



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	最近の世界的地震学データから見たインドネシア地域のサイスモテクトニクス
Author(s)	高波, 鐵夫; TAKANAMI, Tetsuo; 吉井, 敏尅 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 61, 203-219
Issue Date	1998-03-20
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.61.203
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14270
Type	departmental bulletin paper
File Information	61_p203-219.pdf



最近の世界的地震学データから見たインドネシア地域の サイスモテクトニクス

高波 鐵夫

北海道大学理学部付属浦河地震観測所

吉井 敏尅

東京大学地震研究所

(1997年12月22日受理)

Seismotectonics in Indonesia Inferred from the Recent World-Wide Earthquake Data

Tetsuo TAKANAMI

The Urakawa Seismological Observatory, Faculty of Science, Hokkaido University

Toshikatsu YOSHII

Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

(Received December 22, 1997)

In order to investigate the recent seismicity and the earthquake mechanisms in and around Indonesian archipelago, we used the International Seismological Catalogues from January 1964 to March 1992 and 210 moment tensor solutions in the period from January 1981 to January 1993 for the earthquakes which occurred there. The obtained results present the newly important findings for the recent tectonic development that they ascertained the truth of the active zones along the Andaman rift in the Andaman sea and along the boundary among the the Asian, Philippine Sea and Pacific Ocean plates and that the presence of many non-double couple earthquakes indicates the complex source processes in this region.

I. はじめに

インドネシア島弧およびその周辺は、地震活動が非常に高く、時々被害を伴う地震が起きている(たとえば、宇津, 1990)。ごく最近では、1992年12月12日のフロレス島地震(Mw 7.8)が起き、津波その他によって1700名以上の多数の死者が確認された(都司, 1993)。このような高い地震活動は、当地を取り囲む複数のプレート間の相対運動の結果であることはすでに多くの研究によって明かにされてきた(例えば、Oliver and Isacks, 1967; McKenzie and Parker, 1967; Morgan, 1968; Le Pichon, 1968; Isacks et al., 1968; Fitch, 1970; Osada and Abe, 1981; Nishimura and Suparka, 1986; Ghose et al., 1990)。

Fitch (1970)はインドネシア-フィリピンで起きた浅発地震の長周期地震記録のP波とS波とを解析し震源メカニズムを求めている。彼によれば、走向断層よりも低角逆断層と正断層とが卓越し、

とくに海溝と活火山帯に挟まれたスダ弧沿いでの浅発地震は低角逆断層タイプのもものがほとんどである。すなわち、島弧下での地震メカニズムは、2つのプレートが押し合って生じる低角逆断層タイプの地震が多い、と言える。地震のスリップ・ベクトルの方向は、西部スダ弧では北東に、セレス海の東縁およびその延長のフィリピン弧に沿っては西に向いている。一方ジャワ海溝付近の地震からは正断層タイプの地震メカニズムが求まり、沈み込むプレートが島弧下で曲げられその上面に引っぱりの力が働いて地震が発生しているのが理解できる。またスダ弧が湾曲しているため、島弧下に沈み込むプレートが北西側で浅くなっている。このように地震学データからの証拠が、プレートの相接する場での造構造運動、すなわちプレート・テクトニクスの一般的現象と大変よい一致が見い出されてきた (Oliver and Isacks, 1967; McKenzie and Parker, 1967; Morgan, 1968; Le Pichon, 1968; Isacks et al., 1968; Nishmura and Suparka, 1990)。

一般に当地域の地震から得られた地震学データと複雑な地域性とを考慮した合理的なテクトニクス・モデルとは、アジア、インド洋-オーストラリア、フィリピン海、そして太平洋の4大プレートの相対運動場に基づくものであり、地表の地学的諸現象がこれによって説明されてきた。さらに今日の観測機器の性能の向上、新しい地震波形解析法の導入などでより詳細なテクトニクスの解釈が期待されている。

本報告では、最近のインドネシア弧周辺に発生した地震の震源分布の空間表示と、比較的大きな地震のモーメント・テンソル解から計算されたP波放射のステロイド投影図の作成を行い、それらの空間分布が示した幾つかの新しい興味ある事実について紹介する。さらに議論のなかで今までの地質学的事実から考察されてきた当地のサイモテクトニクスの解釈が妥当であるかも考察する。

II. 資 料

観測機器、データ処理、そして計算機等の性能向上によって、中規模 ($mb > 5.7$) 以上の地震の震源パラメータを求める解析がルチーン的に行われるようになってきた。たとえば、ハーバード大学 (Dziwonski et al., 1981) と米国地質調査所 (Sipkin, 1982) によって、長周期実体波から震源パラメータのモーメント・テンソル表示を行う半自動アルゴリズムの開発が行われ、今日ではインターネットを通じて地震発生後間もなく震源パラメータが入手できるようになった。また1981年以降、米国地震情報センター (the National Earthquake Information Center, NEIS) からは、初動にもとづく断層面解と一緒にモーメント・テンソルの震源パラメータも地震速報 (the Preliminary Determination of Epicenters, Monthly Listing; PDE) で発表されるようになった。本報告で扱った210個の地震のモーメント・テンソル解は、1981年から1993年1月までに当地に発生した浅発地震から深発地震を含むすべて可能な限りの地震の波形インバージョンから求めたものである (Sipkin, 1986; Sipkin and Needham, 1986, 1991, 1992, and 1993)。なお1992年~1993年1月のデータはインターネットを介してSipkinから直接供与されたものである。一方地震の震源位置の情報は、東京大学地震研究所がISCから定期的に購入している地震報告 (ISC Bulletin) から得た。ここでは、1964年1月から1992年3月までの期間に当地域で起きた mb 4.5 以上の地震すべてを用いた。

III. 地質学的背景

1967年以前、主にオランダの研究者によって集められた当地の膨大な地質学的データからは、中生代末期以来インドネシアからフィリピンに至る地域で上下変動のみならず、大きな水平的変動が

あったのが認められた。たとえば、Brouwer (1925) は、この地域の基本の構造は島弧であると認識し、当地の代表的なスンダ弧は、より北側の火山性内弧と非火山性外弧とからなる2重弧であると述べている。Umbogorve (1948) によれば、スンダ弧とビルマの山脈地帯との層位的、および構造学的類似性から、この2重弧はインドネシアからヒマラヤまで続く大規模なものであるらしい。Peter・他 (1966) は地球物理学的手法によってアンダマン海西縁部に沿って走る2重弧を追跡している。またBrouwer (1925) によると、フィリピン東部には逆向きの島弧が存在している。すなわち、フィリピン東部は東向きフィリピン弧と、ハルマヘラ北西沿岸から走る火山列と連なる西向き島弧的構造とからなっている。さらにルソン島西岸沖の海底地形調査 (Ludwig・他, 1967) によれば、その海底地形がほとんどの島弧湾曲側に見られる地形と調和していた。したがってインドネシアからフィリピンに至る当調査地域には、少なくとも4個の島弧、もしくは島弧的な構造；スンダ弧、フィリピン弧、ハルマヘラ弧、そして西ルソン弧が存在している、と言えよう (Fig. 1)。Brouwer (1925) によれば、この複雑な地域の地質学的研究によって、中生代から続いた上下変動の証拠が数多く発見され、その中で、スンダ島弧の外帯で最も大きな島のチモール島で珊瑚礁が数百メートル隆起した大きな上下変動が確認された。彼はまた、近隣の島弧と無関係な環境をもつ島の存在から、かつて水平運動があったことを主張している。セレベス (スラウエシ) 島東方沖にあるスルー・スパー (Sulu

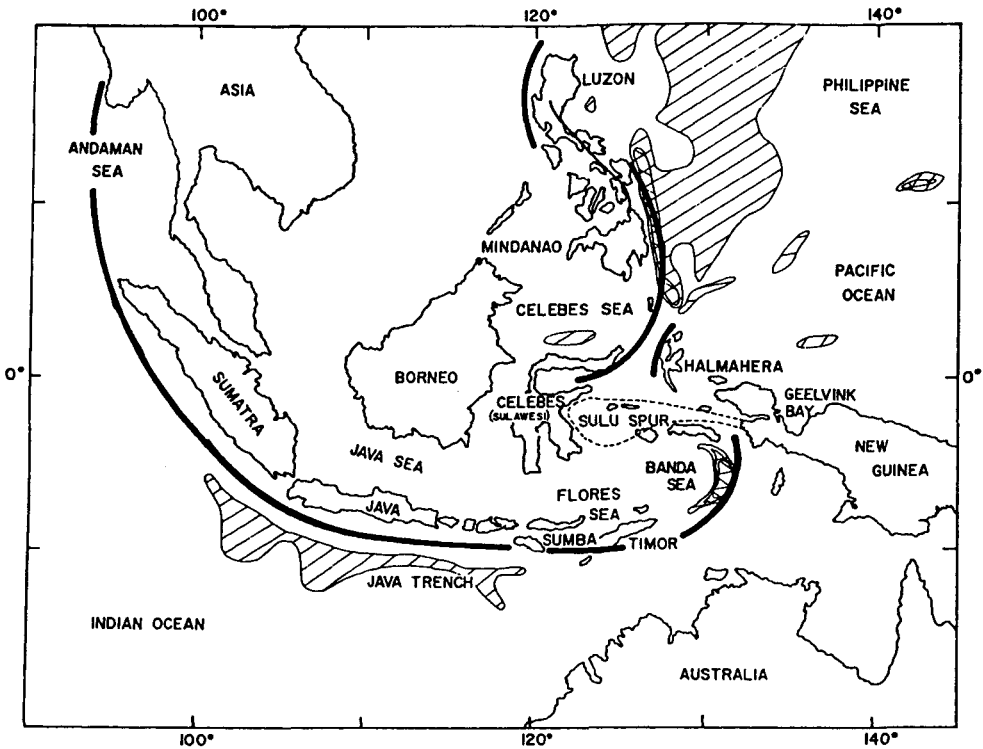


Fig. 1. The Indonesia-Philippine region (modified from Fitch, 1970). Striped and cross-striped areas indicate ocean depths greater than 6000 and 8000 meters respectively. The heavy curves indicate the extent of the Sunda, Philippine, Halmahera and western Luzon arcs. The curve through Luzon and continuing south to Mindanao indicates the trace of the Philippine Fault (Allen, 1962). The line crossing the westernmost peninsula of New Guinea (the Bird's Head region) represents the Sorong Fracture Zone.

-Spur) では、中生代より後の水平運動の存在を認めている。スルー・スパーの名前のごとく、狭い列島には中生代の堆積岩があり、その南北両側にある同年代の堆積層に対してそれはほとんど下部にある。このことは第三紀に広範囲の褶曲、または断層運動があったことを物語っている (Klompe, 1954)。多くの地質学者はスルー・スパー列島とニューギニア最西部との間に見られる岩石と地質構造の類似性に注目し、これはセレベス、セラム、ブル、その他周辺の島々がオーストラリア大陸の半安定な支脈の渡来によって極度のアーチ状形態を呈したとの結論を導き出した (Klompe, 1954)。

地震学的データからは、その支脈が小プレート、インド・オーストラリア、太平洋、そしてアジアなどのプレート群からなっていると示された (Fitch, 1970)。とはいえ、現在も小プレート間の相対運動は完全に理解されているとは言えない。

一方、一列の火山隆起帯がスダラ弧内帯を走っている。特に大きな島のスマトラ島とジャワ島とでその発達が目覚ましく、スマトラ地震 (1882) の際にはそれに沿って数メートルの食い違いが生じた (Richter, 1958)。

次章以降では、今まで述べてきたようなテクトニクス環境下にあるインドネシアおよびその周囲の地震活動、地震の起き方を、地震の震源分布、およびモーメント・テンソル解などの最近の地震学的データに基づいて調べ、それらと地質学的事実との関係を考察する。

IV. 震 源 分 布

当調査地域 (東経 90° ~ 140° , 南緯 13° ~ 13°) の最近の地震活動を見るために、ISC の地震報告を用いて震源分布図を作成した。1964年1月から1992年3月までの地震 (mb 4.5以上) の震央分布を、(a) : 0 km~33 km, (b) : 33 km~100 km, (c) : 100 km~200 km, (d) : 200 km~300 km, (e) : 300 km~400 km, (f) : 400 km~500 km, (g) : 500 km~600 km, (h) : 600 km~, 等の深さ別に図示したのが Fig. 2 であり、インドネシア弧に注目して作った垂直断面投影図の小区域別 (A~K) が Fig. 3 である。さらにこれらの震源分布図から推定される地震帯 (プレート上面) の等深線を図示したのが Fig. 4 である。前章で述べてきたテクトニクスとこれら新しい震源分布の様子がよく調和しているのが判る。4つのプレートが複雑に関係しながら沈み込んでいく様子が容易に理解できる。とくに主な等弧

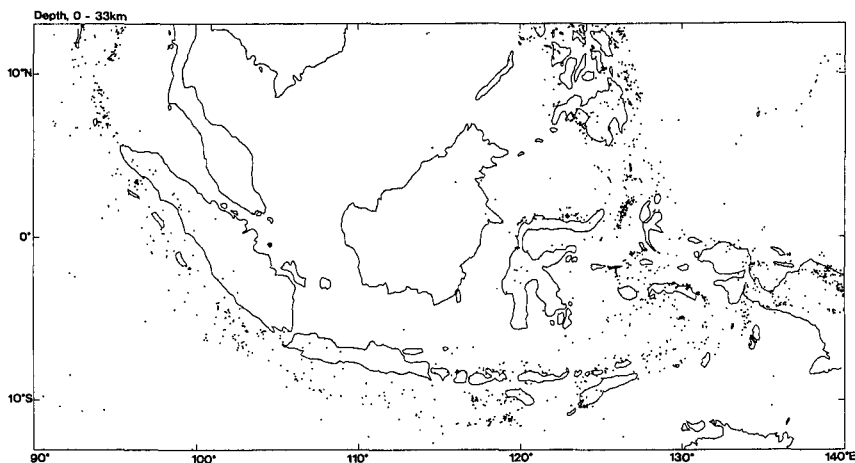


Fig. 2. Epicenters of earthquakes with magnitude 4.0 and larger reported by ISC for the period from Jan. 1964 to Mar. 1992. (a) : depth 0~33 km.

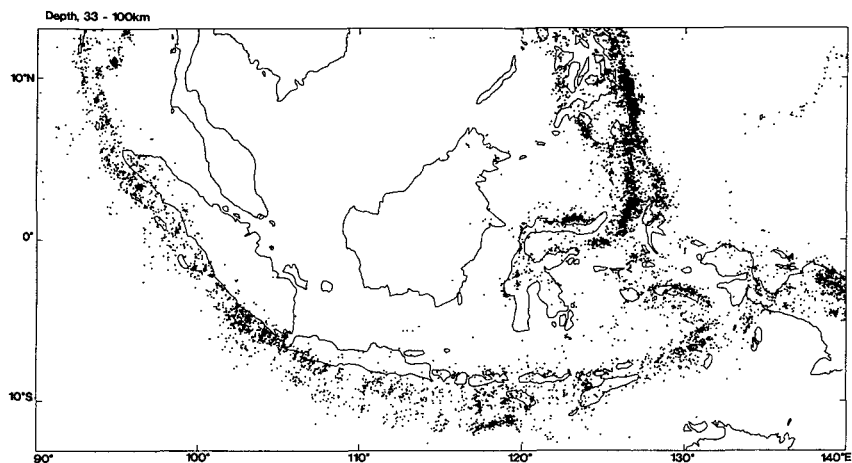


Fig. 2. (b) : depth 33~100 km.

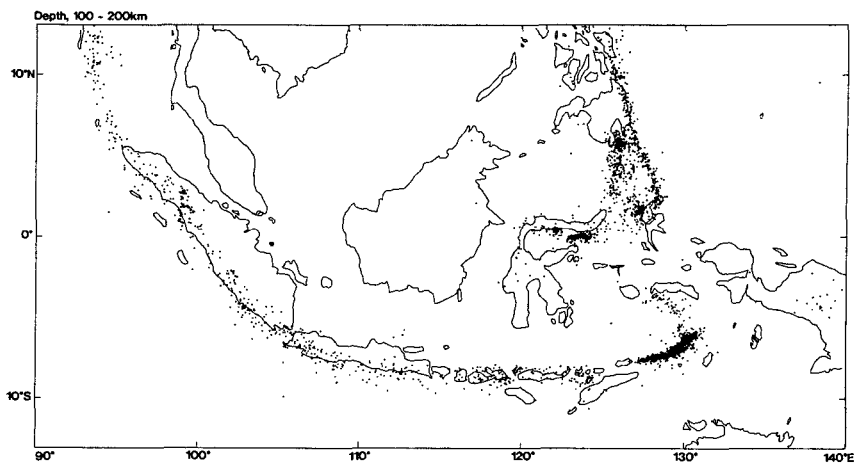


Fig. 2. (c) : depth 100~200 km.

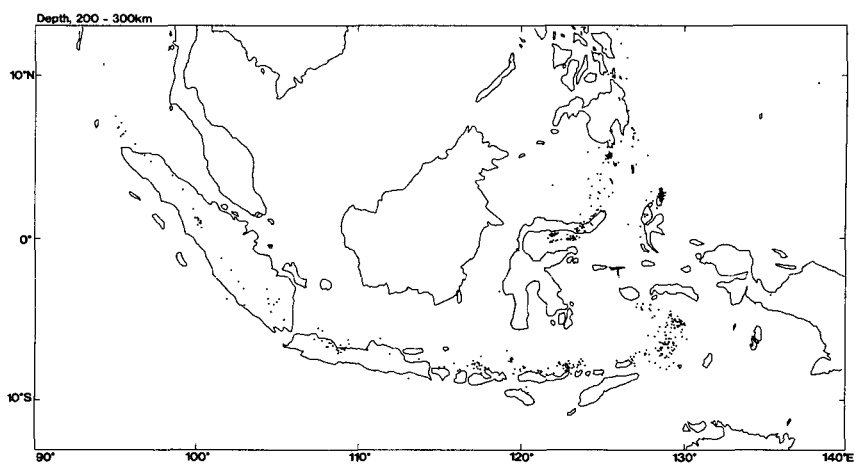


Fig. 2. (d) : depth 200~300 km.

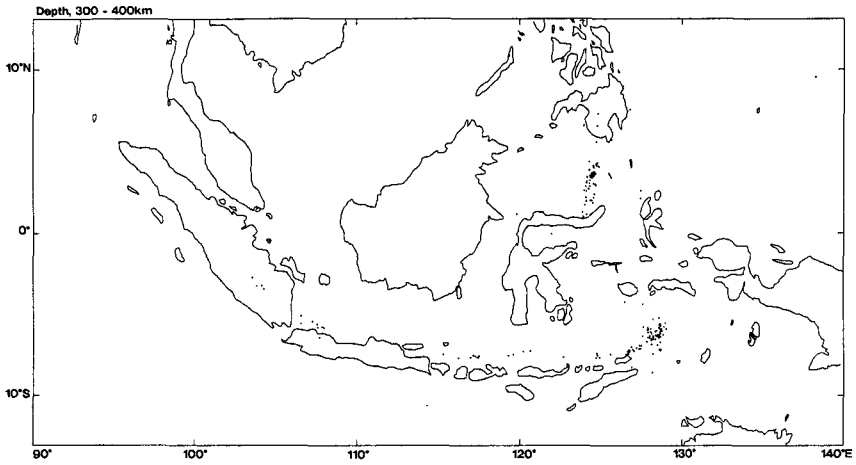


Fig. 2. (e) : depth 300~400 km.

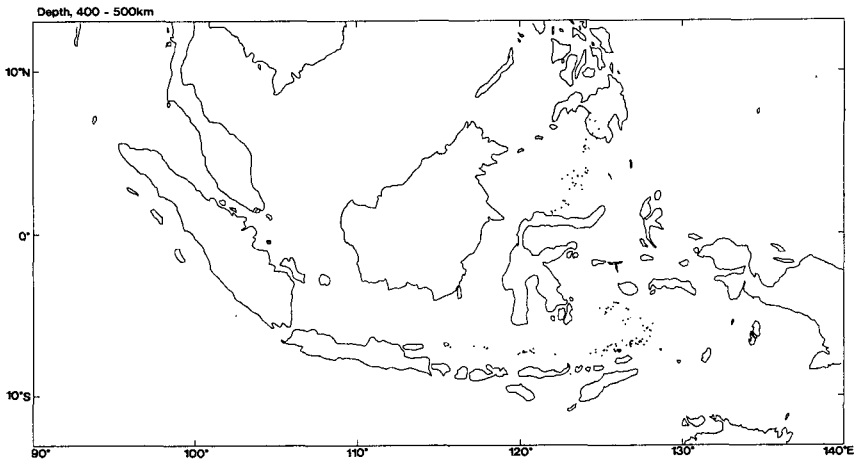


Fig. 2. (f) : depth 400~500 km.

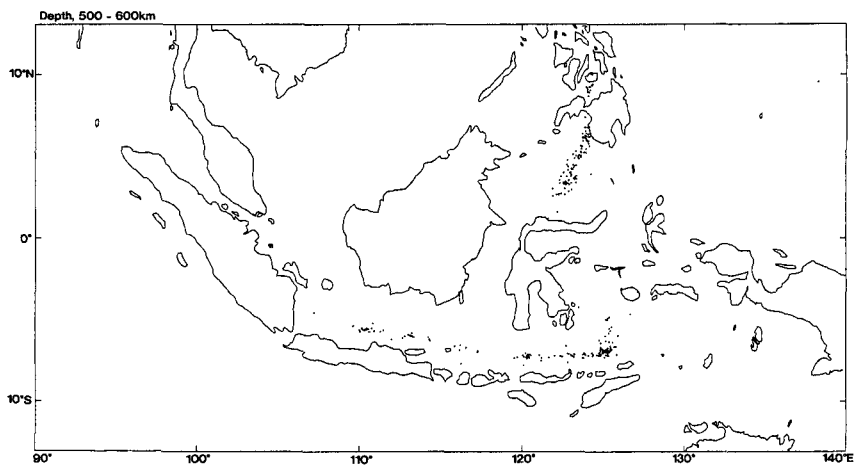


Fig. 2. (g) : depth 500~600 km.

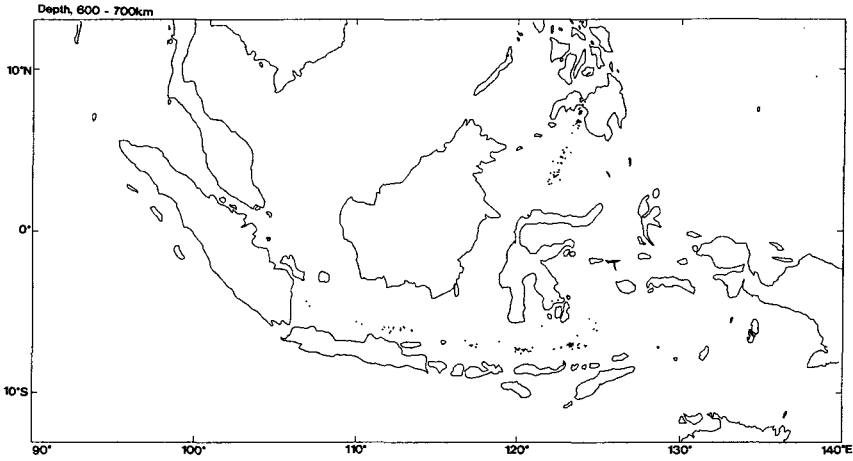


Fig. 2. (h) : depth 600 km~700 km.

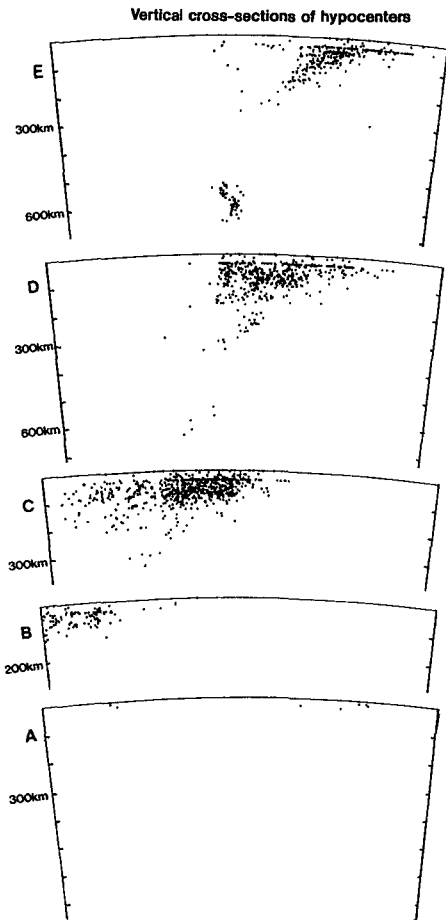


Fig. 3. (a) : Distributions of hypocenters projected on the N-S vertical planes of the sections A to E shown in Fig. 3(c).

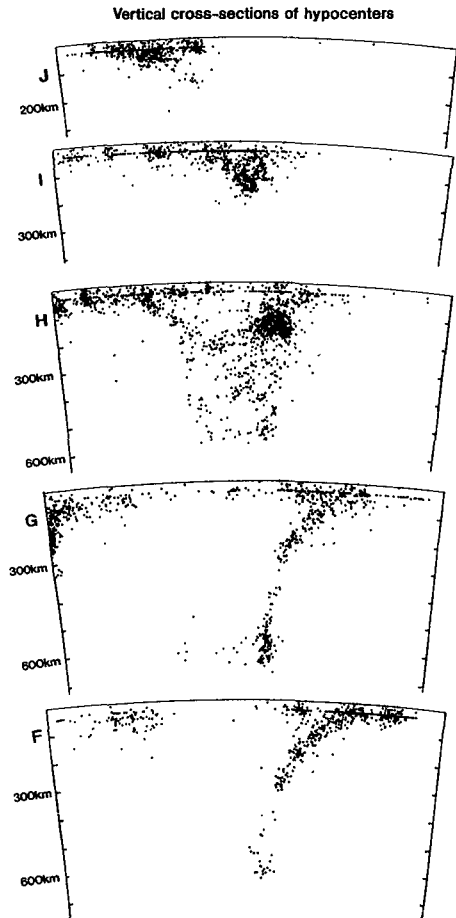


Fig. 3. (b) : Distributions of hypocenters projected on the N-S vertical planes of the sections F to J shown in Fig. 3(c).

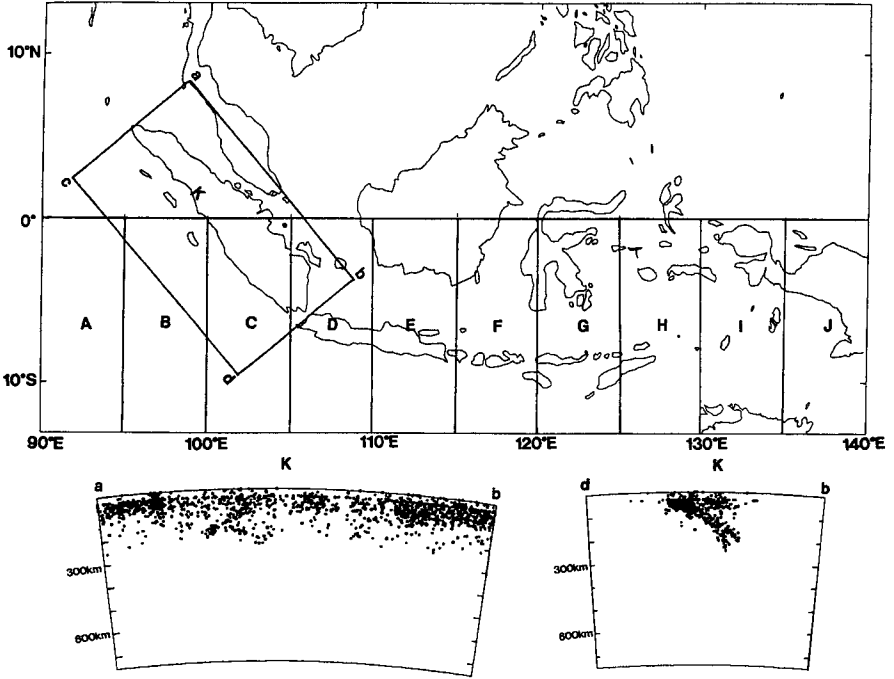


Fig. 3. (c) : Distributions of hypocenters projected on the vertical planes of lines ab and db of the section section K.

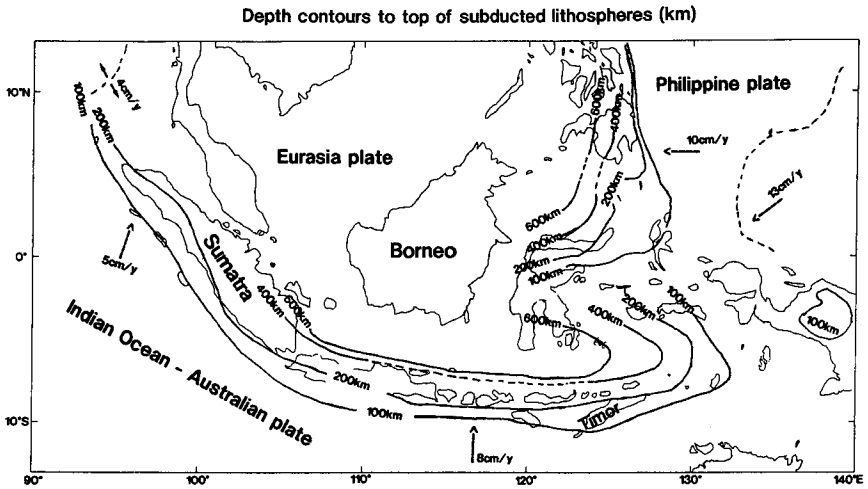


Fig. 4. Depth contours to the surface of the subducted lithospheres inferred from the distribution of hypocenters.

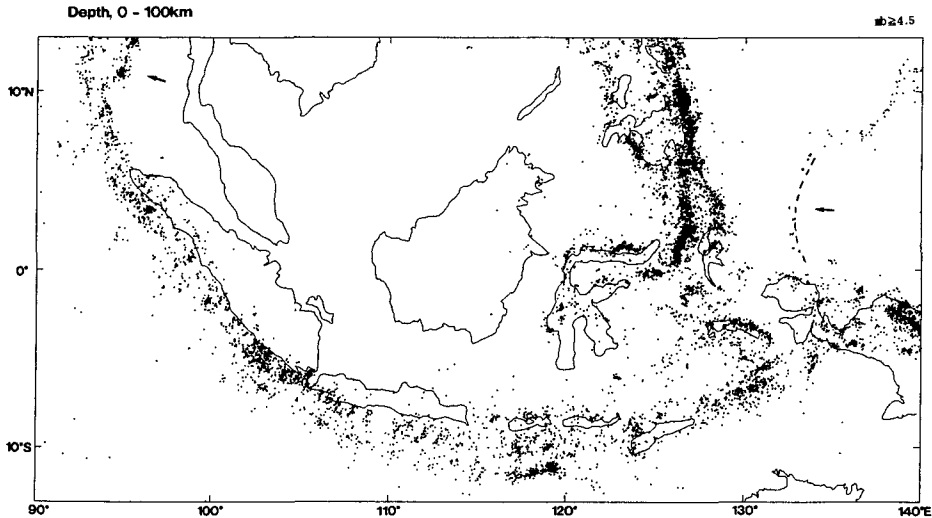


Fig. 5. Epicenters of shallow earthquakes (depth ≤ 100 km). Arrows indicate the newly finding shallow earthquake zones which place in the young tectonic zones as Andaman ridge and Ayu trough, respectively.

を形成する島の配列がほぼ深さ 100 km までの震源分布に大変よく調和している (Fig. 5)。その幅も 200 km を超えるところは稀で、細長い帯状の地震帯が当地のプレートの境界を明瞭に定めている。また、数は少ないが、より深い地震の震源分布からも細長い明瞭な地震帯が認められる。

一般に火山活動など他のテクトニックな活動域と関係する地震活動帯は、当地域を 4 つの大きな非活動域、またはプレート (アジアプレート、インド洋・オーストラリアプレート、フィリッピン海プレート、太平洋プレート) に分割している (Le Pichon, 1968; Barazangi and Dorman, 1969)。なかでフィリッピン海と太平洋のプレート境界は地震活動の低い海溝で定められるが、フィリッピン海の残りの境界は、地震活動で定義できる (Katsumata and Sykes, 1969)。詳細に見ると、ルソン島南部、ミンダオーセレベス間、セレベス-西ニューギニア間でのプレート境界の解釈はまだ色々とありそうである。震源分布だけからは決めかねるが、特にインドネシア弧東部については和達・ベニオフゾーンが東に激しく湾曲し、その内側の背弧にバンダ海を擁している。時々深さ 600 km を超える深発地震がその真下で起きている。Nishimura and Suparka (1986) は、地表の火山学的データや地質学的データから当地の構造発達発達史を紐といている。その中で、南部のチモール島、スンバ島の移動、北部のブルー島、セラム島の漂移があったと解釈している。また複雑な構造運動は背弧であるバンダ海とセレベス海の拡大に関係している、とも指摘している (Fig. 6)。

一方プレート境界ではないがアングマン海の中央を 1 つの細長い浅い地震活動帯が見られる。また太平洋プレートの南西端に西ニューギニアからパラオ諸島に伸びる細長い浅い地震活動帯が見られる。今までこれらはプレート境界としてあまり明確に定義されなかった地帯である (Fig. 5 に矢印で示す)。しかし、前者は、アマダグン海嶺の場所と一致し、後者は、アユ海底峡谷 (Ayu trough) のある場所であり、ともに現在伸張の場にある。これらの浅発地震帯がそのテクトニクスを反映したものと思われる。

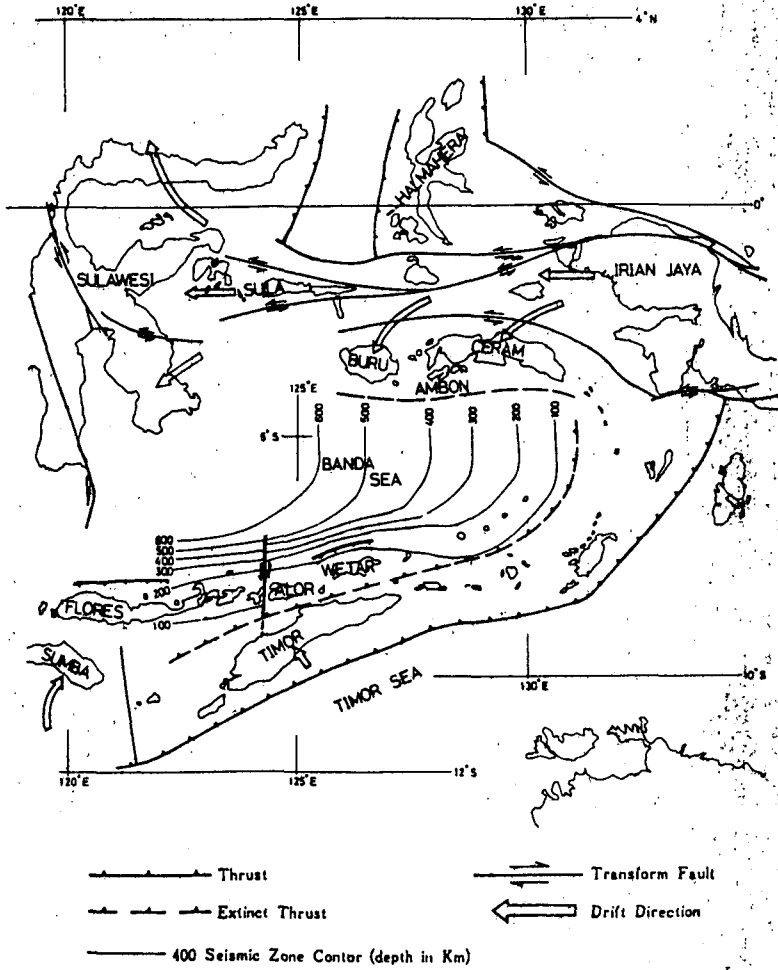


Fig. 6. Tectonic map of the eastern part of Indonesia (referred from Nishimura and Suparka, 1986). The outer non-volcanic arc in eastern Indonesia, especially Sumba, Timor, and Seram, Australian continent before the Upper Jurassic at rather high latitude in the southern hemisphere and in a position rotated clockwise or counterclockwise.

V. モーメント・テンソル解と非ダブル・カップル地震

地震の波形インバージョンから求めた震源のモーメント・テンソル解 (Sipkin, 1986 ; Sipkin and Needham, 1986, 1991, 1992, and 1993 ; 1992年1月~1993年3月の解はインターネットを介して Sipkin から直接供与されたもの) から当調査地域に起こった 1981年1月から 1993年3月までの地震を 210個抽出し、その分布の様子を調べた。

すでに Sipkin (1986) が指摘しているように、彼の計算結果によれば大きなモーメント ($M_0 > 10^{27}$ dyne-cm) の地震以外、ほとんどの地震のスカラー・モーメントはハーバード大学のセントロイド・モーメント・テンソル (CMT) と一致しているか、若干大きめに求めている。これは、横方向の非均質性をモデルに入れていないためのバイアスがスカラー・モーメントの CMT 解を小さくさせていると考えられている。しかし、大きい地震の場合は、複雑な震源過程が CMT 解より小さく見積もるようなバイアスが掛かっていると考えられ、多分大きめの地震の場合は CMT 解の方が真の値に近いであろう。しかし、いずれにしても当地域の大規模のテクトニクスを議論するのに、それらの違いが大きく間違った結論を導き出すことはないと思われる。

さて、当地域の地震メカニズムの解析に関しては、たとえば Fitch (1970) が行った結果がある。そして Ghose・他 (1990) はスダ弧の沈み込む様子を各種の地球物理学データを参考にしながら 3 次元的シミュレーションの実験を行っている。これらの今までの地震メカニズムの解析から導き出された一般的な結果を整理すると、当地域の地形変形の卓越モードは、ほとんど低角逆断層と正断層からなっていて、走向断層は少ない。最も地震活動の高い、スダ弧とフィリピン弧に沿った浅い地震活動帯は海溝と活火山列との間にあり、これらの地震帯に起きる地震のメカニズムは、島弧の下に向かって滑り込む低角の断層面を持った低角逆断層タイプが主流である。地震の滑り方向は、西スダ弧の湾曲部に沿っては北東に、フィリピン弧とその延長のセレベス海東縁に沿っては西向きになっている。ジャワ海溝とフィリピン海溝の下で正断層の地震があり、これは島弧下で曲げられたリソスフェア上面の伸張場によるものである。またスダ弧の湾曲が島弧下の斜めに傾いた地震帯 (和達・ベニオブゾーン) を浅くさせている。またスダ弧下の地震帯の長さや形状が、負の重力異常分布や海溝の最大深度と相関関係にある。一方ほとんど直線に近いフィリピン弧の下にある斜めの地震帯は、弧の南から北に向かって、滑り速度の減少とともに次第に浅くなっている。西ニューギニア、スルー・スパー、そして小さなフィリピン群島などの複雑な地域では、大きなプレートに影響を受けた小プレートが数多く存在している。

ここで当地のテクトニクスを、最近の地震学の解析結果に基づいて見直すために、調査地域に起きた mb 5.8 以上の地震を抽出し、それらの震源のモーメント・テンソル解から計算されたベスト・ダブル・カップル解の主軸 (ここでは P 軸) の向きを地図上にプロットした (Fig. 7(a)~(c))。この図から、インドネシア弧で沈み込むインド洋・オーストラリアプレートでの応力状態の変化がプレートの衝突に伴うプレート変形で読み取れる。まずプレートの沈み込む前の浅い地震帯で、水平面に投影した P 軸がその進む方向に直交している。これはその周辺でプレートの上屈曲に伴う正断層タイプの地震が卓越していることを暗示したものである。プレートがさらに潜り込んだ海溝の下ではプレートの進行方向と一致した P 軸分布が認められる。その方向はプレートの回転運動によって変化している、と理解できる。さらに深く沈み込んだプレートの P 軸分布は、ジャワ島から東部のバンダ海、フィリピンに至る限定された地域にしか存在しないが、プレートの潜り込む様子を反映したものとなっている。地表で見られた複雑なテクトニクスの場合では、深部プレートの潜り込む様子にも同様に複雑さが反映しているのを見て取れる。

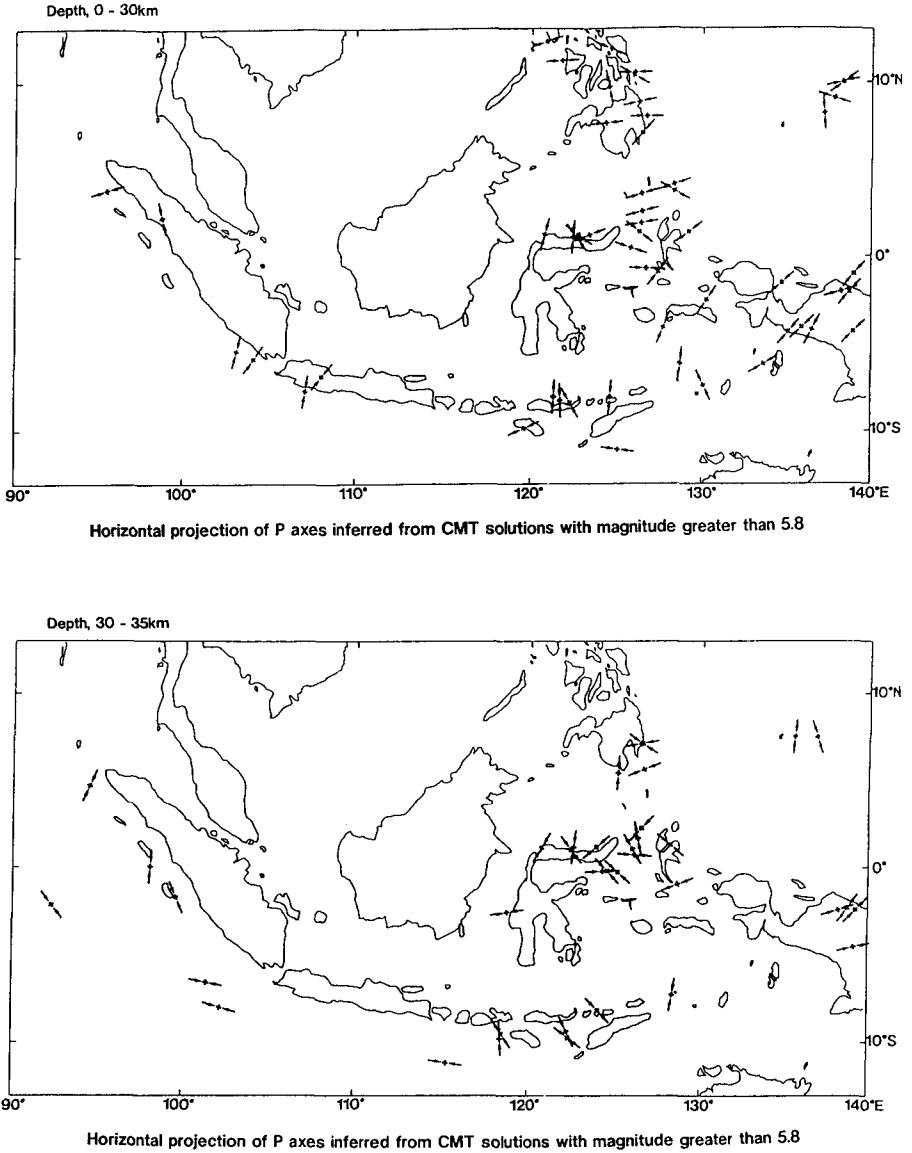


Fig. 7. Distributions of principal P-axes projected on the surface of earth inferred from the best double-couple mechanisms calculated from the moment-tensor solutions. (a) : depth 0~30 km and 30~35km.

一般にこのような複雑な地震メカニズムを示す1つの指標として非ダブル・カップル性が考えられる。当地域の多くの地震は、その様な非ダブル・カップル性の強い地震であった。ここで代表的な27個の地震のモーメント・テンソル解を図示したのが Fig. 8 であり、それらの震源情報は Table 1 に示した。

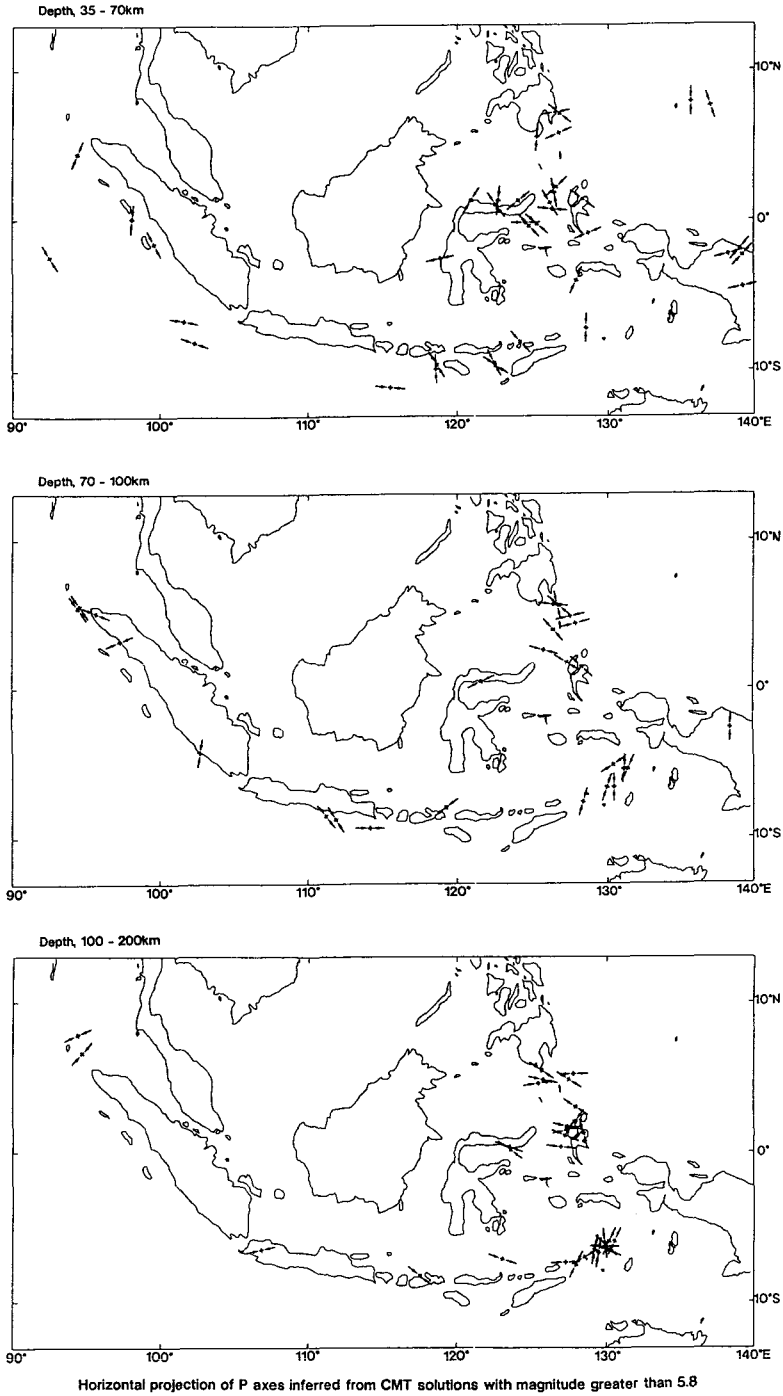


Fig. 7. (b) : depth 35~70 km, 70~100 km, and 100~200 km.

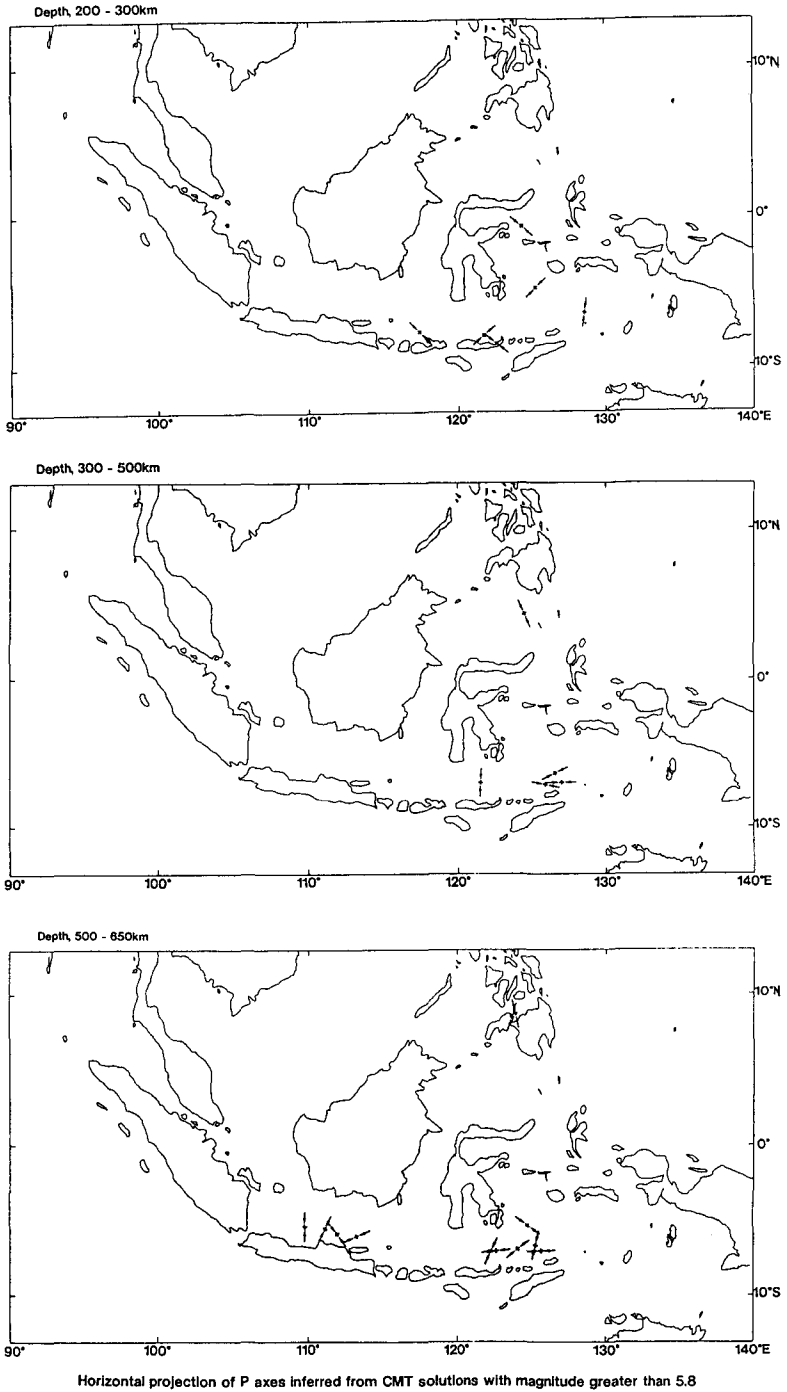


Fig. 7. (c) : depth 200~300 km, 300~500 km, and 500~650 km.

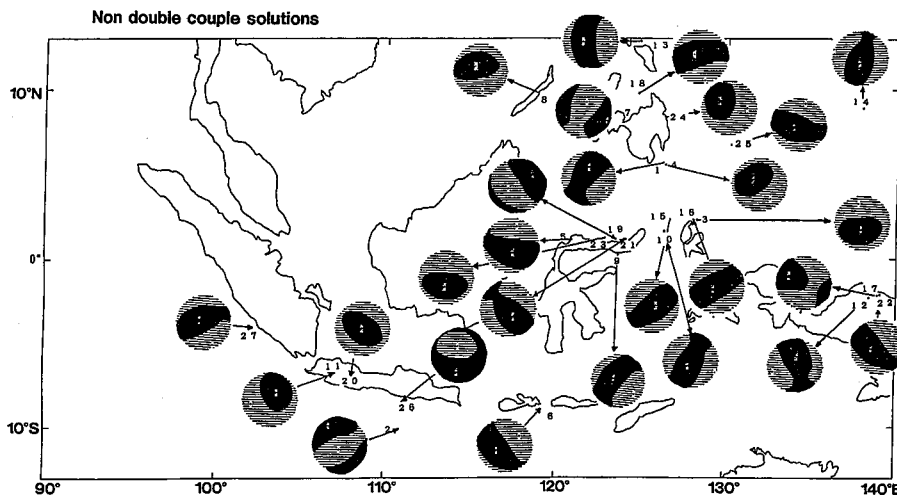


Fig. 8. Equal area projections of the moment-tensor solutions of non-double-couple earthquakes. Striped and dark areas indicate compressional motion toward the source and dilatational motion away from the source, respectively.

Table 1. Source parameters of the earthquakes plotted in the Fig. 6.

No. of event	Date yrs-m-d	Origin time hrs:min sec	Lat. °	Long. °	Depth km	mb
1	1983-02-12	08:47 12.7	5.669N	126.297E	51	5.7
2	1983-04-16	12:57 00.0	10.161S	110.890E	57	5.9
3	1983-05-11	00:12 07.0	2.293N	128.340E	125	5.7
4	1983-07-14	19:47 46.5	5.557N	126.452E	43	5.8
5	1983-10-27	19:43 48.4	1.093N	120.833E	28	5.7
6	1983-10-31	17:37 56.3	9.016S	119.180E	83	6.0
7	1984-03-05	03:33 51.0	8.147N	123.762E	649	6.5
8	1984-10-04	16:31 53.4	9.809N	118.780E	34	5.8
9	1985-01-11	14:41 58.6	0.196N	123.582E	189	5.9
10	1985-04-13	03:00 0.68	1.622N	126.411E	51	6.4
11	1985-10-09	01:15 04.7	6.791S	107.082E	153	5.9
12	1987-10-25	16:54 05.7	2.323N	138.364E	33	6.2
13	1987-11-18	16:27 05.3	12.845N	124.770E	22	5.9
14	1988-07-03	11:43 12.7	8.919N	137.896E	15	5.9
15	1989-02-10	11:15 24.7	2.305N	127.760E	44	6.2
16	1989-07-22	05:02 11.5	2.299N	128.142E	142	6.4
17	1989-11-25	07:49 44.2	2.179S	138.862E	26	5.9
18	1990-02-08	07:15 32.2	9.755N	124.694E	26	6.2
19	1990-04-19	12:40 38.7	1.108N	123.429E	24	5.8
20	1990-07-06	00:16 20.4	6.904S	108.120E	14	5.8
21	1990-12-13	12:26 40.6	1.116N	124.034E	33	6.0
22	1991-01-25	17:38 36.5	2.152S	139.020E	22	5.9
23	1991-06-20	05:18 52.5	1.196N	122.787E	31	6.2
24	1991-11-13	11:12 13.2	8.361N	126.371E	36	6.1
25	1992-05-04	08:45 01.7	6.762N	130.229E	86	5.9
26	1992-06-09	00:31 56.3	8.474S	111.100E	64	5.9
27	1992-11-25	06:02 25.3	4.069S	102.160E	58	5.9

VI. 議論およびまとめ

本論文で扱ったインドネシア島弧およびその周辺地域の現在のテクトニクスは、4つの大きなプレートの相対運動で表現できることが、最近の地震学データからも支持された。同時に、非ダブル・カップル性地震がほとんどの地域で見い出され、大変複雑なテクトニクスの場にあることも再確認された。このような純粋のダブル・カップル震源から有意に離脱したモーメント・テンソル解の地震は、しばしばインバージョンに用いた波形データのS/N比、仮定した地下構造などがこの種の問題に起因していると、疑われることがある。しかし、現実の震源での物理現象として解釈することもできる。すなわち非ダブル・カップルのモーメント・テンソル・インバージョンには、震源の多重性、非平面的断層面上での破壊、そして高圧流体中での伸張疲労など実際の物理的現象をも含んでいる。したがって、このような場合には非ダブル・カップル成分が、データの質の問題以上にインバージョンに直接反映するであろうし、震源の物理を解明するための重要な要素となりうるであろう。すでに Kuge and Kawakatsu (1993) は稍深発地震や深発地震において非ダブル・カップル成分が有意に認められ、スラブ内での顕著な歪解放の状態に呼応していて、その歪の存続期間は、部分的または全体的に震源自身、または震源近傍のスラブの構造に起因していると主張している。だとすれば、数多い非ダブルカップル成分の存在は、当地域のテクトニクスの複雑さを暗示したものと解釈できる。また今回示した新しい震源の空間分布からは、島弧下または、島弧的構造下におけるスラブの形状がより鮮明になった。そしてアンダマン海にあるアンダマン海嶺と一致した浅い地震帯の存在やハルメヘラ海東部のアユ海底峡谷の浅い地震帯の存在などは、新しいプレート運動を展開する際の重要な証拠を提供したと考えられる。

謝辞 本論文は、1994年1月から24日ベトナムのハノイ市で開催されたワークショップ“東南アジアにおけるサイモテクトニクスと地震災害”に招待されたときに準備したものである。インドネシア島弧およびその周辺のテクトニクスについての調査の機会を与えて下さった国立ベトナム科学研究センター地球物理学研究所教授のウエン デイン シェン (Nguyen Dinh Xuyen) 氏、およびユネスコ地球科学部門の橋爪道郎氏に、そしてさらに著者の一人、高波に1997年1月から約3ヵ月間、インドネシア鉱山資源エネルギー省、地質研究開発センター (GRDC) のサイモテクトニクス部に滞在させ、現地での貴重な学術情報を得る機会を与えて下さった、九州大学名誉教授相原安津夫氏、北海道大学理学部附属海底地震観測施設長島村英紀氏、そしてGRDC、ジャカルタ日本大使館、JICA 本部、および JICA ジャカルタ支部の関係スタッフに、また当地域の新しい地震のモーメント・テンソル解を快く提供して下さいました米国地質調査所のシプキン氏 (Stuart A. Sipkin) に、心からの謝意を表します。

文 献

- Allen, C. R., 1962, Circum-Pacific faulting in the Philippine-Taiwan region, *J. Geophys. Res.*, **67**, 4795-4812.
- Barazangi, M. and J. Dorman, 1969, World seismicity map of ESSA Coast and Geodetic Survey Epicenter DATA for 1961-1967, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **59**, 369-380.
- Dziewonski, A. M., T. A. Chou, and J. H. Woodhouse, 1981, Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, *J. Geophys. Res.*, **86**, 2825-2852.
- Fitch, T. J., 1970, Earthquake mechanisms and island arc tectonics in the Indonesian-Philippine region, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **60**, 565-591.
- Ghose, R., S. Yoshida, and K. Oike, 1990, Three-dimensional numerical simulation of the subduction dynamics in

- the Sunda arc region, Southeast Asia, *Tectonophysics*, **181**, 223–255.
- Isacks, B., J. Oliver and L. R. Sykes, 1968, Seismicity and the new global tectonics, *J. Geophys. Res.* **73**, 5855–5899.
- Katsumata, M. and L. R. Sykes, 1969, Seismicity and tectonics of the Western Pacific: Izu-Mariana–Caroline and Ryukyu-Taiwan regions, *J. Geophys. Res.*, **74**, 5923–5948.
- Brouwer, H. A., 1925, *The geology of the Netherlands East Indies*, Macmillan Co., New York.
- Klompke, th. H. F., 1954, The structural importance of the Sulu-Spur (Indonesia), *Madjalah Ilmu Alam Untuk, Indonesia*, **110**, 21–40.
- Kuge, K. and H. Kawakatsu, 1993, Significance of non-double couple components of deep and intermediate-depth earthquakes: implications from moment tensor inversions of long-period seismic waves, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **75**, 243–266.
- Le Pichon, X., 1968, Sea-floor spreading and continental drift, *J. Geophys. Res.*, **73**, 3661–3705.
- Ludwig, W. L., D. E. Hays and J. I. Ewing, 1967, The Manila trench and West Luzon trough- I, Mathymetry and sediment distribution, *Deep-Sea Research*, **14**, 533–544.
- McKenzie, D. and R. L. Parker, 1967, The North Pacific: An example of tectonics on a sphere, *Nature*, **216**, 1276–1280.
- Morgan, W. J., 1968, Rises, trenches, great faults and crustal blocks, *J. Geophys. Res.*, **73**, 1959–1982.
- Nishimura, S. and S. Suparka, 1986, Tectonic development of East Indonesia, *J. Southeast Asia Earth Sci.*, **1**, 45–57.
- Nishimura, S. and S. Suparka, 1990, Tectonics of East Indonesia, *Tectonophysics*, **181**, 257–266.
- Oliver, J. and B. Isacks, 1967, Deep earthquake zone, anomalous structures in the upper mantle, and lithosphere, *J. Geophys. Res.*, **72**, 4259–4275.
- Osada, M. and K. Abe, 1981, Mechanism and tectonic implications of the great Banda Sea earthquake of November 4, 1963, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **25**, 129–139.
- Peter, G., L. A. Weeks and R. E. Burns, 1966, A reconnaissance geological survey in Andaman Sea and across the Andaman-Nicobar Island arc, *J. Geophys. Res.*, **71**, 495–509.
- Richter, C. F., 1958, *Elementary Seismology*, W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Sipkin, S. A., 1982, Estimation of earthquake source parameters by the inversion of waveform data: Synthetic waveforms, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **30**, 242–259.
- Sipkin, S. A., 1986, Estimation of earthquake source parameters by the inversion of waveform data: Global seismicity, 1981–1983, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **76**, 1515–1541.
- Sipkin, S. A. and R. E. Needham, 1989, Moment tensor solutions estimated using optimal filter theory: Global seismicity, 1984–1987, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **57**, 233–259.
- Sipkin, S. A. and R. E. Needham, 1991, Moment tensor solutions estimated using optimal filter theory: Global seismicity, 1988–1989, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **67**, 221–230.
- Sipkin, S. A. and R. E. Needham, 1992, Moment tensor solutions estimated using optimal filter theory: Global seismicity, 1990, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **70**, 16–26.
- Sipkin, S. A. and R. E. Needham, 1993, Moment tensor solutions estimated using optimal filter theory: Global seismicity, 1991, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **75**, 199–204.
- 都司嘉宣, 1993, 1992年インドネシア国フローレス島地震とその津波に関する調査研究, 平成4年度科学研究補助金(総合A)研究成果報告書, 研究課題番号 04306024, 研究成果報告番号 No. B-4-4.
- Umbgrove, J. H. F., 1948, The origin of deep sea troughs in the East Indies, *Int. Geol. Congr. 18th*, London, Report 8.
- 宇津徳治, 1990, 世界の被害地震の表, 古代から1989年まで, 東京大学地震研究所, 地震活動部門.