微小地震観測網から求めた和歌山地方の 地震の発震機構 (第 1 報)

京都大学理学部地球物理学教室 塩 野 清 治

(昭和 45 年 7 月 28 日受理)

Focal Mechanism of Local Earthquakes in Wakayama Region (Part 1)

Kiyoji SHIONO

Geophysical Institute, Faculty of Science, Kyoto University

(Received July 28, 1970)

Focal mechanisms of 82 earthquakes that occurred during the period from 1966 to 1969 in the Wakayama region (well known as to be one of the seismically most active region) have been investigated from the polarities of the first motions of P waves recorded at the microearthquakes observation network that spread over Kinki District. In order to get clean pictures of the radiation patterns of the first motions, all recording stations were projected on the Wulf net grids, according to the emergent angles determined from the velocity structure of this region. For 75 earthquakes, the observed first motions of P waves showed quadrantal distributions, and the azimuths and dips of the maximum pressure axes and the maximum tension axes have been estimated for those earthquakes. But the radiation patterns of P waves of 7 earthquakes did not seem consistent with the quadrant type mechanisms, suggesting that the possibility that they might be explained as to be different types of focal mechanisms.

§ 1. ま え が き

1920 年以来活動を続けている和歌山地方(特に和歌山市およびその周辺)の地震については、従来行われた臨時観測や現在の常時観測などによりその性質がほぼ明らかになって来た。これらの地震の発震機構に関しては気象庁の資料から市川 (1965) や臨時観測の資料から三雲 (1960), 三雲他 (1970) などの研究があり, nodal plane が傾いていることや cone type の発震機構の可能性なども指摘されているがまだ確定的な解釈が得られていない。また, 紀伊水道から紀伊半島中央部にかけての深さ 50 km 程度の地震については市川 (1965) の研究があるが, 紀伊水道の南北方向の主圧力と主張力方向の規則性の可能性を指摘するととどまっており, 残された問題点が多い。

1965 年以来近畿地方の微小地震観測網が次第に整備されて来たので, すでに中村 (1967) が指摘したようにこれらの観測資料を用いればこの地方に発生する $M \approx 3.5$ 程度の比較的規模

の小さい地震についてもその発震機構を推定し、詳しい議論が出来るようになった。

§ 2. 資料および解析

ここでは紀伊水道と紀伊半島西部に発生する地震の発震機構、特に主圧力と主張力方向の分布を調べることを目的として可能な限り多くの地震を解析した。今回はほぼ定常的な観測網が完成された 1966 年から 1969 年までの 4 年間に上の地域で発生した $M > 3.1$ のすべての地震を調査の対象とした。資料として用いたのは Fig. 1 に示した近畿地方およびその周辺の微小地震観測所 (東京大学地震研究所和歌山, 京都大学防災研究所鳥取 (高槻支所を含む), 京都大学理学部丹波, 高知大学高知および名古屋大学犬山の各微小地震観測所およびその衛星観測点) で得られた観測記録であり, 地震月報の資料も参考にした。これから P 波初動が 15 点以上で明瞭に観測された地震 82 個について, 象限型発震機構を仮定して, 主圧力方向 (P 軸) および主張力方向 (T 軸) を求めた。なお各観測所の位置については“微小地震観測所の現状と計画” (1970) を参照されたい。すでに示唆されているように, 和歌山市周辺の地震については nodal plane が, 震源が浅いにもかかわらず傾いていると考えられる。 P 波初動の押し引き分布から発震機構を推定するにあたっては, 地殻構造を考慮して震源を決定し, 震源における地震波線の射出角を定めなければならない。これについては三雲, 大塚, 尾池 (1970) の方法を用いた。この方法の詳細は上記論文を参照されたい。震源の決定は, 深さが 20 km より

Fig. 1. Location of the microearthquake observation stations.

Fig. 2 (a).

Fig. 2 (b).

Fig. 2. Distributions of the first motions of P waves for the shallower earthquakes ($H < 20$ km) in Wakayama region (1966~1969).

○; dilatation, ●; compression, P ; max. compression (P axis), T ; max. tension (T axis).

浅い地震 [浅い地震] については和歌浦 (WK), 生石山 (OI) [または^{とどろき}動木 (TD)], 有田 (AR), 日高 (HD), ^{かいのかわ}甲斐川 (KK) の 5 点, 深さが 20 km より深い地震 [深い地震] については上記 5 点に^{しちかわ}猿谷 (ST), 七川 (SK) を加えた 7 点の P 波着震時 t_p を用いて計算した. 震源決定の際の perturbation の範囲は, 浅い地震では $\Delta x = \Delta y = 2.0$ km, $n_x = n_y = 25$, $\Delta z = 0.5$ km, $n_z = 9$, $\Delta t = 0.05$ sec, $n_t = 9$ であり, 深い地震では $\Delta x = \Delta y = 2.0$ km, $n_x = n_y = 25$, $\Delta z = 5.0$ km, $\Delta t = 0.1$ sec, $n_t = 9$ である. 地殻構造については近畿地方全体にわたつての確定的な速度分布がまだ求められていないので上記論文で和歌山地方に対して最も妥当なモデルとされている Model B によつた. ただし Model B を近畿地方全体に拡張し得る確証はないので, 浅い地震の $\Delta \geq 130$ km の観測所に対する地震波線の射出角はマントル上部 ($H \geq 40$ km) の速度を 8.0 km/sec として計算し, 深い地震については V_p が $H \geq 40$ km に対しては 8.0 km/sec より深さ 1 km 当り 0.1 km/sec の割合で増加するとして計算した. このようにして震源球の

Fig. 3. Distributions of the first motions of *P* waves for the deeper earthquakes ($H \geq 20$ km) in Wakayama region (1966~1969).
The expression is as same as Fig. 2.

Table 1. Source parameters of the shallower earthquakes ($H < 20$ km) in Wakayama region during the period from 1966 to 1969.

σ ; standard deviation. X ; measured from 135°E and positive for the east, Y ; measured from 34°N and positive for the north. Azimuth is measured clockwise from the north. Dip is measure upward from the horizontal plane. N ; number of data. M ; magnitude given by J.M.A.

No.	Origine time			σ	Origine			P axis		T axis		N	M
	h	m	s		X km	Y km	H km	Adimuth	Dip	Azimuth	Dip		
1966													
S-1	Jan. 25	0	16	12.50	0.2330	16.00	17.50	3.5	270 $\pm$ 10	22 $\pm$ 10	118 $\pm$ 20	65 $\pm$ 10	16
S-2	Feb. 17	23	28	48.60	0.0402	15.35	20.20	3.5	290 $\pm$ 5	8 $\pm$ 10	25 $\pm$ 10	46 $\pm$ 10	17
*S-3	Apr. 11	10	20	14.50	0.3301	-12.00	10.00	10.0	100 $\pm$ 8	0	10 $\pm$ 8	0	15
S-4	May 28	9	38	23.95	0.0436	16.50	-9.00	3.5	270 $\pm$ 15	30 $\pm$ 20	180 $\pm$ 15	0 $\pm$ 30	19
S-5	Jun. 21	18	17	15.20	0.0834	16.25	17.75	6.0	286 $\pm$ 0	8 $\pm$ 0	28 $\pm$ 0	52 $\pm$ 0	16
S-6	Jun. 24	3	33	2.90	0.1079	32.50	13.00	7.0	118 $\pm$ 0	4 $\pm$ 0	205 $\pm$ 0	28 $\pm$ 0	24
S-7	Aug. 1	22	21	46.95	0.3543	9.15	24.95	5.0	97 $\pm$ 10	8 $\pm$ 25	5 $\pm$ 10	22 $\pm$ 20	18
S-8	Nov. 13	18	44	44.60	0.0898	20.50	23.70	6.5	81 $\pm$ 10	16 $\pm$ 5	190 $\pm$ 10	50 $\pm$ 10	16
S-9	Dec. 22	20	50	33.35	0.0685	22.50	27.75	6.5	114 $\pm$ 10	30 $\pm$ 5	325 $\pm$ 15	52 $\pm$ 3	17
1967													
S-10	Apr. 14	11	37	21.75	0.0629	14.50	10.20	5.0	265 $\pm$ 0	12 $\pm$ 0	4 $\pm$ 0	40 $\pm$ 0	27
S-11	Apr. 19	15	38	30.10	0.0659	15.25	-4.75	7.5	110 $\pm$ 5	0 $\pm$ 8	20 $\pm$ 3	15 $\pm$ 5	18
S-12	May 27	17	13	11.15	0.0996	11.85	7.20	5.0	313 $\pm$ 3	12 $\pm$ 5	43 $\pm$ 3	40 $\pm$ 5	23
S-13	Jul. 11	17	37	31.85	0.0855	21.80	21.10	3.5	90 $\pm$ 0	14 $\pm$ 0	355 $\pm$ 0	14 $\pm$ 0	21
S-14	Sep. 22	31	47	70.00	0.0297	15.00	20.00	4.0	280 $\pm$ 5	8 $\pm$ 10	15 $\pm$ 10	38 $\pm$ 15	16
S-15	Sep. 23	5	54	59.55	0.0507	14.75	20.00	3.5	287 $\pm$ 10	8 $\pm$ 15	20 $\pm$ 10	24 $\pm$ 20	16
S-16	Sep. 29	4	41	40.00	0.1941	18.75	18.00	3.5	306 $\pm$ 5	16 $\pm$ 3	47 $\pm$ 8	38 $\pm$ 5	31
S-17	Sep. 29	8	13	3.00	0.0639	19.75	19.50	3.5	293 $\pm$ 10	8 $\pm$ 20	30 $\pm$ 15	44 $\pm$ 15	20
S-18	Sep. 30	1	43	59.15	0.0528	19.25	19.25	3.5	125 $\pm$ 15	45 $\pm$ 20	215 $\pm$ 15	22 $\pm$ 10	17
S-19	Nov. 2	6	40	59.45	0.0423	27.25	33.50	6.5	98 $\pm$ 5	3 $\pm$ 10	7 $\pm$ 8	22 $\pm$ 10	21
S-20	Nov. 15	3	44	30.15	0.0344	12.25	-11.00	6.5	265 $\pm$ 0	4 $\pm$ 0	125 $\pm$ 0	84 $\pm$ 0	26
S-21	Dec. 4	10	43	9.05	0.0778	25.75	24.50	4.0					20
1968													
S-22	Jan. 13	2	30	28.95	0.0567	23.00	21.75	3.5	90 $\pm$ 10	20 $\pm$ 25	355 $\pm$ 15	12 $\pm$ 20	15
S-23	Feb. 5	17	6	31.15	0.0364	14.50	15.00	3.5	105 $\pm$ 3	0 $\pm$ 3	30 $\pm$ 3	42 $\pm$ 3	25
S-24	Feb. 24	20	47	0.60	0.0306	31.25	-4.50	3.5	293 $\pm$ 10	26 $\pm$ 10	25 $\pm$ 10	4 $\pm$ 10	24
S-25	Mar. 15	21	12	52.50	0.0337	12.75	14.75	3.5	92 $\pm$ 5	8 $\pm$ 3	352 $\pm$ 10	60 $\pm$ 3	20
S-26	Mar. 19	12	33	17.90	0.0579	10.25	9.50	6.5					23
S-27	Mar. 30	4	4	32.05	0.0801	18.00	20.75	3.5	294 $\pm$ 0	7 $\pm$ 0	27 $\pm$ 0	14 $\pm$ 0	37
S-28	Mar. 30	4	9	40.45	0.1836	18.00	22.75	4.0	276 $\pm$ 0	2 $\pm$ 0	175 $\pm$ 0	68 $\pm$ 0	18

S-29	30	10	12	58.40	0.0602	17.50	20.25	3.5	118±10	4±10	25±10	46±10	18
S-30	Apr. 1	14	1	35.85	0.0318	16.00	19.50	3.5	295±5	10±10	35±10	30±10	19
S-31	22	6	42	28.05	0.1183	7.75	15.25	8.5					28 3.6
S-32	May 8	28	8	42.20	0.0374	15.75	14.75	3.5					20 3.3
S-33	27	14	29	11.30	0.0650	23.50	16.25	4.0					18
S-34	4	15	15	32.50	0.0332	18.25	6.25	3.5	285±10	22±15	192±10	5±10	18 4.0
S-35	Jun. 8	8	15	20.60	0.0853	11.75	21.75	6.0					28 4.0
S-36	21	26	26	2.00	0.0964	30.75	19.25	3.5	295±3	30±5	32±5	24±3	24 3.8
S-37	12	2	48	55.65	0.0689	14.75	5.00	3.5	93±0	12±0	355±0	70±0	24
S-38	22	1	42	16.25	0.1009	18.75	22.00	4.0	287±8	8±5	28±10	55±5	17
S-39	Jul. 11	3	17	57.75	0.0290	19.75	20.50	3.5	287±5	6±10	21±15	34±5	24
S-40	Aug. 4	12	30	51.20	0.1180	12.50	16.75	6.0	285±10	20±25	17±20	4±30	17
S-41	12	2	10	39.35	0.0444	19.00	10.00	4.0	262±0	32±0	22±0	40±0	19 3.2
S-42	16	20	14	11.65	0.1067	14.50	23.25	7.5	328±10	32±5	190±10	50±5	17 4.8
S-43	18	9	56	0.30	0.2593	1.00	19.00	10.0	82±0	45±0	172±0	45±0	29 4.8
S-44	Sep. 10	4	50	22.95	0.0756	13.75	23.25	5.5	282±3	2±3	22±5	58±3	19
S-45	Nov. 29	5	15	42.85	0.0756	14.25	23.75	5.5	110±25	40±25	0±30	20±20	21
1969													
S-46	Jan. 20	12	18	48.40	0.1474	25.00	15.50	7.0	283±10	3±15	15±40	70±10	15
S-47	29	16	52	39.70	0.1893	12.50	7.00	7.0	105±8	18±10	260±30	68±10	16
S-48	Feb. 6	8	57	55.25	0.1513	18.50	18.50	6.0	98±10	10±10	348±20	62±8	20 3.5
S-49	13	1	33	8.10	0.0865	14.00	22.00	6.0	95±8	0±10	3±10	50±8	17
S-50	Mar. 2	4	21	32.40	0.0604	16.50	18.00	6.0	281±3	25±3	125±10	64±3	21 4.0
S-51	15	0	30	11.90	0.1157	14.00	8.50	7.0	111±20	40±15	22±25	48±25	16 4.2
S-52	21	22	28	55.80	0.1702	27.00	15.00	10.0	111±8	4±3	215±5	68±10	15
S-53	May 24	19	34	32.95	0.1176	23.00	28.50	6.0	285±3	30±3	175±3	40±3	24 4.4
S-54	31	19	44	40.20	0.0542	11.00	4.50	7.0	110±5	22±3	340±10	58±3	20
S-55	Jun. 10	8	2	2.45	0.1087	15.00	22.00	6.0	123±0	35±0	9±0	30±0	20 4.4
S-56	Jul. 9	19	21	50.85	0.1023	11.00	21.50	6.0	273±10	6±5	15±20	56±10	18 3.5
S-57	Aug. 25	8	4	26.80	0.1197	15.00	26.00	7.0	90±10	15±25	353±15	28±20	15
S-58	Sep. 6	11	4	22.95	0.1012	22.50	25.00	7.0	120±15	37±3	330±15	49±5	18 3.4
S-59	13	13	10	40.70	0.0989	11.50	23.50	7.0					

Table 2. Source parameters of the deeper earthquakes ($H > 20$ km) in Wakayama region during the period from 1966 to 1969.

The expression is as same as Table 1.

No.	Origine time				σ	Origine			P axis		T axis		N	M
	h	m	s	X km		Y km	H km	Azimuth	Dip	Azimuth	Dip			
1966														
D-1	Feb. 15	18	34	42.4	1.1689	24	-24	50	113 $\pm$ 3	40 $\pm$ 10	272 $\pm$ 3	50 $\pm$ 10	18	
D-2	May 20	7	56	39.7	0.7058	47	- 6	20	105 $\pm$ 0	47 $\pm$ 0	321 $\pm$ 0	36 $\pm$ 0	16	4.1
D-3	Nov. 28	9	19	20.3	0.1159	10	-38	35	155 $\pm$ 10	0 $\pm$ 30	245 $\pm$ 20	30 $\pm$ 10	15	4.5
1967														
D-4	Jan. 13	14	15	6.7	0.1494	31	-27	45	30 $\pm$ 10	48 $\pm$ 3	215 $\pm$ 10	42 $\pm$ 3	23	4.2
D-5	Jan. 16	1	8	49.1	0.0917	12	-20	50	27 $\pm$ 15	32 $\pm$ 15	122 $\pm$ 20	8 $\pm$ 20	19	
D-6	Jun. 3	1	40	32.6	1.0849	23	-21	50	104 $\pm$ 0	35 $\pm$ 0	237 $\pm$ 0	45 $\pm$ 0	31	4.4
D-7	Jun. 19	13	57	59.6	0.0307	-12	- 9	45	173 $\pm$ 5	68 $\pm$ 10	58 $\pm$ 5	9 $\pm$ 5	36	4.4
D-8	Sep. 14	9	36	4.2	0.1422	0	0	40	36 $\pm$ 5	18 $\pm$ 10	124 $\pm$ 5	18 $\pm$ 15	36	4.1
D-9	Nov. 28	1	57	17.5	0.2206	22	-31	35	134 $\pm$ 3	4 $\pm$ 20	45 $\pm$ 3	4 $\pm$ 20	16	
D-10	Dec. 19	0	13	58.9	0.5509	47	- 2	50	309 $\pm$ 0	46 $\pm$ 0	153 $\pm$ 0	42 $\pm$ 0	19	
1968														
D-11	Jan. 17	13	1	59.2	0.1484	18	-35	40	322 $\pm$ 20	14 $\pm$ 30	56 $\pm$ 20	20 $\pm$ 25	24	3.6
D-12	May 9	18	55	55.9	0.1429	17	-20	45	262 $\pm$ 0	51 $\pm$ 0	82 $\pm$ 0	39 $\pm$ 0	32	
*D-13	Jun. 12	17	44	50.8	0.4218	-13	-33	50	175 $\pm$ 5	0	85 $\pm$ 5	0	22	
D-14	Jun. 15	8	14	18.1	0.1057	31	-17	45	330 $\pm$ 30	62 $\pm$ 20	64 $\pm$ 25	2 $\pm$ 20	23	4.0
D-15	Jul. 12	20	35	3.1	0.1144	43	- 2	50	113 $\pm$ 0	6 $\pm$ 0	204 $\pm$ 0	12 $\pm$ 0	26	3.5
D-16	Oct. 6	11	45	10.0	0.0999	-12	0	45	166 $\pm$ 2	32 $\pm$ 5	258 $\pm$ 5	2 $\pm$ 5	20	
D-17	Nov. 4	3	35	37.8	0.0984	-11	- 2	45	8 $\pm$ 30	6 $\pm$ 30	104 $\pm$ 25	35 $\pm$ 25	20	
1969														
*D-18	Jan. 26	10	34	56.0	0.1187	-12	-13	40	0 $\pm$ 5	0	90 $\pm$ 5	0	21	
D-19	Jan. 19	4	25	51.0	0.0785	- 1	-30	40	17 $\pm$ 15	8 $\pm$ 25	283 $\pm$ 15	22 $\pm$ 25	19	
D-20	Feb. 28	5	22	19.0	0.5244	21	-31	50	320 $\pm$ 20	32 $\pm$ 25	63 $\pm$ 20	16 $\pm$ 30	25	3.7
D-21	Mar. 28	15	4	50.7	0.6352	38	- 8	50	102 $\pm$ 8	34 $\pm$ 5	230 $\pm$ 10	42 $\pm$ 5	22	
D-22	Jul. 8	7	52	33.6	0.0768	-16	- 2	40	10 $\pm$ 10	5 $\pm$ 35	100 $\pm$ 15	5 $\pm$ 40	20	3.6
*D-23	Jul. 9	17	38	5.9	0.1790	5	-23	35	160 $\pm$ 5	0	70 $\pm$ 5	0	25	3.8

上半球上に求めた各観測所の位置を P 波初動の押し引きと共に Wulf net 上に投影し、象限型の発震機構を仮定して nodal plane を定め、これから P 軸および T 軸の位置を決定した。浅い地震の結果を Fig. 2 に、深い地震についての結果を Fig. 3 に示した。なお●は押し○は引きを表わし、 P , T は P 軸, T 軸の位置を表わす。

§ 3. 解析結果

解析した 82 個の地震の発震時、震源位置および P 軸, T 軸の方向等を浅い地震 ($H < 20$ km) については Table 1 に、深い地震 ($H \geq 20$ km) については Table 2 に示した。震央位置は $135^\circ\text{E } 34^\circ\text{E}$ を原点として $+X$ を東 $+Y$ を北にとつた座標で表わした。 P 軸 T 軸の方位角 (azimuth) は北から時計回りにはかつた角度で、傾き (dip) は水平面から上方にはかつた角度で表わした。またこれらの角度は矛盾なく nodal curve をひきうる P 軸 T 軸の可能な範囲の中心値を示し、±はその範囲を示す。* 印のついた地震は任意性が大きく nodal plane を正確に定めることが困難なのでここでは null vector が垂直であると仮定して P 軸 T 軸を定めた。また象限型の発震機構で説明できない押し引き分布をもつ地震は P 軸 T 軸の項を空白のままにしてある。

以上 82 個の地震 (浅い地震 59 個深い地震 23 個) の中で象限型発震機構として P 波初動の押し引き分布を説明できたものは 75 個 (浅い地震 52 個深い地震 23 個) であった。ただし、nodal plane あるいは null vector はかなり傾いている場合が多い。象限型で説明できない初動分布をもつ地震は 7 個 (浅い地震 8 個深い地震 0 個) であった。その中で S-16, S-31, S-32 および S-35 は Fig. 4 に示したような押し引き分布をもち cone type の発震機構の可能性を暗示しているように思われる。これらの解析結果を使つたこの地域の地震の発震機構についての詳しい議論は第 2 報で行なう。

Fig. 4. Distributions of the first motions of P waves for S-16 (1967 September 29).
X; epicenter.

§ 4. 結 び

近畿地方の密な微小地震観測網の観測資料から 1966 年から 1969 年の 4 年間に発生した 82

個というかなり多数の地震の発震機構を調べることができた。これらの地震の P 波初動の押し引き分布は一部を除いてほとんどが **null vector** の傾斜した象限型の発震機構として説明できたので、この地域ではこの程度の規模の地震については象限型の発震機構が一般的であると推定される。cone type の発震機構を暗示する P 波初動分布をもつ地震が 4 個あつたが、この type の発震機構が存在するかどうかについては震央附近の観測資料をえる必要があり、さらに密な観測が望まれる。

最後に解析にあたり震源決定および射出角の計算のプログラムを提供いただき有益な助言と激励をいただいた京都大学防災研究所三雲健先生に心から感謝を申し上げます。なおこの研究は東京大学地震研究所和歌山微小地震観測所、京都大学防災研究所鳥取微小地震観測所および高槻支所、京都大学理学部丹波微小地震観測所、高知大学文理学部高知地震観測所、名古屋大学理学部犬山地震観測所および気象庁から原記録および読み取り値等の資料を提供いただきできたものです。心よく資料を提供下さつたこれら諸機関の方々に改めて感謝します。また有益な助言と激励をいただいた岸本兆方教授や尾池和夫氏をはじめ京都大学防災研究所地殻変動部門の方々および東京大学地震研究所和歌山微小地震観測所の方々に心から感謝します。なお震源決定および射出角の計算は京都大学大型計算機センターの FACOM 230-60 によつた。同センターに御礼申し上げます。

文 献

微小地震観測所研究連絡会編, 1970, 微小地震観測所の現状と計画。

市川政治, 1965, 日本附近の地震のメカニズムに関する統計的研究と二, 三の問題, 研究時報, 18, 2, 83-172.

三雲 健, 1960, 和歌山地方の局地地震の発震機構について, 地震, 13, 65-77.

三雲 健, 大塚道夫, 尾池和夫, 1790, 和歌山地方の地殻構造と微小地震の発震機構, 地震, 23, 213-225.

中村正夫, 1967, 近畿地方中部の地震の発震機構について, 昭和 42 年秋季地震学会講演。