



展 TENBO 望

地球進化史解明の鍵を握る 地球深部の“暗い”マグマ



村上 元彦

Murakami Motohiko

(東北大学大学院理学研究科地球学専攻)

1 地球の進化は“冷却”の歴史

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ほどの巨大な天体の衝突により、原始地球が全溶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）に覆われていたとも考えられています。このように、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りました。

その後、マグマオーシャンの中では、冷却とともに冷えて固まったFeなどの重い物質が深部へ沈降し地球の核を形成し、また軽い岩石成分は地球の岩石層であるマントルや地殻を形成したと考えられています。そして、私たちが住む現在の地球を“生きている”星として駆動しているほぼ全ての熱源は、前述した地球形成時の衝突・集積による重力エネルギーとマグマオーシャンから（Feを主成分とする）核物質が地球中心に向かって沈降する際に解放される巨大

な重力エネルギーに由来するものであることが分かっています。このような観点からみれば、地球の歴史は誕生以来、四十数億年にわたって地球形成時に蓄えられた熱を極低温の宇宙空間へ放出し続ける“冷却”の歴史であると言えるでしょう。この冷却過程において地球深部に蓄えられた熱は、種々の熱伝達機構（伝導、対流、放射）を通して地球の表層へ伝えられ、私たちが地表で目にするプレート運動や大陸の形成、あるいは火山活動等の様々な地質学的な現象を引き起こす原動力となっているといえます。したがって、この冷却の歴史を理解すること、つまり地球内部の熱が地表へどのように輸送されてきたかを明らかにすることは、地球の進化を解明することにつながるといえます。

2 地球の内部構造と巨大マントル上昇流の存在

では、地球内部に蓄えられた熱とはいったいいかなるものなのでしょうか？ 約6,400 kmの半径を有する地球の内部は主として、マントルと呼ばれる岩石層と、Feを主成分とする核と呼ばれる層に分けられた成層構造を成している

考えられています。そして、地表から約2,900 kmの深さに位置するマンツルの底は、岩石層である固体のマンツルの鈹物と液体の鉄を主成分とする外核が接する“物質”の境界面であるとともに、高温の核から低温の岩石層へと熱が伝わる地球最大の“熱”の境界面であることが知られています。高温の物質から低温の物質へ熱を伝える方法は幾つかありますが、物質の流動性が高い場合は高温の物質と低温の物質を物理的に混合する方法、つまり対流という熱の伝え方が最も効率的です。地球内部においても、この対流という熱の伝達機構は実際に様々な場において機能しており、前述したマンツル層も固体ではありますが、年間に数cm~数mという非常に緩やかな速度で流動し、地球内部の熱を効率的に逃がすことに貢献しているのです。このマンツルの流動現象のことを“マンツル対流”と呼び、地表での様々な火山活動やプレート運動を議論する上で欠かすことのできない重要な地質学的な現象として知られています。しかし、軽い岩石層で構成されるマンツルと重い鉄を主成分とする核は、重力的に安定に成層しているために対流という方法で熱を伝えることができません。したがって、核とマンツルの境界においては伝導や放射といったほかの熱の伝達機構が卓越するわけですが、この方法は対流に比較して熱を伝える効率が非常に悪いのです。その結果、マンツルと核の境界では、それぞれが感じている温度差を解消できずに、高温の核と低温のマンツルが接している状態にあると考えられています。そして、この高温の核の熱がどのようにマンツルに伝えられるのか、あるいは地表へもたらされるのかといった問題を明らかにすることは、地球のマンツルの対流運動、ひいては地表の火山活動の根源を理解する上で大変重要となってくるわけです。

深さ約2,900 kmにある地球のマンツルの底は、私たちが直接手にすることも目にもすることもできない謎に満ちた世界です。しかし、地震の発生に伴って地球内部を伝わっていく波（地

震波）の速度分布を詳細に解析することで、マンツル底部の構造や物性に関する知見が徐々に得られつつあります。そして、地球のマンツルの底には、地震波の伝わる速さが異常に遅くなる領域（地震波超低速度層）がわずかにあり、それらは厚みが10 kmにも満たない薄い層として存在することが分かっています。この地震波超低速度層は主に南太平洋とアフリカ大陸の真下に多く観測されています（図1）。波が媒質中を伝わる速さは、媒質の密度（重さ）と弾性率（固さ）の関数で表されます。この関係から一般に地震波の速度が周囲より遅くなる要因は、1) 非常に“重い”ものが存在する、2) 非常に“柔らかい”ものが存在する、あるいは、3) 非常に“熱い”ものが存在する、などが考えられます。そして、このような条件を最もよく満たすものとして、マンツルの底には“重いマグマ”が存在しているというモデルが近年提唱されています。また、この重いマグマは、高温のマンツルの底に現在に至るまで固化せずになわずかに残っている四十数億年前の地球誕生時に地球を覆っていたマグマオーシャンの名残とも考えられています。

一方、近年の地震学的な観測によると、南太平洋とアフリカ大陸の下には、平均的な地球内部の地震波速度伝播速度より地震波速度が遅い領域が核とマンツルの境界部分からマンツル上部付近までの広範囲にわたって存在することが



図1 点線部で示されるマンツル底部での地震波超低速度域 (T. Lay, Q. Williams & E.J. Garnero, *Nature* (1998) より)

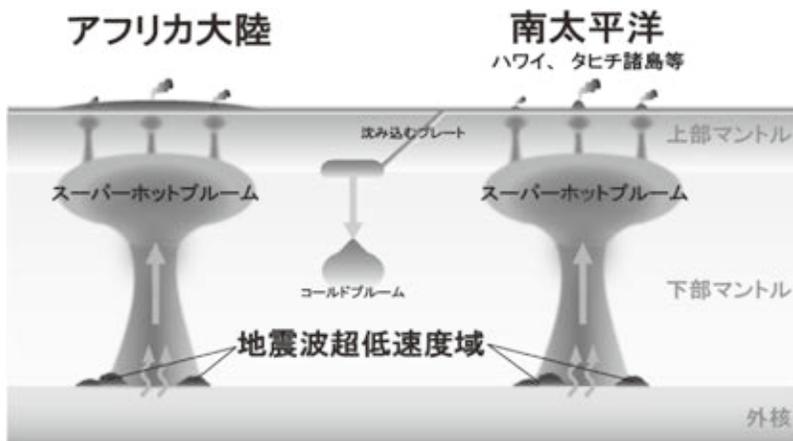


図2 マントル底部から発生する巨大高温マントル上昇流（スーパーホットブルーム）と地震波超低速度域の分布の概念図

分かっており、この地震学的観測結果は、核からの熱を受けて高温になったマントル成分が“スーパーホットブルーム”と呼ばれる巨大な上昇流として存在しているのだと解釈されています（図2）。このスーパーホットブルームは、地表での火山活動へ非常に大きな影響を与えており、アフリカ大陸の大地溝帯（グレート・リフト・バレー）の形成や、南太平洋に点在するハワイ・タヒチ・サモア諸島等のホットスポットと呼ばれる火山活動の源であると考えられています。

このようなマントルと核の境界面での熱の輸送機構解明の重要性から、マントル底部に存在する鉱物相、あるいは外核の構成物質である鉄のマントル深部条件での熱の伝達機構に関する研究がこれまで数多く行われてきました。しかし、マントル底部にごくわずかに存在するとされる重いマグマの熱の伝わり方に注目した研究はこれまでなく、前述したマントル底部の重いマグマの存在と、スーパーホットブルームの発生の関係を説明するモデルの提案には至っていませんでした。

3 超高压力発生装置による地球マントル深部の再現実験

皮肉なようですが、現代の最先端技術の粋を凝らした望遠鏡によって、地球外の百数十億光年先の星を捉えられるようになった現在でも、私たちの足下のたかだか地下2,900 kmの地球のマントルの底がどうなっているのかという問題はまだまだ深い闇に包まれています。人類が地球上に歴史上最も深く掘った穴の深さがわずか10 kmにすぎないという事実を見ても明らかのように、地下2,900 kmにある地球のマントルの底の様子を垣間見ることは極めて困難なことであるといえます。もはや私たちの直接手の届かない地球深部に由来するこのような問題を理解するために最も確実な手法の1つは、実際に地球内部に相当する条件を実験室内で再現し、そこから物性に関するパラメータを抽出することです。しかし、地球のマントルの底は圧力にして百数十万気圧、温度は2,000℃を超えるような超高压力超高温の状態であり、その極限的の温度圧力条件の再現の困難さと、そのような条件から物性パラメータを正しく抽出する実験プロブの欠如によって、地球の内部進化史の理解は妨げ続けられていたといっても過言ではあ

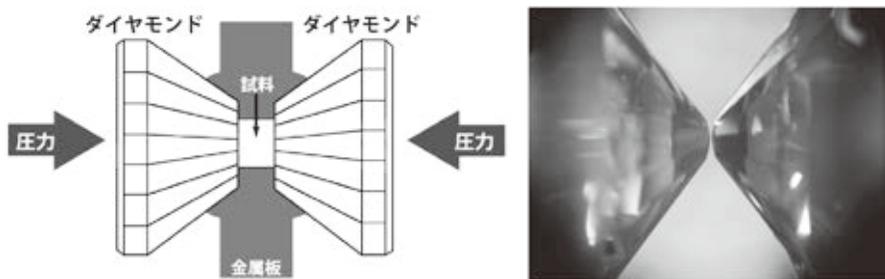


図3 超高压力発生装置ダイヤモンドアンビルセルの概要図と中心部の写真

りません。

このような地球内部に起因する様々な問題に対して実験的にアプローチするために筆者らの研究グループは、“ダイヤモンドアンビルセル”という超高压力発生装置(図3)を用いて研究を行っています。ダイヤモンドアンビルセル超高压力発生装置とは、先端を平らにした(300 μm 以下)にした対向する一組の単結晶ダイヤモンド(1/4カラット)の間に試料を封じ込め、ダイヤモンドを押し込むことで試料に超高压力を発生させることができる装置です。このダイヤモンドアンビルセルは、静的に圧力を発生させる装置として最も高压力を発生させることができる装置であり、現在までに圧力300~400万気圧程度の超高压力を発生させることに成功しています。地球の中心部の圧力が約364万気圧ですので、原理的にはこのダイヤモンドアンビルセルを用いることで、地球内部の全ての圧力条件を発生させることが可能となるのです。

そして、前述したマントル底部における重いマグマの熱物性を調べるために筆者らの研究グループは、このダイヤモンドアンビルセル超高压力発生装置を用いて、マントル深部に相当する超高压力条件における再現実験を行いました。マントル底部に存在するとされる重いマグマと同じ成分(Si, Mg, Fe等の酸化物)を持つガラス物質をマグマの模擬試料として、マン

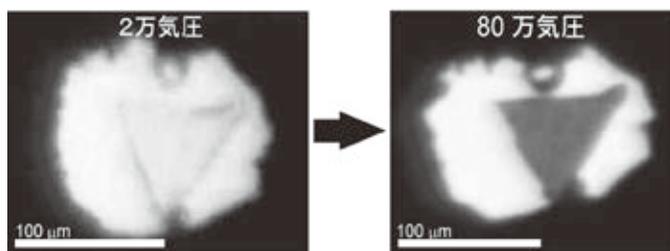


図4 ダイヤモンドアンビルセル中の高压力条件下の微小試料

トル深部に相当する圧力(80万気圧)まで実験を行った結果、圧力を上げるにしたがって試料の色が著しく“暗く”なることを発見しました(図4)。さらに、大型放射光施設SPring-8の日本原子力研究開発機構ビームライン(BL11XU)における放射光メスbauer分光測定という測定を行い、なぜ圧力の増加に伴ってこのような試料の色の劇的な変化が起こるのかということを探りました。メスbauer分光というのは、原子核に γ 線を共鳴吸収させて、物質の電子状態や格子振動を観測する手法です。このメスbauer分光を利用すると、原子核の周りには電子がどのような軌道で回っているか等の変化がわかります。物質の色の変化は、物質の電子状態の変化と密接に関連しているので、高压力条件で徐々に暗くなっていく試料に対してこのメスbauer分光測定を行うことで、試料が暗くなるメカニズムが明らかにできると考えました。ところが、従来のメスbauer分光で使われていた、放射性同位体を γ 線源に用いる方法では、10 μm や 100 μm とい

った、微小な試料を計測することが難しいのです。図4でも分かるように、本研究で使用した試料は $50 \times 50 \mu\text{m}$ 程度であり、このような微小試料の測定に耐え得る新たな測定法として、放射光メスbauer分光測定という手法を利用することにしました。放射光は、非常に向きの揃った微小サイズのX線です。このX線には様々な波長が含まれているので、そこからメスbauer分光で利用する γ 線と同じ波長成分だけを取り出し、試料に照射することで高圧力条件下の極微小試料からのメスbauer分光測定を実現することが可能になります。そして、この放射光メスbauer分光測定の結果、圧力の増加に従って試料中に含まれるFeの電子状態が緩やかに変化し、これが深さとともに徐々に試料が“暗く”(可視光線の吸収が大き)くなっていく原因であることを突き止めました。

4 地球マントル底部での“ダークマグマ”仮説の提案

物質が持つ色は、物質の熱の伝わり方(放射熱伝導率)を反映する指標であり、一般に、物質の色が暗くなればなるほど熱は伝わりにくくなると考えられます。そして、本実験結果から予想されるマントル底部における重いマグマの放射熱伝導率は、周囲を取り囲むマントルの鉱物よりも5~25倍程度も小さく、熱が伝わりにくくなることが明らかになりました。周囲よりも熱を伝えにくい重くて“暗い”マグマ(“ダークマグマ”)は、核からマントルへの均質な熱の輸送を妨げ、たとえその存在がごくわずかであっても、核とマントルの境界での熱流量に著しい不均質構造をもたらすものと予想されます。その結果、このマントルに生ずる大きな熱流量の差によって、マントル底部に根っこを持つスーパーホットブルームが生み出されるもの

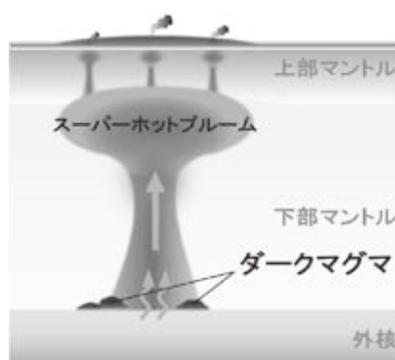


図5 スーパーホットブルームの発生の鍵を握るマントル底部の“ダークマグマ”

と考えることができます(図5)。この仮説は、マントル底部での地震波超低速度層とスーパーホットブルームの発生という地球科学の2つの大きな謎に対して整合的な説明を与えるものであり、地球の進化史を理解する上で、非常に重要な制約を与え得ると考えられます。

四十数億年の冷却の歴史の途上にある現在の地球では、ごくわずかにしか存在しないマントル底部の“ダークマグマ”も、歴史を遡るとマントルと核の境界面が“ダークマグマ”で全て覆われていた時代があったことが予想されます。そして、本仮説に従うならば、この“ダークマグマ”の海の隙間から外核が見え始めた時代を境にして、マントルの対流様式が大きく変化し、より巨大なマントル上昇流が生まれる時代に入ることになったと考えることができるかもしれません。今後、より現実的な系での測定実験と、ほかの熱伝達機構等の解明によって、マントル底部での“ダークマグマ”仮説が検証されていくことでしょう。

参考文献

- 1) Murakami, M., et al., *Nature Communications*, **5**, 5428 (2014)