

超高压実験による地球内部探査

岡山大学地球物質科学研究センター 伊藤英司

1. 地震学的地球内部像

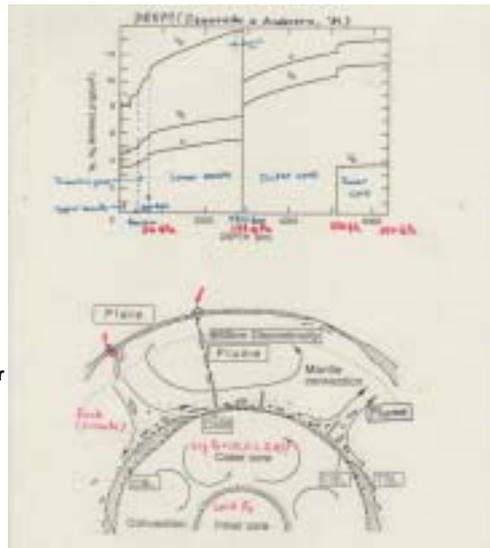
ギリシャ時代から地球がその名の様に球であることは知られていました。しかしその内部状態は20世紀になって、そこを通過する地震の波を観測することによって“当たり”がつけられました。第1図の上は地球内部の平均的な地震波速度(縦波 V_p 、横波 V_s)と密度(ρ)の深さ分布で深さ2900kmを境に上方の岩石からなるマントルと下方の鉄合金からなる中心核に大別されます。マントルは深さ410km、660km付近の速度の不連続的増大で特徴づけられます。この660km不連続の上方を上部マントル下方を下部マントルと呼びます。中心核は主に溶融体ですが中心から半径1200kmは固体で内核と呼びます。下は大きなタイムスケールで起こると考えられる地球内部物質移動のイメージで、

1D seismic models of the Earth's Interior.

V_p : Longitudinal wave velocity, V_s : Transverse wave velocity

ρ : Density

Images of the Earth's Interior



第1図 地球内部の地震学モデル

トモグラフィーによって地球内部のこのような物質移動にともなう3次元構造が示されています。マントルと中心核の境界の圧力は136GPa、地球の中心では360GPaです。温度は数1000におよぶ超高压高温の世界が広がってます。地震学的情報から構成物質と状態の推定を行うための超高压高温実験が20世紀後半から活発に行われてきました。

2. 超高压発生装置

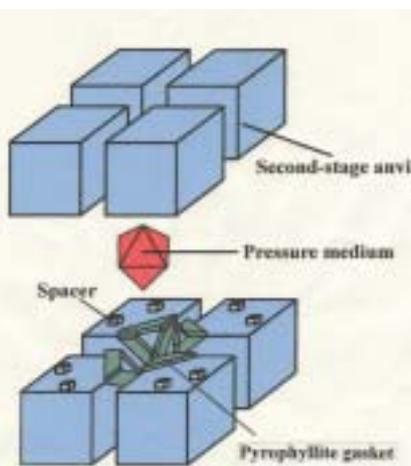
超高压発生の原理は大きな力を小面積に集中させることで、硬い材料が必要です。超高压装置の試料部を直接圧す部材(アンビル)にはタングステンカーバイド(WC)、焼結ダイヤモンド(SD)、単結晶ダイヤモンドを用います。現在超高压地球科学で主に使われている装置は、我々が使っている川井式装置(第2図)と二個の単結晶ダイヤモンドを対向させたダイヤモンドアンビルセル(DAC)です。川井式では8の立方体アンビルが中心に置かれた正八面体の圧力媒体を圧縮します。SDを用いて現在63GPa(深さ1500km)までの圧力が発生できます。地球内部を再現するために圧力媒体の中には小さなヒーターを置いて同時に試料を加

熱します。2500 °C程度までの高温発生が可能です。数100GPaが発生できるDACには圧力では負けても、数桁大きい試料を使ってより定量的な実験が出来るのが強みです。

The Kawai cell (川井セル)

8 cubic anvils + octahedral pressure medium

Large volume sample is kept in quasi-hydrostatic state due to compression from multi-directions.



第2図 川井セル

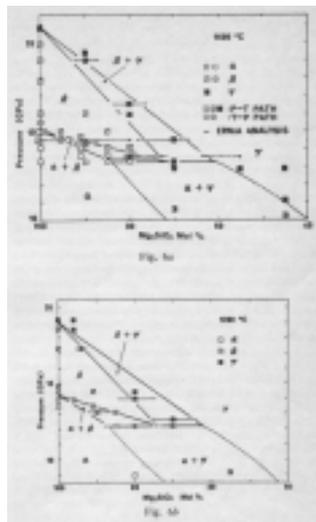
(Mg_{0.9}Fe_{0.1})₂SiO₄ 57%、斜方輝石 (Mg,Fe)SiO₃ 17%、単斜輝石 (Ca,Mg,Fe)₂Si₂O₆ 12%およびざくろ石 (Mg,FeCa)₃(Al,Cr)₃Si₃O₁₂ 12%でオリビンが主体です。ここではこの鉱物の高圧相平衡関係を中心にしてマンツルの構成を概観することとします。第3図はオリビン固溶体(α相)の相転移の様子を示し、マンツルオリビンは圧力の上昇(深さの増大)にともなうα→β→γの順に相転移することが示されています。γ相はスピネル型構造をβ相もこれに類似の構造をとる

Mg₂SiO₄-Fe₂SiO₄系のオリビン-変形スピネル-スピネル相平衡図。○:オリビン、●:変形スピネル、□:スピネル。

- - transformation in the system Mg₂SiO₄-Fe₂SiO₄.

410 km不連続はオリビン(Mg_{0.9}Fe_{0.1})₂SiO₄の変形スピネルへの転移に起因する。

The 410 km discontinuity would be responsible to the transformation of (Mg_{0.9}Fe_{0.1})₂SiO₄.



第3図 オリビン-スピネル転移

され、マンツルの深さ 410-660km(遷移層と呼ばれている)の主要構成鉱物はβ相もしくはγ相および Maj となります。

3. マンツル物質の高圧相転移

第1図下方の様子からもマンツルの化学組成が一様であると考えにくいですが、深さ150km付近から由来する岩石がほとんど橄欖岩(ペリドタイト)であることからこの物質がマンツルを代表するとみなされています。主成分はSiO₂, MgO, FeOで(Mg+Fe)/Si ~ 1.8, Mg/Fe ~ 0.1という特徴を持ち、これにそれぞれ4%、3%程度のAl₂O₃とCaOが随伴します。鉱物で見るとかんらん石(オリビン)

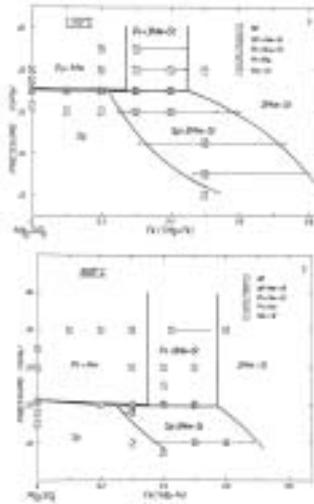
ので変形スピネルと名づけられ、それぞれα相に比べると11%、8%高密度です。これらの相はダイヤモンドのように準安定相として一気圧のもとに回収できるので、詳しく調べることが出来るわけです。この相図から第1図で示された深さ410km 不連続はオリビンのβ相への転移に起因すると考えられています。β相は520km 付近でγ相に転移します。一方輝石類は170km 付近からざくろ石に固溶し始め600km では消滅してMSiO₃成分にとんだざくろ石(Maj)が大量に生成

第4図にはさらに高圧下ではγ相はどのように相転移するのか(ポストスピネル転移)が

□

Pseudobinary diagram for the post-spinel transformation in the system $Mg_2SiO_4-Fe_2SiO_4$. Sp: $(Mg,Fe)_2SiO_4$ spinel, Pv: $(Mg,Fe)SiO_3$ perovskite, Mw: $(Mg,Fe)O$ ferropericlasite, St: SiO_2 stishovite.

The 660 km discontinuity would be responsible for the dissociation of Sp to Pv+Mw completing within a very narrow pressure interval.



第4図 高压化での 相の相転移 (ポストスピネル転移)

≤ 0.25 、 $y \leq 0.34$ の組成域まではPvとそれより大きなFe/Mg比をもつMwの2相集合体で、Fe成分が増えるとStが加わり、さらにFeが増すとPvが消失します。第4図によれば $(Mg_{0.9}Fe_{0.1})_2SiO_4$ 組成の $\gamma \rightarrow Pv + Mw$ 分解圧力が1600 において実験誤差の範囲内で660km不連続における圧力23.4GPaに一致しています。これに伴う密度、 V_p, V_s の増加はそれぞれ11%、7%、12% (いずれも常温、1気圧のもと)と顕著であり、Majの‘動静’にかかわらずこの分解が660km不連続の要因であることは動かしがたいと考えられています。これに関連して第4図が示している重要な点が二つあります。一つは二つの図から解るように分解圧力温度とともに減少している点で、この深さを通過する物質移動(プレートなど)に対してブレーキの役割を果たします。もう一つは $(Mg_{0.9}Fe_{0.1})_2SiO_4$ における圧力幅が1600 において0.14GPa(深さ幅にして5km)以下と大変狭くこの不連続から生じる反射波がしばしば観測されることと調和的です。この相図からこの深さの平均的温度が約1600 であることも読み取れます。

一方、 $(Mg,Fe)SiO_3$ Pvが安定化される圧力になるとMajからこの相の離溶が始まり、圧力の増大とともにPvの量は増大してその組成は Al_2O_3 成分に富んできます。そして、ポストスピネル分解によってすでに存在していた Al_2O_3 を含まないPvと合わせてペリドタイトに含まれていた全ての Al_2O_3 を収容するとMajが消失します。この過程での圧力幅は2.7GPa(深さ幅60km)で660km不連続は鋭いポストスピネル分解に緩やかなMaj→Pvの‘後追い’で特徴づけられることとなります。

こうして、下部マントルの主な構成物質は $(Mg_{0.94}Fe_{0.06})(Si,Al)O_3$ の組成のPvと $(Mg_{0.8}Fe_{0.2})O$ 程度のMwとの集合体であり、それぞれ78%、18%の体積を占めていると推定されます。これらの相が収容能力をもたないCaは $CaSiO_3$ 組成のPvとして独立な相を形成

示されています。図の中でPvは $(Mg,Fe)SiO_3$ 組成を持つ斜方晶ペロフスカイト、Mwは $(Mg,Fe)O$ で表される岩塩型酸化化物、Stはルチル型構造を持つ SiO_2 (スティショバイト)で構造の中でのSiの最近接Oの数(配位数)4がPv,Stいずれもにおいても6に増大しています。Pv $(Mg_{1-x}Fe_x)SiO_3$ においてFeの最大固溶量は1100 で $x=0.08$ 、1600 で $x=0.11$ なので、 $(Mg_{1-y}Fe_y)_2SiO_4$ のポストスピネル相はそれぞれ y

するが、その量は数%以下です。

4. おわりに

以上地球マンツルの構成について述べましたが、最初の仮定 “ マンツルの全組成はペリドタイトで代表される ” がほんとに正しいのか、この点に関連して、最近の超高压実験から示唆される初期地球におけるマンツルの分化についてお話したいと思います。

また、SPring-8において放射光を用いた実験についてもご紹介するつもりです。