

6-21 3次元応力の測定と応力深度勾配の測定

—平木鉱山および土橋鉱山—

Measurements of 3 Dimensional Stress and Stress Gradient with Depth — The Hiraki Mine and The Tsuchihashi Mine

西日本地殻応力調査班

The Research Group of Crustal Stress in Western Japan

平木鉱山、土橋鉱山において第一表の通り応力測定を実施した。

- 1) 水平面内主応力方向は、測定上問題のあるものを除くと、 $\pm 8^\circ$ 程度のバラツキで収まり、テクトニック・ストレスをよく反映していると考えられる（第1図）。
- 2) 平木の1989年の測定は1985年の測定に対し、主応力方向が東西に近く変化したように見える。測定点が異なるが、1987年以後活発化している京都府亀岡（第1図大谷付近）の地震活動による応力再配分のため、東西応力増大の可能性もある（第5図）。
- 3) 土橋の鉛直ボーリングは珪化帯よりおこなったが、下方17mで粘土を含む小断層、または破碎帯に遭遇し、その下部は蠟石鉱床に入り込んだ。蠟石の塑性変形が激しく、5点で水圧破碎を行ったが測定は困難をきわめた。最下部の2点で亀裂の方位測定を行った直後、パッカーが孔変形のため閉じ込められ、捲上げ不可能となり上部2点については、亀裂の方位測定はできなかった（第2図）。しかし、応力解放4回、水圧破碎3回の結果をみると（第4図）、応力解放3回と水圧破碎3回および応力解放（10.25m）1回の結果が主応力方向で系統的に 35° 前後ずれて2組に分かれるのは明らかである。つまり、水圧破碎法による結果は、蠟石の塑性変形が大きく、孔が変形し、孔壁の接線応力が緩和し、水圧破碎を行った時最大せん断応力の方向に亀裂が生じた（あるいは亀裂が生じていた）ものと考えられる。そこで、最大主応力方向を応力解放による $N52^\circ E$ と仮定し、亀裂方向の応力とそれと直交する応力から最大主応力値と最小主応力値を計算した。これが補正された主応力値である（第4図内点線）。
- 4) 土橋の応力深度勾配は宝殿の応力勾配とほぼ等しい。最小主応力は西日本標準応力勾配に比べて小さく、従ってせん断応力は深部ではやや高くなっていると推定される。平木の浅部の応力値は宝殿の場合と同じくバラツキが大きい。第6図に見られるように1989年の測定は、1978年、1985年の測定値に比べると、最小主応力値 σ_{h_2} は余り変わらず、最大主応力値 σ_{h_1} は増加しているように見える。第7図でも平均主応力 σ_h と最大せん断応力 τ_h の比 μ が増加している傾向が見られる。場所的な違いか、時間的な変化であるかは断定できない（2）参照）。

第1表 平木, 土橋における応力測定実施項目

Table 1 Operation items for stress measurements at Hiraki and Tsuchihashi sites.

	3次元応力測定		応力深度勾配測定	
	応力解放法	小口径水圧破碎法	60 mm 径水圧破碎法	
平木鉦山 兵庫県 加東郡 社町	1978年12月 (8素子ゲージ法) 地表下108m坑道 (科研費)	1989年4月 地表より斜下2方向、 各30m、鉛直60mm併用 白亜紀後期流紋岩	1985年9月 地表下145m坑道 から鉛直100m、 (同和工営KK)	1989年2月 地表より 鉛直100m
土橋鉦山 岡山県 備前市 三石	1989年3月 (16素子ゲージ法) 地表下140m坑道 白亜紀後期流紋岩質熔結凝灰岩珪化帯	1989年11月 小口径水圧破碎法 地表下140m坑道より 2方向、鉛直60mm併用	1989年11月 60mm径水圧破碎法 地表下140m坑道より 鉛直60mボーリング 珪化帯下部の蠟石鉦床	

第2表 平木と土橋における3次元応力測定結果

Table 2 Results of absolute stress measurements at Hiraki (left) and Tsuchihashi (right) sites.

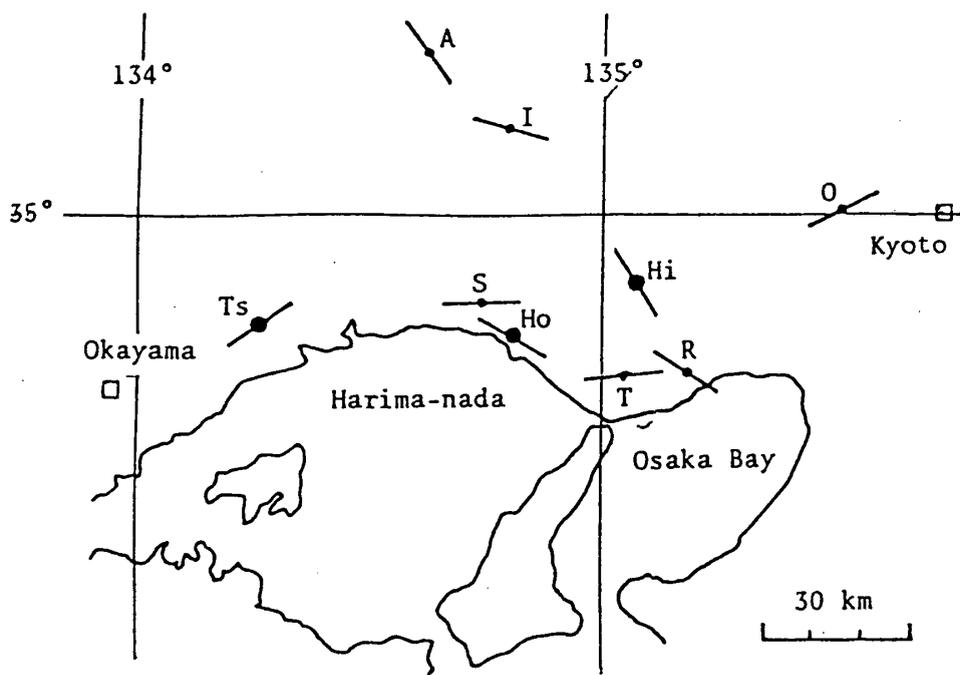
Stress Relief Method				Stress Relief Method			
	MPa	Azimuth	Dip		MPa	Azimuth	Dip
σ_1	4.9 ± 0.5	N 53°W±15°	48°±10°	σ_1	6.2 ± 0.6	N 49°E± 9°	11°±18°
σ_2	3.1 ± 0.7	N169°W±18°	21°±20°	σ_2	5.2 ± 0.4	N 65°W±34°	65°±14°
σ_3	1.9 ± 0.5	N 86°E±25°	54°±10°	σ_3	3.4 ± 0.6	S 36°E± 8°	22°±11°
σ_{h1}	3.6 ± 0.8	N 29°W±27°	-----	σ_{h1}	6.2 ± 0.6	N 52°E±10°	-----
σ_{h2}	2.6 ± 0.7	N118°W±27°	-----	σ_{h2}	3.7 ± 0.6	N 38°W±10°	-----
σ_v	3.7 ± 0.4	-----	-----	σ_v	5.0 ± 0.4	-----	-----
Hydrofracturing Method				Hydrofracturing Method			
	MPa	Azimuth	Dip		MPa	Azimuth	Dip
σ_1	3.0 ± 0.4	N 45°W±12°	25°± 8°	σ_1	4.9 ± 0.7	S 20°W±10°	6°±10°
σ_2	1.9 ± 0.4	S 39°W±12°	13°±10°	σ_2	2.3 ± 0.8	N 66°W±15°	34°±23°
σ_3	0.2 ± 0.6	S 76°E±16°	61°± 9°	σ_3	0.9 ± 0.8	S 79°E±21°	55°±23°
σ_{h1}	2.6 ± 0.4	N 34°W±18°	-----	σ_{h1}	4.9 ± 0.7	N 18°E±11°	-----
σ_{h2}	1.7 ± 0.3	N 56°E±18°	-----	σ_{h2}	1.9 ± 0.7	N108°E±11°	-----
σ_v	0.8 ± 0.6	-----	-----	σ_v	1.4 ± 0.8	-----	-----

第3表 平木と土橋における測定深度と水平面内主応力値

() 内は主応力方向をN52° Eとして補正した結果

Table 3 Principal horizontal stress values and azimuths at different depths calculated from hydrofracturing data at Hiraki site (upper) and Tsuchihashi site (lower). The values in parenthesis are the corrected values deduced from the principal stress direction N 52° E.

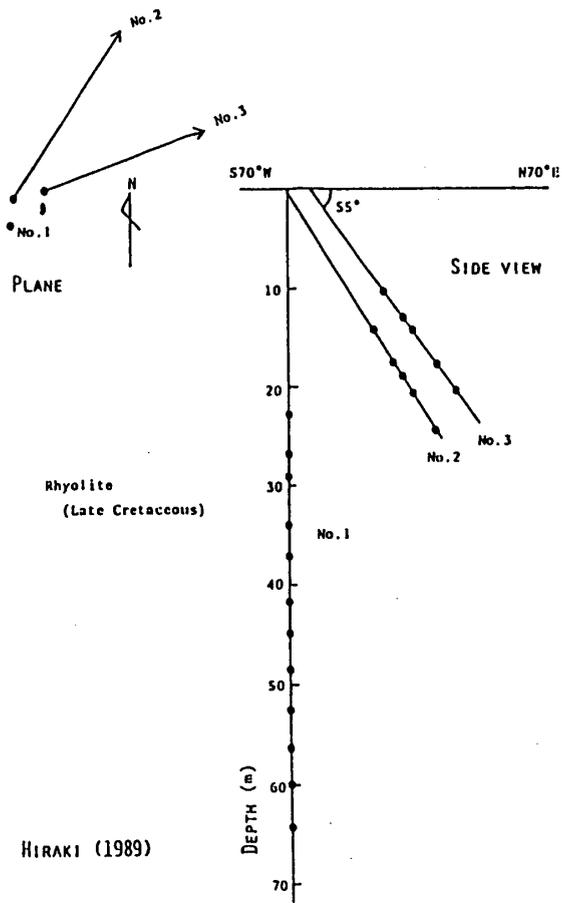
Depth(m)	σ_{h1} (MPa)	σ_{h2} (MPa)	Direction of σ_{h1}
23.3	3.8	2.0	N28.9°W
27.0	1.7	0.9	N47.5°W
29.4	4.9	0.1	N83.3°W
34.0	5.3	2.3	N43.5°E
37.3	3.7	1.4	N32.8°W
42.0	7.3	2.9	N53.8°W
45.0	9.3	3.6	N70.0°W
48.3	3.2	1.5	N33.3°W
52.5	1.5	1.0	N76.7°E
56.5	4.4	2.1	N84.5°E
60.0	7.4	3.0	N41.5°W
64.6	4.9	2.6	N34.9°W
200	5.7	2.8	N17.1°W
204	6.4	2.7	N 2.0°W
207	5.2	2.6	N 9.9°W
217	2.4	2.2	N44.1°W
223	5.5	2.5	N26.9°W
229	---	3.5	-----
234	7.1	3.5	N26.1°W
240	7.5	3.8	N 7.3°W
Depth(m)	σ_{h1} (MPa)	σ_{h2} (MPa)	Direction of σ_{h1}
140	4.9(6.4)	1.9(0.4)	N18.4°E(N52°E)
151	7.2(9.0)	3.5(4.2)	----- (N52°E)
165	5.8(7.5)	2.5(0.8)	----- (N52°E)
169	4.5(5.7)	2.0(0.7)	----- (N52°E)
177	5.4(6.7)	2.8(1.5)	N23.9°E(N52°E)
183	6.5(8.2)	3.1(1.4)	N11.4°E(N52°E)



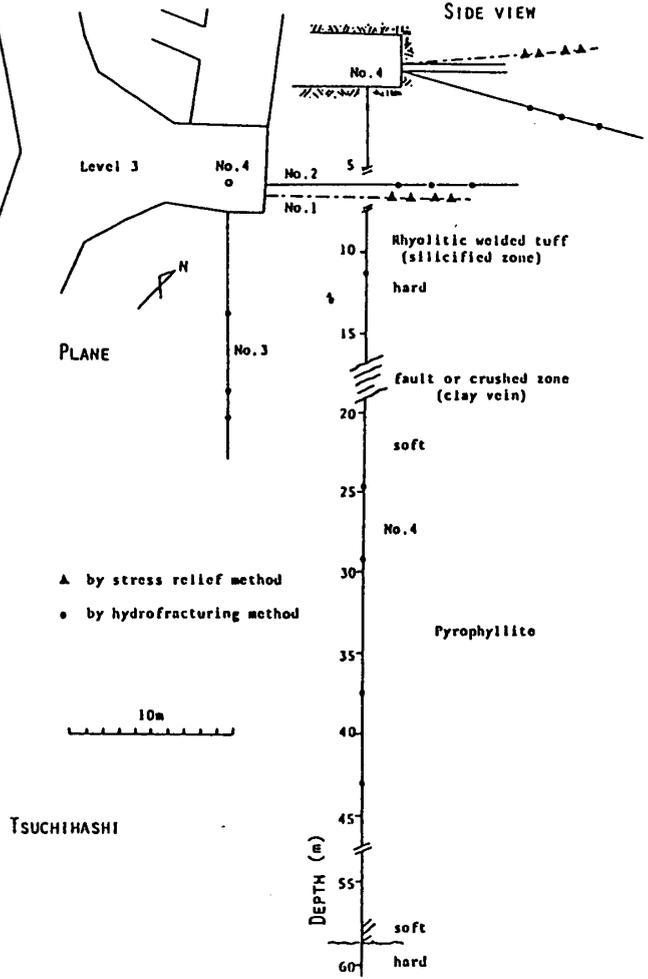
第1図 応力測定点及び水平面内最大主応力方向
 Hi: 平木, Ts: 土橋, Ho: 宝殿, A: 明延, I: 生野,
 O: 大谷, T: 高塚山, S: 城見台, R: 六甲諏訪山

Fig. 1 Location of the measuring site for crustal stress and azimuth of maximum horizontal stress in Northwest Kinki District.

Hi: Hiraki, Ts: Tsuchihashi, Ho: Hoden, A: Akenobe, I: Ikuno, O: Otani, T: Takatsukayama, S: Shiromidai, R: Rokko-Suwayama



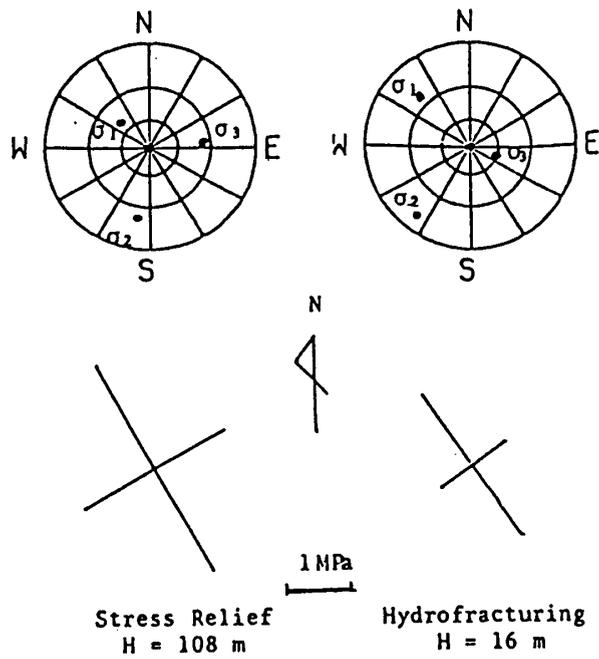
HIRAKI (1989)



Tsuchihashi

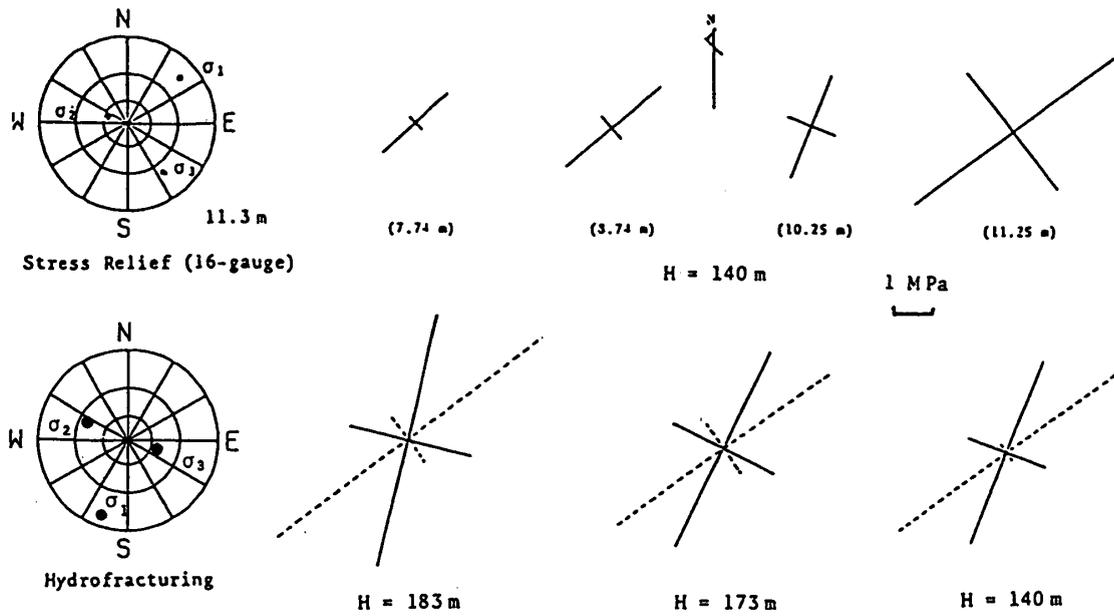
第2図 平木（左）と土橋（右）のボーリング孔方向と測定点位置

Fig. 2 Direction of boreholes at Hiraki (left) and Tsuchihashi (right) measuring sites.
 ●: hydrofracturing points.
 ▲: stress relief points.



第3図 平木3次元応力測定結果
 上：主応力軸方向（下半球ステレオ投影）
 下：水平面内主応力軸

Fig. 3 Results of absolute stress measurements at Hiraki site.
 Upper: directions of principal stresses shown on stereographic net of lower hemisphere.
 Lower: principal axes of horizontal stress.



第4図 土橋3次元応力測定結果

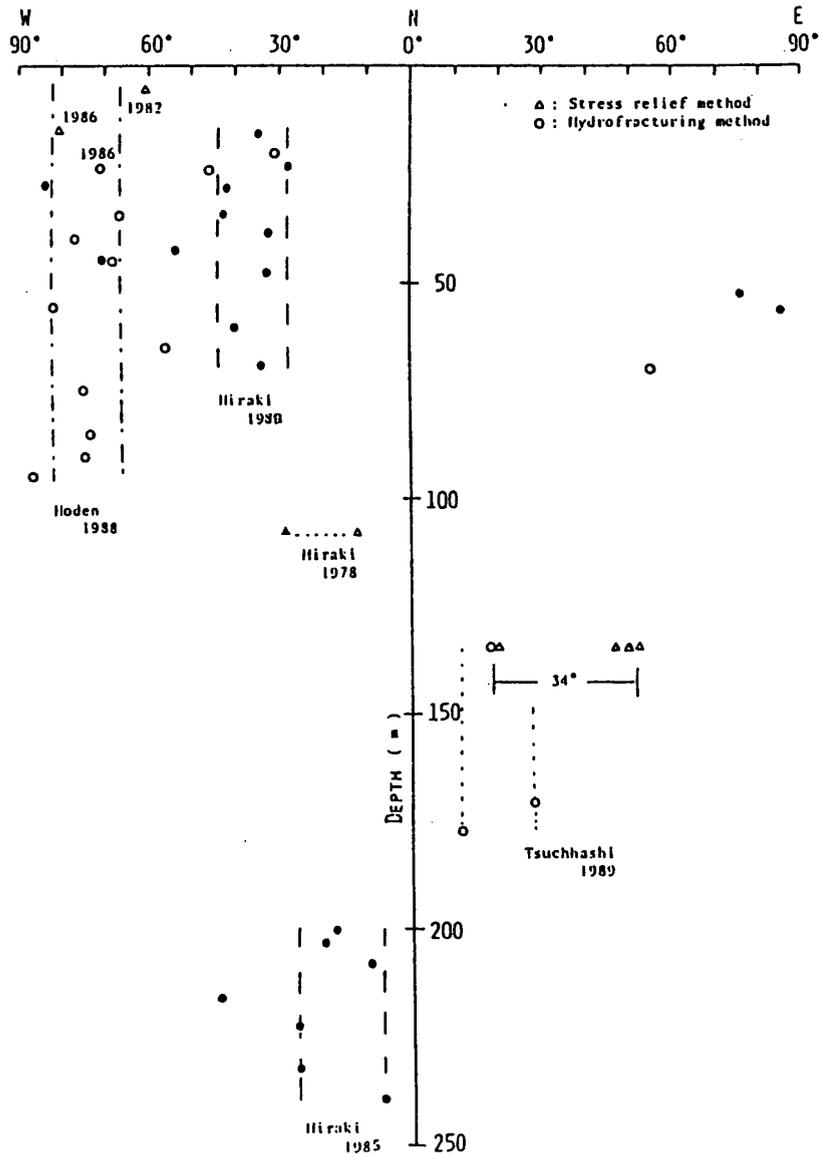
主応力軸方向の下半球ステレオ投影（左端）と水平面内主応力軸

上段：応力解放による。（ ）内は孔口よりの測定点深度

下段：水圧破碎法による。Hは地表からの測定点深度

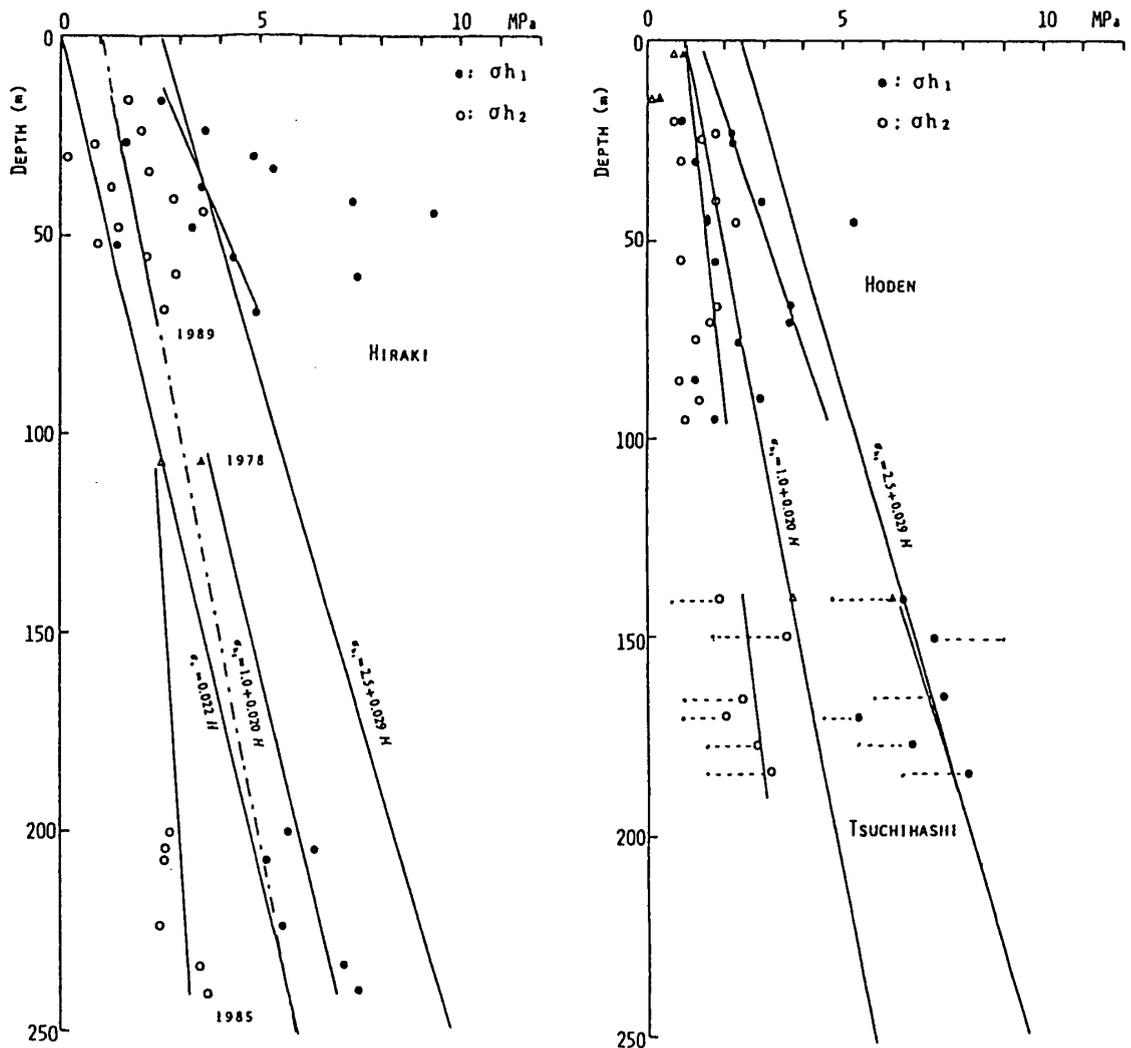
実線は測定値，点線は主応力方位をN52° Eと仮定して，補正後の主応力値。

Fig. 4 Results of absolute stress measurements at Tsuchihashi site. Directions of principal stresses shown on stereographic net of lower hemisphere (leftmost) and principal axes of horizontal stress (right). Upper: by stress relief method, Lower: by hydrofracturing method. The values in parenthesis are the depth of the measuring point from the mouth of borehole. H is the depth of measured point from the ground surface. Solid line shows the measured values, and dotted line shows the principal stress value after correction, assuming the principal stress direction N 52° E.



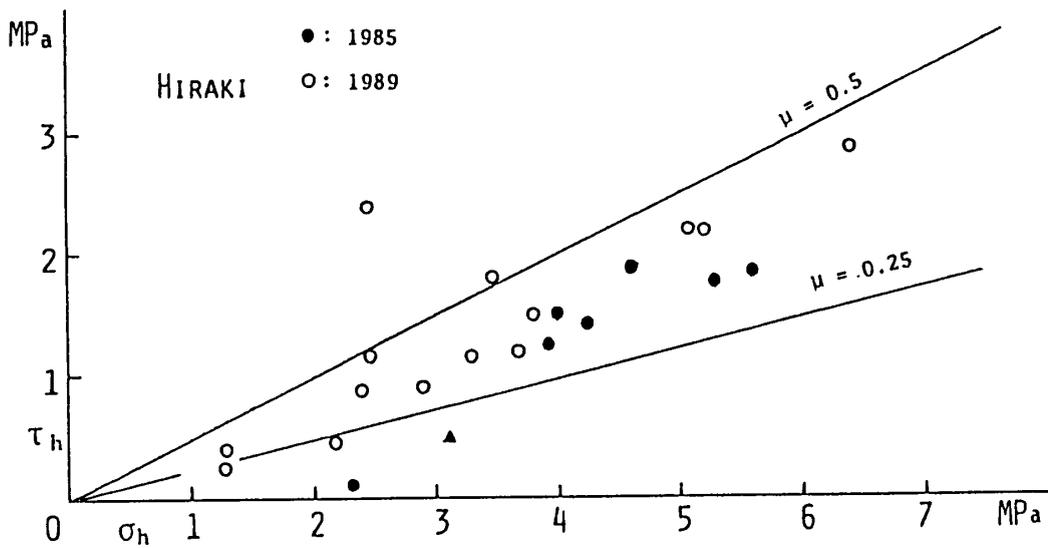
第 5 図 平木, 土橋, 宝殿の各測定深度における主応力軸方向

Fig. 5 The azimuth of principal stress at each depth of measuring points of Hiraki, Tsuchihashi and Hoden.



第 6 図 水平面内主応力値の深度分布
 左：平木，右：土橋，宝殿
 点線は補正量を示す。

Fig. 6 Variation of horizontal principal stress value with depth.
 Left: Hiraki, Right: Tsuchihashi, Hoden.
 Broken line shows the correction value.



第7図 平木の測定結果による平均応力 $\sigma_h = (\sigma_{h1} + \sigma_{h2}) / 2$, と最大せん断応力 $\tau_h = (\sigma_{h1} - \sigma_{h2}) / 2$ の比。1989年の測定は勾配 μ がやや増加している傾向がある。

Fig. 7 The ratio of the mean stress value $\sigma_h = (\sigma_{h1} + \sigma_{h2})/2$ and the shear stress value $\tau_h = (\sigma_{h1} - \sigma_{h2})/2$ at Hiraki site. The measured values in 1989 show the tendency of slight increase of the ratio μ .