GRC News Letter

2015.7.20　No.42

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

センター長あいさつ

入舩　徹男

全米60拠点が参加する地球深部科学コンソーシアムCOMPRESの招聘により、その年会及び直前のワークショップにおいて基調講演を行いました。GRCの大型超高圧合成装置BOTCHANとヒメダイヤの成功は海外でも広く知られ、中国やヨーロッパで同様の大型装置の導入が進んでいます。COMPRESでも大型高圧装置導入の検討が始まっており、多くの質問が出されるとともにアドバイスを求められました。

COMPRES年会での講演導入部では、我が国の高圧鉱物物性のルーツが京大にあり、深発地震を予測した志田順と地磁気の反転を見出した松山基範により、約100年前に大型高圧装置が京大に初めて設置されたことを話しました。松山の弟子である川井直人先生(当時大阪大学教授)が開発した、2段加圧式マルチアンビル装置の基本原理は、BOTCHANをはじめ世界の多くの大型高圧装置において採用されています。

高圧地球科学の黎明期については、今年1月に岩波書店から出版された「地球科学の開拓者たち」（諏訪兼位・名古屋大学名誉教授著）に詳しく述べられています。上記のマルチアンビル装置は、Kawai-type Multianvil Apparatus (KMA)として世界で広く知られていますが、諏訪先生のこの本では、幕末から現在に至る我が国の地球科学者の独創的な研究と人物が詳しく紹介されています。

コロラドで開催されたCOMPRES会議に引き続き、カリフォルニアの小さな町にある米国宝石学研究所（GIA）で、講演と共同研究の打ち合わせを行いました。GIAは宝石学の研究と教育の機関であるとともに、世界で最も権威あるダイヤモンド鑑定機関としても有名です。GIA本部は、多くの警備員や何重もの扉と多数の監視カメラで厳重に管理されていましたが、その一角にテトラヘドラルアンビル型高圧装置（写真）が飾られていました。

この装置は､約60年前に初めてダイヤモンドの高圧合成を報告したTracy Hallにより考案されたものです。我が国でも東大物性研において秋本俊一先生らにより、これを原型とした独自の装置が開発され、高圧地球科学において多大な成果をあげてきました。前述の京大の高圧装置は学生時代に見た記憶がありますが、思いがけずテトラヘドラル型装置の初期モデルを目にすることができ、感慨深いものがありました。

高圧地球科学に限らず、実験分野において新しい装置や技術の開発は、研究の最先端を切り拓く上で欠かせません。新しい装置の原理や機構の発明もさることながら、これに様々な工夫を加え、より高度な機能を有する装置へと改良することや、

それを使いこなすための技術の開発も大切です。我が国の高圧地球科学が世界をリードしてきたのも、先人たちのそのような努力の結果であると感じています。

折しも、高圧地球科学分野を中核とした大型科研費「新学術領域研究」（領域代表：土屋卓久 GRC 教授）が採択されたという、嬉しいニュースが飛び込んできました。私もこの中で高圧技術の開発を担当する計画研究の代表者として、領域研究に参画させていただく予定です。特にヒメダイヤを利用した新しい超高圧実験技術の開発により、次世代の地球深部科学の新しい展開に対して、少しでも貢献できればと思っています。

センターの構成

（H27.7.1現在）

❖ 超高圧合成部門

入舩徹男（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）
Vincenzo Stagno（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）

入舩徹男（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）

NEWS＆EVENTS

❖ 入舩センター長が紫綬褒章を受章

平成 27 年春の褒章に入舩徹男 GRC センター長が紫綬褒章を受章しました。愛媛大学からは平成 23 年度に受章された、田辺信介沿岸環境科学研究センター教授に続いて 2 人目の受章者となります。

今回は作家の浅田次郎氏、歌手の谷村新司氏など17名が受章し、平成27年5月15日（金）に伝達式及び皇居における拝謁が行われました。入舩センター長はこれに先立つ2月19日に、亀山郁夫名古屋外国語大学学長・新井紀子国立情報学研究所教授とともに御所での両陛下との懇談会にも参加しました。

会見する大橋学長（左）と入舩センター長（右）

❖ 市川研究員が文部科学大臣表彰科学技術賞受賞

市川浩樹WPI研究員は、齊藤昭則准教授・小田木洋子研究支援推進員（ともに京都大学大学院理学研究科）、津川卓也プランニングマネージャー（情報通信研究機構）、西憲敬准教授（福岡大学理学部）と共同での「デジタル立体地球儀を用いた地球惑星科学の理解増進」の取り組みにより、平成27年度科学技術分野の文部科学大臣表彰「科学技術賞（理解増進部門）」を受賞しました。

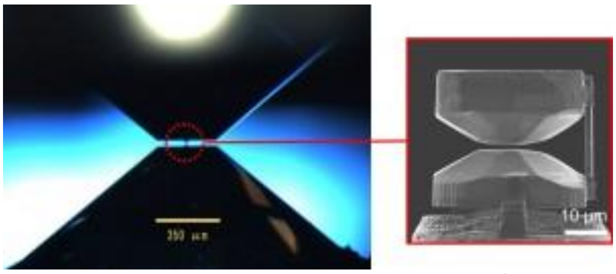
今回の受賞は、デジタル立体地球儀（ダジック・アース）による地球惑星科学の啓発活動が高く評価されたものです。ダジック・アースに地球等の球面上のデータを球面スクリーンに投影するシステムで、小中高校や科学館等で広く使われています。市川WPI研究員は、数値計算部門の亀山真典准教授や土屋卓久教授らと地球深部のダイナミクスに関する研究を進めており、受賞対象となった活動においては、特にダジック・アースに使われている画像処理ソフトウェアの作成に貢献しました。

津川氏（左）、小田木氏（中）、市川氏（右）

❖ 境助教らの論文がRev. Sci. Instrum.誌のEditor's Picksに選出

GRCの境毅助教、八木健彦客員教授、大藤弘明准教授、入舩徹男教授らの論文が、米国物理学協会（AIP）が発行する専門誌Review of Scientific Instrumentsの編集部が選考するEditor's Picks論文に選出されました。この雑誌に発表される年間約1000編の研究論文のうち、特に注目すべき論文として年間30編程度の論文がEditor'sPicksとして選出されます。2015年1月～3月期に発表された論文のうち、境助教らの論文を含む5編の論文が該当論文として発表されました。

境助教らは、GRCで開発されたヒメダイヤや単結晶ダイヤモンドを、最新の集束イオンビーム（FIB）加工装置を用いて数十ミクロン程度の超小型アンビルに加工しました。これを用いて「2段加圧式ダイヤモンドアンビル装置」を開発し、300万気圧を越える超高圧力を高い再現性で発生させることに成功しました。今後この手法やヒメダイヤの改良により、1000万気圧領域の発生も目指しています。



実験に用いられたマイクロアンビル

❖ 土屋教授らがNature Geosci.に論文発表

GRCの王賢龍研究員（現中国科学院准教授）、土屋卓久教授、長谷淳史大学院生らの研究グループは、地球マントル深部の高温高圧条件下における鉱物の地震波速度を世界で初めて詳細に計算し、下部マントルの化学組成に重要な制約を与えました。

土屋教授らは，量子力学の基本原理にもとづいて物質の化学結合をシミュレートする第一原理電子状態計算法に基づき、種々の下部マントル物質の弾性特性を圧力や温度の関数としてできるだけ精度よく計算し、地震波速度や密度の観測値をよく再現する岩石モデルの探索を行いました。その結果、ブリッジマナイトと呼ばれる鉱物とフェロペリクレースと呼ばれる鉱物がおよそ8対2の体積比で混合したパイロラ

イトが地震波の観測に基づく地震波速度・密度モデルを最もよく再現することが分かりました。この研究成果は 2015 年 6 月 15 日付の Nature Ggeoscience 誌電子版にて公開されています。(X. Wang, T. Tsuchiya and A. Hase, Nature Geoscience, doi:10.1038/ngeo2458, 2015)

❖ 新学術領域研究が採択

平成 27 年度大型科学研究費「新学術領域研究（研究領域提案型）」の公募において、GRC の土屋卓久教授を領域代表とする「核ーマントルの相互作用と共進化〜統合的地球深部科学の創成〜」の採択が決定されました。今回採択された領域研究では、理論計算、化学分析、物理観測、物性測定に関連した 8 つの計画研究班が組織され、我が国の 13 の大学･研究機関から約 50 名の参加を得て、地球中心部の核とマントルの相互作用と共進化の解明を通じ、新たな段階の統合的な地球深部科学の創成を目指しています。

GRC からは、土屋教授が領域代表及び理論分野の計画研究代表を務めるとともに、入舩徹男センター長が高圧実験分野の計画研究代表を務めるなど、本領域研究において中心的な役割を果たしています。本領域は「物理学、化学、宇宙・地球科学、工学」分野で 85 件あった応募から、厳しい書面審査・ヒアリングを経て採択された 8 件の中の 1 件で、地球科学分野からは唯一選出されました。愛媛大学の研究者を領域代表とした新学術領域研究が採択されるのは初の快挙であり、平成 27 年度〜31 年度の 5 年間に渡り、地球深部の核とマントルを主な対象とした先端的研究が推進される予定です（内定予算額は直接経費で総額約 11 億円）。なお、本領域では公募研究を募集します。後日詳細な公募内容が告知されますので、関連情報にご注目下さい。

❖ 新学術領域研究キックオフシンポジウム

核ーマントルの相互作用と共進化　〜統合的地球深部科学の創成〜

日時：2015 年 8 月 7 日（金）13：00〜17：45
　　　　　　8 月 8 日（土） 9：00〜14：15
　　　懇親会 8 月 7 日（金）18：00〜20：00

13:00-13:10 開会の挨拶（土屋卓久）

【研究項目 A01　物性測定】
13:15-14:05
　計画研究 1：ダイナミクス班（班長 芳野極）
　　「核-マントルの動的挙動」の概要他
14:05-14:55
　計画研究 2：構造物性班（班長 鈴木昭夫）
　　「核マントル境界の物質の構造と物性」の概要他
15:15-16:05
　計画研究 3：技術開発班（班長 入舩徹男）
　　「核ーマントル物質の精密高圧実験技術の開発」の概要他
【研究項目 A02 化学分析】
16:05-16:55
　計画研究 4：同位体班（班長 鈴木勝彦）
　　「同位体から制約する核-マントル共進化」の概要他
16:55-17:45
　計画研究 5：元素分配班（班長 M. Satish-Kumar）
　　「元素分配から制約する核ーマントルの相互作用」の概要他

18:00-20:00 懇親会［会場: セトリアン］

8/8（土）
9:00-10:00
　基調講演: Prof. William McDonough
　　「Nature, evolution, and origin of the Core and Mantle:Future prospects for understanding the Deep Earth」

【研究項目 A03 物理観測】
10:15-11:05
　計画研究6:地震･電磁気観測班（班長 田中聡）
　　「核-マントルの地震･電磁気観測」の概要他
11:05-11:55
　計画研究 7:ニュートリノ観測班（班長 田中宏幸）
　「ニュートリノ観測から制約する核ーマントルの化学組成」の概要

【研究項目 A04 理論計算】
13:15-14:05
　計画研究 8:物性理論計算班（班長 土屋卓久）
　　「地球内部境界層物質の物理・化学特性の理論と計算」の概要他

14:05-14:15 閉会の挨拶（入舩徹男）

14:30-16：00 総括班会議（4FGRC 小会議室）

❖ 国際フロンティアセミナー

第53回

"Sound velocities by single - crystal Brillouin spectroscopy with laser heating and variable q: Design and results on olivine"
講演者：Prof. Jay Bass (COMPRES and Univ. of Illinois Urbana-Champaign, USA)

"3D - FIB techniques for analysis of meteorites and high - pressure samples"
講演者:Prof. Bruno Reynard (ENS Lyon, France)
日　時：2015年6月1日（水）16:30-18:30

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）

７月

7/24 "Stability region of the liebermannite-lingunite solid solution"
Youmo Zhou (Ph.D. Student, Ehime University)

7/31 (Advanced Science Seminar)
"Linear analysis on the onset of thermal convection of highly compressible fluids with variable physical properties: Implications for the mantle convection of super-Earths"
Dr. Masanori Kameyama (Associate Professor, GRC)

❖ 過去の講演

第411回 (Advanced Science Seminar)
"Making transparent nano-polycrystalline ceramics with large-volume multianvil apparatus"
Dr. Tetsuo Irifune (Professor, ELSI-ES, GRC) 2015.04.10

第412回 (Advanced Science Seminar)
"Growth kinetics of forsterite reaction rim at high-pressure"
Dr. Yu Nishihara (Associate Professor, GRC) 2015.04.24

第413回 "High pressure experimental studies on Tagish Lake Meteorite - Contribution of volatile rich material to the Earth's accretion"
Dr. Wei Du (Postdoctral Researcher, ELSI-ES, GRC) 2015.05.08

第414回 "Applications of nano-polycrystalline diamond to anvil materials for multianvil apparatus"
Dr. Takehiro Kunimoto (Postdoctral Researcher, GRC) 2015.05.22

第415回 "Phase behavior of tetracyanoethylene under high pressure and high temperature"
Dr. Yohei Kojima (Postdoctral Researcher, GRC) 2015.06.05

第416回 (Advanced Science Seminar)
"Ab initio modeling on the structure and dynamics o Fgrain boundary"
Dr. Taku Tsuchiya (Professor, ELSI-ES, GRC) 2015.06.12

第417回"Phase equilibria, elastic properties of $MgSiO_3$-Al_2O_3 system in Earth's interior"
Zhaodong Liu (Ph.D. student, Ehime University) 2015.06.19

第418回"Redox melting in the Earth's lower mantle: implications for the presence of low seismic velocity anomalies"
Dr. Vincenzo Stagno (Postdoctral Researcher, ELSI-ES, GRC) 2015.06.26

第419回"Experimental study of Al,Fe-bearing phase H"
Dr. Masayuki Nishi (Assistant Professor, GRC) 2015.07.03

第420回"Discovery of a new Al-bearing hydrous phase (23 Å phase) and some implications to the deep earth"
Nao Cai (Ph.D. student, Ehime University) 2015.07.10

第421回 "Technical developments on acoustic emissions monitoring at high pressures"
Dr. Tomohiro Ohuchi (Assistant Professor, GRC) 2015.07.17

インターンシップ報告

❖ Synthesis and ultrasonic measurement on hydrous coesite and stishovite

My name is Ting Chen, a third-year graduate student at Stony Brook University in Prof. Baosheng Li's group. My interest is in the measurements of the physical properties of minerals in the subducting oceanic crust and the underlying depleted lithosphere, which can provide insights into the thermal structure, composition and dynamics of the subducted plate. In particular, I am studying the elastic properties of coesite and its high-pressure polymorph stishovite, one of the main constituents of the subducting oceanic crust, at high pressure and temperature conditions relevant to the subduction zone using ultrasonic method in multi-anvil apparatus. In this PRIUS project, I will synthesize hydrous polycrystalline coesite and stishovite samples, characterize their grain size and texture, measure the water content followed by the sound wave velocity measurements. In this way, we can quantify the water effect on the elastic properties of coesite and stishovite, so as to evaluate the effects of this phase transformation on the X-discontinuity and explore their roles in transporting water into the deep mantle in the subduction zone.

I will stay in GRC for about three months. Besides from research, I also enjoy living in Matsuyama. The food, culture, and the badminton time on the weekend with my friends all give me a good time. And the view of the sunset on the mountain in Matsuyama castle is especially amazingly beautiful. I am sure I will have a fruitful and unforgettable time here. (Ting Chen, Graduate student at Stony Brook University)

海外出張報告

❖ Toward a better understanding of the Deep Carbon Cycle

The Deep Carbon Observatory Thematic Institute entitled "Carbon from the Mantle to the Surface" was held in Berkeley (California, USA) in July 1-3, 2015. The goal of this Thematic Institute was to integrate efforts between distinct scientific fields studying the speciation and fluxes of carbon in Earth in order to address the long-term fate of carbon in our planet and build up a model for fluxes and uncertainties that can address one of DCO's decadal goals: "Is the net flux of carbon into or out of Earth?". This 3-day workshop at UC Berkeley brought together about 50 researchers and young scientists (Figure) from all over the world with broad representation in geochemistry, experimental petrology, volcanology, geodynamics, thermodynamics, geophysics, paleoclimate and geology.

How many times watching TV documentaries on Earth's volcanoes and fumaroles (if not standing in front of a real one!), or dropping an eye on someone's shining diamond ring or, again, when filling the tank up with gas the following questions crossed our mind: Where have all these forms of carbon been originated in the Earth? How much carbon is likely to be stored in the interior for which we do not know anything about? Can, indeed, this carbon be relevant for our daily life such as by affecting the weather, the quality of the air we breathe, the survivability of living beings, etc...etc...??!

Among all the volatile elements present in geological contexts (hydrogen, nitrogen, sulfur, oxygen, etc...) *carbon* is the most interesting one as it likes to occur in different forms such as solid carbonate minerals (calcite, dolomite, etc...), magmas (kimberlites, carbonatites, etc...), diamond and graphite, organic compounds (for instance, hydrocarbons), carbides and many other forms.

Through geological time carbon has come out the Earth (outputs, e.g. volcanism) and returned back into the interior (inputs, e.g. subduction) after being removed from the atmosphere and biosphere via rock weathering reactions, carbonate precipitation, and settling of shells and organic matter onto the seafloor to form marine sediments. Yet, even the most approximate estimates suggest that there is some carbon stored at depth greater than 660 km down into inner core that sporadically can become mobile and reach the surface where cyclically interact with oceans, atmosphere and life.

To date there have been attempts to quantify C fluxes into subduction zones, CO2 emissions from volcanoes and seismically active areas, and the balance of different carbon reservoirs. However, neither the extent of each reservoir nor the mechanisms that control how and when carbon becomes mobile remained poorly constrained.

This DCO-Thematic Institute gave voice to the effort that many scientists including myself have been making to date to explore these processes and try to improve the common understanding of the Deep Carbon Cycle. (Vincenzo Stagno)

ALUMNI レポート⑦

❖ 岡山大学地球物質科学研究センター
准教授　山崎大輔

2002 年の 1 月か 2 月に東大物性研八木研究室の実験室に電話がありました。内容は、愛媛大 GRC の助手への採用内定通知でした。嬉しかった記憶があります。この採用に至ったポイントは、入舩先生と私の面識がそんなに（ほとんど）無かったことだと思います。赴任のため、3 月末日に、東京から車で愛媛に向かいました。瀬戸大橋を渡って讃岐に入ったときの驚きは今でも覚えております。山の形状が今まで慣れ親しんだ関東・東北・北海道と異なっていたのです。また、愛媛大学に着いたときには、構内に植わっている蘇鉄の木を目にし、南国気分が醸し出されました。異境の地へ来たもんだと思いました。

着任当時の GRC は、もちろん組織はできていましたが、新研究棟はまだ無く、理学部本館内に実験室と研究室が配置されていました。当時、GRC の教員は、入舩教授と花山教授、趙助教授、井上助教授、木村助手の 5 名のみでした。私と同時に助手として着任した山田さんと私を含めても 7 名です。他に、ポスドクの西山さん（同時期に物性研から異動）と小林さん、阪本さん、研究支援推進員の目島さんがおられるのみで、総勢でも 11 名という小所帯でした。現在の GRC の陣容をみますと、当時とは比べものにならないくらい大きくなっています。

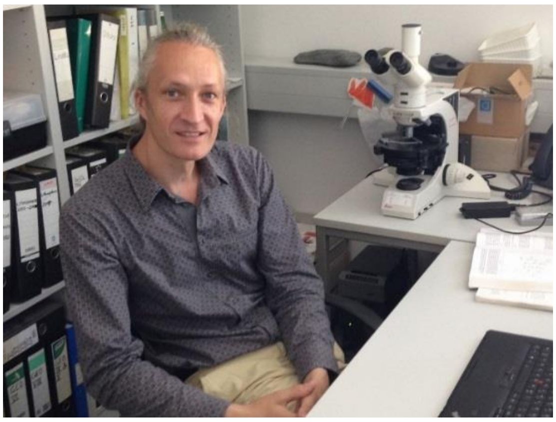
転校したらとりあえず、何でもいいから、さっさと一発目の実験を行うという信念がありましたので、早速、研究を開始しました。開始と言いましても、今まで行ってきた「マントル深部のダイナミクスをレオロジーの観点から説き明かす」ことを引き続き行ったのです。研究を進める上で、私の隣室の山田さんや旧知の間柄だった小林さんという地震学者が近くにいる環境は、私には難解な地震学の論文についてご教授いただけるので、なかなかいいものでした。山田さんの部屋の炬燵で、三十路会なる小宴を催したことを覚えております。

入舩先生は、私に、焼結ダイヤモンドアンビルを用いた川井型マルチアンビル装置での圧力発生に関する技術開発を期待していたようです。しかし、下部マントルの主要構成鉱物は珪酸塩ペロフスカイト（最近では、ブリッジマナイト）とフェロペリクレースです。これらの研究には、圧力領域として 25 GPa 発生できればそこそこ困りません。という訳で、焼結ダイヤモンドアンビルを用いたより高圧での実験には興味が持てず、実際に実験もほとんど行いませんでした。ところが、2004 年に村上さんや廣瀬さんらが珪酸塩ペロフスカイトが 120 GPa、2000K 付近で、$CaIrO_3$ 構造へと相転移するということを発表しました。すごい発見です。マントル流動の鍵となる最下部マントル D” 層は、このポストペロフスカイトで主要に構成されていることとなります。従って、ポストペロフスカイトについて研究したいと思うようになりました。焼結ダイヤモンドアンビルを用いての圧力

発生領域を拡大する必要があります。何故なら、レオロジー研究には大容量試料が一つのキーポイントとなるからです。それからは、貴重な焼結ダイヤモンドアンビルを多く割らせていただきました。

2005 年に三朝（岡山大学地球物質科学研究センター）に異動しました。GRC で培った焼結ダイヤモンドアンビルを割る技術と、伊藤大先生のお教えやサポートにより、さらなる圧力領域の拡大を可能としました。現在では、110 GPa の発生が確認されています。ポストペロフスカイトの安定領域まであと一歩です。この 1-2 年のうちにはポストペロフスカイトに関する研究ができるようになると信じており、結構、楽しみにしております。

❖ Institute of Mineralogy, Potsdam University
Research assistant Dirk Spengler



As a mantle petrologist - used to work on natural samples in handspecimen size and larger - I had a two years postdoctoral experience at GRC, which enabled me to enter a new discipline: experimental petrology and mineral physics. With curiosity and enthusiasm I learned how small experimental samples can be and what potential multi-anvil apparatuses have for the understanding of planetary processes. Under the guidance of Nishihara-san and Fujino-san I became familiar with the required tools and analytical instruments, including ATEM. New insights and the experimental way of thinking immensely broadened my horizon and scaled my knowledge deeper. Four years ago I took my current position as a research assistant in the mineralogy group at Potsdam University, Germany. My responsibilities include to hold classes in optical microscopy, in mineralogy, to supervise students in the field, at analytical facilities (SEM, EMPA) and during their final theses. Together with them I follow my interests on early Earth mantle processes, that have led to Archaean cratonisation, and on late continent-continent collision zones, that involved ultra-high pressure metamorphism since the Phanerozoic. My additional activities include field work in Norway and collaborative work, e.g. for isotope geochemistry in Vancouver. During spring last year I visited the GRC for several weeks to extend an existing experimental dataset on the decomposition behaviour of majorite garnet. This stay was very productive and promising and I am looking forward to a new collaboration in a following project.

最新の研究紹介

❖ 自由エネルギー定量計算のための第一原理熱力学積分分子動力学法の開発

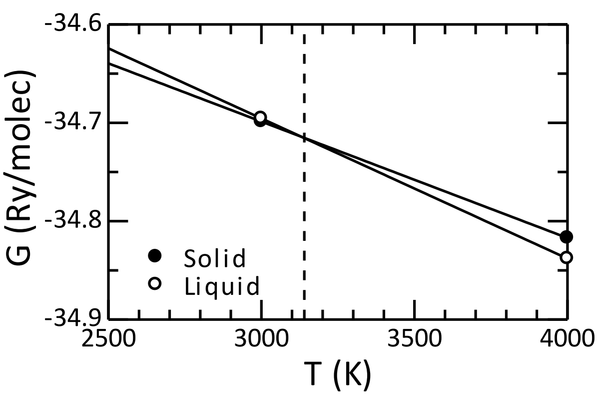
自由エネルギーは、熱力学における基本的状態量の一つです。自由エネルギーを用いて、状態の安定性や状態方程式をはじめ、多くの平衡物性を導出することができます。そのため自由エネルギーの定量評価は、計算物理学における主要な研究テーマの一つとなっています。しかしながら自由エネルギーの計算は、内部エネルギーやエンタルピーに比べ一般的に困難であり、例えば、調和近似が成り立つような結晶固体の場合は、振動エントロピーについての表式が与えられていますが、液体のように状態数の定義が不明確な場合は、エントロピーは簡単には求められません。

自由エネルギーを計算する特別な方法の一つに、熱力学積分法があります。統計力学の Kirkwood の結合定数法（Kirkwood, 1935）に基づいており、異なる 2 つのポテンシャル系において、ポテンシャルを断熱的にスイッチした際の内部エネルギー変化総量が、2 つの系の自由エネルギー差と等価となるという関係を利用して、2 つの系の間の自由エネルギー差を求めるものです。

自由エネルギーが解析的に得られるような理想系(例えば理想気体)を参照系として採用すれば、その自由エネルギーに熱力学積分により得られる自由エネルギー差を加えることにより、興味ある系（第一原理系）の自由エネルギーを、エントロピーを経由せず直接的に求めることができます。従来、第一原理系と参照系の間にモデルポテンシャル系をはさんで、2 段階の熱力学積分を行う方法が一般的でしたが、今回我々は熱力学計算法と定温第一原理分子動力学計算法を組み合わせ、モデルポテンシャル系をスキップし一段階で参照系から第一原理系への直接変換を可能とする独自プログラムの開発を行いました。本研究のような一段階での方法は、世界的に見てもいまだほとんど見

受けられない状況です。

まず最初の適用例として、新たに開発した第一原理熱力学積分分子動力学計算法を用いて、MgO の融点の計算を行いました。液相と固相の自由エネルギー曲線の交点から、常圧下での融点として 3140K が得られました。実際の融点（3125K）とほぼ同じ温度であり、本手法の高い有効性が見て取れます。また熱力学積分そのものは統計力学的に厳密であるため、原理的にはどのような系に対しても汎用的に適用できます。数値誤差に気を配りながら注意深く計算を行えば、高い精度で自由エネルギーを求めることが可能です。今後、主要地球惑星物質の高圧下での融点曲線や、多成分系の化学ポテンシャルの定量計算などを進める計画です。（土屋卓久）



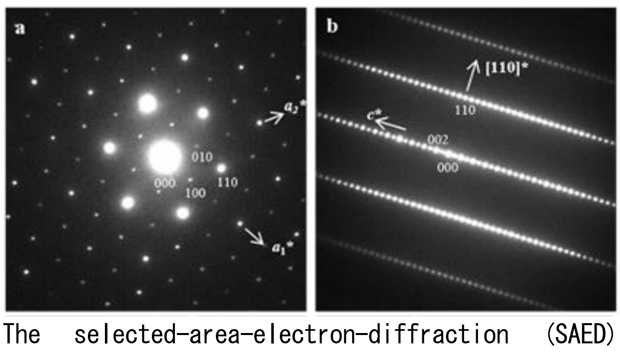
計算された MgO の固相、液相の常圧下における自由エネルギー曲線

❖ A possible new Al-bearing hydrous Mg-silicate (23 Å phase) in the Mantle

A possible new Al-bearing hydrous Mg-silicate (23 Å phase) in the mantle plays an important role in modifying the chemical and physical properties of the mantle's rocks and minerals. Water is transferred, released and recycled into the deep mantle through the subduction processes, mainly in the form of hydrous phases. Lots of researches have clarified the stability of hydrous phases in the MgO-SiO_2-H_2O system, which is the most important system for a pyrolitic mantle. Based on the previous results, hydrous phases, such as antigorite or serpentine, dense hydrous magnesium silicates (DHMS) phase A, 10 Å phase, phase E, superhydrous phase B, phase D, were suggested to be stable along the cold subducting P-T paths. Thus, as the predominant metamorphosed hydrous phase of the peridotite composition, antigorite plays an important role in transporting water into the deep earth.

Although the chlorite is another important hydrous phase, especially in the Al-bearing subduction zones, the decomposition experiments show that chlorite totally dehydrates at depth greater than 200 km. On the other hand a very recently reported hydrous Al-bearing pyroxene called phase HAPY ($Mg_{2.1}Al_{0.9}(OH)_2Al_{0.9}Si_{1.1}O_6$) may show a possible way for water to enter the deep mantle at depth greater than 200 km.

Here we reported a new aluminum bearing hydrous phase named 23 Å phase after its characteristic *c* axis. 23 Å phase was synthesized at 10 GPa and 1000°C, while coexisting with diaspore and pyrope in the following system: phase A ($Mg_7Si_2O_8(OH)_6$) + Al_2O_3 + H_2O. The chemical composition of this new 23 Å phase is $Mg_{11}Al_2Si_4O_{16}(OH)_{12}$, and it contains about 12.1 wt% water. Powder X-ray diffraction and electron diffraction patterns show that this new 23 Å phase has a hexagonal structure, with a = 5.1972(2) Å, c = 22.991(4) Å, and V = 537.8(2) Å^3, and the possible space group is $P\bar{6}c2$, $P6_3cm$, or $P6_3/mcm$. The calculated density is 2.761 g/cm^3 accordingly, which was determined by assuming that the formula unit per cell (Z) is 1. This crystal structure is quite unique among mantle minerals in having an extraordinarily long *c* axis. Several experiments revealed that its stability region is very similar to that of phase A. We further confirmed that this new 23 Å phase was stable in the chlorite composition at 10 GPa and 1000°C. The present results indicate that this new 23 Å hydrous phase will form in an Al-bearing subducting slab, and may largely promote the water transportation together with aluminum component into the deep upper mantle or even into the upper part of the transition zone. (Nao Cai (D3))



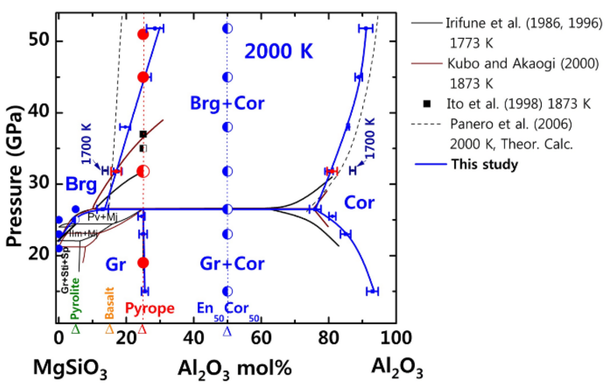
The selected-area-electron-diffraction (SAED) patterns show a typical hexagonal symmetry (a) and a condensed spots array perpendicular to the plane of hexagonal symmetry (b)

❖ Phase relations in the system $MgSiO_3$-Al_2O_3 to 51.8 GPa and 2000 K

Investigation of phase relations in the system $MgSiO_3$ – Al_2O_3 can provide important information to understand the chemical composition, structure and mineralogy of the Earth's mantle. Phase relations in the system $MgSiO_3$-Al_2O_3 are restricted to pressure below 30 GPa due to the limitation of hardness of tungsten carbide cube anvils in the multi-anvil apparatus. Recent development of high pressure techniques using sintered diamond anvils in the multi-anvils apparatus allows us to achieve 50 GPa and 2273 K, equivalent to the pressure and temperature conditions of the middle part of lower mantle. Applying this high pressure technique, we conducted a series of high pressure experiments to clarify phase relations in the system $MgSiO_3$-Al_2O_3 under the deep lower mantle conditions.

Phase relations in the system $MgSiO_3$ – Al_2O_3 were determined to 51.8 GPa and 2000 K by in-situ synchrotron X-ray diffraction measurement using sintered diamond anvils in a multi-anvil apparatus. A two phase region of garnet and corundum existed between 15.0 to 27.0 GPa, and a wide phase assemblage of aluminous bridgamanite and corundum stabilized at pressures above 27 GPa. Bridgmanite becomes more aluminous with increasing either pressure or temperature, whereas the corundum will dissolve less and more $MgSiO_3$ content with increasing pressure and increasing temperature, respectively. Bridgmanite with pyrope composition is stable at pressures higher than 45 GPa.

Different Al_2O_3 content in bridgmanite such as $MgSiO_3$ and $95MgSiO_3 \cdot 5Al_2O_3$ bridgmanite has been used as pressure reference (23 and 25 GPa) at high temperatures. The more Al_2O_3 content (> 5 mol%) in bridgmanite determined in this new phase diagram should be a good pressure reference at pressure above 30 GPa. The new constructed phase diagram in the system $MgSiO_3$ – Al_2O_3 further suggest no separate aluminous-rich phase exist in this system up to middle part region of the lower mantle. As the solubility of Al_2O_3 in bridgmanite is greater than Al_2O_3 content in pyrolite and basalt, bridgmanite is therefore a major host phase for Al_2O_3 in the lower mantle. (Zhaodong Liu (D3))



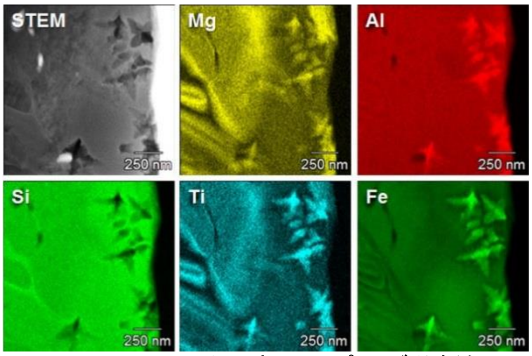
Phase relations in the $MgSiO_3$ - Al_2O_3 system at 15.0 - 51.8 GPa and 2000 K

センター機器紹介 No.28, 29

❖ 電界放出型透過電子顕微鏡

本装置（日本電子製 JEM-2100F）は、微細組織観察や化学組成分析を通して主に高圧実験後の回収試料のキャラクタリゼーションを行うための装置で、2015 年 3 月に当センターへ納入・設置されました。走査型電子顕微鏡（SEM）が、試料表面の形状や組織の観察に用いられるのに対して、透過電子顕微鏡（TEM）は、試料内部の微細組織や構造を透過像や回折像を通して観察するのに使用されます。GRC 設立当初から活躍してきた従来機（同社製 JEM-2010）は、熱電子銃（LaB_6 フィラメント）タイプでしたが、本装置は電界放出（ショットキー）タイプの電子銃を備えており、高輝度，高安定度の細い電子線を作り出すことが可能です。また、熱電子銃タイプに比べて波の干渉性が高いため、特にナノスケールオーダーの高分解能像（結晶格子の観察）で威力を発揮します。電子銃やレンズなどの光学系のほか、ゴニオメーターステージや排気系などが全てコンピューター制御により一元管理されており、ユーザーの操作性も格段に向上しています。

本装置は、2 台の高感度 CCD 検出器（ガタン社製 Orius200D、Ultrascan1000）を備えており、それぞれ低倍～中倍、高倍における画像データを取得するのに使用します。また、STEM（走査透過



STEM-EDS による元素マッピング分析例

電子顕微鏡）機能を搭載しており、細く絞った電子線を試料上で(SEM のように)走査することで、位相コントラストを活かした高分解能観察や高角散乱電子を利用した HAADF 像（Z（原子番号）コントラストを強調させた組成像）を取得することも可能です。さらには、後述の EDS 分析と連動させることによってナノスケールにおける元素マップを収集することもできます。本装置が備える EDS 検出器（日本電子製 JED-2300T）は、検出素子の冷却に液体窒素を使用しないドライタイプのシリコンドリフト検出器（SDD，検出面積 60 mm^2）で、試料局所からの化学組成情報を短時間、高精度で引き出すことができます。解析システムには、化学定量分析に定評・実績のあるサーモフィッシャー製の NORAN™ System 7 を導入し、スペクトル波形解析や K ファクター計算・登録、X 線吸収補正など、“玄人的”なニーズにも対応しています。また、分析中に生じる試料ドリフトにフィードバックをかけるドリフト補正機能も備えており、高倍率下における長時間の元素マッピング分析やライン分析が可能です。将来的には、物質の化学結合状態や価数状態、局所構造を調べるのに不可欠な電子エネルギー損失分光（EELS）検出器の導入などの拡張も検討しております。

本装置の導入によって、ミクローナノスケールにおける試料の微細組織や結晶構造の観察・評価技術が一段と強化され、STEM 機能と連動した EDS 分析によって、化学分析の幅や自由度も格段に広がることが期待されます。今後、共同研究・共同利用事業においても主要装置として活躍してくれると思います。(大藤 弘明)

❖　デュアルビーム加工装置

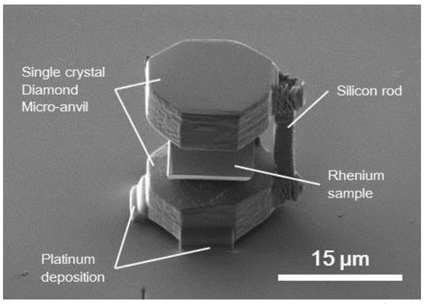
2015 年 3 月に、FEI 社製の最新の集束イオンビーム(FIB)加工装置 Scios が納入・設置されました。この装置はガリウムイオン源によるイオンビーム加工に加えて、電子ビームによる SEM 像観察機構を備えているデュアルビームシステムとなっています。装置中央鉛直方向に電子銃があり、そこから 52 度の傾きでイオン銃が取り付けられています。電子銃・イオン銃の 2 つを持つデュアルビームシステムの利点は、FIB 加工断面を SEM 像によりリアルタイムで確認可能であること、加工断面を SE 像・BSE 像・SIM 像の 3 種の異なる検出モードで確認できること、マニピュレータを 2 方向から確認できるので試料ピックアップ時に正確に（立体的に）位置合わせができる、といった点があげられます。

装置の概要を以下に説明します。電子銃は熱電界放出型（ショットキータイプ）、加速電圧は 0.35-30 kV の範囲で変更可能で、15 kV 時で 1.0 nm、低加速の 1 kV 時でも 1.6 nm の高い分解能を誇ります。イオン銃は加速電圧が 0.5-30 kV の範囲で可変で、プローブ電流は 0.6 pA-65 nA の範囲で 15 段階選択可能です。検出器は、通常(External)の 2 次電子検出器に加えて、カラム内に 3 つのインレンズ検出器を備えており、観察の用途（表面・組成・凹凸）に応じて最適な観察モードが選択可能です。また試料自身にバイアス電圧を印加して試料最表面の情報を得るための減速モードを有しており、チャンバーは大容量のドローアウト式、センチメートルオーダーの大きな試料でも搭載可能です。標準では多目的試料ホルダーが設置されており、φ12 mm のスタブ（試料台）が一度に 18 個搭載可能で、さらに側面には TEM グリッド用のホルダーもついています。試料ステージは XYZ の各軸移動に加え、回転・傾斜機構も備えており様々な加工に対応可能です。また、特殊な多軸加工用に kleindiek 社製の一軸回転ステージを追加することもでき、また、ガスインジェクション機構を有し白金デポジッションによる試料表面の保護や試料リフトアウト時の固定が可能です。TEM 試料リフトアウト用ナノマニピュレータシステム(EasyLift)も設置されており、上述のデポジッション機能と合わせることで試料を取り出すことなくチャンバー内で試料リフトアウトと TEM グリッドへの固定が可能です。

化学組成分析に用いる検出器としては、GRC 既設の FE-SEM および SEM に導入されているものと同タイプのオックスフォード・インストゥルメンツ社製のエネルギー分散型 X 線分析装置（EDS：X-Max50）が設置されており、検出器は検出素子の冷却に液体窒素を使用しないドライ（電子冷却）タイプのシリコンドリフト検出器（SDD）で、比較的短時間で正確な定性・定量分析を行うことができます。同社製のデータ処理・解析用ソフトウェア（AZtec Energy）により運用されており、イオンビームで切削断面を作成しては面分析を行うスラ

イスアンドビュー機能と組み合わせることで、3次元的な組成マッピングも可能です。プローブ電流が大きく向上したことで従来の TEM 薄膜加工がより短時間で可能となり、レーザー加熱 DAC 回収試料の広範囲での断面観察も容易に行えるほか、DAC 用の圧媒体・試料加工や 2 段式加圧 DAC のためのマイクロアンビル加工（図）といった特殊加工も可能になっています（2 段式加圧 DAC については Sakai et al. 2015 RSI を参照)。

従来に比べて格段に自由度の上がった本装置はユーザーも多く導入以来連日稼働しています。有効的な利用による今後の新たなサイエンスの展開を期待したいと思います。(境毅)



2 段式加圧 DAC 用マイクロアンビル

共同利用・共同研究拠点（PRIUS）

❖ PRIUS 利用者の声

地質現象をはじめとする様々な自然現象の素過程を理解するには、やはり、その現象によって形成された生成物の観察が不可欠です。特に、マイクロ～ナノスケールの視点に基づいた試料の観察からは、物質の様々な特性や履歴を理解することができます（小から大へのアプローチ）。この点において、非常に高い分解能のもとで試料を観察することが出来る電界放出型走査型電子顕微鏡、透過型電子顕微鏡は、他の物質科学と同様に地球科学においても大きな力を発揮しています。私の主な研究テーマは、地球のダイナミクスを岩石・鉱物の変形特性を通じて明らかにするというもので、野外で採取した岩石試料のミリ～マイクロ～ナノスケールの変形微細組織観察に力をいれています。本年度の PRIUS 共同利用では、岩石鉱物の脆性破壊領域の研究として“鏡肌”を、そして塑性変形領域の研究として“蛇紋岩”を対象とする 2 つのテーマを採択していただいています。大藤先生、井上先生、西原先生のサポートのもと、主に前述した装置（それと D-DIA 装置）を使用させていただき研究を進める予定です。

また、GRC での滞在中は、教員、研究員他多くの方から刺激を受ける貴重な時間となっています。今後ともどうぞよろしくお願いします。（広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻　准教授　安東淳一）

WPIサテライト拠点（ELSI-ES）

❖ 下部マントルはパイロライト組成か

ELSI-ES の土屋卓久教授らは、第一原理計算に基づく数値計算により様々な化学組成の弾性波速度を見積もり、地震波速度分布の標準的モデルと比較した結果、パイロライト組成が最もうまく地震学的モデルを説明すると結論づけました(Wang, Tsuchiya, Hase; Nature Geoscience, 2015)。この結果は、地球の起源物質が CI コンドライトに比べて珪素に乏しい、あるいは珪素は核の主要軽元素として存在していることを示唆します。この問題に決着をつけるためには、下部マントル領域でのパイロライトの弾性波速度精密測定や核中の珪素存在量を実験的にも制約する必要があり、実験系グループではこれらの課題に取り組んでいます。

❖ 核ーマントルの相互作用と共進化

土屋卓久教授を領域代表とし、入舩徹男主任研究員を計画研究の代表とする大型科学研究費新学術領域研究が採択され、本年度から 5 年間 ELSI 関係者を含め 50 名近い分担者による核とマントルの相互作用と共進化の解明を目指す研究がスタートしました。本領域は ELSI の重要課題の一つである地球の起源と進化に深く関連しており、動的かつ統合的な地球深部科学へのパラダイムシフトを目指しています。8 月 7 日～8 日には本領域のキックオフシンポジウム、また 11 月 4 日～7 日には ELSI と共催した国際シンポジウムが開催される予定です。

編集後記：今年は宮内庁ご用達のどら焼き（？）「菊焼残月」を 2 度口にする機会がありました（T.I & Y.M.）