

超高压力条件における SiO₂ ガラスの高密度化現象と地球内部進化

東北大学大学院理学研究科

村上 元彦

Densification of SiO₂ glass under ultrahigh pressure : Implications for the internal evolution of the Earth

Motohiko Murakami

Graduate School of Science, Tohoku University

1. 原始地球とマグマオーシャン

四十数億年前の原始地球は、原始惑星物質や微惑星が衝突・集積を繰り返す地球の形成期にあったと考えられています。また、その衝突のエネルギーにより原始地球の表層はドロドロに融けた状態にあったと考えられています。さらに集積期末期にはジャイアント・インパクトと呼ばれるような火星サイズ程の巨大な天体の衝突により、原始地球が全熔融するほどの高温状態を被り、全原始地球はドロドロに融けたマグマの海（マグマオーシャン）に覆われていたと考えられています。四十数億年前、極低温の宇宙空間の中に、火の玉のように燃えさかる原始地球が誕生しその歴史が始まったのです。このような観点から現在の地球を眺めてみると、地球の物質分化の歴史は、超高温でドロドロに融けたマグマオーシャンの時代からの冷却の歴史であるとも考えられるのです。では、この冷却の歴史のなかで地球の内部はどのような物質分化を辿ったのでしょうか。マグマオーシャンのなかでは、基本的には鉄などの重い物質は深部

へ沈降し地球の核を形成し、また軽い岩石層は地球のマントルや地殻を形成したと考えられます。また地球内部の温度圧力条件で決まる様々な物質の密度関係に従い、岩石層の中でも相対的に重い鉱物は沈み、軽い鉱物が浮くことで地球深部の層構造が形成されると考えられるのです。従って、マグマオーシャンの冷却に伴って地球深部の超高压力条件で結晶化する鉱物と周囲のマグマとの浮沈関係（密度関係）を明らかにすることは、地球の基本的な層構造（図1）を理解する上で非常に重要です。とりわけ、周囲を取り巻くマグマそれ自体の地球深部条件での構造や密度を明らかにすることは、マグマオーシャン中での物質の浮沈を決める上で必要

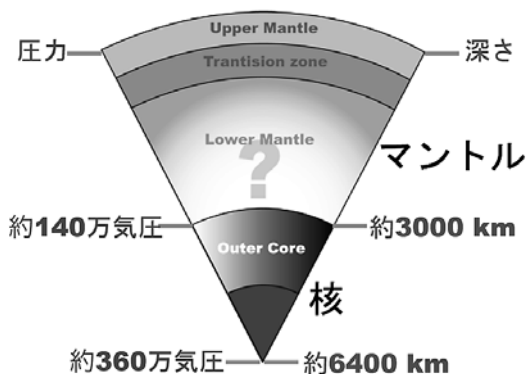


図1 地球の層構造と深さ 圧力の関係

〒980 8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6 3

TEL 022 795 5789

FAX 022 795 6664

E mail : motohiko@m.tohoku.ac.jp

不可欠な情報となります。

2. 地球の層構造と圧力条件

では、地球内部で達成される圧力条件とは一体どの程度なのでしょうか。図1には、現在の地球の層構造を示す模式的な断面図と共に、その深さと圧力との関係を表しています。図中、緑とオレンジで示された部分がいわゆるマントルと呼ばれる岩石層で、灰色と黒で示した部分が鉄を主成分とした核と呼ばれる層になります。マントル層はその化学組成や構成鉱物の違いから上部からそれぞれ、上部マントル(薄緑色)、マントル遷移層(濃緑色)、下部マントル(オレンジ色)と呼ばれます。また核は鉄を主成分とする液体で構成される外核(灰色)と固体の内核に分けられます。図に示した通り、地球中心部の深さは約6400 kmで圧力は約360万気圧にも及び、想像を絶する極限的な超高压力条件であることが分かります。このような極限的な超高压力条件において、これまでマグマの密度や構造を直接測定することは非常に困難であり、マグマオーシャン深部での物質分化の理解はほとんど進んでいませんでした。

3. SiO₂ ガラスの超高压力条件での弾性波速度測定

3.1 珪酸塩マグマの模擬物質としての SiO₂ ガラス

このような超高压力条件下での「マグマ」自身の物性の直接測定は依然として実験的には困難であり、これまでに同種の実験結果を報告した例はありませんでした。本研究では、熔融体である「マグマ」と同様に原子配列に秩序を持たず、また地球内部に存在する珪酸塩マグマの最も単純な成分を有する SiO₂ ガラスをマグマの模擬物質として用い、圧力207万気圧までに至る地球深部に相当する超高压力条件における弾性波速度を測定し、SiO₂ ガラスの超高压力条件での構造変化を明らかにすることを目的としました。本実験は、四十数億年前の原始地球

がマグマの海(マグマオーシャン)に覆われていた時代、珪酸塩マグマ(SiO₂ ガラス)が地球深部の超高压力条件において、どのようなメカニズムで高密度化を達成していくかを模擬したものです。地球深部物質中を波が伝わる速さ(弾性波速度)は物質の物性(密度・構造・硬さ)を強く反映しているため、圧力の上昇に伴った弾性波速度の変化を詳細に調べることで、SiO₂ ガラスの構造の変化を明らかにすることが可能となるわけです。

3.2 超高压力条件下での弾性波速度測定システムの開発

200万気圧を超えるような超高压力条件での弾性波速度測定を実現させるために、筆者は近年イリノイ大学の Jay Bass 研究室と共同研究を行い、ダイヤモンドアンビルセルを用いた Brillouin 散乱分光システムの開発に成功しました。Brillouin 散乱分光法は、物質中のフォノンとプローブレーザー光の光子との相互作用による散乱光の微小な周波数変調(Brillouin 周波数シフト)から物質中を伝わる弾性波速度を光学的に求める手法のことで、物質を非破壊で且つプローブレーザー光の集光サイズ程度の微小試料(20ミクロン径程度)からの信号を得ることができるという利点があります。ダイヤモンドアンビルセルは、先端を平坦にカットした対向する2つの単結晶ダイヤモンドの間に試料を封入し(図2参照)、圧縮することで地球深部に相当する超高压力を発生させるという超高压力発生装置であり(図2)、静的圧縮法としては、現在最も高圧力を発生させ

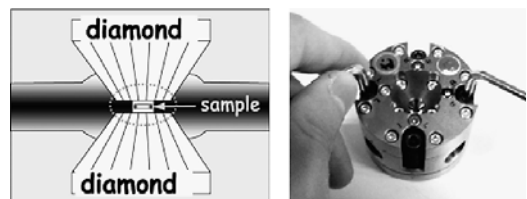


図2 ダイヤモンドアンビルセル(DAC)超高压力発生装置

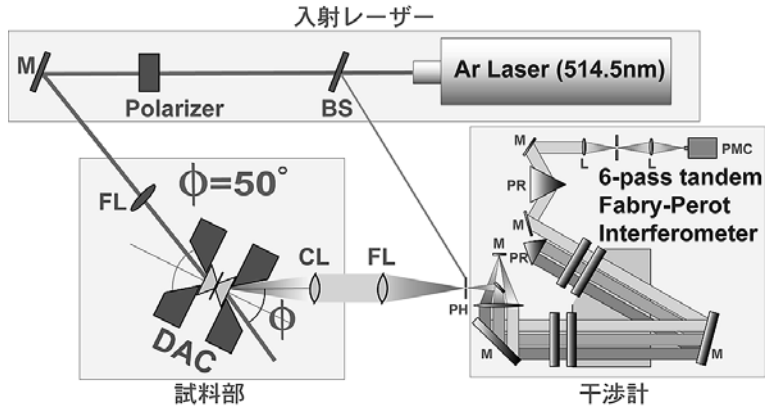


図3 ダイヤモンドアンビル装置を組み合わせた超高压力条件下における Brillouin 散乱分光測定システムの概略図

られる装置としてこれまで 300 400 万気圧の極限的超高压力の発生に成功しています。本装置は、ダイヤモンドという光学的に透明な窓から超高压力条件の試料を覗くことができるという利点があり、この「透明」で「強い」窓から様々な光学プローブを通して超高压力条件の試料の物性を探るといことに適しています。この両者の利点を最大限に活かして超高压力条件での Brillouin 散乱分光測定を可能にしたのが、本複合測定システムです（図3）。

3.3 SiO₂ ガラスの弾性波速度測定結果

実験は、SiO₂ ガラス（Suprasil P 信越石英）の粉末試料をダイヤモンドアンビルセル装置に封入し、圧力 13 207 万気圧の条件において圧力幅約 2 7 万気圧刻みで弾性波速度測定を行いました。200 万気圧を超えるような超高压力発生のためには、ダイヤモンドアンビルセル高压発生装置で用いる単結晶ダイヤモンドアンビルの先端径は非常に小さくする必要があり、本実験では先端径 150 ミクロンφというアンビルを用いています。封入試料サイズはさらに小さくなり、図4に示す通り、約 40 ミクロンφ程度の大きさになります。図5に示したのが超高压力条件で得られた Brillouin 散乱測定データで、圧力 21 万気圧では試料からの、縦波・横波音響モードからの信号のいずれも観察されま

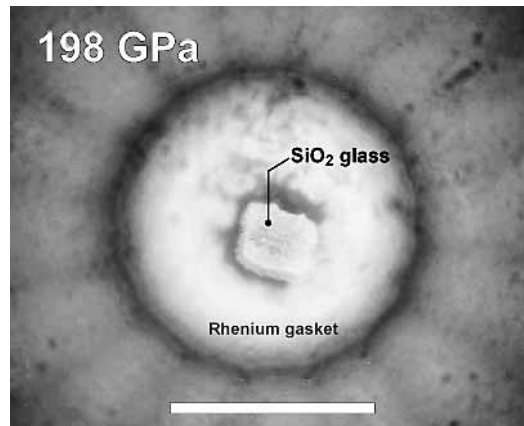


図4 ダイヤモンドアンビルを通して見た超高压力状態（198 万気圧）の試料。（外側の円はダイヤモンドアンビルの先端径を表し、内側の円は試料を表す。スケールバー：100 ミクロン）

すが、より高压力条件になると試料の縦波音響モードからの信号はダイヤモンドの横波音響モード信号に重なり圧力 183 万気圧では完全に隠れてしまっているのが分かります。試料の構造の情報を抽出するためには両方のモードからの信号を得ることに越したことはありませんが、ダイヤモンドアンビルセルという装置を使う以上、より高压条件での縦波音響モードの情報はこのようにダイヤモンドの壁に埋もれてしまうことになるのです。図6には、今回実験で得られた SiO₂ ガラスの横波音響モードから算出した横波速度の圧力依存性を表しています。

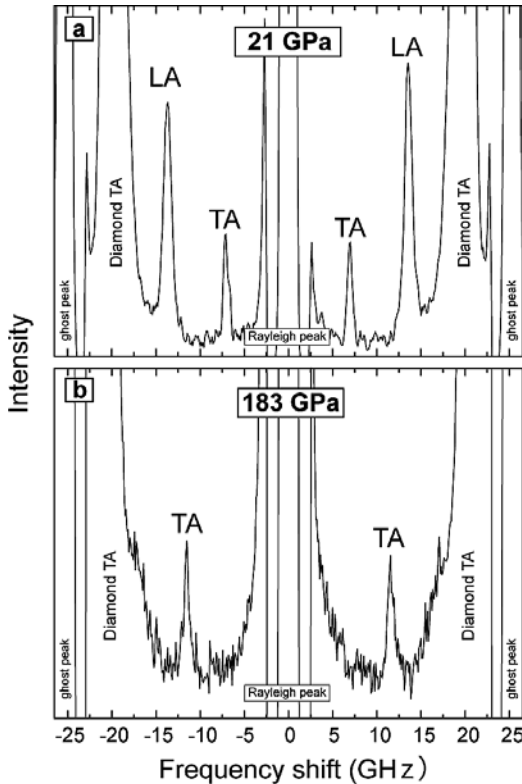


図5 超高压条件下でのSiO₂ガラスのBrillouin散乱データ。TA 横波音響モード。LA 縦波音響モード。

この速度プロファイルは傾向の違いから大きく以下の3つの圧力領域に分類することができます。弾指数関数的な速度増加を示す圧力40万気圧程度までの低圧力領域、弾圧力40万気圧から140万気圧におけるなだらかな増加傾向を示す中圧領域、弾そして、約140万気圧から急激な速度増加に転じる超高压力領域。この速度上昇傾向の分類を、過去に行われた圧力約50万気圧程度までのSiO₂ガラスのX線回折実験やX線吸収法等を用いた研究結果と比較すると、低圧領域で示される速度傾向はSiO₂ガラス中のSi-Oの配位数が4から6へと変化する圧力領域と非常に良い一致を示し、さらに高压領域と分類した40万気圧以上で確認されたなだらかな速度勾配は、同様にSiの配位数が6に安定しているという過去の研究結果と整合的であることが分かりました。一方で、本実験で

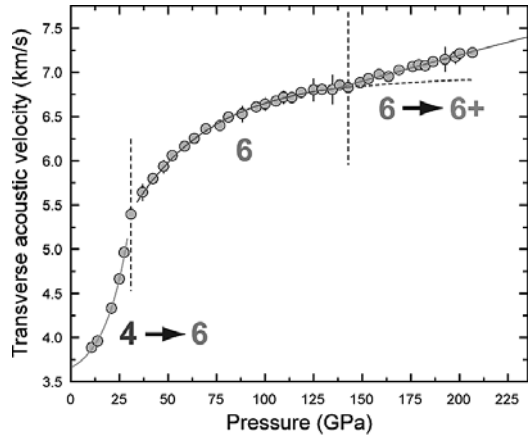


図6 SiO₂ガラスの横波速度の圧力依存性

示された140万気圧以上における超高压力領域での速度の急激な上昇傾向を説明するためには、6配位で安定したSiO₂ガラスがさらに構造変化を引き起こしているということを強く示唆しています。本実験結果だけでは、配位数変化に関する定量的な理解をすることはできませんが、これまでSiO₂ガラスが6配位以上の構造を伴って変化するというを実験的に示唆した例はなく、本実験結果は、今後、ガラス物質の超高压力条件での新たな高密度化機構を明らかにするためのひとつの重要なカギを与えるものであると言えるでしょう。

4. 超高压力条件での高密度化現象と地球内部進化

本実験では、初期地球のマグマオーシャン深部における珪酸塩マグマの模擬物質として、SiO₂ガラスが超高压力条件でどのように高密度化（構造変化）を達成するのかを弾性波速度測定を用いて調べ、圧力140万気圧以上で新たな高密度化が起きている可能性を示しました。圧力140万気圧というと、現在の地球の深さで約3000kmもの深さに相当し、ちょうど現在の地球マントルと核が接する境界付近の深さにあたります。本実験結果からは、原始マグマの海の深部約3000kmもの深さでは、マグマはもはや従来考えられていたような構造を持た

ず、より高密度な「重い」マグマに変化していたと考えられます。この結果は原始地球のマグマオーシャンからの物質分化の歴史に非常に大きな制約を与えるものといえるでしょう。最近の地震波の観測では核 マントル境界に地震波が急激に遅くなる領域が存在することが指摘され、核 マントル境界におけるマグマの存在が活発に議論されています。今回の研究結果から、高密度化が出現する圧力はまさに核 マントル境界の圧力に相当しており、マグマオーシャン以来、重力的に安定な高密度マグマが現在の地球の核 マントル境界に残存しているとい

う、近年提唱された「地球底部マグマオーシャン残存」仮説の議論にも大きく影響することが示唆されます。また超高压力条件でのガラス物質の高密度化現象の発見は、今後、地球科学のみならず、超高压力条件における新物質合成の開拓などへの応用も期待されます。

参考文献

Spectroscopic Evidence for Ultrahigh Pressure Polymorphism in SiO₂ Glass
Motohiko Murakami & Jay D. Bass
Physical Review Letters ,vol .104 ,Issue 2 ,jd .025504