

内核 (G) 上部の準半球構造

大滝 壽樹¹⁾

1. はじめに

地球の中の深いところがどうなっているかについて、これまでGSJ地質ニュースで二回紹介してきました(大滝, 2017, 2020)。このうち前回は、外核の底近く(第1図のF層; Bullen, 1942)では同じ深さであっても場所によって地震の波がすすむ速さが違う、という話をしました。この速さの違いは、その場の元素の割合が違うためだと私たちは考えています。では、なぜ割合が場所によって違うのでしょうか? これはまだよくわからないのですが、外核の下にある内核(G層)にヒントがあるように思います。

というのも、内核のもっとも浅い部分、つまり外核と接する付近には内核全体を大きく二つに分けるような準半球型の不均質がある、といわれているからです(田中, 2018)(第2図)。準半球とよぶのは、球面を正確に二つに分けたのではないからです。二つに分けたうち図で色が塗ってある方を「(準)東半球」、もう一方を「(準)西半球」とよびます。「東半球」のほうが小さく、「西半球」の半分ぐらいの大きさです。以下では、この二つを簡単に「東」、「西」と書くことにします。「東」は東南アジアを中心とする地域で、「西」はそれ以外です。「東」では「西」より地震波が速くすすむことが特徴です。この違いは、東西で内核の成長スピードが違

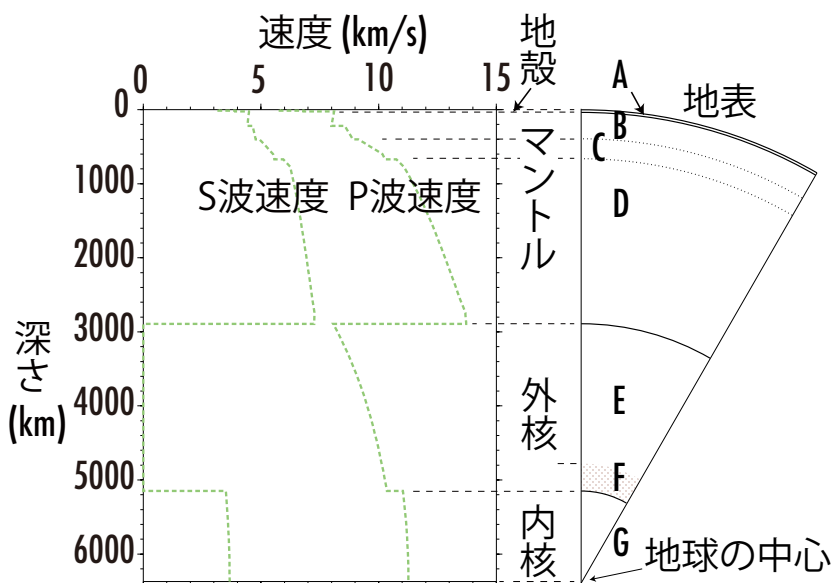
うことによるのではないかと考えられていますが、それほど確かなわけではありません。今のところほかの説明が出されていないといったほうがいいでしょう。内核は外核の液体がその表面で固まって成長していきます。地球はすこしずつ冷えていて、内核もすこしずつ大きくなっているのですが(たとえば吉田, 2018)、この成長の仕方はどこでも同じではなく、場所によって違うのではないかと考えられているのです。

今回は、まず内核の構造をざっと見たあとで、この内核上部の東西構造を示し、最後に私たちの最近の研究結果(Ohtaki *et al.*, 2012, 2021)について紹介します。

2. 内核のあらまし

デンマークのInge Lehmannによって外核の下に内核が見つかったのは1936年のことです(Lehmann, 1936; Bolt, 1987)。地殻・マントル・外核だけ考えていると波がこないはずの距離・時間にP波が到着していることを説明するために、内核が必要となりました。

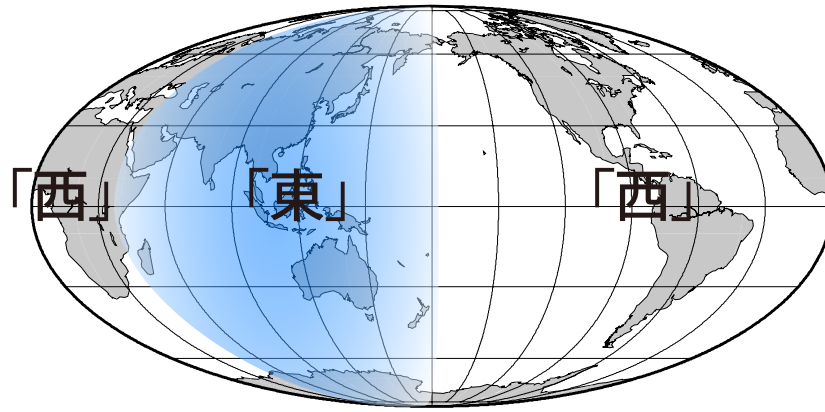
この内核は地球の一番真ん中にある固体です(第1図)。その外側にある液体の外核と同じく、主な成分は鉄でニッケルも5%ぐらい含まれています(たとえば境, 2018)。そ



第1図 標準的なモデルとして今でも使われているPREM (Dziewonski and Anderson, 1981)の地球のなかの地震波の速さ(あるいは地震波速度)。縦軸は地球の表面からの深さを、横軸はP波(縦波)速度とS波(横波)速度の大きさを示す。図の上ほど浅い。図の右に、マントル、外核、内核と、Bullen (1940, 1942)が命名したA, B, C, D, E, F, G各層の位置を示した。速度モデルが当時のものとは違うため、A~Gの深さの範囲も当時とはすこし変えている(大滝(2020)第1図を転載)。

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門

キーワード: 地球, 地震波速度, 内核, 準半球構造, 不均質, 目玉形異常



第2図 内核上部の「準東半球」(または「東」と「準西半球」(または「西」)のおおよその場所を地表に投影して示した。

の半径は 1,200 km ほどです。外核の半径が 3,500 km ほどですから、その 1/3 くらいになります。温度は内核の表面でだいたい 5,000 ~ 6,500 K くらいと考えられています(市川・土屋, 2018)。大谷(2018)は、内核表面の温度を 5,500 K と推定しています。ここで“K(ケルビン)”は温度の単位で、絶対温度を意味します。

内核の密度(単位体積あたりの質量)はその表面で 12.8 g/cm³, 地球の中心で 13.1 g/cm³ くらいとされています(Dziewonski and Anderson, 1981)。この密度は純鉄の密度より 5% ほど軽いので、軽元素がその分入っていると考えられています。どの軽元素が入っているかはいま調べられているところですが、候補としてケイ素、硫黄、酸素、炭素、水素が挙げられています(市川・土屋, 2018; 大谷, 2018)。なお、ニッケルは鉄と同じくらいの密度なので、ニッケルが 5% ほど入っていても軽元素量の見積もりはあまり変わりません。外核の密度は純鉄より 10% ほど小さく、内核よりもさらに差が大きいので、外核のほうが内核よりも軽元素をたくさん含んでいることになります。これは、外核の液体が内核表面で固まるときに、余分な軽元素が外核に追い出されるということです。この放出された軽元素が外核の流体運動、ダイナモ作用の主な動力源です(高橋, 2005)。密度は地震波の速さに比べて決めにくいのですが、最近、Dziewonski and Anderson (1981) のモデル(PREM)より 1 ~ 2% ほど小さい内核密度が報告されています(Robson and Romanowicz, 2019)。

3. 内核の東西構造

内核の表層付近にある「東」、「西」の境は、低緯度から中緯度ではだいたい決まっています。その位置は、一本がだいたい東経 40° ~ 60°, もう一本が東経 180° ~ 西経 160°

くらいにあります(Ohtaki *et al.*, 2021)。この間の、東南アジアを含んだところが内核の「東」になります(第2図)。「東」は「西」に比べて地震波がすすむ速さが内核表面で 1% くらい速いことが知られています(田中, 2018)。「東」と「西」、それぞれの領域のなかでは地震波の速さはだいたい同じで、境のところで急に変わるようです(Waszek and Deuss, 2011)。「東」と「西」の間のこの違いは深くなると小さくなりますが、だいたい内核の表面から深さ 400 km ほどまで続いているようです(Tanaka, 2012)。この他、内核では、波のすすむ向きによって地震波の速さが違い、おおよそ南北の方向へはそれと直交する方向より波が速くすすむことが知られています。これを速さの異方性と呼びますが(田中, 2018)。異方性は西半球で強いと考えられていますが(たとえば Tanaka and Hamaguchi, 1997)、他の異方性モデルも提出されています。今までのモデルのまとめは Tkalcic (2017) Figure 4.3 をご覧ください。

このように内核の細かな構造の話をするときには、二つの地震波が観測点についた時間の差をとって調べることが重要になります(大滝, 2017)。内核を調べるときは、内核までもぐる波と、その上の外核までしかとおらない波の時間差を用います。内核をとおる波(PKIKP)は、地震から観測点までの角距離(地球の中心からみた角度)で 120° ぐらいから地球の反対側(180°)まで見えます。一方、外核までの波(PKPbc やその延長に現れる PKPc-diff)は、見える角距離の範囲が内核をとおる波より狭くなります(第3図)。震源からの距離によって PKIKP がどの深さまでもぐるかが決まりますから、内核のなかで調べられる深さは外核の波がみえる距離の範囲でおおよそ決まってしまう。外核下部をとおる波(PKPbc)が見えて、時間差を測るのに使えるのは、外核の底を伝う波(PKPc-diff)も合わせても、震源から角距離でお

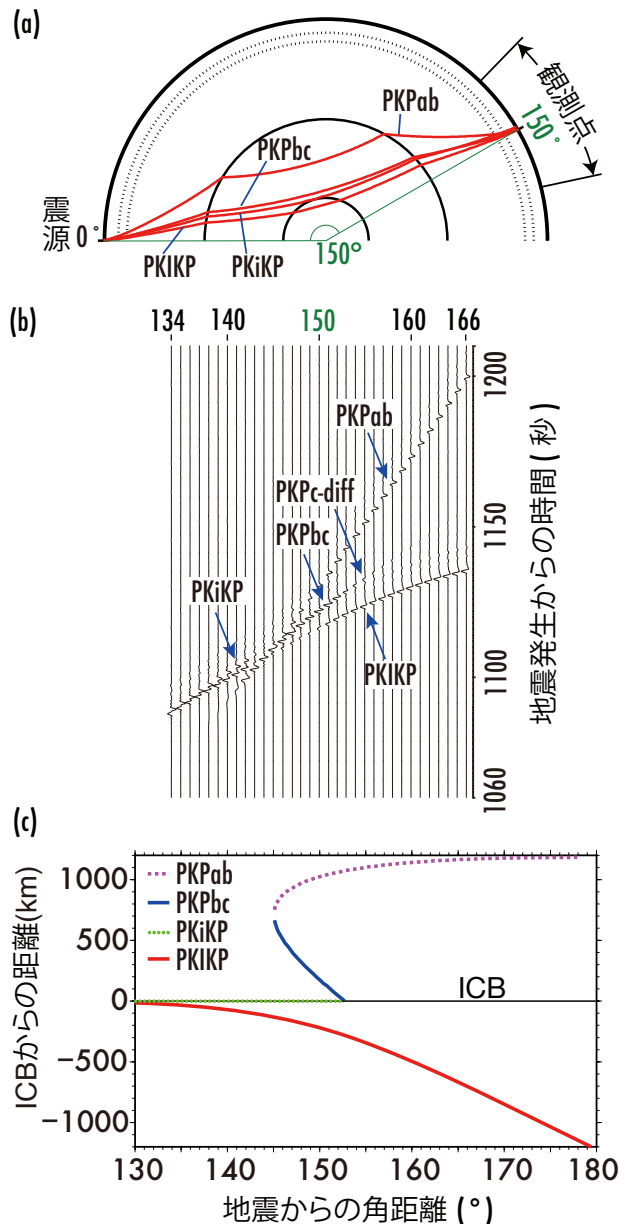
よそ $146^{\circ} \sim 160^{\circ}$ くらい離れたところだけです。これより近いと PKPbc と PKIKP の分離が難しくなります。遠いと外核底をとる波が小さくてほとんど見えなくなります。この PKPbc と PKIKP のペアだと、内核表面の下 100 km ぐらいから調べられます。深いほうは深さ 500 km ほどまでです (Tanaka, 2012)。これより浅いところ、内核表面から深さ 100 km ぐらいまでは、外核-内核境界で反射する波 (PKiKP) と PKIKP のペアを使います (たとえば Waszek and Deuss, 2011)。一方、深さ 400 km より深いところは、PKIKP と外核上部で向きをかえて地表にもどる波 (PKPab) (第 3 図) のペアを使うことになります。ただし、この三番目のペアは、波同士がだいぶ離れているため、マンツルの影響が時間差に残ることが指摘されています (たとえば Song and Helmberger, 1993)。このため、深いところの探査には、むしろ PKIKP を単独で使ったりします (最近の例は Stephenson *et al.*, 2021)。

4. 南極と北極の下の内核

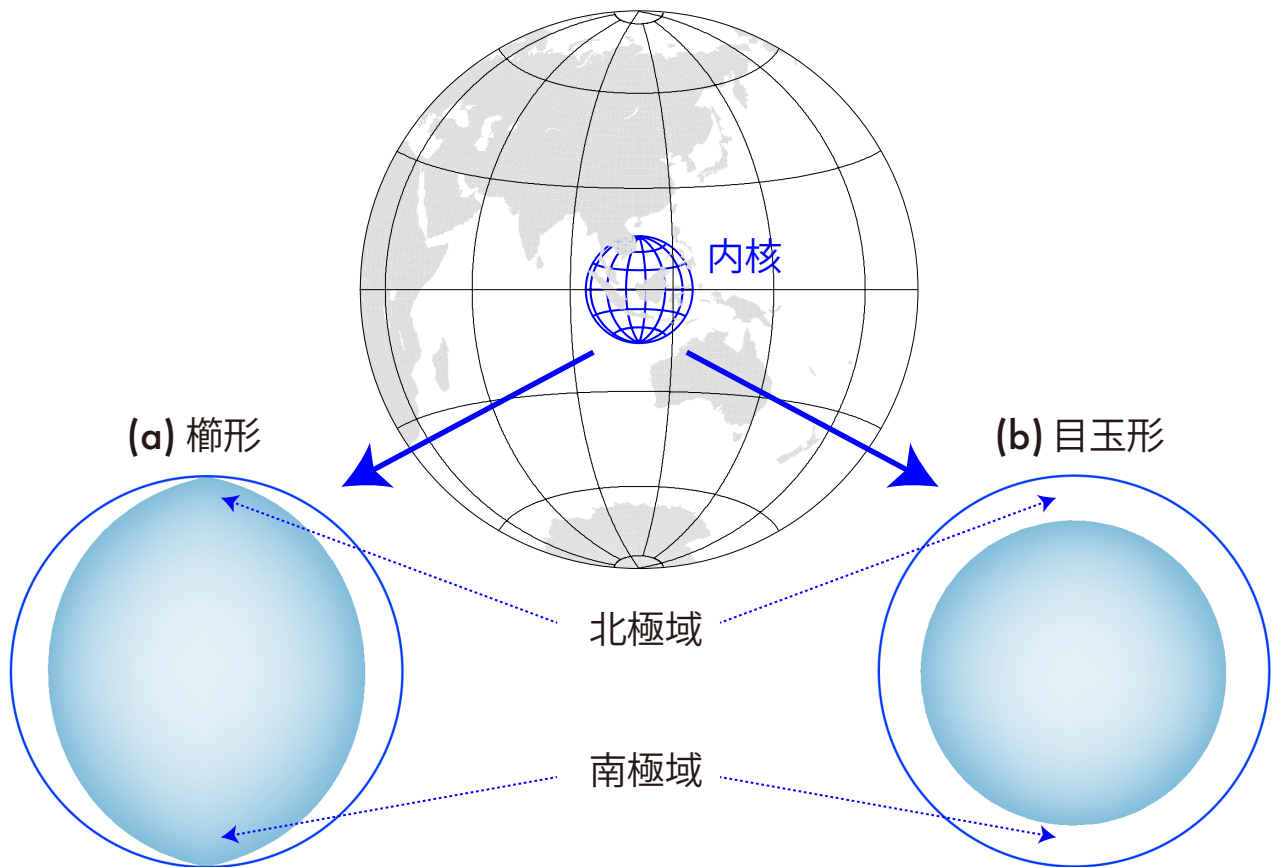
この内核の準半球構造、つまり「東」と「西」の成因として、考えられているモデルは二つあります。そのうち一つが内核の水平移動で、もう一つが外核の対流の場所による違いです。前者は、外核のなかで内核が自転軸とは垂直の方向を「西」から「東」へ移動するというモデルです (Alboussière *et al.*, 2010; Monnereau *et al.*, 2010)。移動した先では内核表面が地球の中心から遠ざかり圧力が減るため融けてしまい、移動する元では逆に液体が固まっています。後者は、外核内の冷たい下降流が内核表面の「東」の赤道域の上で強く、そこで固化が進んでいるというモデルです (たとえば吉田・隅田, 2001; Aubert *et al.*, 2008)。前者のモデルは赤道を中心とした同心円状の構造の異常を示します。一方、後者は赤道域を中心とした異常を示すでしょう。つまり、どちらのモデルでも極域には大きな異常は現れないと予測されます。

これにたいし、地震学の結果は北極から南極まで「東」と「西」の違いが続いていてちょうどスイッチを切ったような楕円形を考えることがほとんどです (第 4 図 a)。両極付近には「東西」の違いが現れない目玉形の「東」(第 4 図 b) を持つ内核のモデルは Tanaka and Hamaguchi (1997) など数例に止まります (Ohtaki *et al.*, 2021)。楕円形だとすると、先に述べた二種類の内核異常の成因モデルでは説明がつかないこととなります。しかし、本当に楕円形なのでしょうか？

内核の「東」が、楕円形なのか、目玉形なのか、を決める鍵は北極と南極という二つの極域にあります (第 4 図)。極



第 3 図 (a) 核のなかをとる地震波線。地震波の波長が十分短いとき、地震 (震源) から観測地点まで波が伝わる様子を、あたかもその波が曲線状の経路をたどって進むかのように表すことができる。この曲線あるいは経路を (地震) 波線とよぶ。距離 150° には、ここで示した 4 つの P 波がほぼ同じ時刻に到着する。(b) 核のなかをつたわってきた地震波形の計算例。PREM の浅部を簡略化したモデルで計算した。横軸は地震からの角距離 ($^{\circ}$)、縦軸は地震発生からの時間。左ほど地震に近く、下ほど時間が早い。図の左から右にいくつ波のつらなりが見える。これが核をとってきた波である。この図では、波形ごとに波の振幅の最大の大きさを同じにしてある。その結果、 $143^{\circ} \sim 150^{\circ}$ あたりでは PKPbc の振幅が大きいため PKIKP の振幅がみかけ上小さくなっている。 145° より近くで PKPab の延長に見えるのは PKPb-diff という回折波、 152° より遠くで PKPbc の延長に見えるのは PKPc-diff という回折波である。(c) 核をとる波の最深点を内核の境界 (inner core boundary; ICB) からの高さ (深さ) で示した。負の値は境界より深いことを示す。横軸は地震からの角距離。(a)、(b) は大滝 (2017) 第 3 図を一部改変し転載した。



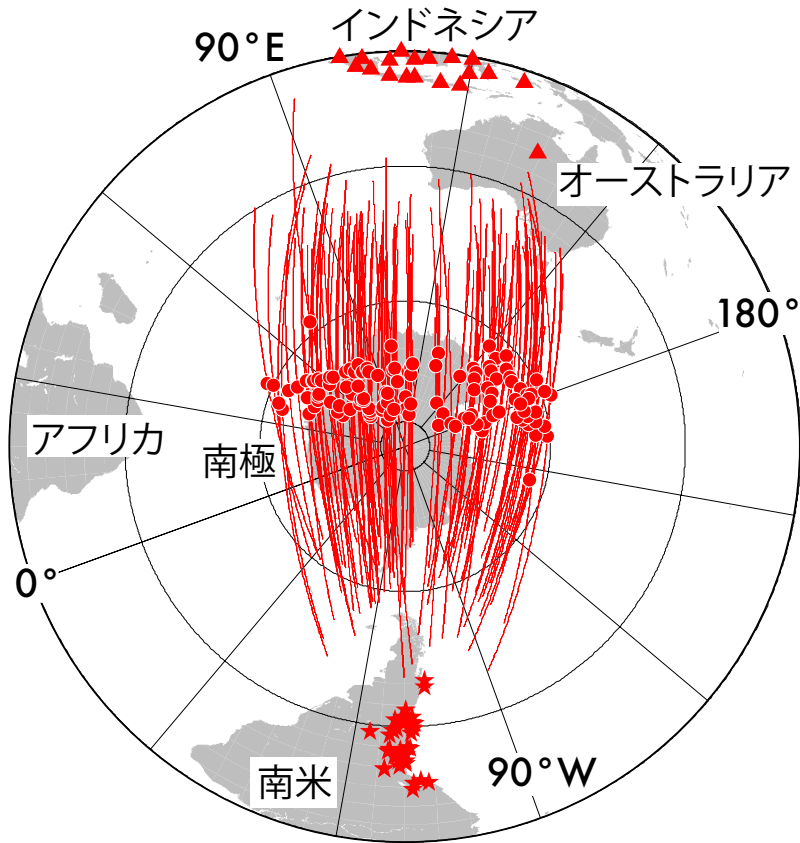
第4図 地球のなかで占める内核の大きさと、その上部にある不均質の形。(a) 橢球形と (b) 目玉形、二つのモデルが提出されている (Ohtaki *et al.*, 2021)。

域、とくに「東」の極域はほとんど調べられていませんでした。極域で内核をとおる波がほとんど観測されていなかったのです。地震がおこる場所がほぼ決まっています、観測点の場所も偏っているためです。

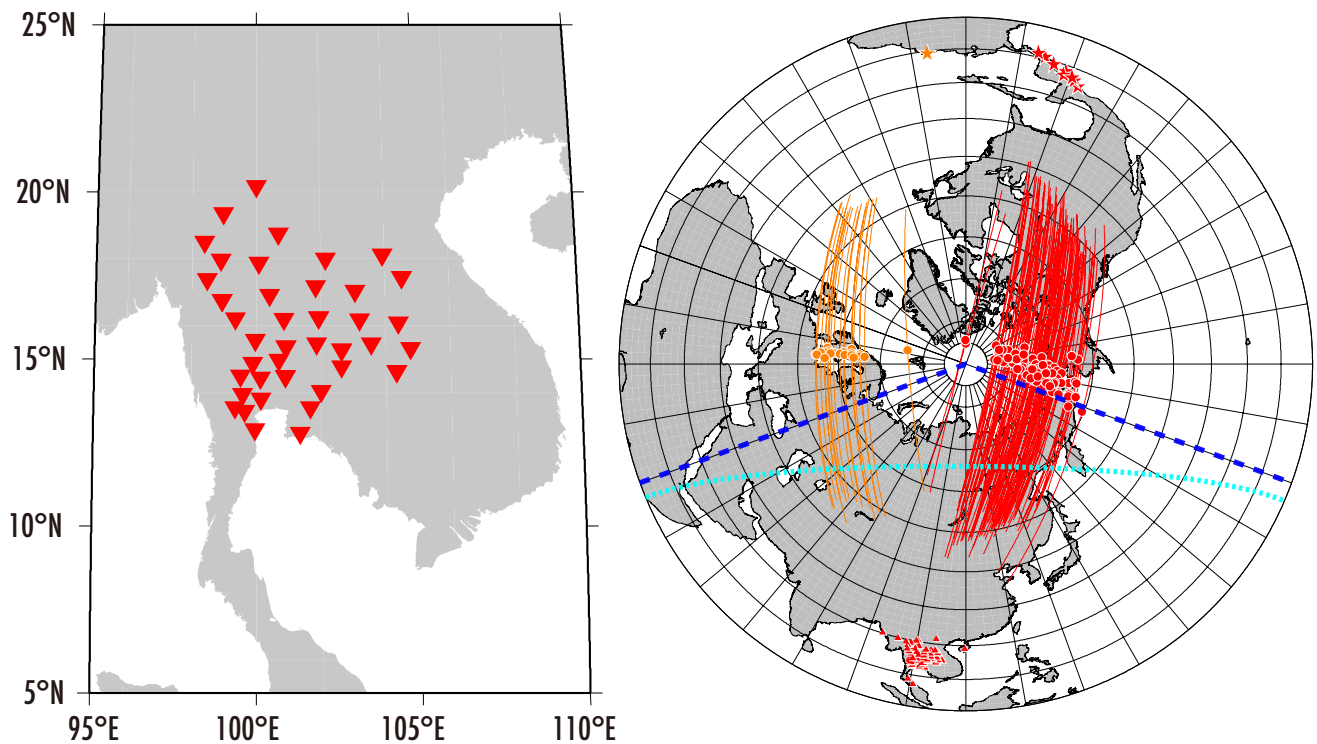
内核の極域のうち、南極域については、私たちがインドネシアに20年ほど前につくった地震観測網(大滝ほか, 2000)で初めてくわしく調べることができました (Ohtaki *et al.*, 2012) (第5図)。私たちは、まず、外核下部をとおる波 (PKPbc) と内核をとおる波 (PKIKP) の振幅の大きさの比を使い、内核内での波の減衰の大きさと外核底の地震波の速さを順に求めました。次に、外核-内核境界で反射する波 (PKiKP) と PKIKP の時間差を使って内核の表面近くの速さを決め、最後に PKPbc と PKIKP の時間差を測って内核上部での波の速さを見積もりました。その結果は、内核の南極域は地震波のすすむ速さが遅い「西」タイプであることを示しています。この研究では、後から決める構造が先に決める構造に影響しないように注意して順をおって決めています。そのため、地震波の速さはよく決まっていると考えています。

その一方で、「東」の北極域は調べられていないままでしたが、最近、タイに観測網が設置されたことがこの状況を変えました (Tanaka *et al.*, 2019)。タイのほぼ全域に2016年から2019年にかけて設置されたこの観測網は、中央アメリカと北極域をはさんで向かいあっている上、中央アメリカからの距離も内核の北極域を調べるのにちょうどよいのです (第6図)。TSAR という名前のこの観測網で記録された中米の地震の波形を調べた Ohtaki *et al.* (2021) では、PKPbc と PKIKP の時間差を観測値として使い、初めて北極域の内核構造を調べることができました。ただ残念ながら、記録には PKiKP を見つけることができませんでした。また PKPbc と PKIKP の振幅の比のばらつきも大きくて、信頼できる結果はえられませんでした。

TSAR の観測値は PREM のような全球モデルより明らかに小さな時間差を持っていて、今までの「西」の速さモデルとよく合います。また、「西」とされているところをとおった他の波の観測値ともよく合います。つまり、北極域の内核も南極域と同じく「西」的、上部が遅いということです。ということは、内核の「東」は第4図bのような極域までカ



第5図 内核の南極域をとる波線 (Ohtaki *et al.*, 2012). 赤線が、波線が内核のなかをとっている部分を示す。波線は深さ 5,000 km ほどをとっているのだが、その場所を同じ緯度経度の地表に投影して示している。波線のなかほどの赤丸は波線が一番深いところをとっている場所である。



第6図 (左) タイに数年間設置された地震観測網 TSAR (Tanaka *et al.*, 2019) と (右) その観測網で捉えられた地震の波線 (Ohtaki *et al.*, 2021). 内核の北極域とその周辺をとっている。右図の赤線・オレンジ線は、波線が内核のなかをとっている部分を示す。波線のなかほどの赤 (オレンジ) 丸は波線が一番深いところをとっている場所である。第4図に示した楕形と目玉形内核東西構造の境界線を青破線と水色点線として載せた。図の上にある星が解析に使った地震を、下の三角が観測点を示している。右図で三角は TSAR 観測点の外側にもあるが、これは IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology, <http://ds.iris.edu/>) からデータが公開されている点である。これらの点も合わせて解析に使ったため、波線には合わせて示してある。右図は Ohtaki *et al.* (2021) より転載した。

バーしていない目玉形をしているということになります。この形なら、先ほど紹介した二つの「東西」差成因モデルとうまく合います。

さらに、私たちの結果は今回調べた波線が内核をとおったところ全体が西半球的であったほうが、今までの「東」「西」二つの速さモデルと合うことを示しています。これは、「東」がすこし南北につぶれた目玉形をしていることを示唆し、外核の対流に起因すると考える説に有利な結果のようにも思います。私たちの研究の他にも内核不均質の成因として外核対流起因説を支持する結果もあります(たとえば Attanayake *et al.*, 2014; Ritterbex and Tsuchiya, 2020)。

地球の磁場は外核の対流が作っていると考えられています。しかし、外核の対流を直接見ることはできませんし、外核深部の対流にいたってはそれを間接的に推定するための観測すらありませんでした。

その対流の重要な駆動力となっているのが内核表面で外核に放り出される軽元素です。大滝 (2017, 2020) で紹介した外核底の地震波の速さの不均質は、この放出された軽元素の濃度がオーストラリアの下の方で北東太平洋の下より高くなっていることを示していました。今回紹介した Ohtaki *et al.* (2021) の結果は、軽元素の放出はオーストラリア下を含む内核の「東」の表面で起こっている可能性を示しているのかもしれませんが。このように、ここ 10 年ほど外核の底や内核の表層付近を集中的に調べてきた我々の研究はすこしずつ結びついて、内核がどのように成長し、外核はどのように対流して磁場を作っているのかが、より明らかになってきているように感じています。

5. おわりに

「ゲゲゲの鬼太郎」(水木しげる)に出てくる「目玉親父」を思い浮かべてください。茶碗のお風呂に入っているシーンがありましたよね。私は、あの姿に内核のイメージが重なります。茶碗の直径は目玉の三倍くらいです。茶碗が固体であるマンツルの底で、そのなかのお湯が外核で、その温度は四~五百度くらい。その真ん中でお湯につかっている親父さん(の目玉)が内核になります。黒目の部分が地震波の速くすすむところで、白目が遅くすすむところです。黒目の向いている先には東南アジアがあります。

謝辞: 描図は GMT (Wessel and Smith, 1998)、波線計算は TauP Toolkit (Crotwell *et al.*, 1999)、波形計算は DSM (Direct Solution Method) (Takeuchi *et al.*, 1996) で行いま

した。ここで紹介した内核の北極の研究には JSPS 科研費 JP15H05832 を使用しました。タイでの地震観測網もこの科研費で設置されたものです。観測網の設置、維持管理に関わった方々に深く感謝します。また、ここで紹介した研究の共同研究者の皆さまにも深く感謝します。とくに金嶋 聡氏(九州大学)からは本稿についても有益なコメントを多くいただきました。ここに記して感謝します。

文 献

- Alboussière, T., Deguen, R. and Melzani, M. (2010) Melting-induced stratification above the Earth's inner core due to convective translation. *Nature*, **466**, 744-747. doi:10.1038/nature09257
- Attanayake, J., Cormier, V. F. and de Silva, S. M. (2014) Uppermost inner core seismic structure - new insights from body waveform inversion. *Earth and Planetary Science Letters*, **385**, 49-58. doi:10.1016/j.epsl.2013.10.025
- Aubert, J., Amit, H., Hulot, G. and Olson, P. (2008) Thermochemical flows couple the Earth's inner core growth to mantle heterogeneity. *Nature*, **454**, 758-761. doi:10.1038/nature07109
- Bolt, B. A. (1987) 50 years of studies on the inner core. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, **68**, 73-81. doi:10.1029/EO068i006p00073-01
- Bullen, K. E. (1940) The problem of the Earth's density variation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **30**, 235-250.
- Bullen, K. E. (1942) The density variation of the Earth's central core. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **32**, 19-29.
- Crotwell, H. P., Owens, T. J. and Ritsema, J. (1999) The TauP toolkit: Flexible seismic travel-time and ray-path utilities. *Seismological Research Letters*, **70**, 154-160. doi:10.1785/gssrl.70.2.154
- Dziewonski, A. M. and Anderson, D. L. (1981) Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **25**, 297-356. doi:10.1016/0031-9201(81)90046-7
- 市川浩樹・土屋卓久 (2018) 外核の化学組成. 地学雑誌, **127**, 631-646. doi:10.5026/jgeography.127.631
- Lehmann, I. (1936) *P'. Publications du Bureau central sismologique international, Série A*, **14**.

- Monnereau, M., Calvet, M., Margerin, L. and Souriau A. (2010) Lopsided growth of Earth's inner core. *Science*, **328**, 1014–1017. doi:10.1126/science.1186212
- 大滝壽樹 (2017) 外核の底を探る. *GSJ 地質ニュース*, **6**, 332–337.
- 大滝壽樹 (2020) 外核底 (F) の不均質. *GSJ 地質ニュース*, **9**, 3–7.
- 大滝壽樹・神定健二・金嶋 聡・西村太志・石原 靖・吉田康宏・原田智史・神谷真一郎・SUNARJO (2000) インドネシアにおける広帯域地震観測網 JISNET. *地質調査所月報*, **51**, 189–203.
- Ohtaki, T., Kaneshima, S. and Kanjo, K. (2012) Seismic structure near the inner core boundary in the south polar region. *Journal of Geophysical Research*, **117**, B03312. doi:10.1029/2011JB008717
- Ohtaki, T., Tanaka, S., Kaneshima, S., Siripunvaraporn, W., Boonchaisuk, S., Noisagool, S., Kawai, K., Kim, T., Suzuki, Y., Ishihara, Y., Miyakawa, K. and Takeuchi, N. (2021) Seismic velocity structure of the upper inner core in the north polar region. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **311**, 106636. doi:10.1016/j.pepi.2020.106636
- 大谷栄治 (2018) 地球内部の物質科学. 現代地球科学入門シリーズ 13, 共立出版, 東京, 180p.
- Ritterbex, S. and Tsuchiya, T. (2020) Viscosity of hcp iron at Earth's inner core conditions from density functional theory. *Scientific Reports*, **10**, 6311. doi:10.1038/s41598-020-63166-6 (日本語解説は https://research.ehime-u.ac.jp/ja/environment_geoscience/20200414-01.html, 閲覧日: 2021年10月22日)
- Robson, A. J. S. and Romanowicz, B. (2019) New normal mode constraints on bulk inner core velocities and density. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **295**, 106310. doi:10.1016/j.pepi.2019.106310
- 境 敦 (2018) 核の物質科学. 図説 地球科学の事典, 鳥海光弘編, 朝倉書店, 東京, 66–67.
- Song, X. and Helmberger, D.V. (1993) Effect of velocity structure in D" on PKP phases. *Geophysical Research Letters*, **20**, 285–288. doi:10.1029/92GL02614
- Stephenson, J., Tkalčić, H. and Sambridge, M. (2021) Evidence for the innermost inner core: Robust parameter search for radially varying anisotropy using the neighborhood algorithm. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, **126**, e2020JB020545. doi:10.1029/2020JB020545
- 高橋 太 (2005) 地球惑星ダイナモシミュレーションの新たな発展. *地学雑誌*, **114**, 123–131.
- Takeuchi, N., Geller, R. J. and Cummins, P. R. (1996) Highly accurate P-SV complete synthetic seismograms using modified DSM operators. *Geophysical Research Letters*, **23**, 1175–1178. doi:10.1029/96GL00973
- Tanaka, S. (2012) Depth extent of hemispherical inner core from PKP(DF) and PKP(Cdiff) for equatorial paths. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **210–211**, 50–62. doi:10.1016/j.pepi.2012.08.001
- 田中 総 (2018) 内核. 図説 地球科学の事典, 鳥海光弘編, 朝倉書店, 東京, 186–187.
- Tanaka, S. and Hamaguchi, H. (1997) Degree one heterogeneity and hemispherical variation of anisotropy in the inner core from PKP(BC)–PKP(DF) times. *Journal of Geophysical Research*, **102(B2)**, 2925–2938. doi:10.1029/96JB03187
- Tanaka, S., Siripunvaraporn, W., Boonchaisuk, S., Noisagool, S., Kim, T., Kawai, K., Suzuki, Y., Ishihara, Y., Iritani, R., Miyakawa, K., Takeuchi, N. and Kawakatsu, H. (2019) Thai Seismic Array (TSAR) Project. 東京大学地震研究所彙報, **94**, 1–11.
- Tkalčić, H. (2017) *The Earth's Inner Core: Revealed by Observational Seismology*. Cambridge University Press, UK, 234p
- Waszek, L. and Deuss, A. (2011) Distinct layering in the hemispherical seismic velocity structure of Earth's upper inner core. *Journal of Geophysical Research*, **116**, B12313. doi:10.1029/2011JB008650
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998) New, improved version of generic mapping tools released. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, **79**, 579. doi:10.1029/98E000426
- 吉田茂生 (2018) 核の進化と地球磁場変動. 図説 地球科学の事典, 鳥海光弘編, 朝倉書店, 東京, 48–49.
- 吉田茂生・隅田育郎 (2001) 解説: 内核の異方性と差動回転が意味するもの. 社団法人日本地震学会ニュースレター, **13**, no. 2, July 10, 45–49.

OHTAKI Toshiki (2021) Eyeball anomaly of the Earth's upper inner core.

(受付: 2021年12月10日)