

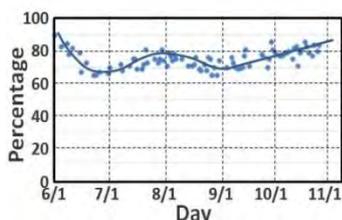


国立大学法人 愛媛大学  
 地球深部ダイナミクス研究センター  
 〒790-8577 松山市文京町2-5  
 TEL : 089-927-8197 (代表)  
 FAX : 089-927-8167  
 http://www.grc.ehime-u.ac.jp/

目 次

- ◆ センター長挨拶
- ◆ センター構成
- ◆ NEWS & EVENTS:
  - 入船センター長が応用鉱物科学賞を受賞
  - 「知の拠点」でGRC紹介動画公開
  - JpGU-AGU 2020でオンラインセミナー
  - 第4回GRCイメージコンテスト2020
- ◆ ジオダイナミクスセミナー
- ◆ ALUMNIレポート No. 23
- ◆ 最新の研究紹介
- ◆ センター機器紹介
- 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

新型コロナウイルス (COVID-19) の拡大に伴う春から夏の活動制限期間を経て、GRCが運

用する共同利用・共同研究拠点 PRIUS も徐々に正常化されています。この間、拠点活動を途切れさせないことを念頭に、様々な対応を試みてきました。

第一に外部からの利用者が、GRC に自ら来所しなくても共同利用・共同研究が可能なように、GRC スタッフによる代理実験の体制を整えています。このため内部スタッフによる対応を強化するとともに、GRC で学ぶ学生を実験支援者として雇用しています。これにはコロナ禍でアルバイトが困難になった学生に対する、経済的支援の意味も込められています。

また、代理実験が困難な場合にも対応できるよう、高温高压実験の温度・圧力を外部から制御で

きるソフトウェアを自力で開発し、一部の高压装置では遠隔操作による実験が可能な体制を整えつつあります。実際に何件かの高压実験の制御を学外から行ってもらい、問題なく動作することが確認されました。このような遠隔制御の体制は今後順次他の装置にも拡張していく予定です。

その他、リモート会議に必要な機器の充実や、実験作業台のパーティションの設置など、コロナ禍を契機とした「新たな拠点活動様式」の確立・推進のため、GRC/PRIUS では様々な取り組みが行われています。一方で、第二波・第三波に備えて、マスクやアルコール等の備蓄も進め、このような状況の中でもより安全安心に研究・教育活動や拠点活動が継続できるよう、最大限の努力を払っています。マスクの功罪には色々議論もありますが、会話者双方がつけることは、飛沫感染抑制に大きな効果があることは明白と思われま

す。マスクといえば、私も5月の連休付近の1か月近い一斉テレワークの後、徐々に普段の生活スタイルに戻し、日課となっていた夕方の散歩も5月末からマスクを着けて再開しました。ついでにこれを機会に、大学周辺の路上でのマスク装着率チェックを始めました。約一時間の学外散歩中にすれ違う人が、どれくらいマスクを着けているかのチェックです。この間 (6/1~10月末) に得られた、約5か月間の結果が冒頭のグラフです。

世の中が自粛ムードだった5月末は、ほぼ人と触れ合うことのない大学付近の路上でさえ9割以上の装着率でしたが、6月に入ると目に見えてその割合は減少し、6月下旬には7割以下に。このまま夏を迎えれば装着率は5割を切り、真夏にはゼロに近づくと予想しましたが、見事にはずれて真夏の8月でも装着率はほぼ7割を維持したままでした。

7月に入り全国的な感染増加傾向に転じるとともにマスク装着率も再び増加し、GoTo Travel が始まった7月下旬には極大 (8割程度) を迎えました。その後 GoTo の影響か全国的にも愛媛でも感染者が増えていたにもかかわらず、8月に入ると気温の上昇に対応してマスク装着率は減少傾向に

転じ、8月下旬にはまた7割を切りました。気温が下がりはじめた9月になると装着率は増加に転じ、このままいくと11月半ばにはまた9割程度になると予想されます。

マスク装着率変動の波には色々な要因が考えられそうですが、愛媛県全体で微々たる感染者しか出ていない真夏でも、7~8割の装着率を維持していた結果には少々驚きました。大都市の市街地ならともかく、人が触れ合う距離に近づくこともなく、一時間にすれ違う数が100人程度という、感染リスクほぼゼロの松山の路上でさえこれですから驚きです。

半年近く調査して、気づいたことがいくつかあります。第一にマスクをしていない割合が圧倒的に高いのは、ラフな格好で自転車に乗っている高齢者です。また、着けない人は感染状況や気温に関係なく、一貫して着けていないようです。ちなみに全体的には、男女の差や年齢差はあまりないように思います。

ほぼ毎日、同じような時間・同じコースに出かけるので、不着用者の何人かは顔を覚えてしまいました。着けていない人にはつい厳しい視線を送ってしまうせいか、向こうもこちらを意識している気がします。知らず知らずのうちに、マスク着けているひとは「いい人」、そうでない人は「悪い人」と、一瞬で仕分けをしていることに気づきます。これがあの「自粛警察」の心境かと自戒しつつも、今後の推移を観察したいと思います。



## ◆ センターの構成 ◆

(R2.10.1現在)

### ❖ 超高压合成部門

入舩徹男 (特別荣誉教授)  
大藤弘明 (教授: 東北大学兼任)  
(R2.10.1-)

大内智博 (准教授)  
西 真之 (准教授)  
Steeve Gréaux (助教)  
國本健広 (特定研究員)  
Youmo Zhou (特定研究員)  
近藤 望 (特定研究員)

### ❖ 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)  
Sebastian Ritterbex (特定研究員)

### ❖ 物性測定部門

西原 遊 (教授) (R2.10.1-)  
河野義生 (准教授)  
境 毅 (准教授)

大平 格 (WPI研究員)

### ❖ 超高压材料科学部門

内藤俊雄 (教授: 理工学研究科兼任)  
松下正史 (教授: 理工学研究科兼任)  
石川史太郎 (准教授: 理工学研究科兼任)  
山本 貴 (准教授: 理工学研究科兼任)

### ❖ 教育研究高度化支援室 (連携部門)

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)  
白石千容 (研究補助員)

### ❖ 客員部門

客員教授 Yanbin Wang (シカゴ大学GSECARS 代表・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名誉教授)  
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 (東京大学名誉教授)  
客員教授 舟越賢一 (CROSS中性子科学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)  
客員教授 井上 徹 (広島大学大学院先進理工系科学研究科教授)  
客員准教授 丹下慶範 ((公財) 高輝度光科学研究センター回折・散乱推進室主幹研究員)  
客員准教授 西山宣正 (住友電気工業(株) アドバンストマテリアル研究所 所主席)

### ❖ 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

研究支援課・研究拠点第2チーム  
十河幸子 (副課長)  
和田まどか (事務職員)  
宮本菜津子 (事務補佐員)  
上田瑠美 (研究補助員)  
八城めぐみ (研究補助員)  
濱田愛子 (事務補佐員)



## ❖ 入船センター長が応用鉱物科学賞を受賞



応用鉱物科学賞は、鉱物科学の応用研究分野で顕著な研究業績をあげた者1名に、日本鉱物科学会から授与されています。本年度の受賞者としてGRCの入船センター長・教授が選出され、2020年9月18日(金)にオンラインで開催された同学会総会において賞状・副賞が授与されました。受賞題目は「ナノ多結晶ダイヤモンドの合成とその多様な科学研究・新材料創製への応用」であり、同教授が取り組んできたナノ多結晶ダイヤモンド(ヒメダイヤ)の合成と応用、また超高圧合成法を利用した多様な「透明ナノセラミックス」の合成が高く評価されたものです。

日本鉱物科学会は、それぞれ長い歴史を持つ日本鉱物学会と日本岩石鉱物鉱床学会が統合されて2007年に設立されました。入船教授は1998年に統合前の日本鉱物学会賞を受賞しており、初の学会賞と応用鉱物科学賞両賞の受賞者となります。

【参考HP】日本鉱物科学会(JAMS)  
<http://jams.la.coocan.jp/index.html>

## ❖ 「知の拠点」でGRC紹介動画公開



国立大学共同利用・共同研究拠点協議会(JURC)は、共同利用・共同研究拠点に認定された国立大学の附置研究所・センターによって結成され、現在79拠点から構成されています。JURCでは一般向けの短い動画「すぐわかアカデミア。」シリーズをホームページ上で公開し、各拠点が担う学術分野の動向や各拠点における研究成果を、広く一般の市民や学生にわかりやすく知っていただく機会を設けています。

GRC/PRIUSでは、その特色ある研究成果の一つである、ナノ多結晶ダイヤモンド(ヒメダイヤ)の合成についての動画「すぐにわかる世界一硬いダイヤモンドの作り方」を作成し、JURCホームページ及びYouTube上で8月21日に公開しました。動画は愛媛大学広報関係教員・学生のご協力を得て、非常にクオリティーの高いものに仕上がっており、10月末現在で公開されている14の動画の中でも突出して高い閲覧数が得られています。【YouTubeチャンネル:すぐわかアカデミア。】  
[https://www.youtube.com/channel/UCnrOC\\_fopoXZTGGgagIbHlg](https://www.youtube.com/channel/UCnrOC_fopoXZTGGgagIbHlg)

## ❖ JpGU-AGU 2020でオンラインセミナー



7月12日~19日にオンライン開催された、日本地球惑星科学連合(JpGU)とアメリカ地球物理学連合(AGU)の合同大会(JpGU-AGU Joint Meeting 2020)において、GRCではiPosterでGRC概要の説明・展示を行うとともに、7月12日(日)にはオンラインセミナーを開催しました。

セミナーはZoomによるラボツアーの形式で開始され、GRCがある総合研究棟や超高圧実験室の様子をリアルタイムで配信しました。その後、世界最大のマルチアンビル超高圧装置のある「創石実験室(Soseki Lab)」において、ダイヤモンドアンビル装置を用いた高圧氷を作る様子を示すとともに、ヒメダイヤでできた世界で最も硬い乳鉢を用いて、天然のダイヤモンドを粉末にする実演を行いました。セミナーには一般の参加者を含め多数の人がオンライン参加し、合計45分のセミナーの間に活発な質疑応答もおこなわれました。尚、セミナーの動画は下記のYouTubeにおいてご覧になることができます。

【GRCオンラインセミナー】  
<https://youtu.be/gUjJ77Mipku>

## ❖ 第4回GRCイメージコンテスト2020

GRC広報活動の促進のため、第4回GRCイメージコンテスト2020を開催いたします。今年はコロナ禍でGRC/PRIUSの活動が大きく制約されているため、それぞれの自粛期間中に撮影された写真・動画を含め、自由に題材を選んでいただいても構いません。また

今年の受賞作品の公開/非公開に関しては、プライバシーの観点などから受賞者ともご相談の上決定させていただきます。皆様、奮ってご応募ください!

主催：愛媛大学 GRC ホームページ委員会  
募集内容：GRC の皆さんでシェアしたい作品  
参加資格：不問。一人何点でも応募可。  
締切：年内を目途とし、詳細は未定。  
提出先：土屋旬 (junt@ehime-u.ac.jp)  
※詳細は GRC HP をご覧ください。  
<http://www.grc.ehime-u.ac.jp/>

.....

### ◆ 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)

##### 10月

10/30 “Thermal conductivity of Super Earth’s mantle”  
Dr. Haruhiko Dekura (Lecturer, GRC)

##### 11月

11/6 “Sound velocities of subducted basaltic crust in the deep mantle”  
Dr. Steeve Gréaux (Assistant Professor, GRC/ELSI-ES)

11/20 “Two-dimensional numerical experiments on thermal convection of highly compressible fluids with variable viscosity and thermal conductivity: Implications for mantle convection of super-Earths”  
Dr. Masanori Kameyama (Professor, GRC)

11/27 “A challenge to observe the process of faulting in rocks at high pressures”  
Dr. Tomohiro Ohuchi (Associate professor, GRC)

##### 12月

12/11 “Structural evolution of SiO<sub>2</sub> glass with Si coordination number greater than 6”  
Dr. Yoshio Kono (Associate Professor, GRC)

12/18 “Some recent advances in applications of NPD to high-pressure science and technology”  
Dr. Tetsuo Irifune (Professor, GRC/ELSI-ES)

##### 1月

1/8 “Numerical simulations on overriding plate behavior and mantle flow induced by slab subduction in 2-D spherical annulus”  
Ms. Mana Tsuchida (PhD. student, GRC)

1/22 “Thermal and chemical interactions between the core and mantle”  
Dr. Taku Tsuchiya (Professor, GRC/ELSI-ES)

#### ❖ 過去の講演

第532回 “New high-pressure phases in the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system: Phase relations and crystal structures”  
Dr. Youmo Zhou (Postdoctoral fellow, GRC) 2020. 7. 17

第533回 “Ultrahigh pressure structures of amorphous oxides investigated by the opposed type double-stage cell apparatus”  
Dr. Itaru Ohira (WPI Postdoctoral fellow, GRC/ELSI-ES) 2020. 7. 31

第534回 “Rheology of bcc-iron at high-pressure and high-temperature”  
Dr. Yu Nishihara (Professor, GRC) 2020. 10. 9

第535回 “First principles investigation of hydrous phases in Earth’s interiors”  
Dr. Jun Tsuchiya (Associate Professor, GRC/ELSI-ES) 2020. 10. 23

.....

### ◆ ALUMNI レポート② ◆

#### ❖ 広島大学大学院先進理工系科学研究科 教授、井上 徹



2017年4月から広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻(2020年4月から先進理工系科学研究科に改組)に異動しました井上です。急に異動が決まったこともあり、その後3年間弱愛媛大に指導学生を残していましたので、2020年3月までクロスアポイントメント教授として雇っていただいていた。昨年9月に最後の学生に博士号を授与でき、この4月に愛媛大退職ということになりましたので、ここにアルムナイレポートとして寄稿させていただきます。

私の愛媛大学との関わりは博士号取得直後の1994年4月、入船先生にお声がけいただき博士研究員として赴任したのが始まりでした。当時の入船研究室には高圧発生装置が1台のみであり、理学部棟1階の1スパンの狭い部屋に入っていました。その横が2スパンの実験準備室で、この部屋に大勢が集まり実験準備をしていました。このこじんまりした環境が当時としては居心地がよかったのを覚えています。実験室では当時の入船研の学生とよく話し、いまだに年賀状でやり取りを続けています。その後、約1年間のニューヨーク州立大学ストニーブルク校博士研究員を経て1996年10月から愛媛大理学部助手として採用していただき、20年以上もお世話になることになりました。地元でいた期間は高校卒業までの18年間でしたから、ここ松山が人生で一番長く生活した街となります。

愛媛大ではいい学生に恵まれ、この機会に数えてみると、博士7名、修士14名、学士38名の学生さんにそれぞれの学位を与えて送り出すことができました。一人一人とのいろいろ貴重な思い出がありますが、この紙面上では書ききれないのでまたの機会にさせていただきます。

ところで愛媛大で一番印象に残っているのは入船先生の研究室運営の凄さです。冒頭に書きましたように高圧発生装置1台の研究室から、研究センターGRCの設立、全国共同研究・共同利用研への認可と、傍目でGRCがどんどん大きくなっていくのを見てきました。今や“世界のGRC”であり、これほど充実した研究機関は国内外を見てもそれほど多くはありません。私は現在、広島大で超高压ラボ及び研究拠点を立ち上げていますが、その大変さに直面しています。3年経ってようやく超高压ラボが立ち上がってきましたがまだまだです。GRCには足元にも及びませんが、地に足をつけて焦らず地道に進めていきたいと思えます。広島大にお越しの際は是非お立ち寄りください。

最後に、コロナ禍のために活動が制限され、2020年3月退職の際にはGRCスタッフの皆さんにはきちんと挨拶ができていないままになっており失礼をしています。お許し下さい。GRCでは長い間本当にお世話になりました。この4月以降は客員教授にいただいていますし、コロナの影響が一段落すれば共同研究・共同利用でも学生を連れてお世話になります。今後ともよろしく願いいたします。



#### ❖ 台湾中央研究院地球科学研究所

研究員, Wei Sun

Study on sound velocity of mantle minerals is a powerful tool to understand the Earth interior, which is rapidly developed during recent few decades. The scientists of Geodynamics Research Center (GRC) have made enormous contributions to such in-situ sound velocity measurements using ultrasonic interferometry combined with synchrotron X-ray techniques and the multi-anvil apparatus, and GRC gradually grew into one of the most prestigious research centers of high-pressure Earth science. I've heard a lot about GRC when I was a PhD student of Institute for Study of the Earth's Interior in Okayama University. Therefore, after graduation in May, 2017, I was lucky to have an opportunity to be a member of GRC, and continued my high-pressure research as a WPI post-doctor.



During my three-years in GRC, Prof. Tetsuo Irifune, the authority on the sound velocity determination offered me much guidance and the other GRC members also greatly helped me to gain intensive and systematic knowledge in this field. Via cooperation with Prof. Steeve Gréaux and other GRC members, we determined sound velocities and densities of wadsleyite and hydrous ringwoodite at high temperatures and high pressures. Since wadsleyite and ringwoodite are thought to be the dominant minerals in the mantle transition region (MTR), our researches are very important to understand the constituent of the deep Earth interior and help us to acquire the iron and water contents in MTR. Because of superior facilities and excellent environment in GRC, I have achieved some success in my study and work. Our research progresses have been reported in many international conferences such as Goldschmidt conference and JpGU, and part of our results have already been published (Sun et al., 2018, EPSL; Sun et al., 2019, JGR). Besides scientific research, I also feel deeply indebted to administrators of GRC for all their kind help, because of which, my daily life in Matsuyama was homey and convenient.

I left Ehime on June, 2019 and found another

post-doctor position in Institute of Earth Sciences of Academia Sinica in Taipei of China. At present, I am making a cooperation with Prof. Wen-Pin Hsieh and try to determine the affection of iron and water on thermal conductivities of wadsleyite and ringwoodite via diamond anvil cell (DAC). Although their technique is quite different from the sound velocity measurements in GRC, our new topic is an important supplement to my Earth scientific research under a large background, which help us to lift the veil of MTR. It has been more than one year since I left GRC and Japan. I am really missing my friends in GRC and three-years life in Matsuyama. I hope in future I could do more collaboration with GRC members, especially after I return to mainland of China. However, because of COVID-19 virus, this year is difficult for the worldwide people. I sincerely wish the lives of all GRC members are fine and healthy, and pray the virus to vanish as soon as possible.

❖ Institute of Experimental Mineralogy,  
Russian Academy of Sciences  
Research scientist, Nadezda Chertkova

I was a research fellow at the Geodynamics Research Center (GRC) from May 2016 to May 2019. It was a great opportunity for me to get familiar with state-of-the-art experimental equipment, innovative techniques and, most importantly, outstanding people who helped me in my work and in my daily life throughout this period. At that time, I was working on the development of external heating system for the different types of diamond anvil cells, in order to achieve high experimental parameters (temperatures and pressures), corresponding to the upper mantle conditions, and to take



an advantage of monitoring the samples visually during heating and performing their analysis in situ. The adjustment of inner assemblies was done for the diamond anvil cells to obtain the strong infrared and

Raman signals during measurements directly at experimental conditions. Using developed methods and techniques, in situ spectroscopy of the C-O-H fluid species, coexisting with the silicate minerals of eclogite assembly, were performed in the stability field of diamond. During my work at GRC I enjoyed attending the “Core-Mantle Coevolution” international frontier seminars and the seminars given by GRC members and visitors. International conferences and seminars, which were held at GRC, gave me a chance to meet specialists from the various fields of science and to broaden my field of vision. At the same time, the help from research coordination and technical development office and administration of Ehime University made my research going smooth. I also highly appreciate support from GRC students and Japanese class teachers, which resulted in great improvement of my knowledge of Japanese language and working culture.

After returning back to Russia, I continued my work on technological developments for diamond anvil cell experiments under the guidance of Dr. Anna Spivak at the Mantle Laboratory of the Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences. Currently at my laboratory I am surrounded by the wonderful co-workers and experienced technicians, whose efforts and support were essential for the establishment of externally heated diamond anvil cell instrumentation combined with Raman spectroscopy at our institute. This progress would not be possible without technical knowledge and expertise that I was lucky to obtain in Japan. Installed equipment is unique for Russian laboratories and now we receive many offers for participation in the collaborative projects. The outbreak of the novel coronavirus (COVID-19) in Russia did not have much impact on our work, though we had to postpone international collaboration. Masks and gloves became a part of the daily life in Russia and are required at the shops (see photo) and on public transport.

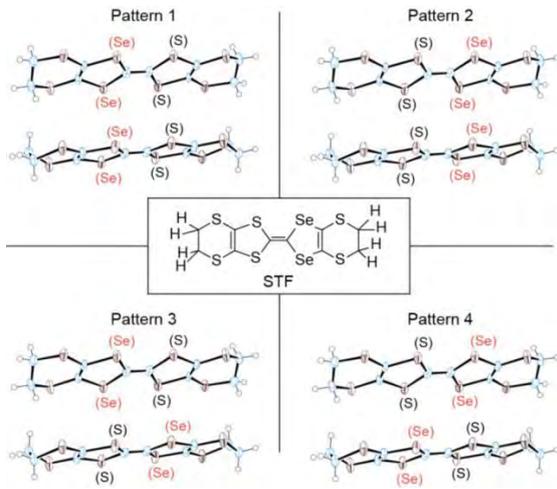
I was glad to know that my application for the Joint Usage/Research (PRIUS) at GRC was accepted this year. Unfortunately, the travel restrictions imposed around the world due to the COVID-19 pandemic situation are still in place. Russia was the first country to register a COVID-19 vaccine and hopefully international scientific cooperation in this

issue will help the humanity to overcome the challenge. I am looking forward to visiting GRC again and to continuation of collaborative research and scientific development worldwide.

◆ 最新の研究紹介 ◆

❖ 乱れを利用した“周期表にない元素”の実現

ここでは、分子が集まってできる結晶ならではの興味深い現象を紹介する。結晶というのは原則としてそれを構成するすべての原子が、縦、横、高さ方向に寸分の狂いもなく、決められた位置と順番で整列した塊である。今回紹介する結晶は大きさ 1 mm にも満たないが、そこに含まれる原子の数は 0 が 15 個から 20 個並ぶような、天文学的数字に上る。これだけ多数の原子が集まると、時々その並び方に手違いが生じることがある。実際に今回の例でも、その中の一組の原子の対（硫黄 S とセレン Se）だけは、ランダムに配列している（図）。これを“乱れ”という。乱れを含んだ結晶ができること自体は決して珍しくないが、我々が 30 年ほど前に合成した  $\alpha$ -STF<sub>2</sub>I<sub>3</sub> という物質が、今頃になって思わぬきっかけで脚光を浴びている。



$\alpha$ -STF<sub>2</sub>I<sub>3</sub> の構造を X 線で見ると、STF という有機分子と I<sub>3</sub><sup>-</sup> という無機イオンとが 2 : 1 で結晶を組んでいる。従って計算上、STF は +0.5 価、つまり電子が半分だけ欠けているという特殊な電子状態を取る。実際には電子は半分には割れないので、やむを得ず結晶中のすべての STF 分子でこの不足分を痛み分けすることになる。つまり全体のうち半分の STF 分子は +1 価 (STF<sup>+</sup>)、残りは中性 (0 価; STF<sup>0</sup>) になればよい。しかし電子を 1 個出すかどうかでその分子のエネルギーは大きく変わるため、誰が電子を出すかはそう簡単に話し合いがつかない。その結果、結晶中で絶えず STF<sup>0</sup> と

STF<sup>+</sup> とが入れ替わっている。実際には分子は動かないので、分子より遥かに軽くて小さい電子が動き回って所属先の STF を絶えず変えている。これは人間から見ると伝導電子に相当し、実際  $\alpha$ -STF<sub>2</sub>I<sub>3</sub> は（金属原子はどこにも入っていないが）例えばアルミニウムなどと同じく金属の性質を示す。

$\alpha$ -STF<sub>2</sub>I<sub>3</sub> の特徴は、硫黄原子とセレン原子が非常に似通っているため、分子がほぼ左右対称で、どちら向きに配列しても、できて来る結晶のエネルギーや体積はほとんど変わらないという点である。こうした場合はむしろ全くランダムに配列した方が、エネルギーが下がって安定になる。これが乱れの原因である。このように、伝導電子の所属先 (STF 分子) つまり電気の通り道に乱れがあると、通常は電気の流れをかなり深刻に邪魔するというのが、固体物理と物性化学の常識だった。しかし  $\alpha$ -STF<sub>2</sub>I<sub>3</sub> の場合、そのような傾向が見られない。その理由として硫黄とセレンの電子密度は完全に（厳密に）平均化されていることが、最近計算と実験両面から示された。言い換えれば、 $\alpha$ -STF<sub>2</sub>I<sub>3</sub> の結晶中では、周期表 (図) にはない硫黄とセレンの中間の元素が実現していることに相当する。乱れの典型的な検出法である (放射光で撮影した) X 線写真にも、散漫散乱が一切現れない。世の中で最小の原子 (水素原子) の 100 分の 1 の大きさまで見分ける X 線でも、 $\alpha$ -STF<sub>2</sub>I<sub>3</sub> 結晶中の硫黄とセレンの違いは見抜けなかった。このような電子状態は意外にも非常に安定で、広い温度範囲と圧力範囲で保たれている。有機合成等の通常の化学的手法ではもちろん、核融合でも実現できない“特殊な原子”を含んだ分子である。

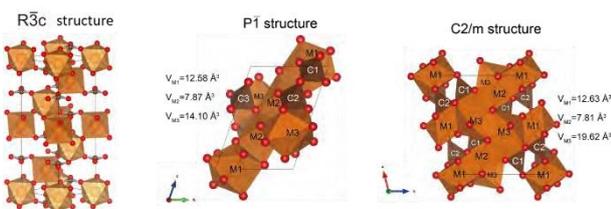
更に  $\alpha$ -STF<sub>2</sub>I<sub>3</sub> にはボーナスが付いた。この特殊な環境におかれた伝導電子が、いわば化学反応ならぬ“物理反応”を起こし、質量ゼロで光速に近い速度で動き回る特殊な粒子になっているという発見である。大昔にディラックという理論物理学者 (1933 年ノーベル物理学賞受賞) が予言し、おそらく多くの人が電波望遠鏡などを使って宇宙中を探したと推測されるが、我々はフラスコの中から顕微鏡で見つけた。高圧と磁場を掛けると、現在の固体物理の法則では説明のつかない奇妙で美しい電気特性を示すが、その話はまたの機会にさせて頂く。(内藤俊雄)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	L	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	A	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
				Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
	L	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
	A	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

## ❖ 鉄含有マグネサイト高圧相の第一原理計算

2016年から数年間、Deep Carbon Observatory (DCO 国際深部炭素観測計画)とよばれるプロジェクトにタスクフォース (TaskForce 2020) のメンバーとしてかかわる機会をいただきました。このDCOとは2009年から10年間、アメリカのスローン財団の資金提供によりカーネギー地球物理学研究所を中心とした世界各国の研究者が地球内部の炭素循環を追い求める巨大な研究プロジェクトです。二酸化炭素は温暖化の原因とされていますが、実は地球に存在する炭素のほとんどは地球内部に存在します。その炭素の地球内部循環について火山学、海洋学、生物学、鉱物学、地球化学、地球物理学など多岐にわたる研究者が学際的に研究を行うというものです。私自身は炭素の研究は最近行ってなかったのですが、このDCOが2019年に終わるため、これまでに築き上げたDCOの研究成果(Legacy)を2020年以降どのように展開するかについての助言を行うタスクフォースへ加わるよう依頼されました。とは言え、DCOの個々の活動についてはほとんど何も知らない状態で、年何回も行われる会議では完全にアウェーな雰囲気の中で、議論についていくのだけでもかなりハードでした。ですが、おかげで研究以外にも大型プロジェクトの運営やアウトリーチの方法(魅力的かつ壮大な映像資料やフルカラーの書籍)など学ぶことが多かったです。もちろん潤沢な資金があるからこそ出来るのですが…いつか何かの機会に活かせるといいなあ。

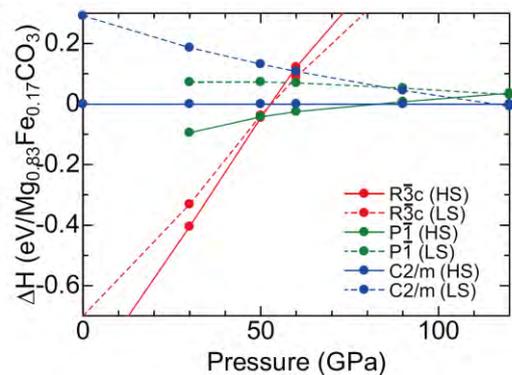
このDCOにかかわったのが理由ではありませんが、ちょうど2017年に研究室配属された学生さんが地球内部の炭素の循環に興味があるとのことで、卒業研究に選んだのが表題の鉄含有マグネサイトの研究です。上にも述べた通り、炭素の90%は地球内部に存在すると考えられています。地球深部において、炭素はダイヤモンドや炭酸塩鉱物のような状態で存在しています。炭酸塩鉱物として代表的なものは石灰岩に含まれるCaCO<sub>3</sub>カルサイト(方解石)やMgCO<sub>3</sub>マグネサイト(菱苦土鉱)です。このうち、高温高圧下で最も安定性が高いと考えられているのがマグネサイト(空間群R $\bar{3}c$ )です(図)。MgO<sub>6</sub>八面体と炭酸塩鉱物に特徴的な平面



3配位したCO<sub>3</sub>から成る結晶構造を持っています。一般的に、圧力誘起結晶構造相転移では陽イオン配位数が増加することが多く、マグネサイトにおいては60~80 GPaで、この平面3配位構造がCO<sub>4</sub>

四面体をもつ結晶構造(空間群P $\bar{1}$ およびC2/m)へと相転移することが理論および実験において報告されています。

我々が興味を持ったのは、この一連のマグネサイトの構造相転移において、鉄が含まれた場合どのような影響があるかについてです。炭酸塩鉱物はマントル主要構成鉱物に比較して密度が小さいのですが、鉄を含むことによってマントル内部においても重力的安定性の増加が見込まれます。さらに、高圧下では鉄含有マグネサイトにおいて高スピンから低スピンへのスピン転移が起き、それがマグネサイトの構造安定性に寄与する可能性も指摘されています。そこで、鉄のスピン状態を適切に取り扱うため内部無撞着LDA+U法と呼ばれる手法を用いて鉄含有マグネサイトの高圧相の第一原理電子状態計算を行いました。



鉄を含有しないマグネサイトは約60 GPaでP $\bar{1}$ 構造、さらに80 GPaでC2/m構造へと相転移します。今回、鉄を17%含むマグネサイトでは、50 GPaで高スピンの鉄を含むP $\bar{1}$ 構造、さらに80 GPaで同じく高スピン鉄を含むC2/m構造へ相転移し、相転移圧力自体は鉄を含まない系とそれほど大きく変化しない結果が得られました。また2つの高圧相はいずれも低スピンではなく、高スピンの状態が安定であることを示しています。これは、先にも述べたように、相転移による陽イオン配位数の増加が原因で、配位多面体の体積が大きいためイオン半径の小さい低スピンよりも高スピン状態のほうが安定化したためだと考えられます。

この論文は、ボブさん(Bob Liebermann)の編集によるMinerals-Orson Anderson追悼号(Tsuchiya et al. (2020) Minerals, vol. 10, 54, doi:10.3390/min10010054)において発表されました。論文共著の卒業生にも久しぶりに連絡をとりましたが、元気にやっていることを知りうれしく思いました。(土屋 旬)

## ❖ Does the Earth's inner core oscillate and translate anomalously?

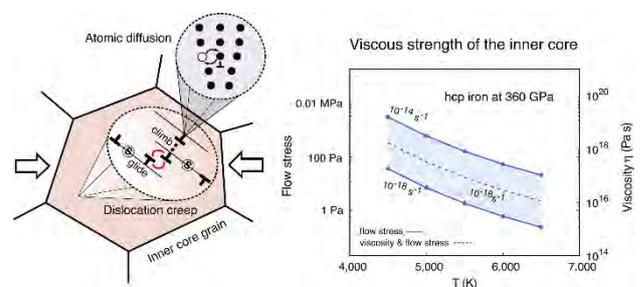
In a recently published study in Scientific Reports (Ritterbex & Tsuchiya 2020, 10, 6311),

I have employed a theoretical mineral physics approach to predict for the first time the viscosity of hexagonal close packed iron at the extreme pressure and temperature conditions of Earth's inner core in collaboration with the Theoretical Mineral Physics Group at the Geodynamics Research Center, Ehime University.

The Earth's inner core, hidden 5150 km below our feet, is primarily composed of solid iron and is exposed to pressures which are  $\sim 3.3$  to 3.6 million times that of atmospheric pressure and to temperatures of  $\sim 5000$ –6000 K, corresponding to the surface temperature of the Sun. From seismological observations, we know that seismic waves travelling through the inner core show a strong directional dependence, a phenomenon known as “seismic anisotropy”. This is likely due to the alignment of the iron crystals, something that could result from the deformation inside the inner core. More specific variations in seismic anisotropy between the eastern and western inner core hemispheres have also been reported. Other seismic studies furthermore suggest distinct fluctuations in the inner core rotation rate with respect to that of the Earth's crust and mantle. Although previous geodynamic modeling studies predict that the hemispherical asymmetry of the seismic anisotropy structure can be explained by a translational motion of the inner core and that variations in the length of day can be explained by the gravitational coupling between the mantle and a weak inner core, the causes and mechanisms of these enigmatic features remain unclear because these modeling studies rely on the poorly constrained mechanical strength of iron at the extreme conditions of the Earth's center.

This mechanical strength depends on the ability of minerals to undergo slow plastic deformation in response to small mechanical stresses, called “creep”, typically described by a parameter known as “viscosity”. Creep of crystals is accommodated by the motion of imperfect arrangements of atoms in the crystal structures called “lattice defects” and is particularly limited by atomic diffusion under the extreme conditions of the inner core. Such conditions impose technical difficulties to laboratory experiments that makes measurements of the inner core viscosity currently impossible. Instead, I applied atomic scale computer simulations

based on quantum mechanics theory, called the *ab initio* methods, to quantify atomic diffusion in hexagonal close packed (hcp) iron, the most likely phase of iron stable in the inner core. This theoretical mineral physics approach is able to predict electronic structure and chemical bonding highly accurately and is thus a quite powerful tool in investigating material properties at extreme conditions which are difficult to handle by experiments. In this study, the technique was applied to compute iron self-diffusion behavior through the formation and migration of point defects. Results are applied to microphysical models of intracrystalline plasticity to compute the rate-limiting creep behavior of hcp iron numerically. The modeling provides evidence that the viscosity of hcp iron is lower than assumed in previous geodynamic studies and is determined by the transport of shear through the crystal lattice, a plastic deformation mechanism known as “dislocation creep”, which can lead to the formation of crystallographic preferred orientations (see figure). This suggests that plastic flow of hcp iron might contribute to the crystal alignment and thus to the seismic anisotropy observed in the inner core.



The results are able to shed new light on the enigmatic properties of the inner core. It is demonstrated that the low viscosity of hcp iron derived from the theoretical mineral physics approach is consistent with a strong gravitational coupling between the inner core and mantle compatible with geodetic observations of small fluctuations in the inner core rotation rate. The results furthermore predict that the inner core is too weak to undergo translational motion, meaning that the hemispherical asymmetric anisotropy structure is likely to have another, yet unknown, origin. Instead, mechanical stresses of tens of Pa are sufficient to deform hcp iron by dislocation

creep at extremely low strain rates, comparable to the candidate forces able to drive inner core convection. The associated viscosity is not a constant but instead depends on the mechanical stress applied to the inner core, a behavior known as “non-Newtonian rheology”. This non-linear deformation behavior is thus expected to govern the dynamics of the Earth’s inner core. Future incorporation of the rheological properties of hcp iron derived in this study in geodynamic modeling will enhance our understanding of the growth, dynamics and evolution of Earth’s inner core. (Sebastian Ritterbex)



## ▼ センター機器紹介 ▼

### ❖ 電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM)



本装置（日本電子製 IT-500HR）は、主に高压実験後の回収試料の微細組織観察や鉱物相の同定、化学組成分析を行うための装置で、2020年3月に当センターに納入・設置されました。GRCでは2005年に導入した同タイプの装置（同社製 JSM-7000F、EDS および EBSD 検出器付き）が長らく主力装置として務め、これまで多くの先端研究の推進に貢献してきましたが、老朽化により真空系や操作系、電子銃周りなど故障が頻発し、ここ数年は修理対応に追われる状況でした。加えて、平成25年に共同利用・共同研究拠点（PRIUS）がスタートして以来、国内外の研究者からの使用要請も多く、GRC 学生の卒論・修論研究が本格化する年度後半などは予約がかなり混雑している状況でした。SEM-EDS による微細組織観察と化学組成分析は、X 線回折やラマン分光分析などと並んで、高压合成試料のキャラクタリゼーションを行う上で、今や最も基本的かつ必須のルーチンであるため、実質的な後継として本装置を導入するに至りました。

今回導入した日本電子製の IT-500HR は同社が展開する JSM-7000 シリーズの下位に位置するエントリークラスの FE-SEM ですが、たいへん操作性が良く、十分な性能を有しています。元々フィラ

メントタイプの電子銃を備えた通常の SEM (IT-500) の鏡筒周りや真空系をアップグレードして電界放出 (FE) 電子銃を搭載したモデルで、GRC で博士号を取得し、現在は日本電子 (株) の SEM アプリグループで働いている小島洋平さんにもお薦めいただきました。FE 電子銃よりつくられる電子プローブは極めて細く、加速電圧 30 kV で 1.5 nm という高い分解能を有し、水分を含む試料や表面に帯電防止蒸着を施していない試料も観察可能な低真空モードも備えています。操作系のインターフェースも（これまで GRC でメインに使用してきた JSM-7000F と比べると）今風のスタイルに刷新されており、タッチ対応モニターを介したタッチ操作も可能です (図)。分析前に備え付けの CCD カメラで撮影した光学像と高倍の SEM 像をシンクロ・リンクさせる Zeromag (ゼロマグ) という大変便利な機能も備わっており、ステージ上での試料位置やターゲット部位を光学像で確認しながら、倍率ダイヤルを回すだけでそのままシームレスに高倍の SEM 観察へと移れるのは、かなりの時短、効率化に繋がります。

EDS (エネルギー分散 X 線分光装置) も既設のフィラメント型 SEM についていたオックスフォード・インストゥルメンツ社製の X-Max+Aztec システムを移設したので、これまでメインで使用してきた FE-SEM とほぼ同様、同水準で局所化学組成分析が可能です。また、SEM 装置本体には EBSD (後方散乱電子線回折) 検出器や CL (カソードルミネセンス) 検出器などを追加するための拡張ポートも備わっており、将来的に機能を拡張することも可能です (予算次第ですが)。

本装置の導入により、GRC が推進してきた高压実験と回収試料の分析に基づく高压地球科学研究のさらなる進展や、ヒメダイヤ研究の応用から生み出されたナノ多結晶セラミクスや関連機能性材料開発の新展開が期待され、また、共同利用・共同研究 (PRIUS) 課題においても主力装置として活躍してくれることと思います。(大藤弘明)



## 共同利用・共同研究拠点 (PRIUS)

### ❖ PRIUS 利用者の声



茨城県東海村にあるパルス中性子源 J-PARC に高圧ビームライン PLANET が設置され、高圧下における中性子回折実験が行われるようになりました。中性子は水素を含む軽元素の観察が可能であり、X線と

相補的な関係を持つ強力な実験手法です。一方で、回折中性子の強度が弱いというデメリットがあり、それを補うために大容量の試料の確保や開口角の確保を行う必要があります。現在の主な実験方法は、開口角を確保するためにマルチアンビル (MA) 6-6 式を用いて行われており、12 GPa、2000 K までの実験がルーチン的に行うことが可能になっています。一方で、それ以上の圧力は MA6-8 式で行うことが試みられています。

私たちは、中性子回折実験の可能な温度圧力範囲を広げるために MA6-8 式の高圧セル構成の最適化を PRIUS を利用させていただき行っています。特に大容量の試料を確保しながら高温高圧を発生させるためにヒーターやガスケットサイズを変更させながら試行錯誤で実験を行わせていただいています。現在までに MA6-8 を用いて 12 GPa、1000 K までの条件でリートベルト解析に耐えうるデータの取得に成功しています。発生圧力の拡大には至っていませんが、大容量の試料を確保することで MA6-6 式よりも高強度の回折中性子の取得が可能になりました。これにより高温高圧下における hcp 相の鉄水素化物中の水素量・水素位置・水素化に伴う体積膨張率の決定を行うことができました。これらを用いることで高温高圧下での水素量を X 線でも決定することが可能になり、hcp 相の鉄水素化物の安定領域や相図の決定を迅速に行うことが可能になりました。

愛媛大学 GRC での実験では新名さんをはじめ GRC のスタッフの皆様が大変お世話になっております。この場を借りてお礼申し上げます。私事ですが、この4月に東京大学地殻化学実験施設から広島大学に異動しました。広島大学には学習院大学の赤荻先生から譲り受けた 600 ton のマルチアンビル型高圧発生装置 (MAPLE600) が設置されましたが、大容量試料合成や分析装置を今後とも使用させていただきたくと幸いです。新型コロナウイルスの影響で GRC に行ける機会が少なくなりましたが、こ

れからもどうぞよろしく申し上げます。(柿澤翔：広島大学大学院先進理工系科学研究科助教)

### ❖ PRIUS 利用者の声

この4月に GRC から九大に移りましたが、現在も引き続き PRIUS にて GRC の方々や装置にお世話になっております。振り返ってみると、GRC 所属となる前の横浜国大にいた際から PRIUS では大変お世話になっており、私の研究活動において重要な存在となっております。特にこの度のコロナ禍では、“リモート実験”という形にて8月にマルチアンビル高圧発生装置 ORANGE-3000 を福岡にいながら利用させて頂きました。そこで今回のこの来所を伴わない PRIUS 利用について、ご対応頂いた方々へ感謝申し上げますと共に、実際に行いましたリモート実験の様子について少しお伝えさせていただきたいと思えます。



元々私は8月上旬に PRIUS を利用して GRC に来所し、ORANGE-3000 を使い変形実験のための出発物質を焼結する予定でした。しかしながら7月後半から全国的に新型コロナウイルス感染の第二波に見舞われ、予定していた PRIUS 来所についても受入れが見送られることになった中、リモート実験という形で(更に当初実験を予定していた日と同じ日に)装置を利用させてもらえるという大変有難いご連絡を受けました。このリモート実験では、組んだセルのセットや装置の操作そのものは代行して頂くものの、加圧中のログをリアルタイムで手元の PC 画面で確認でき、加熱プログラムについては自ら遠隔で操作可能とのことでした。このような実験様式は PRIUS ご担当の方々にとっても今回が初めての試みと聞きましたが、事前の PC 操作テストや当日の流れ確認などを念入りに行って頂きまして、当日は回線落ち(私の方の通信環境の問題による)等もありましたが最後まで無事に実験を終えることができました。後日、回収試料は郵送で送っていただき、現在は実験試料としてさっそく

使っております。今回のこのリモート実験を行うにあたり、こちらでは用意できないパーツ類を準備していただきました河田様、遠隔操作のための通信環境等を整えていただきました新名様、実際に装置の操作をして頂きました大内先生にはこの場をお借りして特に感謝申し上げます。

現在はPRIUS来所の受入れが再開したことで、今度は主に透過型電子顕微鏡の利用のためにPRIUSでまたお世話になっております。今後ともどうぞ

よろしくお願ひ致します。

(坪川祐美子：九州大学大学院理学研究院助教)

編集後記：PRIUSにおける共同利用も受け入れを再開するとともに、リモート実験・代理実験など様々な取り組みを開始しています。詳細はGRCスタッフにご相談ください (T. I & Y. M.)。