

フィリピン海スラブの形状

石川 有三*

The Shape of the Philippine Sea Slab

Yuzo ISHIKAWA*

Abstract

The shape of the Philippine Sea slab beneath southwest Japan was investigated using the hypocenter distribution and the fault plane solutions obtained by Japan Meteorological Agency. Two seismic belts were found in an equal depth section of the slab and these did not relate to the double seismic zone in the subducting slab. Then, the existence of a broken off piece of slab was proposed beneath Kii channel. This piece collided with Philippine Sea slab and created a high seismicity area at each side.

Three events that were not located at a high seismic area in the slab were found. Two were considered to be the events that occurred at the near aseismic part of the slab. The other may have occurred at another broken off piece of the slab.

Key words : Philippine Sea slab, shape of slab, hypocenter distribution, fault plane solutions
キーワード : フィリピン海スラブ, スラブ形状, 震源分布, 発震機構解

I. はじめに

フィリピン海プレートは、東海地方から中国・四国地方、そして九州、琉球列島にわたり陸側プレートの下へ沈み込むが、その沈み込んだ後のスラブの形状は非常に多岐にわたっている。たとえば、九州から沖縄地方にかけての形状は、Shiono *et al.* (1980) がトカラ海峡付近を挟んで沈み込みの角度が急変することを指摘した。この場合、彼らは奄美大島のすぐ北側の海峡にトカラ海峡という名称を用いているが、多くの地図ではトカラ海峡はそれより少し北側の屋久島とトカラ列島北端との間を指している。したがって、フィリピン海スラブの沈み込む角度が急変するのは、奄美大島の北側とした方が正しい。この誤りの元は小西

(1965) の図にある。Shiono らは、この図を引用したため地名を誤ったが、その後もこの図を引用した長宗 (1987) や長宗・田代 (1989) も誤りを引き継いでおり、注意する必要がある。

次にこの北側の地域でも九州地方下では、角田ほか (1992, 1995) は沢山の裂け目があると指摘している。四国から近畿地方については、古くは溝上 (1977) のモデルがあるが、その後 Mizoue *et al.* (1983), 木村・岡野 (1994), 中村ほか (1997), 石川・石原 (1999) が新しいモデルを提案している。伊藤 (1990) は、それまでの研究成果を概括しているが、新しいモデルの提案はしていない。この地域での新しいモデルは、長く溝上 (1977) の形状を手直したものであった。唯一、石川・石原 (1999) が紀伊水道下に千切れて孤立したス

* 気象研究所地震火山研究部

* Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute, JMA

ラブの破片があるとしたモデルが他のモデルと際だって異なっている。最近、中村ほか(2000)が震源分布に新しい特徴を指摘しているが、モデルの提案には至っていない。東海地方についても、山崎・大井田ほか(1985)によって複雑な形状が示され、紀伊半島東部で切り裂かれたモデルが出されている。

また、スラブの先端がどこまで達しているかという議論もいくつかなされてきた。特に、Nakanishi(1980)がScS波の変換波から、Kinoshita and Nakanishi(1997)は最近の震源分布からそれぞれ中国地方下までスラブが達していることを示した。

近年気象庁、国立大学、防災科学技術研究所などの地震観測網が一元化されたため、震源決定能力が著しく向上している。ここではこれらのデータを気象庁が処理した成果を用いてスラブの形状などについて議論する。

II. 用いたデータ

震源データは、気象庁地震月報、同地震年報、および一元化処理された震源データによった。しかし、気象庁の地震月報は時期により震源決定方法や用いる走時表が異なっている(石川, 1987)。そのため細かな震源分布を見る場合には不向きな場合もある。この欠点を補うため石川・濱田(1985)は、過去の地震月報のデータを用いて最新の震源決定方法でかつ同じ走時表を用いて、1961年から1984年までの震源を再決定した。そして、その中でも、P波着震時とS波着震時の報告が比較的多く、特に信頼性の高い震源を採用して震源分布を議論した。

この他、震源メカニズム解については、気象庁地震月報、同地震年報と一元化処理による解と防災科学技術研究所のFREESIAの解(Fukuyama *et al.*, 1999, 2000a, b, 2001a, b)も用いた。

III. 震源等深線から推定される形状

南海トラフから沈み込んだフィリピン海スラブが非常に複雑な形状をしていることはこれまでの先に述べた多くの研究成果で示されている。特に、

紀伊半島から四国にかけての地域では直角に近い角度でスラブの等深度線が奇妙な折れ曲がっているモデルが提案されている。しかし、石川・石原(1999)は、四国東部下の北西-南東走向の震源分布が密度は異なるが2列存在すること(図1参照)やその付近の震源メカニズムによるP軸方位が互いに押し合っているように見えることから、北東側の震源列は現在連続して沈み込んでいるスラブとは過去に切り離された部分が紀伊水道下で現在のスラブに衝突していると考えた(図2)。石川・石原(1999)の後のデータも含めて震源分布を示したものが図1であるが、以前と同様にA, B2列の北西-南東走向の震源分布の傾向は変わっていない。

一方、この北東側(徳島東部から紀伊水道にかけて)の震源列(B)が紀伊半島に分布する北東-南西走向の地震列とぶつかってV字型の分布を形成しているが、このV字の谷部分に震源が分布しない狭いギャップ状の部分がある。橋本・菊地(1999)は、この低地震活動域が東海地震と南海地震の震源域を分けているのではないかと推定している。また、中村ほか(2000)もこのギャップの存在を指摘し、この部分を境に震源メカニズムの特徴が変化していると指摘した。実際の分布特性を見るためこのギャップを通る断面図を図3に示した。この断面図を見ると(1)ギャップはほぼ鉛直に分布している、(2)ギャップの両側の地震活動が高い、(3)ギャップ内の地震活動は非常に低いが無地震域ではない、(4)ギャップの西側での震源は深さ55 km程度までであるが、東側は60 km余りの深さまで震源が分布している、という特徴が見える。また、図4, 5に広域の応力場を見るため、震源メカニズムによりP, T軸の水平面投影方位分布をそれぞれ示した。これらの図からは、広域にはP, T軸ともに東から西へゆるやかな方位変化が見られ、ギャップの部分でスラブが分断しているようには見られない。

また、このギャップ部分を拡大したものを図6, 7に示した。ギャップの西側に多数分布している震源の東端は南北走向を示している。また震源メカニズムを見るとこの部分は南北走向の節面を持つ

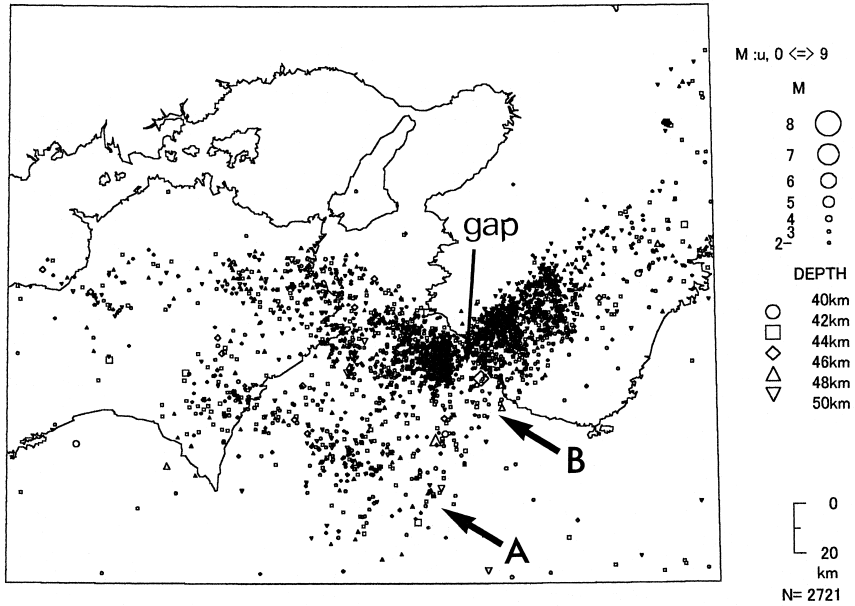


図 1 石川・浜田(1985)と気象庁データなどによる1961年から2001年5月までの深さ40~50kmの震源分布。「A」「B」で示したものは、北西-南東走向の2列の地震帯。「gap」と記載した矢印の先端部は地震活動が非常に低い場所。

Fig. 1 Epicentral distribution. Hypocenter parameters are adopted from Ishikawa and Hamada (1985) and JMA Seismological Bulletins with a focal depth from 40 to 50 km during the period 1961-2001 May. 'A' and 'B' indicate two seismic belts in the NW-SE direction. 'Gap' means the region pointed out by several researchers, where the seismic activity is very low.

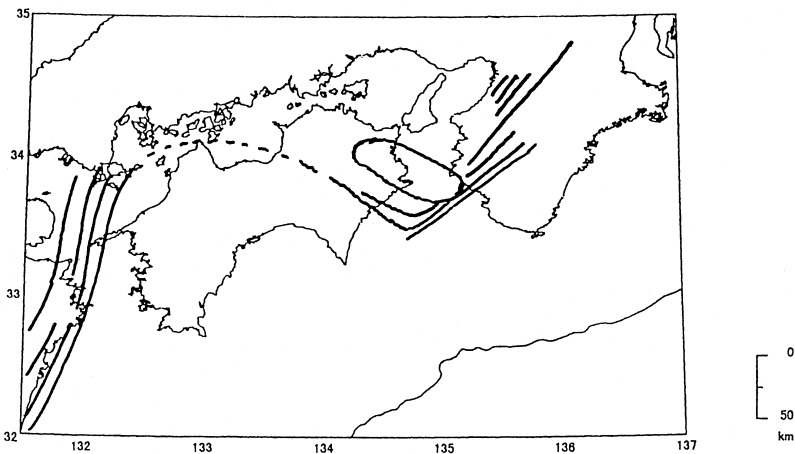


図 2 フィリピン海スラブの形状の模式図。

震源の等深度線は、45 km から 5 km 毎に示した。四国東部から紀伊水道にかけての楕円形で囲った部分は、過去にスラブから千切れて離れ、現在は沈み込むスラブに衝突している破片。

Fig 2 Schematic illustration of Philippine Sea slab and the broken off piece located beneath Kii channel. The lines indicate the equal depth lines of hypocenters for each 5 km from 45 km.

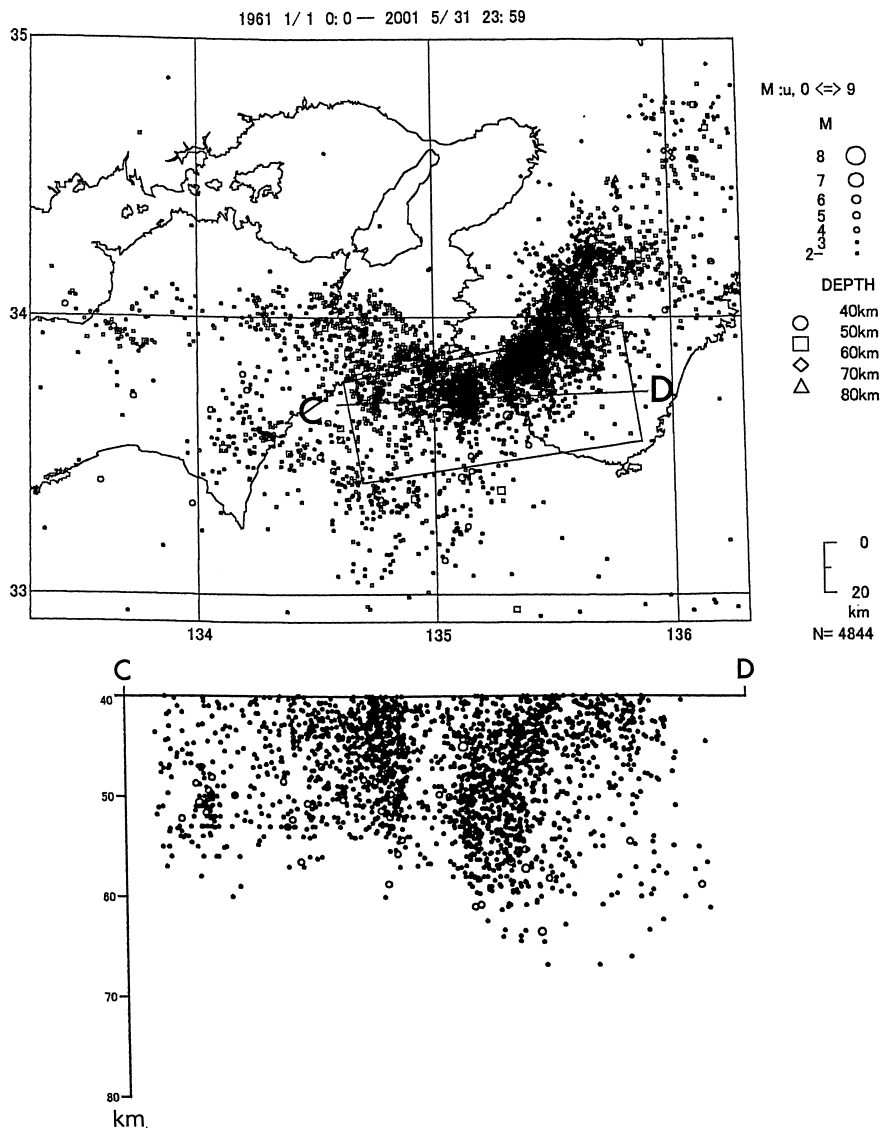


図 3 上：深さ 40 ~ 80 km の震源分布図 .

下：上図の四角形の枠内を C D に沿っての断面に投影した図 . 鉛直方向の長さは、水平方向に比べて 2 倍誇張してある .

Fig. 3 Upper: Epicentral distribution with a focal depth of 40 80 km.

Lower: Cross-section distribution of the hypocenters in the rectangle along C-D line in Fig. 3. The vertical scale is twice the horizontal one.

横ずれ型が多い。このことは、南北走向の左横ずれ地震が多発していて、北西-南東の圧縮力がこの部分に働いている。一方、北東側の地震多発域で

は正断層型が多く、スラブ内応力場が明らかに異なっている。これは、石川・石原（1999）の示した千切れたスラブが沈み込んでいるスラブに衝突

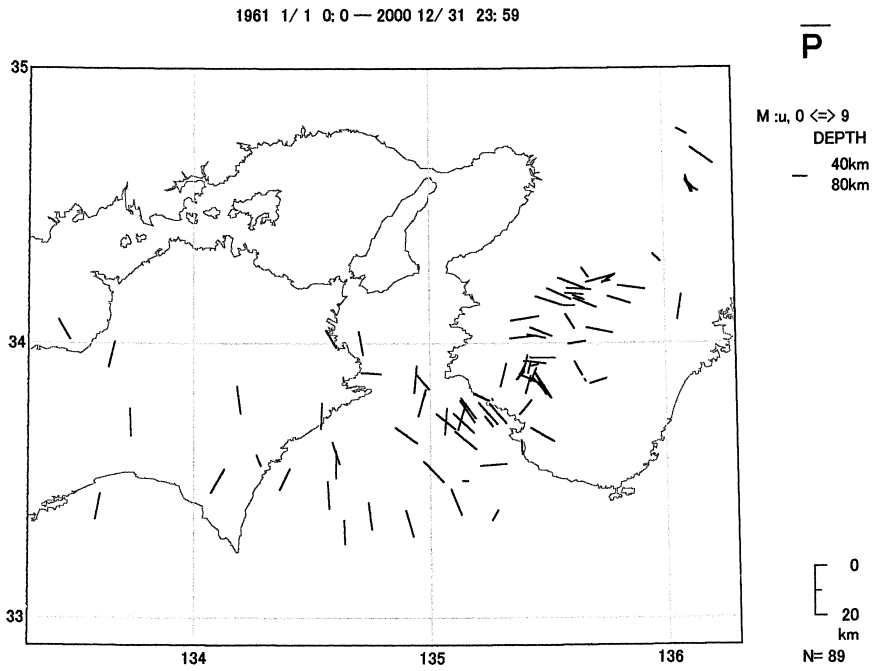


図 4 気象庁による P 波初動方向から求めた震源メカニズム解の P 軸方位の水平面投影 .

Fig. 4 P axes distribution of the fault plane solutions determined by JMA, using P wave first motion directions.

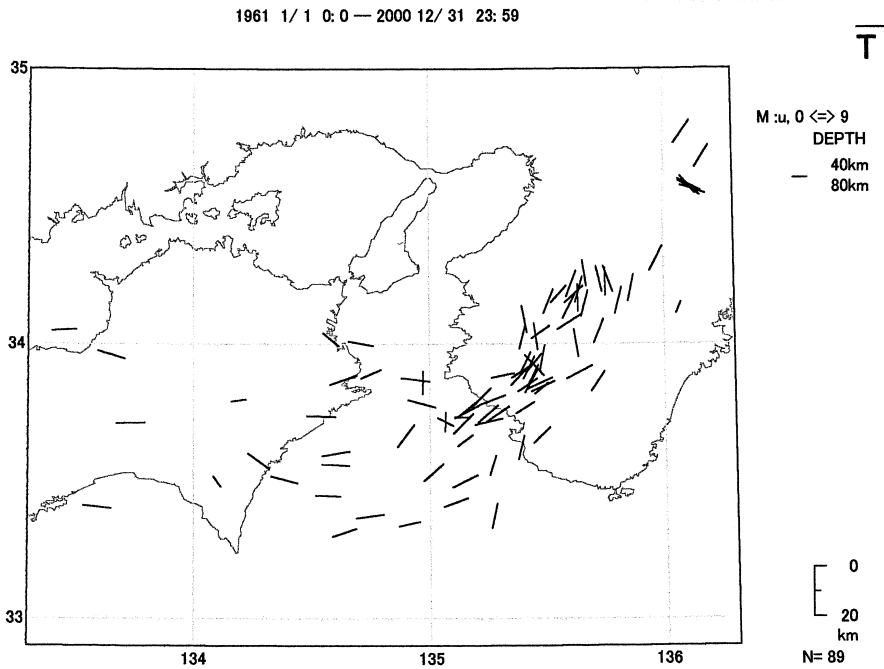


図 5 図 4 の T 軸方位分布図 .

Fig. 5 T axes distribution of the fault plane solutions determined by JMA, using P wave first motion directions.

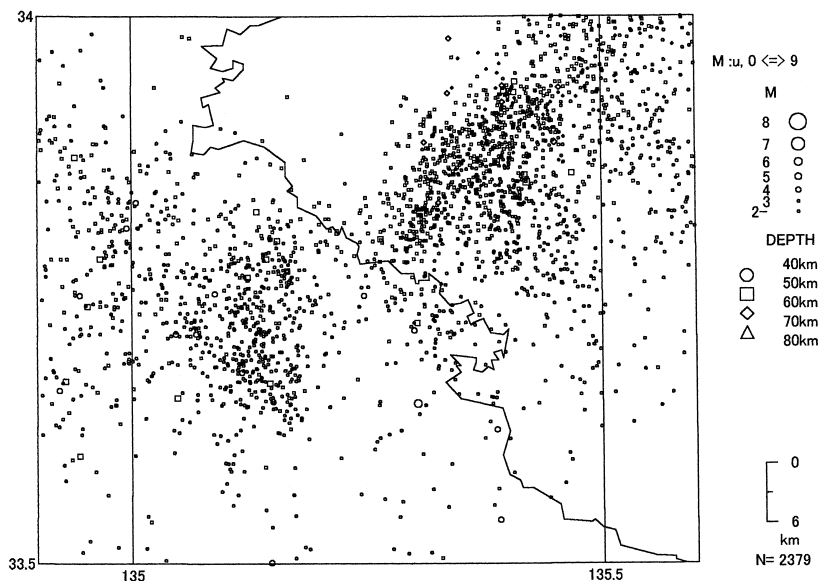


図 6 「Gap」近傍の震源分布図。

Fig. 6 Epicentral distribution near 'Gap' region.

しているとするモデルで考えれば、B列の震源は千切れた破片のスラブ内であり、B列南東端で沈み込むスラブと衝突し、図6の西側で南北走向に密集して分布する震源は、衝突されたフィリピン海スラブ本体内部での破壊と考えることが出来る。

IV. スラブの先端

フィリピン海スラブの先端は、最近の検知力の向上した地震観測網の震源分布から中国地方まで達しているとされている (Kinoshita and Nakanishi, 1997)。一方、地震波の変換波からは、震源が分布するよりも北側までスラブが存在していると指摘されている (Nakanishi, 1980)。これは、検知力の向上と、その観測期間の長期化によって震源分布から推定されるスラブ先端は時間とともに深くなっていると予想される。実際、そのような既知のスラブ先端よりの更に深い場所に震源が求まるようになってきた。

図8は、九州北西部から山口県にわたる地域のやや深い震源分布を示している。この地域のフィ

リピン海スラブは、南半分では東から西へ、北部では南東から北西へ傾き下がる形状をしている。この図で「1」～「3」で示されたイベントがこれまで知られていたスラブから離れた場所に震源が求まっている。図9は、図8の中央部の枠中の震源をA-Bに沿った断面を示した。Bの側からAの方へ傾き下がる震源分布が深さ130kmあたりまで見られるが、「1」「2」のイベントはそれから30km以上離れている。これらは、沈み込むスラブのほぼ延長部にあるため、やはりスラブ内イベントであると考えられる。実際、スラブの存在はこれまで震源分布で確認されていたが、震源分布下限の延長深部にも地震波から脆性破壊を起こさないスラブの存在は不思議ではない。この場合も、完全な脆性では無くなったため地震活動がほとんど起こらなくなった部分が地震活動を多数伴うスラブの深部延長に存在し、そこでは部分的に脆性を持つ領域が存在し、ときどき珍しい脆性破壊イベントを起こすと考えることが出来る。このようなスラブ内の低地震活動域は、同じフィリピン海

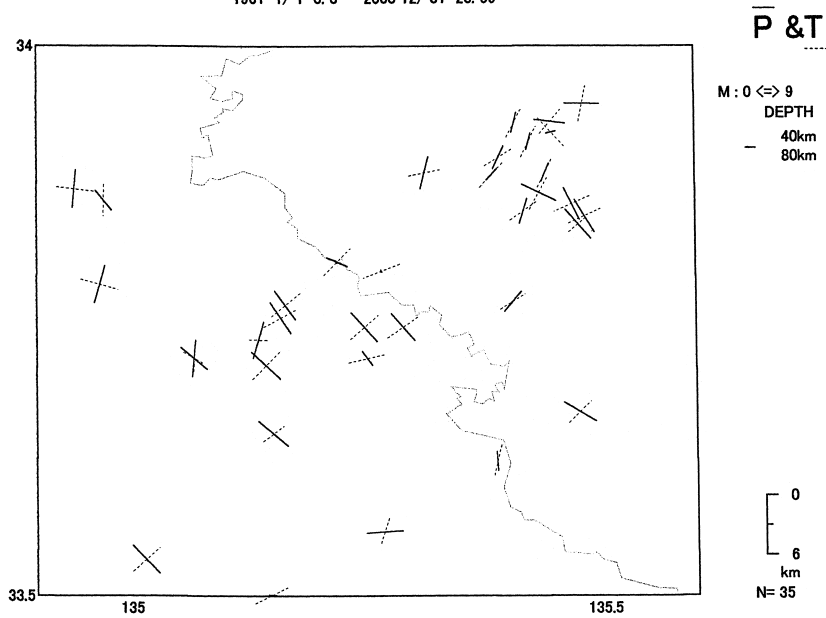


図 7 「Gap」近傍の P, T 軸の方位分布 .
 Fig. 7 P and T axes distribution near 'Gap' region.

表 1 図 8 の 3 個のイベントの震源パラメータ .
 Table 1 The source parameters of three events in Fig. 8.

No.	date	time	Location	M
1	1994 Aug 16	09 : 04 : 57.7	33.507N 131.345E 169.4 km	un
2	1999 Jun 26	01 : 09 : 55.8	33.511N 131.345E 178.5 km	un
3	2001 Mar 12	01 : 34 : 49.4	34.096N 131.885E 64.0 km	1.7

スラブには、大阪府下の深さ 80 km 付近の所でも見られる。したがって、震源分布から求められるスラブの先端は、データの蓄積と共にだんだん深くなって行くであろう。

一方、図 8 の「3」で示したイベントはこれとは異なっている。スラブの沈み込む方向 (C D) に震源分布の断面を示したのが図 10 である。震源が余り多くないため A B 断面の場合ほどスラブの形状が明瞭ではないが、D の側から深くなり、中央部では 70 ~ 80 km の深さになっている。しかし、「3」は、それより北西側のスラブのより深い側に

位置するにもかかわらず震源の深さは逆に 60 km 余りと浅い。そのため、このイベントは沈み込んだスラブの深部延長部で起きたイベントとは考えられない。一方、この付近のスラブの形状は、九州下へ急激に深くなる部分から四国から中国地方へ非常にゆるやかな傾斜を持つ沈み込みへとちょうど遷移する部分にあたる。この少し東側の安芸灘付近では 2001 年芸予地震のようにスラブを水平に引き裂くような正断層地震が起きている (小沢ほか, 2001)。したがって、この部分は単純な 1 枚のスラブ構造ではなく、切れて重なったり、

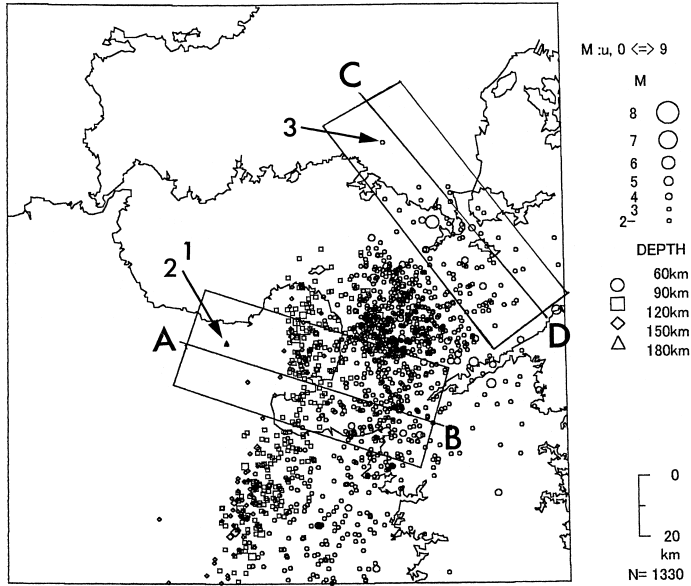


図 8 九州北東部と山口県周辺の震源分布図。
「1」「2」「3」のイベントが今回調べたもので、震源パラメータは表 1 に示した。

Fig. 8 Epicentral distribution in northwest Kyushu and Yamaguchi prefecture.
'1', '2', and '3' events are discussed in this study and shown by the parameters in Table 1.

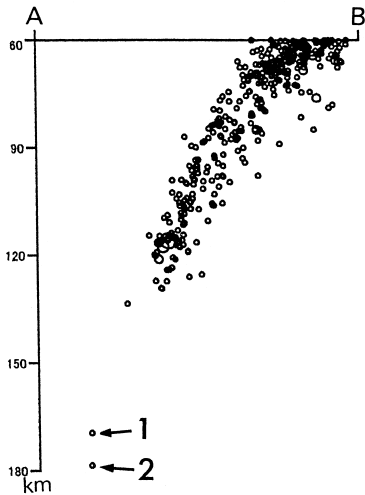


図 9 図 8 の枠内の震源を A B に沿った断面で示した。
「1」「2」は、図 8 と同じ。

Fig. 9 Cross-section distribution of the hypocenters in the rectangle along A-B line in Fig. 8.

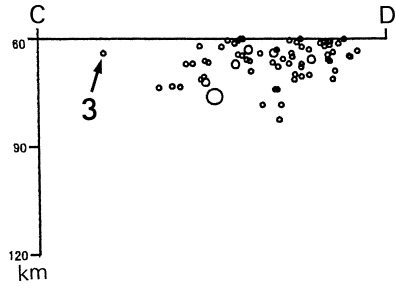


図 10 図 8 の枠内の震源を C D に沿った断面で示した。
「3」は、図 8 と同じ。

Fig. 10 Cross-section distribution of the hypocenters in the rectangle along C-D line in Fig. 8.

紀伊水道で見られたような千切れて切り離されたスラブの破片が存在している可能性も考えられる。

V. 議論とまとめ

ここで見たように紀伊半島，四国にかけての部分でフィリピン海スラブは，スラブが断裂し，千切れたり，屈曲したりと複雑な形状をしている。この原因は，南海トラフから沈み込むフィリピン海プレートの年代が若く，プレートの厚さが薄いため変形しやすく，断裂なども起きやすいと考えられる。また，Shiono (1982) は紀伊半島下の地震活動の特異な折れ曲がりの原因を，過去に活動した海嶺軸が沈み込んだことと結びつけている。過去の海嶺軸がトラフに交差する形で沈み込んでいることは，スラブの等深線にそってスラブの年代が異なることを意味している。このことは，スラブが水平方向に強度が異なることを意味しており，西南日本の下で見られる複雑な形状に関係している可能性が高い。しかし，紀伊水道下の震源がV字型分布を示しているものの，最近までのデータで詳細を見ると，一部に低活動域を含み，西側では同じ深さで地震帯が2列存在するなど，古い海嶺が沈み込んだことだけでは説明できない。

したがって，広域の応力場はスムーズに変化している点に注目するとフィリピン海スラブは，四国付近ではこれまで考えられていた場所よりもっと南側にあり（図1のA列），これまでのスラブの先端と考えられていた位置（同B列）は，千切れたスラブの破片が存在していると考えた方が震源分布を説明できる。

九州北東部と山口県では，これまでのスラブ内地震の分布からやや離れたところに震源が3個決まった。これらのうちの九州北東部のは，活発な地震活動を持つスラブの延長部に位置しており，脆性から非脆性へスラブが遷移しつつある部分で起きたものと結論した。山口県のイベントは，スラブが折り重なったり，千切れたりした部分で起きた可能性があることを示唆した。

謝 辞

なお，この論文中のイベント1, 2は，高橋道夫氏（気象庁）と木村昌三氏（高知大）の，イベント3は，西宮隆仁氏（内閣府，当時気象庁福岡管区気象台）の指摘によって知ったものでここに感謝いたします。

この研究は，科学技術振興調整費「南海トラフにおける海溝型巨大地震災害軽減のための地震発生機構のモデル・観測システムの高度化に関する総合研究」の援助を受けました。

文 献

- Fukuyama, E., Ishida, M., Horiuchi, S., Inoue, H., Hori, S., Sekiguchi, S., Kawai, H. and Murakami, H. (1999): NIED seismic moment tensor catalogue January-December, 1998. *Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, **193**, 1 35.
- Fukuyama, E., Ishida, M., Horiuchi, S., Inoue, H., Hori, S., Sekiguchi, S., Kawai, H., Murakami, H., Yamamoto, S., Nonomura, K. and Goto, A. (2000a): NIED seismic moment tensor catalogue January-December, 1999. *Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, **199**, 1 56.
- Fukuyama, E., Ishida, M., Horiuchi, S., Inoue, H., Hori, S., Sekiguchi, S., Kubo, A., Kawai, H., Murakami, H. and Nonomura, K. (2000b): NIED seismic moment tensor catalogue January-December, 1997. *Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, **205**, 1 35.
- Fukuyama, E., Ishida, M., Horiuchi, S., Inoue, H., Hori, S., Sekiguchi, S., Eguchi, T., Kubo, A., Kawai, H., Murakami, H., Yamamoto, S. and Nonomura, K. (2001a): NIED moment tensor catalogue January-December, 2000. *Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, **217**, 1 131.
- Fukuyama, E., Ishida, M., Horiuchi, S., Inoue, H., Kubo, A., Kawai, H., Murakami, H. and Nonomura, K. (2001b): NIED moment tensor catalogue January-December, 1998 (Revised). *Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, **218**, 1 51.
- 橋本徹夫・菊地正幸 (1999) 地震記象から見た1946年南海地震の震源過程. 月刊地球, 号外, **24**, 16 20.
- 石川有三 (1987) 気象庁震源データの変遷とその問題点. 験震時報, **51**, 47 56.
- 石川有三・濱田信生 (1985) 再決定震源に基づく日本の地震活動その1. 西南日本. 地震学会講演予稿集, No. 2, 15.
- 石川有三・石原和彦 (1999) フィリピン海スラブの形状, 月刊地球, 号外, **24**, 95 98.

- 伊藤 潔 (1990) 西南日本の地震活動とテクトニクス . 地震 , **43** , 555-569 .
- 角田寿喜・宮町宏樹・久保田裕史・高木章雄 (1992) 九州の内陸地震活動 , 地震 , **45** , 229-237 .
- 角田寿喜・後藤和彦・宮町宏樹・平野舟一郎・石原和彦 (1995) 地震活動からみた九州南部 南西諸島域のテクトニクス . 月刊地球 , **192** , 414-418 .
- 木村昌三・岡野健之助 (1994) 四国中・西部におけるマントル地震の震源分布の特徴 . 地震 , **47** , 11-19 .
- Kinoshita, Y. and Nakanishi, I. (1997): Subcrustal seismicity beneath the southern part of the Chugoku region. *Japan, J. Phys. Earth*, **45**, 307-312.
- 小西健二 (1965) 琉球列島 (南西諸島) の地質区分 . 地質学雑誌 , **71** , 437-457 .
- 溝上 恵 (1977) 地殻底地震活動の特性 . 地震予知シンポ (1976) , 97-105 .
- Mizoue, M., Nakamura, M., Seto, N., Ishiketa, Y. and Yokota, T. (1983): Tree-layered distribution of micro-earthquakes in relation to focal mechanism variation in the Kii peninsula, Southwestern Honshu, Japan. *BERI*, **58**, 287-310.
- 長宗留男 (1987) 九州 琉球列島における稍深発地震とテクトニクス . 地震 , **40** , 417-423 .
- 長宗留男・田代秀樹 (1989) 九州下における和達 ベニオフゾーンの形状 . 地震 , **42** , 13-19 .
- 中村正夫・渡辺 晃・許斐 直・木村昌三・三浦勝美 (1997) 西南日本外帯における地殻下地震の活動特性 . 京都大学防災研究所年報 , **40B** 1 , 1-20 .
- 中村正夫・瀬戸憲彦・木村昌三 (2000) 南海道地震余震域における地震の時空間分布と応力場の関係 . 日本地震学会講演予稿集 2000 , No. 2 , 132 .
- Nakanishi, I. (1980): Precursors to ScS phases and dipping interface in the upper mantle beneath southwestern Japan. *Tectonophysics*, **69**, 1-35.
- 小沢慎三郎・多田 堯・宮川康平 (2001) 地殻変動データから見た 2001 年芸予地震 (M_s6.8) . 地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会予稿集 , X0-P003 .
- Shiono, K. (1982): Frontal shape of the seismic slab by normal subduction of a dead spreading axis and a preliminary application to southwest Japan. *J. Osaka City Univ.*, **25** 2, 19-33.
- Shiono, K., Mikumo, T. and Ishikawa, Y. (1980): Tectonics of The Kyushu-Ryukyu Arc as evidenced from seismicity and focal mechanism of shallow to intermediate-depth earthquakes. *J. Phys. Earth*, **28**, 17-43.
- 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 , **38** , 193-202 .

(2001 年 6 月 29 日受付 , 2001 年 7 月 13 日受理)