

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.grc.ehime-u.ac.jp/>

## 目 次

- ◆ センター長挨拶
- ◆ センター構成
- ◆ NEWS & EVENTS:
  - 透明ナノセラミックスの合成に成功
  - 土田さん(M1)が地震学会で学生優秀発表賞
  - 高圧下での水素化鉄生成その場観察に成功
  - 第4回 PRIUS シンポジウム開催 (3/1-2)
  - フロンティアセミナー
- ◆ ジオダイナミクスセミナー
- ◆ 海外出張・国際会議報告
- ◆ インターンシップ報告
- ◆ ALUMNIレポート No. 12
- ◆ 最新の研究紹介
- 先進超高压科学研究拠点 (PRIUS)

◆ センター長あいさつ ◆



入船 徹男

新年おめでとうございます。本年も GRC、及び 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)」を宜しく願っています。

昨年末に、集中講義のため名古屋大学工学部を訪れました。10年ほど前に理学部で話しをさせていただいて以来の名大訪問でしたが、構内の入口付近には「ES 総合館」と称されるノーベル賞記念室のある立派な建物ができ、この間小林、益川、下村、赤崎、天野教授と次々とノーベル賞受賞者を輩出した同大学の発展ぶりがうかがえました。

私も修士の2年間(+α)お世話になりましたが、京都から名古屋に移りその研究レベルの高さに驚いたのがもう40年近く前のことです。名大地球科学教室では、熊澤峰夫先生を中心に高压地球科学の独創的研究が行われており、世界1、2を争う大型マルチアンビル装置を収納した4階建ての「極超高压実験室」(通称F館)が完成したばかりでした。

当時のF館が今も残っているとの噂を聞き、講義の合間に見に行き行って驚きました。確かにF館は残っていましたが、中身は空っぽで、新しくできた化学系のWPI(世界トップレベル研究拠点)の建物がこれを文字通り覆っているという、大変興味深い光景でした。

WPIに相応しく外国人の姿も多くみられましたが、モダンな建物内部に40年前の建物をほぼそのまま残したのは、モットイナイの精神でしょうか。事の経緯は知りませんが、もし耐用年数を超えてないから残したとすると、いかにも我が国のお役所仕事であるところがWPIの趣旨との対比で微笑ましいところです。建物の是非はともかく、関係者としてはこのような「歴史的建造物」の一部としてF館が残るのは、大変嬉しいことではあります。

当時F館で威容を誇った大型マルチアンビル装置は、その後役割を終えて解体されましたが、2009年にGRCにおいて最新バージョン(BOTCHAN-6000)が、現存する世界最大の同型装置として建造されました。当初は無謀だとの声も聞かれましたが、ヒメダイヤの大型化などに威力を発揮し、今ではその大容量を活かした様々な研究に活用されています。BOTCHANの成功は国際的にも大きなインパクトを与え、中国や米国でも同様の大型マルチアンビル装置の建造・計画がすすめられつつあります。

40年前に筆者が修士論文の課題として名大F館で取り組んだのが、高品質多結晶ガーネット焼結体の合成と、その弾性的性質の測定でした。しかし当時はなかなかうまくいかず、この研究は日の目をみず、時々思いだしては学生と色々試みましたが、なかなかうまく行きません。ところがここ数年で研究が大きく進展し、昨年暮れには世界初の「透明ナノセラミックス」ともいえる、透明ナノ多結晶ガーネット(NPG=「ヒメガーネット」)

の合成を論文発表することができました。

新年の挨拶としては相応しくない回顧録のようになってしまいましたが、この間のヒメガーネット合成に至る経緯は、科学研究にとって思い入れや持続性も大切だという一つの事例と考えています。ヒメガーネットが何の役にたつかはわかりませんが、同様の手法を用いた多様なナノ多結晶体の合成と、それらの生成機構の解明及び特性評価・応用を、GRC「創石ラボ」における学際的研究の一つの柱として推進したいと思っております。

## ◆ センターの構成 ◆

(H29. 1. 1現在)

### ❖ 超高压合成部門

入船徹男 (教授)  
大藤弘明 (教授)  
大内智博 (講師)  
西 真之 (助教)  
野村龍一 (助教) (H29. 1. 1~)  
Steeve Gréaux (WPI上級研究員)  
國本健広 (WPI技術研究員)  
小島洋平 (特定研究員)  
Nadezda Chertkova (特別研究員)  
Wei Sun (WPI研究員)  
桑原秀治 (学振特別研究員) (H28. 7. 1~)

### ❖ 数値計算部門

土屋卓久 (教授)  
亀山真典 (教授)  
土屋 旬 (准教授)  
出倉春彦 (講師)  
市川浩樹 (WPI上級研究員)  
Zhihua Xiong (特定研究員)  
Sebastian Ritterbex (WPI研究員)  
(H28. 7. 18~)  
白石千容 (研究補助員)

### ❖ 物性測定部門

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

### ❖ 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)

### ❖ 客員部門

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鉱物物性研究施設特任教授/高圧実験室長)  
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東海事業センター利用研究促進部門次長)  
客員教授 平井寿子 (立正大学地球環境科学部特任教授)  
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 (東京工業大学科学技術創成研究院准教授)

### ❖ 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  
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 (研究補助員)  
長野絵理 (事務補佐員)  
上田瑠美 (研究補助員)

## ◆ NEWS & EVENTS ◆

### ❖ 透明ナノセラミックスの合成に成功



入船センター長らのグループは、通常の焼結法と比べてはるかに高い10万気圧以上の超高压と、1400℃程度の温度を加えることにより、透明ナノセラミックスの一種である「透明ナノ多結晶ガー

ネット」の合成に成功しました。得られたナノ多結晶ガーネットは、30 ナノメートル程度の超微細結晶からなり、宝石などに使われる単結晶ガーネットと同程度の透光性ととも、単結晶に比べて約30%高い硬度を有することも明らかになりました。

入船教授らは 2003 年に超高硬度ナノ多結晶ダイヤモンド（ヒメダイヤ）の開発に成功し、製品化されるとともに、現在では世界の多くの研究室で様々な研究に利用されています。この手法を発展させて今回開発された超高压合成法により、今後更に新しい透明ナノセラミックスの開発と、そのレーザーや光学素子などへの応用が期待されます。

この研究成果は、イギリスネイチャー出版のオンラインジャーナル Nature Communications 誌の 12 月 7 日号において公開されました。また、アメリカ科学振興協会 (AAAS) 発行の Science 誌 2017 年 1 月 20 日号の Editor's Choice 欄でも紹介されました。(http://www.nature.com/articles/ncomms13753)

#### ❖ 土田真愛さん(M1)が地震学会で学生優秀発表賞



GRC の亀山真典教授のもとで研究を進めている土田真愛さん(理工学研究科博士前期課程 1 年) が、2016 年 10 月 5~7 日に名古屋市で開催された日本地震学会 2016 年度秋季大会において、学生優秀発表賞を受賞しました。

土田さんはマントル中に沈み込んだプレート(スラブ)の沈み込み帯ごとに異なる挙動・形態の違いが生じる原因を探るため、流体力学モデルを開発し、マントル中に沈み込むプレートの数値シミュレーションを行いました。この結果、660 km 不連続面のクラペイロン勾配とそこでの粘性率ジャンプの 2 つのパラメータに関する強い制約は得られなかったものの、海溝が海側に後退する速度を有意に制約できることを明らかにしました。この研究成果は、プレートやマントルのダイナミクスの理解に貢献するだけでなく、数値流体力学に基づく成果と地震学・測地学的観測とを結びつける重要な知見と期待され、審査員にも高く評価されました。

#### ❖ 高圧下での水素化鉄生成その場観察に成功

GRC の飯塚理子博士(日本学術振興会特別研究員:現東大特任助教)及び岡山大学・東京大学・日本原子力研究開発機構らの研究グループは、J-

PARC の中性子高圧地球科学ビームライン PLANET に設置された超高压中性子回折装置(「圧姫」)を用いて、地球生成初期に集積した物質をモデル化した試料で高温高压実験を行いました。この結果、高压下で温度が上昇し含水鉱物の脱水が起きると、固体のままの鉄に水素が溶け込むことを明らかにしました。

本研究により、水素が最初に固体の鉄に溶け込み、その後に核-マンテル分離や他の軽元素の溶融鉄への溶解が起き、水素が中心核中の重要な軽元素の 1 つである可能性が高いことが示唆されました。本研究成果はイギリスのネイチャー出版のオンラインジャーナル「Nature Communications」誌 1 月 13 日号に発表されました(http://www.nature.com/articles/ncomms14096)。

#### ❖ 第 4 回 PRIUS シンポジウム開催 (3/1-2)

2017 年 3 月 1~2 日に、本拠点の共同利用・共同研究の成果報告会を兼ねた“第 4 回 PRIUS シンポジウム”を開催します。今まで本拠点での共同利用・共同研究の実績がない方々の参加も歓迎しますので、このシンポジウムを機会に、今後本拠点での共同利用・共同研究を基にした超高压科学研究の推進にご協力いただければ幸いです。

また、本シンポジウム後の 3 月 2 日の午後から翌日 3 日にかけて同じ会場にて、愛媛大学工学部・理学部・GRC の教員による学際的研究グループである「超高压材料科学研究ユニット」の主催する「Workshop on Materials Science under Ultra-High Pressure MATSUYAMA 2017」が開催されますので、続けてご参加ください。

日程:2017 年 3 月 1 日(水) 13:00~2 日(木) 12:00  
場所:愛媛大学総合研究棟 I 4 階共通会議室  
詳細:GRC HP (http://www.grc.ehime-u.ac.jp/prius/priussymposium)

#### ❖ 国際フロンティアセミナー

第 59 回



“Carbon-bearing magmas and material transport in the deep Earth's mantle”

講演者:Prof. Konstantin Litasov (V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy)

日時:2016 年 11 月 17 日(木) 16:30-18:00

第 60 回



“Experimental investigation into the fate of subducted carbonates and origin of super-deep diamonds”

講演者 : Prof. Jie Li (University of Michigan)

日時 : 2017 年 1 月 13 日 (金) 16:30-18:00

第 61 回



“Thermo-chemical-tectonic evolution of terrestrial planets: the key influence of magmatism”

講演者 : Prof. Paul J. Tackley (ETH Zurich)

日時 : 2017 年 1 月 16 日 (月) 16:30-18:00



◆ 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

2/3 “Estimate of the outer core composition”  
Dr. Hiroki Ichikawa (Senior researcher, ELSI-ES, GRC)

2/10 (Advanced Science Seminar)  
“Diamond formation from various C-H-O fluids under the mantle conditions”  
Dr. Hiroaki Ohfuji (Professor, GRC)

2/24 (Advanced Science Seminar)  
“Ab initio core model”  
Dr. Taku Tsuchiya (Professor, ELSI-ES, GRC)

4 月

4/14 “Ab initio phonon and electron conduction in minerals”

Dr. Haruhiko Dekura (Assistant Professor, GRC)

❖ 過去の講演

第 455 回 “Melting relations in the MgO-MgSiO<sub>3</sub> system and the effect of other elements under the lower mantle condition”

Satoka Ohnishi (Ph.D. student, Ehime University)

“Numerical simulations of thermochemical mantle convection with drifting supercontinent in two-dimensional cylindrical geometry”

Akari Harada (Msc. student, Ehime University) 2016. 11. 11

第 456 回 “From modeling defects to the rheology of the Earth’s interior”

Dr. Sebastian Ritterbex (Postdoctoral Researcher, ELSI-ES, GRC) 2016. 11. 18

第 457 回 “Synthesis of transparent sintered bodies of polycrystalline pyrope at high pressure and high temperature and their characteristics”

Daisuke Furuta (Msc. student, Ehime University)

“Lattice diffusion in B2-type MgO”  
Takafumi Harada (Msc. student, Ehime University) 2016. 11. 25

第 458 回 “Development of externally heated diamond anvil cell technique for high temperature studies of fluids and silicate melts”

Dr. Nadezda Chertkova (Postdoctoral Researcher, GRC) 2016. 12. 2

第 459 回 “High temperature generation using “Exploring the origin of carbonado, natural polycrystalline diamond, from its primary nano-inclusions”  
Natsuko Asano (Msc. student, Ehime University) 2016. 12. 9

第 460 回 “Experimental study on the stability and physicochemical behavior of methane hydrate under high pressure and high temperature”

Hirokazu Kadobayashi (Ph.D. student, Ehime University)

“Equation of state of Al-bearing hydrous bridgmanite: technical development for in situ X-ray closed system experiment”

Sho Kakizawa (Ph.D. student, Ehime University) 2016. 12. 16

第 461 回 “Metal-silicate partitioning of halogens: Implications for the abundance and origin of terrestrial halogens”

Dr. Hideharu Kuwahara (JSPS Postdoctoral Researcher, GRC)

2017. 1. 6

第 462 回 (Advanced Science Seminar)  
“Recent progress for our “hydrous bridgmanite” project”

Dr. Toru Inoue (Professor, GRC)

2017. 1. 20

第 463 回 (Advanced Science Seminar)  
“First principles investigation of high pressure behavior of FeOOH”

Dr. Jun Tsuchiya (Associate Professor, ELSI-ES, GRC) 2017. 1. 27



## ➡ 海外出張・国際会議報告 ‹

### ❖ 12th Laser Ceramics Symposium (LCS 2016)

2016 年 11 月 28 日から 12 月 2 日にかけてフランスの Saint-Louis (サン・ルイ) で開催されたシンポジウム「12th Laser Ceramics Symposium」へ参加してきました。サン・ルイはフランスの東の端、ドイツとスイスとの国境の三重点のすぐそばにある小さな街で、空からの玄関口は「ユーロエアポート・バーゼル=ミュールーズ」というスイス、フランス両国の街の名前のついた空港でした。空港について入国を済ませた時にはすでに夜の 10 時を回っており、タクシーでホテルに移動しましたが、クリスマスシーズン前ということもあり、街中が青白い LED で飾られていたのが印象的でした（不動産屋の空き物件を掲示する枠までもが、1 軒分ずつ LED で縁取られているのは斬新でした）。翌日からのシンポに参加して分かったのですが、サン・ルイにはフランス・ドイツ両国の共同運営による国防技術のための研究拠点 ISL (Institute of Saint-Louis) があり、透光性セラミクスなどの光学材料の研究開発にも力を入れているようで、そうした背景もあってハイテクな街として印象づけようとしているのかもしれませんが。

前置きが長くなりましたが、同シンポはレーザー光学材料としての透光性セラミクスの合成や特性評価などを中心とした研究成果を発表・共有する場として毎年各国に舞台を移して行われています。



今回、当センターが誇るヒメダイヤモンド（ナノ多結晶ダイヤモンド）の高圧合成とその特徴についての基調講演を依頼された入船センター長に代わって発表するために、初めて参加してきました。固体レーザーの媒体としては希土類元素をドープさせた結晶（単結晶）やガラスが一般的ですが、近年では高い透光性を持つセラミクス（多結晶体）も用いられるようになってきました。そのような良質の透明セラミクスの合成は、ナノサイズの粉末を高圧下で焼結させることにより行われています。ただし、高圧といっても多くの場合は数十 MPa 程度で熱間等方加圧法（HIP）や放電プラズマ焼結法（SPS）により合成されており、我々が身近な GPa レベルの超高压は必要ありません。

私はヒメダイヤモンドや最近発表した“ヒメガーネット”（ナノ多結晶ガーネット）を例に、超高压下における前駆体やガラスからの直接変換焼結の利点（多核形成が促進される一方、粒成長は抑制され、空隙率も限りなくゼロに近づく）をアピールし、従来にない新しい透明ナノセラミクスの合成法としての可能性を提示してきました。なかなか受けは良く、多数の質問やコメントをいただき、特に、透明セラミクスで新たなブレイクスルーを狙う日本の民間企業や大学、研究所の方に興味を持っていただいたようで、今後は共同研究などへも発展しそうです。今回は、普段とは全く異なるコミュニティーへ飛び込んだわけですが、連日の議論や交流を通して、透明セラミクスの研究分野においても様々な人脈やコネクションを築くことができたのは良い収穫でした。

シンポの最終日、閉会后、会場から 2km ほどのところにある国境の三重点（ライン川の真ん中ですが）を一目見ようと、ひとり足を運びました。無事写真に収めると、そのすぐ北に、歩いてドイツ側へ渡れる立派なつり橋があることに気づきました。試しにその橋を渡ってみたのが長い散歩のはじまりでした。その後、ドイツからスイスへ入国し、バーゼルの古い街並みを散策し、再びフランスへ戻ってきた頃にはあたりは真っ暗になっていました。ホテルに戻ってきたのは 7 時過ぎで、実に 3 時間半、14km にわたるぶらり旅で、革靴を履いていた足の裏はマメだらけになりましたが、徒歩による 3 カ国周回の旅はなかなか貴重な体験

でした。その後、イタリアンレストランで日本人研究者の方と合流してサイエンス談義を楽しみ、充実の一日を締めくくりました。(大藤 弘明)

#### ❖ 中国科学院固体物理研究所に滞在して

2016年11月7日から11月25日までの19日間、中国科学院の固体物理研究所(以下、ISSP)に滞在しました。中国科学院は先端科学技術を有する国内最高研究機関として位置づけられており、ISSPはそれの附置研究所として物性物理学・材料科学の研究・教育の役割を担っています。ISSPには多くの固体物理学者が在籍しており、カバーしている研究分野は、ナノ構造物性、半導体物性、結晶欠陥、計算物質科学、新規機能性物質探索、電子輸送特性、強相関電子物性、超伝導、など多岐にわたっています。ISSPがある合肥市には省都として行政施設が多数置かれているほか、主要大学があることに係して技術研究開発施設に重点が置かれた都市開発が進んでいるようです。そのせいか、どこか都会の喧騒を離れた一隅のような雰囲気を感じることができ、滞在中は落ち着いた時の流れを満喫できました。



ISSPでは私の盟友であり受入研究者でもあるXianlong Wang教授と共に、地球の下部マントル構成鉱物の高温・高圧下における電子状態や原子の振動特性について、第一原理量子力学計算に立脚した研究を進めました。Wang氏は、博士研究員の頃からGRCの鉱物物性理論グループの土屋卓久教授と共同研究を行っており、地球深部物質科学に関する造詣が深い方です。そのため、私のISSP滞在中、氏から多くの有益なコメントをいただくことができ、研究を円滑に進めることができました。

Wang氏には生活面でも大変お世話になりました。毎日の食事一つとってもいつも気に掛けてくださり、自宅へ夕食の招待をしていただいた日もありました。また、滞在したホテルで軽微な電源トラブルがあったときにも、夜にもかかわらず、私のホテルまで駆けつけてくださったり、休日にはWang夫妻に市外へ観光案内いただいたりと、私の中国生活はいつも氏と共にありました。氏とお互いに抱えている悩みや幸福観、そして将来について多くのことを語り合った一日一日の積み重ねが、人と人との精神的な交流が生きるうえでいか

に重要な私に気づかせてくれたと思います。私にとってそれは本出張で得られた学術的な成果に匹敵する価値あるものと確信しています。

ISSPの研究者との交流を図るための研究セミナーを開く機会にも恵まれました。セミナーでは、鉱物の格子熱伝導率に関して私がこれまでに行ってきた研究を紹介しました。聴衆の方(おそらく)全員が物性物理学を専門とする研究者・学生だったと思いますが、私の研究は固体である鉱物を対象とした物性理論物理学という側面も持っているため、彼等にも興味を持ってもらったように思います。実際、セミナー中はもとよりセミナー後も彼等から物性物理学的視点から質問・コメントを多くいただくことができました。先述のWang教授を含め、ISSPの研究者は学外研究者と積極的に交流を行っていることが印象的でした。

本滞在中、私の知人のTao Sun博士(中国科学院大学地球科学学院、北京市)を訪ねました。Sun氏は私の研究テーマである鉱物の熱伝導と密接に関連するフォノン-フォノン相互作用に関する造詣が深いこともあり、それについての専門的な議論を行うことができました。そこで得た知見を最近投稿した学術論文に盛り込むことができたことは大きな収穫でした。

終わりに。本稿では文字数の都合(1500文字)により割愛した中国滞在中のエピソードが多い。思いの儘に綴った日記めいた散文の字数は二万字を優に超えている。この事実はとりもなおさず、本滞在中が私にとっていかに実り多いものであったかを示している。それはまた同時に、私の再訪中への想いを表すものでもある。彼等と再び会えることを願いつつ、筆を擱くことにする。(出倉春彦)



#### ◆ インターンシップ報告 ◆

#### ❖ Explorations of new boron-rich compounds Hu Tang (D2, HPSTAR, China)



In system of high borides, boron atoms display very complex three-dimensional arrays. Usually metals and transition metals (e.g. Li, Na, Al, Mg, Ca, Cr, Mn, Fe, W and Mo) can be inserted into the three-dimensional boron network, which may display fascinating

catalytic and thermoelectric properties. It is also expected that higher boron-contained compounds, may have a greater hardness by forming short and strong covalent bonds.

Furthermore, boron-rich compounds as potentially superhard materials display two advantages over the diborides: (1) reduction of the overall production cost because of relatively low cost of boron compared with 5d transition metals; (2) lower density and thus light weight which benefit many engineering applications. Static high pressure technique provides a change for synthesizing new boron-rich compounds. In this research project, we focused on the synthesis of  $WB_4$  and  $MoB_4$  under high pressure of 10~20 GPa.

I am very glad to have the opportunity to complete our experiments in GRC. GRC is a great laboratory. It has a very comprehensive experimental facilities. I learned many new tools and techniques, which will help me in future work. In particular, grasping the skill of designing a suitable cell is important for me. I am very grateful to Irifune-sensei, Shinmei-sensei, Yashiro-san, Zhou-san, Xu-san and Li-san for their help during this time.

A series of experiments were performed using 14/8 and 10/4 cell assemblies in 2000-tons split sphere multi-anvil press equipment. The chemical composition and microstructure were studied by employing micro-focus X-ray diffractometer and field emission scanning electron microscopy. These results reveal that the large-sized  $MoB_4$  and  $WB_4$  crystals can be synthesized by a process of fast chemical reaction under high pressure and high temperature, which also help the subsequent tests of physical and chemical properties.

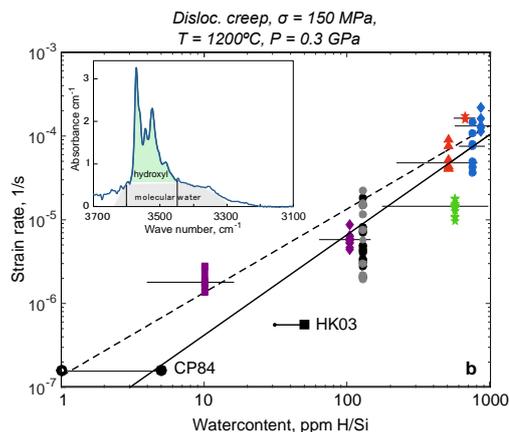
These fundamental understandings of these borides will reveal underlying physics and chemistry that govern the phase stability and materials behaviors under equilibrium and extreme conditions, which may form the basis for establishing a predictive model describing the correlation among materials composition, microstructure and bonding controlling, superconducting properties.

.....

➡ ALUMNI レポート⑫ ⬅

❖ オーストラリア国立大学地球科学研究所  
教授 Ian Jackson

Many years have elapsed since my memorable sabbatical in Matsuyama in 2003 during the very early days of the Geodynamics Research Center. I thoroughly enjoyed my interactions then and since with GRC Director and long-time friend Professor Tetsuo Irifune, and also with many other past and current GRC staff, students and visitors. I have visited Ehime University and the GRC several times since then, most recently for the 3rd Global-COE international symposium on Deep Earth Mineralogy in conjunction with TANDEM 2013. I hope to return to Matsuyama for a brief visit after the joint JpGU-AGU meeting in May. Following retirement as Director of the Research School of Earth Sciences at the Australian National University, and appointment as an Emeritus Professor in late 2015, I have maintained an active research program within the School's Rock Physics Research Group.



A recent highlight of my research is a collaborative study with Ulrich Faul (MIT), PhD student Chris Cline, Emmanuel David (UCL), and ANU colleague Andrew Berry, of the high-temperature rheology of synthetic olivine that has identified the defect responsible for the previously reported water-weakening of mantle olivine (Fig.1: Faul et al., Earth Planet. Sci. Lett., 2016). It is a Ti-hydroxyl defect, with a distinctive infrared absorption spectrum, that is stable under the relatively oxidising, water-undersaturated conditions prevailing within Pt-sleeved Ti-doped olivine. Similarly oxidising and hydrous conditions prevailing within Pt sleeves are responsible also for reduced shear wave speeds and increased dissipation observed in parallel low-strain forced-oscillation tests - probably through enhanced grain-boundary sliding (Cline et al., Nature,

submitted). Complementary torsional and flexural oscillation tests of partially molten synthetic dunite show that its mechanical behaviour can be understood in terms of the relaxation only of the shear modulus, but the method proves to be insensitive to possible relaxation of the bulk modulus (Cline and Jackson, Geophys. Res. Lett., 2016). Another experimental PhD project completed in 2016 by Yang Li, involving a broadband study of the seismic properties of synthetic glass media both dry and fluid-saturated (collaborative with Kneafsey, Lawrence Berkeley Laboratory), Emmanuel David, Douglas Schmitt, University of Alberta, and Seiji Nakagawa and Timothy has clearly shown that ultrasonic wave speed measurements at MHz frequencies and forced oscillation tests at seismic (sub-Hz) frequencies probe different regimes of stress-induced fluid flow in low-permeability cracked glass materials. These results have implications for interpretation of seismological models for the upper crust. The ambitious PhD project of Richard Skelton (co-supervised with Andrew Walker, University of Leeds) is nearing completion with the development and application of versatile computer software for the modelling of dislocations in minerals including the simulation of dislocation slip with and without adhering point defects involving protons.

#### ❖ 東京大学大学院理学系研究科

特任助教 桑山靖弘



私は2009年4月から2016年12月までの7年9か月間、GRCでお世話になりました。私の着任当時はG-COEプログラムがスタートした翌年で、GRCが大きく変わろうとしているときだったように思います。新たに設けられた量子ビーム部門には、私のほかに平井寿子教授や藤野清志教授も着任され、当時助教であった大藤弘明教授の研究室を加えて、総勢15~20人の大人数でダイヤモンドアン

ビルセル(DAC)グループゼミを行っていました。毎週のゼミで、「こうではないか、いや、むしろああではないか」と、白熱した議論を(特に客席にいる教員同士で)行っていたことが懐かしく思い出されます。また、G-COEプログラムの始動により、他の研究グループでも博士研究員や博士課程在学中の学生がそれ以前と比べて(おそらく)倍以上に増え、大変活気があったことを覚えております。G-COEプログラムの一環として、海外や国内の大学の著名な講師を招いた集中講義やセミナー、インターンシッププログラムなども頻繁に行われていました。当時の私は博士課程を修了して数年がたち、いろいろな分野のことが少しずつ見え始めてきた時期であり、それらについてさらに詳しく知りたいとも思っていた自分にとって、当時の状況は大変有益かつ楽しいものでした。夏には毎年、土屋教授らと共に、高知の山奥の溪流沿いにある、廃校になった小学校の校舎を改装して宿泊施設にした「しもの郷」まで出かけて行き、サマースクールと称した勉強会合宿を行いました。これまで、河合研志准教授、大村訓史准教授、金嶋聰教授、田中聡博士、Bijaya Karki教授、松井宏晃博士、大滝壽樹博士、John Hernlund博士、Christine Houser博士、他大学の学生らも参加してくれました。昼は研究セミナー、休憩時間は川で水泳、そして夜はバーベキューや温泉、花火と、夏の息抜きも兼ねつつ、大変密度の濃い勉強会を行なうことができました。他にもG-COEプログラムの活動として行なわれた、カーネギー研究所(ワシントン)やバイエルン地球科学研究所(バイロイト)でのワークショップ等に参加したり、カリフォルニア大学バークレイ校やパリ第6大学に滞在したりと、研究面のみならず人脈の幅を広げるうえで大変有意義な研究生生活を送ることができました。

一方で、GRCの博士研究員や愛媛大学の学生との研究生生活を行えたことも、大変勉強になる有意義な機会でした。特に、当時GRCの博士研究員だった木村友亮博士および現在博士課程の大西里佳さんとは、CO<sub>2</sub>レーザーを使ったダイヤモンドアンビルセル用の加熱光学系を設計するところから一緒に研究を行い、木村博士とは氷の高圧下での融点を、レーザー加熱DACを用いて決定する実験を行いました。彼はその後大きく研究の幅を広げ、現在は東北大学で日本学術振興会の博士研究員として、意欲的に研究をしているようです。大西里佳さんは、研究室配属された愛媛大学地球科学科3年生の後期から7年以上にわたり、一緒に研究を行ってきました。そして、先日、彼女の行ってきたレーザーDACを用いた「高圧下におけるMgO-MgSiO<sub>3</sub>系の融解関係」に関する研究成果が、「Physics and Chemistry of Minerals」誌に掲載され、彼女はまさに今、博士号を取ろうとしているところです。私にとって学生や博士研究員と1対1で研究することは初めての経験で、彼らを色々と戸惑わせてしまったに違いないと思います

が、彼らが私の未熟さという逆境をばね(?)に研究に励み、そして今、それぞれ次のステージへ進んでくれるのは感慨深いものがあります。その他にも、GRCの多くの方々と共同研究を行うなど、この7年半でいろいろな経験を積むことができました。

私は、この1月から、東京大学地球惑星科学専攻で働くことになりました。私は、自分自身では、これまで固体に関する研究ばかりを行ってきたと思っていたのですが、今思い返してみると、液体金属鉄の研究、氷の融解実験、そしてケイ酸塩の融解実験など、ここ数年は液体に関する研究の比率がずいぶんと増えてきました。東京大学では、特別推進研究課題「高圧液体の挙動と初期地球進化」のための特任助教としての採用ということで、さらに「地球深部の液体」にフォーカスして研究を行っていかうと思っております。およそ8年間、ずいぶん長い間愛媛大学で皆様にお世話になりましたが、そこで学んだことを糧にまた新たな環境で研究に励んでいきたいと思っております。

❖ 富士ダイス(株) 秦野第2工場  
材料開発部 藤井卓



私は2016年3月にGRCにて博士後期課程を修了し、同年4月から富士ダイス株式会社で働いて

います。弊社は主として超硬合金製の耐摩耗工具の生産・販売を行っている会社で、耐摩耗工具とは、主として皆さんの身近にある、ありふれた製品を作るための工具です。例えばジュースの缶や自動車部品を作るための工具など。その為、製造業の企業間では良く知られていますが、普段の生活において耳にする機会は少ないと思います。ただ、高圧業界向けにも、超硬合金やセラミックスで製作したアンビルやシリンダーなどの販売も行なっていますので、ご存知の方も多いと思います。

私が現在所属する材料開発部は神奈川県秦野市にあります。秦野市は松山と比較してもかなりの田舎で、飲む場所も限られますが、自然に囲まれた長閑な生活を送っています。その一方、電車に乗ると新宿歌舞伎町まで1時間程度で着き、箱根や熱海、湘南も近く観光にも困ることなく便利な生活をしています。また盆地ではありますが、富士山の方角のみ山脈が途切れているため、毎日富士山を見ながら出社しています。最近では真っ白に雪化粧をしてとても美しくなっています。

GRCには学部・修士・博士の学生として在籍させて頂きました。GRCを卒業し早1年が経ち、外

部に出て改めてGRCの設備や環境が非常に恵まれていたことに気が付かされています。在籍中はダイヤモンドアンビルセルとマルチアンビル高圧発生装置を用いて、下は30 K程度の低温から上は2000 K以上の高温まで、圧力は90 GPa程度までと、非常に幅広い温度圧力領域において様々な研究をさせていただき、それらの研究を通して、研究の進め方や視野広さの重要性を教えていただきました。またKEKやSpring-8での放射光実験、学会発表等多くの経験を重ね、特に在籍期間の一部は、ちょうどグローバルCOE期間と重なっていたため、多くの先生や研究員の方々と接し、ご指導を賜れたことは私の財産となっております。そのため先生方や研究員、事務員の方々、先輩・後輩には非常に感謝しております。

現在の会社での業務は、主に原料粉末の検査および超硬合金の材料開発です。原料粉末の検査は、製品の品質がかかっているのでもいつも緊張して検査を行っております。超硬合金の開発は、高圧発生用の超硬合金ではなく金型用の材料を開発しています。ターゲットは鍛造向け金型と呼ばれるもので、自動車部品のギアなどを製造するのに必要な金型です。バルクの金属を金型に押し付け成形するため、このような金型には粗粒な粒子と高い靱性が求められます。そのため和田(GRC卒業生、現富士ダイス)が開発した超微粒超硬合金やナノ微粒バインドレス超硬合金とは真逆の材料を開発しております。また、超硬合金以外にも高圧技術を用いた新規材料の探索も行っております。このALUMNIレポートが掲載される頃には終えているはずですが、リクルーターとしてGRCにもお伺いさせていただく予定となっております。GRCを卒業することで遠ざかったと思っていた高圧業界もまだまだ関わる事ができ、研究生活で培った知識や経験を十分に活かせる環境にあると思っております。

最新の研究紹介

❖ Atomic diffusion in solid Fe at Earth's inner core conditions

Already in 1952 F. Birch showed that crystalline iron is the main constituent of the Earth's inner core. The thermomechanical properties of solid iron at high pressure and temperature therefore mainly control the dynamics and evolution of the Earth's inner core. One of those properties is atomic diffusion which plays a key role in many processes, such as plastic deformation (viscosity) and crystal growth. Ongoing debate about the seismologically observed

elastic anisotropy of the Earth's inner core has led to several suggestions to find its origin in non-uniform core growth, dendritic crystal growth (core solidification) or in solid-state flow (formation of LPO), all which depend on atomic diffusion processes.

Since experiments are extremely difficult at the pressure and temperature conditions of the inner core, computational mineral physics provides an alternative to study atomic diffusion in iron under those conditions. In this work, a computational mineral physics approach is used to investigate diffusion of vacancies by means of defect energetics as it largely determines the rate of vacancy diffusion. First principles simulations have been performed to calculate enthalpy of vacancy formation in FCC- and BCC- and HCP-Fe in relation to self-diffusion at a pressure range up to the conditions of the Earth's inner core.

Vacancy formation enthalpy controls the diffusion process to a large extent as it is exponentially proportional to the inverse of vacancy concentration. This intrinsic vacancy concentration plays an important role in metals in contrast to ionocovalent minerals where extrinsic vacancy concentration can determine effective vacancy diffusion. The effect of pressure on intrinsic vacancy concentration in iron is found to be significant. With vacancy formation enthalpies in the order of 10 eV at 320 GPa, we have estimated the intrinsic vacancy concentration of the most stable HCP- and FCC-Fe at 5500 K to be 0.01% of the intrinsic vacancy concentration in BCC-Fe at ambient pressure conditions near the melting temperature. This shows that pressure substantially suppresses defect concentration in iron at inner core conditions. Consequently the rate of vacancy diffusion will be strongly inhibited. The question then arises whether other mechanisms allow to enhance vacancy concentration in iron under inner core conditions. If not, the latter will have direct consequences for the interpretation of the seismologically observed inner core anisotropy in terms of intracrystalline plasticity. (Sebastian Ritterbex)

#### ❖ Elastic properties of wadsleyite to the mantle geotherm

Current poor knowledge on elastic properties of wadsleyite relevant to the transition zone

condition largely stagnates understanding mantle evolution and water distribution in the wedge mantle. Especially on temperature dependence, linear extrapolation from low temperature results (<1000 K, Inoue et al., 1998; Jacobsen et al., 2004, 2006; Mao et al., 2012) to the mantle geotherm (>1500 K) might cause large error because of nonlinearity of variation of elastic moduli. On the other hand, Fe and water dependence on elastic properties of wadsleyite have never been systematically studied, which are critical to understand the origin of the observed seismic abnormalities and evolution of the wedge mantle.

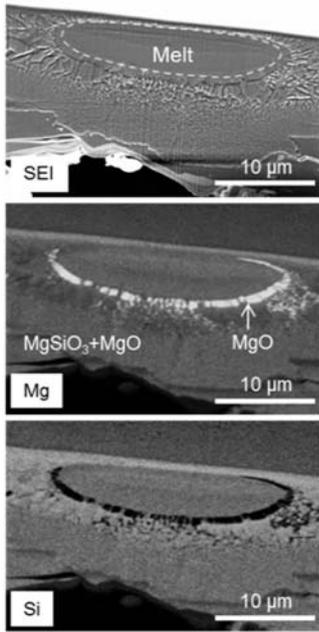
Among all the methods to investigate elastic wave velocity, ultrasonic method is the sole one that can realize both high temperature and pressure. In this study, we employed ultrasonic method combined with observations developed by Higo et al. (2008) to determine P- and S-wave velocities of wadsleyite at high temperature and pressure.

We have finished ultrasonic measurements on dry wadsleyite synthesized with different multi-anvil apparatus and in-situ X-ray content (Fe#=0 and 10), up to 1500K and 20 GPa. P- and S-wave velocities of wadsleyite display the clear decrease trend as Fe content increase. Based on our results, variation of seismic velocities observed among locations at the transition zone depth could be explained by Fe content variation in wadsleyite except wedge mantle, which is consistent with the conclusion from electrical conductivities (Yoshino et al., 2009).

In the future, we would like to explore our synthesis experience and ultrasonic measure technique to wet wadsleyite with diverse water contents and determine P- and S-wave velocities of wadsleyite as function of pressure, temperature and water content, so as to constrain the water distribution and its absolute content at the wedge mantle transition zone. (Sun Wei)

#### ❖ 下部マントル条件下における MgO-MgSiO<sub>3</sub>系の溶融関係

これまで、上部マントル圧力条件下での溶融実験は比較的広い組成範囲で行われてきた。一方、下部マントル圧力条件下においてはパイロライトや中央海嶺玄武岩など限られた組成でしか溶融関係が明らかにされていない。化学組成の違いは溶融関係に大きな影響を及ぼすため、組成を関数と



した熔融関係の相図を決定することは極めて重要である。下部マントルの主要構成鉱物はペリクレスとブリッジマナイトであるため、その Mg 端成分である MgO-MgSiO<sub>3</sub> 2 成分系における熔融関係の相図は最も基本的な情報である。これまで、MgO-MgSiO<sub>3</sub> 系の熔融関係は圧力 26 GPa まで決定されている (e.g. Liebske and Frost 2012)。これは下部マントルの最上部に相当する圧力であるため、より高い圧力条件

下での熔融実験を行う必要がある。そこで、本研究では下部マントル圧力条件下での MgO-MgSiO<sub>3</sub> 系の熔融実験手法を確立し、熔融関係の解明を行った。

出発物質には組成が均質なガラスを用い、高温高压発生装置には下部マントル温度圧力が発生可能なレーザー加熱ダイヤモンドアンビルセル (LHDAC)、加熱には直接加熱可能な CO<sub>2</sub> レーザー加熱装置を用い、加熱後の試料は dualbeam 収束イオンビーム (FIB) にて試料断面を研磨し、電界放出型走査型電子顕微鏡 (FE-SE) による分析を行った。約

35 GPa、約 4000 K で実験を行ったところ、加熱中心部に楕円形の融解組織が観察された。組成分析を行ったところ、融解部分の縁に沿うように MgO 単相が形成され、融解部分の組成は出発物質と比べて MgSiO<sub>3</sub> に富むことが明らかになった。このことから、この条件では部分溶解が生じており、リキダス相が MgO であると判断できた。また、Si/Mg モル比が高い出発物質を用いた場合、MgO 相は観察されず、融解部分に隣り合うように MgSiO<sub>3</sub> 相が形成された。同様の実験を圧力、組成を変化させて行った。

共融組成は①リキダス相が変化する組成、②メルトの組成の 2 点から制約できる。これら 2 つの方法を合わせて正確な共融組成の制約を行った。また、対称型正則溶液を仮定して熱力学計算を行うことで、実験条件以上の圧力下における共融組成の制約を試みた。実験により得られた共融組成、及び先行研究の値を用いることで、各圧力における相関パラメータ  $W$  を算出し、これに基づき共融組成が制約された。この結果 MgO-MgSiO<sub>3</sub> 系の共融組成は 80 GPa 以下では圧力増加と共に MgO に富む。さらに、80 GPa 以上ではほぼ一定の値を示し、マントル最下部での共融組成は約 0.64 Si/Mg モル比であることが明らかになった。また、熔融相図を決定したことで、任意の組成及び圧力で熔融関係を議論することが可能となった。本研究は下部マントルの熔融関係を理解する上での基礎的情報を与え、地球の進化過程及び現在の地球内部構造、特に熔融・分別に関して極めて重要な制約条件を提供する。(大西里佳 (D3))

## 共同利用・共同研究拠点 (PRIUS)

### ❖ PRIUS 利用者の声



Our cooperation with GRC team and personally Professor Tetsuo Irifune was initiated in 2012, when Ekaterina Sirotkina, fourth-year undergraduate student, visited the high-pressure lab of the GRC and got a very good experience in multi-anvil experiments. The results of this study were used in her Master

course. In August 2013, I visited the GRC and gave two seminars on high-pressure components of natural diamonds and diamond-forming silicate-carbonate systems. During this visit, we prepared an agreement between the Geodynamics Research Center and Geological Faculty of the Moscow State University, which was later signed by Professor Tetsuo Irifune, Director of the GRC and Academician Dmitry Pushcharovsky, Dean of the Geological Faculty. A very important event of our cooperation was an International Seminar “High-Pressure Mineralogy: Theory and Experiment”, which was held at the Moscow State University on October 22, 2015. We were very glad to meet professors Tetsuo Irifune, Toru Inoue, Hiroaki Ohfuji (GRC), Hiroyuki Kagi (University of Tokyo), and two students Natsuko Asano and Masahiro Kobayashi. Our group including Professor Andrey Bobrov, PhD Ekaterina

Sirotkina, Master student Anastasiya Tamarova (Moscow State University) and Professor Luca Bindi (Firenze, Italy) participates in the PRIUS projects, and students from the Moscow State University every year visit the GRC for multi-anvil experiments. Currently we have eight joint papers in high-rank international journals.

The problem of the composition and structure of the deep Earth has been debated over the past decades. It is generally considered that a relatively small group of elements (Si, Mg, Fe, Al, Ca, and O) is predominant in Earth's interior. A huge experimental database is currently available on a number of the model (basically, illustrating the Mg-Fe isomorphism in high-pressure phases) and multicomponent (with pyrolytic and eclogitic compositions) systems. However, models of the chemical and phase composition of deep Earth also should account for the high-pressure behavior of rare elements and, in particular, potential phases accumulating these elements at mantle depths. In our projects, we study incorporation of minor elements (Cr, Ti, Na, etc.) and their influence on physicochemical parameters of phase transformations on a multianvil (Kawai-type) split-sphere press at the GRC. To obtain maximally indicative values of minor element concentrations and to plot reliable P-X phase diagrams, we select the model (mostly simple binary) systems, in which runs are performed with small steps in pressure (and/or temperature) and compositional (concentration of minor element) variations. In recent years, our research was mainly focused on incorporation of Cr, Ti, and Na in the phases of the  $Mg_4Si_4O_{12}$ - $Mg_3Cr_2Si_3O_{12}$  (Fig. 1),  $Mg_2SiO_4$ - $MgCr_2O_4$ ,  $MgSiO_3$ - $MgTiO_3$ , and pyrolyte-Na-rich carbonate systems at 10-24 GPa and 1300-2000° C. Structural refinement of the mineralogically interesting phases is supervised by Professor Luca Bindi is performed by the method of single-crystal X-ray diffraction. (Moscow State University, Professor, Andrey Bobrov)

#### ❖ PRIUS利用者の声

水素は含水鉱物や、無水鉱物中にとりこまれた微量元素として地球内部に少なからず存在していると考えられています。鉱物の場合、共有結合からイオン結合的な強さでフレームワークが出来上がっていますが、水素結合はそれらに比べると弱

い結合であるため、圧力に対してフレキシブルな部位として応答するのが一般的です。一方で圧力は水素結合を含むふたつの酸素間の距離を縮めます。二つの酸素間の距離が縮むにつれ、間におかれた水素は両側の酸素とより強く相互作用するようになり、圧縮されにくくなるなど、低圧で一般的に考えられているルーズな結合とはまた異なる様相を呈するようになります。そのため、水素が構造中に存在する場合になぜ鉱物の物性が変化するかを議論するためには、高圧下その場観察で水素位置を直接決定することが重要であり、中性子実験はそれを可能とする強力なツールです。博士課程の時のテーマのひとつとして高圧下中性子実験を行ったことをきっかけに、今は東海村の中性子施設 J-PARC 内の高圧実験専用ビームラインで、ビームライン担当者としてユーザーのサポートと研究にあたっています。



中性子実験には放射光に比べて大きな試料体積が必要です。目的にもよりますが、パリ-エジンバラプレスの場合、10 GPa 以下なら 76 mm<sup>3</sup> 程度、20 GPa 程度を目指すなら 26 mm<sup>3</sup> 程度の試料が必要となります。中性子実験に必要な大きな試料の合成のために以前から GRC のプレスを利用させていただいておりましたが、PRIUS が始まってからは、旅費や消耗品のサポートを受けられることとなり非常に助かっています。また滞在中には GRC の研究者の方が気さくに声をかけてくださることが嬉しく、ちょっとした実験の工夫の話から研究の立ち上がった議論まで広く話せることも非常に刺激となっています。

昨年度、今年度と申請が受理され、滞在中は井上先生をはじめスタッフの方々だけでなく学生の方にお世話になりつつ、これまで計 3 回の滞在中を経て目的の試料を合成するための条件出しが進んでいます。面白い結果をまとめられるまでもう少し、これからも度々松山にお伺いしますので、よろしく願いいたします。

(日本原子力研究開発機構 J-PARC センター 副主任研究員 佐野亜沙美)

編集後記：超高压合成によるナノ多結晶寶石シリーズの第 2 弾はガーネット。様々な色の「ヒメガーネット」ができそうです。(T. I & Y. M.)