



沈み込み帯での水を追う

岩森 光 研究室～地球惑星科学専攻



岩森 光 教授

地球内部ダイナミクスとは、地球内部の物質の循環とその機構に関する分野である。地球内部のマントルと呼ばれる層は熱対流しており、その影響として地震や火山活動が起こっている。そのため、地球内部ダイナミクスを研究することは地球の活動を解明することにつながる。

岩森先生は、沈み込み帯と呼ばれる場所での火山活動には水が関係していると考えており、そこでの水の移動を追っている。その手法としてシミュレーションを利用している。本稿ではどのように水の移動を追っているのかを紹介する。



地球内部ダイナミクスとは

岩森先生の所属する地球惑星科学専攻では、地球やその他の惑星がどうやってできたのか、それらはどのような営みをしているのか、といった素朴な疑問を追っている。そのための研究には物理学、化学、生物学や地質学などといった幅広い分野の学問を用いる必要がでてくる。

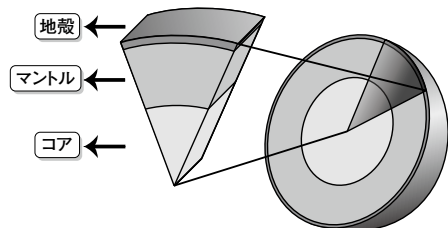
地球惑星科学専攻では、惑星についての研究を行っている。しかし、他の惑星について地球と同程度に精密な研究を行うとしても、地球から遠く観測データが限られるため、他の惑星の構造を調べることは容易ではない。そこで、まず地球の構造を調べて観測データを集め、それらを他の惑星に応用している。地球と他の惑星では温度や圧力などの物理的条件は異なるものの、はたらく物理法則は同じである。そのため、地球の構造を調べることで他の惑星の構造を推察できるようになる。

岩森先生の研究室では地球内部ダイナミクスと呼ばれる分野の研究を行っている。地球内部ダイナミクスとは、地球内部の物質の循環とその機構に関する分野である。

物質の循環は地球内部のマントルと呼ばれる

部分が根源となっている。地球内部は図1のように表面から中心に向かって、地殻、マントル、コアの三層に分けられる。地殻は表層部の深さが約30kmまでの範囲を構成している柔らかい岩石の層である。マントルは地殻の下からコアの上まで深さ約30kmから2900kmまでの硬い岩石の層である。コアはマントルより深くにあり、地球の中心を構成している金属部分である。

地球は他の惑星と比べて、火山活動や地震活動などの表面活動が活発である。その原因はマントル対流と呼ばれるマントルの動きにあることが分かっている。マントルは岩石でできてい



地表から中心に向かって、地殻、マントル、コアの順

図1 地球内部の構造

るため固体であるが、熱によって対流が生じている。この対流はどのように起こるのだろうか。

物体の熱対流は、物体の温度差によって生じる。一般に物体は、温度が高いと密度が小さくなり、温度が低いと密度が大きくなる。そのため、温度が高い部分が上昇し、温度の低い部分が下降する。

マントル対流を引き起こす熱源は、コアとマントル内部にある。そして、これらから生じた熱は地表より放出される。そのため熱源付近では温度



シミュレーションと地震波トモグラフィー

地球内部にあるマントルについて、どのような方法で調べることができるだろうか。すぐに思いつきそうな調査方法として、地殻を掘削して地球内部の物質を採取するという方法があるだろう。しかし今の技術では10km程度までの掘削が限界であり、地殻の厚さである30kmを超えて掘削しようとするのは現実的ではない。

そこで、地球内部でも地表と同じ物理法則が成り立っているという観点から、シミュレーションを用いて地球内部の状態を推測するという方法がとられている。シミュレーションとは対象を直接調べることが難しい場合に、調べたい状態と似た状態をコンピュータ内に作りだしてその特徴を調べるといった手法である。

マントル対流を引き起こしている熱源がどこにあるのかを調べるために、放射性元素の量については隕石や地球の岩石の分析値を参照しながら、三つの熱対流のモデルを仮定した。一つ目は熱源がコアそのものである場合、二つ目は熱源がマントル内のみにある場合、三つ目は熱源がコアそのものとマントル内の両方にある場合である。それぞれの仮定のもとにシミュレーションを行うと、それぞれの場合において地球内部の温度分布を推測できる(図2)。これらと実際に調べた地球内

部が高く、地表付近では温度が低くなる。一般の物質と同様にマントルは温度が高いほど密度が小さくなり、熱源の位置によりマントル内には温度差が生じるため、結果として密度の差が生じる。それを解消しようとしてマントル内で対流が起こるのである。

コアとマントル内部に熱源があることは、隕石や地球の岩石の分析およびシミュレーションを用いることで、地球惑星科学の分野で解明された。

部の温度分布を比較することで、どのモデルが正しいかを判断することができる。

地球内部の温度分布は、地震波の伝わる速さを観測することで分かる。マントルでは、同じ圧力では温度が高いほど地震波の伝わる速さが小さくなると分かっている。よって、地震が発生してから地震波が計測されるまでの時間差を世界中で測定することで、地球内部の温度分布が分かる。この手法を地震波トモグラフィーという。

地震波トモグラフィーの結果、地殻付近とコア付近のマントルでは、同じ深さにおいて地震波の伝わる速さが場所によって大きく異なっていると分かった。また、マントルの中層部では、地震波の伝わる速さは場所によらずあまり変わらないと分かった。ここで、地震波の伝わる速さの分布を温度分布に置き換えることで、モデルとの比較を行うことができる。その結果、地震波トモグラフィーからコア付近のマントルで温度の変化があると分かった。コア内部にはコアを温める熱源はないが、コアは熱を蓄えているためマントル対流の熱源となる。ただ、コアから伝わる熱はそれほど大きくないと考えられており、図2を見てみるとこれに当てはまるのは三つ目のモデルの、熱源がコアとマントル内

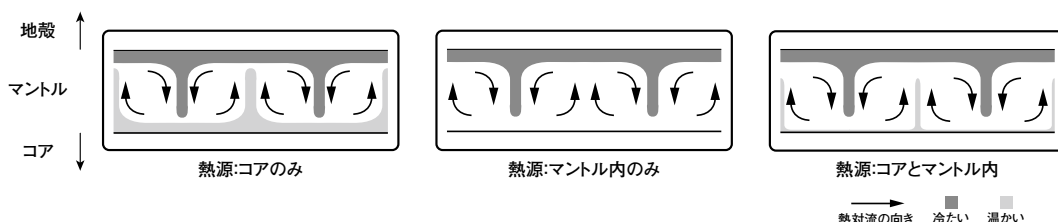


図2 熱対流の三つのモデルのシミュレーション

の両方にある場合であるということが分かる。さらに詳細に調べると、マントル内部の熱の方がコアからの熱よりも大きいということが分かった。

マントル内の熱は、マントル内に存在する放射性物質の崩壊熱によるものと考えられている。マントル対流は火山活動などの表面活動に関係しているため、放射性物質は地球の表面活動に影響する。

一方で、放射性物質の他に、マントル内に存在する水も表面活動に影響しうる。水はマントルの融点を下げるため、マグマの生成に関与する。マグマは火山活動を引き起こすため、水は火山活動

などの表面活動に影響しうる。

これまで、マントル対流に影響するものとしては、放射性物質などの熱源が注目されてきた。しかし、岩森先生は水も火山活動に大きく影響していると考えた。その根拠として、沈み込み帯と呼ばれる場所での特殊な火山活動が挙げられる。先生は、この特殊な活動は水によって引き起こされているのではないかと考えている。そこで実際の沈み込み帯の特徴から複数のモデルを構築し、シミュレーションを利用して沈み込み帯での水の移動を追っている。



沈み込み帯における火成活動

先生の研究内容を紹介するにあたって、まず沈み込み帯について説明する。地表を覆っている厚さ100kmほどの岩盤のことをプレートという。プレートには海洋プレートと大陸プレートがあり、海洋プレートが他のプレートの下に沈み込む場所が沈み込み帯と呼ばれている。多くの場合、海洋プレートは大陸プレートの下に沈み込む。

図3は沈み込み帯を説明する図である。火山フロントとは、沈み込み帯に近い火山の列を指す。前弧側とは火山フロントより沈み込み帯に近い方を指し、背弧側とは火山フロントより沈み込み帯から遠い方を指す。また、マントルウエッジとは、沈み込み帯において大陸プレートの下でマントル対流が折り返すところを指す。

沈み込み帯では地震が頻発し、火成活動が盛んである。火成活動とは地表での火山活動と地下でのマグマの発生、移動を含む活動の総称である。先生の研究の対象である火成活動の仕組みはどうなっているのか見てみよう。マントル内で固体であったマントルが融けることで、液体であるマグマとなる。マグマとなることで密度が小さくなり、地表へ移動して火成活動が生じる。火成活動の大まかな仕組みはこのように解明されているが、マントルが溶けてマグマができる過程については、詳しくは解明されていない。

マグマの生成には圧力、温度、水の三つの要素があると考えられている。圧力の減少、温度の上昇によりマントルが溶けてマグマが生じる。また、水を含むとマントルの融点が下がるのでマントルが融ける。先生は、どの要素がどの程度火成活動

に関与しているのかをシミュレーションや化学分析を通して調べた。

火成活動が起こる場所は沈み込み帯、海嶺などに分けられる。沈み込み帯とは先に述べたように海洋プレートが他のプレートの下に沈み込む場所である。海嶺とは海洋プレートが裂け、そこでマントルが上昇して新しいプレートが作られる場所である。海嶺ではマントルが上昇すると圧力が下がりマグマができる。

海嶺とは異なり、沈み込み帯では圧力、温度という観点からはマグマができにくい。なぜなら、海洋プレートは沈み込むにつれて圧力が上昇するのに加え、海で冷やされ続けてきたために温度が低いからだ。ところが実際には火成活動が起こっている。このことから、沈み込み帯でのマグマの生成には圧力、温度の条件を覆すほどに水が大きな役割を果たしていると先生は考えた。

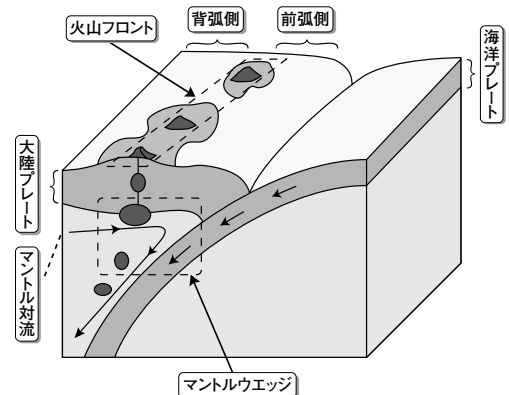


図3 沈み込み帯の構造

表1 岩石ごとの水の放出条件

かんらん石からできた鉱物 (蛇紋石、緑泥石)	玄武岩からできた鉱物 (角閃石)	玄武岩 堆積物	その他の岩石
700℃以下 5~8%の水を含む 700℃以上 水をほとんど放出	2.5GPa以上 水をほとんど放出	圧力と温度の増加に ともなって水を放出	2.5GPaから10GPa, 600℃~700℃以上 水をほとんど放出

先生は水に着目したが、その水はどこから生じたのだろうか。プレートは沈み込む前には海底にあったために大量の水を液体として含んでいる。この水は沈み込む過程でプレートを構成する岩石と反応して別の物質に変化するため、液体としては存在しなくなる。さらにプレートが深くまで沈み込み、圧力や温度が上昇すると、プレートを構成する岩石が分解して液体の水をマントル内に放出する。

岩石に圧力をかけて地球内部の環境を再現する高圧実験の結果、岩石の水の放出は圧力と温度が関係しており、岩石ごとにその条件が異なるということが分かった。沈み込み帯において、どこ

で火成活動が起こるかはどこで水の放出が起こるかに関係しているという考えから、沈み込み帯での火成活動について調べるには沈み込むプレートを構成する岩石を調べればよいといえる。そこで先生は、モデルを構築して沈み込み帯での水の移動を調べるために、プレートを構成する岩石ごとに水の放出条件をまとめた。

沈み込む海洋プレートを構成する岩石は地質学の研究によって分かっている。上から順に、堆積物、火成岩である玄武岩、かんらん岩という構造である。深さ 300km 程度の圧力に相当する 10GPa まで、これらの岩石の含水率を高圧実験から推定した(表1)。



日本をモデルとしたシミュレーション

高圧実験から得られたデータをもとに、先生は沈み込み帯での水の移動を、シミュレーションを用いて調べた。シミュレーションを行うことで沈み込み帯での火成活動に水が関係しているかどうか分かる。シミュレーションには日本列島近辺をモデルとして利用した。

日本列島近辺でのシミュレーションを行うにあたって、先生は日本列島を東北日本、西南日本、中部日本の三つの地域に分けた。日本列島周辺には特徴の異なるプレートが複数あり、それらが複雑に重なり合っている(図4)。そのため、沈み込み帯の特徴が異なってくることから日本列島を三つの地域に分けた。

東北日本においては、太平洋プレートが北米プレートの下に沈み込んでいる。太平洋プレートは沈み込み始める頃にはプレートができてから 1.3 億年ほど経っており、その間海で冷やされ続けている。そのため太平洋プレートの温度は世界中の沈み込むプレートの平均温度より低い。しかしそこでの過程と原理は他の沈み込み帯にも共通し、東北日本での現象は一般化可能である。火成

活動や地震活動が活発であることも踏まえると、東北日本のモデルは代表的なモデルと見なせる。

西南日本においては、フィリピン海プレートが大陸プレートの下に沈み込んでいる。フィリピン海プレートは沈み込むプレートの中ではかなり若い方であり、比較的 температураが高い。

中部日本においては、太平洋プレートとフィリピン海プレートの二つの海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込んでいる。マント

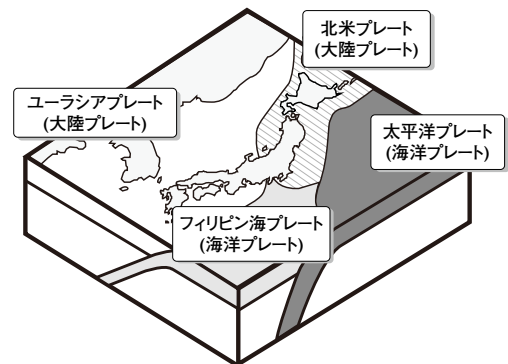


図4 日本近辺のプレートの重なり合い

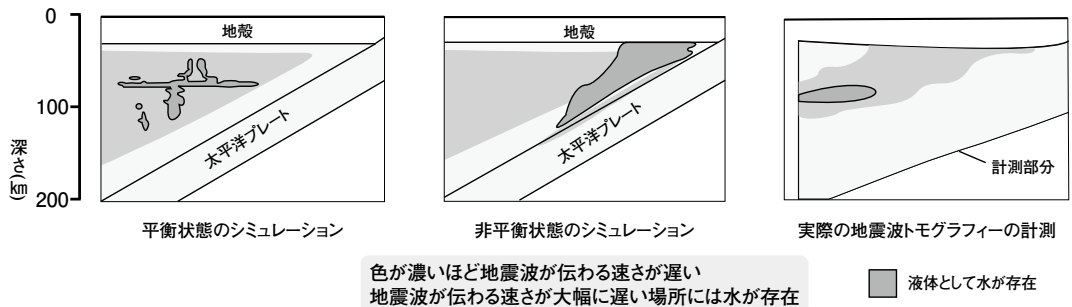


図5 平衡状態と非平衡状態のシミュレーションと実際の計測

ルウェッジにおいて、フィリピン海プレートはマントル対流を遮るはたらきをしている。

以降この三つのモデルを用いて行ったシミュレーションの経緯と結果を示す。

まず、先生は代表的なモデルである東北日本のモデルでさらに二つの仮説を考えた。先に述べたように、水は沈み込む過程でプレートを構成する岩石と反応して別の物質を構成する。この反応が平衡状態である場合と非平衡状態である場合の二つの仮説を考えたのである。

平衡状態の場合、沈み込み帯における圧力や温度の条件下では水は広がる。そのため水は岩石の表面に広がるだけでなく、岩石を構成するすべての粒子と接しようとする。したがって平衡状態の場合、水は岩石の内部にまで浸透する。

一方、非平衡状態の場合、水は縮まろうとする。そのため岩石と水の接している面積がより小さくなるように、水は岩石の表面にしか存在しなくなる。したがって非平衡状態の場合、水は岩石と岩石の隙間を通る。

平衡状態を前提にシミュレーションを行った結果、水は火山フロント直下の深さ100～150kmでは放出されず、火山フロントの背弧側の深さ150～200kmで放出された。

液体としての水が生じると、一般に岩石は柔らかくなり、元の位置に戻る力が小さくなる。そのため、岩石を媒質とする地震波の伝わる速さは大幅に小さくなる。このことから、水の放出された深さ150～200kmのマントルウェッジにおいて、地震波の伝わる速さが大幅に小さくなるということが推測される。

非平衡状態を前提にシミュレーションを行った結果、水は火山フロントの前弧側の深さ100kmより浅い場所で放出された。このことから、平衡状

態の場合よりも浅い場所で地震波の伝わる速さが大幅に小さくなるということが推測される。

ここで実際の地震波トモグラフィーでの計測結果と比較して、平衡状態の場合と非平衡状態の場合のどちらが東北日本のモデルとして適切であるかを検討した(図5)。計測の結果、火山フロントの直下ではなく背弧側で地震波の伝わる速さが大幅に小さくなっていった。これは、地震波の伝わる速さが大幅に小さくなる領域の深さや位置が平衡状態の場合と似ているため、平衡状態の場合が実際の東北日本の沈み込み帯での水の移動をよく表しているといえる。つまり平衡状態の場合の方が適切なのである。この結果と、東北日本のモデルは代表的なモデルであることを踏まえると、以降のモデルでは平衡状態の場合を考えればよいといえる。

西南日本のモデルでは、シミュレーションを行った結果、東北日本のモデルよりも浅い、深さ100kmで水の放出が起こった。これは、沈み込むプレートが若く温度が高いため、沈み込むとすぐに水を放出する温度に達したためと考えられる。

中部日本のモデルでは、太平洋プレートに比べてフィリピン海プレートは沈み込む速さが小さいため、フィリピン海プレートは静止していると仮定した。シミュレーションの結果、東北日本のモデルよりも深い、深さ200kmで水が放出された。しかし深さ300kmまで達しても、沈み込むプレートに含まれるすべての水が放出されることはなく、水を含んだ岩石が安定なまま、より深い場所に移動することも分かった。これは、フィリピン海プレートがマントル対流の障害物となるために、プレートの温度上昇の開始が遅くなり、水を放出する温度に達しにくかったた

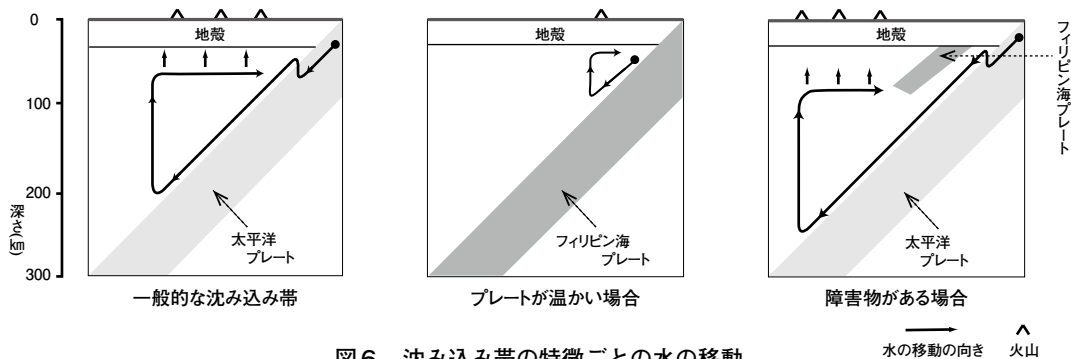


図6 沈み込み帯の特徴ごとの水の移動

めと考えられる。

これまでのシミュレーション結果から、日本近辺の沈み込み帯における水の移動の様子が分かった(図6)。これらは実際の沈み込み帯の様子をうまく表しており、水が火成活動に関わっていることが確かめられた。

これまで利用した日本列島付近の三つのモデルを一般化することで、世界中の沈み込み帯での水の移動の様子が分かる。三つのモデルを一般化した結果をまとめてみよう。

一般的な沈み込み帯では火山フロントの背弧側で水は放出される。その結果マグマが発生して背弧側に火山ができる。

沈み込むプレートが比較的若い場合、沈み込むプレートは温度が高い。そのため、一般的な沈み込み帯よりもより浅い場所で、水を放出する温度に達する。この水が火成活動を引き起こすため、火山は前弧側にできる。

マントルウエッジにおいてマントル対流を遮る障害物がある場合、沈み込むプレートの温度は上がりにくくなる。そのため沈み込むプレートは深くに潜っても冷たく、一般的な沈み込み帯よりもより深い場所で水を放出する温度に達する。結果として水は深い場所で放出され、火山が一般的な

沈み込み帯よりもさらに背弧側ができる。

最後に、先生が現在着手している研究を紹介しよう。先生は世界中の海の中にある玄武岩を構成する元素の同位体比を調べた。その結果、同じような構成の玄武岩が、ある経度のところで南北に広く分布していることが分かった。先生はこの玄武岩を調べることで一つの仮説に行き当たった。それは、沈み込んでいった水が沈み込み帯で放出されずに、地球内部で10億年ほど熟成されることによりこの玄武岩ができたのではないかと、という説だ。

さらに先生はこの説と中部日本のモデルを組み合わせることで、地球規模での水の移動を考えている。中部日本のモデルでは、フィリピン海プレートがマントル対流の障害物となることで、モデルに用いた深さでは水が全て放出されないというシミュレーション結果となっている。ここで放出されなかった水が、先の特徴的な分布をしている玄武岩の生成に関係していると先生は考えたのだ。この水は、さらに朝鮮半島や中国の内陸部にいたるまでの火成活動に影響しているのではないかと先生は注目している。先生は水の移動を地球規模で追い、地球上のすべての火成活動の仕組みを解明しようとしているのである。

日本では地震が頻発し、火山活動が活発です。地震の仕組みは一般に知られていますが、火山活動の仕組みはそうではなかったため、私は火山活動に興味を持っておりました。そんな私に、シミュレーションを利用することで火山活動の仕組みを解明しようとする岩森先生の研究はとても興味深いものでした。

お忙しい中取材に快く応じてくださり、専門知識をもたない私にも理解できるように分かり易い例をまじえて丁寧に説明していただき、岩森先生には多大なご尽力をいただきました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。岩森先生のより一層のご活躍をお祈り致します。

(小熊 功太)