



地震波が伝える地球内部構造

金嶋 聰 研究室 ~ 地球惑星科学専攻



金嶋 聰 助教授

地球科学の重要な研究テーマの一つに地球内部の構造決定がある。金嶋先生は、地震時に発生する地震波を利用して、長年この研究を続けてきた。その中で現在先生は、緻密な内部構造の決定という観点にたち、従来より盛んに用いられてきた地震波トモグラフィーという手法の有効性と限界を指摘している。さらなる緻密な構造の探究という課題を前に、先生は散乱波という波に注目し新手法確立を進めている。ここでは先生の最新の研究から見えてきたより精密な地球内部の姿とそこにかかる先生の意気込みを紹介していく。



微細構造に懸ける情熱

遥か46億年もの昔、この宇宙に地球が誕生した。原始の地球は、太陽のダストとガスから生まれた小惑星が数多く衝突し形成された。現在より遥かに高温であった地球はその後時間とともに冷えていき、次第に現在の地球の姿を形作っていった。金嶋先生はこの地球を舞台にした地球科学の中で地球の内部構造の決定を長年研究し続けている。そして、この研究を行う上で先生が選択した手法、それが地震時に発生する地震波を用いた手法である。

地震波の利用によってこの分野では現在に至るまでに多くの成果が挙がってきた。20世紀半ばまでに明らかになった地球内部の成層構造もその一つだ(図1)。しかし、大枠の構造が判明したからといって、地球内部を全て明らかにしたとは言い難い。同じ層内の同じ深度において、地域によって岩石の種類や性質は異なるからだ。先生はこの差異を地震波によって明らかにし、より詳細なモデルの構築を進めている。中でも近年特に先生が力を入れて研究を行っているのがマントル層内の構造決定だ。

マントル内の構造決定では、ここ20年余り地震

波トモグラフィーと呼ばれる手法が盛んにとられてきた。先生のここ4、5年の研究でも主要な地位を占めてきた手法である。トモグラフィーの長所は、地球表面に設置された複数の地震計で地震波を捕捉し、獲得したデータを読み取ることで、岩石の性質の微妙な違いを測定することができる点である。

実測データから導き出される重要な情報に、震源からの伝播時間より割り出される地震波速度がある。他方理論でも、均質な岩石からなる地球を

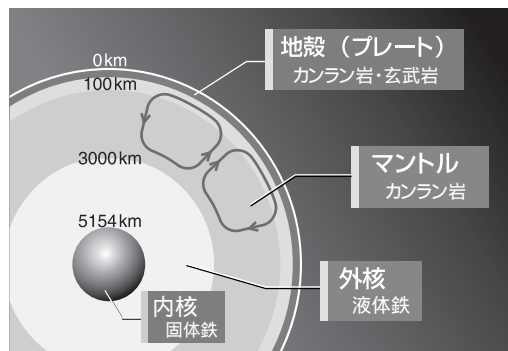


図1 地球内部の成層構造

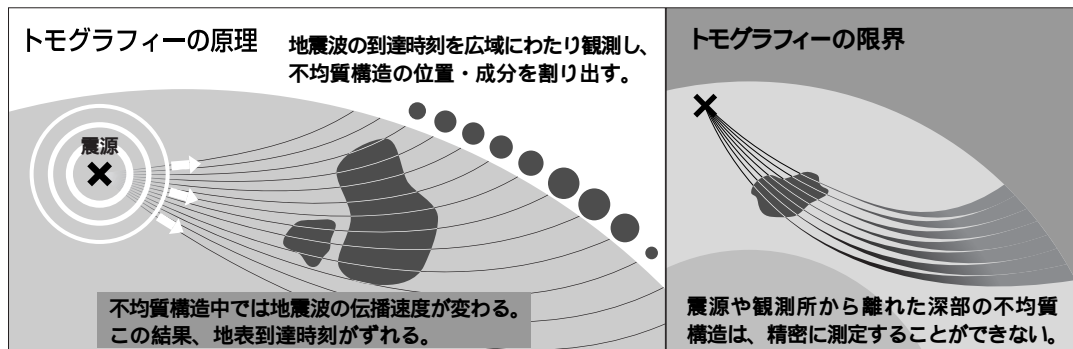


図2 地震波トモグラフィーの原理とその限界

想定し、マントル内の圧力、温度、密度などから、地震波速度は導き出されている。

トモグラフィーの解析では、地震波が通過してきた岩石の性質によって、その速度が異なることを利用し、地震波速度の理論値と実測値を比較し、この岩石の性質の違いをモデルに書き加えていく。そして、より多くのデータを説明しうるモデルを構築していく、というのがトモグラフィーの基本的な流れである(図2)。

地震波トモグラフィーを用いたモデルは金嶋先生をはじめ、世界のあらゆる研究者が数多く発表しているため、マントルの浅い部分ではかなり精密な内部構造のモデルが出来上がりつつある。しかし、金嶋先生はトモグラフィーを用いたモデルだけでは完全なマントル構造の解明には至らない

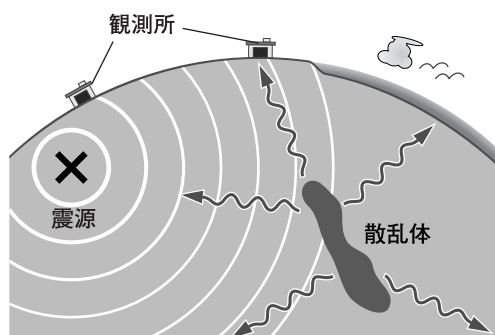
という。トモグラフィーで得られるデータには、地震波の通過した全経路の岩石の性質が反映されるため、震源や観測点に近い比較的浅い位置の観測であれば地震波経路は短く、情報は密になる。一方、マントルの深い位置での観測ではデータは長距離の性質を網羅的に反映するため、局所的な岩石の正確な形や大きさが特定しにくくなるという欠点があるのだ。

トモグラフィーは比較的浅い部分の広い領域の構造を効率良く決定するには非常に効果的だが、地球深部の微細構造の決定を可能にするには違った観点から研究を進めていく必要性があったのである。そこで金嶋先生はこの問題を解決すべく、地震波データ中の散乱波にその問題を解く鍵を求めたのだ。



散乱波より覗く新しい地球

地震が起こった時、縦波であるP波と横波であるS波が震源より発生する。しかし、地震計で測定されるものは震源から直接伝播する直達波ばかりではない。地震波形の中には数多くの散乱波が紛れ込むのである。地震波は伝播中に性質の異なる岩石に衝突すると、衝突面で再びP波とS波を生じさせ、あたかもそこに新たな震源が生じたかのように波が伝わっていくのだ。この新しい波が散乱波である(図3)。これらの散乱波の中で先生が着目したのはトモグラフィーでは捉えられないような微細構造による散乱波だ。散乱波は伝播してきた岩石と衝突した岩石の性質の差異のみによって波の性質が決定される。そのため地震波経路が長くなる深部の散乱体による波でも、鮮明に岩



異なる岩石に直達波が衝突すると、散乱波が発生する。衝突面で発生する散乱波の性質は岩石の差異で決まるため、深部の散乱体の位置や形状をも知ることができる。

図3 散乱波を利用した測定法

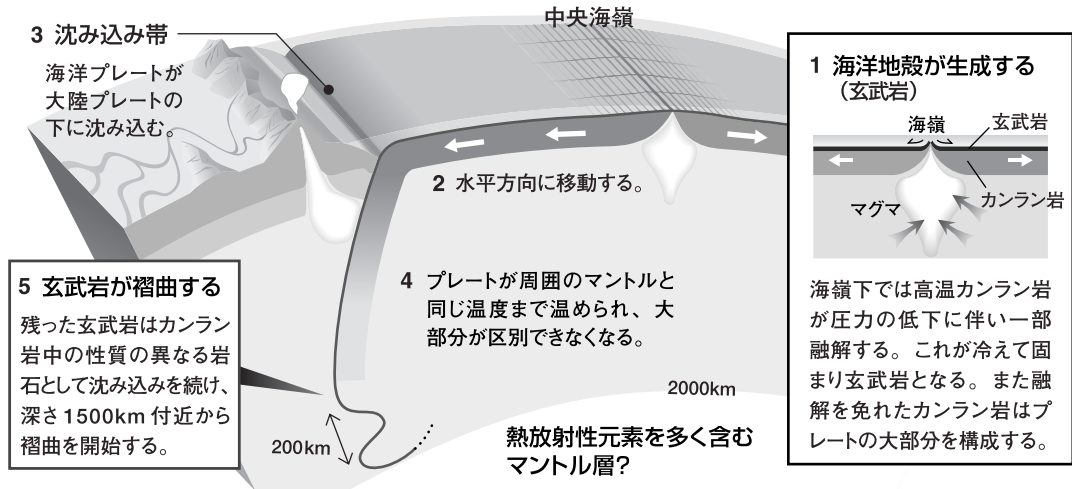


図4 海洋地殻玄武岩の行方に関する金嶋先生の仮説

石の詳細を伝えるのである。

先生はこの散乱波を発生させる散乱体の主要なものとして玄武岩を想定した(図4)。これは主要成分がカンラン岩からなるマントル中に、性質の異なる岩石として多く存在していながら、トモグラフィでは捉え難い岩石として知られていたからだ。

先生は散乱波を用いてこれらの微細構造を捉える研究に取りかかった。しかし、散乱波は直達波に比べて非常に小さく、地震の規模がかなり大きくなければ観測自体が難しい。また目標以外の散乱波や、P波とS波の干渉によって生じる表面波等の影響もあって、目標とする散乱波との識別は困難を極める。波形の中から適当な散乱波だけを取り出し、増幅させたのちに玄武岩の位置や深さを特定していくというのは非常に根気のいる作業であった。先生はこれらの障害を乗り越え、ようやくいくつかの玄武岩の発見に至ったのである。先生が散乱波を用いた測定を行っているのは今のところ環太平洋沿いのマントル層に限られ、数も限定的ではあるが、見つかった玄武岩には共通点が見られる。それは発見された玄武岩の層が全ておよそ1500kmの深さに集中しているということだ。またそれら玄武岩が200km程度の間隔をあけて点在するという傾向も見えてきているという。

では、なぜ1500kmほどのところに玄武岩の層が多く発見されるのか。先生は1500km付近に集中する玄武岩を合理的に説明するプレートの褶曲

という壮大な仮説を考案している(図4)。

マントルへのプレートの沈み込みは深部に行けば行くほど、抵抗が大きくなる。これは粘性流体に関する力学的考察からも推察できる。1500km付近で下降を続けたプレートが真っすぐに下降しなくなる。そしておよそ200km幅の周期を持つ褶曲がこの地点で起こる。これが先生の仮説の概要である。

そして先生は今回の玄武岩の発見から導かれた仮説は一つの新しい視点を与えられるとしている。それは最近学会で議論をよんでいるマントル内の層構造に関するモデルについてである。

マントル内の既に知られた層構造として660km付近の境界がある。これは主要成分であるカンラン岩の安定した結晶構造が、この付近の圧力温度を境に異なるからである。そのため境界の上部と下部では岩石の性質が大きく異なる。

このような境界の仮説として近年提唱されたのが、マントル層の2000km付近での、今まで議論されていなかった新しい境界の存在だ。

通常マントルは上部から下部まで構成成分が均一であるというのが一般的なモデルである。このモデルに対し、この仮説では2000km付近を境にこれより下層では熱放射性性元素や希ガスの元素が上層に比べて多量に含まれるとしている。今回の先生の1500km付近での玄武岩の発見はこの説を直接裏付けるものではない。しかし、2000km付近の境界の仮説と先生の仮説とを統合して考え、

新たな説として再度検証してみる。すると境界以下の熱放射性元素を多く含んだ層が、下降するプレートの侵入を防ぎ、1500km付近に玄武岩が集中することも容易に説明できる。先生はこのように考え、現在一定の研究成果として理論構築を進

めている(図4)。

確実なモデルを構築するにはまだまだサンプルの絶対量が少なく、これから散乱波を用いてモデル構築に十分な情報を得るのも同時に行っていきたいと先生は語ってくれた。



真の姿を求める旅路

金嶋先生が取り組んでいる課題はマントルを舞台にしたものに限らない。現在、マントルで成功を収めた散乱波を用いた解析方法を活かし、マントルと外核の境界、さらには外核と内核の境界の細かい構造の決定を行っている。

外核の主要成分は液体の鉄であることが分かっている。また微量な元素としてO、Si、Sなどの元素も含まれていると考えられているが、混ざっている元素の正確な種類や、それらが鉄とどのような元素配置をとっているのかということは未だによくわかっていない。

そのような中、外核の境界付近でも先ほど述べたマントル構造に関わる説のように、その元素分布に何らかのむらがあるとする説がある。これは核に比べて低い圧力、低い温度の下で液体の鉄は、質量の関係からOやSを多く含む上部の層と、含まない下部の層とに分離するという事実に基づく。このような分離が地球深部でも起こっていると仮定すると、マントルと外核の境界線付近の液体の鉄には、鉄に対し軽い元素である微量元素を多く含み、地震波の伝わり方の異なる層が測定できるはずである。先生はこの仮説の真偽を確かめるべく、散乱波を用い解析を進めた。結果として散乱波に期待されるような異常は発見されなかった。先生は現時点で外核内での元素分布にむらは無いと結論づけ、次のモデルづくりとその検証を続けている。

さらに、先生の研究は核内部にも向けられる。核内部は外核と内核に分かれ、内核は鉄の固体、外核は鉄の液体となっている。このため外核と内

核の境界面では鉄が凝固していく過程にある。その中で微量元素の多くは、水溶液が凝固していく時の溶質と同様に、内核に留まるのではなく、液体である外核へ浮上していく。先生の地震波による測定のターゲットは、この外核へ浮上する微量元素を多量に含んだ鉄の層である。

先生は現在この研究に踏み出したばかりであるが、このような微量元素の核内での挙動に関する研究を積み重ねていくことで、核内の微細構造のみならず、将来的には核内の物質循環の全貌に迫れるのだ。

地震波以外で地球内部の細かい構造を探れるような手段というのは考えにくく、地震波に頼らざるを得ない。しかし、本章で述べたような核付近の構造を探れるような地震波となると、地震波の中でもかなり強力なものでなければならない。微弱な地震波では地球内部を通過していく過程で消滅してしまうからである。このように地球の内部構造の判断材料自体、深くなれば深くなるほど資料不足だといえる。

現状を説明するモデルの作成、地震波観測による新情報の獲得、そしてさらにその新情報をも説明しうる修正モデルの作成という過程を経て、地道ながらもモデルは確実に書き加えられ進歩していく。そして先生はそこにこそ地球科学の面白さがあるのではないかという。「実験で確認できない地球科学など科学ではないという人もいます。けれど情報を集めてそこから自由に発想する。それが地球科学の思考方法なのです」。先生の真の地球の姿を追求する旅路はまだまだ続いていく。

地震波を駆使し、複雑な地球の内部を捉えようという金嶋先生の研究は非常に興味深く、また地球科学という分野の科学のあり方が、地球という非常に大きな謎を探求するにふさわしいものであ

るようにも思われました。

最後になりましたが、今回二度の取材に加え、度重なる訪問を快く迎えて下さった金嶋先生にお礼を申し上げます。(篠田 薫)