

地球惑星科学の近未来と展望

Future Plans and Perspectives of Earth and Planetary Sciences

地球惑星科学研究会

Earth and Planetary Sciences Research Group

入船徹男, 愛媛大学

桂 智男, 岡山大学

Tetsuo Irifune, Ehime University

Tomoo Katsura, Okayama University

地球惑星科学分野の SPring-8 ユーザーは、様々なビームラインにおいてそれぞれの特性を生かした目覚ましい研究成果をあげてきた。その成果は供用開始以来、5 編の Science 誌、2 編の Nature 誌論文をはじめ、多数の論文として公表され、国内外を通じて極めて大きなインパクトを与えている。本稿では、これらのうち SPring-8 において特に活発な研究活動をおこなっている、高圧地球科学および太陽系物質科学における今後の課題と展望について概観する。またそれぞれの分野における問題点や施設側への要望についても言及する。

1. マルチアンビル装置 (MA) によるマントル物質の物性精密測定

(1) 全マントル領域での高精度 X 線回折その場観察

我が国のお家芸である MA の圧力発生技術の進歩は目覚しく、SPring-8 供用開始時点で 40GPa であった最高発生圧力は、焼結ダイヤモンド (SD) アンビルを用いた新たな技術により、現在その二倍の 80GPa を越えており他国の追従を許していない。近い将来地球マントル全域に対応する 130GPa の発生も夢ではなく、全マントルの化学組成や形成過程を明らかにするために不可欠な、高圧相転移境界や密度変化の精密測定が可能になると期待される。しかし、発生圧力の拡大に伴い試料体積は減少し、現在の白色 X 線と半導体検出器の組み合わせによるエネルギー分散型 X 線回折では、十分良質の X 線回折パターンの取得が困難になりつつある。この問題を解決するには、高輝度単色 X 線と、IP や CCD などの高感度の検出器の組み合わせによる角度分散型 X 線回折像の測定が重要であり、このためには新たな挿入光源ビームラインの利用が不可欠である。

(2) 物性精密測定に基づくマントル化学組成の解明

SPring-8 では MA の大容量試料体積や温度圧力精度の高さを利用し、X 線回折その場観察と様々な物性測定技術を組み合わせることにより、マントル物質の高温高圧下における弾性波速度や電気伝導度の精密測定がおこなわれ、世界的に大きな注目を集めている。上部マントルの 20GPa 程度の圧力に限られていたこのような実験を、さらに下部マントル領域に拡張することにより、この領域の化学組成や水の存在などに関し重要な実験的制約を与えることができる。このためには、上記の SD アンビルを用いた更に高度な高圧実験技

術の開発が必要である。一方で、このような測定を行う上での大きな障害は、ハッチ内の電氣的ノイズレベルが極めて高いことである。これを下げるためのハッチ内の改造や、様々な物性測定に対応出来るようハッチ内の機器をコンパクトなものに改造し、ハッチ内に出来るだけ大きな空間を確保する必要がある。

(3) マントルのダイナミクスと分化過程

従来の SPring-8 における MA による研究は、相転移境界の決定や、高压相の P-V-T 挙動、また高温高压下における様々な物性の測定といった、いわば“静的”な実験が主体であった。これらにより地球深部構成物質の結晶構造や化学組成の解明が大きく進展したが、今後は地球内部のダイナミクスや分化過程に対する“動的”研究の重要性が増してくる。特に今後重要になると考えられるのは、高温高压下での試料の変形実験による鉱物のレオロジーの研究である。鉱物のレオロジーを調べるためには、鉱物に作用している差応力を見積もる必要があり、X線応力測定は高温高压下の試料に作用している差応力を評価する重要な手法の一つである。特に単結晶に作用する差応力を評価するためには、高品質の二次元X線回折パターンを取得することが必要であり、挿入光源ビームラインの強力な単色X線の利用が重要になる。また、試料の微少な変形を定量的に見積もるためには、より高い分解能のX線ラジオグラフィ実験が必要である。単色X線を用いれば、適切なエネルギーを選択することにより、大きなコントラストを得ることができて、高温高压下での試料変形の高精度観察に大きく貢献する。一方でこのような高压下での変形実験を行うためには、高い歪みを実現できる機構を備えた新たな高压装置の設置も必要である。

2. ダイヤモンドアンビル装置 (DAC) による地球中心・巨大惑星内部の探査

(1) 地球中心条件でのX線回折実験

SPring-8 における DAC を用いた超高压高温実験により、ポストペロブスカイト相の発見など、地球のマントル最下部や核領域、また巨大惑星深部で起こっていると考えられる結晶構造変化が、世界に先駆けて次々と明らかにされてきた。しかしながら圧力の上昇とともに試料の体積は急激に減少するため、それに応じてX線のビーム径を小さくする必要がある。しかもビームを単にスリットで切り取るのではなく、微小領域に集光してX線の高輝度化をすることが重要である。現在、高温高压 DAC 関連ビームラインでは、半値幅約 $10\mu\text{m}$ 角に集光されているが、地球の中心部に対応する $300\text{GPa} \cdot 3,000\text{K}$ を超える実験では $5\mu\text{m}$ 以下にする必要があるが、現在の集光ビームは数 $10\mu\text{m}$ のテールを引いており、これをコリメータで除去できない。そのため、試料低温部からの不要な情報が測定している高温部に重なってしまう。従って、今後地球中心部での圧力温度条件下での実験を可能にするためには、高輝度化と同時にビームのクリーンアップも急務である。さらに、現状ではビームの位置が常に振動しており（おそらく水冷の振動を拾っていると思われる）、 μm レベルでの安定な位置を保つことが望まれる。なお、SPring-8 では、新しい超高硬度ナノダイヤモンド (Nano-Polycrystalline Diamond, NPD : ヒメダイヤ) を使い、DAC におけるより高い温度圧力や大容量試料に対する測定の試みが開始されている。

(2) 超高压下での複合測定

X線回折による結晶構造と密度の測定に加え、DAC を用いた超高压下でのさまざまな物性の同時測定も行われつつある。DAC の透光性を利用したブリルアン散乱法により、すでに密度と弾性波速度の同時測定が全マントルに対応する圧力下で可能になり、地球科学ではきわめて重要な弾性特性の決定を行っている。また、高压下での電気伝導度測定もおこなわれ、鉄の高压下スピン転移に関連した重要な成果を得ている。鉄は地球深部物質の密度、粘性、電気伝導度、放射熱伝導度などを大きく左右する重要な元素である。しかし鉄の価数とスピン状態は、圧力・温度・相転移に伴って大きく変わると考えられており、マントル深部でのその挙動は未だよく理解されていない。そこで、特に DAC における放射光メスバウアーとX線回折の同時測定を実現させれば、下部マントル領域における高压相中のスピン転移の実体説明が大きく進展すると期待される。

一方で、非弾性散乱、核共鳴前方散乱・核共鳴非弾性散乱、X線ラマン散乱、X線発光分光などの測定を、SPring-8 において高温高压下でおこなうことは現状では難しい。これらの測定用ビームラインでも、高温発生のための加熱システムの導入と、超高压高温下にある極微小試料の解析に適したX線集光システムが整備されることが望まれる。

3. マイクロイメージングによる地球外物質の起源説明

太陽系の始原物質(彗星塵、隕石)には有機物が含まれている。これらの有機物の先太陽系あるいは初期太陽系での進化は地球生命の起源とも関連して、重要なテーマである。始原物質中には、アミノ酸や糖から有機溶媒に溶けない重合した不溶性有機物までさまざまなものが含まれるが、どのような有機物がどのような形態で始原物質のどのような部分に存在するかは、まだよくわかっていない。C、N、O などの XANES を用いたマイクロビームイメージングは、このような物質の研究にきわめて有効である。このためには、このような軟X線領域でのマイクロイメージングシステムが必要である。

X線結像光学系を用いたマイクロトモグラフィーにより、現在SPring-8では数100nmの実効的な空間分解能で3次元のCT撮影が定常的に可能となり、世界をリードしている。その成果は、NASAにより無人宇宙機を用いて地球にもたらされた彗星塵サンプルの分析でも大きな成果も挙げ大きな注目を浴びている。しかし、彗星塵をはじめとする宇宙塵の構成単位は100nm程度であり、これらの構造を理解するためにはより高い位置分解能が必要となる。一方、TEMを用いたCTでは、nmスケールの空間分解能があるが、X線とTEM-CTの間にはギャップが存在する。電子線の透過厚みを考えると、放射光CTの高空間分解能化が現実的であり、今後このための装置開発が必要である。