

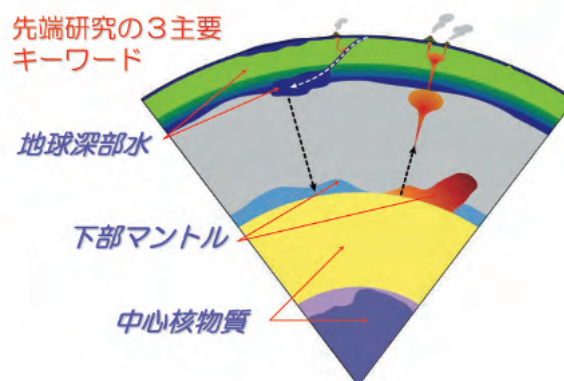
4. 研究活動

4-1. 研究活動概要

本 COE では、愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター (GRC) を中核とし、独自の実験技術を有する超高压実験分野と、最先端の研究活動を展開している第一原理計算分野を主体として、地球深部物質学の国際的拠点形成を目指して研究活動を展開している。連携機関との共同により、放射光と中性子を活用した先端技術の開発能力を持つ人材育成をおこなうとともに、GRC の超高压実験基盤を活用し、物性科学・材料科学などの学際的研究の推進にも力を入れている。特に「地球深部水」、「下部マントル」、「中心核物質」を主要なキーワードとして先端研究を推進するとともに、GRC が独自に生み出した世界最硬ナノ多結晶ダイヤモンド (ヒメダイヤ) の超高压実験への応用や、高温高压下での弾性波速度精密測定、また新たな第一原理計算手法など、地球深部物質学に関連した独自技術の開発も重視している。このような独自技術の開発と先端研究の推進過程を通じ、高度な技術開発能力と高いモチベーションとともに、豊かな構想力を持つ先導的研究者と先端的技術者・研究者の育成を目指している。

GRC での研究は、実験系 5 つ (「超高压」、「マグマ流体」、「新物質合成」、「レオロジー」、「DAC」) と、理論系 2 つ (「鉱物物性理論」、「ダイナミクス」) の計 7 つのグループに分かれておこなわれているが、それぞれのグループは互いにオープンにした会議やセミナーを開いており、多くのメンバーが複数のグループに属している。このような体制のもと、自然発生的に共同研究が活発におこなわれている。研究のキーワードである「下部マントル」「中心核物質」は特別推進研究のメンバーが中心に、また「地球深部水」は新学術領域研究のメンバーが中心になり、それぞれ適宜会合を開いて研究を推進している。これらには実験系と理論系のメンバーがそれぞれ含まれており、グループ横断的に連携をとって研究活動をすすめている。「革新技術開発」に関しては、SPring-8 のパワーユーザーメンバーを中心に定期的会合を持ち、やはり横断的な連携体制のもと研究がすすめられている。一方で、GRC 全体のセミナーや実験系と理論系の合同勉強会の開催などを通じて、研究成果・情報の共有や議論も活発におこなわれている。その結果、下部マントル上部の化学組成、より現実的な化学組成を持つ場合のポスト・ペロフスカイト相平衡、核-マントル境界の温度構造などに関し、本 COE 事業のもとですでにいくつかの重要な成果も得られている。

連携先においては、東京大学グループによる化学分析や中性子回折超高压実験、SPring-8 グループによる精密弾性波測定実験や超高压発生技術開発、ストーニーブルック大学グループによる超音波弾性波速度測定の技術開発、愛媛大学理学部地球科学科グループによる試料合成・弾性波測定・地球科学情報処理など、それぞれの得意分野を用いた活動の展開と、GRC を中核とした相互の研究・技術交流を図っている。



4-2. 研究グループの概要と成果

次ページから、各研究グループごとに、これまでに行ってきた研究活動の概要と得られた主な成果について紹介する。

超高压グループ(リーダー：西山宣正)

概要 マルチアンビル型装置を活用した超高压高温実験を行い、地球深部物質の相関係、状態方程式、弾性波速度の決定を行っている。本COE事業においては、主として、「下部マントル」、「革新技術開発」のキーワードに貢献する先端研究を推進している。また本グループでは、連携先である第3世代放射光施設、SPring-8のビームラインBL04B1におけるマルチアン



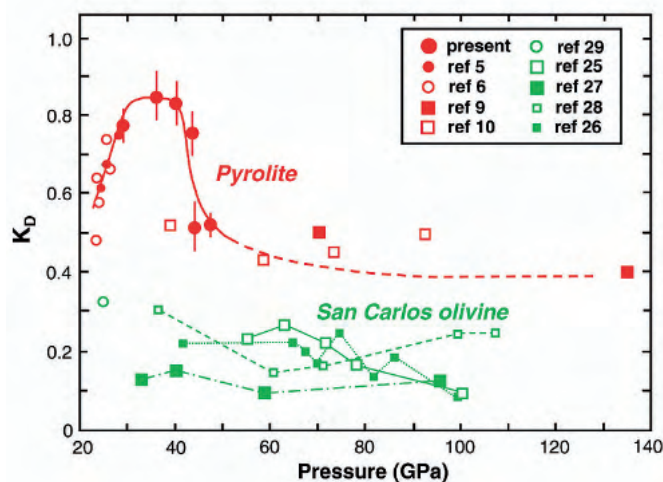
ビル型装置と放射光 X 線を利用した実験を主な研究手法としている。このような研究を通して、地球深部鉱物の物性測定、マントル遷移層および下部マントルの化学組成、地震学的不連続面の物質科学的解釈などの研究を展開している。

基盤的設備・手法 本COE期間内に焼結ダイヤモンドアンビルを第2段アンビルに用いる大型マルチアンビル型装置、MADONNA-IIが設置された。この装置は、それまでに設置されていた高圧下における変形実験を可能にする装置、MADONNAを上記の実験目的に特化して製作されたものである。MADONNA-IIでは立方体の加圧空間の高圧下でのゆがみをこれまでの装置よりも小さく抑えることに成功しており、これにより焼結ダイヤモンドアンビルを用いた50GPa以上での実験をより安定して行うことができるようになった。本グループでは、地球深部ダイナミクス研究センター(GRC)にこれまでに設置されている大型マルチアンビル型装置(ORANGE-1000, ORANGE-2000, ORANGE-3000)を使用して、高圧試料の合成や急冷回収法を用いた相平衡実験を行っている。また、SPring-8のBL04B1に設置されているSPEED-1500, SPEED-Mk.IIを使用して高温高圧下におけるX線回折実験、X線透過像観察、弾性波速度測定を行っている。さらに、GRCに設置されている微小領域X線回折装置、粉末X線回折装置、ラマン分光測定装置を用いた回収試料の相同定や格子定数測定、EDS付き電子顕微鏡を用いた化学組成分析を行っている。

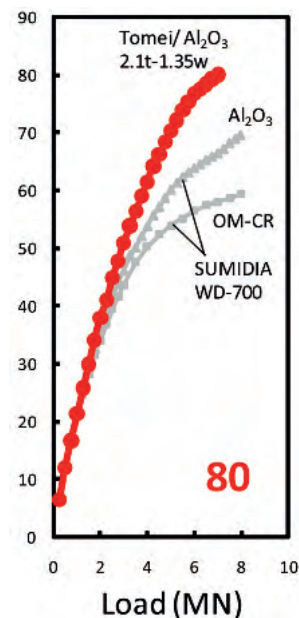


研究成果の具体例

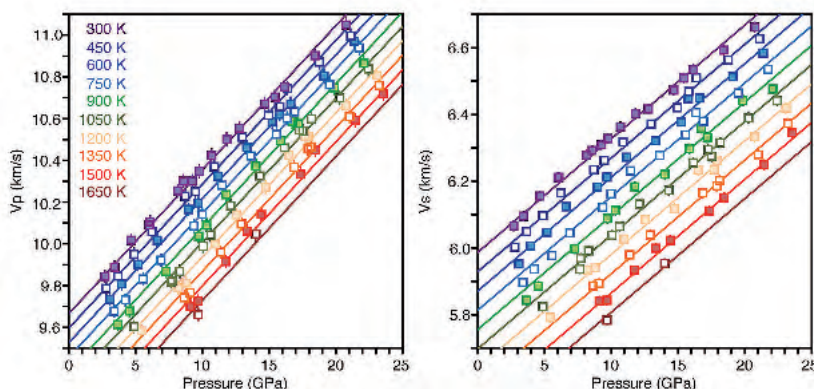
1. **下部マントル 焼結ダイヤモンドアンビルを第2段アンビルに用いた SPring-8 の SPEED-Mk.II を使用して** パイロライトの相関係を圧力約 45GPa まで調べ、下部マントル条件下におけるマグネシウムケイ酸塩ペロブスカイト (MgPv) とマグネシオウスタイト (Mw) の鉄-マグネシウム分配係数 K_D を求めた結果、圧力とともに増加するセンスにあった K_D は、圧力約 40GPa を境に、減少し始めることが明らかとなった (Irifune et al., Science, 327, 193, 2010)。この減少の開始は、Mw 中の Fe^{2+} のスピン転移に伴うその増加が原因であると考えられる。しかしながら、このような鉄-マグネシウム分配係数の変化は、パイロライトの下部マントル条件下における鉱物構成比、密度には大きな影響を与えることはなく、計算された密度は地震学的モデルとよく一致する。本研究の結果は、パイロライトが下部マントルの上部から中部のモデル物質として適していることを示している。



2. **下部マントル、革新技術開発 焼結ダイヤモンドアンビルを用いて** 圧力発生実験を行い、80GPa を超える圧力発生に成功している (Tange et al., High Press. Res., 28, 245, 2008)。このような技術開発の結果、マルチアンビル型装置を用いて、下部マントル中部条件までの精密な実験的研究が可能になった。

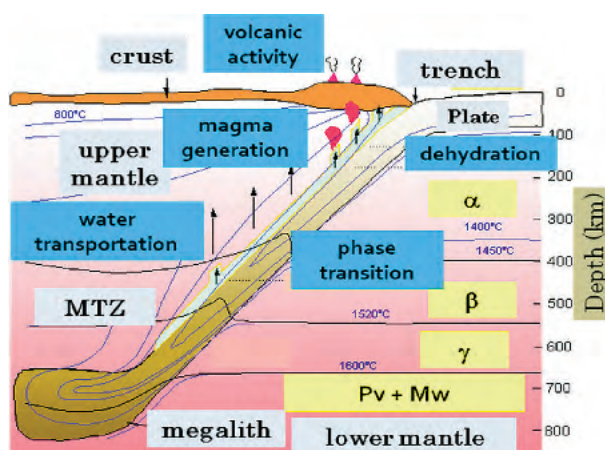


3. **下部マントル、革新技術開発 下部マントル鉱物のマグネシウム端成分であり、圧力マーカーとしても頻繁に使用される MgO の弾性波速度測定を** 圧力約 24GPa、温度 1650K まで測定した (Kono et al., Phys. Earth Planet. Inter., in press, 2010)。MgO の高温高压下における弾性波速度と格子体積測定を同時に行うことにより、圧力マーカーを使用せずに、発生圧力を算出し、他の圧力スケールに依存しない状態方程式を構築した。また、下部マントル鉱物の弾性波速度測定も技術的に可能であることを示した。

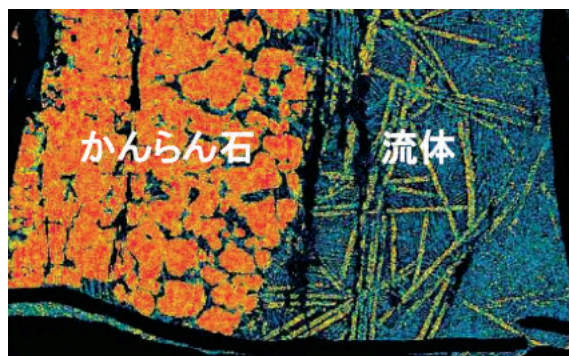


マグマ流体グループ (リーダー：井上徹)

概要 マグマ流体グループでは、地球内部におけるマグマ・流体の生成条件やその影響・役割等について、物理化学的な側面から構造の側面まで多岐にわたる解明、特にマグマ・流体の生成においては揮発性成分が鍵となるためその影響の解明、また、地球内部での含水鉱物や無水鉱物中の水、およびその影響の解明を下部マントルまでをターゲットとして行っている。本 G-COE 事業においては、「地球深部水」プロジェクトと深くかかわって研究を行っている。また本グループのメンバーは、新学術領域研究『中性子地球科学』や『地殻流体』プロジェクトにも多大にかかわっており、これらを通して「中性子」という新しい「量子ビーム」を利用した研究の創成や、「地殻流体の起源、実態、役割の解明」を目指している。



基盤的設備・手法 高温高压実験を軸として、各種分析技術、分光学的手法、放射光 X 線その場観察等を駆使して研究を遂行しており、高温高压発生装置 (ORANGE-1000, 2000, 3000)、走査型電子顕微鏡、電子線マイクロプローブ、X 線回折 (ゴニオ、微小部)、顕微ラマン分光、顕微赤外分光、二次イオン質量分析計 (北海道大学との共同研究) を主なツールとしている。また放射光 X 線その場観察実験は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の放射光施設 (PF-AR) を主に用いて研究を遂行している。さらに、「中性子」を利用した実験は、現在新学術領域研究によって立ち上げつつある J-PARC のビームラインで行いつつある。



研究成果の具体例

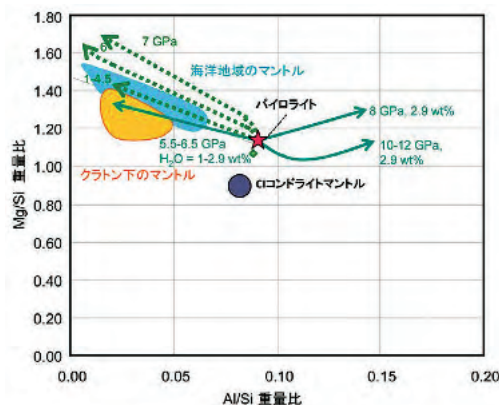
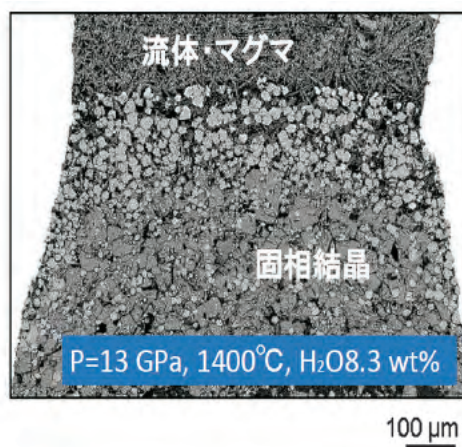
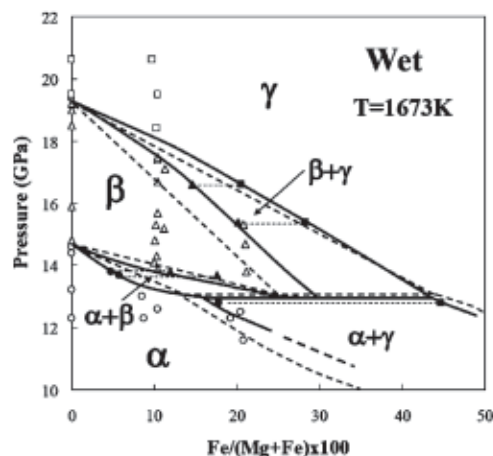
1. 高压相鉱物間の水の分配・相転移境界における影響 カンラン石の相転移境界における水の影響、及びそれらの相間の水の分配を明らかにした。その結果、カンラン石 (α):ウオズレアイト (β):リングウッドイト (γ):ペロプスカイト間の水の分配は 6 : 30 : 15 : 1 となることが明らかとなり、今まで指摘してきたように、マントル遷移層が地球内部の主要な水のリザーバーとなることを水の分配の立場から明らかにした。さらにこの影響により、 β 相の安定領域が広がることが明らかとなった (Inoue et al., J. Phys. Conf. Ser., 215, 012099, 2010)。引き続き他の相間の水の分配に関して明らかにする研究を進めている。

2. 地球内部で生成されるマグマの含水量 地球内部に存在する水は鉱物中に固定されなければ、鉱物の融点を下げることによりマグマ・流体相として存在し、その流体相中の含水量は温度圧力が一定の場合ユニークに決定されると考えられる。この考えから、地球内部で生成されるマグマの含水量を温度圧力の関数として明らかにしつつある。

3. マグマの構造、及び中性子利用実験セルの開発 放射光 X 線その場観察法により、高温高压下における含水マグマの構造を明らかにする研究を MgO-SiO₂-H₂O 系、及びアルバイト-H₂O 系で行っている。さらに水素の位置の情報を得るため、中性子を利用した実験に向けての実験セル開発を行っている。

4. 大陸クラトン下マントルの化学多様性 大陸クラトン下のマントルは Mg と Si の両方に富んでいるという特異な化学組成を有する。この特徴が初期マントルにおける大規模な“地球深部水”の不均質によってもたらされたという仮説に基づき、パイロライト-H₂O (-CO₂) 系の部分融解実験を進めている。予察的な結果ではあるが、深さ 200km 相当の圧力、H₂O 及び CO₂ 成分の存在下でパイロライトが部分融解するとその融け残り物質は高 Si 含有量を示しつつ Mg に富む様になり、仮説が正しいことが示されつつある。

これらの研究に加えて、蛇紋石の脱水分解反応カインテイクス (Inoue et al., J. Mineral. Petrol. Sci., 104, 105, 2009)、含水鉱物の状態方程式、鉱物-フルイド間の元素分配などの研究も遂行している。



鉍物物性理論グループ (リーダー：土屋卓久)

概要 第一原理電子状態シミュレーションを軸とした理論的・計算物理学的研究手法に基づいて、地球惑星物質の高温高圧物性の定量予測をおこなっている。またそのための手法開発をおこなっている。本 COE 事業においては、予察的結果の提供や実験結果の理論的検証・解釈など、理論面からのサポートを一手に引き受けており、それらを通じて地球や惑星内部の物質構成、形成・進化プロセス、動的システムの解明などを目指して研究を展開している。

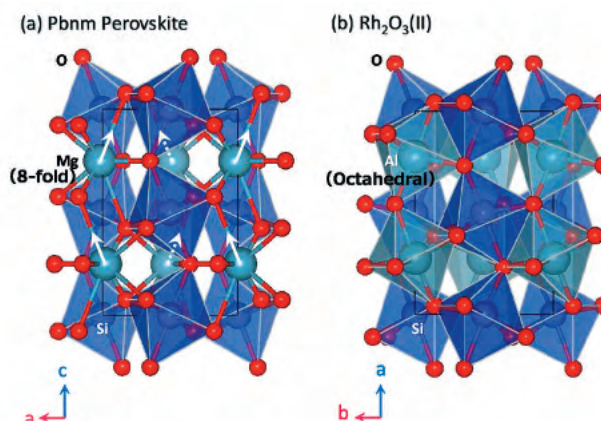


基盤的設備・手法 本 G-COE 期間内に2つのクラスタ型大規模並列計算機、pyrope (80CPU, 640GB メモリ) と knorringite (60CPU, 480GB メモリ, Infiniband インターコネク) を導入し、既存の並列計算環境 (GRC-Parallel Computing System) を大幅に拡張した (前者は G-COE 経費、後者は上級研究員センター経費による)。第一原理格子動力学法+準調和近似による熱力学諸量の計算プログラム、定温第一原理分子動力学計算プログラムなどが整備されており、これらに基づき構造安定性、弾性特性などの第一原理シミュレーションが恒常的に実行可能となっている。本 G-COE 事業の推進に当たり、これらに加えて固溶体の熱力学特性を効率良く計算する多配置サンプリング (MCS) 法、安定構造を効率良く探索する自由エネルギー面トレンキング (FEST) 法、直接格子動力学法と内部無撞着 LDA+U 法を組み合わせた鉄酸化物系物質のフォノン計算手法など、オリジナルのシミュレーション手法や計算コードの開発を進めている。他グループの研究者などにもこれらの基盤設備の利用機会を提供しており、手法の普及に努めるとともに国内外の研究グループと活発な共同研究を展開している。

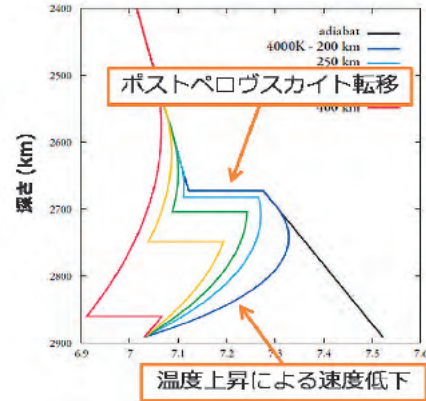
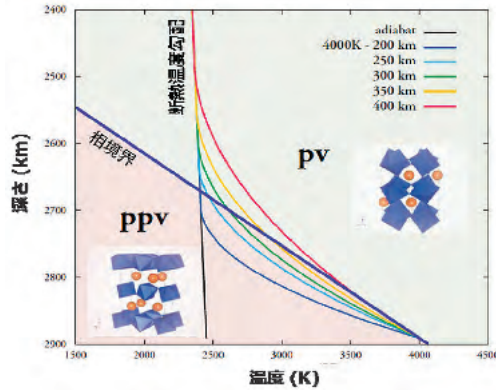


研究成果の具体例

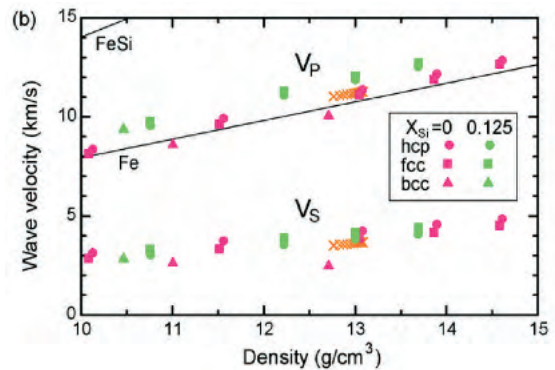
1. 下部マントル 多配置サンプリング法を開発し $\text{MgSiO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系におけるポストペロヴスカイト相平衡を調べた結果、 Al_2O_3 が固溶した場合でもポストペロヴスカイト相転移は十分狭い圧力範囲で生じ、地震波不連続面が形成されることがわかった (Tsuchiya and Tsuchiya, PNAS, 105, 19160, 2008)。さらに波形インバージョン法などから得られる地震波速度構造を再



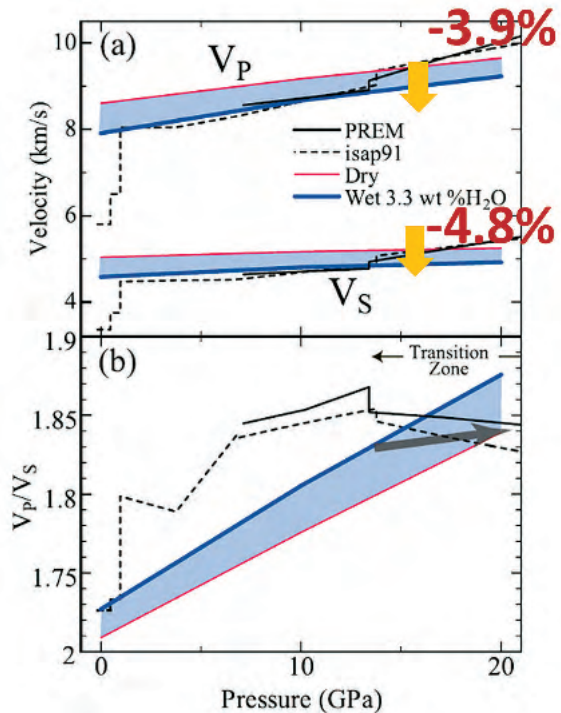
現し、核-マントル境界の温度は 3800K 程度であり、広域的には二重相転移は生じていないことを明らかにした(Kawai and Tsuchiya, PNAS, 106, 22119, 2009)。現在化学的不均質の詳細の解明、さらに異方性の物質の起源についての研究を進めている。



2. 中心核 鉄の超高压弾性特性とSiの固溶効果を調べた結果、10mol%程度までのSi濃度であればFe-Si合金は地球内核の密度と地震波速度の関係をおおむねよく再現することがわかった(Tsuchiya and Fujibuchi, PEPI, 174, 212, 2009)。現在FEST法とMCS法を組み合わせ、内核に対応する高温下における固体鉄の新しい結晶構造モデルを推定し、興味深い成果を得つつある。



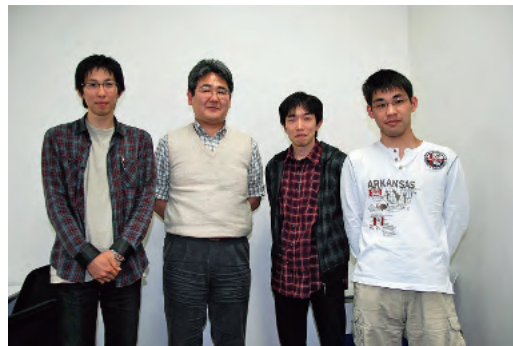
3. 地球深部水 マントル遷移層鉱物であるウォズリアイトに対する水の固溶メカニズムと弾性特性への固溶効果を計算した結果、1wt%の水の固溶は350-450K程度の温度上昇と同程度の効果を持つことがわかった(Tsuchiya and Tsuchiya, JGR, 114, B02206, 2009)。現在、蛇紋石の高压弾性特性を計算し地震学的観測結果を解釈することで、沈み込み帯における水分分布の推定を試みている。さらに新しい高压安定含水相の探索をおこない、地球深部への水輸送メカニズムについて研究を進めている。



4. 革新技術開発 現在、非調和格子動力学理論に基づくフォノン散乱と格子熱伝導率、転位論に基づく塑性特性、水素など軽い原子の量子ダイナミクスなど、鉱物物性シミュレーションにおける次世代の革新技術開発も精力的に進めている。

ダイナミクスグループ(リーダー：亀山真典)

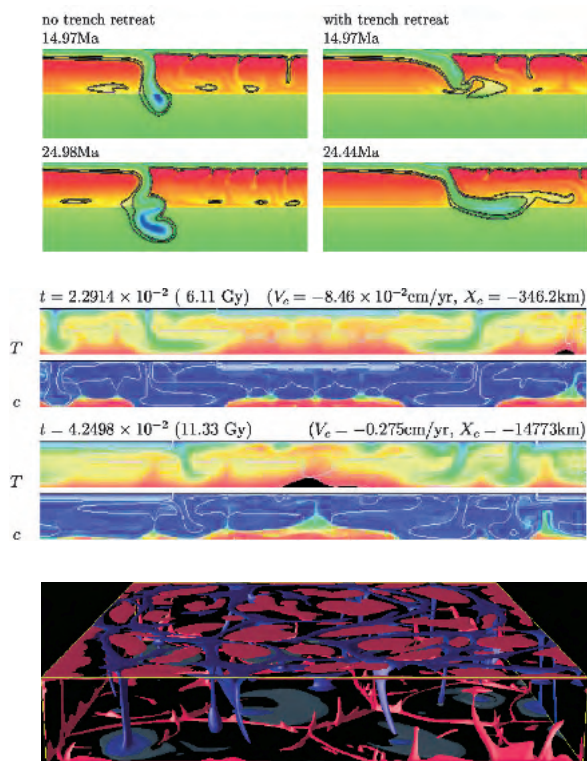
概要 本グループでは、数値流体力学あるいは連続体力学を主な手段とし、地球惑星内部で起こっているダイナミックな運動の計算機シミュレーションやその手法の開発、及びこのシミュレーションにより地球惑星内部のダイナミクス・進化の過程を調べる研究を行っている。このグループは比較的新しく、かつ少人数ではあるものの、本拠点においていわば「異彩を放つ」存在である。具体的には、ミクロな視点から地球惑星内部を調べる研究が主流の本拠点にあって、その対極となるマクロな視点からの描像を提供し、これを通して本 COE 事業へ貢献することを目指している。また、大規模な時間・空間スケールでの地球惑星内部ダイナミクスを直接扱うグループであることの希少性を生かし、本拠点内のみならず、他の地球深部物質学関連拠点との連携・協力も順次展開しつつある。



研究手法・設備 本グループで実施している数値シミュレーションは、ほとんど自作のソフトウェアによるものである。シミュレーションに用いる手法はオイラー的なもの(差分法・有限体積法)からラグランジュ的なもの(粒子ベースの方法)まで多岐にわたる。また扱う問題に応じて最適なモデルの形状・サイズをも柔軟に使い分けることにより、シミュレーション研究の効率を可能な限り高める工夫も行っている。同様の工夫はシミュレーションに用いるハードウェアに関しても適用され、PC や PC クラスタ(一部は本 G-COE によって GRC 内に措置)、あるいは地球シミュレータに代表される外部のスーパーコンピュータなどを、目的や問題規模に応じて選択し、かつ必要なソフトウェアの最適化をも自らの手で施した上で利用している。

研究成果の具体例

1. 下部マントル ここでは、高温・高圧下で予想されるマントル物質の物性変化に注目し、地球型惑星のマントル内部に特徴的にみられる大規模構造の成因を調べることを主な目的としている。まず、流体の断熱圧縮の効果を取り入れたシミュレーションモデルの開発も行い、最近行なわれた圧縮性マントル対流プログラムのベンチマークの1つとして採用された(King, 6 authors, and Kameyama, GJI, 180, 73, 2010)。また、粘性率が温度に強く依存する流体の球殻内での熱対流の計算を数値的及び半解析的な手法によって系統的に行ったところ、温度依存性により対流層の上下で 10^4 倍程度の粘性率コントラストがある場合には、「冷たくて固い『ふた』」と、その下の長波長な対流セル、で特徴づけられるパターンとなり、地球や地球型惑星のマントル内部の様子と調和的な描像が得られることが分かった

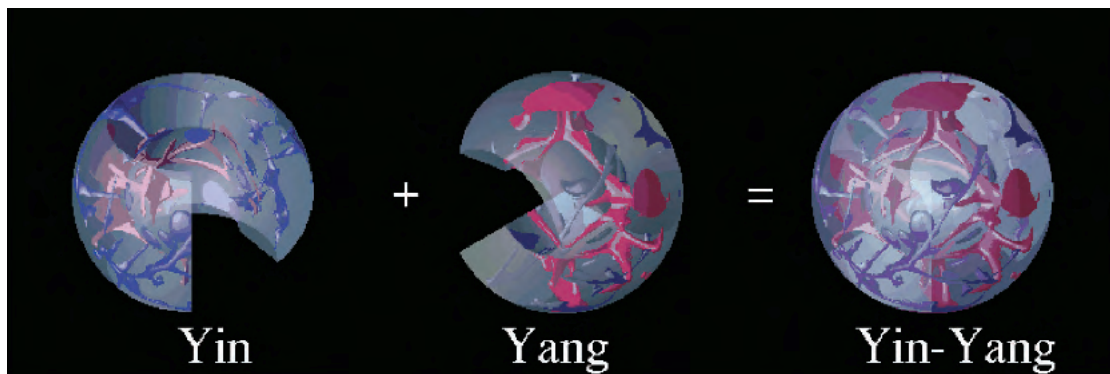
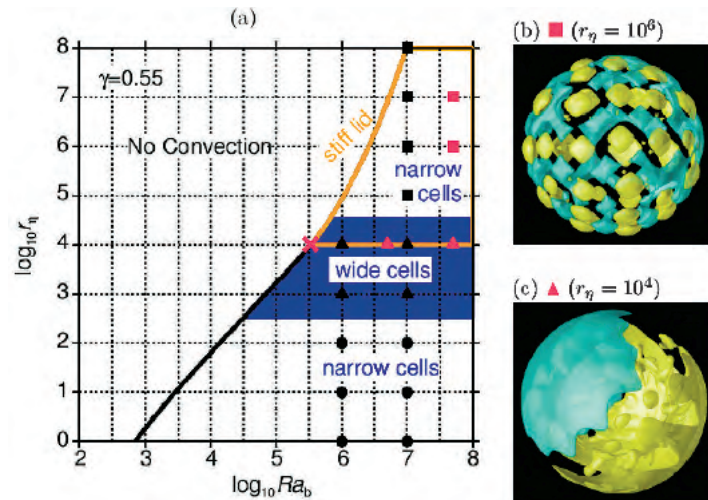


(Kameyama et al., PEPI, 171, 19, 2008 ; Kameyama and Ichikawa, submitted)。今後は粘性率や圧縮性の効果に加えて、熱膨張率や熱伝導率の温度・圧力変化、及びそれらの鉱物組成や相状態の違いに起因する違いに注目して調べていく予定である。

これと並行して、化学的不均質の存在が対流様式に与える影響に注目したシミュレーションも行っている。ここでは、マントル深部の化学的不均質と地表面の不均質(「超大陸」のあるところとないところ)の分布との間に何らかの時空間的な因果関係が存在するか否かについても考察を加えていく予定である。

2. 中心核 ここでは、地球史初期に期待される大規模な溶融状態(マグマオーシャン)中で岩石成分と金属鉄が分離する過程、及び核が形成される際に起こる熱的あるいは化学的プロセスをターゲットとした研究を行っている。このシミュレーション研究を通して、核中に含まれる軽元素の種類と量、地球史初期におけるダイナモ熱源、そして核・マントルの間での親鉄元素の分配と金属成分の分離過程との関係について考察を加える予定である。

3. 革新技術開発 現在は、マントル対流の革新的シミュレーションモデルの構築の1つとして、「多相系」を扱うための技術開発を進めている。具体的には、マントル対流で標準的な固相の流動と、固相と液相の相対運動を同時に扱えるようなモデルの開発を行っている。このモデルの開発を進めることで、ただ「下部マントル」のみならず、G-COEの研究テーマ3つの全てに貢献していくことを目指している。これと並行して、より高度な地球惑星内部ダイナミクスシミュレーションを開拓する上で不可欠な要素である、計算機ハードウェアの進歩に応じた既存プログラムの更新・改良にも継続的に取り組んでいる。



レオロジーグループ (リーダー：西原遊)

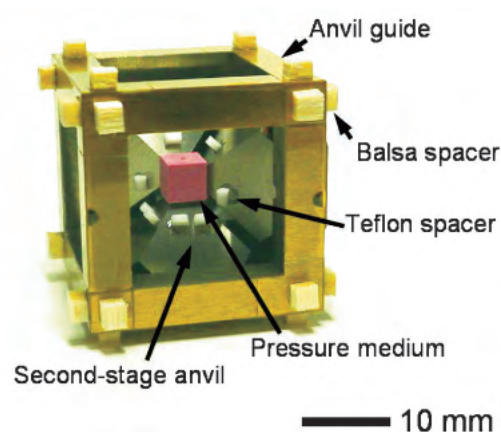
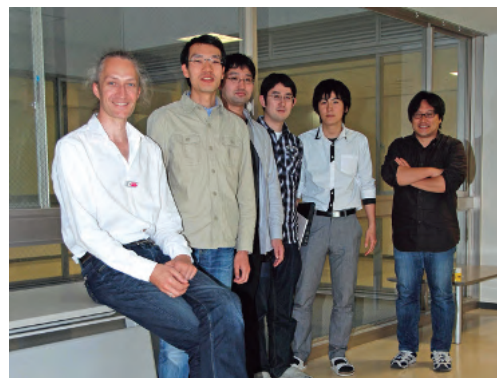
概要 高温高压変形実験を軸とした実験岩石学的手法に基づいて、地球深部物質についてのレオロジー・鉱物化学反応カインेटクスなどの輸送特性の解明を進めている。本 G-COE 事業においては、輸送特性に対する地球深部水の与える影響の研究、これまで未開拓だったマントル遷移層・下部マントル条件における定量的変形実験の革新技術開発を進めており、地球深部での物質輸送の速度や様態の理解に向けた研究を進展させている。

基盤的设备・手法 本グループの軸となる高温高压変形実験は、主に最高荷重 1500トンで世界最大の DIA 型変形装置である MADONNA (Multi-Anvil Device ON Newer Applications)を用いて行われている。本装置は、立方体の試料空間を6方向から均等に加圧する能力と、加圧したのち上下方向から力を加え、試料を高压下で変形させる能力を有している。この装置と組み合わせ、本グループで開発・改良が行われた MA6-6 加圧方式を用いて精密に圧力媒体を圧縮することで、現在までに最高 20GPa、2000K までの高温高压下での変形実験が実現されている。

変形実験などの回収試料の分析において特に重要な存在は電子後方散乱回折 (EBSD) 検出器を備えた電界放出型走査型電子顕微鏡 (FE-SEM) である。この装置は通常の走査型電子顕微鏡に比べ、像観察において約一桁高い空間分解能を有しており、変形後の試料中の転位や粒界などの微細組織の観察に威力を発揮している。また、変形により生じた格子選択配向の測定が電子後方散乱回折により行われている。そのほか、レオロジー特性に決定的な影響力をもつ試料中の水素の分析はフーリエ変換型赤外分光装置 (FTIR) を用いて行われている。実験に用いる緻密な焼結多結晶体や単結晶の試料の加工には超音波加工機、ワイヤー切断装置、レーザー精密切断装置などが用いられている。

研究成果の具体例

1. **地球深部水** 上部マントルに相当する温度圧力条件での変形実験により、上部マントル主要鉱

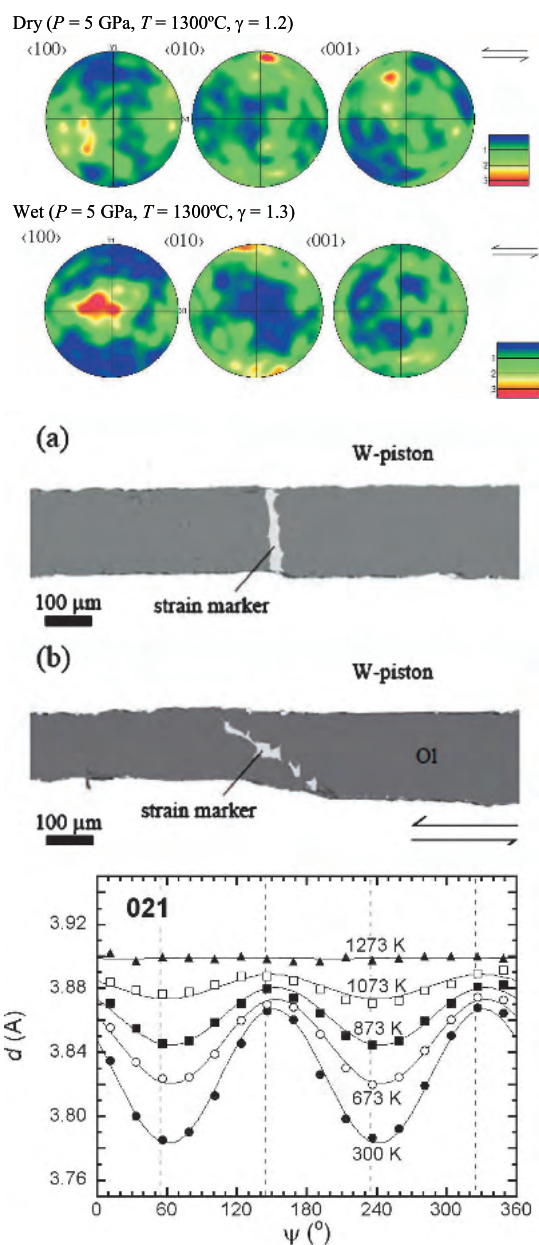


物カンラン石の格子選択配向に対する水と圧力の影響を調べた。その結果、低圧で無水の条件下ではせん断方向に a 軸が配列するのに対し、高圧または含水条件下ではせん断方向に c 軸が配列することがわかった。このことから、スラブ沈み込みによって変形され生じると考えられる上部マントルの地震波速度異方性は、比較的深部では浅部とは異なり、またスラブの含水量によっても速度異方性が異なる可能性が示唆される。

2. 革新技術開発 MADONNAとMA6-6 加圧方式を組み合わせることにより、従来よりも精密な加圧・変形制御が可能となった。この実験手法に基づき、従来は困難だったマントル遷移層条件に相当する高温高圧下の定量的変形実験の技術開発に成功した。この技術を用いて、マントル遷移層での物質流動における地震波速度異方性の発達や粘性率の解明に向けた実験的研究を進めつつある。

これまで DIA 型変形実験装置でのせん断変形実験の成功例は 3GPa, 1300K までに留まっていた。われわれは、圧力媒体等を改良することにより 7GPa, 1800K までの条件下でせん断変形を実現した。この技術を用いて、従来の一軸圧縮変形実験からは評価の難しかった地球深部の格子選択配向の解明に向けた実験的研究を進めている。

変形実験において応力とひずみは試料の変形を評価するうえで重要な観測量であるが、高圧下の試料の応力とひずみの計測には放射光 X 線を用いた方法がもっとも有用である。このため、現在、高エネルギー加速器研究機構の放射光施設 PF-AR で予備的な実験を行っている。またこれと並行して放射光施設 SPring-8 での精密な高温高圧変形実験の実現に向けて準備を進めている。現在までのところ SPring-8 のビームライン BL04B1 では、単色 X 線と 2 次元 X 線回折を組み合わせた高温高圧下での応力測定を実現している。将来的には MADONNA を導入することで、下部マントルの流動特性解明に向けた変形実験を可能にしたい。

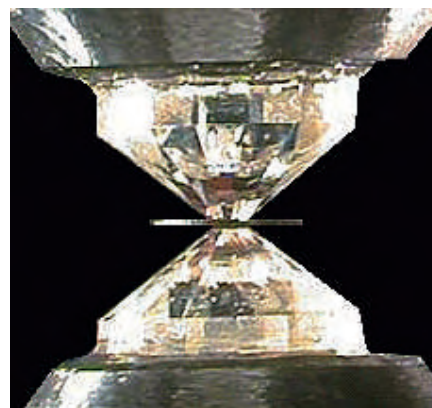


DAC グループ (リーダー：平井壽子)

概要 本グループはダイヤモンドアンビルセル (DAC) を用いた高圧実験を基盤とし、地球・惑星の深部、すなわち核や下部マントル物質の組成や構造、進化過程に関する研究を行っている。また、DAC により発生させた高温高圧により新物質創成の研究も行っている。本グループでは DAC という共通の高圧発生技術を用いているが、その研究内容は多岐に渡り、扱う物質系も多様である。地球・惑星深部は高温高圧であり、特に核や下部マントル底部の条件は現在レーザー加熱 DAC (LHDAC) によってのみ実現させることが可能である。



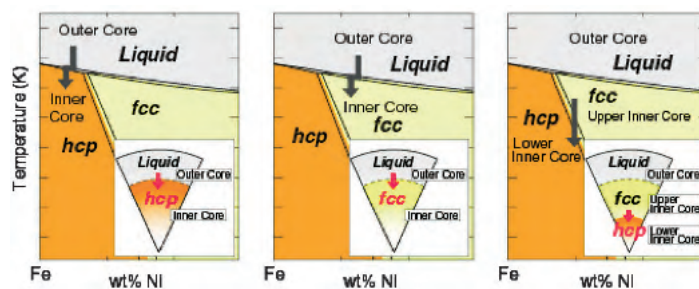
LHDAC によりこの環境を発生させ、核を構成する物質の組成や結晶構造の研究、核-マントル境界付近でのマントル鉱物の融解実験、ペロブスカイトやポストペロブスカイト中 3 価鉄のスピンの転移の研究、マントル鉱物と C-H-O 流体との反応の研究等を行っている。また、氷惑星・衛星深部は低温から高温までの広範囲な温度条件が存在するため、クライオスタットを用いた低温 DAC や LHDAC を用いて、メタンハイドレートや水素ハイドレートの相変化や高圧物性の研究を行っている。また、新物質創成に関しては、GRC で合成された NPD の物性向上の研究や C-N 系ハードマテリアルの合成研究も行っている。



基盤的手法・設備 DAC グループの基本的実験手法は DAC による高圧実験と物性評価である。対象とする温度圧力領域や研究目的により多様な DAC を用いている。物性評価も目的により種々の手法を採用しているが、放射光を用いた高圧下その場観察は共通した手法である。最も一般的なものは X 線回折による結晶構造の決定で、この他、X 線発光分光法によってスピン状態の測定も行っている。高圧下のその場観察だけでなく、回収試料を分析電顕 (A-TEM) や FE-SEM を用いて、微細組織観察、結晶構造、化学組成等を評価している。また、その場・回収両試料に対してラマン・赤外分光法を用いて、構成分子・原子の振動状態や結合状態の評価を行っている。このように放射光を用いたその場測定と回収試料の評価を組み合わせることにより、高圧下での現象や物性をより的確にとらえることを可能にしている。

研究成果の具体例

1. **中心核** 地球最深部内核は鉄を主成分とする固体金属からできていることは明らかであるが、その組成や構造も現在十分に明らかにされていない。内核の基本物性を理解するため、LHDAC を



もって中心核のマルチメガバールの条件を発生させ、主成分である Fe-Ni 合金の相図を決定した。この結果に基づき内核の組成と構造を推定し、内核の形成過程を検討した (Kuwayama et al., PCM, 36, 511, 2009)。

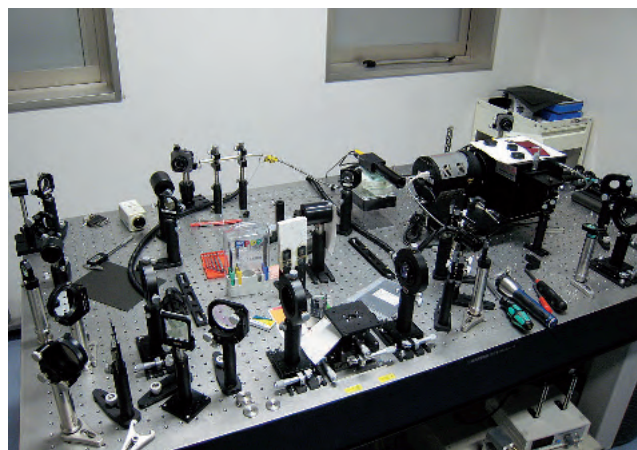
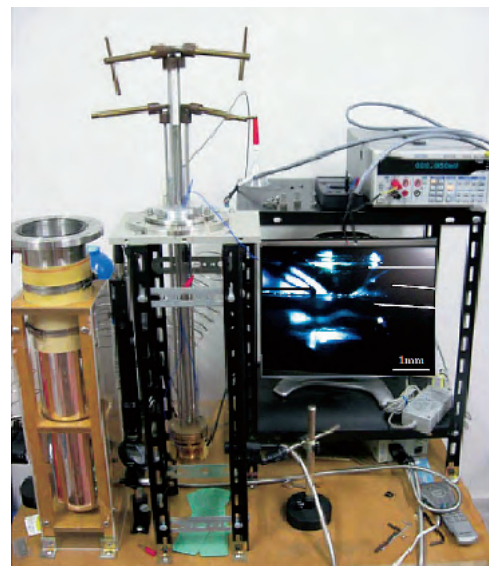
2. 下部マントル 3 価鉄のスピン転移は下部マントルの物性を左右する重要な要素である。FeAlO₃ 成分を含むペロブスカイト及びポストペロブスカイトにおける 3 価鉄のスピン状態を放射光 X 線発光分光法を用いて測定した。また、ペロブスカイトの安定性と類似物質のポストペロブスカイト転移の可能性を明らかにした (Kuwayama et al., PCM, 36, 511, 2009)。

3. 地球深部水 マントルは深部になるほど還元的になり、水やメタンが C-H-O 流体の主要な成分となる。マントル条件下でオリビンとメタン-水の高温高压処理を行い、マントル条件下でメタンの重合が進み黒鉛が形成され、一方解離された水素がオリビンと反応することが明らかとなった。

4. 革新技術開発 上述した核物質の物性決定には LHDAC を用いたマルチメガバールでの高温高压その場観察実験技術が不可欠であり、この技術を確立した。また、ガスハイドレートの試料充填法は安全性や経済性から将来低温液化充填法に移行すると考えられるが、各種 DAC に適用でき、液化水素まで充填できる装置を開発した (Machida et al., Rev. Sci. Instr. 81, 033901, 2010)。

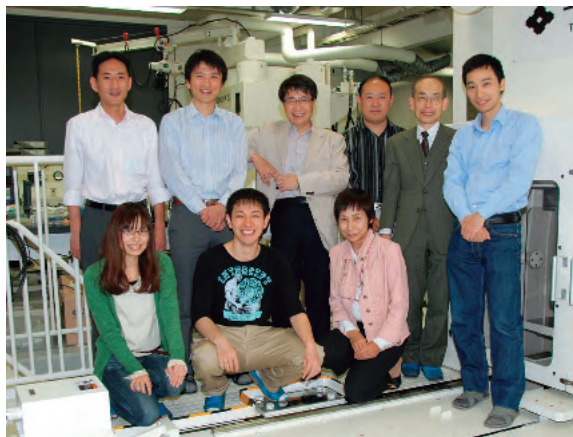
5. 新物質創成 GRC で合成された NPD の微細組織と強度や出発物質の組織との関係を TEM やラマン分光などを用いて明らかにし、その結果を基に NPD の物性向上や大型化が図られた (Okuchi, Ohfuchi et al., Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process., 96, 833, 2009)。

6. ガスハイドレートおよび氷の高圧物性 水素ハイドレートの高圧安定性や相互作用に関する研究が行われ、また、固体メタンの高温高压状態変化を明らかにし、その結果から海王星氷マントルの状態が推定された (Hirai et al., PEPI, 174, 242, 2009)。

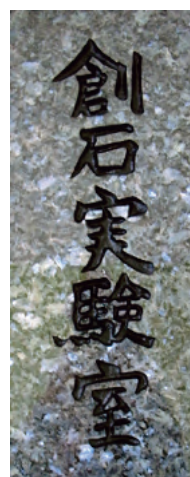


新物質合成グループ(リーダー：入船徹男)

概要 マルチアンビル装置を利用した高温高圧合成技術に基づき、独自に開発した超高硬度ナノ多結晶ダイヤモンド(NPD=ヒメダイヤ)をはじめ、様々な地球関連物質や新しい超硬物質・新物質の合成を試みている。特にヒメダイヤの大型化・特性評価・高品質化に関する研究をすすめるとともに、種々のタイプの超高压発生装置への応用もおこなっている。また、ヒメダイヤ合成技術を地球深部物質に応用することにより、高压相の高品質多結晶体の合成も試みており、地球深部物質の弾性波速度測定や変形実験などに試料を提供することも目指している。一方で、学内外の他分野の客員研究員等との共同研究を推進し、GRCの超高压技術を利用した学際的研究の展開を図っている。



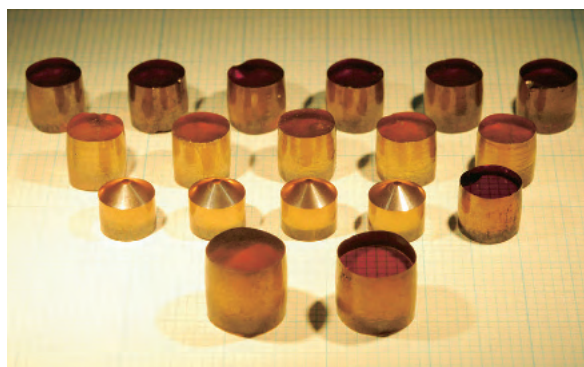
基盤的設備・手法 2009年に設置した「創石ラボ」に導入された、世界最大級のマルチアンビル(MA)装置(BOTCHAN-6000)、およびGRC設置のORANGE-3000, 2000を中心とした大型MA装置を主要な合成手段として用いている。得られた合成物質はGRCの様々な分析装置群や、弾性波速度等の物性測定手法により特性が評価される。また、必要に応じて放射光X線その場観察実験も併用している。



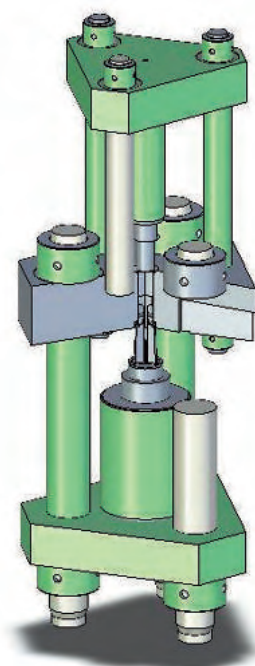
研究成果の具体例

本グループはGRC超高压グループから分離したが、同グループとは特に強い連携を保って研究活動をすすめている。特に本グループで得られたヒメダイヤは、超高压グループによりその応用が図られ、また合成された高压相多結晶焼結体を用いて弾性などの物性測定が行われている。

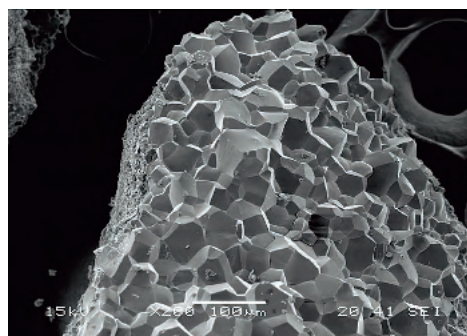
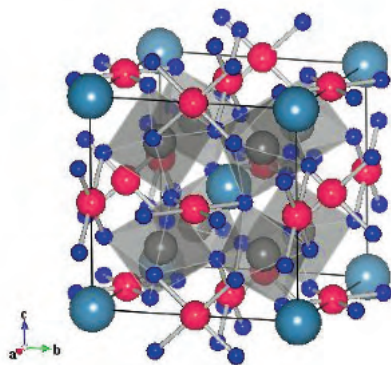
1. 革新技術開発 2003年にNature誌に初めて発表したヒメダイヤが直径1mm、厚さ0.4mm程度であったのに対し、2009年には体積で1000倍を超える、直径長さともに8mm程度の大きさの試料が合成可能になった。また、その合成圧力下限についても従来より3GPa低い12GPa程度の比較的低い圧力下でも合成可能であることが明らかになった(Isobe et al., J. Phys. Conf. Ser., 215, 012136, 2010)。また、これをMAやDACなどに利用する試みがおこなわれ、例えば“6-8-2加圧方式”を用いたMAにおいて125GPa、1000Kの発生に成功している(Kunimoto & Irifune, J. Phys. Conf. Ser., 215, 012190, 2010)。最近では大型ヒメダイヤを利用したドリッカマー型装置への応用が試みられるとともに、中性子実験用の高压装置開発も開始されている。



2. 下部マントル物質 高い透光性を有するヒメダイヤ合成において培った高压下焼結体合成技術を用い、様々な高压相の良質焼結体合成を開始している。ガーネットを中心とする上部マントル～マントル遷移層領域の主要高压相とともに、ケイ酸塩ペロブスカイトを初めとする下部マントルの主要高压相やそれらを含む多成分系焼結体の合成も予定している。このようにして得られた高品質多結晶体は、超音波法による弾性波速度精密測定や、高压下変形実験等の試料に供される予定である。また、ORANGE-3000やBOTCHAN-6000の大容積試料部を利用し、中性子回折実験のための高压相の大量合成や、高压相単結晶の合成もターゲットとしている。



3. 新物質合成 物質科学や物性科学をバックグラウンドとしたメンバーや、客員研究員等との共同研究により、新奇高温超伝導物質や超硬物質の高温高压合成実験に取り組んでいる。これまでに、グラファイト以外にも様々なカーボン(C₆₀、ナノチューブ、アモルファスカーボン、グラッシーカーボン、他)を用いたヒメダイヤ、B-ドープダイヤモンド、BN、C₃N₄、LiGaO₂、等の合成を手掛け、新しい高压相の発見などの成果があがりつつある。また、大学等の研究機関のみならず、住友電気(株)等との共同研究も推進し、ヒメダイヤの製品化にも協力している。更に理学部化学や工学部機械工学のグループとともに、国内外の様々な分野との共同研究を推進し、今後GRCにおいて新たな学際的分野を立ち上げるための核となることも想定している。



固体地球物理学・実験岩石学グループ(愛媛大学地球科学科)

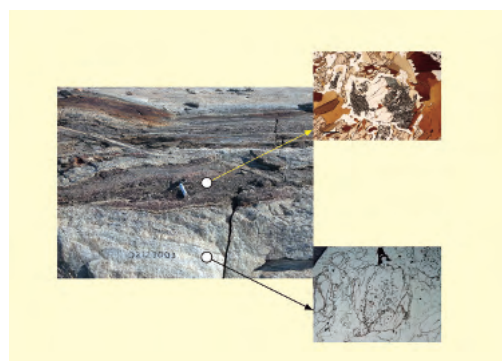
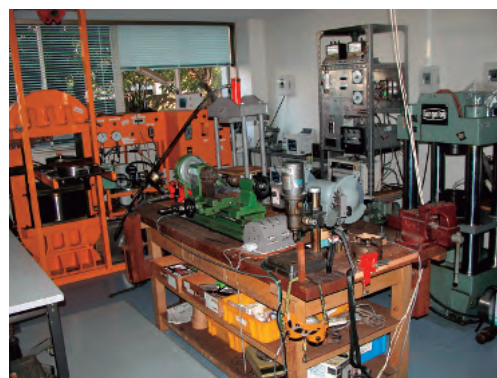
実験岩石学的手法と野外調査や岩石記載・鉱物化学分析など従来の伝統的に使われている岩石学的手法を駆使して、平成 21 年度は東南極形成過程の精密解析として以下の研究を行った。

1. 地殻における主要元素である Ti は、電荷の価数やイオン半径の制約のため、ケイ酸塩鉱物にとって難固溶性元素である、この Ti のもつ地球化学的性質に着目し、南極や東インドの大陸地殻を特徴付ける超高温変成岩類に普遍的に含有される石英、斜方輝石、ザクロ石への Ti 固容量を大陸地殻下部の条件で調べた。Ti はアーレニウスタイプの分配関数に従って造岩鉱物へ固溶分配されることを明らかにした。この成果は、チェコ共和国で開催された Granulites & granulites2009 で公表した。研究成果は Lithos に投稿中である。

2. 第 44 次南極地域観測活動において重点的調査を展開したリュツオホルム岩体ルンドボックスヘッタ地域の片麻岩から大隅石やスピネルと石英の共生を初めて発見した。この片麻岩の記載岩石学的研究と鉱物化学的研究や実験岩石学的研究とから、リュツオホルム岩体ルンドボックスヘッタ地域の変成履歴を明らかにした。研究成果は Gondwana Research に投稿中である。

3. 第 44 次南極地域観測活動で調査研究をおこなったリュツオホルム岩体スカレビークスハルセン地域から Ti 酸化物であるフェロシュードブルッカイト+イルメナイト+ルチルが共生する片麻岩を発見した。先行研究によると、これら 3 つの Ti 酸化物が共生する条件は 1140℃ であるとされているが、この片麻岩を使った再現実験からフェロシュードブルッカイト+イルメナイト+ルチルが共存する温度条件が 1040℃ であることを明らかにした。成果は連合王国で開催された Annual Meeting 2009 of the Mineralogical Society, MAPT: Micro Analysis Processes Time で公表した。現在、この系について、さらなる実験的研究を展開している。

これら天然系の相平衡再現実験を遂行する過程で、1000 日以上にわたる長時間の高温高压状態を保持するための技術的課題はある程度解決された。これらの実験生成物中に流体が浸透して細



管を形成した痕跡が観察されることがある。このような細管形成過程の研究は、地球深部の水が集積し移動する機構の解明に結びつく可能性を開くものであると考えられる。

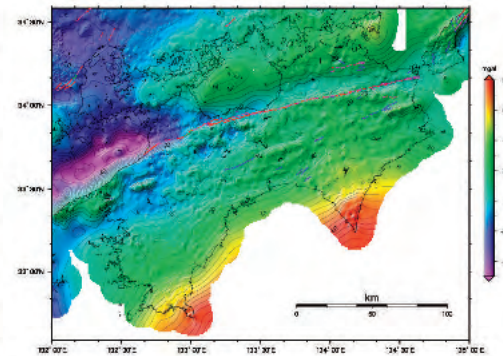
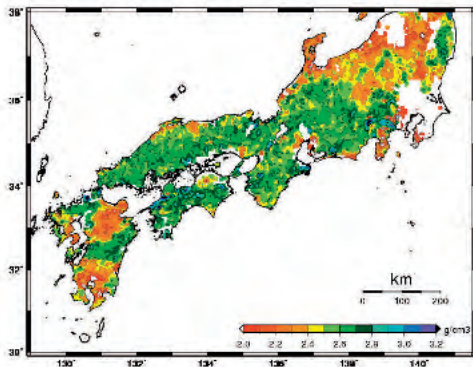
一方、我々をコアとするグループにより、現在、日本列島における稠密な重力データベースが構築されつつある。これらに地震、地殻変動のデータベースを協調させ、現場での観測組み合わせることにより、以下の研究を推進している。

1. 地殻表層の岩石密度構造のラテラルな不均質性を明らかにし、地殻表層の活構造場における密度モデリングを行なう。

2. 重力異常の急変帯における密度構造の変化と地震発生場の関連に着目して破壊域の広がりや物性変化の関連を研究する。

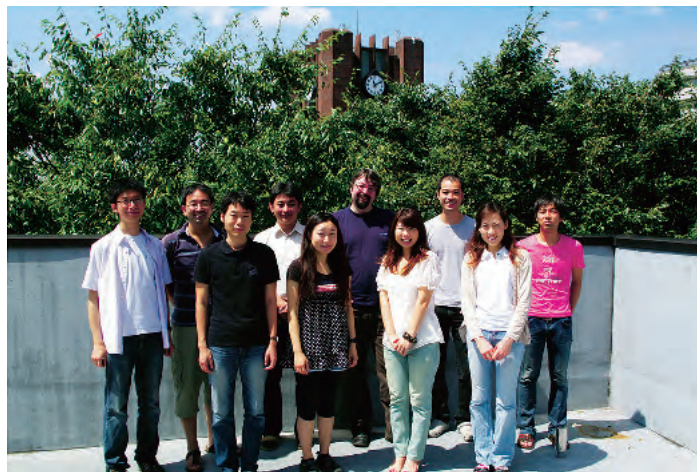
3. 内陸部における地殻内地震発生層の上限・下限と活構造・重力異常との関連に着目して地震発生源と思われる活構造場の力学的特性や熱的性質を明らかにする。

これらの研究はローカルな地殻構造や地殻内地震発生層の解析だけでなく、地球深部のプレート運動に起因すると考えられる地震発生応力の大局的なローディング機構を理解する上でも重要であり、これまでにない新しい発想の地球科学を積極的に展開したいと考えている。



地球物質化学グループ(東大地殻化学実験施設)

概要 我々の研究グループでは、地球深部物質の構造と物性を解明すること、特に揮発性元素である水素の挙動を解明することを研究目標として掲げ、主として化学的な研究視点から研究を遂行している。研究を進める過程で種々の測定技術の開発を行いながら、高圧下での分光測定や結晶構造解析、地球深部由来の天然物質を研究対象とした微小領域の分光測定などを進めている。特に我々の研究グループが中心となって、J-

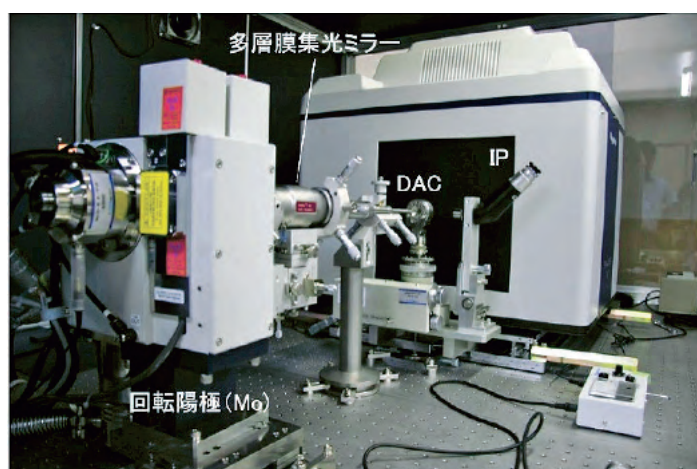


PARCにおける高圧下での中性子回折測定のための技術開発を行っており、2011年4月に完成予定の高圧ビームライン PLANET の建設にも中心メンバーとして参加している。本 COE 事業においては、地球深部水の存在状態、安定性などに関する問題に対して、構造化学的な実験研究からサポートを与える役割を担っている。また、結晶構造解析や分光学的測定について、大学の壁を越えてインターンシップなどを通して教育活動を展開している。

研究成果の具体例

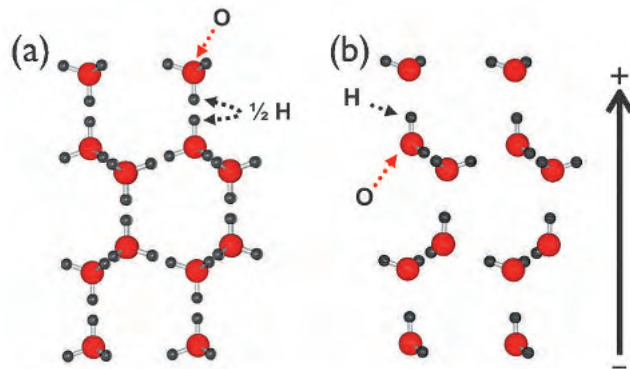
1. **下部マントル** 地球深部に由来するダイヤモンド中に取り込まれた包有物を詳細に調べることは、地球深部の酸化還元状態を知るうえでの貴重な手がかりとなる。我々は下部マントル起源のダイヤモンドを研究対象として、微小領域の X 線吸収スペクトル測定を行い、フェロベリクレス中に Cr が 2 価のイオンとして取り込まれていることを見いだした。クロムが 2 価として存在できるのは、月の環境のような極端な還元的条件のみと考えられており、下部マントルが極めて還元的であったことを示す直接的な証拠を得ることができた(Odake et al., J. Mineral. Petrol. Sci., 350, 350, 2008)。

2. **地球深部水** 地球深部における水のリザーバーとして、いくつかの含水鉱物の存在が重要視されている。その一つが δ -AIOOH で、下部マントルまで安定に水を運搬できる物質である。また、 δ -AIOOH は常温でも強い水素結合をもつことで知られる物質であり、28GPa 程度で水素結合が対称化することが、本 GCOE 拠点の土屋らの理論計算から予測されている (Tsuchiya et al., GRL, 29,

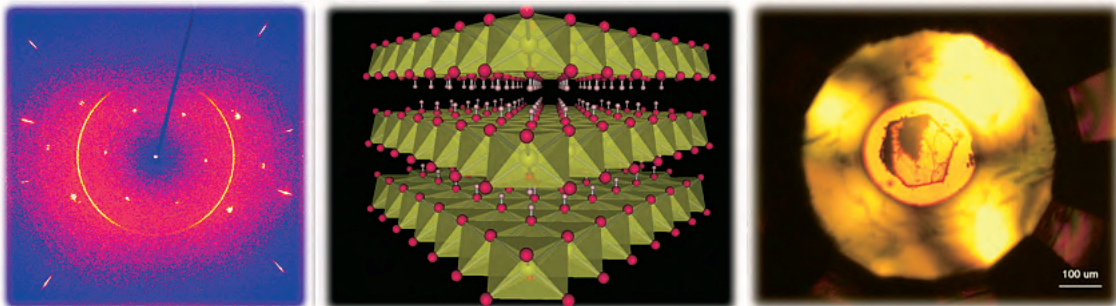


1909, 2002)。水素結合の対称化過程の観察には、高压下での中性子回折の観察が不可欠であるが、現状の実験技術ではこのような条件での測定は十分にはできない。そこで、我々はダイヤモンドアンビルを用い、ヘリウムを圧力媒体とした準静水圧条件で δ -AlOOH の圧縮挙動を精密に観察した (Sano-Furukawa, Kagi et al., *Am. Mineral.*, 94, 1255, 2009)。その結果、10GPa をわずかに超えた圧力領域で水素結合の対称化を示唆する実験結果が得られた。今後、中性子回折の測定を行う必要があるが、このように極めて低い圧力で水素結合の対称化が起こるのは、実験的にはまだ例がない。

3. 惑星氷 我々の身の回りには氷は Ih 相と呼ばれ、水素原子が二つの結晶学的に等価なサイトに 1/2 ずつ存在している状態である。一方、65K 以下の低温条件では、水素原子が秩序化し、片方のサイトのみが存在するような状態 (氷 XI) に変化することが知られている。氷 XI は結晶格子内で双極子モーメントがそろうため、強電体として振る舞い、太陽系の外惑星で普遍的に存在する可能性があり、もしも



そうであれば惑星形成の際に粒子間に働く引力が桁違いに増加する可能性があり、惑星科学的に重要な問題となる。我々の研究グループでは、氷 XI の赤外吸収スペクトルを初めて報告し、氷 Ih と識別可能であることを示した (Arakawa et al., *J. Suppl. Ser.*, 184, 361, 2009, 東大、原研プレスリリース。日刊工業新聞など)。本研究の結果は、将来の赤外線天文学への道を開いた画期的なものである。



放射光高圧地球科学グループ (SPring-8)

概要 大型放射光施設 SPring-8 では、マルチアンビル高圧装置と高強度の放射光 X 線の組み合わせによる先端的地球内部研究を進めている。GCOE 事業において、SPring-8 グループでは上部マントル深部から下部マントル領域での相関係や弾性的性質に関する研究開発とユーザー支援活動を行っている。また、学生や博士研究員を対象にしたインターンシッププログラムによる若手研究者の育成にも協力・支援している。



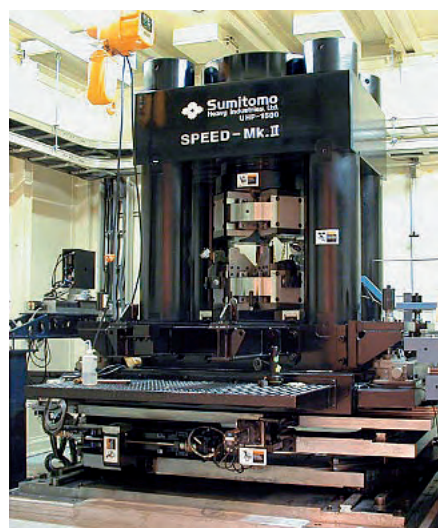
基盤的設備・手法 SPring-8 の BL04B1 ビームラインは偏向電磁石による白色 X 線を利用するビームラインで、高エネルギー X 線 (20~150keV) を使って半導体検出器 (SSD) によるエネルギー分散型 X 線回折測定と、CCD カメラによる X 線ラジオグラフィ測定を行うことができる。また、本 GCOE 事業の一環として単色 X 線分光器と 2 次元検出器の整備が進められている。本ビームラインは、高温高圧状態にある地球内部物質の構造や物性を調べることを目的に設計され、二台のマルチアンビル高圧装置が設置されており、地球内部環境下での相平衡、状態方程式、結晶構造の決定や電気伝導度、弾性波速度などの物性測定が可能である。GCOE 事業では、これまでの実験温度圧力条件を拡大し、下部マントル領域での相平衡、弾性波速度測定に対応した技術開発を行っている。またマントルの非静水圧下での挙動を明らかにするため、従来の手法に加えて新たに非静水圧測定システムの整備も進めている。

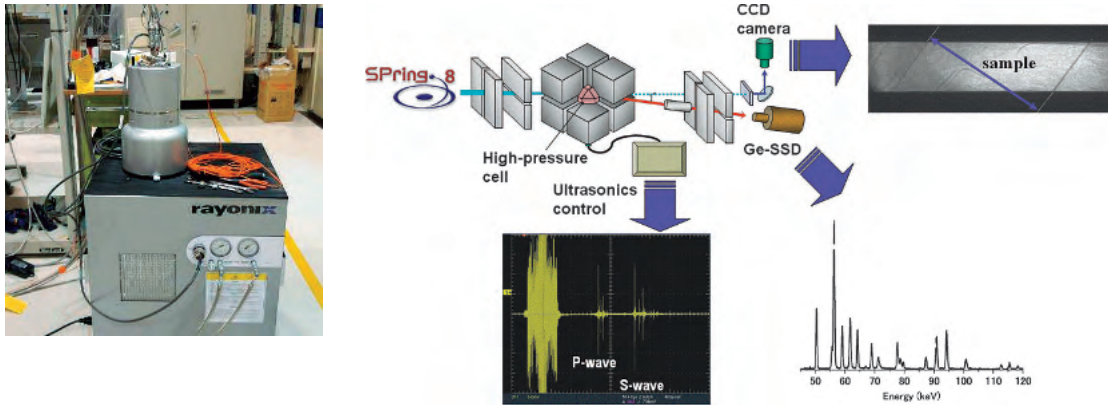


研究成果の具体例

1. 高感度弾性波速度測定

高温高圧下におけるマントル物質の弾性波速度は、地震波速度データと直接比較することが可能であり、地球内部の構成物質やダイナミクスを考える上で非常に重要な情報である。SPring-8 では高温高圧下で精密な弾性波速度を測定するため、新たにポストアンプ、RF 信号高速切替器と高周波数波形発生器を導入し、超音波エコーの検出限界を従来よりも 1 桁以上引き上げることに成功した (GCOE 直接経費)。本システムの導入によって、下

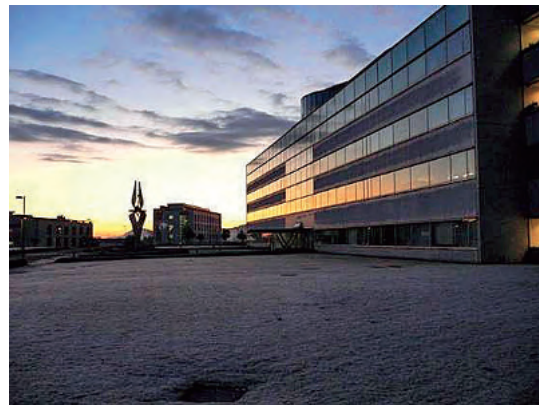




部マントル条件を発生可能な非常に小さな実験セルにおいても弾性波速度測定が可能となった。これまでの標準試料を用いた予察的な実験では 25GPa を超える下部マントル条件での弾性波速度測定に成功している。今後は下部マントル中に存在する鉱物 (Mg ペロブスカイト、マグネシオウスタイトなど) の弾性波速度測定を展開し、地震波の観測データと比較することによって下部マントルの詳細を解明していく計画である。

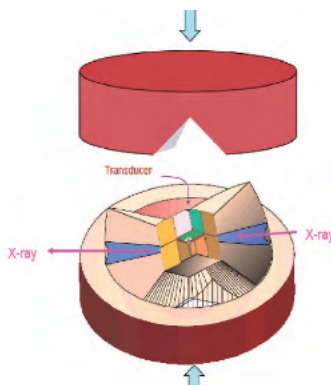
2. 非静水圧測定システムの整備

これまで非静水圧実験に対応した 2 次元時分割 X 線回折システムの整備を進めており、高エネルギー単色 X 線分光器と大型 X 線 CCD 検出器の導入によって、1 回の測定時間が 10 秒程度の速い相変化に対応できる高速時分割測定が可能になった (一部は GCOE 直接経費)。これにより、高温高压条下でおこる急速な相転移や応力変化、粒成長を捉える事が出来る。さらに 2010 年度では非静水圧圧縮が可能な D-DIA 型高压変形装置をマルチアンビル高压装置に導入し、これにより非静水圧測定システムが完成する予定である。本システムの導入によって、これまでほとんど手がつけられなかった沈み込むプレートやマントルの流動特性についての研究が飛躍的に前進すると期待される。



Study of Elasticity at Stony Brook University

Outline High Pressure Elasticity study is one of the three core programs in the Mineral Physics Institute of Stony Brook University (SBU). The elasticity group, led by Professor Baosheng Li, the pioneer of the modern techniques for ultrasonic interferometry measurements in large volume high pressure apparatus (Li, Jackson, Gasparik, and Liebermann, PEPI, 98, 79, 1996), has conducted acoustic velocity measurements on many mantle minerals at mantle pressures and temperatures, including olivine and its high pressure polymorphs, low and high pressure phases of pyroxenes, and lower mantle perovskite. These results are indispensable for the interpretation of the seismic velocity-depth profiles as well as lateral heterogeneities in terms of variations of temperature and composition. Members of the group consist of faculty from Mineral Physics Institute and Department of Geosciences of SBU, research scientist, postdoctoral research associates, and graduate students. Currently, the group is working on the developments of novel ultrasonic techniques and data analysis methods, static compression and phase transformations in Earth minerals and multi-functional materials at high pressures, linear and non-linear elastic behaviors of materials at high P and T, elastic stiffening/softening across phase transformations, thermoelastic properties and equation of state of mantle and core phases for constraints on compositions of the Earth and other planets.



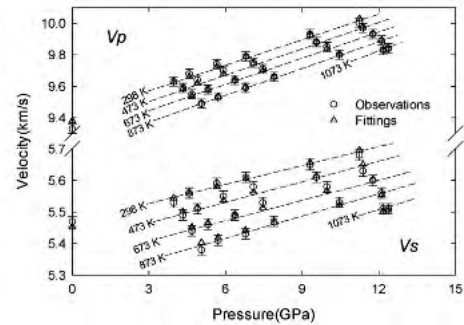
Facilities We use high pressure facilities both on campus and off-campus. On campus, available facilities for elasticity studies include a 2000-ton (SUMITOMO) and a 1000-ton (Kennedy-Getting type) MA-8 type multi-anvil high pressure apparatus located in the High Pressure Lab at Stony Brook University. Both presses are equipped with automatic pressurization/depressurization controls. In addition to synthesizing experiments, these presses are also interfaced with ultrasonic interferometer for velocity measurements up to 30 GPa at room temperature. Off-campus, we have deployed a 250-ton (D) DIA-type, MA-6 apparatus installed at X17B2, NSLS of Brookhaven National Lab, where we developed the combined ultrasonic and X-radiation techniques for the first time in history (Li, Liebermann, and Weidner, Science, 281, 675, 1998). A 1000-ton press at X17B2 of NSLS at BNL is expected in operation by the end of the year 2010. In addition to large volume presses, the group is also equipped with diamond anvil cells that can be used for in-house experiments and

beamlines experiments using synchrotron X-ray source. To complement the experimental effort, the group also has a 32-core cluster for computational studies using first principles techniques.

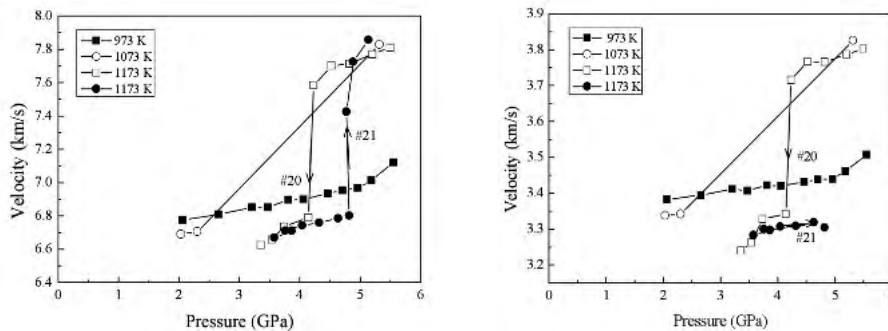
Research Project Samples

1. Velocities of wadsleyite at 410 km Depths

Olivine($\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$ is believed to be the major component in the upper mantle, and the transformation to wadsleyite is widely considered to be responsible for the 410 km discontinuity. To interpret seismic models in terms of mineralogy and chemical composition, the elastic bulk and shear moduli and their derivatives are the critical parameters. Previous acoustic studies on iron bearing wadsleyite have only been conducted either at high pressure (up to 15 GPa) and room temperature, or at high temperature (up to 660 K) and ambient pressure. The discrepancies in the derived pressure and temperature dependence for the elastic moduli of wadsleyite have resulted in large inconsistencies in the conclusions about olivine content in the upper mantle. Here a simultaneous ultrasonic interferometry and X-ray diffraction measurement on $(\text{Mg}_{0.87}\text{Fe}_{0.13})_2\text{SiO}_4$ wadsleyite were conducted to 12 GPa and 1073 K. The elastic moduli and their pressure and temperature derivatives are precisely determined using a pressure-standard-free fit using finite strain equations to the velocity and unit cell volume data in the entire pressure and temperature range (Liu, Kung, Li, Nishiyama, and Wang, PEPI, 174, 98, 2009).



2. Elasticity of Fayalite To further understand the material behavior across the phase transformation, we have also conducted velocity measurements across the phase transformation of fayalite-spinel of Fe_2SiO_4 (Liu, Whitaker, Liu, Wang, and Li, Am. Mineral., in press, 2010)



Compressional (P) and shear (S) wave velocities across the olivine-spinel transformation were investigated in situ using combined synchrotron X-ray diffraction, X-ray imaging, and ultrasonic interferometry up to 5.5 GPa along 973 K and 1173 K isotherms. The onset of the spinel to olivine transformation at 4.5 GPa and olivine to spinel transition for Fe_2SiO_4 at 4.8 GPa was concurrently observed from the X-ray diffraction, the amplitude of the ultrasonic signals, the calculated velocities, no velocity softening was observed prior to the fayalite to spinel transition. The velocity contrasts across the Fe_2SiO_4 spinel to fayalite phase transition are derived directly from the measured velocities, which are 13 and 12% for P and S waves, respectively.