

## グローバル地震学 - 見えてきた

### 地球中心核の不均質構造

川勝 均

地震波の解析から地球内部の 3 次元の構造を推定する種々の手法を「地震波トモグラフィー」と総称する。地球の岩石層であるマントルの構造は、近年の地震波トモグラフィー研究の進展によりかなり詳しくわかってきた感があり、マントルのダイナミクス・進化の議論に強い制約を与えるに至っている<sup>1)</sup>。一方、マントルのさらに下の地球中心核（流体鉄を主成分とする外核とそれが固化して出来た内核に分かれる）については、固体部分の内核を通過する S 波（横波）の明瞭な確認すら未だなされていない状況で、その 3 次元構造の詳細を議論するような段階には至っていない。しかしながら内核にはどうも西半球と東半球で大規模な構造の違いがあり、その原因がマントルの構造の反映である可能性も示唆されるなど、内核の構造研究は最近注目を集めている。

#### 内核の異方性・差分回転<sup>2)</sup>

地球中心核のうち、マントルに接している外核（半径約 1220-3480km）は、主成分である流体鉄の粘性が水と同程度でさらさら流れてしまうので、地震学的観測にかかるような水平方向の不均質構造は見つからないであろうと一般的に考えられている。したがって地震波トモグラフィーの対象はもっぱらその下の内核である。内核は地球が冷えるにつれて外核の流体鉄が凍って出来上がってき

ると考えられている。その生成・成長が地球磁場を作るエネルギー源になっているとも考えられており、内核のダイナミクスを理解することは、磁場の起源まで含めた地球科学の第一級の問題である。

先にも述べたように、固体である内核を通過する S 波の構造は長周期の地球の固有振動から決めた平均的なものを除いて殆どわかっていない。一方、縦波である P 波の構造については、内核を通過する波（PKIKP 波と呼ばれる）が明瞭に観測されることから、内核特有の構造が臆気ながら見えてきた。その第一は、内核を極方向（南北方向）に通過する地震波は、赤道方向（東西方向）を通過するものより数%早く到着するという観測事実による。方向によって地震波の伝播速度が異なるとき、媒質は“異方的”であるという。マントルの最上部や最下部などでは、マントル対流に起因すると考えられる地震波の異方性が観測されている。これはマントルを構成するかんらん石が流動変形する際に、結晶の並び方に方向性が出るからである。しかしマントル内では、極方向・赤道方向といったような大規模な異方性は観測されていない。内核を通過する地震波は必ずマントルも通過するのでその影響を考慮する必要はあるが、PKIKP 波にみられる異方性は、内核が地球の自転軸にほぼ平行な軸対称な異方性を持つことことの証拠と考えられているのである。内核の軸対称な異方性の原因に関しては、幾つかの興味深い説が提出されているが今のところ決着は付いていない<sup>3)</sup>。しかしながら地球の回転により外核内に回転軸対称な対流運動が起こり、直接的・間接的に内核内の構造に影響を与えているのであろうことは想像に難くない。

さて、このように内核に構造が見え

始めてくると、流体鉄の外核の中に浮いている内核（マントルが外核の上に浮いているのかも知れないが）は、本当にマントルと一緒に回っているのかを検証しようという研究が現れた。地球磁場の生成起源を検証する地球ダイナモのシミュレーションからは、外核との電磁氣的結合により、内核はマントルより少し速く回転する（内核の差分回転）可能性が示唆されている。その場合、もし内核が球対称でないならば、マントルから見て内核の不均質構造の相対的位置が時間と共に変わるはずである。それを地震波でとらえるには、時を隔ててほぼ同じ場所で起こる複数の地震を同一の場所で観測し、地震波の到達時間の時間変化（質の良い地震データのそろそろ過去 30 年間での）を検出すればよい（図 1）。当初一年間に約  $1^\circ$  速く回っているという報告が出たが、最近の研究では年  $0.2 \sim 0.6^\circ$  の範囲でということ議論が続いている。

### 内核の東半球・西半球

内核の差分回転の有無を厳密に議論するためにも、より詳細な内核の不均質構造を知る必要がある。そのような中、内核には東西の半球で大規模な速度の不均質が存在することが、日本の研究者によって明らかにされた<sup>4)</sup>。上に述べたように、内核には回転軸にほぼ対称な異方性が存在するが、その強さは深さにより異なることが知られている。田中らは内核の表層 100km-400km の構造は東半球と西半球で異なり、地震波の異方性は西半球にしか存在しないこと、東西方向の地震波の伝播速度は東半球が西半球に比べて 0.9% 程度速いことを示した（図 2, 3）。またその後の研究により、東西の違いは最表層 100km にも存在することが

わかった。内核は地球の冷却と共に少しずつ成長していると考えられている。内核の最表層に大規模な不均質が存在するという観測事実は、東西半球の違いの成因は内核を作る過程の中で「現在」起きているプロセスを反映している可能性を示唆する<sup>5)</sup>。

ではどのようなプロセスが東西半球の違いを作れるのだろうか？半球の水槽を高速で回転させ、外核内の流体運動を再現したとする興味深い室内実験がある<sup>6)</sup>。これによると外核の外側（マントルの底）の境界（核 マントル境界, CMB）の温度構造が一様な場合、外核内の流れはこれといった特徴的な構造を持たないが、CMB に温度の不均質が存在する場合（例えば西太平洋下の CMB に観測されている地震波の高速度帯<sup>1)</sup>を低温領域と考える）、そこからの低温の下降流が安定的にできあがり、前線によって外核内が温かい領域と冷たい領域に分けられるという。この低温の下降流の内核境界（ICB）での行き先は CMB 低温部の裏側あたりで、丁度内核の西半球に対応するように見える（図 4）。冷たい ICB の上では、内核は早く成長し地震波の低速度を説明できるという。実際の CMB の不均質構造はもっと複雑なので、この実験の結果がそのまま地球中心核の流れを表しているかはわからないが、マントルの構造が内核の構造に影響を与えるといった意味で興味深い。さらにもしこのモデルが内核の東西半球の構造を説明するならば、内核の差分回転はないことが予想される。なぜなら、仮に現在議論されているような差分回転があれば内核は 1000 年程度でマントルに対して一周してしまうことになり、内核の成長は非常にゆっくりと起こるので、構造の異なる東・西半球を 100km 以上の厚さで作るよ

うな余裕はないからである。

以上最近の内核の構造に関する研究を概観したが、内核のダイナミクスを理解するには、地震学的観測からの制約条件を増やすと共に、高圧物性実験・磁場ダイナモのシミュレーションなど総合的な研究が必要である。まだまだ謎は多く、しばらくの間ホットな話題を提供し続けるであろう。

- 1) 川勝均編：「地球ダイナミクスとトモグラフィー」, 朝倉書店, 219pp (2002).
- 2) K. C. Creager: *Inner core anisotropy and rotation*, in *Earth's Deep Interior*, Geophysical Monograph 117, 89, American Geophysical Union (2000)
- 3) 唐戸俊一郎：「レオロジーと地球科学」第6章, 東京大学出版会, 153-176 (2000).
- 4) S. Tanaka and H. Hamaguchi: *Degree one heterogeneity and hemispherical variation of anisotropy in the inner core from PKP(BC)-PKP(DF) times*, *J. Geophys. Res.*, 102, 2925 (1997).
- 5) F.-L. Niu and L.-X. Wen: *Hemispherical variations in seismic velocity at the top of the Earth's inner core*, *Nature*, 410, 1081 (2001).
- 6) I. Sumita and P. Olson: *A laboratory model for convection in Earth's core driven by a thermally heterogeneous mantle*, *Science*, 286, 1547 (1999).

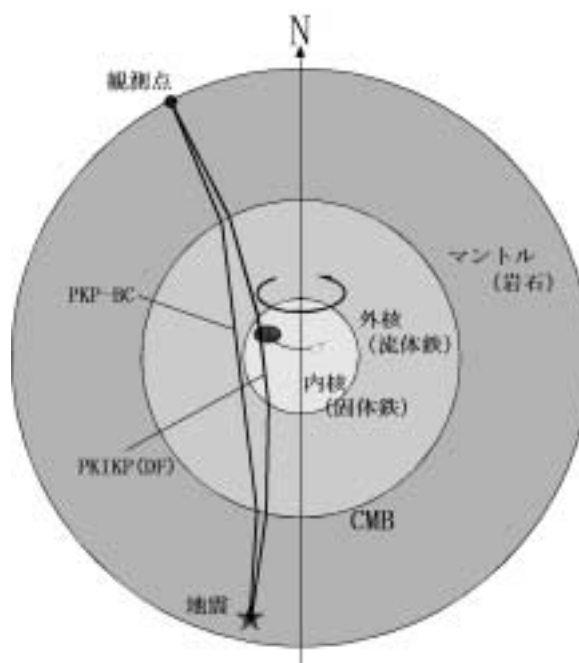


図1．地球の構造と内核の差分回転．内核の異方性の軸の向きが地球の回転軸と少しずれていたり、内核に水平方向の不均質構造がある場合、もし内核がマンテルと違う速さで回転（差分回転）していると、マンテルから見て内核が時間と共に動いていくのが見える（地震波で）は

ずである。

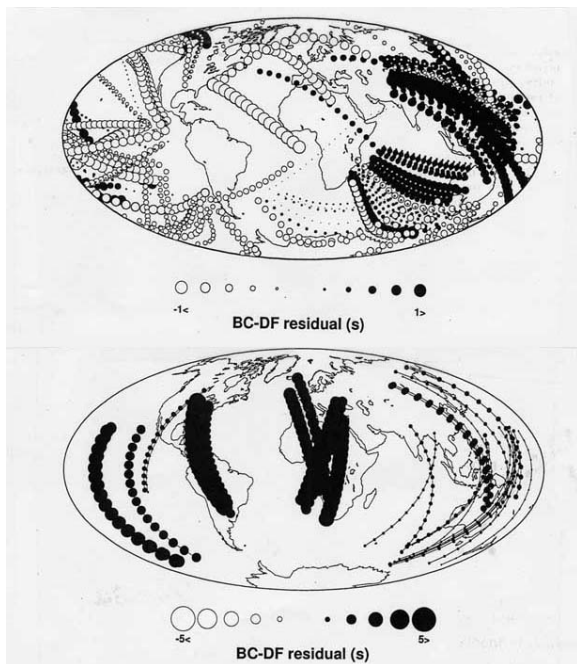


図2 . 内核を通過する地震波の伝播時間と経路<sup>4)</sup>. 黒(白)丸は速く(遅く)到着する経路を示す. 丸の大きさは標準モデルからのずれの大きさ. 東西方向(上)と南北方向(下)に分けて示している. およそ東経40°付近で東西にパターンが分かれる.

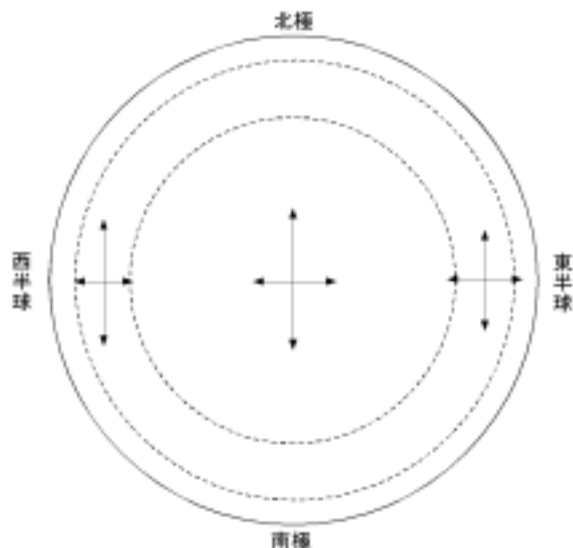


図3 . 内核の地震波速度の模式図. 矢印の長さは, 速度の大きさを模式的に表している. 点線は内核表層の100 kmと400 kmの深さを示す.

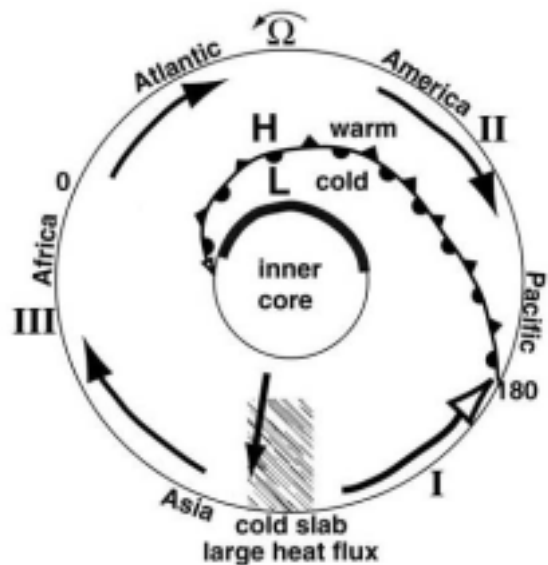


図4 . マントルの不均質によりできる外核の高気圧・低気圧. 外核内の流れを模擬した室内実験の結果をまとめた模式図<sup>6)</sup>. 地球中心核を赤道面で切って, 北極から見たもの(数字は経度). CMBの低温帯(影の部分)により, 黒(白)矢印に沿った暖流(寒流)が作られる. 内核境界の黒い部分で内核の成長が早まる.