九州下フィリピン海スラブの形状と地震活動

福岡管区気象台* 石原和彦
気象研究所** 吉田明夫

Configuration of the Philippine Sea Slab and Seismic Activity in and around Kyushu

Kazuhiko ISHIHARA

Fukuoka District Meteorological Observatory, 1-2-36, Ohori, Chuo-ku, Fukuoka 810, Japan
and Akio YOSHIDA

Meteorological Research Institute, 1-1, Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

(Received June 14, 1991; Accepted April 17, 1992)

There are several gap zones in the intermediate-depth seismicity in the Philippine Sea slab beneath Kyushu. The focal depth of the deepest earthquake increases step-like toward the south, and dip direction and inclination of the slab change from segment to segment divided by the gaps. Further, seismicity around the depth of 80 km, where the slab bends steeply downwards, varies with the segments. That is, the seismicity is very low for the northern segment, whereas fairly many earthquakes occur in the middle and the southern segments, although no earthquake with $M \geq 4$ was observed in the depth range deeper than 80 km in the southern segment during the period 1926 through 1990. Sectionalization is seen in the seismic activities in the Hyuganada basin. Aftershock areas of large earthquakes in the Hyuganada basin are delineated by the boundaries of the segments. Moreover, a tendency of successive occurrence of large earthquakes, first in the northern section, then in the southern section, is clearly recognized.

Key words: Kyushu, Philippine Sea slab, Segmentation, Hyuganada Basin, Successive occurrence.

§ 1. はじめに

九州下におけるフィリピン海スラブ内のサイスミシティやスラブの形状に関しては、これまでに多くの研究がある [例えば SHIONO *et al.* (1980), IMAGAWA *et al.* (1985), 石川 (1985), 高橋 (1987), 高橋・他 (1987), 長宗・田代 (1989), 角田・他 (1991)]. これらの研究によって、九州下ではスラブの到達深度が北から南にいくにつれて次第に深くなること、深さ 70~80 km 付近で地震面は大きく折れ曲がって、それで深では沈み込み角度がほぼ 70° と急傾斜になることが明らかにされ、スラブ折れ曲がり付近のサイスミシティが著しく低いこと、それより下部の稍深発地震の発震機構から求まる最大主圧力軸は水平方向であることなどが指摘されている [例

えば, SHIONO *et al.* (1980), IMAGAWA *et al.* (1985)]. また、長宗・田代 (1989) は 1983 年 1 月~1987 年 4 月の気象庁震源データを解析し、地震面の厚さや傾斜角、最深部の深さなどの差異に基づいて、九州下のスラブに 2 か所の断裂を推定した。

九州地方における気象庁の震源決定能力は、1984 年に地震観測網のテレメータ化が完成して以後大幅に向上した [山本 (1985)]. 本論文では、1984 年 1 月~1990 年 12 月の気象庁震源データを用い、スラブの断裂の存在に焦点をしばって、稍深発地震活動並びに日向灘の地震活動の地域的特徴について検討する。

§ 2. 九州下のフィリピン海スラブ

Fig. 1 は、九州下における 70 km 以深の地震の震央分布と、 $N153^\circ W-N27^\circ E$ 方向に切った震源の断面を示したものである。この断面図から、図中の A~E のとこ

* 〒810 福岡市中央区大濠 1-2-36

** 〒305 茨城県つくば市長峰 1-1

Fig. 1. Epicentral distribution (left) and cross section in the direction of $N27^{\circ}E$ (right) for earthquakes with focal depth ≥ 70 km during the period 1984–1990. Gap zones in the intermediate-depth seismicity are indicated by A, B, C, D and E.

ろでサイスミシティが低く、またそこを境に震源の最深部は南側にいくにつれてステップ状に深くなっていることがわかる。長宗・田代(1989)は、同様な稍深発地震のサイスミシティとその震源断面図から、稍深発地震が群れになって発生している領域の北端、ほぼCとEに相当するところに、スラブの断裂の存在を想定している。一方、角田・他(1991)は稍深発地震活動の空白域と大規模カルデラとの位置的対応に着目し、地表の地質構造線も考慮に入れて、むしろそれらの空白域のところが稍深発地震面のブロック構造境界を表すと考えている。Fig. 1の震源断面図からは、先に述べたように、長宗・田代(1989)や角田・他(1991)が指摘したC、E以外に、A、B、Dのところにも稍深発地震活動の低い領域が認められる。以下では、BとCの間をセグメントⅠ、CとDの間をセグメントⅡ、DとEの間をセグメントⅢとして、地震活動や震源分布について各セグメント間での差を検討する。なお、伊予灘付近及びEの南側領域の地震活動に関しては別稿で論じる。

ところで、Fig. 1に見るように、スラブ内地震活動が低く、地震の深さが変わるという条件だけからでは、断裂の位置に不確定さが生じる。実際、長宗・田代(1989)と角田・他(1991)では推定された断裂の場所が多少

違っている。その意味でFig. 1のA～Eの線も、現段階ではセグメントへの区分けの一つの目安と見るべきものである。

Fig. 2にそれぞれのセグメントについて $N63^{\circ}W$ 方向に切った断面図を示す、スラブの到達深度はⅠ、Ⅱ、Ⅲの順に、約130 km、160 km、そして180 kmと深くなっている。また、80 km付近の地震面の折れ曲がりの角度とその近傍のサイスミシティに、各セグメント間で違いが見られる。SHIONO *et al.* (1980)は1964～1975年のISCデータを、またIMAGAWA *et al.* (1985)は1961～1983年の気象庁データを解析して、九州下スラブの折れ曲がり付近のサイスミシティがきわめて低いことを指摘した。しかし、Fig. 2の断面図、及びFig. 3(c)のスラブの折れ曲がり付近に相当する深さの地震活動を見ると、セグメントⅠでは確かに折れ曲がり付近のサイスミシティは低い、Ⅱ、Ⅲではかなりの数の地震が起きていることがわかる。ただし、 $M4$ 以上の地震に限ると、セグメントⅢでは80 km以深に全く見られない。これに対してセグメントⅡでは80 km以深にも多くの $M4$ 以上の地震が発生している。これらは1984～1990年の期間の震源データに基づいたものであるが、稍深発地震活動に関する上の特徴は、1926～1990年の長期間震源

Fig. 2. Cross sections of the hypocentral distribution of earthquakes in each segment I, II and III shown in the epicentral map. Note the difference of seismicities around the kink of the slab—it is very low in the segment I, whereas a fairly many earthquakes are observed in the segments II and III, although there is no earthquake with $M \geq 4$, depth ≥ 80 km in the segment III.

データにおいても共通して見ることができる。

なお、折れ曲がりの角度は、セグメント I, II に比べてセグメント III では緩やかになっている。そのことは、例えば、Fig. 2 の断面図で、日向灘のプレート間カップリング領域からサイスミックゾーンの同じ深さのところまでの水平距離の違いに表れている。

次に深さ別にサイスミニシティの特徴を見てみる。まず深さ 20 km から 40 km までの地震活動の震央分布 [Fig. 3(a)] からは、先に想定したスラブの切れ目のところで、日向灘の地震活動もブロック化されている様子が見られる。スラブの折れ曲がり部分に相当する深さ 70 km 前後の地震活動 [Fig. 3(c)] の地域性については先に述べた。沈み込み角度が急となつてからの、80~160 km の深さの地震の震央分布の西縁を点線で示した Fig. 3(d), (e) からは、スラブの最大傾斜方向はセグメント I から III へ順に、それぞれ約 $N70^\circ W$, $N65^\circ W$, $N60^\circ W$

と、南にいくにつれて次第に北向きに変わっている様子が見られる。また、160 km 以深の地震の発生は D より南側に限られる [Fig. 3(f)]。

以上の事実は、九州下のフィリピン海プレートがいくつかのセグメントに分かれているという仮説を支持するものである。

§ 3. スラブのセグメンテーションと日向灘の地震活動

先に、日向灘では B, C の延長を境界とする地震活動のブロック化が見られることを指摘した [Fig. 3(a)]。こうした特徴は日向灘に発生する大地震の震源域に明瞭に現れている。例えば、C の北側に震源を有する 1984 年 8 月 7 日の $M 7.1$ の地震、及びそれに引き続いて C の南側で発生した 1987 年 3 月 18 日の $M 6.6$ の地震後の、それぞれ一ヶ月間の地震活動を見ると [Fig. 4(a)], 余震

Fig. 3. Epicentral distribution of earthquakes in different depth ranges: (a) $20 \text{ km} \leq \text{depth} < 40 \text{ km}$, (b) $40 \text{ km} \leq \text{depth} < 65 \text{ km}$, (c) $65 \text{ km} \leq \text{depth} < 80 \text{ km}$, (d) $80 \text{ km} \leq \text{depth} < 120 \text{ km}$, (e) $120 \text{ km} \leq \text{depth} < 160 \text{ km}$, (f) $160 \text{ km} \leq \text{depth} \leq 200 \text{ km}$.

域は、1984年の地震ではCの北側に、また1987年の地震ではCの南側にあったことは明らかである。同様に、Fig. 4(b)は、1968年4月1日の $M7.5$ の地震、1969年4月21日の $M6.5$ の地震、1970年7月26日の $M6.7$ の地震の後、それぞれ一カ月間の余震を重ねてプロットしたものであるが(震源データは地震月報別冊第6号[気象庁(1982)]による。Fig. 4(c)も同様)、先の例と同じく、1968年の地震の余震域はCの北側に、また1969年、1970年の地震の余震域はCの南側にあったことがわかる。さらに遡って、宇津のカタログ(1982)

によれば、1931年11月2日の $M7.1$ の地震の震央はCの北側に、また1941年11月19日の $M7.2$ の地震の震央はCの南側にくる。Fig. 4(c)は1939年3月20日の $M6.5$ の地震、及び1941年の地震の後の、それぞれ一カ月間の余震活動と、宇津(1982)による1931年の $M7.1$ の地震の震央を重ねて示したもののだが、これから1941年の地震の震源域はCの南側にあったこと、また、1939年の地震の後、境界CとBの近傍で地震活動が活発だった様子が見られる。BとCに沿っては、地震の線状配列がこの期間以外にもしばしば認められる。な

Fig. 4. (a) Superposition of epicentral distributions of earthquakes during each one month period just after the occurrence of an $M7.1$ earthquake on 7 August 1984 (solid circles) and after an $M6.6$ earthquake on 18 March 1987 (open circles).
 (b) Superposition of epicentral distributions of earthquakes during each one month period just after the occurrence of an $M7.5$ earthquake on 1 April 1968 (solid circles), after an $M6.5$ earthquake on 21 April 1969 and an $M6.7$ earthquake on 26 July 1970 (open circles).
 (c) Superposition of epicentral distributions of earthquakes during each one month period after the occurrence of an $M6.5$ earthquake on 20 March 1939 (solid circles) and after an $M7.2$ earthquake on 19 November 1941 (open circles). A large circle with slant lines represents the epicenter of an $M7.1$ earthquake on 2 November 1931.

お、1931年の $M7.1$ の地震については、震源域がCの北と南の両側に及んでいたとする見解もある〔長宗(1988)〕。

以上の三つの例で注目すべき特徴は、Cの北側でまず大地震が発生して、次いでCの南側でも発生するというパターンが共通して見られることである(上述のように1931年の地震については、震源域がCの北と南の両側に及んだ可能性がある)。このような特徴は、日向灘に発生した $M6.5$ 以上の地震の時空間分布からも明瞭である(Fig. 5)。サブダクションゾーンの隣合ったカップリング領域において大地震が続いて発生するというパターンは、東南海地震と南海道地震の関係と似ていて興味深い。

なお、Utsu (1974) は、日向灘の地震活動域を北からU, T, Vの3つに分け、それぞれの領域の活動の特徴と

して、Tでは最大 $M7.5$ に達する大地震がほぼ30年の間隔で発生しているのに対して、Uでは高々 $M7$ の地震が群発する傾向が見られると述べている。U, T, Vの境界はほぼCとDに対応する。

§ 4. 議 論

南海トラフ沿いでは、東南海地震や南海道地震のように $M8$ クラスの巨大地震が発生するのに対して、日向灘では $M7.5$ 程度の地震が大きさの上限で、その代わり地震発生繰り返し間隔は短い。一般に相対運動速度が同じであれば、カップリング領域の応力場の増大の仕方は、その領域が小さいほど早くなるから〔YOSHIDA (1980)〕、これは九州下に沈み込むフィリピン海スラブがいくつかのセグメントに分かれているという仮説と合っている。また、中国地方の内陸の地震活動は南海道地震

Fig. 5. Space-time distribution of earthquakes with $M \geq 6.5$ occurring in the Hyuganada basin. It is clear that a large earthquake in the zone between C and D is likely to occur succeeding to the occurrence of a large earthquake in the zone between B and C.

の発生が近づく傾向がある [例えば Mogi (1981)] のに対して、九州地方の浅発地震活動は日向灘の大地震の前に特に活発化するには見えない。このことも、日向灘におけるプレート間カップリングは四国沖に比べてスケールが小さなものであることを示唆する。なお、九州中央部の浅い地震活動は、むしろ、フィリピン海スラブ内の稍深発地震活動と相関を持つ [吉田 (1991)]。

九州下のフィリピン海スラブが、その短さにもかかわらず急角度で沈み込み、またセグメントに分かれているのは、九州中央部を西南西-東北東方向に横切って九州を南北に分裂させつつある沖縄トラフ [多田 (1984), (1985)] の活動に起因する横方向の力を受けているためではなかろうか。更に、これに加えて、フィリピン海プレート自体が変形しやすいということもあろう。伊豆半島周辺や紀伊半島下でもフィリピン海スラブは複雑な形状をしており [石田 (1986), Mizoue *et al.* (1983), 山崎・大井田 (1985), WATANABE and MAEDA (1990)], こうした変形のしやすさは、スラブが比較的薄く、また年代が若くて十分冷えきっていないことなども関係しているものと思われる。

§ 5. ま と め

九州下スラブ内の稍深発地震活動にはサイスミシティの極度に低い部分が何か所かあって、そこを境にスラブの到達深度はステップ状に南にいくにつれて深くなる。そして、各セグメントによってスラブ折れ曲がり付近やそれより深部のサイスミシティ、最大傾斜方向に差違が見られる。また、このような稍深発地震面のセグメンテーションは日向灘のプレート間カップリング領域の地震活動のブロック的構造とも関係していて、日向灘に発生する大地震の震源域は、これらの境界の海側への延長

部で仕切られる。以上のような特徴は、これらのセグメント境界がスラブの断裂を表しているという考え方を支持する。なお、今世紀に日向灘で発生した $M 6.5$ 以上の地震について見ると、まず境界 C の北側で大地震が起き、続いてその南側で大きな地震が発生するというパターンがほぼ共通して見られる。これは東南海地震と南海道地震の関係に似ていて興味深い。

謝 辞

鹿児島大学理学部角田寿喜教授及びもう一人の匿名の査読者からの懇切なコメントは、論文を改善するうえでたいへん有益であった。記して厚く感謝いたします。

文 献

- IMAGAWA, K., K. HIRAHARA and T. MIKUMO, 1985, Source mechanisms of subcrustal and upper mantle earthquakes around the northeastern Kyushu region, southwestern Japan, and their tectonic implications, *J. Phys. Earth*, **33**, 257-277.
- 石田端穂, 1986, 関東・東海地域の震源分布から想定したフィリピン海及び太平洋プレートの等深度線, 国立防災科学技術センター研究報告, **36**, 1-19.
- 石川有三, 1985, 九州下の二重深発地震面, *地震* **2**, **38**, 265-269.
- 角田寿喜・宮町宏樹・高木章雄, 1991, 九州-琉球孤北部域の稍深発地震, *地震* **2**, **44**, 63-74.
- 気象庁, 1982, 改訂日本付近の主要地震の表 (1926 年~1960 年), *地震月報*, 別冊第 6 号.
- MIZOUE, M., M. NAKAMURA, N. SETO and Y. ISHIKETA, 1983, Three-layered distribution of micro-earthquakes in relation to focal mechanism variation in the Kii Peninsula, southwestern Honshu, Japan, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **58**, 287-310.
- Mogi, K., 1981, Seismicity in western Japan and long-term earthquake forecasting. In Simpson, D. W.

- and Richards P. G., eds., Maurice Ewing Series 4, Earthquake Prediction, Am. Geophys. Union, Washington D. C., 43-51.
- 長宗留男, 1988, 日向灘における大地震の活動, 鹿児島大学理学部紀要, 第21号, 1-21.
- 長宗留男・田代秀樹, 1989, 九州下における和達ーベニオフゾーンの形状, 地震 2, 42, 13-19.
- SHIONO, K., T. MIKUMO and Y. ISHIKAWA, 1980, Tectonics of the Kyushu-Ryukyu arc as evidenced from seismicity and focal mechanisms of shallow to intermediate depth earthquakes, J. Phys. Earth, 28, 17-43.
- 多田 堯, 1984, 沖縄トラフの拡大と九州地方の地殻変動, 地震 2, 37, 407-415.
- 多田 堯, 1985, 沖縄トラフと拡大と九州地方の地殻変動 (2), 地震 2, 38, 1-12.
- 高橋道夫, 1987, 九州下の稍深発地震面の非二重性, 地震 2, 40, 115-117.
- 高橋道夫・西辻和也・後藤主夫, 1987, テレメータシステムの整備により明らかになった九州地方の地震の特徴, 気象庁研究時報, 39, 27-48.
- UTSU, T., 1974, Space-time pattern of large earthquakes occurring off the Pacific coast of the Japanese islands, J. Phys. Earth, 22, 325-342.
- 宇津徳治, 1982, 日本付近の M 6.0 以上の地震および被害地震の表: 1885 年~1980 年, 地震研彙報, 57, 401-463.
- WATANABE, H. and N. MAEDA, 1990, Seismic activity of subcrustal earthquakes and associated tectonic properties in the southwestern part of the Kinki district, southwestern Japan, J. Phys. Earth, 38, 325-345.
- 山本雅博・後藤主夫・豊田正昭・永岡 修, 1985, 福岡管区気象台地震波形テレメータシステム整備とそれに伴う地震検知能力の改善について, 験震時報, 49, 93-104.
- 山崎文人・大井田 徹, 1985, 中部地方におけるフィリピン海プレート沈み込みの形状, 地震 2, 38, 193-201.
- YOSHIDA, A., 1980, Antidislocation as a source of earthquake, Pap. Meteorol. Geophys., 31, 7-14.
- 吉田明夫, 1991, 九州地方における稍深発地震活動と浅発地震活動の相関とその地学的背景, 地学雑誌, 100, 776-782.