

7-3 日本における地殻応力測定を試み(2)

Measurements of Crustal Stress in Eastern Japan (2)

東日本地殻応力測定グループ

The Research Group for Crustal Stress in Eastern Japan

(1) 変形率変化法

1. はじめに

変形率変化法(山本・他, 1983)の測定技術を改良し, この方法を硬質岩石に適用することを可能にした。また, 岩石のもつ先行応力の記憶にはその応力が印加されつづけた時間に依存した安定性があることを見いだした(山本・他, 1984)。測定技術の改良とこの性質の利用により, 変形率変化法(DRM)による地殻応力の測定精度の向上がはかられた。

改良された測定法により, 神奈川県山北町(YMK), 静岡県下田市(SMD)と芝川町(SBK)の岩石試料を用いて各地点の水平面内及び鉛直方向の地殻応力測定を試みた。山北の試料採取地点付近の4地点と下田および芝川の試料採取地点では, 地質調査所が応力解放法(O.C.)による地殻応力測定を行っている。以下にそれらの結果と比較しつつ, DRMにより測定された各地点の地殻応力について報告する。

2. 測定結果

第1図には $\Delta \varepsilon(\sigma)$ [$\Delta \varepsilon(\sigma) = \varepsilon_i(\sigma) - \varepsilon_{i-1}(\sigma)$; ε_i は*i*番目の戴荷での試料の歪, σ は圧縮軸力]の芝川試料での測定例を示す。図からわかるように $\Delta \varepsilon(\sigma)$ には $\Delta \varepsilon$ と σ の関係が非直線的となる圧縮軸応力 σ_0 がある。DRMでは軸応力 σ_0 を試料の圧縮方向に働いていた地殻応力の推定値として測定する。

このようにして, 下田, 山北と芝川の試料から軸応力 σ_0 の方位分布を求めた。第2図には芝川試料による方位分布の測定例が示されている。これらの方位分布から求められた各地点の主圧縮応力と最大主圧縮軸方向, 鉛直方向の法線応力を第1~3表に示す。表には地質調査所によるO.C.の結果を比較のために併記した。これらの表からDRMとO.C.による結果がよく一致していることがわかる。

第3図には, DRMで測定された各地点の地殻応力が地図上に示されている。下田(SMD)は芝川(SBK)よりも浅い深度で測定されているにもかかわらず応力値は大きい。これは下田試料が高さ約40m分の岩石を既にカットした採石場跡から採取されたことによるものと考えられる。実際, 下田の鉛直方向法線応力の深さ60~70mでのかぶり圧に相当している。

下田市と芝川町の試料は地質調査所より，山北町の試料は国立防災科学技術センターより提供して戴いた。ここに記して感謝します。

参 考 文 献

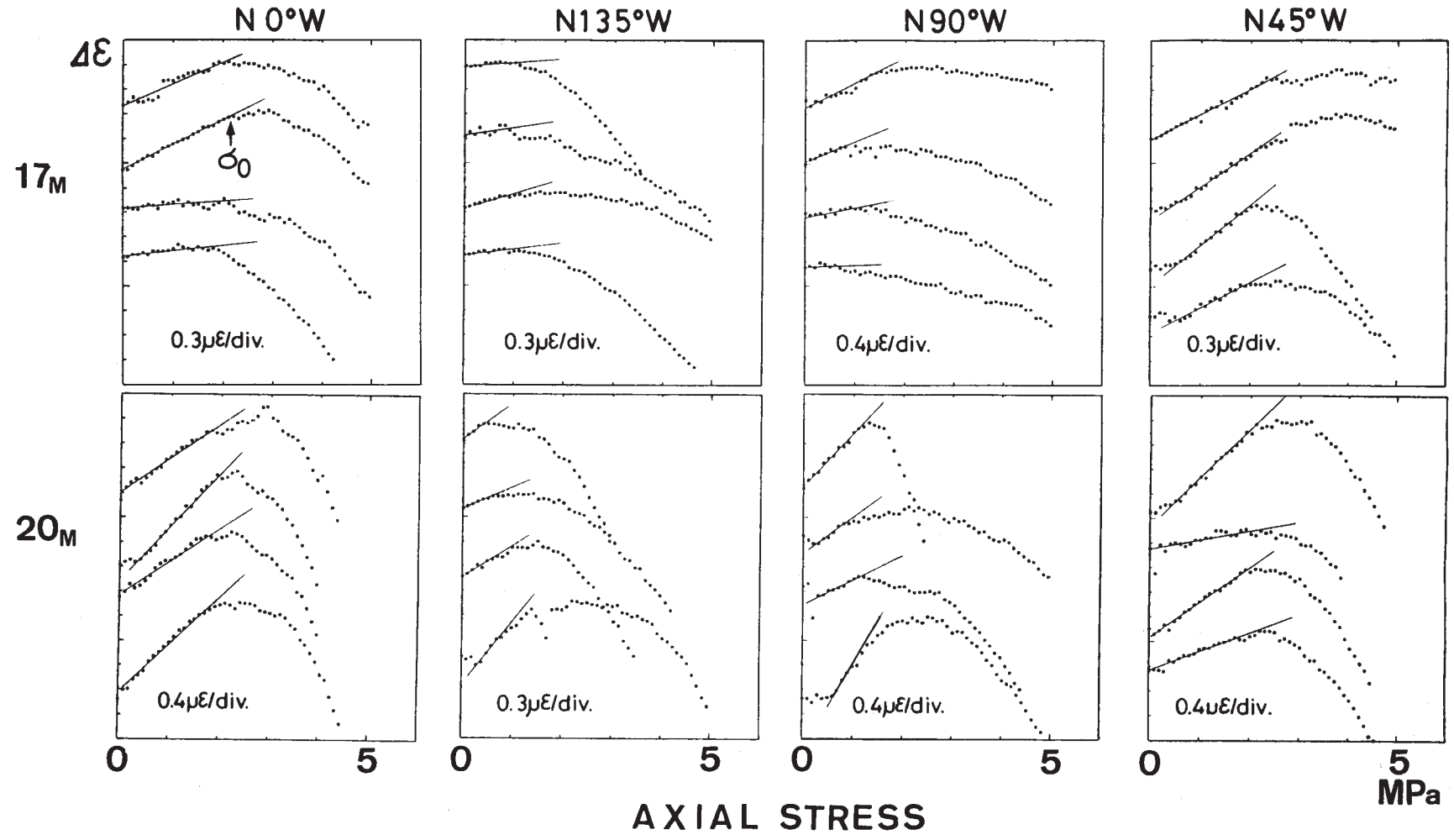
小出 仁・星野一男・楠瀬勤一郎・井波和夫・金川 忠・林 正夫・北原義浩：丹波山地における応力解放法による地殻応力の測定（その3），地震学会講演予稿集，1980，No. 2，238，1980。

小出 仁・星野一男・楠瀬勤一郎，井波和夫・西松裕一・小泉昇三・秋山政雄：伊豆下田地区における応力解放法による地殻応力測定，地震学会講演予稿集，1981，No. 2，20，1981。

小出 仁・西松裕一・小泉昇三・高橋 学・山本清彦・菊池慎二・中山芳樹：芝川活断層系北西における地殻応力測定法の相互比較，地震学会講演予稿集，1985，No. 2，106，1985。

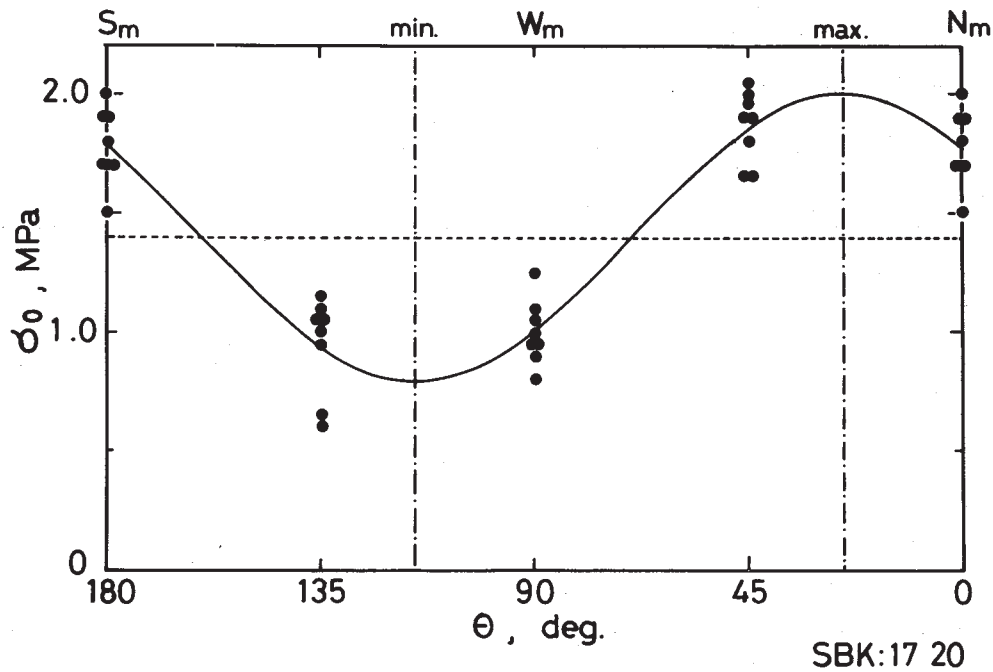
山本清彦・栗原保人・平沢朋郎：変形率変化を用いた先行応力の推定，地震学会講演予稿集，1983，No. 1，245，1983。

山本清彦・栗原保人・平沢朋郎・笠原敬司：丹沢山地における定方位試料の採取と先行応力の測定，地震学会講演予稿集，1984，No. 2. 171，1984。



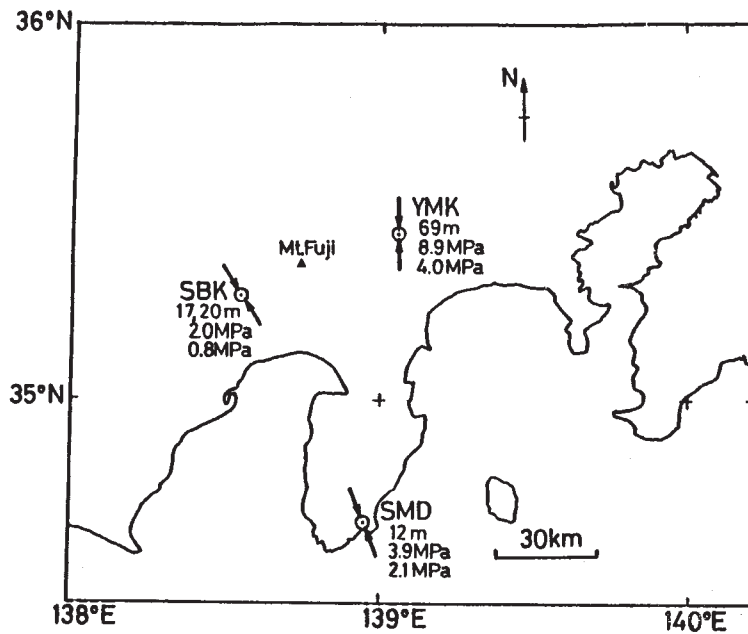
第1図 芝川 (SBK) の深さ 17 m と 20 m で採取された試料に 2 回の繰り返し載荷をして得た試料歪の差 $\Delta \varepsilon$ の測定例, 横軸は圧縮軸応力 σ

Fig. 1 Examples of the strain difference $\Delta \varepsilon$ between the first and the second loading measured on the samples from depths of 17 and 20 m at Shibakawa (SBK).



第2図 芝川試料から変形率変化法により求められた軸応力 σ_0 の方位分布。実線は測定値に対する最良適合曲線。Nmは磁北を示す。

Fig. 2 Azimuthal distribution of the axial stress σ_0 measured for Shibakawa (SBK) samples by the deformation rate method (DRM). The solid curve is the best fit sinusoidal one to the data. N_m means the magnetic north.



第3図 下田 (SMD)、山北 (YMK) と芝川 (SBK) で変形率変化法により求められた地殻応力の最大主圧縮軸方向、測定深度、水平面内の最大・最小主圧縮応力も示されている。

Fig. 3 The maximum and the minimum compressional stresses in the horizontal plane estimated by the deformation rate method (DRM) at Shimoda (SMD), Yamakita (YMK) and Shibakawa (SBK). The directions of the maximum compression are shown by arrows. The numerals at each observation site indicate the depth, the maximum and the minimum compression.

第1表 下田における変形率変化法と小出・他(1981)による応力解放法の地殻応力測定結果の比較

Table 1 Comparison of the result of DRM with that of the overcoring method by Koide *et al.* (1981) at Shimoda (SMD).

σ_{max} and σ_{min} : the maximum and the minimum compressional stress.

σ_{vert} : the normal stress in the vertical direction.

θ (σ_{max}): the direction of the maximum compression.

	D R M	OVERCORING*		
S I T E	SMD : B 1 2	B	A	A
DEPT H (m)	1 2.0~1 2.8	1 9.3 9	1 6.1 6	1 7.1 6
σ_{max} (MPa)	3.9 ± 0.2	3.8 8	4.7 7	3.4 3
σ_{min} (MPa)	2.1 ± 0.2	2.2 1	2.4 4	1.3 8
σ_{vert} (MPa)	1.7 ± 0.1			
θ (σ_{max})	N 2 2 ± 4°W	N 2 2°W	N 1 9°W	N 1 8°W

* After Koide *et al.* (1981).

第2表 山北における変形率変化法と小出・他(1980)による応力解放法との結果の比較

Table 2 Comparison of the result of DRM with that of the overcoring method by Koide *et al.* (1980) at Yamakita (YMK).

	D. R. H.	OVERCORING*				
S I T E	YHK - 09	A	B	D 1	D 2	E
depth (m)	6 9~7 1	5.7 3	8.2 7	1 3.6~1 3.8	1 4.8~1 5.0	1 1.2 5
σ_{max} (MPa)	8.9 ± 1.1	1 1.9	1 3.9	4.0	7.6	1 2.5
σ_{min} (MPa)	4.0 ± 1.1	3.3	5.1	2.2	2.7	4.6
σ_{vert} (MPa)	2.2 ± 0.6					
θ_{max}	N 0 ± 5° E	N 7° E	N 2 6° E	N 2 8° E	N 9° E	N 2 7° E

* : After Koide *et al.* (1980)

第3表 芝川における変形率変化法と小出・他(1985)による応力解放法との結果の比較

Table 3 Comparison of the result of DRM with that of the overcoring method by Koide *et al.* (1985) at Shibakawa (SBK).

	DRM	OVER-CORING*
S I T E	SBK : 1 7 2 0	SBK
DEPTH (m)	1 7~1 8 : 2 0~2 1	1 1
σ_{max} (MPa)	2.0 ± 0.1	2.3
σ_{min} (MPa)	0.8 ± 0.1	0.0
σ_{vert} (MPa)		
θ (σ_{max})	N 3 1 ± 2°W	N 2 1°W

* After Koide *et al.* (1985)

(2) A E 法

岩石の処女試料に力を加えてゆくと次第にA Eの数の増加が見られるが、一旦、力を除いて再び力を加えた場合はA Eの発生度は著しく低下する。しかし、応力が最初のレベルを越えるや否やA Eの数が急激に増加する。従って、このようなA E曲線の急変点から岩石試料が前にうけた応力を推定することができる。このA Eの応力履歴効果に注目して地殻応力の値を推定できる可能性が考えられる。このA E法を神奈川県真鶴半島、静岡県伊豆長岡、茨城県稲田の石切場より採取した岩石試料に適用して応力場の推定を試みたが（第1図）、ここでA E法で推定した過去の応力レベルとは一体何時頃のものであるかが問題であった。

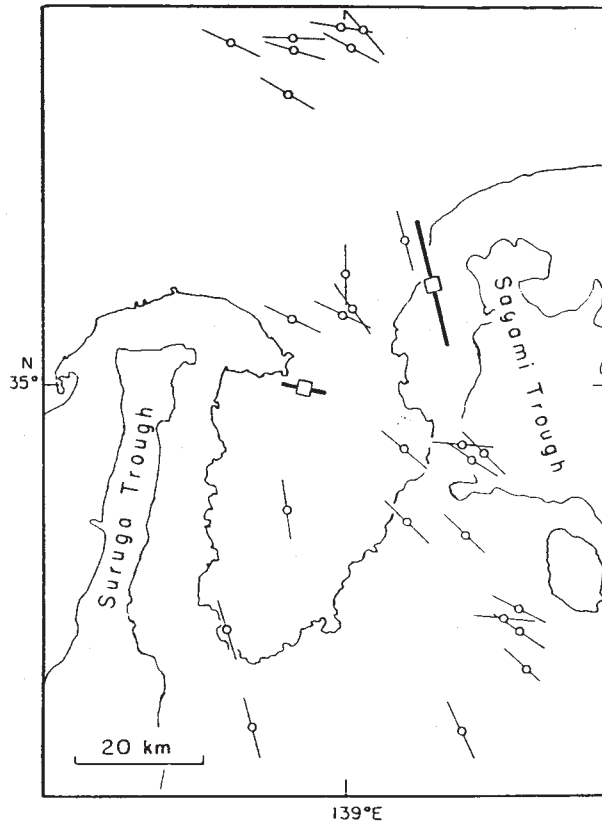
この問題を解く為に、A Eの応力履歴効果がいつまでも保たれるものか、それとも時間と共に変化してゆくものか、を実験によって検討した。実験においては、2回目の加圧までの時間間隔が最大3年間にとどまったが、過去の応力についての記憶は時間と共にかなり急速に失われるらしいとの結果を得た。このことはA E法によって推定された地殻応力はかなり最近の応力についての情報を提供することを意味する。即ち、A E法は現在の応力状態を推定するのに適していると考えられる。尤も、応力履歴効果の時間依存性は応力レベルによっても異なり、単純なものではない。

第2図は2回目の加圧までの時間間隔が短い場合にはA E活動度が顕著に低下するのに対して、時間間隔が長くなるとA E発生能力が回復すること、つまり、過去の応力の記憶が時間と共に失われることを示す例である。第3図は横軸に実際に加えた応力を、縦軸にA E法で推定した応力値をとって示したが、時間の経過と共に推定応力値が顕著に低下してゆくことが注目される。

参 考 文 献

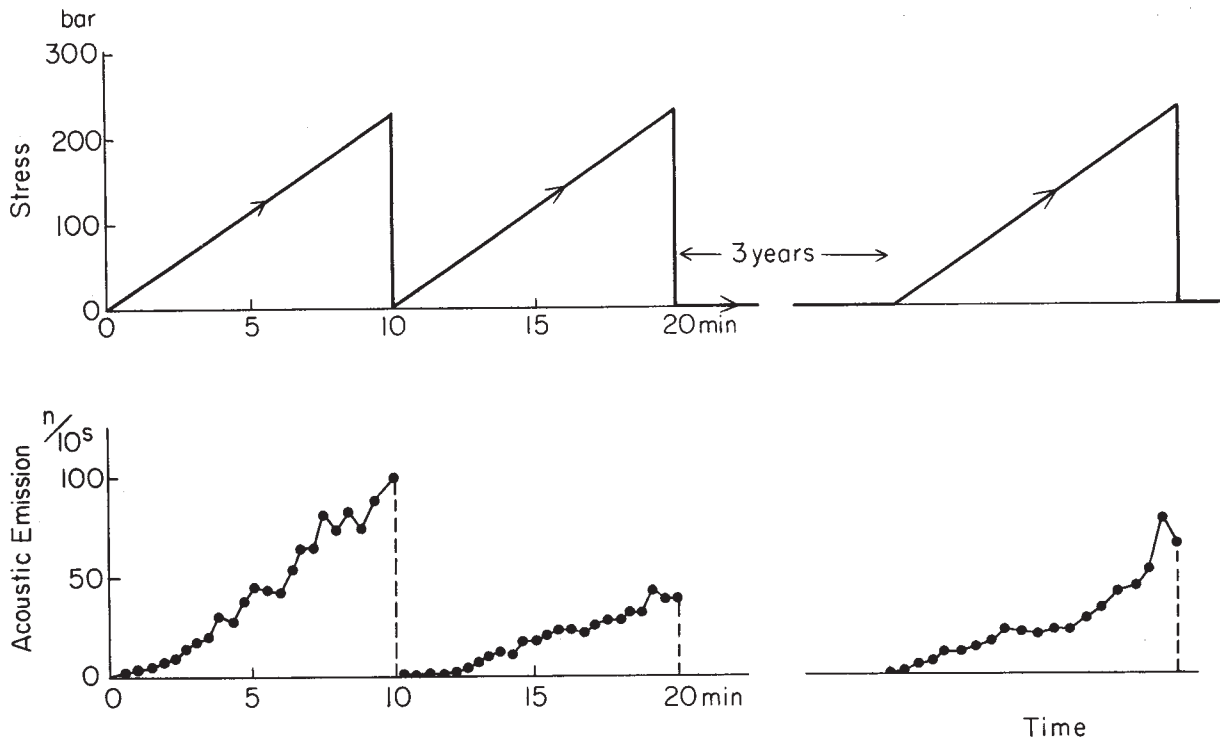
吉川澄夫・茂木清夫：岩石のA E活動度の応力履歴効果による応力推定法(5)，地震学会講演予稿集，1982，No. 2，212，1982。

吉川澄夫・茂木清夫：岩石のA E活動度の応力履歴効果による応力推定法(6)，地震学会講演予稿集，1983，No. 1，232，1983。



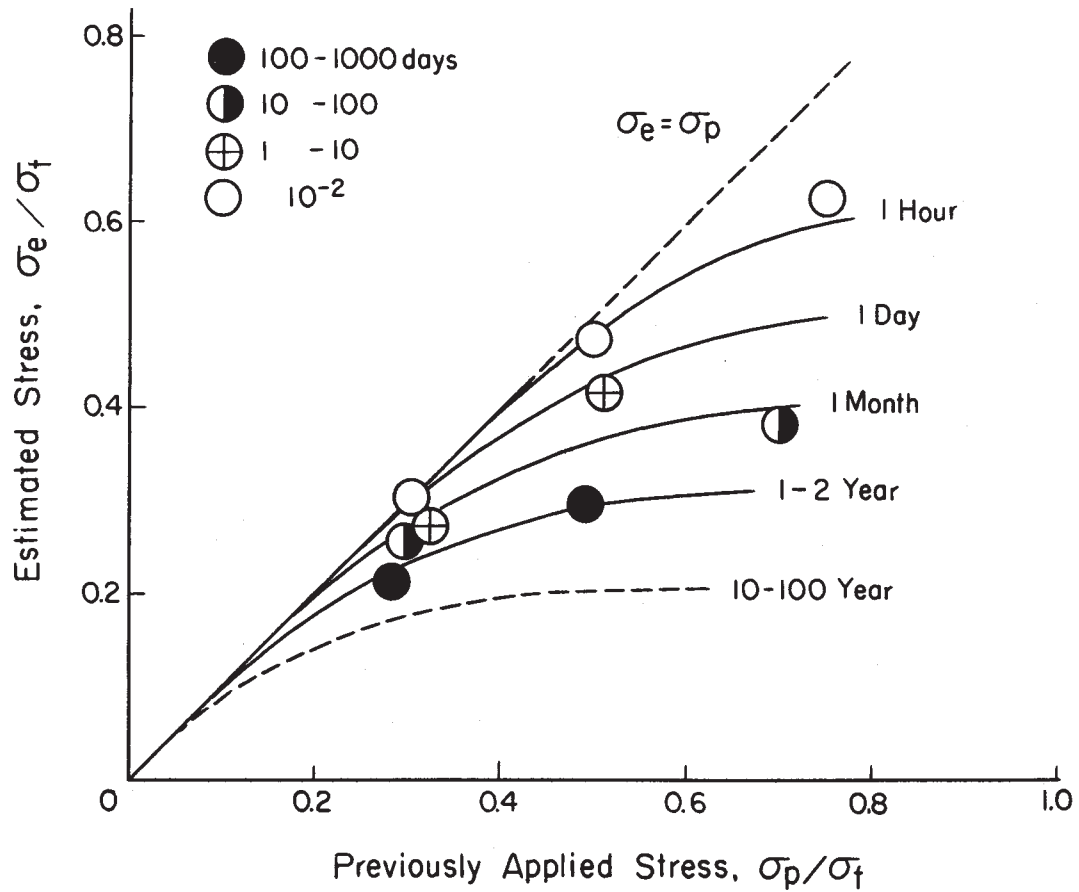
第1図 AE法によって求められた最大主圧力方向と大きさ (角印と太い線)

Fig. 1 The horizontal maximum stresses estimated by the AE method in the Izu Peninsula region (thick lines).



第2図 2回目の加圧までの時間間隔が増すにつれて初期応力についてのメモリーが次第に失われることを示す実験結果

Fig. 2 This experimental result shows that the memory on the stress history in AE activity is gradually missed with time.



第3図 AE法によって求められた応力値と初期応力値との関係。初期加圧と2回目の加圧の時間間隔が長くなると見かけ上低い応力値が求められる。

Fig. 3 Relation between previously applied stress and stress estimated by AE method. The apparent stress estimated by AE method decreases with increasing time interval between the previous loading and the second loading.

(3) ホログラフィー二乗干渉法

1. はじめに

従来の多くの地殻応力測定法は比較的深いボーリング孔を必要とするので、多くの地点で in-situ stress を得るのは困難である。本方法は軽便かつ迅速に地殻応力を測定するために開発された新しい方法で、精度には多少の問題点が多少あるにしても、多くの地点で測定を実施することによってこの欠陥をおぎなおうとするものである。また本方法は実時間で応力をモニターできる可能性があるため、地殻応力の連続測定が可能になる。

2. 原理の概略

ホログラフィー法は物体の三次元像をフィルム上に写しとる事ができるものである。従ってわずかに変形した物体のホログラムともとの変形前の物体のホログラムを重ね合わせると、三次元像が干渉して変形量がレーザー波長の半分の長さを単位とした縞模様としてあらわれる。この方法は比較的簡単で、精度の高い変形測定法となるので、これを利用して岩石の変形を二次元的に決める事ができる。これは歪ゲージが点的に歪を測定するのに対して、大変有利な点である。

地殻応力による岩石の変形を調べるために、第1図に示す様に、地表上の岩盤に小さな孔をあける。二次元的応力場でこのような孔がどのような変形を行うかは理論的に計算できる。この変形をホログラフィー干渉法で測定すると、この変形のうちレーザービーム方向の成分のみが観測され、それが縞模様となってあらわれる。

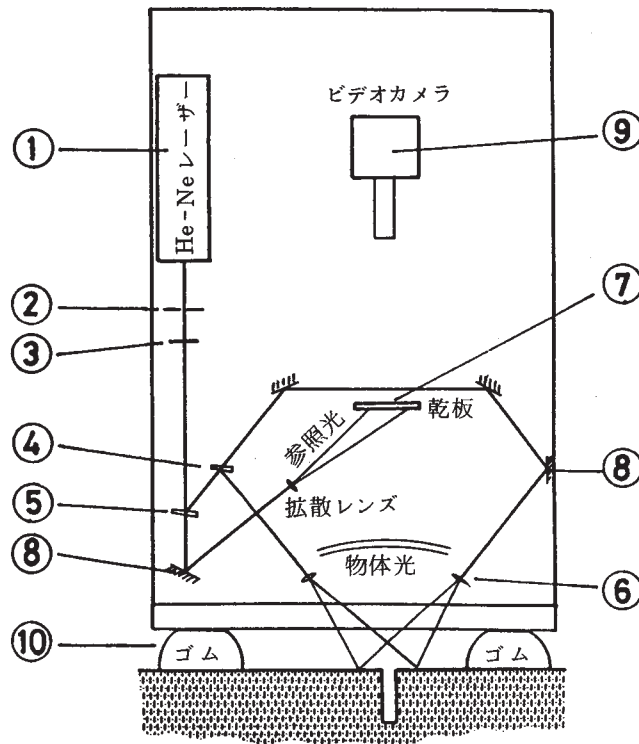
第2図は最大水平圧縮応力方向がレーザービーム方向と一致している場合と 45° かたむいている場合の2つの例に見られる干渉パターンである。これらの模様は最大圧縮応力と最小圧縮応力の値によっても変化してくる。従って干渉パターンの形状から、最大圧縮応力応向、応力値を求める事が出来る。

3. 将来の問題

ホログラフィー二乗干渉法による地殻応力測定装置は科学研究費補助金によって製作された。野外での測定をこれから始める予定である。この方法では地表面近くの岩石の変形を測定するため、気温の変化、潮汐などによって測定値が影響を受ける可能性がある。これらは連続的に観測すれば補正できる種類のものと考えられるが、これらについて後に結果が出た段階で報告したい。(名古屋大学理学部)

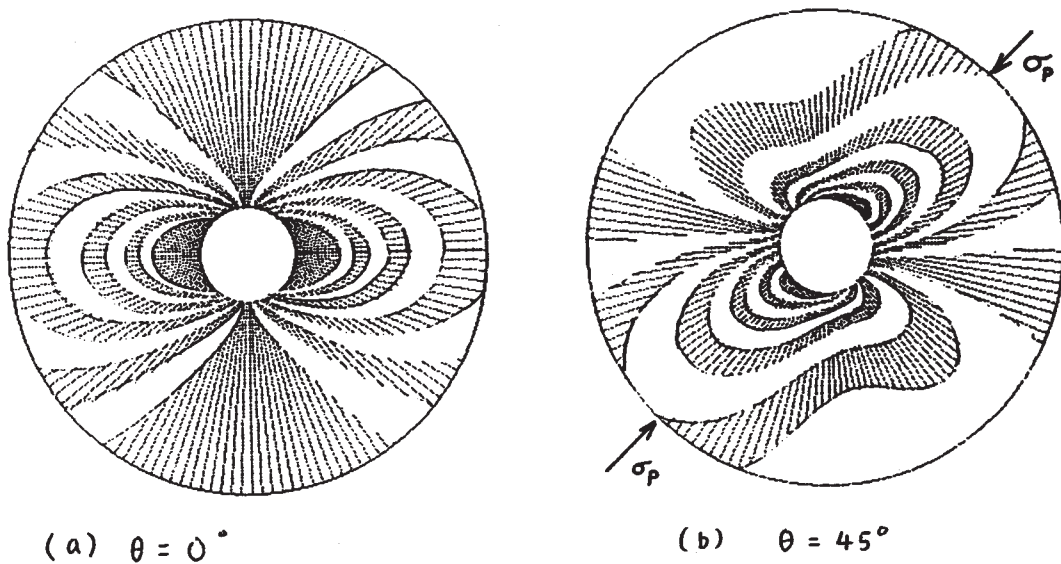
参 考 文 献

水谷 仁・山田切夫・増田幸治：1985，ホログラフィー法による地殻応力測定装置の開発，地震学会予稿集，1985，No 1， 1， 210。



第1図 ホログラフィー干渉を利用した地殻応力測定装置の概観。岩盤上に小孔をあけ、ドリリング前後の岩盤の変形をホログラフィー法で計測する。

Fig. 1 Apparatus for in-situ stress measurement using holographic interferometry. Deformation of rock basement associated with blind-hole drilling is measured by holographic technique.



第2図 中央の孔の変形によって生じた孔周辺の干渉パターン。左図はレーザービーム方向と水平最大圧縮応力方向が一致した場合、右図は45°のズレがある場合の理論パターンである。

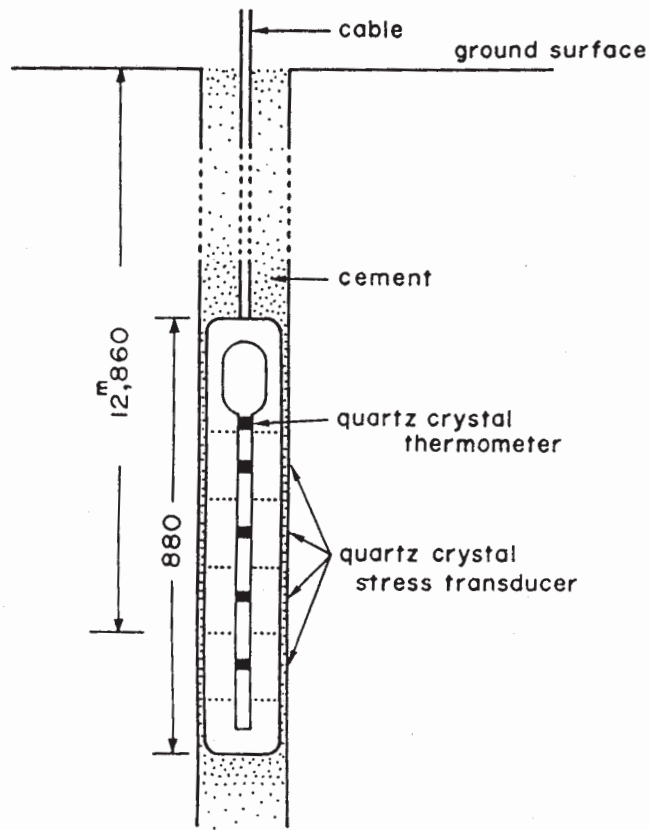
Fig. 2 Theoretical interference pattern around a hole. The pattern depends on the angle between the laser beam axis and maximum stress axis and the magnitude of the stress.

(4) 埋込み式デジタル地殻応力計の開発

埋込み式デジタル地殻応力計（第1図）を開発し、これを地質調査所が絶対応力測定を実施した静岡県富士郡芝川町の同一地点に試験的に埋設（第2図）する機会を得た。この地殻応力計の原理は、剛性の高い円筒物質を地殻中に埋設するとき円筒内径 R_1 の外径 R_2 に対する比 R_1 / R_2 が小さければ、円筒内径歪は円筒物質埋設地点から十分離れた場所における地殻応力に比例することを利用するものである。円筒内径変化測定には共振周波数約 10MHz の水晶振動子を用いているので高感度（分解能 < 1 mbar）である。この方法によれば、地殻の弾性定数と無関係に地殻応力が求まるので、たとえ地殻の弾性定数が時間と共に変化することがあってもそれに影響されずに地殻応力変化をモニターすることができる。異なる3方向の内径変化を測定することにより、水平最大、最小、応力とその向きが決められる。

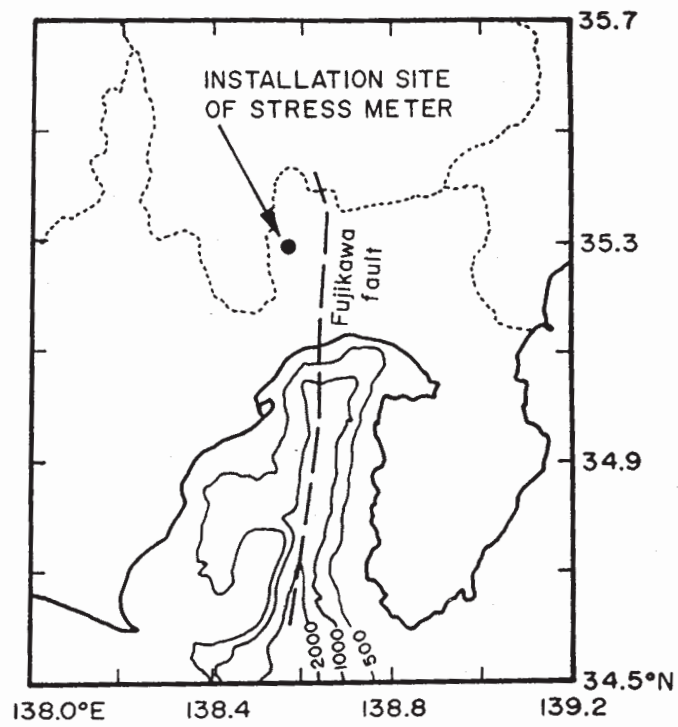
参 考 文 献

- 1) 大中康誉, 1984, 埋込み式デジタル地殻応力計の開発, 地震学会講演予稿集, No. 1, 35。
- 2) 小出 仁, 西松裕一, 小泉昇三, 星野一男, 金川 忠, 中山芳樹, 井上 朗, 山本清彦, 菊地慎二, 1986, 関東・東海地域における地殻応力測定と測定法の比較, 第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 261 - 265。



第1図 埋込みデジタル地殻応力計埋設の概略

Fig. 1 Schematic illustration of a quartz-crystal digital stressmeter installed in a borehole.



第2図 地殻応力計埋設地点 (図中矢印)

Fig. 2 Installation site of a quartz-crystal digital stressmeter.