GRC News Letter 2012. 2.29 No.32

EHIME UNIVERSITY
GRC
GEODYNAMICS RESEARCH CENTER

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:
  - ヒメダイヤが EOS のトップ記事に
    ドイツとの人事交流
  - GRC で学位取得のミシュラ氏が講演会
  - 入舩センター長が鳥栖市市民講演会で講演
  - ヒメダイヤの製品化
  - 第 5 回インターンシップ
  - 国際フロンティアセミナー
- ジオダイナミクスセミナー
- 新人紹介
- 国際会議報告
- インターンシップ報告
- 最新の研究紹介
- センター機器紹介⑱
- 特別推進研究ニュース No.8

センター長あいさつ

入舩　徹男

私ごとで恐縮ですが、私は学部、修士課程、博士課程、博士研究員、そして教員時代とこれまですべて違う大学、異なる研究分野（地球物理、高圧物性、鉱物学、地球化学、etc）を渡り歩いてきました。サークルや自治会活動などにあけくれた京都から、このままではまずいと環境を変えるためにも、修士からは名古屋の高圧物性研究室に入れてもらいました。この頃の名大地球科学教室は、多くの分野で我が国をリードしており、大学院に入った当初はそのレベルの高さに驚いたものです。

私に与えられた修士の課題は、当時ダイヤモンドの包有物から発見されていた Cr の入ったガーネット「knorringite」の安定領域の解明と、その多結晶焼結体合成および共振法による弾性定数の決定でした。先輩から単結晶と区別がつかない、透明な多結晶ガーネットを見せてもらい、こんなものが天然にあるのかと強いインパクトを受けました。しかし、後者の焼結実験は、一応弾性データは得たものの、結局お蔵入りしてしまいました。前者についても、国際誌に発表はしたものの、やはり不十分感がぬぐえず長い間気になっていました。

あれから 30 年、この間色々な研究を行ってきましたが、研究生活初期のやり残しがどうしても頭から離れません。knorringite は、博士課程から入学した留学生の練習用に再検討してもらい、最近面白い結果が得られました。一方、後者のガーネット多結晶体の合成についても、ようやく“光が見えてきた”気がします。近年、ナノ多結晶ダイヤモンド(ヒメダイヤ)の合成に取り組む中で、良質多結晶体合成のための様々な技術開発をおこないました。また大型多アンビル超高圧装置（BOTCHAN-6000）も導入し、この課題に本格的に再挑戦する機が熟したと感じています。

その第一弾として、この一年間卒論生に取り組んでもらったアルマンディン（$Fe_3Al_2Si_3O_{12}$）ガーネットについては、様々な試行錯誤の後、30 年前に見たのと同様、高い透光性を持つ多結晶体の合成に成功しました。こうしてできた多結晶体は、弾性波速度の精密測定などに用いる予定ですが、宝石としても魅力的であり、思わぬ用途が広がる可能性もあります。BOTCHAN や MADONNA が鎮座している、3 年前に設置された GRC の“SOSEKI LAB”は、「創石」即ち新しい（宝）石を創る意味が込められています。

ヒメダイヤも、最初に合成に成功してから 20 年あまり。学生と一緒に細々と研究を続けてきましたが、最近 10 年間の企業との研究開発の成果が実り、いよいよ製品として販売が開始されました。

我が国で開発された多アンビル装置により、10 万気圧を超える圧力下で合成された物質が製品化された世界初の例です。

折しも GRC では概算要求プロジェクト「大容量超高圧合成装置を用いた超硬物質・高温超電導物質の開発」が、本年度から開始されました。既にヒメダイヤ以外にも、「ナノ多結晶スティショバイト」や、「六方晶ダイヤモンド多結晶体」など、興味深い新物質の合成が相次いでいます。このようなプロジェクトを通じ、地球深部科学という基礎科学の成果が、多少なりとも世の中の役に立つことができれば望外の幸せです。今後も先端的研究や息の長い基礎研究とともに、一方で応用を見据えた研究も推進できればと思います。

センターの構成

(H24.2.1現在)

❖ 地球深部物質構造動態解析部門

入舩徹男（教　授）
西山宣正（准教授）
大藤弘明（助　教）
丹下慶範（助　教）
川添貴章（COE助教）
Steeve Gréaux（COE研究員）
大内智博（COE研究員）
雷　力　（COE研究員）
西　真之（学振特別研究員）
秦　家千（学振外国人特別研究員）

❖ 地球物質物性計測部門

井上　徹（教　授）
松影香子（准教授(COE)）
木村正樹（助　教）
選考中（助　教）
山田明寛（COE研究員）

❖ 量子ビーム応用部門

平井寿子（教授(COE)）
藤野清志（教授(COE)）
桑山靖弘（助　教）
木村友亮（COE研究員）

❖ 地球深部活動数値解析部門

土屋卓久（教　授）
亀山真典（准教授）
Nico de Koker（助　教）
Arnaud Metsue（COE助教）
臼井佑介（COE研究員）
市川浩樹（COE研究員）

❖ 上級研究員センター連携部門

土屋　旬（上級研究員（GRC関連））
西原　遊（上級研究員（GRC関連））
出倉春彦（研究員（GRC関連））
募集中　（研究員（GRC関連））

❖ 教育研究高度化支援室分室

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（技術員）
河田重栄（技術補佐員）

❖ 客員部門

客員教授　角谷　均（住友電気工業（株）産業素材材料技術研究所主幹）
客員教授　YanbinWang（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　BaoshengLi（ストニーブルック大学鉱物物性研究施設特任教授）
客員教授　鍵　裕之（東京大学大学院理学系研究科教授）
客員准教授　舟越賢一（JASRI利用促進部門副主幹研究員）

❖ GRC研究員

大野一郎（理工学研究科教授）
川嵜智佑（理工学研究科教授）
榊原正幸（理工学研究科教授）
山本明彦（理工学研究科教授）
森　寛志（理工学研究科准教授）
渕崎員弘（理工学研究科教授）
小西健介（理工学研究科准教授）
山田幾也（理工学研究科助教）
田中寿郎（理工学研究科教授）
野村信福（理工学研究科教授）
平岡耕一（理工学研究科教授）
山下　浩（理工学研究科准教授）
八木秀次（理工学研究科准教授）
豊田洋通（理工学研究科准教授）
松下正史（理工学研究科講師）
仲井清眞（理工学研究科教授）
阪本辰顕（理工学研究科講師）
中江隆博（理工学研究科助教）
佐野　栄（教育学部教授）

❖ GRC客員研究員

遊佐　斉（物質・材料研究機構物質ラボ主幹研究員）
鍵　裕之（東京大学理学系研究科教授）
平賀岳彦（東京大学地震研究所准教授）
道林克禎（静岡大学理学部准教授）
川本竜彦（京都大学理学研究科助教）
大高　理（大阪大学理学研究科准教授）
重森啓介（大阪大学ﾚｰｻﾞｰｴﾈﾙｷﾞｰ学研究ｾﾝﾀｰ准教授）
角谷　均（住友電気工業（株）産業素材材料技術研究所主幹）
吉岡祥一（神戸大学自然科学系先端融合研究環都市安全研究ｾﾝﾀｰ教授）
肥後祐司（JASRI利用促進部門研究員）
浦川　啓（岡山大学自然科学研究科准教授）
山崎大輔（岡山大学ISEI准教授）
奥地拓生（岡山大学ISEI准教授）
安東淳一（広島大学理学研究科准教授）
中久喜伴益（広島大学理学研究科助教）
片山郁夫（広島大学理学研究科准教授）
中田正夫（九州大学理学研究院教授）
加藤　工（九州大学理学研究院教授）
金嶋　聰（九州大学理学研究院教授）
久保友明（九州大学理学研究院准教授）
西堀麻衣子（九州大学シンクロトロン光利用研究センター准教授）
赤松　直（高知大学教育学部准教授）
本田理恵（高知大学教育研究部准教授）
田島文子（ミュンヘン大学客員教授）
Fabrice Brunet（CNRS研究員）
Jennifer Kung（台湾国立成功大学地球科学研究所准教授）

❖ 事務室

研究拠点事務課（3F）
藤村　宗　（副課長）
外山廣子　（再雇用事務補佐員）
加藤智恵子（事務補佐員）
田中規志　（事務補佐員）
宮本菜津子（事務補佐員）
兵頭　恵理（事務補佐員）
八城めぐみ（事務補佐員）

NEWS＆EVENTS

❖ ヒメダイヤがEOSトップ記事に

GRC が中心となり開発されたナノ多結晶ダイヤモンド（ヒメダイヤ）が、アメリカ地球物理学連合（AGU）のニュースレター誌（2012 年 2 月 14 日発行）の Feature Article に掲載されました。

アメリカ地球物理学連合（AGU）は世界中に多数の会員を持ち、例年サンフランシスコで開催される AGU 総会は、毎年開催されている国際的会議としてはすべての研究分野の中で世界最大であるとされています(昨年12月の参加者は約21,000人)。EOS は AGU により毎週発行されているニュースレター誌ですが、その 1 面トップの Feature Article に GRC の入舩徹男センター長と、カーネギー研究機構地球物理研究所(Geophysical Laboratory, GL)の Hemley 所長の共著による記事が掲載されました。Feature Article は専門家 3 人の厳しい査読により採用が決定され、月に 1 件程度 EOS の第一面に掲載されます。

❖ ドイツとの人事交流

GRC の西山宣正准教授が、2012 年 4 月 1 日付でハンブルクの放射光研究所（DESY）の新しい放射光実験施設 PETRA-III のビームラインサイエンティストとして転出します。当地では PETRA-III における新しい高圧ビームラインの建設の責任者として、活躍が期待されています。一方、GRC 数値系の助教として、バイロイトにあるバイエルン地球科学研究所（BGI）から、Nico de Koker 氏が 2 月 1 日付で赴任しました。de Koker 氏は第一原理計算の専門家として、地球・惑星の物質科学的研究において重要な役割を果たすことが期待されています。BGI と GRC は部局間の学術交流協定を結んでおり、これまでにも研究者の交流がおこなわれてきました。今回の 2 件の人事交流により、ドイツとの共同研究や研究者の交流が一層加速されると考えられます。

❖ GRC で学位取得のミシュラ氏が講演会

博士課程学生時代のミシュラ氏

インドやパキスタンなど 8 か国が加盟する、南アジア地域協力連合（SAARC）の災害管理防災センター長を務めるミシュラ・オム・プラカッシュ氏

が、2012 年 1 月 21 日（土）に、愛媛大学で南アジア諸国の災害対策に関する講演をおこないました。同氏は愛媛大学理工学研究科博士後期課程に在籍し、2004 年 3 月に GRC で博士号を取得しています。ミシュラ氏は 1 月 20 日に神戸市で開催された国際フォーラム出席のため来日し、愛媛大学防災情報研究センターの招きで松山を再訪しました。講演後には久し振りに GRC を訪れ、入舩センター長、井上徹教授、山田朗リサーチアドミニストレーターらと歓談しました。

❖　入舩センター長が鳥栖市市民講演会で講演

左から圦本北大教授、入舩センター長、橋本鳥栖市長

2012 年 1 月 8 日（日）に佐賀県鳥栖市市民文化会館で開催された市民講演会「放射光で解き明かす太陽系と地球の謎」(日本放射光学会主催、九州シンクロトロン光研究センター・佐賀県・鳥栖市共催）において、入舩センター長が「放射光と新しいダイヤモンドで拓く地球の深部」と題して講演をおこないました。講演会は鳥栖市長の挨拶のあと、水木純一郎放射光学会長の放射光に関する解説や圦本尚義北海道大学教授の「最先端分析で挑む小惑星探査機はやぶさ採取資料の解析」と題した講演がおこなわれ、最後に入舩センター長が講演しました。尚、同研究センター内に設置されている九州大学ビームラインに関連して設置された、九州大学シンクロトロン光利用研究センターにおいて、入舩センター長の指導のもとに博士号を取得した愛媛大学出身の西堀（旧姓一色）麻衣子氏が、昨年から准教授として赴任しています。

❖　ヒメダイヤの製品化

GRC と住友電工（株）とで共同開発がすすめられてきたナノ多結晶ダイヤモンド(ヒメダイヤ)が、同社および関連会社により本年 2 月から製品（スミダイヤバインダレス）として販売開始されることが 2012 年 1 月 16 日（月）付で同社からプレス発表されました。住友電工では、超硬合金などの硬脆材向け微細加工ボールエンドミル・旋削バイトを、関連会社のアライドマテリアルでは、光学部品用金型などの硬脆材の超精密加工向けた切削工具を開発し、販売を開始する予定です。

ヒメダイヤは、入舩センター長が 20 年あまり前に合成に成功し、2000 年代初めまでにその生成条件が明らかにされました。その後住友電工の共同研究者により硬度等の測定がおこなわれ、特異な高い硬度とナノ組織が明らかにされ、2003 年にはネイチャー誌に発表されました。前後して住友電工および四国 TLO と基本特許を共同出願し、同社にマルチアンビル合成技術を移転するとともに、共同研究によりその高品質化・大型化に取り組んできました。

❖　第5回インターンシップ

“Tutorial for Resonant Ultrasound Spectroscopy”

- Measurement of resonant ultrasound spectroscopy
- Mode identification and determination of elastic constants
- Theoretical aspects on calculation of resonant frequencies

講師: 大野一郎
（愛媛大学理工学研究科教授・GRC 研究員）
日時:2012 年 3 月 8 日（木）～10 日（土）
場所:愛媛大学
問合せ先:井上徹（inoue@sci.ehime-u.ac.jp）

❖　国際フロンティアセミナー

第42回
“Alluvial diamonds from north-east of Siberian platform: evidence for formation in subduction environment”
講演者：Prof. V.S. Shatsky (Institute of Mineralogy and Petrology, Novosibirsk, Russia, Novosibirsk State University)

“Evidence for evolution of growth media in superdeep diamonds from Sao-Luis (Brasil)”
講演者：Dr. D.A. Zedgenizov (Institute of Mineralogy and Petrology, Novosibirsk, Russia)
日　時：2012年1月11日（水）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）

３月

3/3 “Viscosity contrast between majorite and

ringwoodite”
Dr. Yu Nishihara (Senior Research Fellow, Senior Research Fellow Center, GRC)

3/9 “Measurements of elastic velocities and elastic constants of nano-polycrystalline diamonds with pulse and resonance methods under fluid pressure”
Dr. Masaki Kimura (Assistant Professor, GRC)

3/16“Synthesis of high-quality sintered bodies of polycrystalline minerals at high pressure”
Dr. Tetsuo Irifune (Professor & Director, GRC)

3/23 “First principles investigation of the plastic deformation of hydrous wadsleyite”
Dr. Jun Tsuchiya (Senior Research Fellow, Senior Research Fellow Center, GRC)

❖ 過去の講演

第 313 回“Toward the experimental study on the serpentinization mechanism of olivine in the presence of supercritical fluid using an externally-heated hydrothermal DAC”
Taku Fujii (M.Sc. student, Ehime University)

“Condition of oxygen vacancy substitution in $(Mg,Fe)SiO_3$ perovskite”
Kohei Hayashi (M.Sc. student, Ehime University) 13 January 2012

第 314 回 “Multimegabar phase relations of silicates and planetary interiors”
Dr. Taku Tsuchiya (Professor, GRC) 20 January 2012

第 315 回 “Optical properties of nano-poly-crystalline diamond synthesized and treated under various high pressure and high temperature conditions”
Futoshi Isobe (Ph.D. student, Ehime University)

“Numerical simulations of thermal convection of fluids with spatial variations in physical properties”
Arata Miyauchi (Ph.D. student, Ehime University) 27 January 2012

第 316 回 “Spin transitions of iron in the lower mantle minerals”
Dr. Kiyoshi Fujino (Global COE Professor, GRC) 3 February 2012

第 317 回 “Phase stability of boron relative to beta-boron at HPHT”
Dr. Jiaqian Qin (JSPS Postdoctoral Fellow, GRC)

“Synthesis and elastic wave velocities of polycrystalline pyrope $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$ garnet up to 20 GPa and 1700 K”
Yongtao Zou (Ph.D. student, Ehime University) 10 February 2012

第 318 回 “Investigation of intermediate and deep seismicity using acoustic signal monitoring during multi-anvil press experiments”
Dr. Julien Gasc (GSECARS, University of Chicago) 13 February 2012

第 319 回“Elastic wave velocities of stishovite at high pressure and high temperature”
Ryo Negishi (M.Sc. student, Ehime University) 17 February 2012

第320回 “Thermal condition(s) of upper mantle in early Mars”
Dr. Kyoko Matsukage (Global COE Associate Professor, GRC) 24 February 2012

◆ 新人紹介 ◆

Nico de Koker
(助 教)

Growing up in South Africa, the lands of the

northern hemisphere in the world appeared to be very far away, and so, most intriguing. As a youngster I was always curious about what the rest of the world must be like, hoping to see for myself one day. So, when after completing my undergraduate studies at the University of the Witwatersrand I was fortunate enough to get the opportunity for graduate studies at the University of Michigan in the USA. I jumped at the opportunity.

I started my studies in Michigan doing geodynamics, and finished my MSc thesis on the global density structure of the lithosphere under the guidance of Carolina Lithgow-Bertelloni. However, my fascination with the physics of materials led me to enter the field of computational mineral physics, working with Lars Stixrude on the first principles simulations of silicate melts in the MgO-SiO_2 system.

After a relatively easy american start to my exploration of the world, it was time to get more serious and move to Germany. Here I would be introduced to the more traditional european lifestyle, with the additional challenge of mastering a new language. I obtained a position as a postdoctoral research scientist at the Bayerisches Geoinstitut (BGI) in Bayreuth, where I continued my research work in computational and theoretical mineral physics, working with Gerd Steinle-Neumann and Dan Frost. My time at BGI was very productive: in addition to my continued work on liquids, I got my hands dirty with thermal diffusivity in lower mantle minerals, and also made good progress on investigating the electronic transport properties of the liquid outer core. In doing so I explored material compositions ranging from liquid Fe and Fe alloys, Mg and Ca oxides and silicates, as well as industrially relevant phases, notably cubic BN.

After nearly three and a half years in Germany it was time to move on again -- this time to Japan, famous for its unique culture and rich history. An opportunity to live here, learn the language and experience the country first hand is very difficult to pass on. Starting February 1st 2012, I joined GRC as assistant professor in the theoretical mineral physics group. I hope to use my time at GRC not only to pursue further questions related to silicate melts and electronic transport of liquid metals, but also to explore some new avenues in materials simulations.

I look forward to a productive and very educational time in Matsuyama. Who knows where my work here will lead me to go next!

木村 友亮
(COE 研究員)

今年度の 10 月から GCOE 研究員として働かせていただいております、木村友亮です。同年度 9 月に大阪大学大学院の博士課程を修了しました。これまでの研究ではダイヤモンドアンビルセルとレーザー誘起による衝撃圧縮を組み合わせた圧縮法の開発を行ってきました。主に衝撃圧縮実験を多く経験した私にとってマルチアンビル型高圧発生装置を使った実験は新鮮で、セミナーやディスカッションを通して実に刺激的な日々を送らせて頂いています。

私の専門である衝撃圧縮は、瞬時に試料に大量のエネルギーを送り込むため、数テラパスカル以上の高い圧力状態を作ることができると言われています。この桁違いに高い圧力が得られることから、超高圧力発生の可能性が衝撃圧縮技術の特長として印象に残ります。しかし一方で私は、レーザーショック実験が有する高速診断技術に注目しています。近年では計測技術の開発により、数ナノ秒で物質を圧縮する衝撃波の速度を 1%以内の精度で計測できるようになりました。また、100 ピコ秒以下の分解能で温度履歴を計測できるようになりました。このような衝撃圧縮における高速の“眼”をレーザー加熱ダイヤモンドアンビルセル実験に適用し、この GRC では高圧･高温度下における物質の熱伝導を実験的に計測することを試みようと思っています。

差し当たって現在は桑山靖弘助教と共にダイヤモンドアンビルセル加熱用の CO_2 レーザーのセットアップを行っています。大学院時代でも光学素子を扱っていたので、光学系の設計や素子の調整を行ってきた経験が新しい研究の場でも役に立って非常に嬉しいです。毎日が緊張の連続ですが、設計通りに事がうまく運ぶとチーム皆で喜びを共有し合えるので、今の仕事に他では得難い充実感を覚えています。

充実しているのは研究だけではありません。週末の夜はジャズバーでセッションに参加するようにしています。松山は音楽が盛んで色々な場所でライブやセッションが繰り広げられています。引

っ越して来た当初は敷居が高いイメージだったジャズも松山の方々は私を優しく迎えて下さり、今では大学のジャズ研サークルの学生に混じって、ダンディな玄人が持つ大人の色気を少しでも身につけるべく日々努力しています。(しかしその努力の跡が残酷な程見受けられませんが…)このように音楽を通して交流の場を広げると共に、研究も精力的に推し進めたいと思います。以上、若干話題が研究からそれましたが臆さず前向きに、これまでの経験に新しい知識を加えてこれからの仕事に貢献したいと考えています。どうぞよろしくお願いします。最後になりましたが、掲載の味のある似顔絵を描いてくれた学生の元木健介君に心から感謝の意を表します。

海外出張報告

❖ アメリカ地球物理学会 2011 年秋季大会

2011 年 12 月 5 日～9 日にアメリカ､サンフランシスコで開催されたアメリカ地球物理学会 2011 年秋季大会に私を含め当センターから 15 名以上のメンバーが参加しました。AGU は改めて説明するまでもなく、地球惑星科学の分野における世界最大の学会です。特にその秋季大会には近年は膨大な人数の参加者があります。今年の参加者は初めて 2 万人を超え 21116 人で昨年に続き過去最高の参加者数を記録しました。会期中は丸 5 日間にわたり毎日 8 時間（8：00 の講演開始から 18：00 講演終了までのうち休憩を除いた時間)約 45 カ所の会場で同時に口頭発表が行われました。一講演あたり 15 分として単純に計算すると口頭発表の総数は 7200 件となります。このほかにポスター発表､特別講演もありとにかく膨大な講演数なので、当然ながら実際に聞くことのできる講演は全体のほんの一部にすぎません。私は前日に配られる詳細な講演プログラムを毎晩調べて次の日の計画を立てましたが聞きたい講演が重なることもしばしばでした。学会の規模が大きくなりすぎるのもいかがなものかと思わないでもありません。

今回の AGU では､GRC レオロジーグループのリーダーの私が「Rheology of Geological Materials: from the Concepts to the Field」と題したセッションの共同コンビーナを務めました（代表コンビーナはフランスのリール第一大学の Patrick Cordier 教授、もう一人の共同コンビーナはアメリカのブラウン大学の Greg Hirth 教授)。このセッションは地球内部のレオロジーに関する多方面からの議論を目的として、実験・理論・観測の各分野からの講演を募集したものでした。口頭発表の枠に比べ投稿数がとても多く、口頭講演の選別には苦労しました。しかし、セッション当日は多くの優れた講演が行われ活発な議論がなされ成功の手ごたえを得ることができました。私自身はこのセッションのポスター発表で高圧下のカンラン石の粒径依存クリープの実験的研究について発表しました。また、同じレオロジーグループの川添貴章 GCOE 助教は「Earth Materials Under Compression: Advances in Experimental and Numerical Methods」と題するセッションで招待講演を行いました。内容は D-DIA 装置を用いた高温高圧変形実験の技術開発とその技術に基づくマントル遷移層条件でのウォズリアイトの定量的変形実験に関するものでした。これまで参加してきた学会に比べ、我々GRC レオロジーグループの研究に対する好意的な反響が大きく、これまで約 3 年間のグループの研究活動を通じて世界で認められるようになってきたことを感じました。(西原遊)

❖ A trip to APS

Like continental crust, mid-oceanic ridge basalts and sediments are enriched in silicon and therefore, subduction processes are suggested to provide a way of enriching the mantle with silica. Above 10 GPa, SiO_2 transforms to a dense form called stishovite, which could generate chemical and density heterogeneities in the deep mantle. Although numerous studies reported the physical properties of pure stishovite, there is still few reports concerning Al-bearing stishovite, which would be in a natural context, the most abundant mineral of mid-oceanic ridge basalts subducted to the mantle transition zone.

Thus, I hot-pressed polycristalline samples of Al-bearing stishovite with 1 to 6 wt% Al_2O_3 using 2000-tons multi-anvil press at the GRC. I went to the Argonne National Laboratory located near Chicago, to meet Prof. Yanbin Wang, Dr. Zhicheng Jing from Univ. of Chicago and former GRC member, now at Carnegie Inst., Dr. Yoshio Kono. Together we conducted simultaneous measurements of density and sound velocities of Al-bearing stishovite *in situ* at high P and T conditions at the beamline 13-ID-D in GSECARS. The pressure and temperature dependences of the elastic properties of

Al-stishovite were examinated up to 24 GPa and 1700 K by using a Kawai-type multi-anvil press apparatus coupled with synchrotron X-ray diffraction and ultrasonic interferometry.

Generally, we found that even SiO_2 + 1 wt% Al_2O_3 has sound velocities of P- and S-waves substantially slower than pure stishovite. Therefore, the incorporation of even small amounts of Al and its possible coupling with oxygen vacancies can influence the elastic properties of SiO_2. The current experiments resulted in a valuable set of P-V-T-V_P-V_S data for various Al-content. Now we are working to extrapolate those thermoelastic data to higher P, T and Al-content in order to directly estimate density and velocity profiles for various composition and temperature conditions relevant to slabs subducted to the depths of the mantle transition zone and lower mantle. This project is still ongoing and will be continued in 2012 with a second visit to GSECARS. (Steeve Gréaux)

インターンシップ報告

❖ Internship stay in GRC

With great honor, I was provided an opportunity to study at GRC as an internship student from October 17th (2011) to January 13th (2012). This is my first time to study in out of China for a long time, and it is a very excellent experience for me. I appreciate it very much that GRC can offer me the opportunity. At GRC, I attended the group of "magma and fluid group" leaded by Prof. Inoue. He gave me much help, and I learnt a lot from him, such as how to conduct high pressure experiments using 2000ton split-sphere apparatus, how to proceed the study, how to interpret the result, how to find and solve the problem and so on. I believe that all of these will be very helpful for my future research. Also, most of the people at GRC, especially Cuiping Yang and Chunyin Zhou, have helped me, and they were very friendly. Matsuyama is a very beautiful city near from sea, and its environment is very good. I enjoyed the blue sky and the comfortable fresh air. During my stay, I also attended the annual year-end party held by GRC. It was my second time to play bowling. It was so interesting and I liked it. In addition, both Fujino-sensei and Inoue-sensei invited me to taste many delicious Japanese foods, such as the famous sashimi and sushi. All of these activities gave me very good memories and I had a really good time. So, I want to say "Arigatoo" again to all the people at GRC.

During this period, I planned to conduct two subjects. One is "the fusion curve of K_2CO_3 at high pressure", and the other is "trace element partitioning during partial melting of carbonated pelite" using the high pressure apparatus.

Carbonate magmas are volumetrically rare compared to silicate magmas, but the equation of state of carbonate liquids is of great interest to geologists. Studies on the density, compressibility and thermodynamic stability of carbonate liquids at high pressure are important for calculating their buoyancy in the lower mantle. Additionally, location of a carbonate solidus at upper mantle conditions is a key factor in the deep carbon cycle.

A series of experiments were performed in a 14/8 cell assembly using 2000 ton split-sphere apparatus in order to bracket the melting temperature of K_2CO_3 at 4.0, 9.0 and 11.5GPa. Using these result, I will calculate the density and compressibility of K_2CO_3 liquid using K' value at different pressure and then discuss the reason of different K' value at different pressure and its application in geology. (Meili Wang, PhD student in Peking University)

最新の研究紹介

❖ 下部マントル下 Fe のスピン転移問題の新展開

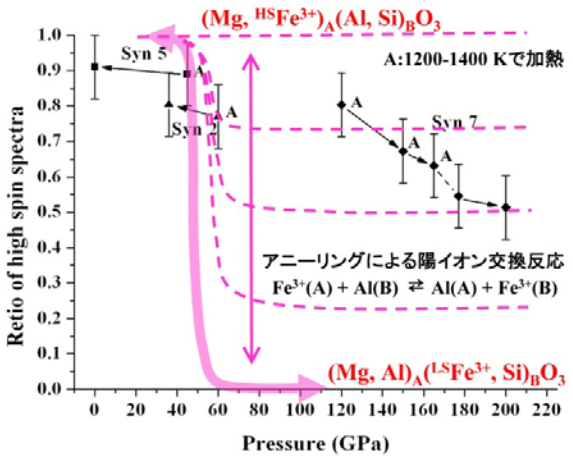
下部マントル構成相の構造や物性，鉄の分配等に大きく影響を与える鉄のスピン転移が実験的に見い出せることが分った 21 世紀初頭以来、鉄のスピン転移に関する多くの研究がなされてきた。し

かし、その実態についてはフェロペリクレスを除いて長らく混迷状態にあった。ごく最近、そうした混迷状態を解決する可能性が、2 つのアプローチにより見えてきた。1 つは、Fe^{2+}のスピン状態とメスバウアースペクトルにおける 4 極子分裂の関係についての理論的アプローチであり、もう 1 つは Fe^{3+}のスピン状態と結晶内交換反応についての実験的アプローチである。我々は、この数年後者のアプローチに関わってきたので、こうした鉄のスピン転移問題をめぐる新たな展開について、述べてみたい。

まずは、後者のアプローチから述べる。我々は上記の混迷状況を改善すべく、$Fe^{3+}AlO_3$ 成分を固溶した Mg ペロブスカイト（Pv）とポスト Mg ペロブスカイト（PPv）における Fe^{3+}のスピン転移について、X 線発光分光法（XES）と X 線回折法（XRD）により取り組んだ。$Fe^{3+}AlO_3$ 成分に着目したのは、下部マントル条件では Pv と PPv の両者で、Fe^{3+}は Fe^{2+}より支配的であり、Fe^{3+}は Al と対になって $Mg + Si \rightleftarrows Fe^{3+} + Al$ の置換をすると思われるからである。実験により、Pv では A サイトで高スピンの Fe^{3+}は、50-60 GPa 以上で交換反応により B サイトの Al と入れ替わって低スピンになり（図）、PPv では 80-110 GPa 以上で Fe^{3+}は B サイトを占めて低スピンになることを示す結果を得た。これらの実験で判明した事は、陽イオンサイトが 1 種しかないフェロペリクレスと異なり、2 種の陽イオンサイトを持つ Pv と PPv では Fe^{3+}のスピン状態は圧力と温度のみでは決まらず、A、B 両サイトに Fe^{3+}がどう分布するかに大きく依存し、それを支配するのが結晶内陽イオン交換反応ということであった。従って、同じ組成の試料でも合成またはアニーリング条件が異なれば、たとえ同じ圧力・温度で測定しても、まったく異なるスピン状態を示し得る。これまでの研究がこの点を十分考慮してこなかったことが、混迷を生み出していると思われる。

次に、もう 1 つのアプローチについて述べよう。これまで Pv 及び PPv における A サイトの Fe^{2+}のスピン状態については、下部マントル条件で中間スピン（スピン数が 1）あるいは低スピンになるとの説と、高スピンのままであるとの説の大きな対立があった。前者の説の最大の根拠として、メスバウアースペクトルにおける Fe^{2+}の四極子分裂が極めて大きい（3.5-4 mm/s）ことがあげられた。しかし最近、Bengtson ら(2009)や Hsu ら(2010)によって、これらの大きな四極子分裂はむしろ Fe^{2+}の高スピンに由来し、中間スピンや低スピンの四極子分裂はずっと小さいとの理論計算結果が出された。これにより、A サイトの Fe^{2+}のスピン状態をめぐる従来の対立は、解消される可能性が高い。これら 2 つのアプローチにより、長らく続いた下部マントルにおける鉄のスピン転移に関する混迷状態は解決の方向に向かうものと思われる。

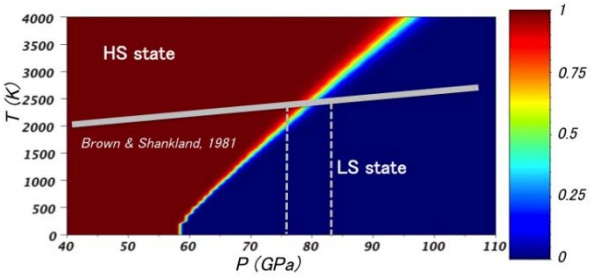
以上のことを踏まえて、我々は下部マントル各構成相における鉄のスピン転移を、以下のように考えている。フェロペリクレスでは、Fe^{2+}が圧力の増大とともに 40-80 GPa で高スピンから低スピンに変わる。Mg ペロブスカイトでは、Fe^{2+}は下部マントル全領域で A サイトを占めて高スピンのままであるのに対し、Fe^{3+}は低圧では A サイトを占めて高スピンであるが、50-70 GPa で B サイトの Al と置き換わって低スピンになる。一方、ポスト Mg ペロブスカイトでは、マントル最下部領域で Fe^{2+}は A サイトを占めて高スピンのままであり、Fe^{3+}は B サイトを占めて低スピンのままである。従って、下部マントル全体を見たとき、40-80 GPa の間でスピン状態の大きな変化があるが、それ以外の圧力領域では大きな変化はないものと思われる。（藤野清志）



Mg-Pv 中の陽イオン分布と Fe^{3+}のスピン状態変化

❖ Spin transition in $(Mg,Fe)(Si,Fe)O_3$ perovskite from first principles calculations

We investigate the spin transition *P*-*T* conditions of ferric Fe in $(Mg_{0.9375}Fe_{0.0625})(Si_{0.9375}Fe_{0.0625})O_3$ perovskite (Pv) from density functional theory (DFT) calculations based on the internally consistent LSDA+*U* technique. This original method accurately describes the local interactions between the *d*-states in Fe that give rise to Hubbard splitting. Ferric Fe was incorporated in high spin (HS) and low spin (LS) states in both Mg-site and Si-site. First, we calculate the phonon dispersion relations of the Fe-bearing phases based on the direct method, where the force constant matrices are determined by directly applying small but finite atomic displacements. The phonon dispersion curves show that the acoustic phonon mode frequencies are clearly affected by the incorporation of ferric iron, particularly the modes associated with the shear of the crystal. This implies that ferric iron decreases significantly the shear wave velocities in the



Fraction of high spin Fe in the Si-site.

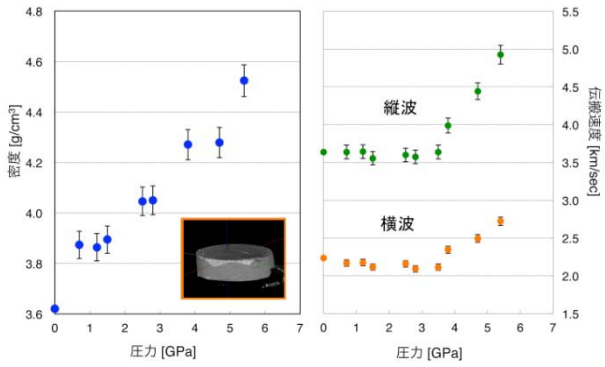
Pv phase. Then, the thermodynamic properties of the Fe-bearing phases, such as the equation of states or isothermal bulk modulus were determined at the *P-T* conditions of the lower mantle from the calculation of the Helmholtz free energy based on the quasi-harmonic approximation. The calculated volumes and bulk modulus calculated at 300 K are consistent with experimental results of Catalli *et al.* (2010). We extend the calculations to the Gibbs free energy and we found that Fe in the Si-site undergoes a spin transition, from HS to LS at 56 GPa at 300 K and at around 80 GPa along the geotherm proposed by Brown and Shankland (1981). The spin transition decreases the volume about 0.5% and increases the bulk modulus about 2% of the Pv phase in the *P-T* conditions of the lower mantle. The spin transition pressure is consistent with previous experimental studies (Catalli *et al.*, 2010; Fujino *et al.*, 2012).
(Arnaud Metsue)

❖ GeO_2 ガラスの高圧下密度・弾性波速度同時測定

GeO_2 ガラスは SiO_2 ガラスと同様、複雑系ガラス(液体)の中でもっとも単純な組成であるため、その物性、構造を理解することは、難解な複雑系物質の基本的な情報を得るための第一歩であると考えられます。そのため、これまで多くの構造に関する研究が高圧、常圧を問わず行われてきました。また、地球科学の分野においても SiO_2 はほぼ全ての造岩鉱物中に含まれる成分であり、岩石融体(マグマ)においても、その性質を左右する重要な成分です。そのアナログ物質となる GeO_2 は約 6-10 GPa で GeO_4 四面体(4 配位)からなる基本構造が GeO_6 という 6 配位構造へと変化することが様々な実験によって示唆されてきました。このようなガラス(液体)中の基本構造の配位数変化が生じたとき、その弾性がどのよう変化するかという点も私たちの大きな関心事の一つです。一方、圧力下における物性に関する研究はそれほど多く行われてはいませんが、密度に関しては約 5 GPa で小さな密度の不連続な増加が見られるとの報告があります。また、弾性波速度に関しては、SiO_2 ガラス同様、低圧の領域で速度の最小があることが示唆されています。私たちは、これらの物性変化がどのように反映し合っているかをより確実に調べるため、密度と弾性波速度の圧力下での同時測定を行いました。

実験はアメリカのアルゴンヌ国立研究所における第 3 世代放射光実験施設 Advanced Photon Source の 13-BMD ビームラインで行いました。このビームラインはシカゴ大のグループ (GSECARS) が管理、運用を行っています。私たちが用いた手法は、圧力下での X 線 CT による試料の 3 次元イメージング、及び超音波法です。3 次元の試料画像から体積を求め、密度を求めます。また、超音波法からは試料を透過する超音波の伝搬時間を知ることができるので、X 線の二次元の像から試料の超音波の伝搬距離を測定し、超音波の速度を計算することができます。これらの測定を一つの実験内で同時に行うことができます。現在までのところ、このような測定ができるビームラインは高圧発生装置、X 線の制御を考えると 13-BMD に限られると言ってよいでしょう。X 線 CT に用いた X 線は 43 keV の単色 X 線で、圧力下でも試料を回転させることのできるモジュール(Rotating Anvil Apparatus)を用いておよそ 0.5° 毎に試料の二次元画像を撮影しました。超音波速度測定には、縦波、横波を同時に観測するため、厚さ 50 μm の $LiNbO_3$ 製振動素子を用いました。入力した波は 40 MHz の正弦波です。試料は円柱状の GeO_2 ガラスで、超音波の反射をより明瞭に観測するため、両端を鏡面研磨したものを用いました。圧力発生に用いたアンビルは Paris-Edinburgh 型のものに弾性波速度測定用に修正を加えたものを用いました。

密度測定と超音波速度測定の結果を図に示します。密度変化に関しては 4.7-5.4 GPa の間で不連続に増加していることがわかります。この結果は、以前の X 線吸収法による密度測定結果と非常に調和的です。また、この圧力はこれまでの構造変化に関する研究結果から、GeO_4 四面体が 6 配位構造へ構造変化を始める圧力領域に相当しています。すなわち、この密度増加は 4 配位から 6 配位への遷移的な状態を反映した物性変化であると予想されます。一方、超音波速度は縦波・横波ともに 3.5 GPa まで一気圧の速度とほぼ変わらず、それより高圧で急激に速度が増加するという傾向を

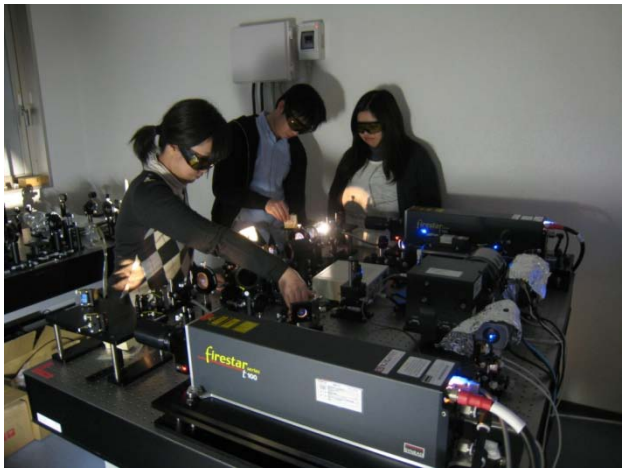


GeO_2 ガラスの密度変化と超音波速度

示しました。SiO_2ガラスに見られるような低圧力領域での顕著な速度最小は見られませんでしたが、GeO_2ガラスも圧縮に対して速度が増加しない、つまり高密度化を起こしても堅くならないという結晶では見られない特異な性質を示すことがわかりました。また、速度増加開始の圧力は密度の不連続増加の圧力とわずかにずれがあることがわかります。このことは速度増加に対して配位数変化以外の何か更に重要なメカニズムが低圧の領域で支配していることを示唆しています。(山田明寛)

センター機器紹介⑱

DAC 用 CO_2 レーザー加熱装置



ダイヤモンドアンビルセル高圧発生装置（DAC）における高温発生法には、レーザー加熱法、外熱法、内熱法などがあります。レーザー加熱法には、波長約 1 ミクロンの固体レーザーである Nd:YAG レーザー（波長 1.064 μm）及び Nd:YLF レーザー（波長 1.053 μm）、ファイバーレーザー（GRC には波長 1.090 μm、最高出力 100 W の SPI Laser 社製のファイバーレーザーが導入されています）、波長約 10 ミクロンのガスレーザーである CO_2 レーザー（波長 10.6 μm）などがよく用いられています。波長 1 ミクロンの YAG レーザー、YLF レーザー及びファイバーレーザーは集光性がよく、超高圧下での微小試料の加熱なども行なうことができ、また Shen 博士らにより開発された両側加熱法により試料両端の温度を均質に加熱することができるため多くの放射光施設などに導入されています。しかし、これらのレーザーではケイ酸塩を含む多くの酸化物などは直接加熱することができないため、これらの物質を加熱するためには、試料に白金や金、レニウム粉末や箔などのレーザー吸収剤をまぜ間接的に加熱しなければなりません。一方、CO_2 レーザーは多くの透明試料を直接加熱することが可能ですが、Nd:YAG レーザー等に比べて集光性が悪く、また、CO_2 レーザーを用いた両側加熱による実験というものは、これまでほとんど行なわれておりませんでした。そこで GRC では CO_2 レーザーを 2 台用いた両側加熱装置の組み立てを行なっております。

CO_2 レーザーにはダイヤモンドアンビルセルを用いたレーザー加熱に実績のあるアメリカ・シンラッド社製の水冷式 RF 励起型、直線偏光の最高出力 100 W（カタログ値、実際の最高出力は約 120 W）の CO_2 レーザーを 2 台用いています。レーザー発振管の保護のために実際の運転時は最高出力の 95 %でリミットをかけていますが、2 台合わせて最大 200 W 以上の出力で試料を加熱することができます。レーザーの出力安定性は±7 %以下となっており、これらのレーザーの出力はパソコンからコントロールできるようになっております。また、必要であれば 0.1 kHz ステップで周波数を変更することもできます。ビームエキスパンダーも備えられており、理論集光系を約 60 ミクロンから 200 ミクロンまで変化させることができます。試料からの光は、ハーフミラーによって 2 つに分けられ CCD カメラによる試料観察を行いながら、輻射スペクトルや蛍光などの分光観測が可能になっています。分光器には二枚のグレーティングを搭載可能なプリンストン・インスツルメンツ社製の ACTON SpectraPro2150i を用いており、ブレーズ波長 500 nm のグレーティングを用いることで、335～1000nm の波長領域で分光スペクトルを取得することが可能です。分光器用の検出器には電子冷却型微弱光用 CCD 検出器 PIXIS 256（素子数 1024×256、－80 ℃電子冷却、波長感度範囲カタログ値 200～1000 nm、実効波長領域約 500～950 nm）を採用しており、試料部からの輻射スペクトルを測定することにより、リアルタイムで温度計測を行なうことができるようになっています。また、試料観察用の CCD には、1.3 メガピクセルの高感度 CCD を採用しております。

現在、G-COE 研究員や学生たちが中心となって、時に白熱した議論をしながら、しかし和気藹々と着実に組み立てが行なわれており、来年度初旬の運用開始を目指しております。この装置を用いて、地球や惑星のマントルを構成するケイ酸塩や酸化物のみならず、ハイドレートなど様々な物質の高圧高温実験を行ないたいと思います。本装置の導入にあたり、東京大学 物性研究所の八木健彦教授と物質・材料研究機構先端的共通技術部門の遊佐斉主幹研究員には、レーザーや光学系に関する議論など大変多くの時間を割いていただきました。この場をお借りしてお礼申し上げます。(桑山靖弘)

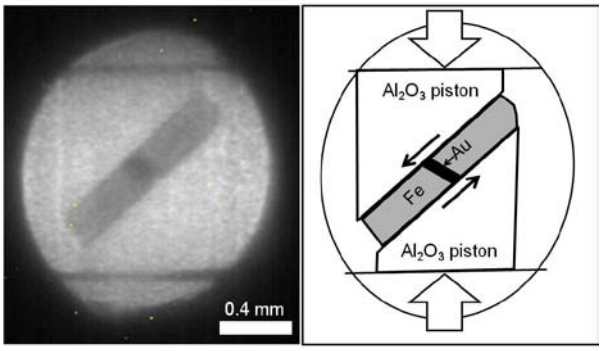
編集後記：今年の冬は松山も寒く、大雪（？）が降りました。梅も 2 月末になってようやく咲き始めました。(T.I. & Y.M.)

特別推進研究ニュース No. 8

透光性多結晶 Fe ガーネットの高圧合成

ガーネットはマントル深部を構成する重要な高圧相の１つであり、その弾性的性質の測定はマントル物質の解明において重要です。超音波パルス法で高圧相多結晶体の弾性波速度を測定するには、均質で粒径が小さく、また理論密度に近い良質な焼結体が必要とされます。ナノ多結晶ダイヤモンド（ヒメダイヤ）は、空孔率 0.3%以下の極めて緻密な多結晶体で、このような目的に理想的な試料です。本研究では、Fe 系物質の高温高圧下での弾性波測定も１つの重要な課題としていますが、このほどヒメダイヤ合成と同様な手法を用い、かつカプセル材や出発物質に様々な工夫をすることにより、ヒメダイヤと同様に高い透光性を持ち、緻密な多結晶 almandine（$Fe_3Al_2Si_3O_{12}$）端成分ガーネットの合成に成功しました。天然には、単結晶に近い透光性ガーネットの存在が報告されていますが、今回得られた試料もヒメダイヤ同様単結晶と遜色のない透光性を呈しており、今後弾性波速度をはじめ様々な物性測定に利用される予定です。

六方最密充填 Fe のせん断変形実験



固体金属によって構成される地球の内核には地震波速度の大きな異方性が存在しますが、その成因には様々な仮説が提唱されています。一部のモデルでは、この異方性を固体金属の塑性変形が引き起こす格子選択配向と弾性異方性により説明しています。内核は六方最密充填構造の Fe（hcp-Fe）を主成分とすると考えられていますが、この物質は一気圧下に回収することができないため変形挙動がよくわかっていません。そこで、GRC レオロジーグループでは hcp-Fe の格子選択配向を解明することを目的として、この物質の安定領域である高温高圧下でのせん断変形実験を試みています。軸と 45° に切断された Al_2O_3 円柱ピストンにより挟まれた Fe 試料を高圧セルに組み込み SPring-8, BL04B1 の D-DIA 装置を用いてせん断変形させ、変形中の試料の選択配向を放射光単色 X 線を用いた２次元 X 線回折により観察しています。今後、実験を進めることで hcp-Fe の塑性変形による選択配向の解明が期待されます。

DAC 用新レーザー加熱システム

最下部マントル～核領域における Fe などの融解実験を高精度でおこなうためには、通常用いられる YAG レーザーとは異なる波長領域かつ、より強力な加熱が可能な CO_2 レーザーの利用が有効です。本研究では、これまで困難であったダイヤモンドアンビル装置（DAC）の両側からの CO_2 加熱に加えて、加熱試料の観察および温度同時測定を可能にするシステムを構築しました。本研究では、マルチアンビル装置の圧力限界を拡張する一方で、DAC による高精度な実験を目指した技術開発も進めており、今後本システムの活用により、DAC によるより高精度な相転移・融解実験が可能になると期待されます。

ペロブスカイト中 Fe^{3+} スピン転移

下部マントル中の主要高圧相である $MgSiO_3$ ペロブスカイト中の、3 価の Fe の挙動に関して、第一原理計算とレーザー加熱 DAC による検討がすすめられました。前者により、ペロブスカイト中の Si サイト（B サイト）を占める Fe^{3+} が、300K では 56GPa 程度の圧力下で、高スピン状態から低スピン状態に変化することが示されました。一方後者の実験でも、この程度の圧力下で Fe^{3+} は B サイトにおいて、低スピン状態で存在する可能性がしめされ、両者が互いによく一致することがわかり、統一的な解釈が可能になりつつあります（本号「最新の研究紹介」参照）。