7MHz 帯域 AE 波形シミュレーションとレーザ励起縦波 速度モニタリングによる遅れ破壊の ダイナミクスと前駆過程

竹本 幹男*, 正木 龍士*, 田中 栄吉*

* 青山学院大学理工学部

Dynamics and Precursor of Delayed Fracture Studied by the Waveform Simulation of 7 MHz Acoustic Emission Signals and by the Laser Excited Longitudinal Wave Velocity

Mikio Takemoto*, Ryuji Masaki* and Eikichi Tanaka*

* Faculty of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University

With the aim of studying the precursor and dynamics of delayed fracture of high tension steel, we developed two advanced elastic wave monitoring systems. One is a broad-band digital AE monitoring equipment consisting of a multi-resonant 7 MHz AE sensor, a 10 MHz pre-amplifier and a 200 MHz A/D converter. The overall transfer function was determined as a response to a pulse YAG laser break-down of silicon placed in slit (or crack). The break down was found to simulate the Mode-I fracture with effective source rise time of $0.035 \mu\text{s}$ and successfully utilized to determine the overall transfer function of the system. The waveform simulation of the monitored AE signals revealed the succession of fast and small ($<10 \mu\text{m}$) cleavage cracks with source rise time of $0.07 \mu\text{s}$ to $0.24 \mu\text{s}$ in high hydrostatic stress field. In the 20 MHz laser-ultrasonic system developed, a velocity change of spherical longitudinal (P-) wave was continuously monitored to detect the precursor of delayed fracture. Here, the P-wave was excited by pulse YAG laser so that it propagates through the hydrostatic stress field. The velocity decreased by 100 m/s at 2.8 ks before the first AE signal. The velocity decrease appears to be due to hydrogen induced voids. The method has potential for monitoring the precursor of delayed fracture.

Key words : waveform simulation, acoustic emission, transfer function, break-down, laser ultrasonic, delayed fracture

1. 緒 言

鋼の高強度化に対するニーズは高いが、高強度化に伴い感受性を高める遅れ破壊の発生・伝播のメカニズムについては未解明な点が多い。遅れ破壊の前駆過程としては、拡散性水素によるマイクロボイドの生成と合体、格子脆化、微小割れの発生・合体などが考えられているが、これらを証明する直接的情報を報告した研究は少ない。前駆過程をリアルタイムにモニターする方法としてアコースティック・エミッション (AE) や超音波が考えられる。

AE の逆解析によって環境劣化割れの速度 (キネティックス) を調べる研究^{1)~3)} は 1980 年代にはじめられ、現在では source characterization^{4),5)} や moment tensor 解析^{6),7)} によって破壊のダイナミクス (割れの幾何学的情報 (キネマティックス) とキネティックス) を評価することができる。著者らは、変位センサーを用いて実体波面外変位を、また共振型センサーを用いて縦波放射パターンを測定し、解析的応答関数 (第 2 種グリーン関数) を用いるダイナミクス推定法: source simulation 法^{8)~10)} を開発した。この方法^{11),12)} は初動縦波に適

用できるが、変位センサーの周波数帯域は約 1 MHz 程度で、遅れ破壊に応用した場合 $0.5 \mu\text{s}$ より遅い微小破壊しか計測できないという問題があった¹³⁾。遅れ破壊中には $0.5 \mu\text{s}$ 以下の高速破壊が発生することが予見されるが、このような高速破壊による実体波を検出するためには少なくとも 5 MHz 帯域の AE 装置が必要である。多重共振型 AE センサーを用いれば広帯域をカバーできるが、センサーの応答特性が不明なため媒体と AE 装置を一括した応答関数を実験的に求める必要がある。しかし、広帯域応答関数を求めるための音源は提唱されていない。そこで、スリット (あるいはき裂) 内に注入した液体のパルスレーザ・ブレイクダウンを利用してへき開型破壊を模擬し、一括応答関数を求める方法を開発した。はじめに、ブレイクダウンの物理現象とダイナミクスを明らかにし、次に一括応答関数を用いた波形シミュレーションによって低合金鋼の遅れ破壊中の微小破壊のダイナミクスを推定した。

一方、提唱する方法によって高速微小破壊のダイナミクスは推定できるようになるが、水素ボイド発生などの前駆過程についての情報は得られない。そこでレーザ超音波装置を用いて、高静水圧部を横切るように伝播させた 20 MHz 帯域の縦波を連続的に検出し、縦波速度の時間変動からどのような組織や構造の変化が検出できるかの基礎実験を行った。

* 〒157-8572 東京都世田谷区千歳台 6-16-1 (6-16-1, Chitosedai, Setagaya, Tokyo, 157-8572 Japan)

Fig. 1 Experimental setup for producing artificial Mode-I fracture by laser break-down of silicone oil in slit of CT specimen.

2. 隙間内に充填したシリコンオイルのブレイクダウンによる人工へき開型破壊

Fig. 1 の上図に示したように、スリット（またはき裂）内に注入した液体に点焦点パルス YAG レーザを照射すると、液体のブレイクダウン（ガスまたはプラズマ状態になって瞬間的に膨張）によってき裂壁に等しい大きさの逆向きの力 F (balanced force) を与え、へき開型破壊 (dipole source) を模擬できる。そこで、焼入れ・焼戻し ($850^{\circ}\text{C} \times 3.6 \text{ ks}$, oil quench 後 $550^{\circ}\text{C} \times 2.4 \text{ ks}$ で焼戻し) SCM 440 の CT 試験片に、き裂を模擬した 0.8 mm 幅のスリットを導入し、シリコンオイル（液体であれば水でもかまわないが今回は蒸発しにくいオイルを用いた）を注入し、半値持続時間 5 ns のパルス YAG レーザでブレイクダウンさせた。試験片寸法は後述する Fig. 5 に示したが、負荷用のピン孔と電解槽をもつ $24.5 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ の CT 試験片である。

Fig. 1 下図のように、レーザはスリット導入方向（図の Y 方向）から照射する方法（Type-A）と側面（ Z 方向）から照射する方法（Type-B）を用いたが、Type-A は板幅中央のへき開破壊を、Type-B ではレーザ焦点が表面から 1 mm になるように照射して側壁近傍の破壊を模擬する。

ブレイクダウンによる負荷方向の面外変位 $U_x(x, t)$ をヘテロダイン型レーザ干渉計（BM インダストリー, SH 100, 帯域 20 MHz ）で計測するとともに、多重共振型センサー¹⁴⁾（以後 AE 6-1, 共振周波数の異なる PZT 素子を集合させて広帯域を持たせたセンサー）で AE を検出した。また、試験片側面の半径 30 mm の円

Fig. 2 Amplitude distribution of the P-waves produced by laser break-down of silicone oil in the slit.

周上に取りつけた 6 個の共振型小型 AE センサー（PAC 社, Type PICO）で縦波放射パターンを測定した。干渉計の出力は、高速ディジタイザ A（テクトロニクス RTD 720, サンプル時間 4 ns , 4098 点, 振幅分解能 8 bit ）でデジタルデータとした。また、AE センサー出力は 10 MHz プリアンプで 40 dB 増幅後、ディジタイザ B（オートニクス APC 510, サンプル時間 50 ns , 振幅分解能 10 bit ）でデジタルデータにした後、ワークステーションで解析した。

レーザエネルギーは $26 \sim 66 \text{ mJ}$ まで変化させたが、Fig. 2 には、 49 mJ での最大振幅（バーガースベクトル方向で X 方向）を 1.0 としたときの Type-A スリットでの縦波振幅分布を示す。レーザエネルギーが大きくなると振幅は増加するが、その分布はへき開型破壊による解析的振幅分布⁹⁾（破線で示した分布で $C_1(C_2 + \cos^2 \theta)$, C_1 と C_2 は定数）と良く一致しており、へき開型破壊が模擬できている。Fig. 3(a) には干渉計による面外変位を示す。インパルス初動縦波 (P_1) を正確に捕えている。この面外変位に対し、媒体の第 2 種グリーン関数 $T_{xx}(x, t; x', t')$ を用いた波形シミュレーションを行って音源の物理量を調べた。すなわち、(1) 式によって縦波面外変位 $U_x(x, t)$ を計算し、検出縦波変位と一致するようにき裂体積の時間変化 $Ab_x(x', t')$ を求めた。

$$U_x(x, t) = Ab_x(x', t') * T_{xx}(x, t; x', t') \quad (1)$$

なお、記号 $*$ は畳込み積分を意味し、 A はき裂面積、 b_x はき裂開口変位である。Fig. 3 の波 (b) は、(c) に示した実効立ち上がり時間 $\Delta Tr^* = 0.035 \mu\text{s}$, 体積 $\Delta V = 8.5 \times 10^{-14} \text{ m}^3$ のパルス状原波形に対して計算した面外変位で、検出波 (a) に見られる $5.3 \mu\text{s}$ の P_1 -波、 $9.4 \mu\text{s}$ の S-波と一致している。なお、原波形の初動立ち上がりは、 $\sin^4(\pi t / \Delta Tr)$ ランプ関数で近似しているので、 $0.1 \mu\text{s}$ の立ち上がり時間 ΔTr に対する実効立ち上がり時間 ΔTr^* （初動波振幅の 10% から 90% までの時間）は $0.035 \mu\text{s}$ になる⁹⁾。初動縦波部分を拡大して比較したものを (d) に示す。計算 P 波の初動は検出波と一致しているが、初動波ピークの $0.05 \mu\text{s}$ 後には別のピークが観察されている。この波は、スリット幅が小さかったため、レーザがスリット壁にあたって断熱膨脹を起こしたことによる波と考えられる。このため、(a) に見られるように計算では見られないはずのいくつかのピークが観察されている。この問題は、短焦点レンズを用いてレーザ径を絞れば解決できるし、また、実際の波形シミュレ

Fig. 3 Procedure for estimating the source wave(c) of break-down of silicone oil in the slit by the waveform simulation (b, d) to detected out-of-plane displacement (a).

Fig. 4 Waveform (a, b) and over-all transfer function (c, d) obtained using the break-down of silicone oil in Type A and B slit.

ーションは初動縦波について行うので大きな問題にはならない。ブレイクダウンの原波形は、これまで提唱されている最も早い人工音源、たとえば $0.5\text{ mm}\phi$ のガラスキャピラリーの圧壊¹⁵⁾ ($\Delta Tr = 0.54\text{ }\mu\text{s}$) では再現できない高速破壊を模擬できる。Type-A, -B スリットに対するレーザエネルギーと立ち上がり時間 ΔTr^* の関係を調べたが、 ΔTr^* はレーザエネルギーには無関係で $0.035\text{ }\mu\text{s}$ と一定であった。一方、体積はレーザエネルギーとともに直線的に増加した。

ブレイクダウンの面積 A を調べるため、金を真空蒸着したスリット内でブレイクダウンを行い破損膜の形状を調べた。その結果、破損膜の幅はほぼ 0.38 mm で、

長さは 1.1 mm であった。面積は $4.2 \times 10^{-7}\text{ m}^2$ となるので、き裂体積 $8.5 \times 10^{-14}\text{ m}^3$ から逆算される b_x は約 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ となる。なお、レーザエネルギーを変化させても面積の変化は極めてわずかであった。すなわち、同じレーザ装置を使うかぎり A は一定となるので、模擬き裂の体積は開口変位量 b_x に比例することになる。 b_x は材料の衝撃応答に対応するので、材料の弾性特性に影響される。

次に、媒体と AE 計測装置 (AE 6-1 センサーとプリアンプ) を一括した応答関数を求めた。Fig. 4 の (a), (b) は、それぞれ Type-A と -B スリット内のブレイクダウンによる AE 波で、干渉計の出力 (Fig. 3(a)) と

Fig. 5 Experimental setup for monitoring 7 MHz AE and laser-excited P-wave velocity.

比べると、センサーの応答関数のためポラリティーが逆になっているほか、波形もかなり複雑になっている。また、Type-B スリットでは試験片側壁からの反射波が入ってくるため、Type-A に比べて波形は複雑になっている。これらの波をブレイクダウンの原波形 (Fig. 3(c)) で逆畳込み積分して一括応答関数(c)と(d)を得た。応答関数は、時間領域でも周波数領域の逆畳込み積分でも求まり、媒体とAEセンサーの応答特性を反映したものになっており、7 MHz 帯域を有している。なお、応答関数は音源位置によって変わるため、遅れ破壊実験を中断した開口き裂内にレーザを照射して逐一求める必要がある。

3. コンパクトテンション型試験片の遅れ破壊のダイナミクス

3.1 実験装置

試験法を Fig. 5 に示す。ノッチ部には電解チャージで水素を供給するため、幅 10 mm、深さ 25 mm の電解槽を設け、その先に幅 0.8 mm、深さ 17.5 mm のスリットを導入した。試験片両サイドには、0.5 mm 厚さの亚克力板をスリット先端までシリコンゴムで接着し、電解液 (1 N H_3BO_3 + 0.033 M KCl + 0.02 M チオ尿素) を注入し、5 A/m² で水素チャージした。座標原点をノッチ先端、板厚中心とし、負荷方向を X、板厚方向を Z とする。#10 の AE 6-1 センサーと #9 の変位センサー (PAC, S 9208) を負荷軸と直交する面に設置し AE を検出した。この位置はへき開型破壊による最も大きな縦波が検出できる位置である。これらのセンサー出力は、前節で使用したプリアンプと 2 チャンネルディジタイザーで離散化データとした。また、8 個の PICO センサー (#1-8、それらの座標は Fig. 6 の波形に示した) によって縦波を検出し、音源位置評定とモーメントテンソル解析を行った。PICO センサーの出力は 40 dB 増幅した後、8 チャンネルディジタイザーで離散化データと

したが、離散化条件は同じ (50 ns × 1024 points) である。8 チャンネルディジタイザーを改造して、#1-10 のセンサーはすべて同期できるようにした。

また、微小破壊発生の前駆過程がレーザ縦波の速度変化として測れるかを検討するため、レーザ超音波システムを用いてノッチ先端から 1 mm の部分を横切るように (Z 方向に) 縦波を発生・検出した。すなわち、試験片側面に塗布したシリコンオイルのレーザブレイクダウン (この場合は mono-pole force で実効立ち上がり時間は 0.03 μs) によって球面波を発生させ、震央応答をヘテロダイン干渉計で測定した。レーザ干渉計は、パルス YAG レーザと同期させ、その出力は高速ディジタイザー (テクトロニクス RTD 720) を用いてサンプリングインターバル: 5 ns、サンプリング点数: 4096 点、振幅分解能: 8 bit でデジタルデータとした。レーザ超音波では高精度の光軸調整が必要であるため、小型油圧負荷装置を試作して 17.64 kN の定負荷をあたえ、負荷装置全体を 3 軸微動調整用ステージ (自作) に設置して調整した。ブレイクダウンによって発生した弾性波はすべての AE センサーが検出するので、遅れ破壊による AE が検出されるようになるとレーザ照射間隔を長くし、AE モニタリングを優先させた。

3.2 実験的応答関数を用いた逆解析による遅れ破壊のダイナミクス

遅れ破壊負荷開始 168.308 ks (46.75 時間) 後に最初の AE が検出され、実験終了 (178 ks) までほぼ連続的に 92 個の AE を検出した。Fig. 6 には、一例として AE データカウント (以後 D. C.) 3 の検出波 (168.378 ks で検出) を示す。上段の 8 つの波が PICO センサーによる検出波で、縦波のポラリティーはすべて負でへき開型破壊を意味している。モーメントテンソル解析⁹⁾ による shear ratio (SR, せん断破壊成分の寄与率で 45% 以下はへき開型破壊¹⁵⁾) を調べた結果、12% でへき開型破壊であった。この波の音源は、座標 (X, Y, Z) が

Fig. 6 Waveforms detected by PICO, AE 6-1 and S 9208 sensors during delayed fracture of SCM 440.

(0.6, 1.0, -7.5) mmで, Fig. 7に示す試験片左側のノッチ先端から1mm離れた高静水圧部で発生している。図の左下に示したAE6-1センサーの波形には, $5.0 \mu s$ に縦波, $9 \mu s$ に横波が見られる。7 μs に見られるピークは反射縦波である。一方, 右のS 9208センサー波形には, $\Delta Tr^* = 0.2 \mu s$ のへき開破壊に対する計算面外変位 (simulated) も示したが, センサー帯域が狭いため初動縦波変位が正しく検出されていない。破壊のダイナミクスは, 初動縦波について行うので, 狭帯域センサー

を使う方法では限界があることを示している。

Fig. 7には音源位置の経時変化を示す。最初のAE群は右の図にグループ1として示すように, 静水圧場 (ノッチ先端から約1mm程度離れた場所) で発生した後, グループ2→3→4の順, すなわち, 反時計周りに+Z方向にまわり込むように進展している。Y=1mmの破線はレーザ縦波の最短伝播経路を示す。微小破壊は縦波伝播経路を避けるように伝播している。AE源は, グループ1, 2, 3, 4に分けたように, かなり広い (離れた) 領

域から発生している。すなわち、1個の微小破壊が断続的に成長していく過程を捕らえているのではなく、色々な場所で発生する微小破壊のAEを検出している。

モーメントテンサー解析の結果、168~171 ks間に検出された48個のAEのSRは35%以下でへき開型割れであるが、172~173 ksで検出されたAEではSRが50%を超えるものもあった。後者のAEは、き裂先端の回り込み(グループ2,3に対応)に伴ってせん断力が大きくなって発生したものと考えられ、原波形解析からはずした。すなわち、レーザブレイクダウンはへき開型破壊を模擬するので、混合モード破壊に対する応答関数は求まらないからである。

試験終了後もノッチ先端は開口していなかったため、薄い砥石を用いて切込みを入れたのち、シリコンオイルを注入し、ブレイクダウンを利用して一括応答関数を求めた。切込み深さは、Fig. 7に示したAEグループ1の平均深さとした。縦波変位のシミュレーションでは、レーザ照射位置がAE音源位置より2 mm離れても、3%程度変化するのみであるので、グループ1の中央付近でブレイクダウンを起こさせれば波形シミュレーションには大きな誤差は与えないと考えられる。

Fig. 8にはD.C. 5と15の検出波とシミュレーション波形を示した。初動縦波の立ち上がり時間と振幅値が、検出波のそれらと一致するように原波形を求めた。

Fig. 8にはD.C. 5と15の検出波とシミュレーション波形を示した。初動縦波の立ち上がり時間と振幅値が、検出波のそれらと一致するように原波形を求めた。

D.C. 5の ΔTr^* は $0.1 \mu s$ 、15のそれは $0.07 \mu s$ と推定された。Fig. 9は、推定したき裂体積 ΔV と ΔTr^* の関係を示すが、 ΔTr^* は 0.07 から $0.25 \mu s$ である。き裂体積は、 $0.5 \times 10^{-15} m^3$ から $7.7 \times 10^{-15} m^3$ の範囲に推定された。同図には、変位センサーを用いた前報⁹⁾の実験で解析された領域をシャドウで示すが、これまでの実験では比較的大きなき裂、すなわち体積 $2 \times 10^{-15} m^3$ から $10^{-14} m^3$ (き裂大きさは $40 \sim 150 \mu m$)を検出していた。なお、前報では ΔTr を使用していたので ΔTr^* に直して表示した。微小割れはノッチ先端から離れた場所で分離して発生しているため、 b_x が計算出来ず割れ大きさ A を推定することが難しいが、前報⁹⁾の $b_x = 2 \mu m$ を使用して計算すると、多くの割れ大きさは $10 \mu m$ 以下である。この大きさは旧オーステナイト粒径よりも小さく、これまで検出できなかった微小な破壊を検出できたといえる。なお、図中に示した2本の直線は、 $b_x = 2 \mu m$ として計算される円状割れ直径から推定した破壊速

Fig. 7 Change of AE source location of delayed fracture with time.

Fig. 8 Comparison of detected and simulated waveform during delayed fracture of SCM 440.

度で、 $180 m/s$ から $550 m/s$ の範囲にある。前報の結果が2本の直線(速度 182 から $558 m/s$)の範囲に入っていることは、小さな割れの生成速度も大きな割れのそれ

Fig. 9 Crack volume and effective source rise time during delayed fracture.

もほぼ同じ範囲にあることを示している。

3.3 レーザ縦波速度の経時変化による遅れ破壊の前駆過程

Fig. 10 にはレーザ干渉計で検出した震央応答の経時変化を示す。時間 0 ks は YAG レーザ発信時間と一致しており、検出波形はインパルス力に対する解析的震央変位と良く一致している。P₃ は対面での反射縦波、S と P₃ の間にみられる波はノッチ先端で反射された縦波である。なお、163.88 ks までの波形は極めてよく類似し time-of-flight 法（伝播距離を初動縦波のゼロクロス到達時間で除す方法）で求めた速度は 5975 ± 11 m/s で、速度誤差は 0.2% 以下である。最初の AE は 168.3 ks で検出されたが、その 2.8 ks 前すなわち時間 165.6 ks には初動縦波の到達時間が $0.07 \mu\text{s}$ （デジタルデータでは 17 ポイント）遅れ、振幅は減少し、分散性の波形（長時間側に尾を引く波形）に変化している。また、S と P₃ の間に新しい波が見られ、P₃ 波が不明になっている。

Fig. 11(a) に示したように、縦波速度は AE 発生の直前に 100 m/s 低下し、AE 発生中にも低い速度を示した。

この試験片では、Fig. 7 に示したように、き裂はレーザ縦波伝播経路を避けるように伝播したため、最初の AE が検出されるわずか 2.8 ks 前で速度変化が見られたが、き裂先端が直線的に進展した別の CT 試験片（厚さ 13.8 mm）では、Fig. 11(b) に示すように最初の AE が検出される 25.3 ks（7.02 時間）も前に速度が減少した。

この場合も、速度の低下は 100 m/s 程度であったが、AE が検出されなくなると（音源がグループをつくって移動する場合に観察される¹⁰⁾）、速度は 5950 m/s まで回復する。速度の可逆変化が、水素を吸蔵しつつある試験片のノッチ先端で起こるのかなど未解明な点も多い。

レーザ縦波の速度変化が、材料のどのような構造変化によるものかは明らかになっていない。縦波速度は $\sqrt{\frac{(1-\nu)}{E\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$ で与えられるので、空孔による散乱がなければ、ポアソン比 ν 、ヤング率 E 、密度 ρ に

Fig. 10 Change of pulse laser excited longitudinal wave with test time during hydrogen charging to loaded SCM 440.

よって変化する。水素吸蔵によって格子脆化が起こるならば、 ν は減少すると考えられる。 ν が 0.3 から 0.29 に変化する、 $\sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$ は 1.9% 減少し、113 m/s の縦波速度の低下をもたらす。この仮定は測定された速度低下を説明できるが、水素吸蔵によって密度も低下し、 E も変化する（増大するか減少するかは不明）であろうから、ポアソン比だけで論じられるものでもない。水素吸蔵による 3 つの物性 (E , ρ , ν) 変化を独立して 2% 程度の精度で測定することはひずみゲージ法ではほとんど不可能である。一方、拡散性水素によって発生したポイドに起因しているなら、前駆過程を非破壊的に捕えられる可能性がある。しかし、高静水圧で生成した水素ポイドがどのような過程を経て、AE 発生を伴うへき開型高速割れに至るのか、不明な点は多い。今回用いたレーザシステムの周波数は 20 MHz で縦波の波長は $300 \mu\text{m}$ 程度である。今後、40 MHz 帯域レーザ超音

Fig. 11 Change of laser P-wave velocity in high hydrostatic stress field of 24.5 mm thick (a) and 13.83 mm thick (b) CT specimens.

波システムを用いて、水素を吸蔵する鋼の縦波速度と減衰について詳細に検討し、いわゆる前駆過程のメカニズムを明らかにして行く予定である。

4. 結 論

遅れ破壊のダイナミクスと前駆過程を調べる目的で、7 MHz 帯域の AE 原波形解析システムと 20 MHz レーザ超音波システムを開発した。得られた結果は以下のよう要約される。

(1) 多重共振型 AE センサーを用いる 7 MHz 帯域デジタル AE 装置を構築した。隙間内に充填したシリコンオイルのパルス・レーザブレイクダウンで発信した縦波をレーザ干渉計で計測した結果、バーガースペクトルがき裂壁法線方向のへき開型破壊（人工破壊源）を模擬できることがわかった。人工破壊源の体積はレーザエネルギーによって変化するが、生成時間はエネルギーには無関係で $0.035 \mu\text{s}$ である。この音源を用いれば、媒体と AE 測定装置を一括した 10 MHz 帯域の応答関数が求まり、高速破壊の AE 原波形解析を可能にする。

(2) 低合金鋼 CT 試験片の遅れ破壊中に検出される AE の音源位置評定とモーメントテンソル解析、実験的応答関数を用いる原波形解析を行った。最初の微小破壊はノッチ先端の高静水圧応力場で発生した。モーメント

テンソル解析でへき開型破壊と同定された微小破壊について、波形シミュレーションを行った結果、体積 $7.7 \times 10^{-15} \text{ m}^3$ 以下の微小破壊が $0.07 \sim 0.2 \mu\text{s}$ で発生していることが分かった。広帯域 AE システムで解析できた破壊面積は、市販変位センサーで解析できたその $1/2$ 程度であった。すなわち、 $10 \mu\text{m}$ の大きさの高速破壊の検出を可能にした。

(3) 20 MHz 帯域レーザ超音波システムを用いて、ノッチ先端の高静水圧場を横切るように伝播させた縦波速度 (5975 m/s) は、最初の AE が検出される 2.8 ks 前に 100 m/s 低下した。一方、縦波伝播経路を広範囲に横切るように割れが発生した別種試験片では、最初の AE 発生 25.3 ks 前に縦波速度が 100 m/s 減少した。速度減少の原因は必ずしも明らかではないが、遅れ破壊をおこす低合金鋼に固有の現象で、遅れ破壊の前駆過程を調べられる可能性がある。

謝 辞

本研究は、文部省科学研究費（課題番号 11450278）、熊谷研究財団および新日本製鐵（株）からの研究助成金によってなされた。また、多重共振型センサー AE 6-1 は山形大学 富川義朗教授に提供していただいた。ここに記して謝意を表する。試験装置の作製に協力した往年の大学院生、小川真吾、田村宙治、元助手鈴木裕晶（現、千代田化工建設（株））、長英雄（現、東北大学助手）、（有）新和精工社長小川豊氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) H. N. G. Wadly, C. B. Scruby and G. Shimpson : *Acta Metallurgica*, 29, 399 (1980).
- 2) T. Ohira and Y. Pao : *Metallurgical Trans.*, 17A, 843 (1986).
- 3) T. Ohira and Y. Pao : *Metallurgical Trans.*, 20, 1105 (1989).
- 4) 岸 輝雄, 大野一生, 栗林一彦 : 非破壊検査, 30, 911 (1981).
- 5) 大平貴規, 岸 輝雄 : 日本金属学会誌, 46, 518 (1982).
- 6) 大津政康 : 材料, 32, 577 (1983).
- 7) M. Ohtsu : *Materials Evaluation*, 45, 1070 (1987).
- 8) M. Ohtsu and K. Ono : *J. Acoustic Emission*, 3, 27 (1984).
- 9) 竹本 誠, 林 泰久, 竹本幹男 (M. Takemoto, Y. Hayashi and M. Takemoto) : 材料と環境 [*Zairyo-to-Kankyo (Corros. Eng.)*], 43, 637 (1994), および非破壊検査, 43, 637 (1994).
- 10) H. Suzuki, M. Takemoto and K. Ono : *J. Acoustic Emission*, 14, 35 (1996).
- 11) 田村宙治, 竹本幹男 : 鉄と鋼, 83, 532 (1997).
- 12) 田村宙治, 竹本幹男 (O. Tamura and M. Takemoto) : 材料と環境 [*Zairyo-to-Kankyo, (Corros. Eng.)*], 46, 256 (1997).
- 13) 田村宙治, 竹本幹男 : 鉄と鋼, 83, 255 (1998).
- 14) 富川義朗, 柳橋 実, 稲葉秀弘 : 非破壊検査, 37, 196 (1988).
- 15) N. N. Hsu, J. A. Simons and S. C. Scruby : *Mat. Eval.*, 45, 100 (1977).
- 16) Y. Hayashi, M. Takemoto and M. Takemoto : *CORROSION '94*, Paper No. 220 (1994).

(Manuscript received September 3, 1999 ; in final form November 16, 1999)