

ナノビームによる極高圧下における惑星科学

船守展正

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

High-Pressure Planetary Science with X-ray Nanobeam of ERL

Nobumasa FUNAMORI

Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

<Synopsis>

We use diamond-anvil cells to simulate high-pressure and high-temperature conditions of planetary interiors. The sample size decreases with increasing pressure to be simulated, and in the near future, it will be smaller than 10 μm to achieve the world's highest pressure in static-compression experiments. Moreover, samples in diamond-anvil cells typically consist of small grains of 10-100 nm. Therefore, X-ray nanobeam of ERL will bring breakthroughs in high-pressure planetary science.

惑星の内部は高圧高温の状態にあり、地球の中心で 365GPa・6000K、太陽系最大の惑星である木星の中心で 5000GPa・20000K と推定されている。ある与えられた圧力温度環境で、物質はギブスの自由エネルギー $G = U + PV - TS$ を小さくするように振る舞う。したがって、惑星内部の極限環境では、 PV 項や TS 項の寄与が大きくなり、構造や物性の変化が起こる。高圧高温下における物質の振る舞いを解明するための研究は、高圧高温容器内の微小試料に対する測定を行う必要から、放射光の恩恵を受けることで大きく発展してきた。本稿では、ERL で計画されているナノビームによって、ダイヤモンドアンビル装置を用いた高圧高温実験にどのような新しい展開が期待されるか幾つかの例を挙げて概観する。

(1) 極高圧下その場 X 線回折 (未踏の圧力温度領域へ)

未踏の圧力領域での実験を可能にして物質の振る舞いを解明することは高圧科学における第一級の課題である。現在、世界をリードするのは SPring-8 で放射光 X 線回折を行っている日本のグループであり、地球中心に相当する 400GPa・6000K 領域に到達している。さらに圧力領域を拡大できれば、固体水素の金属化なども視野に入ってくる。しかし、400 GPa 領域における実験の試料サイズは 10-20 μm 程度であり、これを超える圧力領域での実験に挑戦するた

めには、試料サイズをさらに小さくする必要がある。そのような微小試料の測定には、ERL の高品質のビームが威力を発揮する。

(2) 高圧下その場 X 線顕微鏡観察 (新技術が拓く高圧科学の新展開)

ERL のナノビームを活かした X 線顕微鏡が実現すれば、高圧科学の強力なツールとなり、多様な研究が新しく展開されるものと期待される。これまで、透過型電子顕微鏡とダイヤモンドアンビル装置の組み合わせにより、数多くの重要な知見が得られてきた。これは、ダイヤモンドアンビル装置中の試料の典型的な粒子サイズが 10-100nm 程度であることによる。しかし、電子顕微鏡を高圧下その場観察に用いることは不可能であるため、その主な適用範囲は、状態を保ったまま常圧常温に回収される試料に限定されてきた。X 線顕微鏡とダイヤモンドアンビル装置の組み合わせが実現して、高圧下におけるその場イメージングが可能になり、粒子の一粒一粒を選んで回折パターンの測定や組成分析を行うことが可能になれば、その効用は絶大である。例えば、従来の粉末 X 線回折パターンでは決定の困難であった未知相の格子定数と空間群を単結晶 X 線回折パターンから決定すること、試料室内の温度勾配に起因する熱拡散 (Soret 効果) によって巨視的な組成分布が生じていても平衡状態にある近接粒子間の元素分配を測定すること、などが可能になるものと期待される。惑星のダイナミクスは重力場中の物質移動によって支配される。したがって、結晶構造と化学組成から求められる密度に関する情報は極めて重要である。

(3) その他 (各種高圧下その場測定の高度化)

ビームサイズが小さくなることの二次的な効用として、入射 X 線コリメータが不要になるならば、レーザーやクライオスタットを用いた高温実験や低温実験の際の幾何学的な制約が緩和されること、小角散乱測定の際のコリメータからの寄生散乱が無くなることなど、従来技術を改良して質の高い測定を目指す上での様々な恩恵がある。

本稿では、ナノビームとダイヤモンドアンビル装置の相性の良さを強調した。しかし、実際に新しい実験を成功させるためには、超えなければならない多くの障壁がある。PF 高圧ユーザーグループでは、2010 年 4 月に、将来光源利用高圧科学ワーキンググループを立ち上げて、大型プレス装置やレーザーショック装置との組み合わせも含め、検討を開始している。さらに検討と準備を進め、ERL の建設と運用開始に備えたい。