寄 書

1995年4月18日駿河湾北部の 地震 (M 4.9) について ——プレート間地震か海洋プレート 内地震か?——

神戸大学自然科学系先端融合研究環
都市安全研究センター*

石橋克彦†・原田智也

On the 1995 April 18 Earthquake (M 4.9)
in Suruga Bay, Japan
——Was It an Interplate Event or
within the Philippine Sea Plate?——

Katsuhiko ISHIBASHI† and Tomoya HARADA
Research Center for Urban Safety and Security,
Kobe University, Rokkodai-cho, Nada,
Kobe 657-8501, Japan
(Received May 14, 2007;
Accepted April 28, 2008)

§1. はじめに

想定東海地震の震源域 (Fig. 1) [中央防災会議 (2001)] の中または外縁付近で、ある程度大きい (例えば M 5 前後以上の) プレート間地震が最近発生しているかどうかは、興味深く重要な問題である。この観点から駿河湾とその西岸の地域の最近 10 年間程度の地震活動を見ると、1995 年 4 月 18 日の駿河湾北部の M 4.9 の地震が注目される (Fig. 1)。この地震は、震源の深さや P 波初動のメカニズム解からはフィリピン海プレート内部で発生した地震と考えられるが、菊地 (1995a, b) と菊地・石原 (1995) は、実体波インバージョンに基づいて「低角逆断層のプレート境界型地震」としているからである。

そこで、この地震の本震と余震、およびバックグラウンドの地震の震源を同時再決定して検討した。その結果、やはりフィリピン海プレート内部で発生したもので、プレート間地震ではないという結論が得られた。以

下にこのことを報告する。

§2. 地震の概要

問題の地震は、気象庁の地震年報によれば、1995 年 4 月 18 日 20 時 26 分 25.26 ± 0.09 秒に発生し、震央は $35^{\circ}03.90 \pm 0.48' N$, $138^{\circ}35.15 \pm 0.50' E$ (Fig. 1), 震源の深さは 24.13 ± 2.40 km, M は 4.9 である。この地震により静岡と小田原で震度 4, 河口湖, 網代, 三島, 御前崎で震度 3 の揺れを観測し, 10 分後の M 3.8 の余震によって小田原, 河口湖, 三島, 静岡で震度 2 を記録した [気象庁地震予知情報課 (1995)]。

P 波初動によるメカニズム解は, Fig. 2(a) (b) に示すように, 気象庁地震予知情報課 (1995) は逆断層型, 石田 (1995) は逆断層成分を含む横ずれ型だが, 主圧力軸はともに北北東-南南西方向である。この主圧力軸方向は, この付近のフィリピン海プレート内で発生する地震に特徴的なもので, Ukawa (1991) は同プレートが伊豆半島北方で衝突しているためだと解釈した。このようなメカニズム解や本震・余震の震源位置から, 石田 (1995) と鶴

Fig. 1. Epicenter of the 1995 April 18 earthquake in northern Suruga Bay, central Japan (solid star). Closed broken curve delineates the hypothetical source region of the anticipated Tokai earthquake after the Central Disaster Management Council (2001). Thick lines with Roman letters and thin lines with italic letters are isodepth contours of the upper surface of the subducted Philippine Sea plate inferred by Noguchi (1996) and Ishibashi *et al.* (2003), respectively. Isobath interval is 200 m after Japan Oceanographic Data Center (J-EGG500).

* 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1

† 現在の連絡先: 〒654-0131 神戸市須磨区横尾 2-28-26

† Present address: 2-28-26 Yokowo, Suma-ku, Kobe 654-0131, Japan

Fig. 2. Focal mechanism diagrams (lower focal hemispheres) of the 1995 April 18 northern Suruga Bay earthquake by JMA (1995) (a), Ishida (1995) (b), and Kikuchi (1995b) (c), respectively. (a) and (b) are based on P-wave first motions. (c) shows three sub-events and the overall faulting by a waveform-inversion analysis.

川 (1995) はこの地震を、駿河トラフから沈み込んだフィリピン海プレートの内部で発生した地震だと考えた。

これに対して菊地 (1995a, b) と菊地・石原 (1995) は、横浜市立大学と防災科学技術研究所の広帯域地震計記録を用いて、深さを気象庁速報値の 20 km に固定して波形インバージョン解析を行い、主破壊の 2 つのサブイベントがともに北西-南東圧縮の低角逆断層という結果を得た (Fig. 2(c) の 2 と 3)。メカニズムの異なる初期破壊

部分を加えて再解析を行っても、Fig. 2(c) に示す 3 つのサブイベントが得られ、破壊の主要部分のメカニズム解 (Fig. 2(c) の Total) は最初の解析とほとんど変わらなかった。これらのことから、この地震の主要部分は、ユーラシアプレートとフィリピン海プレートとの間の低角逆断層型のプレート間地震だと結論した。

§ 3. 震源再計算

本地震がフィリピン海プレート内部で発生したのか、あるいは、微小な初期破壊はフィリピン海プレート内で発生したが余震を含む地震活動全体はもっと浅いプレート境界面で発生したのかを別の方法で見極めるために、この地震の本震・余震と、バックグラウンドで発生した地震とを一緒にして、同時震源再決定を行った。これは、Harada and Ishibashi (2008) が 1993 年グアム地震に適用して有効性を示した方法である。

震源再計算の対象とした地震は、 $34.90 \sim 35.15^{\circ}\text{N}$, $138.45 \sim 138.75^{\circ}\text{E}$ の範囲 (Fig. 4 の地図の中の細実線の枠内) のもので、期間は、1995 年 4 月 18 日から 5 月 17 日までの 1 カ月間と、1997 年 10 月 1 日から 2007 年 12 月 31 日までの 10 年 3 カ月間とである。震源パラメータと検測値のデータは、2005 年 12 月分までは気象庁の各年の地震年報から、2006 年 1 月以降は、独立行政法人防災科学技術研究所 Hi-net 高感度地震観測網のページ内の気象庁一元化震源要素ダウンロードのページから、それぞれ取得した (ただし、測地基準系の変更と、気象庁の震源再計算とマグニチュード算出の変更とは、考慮している)。なお、1995 年 4 月 18 日からの 1 カ月間については、国立大学観測網地震カタログ [Earthquake Information Center (2000)] から検測値データを補充した。地震の総数は 154 個である。震源再計算には、Waldhauser and Ellsworth (2000) の double-difference 法のプログラム hypoDD (ver. 1.1) を使用した。

計算対象期間が長期にわたり、しかも観測点が急速に増加した時期を含むので、地震発生時期によって観測点配置がかなり変わってくることが避けられない。これは震源再計算結果に悪い影響を及ぼすことが考えられる。また、観測点の広がりも計算結果に影響を与えると思われる。そこで、対象領域の中心から 200 km 程度離れた点も含んで 133 観測点を用いたケースから、半径約 50 km 以内の 7 観測点のみを用いたケースまで、8 通りの観測点組み合わせについて計算を行った。その結果、個々の地震の震央位置と震源の深さは 3~4 km 程度しか動かず、したがって地震間の相対位置も大きくは変わらないことがわかった。次節で見るように、この程度の

Fig. 3. Distribution of 32 stations and the P-wave velocity structure (upper left) used in the hypocentral relocation (V_P/V_S has been assumed to be 1.73). Earthquakes in 1995 were observed only at stations shown by open triangles. The square in the Suruga Bay region corresponds to the inner frame of the map in Figs. 4(a) and (b).

不確定さは本報の論旨には影響しないが、いちおう本報では Fig. 3 に示す観測点 (32 点) の組み合わせを最善のものと考えたことにした。図中、白三角 (16 点) が 1995 年の本震・余震を観測している点、黒四角 (16 点) が観測していない点である。白三角の観測点の中には、1997 年以降の観測データが不十分なものもあるので、その場合にも観測点配置が大きくは変化しないように注意している。hypoDD に使用した相対走時データ数は約 57,800 である。地震波速度構造は、野口 (1996) が駿河湾に対して使ったモデル S1 の P 波速度構造 (Fig. 3 の挿入図) に従い、 V_P/V_S は 1.73 の一定値とした。

Fig. 4(a) に震源再計算前の震源分布を示す。右側の 2 つの断面図は、範囲内の全地震を東西方向と南北方向に投影したものである。赤色の印が 1995 年 4 月 18 日から 1 カ月間の地震 (12 個) で、一番大きな赤色丸が駿河湾北部地震の本震、一番大きな赤色三角が 10 分後の最

大余震 (深さ 19.5 km) である。他に、24 時間以内の余震と思われるものが 6 個見られる。直線 AB 上の黒い逆三角は、平面図と右側の AB 断面図とを見比べる際の参照点として入れたもので、ほぼ駿河トラフ軸の北方延長に当たる。

Fig. 4(b) に震源再計算結果を示す。154 個の地震のうち 149 個が震源再決定された。本研究では hypoDD において LSQR で解いたのでエラーが過小評価される傾向にあるが [Waldhauser and Ellsworth (2000)], それを考慮しても再決定の精度は良好であり、また、仮に実際の誤差がエラーバーを多少超えたとしても、次節の議論には影響が生じない程度である。対象とした地震のうち西側のものは、西方に移動したので対象範囲の外に出ている。駿河湾北部地震の本震・余震は 5 個が精度よく震源再決定され、初期震源よりもコンパクトに本震震源付近に集中している。最大余震は、深さが 20 km よりも深くなったので、(a) の赤色三角から赤色丸に印が変わっている。AB 断面では、東方の伊豆半島から続いているフィリピン海プレートの内部で発生したと思われるバックグラウンドの地震も、初期震源に比べると集中度がよくなっている。

§ 4. 議論と結論

駿河湾地域においては、杉村 (1972) の指摘以来、数多くの観測・調査・研究によって、東方の伊豆半島から続くフィリピン海プレートが駿河トラフ軸から西岸地域の地殻の下に斜めに沈み込んでいるという基本的見方が共通認識になっている。Fig. 1 に、野口 (1996) が推定したフィリピン海プレート上面の等深線を太めの線で示した。中央防災会議 (2001) の想定東海地震の震源域は、主としてこの等深線に準拠して、深さ 10 km 以深に設定されたので、その上端は野口 (1996) の深さ 10 km の等深線の実線部分とほぼ一致している。これに対して石橋・他 (2003) は、伊豆半島から続く駿河湾東半部 (駿河トラフ以東) の海底地形、気象庁一元化震源データによる震源分布と発震機構解、野口 (1996) の「遷移帯」の地震などを総合的に検討して、この地域のフィリピン海プ

Fig. 4. (a) Hypocentral distribution of the 1995 April 18 earthquake's main shock and aftershocks, and background earthquakes. Events within the frame in the map during the periods from April 18 to May 17, 1995 (red) and from Oct. 1, 1997 to December 31, 2007 are plotted. Vertical cross sections along the lines A-B and C-D in the map are shown on the right. Hypocentral data are from JMA. Solid inverse triangle on the line A-B indicates the northern extension of the Suruga trough axis, where the Philippine Sea (PHS) plate is considered to begin subduction beneath the western-side block of the trough. Concerning the upper surface of the PHS plate, its isodepth contours (in the map) inferred by Noguchi (1996) and by Ishibashi *et al.* (2003) and its corresponding geometry (in the A-B cross section) estimated by their contours are shown by solid and broken lines, respectively. (b) Distribution of relocated hypocenters of earthquakes plotted in (a).

(a)

(b)

レート上面はもっと浅いだろうと主張した。彼らによるフィリピン海プレート上面の等深線も Fig. 1 に細線で示す。なお、最近の弘瀬・他 (2007) は、東海地震想定震源域の上端に沿って深さ 10 km の等深線を引いている。

Fig. 4(a) (b) の A-B 断面図に、フィリピン海プレート上面の大まかな推定を、野口 (1996) の等深線に基づく場合 (実線) と石橋・他 (2003) の等深線に基づく場合 (破線) の 2 通り示した。これを見ると、石橋・他 (2003) が指摘したように、野口 (1996) や中央防災会議 (2001) のフィリピン海プレート上面の形状は、駿河トラフ軸付近から急角度で傾斜し、深すぎるように思われる。A-B 断面付近におけるプレート境界面は破線で示したものに近いのではなかろうか。ただし、本報では、このような問題が残っていることを指摘するにとどめ、プレート境界面の形状に関する議論はこれ以上行わない。

さて、震源再決定前の AB 断面図 (Fig. 4(a)) においても、震源再決定後のそれ (Fig. 4(b)) においても、東側の深さ 10~17 km 程度の地震群も、西側に密集する深さ 20 km 付近の地震群も、仮に実線付近にプレート境界面があったとしても、フィリピン海プレートの内部で発生したと見なすことができる。破線付近にプレート境界面があれば、なおさらである。駿河湾北部地震の本震と、最大余震を含む余震活動は、これら東西の地震群をつなぐベルトの中、ないしやや深い部分で発生したから、駿河湾北部地震もフィリピン海プレート内で発生したと結論することができる。同時震源再決定によってバックグラウンドの地震活動との相対位置がより確かになったので、この結論は信頼度が高いといえよう。

今回は絶対位置を再決定したわけではないので、その誤差を考えればまだ確定的ではないという見方があるかもしれない。しかし、Fig. 4(b) の A-B 断面において本震・余震がプレート境界面近くに位置するためには、深すぎると思われる実線に対しても、水平・鉛直に 10 km 前後かそれ以上の絶対誤差を考えなければならない。しかし、それはありえないと言ってよいだろう。仮に、それだけ浅くなるとしたら、浅く震源決定されている地震は空中に飛び出してしまい、かえって不合理である。

本報で再決定された本震の震源は初期破壊にすぎないから、主破壊はプレート境界面で生じた可能性が残されているという反論があるかもしれない。だが、 M 4.9 の地震において、初期破壊が海洋プレート内で起こり、主破壊が 10~15 km も離れたプレート境界面で生じて、余震活動は再び海洋プレート内の初期破壊に近いところで発生したということは、非常に考えにくい。

菊地 (1995a) は、震源の深さが気象庁の暫定値 (20 km) よりもっと浅いとすればプレート間地震の可能性

があると述べたが、その可能性はなくなったといっている。菊地 (1995a, b) と菊地・石原 (1995) は、発震機構の初動解と波形インバージョンの解が異なる例は珍しいことではないと述べているが、それはそうだとすると、本地震の場合、微弱な初期破壊も主破壊もフィリピン海プレート内部で発生したと考えるのが妥当であろう。波形インバージョンからは、地震規模のわりに破壊継続時間がたいへん短くて応力降下量が高かったと推定されているが、そのことからフィリピン海プレート内の破壊というほうが自然だと思われる。菊地 (1995a) は「かなり注意深い監視が必要ではないか」と述べていて、プレート間地震だった場合、応力降下量が高いということは東海地震が迫っていることを示すのかもしれないと考えたようだが、初期破壊に誘発されて浅いプレート境界面で応力降下量の高いプレート間の破壊が生じたという可能性も、前述のように否定される。

本報の結論として、1995 年 4 月 18 日の駿河湾北部の地震 (M 4.9) は、明らかにフィリピン海プレート内部の地震だったといえる。

謝 辞

本研究には、気象庁、独立行政法人防災科学技術研究所 Hi-net 高感度地震観測網、国立大学観測網地震カタログの震源・検測データと、Waldhauser and Ellsworth (2000) による double-difference 法のコンピュータ・プログラム hypoDD (ver. 1.1) を使わせていただいた。匿名の二人の査読者および編集担当委員加藤愛太郎氏からいただいたコメントは、本稿を改善するのに有益であった。図の作成には Wessel and Smith (1991) の GMT3.3.5 を用い、メッシュ水深データは日本海洋データセンターの J-EGG500 によった。以上の皆様に深く感謝いたします。

文 献

- 中央防災会議, 2001, 中央防災会議東海地震に関する専門調査会報告, 18 pp., <<http://www.bousai.go.jp/chubou/3/siryo2-2.pdf>>, (参照 2008-7-28).
- Earthquake Information Center, Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2000, Japan University Network Earthquake Catalog, April-June 1995, 570 pp.
- Harada, T. and K. Ishibashi, 2008, Interpretation of the 1993, 2001, and 2002 Guam earthquakes as intraslab events by a simultaneous relocation of the mainshocks, aftershocks, and background earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., **98**, 1581-1587.
- 弘瀬冬樹・中島淳一・長谷川 昭, 2007, Double-Difference Tomography 法による西南日本の 3 次元

- 地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定, 地震 2, **60**, 1-20.
- 石橋克彦・浅海善成・三好崇之, 2003, 駿河トラフから沈み込むフィリピン海スラブ上面の深さと形: 東海地震想定震源域との関連, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会予稿集 (CD-ROM), S045-004.
- 石田瑞穂, 1995, 1995 年 4 月 18 日駿河湾北部の地震 ($M 5.1$), 地震予知連絡会会報, **54**, 384-387.
- 菊地正幸, 1995a, 4 月 18 日駿河湾の地震のメカニズム解析速報 (暫定版), YCU 地震学レポート, No. 40, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/YCU_report/40.html>, (参照 2008-7-28).
- 菊地正幸, 1995b, 4 月 18 日駿河湾の地震のメカニズム解析速報 (改訂版), YCU 地震学レポート, No. 40s, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/YCU_report/40s.html>, (参照 2008-7-28).
- 菊地正幸・石原 靖, 1995, 1995 年 4 月 18 日駿河湾北部の地震の震源過程, 日本地震学会講演予稿集, 1995 年度秋季大会, B48.
- 気象庁地震予知情報課, 1995, 駿河湾北部の地震 (1995 年 4 月 18 日, $M 5.1$), 地震予知連絡会会報, **54**, 378-383.
- 野口伸一, 1996, 東海地域のフィリピン海スラブ形状と収束テクトニクス, 地震 2, **49**, 295-325.
- 杉村 新, 1972, 日本付近におけるプレートの境界, 科学, **42**, 192-202.
- Ukawa, M., 1991, Collision and fan-shaped compressional stress pattern in the Izu block at the northern edge of the Philippine Sea plate, J. Geophys. Res., **96**, 713-728.
- 鶴川元雄, 1995, 1995 年 4 月 18 日駿河湾北部の地震の発震機構解とテクトニック応力, 地震予知連絡会会報, **54**, 388-391.
- Waldhauser, F. and W. L. Ellsworth, 2000, A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California, Bull. Seism. Soc. Am., **90**, 1353-1368.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1991, Free software helps map and display data, EOS Trans. Am. Geophys. Union, **72**, 441.