種々な岩石の AE による初期応力推定のための 基礎的考察[†]

道 廣 一 利* 畑 浩 二**
藤 原 紀 夫*** 吉 岡 尚 也**

Estimation of Initial Stress in Various Rocks by Acoustic Emission

by

Kazutoshi MICHIIRO*, Koji HATA**, Toshio FUJIWARA***
and Hisaya YOSHIOKA**

Our previous experimental studies showed that the initial stress in rocks estimated from the Kaiser effect of acoustic emission is not necessarily the maximum stress that the specimen is subjected to, but is correlative to the residual strain in the specimen at the time of testing. The present investigation on the characteristics of the Kaiser effect in various rocks revealed that the initial stress estimated from the Kaiser effect tended to decrease with time after coring. Thus, the experiments to estimate the initial stress existing in a rock mass by means of the Kaiser effect, must be conducted as soon as possible after coring rock samples.

Key words : Acoustic emission, Initial stress, Kaiser effect, Rock mass, Non-destructive test

1 緒 言

地山の初期応力（地山から試料を採取した直後の岩石が有する応力とする）を推定する方法は数多く提案されているが、現在よく使用される方法の代表的なものとしては、応力解放法や水圧破砕法などがある。しかしながら、これらの方法には幾つかの問題点がある。例えば技術的な問題や、計測装置が大がかりになり多大な費用を要するといった点である。

ところで、材料には、外力によって変形したり破壊したりする時に微小音を発生する現象がある。この現象は、変形および破壊に伴って解放されるエネルギーの一部が音響パルスとなって伝播するものであり、アコースティック・エミッション（以下 AE と記す）と一般に呼ばれている。この AE には材料によって差異はあるが、カイザー効果と呼ばれる非可逆的な現象¹⁾が確認されている。これは、過去に荷重が加えられた材料に再載荷すると、過去の荷重で生じた最大応力値までほとんど AE の発生しない現象である。岩石でのカイザー効果現象を最初に確認したのは Goodman²⁾であり、その後岩石におけるカイザー効果について各方面で種々な研究がなされてきた。また、カイザー効果現象を利用した研究の一つとして、金川らは、岩石供試体に単軸単調載荷試験を行い、供試体から発生する AE レートを計測し、AE 累積曲線の変曲点を

初期応力としている。一方、著者らは⁶⁾⁻⁸⁾カイザー効果を利用して岩盤の初期応力を推定する上での種々な問題点を提唱し解明してきた。その結果、カイザー効果から推定される応力値は必ずしも岩石供試体が受けた最大応力値ではなく、試験時に供試体に残留しているひずみ（供試体に応力を加えることによって生じた軸ひずみとする）^{6),7)}に対応していることを明らかにした。さらに、供試体から応力が解放されると、カイザー効果より推定される応力値は時間経過に伴って小さくなることも明らかにした。本論文では、残留ひずみと応力解放後の時間経過の二つに観点をおいて、種々な岩石材料におけるカイザー効果特性を解明したものである。AE のカイザー効果を利用して岩盤の初期応力が推定できれば、応力解放法や水圧破砕法に比較して装置・実験方法とも簡便であり実用的な方法と考えられる。

2 実験装置および使用岩石

実験に使用した AE 計測システムの概略を Fig. 1 に示す。このシステムにより計測される諸量は、単調載荷時における軸応力、軸ひずみおよび AE 発生数である。単調載荷にはアムスラー型万能試験機（応力制御方式）を用いた。載荷速度は 9.8 MPa/min である。AE は供試体側面に取り付けた AE トランスデューサー（PZT: チタン酸ジルコン酸鉛磁気振動子、共振周波数 140 kHz, NF 社製 AE-901S）で計測した。検

† 原稿受理 昭和63年2月16日 Received Feb. 16, 1988

* 正 会 員 摂南大学工学部 寝屋川市池田中町, Department of Civil Engineering, Setsunan University, Ikeda-nakamachi, Neyagawa

** 正 会 員 (株)大林組技術研究所 清瀬市下清戸, Technical Research Institute, Ohbayashi Corporation, Shimokiyoto, Kiyose

*** (株)大林組技術研究所 清瀬市下清戸, Technical Research Institute, Ohbayashi Corporation, Shimokiyoto, Kiyose

Fig. 1. AE measuring system.

Table I. Threshold and gain.

Identification	Threshold (mV)		Gain (dB)
	V_H	V_L	
Granite	400	380	80
Tuff	250	230	90
Mudstone	100	80	90
Sandstone	120	100	90
Crystalline schist	200	180	100

出された AE は、プリアンプ (NF 社製 AE-912) とメインアンプ (ディスクリミネータ, NF 社製 AE-922 内に装備) により増幅され、あらかじめ設定したしきい値 (Table I 参照) を越え、かつ B. P. F (Band Pass Filter, 100 kHz~200 kHz) を通過した信号について包絡線検波法によりカウンタ (NF 社製 AE-932) で計数表示した。一方、軸応力と軸ひずみは、それぞれロードセル (共和電業社製 LU-5TE) と抵抗線ひずみゲージを用いて計測した。これら計測された諸量は、パーソナルコンピュータによりリアルタイムで処理・解析した。

実験に使用した岩石試料は、花崗岩、凝灰岩、泥岩、砂岩および結晶片岩の 5 種類であり、表面乾燥状態である。これら岩石の単位体積重量、一軸圧縮強度および採取場所は Table II に示す通りである。供試体は、岩石塊から直径 30 mm、高さ 60 mm および直径 50 mm、高さ 100 mm の円柱形に整形した。

Table II. Identification, uniaxial compressive strength (σ_c) and unit weight (γ).

Identification	γ (kN/m ³)	σ_c (MPa)	Location
Granite	25.8	131.7	Inada
Tuff	24.3	83.6	Doujyou
Mudstone	18.3	3.4	Machida
Sandstone	25.9	210.3	Aiki
Crystalline schist	28.9	71.2	Fujioka

3 実験結果および考察

3.1 繰返し载荷を受けた岩石のカイザー効果^{6),7)}

著者らは、岩石におけるカイザー効果現象において、供試体に残留しているひずみの重要性についてすでに報告している^{6),7)}。ここでは、その概略について要約する。

円柱供試体に一軸圧縮応力を繰返し作用させると応力~ひずみ曲線はヒステリシスループを描く。これを繰返し回数と残留ひずみの関係で示せば Fig. 2 となる。図中破線で示した繰返し 50 回では、残留ひずみの増加率は非常に小さく、一方、繰返し 10 回程度では残留ひずみの増加率は繰返し 50 回に比して著しく大きい。ここでは、便宜上繰返し 50 回のを“ひずみ飽和状態”、繰返し 10 回のを“ひずみ不飽和状態”の試料とした。

Fig. 2. Relationship between repetition numbers and residual strain.

このような“ひずみ飽和”と“ひずみ不飽和”の 2 種類の状態の供試体を用いて、一軸試験を行い、AE を計測した。その結果の一例を軸応力と軸ひずみおよび AE 累積数関係で示したのが Fig. 3 である。Fig. 3 (a) は“ひずみ飽和状態”の試料で、カイザー効果より 14.8 MPa の見掛けの先行軸応力 (カイザー効果から推定した軸応力とする) が得られ、これは当初与えた繰返し軸応力 14.7 MPa にほぼ等しい。これに対し、“ひずみ不飽和状態”の試料では、カイザー効果から得られた見掛けの先行軸応力は 6.1 MPa であった (Fig. 3 (b))。ここに挙げたのは花崗岩の一例にすぎないが、Table III に示すように凝灰岩、泥岩、砂岩および結晶片岩など約 200 体の供試体を用いて行っており、一部の供試体 (供試体表面にマクロなクラックが観察されるもの) を除き上記例 (Fig. 3 (a)) の結果と同一となっている。これらの結果より、“ひずみ飽和状態”の試料では、カイザー効果より推定される先行軸応力は当初繰返しによって与えた軸応力にほぼ等しいが、“ひずみ不飽和状態”の試料では当初与えた軸応力よりもかなり低くなっている。いいかえると、カイザー効果より得られる岩石の先行軸応力は、当初繰返しにより受けた最大軸応力に依存するのではなく、

Fig. 3. Relationships among axial stress, axial strain and AE activity in a granite specimen subjected to cyclic uniaxial compressive stress.

Table III. Relationship between real axial stress applied (σ_a) and axial stress estimated from the Kaiser effect (σ_k).

Identification	σ_a (MPa)	σ_k (MPa)
Granite	14.7	14.2
Tuff	14.7	14.9
Mudstone	0.9	1.02
Sandstone	14.7	14.8
Crystalline schist	14.7	15.0

供試体に残留している軸ひずみに大きく依存しているといえる。

地山における岩盤の応力の分布は極めて複雑で、一般には三次元応力状態にあると考えられる。したがって、上述したような一次元的な応力によるカイザー効果の考察も当然必要であるが、地山の応力状態に近い状態でのカイザー効果特性を明らかにしなければならない。そこで、高圧三軸圧縮試験機を用い種々な軸圧 (σ_1) と側圧 (σ_3) のもとで主応力比 (σ_3/σ_1) を一定に保ちながら繰返し載荷を行い、供試体に三次元的な先行応力を与えた。繰返し回数と軸方向の残留ひずみの関係は Fig. 2 と同様な傾向であった。残留ひずみに着目すれば、繰返し回数が 50 回程度になればひずみの増加がほぼ停止している。この状態を三軸応力状態における「ひずみ飽和状態」の試料とする。なお、供試体に作用させた軸圧 (σ_1) と側圧 (σ_3) の組み合わせを Table IV に示す。このような種々の主応力比

Table IV. Axial compressive stress (σ_1) and confining stress (σ_3).

σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
4.9	4.9
6.9	4.9
7.8	4.9
9.8	4.9
11.8	4.9
14.7	4.9
19.6	4.9

(σ_3/σ_1) のもとでの繰返し 50 回終了後、三軸セルより供試体を取り出し、供試体表面に抵抗線ひずみゲージを貼付した後、直ちに一軸単調載荷を行い、AE を計測した。

実験結果の一例を Fig. 4 に示す。図は、主応力比 (σ_3/σ_1) がそれぞれ 1.0 と 0.25 のもとで繰返し載荷を行った後、一軸試験における軸応力と軸ひずみおよび AE 累積数の関係を示したものである。図より推定される見掛けの軸応力は Fig. 4 (a) では 4.7 MPa で、(b) では 19.7 MPa であった。他の主応力比を変えて行った結果を Table V に示す。このように、実験は種々の主応力下で行ったにもかかわらず、カイザー効果より推定される見掛けの先行軸応力は側圧 (σ_3) の影響をまったく受けておらず、繰返し載荷により作用させ

Fig. 4. Relationships among axial stress, axial strain and AE activity in a granite specimen subjected to cyclic triaxial compressive stress.

Table V. Relationship between principal stress ratio (σ_3/σ_1) and axial stress estimated from the Kaiser effect (σ_K).

σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)	σ_3/σ_1 (MPa)	σ_K (%)
4.9	4.9	1.00	4.7
6.9	4.9	0.71	7.0
7.8	4.9	0.63	8.1
9.8	4.9	0.50	9.7
11.8	4.9	0.42	11.4
14.7	4.9	0.33	14.8
19.6	4.9	0.25	19.7

た軸圧 (σ_1) のみの値を示している。厳密に言えば、主応力比の変化とともに AE 発生数には若干の変化がみられるが、カイザー効果より得られる値に関しては、側圧の大小を考慮しなくてもよいと考えられる。

3・2 一定軸応力を受けた岩石のカイザー効果

3・1では、一軸および三軸圧縮による繰返し载荷を行い、“ひずみ飽和状態”と“ひずみ不飽和状態”でのカイザー効果特性について要約を記した。その結果、“ひずみ飽和状態”の供試体を用いた場合のみ、カイザー効果より推定される応力は、当初繰返し载荷により作用させた応力値とほぼ等しい値となった。

ところで、岩盤は長期間にわたり荷重を受けクリープは完了していると考えられる。そのためここでは、3・1の繰返し荷重を受けた場合と異なり、一定軸応力を受けた供試体のカイザー効果特性について考察する。一定軸応力 14.7 MPa のもとで軸ひずみの増加がほぼ停止した。いわゆる“ひずみ飽和状態”と軸ひずみの増加が顕著に認められる“ひずみ不飽和状態”との二種類の供試体を作成した。一定軸応力を除荷したのちただちに一軸試験を行い AE を計測した。Fig. 5 に実験結果の一例を軸応力と軸ひずみおよび AE 累積数の関係で示す。Fig. 5(a)では、カイザー効果より推定される見掛けの先行軸応力は 14.7 MPa となっており、当初与えた一定軸応力 14.7 MPa にほぼ等しい。一方、クリープひずみの増加が顕著に見受けられる状態、いわゆる“ひずみ不飽和状態”では、当初与えた一定軸応力よりもかなり低い値を示した (Fig. 5(b))。

ここに挙げたのは一例にすぎないが、全ての結果について、“ひずみ飽和状態”の試料では、カイザー効果より当初与えた一定軸応力を数パーセントの誤差内で推定できるが、“ひずみ不飽和状態”ではかなり低い値となった。したがって、クリープ载荷の場合も繰返し载荷の場合と同様に“ひずみ飽和状態”の供試体を用いれば、当初与えた一定軸応力をカイザー効果より正確に推定できることが明らかとなった。

(a) State of strain increment equal to zero.

(b) State of strain increment not equal to zero.

Fig. 5. Relationships among axial stress, axial strain and AE activity in a granite specimen subjected to constant uniaxial compressive stress.

3・3 応力解放後の時間経過とカイザー効果の関係

地山から岩石試料を採取し試験を行うまでには、試料の輸送や整形などのためにタイムラグが生ずる。このため岩石試料は応力解放後の時間経過に伴って一般にひずみ回復（膨張）を生ずる。したがって、地山から岩石試料を採取した後（応力解放後）の時間経過がカイザー効果にいかに関与を及ぼすかを調べる必要がある。その調査のための試験として、14.7 MPa の一定軸応力の下で“ひずみ飽和状態”とし、一定軸応力除荷後、恒温・恒湿場所で種々な長さの期間放置した供試体に一軸単調载荷試験を行い AE を計測した。なお、今回の試験での試料放置期間は、1.5, 3, 4, 5, 6, 7.5, 9, 11.5, 14 および 20 日であった。縦軸にカイザー効果より求めた見掛けの先行軸応力を、横軸に放置期間をとり結果を整理すると Fig. 6 のようになる。その結果、放置期間が4日目までは、カイザー効果より推定される見掛けの先行軸応力は予め与えた一定軸応力にほぼ等しくなっているが、4日を越えると放置期間が増すにつれて小さな値となっている。このことは、用いた試料が一時的にある一定荷重下で“ひずみ飽和状態”であっても、それを長期間放置することにより残留ひずみが回復し、ある一定荷重下における“ひずみ不飽和状態”の試料と同等になり、予め与えた応力よりも推定軸応力が低くなるものと考えられる。

Fig. 6. Relationship between axial stress estimated from the Kaiser effect and number of elapsed days.

ただし、ここに述べた“ひずみ飽和状態”および“ひずみ不飽和状態”は実験室レベルのものである。一方、地山の岩石は一般に極めて長期間載荷状態にあり、“ひずみ飽和状態”であると考えられる。したがって地山より採取した岩石と試験室内で短期の載荷をした岩石とは、残留ひずみの回復の様相が異なるかも知れない。また、地山における岩石は三次元応力状態下でのクリープであり、今回の実験は一軸圧縮応力下におけるクリープ試験の結果である。

以上より、一定軸応力下にある供試体から軸応力を解放させ、ある時間以上経過すると、カイザー効果より推定される載荷軸方向の応力はあらかじめ作用させた一定軸応力よりも小さくなることが明らかとなった。しかし、これはあくまでも一定軸応力の載荷期間が7～10日間という実験室内のレベルであり、原位置岩盤のように非常に長期にわたって種々な応力を受けた状態の結果ではない。

3・4 原位置から採取した岩石のカイザー効果

室内における実験結果が、そのまま原位置における岩石に適用できるか否かを検討した。ここでは、原位置から採取した岩石試料を用い、試料採取後（応力解放後）の時間経過がカイザー効果より推定される応力にどのような影響を及ぼすかを調べた。

使用した岩石試料は、適切に選んだダムにおける土被り約80mのバルブ室建設現場の側壁から掘削長さ11mの水平ボーリングを行い、直径75mmの岩石コアを採取した。採取地点はFig.7の概略図に示すように急傾斜をなす斜面の下にあたる。付近の岩種は主に花崗岩で、その一軸圧縮強度は約240MPa、単位体積重量は26.3kN/m³の良質なものであった。掘削長さ11mの水平ボーリングの内、側壁から約4m位までの部分で採取した岩石コアには、節理の発達が見られると共に、青灰色や緑灰色の薄いシーム層が介在していた。この部分は、空洞を掘削したことによる影響（応力集中）を受けていると考えられるので、実験対

Fig. 7. Location of rock sample coring.

象外の試料とした。

Fig.8に示したようにI、II、III方向を軸とする直径30mm、高さ60mmの円柱供試体を整形し、供試体表面に低抵抗線ひずみゲージを貼付した後、直ちに一軸単調載荷を行い、AEを計測した。Fig.9に結果の一例を示す。この図に示した試料はFig.8におけるI方向のものであり、それぞれ岩石コア採取後1日および10日間放置した後、一軸試験を行った結果である。Fig.9(a)は試料採取後の放置期間が1日のものであり、カイザー効果より推定される軸応力は1.0MPaである。一方、Fig.9(b)は10日間放置したもので、推定応力は0.6MPaとなっており、同一場所、方向の試料にもかかわらずカイザー効果より推定される軸応力は約半分の値となっている。これらのデータをFig.8に示した各方向（I、II、III）ごとに、横軸を試料放置経過日数、縦軸をカイザー効果より推定される応力として示せばFig.10となる。これらの図より、いずれの方向においても岩石コア採取後5日目位までは、カイザー効果より推定される軸応力はほぼ一定値を呈しているが、5日目以降では経過日数に伴って推定軸応力は小さくなっている。ここで、前節で示した室内での結果とFig.10を併せて描くとFig.11となる。図中●印は、7～10日間14.7MPaの一定軸

Fig. 8. Cylindrical specimens (diameter: 30 mm, length: 60 mm).

Fig. 9. Relationships among axial stress, axial strain and AE activity in a granite specimen shaped in the horizontal direction (direction I).

応力下でクリープさせ、その後除荷し、種々の期間放置した後、一軸単調載荷を行いカイザー効果より得られた見掛けの先行軸応力を示したものであり、 Δ 、 $\square$ および $\circ$ 印はそれぞれ前述した Fig. 10 (a), (b)および(c)である。 $\bullet$ 印ではあらかじめ与えた軸応力とカイザー効果より推定される応力とがほぼ同じである期間は4日目位までで、 Δ 、 $\square$ および $\circ$ 印では、放置期間が5日目位までであれば、ほぼ同じ値を示しており、室内で強制的に先行軸応力を与えた場合と傾向を同じくしている。このことは、試料採取時の乱れとか、応力解放に伴ってひずみの回復が生ずるが、もし地山内における応力と試料採取直後における応力との間にあまり差がないとすれば（正確に言えば地山から岩石を採取した後応力分布の状態はかわっている）、これらの結果より試料採取後数日間以内に AE 試験を行えば、かなり正確に岩盤の初期応力を測定できるのではないかと考えられる。

いずれにしても、カイザー効果から推定される応力は、応力解放後の時間経過に伴って小さく推定されることが認められる (Fig. 11 参照)。そのため、地山から岩石試料を採取した後は、ひずみがあまり回復しないうちに AE 試験を行わなければ、初期応力を正確に求めることができないことが十分に推測される。

3・5 AE 法により推定した主応力およびその方向

限られた室内実験結果であるが、三軸試験を行った結果から、推定される見掛けの先行軸応力は側圧

Fig. 10. Relationship between initial stress estimated from Kaiser effect and number of elapsed days in specimens shaped.

Fig. 11. Comparison of results in Fig. 6 and 10.

(σ_3) の影響をまったく受けておらず、軸圧 (σ_1) の値を示していることがわかった。そのため、カイザー効果から求められる値は载荷軸方向の応力成分であることが明らかとなった。このことをベースにし、地山における岩盤の最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_3 および主応力の傾斜角 θ を Fig. 12 より求めることができる。

Fig. 12. Mohr's circle of three stress (σ_I , σ_{II} , σ_{III}) components and principal stress (σ_1 , σ_3).

すなわち、ある平面内において水平軸方向を基準にとり鉛直方向へ 0 rad , $\pi/4 \text{ rad}$, $\pi/2 \text{ rad}$ 傾いた三方向の試料を用い、カイザー効果より得られる応力成分をそれぞれ σ_I , σ_{II} , σ_{III} とする。また、この平面内における最大主応力と最小主応力をそれぞれ σ_1 , σ_3 とし、鉛直軸方向の応力成分 σ_{III} と最大主応力 σ_1 とのなす角を θ とする。ただし、ここでは圧縮応力を正、最大主応力の傾き θ は鉛直軸方向の応力成分 σ_{III} から反時計まわりを正とする。Fig. 12 より、三応力成分 σ_I , σ_{II} , σ_{III} は最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_3 および主応力の傾斜角 θ を用いると以下になる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sigma_I + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_I - \sigma_3}{2} \cos 2\theta \\ \sigma_{II} &= \frac{\sigma_I + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_I - \sigma_3}{2} \sin 2\theta \\ \sigma_{III} &= \frac{\sigma_I + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_I - \sigma_3}{2} \cos 2\theta \end{aligned} \right\} (1)$$

また、鉛直軸方向の応力成分 σ_{III} に対するせん断応力を τ_{III} とすれば次のようになる。

$$\tau_{III} = -\frac{\sigma_I - \sigma_3}{2} \sin 2\theta \quad (2)$$

これらを変形すれば、最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3 は以下になる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{aligned} \right\} = \frac{\sigma_I + \sigma_{III}}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2} \quad (3)$$

さらに、最大主応力 σ_1 の傾き θ は式(1)より

$$\tan 2\theta = \frac{2\sigma_{II} - (\sigma_I + \sigma_{III})}{\sigma_I - \sigma_{III}} \quad (4)$$

となる。

上式を用い、Fig. 10 における試料採取後 5 日以内の σ_I , σ_{II} , σ_{III} より、最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_3 および傾き θ を計算すると $\sigma_1 = 2.1 \text{ MPa}$, $\sigma_3 = 0.9 \text{ MPa}$ および $\theta = -0.3 \text{ rad}$ となる。一方、近接地点において応力解放法で初期応力を推定している。その結果は、 $\sigma_1 = 4.6 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 2.1 \text{ MPa}$, $\sigma_3 = 0.3 \text{ MPa}$ であった。AE 法による計測が 2 次元を対象にしているのに対し、応力解放法では 3 次元を対象としている。さらに、応力解放法によるデータが一計測しかいたため詳しい議

論はできないが、今後多くのデータを集めることにより AE 法の有効性をさらに検証する必要がある。

4 結 論

AE のカイザー効果を利用し、岩盤の初期応力を推定する上での問題点の一つである応力解放後の時間経過に着目して、種々な岩石のカイザー効果特性を実験的に検討した。得られた結果をまとめると以下になる。

(1) 種々な岩石 (5 種類) においても、

AE のカイザー効果は先行応力に依存するのではなく、供試体のひずみ飽和の程度に影響される。

(2) 地山から採取した岩石試料を恒温・恒湿な場所で種々の期間放置した後、一軸単調載荷を行い AE を計測し、カイザー効果より見掛けの先行軸応力を求めた結果、採取後 5 日目位を境にして見掛けの先行軸応力は急激に小さくなった。この傾向は、室内で一定軸応力を与えた後、一軸単調載荷により求めた場合と同一傾向であった。

以上のようなことをふまえ、今後種々な問題を解決することにより、AE 法による初期応力の推定が有効な手段になりうると考えられる。

最後に、本研究を遂行するにあたり終始一貫して適切なご指導をいただいた京都大学名誉教授、村山朔郎博士に深く感謝の意を表します。

(昭和 59 年 10 月 23 日 第 7 回国際 AE シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) J. Kaiser, Archiv für des Eisenhüttenwesen, **24**, 43 (1953).
- 2) R. E. Goodman, Geo. Soc. of Am., **74**, 487 (1963).
- 3) K. Mogi, Bell. of the Earthquake Res. Inst., **40**, 125 (1962).
- 4) S. Yoshikawa and K. Mogi, Tectonophysics, pp. 323 (1981).
- 5) 金川 忠, 林 正夫, 仲佐博裕, 土木学会論文報告集, 258号, pp. 63 (1977).
- 6) K. Michihiro, T. Fujiwara and H. Yoshioka, the 26th U. S. Sympo. on Rock Mech., pp. 557 (1985).
- 7) K. Michihiro, H. Yoshioka, K. Hata and T. Fujiwara, 4th Conf. AE/MA in Geo. Structure and Materials, (1985) in print.
- 8) S. Murayama, K. Michihiro, J. Saito, T. Fujiwara, H. Yoshioka and K. Hata, Proc. of the 7th Int. AE Sympo., pp. 586 (1984).