years' study under supervisor Professor Tetsuo Irifune has enabled me to enter the research field: experimental petrology and mineral physics. I studied the symmetry and phase transition in the system pyrope-majorite, and sound velocity of garnet, and phase relations in the system  $MgSiO_3-Al_2O_3$  to 50 GPa and 2000 K using sintered diamond techniques. I learned a lot on geophysics through the group meetings and many nice collaboration with the scientists at GRC. I also enlarged my insight into geophysics through some participation in AGU, JpGU and other meetings. Now I am interested in phase equilibrium in the lower mantle, high pressure generation techniques, and high pressure synthesis of high quality minerals.

After obtaining my Ph.D degree and with recommendation from Professor Tetsuo Irifune, I got this opportunity to pursue my research at Bayerisches Geoinstitut (BGI), University of Bayreuth, Germany as a Postdoctoral Fellowship at December, 2015. Based on my Ph.D study on phase relations using very high pressure techniques, I will continue to investigate the phase relations in the lower mantle, and the chemical and physical properties of bridgmanite using tungsten carbide and sintered diamond anvils in the multi-anvils apparatus through collaboration with Professor Tomoo Katsura. The investigation of phase relations in the lower mantle will help us further understand the chemical compositions, structure and dynamics of the Earth's lower mantle.

At last, I want to thank all the GRC people who contributed and helped me in my research project for three years. GRC provides a nice,

collaborative, scientific and international environment, I have really enjoyed studying and working here. I hope I can get more chances to collaborate with the scientists at GRC in near future. どうもありがとうございます。



## 最新の研究紹介

### ❖ 小さい地球型惑星・衛星のマンテル中の熱対流: 3次元球殻形状と粘性の温度依存性の影響

最近の筆者は太陽系外巨大地球型惑星 (スーパー地球) のマンテル対流 (ニュースレター第 37 号参照) といった、「スケールはでかい」一方で「足が地(球)についていない」研究にばかり現を抜かしている。本稿で紹介させていただくのもその一端であるのだが、今回は太陽系の中の惑星・衛星を意図したものであり、「足が地(球)につく」どころか、地球と比べて「スケールまで小さくなった」話であることを、どうかご容赦いただきたい。太陽系内の岩石質の惑星や衛星の中には、その平均密度が岩石と同程度のもの (月、火星) もあれば、岩石と鉄のほぼ中間あたりのもの (地球、水星、金星) もある。こうした平均密度の違いは、その天体の中に含まれる金属鉄の量の違い、言い換えればその天体の核の大きさの違いに起因している。例えば水星は大きな核を持っているのに対し、月の核は極めて小さい。天体の中を占める核の割合が変わればマンテルの占める割合も変わるが、それに応じて「球殻」としてのマンテルの 3次元的な形状も変化する。特に本研究では小さい地球型惑星に注目し、3次元球殻の形状がマンテル内の熱対流の様式にどのような影響があるかを検討した。

モデルとして、内径と外径の比が  $f$  である 3次元球殻領域の中での熱対流を考える。流体層の上面と下面での温度は一定とし、流体の粘性率は温度に指数関数的に依存するものとした。簡単のため、粘性率を除いた流体の物性は一定とし、かつ流体の圧縮性の効果や内部発熱は無視している。

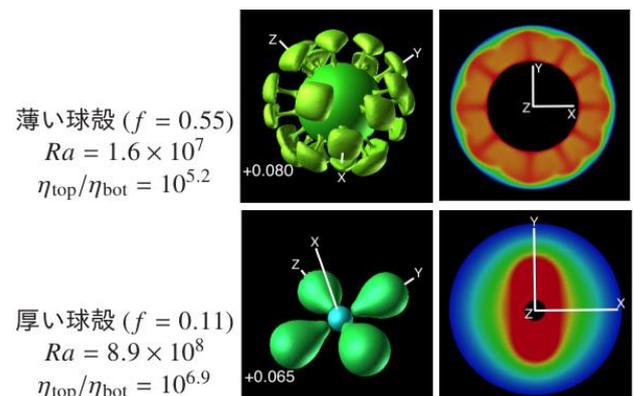


図 1: 対流のパターンの比較。原図: 柳澤孝寿氏提供。

本研究では、粘性率の温度依存性が強い条件下で  $f$  を変化させた場合に、3次元球殻領域の中で起こる熱対流のパターンがどう変化するかを調べる。図に、筆者が開発した3次元球殻領域内のマントル対流シミュレーションプログラムを用いて得られた熱対流パターンの例を示す。両者ともいわゆる“stagnant-lid”型に分類される様式の対流であるが、その特徴は  $f$  の値によって大きく異なっている。具体的には、 $f=0.55$  の場合（地球のマントルに相当）では上面・下面の双方に熱境界層が観察されるが、 $f=0.11$  の厚い球殻の場合には上面に熱境界層と呼ぶべき構造が発達していない。この原因は、 $f$  が余りに小さいと、上面の面積が下面のそれと比べて大きくなり過ぎることにより、上面での熱流量を下げようとして、そこでの温度勾配が小さく抑えられてしまっている。これに加えて線形解析という理論的な手法により、さまざまな  $f$  の値における臨界レイリー数（熱対流が起こり始めるレイリー数）を求めたところ、 $f$  が 1（平板に相当）から 0.11 に低下すると、粘性率の温度依存性が強い条件下での臨界レイリー数は約 2 桁増加することが分かった。ここで求めた臨界レイリー数と、月、水星、火星のマントルで想定されるレイリー数  $Ra$  の値とを比較すると、火星のマントル内では対流が（ぎりぎり）起こってもよいが、月と水星のマントルでは対流が起こりそうにないことになる。言い換えれば、月や水星のマントル内で対流が起こるためには、マントルの粘性率が十分低い（ $10^{20}$  Pa s 以下）か、あるいは内部に十分な熱源のあることが必要なのであろう。

なおこの研究は、海洋研究開発機構の柳澤孝寿氏、及び東京大学の小河正基氏と共同のもと実施しているものである。記して感謝する。（亀山真典）

#### ❖ 新開発超硬アンビルを用いた川井式マルチアンビル装置による超高压発生

地球内部の物質科学的研究に用いられる高压装置、特にマントルやそれよりも深い領域の圧力条件を再現可能な装置として、川井式マルチアンビル装置(KMA)とダイヤモンドアンビル装置(DAC)の2種類がよく知られています。地球内部は高温高压条件から成り、中心部の温度圧力はおよそ $\sim 5000^{\circ}\text{C}$ 、 $\sim 360$  GPaに至ると推測されており、この条件は近年DACを用いた実験で達成されました。これに対してKMAを用いて到達可能な地球内部条件は、最大でも下部マントル中域程度に限られ、これは主としてアンビル材の強度に制約されています。

KMAのアンビル材は炭化タングステン(WC)と焼結ダイヤモンド(SD)の2種類が用いられます。圧力領域はWCを用いた場合で約30 GPa、SDを用いた場合でも約100 GPa程度発生可能ですが、SDアンビルを用いた実験は一般的ではありません。これはSDアンビルを用いた実験の技術的な困難さ

と高いコストに依るものです。

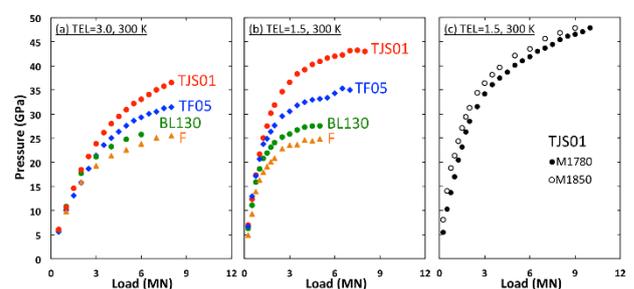
DACと比較した場合のKMAの優位性は、大きな試料容積を確保できる点と、数 $^{\circ}\text{C}$ 程度の温度誤差で高温を制御できる点です。特に大きな試料を確保できることは、相平衡実験、固体や融体の電気抵抗測定、粘性率測定、融点の決定、弾性波速度測定など非常に多様な実験手法の実現をもたらします。これらのことから言えるのは、KMAは地球内部科学には不可欠な装置であり、またKMAによる圧力領域の拡大が急務であるということです。

WCは一般的にバインダーを含み、これが強度を成約する一因でもあります。しかし最近、バインダーをほとんど含まず且つ超細粒な組織からなる、高い硬度(HRA95.1、TRS1470 MPa、ヤング率660 GPa)を持つWC“TJS01”が開発されました。そこで我々はこの新開発WCを用いた高压発生試験と性能評価に取り組んできました。

実験は大型放射光施設SPring-8のBL04B1に設置されているKMA(SPEED-Mk. II)を用いて行いました。WCの性能比較試験は、規格化された試料部構成を用いアンビル材のみ変更して実施しました。アンビル先端のサイズ(TEL)は1.5 mmおよび3.0 mmを採用しました。TJS01(Fuji Die Co. Ltd.)との比較対象となるWCとしてTF05(Fuji Die Co. Ltd.)、BL130(Sumitomo Electric Industries)、F(Tungaloy)を選びました。発生圧力は試料部中心に配置された金の格子体積を決定し、状態方程式(Tsuchiya, 2003)を用いて決定しました。比較試験のうち、TEL1.5を用いて行った試験から回収されたアンビルは加圧部を測定実体顕微鏡で測定し、各WCの塑性変形の度合いを調べました。

図(a-c)にTEL3.0およびTEL1.5を用いた場合の比較試験の結果(a, b)と、その結果を鑑みて試料部構成を調整して実施した圧力発生試験の結果(c)をまとめました。比較試験の結果、従来のWCを用いた場合の圧力発生効率は概ね予想通りでしたが、TJS01を用いた場合はTEL3.0で36.6 GPa、TEL1.5で43.0 GPaまでの圧力発生に成功しました。圧力発生試験ではWCアンビルでありながら最大約50 GPaに至る圧力発生に成功。これまでWCアンビルを用いたKMAによる実験領域がおよそ30 GPaに限られていましたが、我々の実験によってこれを飛躍的に拡大することが出来たと言えます(詳細はkunimoto et al., High Press. Res, in press)。

WCアンビルを用いることの利点のひとつに、アン



ビル自体の大型化が可能であるという点が挙げられます。多彩な実験手法を実現可能なKMAですが、高圧に向かうほど試料容積は限られ、実施可能な実験の選択肢も限られます。アンビルの大型化は供給荷重の最大値を高く設定できるため、今回我々が行ったような圧力発生のみならず、従来発生可能であった圧力であっても、より大きな試料容積を確保した上で実験を行うことが出来るようになります。従って、本研究が示すTJS01の有用性のひとつとして、KMAの特徴である多彩な実験手法を損なうこと無く高い圧力発生が可能であるということが言えます。(國本健広)

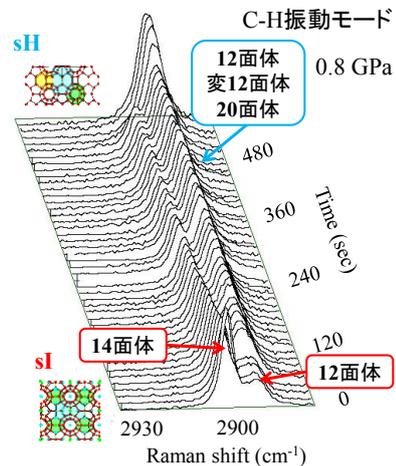
#### ❖ 時分割 X 線回折・ラマン分光観察を用いたメタンハイドレートの相転移メカニズムの解明

ガスハイドレートの代表的物質であるメタンハイドレートは、地球上では「燃える氷」と呼ばれ次世代のエネルギー資源として注目されています。また、太陽系の氷惑星・衛星や最近相次いで発見されている系外惑星の重要な構成成分と考えられており、物質科学だけでなく惑星科学においても重要な物質です。現在までに、メタンハイドレートには3つの相が報告されています。一般によく知られるメタンハイドレートは、立方晶相のsI相であり、このsI相は室温・約0.8 GPaで六方晶相のsH相へ、約1.8 GPaで斜方晶相のfilled ice Ih相という高圧相に相転移します。低圧の2つの相は水分子(宿主)が水素結合でケージ(籠)を形成し、その中にメタン分子(ゲスト)が内包されるケージ構造をとります。一方で、filled ice Ih相は氷Ihに類似した氷のフレームワークにメタン分子が充填された充填氷構造をとります。

このように従来、ガスハイドレートの高圧研究は新しい構造の発見とその構造決定に重点が置かれてきました。しかしながら、その相転移メカニズムに関しては、宿主とゲストを巻き込んだ複雑なメカニズムが予想されながらも、実験・観察の難しさもあり未解決の問題でした。メタンハイドレートの相転移メカニズムを明らかにするためには、相転移時の水分子が構成するホストフレームワークの変化と内包されるゲストメタン分子の変化との両者を観察し、これらの挙動を統合的に検討する必要があります。そこで、我々の研究グループは時分割X線回折と時分割ラマン分光を用いたその場観察を組み合わせることにより、メタンハイドレートの相転移メカニズムの解明に取り組みました。

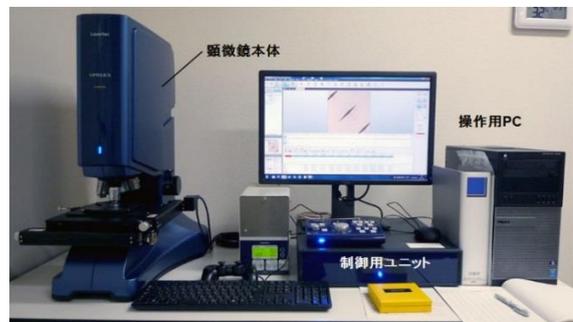
まず、ケージ構造からケージ構造への相転移であるsI-sH相転移において、時分割ラマン分光よりsI相の12面体は相転移中持続し、sH相の構造母体になることが示唆されました。一方で、sI相の14面体はsH相の変形12面体と20面体へ組み換えられていくことが示されました。これらの結果より、sI-sH相転移は「ケージ組み換えメカニズム」と

いうガスハイドレート特有のメカニズムにより転移が進行すると考えられます。一方で、ケージ構造から充填氷構造への相転移であるsH-filled ice Ih相転移では、相転移圧力においてsH相が突然消滅し、同時に固体メタンが放出され、filled ice Ih相のフレームワークが形成されることが時分割X線回折によって示されました。そして時間経過とともに放出された固体メタンを徐々に吸収しながらfilled ice Ih構造を完成させてゆくことが分かりました。つまり、sH-filled ice Ih相転移は再構築メカニズムにより進行するという事です。本研究で用いたX線回折とラマン分光の時分割測定を組み合わせた観察手法は、ガスハイドレートの相転移メカニズムの解明を行う上で強力なツールであり、今回の観察によってこれまで未知のままであったsI-sH相転移、sH-filled ice Ih相転移メカニズムの全容解明に初めて成功しました。これらの研究成果は、2015年1月にJ. Chem. Phys. に公表 (Hirai et al., 2015) されています。(門林宏和 D1)



#### ➡ センター機器紹介 No. 30 ➡

#### ❖ 共焦点レーザー顕微鏡



昨年12月に納入された共焦点レーザー顕微鏡(レーザーテック製ハイブリッドレーザーマイクロスコープ OPTELICS® HYBRID)は、レーザーを試料上に集光し表面を走査(スキャン)することにより、微小領域における試料の表面状態や3D

形状を正確に計測することのできる顕微鏡です。光源として青紫色レーザー（ $\lambda = 405 \text{ nm}$ ）に加えて、高輝度キセノンランプ（白色光）も備えており、ターゲットや観察目的に応じて最適な光源を選択できるという点は、他社製装置にはない特徴です。単色性の高いレーザー光源は主に高倍率下における高分解能観察や高精度 3D 測定に使用し、白色光源は広視野観察やバンドパスフィルターを用いた波長（6 波長）切り替え観察や光干渉を利用した形状測定を行う際に有効です。

顕微鏡本体と制御用ユニット+コントローラー、操作用 PC より構成され、顕微鏡本体には  $\times 5$ 、 $\times 10$ 、 $\times 20$ 、 $\times 50$ 、 $\times 100$  の 5 種類の対物レンズを備えています。駆動系は X-Y ステージを含め

全て電動制御で、操作用 PC 上で視野探しから観察、計測、データ解析まで半自動的に行うことができ、初心者でも比較的簡単に画像・計測データを取得することが可能です。

本装置は超高圧実験による新物質創成を目指し GRC と本理学部・工学部との連携事業において措置された設備で、硬度測定（ビッカース/スnoop 圧痕の計測や破壊試験後の試料表面観察など、高压合成試料の物性評価を行うことを主な目的としています。また、超高圧実験に用いる超硬アンビルのわずかな変形（歪みや亀裂）を定量的に評価する際にも有用で、その他様々な用途への応用の可能性が期待されます。（大藤弘明）



## 共同利用・共同研究拠点 (PRIUS)

### ❖ PRIUS 利用者の声



私は原始惑星のマグマオーシャン中で分化する金属核とマントル間の揮発性元素分配を調べることで惑星の大気海洋の起源を探る研究を行っております。普段は東京大学物性研究所で実験していますが PRIUS 共同利用では入舩先生、新名先生のご支援のもと、物性研では達成困難な温度圧力領域での実験をさせていただいております。

もともとは微惑星の衝突現象の理解から惑星の大気海洋形成過程を探る研究をしておりましたが、大気海洋の起源を探るにはマントルや核も含めた揮発性元素の分配収支を考えなければいけないという当たり前のことに気づき、一昨年から現在行っているような地球深部に関する高压実験を始めました。実験技術や地球深部に関する知識でまだまだ知らないことも多いのですが、GRC 滞在のたびに教員や研究員の方と気軽に議論させていただき、楽しく研究活動ができております。現在、かなり時間がかかってしまいましたが GRC で行ってきた実験結果を論文としてまとめているところです。これからも高压実験を通して惑星の大気海

洋形成過程を探るというテーマに取り組んでいく予定でおりますので今後ともどうぞ宜しくお願い致します。（東京大学大学院 D3 桑原秀治）

### ❖ PRIUS 利用者の声

Understanding the relation between hardness, yield strength, and plastic deformation of superhard materials is crucial in high-pressure generation as well as in a wide range of industrial applications. Diamond, the hardest known material to date, has been extremely difficult to deform. Previous studies on diamond single crystals were conducted at 1 atmosphere at high temperatures, using a three-point bending technique in a controlled atmosphere to prevent diamond from turning to graphite. The strength data thus obtained are semi-quantitative at best. For polycrystalline diamond (PCD), no accurate strength data are available either. The difficulty is well-known, for what can deform the hardest material without being deformed first?



The development of nano-polycrystalline diamond (NPD) at GRC has changed all that. Recently, we have conducted a series of deformation experiments on several selected PCD samples using the D-DIA apparatus at

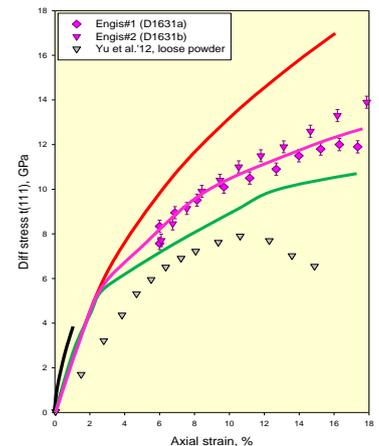
GSECARS sector of the Advanced Photon Source.

Well-sintered cylindrical PCD samples were laser-cut from bulk PCDs that were sintered either with Co (from Sumitomo and Sandvik Hyperion) or Si (from Sandvik Hyperion) as binding material. All samples were deformed at  $\sim 6$  GPa and 1273 K, under an essentially identical strain rate of  $\sim 1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . We used NPD deformation pistons, 1.6 mm in diameter and 0.6 mm in length.

Monochromatized synchrotron radiation at 55–65 keV was used along with area detectors. In certain experiments, different PCD cylinders were stacked right on top of each other during deformation, providing direct comparison on the relative strength of the PCDs (Figure). The Sumitomo PCD with the lowest Co content ( $<1 \text{ vol}\%$ ) has the highest strength, while Versimax with about 30 vol% Si/SiC has the lowest strength. Diamond-diamond bonding across grains increases

strength: Sumitomo PCD, which was presumably hot-pressed within the diamond stability field, is much stronger than loose powder compressed at 3 GPa and 1273 K. In summary, it is now feasible to conduct quantitative stress-strain measurements on PCDs within the diamond stability field, thanks to the development of NPD. Work is ongoing to complete the study on PCDs and will be expanded to other superhard materials, such as cBN.

(Yanbin Wang, The University of Chicago)



## WPIサテライト拠点 (ELSI-ES)

### ❖ HP-HT phase relation of lunar rocks: a clue for finding the lost Hadean crust ?

Studies of the isotopic composition of lunar rocks demonstrated that the bulk silicate Earth and the Moon show a high degree of similarity, consistent with a giant impact theory where the Earth and Moon formed after the collision of a Mars-sized planet with the early Earth.

Although their similar bulk composition, geological studies of the lunar surface showed that the Moon is covered by anorthositic crust and KREEP basalts whereas there are nowadays no such components on the Earth neither on the surface nor in its shallower layers. Thus, one possible whereabouts of the Hadean crust is the Earth's deep interior through plate tectonics.

To verify this assumption, we investigated the high-pressure phase relations of lunar anorthosite and KREEP basalts using multi-anvil press apparatus equipped with sintered diamond anvils, which provide homogeneous heating on large samples up to 50 GPa and laser-heated diamond anvil cell to explore higher pressures up to 125 GPa.

Results showed that KREEP is denser than pyrolytic mantle and therefore may have sunk

down to the core-mantle boundary bringing in the process a substantial amount of radiogenic elements. The less dense anorthositic components would remain trapped near the 660 km discontinuity. (Steeve Greaux)

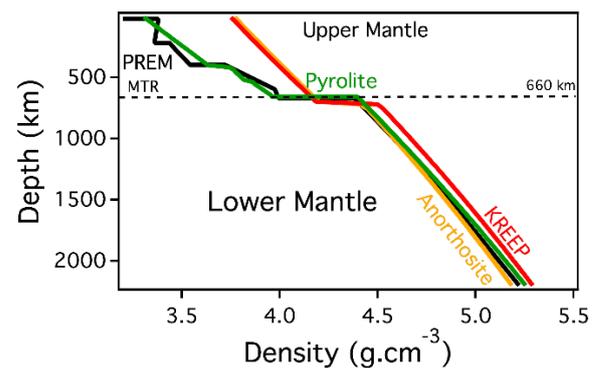


Fig 1. Density profiles versus depth of lunar anorthosite and KREEP basalt compared with those of pyrolite and the 1D seismological reference model PREM.

.....  
 編集後記：今夜は追いコンです。先日やったばかりなのに、もう一年経ったかと思ったらあれは忘年会でした。歳はとりたくないものです。(T. I & Y. M.)  
 .....

