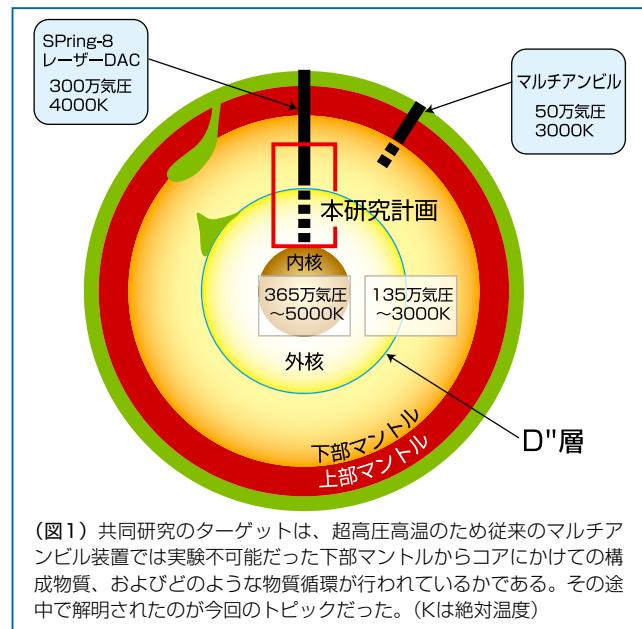


超高压高温環境を再現する技術を開発し マントル最深部に残されたミステリーを解明 地球内部の物質循環解明にまた一歩近づいた

地球内部の物質循環を理解するためには、超高温高圧下にある地球深部がどのような物質でできているかを調べなければならない。地球内部物質循環研究プログラムは国立大学法人東京工業大学と財団法人高輝度光科学研究所(SPring-8)と共同で、下部マントルコア解明プロジェクトを実施している。同プロジェクトではこれまで不可能だった超高压高温状態を人工的に作り出す技術開発を進めしており、地球最深部の謎に迫りつつある。今回はマントルの一番下の部分、D"（ディー・ダブルプライム）層を構成している主要な鉱物が解明された。



取材協力：
翼 好幸 プログラムディレクター
地球内部変動研究センター
地球内部物質循環研究プログラム



(図1) 共同研究のターゲットは、超高圧高温のため従来のマルチアンビル装置では実験不可能だった下部マントルからコアにかけての構成物質、およびどのような物質循環が行われているかである。その途中で解明されたのが今回のトピックだった。(Kは絶対温度)



(図2) ダイヤモンドアンビルセル装置。ハイヒールのかかとで足を踏まれると痛いように、高い圧力を得るには小さい面積に圧力を集中させねばよい。原理は簡単だが、実際には試行錯誤の連続である。わずか直径10cmの装置で300万気圧の実現を目指す。



レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセル実験装置。共同研究はSPring-8の高圧構造物性ビームラインBL10XUで行われている。(写真提供：SPring-8)

マントル最深部・D"層の謎

地球内部がどのような物質でできているかは地震波（P波：縦波とS波：横波）の解析によって知ることができる。地球の体積の8割はマントルと呼ばれる岩石層である。マントルは層構造をなしており、上部マントルと下部マントルにわかれ、さらにマントルの一番下、深さ2700~2900kmにはD"（ディー・ダブルプライム）層と呼ばれる層がある。

地震波の速度は、深度とともに圧力が増し鉱物が同じ構造のまま圧縮される間は規則的かつ連続した変化を示す。上部マントルと下部マントルの境となる660kmの深さには地震波の伝わり方が不規則に変わること（不連続面）があり、上部マントル内部にも410kmのところに不連続面がある。マントル層では Mg_2SiO_4 （かんらん石）が主要な鉱物だが、今までの高圧実験の結果から、410km地点はオリピンというかんらん石がスピネル構造に相転移（同一組成を保ったまま別の構造に変化）し、660kmではさらにスピネル構造からペロブスカイト構造に変わることが分かれている。マントルを作っている天然のカンラン石も実際にこの2つの深度で相転

移する。かんらん石は660kmでペロブスカイト ($MgSiO_3$) + マグネシオウスタイト (MgO) となり、下部マントルはほとんどの鉱物で構成されている。これまでの高圧実験では、ペロブスカイトはそれ以上の構造変化を起こさなかったため、非常に安定した構造だと思われていた。

しかし下部マントルのさらに下、D"層では、P波もS波も不連続な振る舞いをする。その理由を、多くの研究者は「沈み込んだプレートの成分が加わることによって化学的組成が違っているからではないか」と考えていた。なぜなら、サブダクション帯（海洋地殻が大陸地殻とぶつかって地中へと沈み込んでいく場所）で沈み込んだプレート（海洋地殻）はマントル層の下に溜まっている可能性が高いこと、そしてD"層はどこでも観測できるわけではなく、鮮明な箇所とはっきり分からぬ箇所があり、その違いが沈み込んだプレートに起因する可能性があるためである。

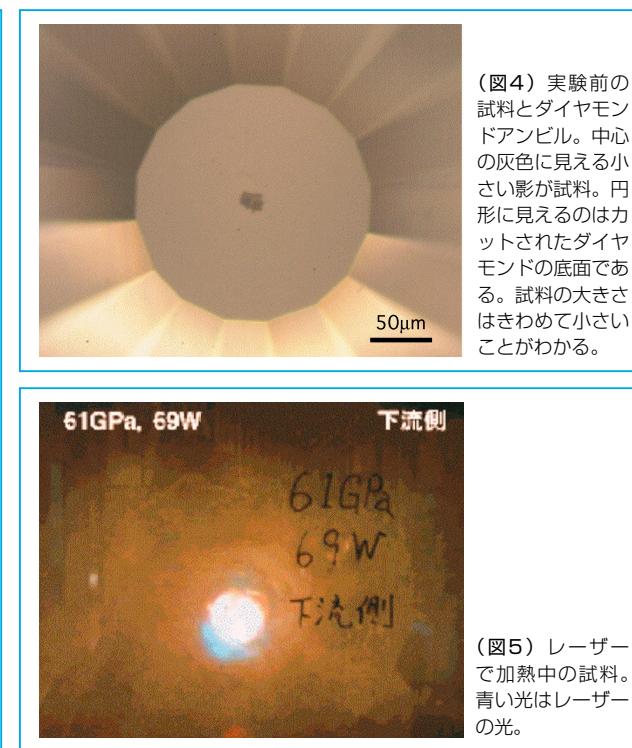
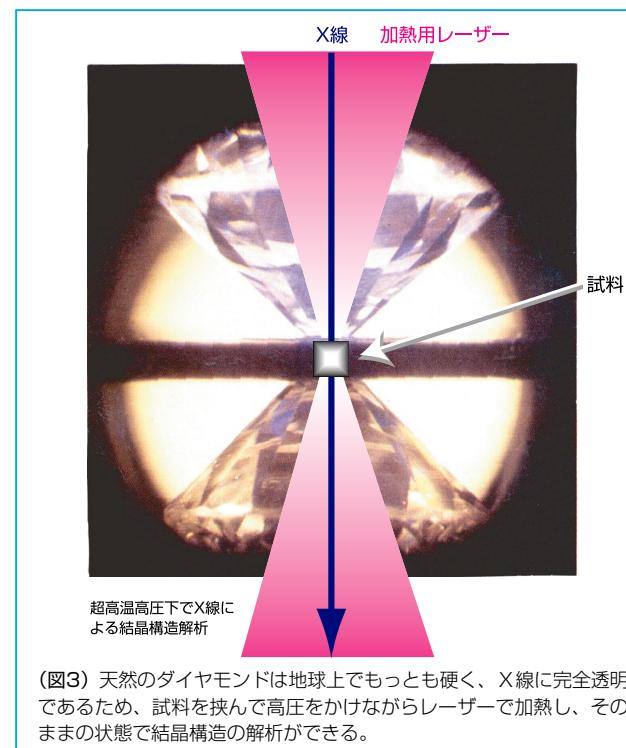
だが、それだけではうまく説明できない点がいくつかあった。D"層ではS波は1.4%速くなるが、P波の速度はほとんど増えない。また伝わる方向によって

地震波の速さが変わる「異方性」が見られる。垂直方向に比べて水平方向のほうが伝わり方が速いのである。密度も1.4%増えている。果して化学的組成の違いでこのようなことが起きるだろうか。これがマントル層に最後に残されたミステリーだったのである。

一方、ペロブスカイトもさらに転移するかもしれないという考え方も一部でなされていた。しかし今までの技術ではD"層の環境を再現する実験が不可能だった。

天然ダイヤを使った 超高压発生装置を開発

410kmや660kmの不連続面の構成物質は「マルチアンビル装置」という高圧発生装置の実験で解明された。ところ



がD"層の実験になると120万~130万気圧を発生させなければならず、従来のマルチアンビル装置では実験が難しい(P.27図1)。

そこで同プロジェクトでは「レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセル高圧発生装置」(レーザーDAC)を開発した(P.27図2)。レーザーDACはブリリアントカットした2つのダイヤモンド(挟む面の直径100 μm)で試料を挟む。試料が動かないように押さえるガスケットの中に試料(30 μm)を入れる。装置自体の大きさは直径10cm程度。平行性を保ちながらねじで締めて圧力をかける。わずかなずれも許されないため、ダイヤモンドの微妙な角度など装置の細部には非公開の細かいノウハウがある。ダイヤモンド部分は高い透明性と正確なカットが必要となるので、天然ダイヤを使っている(図3)。

マルチアンビルなら200 μmくらいの大きさの試料がとれるが、レーザーDACは「試料の大きさ」を犠牲にすることでより高圧を実現した(図4)。試料が小さいと加熱が難しく、クエンチ(急

冷)すると温度も圧力も下がって不安定になってしまふので、取り出して電子顕微鏡で見ることができない。そこで加熱用にはレーザーを使用し、装置に試料をセットしたままX線を使って構造を解析することとした(図5)。

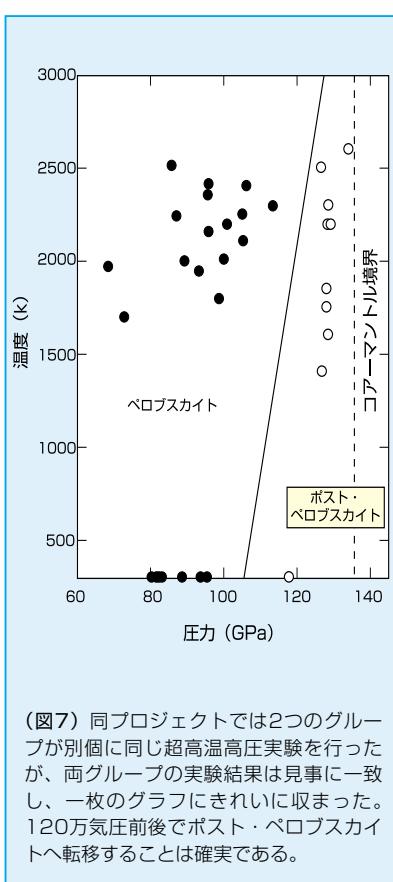
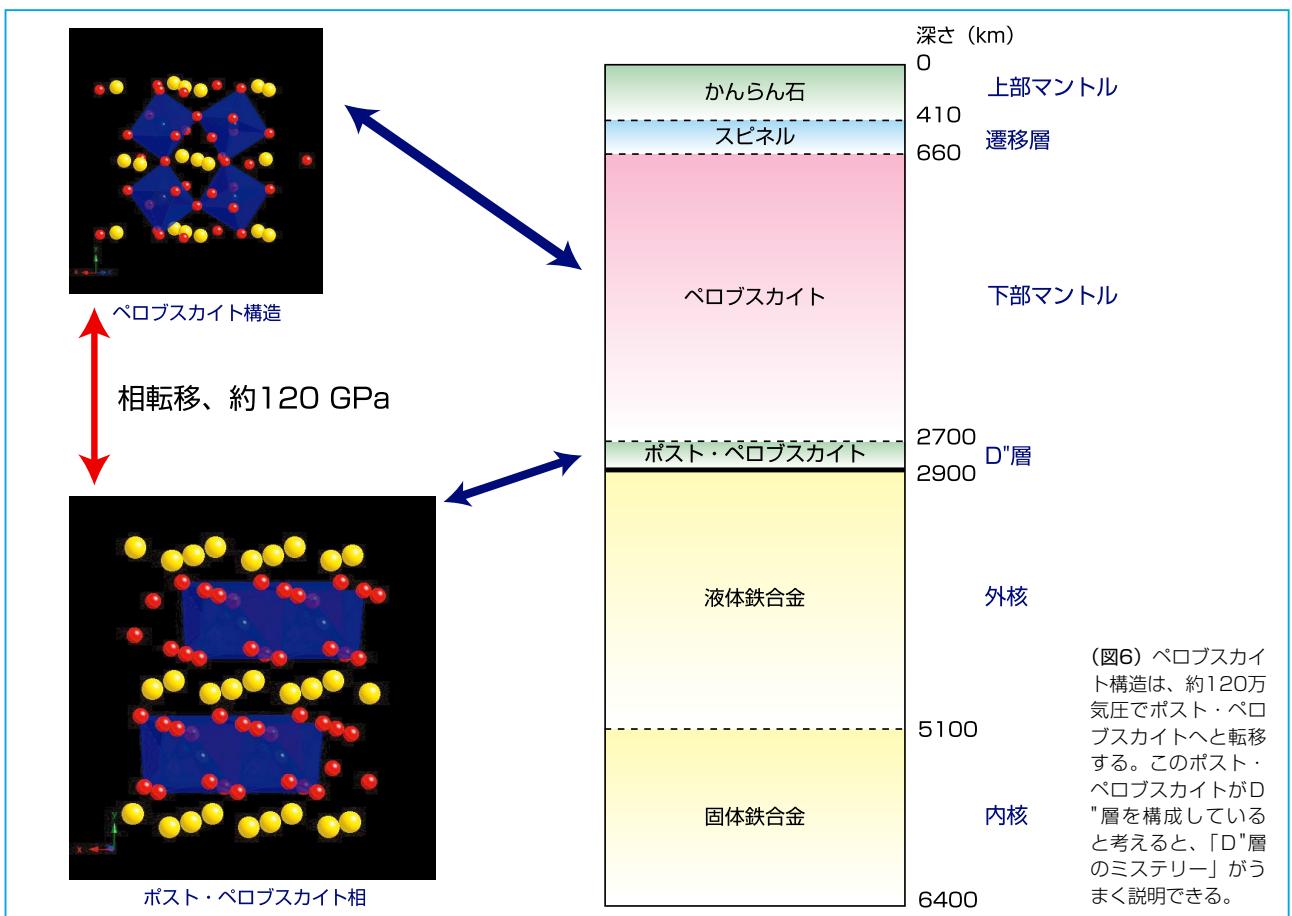
X線回折法とは物質の原子にX線を当て、その反射や干渉波を見ることで原子の間隔を測定し、結晶構造を明らかにすり方法である。試料に当たるX線の回折をイメージングプレートで見て結晶構造の解析を行う。

SPring-8は、ほぼ光速まで加速された電子の軌道を電磁石により曲げた際に放射される極めて明るい光(X線を含む)を使って実験を行う施設である。ダイヤモンドはX線に関して完全透明で、SPring-8のX線は世界最高の輝度を持っているため極小の試料に焦点を絞れる。実験では試料にレーザーを当て、D"層の温度と圧力を同時に発生させ、その温度圧力下でどのようなことが起つているかを見るのである。超高温・超高压は計器では測れないが、試料と一緒に金属を入れ金属の融点をモニターすること

で温度がわかる。圧力測定についても標準物質があるので、それを試料とともに入れてモニターしながら実験する。そのため、この実験では温度も圧力も正確に測定されている。

ペロブスカイトはD"層でさらに構造を変えている

そこからわかったことは、マントルの主要構成鉱物である Mg_2SiO_4 は、660kmでペロブスカイト($MgSiO_3$)とマグネシオウスタイト(MgO)に転移し、前者は圧力が125~150万気圧のD"層までくると再度構造が変わり「ポスト・ペロブスカイト」に相転移するということである。ペロブスカイトは原子が四方に比較的均等につながった「等方的」な構造をしているが、ポスト・ペロブスカイトはそれに比べると分子の水平方向へのつながりが強い層状の構造になる(図6)。これらのこととは、共同研究内部でメンバーの異なる2つのグループが別個に検証し、その結果、ポスト・ペロブスカイトに転移する気圧がぴったり重なったことから確実なもの



といえる(図7)。

D"層で地震波の伝わり方が垂直方向と水平方向で異なるのは、岩石の構造が四方にほぼ均等に原子がつながったペロブスカイトから水平方向のつながりが強いポスト・ペロブスカイトに変わることである。また構造がわかれれば理論計算が可能である。その計算の結果、S波のみが1.4%速度が増えP波がほとんど変わらないことも、1.4%の密度増加も理論的に説明できることがわかった。これは共同研究しているグループ同士が独立に計算して検証を行っている。D"層でポスト・ペロブスカイトへの転移が起こっていることは、高圧実験のみではなく理論計算の面でもでもうまく説明できるのである。

そこでまた新たな疑問が出てきた。「それでは沈み込んだプレートはいったいどこに行ったのだろう」ということである。プレートはマントル層の最深部に

落ちていくと考えられているし、D"層がどこでも観測できるわけではないのだから、この部分にはやはり化学的組成にも不均一があり、全部がポスト・ペロブスカイト転移では説明できないのではないかという仮説が生まれる。それを解明することが全体の物質循環を理解することにつながる。沈み込んだプレートなどの成分がコア・マントル境界に溜まっているかもしれない。異プログラムディレクターらは、プレート物質や大陸からのデラミネーション成分(大陸地殻の安山岩が生まれるときに、相対的に重い成分が剥離して落下するもの)についても、少なくとも現在出力できている135万気圧までは高圧実験を行ない、この仮説を確かめたいと考えている。

レーザーDACは300万気圧の実現を目指している。今後下部マントルからコアにかけての物質循環のさらなる解明が期待される。