展望・解説

地震波による地球内部の可視化*

島 崎 邦 彦**

Visualization of Mantle Flow by Seismic Tomography

Kunihiko SHIMAZAKI

1. はじめに

地球の内部の構造は卵に例えられることが多い。殻にあたる地殻、白身のマントル、黄身の核(コア)とに分けることができる。地震学者はちょうど八百屋さんがスイカを叩いて熟れ具合を知るように、地球内部を伝わる地震波によって、地球の内部構造を調べている。地震計は、目でみることのできない地球内部を覗くための聴診器である。

地球内部の流れと言えば、地震や火山活動をもたらすマントルの流れ、マントル対流が最もよく知られている。マントルは地震波($10^2 \sim 10^{-4}$ Hz)の横波(S波)を通過させる固体でありながら、長期の力に対しては流体として振舞う。その運動速度はわずか数 ~ 10 cm/年にすぎない。この小文ではこのマントルの流れに話題を限って、その可視化の試みを概観する。

地震波によるマントル対流の可視化は、音響撮像技術¹⁾の一種と位置づけることができる。ただし、すでに述べたようにマントルの流れは、cm/年のオーダーの非常に遅い流れである。このため、トレーサーやドップラー効果を用いた手法は適用できない。現在最も多く用いられている手法は、温度による地震波の速度の変化を、TOF(Time of flight) トモグラフィーの手法を応用して撮像し、温度分布から流れを推定する方法である。温度変化は、地震波の減衰をも変えるの

で、トモグラフィーによって、減衰の分布を撮像する方法もある。より直接的に、流れによって結晶の軸が揃うために生じる、地震波速度の異方性をとらえて、対流のパターンを可視化する方法もある。

2. 地球表面でみるマントルの流れ

地殻・マントル・核の区分は構成物質の違いによっている。力学的に区分すれば、地球の最上部は、岩石圏と呼ばれ、地殻とマントルの最上部とからなる。岩石圏は、十数個のプレート(板)と呼ばれる、一体として運動する部分にわかれている。すなわち、地球表面は、あたかも敷石を敷き詰めたように、十数枚のプレートによって覆われている。それぞれのプレートは、その下の变形しやすい層の上をゆっくりと運動している。すでに述べたようにその速度は、年間数 cm のオーダーである。

プレートは一体となって地球表面を移動する。プレートとプレートの境界では、プレート間の相対運動の結果、ずれを生じ地震が発生する。プレートとプレートとが離れていく境界では、地球内部から熱い物質が上昇し、新しいプレートがつくられる。プレートとプレートとが集まる境界では、一方のプレートが他のプレートの下へ沈み込む。この沈み込み口が海溝にあたる。これらの境界では、火山活動も活発である。一方、プレートの内部ではほとんど変形がなく、地震活動は低い。

プレートテクトニクスは、従来の古地磁気学、

*原稿受付 1989年2月27日

**東京大学地震研究所

地震学、構造地質学などの成果を統合して、これらのプレートの運動を定量化することに成功した。日本周辺を例にとれば、千島・日本・伊豆・小笠原海溝は、太平洋プレートの沈み込み口に当たる。太平洋プレートは、日本列島に対して、西から10-20度北の方向に、約10cm/年の速度で運動している。また、相模・駿河・南海トラフは、フィリピン海プレートの沈み込み口で、このプレートは日本に対して、西から30-40度北の方向に、約3-4cm/年の速度で運動している。

このような地表のプレートの動きは、当然マンツル内の流れを反映しているに違いない。そこで、簡単な仮定を基にプレートの動きから、マンツル内の流れを推定することができる。すなわち、観測されているプレートの運動を境界条件として与えて、内部での粘性流体運動を計算する試みがなされている。図1上段には、このようにして求められたマンツル内深さ260kmの流れのパターンを示す。ここでプレートは、粘性率 10^{25} ポアズの粘性流体、その下には 10^{19} ポアズの粘性の低い薄い層があると仮定されている。

3. トモグラフィーでみる沈み込むプレート

図1 マンツル内の水平流のパターン。上段^{a)}：地表におけるプレートの運動に基づいて推定された、深さ260kmにおける水平流。下段^{b)}：周期200秒（深さ約200-400kmに対応）のレイリー波の速度異方性から求めたマンツルの水平流

沈み込むプレートは、周囲のマンツルより温度が低いいため、地震波速度が数%速いだけでなく、減衰も少ない。日本周辺で起こる深い地震の震動は、減衰の小さなプレートを通過して地表に達した場合のみ強いので、プレートの沈み込み口に近い太平洋側だけで、地震の震動が感じられることがある。

このような特徴を利用して、地震の震度分布をトモグラフィーのデータに用い、減衰構造を求め

図2 地震の震度から求められた関東地方の地震波減衰構造^{a)}。Hは減衰の小さい低温部分、Lは減衰の大きな高温部分を示す

た例を図2に示す。震度の精度が低いため、解像度は低いが、相模トラフから関東平野の下に沈み込んでいる、フィリピン海プレートの様子をみることができる。沈み込んだプレートは、周囲に比べ温度が低く、減衰も小さい（図でHで示されている）。特に、深さ90-120kmの結果から、沈み込んだフィリピン海プレートの北端が、赤城山（黒三角）付近まで到達していることがわかる。この他、深さ30-60kmの伊豆大島付近で、減衰が大きく（図中L）、高温部の存在が示唆される。富士山（黒三角）直下では、深さ60-90kmに高温部が存在する。

4. 地震波から求めたマンツルの速度分布

すでに述べたように、TOF トモグラフィの手法を応用した地震波速度分布の推定が、現在最も多く用いられている。温度変化による数%程度の速度変化を求め、これから流れのパターンを推定する。地震波には、P波（縦波）・S波（横波）のように地球内部を3次的に伝播する実体波の他に、地球表面に沿って2次的に伝播する表面波がある。表面波は周期によって地球内部への浸透度が異なり、分散を起こす。このため、異なる周期の群速度・位相速度から、地球の構造を求めることができる。

図3の中段には、表面波から求めた上部マンツル（深さ670kmまで）のS波速度構造が示されている。実際の解析には、地震の波形が直接使われており、理論波形が観測と合うように、位相速度の変化が求められている。

図3の下段は、TOF トモグラフィによって求められた、下部マンツルのP波速度構造である。下部マンツルを通過するP波などの実体波の波線は、上部マンツルではほぼ垂直なため、深さ方向の解像度が低い。このため下部マンツルの構造のみが求められている。また、中段の図では、用いた表面波の周期の制約から、上部マンツルのみが示されている。速度変化（不均質性）は、上部マンツルの方が大きい。このため、中段と下段の図では異なるスケールが使われていることに注意していただきたい。

図3の中段に示された上部マンツルの構造は、プレートテクトニクスから予想されるマンツルの流れとよく一致している。上段の地図には、プレートの境界が示されている。東（南）太平洋のプレートの境界は、プレートが離れていく境界で、ここではマンツル内から熱い物質が上昇して、新しいプレートがつくられる。中段の図には、この温度の高い物質（地震波速度が遅く、図では白く表されている）が、マンツル内から湧き上がって

図3 地球の輪切り断面における地震波速度構造⁹⁾。陰が濃いほど高速度を示す。輪切りの位置は、上段地図の中央の線によって示されている。中段は、その輪切りの部分の深さ0-670kmにおける横波（S波）速度を示す。速度の平均値からのずれが%（上段の表示-3.5%および+3.5%）で表示してある。下段は、深さ670-2891kmにおける縦波（P波）速度の平均値からのずれ。その振幅は、下段の表示（-0.75%および+0.75%）で示されている

くる様子が見える。同様に、太西洋にも、プレートの分離境界が認められる。これは、ヨーロッパ・アフリカ大陸と南北アメリカ大陸とを分離させた流れの湧き出し口である。

東(南)太平洋で新しくつくられたプレートは、太平洋を北西に移動する間に、地表で冷やされ、その厚さを増す。日本に向かって、陰の濃い部分(地震波速度が速く、温度が低い)が、厚みを増す様子が図からよくわかる。解像度が十分ではないために見にくい、日本海溝から沈み込むプレートの様子も認められる。

5. 地震波速度の異方性からみたマンツルの流れ

マンツルの主要鉱物と考えられるかんらん石の結晶軸が、流れの方向にそろうことが野外調査から知られている。結晶軸のa軸はほぼ流れの方向を向き、a軸とc軸が流れの面内に、b軸が流れの面と垂直になる。a軸に沿って伝播する波の速度が最も速く、c軸、b軸の順に遅くなる。実際にマンツル最上部を通過した縦波(P波)の速度には、異方性が認められ、プレートの運動方向に沿った方向の速度が最大となることが測定されている。また、マンツル上部の速度を地球全体で平均すると、水平方向に伝播する波の速度の方が、垂直に伝播する波より速い。これは、マンツル上部では、水平流が垂直流より卓越していることを示すものと思われる。

図1下段は、表面波(レイリー波)の水平伝播速度の異方性から、マンツルの流れのパターンを求めたものである。数パーセントの速度異方性が認められ、そのパターンは、プレートの運動から予想されたもの(図上段)とはほぼ一致している。

6. おわりに

この小文では、地震波を用いたトモグラフィーの例をごく簡単に示した。波源はいずれも自然の地震であり、その分布は限られている。観測点も

現在は、陸上に限られており、地震計の性能にも制約がある。そのため、解像度・信頼度など不十分な点も多い。地球内部構造の研究の現状は、理論・解析が先行し、観測データの制約が限界となっている。

最近、高性能の地震計が製作されるようになり、地震観測面での飛躍的な進歩が期待できるようになった。世界各国ではこの高性能地震計による新しい観測網の設立を進めており、各国のデータ交換による地球観測網が計画されている。日本の地震学関係者は東アジア・西太平洋地域を覆うPOSEIDON 観測網(Pacific Orient SEismic Digital Observation Network)の計画を立案し、その推進に努めている。地球内部を覗くことのできる高性能の望遠鏡-高性能地震観測網は、地震・火山現象などの基本的な理解に重要な貢献をすることが期待されている。

この小文では、話をマンツル内の流れに絞ったが、さらに深部の核(コア)内の流れを可視化する試みがある。核内の流れは、地球の磁場を形成するものであり、地球磁場の変化や、さらには、地球磁場の逆転の解明など、多くの謎の解明に興味深い問題を提起している。

参 考 文 献

- 1) 田村安孝: 音による撮像技術, 流れの可視化, 8, 418-424, 1988.
- 2) Hager, B. H. and R. J. O'Connell: Kinematic models of large-scale flow in the earth's mantle, *J. Geophys. Res.*, 84, 1031-1048, 1979.
- 3) Hashida, T., and K. Shimazaki, Seismic tomography: 3-D image of upper mantle attenuation beneath the Kanto district, Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 75, 403-409, 1985.
- 4) Woodhouse, J. H., and A. M. Dziewonski: Mapping the upper mantle: three dimensional modeling of earth structure by inversion of seismic waveforms, *J. Geophys. Res.*, 89, 5953-5986, 1984.
- 5) Tanimoto, T., and D. L. Anderson: Mapping convection in the mantle, *Geophys. Res. Lett.*, 11, 287-290, 1984.