京都大学防災研究所年報　第35号 B-1　平4．4
Annuals, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 35 B-1, 1992

四国東部および周辺地域における地震の発震機構

許斐　直・渡辺　晃・伊藤　潔・近藤　和男

FOCAL MECHANISM SOLUTIONS OF EARTHQUAKES IN THE EASTERN PART OF SHIKOKU AND ITS VICINITY

By *Tadashi* KONOMI, *Hikaru* WATANABE, *Kiyoshi* ITO, *Kazuo* KONDO

Synopsis

Focal mechanisms of 60 earthquakes are determined in the eastern part of Shikoku and its vicinity from P first motions. The events shallower than 23 km have maximum pressure axes of east-west direction, on the contrary events deeper than 23 km have these of north-south direction. The distribution of the earthquakes in the uppermost mantle dips from the Nankai trough to the Median Tectonic Line and maximum pressure axes show down-dip comprresion along the dip direction of distribution of them. Furthermore, maximum tension axes lie east-west direction in the distribution of the deeper earthquakes. A few earthquakes with normal faults are found in the upper mantle of central Shikoku and Kii Channel. This complex feature of focal mechanisms shows the detailed structure of the Philippine sea plate in this region.

1. はじめに

四国地方の地震に対するこれまでの研究から，深さ約 23 km を境にしてそれより上部の地殻内地震とそれより深いマントル地震が明瞭に分けられ，互に直交する東西及び南北の主圧力によって発生していることが知られている。このことは最初，震央を重ね合わせて観測点の初動の押しと引きの分布を，各々の深さに属する地震に分けて調べることによって見出された[1]。次に，かなり多くの観測点で初動がとらえられた地震のほとんどが，横ずれ型の地震であることから，横ずれ型を仮定して主圧力軸の方向を求めその方位角の頻度分布を示してその直交性が見事に表現された。さらに，可能なものについては震源球解の検討も行われ，そのほとんどは横ずれ型で，わずかに紀伊水道より南側の海域で明瞭なディップ・スリップ型のものが認められると言うものであった[2]。上記の主圧力軸の方位についてはさらに多くの地震に対して調べられ，その直交する二つの卓越方向は疑問の余地が無いものとなった[3]。

ところで，徳島観測所の新しい観測システム[4]が稼働してから約6年の期間が経ち，観測データも蓄積されてきて，上述の研究で不十分と思われる震源球解による起震力の詳細な議論も可能と思われるので，周辺観測点データを補充してメカニズム解を決定することを試みた。

2. データ及び解析方法

今回解析した地震を解析の結果とともに **Table 1** に示す。徳島観測所の自動処理システムが稼働し始めた1985年5月から験震方法に若干の変更があった1988年9月までの60個であり，その震源の位置を **Fig. 1**

Table 1. List of focal parameters and focal mechanism solutions obtained in this study. N1 and N2 indicate nodal planes. P, T and N indicate pressure, tension and null axes, respectively. ND denotes total of first motions used for mechanism determination. SC shows the score of mechanism solution. A and D indicate dip direction measured clockwise from the north and dip angle, respectively

No.	Date Y M D	Time H M S	Lonitude (°E)	Latitude (°N)	H (km)	M	N1 A	N1 D	N2 A	N2 D	P A	P D	T A	T D	N A	N D	ND	SC
B-3	850503	214933	134 45 28	33 53 27	11.3	3.4	232	61	323	88	102	22	4	19	236	60	26	100
B-4	850520	215231	133 39 29	33 33 29	38.0	3.7	339	82	70	87	205	07	114	03	360	82	18	94
B-6	850712	051206	134 54 06	33 50 25	42.3	3.0	186	75	89	65	226	07	319	29	124	60	28	100
B-10	850725	092429	134 44 43	33 37 57	41.5	5.2	297	39	51	72	191	50	77	19	333	33	27	96
B-12	850728	014501	134 47 57	33 41 10	35.0	3.5	323	74	230	82	187	06	96	17	297	72	22	96
B-13	850730	172855	134 43 20	33 37 24	43.0	4.0	300	50	66	55	187	59	92	03	360	31	18	100
B-18	850827	053613	134 39 30	33 50 53	35.9	3.3	164	62	270	62	37	41	307	00	217	49	17	100
B-AA	850901	145701	134 01 44	33 51 20	27.0	2.8	116	53	207	90	348	25	245	25	117	53	18	97
B-19	850906	222224	133 56 27	33 47 45	19.8	3.5	283	45	114	45	108	00	18	84	198	06	20	96
B-20	850909	143218	134 47 13	33 40 38	37.1	3.6	130	86	222	72	355	16	87	09	207	72	33	94
B-22	850911	045247	134 47 57	33 41 09	31.4	4.5	309	89	219	79	353	07	85	09	225	79	24	98
B-23	850920	194025	134 50 33	33 43 51	29.2	4.9	307	84	217	85	172	01	82	08	270	82	41	97
B-24	850922	024801	134 47 38	33 41 39	38.9	3.0	343	69	249	80	207	07	114	22	315	67	29	97
B-25	850926	014412	134 27 46	34 05 33	10.2	3.2	69	72	326	54	104	12	203	39	360	49	18	94
B-26	850927	085638	134 45 24	33 39 00	39.1	4.7	310	85	215	43	343	27	94	35	225	43	40	100
B-27	850927	120630	134 45 56	33 38 34	35.0	3.3	309	80	41	78	175	16	265	01	360	74	28	97
B-30	851021	163449	134 45 55	33 38 24	36.9	2.9	311	67	51	68	181	33	91	01	360	57	18	100
B-31	851030	013648	134 45 39	33 39 53	42.1	3.2	303	57	50	66	180	42	85	06	349	48	22	100
B-33	851123	144431	134 06 26	33 51 10	6.0	3.4	41	79	142	43	259	40	10	22	121	41	23	91
B-35	851203	221837	134 42 17	33 54 06	10.1	3.4	229	88	320	67	92	17	187	15	315	67	27	96
B-36	851203	232159	134 01 51	33 39 15	12.6	3.0	218	42	124	87	92	29	339	35	211	41	17	100
B-44	860201	122536	134 45 20	33 57 31	42.8	3.2	140	78	240	51	3	36	106	18	217	49	26	96
B-45	860202	182123	134 36 12	33 49 41	41.5	3.4	125	44	228	78	8	41	259	21	149	41	33	100
B-46	860203	130759	134 47 33	33 41 19	36.0	4.5	110	78	207	60	334	30	71	12	180	57	30	100
B-49	860214	095646	134 47 26	33 41 23	38.5	3.3	307	87	216	67	349	14	84	18	225	67	32	100
B-50	860228	121258	134 30 01	33 54 29	5.3	3.1	249	32	141	79	117	28	353	47	225	30	17	100
B-52	860327	093836	134 41 30	33 55 43	45.6	3.6	140	76	236	69	6	25	99	05	198	64	33	97
B-55	860502	200212	134 10 42	33 43 43	34.9	4.5	324	76	226	60	2	11	99	32	256	56	38	98
B-58	860605	182309	134 32 57	33 57 07	41.4	3.4	151	83	244	68	15	20	109	11	225	67	29	97
B-60	860626	080147	134 51 41	33 53 33	46.9	3.6	148	50	49	80	14	19	270	35	127	49	41	93
B-61	860714	201445	134 34 39	33 42 42	35.0	3.3	307	55	40	86	179	27	78	21	315	55	31	100
B-62	860720	235330	133 39 30	33 37 49	3.2	3.0	179	33	295	74	80	51	317	23	214	29	13	94
A-1	860726	222550	134 33 59	33 32 54	16.1	3.1	172	66	267	80	42	24	308	09	198	64	18	96
A-2	860806	213557	134 50 02	34 00 25	49.5	3.8	138	69	239	65	7	34	99	03	194	56	45	100
A-7	861212	210113	134 33 44	33 36 02	27.5	4.3	319	90	229	90	184	00	94	00	270	90	48	97
A-8	861215	155844	134 47 48	33 56 27	45.4	3.2	136	84	227	84	2	08	271	00	180	82	33	94
A-12	861230	102346	134 53 57	33 46 53	13.5	3.3	235	43	140	85	107	27	356	35	225	43	21	97
A-13	870117	200050	134 23 46	33 43 32	34.1	3.2	165	84	256	80	30	11	120	03	225	79	26	91

A-14	870202	100532	133	55	13	33	43	12	37.4	3.0	313	83	221	73	356	07	88	17	243	72	15	93
A-15	870228	150322	134	50	06	33	53	15	46.2	3.4	298	72	208	90	165	12	72	13	297	72	33	97
A-16	870316	000405	133	43	26	34	00	00	9.4	3.4	59	73	155	71	286	26	17	01	108	64	26	98
A-18	870410	003453	134	41	06	33	44	38	41.4	3.1	185	49	83	76	50	17	305	40	158	45	18	100
A-19	870512	173217	134	16	53	33	58	59	44.0	3.0	111	46	274	46	12	81	103	00	193	09	36	100
A-20	870527	081840	134	11	53	33	38	11	11.4	3.0	215	77	317	48	77	39	182	18	292	45	20	100
A-21	870609	033926	134	47	35	34	02	37	51.2	3.7	147	85	204	68	11	20	106	12	225	67	34	100
A-22	870628	221348	133	36	40	33	58	25	49.2	3.5	354	75	87	81	221	18	130	04	27	72	25	96
A-23	870710	201055	134	54	21	33	46	48	15.1	3.2	178	74	275	66	45	29	138	05	236	60	20	91
A-27	871007	015042	134	16	31	33	43	46	9.4	3.1	209	78	304	69	75	24	168	06	270	66	18	100
A-30	871106	023206	134	51	19	33	48	41	45.6	3.5	309	84	212	44	341	26	92	36	225	43	31	100
A-34	871228	152015	134	57	13	33	50	28	5.4	3.0	48	89	138	79	273	09	4	08	135	79	18	100
A-35	880101	105451	133	48	28	33	48	38	39.5	3.1	7	75	272	73	49	02	140	23	315	67	17	100
A-36	880123	141608	134	15	11	34	02	19	43.4	3.2	125	44	269	52	29	71	286	04	194	19	31	100
A-39	880204	153510	134	40	02	33	32	07	37.7	3.5	148	51	49	79	14	19	271	35	127	49	39	100
A-46	880517	092321	134	14	55	33	57	54	10.8	3.6	39	77	307	80	263	02	173	16	360	74	27	100
A-50	880624	222400	134	51	31	33	50	41	12.7	3.6	58	83	148	86	283	08	193	02	90	82	28	100
A-51	880625	093512	134	59	24	33	50	08	10.6	3.4	43	85	135	73	268	16	0	08	117	72	19	100
A-52	880719	091456	134	27	40	34	05	51	7.0	3.6	50	79	317	78	93	01	184	16	360	74	34	96
A-53	880724	050004	134	35	51	34	14	48	3.8	3.2	229	74	329	58	94	35	192	11	297	53	14	93
A-54	880815	155933	134	33	02	33	53	42	26.9	3.2	132	89	42	79	176	08	268	08	45	79	29	96
A-BB	880907	005327	134	53	29	33	50	17	46.6	2.8	164	82	255	88	30	07	299	04	180	82	32	100

に示す。図では深さ 23 km を境にそれより浅い地殻内の地震を白丸で，深いマントル内地震を黒丸で区別した。内訳は前者20個，後者40個で地震活動の分布[4]を反映して，徳島県南東部沿岸のマントル地震がかなり多数を占めている。

使用した初動方向のデータは徳島観測所の半自動験震結果（MAEQ）の他，地震月報から選んだ気象庁の観測データ及び出版物[5,6,7]から選んだ岡山大学の渋川観測点のデータである。データ交換回線に乗っていない和歌山微小地震観測所（この中には，名古屋大学・京都大学のデータも一部含まれている），高知地震観測所（これには委託点のデータと白木微小地震観測所のデータが含まれる）のデータはそれぞれの機関の験震ファイルより抜き出した。**Fig. 2** に解析に用いられた観測点の分布図を示す。初動の験震値は通常立ち上がりの明瞭度によりⅠ又はＥの表示がなされているが，地震計の感度や震源距離などを考慮に入れて，三段階のランクに分けて区別した。また波形に立ち帰ってランクを変更したものもある。震源の位置はMAEQ の結果を基本とし，期間と場所によっては和歌山微小地震観測所の値，あるいは高知大学の委託点データも含めて再決定した値を用いた。

メカニズム解の計算には，青木のフーリエ法[8]を前田が改良して作成したプログラム[9]に若干の手を加えたものであり，初動データはランクにより1，0.5，0.1の重みを与えた。null 軸の候補としては21×21の格子点を等面積投影図の上にかぶせ，各々に対してメカニズム解を決定した後それぞれに対してスコアを求めスコアの大きな解を採用する。スコアが同じ複数の解が得られる場合にはそれらについて null 軸の平均を求め平均値に最も近いものを解として選択した。**Fig. 3** にはそれをウルフ・ネットの上半球に投影して示してある。シンボルの大きさはランクに応じて1.0，0.8，0.5としさらに下半球に出るものはそれぞれ 1/2 とした。

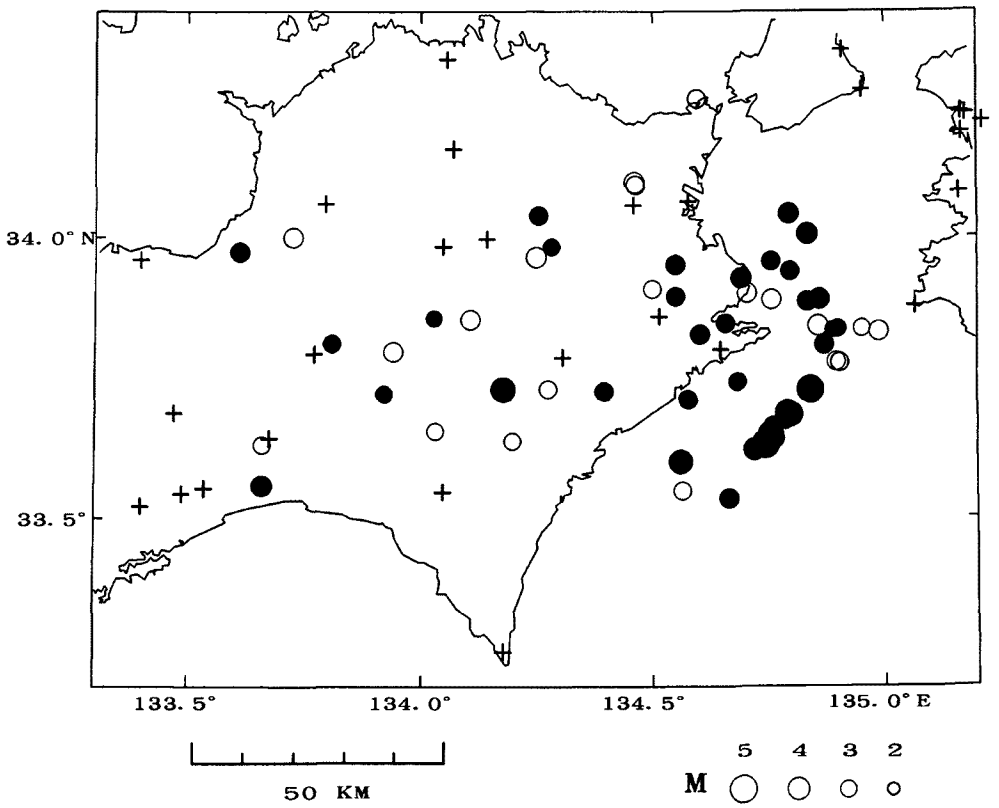

Fig. 1. Distribution of epicenters. Open and solid circles show earthquakes shallower than 23 km and deeper than 23 km, respectively. Plus marks denote stations.

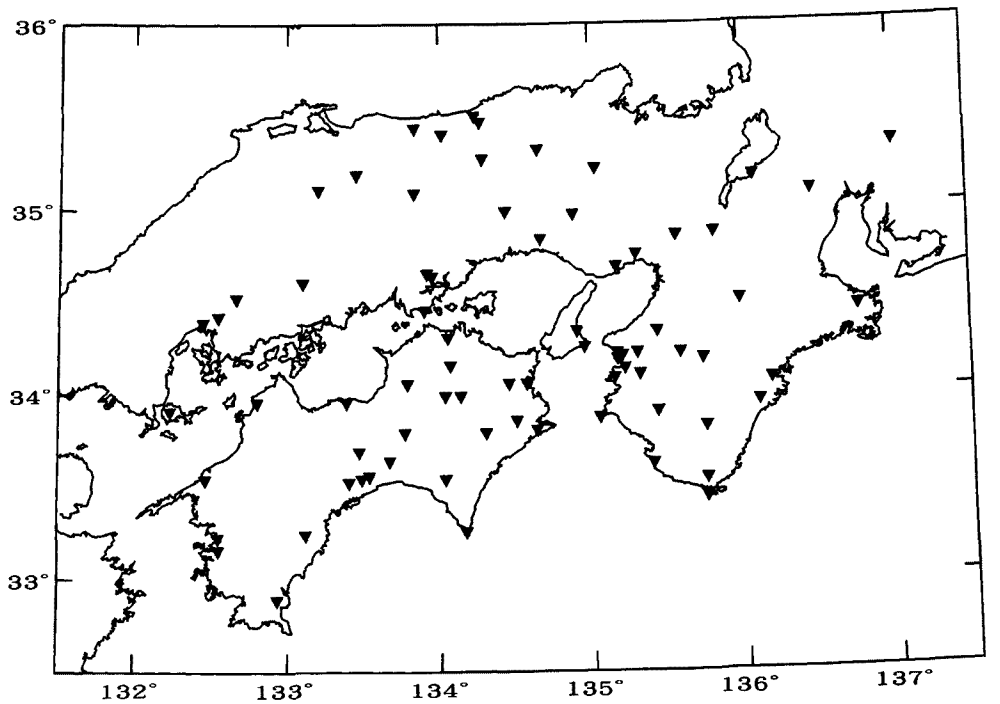

Fig. 2. Distribution of observation stations used in this study.

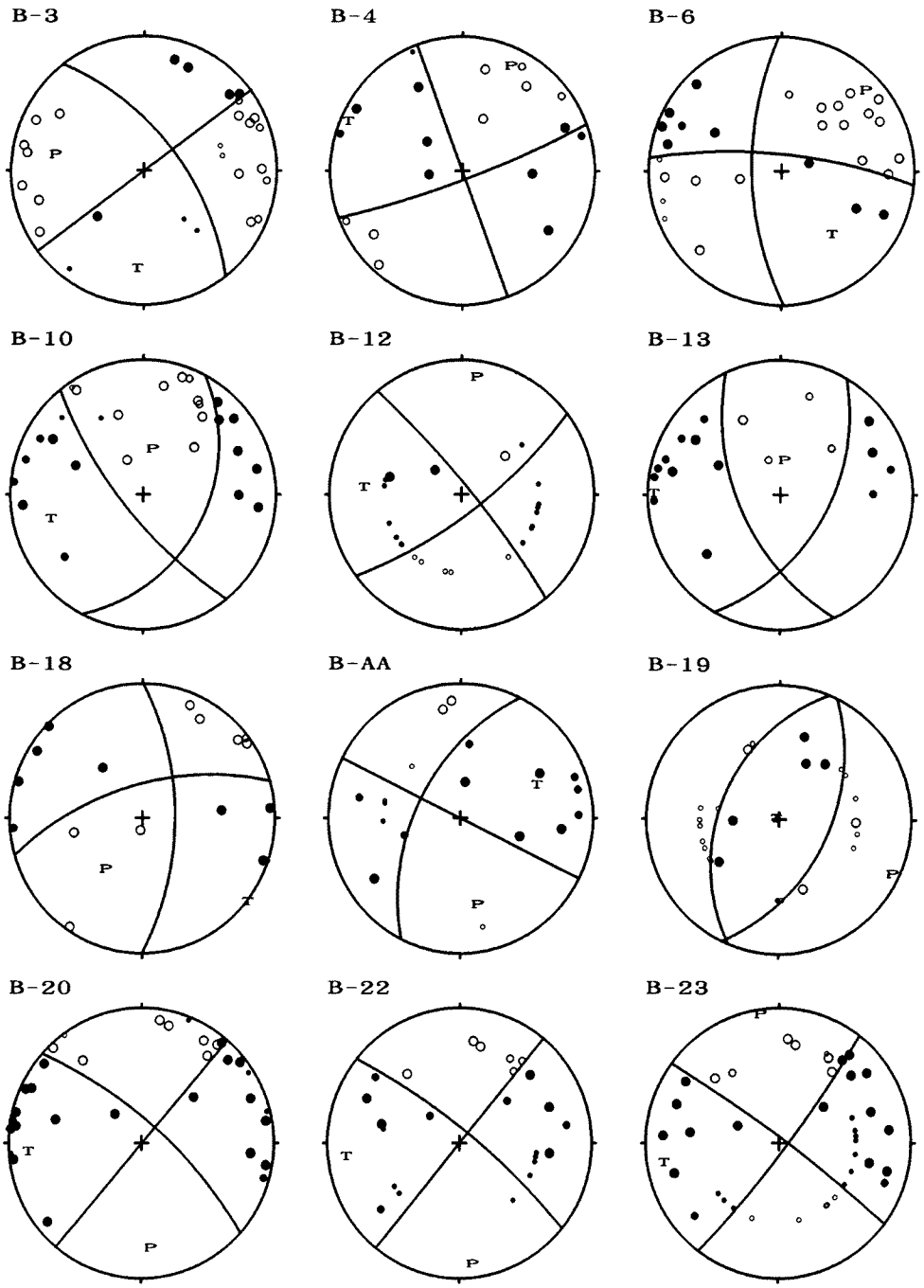

Fig. 3. Focal mechanism solutions for all earthquakes analyzed in this study. First motions and nodal planes are projected on the upper hemisphere of Wulff's net. Solid and open circles denote compressional and dilatational first motions, respectively. The size of the symbols indicate the accuracy of first motion.

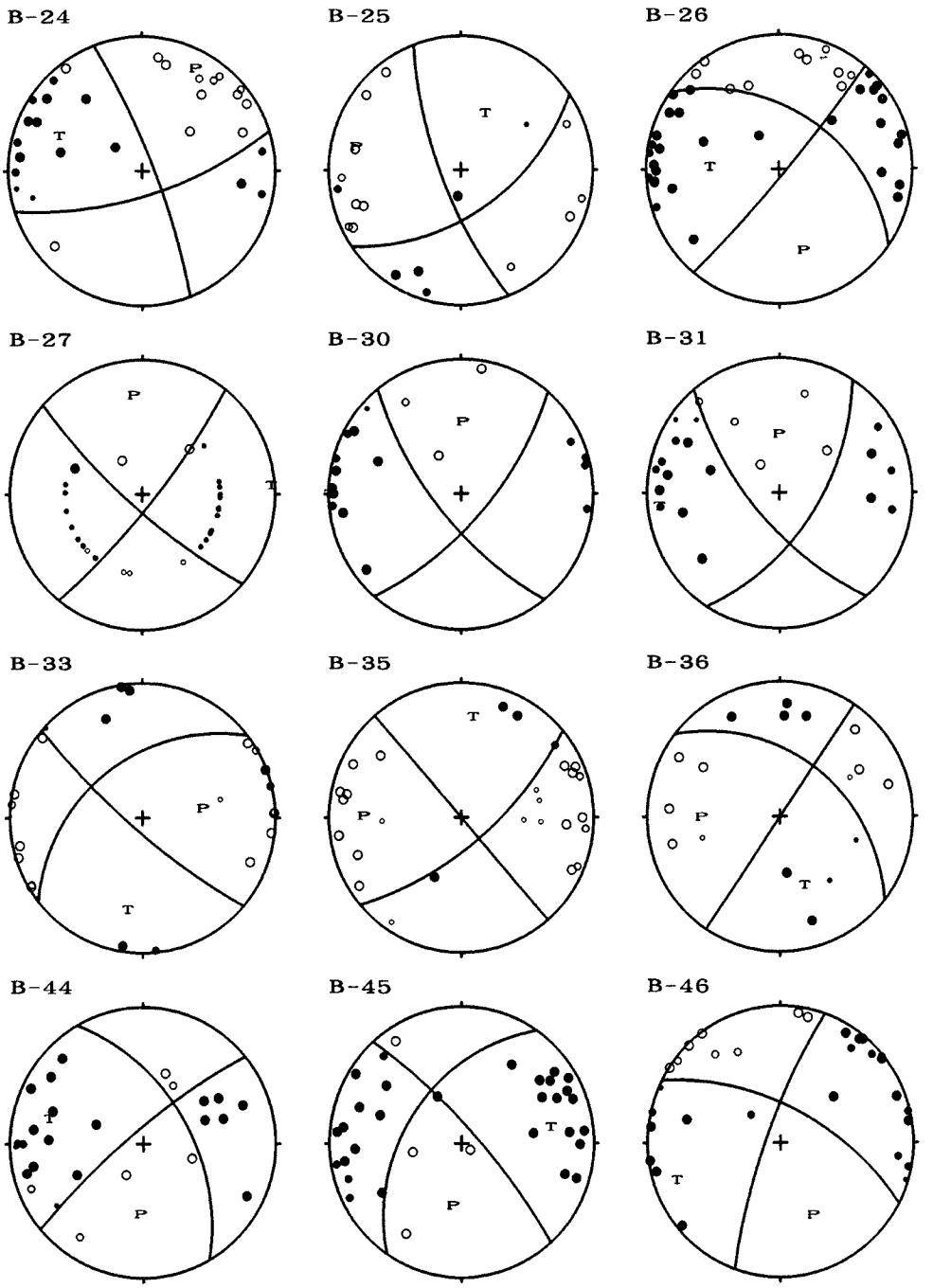

Fig. 3. continued

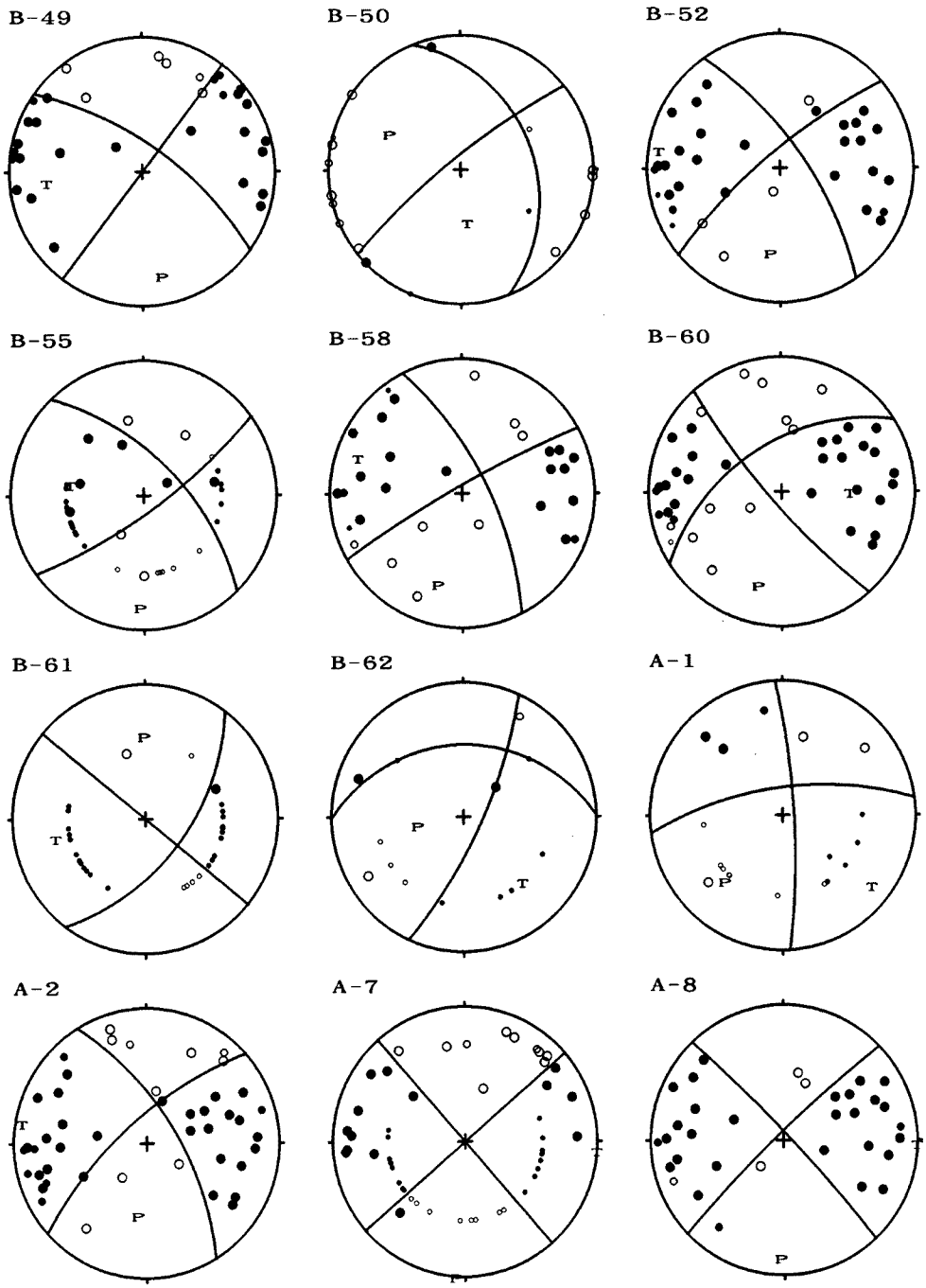

Fig. 3. continued

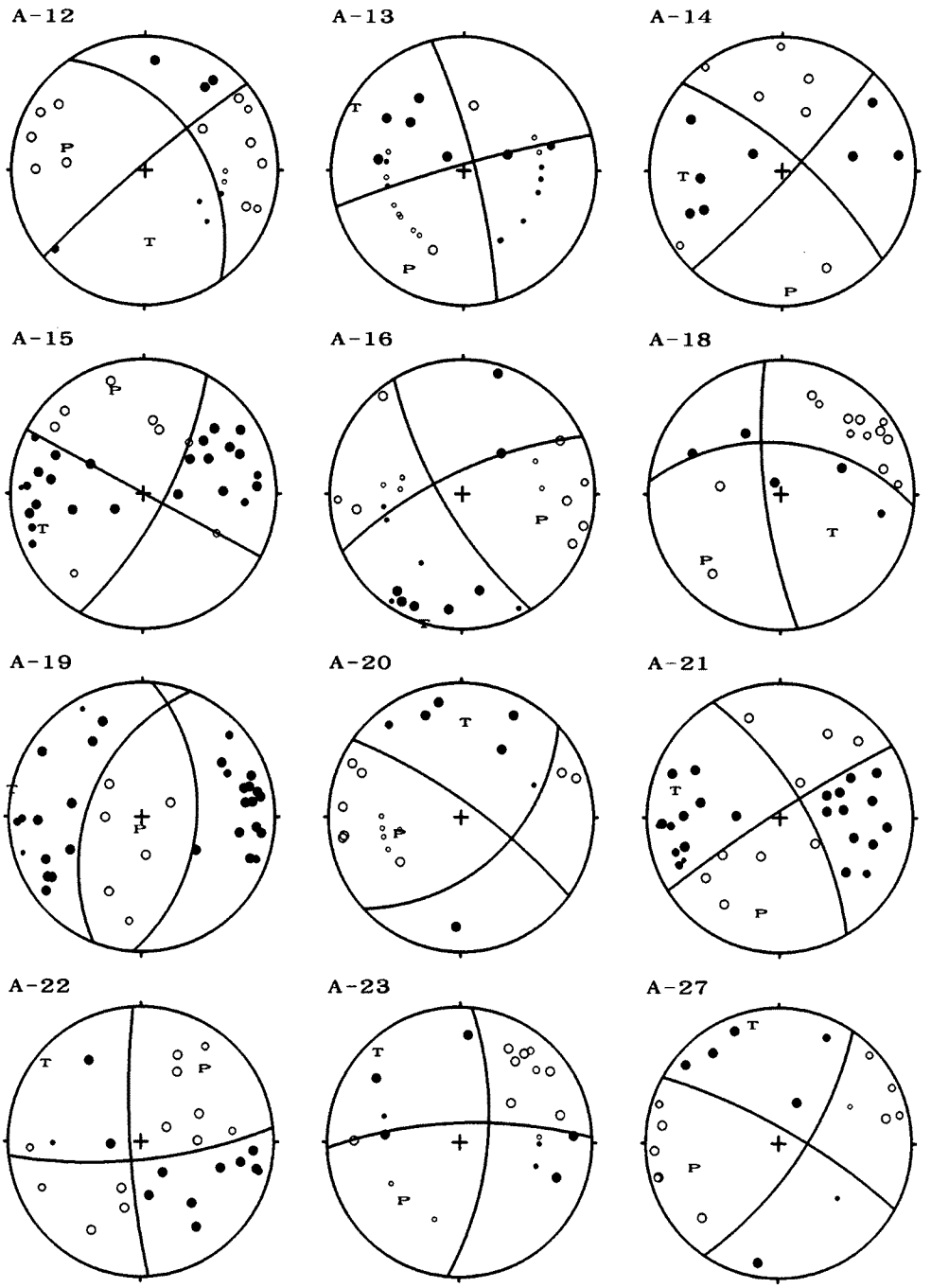

Fig. 3. continued

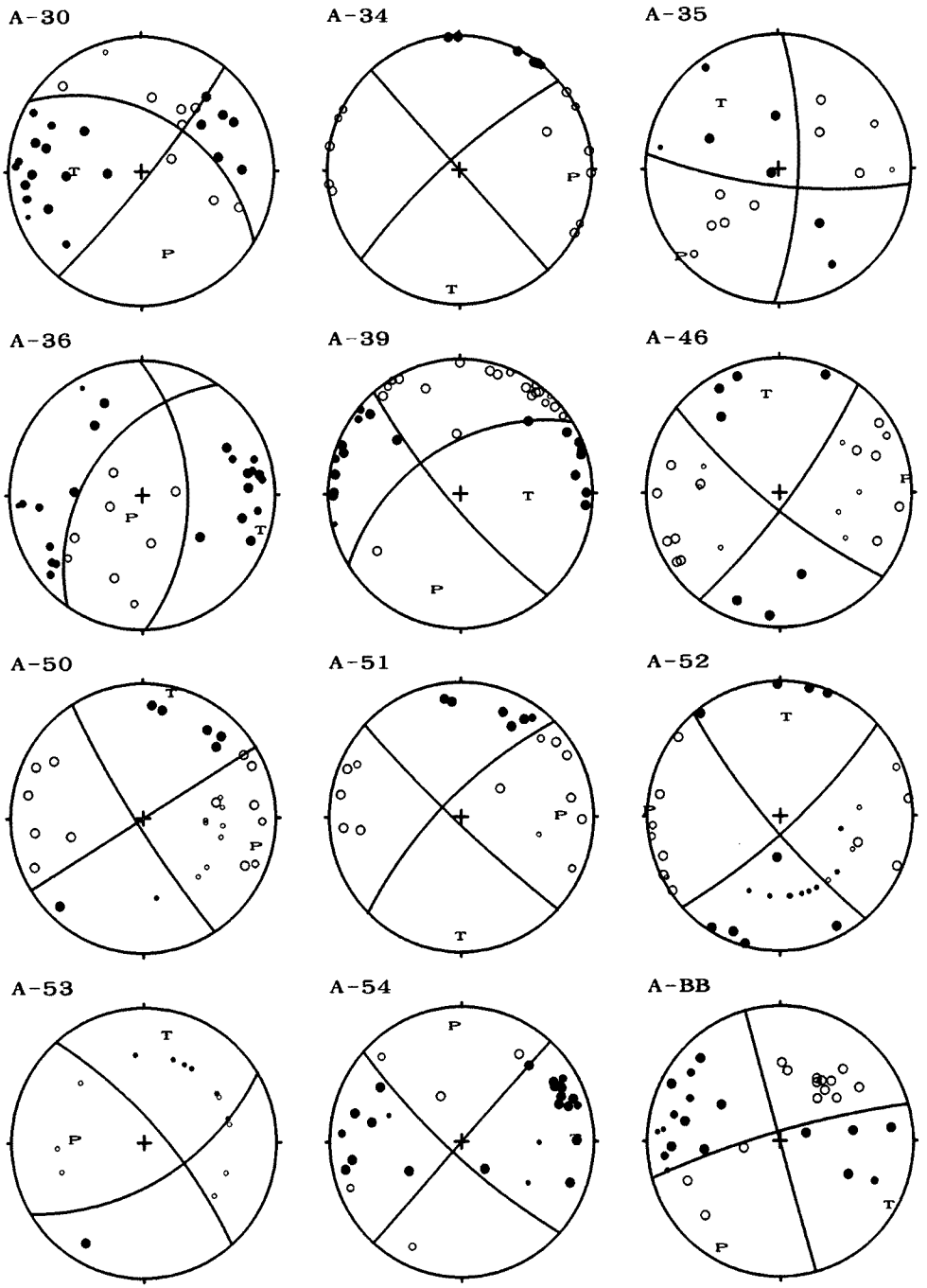

Fig. 3. continued

3. 解 析 結 果

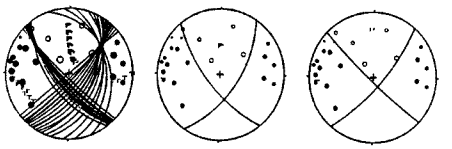

Fig. 4. An example of focal mechanism solution indicating its accuracy; left figure, all possible solutions with the same maximum score; a, the best solution selected based on the criterion that its null axis is nearest to the average direction of all possible solutions; b, the solution probable as strike-slip fault type.

Table 1 においては二つの接面 (N1, N2) は面の最大傾斜の方向とその傾斜角を，また P 軸・T 軸・N 軸に対してはその方位角と傾斜角を示してある。方位角は北側より時計回りの角度 (A) をとった。又 **Table 1** には用いた初動のデータの数 (ND) とスコア (SC) も示してある。解の信頼性は接面及び N 軸付近の初動データの密度に強く支配され，かなりディップ成分を持つように決められた地震（例えば B-13, B-30 など）も横ずれ型かそれに近い解が存在する可能性を残しているものがある。このことを B-31 の地震の場合で見ると (**Fig. 4**)，可能な解は19個あり，a は平均値として選択した解，b は一方の接線を直線に近い方に取った一つの場合である。今回の解析結果はこの程度のあいまいな解も含まれている。一方 A-19 あるいは A-36 は正断層タイプ，また B-19 は逆断層タイプの地震であることは疑い無い。

これらすべての震源球解を押しの領域に影を付けて，震央の位置と対応させたのが **Fig. 5** である。震央の白・黒は **Fig. 1** と同じで 23 km を境に浅い地震と深い地震を区別して示してある。図中 C として点線で囲った地震は1985年 7 月25日の B-10 (M 5.2) を本震とする一連のマントル地震の活動であり，本震は正断層型である。この地震はすでに中村等[10] によって解析され報告されているが，この付近の地震とメカニズム解が異なっている。

最初に述べたように横ずれ型を仮定して求めた直交する東西・南北の主圧力方向から最も期待される震源球解のタイプは浅い地震では A-52，また深い地震では A-7 のような例であるが求められた解はかなりのばらつきを示すものとなっている。**Table 1** を見ると浅い地震で比較的その傾向が大きい様に見えるが，地殻浅部の構造の複雑さに起因するものかもしれない。P 軸・T 軸の方向性を見るため，**Fig. 6, Fig. 7** にそれぞれの水平成分を震央の位置にプロットしてみた。震央の白丸・黒丸は **Fig. 1** と同じである。主圧力軸の並びの傾向は浅い地震で東西，深い地震で南北と言うこれまで指摘されてきたものと基本的な点で差は無いと思われる。しかしながらマントルの地震の中に，これまで見出されていなかった正断層型の地震が 2 個接近した場所で（約 10 km 程の空間距離をおいて）起こっていた事が分かった。これらは良く似た断層型を示し T 軸は東西に近いものである。

次に震源の深さとの関係で見るため **Fig. 8** および **Fig. 9** に P 軸の南北断面への，T 軸の東西断面への投影図を示す。原点は 134°E, 34°N をとっている。また深さの軸を 2 倍に，また棒の長さも拡大して示した。**Fig. 8** ではマントル地震の北下がり（約 15°）の震源分布に沿う様な主圧力軸の並びが認められる。震源分布は地質構造線の走向に垂直な断面（徳島観測網付近では N18°W-S18°E，高知観測網付近では N22°W-S22°E）において最も良くその特徴が現れる[11] のであるが，起震力はそのような構造を貫いて浅い地震には東西に，また深い地震にはやや北下がりの南北方向に働いていると見ることが出来る。**Fig. 9** にはマントル地震の紀伊水道の中央部への深まりに沿う T 軸の傾きが見られるがやや不明瞭である。今回唯一認められた逆断層型地震 B-19 は深さが 20 km にあり地殻上部と最上部マントルの中間に存在する板状分布の地震活動[11] に属する可能性があり注目される。

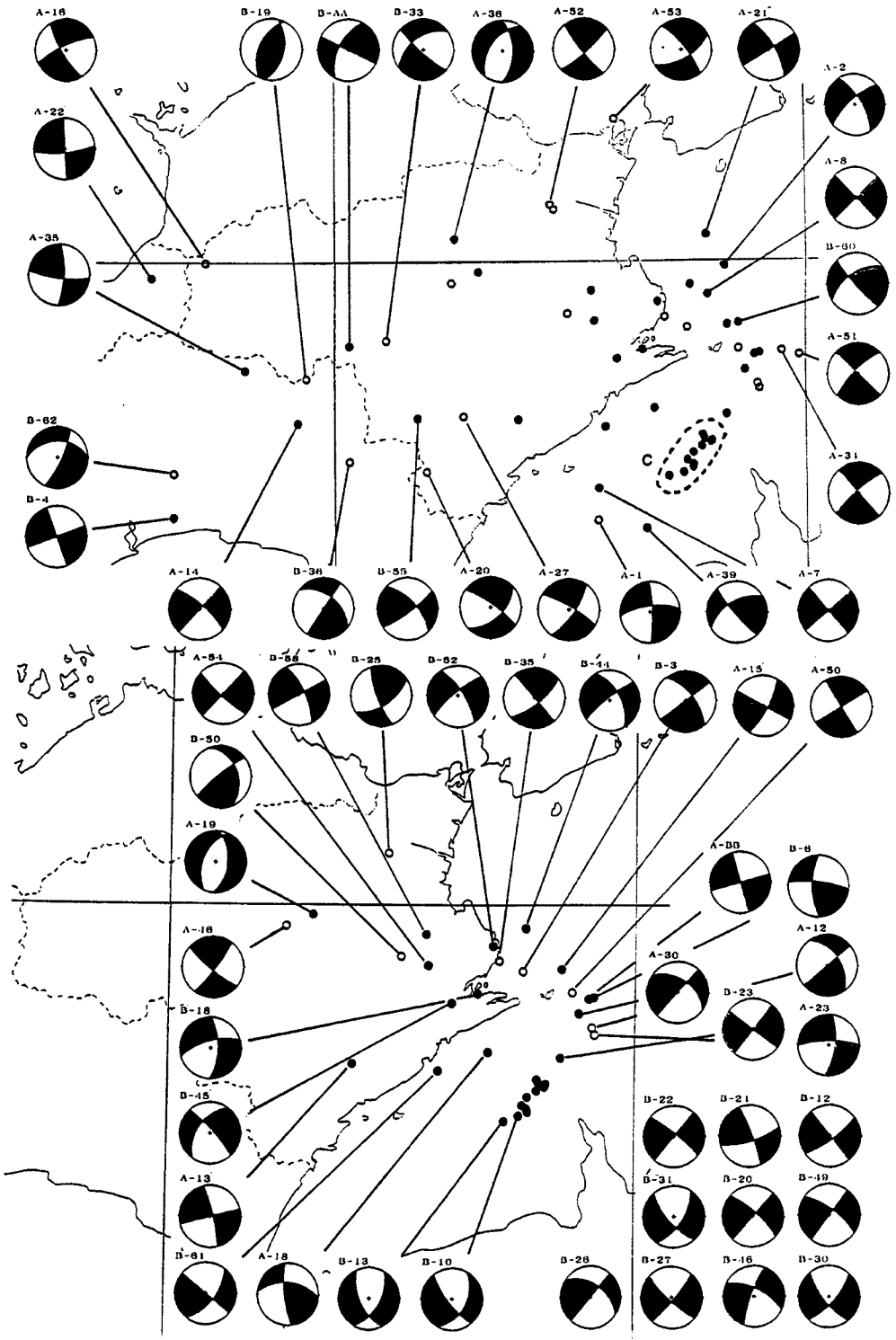

Fig. 5. Distribution of mechanism solutions on a map. Open and solid circles represent earthquakes shallower than 23 km and deeper than 23 km, respectively.

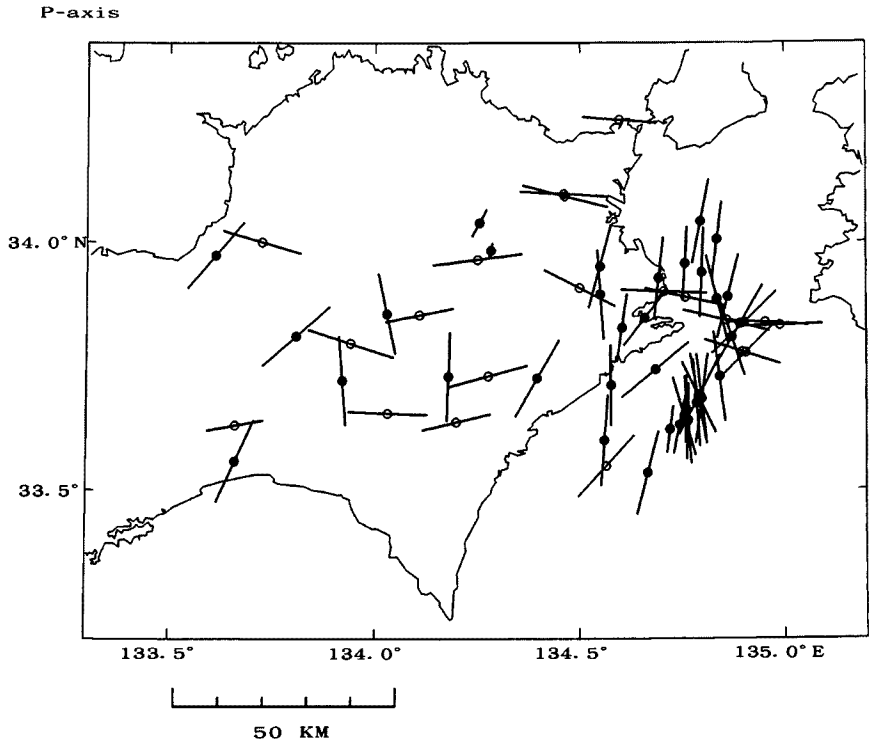

Fig. 6. Horizontal components of P-axes. Open and solid circles show shallow (h<23 km) and deep (h>23 km) earthquakes, respectively.

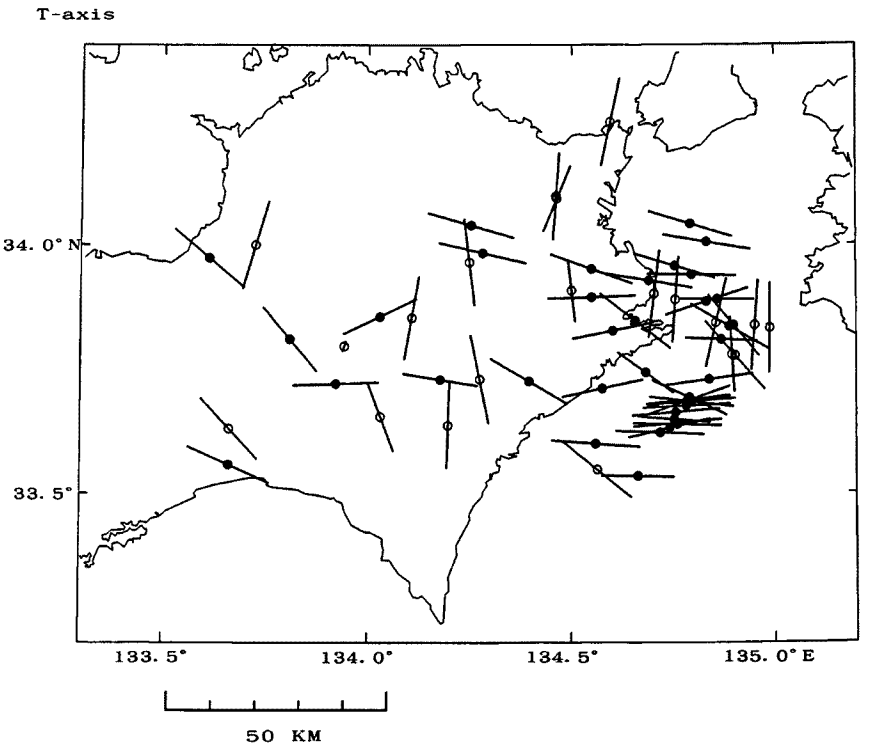

Fig. 7. Horizontal components of T-axes. Open and solid circles show shallow (h<23 km) and deep (h>23 km) earthquakes, respectively.

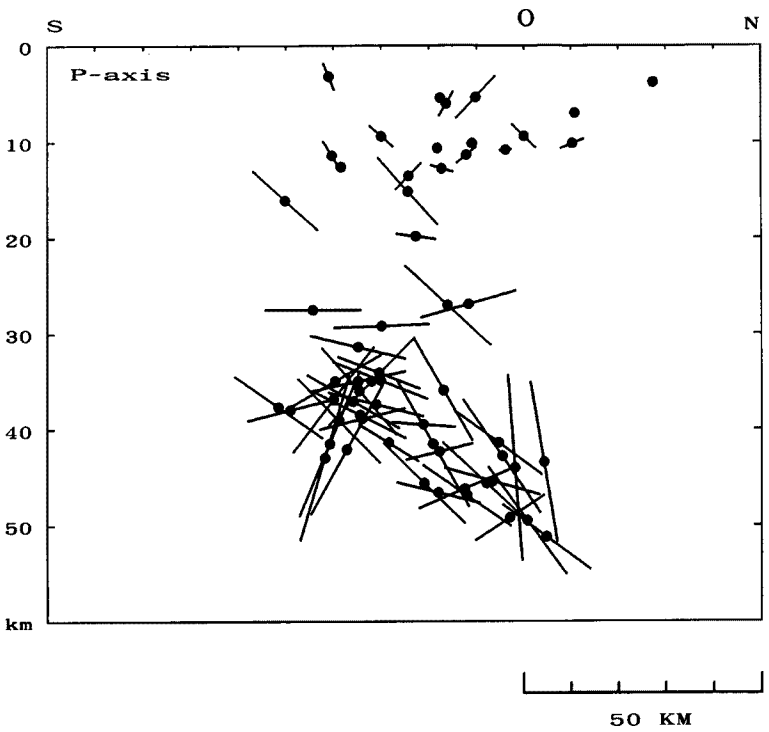

Fig. 8. P-axes projected on the vertical plane striking NS direction. Vertical scale is exaggerated and the symbol "0" shows the cross point of 134°E and 34°N lines.

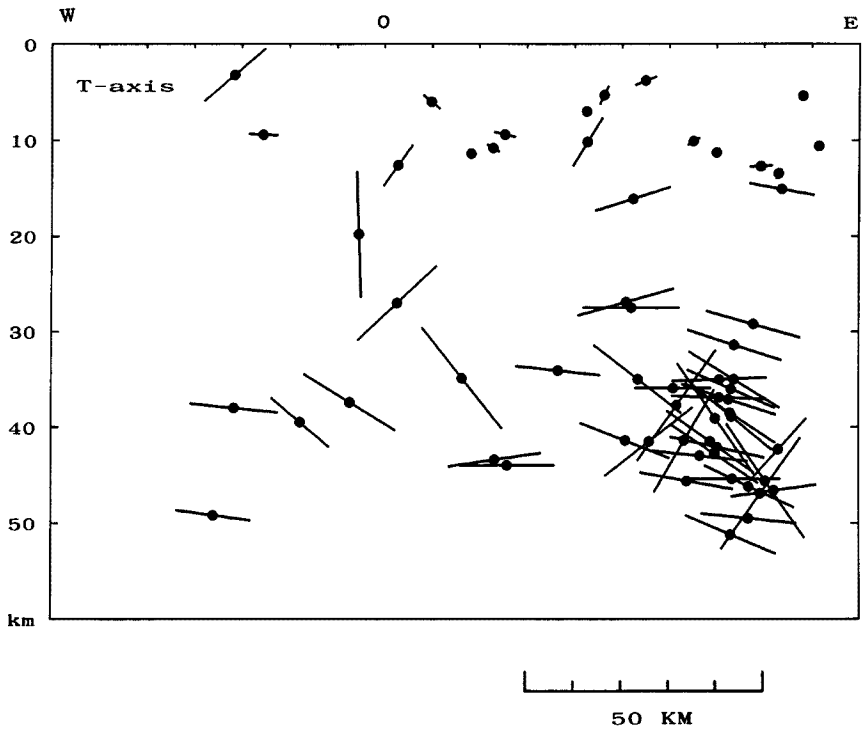

Fig. 9. T-axes projected on the vertical plane striking EW direction. Vertical scale is exaggerated and the symbol "O" shows the cross point of 134°E and 34°N lines.

4. まとめと今後の課題

最近のデータに基ずいて四国東部及び周辺地域の地震の震源球解を求めた。その結果，最上部マントルで発生する地震の南北主圧力軸において傾斜する震源面に沿う並びのあること，またこれまでこの地域では知られていなかった正断層型地震も発生していることなどが分かった。これらの横ずれ断層型とは異なった型の地震の発生はすでに気付かれていて（木村昌三，私信），今後さらに調査が進みその事例が増えて来れば西南日本の他の地域で見付けられている正断層型地震の，発生メカニズムの解釈についても新たな展開が期待される。今回解析に用いた初動データは現在観測されているデータのすべてを網羅できていないため，解の任意性が増えている地震もあるので今後これらのデータを補充するとともに期間をさらに広げて多くの地震を解析することによってより精密な応力場についての議論が可能になると思われる。

5. 謝　　辞

本研究には各観測所の観測及び験震業務に当たられた方々に負う所が大きいが，特に発震機構の研究用データ・ファイルを閲覧させて下さった高知大学理学部の木村昌三氏，広範な地域の観測データの処理結果を見せて戴いた東京大学和歌山微小地震観測所の皆様にはたいへんお世話になった。また解析プログラムの使用を認めて戴いた関東学院大学の前田直樹氏に謝意を表します。

本研究の一部は，文部省科学研究費重点領域研究(1)「内陸地震活動の総合的評価に関する研究（研究代表者　溝上恵)」の経費によるものであることを付記し，関係各位に感謝します。

参 考 文 献

1) 沢村武雄・木村昌三：四国中央部における微小地震活動（II）高知大学学術研究報告，第20巻　自然科学，第14号，1971，pp. 241-249.
2) Okano K., S. Kimura, T. Konomi and M. Nakamura: Focal mechanism in Shikoku, Japan inferred from microearthquake observations, Mem, Fac, Sci, Kochi Univ, Vol. 1, Ser. B, 1980, pp. 1-13.
3) 岡野健之助：四国の地震，土佐出版社，1988，pp. 102-110.
4) 許斐　直・近藤和男：徳島観測所の新旧観測システムの震源決定能力の比較，京都大学防災研究所年報，第34号，B-1, 1991，pp. 253-262.
5) 瀬戸憲彦・溝上　恵・小田　仁・斎藤俊明・尾向晴美：瀬戸内海地方の地震活動，岡山大学環境計測共同利用施設報告（しぶかわ)，No. 7, 1986, pp. 24-27.
6) 瀬戸憲彦・溝上　恵・小田　仁・斎藤俊明・尾向晴美：瀬戸内海地方の地震活動，岡山大学環境計測共同利用施設報告（しぶかわ)，No. 9, 1988, pp. 35-40.
7) 瀬戸憲彦・溝上　恵・小田　仁・斎藤俊明・尾向晴美：瀬戸内海地方の地震活動，岡山大学環境計測共同利用施設報告（しぶかわ)，No. 10, 1989, pp. 54-58.
8) 青木治三：Fourier 解析による地震メカニズム解，地震２，第39巻，第２号，1986，pp. 251-256.
9) 前田直樹：地震群の発震機構の決定法—1987年５月28日京都大阪府境に発生した地震（M 4.9）の余震について，地震２，第41巻，第３号，1988，pp. 323-333.
10) 中村正夫・瀬戸憲彦・溝上　恵：紀伊半島と南海地域に発生した主な地震のメカニズム解について地震学会講演予稿集，1985，No. 2, B 92.
11) 岡野健之助・木村昌三・許斐　直：四国地方の震源分布と地質構造線との関連　地震２，第36巻，1983，pp. 23-29.