AE 原波形解析システムの開発と低合金鋼の水素脆化割れモニタリングへの適用

林 康久*, 竹本 幹男**

* 青山学院大学理工学部大学院

** 青山学院大学理工学部

A Development of AE Source Inversion System and an Application to the Monitoring of Hydrogen Assisted Cracking of Low Alloy Steel

Yasuhisa Hayashi* and Mikio Takemoto**

* Graduate School, Aoyama Gakuin Univ.

** Faculty of Science and Engineering, Aoyama Gakuin Univ.

In order to elucidate the microkinetics of hydrogen assisted cracking of low alloy steel, a newly developed Acoustic Emission (AE) source inversion system was used. The paper discusses the feasibility and some problems in applying this system to monitor the kinetics of microcrack. The AE monitoring system is composed of displacement type transducer, pre-amplifier, high speed A/D converter and 32 bit personal computer. The transfer function of AE measuring system was carefully examined and found to measure the surface displacement without giving wave distortion up to 1.5 MHz. A computer software for AE source inversion procedure made it possible to calculate the second kind Green's function (transfer function of material) and also to simulate the surface displacement at sensor position and calculate the source waves from detected waves by convolution integral in time domain and deconvolution integral in frequency domain respectively. The energy released by step wise crack propagation was obtained by the deconvolution of detected waves with the overall transfer function of the system which was experimentally determined by pencil lead breaking at notch tip. The crack size was calculated from released energy with the assistance of fracture mechanics, and found to fairly well agree with the hydrogen induced intergranular fracture area at early time. Though the propriety and accuracy of the informations from source wave have to be carefully examined by more experiments of large specimens, it could be said that the AE source inversion procedure could give more direct informations on the microkinetics of environmental assisted cracking.

Key words: acoustic emission, source inversion system, wide band displacement sensor, transfer function, green's function, hydrogen embrittlement, micro kinetics

1. 緒 言

Acoustic Emission (以下 AE と呼ぶ) 法を用いて、環境劣化割れをモニタリングする試みは、実験室的にはすでに相当の分野で行われ、また一部実装置の健全性診断にも適用されている。これらのモニタリングにおいては、供試体に接着した機械センサーによって微小な弾性

波を検出し、これを増幅した後のいわゆる“検出波”について信号処理がなされている。検出波のエネルギー、二次エネルギーモーメント、リングダウンカウントによる発生頻度の経時変化、あるいは、数個のセンサーへの初動波到達時間差による欠陥の位置評定などが実用 AE モニタリング手法によって得られる情報である。しかし、これらの情報は、AE モニタリングシステムが変われば大幅に変化し、絶対的でないのみならず、割れに関

*, ** 〒157 東京都世田谷区千歳台 6-16-1 (6-16-1, Chitosedai, Setagayaku, Tokyo 157, Japan)

するより直接的情報, 例えば, 進展割れの大きさ, 方向, 進展速度などについてはほとんどなんらの情報も得られない。モニタリング装置を介して観察される波は, 結果としての波 (検出波) であって, 割れ発生点における原因としての波 (原波形と呼ぶ) が大きく歪められたものとなっている。しかし, 波形を歪める原因となった弾性波の伝播媒体, センサー, アンプなどは, その特性が明らかならば, 適切な信号処理法を用いることによってこれを除去し, 結果から原因を逆演算することが可能である。近年, AE の研究分野で著しい進歩をみせてきた AE 原波形解析法¹⁾では, 検出波から原波形を推定するか, 仮定した原波形に対して検出波をシミュレーションすることが可能である。割れにおける原波形とは, 不連続な新生面の発生, 伝播による解放エネルギーであるから, これが求まれば, 適当な破壊力学的手法の援用によって, 割れの大きさ, 伝播速度, 位置, 方向など, より重要な直接的情報をうる事が可能である。著者らは, 独自に AE 原波形解析のためのコンピュータソフトウェアを開発し, 衝撃力の測定, 脆性材料の破壊の素過程を解明する研究を行い, 一部その有用性を報告²⁾した。本研究では, 低合金鋼の水素脆化割れへの本手法の適用の可否について検討した結果を報告する。採り上げた系, 試験条件は極めて限られているが, 複雑な形状をした試験片の割れに対する AE 原波形解析を行う場合の問題点やそれらに対する対策, 得られた原波形の物理的意味などについて検討した。

2. AE 計測系の定式化

いま, 応答関数が $h(t)$ の線形システムに $x(t)$ が入力したときに $y(t)$ が出力されたとすると, この三者には (1) 式の関係がある。

$$y(t) = \int_0^\infty h(t-\tau)x(\tau)d\tau \quad (1)$$

$$y(t) = h(t)*x(t) \quad (2)$$

(1) 式は畳み込み積分 (合成積) と呼ばれ, 以降 (2) 式のように記号 “*” で表わす。原波形解析の目的は実験によって得られたシステムの出力, すなわち検出波: $y(t)$ から入力である原波形: $x(t)$ を求めることであり, 基本的には (1) 式で表現される積分方程式を解くことによって得られるが, そのためにはあらかじめ応答関数: $h(t)$ を決定しておく必要がある。Fig. 1 には本研究に使用した AE 計測システムを示す。AE 計測系の応答関数: $h(t)$ は, 材料の応答関数: $g(t)$, トランスデューサーの応答関数: $s(t)$, A/D コンバータなどの電気系の応答関数: $d(t)$ のそれぞれの応答関数の合成積で表現されるので, 次式で表される。

$$h(t) = g(t)*s(t)*d(t) \quad (3)$$

Fig. 1 Schematic diagram of AE source wave analysis system.

このうち電気系の応答関数はプリアンプ (NF 回路ブロック 9913) と A/D コンバータ (AUTNICS S121) であるがこれらはファンクション・ジェネレータによる電気信号の計測によって決定することができ, 5 MHz 程度までは波形歪を与えないことから除外することができる。結局 (2) 式は (4) 式となる。

$$y(t) = g(t)*s(t)*x(t) \quad (4)$$

材料の応答関数: $g(t)$, すなわちグリーン関数を決定する方法としては, 理論的に定める方法と, 既に原波形が既知である標準 AE 源を入力し, 検出波を標準 AE 源で逆合積することによって定める実験的方法, の 2 種類が考えられる。複雑な形状の媒体のグリーン関数を理論的, 解析的に決定することは極めて難しいが, 半無限弾性体を想定できる場合には Lamb 問題に対する解であるグリーン関数³⁾を使用することが可能である。一方実験的に求める方法では, シャープペンシルの芯の圧折, もしくはガラス細管の圧壊などの AE 源が提唱されており^{3), 4)}, 比較的簡便にグリーン関数を決定することができるが, (1) 圧折を行うことのできない材料内部の AE 源を取り扱うことができない, (2) 標準 AE 源で決定される応答関数の周波数帯域に限界がある, (3) 後述するように monopole 源に対する応答関数の dipole 問題への拡張などに問題点がある。

境界要素法にもとづく Generalized Theory of Acoustic Emission とよばれる波形解析理論⁵⁾によれば, 境界 S で囲まれた物体内の点 x における時刻 t での i 方向の変位 $u_i(x, t)$ は内部境界 F 上の点 x' における外力による力の違い $f_k(x', t)$ に対しては (5) 式, クラックの生成に伴う変化のくい違い $b_k(x', t)$ に対しては (6) 式で表現される。

$$u_i(x, t) = \int_F G_{ik}(x, x', t)*f_k(x', t)dS \quad (5)$$

$$u_i(x, t) = \int_F T_{ik}(x, x', t)*b_k(x', t)dS \quad (6)$$

G_{ik} , T_{ik} はそれぞれグリーン関数, 第二種グリーン関数と呼ばれ⁶⁾, T_{ik} は等方等質弾性体ならばラーメの定数 λ , μ , 面 F の法線ベクトル n_i を用いて (7) 式で表現される。

$$T_{ik} = \lambda G_{ij,j} n_k + \mu G_{ik,j} n_j + \mu G_{ij,k} n_j \quad (7)$$

ここで, 例えば $G_{ij,j}$ は $\partial G_{ij} / \partial x_j$ を意味し, G_{ij} の j 方向空間微分を意味する。このように対象とする AE 源が外力によって与えられるいわゆる “Monopole 問題” を取り扱う場合と, クラックの発生等による “Dipole 問題” では AE 系を表現する式が異なる。グリーン関数や第二種グリーン関数は既に地震学, 地球物理の分野では理論的に解析されており, 本研究では, 数値解析に適した H. M. Mooney⁷⁾ および L. R. Johnson⁸⁾ の Lamb 解を求めるための Fortran プログラム⁹⁾ を参考にし, Mooney の Lamb 解から G_{ik} を, (7) 式から T_{ik} をそれぞれ求め, 解析を行うソフトウェア (ADAS) を開発した。以下には開発したシステムで, 変位型センサーを用いて, 標準 AE 源である シャープペンシルの芯の圧折による AE 波のシミュレーションと実測を行った例を示す。

半無限弾性体を仮定しうる 300 mm 立方の鋼塊表面でシャープペンシルの芯 (Pentel, 2H) を圧折した時に, 同一表面 (距離=20 mm) に接着した変位型トランスデューサー (DUNEGAN S9208) で検出された AE 実測波を Fig. 2-(a) に示す。芯の圧折時の AE 原波形を求めた著者らの研究²⁾ では立ち上がり時間: ΔTr 約 1 μsec 程度の間に 3.5 N の力を解放を伴うステップ状の波形であることから, この波形を Niwa ら⁶⁾ の提唱した次式で近似する。この式によって得られる波形を Fig. 2-(b) に示す。

$$\begin{aligned} dx(t)/dt &= C \cdot \sin^4(\pi t / \Delta Tr) \\ 0 &\leq t \leq \Delta Tr \end{aligned} \quad (8)$$

一方, 1 μsec の立ち上がり時間をもつステップ状の原波形とグリーン関数 G_{33} を合成積することによってトランスデューサー取付部の表面変位が計算可能となる。得られたシミュレーション波形 (Fig. 2(c)) は Fig. 2(a) の実測波とはかなりよく一致しており, 使用した S 9208 トランスデューサーは表面変位をほぼ忠実に検出していることがわかる。また開発したソフトウェアも, 妥当なものであることがわかった。この例は, monopole 源に対する最も単純なシミュレーションであるが, 想定される AE 源に対して, 観察点でどのような波形が得られるはずであるかをシミュレーションでき, かつ特殊トランスデューサーを用いれば表面変位を直接検出できる意義は大きい。一方, 割れのごとき dipole 源に対するシミュレーション, 検出波からの逆演算による原波形解析においては, それ相応の信号処理が必要となる。以下には定荷重下の低合金鋼の水素脆性割れについてこの方法を適

a) Detected wave

b) Assumed source wave

c) Simulated surface displacement

Fig. 2 Comparison of detected wave of pencil lead break (a), source wave (b) and simulated surface displacement (c).

用した結果を述べる。

3. AE 原波形解析法を用いた水素脆性割れのマイクロメカニクス

3.1 実験装置および方法

定荷重型水素脆化割れに用いた試験片と AE トランスデューサー取付位置を Fig. 3 に示す。試験材料は SCM4 の QT 処理材 (850°C×1 時間保持後油焼入れ, 600°C×1 時間の焼戻し処理) の疑似 CT 試験片を使用した。試験片は 90° の引き抜き丸棒から切り出したため, 引き抜き方向と負荷方向が直交する特殊な実験条件となっている。試験材料の化学成分および力学特性を表 1 および 2 に示す。トランスデューサーを直接試験片に取り付けるため, 試験片切欠き部に特殊アクリル製セル

Table 1 Chemical composition of SCM 4.

wt %						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.34	0.25	0.74	0.017	0.018	0.01	0.16

Table 2 Mechanical properties of QT treated SCM 4.

Young's Modulus	207000 MN/m ²
Proportional Limit	1210 MN/m ²
Ultimate Tensile Strength	1840 MN/m ²
Elongation	11.2%

を取り付け、山川ら¹⁰⁾が使用した試験液：1NH₃BO₄+0.033 MKCL+0.02M thiourea を注入した。実験は 892 kgf の定荷重引張試験を行い、負荷と同時に電流密度 100 A/m² で水素チャージした。試験環境は室温大気中 (23°C) であるが、雑音信号をできるだけ排除するため、除振、無響音環境とした。

AE の計測には原波形解析を目的としたシステムのほか、従来型の検出波解析用システム (PZT トランスデューサー：PAC-R15 とプリアンプおよび AE アナライザー：PAC3000 で構成され全増幅は 85dB) を用いた。一方、AE 原波形解析用には試験片の割れ進展方向と直交する端面 (割れ開口方向) に変位型トランスデューサー：S9208 を接着し、その出力をプリアンプで 40dB 増幅後、高速デジタイザでサンプリングし、GP-IB を介してコンピューター・ハードディスクに記録した。座標軸はトランスデューサー接着位置を原点とし、この場合割れ開口に伴う x_3 方向；すなわち u_3 変位を測定することになる。なおサンプリング条件は、間隔 50 nsec, 点数 1024 点とした。

試験片は小型で複雑な形状をしており、解析的グリーン関数の求まっている無限平板を仮定できる状態には程遠いが、いま、厚さ 40 mm の無限平板を仮定すると、様々な割れモードに対する検出波 (トランスデューサー取付部の u_3 変位) を推定できる。割れの発生、伝播が不連続的であるならば、dipole source wave は b_k に対してヘビサイド型ステップ関数を仮定でき、そのときの T_{ik}^H を Fig. 4 に示す。ここで T_{ik}^H は n 方向の法線ベクトルをもつ面に k 方向の dipole force が作用して、時間に対してステップ状に開口したときの自由表面での i 方向の変位である。Fig. 3 の Mode I 型荷重による水素脆性割れの場合には $n=(0, 0, 1)$, $T_{33}^H(0, 0, 0, t; 0, 0, 0.04, 0)$ となり、Fig. 4 (c) の波となる。Fig. 4 に示した以外の割れモードに対しては表面変位はすべて零となる。例えば $n=(0, 0, 1)$ の Mode II, Mode III 荷重に

Fig. 3 Schematic illustration of the specimen with AE transducers for constant load type hydrogen embrittlement.

Fig. 4 The components of Green's function of second kind: $T_{ik}^H(0, 0, 0, t; 0, 0, 0.04, 0)$

よる割れの弾性波の放出は、Fig. 3 に示したトランスデューサー取付位置では検出されない。このように AE 原波形解析においては、割れの方向とトランスデューサー

の取付位置は極めて重要である。しかし、理論的に求める第二種グリーン関数では、入力に対する変位の絶対量が明らかでないため、AE 原波形解析によって割れのマイクロキネティクスを論じるには限界がある。そこで本研究では、dipole source に対するこの試験片のグリーン関数を切欠き先端部で x_3 方向にシャープペンシルの芯を圧折することによって求まる monopole source に対する G_{ij} から求める方法を用いることにした。この場合、クラックの解放エネルギー D_{ik} と表面変位 u_i は次式で与えられる。

$$u_i(x, t) = D_{ik} * G_{ij, k'} \quad (9)$$

$G_{ij, k'}$ は大平ら¹¹⁾によれば Mode I 型の割れで x_3 方向の初動縦波については次式が成立すると言われている。

$$G_{ij, k'} = \frac{1}{v_L} \frac{\partial G_{ij}}{\partial t} \quad (10)$$

ここで v_L は縦波の伝播速度である。(10) 式は本研究条件の場合には次式となる。

$$G_{33, 3'} = \frac{1}{v_L} \frac{\partial G_{33}}{\partial t} \quad (11)$$

この式は x_3 方向の初動縦波のみに成立すること、Mode I 型のクラックのみに適用できること、信号処理上は離散化したデータの微分操作を伴い誤差を招きやすいこと、予亀裂材では芯の圧折ができないこと、などいくつかの問題点を有しているが、クラックの解放エネルギーの絶対値を求めることにおいては優れている。したがって本研究においては Mode I 型クラックに対するシミュレーション波形 (Fig. 4 (c)) と類似の検出波のみを対象として AE 原波形解析を行うことにした。

3.2 実験結果および考察

Fig. 5 は従来型の AE 検出波の解析による振幅と立ち

Fig. 5 Changes of amplitude and rise time with detected time obtained by the analysis of detected waves.

上がり時間の経時変化を示す。負荷開始時には可移転位と水素の侵入によると思われる立ち上がり時間が短かく振幅の大きな AE 波が発生するが、やがて振幅の大きな AE 波は減少し、立ち上がり時間の長い AE 波が発生する。割れが発生しはじめると再び大振幅の AE 波が発生し最終破断 (14250 sec) に至っている。この結果から材料損傷の過程をある程度掌握することは可能であるが、割れの大きさ等を評価することは不可能である。一方、60dB 増幅した原波形解析のためのモニタリングシステムで得られた典型的波形を Fig. 6 に示す。実験開始直後では Fig. 6 (a) に示したような低周波で低出力の波形が多く観察された。この波形は材料損傷というよりもむしろ、環境からのノイズあるいは水素気泡の崩壊等による波形であると考えられる。一方 1.5 時間程度経過後より Fig. 6 (b), (c) に示すようないくつかのタイプの波が検出されるようになった。ところで Mode I 型のヘビサイ

a) Detected time: 223sec

b) Detected time: 348sec

c) Detected time: 8085sec

Fig. 6 Examples of detected AE waves by S 9208 transducer during hydrogen embrittlement.

ド型クラック発生 ($\Delta Tr \doteq 0$) に対する検出波は Fig. 4(c) に示したが、実際にはある程度速度をもって微小割れが不連続的に伝播し、停止する過程を繰り返すと考えられるので、原波形に立ち上がり時間をもたせたときの検出波をシュミレーションする必要がある。Fig. 7 は ΔTr を $2 \sim 8 \mu\text{sec}$ に低定したときに得られた表面変位を示す。これらの波形のうち Fig. 7 (b) は Fig. 6 (c) に類似していることから、Fig. 6 (c) が Mode I 型割れに対応する AE 波であり、かつ微小割れ伝播はおおよそ $6 \mu\text{sec}$ 程度であったと考えられる。検出波とシュミレーション波は厳密には一致していないが、これは試験片が小さいうへピン穴が存在することなどによる反射波、トランスデューサーの雑音、割れが完全に Mode I 型でないなどの理由が考えられる。しかし、様々な検出波の中から真

Fig. 7 Simulated surface displacement for mode I type crack with various rise time: ΔTr in step-wise crack opening.

Fig. 8 Example of source waves during hydrogen embrittlement of low alloy steel.

に必要な波を選別するには充分利用可能であると思われる。そこで、数千におよぶ検出波の中から雑音波と思われる波を除外し、さらにシュミレーション結果と比較して Mode I 型の波形を選択して原波形解析を行うことにした。

Fig. 8 は対象となった検出波から逆合積によって求めた原波形の一例を示す。原波形の縦軸は割れの発生による解放エネルギー: D (J) である。9004 sec 経過時の原波形 (Fig. 8 (a)) はステップ状の波形が重なった形をしており、これは亀裂が進展と停止を繰り返しながら進行した様子を表していると考えられる。ところが最終破断寸前の原波形 (Fig. 8 (b)) では非常に大きなエネルギーを解放しており、大きな割れが開いた様子がうかがわれる。これらの解放エネルギーにおける一ステップの立ち上がり時間: Δt_n とエネルギー解放量: ΔD_n はそれぞれクラックの進展時間とクラックの開口量に対応すると考えられるので、解放エネルギーの経時変化を調べた結果が Fig. 9 である。実験開始後約 6,500 sec より微小割れの発生・伝播がみられ、12,000 sec あたりを境にして ΔD は突然大きな値を示し破断に至っている。

AE 原波形解析によって得られた ΔD が材料の破壊によって放出された解放エネルギーであるとすれば、線形破壊力学が成立する材料に対してはエネルギー解放率: G を用いて割れ面積: ΔA と次式で相関づけられるものと考えられる。

$$\Delta D = G \cdot \Delta A \quad (12)$$

また G は亀裂先端の小規模降伏を考慮すると次式で与

Fig. 9 Relation between released energy: $\Delta D(J)$ due to the formation of cracks and detected time.

Fig. 10 Relation between rise time: ΔT of source wave and crack opening area: ΔA during hydrogen embrittlement.

えられると言われている¹²⁾。

$$G = \frac{(\lambda + 2\mu)4K^2}{\pi\sigma_y E} \quad (13)$$

ここで、 K : 応力拡大係数、 σ_y : 降伏応力、 E : ヤング率、また、 λ, μ はラーメの定数で、ポアソン比: $\nu (=0.28)$ とヤング率を用いて (14), (15) 式で与えられる。

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (14)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (15)$$

したがって、得られた原波形の ΔD から (12), (13) 式を用いて ΔA を推定することが可能である。本実験では、前述した理由により ASTM E-399-72 を満足する CT 試験片も、また予亀裂試験片も使用していないので、厳密な K 値を求めることはできないが、近似的に K 値を求めると初期 K 値は $134 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ である。なお応力拡大係数の計算式としては次式 (16) を用いた。

$$K_I = \sigma \sqrt{a} \cdot F(a/w) \\ \sigma = P/w$$

$$F(a/w) = 29.6 - 185.5(a/w) + 655.7(a/w)^2 \\ - 1017.0(a/w)^3 + 638.9(a/w)^4 \quad (16)$$

ここで、 w : ピン穴中心と底面間の距離 (25 mm)、 P : 単位厚さあたりの力 (49.6 kgf/mm)、 a : ピン穴中心より切欠き先端までの距離 (15 mm) である。式 (12), (13) を用いて解放エネルギー: ΔD_n から ΔA_n を求め、それらと立ち上がり時間: ΔT_n との関係を図 10 に示す。データは大きく 2 つのグループに分かれており、Fig. 9 の初期段階でみられた ΔD の小さな微視亀裂に対応するデータは立ち上がり時間が 3~8 μsec で、割れ進展面積は 0.01 mm^2 程度である。一方、12000 sec 以降の最終破断付近では、立ち上がり時間は 15 μsec 以上となり割れ進展面積も $0.04 \sim 0.08 \text{ mm}^2$ となっている。仮に亀裂の進展距離を進展面積の 1/2 乗で近似すると、亀裂進展の速度は 10~40 m/s 程度であると推定される。得られ

a)

b)

Fig. 11 Scanning electron microphotographs of fracture surface at early time (a) and final fracture (b).

た情報の妥当性を検証するために走査型電子顕微鏡による破面の観察を行った。Fig. 11 に切欠き部付近と切欠き部から離れた最終破断付近の破面写真を示す。初期亀裂に対応する Fig. 11(a) では粒内割れ破面中に粒界割れが発生しており、粒界割れ部の面積は 0.0016 mm^2 程度であった。初期にみられる粒界割れ部の面積は AE 原波形解析より得られた値と比較的よく一致しており、AE 波は粒界割れによるものと考えられる。ところが、圧延方向と直交方向に負荷するという特殊な負荷条件を用いたため、最終破断付近の断面 Fig. 11(b) では亀裂の進展方向と直交方向に大きな帯状破面が観察されたが、この面積は AE 原波形解析より得られた値よりかなり大きかった。これは AE 原波形解析に使用した応答関数は切欠き先端部の AE 源に対応するものであること、K 値増大型の試験にもかかわらず初期 K 値を用いていること、複数の位置から発生する AE 源には対応できなかったこと、などが原因と思われる。進展した割れの AE 原波形には今後解決すべき問題が多いが、初期割れについては半定量的ながら、割れのマイクロキネティックスに関する情報が得られる可能性を示唆している。

4. 結 言

AE 原波形解析のためのシステムを構築し、このシステムの環境劣化割れへの適用の可否について、低合金鋼の水素脆化割れを採りあげて検討した。

限られた実験条件でのデータであるが、AE 原波形解析手法を用いることによって水素脆化割れの初期段階のマイクロキネティックスに関する情報が得られる可能性があることがわかるとともに、いくつかの問題点も明らかになった。小型の CT 試験片の使用に伴ういくつかの物理上の問題点は克服できるが、内部割れに対するグリーン関数の実験的決定法、とくに離散化データの微分操作に伴う誤差の発生、得られた原波形の一意性（妥当性）については、今後大型試験片を用いた実験により慎重に検討していく必要がある。また、現段階では解析した AE 波と割れ発生位置が不明確であるが、今後多チャンネル化などの方法によって割れ発生位置および方向に関する情報をうることであれば、材料破壊のマイクロキネティックスおよびキネマティックスに関する定量的な情報がもたらされると思われる。

謝 辞

本研究は当時の卒業研究生：浦沢直哉君（現・三菱鉛筆）の熱心な協力によって遂行されたことをここに記し、感謝の意をあらわす。

(Received November 1, 1989)

文 献

- 1) 岸 輝雄：材料科学，**19**, 261 (1983).
- 2) M. Takemoto & Y. Hayashi: *J. Acoustic Emission*, **7** [4] 185 (1988).
- 3) F. R. Breckenridge, C. E. Tschiegg & M. Greenspan: *J. Acoustic Soc. Am.*, **57** [3] 626 (1975).
- 4) N. N. Hsu, J. A. Simmons & S. C. Hardy: *Mat. Eval.*, **35**, 100 (1977).
- 5) M. Ohtsu & K. Ono: *J. Acoustic Emission*, **3** [1], 27 (1984).
- 6) 大津政康：「アコースティック・エミッションの特性と理論」，森北出版 (1988).
- 7) Mooney, H. M.: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **64** [2] 473 (1974).
- 8) Johnson, L. R.: *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **37** (1974).
- 9) Y. Niwa, M. Ohtsu & H. Shiomi: The Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto University, **XLIII** [4] 319 (1981).
- 10) 山川宏二，南野康幸，松本桂一，米沢俊一，吉沢四郎：材料，**29**, 1101 (1980).
- 11) 大平貴規，岸 輝雄：日本金属学会誌，**46**, 518 (1982).
- 12) 岡村弘之：「線形破壊力学入門」，培風館 (1976).