

測定された地殻応力変化と観測された 地殻ひずみ変化の比較

田中 豊・藤森 邦夫・竹内 智一

COMPARISON BETWEEN MEASURED CRUSTAL STRESS CHANGES AND OBSERVED CRUSTAL STRAIN CHANGES

By *Yutaka* TANAKA, *Kunio* FUJIMORI and *Tomokazu* TAKEUCHI

Synopsis

The observation of crustal strain has been carried out at Ikuno Geophysical Observation Station using 4 components of extensometers since 1977. The observed results at Ikuno make it clear that changes of maximum tilt direction and principal strain axis have occurred systematically. These phenomena suggest time changes of stress field in the northwestern part of Kinki District.

To confirm these stress changes, in Jan. 1988, measurement of three-dimensional absolute crustal stress was made using hydro-fracturing methods in three boreholes near the observation station. In Aug. 1988, using the same boreholes, the measurements of absolute stress were again made repeatedly. Then, stress changes were estimated and further, strain changes were calculated through the stress-strain relation in the two-dimensional modeling. The obtained data were finally comparative-studied with those data obtained by the extensometers.

Because of the fact that absolute stress values themselves are low, measurements were not very accurate. On the other hand, the amounts of observed strain changes, due to cavity effect and inhomogeneity of rock in the observational tunnel, lead to noticeable errors of analysis. As a whole, the observed strain changes agree well in characteristics with calculated strain changes from the results of stress measurements within the observational error. But Young's modulus must be taken 200 GPa, several times of elastic constant ($E=26$ GPa) by the uniaxial compression test of in situ rock.

Object of this paper, however, is not to show coincidence of both the measured values. The real purpose is to indicate a future prospect which enables Earthquake Prediction Study to elevate from conventional "qualitative" discussion to "quantitative" one by this comparative observation of stress and strain.

1. 緒 言

地殻変動連続観測の結果と測地測量の結果が量的に合致しないという議論が常にある。また水管傾斜計に

比べて水平振子型傾斜計の変化量が大きすぎる、場所によって全く変動の様子が違うともいわれる。しかし地質が複雑なこと、計器の測線長が異なること、地下坑道内に設置すること、すなわち、岩盤のブロック構造、不均質性、異方性、弾性定数、坑道周辺の応力集中(Cavity効果)、計器の特性を考えれば、合致しないのがむしろ当然であり、測量と連続観測の結果が一致するのは偶然であると言えよう。測線長が長ければ、波長の長い変動しかとらえないし、測線長が短ければ、短波長の変動もとらえ、変動振幅も大きくなる。また、測定の間隔が短ければより短い周期の変動をもとらえる。地盤が不均質であり、地形、地質構造に各種の波長のものがある限り、測量や観測されるものは均質弾性体とはほど遠い複雑性の集積となる。したがって、少しでもこれらの効果から逃れる工夫、あるいは、その差異の究明のための研究がなされている。例えば、六甲鶴甲の多測点の観測¹⁾の開始(1970)は、その最初であり、大規模な野外岩石実験である。生野の4成分伸縮計設置も、この流れにしたがうものである。

元来、長期の連続観測では計器あるいは設置台、坑道のドリフトがあり、むしろ変動速度の変化に注目すべきであって、場合によりCavity効果は増幅作用を伴い、変動変化の検出にはそのような場所を選ぶのが特策でさえある。一方また、地殻変動では今少し定量的、力学的な議論がなされなければならない。地震前兆現象にも定量的、物理的基礎に基づいた論理的追究が必要で、将来、予知の確率を高めるためには、統計的处理では適中率は向上しないであろう。しかしながら例えば変動量、特にひずみ変化量が、測量や伸縮計による連続観測から決定できたとしても、ひずみの絶対量は岩盤を切り出して応力のかからない状態に戻さない限り測定は不可能であり、地殻内に蓄積されたひずみエネルギーを求めることはできない。その上、測量や伸縮計によるひずみ変化量には非弾性変形量や微小非回復性変位が含まれ、特に長期連続観測では各種のクリープ量もすべて含まれるわけである。地震エネルギーの蓄積状態を知ることは地殻の応力状態の地域性の解明と合わせて、地震予知計画における地殻応力測定の目的の一つである。

地殻応力測定は1979年にはじまる地震予知第4次計画から開始され、10年を経て種々の成果を挙げ²⁾、最近是小口径3次元水圧破砕法の繰返しにより³⁾、応力変化を検出できるようになった。もし応力変化とひずみ変化の観測を対比させるならば、応力-ひずみ関係は弾性定数を通して当然整合するはずであるが、現実には岩盤状態、観測条件などで、両者が一致することは地殻変動連続観測と測量を対比する以上に難しいと考えられる。しかし、ひずみ変化があり、特にひずみ速度の変化が観測される以上、例えばそれが増幅されて現れるにしろ応力変化が原因であることは事実である。両者の測定観測結果を対比することは観測量の定量化にも重要であり、ようやくこれが可能な段階に近づいたと言えよう。

しかし、応力変化量は年間でも1 MPaを越えないであろう。一方、主応力方向の変化は3つのプレート間の相互作用の影響を受ける地域では、起こり得る可能性がある。また、大地震前後で主応力軸方向が変化したという観測例⁴⁾や測定報告⁵⁾もある。

1951年から1969年までの生野鉱山内での傾斜計の観測によれば^{6),7)}、生野では10年あるいはそれ以上の周期で傾斜方向が変わっており、特に1960年頃には月総傾斜量も変わっているかのように見える。また、1977年以降の生野地学観測室の観測結果⁸⁾では、最大傾斜方向が変わると、ひずみ主軸方向も同時に変わるという事実が見いだされている。これらの観測結果は応力変化、特に応力値だけではなく、主応力方向が変わる可能性を示唆している。生野地域は応力変化を受けやすい地域であると考えられる理由は2つあり、一つは太平洋プレートあるいは北米プレートからの力とフィリピン海プレートからの力がこの付近でほぼ均衡しており、一方の勢力が増すと主応力方向が回転するという考え方と、生野を中心として東部、北部、南部の地域では、測地測量による水平ひずみの変動パターンに差が見られるので、生野はこれらの3地域の接合点付近にあり、応力状態の変化に敏感に反応する場所であるという考え方である。その原因の追究のためにも応力測定が必要である。一般に何か異常現象が見いだされた場合、その原因を応力場の変化にすりかえることが多い。しかし、応力場の変化そのものが観測や測定で実証されたことは、中国の例^{4),5)}以外にはない。この試みを行うためには、生野は最適の場所である。

2. 生野地学観測室における地殻ひずみの観測

2.1. 伸縮変化観測

現在の生野観測室の観測状況については田部井他⁹⁾で報告した。観測地点と付近の地形は Fig. 1 に示してある。兵庫県下では、7カ所で応力測定が行われており、水平圧縮応力軸は東西ないし北西—南東方向である (Fig. 2 参照)。

生野観測室では、既存の坑道を利用し、特殊な計器配置を行っている。水管傾斜計は正方形に配置され、4つのポットが一つに連結され、各ポットの水位差をとることにより4方向の傾斜成分を直接測定し、また6つの組合せによって検証できる。水平振子型傾斜計も45°方向を変えて4台が配置され、Cavity 効果を避けるよう工夫されている。伸縮計も45°方向を変えて4成分が設置され、直交2成分の値をそれぞれ加え合わせて、面積ひずみの2組の値から、異常変動の確認や計器の不調を検定できるようにしてある。坑内は地下水の湧出がほとんどなく、Fig. 3に見られる Tuff と Rhyolite の接触面から水滴が落ちる程度で坑外への流出はない。深度は30~40 m で浅いが、気象影響は比較的少なく、きわめて安定した観測が行われており、観測の信頼度は他の観測点に比較してきわめて高い。計器の測定方位と配置は Fig. 3 に示す通りで、伸縮計 EXT. 1, 2, 3, 4 の測線方向はそれぞれ N62° E, N28° W, N107° E, N17° E である。詳しくは田部井他⁹⁾を参照されたい。

今回は応力変化との比較が目的であるので、伸縮計によるひずみ変化観測の結果だけについて述べる。Fig. 4 は応力測定を実施した前後1年間 (1987. 12月~1988. 11月) の伸縮変化観測の結果である。3月から7月にかけての、のこぎり歯状の数日の変化は降雨によるものである。年周変化は EXT. 1 だけに明瞭に現れている。経年変化は EXT. 1 と3 で伸びが大きいがドリフトのような通常の傾向ではなく、この期間の特徴である。応力測定は1987年1月中旬と8月初旬に行った。1月は降雨の直前であり、8月は降雨影響が収まった頃にあたるので降雨影響については考えないことにする。ひずみ解析は1月~8月 (Fig. 4 に鎖線で示した) 間について行った。この期間はまた偶然にもこの1年間の変化の傾向をかなりよく代表しているように思われる。

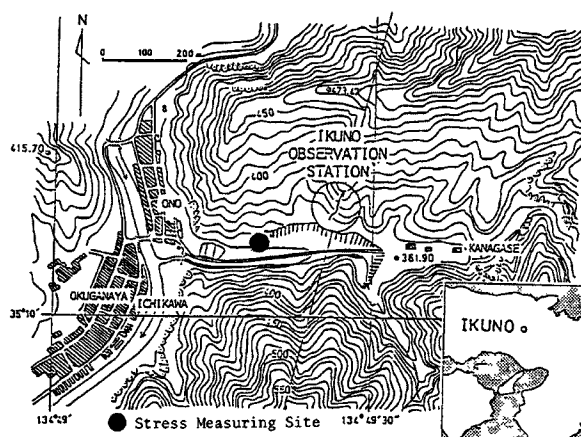


Fig. 1 Topography in the vicinity of the Ikuno Observation Station for crustal movement and the measuring site for crustal stress (●).

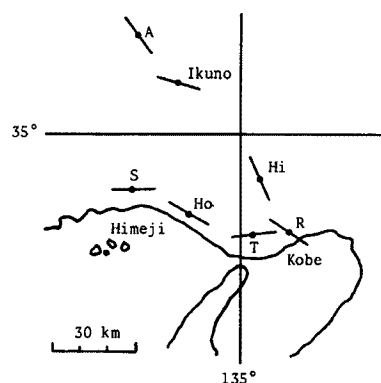


Fig. 2 Distribution of direction of maximum horizontal stress in Hyogo Prefecture.
A: Akenobe, S: Shiromidai, Ho: Hoden, Hi: Hiraki, T: Takatsukayama, R: Rokko-Suwayama

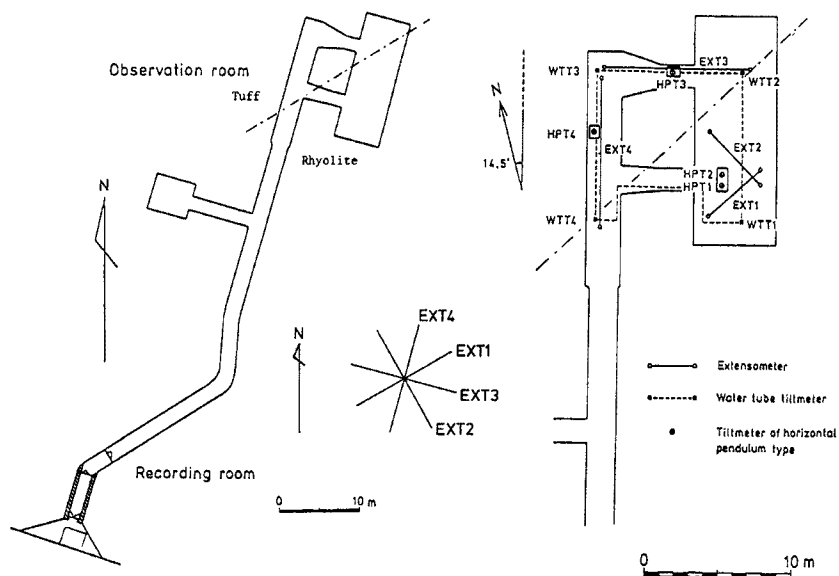


Fig. 3 Observation tunnel and arrangement of instruments.

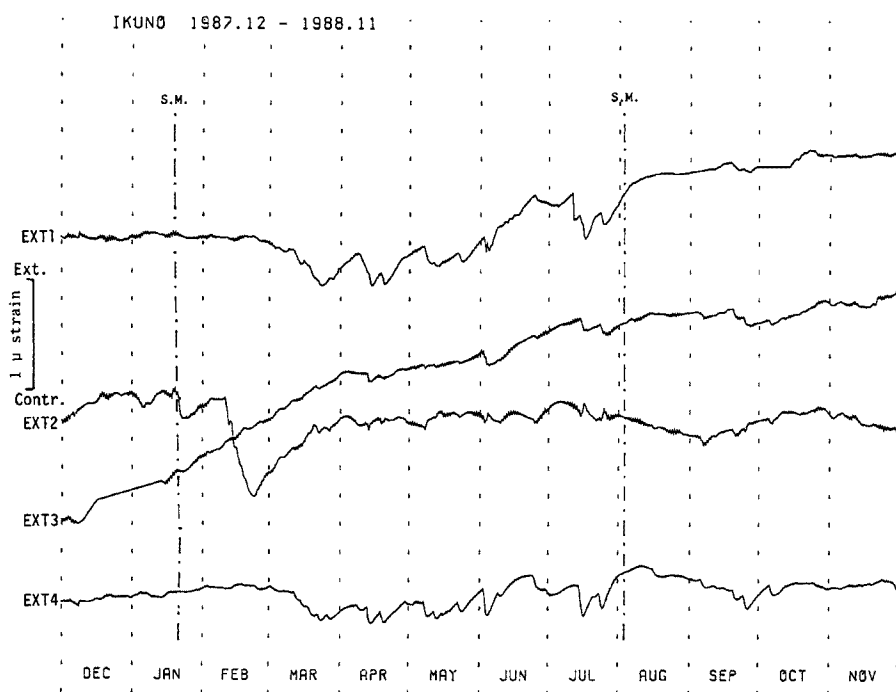


Fig. 4 Strain changes from Dec. 1987 to Nov. 1988 observed by extensometers at the observation tunnel.

Chain lines show the times of absolute stress measurements.

2.2. ひずみ解析結果

伸縮計は4成分設置してあるので、ひずみ解析に必要な3成分の組合せは4つある。岩盤が均質で Cavity 効果がなければ、どの組合せをとっても結果は一致するはずである。結果は Fig. 5 に示す。Fig. 5 の右下には各成分の観測された伸縮量を示し、数値は伸びを正とした μ strain 単位のひずみ量である。上4つの最大、最小ひずみ主軸方向も主ひずみ値も大きな違いがある。この原因のすべてが岩盤の不均質性や計器のドリフト等によるものではなく、またどの計器が不調であるというわけでもない。最大の理由は伸縮計そのものの方向性が傾斜計に比してきわめて高く、 45° 観測方位が違えば、ひずみの読み取り値のわずかな違いが主ひずみ値の算出に大きく効くからで、今回のように、せん断ひずみが大きいような変化の場合、ひずみ量が方向により急激に変わることを示している。もし、一様に伸張（収縮）しているような場合は、主軸方向の決定精度が逆に悪くなる。

方位 45° ごとに設置された3台の伸縮計の場合、 90° の観測空白方向が生じることになり、方位 60° 間隔で3台設置した場合よりも不利となる。いずれにせよ3台のうちの1台が不調あるいは不均質なひずみ変化を記録していると、算出されたひずみ主軸、特に主ひずみ値は全く信頼できないものとなることが図からもわかる。4台の伸縮計が特にどれかが異常を示していない限り、4成分のひずみ変化量すべてを用いて最小二乗

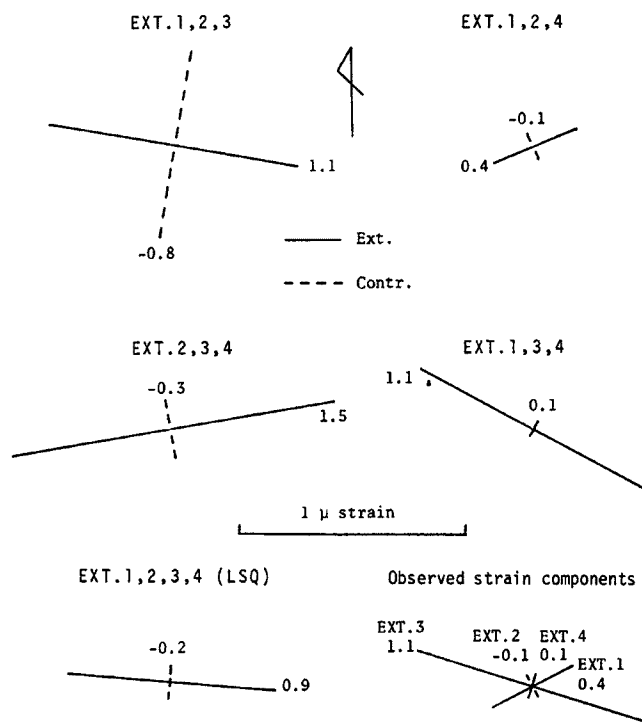


Fig. 5 Strain changes from Jan. to Aug. 1988 obtained by combinations of 3 different components of extensometers. EXT. 1, 2, 3 and 4 indicate the extensometers in the azimuth of $N62^\circ E$, $N28^\circ W$, $N107^\circ E$ and $N17^\circ E$ respectively. Lower most figures show the results by the least squares method using all 4 components (left), and observed strain components (right).

法により、ひずみ主軸を求めるのが最も信頼度が高い。最小二乗法により求めた主ひずみ量とその方向および標準偏差は次の通りである。

$$\epsilon_{\max}: 0.93 \pm 0.39 \mu \text{ strain}, \quad N86^\circ \pm 17^\circ W,$$

$$\epsilon_{\min}: -0.18 \pm 0.39 \mu \text{ strain}, \quad N4^\circ \pm 17^\circ E$$

$$\gamma_{\max}: \pm 1.11 \pm 0.28 \mu \text{ strain}, \quad (N49^\circ E, N41^\circ W)$$

ひずみ量の方向分布は次式のようにになる。 θ は北から時計回りにとってある。ひずみは伸びを正とし、単位は $\mu \text{ strain}$ である。

$$\epsilon_\theta = 0.38 + 0.56 \cos 2(\theta - 94^\circ) \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 5 の左下に結果を図示するが、3成分を用いた上4つのどのひずみ主軸よりも、観測された各成分（右下図）のひずみ量をもっともよく説明できる。標準偏差はやや大きい、これは観測値の決定、各伸縮計の設置場所の特性を含むもので、坑内に伸縮計を設置する以上まぬかれない所であり、4成分の観測値を用いた永年変化の主軸決定としては信頼度が高い。

3. 生野地学観測室周辺での絶対応力測定とその反復

3.1. 絶対応力測定

絶対応力の現場測定方法は応力解放法と水圧破砕法の2つに大別される。Fig. 2 に示した兵庫県下7カ所の測定は、明延、城見台以外は両者の比較観測を行っており、水平主応力方向は両者ともによく一致している。生野においては、3方向のボーリングを行い、水圧破砕法により3次元応力を決定した。

原理的には、同じ測点で、すなわち同じボーリング孔を用いて、時期を隔てて応力の再測定をすることは、応力解放法では不可能であり、また水圧破砕法でも同じ亀裂を開口して絶対応力を繰り返し測定するためには、3方向のボアホールを用いた3次元応力測定をしなければ応力状態を決定できない。鉛直1本のボーリングにより、亀裂を再開口させる場合、その亀裂方向と、亀裂に直交方向の応力成分は求めることができる。新しい亀裂を作る時は亀裂方向が最大圧縮応力の方向であり、これにより最大値、最小値、最大値の方位がわかるから、2次元の応力状態を決定できるが、再開口した場合、主応力方向がすでに変化しているかもしれないので、亀裂方向が主応力軸であると決めることはできない。3次元水圧破砕法では、各ボアホールの縦亀裂を再開口させた場合、それぞれのボアホール軸に直交する面内で、直交する2つの応力成分が測定されるので、合計6つの応力成分を求めることができ、主応力方向が変わっていても応力状態、すなわち3つの応力主軸を決定することができる。つまり均質等方岩盤を仮定すると、半径 a の円形孔がある場合、孔軸に直交する平面内において、方向のいかにかわらず、半径方向の応力 σ_r とそれに直交する応力 σ_θ の間には、ある θ 方向について

$$\sigma_r = 3\sigma_\theta - \sigma_{\theta(r=a)} \quad \text{の関係が成立する。}$$

もし縦亀裂が存在すれば $\sigma_{\theta(r=a)}$ は水圧を加えて亀裂が再開口する瞬間の水圧 P_{sb} (孔壁面上の σ_θ の値) であり、次に水圧を下げて亀裂が閉じる瞬間の水圧 $P_s = \sigma_\theta$ を測定すれば、 σ_r を計算することができる。新しい亀裂の場合には、この σ_r が $\sigma_{\max}$ で、 σ_θ が $\sigma_{\min}$ であり亀裂の方向が $\sigma_{\max}$ の方向であるが、再開口の場合は σ_r 、 σ_θ の2つの直交する応力成分にすぎない。したがって、1本のボアホールではそれに直交する面内の応力状態は決定できない。

生野における第1回の絶対応力測定は、1988年1月、観測室の西南西200mの地点で地表面から掘削した孔径48mmの3本のボアホール内で行った。ボアホールは鉛直1本、斜下方2本で、それぞれ深度30mに達している。岩盤は熔結凝灰岩であるが既存の亀裂が各所に見られる。水圧破砕による応力測定はFig. 6に示すように7点で行い、縦亀裂2カ所（各3データ）、横亀裂5カ所（各1データ）、計11のデータを得た。これを一括処理し、生野における平均深度15mの値とした。結果をTable 1に示す。また主応力軸方向は下半球ステレオ投影により、水平面内の主応力軸とともにFig. 7に示した。なお表中では圧縮を正としている。図に見られるように主応力軸はやや傾いているが、地形の影響とみられる。しかし水平面内主応力方向

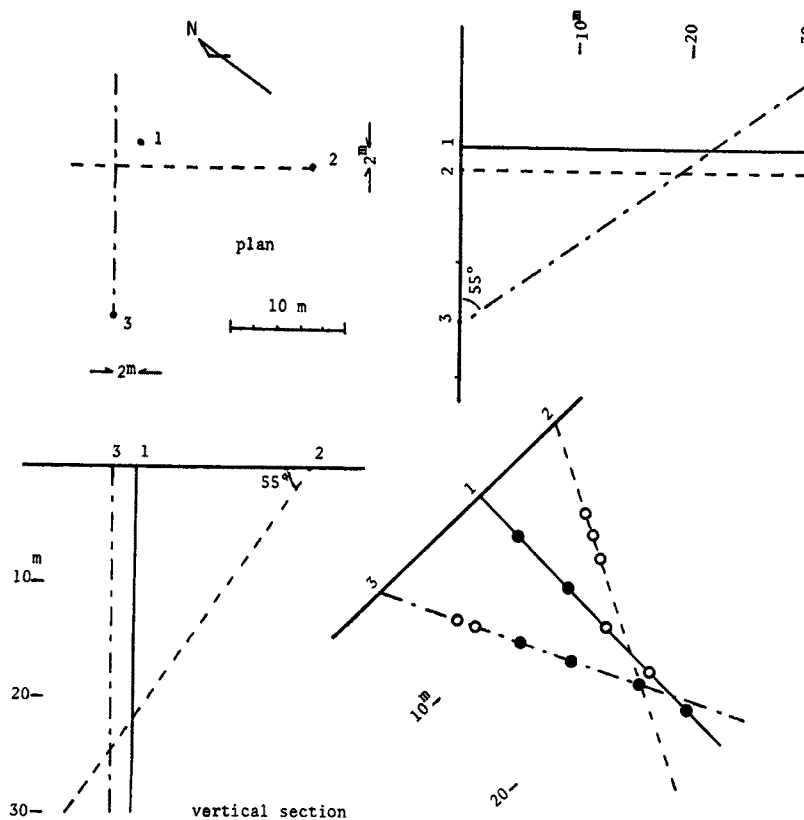


Fig. 6 Direction of boreholes and Hydrofracturing points for stress measurements in Jan. (○) and Aug. (●), 1988.

は測地測量や発震機構解析から推定されているこの地方の東西圧縮傾向とよく一致しており、応力値は西日本標準勾配から求めた値⁹⁾に比べると、水平最大主応力値が小さく、最小主応力値はやや大きい。鉛直応力がかぶり圧より大きすぎるが、地表からのボーリングを行う以上鉛直成分が不正確になるのはやむを得ない。全般に測定深度が浅いために応力値が低く、地表からの擾乱や、地表付近の破碎進行の影響を大きく受けて、標準偏差が大きいのもやむを得ない。岩盤も既存の亀裂が多く測定条件は必ずしも良くなかったが、他の地域に比べて応力値は低く、特にせん断応力が小さいことが確認された。

第2回の応力測定は1988年8月初旬の3日間に行った。測定は前回生じさせた亀裂を再開口したものが7点、9データ（縦亀裂2×2、横亀裂5×1）、新しい亀裂を発生させたもの6点で10データ（縦亀裂2×3、横亀裂4×1）を得た。解析には旧亀裂を再開口した場合（1）、新しい亀裂を用いた場合（3）、すべてのデータを用いた場合（2）に分けて、応力値の再現性を調べた。Table 1とFig. 7を見れば、再現性はかなり高いことがわかる。しかし応力値そのものが2 MPa以下なので標準偏差は相対的に大きい。水平主応力値はやや減少の傾向が見られる。

3.2. 応力変化の検出

第2回目1988年8月の絶対応力測定の結果は同年1月の第1回測定の結果に比べて、いずれのデータを使った場合でも、Table 1の(1), (2), (3)とFig. 7に見られる通り減少している傾向がある。わずか半年余りの間に造構応力が0.2 MPa近く変わるといことは考え難いが、1月、8月は年周変化の極値に近く、深さ15～20 mでは熱弾性ひずみが熱伝導による膨縮の振幅よりも大きくなる深さ¹⁰⁾であり、地中温度変化による熱応力の年周変化振幅が一番大きい深さにあたると考えられる。いずれにしろこの間ひずみ変化が観測され、

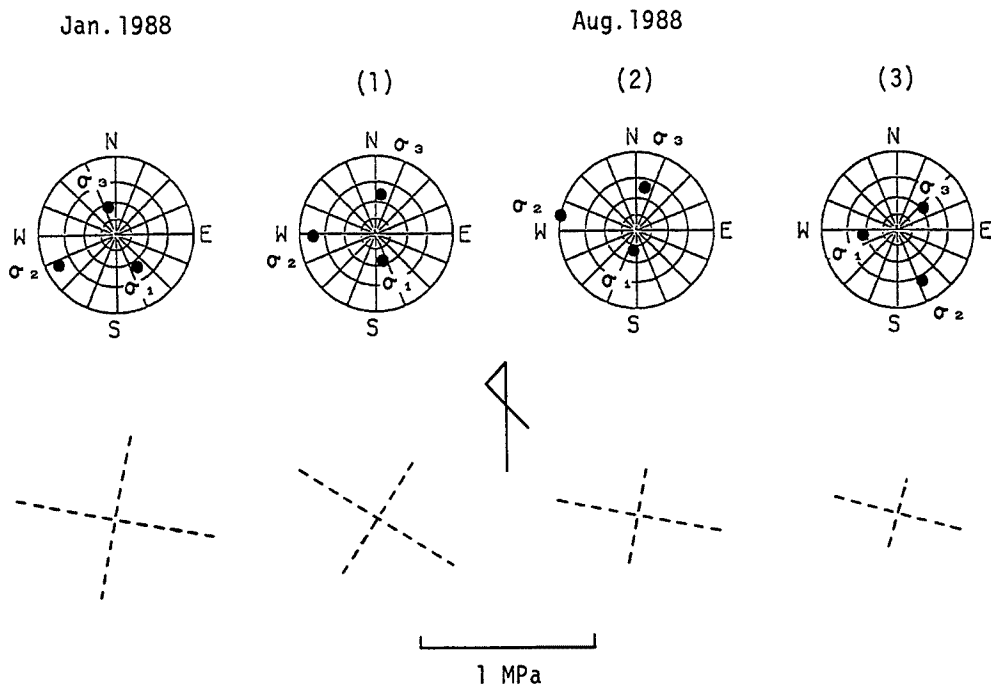


Fig. 7 Directions of principal stresses shown on stereographic net of lower hemisphere and maximum and minimum horizontal stresses. Data are listed in Table 1.

Table 1. Results of absolute stress measurements

Aug.(1): data only by reopening of fractures in Jan.

(2): all data including reopening of old fractures and new fracturing

(3): data only by new fracture in Aug.

+ : compressive stress

	'88, Jan.			'88, Aug.-(1)		
	MPa	Azimuth	Dip	MPa	Azimuth	Dip
σ_1	1.45 ± 0.14	S 37° E $\pm 15^\circ$	$39^\circ \pm 6^\circ$	1.70 ± 0.14	S 16° E $\pm 11^\circ$	$50^\circ \pm 4^\circ$
σ_2	1.09 ± 0.12	S 63° W $\pm 11^\circ$	$12^\circ \pm 11^\circ$	0.94 ± 0.16	S 87° W $\pm 9^\circ$	$11^\circ \pm 7^\circ$
σ_3	0.42 ± 0.15	N 13° W $\pm 11^\circ$	$48^\circ \pm 6^\circ$	0.29 ± 0.15	N 6° E $\pm 11^\circ$	$38^\circ \pm 4^\circ$
σ_{h1}	1.16 ± 0.11	N 80° W $\pm 19^\circ$	.....	1.04 ± 0.14	N 58° W $\pm 20^\circ$	.....
σ_{h2}	0.94 ± 0.14	N 10° E $\pm 19^\circ$	.....	0.76 ± 0.13	N 32° E $\pm 20^\circ$	.....
σ_v	0.86 ± 0.15	.....	.....	1.13 ± 0.11	.....	.....
	'88, Aug.-(2)			'88, Aug.-(3)		
	MPa	Azimuth	Dip	MPa	Azimuth	Dip
σ_1	1.84 ± 0.25	S 11° W $\pm 13^\circ$	$58^\circ \pm 5^\circ$	1.17 ± 0.44	S 83° W $\pm 34^\circ$	$42^\circ \pm 26^\circ$
σ_2	0.95 ± 0.13	S 79° E $\pm 7^\circ$	$0^\circ \pm 6^\circ$	0.53 ± 0.33	S 24° E $\pm 38^\circ$	$18^\circ \pm 15^\circ$
σ_3	0.04 ± 0.23	N 11° E $\pm 7^\circ$	$32^\circ \pm 5^\circ$	0.02 ± 0.53	N 48° E $\pm 34^\circ$	$43^\circ \pm 28^\circ$
σ_{h1}	0.95 ± 0.13	N 80° W $\pm 12^\circ$	.....	0.75 ± 0.18	N 75° W $\pm 19^\circ$	.....
σ_{h2}	0.54 ± 0.21	N 10° E $\pm 12^\circ$	.....	0.39 ± 0.25	N 15° E $\pm 19^\circ$	.....
σ_v	1.34 ± 0.27	.....	.....	0.58 ± 0.88	.....	.....

Aug.1988 — Jan.1988

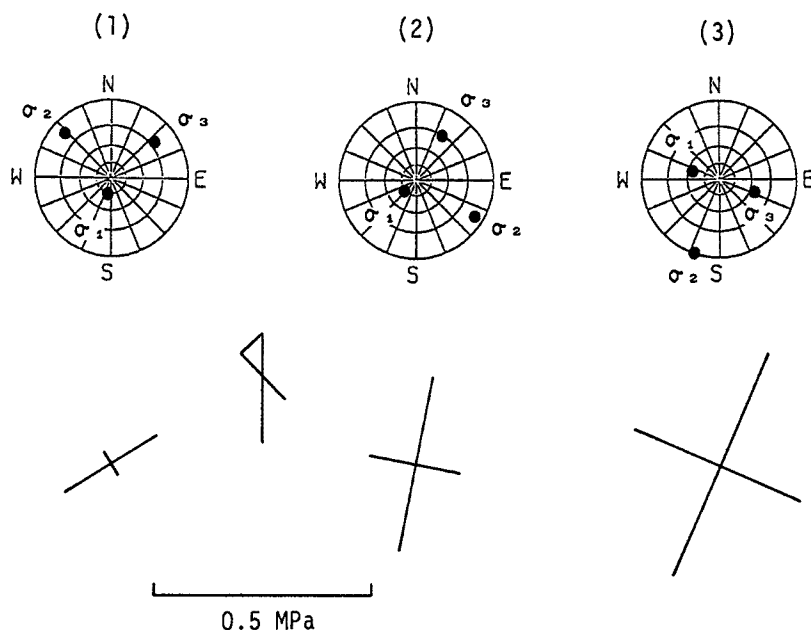


Fig. 8 Stress changes during the period from Jan. to Aug. 1988.

Upper : Directions of principal axes of changed additional stress during the period from Jan. to Aug. 1988.

Lower : Maximum and minimum horizontal stress changes.

Table 2. Stress changes for 6.5 months calculated from the results of absolute stress measurements in Jan. and Aug. 1988 (ref. Table 1)

(1) : Aug.(1)-Jan., (2) : Aug.(2)-Jan.

(3) : Aug.(3)-Jan., - : tensile stress

(1) Diff. (Aug.-(1)-Jan.)

(2) Diff. (Aug.-(2)-Jan.)

	MPa	Azimuth	Dip	MPa	Azimuth	Dip
$\Delta\sigma_1$	0.37 ± 0.19	S 16°W $\pm 40^\circ$	$67^\circ \pm 14^\circ$	0.69 ± 0.29	S 51°W $\pm 22^\circ$	$66^\circ \pm 8^\circ$
$\Delta\sigma_2$	-0.08 ± 0.18	N 46°W $\pm 23^\circ$	$11^\circ \pm 21^\circ$	-0.25 ± 0.18	S 58°E $\pm 20^\circ$	$8^\circ \pm 14^\circ$
$\Delta\sigma_3$	-0.33 ± 0.19	N 48°E $\pm 25^\circ$	$20^\circ \pm 14^\circ$	-0.57 ± 0.24	N 29°E $\pm 23^\circ$	$23^\circ \pm 10^\circ$
$\Delta\sigma_{h1}$	-0.06 ± 0.18	N 32°W $\pm 39^\circ$	.....	-0.21 ± 0.17	N 79°W $\pm 34^\circ$	.....
$\Delta\sigma_{h2}$	-0.25 ± 0.18	N 58°E $\pm 39^\circ$	.....	-0.40 ± 0.26	N 11°E $\pm 34^\circ$	.....
$\Delta\sigma_v$	0.27 ± 0.18	.....	.....	0.48 ± 0.31	.....	.....

(3) Diff. (Aug.-(3)-Jan.)

	MPa	Azimuth	Dip
$\Delta\sigma_1$	0.39 ± 0.55	N 69°W $\pm 29^\circ$	$48^\circ \pm 18^\circ$
$\Delta\sigma_2$	-0.55 ± 0.27	S 20°W $\pm 34^\circ$	$1^\circ \pm 15^\circ$
$\Delta\sigma_3$	-1.07 ± 0.49	S 70°E $\pm 43^\circ$	$42^\circ \pm 18^\circ$
$\Delta\sigma_{h1}$	-0.41 ± 0.21	N 67°W $\pm 61^\circ$	.....
$\Delta\sigma_{h2}$	-0.55 ± 0.27	N 23°E $\pm 61^\circ$	.....
$\Delta\sigma_v$	-0.28 ± 0.89	.....	.....

それが単なる年周的熱膨縮でない限り、この間何らかの応力変化がなければならない。観測されたひずみ変化はこの間伸びである。一方応力値は減少している。これが同一原因によるものか、応力測定精度の不足によるものかは別として、両者を現実のものと考えれば弾性論的にどの程度一致するかを検証を試みるため、8月の測定値と1月の測定値の差をとった。差は南北方向、東西方向、鉛直方向の応力値 σ_N , σ_W , σ_Z とその間のせん断応力値 γ_{WZ} , γ_{ZN} , γ_{NW} の差から計算した。結果は Table 2 および Fig. 8 に示す通りである。Table 2 においては引張り応力は地殻応力の慣例に従って負にとってある。応力変化は、Table 1 に示した亀裂再開口の場合(1)、新亀裂の場合(3)、および両者を用いた場合(2)の3つについて、1月の値との差をとり算出した。(3)の場合は応力変化値として明らかに大き過ぎる。今回は再開口した場合(1)が最も現実に近いと思われる。これは第1回目の測定は既存亀裂のない最も良好な位置を選定し、これに対し第2回目の水圧破碎地点は相対的に条件が悪く、測定精度が落ちているものと考えられ、このことは標準偏差にもあらわれている。新しい亀裂のみを用いた場合(3)およびこのデータを混ぜた(2)より、(1)の同じ亀裂を再開口した場合の方が、亀裂の進展がない限り適切であると考えたからである。亀裂の進展のないことは、亀裂の型取りによって確認されている。

4. ひずみ変化と応力変化の比較

地殻が均質等方弾性体であるならば、弾性定数を介してひずみ変化と応力変化量は結びつくはずである。応力測定が地球科学的目的で実施されるようになって20年は経過していない。最近、応力変化を直接測定する試みが幾つかなされている^{2),4)}。しかし地殻応力測定を同一地点で繰り返すことを試みたのは1987年六甲諏訪山が最初であり、半年後もその再現性が良いことが認められた^{2),3)}。今回の生野は2回目の試みであり、低応力下のため最確値に対し標準偏差が大きいため応力変化が見いだされたという確信はないが、200 m 先で行われているひずみ変化観測とどの程度相違があるかを確認することは今後の研究進展のためには有用である。現在まで地殻応力変化と地殻ひずみ変化を比較した試みは、どの国においても行われたことはないと考ええる。しかし前述したようにわずか半年間の変化であり、年変化も含まれており、応力、ひずみ変化の測定誤差も大きいので両者の最確値が一致することは望めない。

ひずみ変化は1988年1月から8月までの6カ月半の伸縮計4成分の変化量を用い、最小二乗法により決定した主ひずみ軸を採用した。応力変化は標準偏差が小さく、また今後継続実施する場合をも考えて、1月に水圧破碎をさせ決定した絶対応力値と、8月に同じ亀裂を再開口させて決定した絶対応力値の差、Table 2 の(1)、を採用した。

計算には、平面問題として、平面応力とひずみの関係式

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= (1/E) \cdot (\sigma_x - \nu\sigma_y), & \gamma_{xy} &= \{2(1+\nu)/E\} \cdot \gamma_{xy} \\ \epsilon_y &= (1/E) \cdot (\sigma_y - \nu\sigma_x)\end{aligned}$$

を用いた。

これは、ひずみ観測が坑道の床面であり、設置状況から見て鉛直応力による壁面付近の応力集中の影響は少なく、ひずみ観測と比較する場合、鉛直応力は無視してよいと判断したことと、鉛直応力の測定精度が一番悪く、値が大き過ぎることを考慮した。事実3次元応力-ひずみ問題として、応力値からひずみ量を計算すると弾性定数をさらに大きくとらなければならないという結果になる。Fig. 9 右図はヤング率 $E=200$ GPa, ポアソン比 $\nu=0.25$ とした場合で、伸びを正として次の通りになる。

$$\begin{aligned}\epsilon_{\max} &: 1.2 \pm 1.0 \mu \text{ strain}, & N58^\circ \pm 33^\circ E \\ \epsilon_{\min} &: -0.03 \pm 1.0 \mu \text{ strain}, & N32^\circ \pm 33^\circ W\end{aligned}$$

またひずみの方位分布は θ を北から時計回りにとって μ strain の単位で次式のようなになる

$$\epsilon_\theta = 0.58 + 0.61 \cos 2(\theta - 58^\circ) \cdots \cdots (2)$$

現場のボーリングコア試料の一軸圧縮試験を行って、静弾性係数 E_s , 静ポアソン比 ν を求めると平均して、 $E_s=26.1$ GPa, $\nu=0.16$ となる。なお P 波速度 3.7 km/sec, S 波速度 2.2 km/sec, 動弾性係数 27.1 GPa, 動

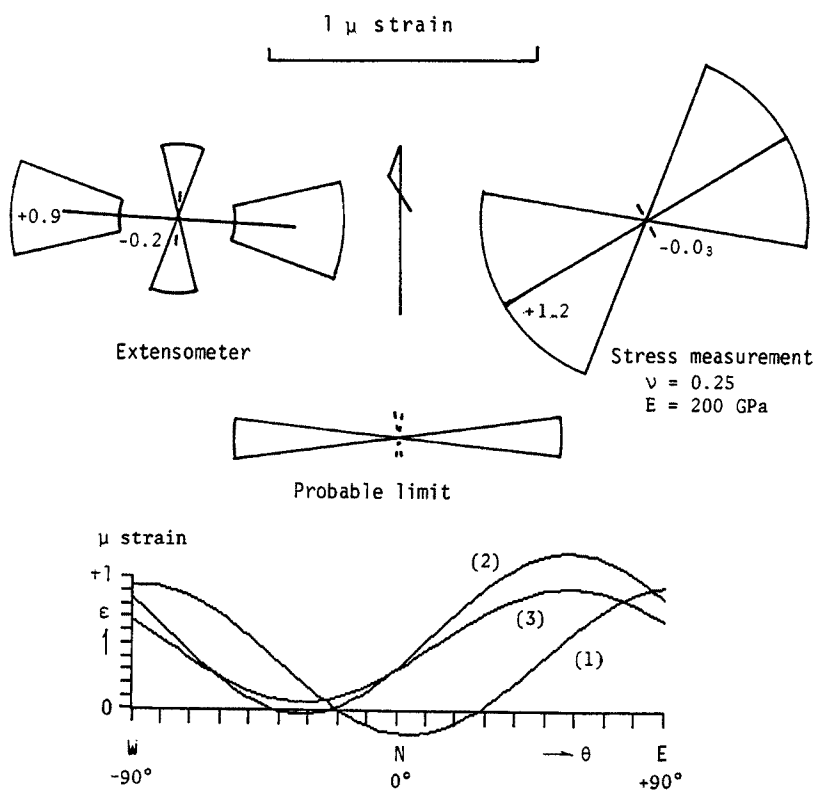


Fig. 9 Comparison of strain changes.

Left : strain changes obtained by the least squares method using 4 components of extensometers.

Right : strain changes calculated by repeated absolute stress measurements assuming Young's modulus 200 GPa and Poisson's ratio 0.25.

Sectoral parts indicate the limit of errors of analysis.

Middle : conformable limit to both observed (left) and calculated (right) strains.

Lower : azimuthal distribution of strains (the most probable value)

(1) : observed by extensometers

(2) : calculated from stress changes, assuming $E=200$ GPa, $\nu=0.25$

(3) : ditto, $E=260$ GPa, $\nu=0.16$

ポアソン比0.24, 密度 2.5 g/cm^3 が得られている。

この値を用いると

$$\epsilon_{\max} : 9.3 \pm 7.3 \mu \text{ strain}, \quad N58^\circ \pm 35^\circ E$$

$$\epsilon_{\min} : 0.6 \pm 7.4 \mu \text{ strain}, \quad N32^\circ \pm 35^\circ W$$

となりこれは明らかにひずみ観測から得られた標準偏差 (68%信頼度) の限界を越えている。両者の最確値をあわせるにはヤング率は7倍位にしなければならない。このことは応力変化量が予想通り大き過ぎることを意味する。

確かに標準偏差をみても、まだ低応力下での応力変化を議論できるほどの精度がないことを示している。

しかしながら主応力方向は、ひずみ変化観測から求めた方位と絶対応力値変化から計算した方位と標準偏差の範囲内で一致し、Fig. 9 中図に示すように両者を満たす範囲をみればほぼ東西方向に伸び（応力減少）で一致する。また最小主ひずみ値はポアソン比を0.24以上に仮定すれば南北縮み（圧縮）となりパターンは一致する。またポアソン比を0.16としても標準偏差を考慮すれば伸び縮みの境界にあり、ひずみ変化観測の結果も標準偏差から見れば伸びの可能性はある。ヤング率を数倍程度にとるならば、大体の傾向としては、両者は一致した結果を示すと言える。これらの様子をひずみ量の方位分布で示したのが Fig. 9 の下図である。ただし(3)は岩石試験によるヤング率の10倍 260 GPa と $\nu=0.16$ の場合であり、ひずみの方位分布は同様に次式で示される。

$$\varepsilon_{\theta}=0.49+0.43 \cos 2(\theta-58^{\circ}) \cdots \cdots \cdots (3)$$

この図では標準偏差を示していないが、(2)、(3)は68%の信頼度の範囲内で $\varepsilon_{\max}$ の方位を(1)と一致させることができるのは Fig. 9 中図に見られる通りである。地殻内の現象において異質の測定、観測の結果がこの程度一致するということは現場条件を考えればむしろ稀と考えられる。

5. 結 語

この論文の目的はひずみ変化の観測結果と絶対応力測定との繰り返しによる応力変化測定の結果の一致を主張することではない。両者とも測定と解析上の誤差はかなり大きい。精度の上では、ひずみ観測結果による主ひずみ解析は他の観測坑における結果よりも信頼度の高いものであると言える。一方応力変化の結果の一つには、応力測定そのものが低応力下の測定であるため擾乱要素が大きく効き、かならずしも測定技術の問題ではなく、測定現場の条件による影響が大きく、精度は良くない。しかしなお、応力変化を求めるためには測定精度の向上が必要であることは言うまでもない。現場コアから求めた静弾性定数を用いては、両者の最確値を一致させることは困難である。また応力変化そのものが、わずか半年余りの間にこの程度あったとは考えがたい。しかし一方この間にひずみ変化があったことは事実であり、それが東西伸びでありその原因が東西方向の圧縮応力減であると考えれば応力測定結果とは傾向的に合致する。弾性定数を数倍にとりさえすれば両者の結果は弾性的に一致するものと見てよく大きな矛盾はない。一軸圧縮試験による弾性定数がどの程度現場に適用できるかは全く未知の問題である。また応力測定現場と伸縮観測現場は200 m 離れており、測定の深度はほぼ同程度15~40 m であるが地形及び地表植生条件などはかなり異なる。また年変化分をどのように考えるかも問題である。それにもかかわらず傾向として一致している結果を得たことは全くの偶然の一致とは考えられない。もし、今少し深い所で測定を実施し、地質岩盤条件の良い所を選ぶならば、現在の技術でも応力変化の精度はもっと良かったはずである。また期間が半年というのは単なる実験的な試みであって、測定精度を考えれば少なくとも数年を隔てるべきであろう。今少し深い均質な岩盤内の観測室でひずみ観測を行うこと、応力測定精度を0.1 MPa の変化を確実にとらえるよう向上させること、少なくとも5年の間隔を取ることによって絶対応力変化とひずみ変化観測を対比することができる可能性はきわめて高い。

応力変化とひずみ変化を対比させることは、両者の信頼性を向上させ、物理量としてひずみ、応力を地球科学に導入し、定量的な議論を可能にする。現在の地震予知の議論が、統計的、定性的な議論に留まっているのを、物理的な理論づけに基づいた定量的な予知に進め、地震予報の将来の適中率を向上させることにも役立つであろう。特に地殻ひずみ変化は連続観測でも、測地測量によっても、弾性的変形と非弾性的変形を区別することは不可能である。応力変化計を用いても長期間のドリフトを考えればその疑いがないという保証はない。絶対応力測定から応力変化を求める限りは弾性ひずみ変化だけを算出できる。長期の観測、測定から絶対応力変化と伸縮変化を比較して非弾性変形量、非回復性変位を見積ることができる。今回はこの可能性を探るための一試みであり、可能性は十分あるということを結論したい。今後1年間隔で両者を比較し、どの期間をとっても両者の変化傾向が一致しておれば、その保証を得るであろう。

この論文作成にあたって京都大学理学部地球物理学教室 大村誠氏にひずみ解析の上で多大の御協力を頂いた。また応力測定に際しては、同和工営株式会社落石雅宣氏および加藤春実氏が御尽力くださった。なお地球物理学教室の鈎卯三郎技官および大学院生諸兄には生野の地殻変動観測、応力測定に協力して頂いている。併せて謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 大塚成昭・田村良明・藤森邦夫・田中豊：六甲鶴甲観測室における地殻変動観測 (I), 測地学会誌, 第28巻, 1982, pp. 134-151.
- 2) 田中豊：日本における地殻応力測定—研究動向と問題点—, 地震予知研究シンポジウム, 1987, pp. 199-212.
- 3) 黒石裕樹・小笠原宏・竹内智一・田中豊・水田義明：小口径3次元水圧破碎法による地殻応力の繰り返し測定—六甲諏訪山実験坑—, 地震, 第41巻, 1988, pp. 203-213.
- 4) 田中豊：中国における地殻応力, 地殻変動および重力変化の観測と地震前後の異常変化, 1977年地震学訪中代表団報告集, 1978, pp. 89-111.
- 5) 李方全：原地応力測量在地震地質研究工作中的応用, 華北地震科学, 第1巻, 1983, pp. 71-76.
- 6) 田中豊・小泉誠・加藤正明：地震活動に関係した地殻変動 (5A) —近畿地方北西部の地震活動と生野で観測された地殻変動—, 京大防災研年報, 第13号 A, 1970, pp. 91-108.
- 7) 田中豊・小泉誠・加藤正明：地震活動に関係した地殻変動 (5B) —近畿地方北西部の地震活動と生野で観測された地殻変動—, 京大防災研年報, 第14号 A, 1971, pp. 71-84.
- 8) 田部井隆雄・藤森邦夫・田中豊：生野における地殻変動連続観測 (1977~1983), 測地学会誌, 第31巻, 1985, pp. 189-201.
- 9) Tanaka, Y: State of crustal stress inferred from in situ stress measurements, J. Phys. Earth, Vol. 34, Suppl., 1986, pp. S57-S70.
- 10) 田中豊・小泉誠・細善信・加藤正明：地震活動に関係した地殻変動(7)—羽越地方の地震活動と赤谷で観測された地殻変動—, 京大防災研年報, 第16号 B, 1973, pp. 43-54.