

外核底 (F) の不均質

大滝 壽樹¹⁾

1. 初めに

2017年に「外核の底を探る」と題して、地球の外核底を地震波がすすむ速さをもとめる方法についてGSJ地質ニュースに書きました(大滝, 2017). 今回は, その方法を使って求めた速さ(Ohtaki and Kaneshima, 2015; Ohtaki *et al.*, 2018)について紹介します.

外核の底を, 古くは「F」とよびました. Bullenが1940年に, 地表から順にA(地殻), B(深さ400kmほどまでの上部マントル), C(その下のマントル遷移層), D(下部マントル)とアルファベットをふりました(Bullen, 1940)(第1図). そして1942年に外核にE, 外核の底にF, 内核にGとふったのです(Bullen, 1942). 今, マントルの底が「D」とよばれていますが, これもこの記法によるもので, 下部マントルを二つに分けたうちの深いほうをさします. このように外核の底を独立させたのは, そのすこし前にでたJeffreys(1939)の地震波速度モデルにもとづきます. 内核の発見(Lehmann, 1936)のすぐ後のことです. このモデルにはP波(縦波)速度のととても遅い層が外核の底の100kmほどにあります(遅い層ができたわけやその速度, その後のモデルの変化は, 大滝・金嶋(2018)にすこし書きました). この低速度層はその後のモデルには見られませんが, 以下ではBullenにならって外核の底近くのおよそ300kmほどをF層とよびます.

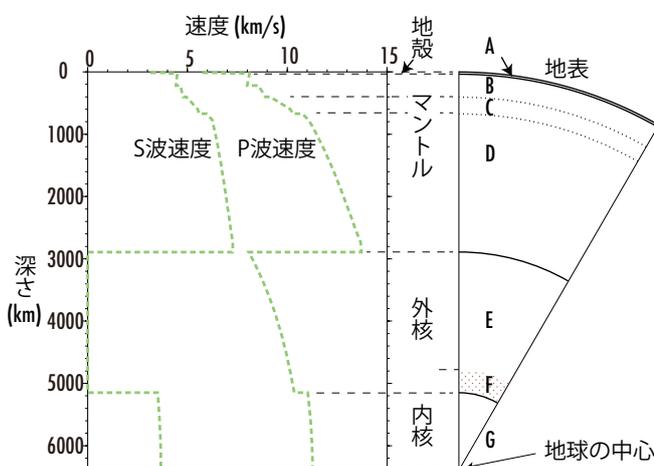
我々の結果は——あとでくわしく説明しますが——北東

太平洋の下とオーストラリアの下とで外核の底近く(F層)のおよそ300kmほどを地震波がすすむ速さが違う, オーストラリア下のほうがちょっと速くて, すこしへんな形をしているのを見つけたというものです(第2図c). オーストラリア下のこの速度の形はもっと浅いところからは予想できません. なにか変わったことが起きていることを示しています. 速度の違いは最大で0.4%(0.04 km/s)ほどのわずかな差です. しかし, 私たちはこの差がたしかにあると考えています. 深さは同じでも場所によって外核を地震波がすすむ速さ(以下, 簡単に速度とよびます)が違うというのは, とても不思議なことです. 外核の中の速度は, 深さが同じであればそこに含まれている元素の割合でまず決まります. であれば, 速度の違いは元素の割合が違うということですが, それなら, 密度も違うはずですが. 実際, オーストラリアの下に軽いものが溜まっていると考えたほうがよさそうです. しかし, 外核は液体でとても流れやすいため, 同じ深さのところを比べると密度はほとんど同じとなるはずなのです.

外核の底, Fでなにが起きているのか, なぜ軽い液体が底近くにたまってられるのかはまだよく分かりません. それに, 私たちが調べられたのもまだF層全体の中で限られた場所だけです. ですので, 今回は不思議なことを見つけた, というところまでです. では, 順をおってお話しします.

2. 外核底を地震波がすすむ速さが違う

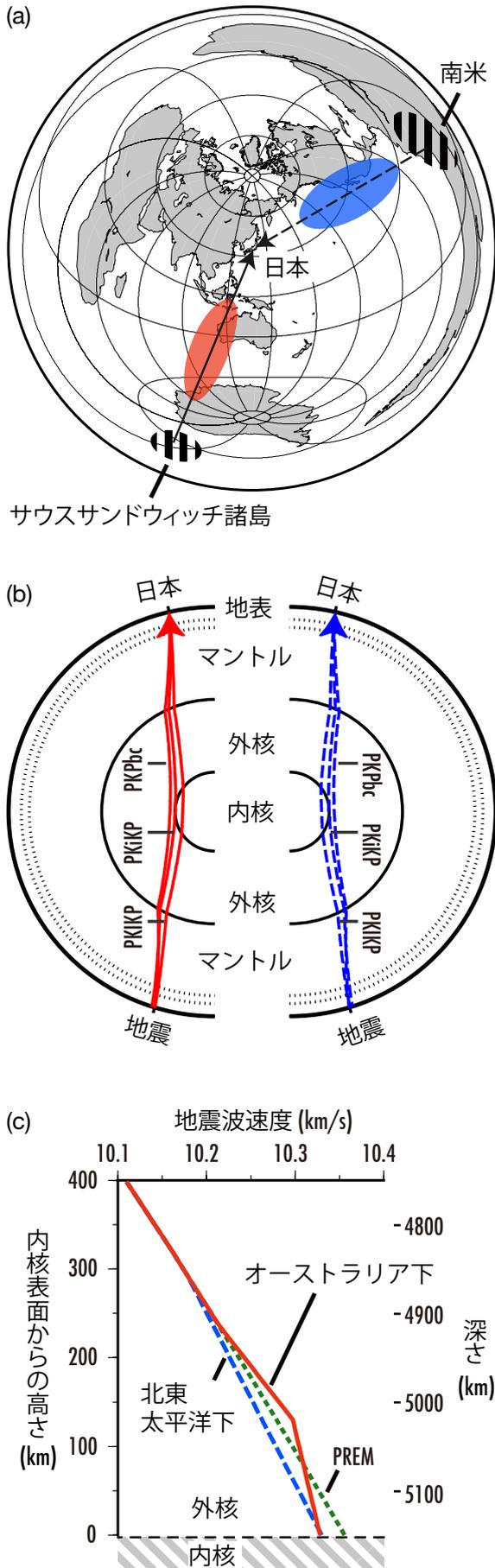
地震波を使って外核の底近く(F層)を調べるためには, そこをうまくとおる波を選ばなくてはなりません. そのような波は, 地球の中心からみて震源から150°くらいはなれた, 地球の反対側に近いところで地球の表面に



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)の地球のなかの速度. 縦軸は地球の表面からの深さを, 横軸はP波速度とS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.

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: 地震波速度, 外核, F層, 不均質, 化学組成



届きます(第2図b)。その波を日本にあるHi-net(汐見ほか, 2009)という地震観測網でとらえることにしましょう。この観測網は観測点の間隔が狭くて数も多いため、今回の観測には一番使いやすいのです。そうすると、この観測に使える地震も限られてきます。日本から150°ぐらい離れていて、観測網まで十分な大きさの波を届かせられるような地震は、南米大陸の下とその南にあるサウスサンドウィッチ諸島だけにしかありません(第2図a)。このとき、地震波はともに地球の中心近く、外核底(F層)や内核まで潜ってから日本に着きます(第2図b)。このうち、図にPKPbcと書いてある波がF層を長くとおってくる波で、今回、中心的な役割をはたしました。南米からきたPKPbc波は、北東太平洋下でF層をとおります。サウスサンドウィッチ諸島からの波は、オーストラリア下です。

前回説明したように(大滝, 2017)、F層の地震波速度をうまく求めるために私たちは観測された波で時間差を二種類測っています。まず、外核底で反射する波(PKiKP, 第2図b)とその上をかすめる波(PKPbc)が観測点につく時間の差です。つぎに、かすめる波が観測点につく時間が周波数によってすこし違うことを使います。私たちは、この波と内核をとる波(PKiKP)の時間差を二つの周波数帯で測ってその差をとりました。その結果、南米から日本に届いた波とサウスサンドウィッチ諸島から届いた波とで、この二種類の時間差どちらにも違いがありました(Ohtaki *et al.*, 2018)。この二種類の時間差の違いはどちらも、北東太平洋下とオーストラリア下でF層の速度に違いがあること(第2図a)を示しています。

北東太平洋下では、一つめの時間差は、代表的なモデルであるPREM(第1図, Dziewonski and Anderson, 1981)の速度よりF層がすこし遅いことを示しています。

第2図 (a) 日本を中心とした正距方位図(中心から地図上の各点への方位と距離が正しくあらわされた図)。この図では、中心と地球上のほかの点とを結ぶ最短距離が直線であらわされる。南米でおきた地震がおこした波は日本との中間にあたる北東太平洋下のF層(外核の底近く)を、サウスサンドウィッチ諸島の地震からの波はオーストラリア下のF層をサンプリングする。私たちが解析に使った地震の場所を斜線で、波がF層をとった場所を青と赤の楕円で示した。(b) 解析に使ったF層をとる3つの波線。外側から順にPKPbc, PKiKP, PKiKPとよばれる。左右の図は同じ波をあらわしているが、二つの地域で起きた別の地震からの波だということを示すために別の図とした。図ではこの三つの波がとおる場所はほとんど変わらないように見える。これが、PKPbcとPKiKPが、そしてPKiKPとPKiKPが観測点についた時刻の引き算をする嬉しいことの原因である。(c) 解析の結果、北東太平洋下とオーストラリア下で外核の底の速度が違うという結果がえられた(Ohtaki *et al.*, 2018)。図には第1図に載せた標準的地球モデルPREMもあわせて示した。縦軸には、内核の表面からの高さを図の左に、地表からの深さを右に示した。図の上ほど浅い。

二つめの時間差は、外核の底近くでは深くなるにつれ速度が PREM よりゆっくり上がることを示しています。この二つをともに満足するようなモデルは、速度が PREM よりすこし遅くてゆるやかに変化するというものです(第2図c)。一方、オーストラリアの下では、一つめの時間差は F 層の平均速度が PREM とほぼ同じだと言っています。しかし、二つめの時間差は、外核の底で PREM や北東太平洋下よりもっとゆっくり速度が上がると言っています。この二つを同時に満足するモデルは、第2図cに示したようなものしかありません。このモデルは、外核と内核の境界のすぐ上では、北東太平洋下と同じくらいの速度をもっているのですが、そこからあまり下がらず、100 km ほど上で PREM より速くなります。さらに上に(浅く)なると、速度は PREM より急速に下がり、境界から 250 km ほど上で PREM と同じになります。なお、モデルを作るときに北東太平洋下では外核最下部に層を一つ、オーストラリア下は層を二つおきました。そして、層の中では速度の傾きは深さによって変わらないとして決めています。オーストラリア下のモデルには急な折れまがりが見えますが、これはこのためです。

このような外核底付近の速度不均質については、以前にも Souriau (2015), Yu *et al.* (2005) がより広い範囲のデータを使って求めています。今回の結果は狭い範囲での結果ですが、底付近の速度やその勾配がより正確にもとまる方法を使って決めている点の特徴です。

3. 速度を化学組成に翻訳する

外核底を地震波がすすむ速さが場所によって違う、というのが前章の結論でした。では、どうして速度が違うのでしょうか？

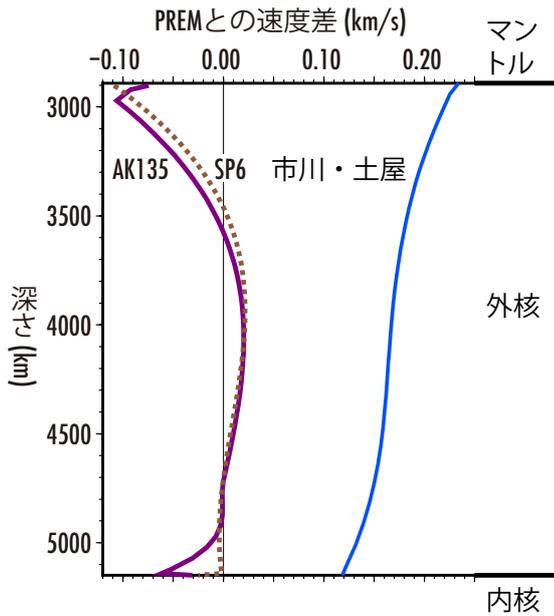
速度の違いに入る前に外核と内核について簡単に説明します。外核は、地殻やマントルの下、内核の上にあります(第1図)。外核は液体で、内核は固体です。その境は地表から深さ 5,150 km ほどにあります。外核・内核ともに鉄がその重さのほとんどを占めますが、ニッケルやもっと軽い元素も含まれていると考えられています。外核に含まれている軽い元素がなにかはいま盛んに調べられていますが、だいたい酸素・硅素・硫黄・炭素・水素の五つに絞られるようです(大谷, 2018)。内核と外核の密度の違いから、この軽い元素は内核より外核に豊富に含まれていると考えられています。外核が液体である、ということは、外核の中をすすむ横波(S波)が見つからないことや潮汐などの観測から分かります(Bolt, 1982)。

地震波のすすむ速さに話を戻しましょう。外核では温度が変わっても地震波の速度はほとんど変わらず、鉄やニッケルのなかに軽い元素がどれだけ入っているかによって変化します(市川・土屋, 2018)。逆に言えば、同じ深さで速度が違ってれば、それは組成の違い——どの元素がどのくらい含まれているか——を意味します。軽い元素が増えるほど、地震波は速くすすみます。ここ数年で、外核の地震波の速度を化学組成に翻訳することができるようになってきました。その一つの例が、市川・土屋(2018)です。彼らは、地震学のモデルである PREM の外核密度と速度をよく説明する化学組成を先にあげた五種の軽元素についてそれぞれ求めました。えられたモデルはまだ PREM などの地震学モデルと差があります(第3図)。酸素を例にとると、その差は地震波速度で 0.1 ~ 0.2 km/s 程度と、地震学モデル間の差よりもすこし大きいです。ですが、地震波の観測から求めた波の速度と高压科学がえた波の速度とを直接比べられるようになったことは、大きな進展です。

そして、この市川・土屋の論文のもう一つ大きな成果は、軽元素がすこし多い、あるいは少なかったときに地震波の速度がどれだけ変わるかがわかるようになったことです。彼らの結果を使って、Ohtaki *et al.* (2018) では第2図cに示した速度の違いを酸素濃度の差に変換しました。外核中にどの軽元素があるのかはまだわかりませんが、酸素は固体(内核)にはとくに入りにくく、液体が固化するときには外核に残りやすい元素です。その変換の結果、速度の違いが酸素濃度の違いだとすれば、内核表面から 100 km ほど上の、差が一番大きいところで、濃度の違いは 1 % 弱となることがわかりました(第4図)。北東太平洋下をふつうの外核だと考えると、我々の結果は、オーストラリア下の F 層に北東太平洋より軽い元素が多く溜まっていることを示しています。

4. F 層の化学組成不均質

このような化学組成の違いはどうしておきるのでしょうか？ 私たちは、内核の中を地震波がすすむ速さが東と西とで違うことと関係があるのではないかと考えています。内核の上のほうは東側と西側(アジアの下とアメリカの下)とで速度が 1 % くらい違うことがわかっています(田中, 2018)。内核は外核の液体が固まってできたものです。その固まる場所が偏っていて、新しくできたところと古いところとで速度が違うのではないかという説が、いくつか出されています(例えば Aubert *et al.*, 2008; Alboussière *et al.*, 2010; Monnereau *et al.*, 2010)。内核に含まれる軽

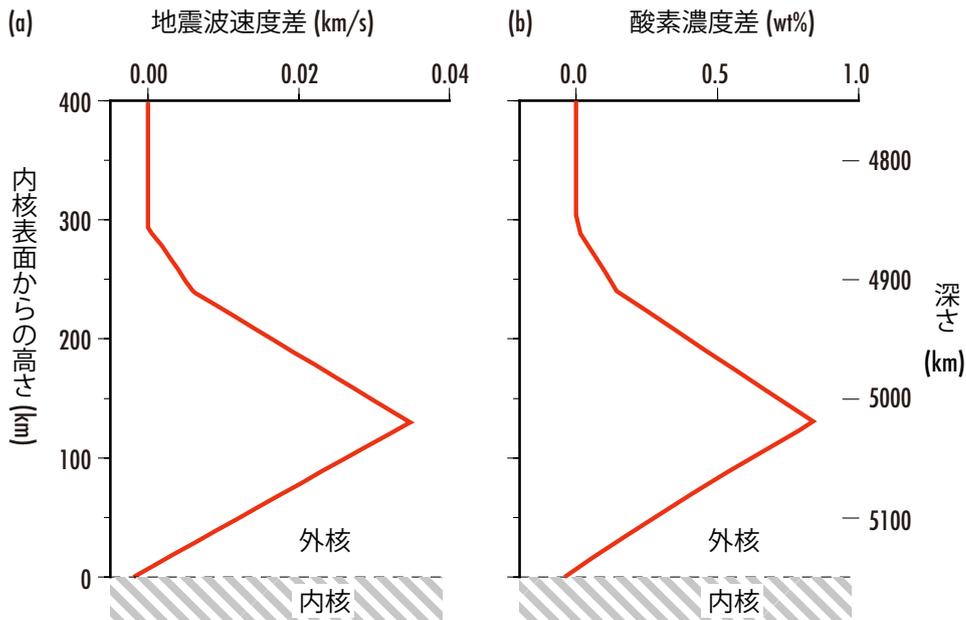


第3図 外核中のP波の速度. 図の上端は外核とマントルの境, 下端は外核と内核の境である. AK135モデル(紫線, Kennett *et al.*, 1995), SP6モデル(茶点線, Morelli and Dziewonski, 1993)のPREMモデル(Dziewonski and Anderson, 1981)からの速度差を示した. この三つのモデルはみな, 地球各地の地震波の観測をあつめて地球全体を平均したモデルであり, 深さが同じならどの場所でも速度が同じとしている. 高圧科学のモデルである市川・土屋(2018)の速度モデルとPREMとの差(青線)もあわせて示す. このモデルでは, 第一原理分子動力学計算をつかって鉄-ニッケル-酸素系金属液体の状態方程式を決定し, PREMの外核中の密度と速度をもっともよく説明する酸素濃度を求めている.

元素は外核より少ないので, 外核の液体が固まるときに余分な軽元素が外核中に残るはずですが, 固まる場所が偏っているとしたら, 外核底近くで場所により軽元素の濃淡があるかもしれません. この違いがF層の不均質, 場所により軽元素の量が違う現象として見えているのではないかと, 私たちは考えています.

地球の磁場は外核内の流体の流れが引き起こしています. この流体運動を維持する源の一つとして, 外核の液体が固まるときに放出される軽元素が考えられています(Stacy and Davis, 2008; 吉田, 2018). 我々の研究は, 外核最下部で軽元素の濃度にむらがある(場所によって違う)ことを示しており, この対流運動に制約をあたえられるのではないかと, 期待しています. とはいえ, まだF層を二ヶ所で調べただけです. 外核内の流体運動をもっと理解するためには, さらに多くの場所で調べていく必要があるでしょう.

謝辞: 本稿で紹介した外核底の研究は金嶋 聡氏(九州大学), 市川浩樹氏(当時, 愛媛大学・東京工業大学), 土屋卓久氏(愛媛大学)との共同研究に基づいています. 金嶋氏・土屋氏からは本稿についても有益なコメントをいただきました. 描図はGMT (Wessel and Smith, 1998), 波線計算はTauP Toolkit (Crotwell *et al.*, 1999)で行いました. ここで紹介した研究にはJSPS 科研費 JP15H05832, JP15H05834 を使用しました.



第4図 (a) 第1図に示した二つの地域の速度の差. オーストラリア下の速度から北米下の速度を引いた値を示した. (b) この速度差を市川・土屋(2018)の結果を使い酸素濃度の差に変換した. オーストラリアの下, 内核の表面より100 kmほど上がったところに, 酸素濃度が高い場所がある. 縦軸には内核の表面からの高さ(図左)と地表からの深さ(図右)を示した.

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.
- 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. (1982) *Inside the Earth: Evidence from earthquakes*. W. H. Freeman & Co., Ltd..
- Bullen, K. E. (1940) The problem of the Earth's density variation. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **30**, 235–250.
- Bullen, K. E. (1942) The density variation of the Earth's central core. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **32**, 19–29.
- Crotwell, H. P., Owens, T. J. and Ritsema, J. (1999) The TauP toolkit: Flexible seismic travel-time and ray-path utilities. *Seismol. Res. Lett.*, **70**, 154–160, doi:10.1785/gssrl.70.2.154.
- Dziewonski, A. M. and Anderson, D. L. (1981) Preliminary reference Earth model. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **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**, 5, 631–646, doi:10.5026/jgeography.127.631.
- Jeffreys, H. (1939) The times of the core waves (second paper). *Mon. Not. Roy. Astron. Soc., Geophys. Suppl.*, **4**, 594–615.
- Kennett, B. L. N., Engdahl, E. R. and Buland, R. (1995) Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. *Geophys. J. Int.*, **122**, 108–124, doi:10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x.
- Lehmann, I. (1936) P. *Publ. Bur. Cent. Seism. Internat., ser. A*, **14**, 87–115.
- 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.
- Morelli, A. and Dziewonski, A. M. (1993) Body wave traveltimes and a spherically symmetric P- and S-wave velocity model. *Geophys. J. Int.*, **112**, 178–194, doi:10.1111/j.1365-246X.1993.tb01448.x.
- 大滝壽樹 (2017) 外核の底を探る. GSJ 地質ニュース, **6**, 332–337.
- Ohtaki, T. and Kaneshima, S. (2015) Independent estimate of velocity structure of Earth's lowermost outer core beneath the northeast Pacific from PKiKP–PKPbc differential traveltime and dispersion in PKPbc. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **120**, 7572–7586, doi:10.1002/2015JB012140.
- 大滝壽樹・金嶋 聡 (2018) 外核F層の速度. 月刊地球, **40**, 365–370.
- Ohtaki, T., Kaneshima, S., Ichikawa, H. and Tsuchiya, T. (2018) Seismological evidence for laterally heterogeneous lowermost outer core of the Earth. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **123**, 10,903–10,917, doi:10.1029/2018JB015857.
- 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.
- 汐見勝彦・小原一成・針生義勝・松村 稔 (2009) 防災科研 Hi-net の構築とその成果. 地震 2, 61 特集号, S1-S7.
- Souriau, A. (2015) Presumption of large-scale heterogeneity at the top of the outer core basal layer. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **415**, 175–182, doi:10.1016/j.epsl.2015.01.024.
- Stacy, F. D. and Davis, P. M. (2008) *Physics of the Earth. Fourth Ed.* Cambridge Univ. Press. (本多 了ほか訳 (2013) 地球の物理学辞典, 朝倉書店)
- 田中 聡 (2018) 内核. 図説 地球科学の事典, 鳥海光弘ほか編, 朝倉書店, 186–187.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998) New, improved version of generic mapping tools released. *EOS Trans. AGU*, **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, 鳥海光弘ほか編, 朝倉書店, 48–49.
- Yu, W., Wen, L. and Niu, F. (2005) Seismic velocity structure in the Earth's outer core. *J. Geophys. Res.*, **110**, B02302, doi:10.1029/2003JB002928.

OHTAKI Toshiki (2020) Laterally heterogeneous lowermost outer core (F layer) of the Earth.

(受付: 2019年10月2日)