

最近の研究から

下部マントル深部条件下における高温高压X線回折実験

八木健彦¹、近藤忠²、宮島延吉¹、亀卦川卓美³

¹ 東大物性研究所、² 東北大学大学院理学研究科、³ 物質構造科学研究所

High Pressure and High Temperature in situ X-ray Diffraction Studies Under the Conditions of the Earth's Deep Lower Mantle

Takehiko YAGI¹, Tadashi KONDO², Nobuyoshi MIYAJIMA¹, Takumi KIKEGAWA³

¹Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, ²Institute for Mineralogy, Petrology and Economic Geology, Tohoku University, ³Photon Factory, Institute of Materials Structure Science

1. はじめに

超高压実験技術の進歩は近年めざましく、100GPa (ほぼ100万気圧) 領域の超高压を物質に加え、その電子構造まで変化させることが可能になってきた。それを用いて、物質が超高压下で持つ実に多様な物性が次第に明らかにされつつある。また地球の下部マントルからコアに迫る超高压条件下での物質のふるまいを直接調べることも可能になってきた [1]。これらの研究で必要とされる最も基本的な情報は、各物質が超高压高温条件下でも結晶構造と、その安定な P-T 領域を明らかにすることである。そのためには、X線実験としては最も単純な粉末 X線回折実験を行えば良いわけであるが、超高压実験では試料が機械的強度の高い超硬合金などで囲まれており、压力容器や圧力媒体による X線の吸収等さまざまな問題のため、種々の技術的困難がある。

PFでは、その建設当初に MAX-80 と名付けられた、6個の超硬合金を用いて立方体の圧力媒体を加圧し試料を高温高压状態に保ったまま X線回折実験を行う、諸外国では例を見ないユニークな装置が建設され、その特徴を生かしたさまざまな高温高压実験が行われてきた [2,3]。その技術はさらに発展して、PF内では MAX-90、MAX-III という新しい装置が建設されると共に、類似の装置が Brookhaven の NSLS やシカゴの APS、ドイツの DESY、そして西播磨の SPring-8 にも建設された。これらのマルチアンビル装置と呼ばれる高压装置は、比較的大容積の試料室を持つことから、試料室内に抵抗加熱のヒーターを埋め込んで均一で安定した高温高压実験ができる特色を持っている。しかし加圧に用いられる超硬合金の強度から、26GPa 程度が発生圧力の限界で、アンビル材として超硬合金の代わりに焼結ダイヤモンドを用いて圧力領域を拡大する試みが精力的に行われているものの、今のところ 40GPa 程度が定常的な実験の限界となっている。

一方、宝石用の単結晶ダイヤモンドを高压発生に用いるダイヤモンドアンビル装置では、ここ 10 年ほどの間に飛躍的な技術開発が進み、今や 100GPa の圧力発生が定常的に可能になった。さらに、高压下の試料にダイヤモンドを

通して赤外レーザー光を照射することにより、数千℃を越す高温の同時発生も可能になった。PF ではやはりその初期から、ダイヤモンドアンビルを用いた高压 X線実験が行われてきたが、それらはすべて室温から低温の実験であった。筆者等は 1996 年から S 型課題を申請し、科研費の特別推進研究で製作した装置を BL-13B2 のハッチに持ち込んで、レーザー加熱と組み合わせた超高压高温実験技術の開発を進めてきた。当初は比較的広い領域を一度に加熱できる炭酸ガスレーザーを用いて実験を試み、一定の成果を得ることができたものの、エネルギー密度が低いことから 50GPa 以上の超高压では十分な高温発生が困難であった。そこでより加熱効率の高い YAG レーザーを用いたシステムを新たに建設し、さらなる高压での高温実験を試みた。それにより、100GPa 領域で 1000℃を越す加熱も可能にはなったが、今度は加熱領域が小さいために、精度の高い実験にはより細い X線ビームを照射することが必要になった。それまで使っていた BL-13B2 では、ハッチ内まで白色光を導き、それを 1 枚のモノクロメータで単色化と集光を同時に行う光学系になっていたため、X線の発散が比較的大きく、微小ビームを作ることは困難であった。そこで 2000 年秋からは新たに X線光学系を整備した BL-13A に装置を移し、そこで実験を開始した。2002 年の春には継続した S 型課題も終了したので、再度の更新は行わず、われわれも G 型課題に切り替え、建設した装置をできるだけ多くのユーザーに使ってもらうことにした。また PF の経験に基づいて、SPring-8 の BL10XU にもほぼ同様の設計に基づくシステムを建設し [4,5]、それもルーチンに活用され始めている。

本稿では、現在 PF の BL-13A ハッチに設置されているレーザー加熱高温高压実験装置の概要と、それでどのような実験が行われてきたのかを簡単に紹介し、さらに今後の問題点等をまとめてみたい。

2. 実験装置

現在 BL-13A に設置されている高温高压装置のブロックダイアグラムと全景を Fig.1 と Fig.2 に示す。マルチポー

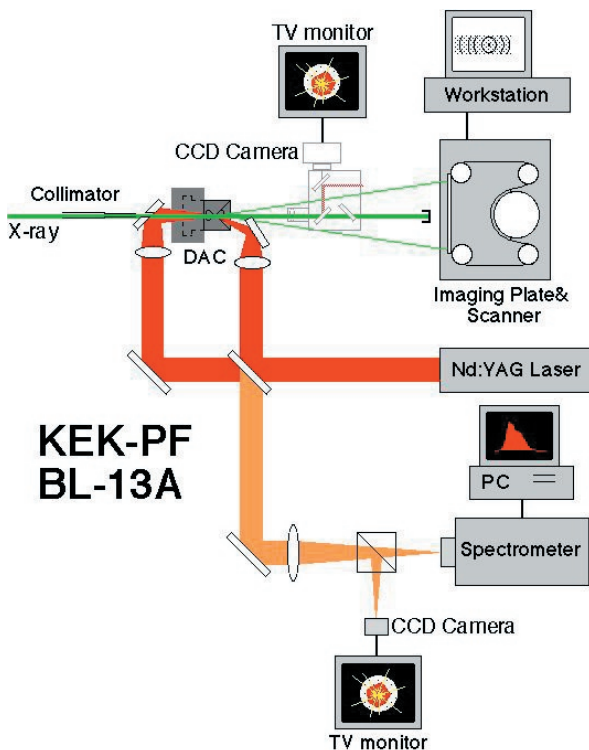


Figure 1 Block diagram of the laser-heated diamond anvil system in BL-13A.

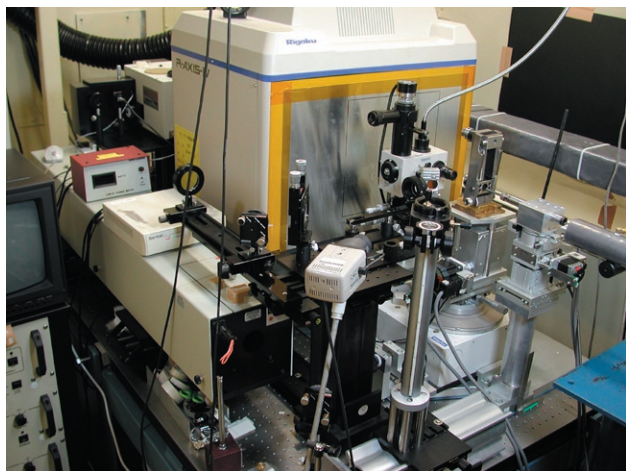


Figure 2 Whole view of the laser-heated diamond anvil system.

ルウィグラーからの白色光はまず、Si(111) と非対称カット Ge(111) の 2 枚のモノクロメータで単色化されたあと、縦横両方向に K-B ミラーで集光されピンホールコリメータを通して細く絞られて、試料に照射される。通常使われる X 線のエネルギーは約 30 keV で、BL-13B2 では 50 ミクロンのピンホールコリメータの使用が一般的であったが、BL-13A に移ってからは輝度が大幅に向上したため、30 ミクロンから場合によっては 15 ミクロンのコリメータでも十分な強度が得られるようになった。回折 X 線は読みとり装置を内蔵した IP(Rigaku R-AXIS-IV) により測定する。ダイヤモンドアンビル装置はミクロン精度で 3 軸の微動と回転ができるステージに載せられており、CCD カメラと

組み合わせた顕微鏡により、試料の位置とその様子を観察することができる。加熱用光学系は、150 W の CW 出力の YAG レーザーからの光をハーフミラーで分割し、レンズを通して試料の両面に集光し加熱する。試料の温度は、加熱された試料からの光を分光器に導き、そのスペクトルから測定できるように設計されているが、現在のところその部分はまだ完全には出来上がっていない。

X 線光学系としてはこのように、ピンホールで絞った細かい X 線を試料に照射し、回折線を IP で記録するという単純なものであるが、レーザーで加熱される試料部の大きさが直径 50 ミクロン程度で、しかもその中心から外側に向けて大きな温度勾配が存在するため、目的とする場所に正確に X 線を照射することが必須となる。顕微鏡による位置あわせは、高い屈折率を持つダイヤモンドを通して試料を観察するため、ダイヤモンド面がわずかでも光軸に対して垂直から傾いていると、10 ミクロン程度のズレが簡単に生じてしまう。そのため最終的な位置あわせは、透過 X 線の強度変化から試料室の影を見つけだす方法で行う。一旦位置を正確に合わせても、加熱により装置全体が温められると、熱膨張により 10 ミクロン程度のズレは簡単に生じてしまうので、実験中も細心の注意が必要となる。

実験の標準的な手順としてはまず、ダイヤモンドアンビルで予め所定の圧力まで加圧した試料をステージに載せ、位置あわせを行ってから、レーザーを照射して所定の温度まで加熱し、X 線の露光を開始する。露出時間は試料や研究目的により大幅に異なるが、数分からせいぜい 30 分程度である。加熱中は試料温度を可能な限り一定に保つ必要があるが、レーザー加熱の場合、試料の温度は照射するレーザー光のエネルギーそのものではなく、試料によって吸収されるエネルギーと、加熱された試料から散逸するエネルギーのバランスによって決められる。そのために、たとえ照射エネルギーを正確に一定に保ったとしても、試料の状態が変化して吸収量が変化すると温度も大きく変わり、長時間一定に保つことは極めて難しい。そのため今まで、レーザー加熱の実験ではあまり定量的な問題を議論することはできず、定性的な議論だけ行うことが多かった。しかし最近では温度の変動を細かくモニターしたり、フィードバックシステムを作ってより温度の安定性を高めることにより、半定量的な議論も行われるようになってきた。

安定した加熱のためには、加熱システムそのものよりもむしろ、試料構成の方が問題になることが多い。遷移金属元素を含まない酸化物やケイ酸塩は一般にそのままでは YAG レーザー光を吸収しないため、白金の微粉末など試料とは反応を起こさず光エネルギーだけ吸収する物質を試料に混合する必要がある。しかしそれらの吸収材が加熱中の温度勾配により拡散、移動して吸収量が大きく変化してしまうことも多い。また吸収材を混ぜないで加熱できる試料の場合も、相転移や温度変化に伴って一般にその吸収率は大きく変化するため、そのまま安定した加熱をすることは難しい。これらの問題を克服するために最近、さまざまな試料構成の工夫が試みられている。次にいくつかの

代表的な実験の例を紹介しよう。

3. 実験例

3-1. FeO の超高压相転移

地球化学的な考察から推定される化学組成と高温高压実験の結果、地球の下部マントルは主としてペロフスカイト構造の $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ と岩塩構造の $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ から構成されると考えられており、これらの超高压下のふるまいについてさまざまな研究がなされてきた。その中で、FeO は最も未解明の問題が残されている物質である。常温常圧下では cubic の岩塩構造 (B1) をとるが、室温で加圧していくと約 15GPa で rhombohedral に歪む。これは Neel 点が圧力と共に上昇するためと考えられている。さらに高压では、衝撃波実験により約 70GPa 付近に大きな密度増を伴う一次相転移があることが見いだされたが [6,7]、室温で 120GPa 領域まで加圧しても、それに対応する相転移は検出されず [8]、その実態は長い間不明であった。1994 年に全体をヒーターで加熱する「外熱型ダイヤモンドアンビル」と呼ばれる装置で高温高压下のその場 X 線観察が行われ、70GPa 付近で温度を上げていくと 1000 K 付近で NiAs 型構造 (B8) に転移することが明らかにされた [9]。その後、レーザー加熱によるその場観察が行われるようになり、より広い温度圧力範囲で詳しい研究が始められたが、まだ互いに矛盾する結果も多く、その全容は明らかになっていない。

Fig.3 に示したものは BL-13A で観測した FeO の超高压高温下の回折パターンである。FeO 試料をアンビルとの断熱のため Al_2O_3 で挟み、室温で 80GPa まで加圧したあと温度を上げながら回折線を観測していくとまず rhombohedral 相が弱まり NiAs 型の B8 構造が強くなるのが見られる。さらに 1500 K 以上に加熱すると今度は明らかに B1 相が強くなり、その後室温に戻すと圧力が 75GPa まで下がり、B8 構造と Rhombohedral 相の混合相になる様子が見て取れる。Fig.4 に示したように、Fei & Mao[9] は B1-B8 の相境界は 70GPa 付近にあって、温度にほとんど依存しないと考えて、衝撃波実験の結果とも整合的になると報告している。しかしもし高温側で B1 の安定領域がこのような広がっているとすると、衝撃波実験で見いだされている相転移の実体が分からなくなってしまう。詳細の議論は別の機会に譲るが、これ以外にも Dvornitsky, Sata, Murakami 等が最近 ESRF、APS、SPring-8 などのシンクロトロン放射光施設で相次いで新しい実験結果を出しており、その結果は相互に必ずしも一致しない。

このような不一致の原因としてさまざまな可能性が考えられるが、ひとつは各実験に使われた FeO 試料の微細構造が異なっている可能性が考えられる。通常 FeO と単純に表記されるが、実際は 2 価の鉄と酸素の 1:1 の単純な化合物ではなく、Fe の一部が 3 価になっており、それに伴い電気的なバランスをとるために正確には $(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \square)\text{O}$ (ここで \square は欠陥を表す) のような構造をしていることが知られている。試料の作製条件等によって、さまざまな微細構造をもった "FeO" が存在することが、実験結果の解

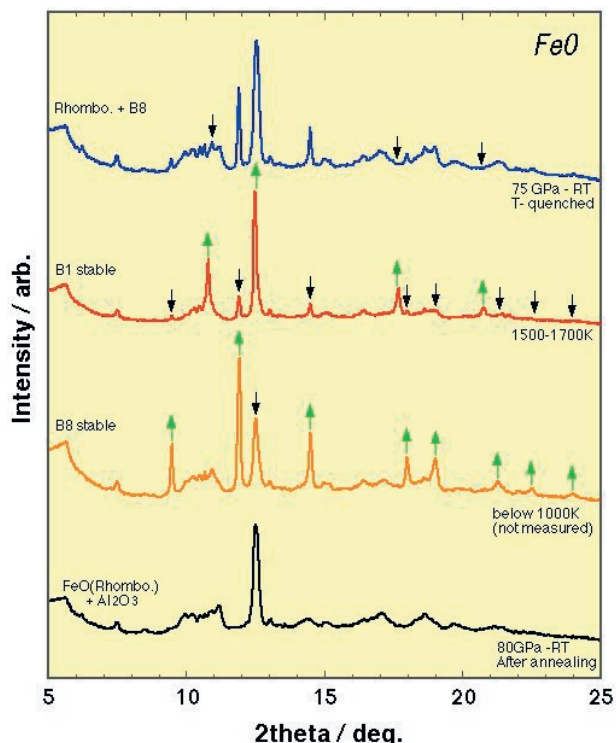


Figure 3 X-ray diffraction patterns of FeO. With increasing temperature at 80 GPa, transitions from rhombohedral to B8, and then to B1 phase were observed. B1 phase observed at high temperature was unquenchable with decreasing temperature.

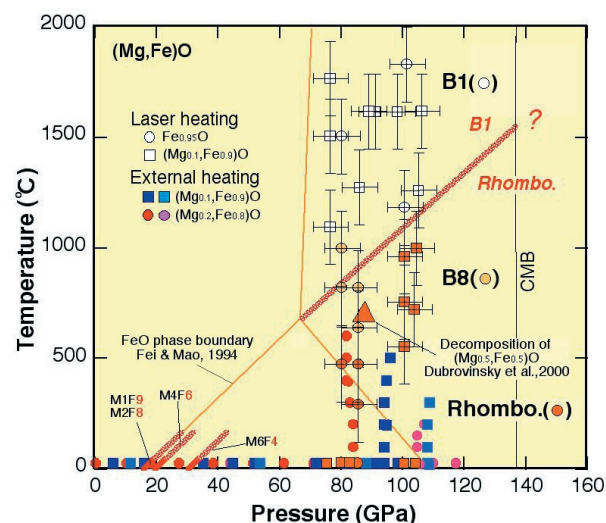


Figure 4 Phase diagram of $(\text{Mg,Fe})\text{O}$.

釈を複雑にしているのであろう。さらに、後述するように、大きな温度勾配などこのような極端条件下の測定におけるさまざまな問題も、結果を複雑にしている可能性が考えられる。

FeO は単に下部マントルの $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ の端成分という意味だけでなく、溶融した鉄からなる外核と固体ケイ酸塩の下部マントル物質が接して反応を起こした場合に重要な役割を演ずる可能性を持つ物質である。従って 100GPa 領域での物性の解明は地球科学的に重要な意味を持つが、現在のところ上記のように、さまざまな矛盾した結果が提出さ

れており、その解明にはまださらなる実験が必要とされる。

3-2. SiO₂ の高温高压相転移

SiO₂ は石英としてなじみの深い鉱物である。高压下ではより密度の高い構造に変化し、約 10GPa 以上では Si が 6 配位のルチル構造をとることが Stishov 等により高压実験で明らかにされ、その後アリゾナの隕石孔で衝撃超高压で生成された同様の物質が見つかり、スティショフ石と名付けられた。地球深部でも場所によっては重要な役割を演ずる鉱物と考えられており、その超高压下の安定性に関して興味を持たれた。この物質の相転移は理論計算でさまざまな可能性が予言されていたが、実験では 1989 年に初めてルチル構造からそれが歪んだ CaCl₂ 構造に転移することが明らかにされた [10]。その後さまざまな詳しい研究がなされ、静水圧下では室温でも約 50GPa 付近で可逆的にルチル -CaCl₂ 型の転移を起こすことが明らかにされたが

[11,12]、出発物質に石英ではなく高温型のクリストバライトを用いると α-PbO₂ 型の相が生成すると報告されたりして [13]、まだ真の相平衡関係は明らかにされていない。

Fig.5 は SiO₂ にレーザー光の吸収材として Pt を混ぜて加熱しながら 70GPa、2000K の条件下で観察した回折パターンであり、SiO₂ がこの条件下では CaCl₂ 構造を持つことが明瞭に示されている。Fig.6 はこのような観察結果を P-T 面にプロットしたものであり、室温での 50GPa 付近での転移圧から、転移境界は正の勾配を持つとして解釈できる結果を示している。この結果は、今まで報告された室温での相転移圧や、相境界の傾きとはおおむね調和的であるが、Dubrovinsky 等により最近報告されている α-PbO₂ 型相の生成 [13] は観測されず、今後さらに、何がそのような違いをもたらすのか明らかにしていく必要がある。

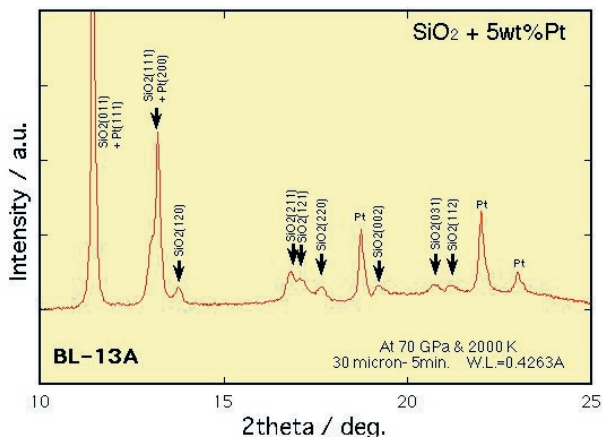


Figure 5 Characteristic X-ray pattern of CaCl₂-type SiO₂ observed at 70 GPa and 2000K. Platinum is mixed as a heat absorber.

3-3. MgSiO₃ペロフスカイトの熱膨張と試料内の温度分布

ペロフスカイト構造を持つ MgSiO₃ の超高压下における熱膨張を測定するために、Fig.7 に示すような実験を行っ

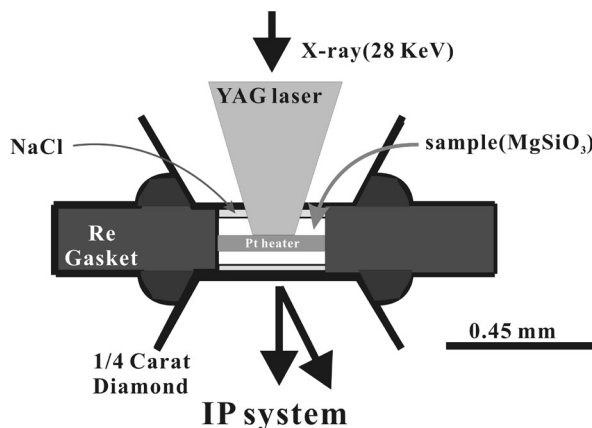


Figure 7a Sample assembly used for the measurement of thermal expansion of silicate perovskite.

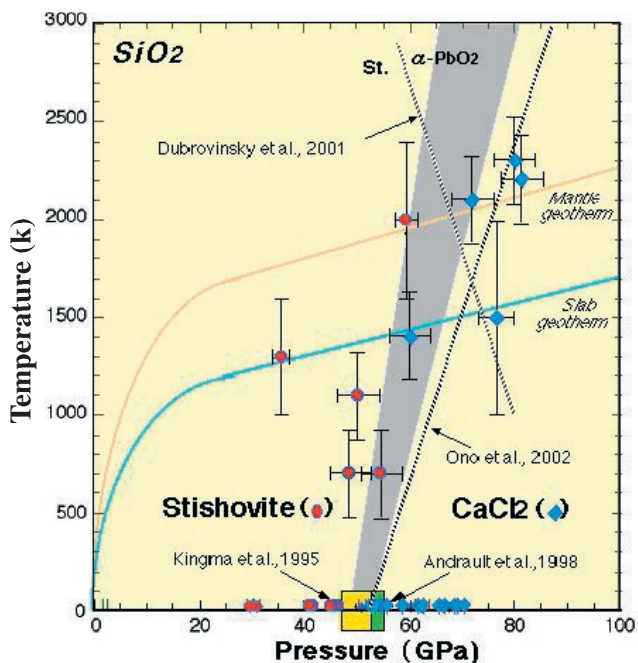


Figure 6 Phase diagram of SiO₂

Cell assemblage in XRD experiments

Figure 7a Sample assembly used for the measurement of thermal expansion of silicate perovskite.

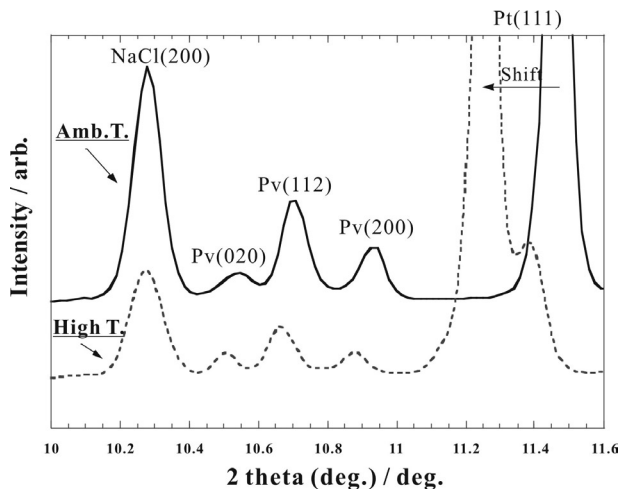


Figure 7b X-ray diffraction patterns of MgSiO₃ perovskite, platinum, and sodium chloride observed at about 25 GPa, before and during laser heating. Diffraction of platinum shifts considerably while sodium chloride remains almost unchanged.

た。この実験では Fig.7a に示したように、試料中に白金箔を吸熱材として埋め込み、さらに試料を両側から NaCl で挟んで、ダイヤモンドへの熱の逃げを少なくするための断熱層兼圧力媒体としてある。Fig.7b は 25GPa における室温と加熱中に撮った回折パターンで、白金のピークは熱膨張により大きく低角にずれているものの、NaCl のそれはほとんど変化せず、MgSiO₃ のそれはその中間の変化を示している。同様の測定が 80GPa でも行われたが、ほぼ同様の結果が得られている。

これらの結果は、このような試料構成を用いた場合、ダイヤモンドアンビル中の試料が高圧下でわずか 10 ミクロンにもならない薄さになるにも関わらず、その中に大きな温度勾配がついていることを明瞭に示している。観測された各試料の格子常数変化は、次のように考えると調和的に理解することができる。つまり、加熱によっても試料室内の圧力はほとんど変化せず、NaCl はダイヤモンドにより冷やされていてほとんど室温のまま、白金は 1000℃ 以上に加熱されているという温度分布である。しかしこれ以上の定量的な議論はなかなか難しい。ペロフスカイト試料はその中に大きな温度勾配が存在するため、斜方晶系を持つ結晶格子の熱膨張の異方性が圧力と共にどのように変化したか、といった定性的議論は可能なものの、それ以上の議論はまだ無理である。

このような試料構成は、比較的容易にできることと、長時間の加熱でも極めて安定性が高いという特徴を持っているが、定量的な議論には向かないことが明らかになった。そこで次節に述べるように、さまざまな技術開発が行われている。

4. 問題点と今後の展望

今まで述べてきたように、ダイヤモンドアンビル装置とレーザー加熱装置を組み合わせ、それにシンクロトロン放射光を照射することにより、一昔前は考えられもしなかった 100GPa 領域での高温 X 線回折その場観察が可能になった。この実験技術を使って、さまざまな新しい研究が推進されつつある。しかしその一方で、まだ多くの問題点が残されていることも確かである。

本稿で紹介したレーザー加熱ダイヤモンドアンビルと X 線回折実験の組み合わせは、高輝度で発散が小さく数十ミクロンに絞れる X 線ビームが必要なため、シンクロトロン放射光の利用が不可欠で、ESRF、APS、SPring-8、および PF の限られたグループでしか実験は行われていない。しかしそれにも関わらず、現在のところ多くの物質に関して、各グループ間でしばしば結果に大きな食い違いが見られる。それはおそらく、主として温度の安定性や試料中の大きな温度勾配により、各物質が必ずしも測定された P-T 条件下で平衡状態になっていないことによると考えられる。

レーザー加熱による実験では、加熱と共にすぐ相転移が観察されることが多く、短時間で測定を終える場合も少なくない。しかしそれが平衡状態に達しているという保証はなく、実際は出発物質の状態に依存した準安定状態になっ

ただけの可能性も少なくない。出発物質により生成相が異なってくるのは、この可能性が高く、実体の解明にはさまざまな出発物質を用いた逆反応などの詳しい研究が必要となろう。一方、長時間加熱を続けると、今度は急な温度勾配の場合における元素の選択的な拡散が問題となる。レーザー加熱の場合、試料構成によっては 1000℃ / ミクロンといった極端に急な温度勾配がつくことも希ではなく、このような急な温度勾配の中に試料が長時間保持されると、普通の熱平衡では起き得ない分解反応等が起きる可能性が指摘されている。

このような状況から、今後重要になる問題点は、温度安定性の向上と試料内の温度分布の改善であろう。最初の FeO の例のように YAG レーザー光を直接試料に吸収させる場合は、試料の相転移や温度変化により吸収率が大きく変動し、フィードバックをかけても温度を一定に保つことは容易ではない。また 2 番目の SiO₂ の例のように白金粉末を試料に混ぜた場合はかなり温度は一様になるものの、長時間加熱を続ける間に白金が拡散し、これまた温度を一定に保つことが困難になる。3 番目の MgSiO₃ の試料構成では、加熱温度の安定性は高いものの試料内部に大きな温度勾配が生じてしまう。

これらの例からも、このようなレーザー加熱実験では結局のところ試料構成が鍵となることが理解できよう。現段階で考えられる最良の方法は、試料の両面に白金等の吸収層を作り、それを熱伝導率の低い圧力媒体で加圧して、両側から同時にレーザーで加熱することである。この方法により試料内部の温度の均一性と、加熱の安定性が共に確保できると考えられるが、問題は試料室全体の厚さが 100GPa 領域では 10 ミクロン程度と極めて薄くなってしまふことである。従って今まで試みられてきたように、手作業で試料を白金箔で挟み、それをさらに断熱性の高い NaCl 等で挟んで試料室に入れるといった方法は限界に来ており、高い再現性は望めない。そこでわれわれのグループでは、スパッタ技術を用いて試料表面に 1 ミクロン程度の白金層を作成し、試料室に入れたあと、ガス封入装置を用いて試料室を高圧アルゴンガスで満たし、それを圧力媒体兼断熱材として加圧する、といった手法の確立を試みている。まだいろいろな問題点は残されているものの、比較的簡単な装置でかなり安定した加熱ができそうな予備の結果を得ている。最近ではエレクトロニクス分野やナノテクノロジーの分野で微細加工技術が長足の進歩を遂げており、それらをうまく応用することにより、まださまざまな可能性が考えられよう。

このようにまだ解決すべき問題は多々あるものの、基本的な高温高圧実験技術と X 線回折技術の組み合わせは確立されたわけで、今後は上記のような問題を念頭に入れ、それぞれの研究の目的に適した試料構成を工夫して実験を進めていくことが必要とされよう。多くの研究者が、このレーザー加熱 X 線回折装置を有効に使いこなして、まだ未知の世界が大きく広がっている超高圧高温領域の研究に役立てて頂くことを希望する。

ここで紹介した装置を立ち上げ、さまざまな実験結果を生み出すまでには、物性研に在籍した多くの学生諸君のひとかたならぬ努力が注ぎ込まれている。改めて彼らの協力に感謝したい。

引用文献

- [1] 八木健彦、「超高压の世界」、岩波書店 (2002)
- [2] O. Shimomura et al., *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **22**, 17(1984)
- [3] T. Yagi, *EOS*, **69**, 18(1988)
- [4] T. Yagi, T. Kondo, T. Watanuki, O. Shimomura, and T. Kikegawa, *Rev. Sci. Instrum.*, **72**, 1293 (2001)
- [5] T. Watanuki, O. Shimomura, T. Yagi, T. Kondo, M. Isshiki, *Rev. Sci. Instrum.*, **72**, 1289 (2001)
- [6] R. Jeanloz and T. Ahrens, *J.R.Astr.Soc.* **62**, 505(1980)
- [7] T. Yagi, K. Fukuoka, H. Takei, and Y. Syono, *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 816 (1988)
- [8] T. Yagi, T. Suzuki, and S. Akimoto, *J. Gophys. Res.*, **90**, 8784(1985)
- [9] Y. Fei and H. K. Mao, *Science*, **266**, 1678 (1994)
- [10] Y. Tsuchida and T. Yagi, *Nature*, **340**, 217 (1989)
- [11] K. J. Kingma, R. E. Cohen, R. J. Hemley, H. K. Mao, *Nature*, **374**, 243 (1995)
- [12] D. Andrault, G. Fiquet, F. Guyot, M. Hanfland, *Science*, **282**, 720 (1998)
- [13] R. Dubrovinsky et al., *Chem. Phys. Lett.* **333**, 264 (2001)

著者紹介

八木健彦 Takehiko YAGI



東京大学物性研究所 教授
〒 277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5
TEL/FAX: 04-7136-3230
e-mail: yagi@issp.u-tokyo.ac.jp
略歴：1976年東京大学大学院理学系研究科卒、カーネギー研究所博士研究員、東大物性研助手、東北大金研助教授、

東大物性研助教授を経て1997年より現職。理学博士。
最近の研究：超高压高温下の地球深部物質の物性研究、高压下の新物質探索。

近藤 忠 Tadashi KONDO



東北大・理学研究科 助教授
〒 980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉
TEL : 022-217-6666
FAX : 022-217-6675
e-mail: tdkondo@mail.cc.tohoku.ac.jp

略歴：1993年名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程地球科学専攻中退、名古屋大学理学部助手、東京大学物性研助手を経て、1998年より現職。理学博士。

専門分野：地球惑星物理学、高压物性。

現在の研究テーマ：下部マントル最下部とマントル-核境界の構造と物性。

趣味：高速移動、老人・子供・学生との会話。

宮島延吉 Nobuyoshi MIYAJIMA



東京大学物性研究所 助手
〒 277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5
TEL: 04-7136-3231
FAX: 04-7136-3230
e-mail: enkichi@issp.u-tokyo.ac.jp

略歴：1997年北海道大学大学院理学研究科卒、北海道大学大学院理学研究科博士研究員、東京大学物性研究所博士研究員、ドイツ・バイロイト大学地球科学研究所博士研究員を経て2002年より現職。理学博士。
最近の研究：分析電子顕微鏡を用いた地球深部物質の物質科学的研究。

亀卦川卓美 Takumi KIKEGAWA

高エネルギー加速器研究機構・物構研・助手・理学博士。