

## 6-22 地殻応力測定総合報告 (1979年～1993年)

### General Report of Crustal Stress Measurements (1979-1993)

西日本地殻応力調査班

The Research Group for Crustal Stress in Western Japan

第4, 5, 6次地震予知計画で実施した応力測定結果は, そのつど予知連会報に掲載されているが, 第6次計画の終了を機会に, 測定結果を総合的にまとめて報告する。測定は当初は8素子ゲージを用いた応力解放法, 次に改良されたより精度の高い16素子ゲージによる応力解放法, 第5次からは小口径水圧破碎法による3次元応力測定を導入し, 鉱山や建設中の道路トンネル等5地点で比較測定を実施した。深部坑道の利用が困難となるにしたがい, 地表からのボーリングによる測定を行った。第6次では応力深度勾配の測定に重点を置いた。同じボーリング孔における3次元水圧破碎法による繰り返し測定も4点で実施し, 応力値にして1MPa, 主応力方向 $10^\circ$ 以上の変化があれば応力変化として検出できることがわかった。このうち生野では地殻歪観測と比較した。すべり破壊の危険度推定のために, 平均応力に対する剪断応力の比 $\mu_m$ を求めて比較した。15年間で5回の測定のある平木では $\mu_m$ の変化と主応力方向の変化について検討した。すべての測定値を第2表, 第3表に, また結果の一部を図に示した。

#### 結果の考察

##### 1. 応力解放法と水圧破碎法の比較測定

両者はかなりよく一致するが, 場所による条件次第で, 完全には一致しない。

##### 2. 3次元応力測定

30mより浅い測定では主応力方向は信頼できるが, 亀裂が多いため応力値としては小さく求められる。また近畿北部の測定結果, この地域の平均応力状態は, 横ずれ断層型(中間主応力が鉛直)が支配的であるという結果を得た。

##### 3. 水平面内最大応力方位

地形の影響の大きい地点, とくに山岳地域を除くと, 発震機構解析によるP軸, あるいは測地測量による最大圧縮歪軸とよく一致する。地域的バラツキは測定誤差というより, 活断層の影響等地域的特徴であろう。

##### 4. 応力深度勾配

###### 1) 鉛直応力

トンネル内での測定では応力集中と地形影響を受けて, 真の値を示さないことがある(3点)。それ以外では, かぶり圧 $\rho gh$ に等しい勾配0.027MPa/mという平均値を得た。

## 2) 水平面内最大主応力

バラツキが大きい。これは地域的特性をあらわすものと考えられる。

## 3) 水平面内最小主応力

標準偏差がもっとも小さく、勾配はほぼ0.020MPa/mとなる。最小主応力値は地域的時期的変化が少ないためと考えられる。この結果はほぼ同じ地質条件と同一テクトニクス区内の測定であるため、古生層地塊などでは勾配が異なるものであろう。

## 4) 同一鉛直ボアホール内での水圧破碎による測定

3次元応力測定の場合は現場で岩盤条件の良い場所を選ぶことができるが、同一地点での鉛直ボーリングによる応力深度勾配測定では必ずしも直線的に深部ほど増加するわけではない。宝殿ではほぼ等間隔の亀裂のため、応力が低下している地点があり、逆に万成は均質部分で応力緩和が生じ、固結した古い断層等で応力集中を生じている。

## 5. 平均応力に対する剪断応力の比 $\mu_m$

近畿北部では  $\mu_m$  の値が0.3前後で低い。万成では深度200m以深で値が急増する。

## 6. 応力変化

平木では15年間に主応力方向が変化し、 $\mu_m$  の値が増大している傾向がある。万成は地殻歪変化も小さく、地震活動も低いにも拘らず応力値が高いが、応力変化が少なく、高応力ながら（剪断応力は小さく）安定していると考えられる。

（地震予知連絡会会報 第23, 26, 27, 28, 30, 32, 33, 36, 38, 41, 44, 46, 48, 50巻 参照）

## 今後の問題点

京都周辺の古生層3箇所では3次元応力測定ボーリングを行ったが亀裂が多く、孔壁の崩落などもあり、いずれも失敗した。また、変成岩帯である和歌山県長峰の測定精度も悪い。測定精度は応力変化を求めるためには、さらに向上を計るべきであるが、岩盤の良い地域の絶対応力測定には十分で、むしろ場所の差による方が大きい。紀伊半島や室戸岬あるいは古生層中など岩盤の条件の悪い地域での測定のためには、別の技術の開発が必要である。実戦的地震予知のためには、測定深度は500m位として、測定点を多くすること。また、測定を繰り返して、応力変化に注目すべきである。応力変化を求めるためには400~500m位の深度が有効であり、できるだけ応力深度勾配の変化を求めるべきである。

第1表 測定場所と測定方法

Table.1 Stress measuring sites and methods.

測定場所	記号	測定深度(m)	地質	測定方法	測定年月	備考
平木	HK	108	白亜紀後期流紋岩	応力解放法(8素子ゲージ)	1978,07	科研費一般B
棚原	YH	370	新第三紀輝緑岩	" ( " )	1978,12	"
佐々連-A	SZ-A	1,219	三波川帯緑色片岩	" ( " )	1979,06	
佐々連-B	SZ-B	1,550	"	" ( " )	1979,07	
明延-A	AN-A	430	舞鶴帯塊状粘板岩	" ( " )	1979,12	
明延-B	AN-B	210	" 珪化斑れい岩	" ( " )	1979,12	
中竜	NT	590	飛驒構造帯輝緑岩	" ( " )	1980,07	
神岡	KO	495	飛驒変成帯片麻岩	" ( " )	1980,10	
大谷	OT	329	第三紀初期花崗岩	" ( " )	1981,07	
長峰	NM	385	三波川帯緑色片岩	" ( " )	1981,11	
城見台	SM	115	古生層粘板岩、凝灰岩質砂岩	" ( " )	1982,07	
宝殿	HD	5	白亜紀後期流紋岩質熔結凝灰岩	" ( " )	1982,08	
諏訪山	SW	82	白亜紀後期花崗閃緑岩	" ( " )	1983,08	
高塚山	TT	30	白亜紀後期黒雲母花崗岩	水圧破砕法(48mmφ)	1984,07	
高塚山	TT	17	"	応力解放法(16素子ゲージ)	1984,07	
諏訪山	SW	82	白亜紀後期花崗閃緑岩	" (16素子ゲージ)	1985,06	
諏訪山	SW	82	"	水圧破砕法(48mmφ)	1985,06	
平木	HK	200~240	白亜紀後期流紋岩	" (60mmφ)	1985,09	8点測定
諏訪山	SW	82	白亜紀後期花崗閃緑岩	" (48mmφ)	1985,07~'86,04	9回
堅田	KD	0~90	古生層(泥岩、砂岩、チャート)	" (60mmφ)	1986,07	測定失敗
北小松	KK	40	" (チャート)	" (48mmφ)	1986,09	測定不良
宝殿	HD	17	白亜紀後期流紋岩質熔結凝灰岩	応力解放法(16素子ゲージ)	1986,11	
宝殿	HD	25	"	水圧破砕法(48mmφ)	1986,12	
宝殿	HD	25	"	" ( " )	1987,03.09	反復2回
生野	IN	20	"	" ( " )	1988,01	
生野	IN	20	"	" ( " )	1988,08	反復1回
宝殿	HD	20~95	"	" (60mmφ)	1988,09	12点測定
京北	KH	30	古生層(片岩と泥岩の互層)	"	1988,12	測定不能
平木	HK	23~70	白亜紀後期流紋岩	水圧破砕法(60mmφ)	1989,02	12点測定
土橋	TH	140	白亜紀後期流紋岩質熔結凝灰岩	応力解放法(16素子ゲージ)	1989,03	
平木	HK	25	白亜紀後期流紋岩	水圧破砕法(48mmφ)	1989,04	
土橋	TH	140	白亜紀後期流紋岩質熔結凝灰岩	" ( " )	1989,11	
土橋	TH	140~190	" (珪化帯)	" (60mmφ)	1989,11	6点測定
万成	MN	35~200	白亜紀後期万成花崗岩	" ( " )	1990,11	10点測定
万成	MN	200~300	"	" ( " )	1991,11	9点測定
平木	HK	108	白亜紀後期流紋岩	" (48mmφ)	1992,12	
生野	IN	25	白亜紀後期流紋岩質熔結凝灰岩	" ( " )	1993,12	

第2表 3次元応力測定結果

Table.2 Results of 3 dimensional absolute stress measurements.  
 $\alpha$  : azimuth,  $\beta$  : dip,  $\sigma_{h1}$  : horizontal maximum stress,  
 $\sigma_{h2}$  : horizontal minimum stress,  $\sigma_v$  : vertical stress.

測定場所	測定深度 (m)	$\sigma_1$			$\sigma_2$			$\sigma_3$			$\sigma_{h1}$		$\sigma_{h2}$	$\sigma_v$	
		MPa	$\alpha^\circ$	$\beta^\circ$	MPa	$\alpha^\circ$	$\beta^\circ$	MPa	$\alpha^\circ$	$\beta^\circ$	MPa	$\alpha^\circ$	MPa	MPa	
柵原	370	32.5	N105E	7	16.9	N156W	65	0.9	N 10E	26	32.0	N 83W	3.3	14.4	
平木	108	4.9	N 53W	48	3.1	N169W	21	1.9	N 86E	34	3.6	N 29W	2.6	3.7	
佐々連-A	1,219	58.9	N 72W	60	38.9	N 78E	26	5.9	N174E	13	43.2	N 93W	8.2	52.4	
佐々連-B	1,550	53.6	N 90W	12	31.4	N 43E	72	16.3	N177E	13	52.6	N 91W	17.1	31.7	
明延-A	430	13.5	N130E	82	11.9	N 37W	8	9.9	N127W	2	11.9	N 37W	9.9	13.5	
明延-B	210	10.3	N100W	7	7.1	N 12E	72	5.4	N168E	16	10.3	N100W	5.5	7.0	
中竜	590	19.5	N 58E	9	14.1	N 36W	22	5.5	N168E	67	19.2	N118W	12.9	7.0	
神岡	495	18.8	N143W	41	10.0	N 37W	17	8.0	N 70E	44	14.3	N149W	9.6	12.9	
大谷	329	20.1	N153W	1	9.0	N116E	14	4.6	N 60W	76	20.1	N153W	8.8	4.9	
長峰	385	36.8	N 98E	25	28.1	N171W	3	19.0	N 73W	65	33.6	N 85W	28.1	22.2	
城見台	115	7.4	N 80E	27	5.6	N 63W	57	3.2	N179E	17	7.0	N 95W	3.5	5.8	
宝殿	5	2.2	N 88W	77	1.0	N127E	11	0.8	N 36E	7	1.0	N 61W	0.8	2.1	
諏訪山	82	5.5	N157E	48	3.2	N 95W	16	1.3	N 8E	37	3.7	N 56W	2.5	3.8	
高塚山	30	1.9	N 95E	24	1.5	N 5E	0	0.6	N 85W	66	1.6	N 85W	1.5	0.8	
高塚山	17	5.6	N 69W	84	2.5	N117E	6	1.1	N 27E	1	2.5	N 63W	1.1	5.6	
諏訪山	82	4.7	N139E	42	3.2	N 61W	46	1.3	N 40E	10	4.0	N 48W	1.4	3.8	
諏訪山	82	7.2	N 9E	53	3.2	N115E	12	2.1	N147W	34	4.1	N 6W	3.0	5.5	
諏訪山	82	4.3	N 19W	45	2.8	N100E	26	2.6	N151W	34	3.5	N 24W	2.7	3.5	
生野	20	1.5	N143E	39	1.1	N117W	12	0.4	N 13W	48	1.2	N 80W	0.9	0.9	
宝殿	17	0.4	N 70W	67	0.2	N 90E	22	0.1	N177W	7	0.2	N 81W	0.1	0.3	
宝殿	25	2.2	N109E	0	1.9	N161W	17	1.4	N 19E	73	2.2	N 71W	1.8	1.4	
平木	25	3.0	N 45W	25	1.9	N141W	13	0.2	N104E	16	2.6	N 34W	1.7	0.8	
土橋	140	6.2	N 49E	11	5.2	N 65W	65	3.4	N144E	22	6.2	N 52E	3.7	5.0	
土橋	140	4.9	N160W	6	2.3	N 66W	34	0.9	N101E	55	4.9	N 18E	1.9	1.4	
平木	108	5.9	N164E	17	3.2	N 54W	69	1.3	N 70E	12	5.4	N 10W	1.6	3.3	
反復測定															
諏訪山	82	4.3	N 19W	45	2.8	N100E	26	2.6	N151W	34	3.5	N 24W	2.7	3.5	'85,10
諏訪山	82	4.2	N 23W	39	2.7	N136E	49	2.6	N122W	11	3.6	N 24W	2.6	3.3	'85,11
諏訪山	82	4.3	N 25W	48	3.0	N169E	36	2.6	N 87E	18	3.5	N 18W	2.7	3.7	'85,12
諏訪山	82	5.2	N 17W	42	2.4	N 92E	20	2.2	N159W	41	3.9	N 20W	2.4	3.6	'86,01
諏訪山	82	4.0	N 10W	43	3.0	N 90E	22	2.3	N158W	45	3.4	N 24W	2.8	3.2	'86,03
諏訪山	82	4.0	N 20W	43	2.5	N 90E	22	2.3	N158W	45	3.3	N 15W	2.5	3.2	'86,04
宝殿	25	2.4	N101E	25	2.0	N176E	15	0.9	N 65W	61	2.2	N 62E	1.8	1.2	'87,03
宝殿	25	2.9	N 78E	15	1.9	N173E	18	0.6	N 50W	66	2.8	N 72E	1.8	0.9	'87,09
生野	20	1.7	N164E	50	0.9	N 93W	11	0.3	N 6E	38	1.0	N 58W	0.8	1.1	'88,08

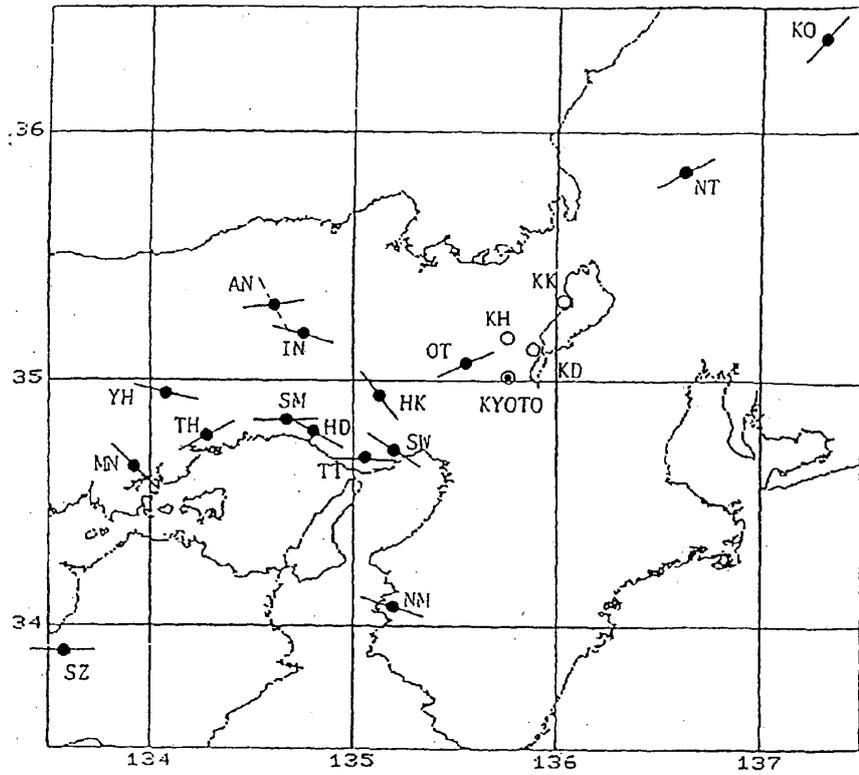
$\alpha$  : 方位、 $\beta$  : 傾角、 $\sigma_{h1}$  : 水平面内最大応力、 $\sigma_{h2}$  : 水平面内最小応力、 $\sigma_v$  : 鉛直応力

第3表 応力深度勾配測定結果

Table.3 Results of measurements for stress gradient with depth.

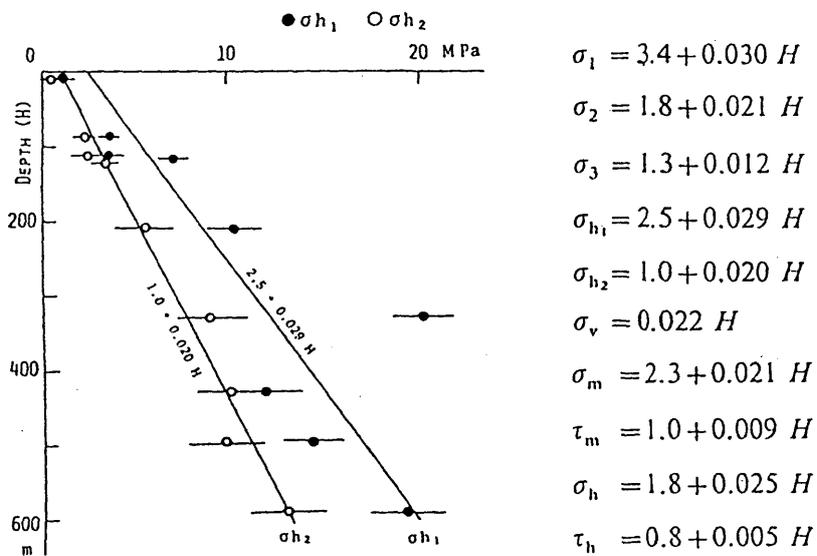
Depth (m)	$\sigma_{h1}$ (MPa)	$\sigma_{h2}$ (MPa)	Azimuth of $\sigma_{h1}$	Depth (m)	$\sigma_{h2}$ (MPa)	$\sigma_{h1}$ (MPa)	Azimuth of $\sigma_{h1}$
平木 IIIK				宝殿 IID			
23.3	3.8	2.0	N28.9°W	20	0.92	0.94	N 31.1°W
27.0	1.7	0.9	N47.5°W	25*	(1.49)	(2.26)	(N 45.1°W)
29.4	4.9	0.1	N83.3°W	35*	(0.95)	(1.25)	(N 65.5°W)
34.0	5.3	2.3	N43.5°E	40	1.84	2.94	N 77.0°W
37.3	3.7	1.4	N32.8°W	45	2.38	5.23	N 68.7°W
42.0	7.3	2.9	N53.8°W	55	0.95	1.78	N 81.3°W
45.0	9.3	3.6	N70.0°W	66	1.84	3.66	N 56.7°W
48.3	3.2	1.5	N33.3°W	70	1.67	3.67	N125.4°W
52.5	1.5	1.0	N76.7°E	75	1.27	2.32	N 76.4°W
56.5	4.4	2.1	N84.5°E	85	0.93	1.22	N 74.5°W
60.0	7.4	3.0	N41.5°W	90	1.48	2.99	N 75.7°W
64.6	4.9	2.6	N34.9°W	95	1.07	1.73	N 88.0°W
200	5.7	2.8	N17.1°W				
204	6.4	2.7	N 2.0°W	土橋 TII			
207	5.2	2.6	N 9.9°W	140	4.9 (6.4)	1.9 (0.4)	N18.4°E (N52°E)
217	2.4	2.2	N44.1°W	151	7.2 (9.0)	3.5 (4.2)	... (N52.°E)
223	5.5	2.5	N26.9°W	165	5.8 (7.5)	2.5 (0.8)	... (N52.°E)
229	...	3.5	...	169	4.5 (5.7)	2.0 (0.7)	... (N52.°E)
234	7.1	3.5	N26.1°W	177	5.4 (6.7)	2.8 (1.5)	N23.9°E (N52°E)
240	7.5	3.8	N 7.3°W	183	6.5 (8.2)	3.1 (1.4)	N11.4°E (N52°E)

	Depth (m)	$\sigma_{h1}$ (MPa)	$\sigma_{h2}$ (MPa)	Azimuth of $\sigma_{h1}$	$\sigma_h$	$\tau_h$
万成 MN	35.5	—	2.90	N21.9° E	—	—
	52.0	2.45	1.82	N16.4° E	2.14	0.32
	63.0	4.80	3.78	N22.2° W	4.29	0.51
	74.7	3.42	3.03	N46.7° W	3.23	0.20
	86.5	4.49	2.83	N40.2° W	3.66	0.83
	119.0	3.26	2.74	N43.5° W	3.00	0.26
	138.0	3.65	2.42	N84.2° W	3.04	0.62
	157.0	3.75	2.89	N58.5° W	3.32	0.43
	179.0	7.18	4.57	N10.2° W	5.88	1.31
	183.5	11.12	6.08	N64.8° W	8.60	2.52
	202.3	30.35	15.53	N16.9° W	22.94	7.41
	214.4	18.40	8.45	N51.2° W	13.43	4.98
	223.0	14.50	6.73	N57.6° W	10.62	3.89
	230.0	15.16	6.96	N57.3° W	11.06	4.10
	240.8	21.31	9.70	N71.3° W	15.51	5.81
	264.0	25.51	12.20	N34.9° W	18.86	6.66
	275.3	17.09	8.83	N48.7° W	12.96	4.13
	285.4	17.06	8.82	N61.1° W	12.94	4.12
	292.2	24.31	12.13	N44.7° W	18.22	6.09



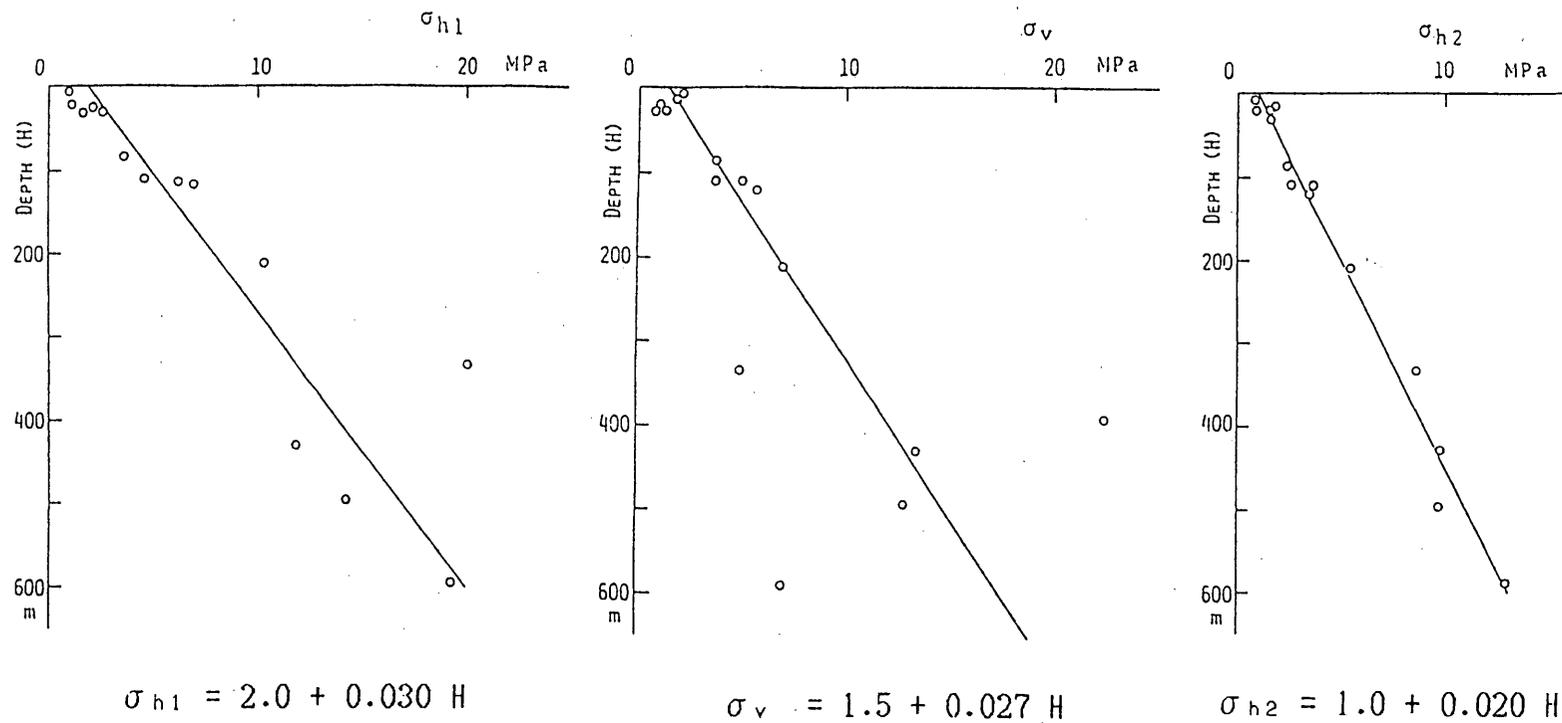
第1図 応力測定場所および水平面内最大主応力方位

Fig.1 Location of the measuring sites for crustal stress and azimuth of maximum horizontal stress at each site.



第2図 西日本標準応力深度勾配 1986

Fig.2 Standard stress gradients with depth in Western Japan (1986).

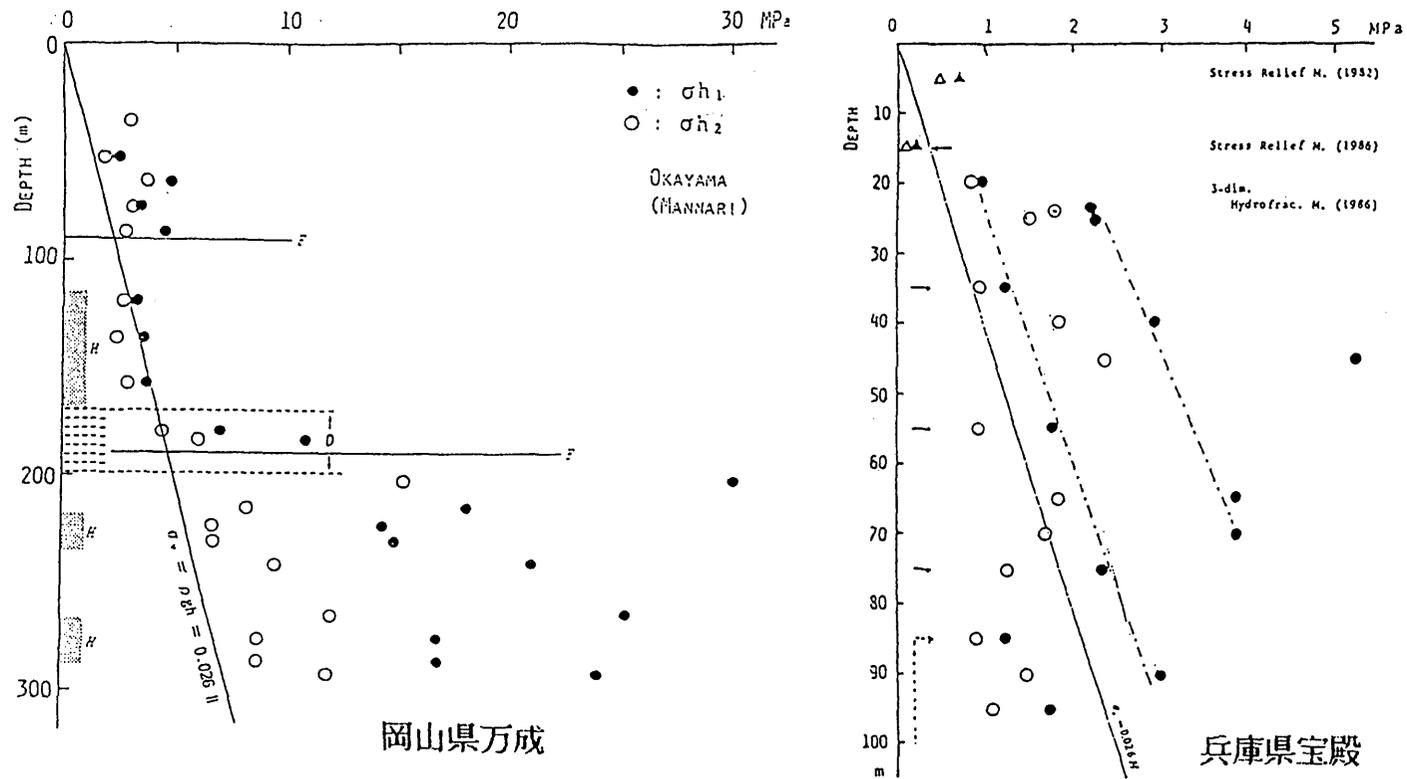


第3図 3次元応力測定による応力の深度分布

左：水平面内最大主応力 中：鉛直応力 右：水平面内最小主応力

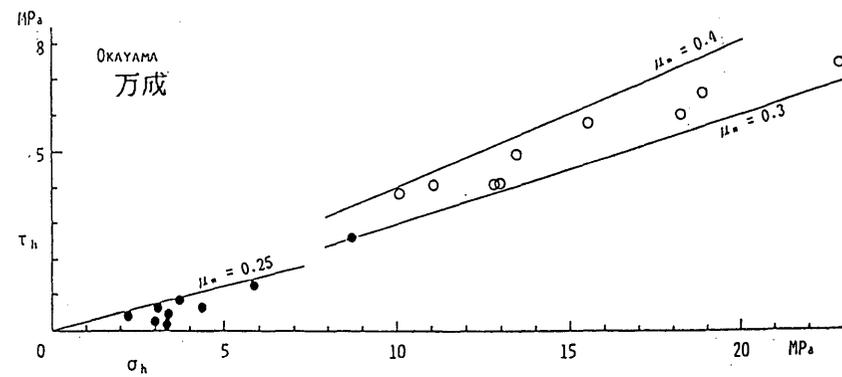
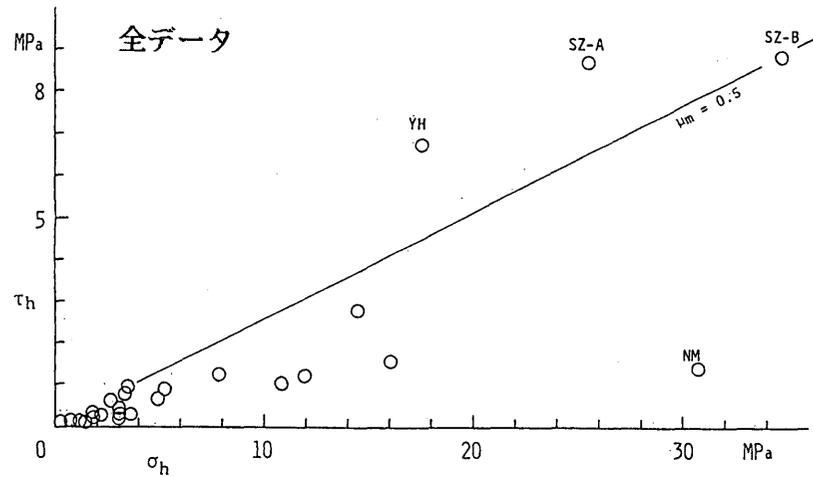
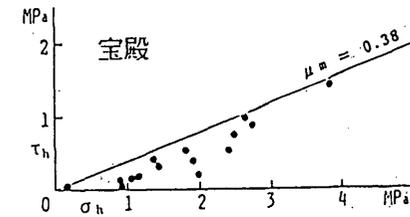
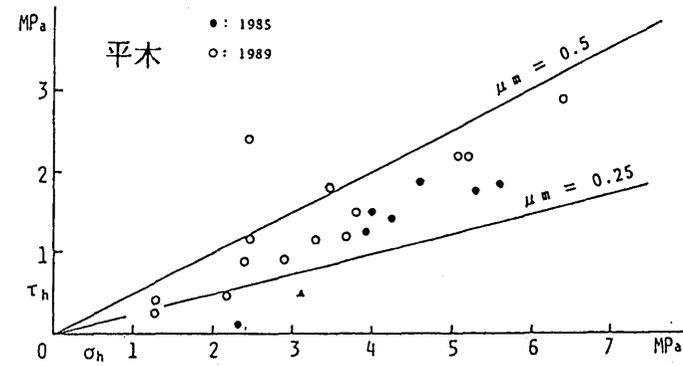
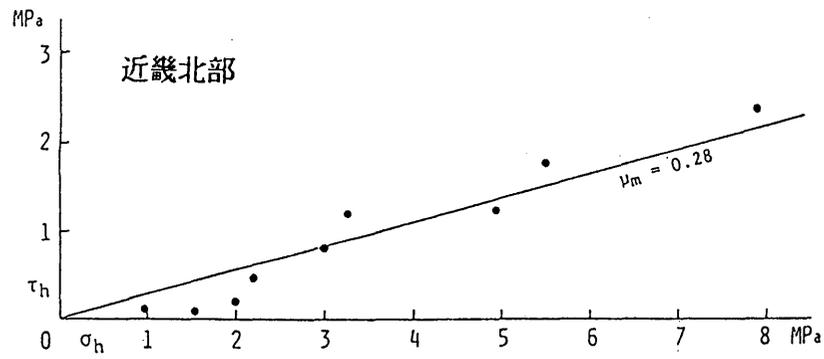
Fig.3 Stress distribution with depth by 3 dimensional stress measurements.

Left : horizontal maximum stress. Middle : vertical stress. Right : horizontal minimum stress.



第4図 鉛直ボアホール内の測定による応力深度分布 (例)

Fig.4 Depth distribution of horizontal principal stresses obtained from measurements at a vertical borehole (Examples).  
 Left : Mannari site, Okayama City. Right : Hoden site, Hyogo Prefecture.



第5図 水平面内平均応力に対する剪断応力の比 $\mu_m$

Fig.5 The ratio ( $\mu_m$ ) of maximum shear stress value to mean stress value.  
Left two : by 3 dimensional stress measurement. Right three : by hydrofracturing method at a vertical borehole.