

# アコースティックエミッションの定量解析による マルエージング鋼の遅れ破壊のダイナミクス

田村 宙治\*・竹本 幹男\*<sup>2</sup>

Delayed Fracture Dynamics of Maraging Steel by Quantitative Analysis of Acoustic Emission

Okiharū TAMURA and Mikio TAKEMOTO

**Synopsis :** Microfracture dynamics in the delayed fracture of a maraging steel was investigated using multi-channel AE monitoring and advanced signal processing system. Source location and moment tensor analysis of 7 channel monitoring system were utilized to determine both the fracture mode and theoretical transfer function of the specimen. Source wave was estimated by iteration of the out-of-plane displacement so as to best represent the corresponding measured displacement. Delayed fracture of maraging steel was found to be dominated by Mode-I cracks of 10 to 30  $\mu\text{m}$  in size. These cracks generated within 1 to 3  $\mu\text{sec}$ .

**Key words :** delayed fracture ; maraging steel ; acoustic emission ; source wave ; fracture dynamics.

## 1. 緒言

遅れ破壊をAE(Acoustic Emission)でモニタリングする試みは新しいことではない。しかし、多くのAEモニタリング<sup>1,2)</sup>は、応答特性の不明な計測システムを用いており、割れ発生時間の検出や進展具合を調べることを目的としてきた。計測システムで歪められた検出波の解析から破壊のダイナミクス(破壊モードと速度)に関する情報を得ることは不可能に近く、AEを用いて破壊挙動を定量評価するには限界があるとも言われてきた。

一方、Wadley<sup>3)</sup>や大平ら<sup>4,5)</sup>は、1970年代にAE信号の定量的な解析を行い、低温脆性破壊や遅れ破壊のダイナミクスに関する情報が得られることを示したが、この種の信号処理がその後遅れ破壊の研究に使われた例を見ない。微小破壊のダイナミクスに関する情報は、遅れ破壊のメカニズムを解明するために極めて重要である。

著者らは、弾性波が誘起する面外変位を計測できる新しいAEモニタリングシステムを構築<sup>6-10)</sup>し、媒体の解析的応答関数(第2種グリーン関数)を用いた逆問題に対する順解析によって原波形、すなわち微小亀裂の生成速度と大きさ(破壊のキネマティクス)が求められることを報告した。有限試験片ではノッチや側壁からの反射が観察されるが、遅れ破壊における微小破壊はノッチ先端から離れた最大静水圧部で発生することから、比較的大きなコンパクトテンション型(CT)試験片を用いれば、縦波の解析から原波形を推定できる。解析的応答関数を用いる原波形解析では、混

合モード破壊のダイナミクスの解析も可能であるが、破壊のキネマティクス(亀裂面の法線方向ベクトルと開口ベクトル)に関する情報が必要である。大津ら<sup>11-15)</sup>は、モーメントテンソル解析によって破壊のキネマティクスを決定する方法を提唱した。この考え方を取り入れ、1チャンネルの面外変位計測システムと7チャンネルのテンソル解析用AEシステムを構築した。このシステムを用いれば、いつ、どこで(破壊発生場所)、どのような破壊がどのくらいの速度で生成したかを推測することができ、破壊のメカニズムを議論する上で有用である。構築したシステムを用いて、マルエージング鋼の遅れ破壊の定量的AE解析を行い、破壊の前駆段階でおこる微小破壊のダイナミクスを解析した。本報では解析的応答関数を用いた原波形解析を、続報では実験的応答関数を用いた小型試験片のAE原波形解析結果を報告する。微小破壊のダイナミクスから遅れ破壊を考えた場合、メカニズムとして説明されなければならない点を指摘する。

## 2. AE原波形解析とモーメントテンソル解析

AE原波形解析とモーメントテンソル解析については既に報告<sup>7,8)</sup>したので、ここでは概要のみを述べる。

材料内部の点 $x'$ 、時間 $t'$ で発生した微小破壊によって放出される弾性波が外部境界上の点 $x$ 、時間 $t$ に励起する $xi$ 方向の変位 $U_i(x, t)$ は、半無限均質等方媒体では(1)式で与えられる。

平成9年1月29日受付 平成9年4月11日受理 (Received on Jan. 29, 1997; Accepted on Apr. 11, 1997)

\* 青山学院大学大学院生 (Graduate Student, Aoyama Gakuin University)

\* 2 青山学院大学理工学部 (Faculty of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University, 6-16-1 Chitose-dai Setagaya-ku Tokyo 157)

$$U_i(x, t) = T_{ik}(x, t; x', t') * Ab_k(x', t') \quad \dots\dots\dots (1)$$

記号\*は時間に関する畳込み積分である。T<sub>ik</sub>は媒体の応答関数で、音源と検出点の位置(x', x)、媒体の縦波と横波速度(または縦、横弾性率と密度)、破壊モードがわかれば解析的に計算できる。また、Aは亀裂の面積、b<sub>k</sub>は開口変位で、時間関数Ab<sub>k</sub>(x', t')は亀裂体積の生成速度(原波形)を与える。遅れ破壊における微小亀裂は、時間的、空間的に分離して生成すると考えられるので、原波形は(2)式のステップ関数で近似する。

$$\frac{dAb_k(x', t')}{dt'} = V_0 \sin^4 \frac{\pi t}{\Delta Tr} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ΔTr(立上がり時間という)は亀裂の生成速度をあらわし、V<sub>0</sub>は亀裂体積に相当する定数である。

媒体の応答関数を計算するためには、どこで、どんなモードの破壊が発生したかを知る必要があり、多くのセンサーへの縦波の到達時間とその振幅から音源位置評定とテンソル解析が必要となる。モーメントテンソルは次の様にして求める。

(1)式の右辺は(3)式のように書き換えられる。

$$T_{ij} * Ab_j = G_{ip,q} * m_{pq} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、G<sub>ip,q</sub>は、第1種グリーン関数G<sub>ip</sub>のx<sub>q</sub>方向の空間微分を意味し、

$$m_{pq} = \lambda b_k n_k \delta_{pq} + \mu b_p n_q + \mu b_p n_p \quad \dots\dots\dots (4)$$

である。また、δはクロネッカーのデルターである。m<sub>pq</sub>は亀裂体積と弾性率の積に相当し、モーメントの次元を持つことからモーメントと、また2階のテンソルであることからテンソル解析という。テンソルは3×3の対称行列であるから、6個以上のセンサーによる縦波解析から亀裂面の法線方向n<sub>i</sub>(3個の未知数)と開口方向b<sub>k</sub>(3個の未知数)を決定する必要があり、固有値解析によって主値及び主方向を求める<sup>9)</sup>。固有値e<sub>i</sub>(i=1, 2, 3)は、媒体のポアソン比をνとすれば(5)式となる。

$$\begin{aligned} e_1 &= \mu b \left\{ \frac{l_k n_k}{(1-2\nu)+1} \right\} \\ e_2 &= \frac{2\mu b \nu \cdot l_k n_k}{(1-2\nu)} \quad \dots\dots\dots (5) \\ e_3 &= \mu b \left\{ \frac{l_k n_k}{(1-2\nu)-1} \right\} \end{aligned}$$

ここで、e<sub>1</sub> > e<sub>2</sub> > e<sub>3</sub>で、それぞれ最大、中間、最小固有値である。また、l<sub>k</sub>は運動ベクトルで開口ベクトルb<sub>j</sub>の方向成分を表し、開口量をbとしたときb<sub>j</sub> = bl<sub>k</sub>とする。今、負荷軸方向をxとし、この軸に対して傾いた亀裂が混合モードで発生した時の角度をFig. 1のように定義する。角度ξは、l<sub>k</sub>と亀裂面の法線方向ベクトルn<sub>k</sub>のなす角度で、(6)式で与えられる。

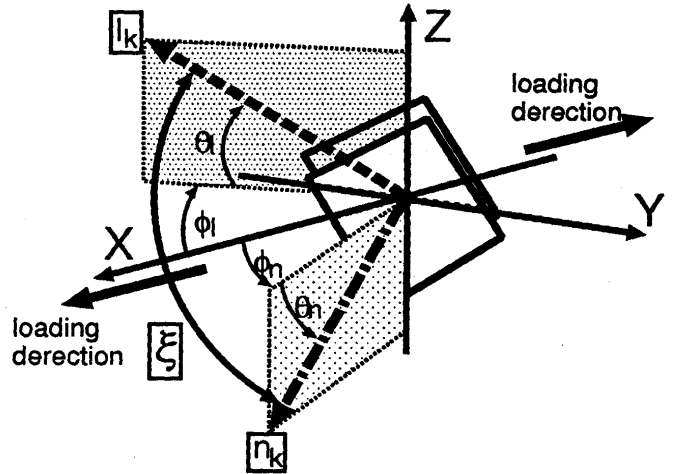


Fig. 1. Schematic presentation of crack normal n<sub>k</sub> (φ<sub>n</sub> θ<sub>n</sub>) and displacement discontinuity b<sub>k</sub> (φ<sub>n</sub> θ<sub>n</sub>).

$$\xi = \cos^{-1} \left( \frac{e_1 + e_2 + e_3}{e_1 - e_3} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

引張り破壊(Mode-I)ではξ=0°、せん断破壊(Mode-II)ではξ=90°である。また、最大固有ベクトルp(=l<sub>k</sub>+n<sub>k</sub>)はl<sub>k</sub>とn<sub>k</sub>の合成方向、最小固有ベクトルr(=l<sub>k</sub>-n<sub>k</sub>)はl<sub>k</sub>とn<sub>k</sub>を含む面内で最大固有ベクトルと直交する方向、中間固有ベクトルq(=l<sub>k</sub>×n<sub>k</sub>)は、l<sub>k</sub>とn<sub>k</sub>に互いに直交する方向であるから、(7)式となる。

$$\begin{aligned} Pl_k &= \cos\left(\frac{\xi}{2}\right), \quad Pn_k = \cos\left(\frac{\xi}{2}\right) \\ ql_k &= 0, \quad qn_k = 0 \quad \dots\dots\dots (7) \\ rl_k &= \cos\left(\frac{\pi-\xi}{2}\right), \quad rn_k = \cos\left(\frac{\pi-\xi}{2}\right) \end{aligned}$$

破壊モードは3次元(角度として4個が必要)になってややわかりにくいのでここではグラフィック表示する。

また、破壊モードは、せん断型破壊の寄与率をSR(Shear Ratio)、引張り型破壊のそれをTR(Tensile Ratio)とすると、SR+TR=1.0となり、SRとTRはe<sub>i</sub>を用いて(8)の様に表示される<sup>15)</sup>。この表示は、破壊モードを知る上で便利であるのでこの報告でも用いる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\nu}{1-\nu}\right) \cdot TR \frac{e_2}{e_1} \\ \left(\frac{\nu}{1-\nu}\right) \cdot TR - SR \frac{e_3}{e_1} \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

### 3. マルエージング鋼CT試験片を用いた遅れ破壊のダイナミックス

#### 3・1 試験片及び実験方法

試験片はマルエージング鋼(組成はTable 1に示す)で、

Table 1. Composition of maraging steel (mass%).

C	Si	Mn	P	S	Cu	N
0.003	0.07	0.02	0.002	<0.001	<0.01	17.22
Cr	Mb	Co	Al	Ti	N	
0.01	3.76	12.16	0.17	1.65	0.002	

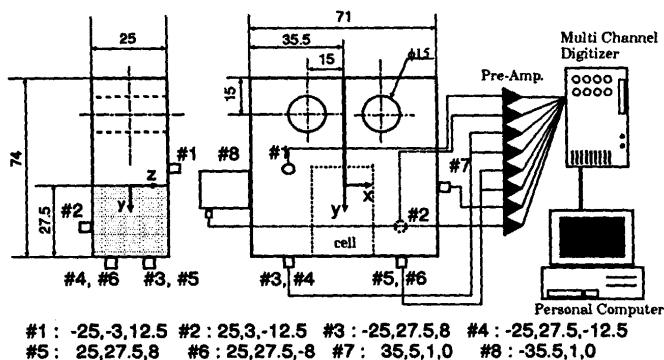


Fig. 2. Compact tension (CT) specimen and AE sensor layout.

Fig. 2 に示すようなCT型試験片に成形後、1088K×3.6ksの溶体化処理、773K×10.8ksの時効処理を行った。この材料の引張強さは2300MPaである。1個の変位計測型センサー(#8チャンネル:ダネガン社製,S9208)と7個の小型センサー(#1~#7:ダネガン社製,ピコセンサー,アパーチャー径3mm)を装着した。センサー出力は広帯域前置増幅器(NF回路ブロック:9913)で40dB増幅された後、8チャンネル高速A/Dコンバーター(サンプリング時間50ns,分解能10bit)でデジタルデータに変換され、エンジニアリングワークステーションで解析した。変位計測型センサーの較正は、surface impulse deconvolution法<sup>16)</sup>で行ったが、感度は $9.23 \times 10^{-9}$ V/mであった。また、小型センサーの較正は特殊な治具を用いて試験片に装着した後<sup>8)</sup>,パルスYAGレーザー(レーザーアブレーションによる衝撃力)を用いて行った。

試験片スリット側面にはアクリル製の小型セルを軟質シリコンゴムで接着し、電解液(1NH<sub>3</sub>BO<sub>4</sub>+0.033MKCL+0.02Mthiourea)<sup>17)</sup>を注入した。デカルト座標は、負荷方向をx,亀裂進展方向をy,板厚方向をzとし、その原点はノッチ先端試験片厚さの中央とした。電解液は、y=±25mmの範囲に注入し、水素はノッチ側面と先端から浸入できるようにした。負荷前3時間は2mA/cm<sup>2</sup>の電流密度で水素チャージし、電流密度を1mA/cm<sup>2</sup>に変更して0.01mm/minの定クロスヘッド速度の引張試験を行った。その後の負荷と水素チャージ条件は、AE信号の発生状況によって変動させた。

3.2 実験結果と考察

Fig. 3 は、試験時間と水素チャージ電流密度、負荷条件を示す。図中の▲は、前述の信号処理によって亀裂の発生に

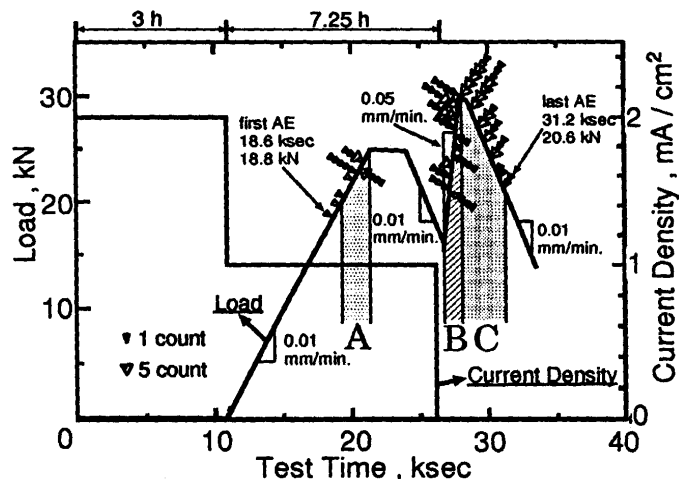


Fig. 3. Change of loading and hydrogen charging with time. Triangles near the load history indicate AE timing.

によって誘起された信号と判定したものだけに限って、その発生タイミングを示したものである。最初のAEは実験開始後18.6ks,荷重18.8kNで検出され、荷重25kN間まで連続して検出された。この期間を期間Aと言う。しかし、荷重を25kN一定に保持した時にはAEは検出されなかった。定荷重に保持した後15kNまで減少させたが、この期間中にもAEは検出されなかった。ここで、水素チャージをやめて0.05mm/minのクロスヘッド速度で荷重を増加したが(この期間をBとする)多くのAEが検出された。30kNまで負荷したのち再び荷重を減少させたが、期間Aで最初にAEが検出された時の荷重(18.8kN)よりやや大きい荷重ではAEが検出されたが(この期間をCとする)、それ以下の荷重ではAEは検出されなかった。位置評定ができたAEの総数は157個であったが、変位計測型センサーのオーバーシュートなどで解析できなかったものを除くと、118個のAE原波形解析が行えた。なお、後述するようにマルエージ鋼の水素脆性破壊では、亀裂体積(したがってAE振幅)はかなり小さく、位置評定も行えなかったAEが約50個もあった。

Fig. 4 には、音源位置の時間変化を期間A, B, Cに分けて示す。なお、記号○はSRが50%以上の破壊、●はSRが50%以下のデータである。期間Aでの破壊は、平面応力状態に近い試験片側面(Z=7.5-12.5)に集中しているが、そのSRは高く、傾斜したせん断型破壊が支配的であることを意味している。一方、期間BやCでの音源は内部にあり、SRも50%以下のものが多く劈開型破壊が圧倒しているが、SRの高いものも散在する。これは、Mode-I型の微小亀裂が空間的に孤立して発生し、それらを混合モード破壊が連結すると考えられ、連結割れのSRはかなり高くなるからである。巨視的には劈開的な破壊でも、多くのせん断型微小破壊が発生していることに注目すべきであろう。

試験片形状は、破壊靱性値(応力拡大係数K<sub>I,HE</sub>)を正しく求めるにはやや適切さを欠いているが、AEが検出された負

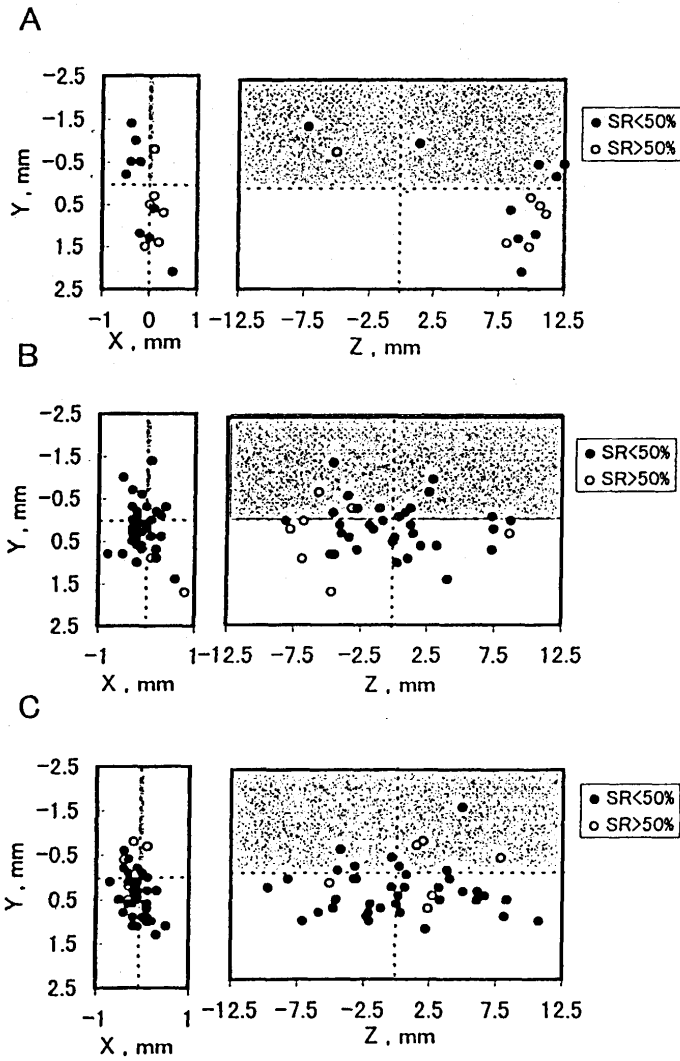


Fig. 4. Change of AE source location with test period: A,B and C.

荷重から計算すると、期間Aでは  $33.5 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  (最初にAEが検出された荷重から計算)、期間BとCでは  $36 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  (AEが検出された負荷  $20.6 \text{kN}$  から計算) となった。なお、期間Aではスリット長さを亀裂長さとしており、期間B、Cでは最先端のAE源を亀裂長さとしている。 $K_I$  は貫通直線亀裂に対して計算でき、先端から離れて存在する亀裂については計算できないので、計算値はやや大きく見積もられている可能性がある。

Fig. 5 は、 $TR=83\%$ 、すなわちほぼMode-I型破壊によって放出されたピコセンサー(#1-#7)と面外変位計測センサー#8)の出力を右列に、解析的応答関数を用いて計算した面外変位を左列に示した。Mode-I型破壊による縦波放射パターンは蘭型になり、全てのセンサー出力が同じポラリティーになるべきであるが、初動縦波のポラリティー、振幅および到達時刻は解析的変位と比較的よく一致している。なお、ピコセンサーは面外変位の速度成分を計測しやすいので、計算変位とは完全な一致を示さない。このAEの音源はほぼ試験片中央(0.1, 0.3, 3.2)で、原波

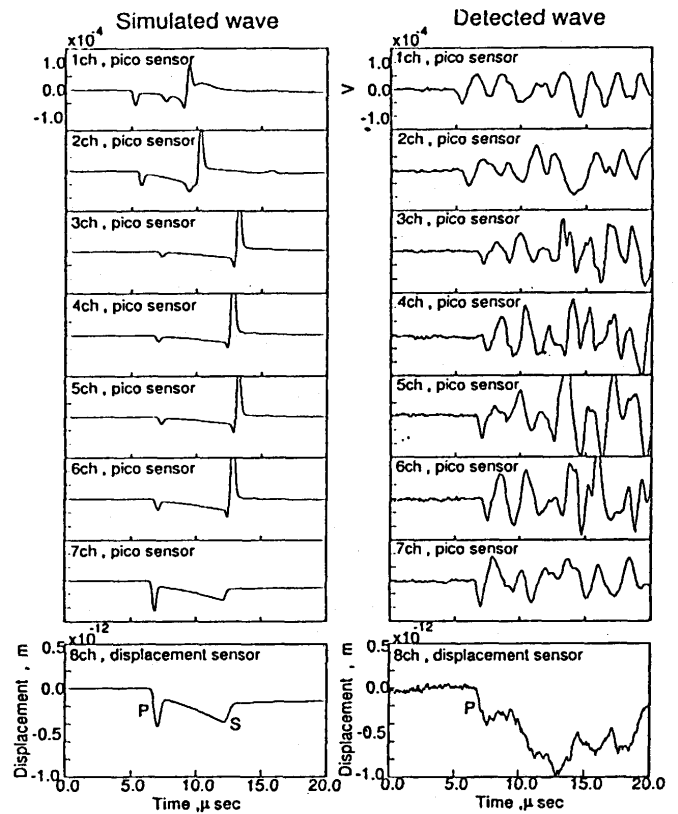


Fig. 5. Comparison of the simulated out-of-plane displacement and monitored waveform.

形の立上がり時間  $\Delta Tr$  は  $1.5 \mu\text{s}$ 、亀裂体積は  $6 \times 10^{-16} \text{m}^3$  であった。空孔の供給(migration)やすべりステップやすべり帯の滑り込みによって亀裂が生成すると考えた場合には、1014個もの空孔が  $1.5 \mu\text{s}$  に供給される必要があるが、このような速い亀裂生成を説明することは難しかろう。もっとも、亀裂体積が全て空孔で生成される必要はなく、わずかの空孔や水素原子(またはイオン)の供給が起爆となって亀裂を誘起することも考えらる。今回使用したAEシステムは、高速破壊や突発的内部膨張(a fast point of dilatation)によるAEの計測を目的として開発されており、ゆっくりした現象のAEは検出できない。AE(面外変位の振幅)は、破壊速度と体積に依存するが、数  $\mu\text{s}$  の高速現象でないと検出できない。突発的内部膨張によるAEは、地下核実験による地震波と同じ様に、パルス状の縦波のみで横波による変位は存在しない。この様な波は、低強度鋼の水素膨れでは観察されているが、極めて高速で広帯域( $\sim 10 \text{MHz}$ )センサーを用いた場合にのみ検出され、高強度鋼の遅れ破壊ではこれまで観察されていない。すなわち、検出されたAEは突発的内部膨張によるものではなく、水素によって脆化した金属の高速破壊によって放出された可能性が極めて高い。従って、以下の議論は破壊を想定して行う。

前述した原波形解析では、遅れ破壊によって生成した亀裂体積が求まる。しかし、体積では、破面や断面観察から推定される亀裂の大きさとの相関が議論できない。そこで、

平面応力条件での小規模降伏から、(9)式を用いて亀裂開口量 $b_3$ を求め、亀裂面積や亀裂長さを推定した。

$$b_3 = \frac{4 K_I^2 (1 - \nu^2)}{\pi E \sigma_y} \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 $\nu$ 、 $E$ はそれぞれポアソン比、ヤング率、 $\sigma_y$ は降伏応力である。 $b_3$ は、下限界応力拡大係数 $K_{I,HE} = 35 \text{MPa}\sqrt{m}$ のとき $3\mu\text{m}$ 、最大負荷( $K_I = 57 \text{MPa}\sqrt{m}$ )のとき $8\mu\text{m}$ であった。なお、この計算も亀裂先端の小規模降伏域に適用できるので、亀裂から離れた微小割れに適用するにはやや問題がある。先端から離れた微小亀裂では、(8)式よりも小さくなるものと考えられる。ここでは、円盤状亀裂を仮定した時の面積 $A (= \pi b_3^2/4)$ から直径 $D$ を求め、それを代表亀裂長さとした。

亀裂長さの経時変化はFig. 6の様になる。ところで、筆者らは、MnSを多量に含むSCM鋼QT処理材のAE原波形解析を行ったことがあるが、この場合には亀裂大きさ100~300 $\mu\text{m}$ の発生による振幅の大きなAEを多数検出した<sup>8,9)</sup>。一方、今回用いたマルエージング鋼の遅れ破壊での亀裂大きさは最も大きなものでも100 $\mu\text{m}$ で、多くのものは30~80 $\mu\text{m}$ であった。破壊規模はかなり小さく、この鋼の遅れ破壊のAEモニターリングでは、センサー感度も問題となるほどである。事実、相当数のAEはその位置評定もできないくらい振幅は小さかった。Fig. 7は試験後の断面写真である。除荷後の断面であることもあって、開口変位の大きさは1~3 $\mu\text{m}$ で、推定開口変位の約3分の1程度となっているが、大きく開口した亀裂大きさは約10~30 $\mu\text{m}$ でFig. 6の大きさとほぼあっている。なお、亀裂生成時間は1 $\mu\text{s}$ を切るものもあり、極めて高速の微小破壊が生成している。Fig. 6の勾配は亀裂の生成速度を意味するが、最大でも約93m/s程度で、SCM鋼の水素脆性で推定した最大速度200m/sに比べればかなり遅い。

空孔の供給による巨視亀裂の進展速度については必ずし

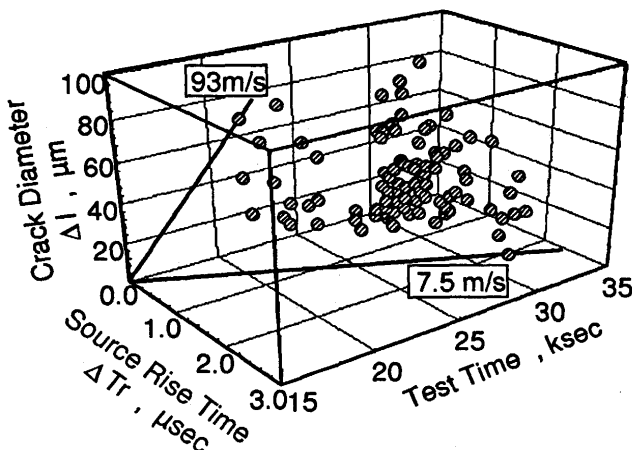


Fig. 6. Change of crack diameter/land source rise time  $\Delta Tr$  with test time.

も明らかになっていないが、Fig. 6に示すような破壊の生成速度を説明できるものでなければならず、空孔や滑り帯の滑り込みでは説明できないであろう。極めて小さな欠陥が突発的な水素供給によって引き起こされ、水素で脆化した格子の劈開破壊は、高速の微小破壊を説明できる様に思う。

Fig. 8には、# 8センサーの代表的な検出波と、仮定した破壊のダイナミクスに対して計算した面外変位、テンソル解析による破壊モードを図示した。検出縦波と計算した縦波変位は一致しているが、後続波に不一致が見られる。これは、スリット、ピンホールや側壁による反射波が、横波到達前に入ったためである。この問題については、続報で議論する。この亀裂の法線方向と開口変位方向のなす角度 $\xi$ は95°ではほぼMode-II型破壊である。亀裂面法線方向ベクトルと開口方向ベクトルを与える角度 $\theta$ 、 $\phi$ は図に示した通りで、グラフィック表示すると(c)になる。負荷方向X軸に対して大きく傾いたMode-II型割れが1.5 $\mu\text{s}$ で生成したことになる。一方、Fig. 9は、SRが10%、すなわちほぼMode-I型割れの発生による検出波とシミュレーション変

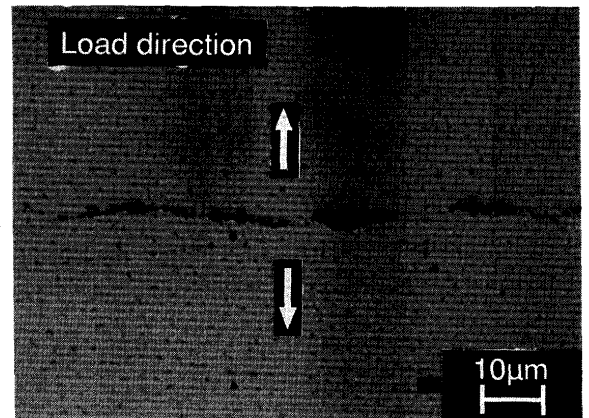


Fig. 7. Transverse microphotograph of maraging steel after delayed fracture.

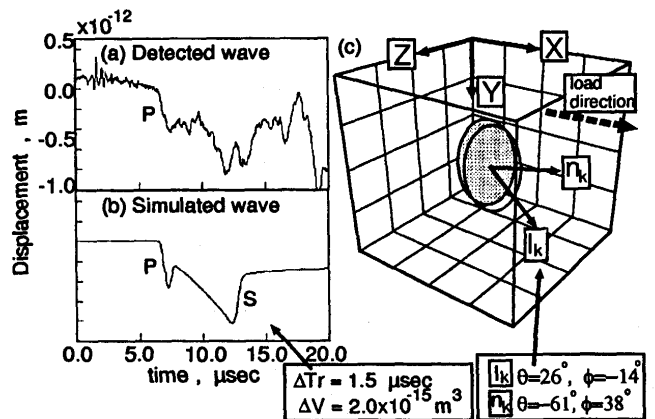


Fig. 8. Detected wave (a) and simulated out-of-plane displacement (b) for almost Mode-II shear fracture as shown in (c).

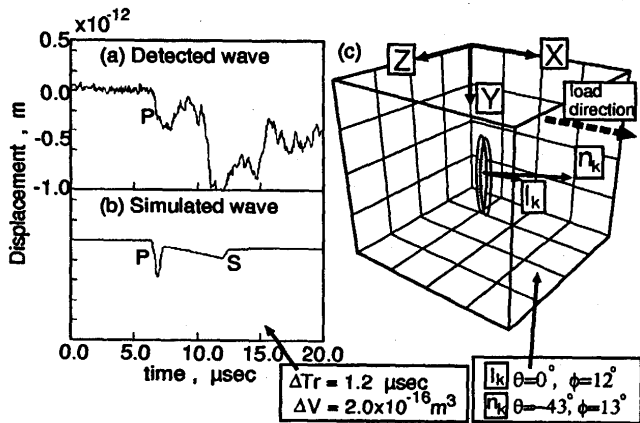


Fig. 9. Detected wave (a) and simulated out-of-plane displacement (b) for almost Mode-I cleavage fracture as shown in (c).

位、割れのグラフィック表示である。割れの相当直径は約  $15 \mu\text{m}$  で、開口量  $1 \mu\text{m}$  の割れが  $1.2 \mu\text{s}$  で生成したケースである。開口方向ベクトルが必ずしも  $x$  軸方向にならないのは、遅れ破壊が特定の結晶面にそって発生することを示唆している。この様な破壊が圧倒的であるが、平面応力状態に近い側面や、分離して発生した微小破壊を連結するせん断型破壊も発生する。

#### 4. 結言

マルエージング鋼の水素脆性破壊のダイナミクスを明らかにすることを目的として、AE原波形解析、モーメントテンソル解析を行った結果以下のことがわかった。

(1) 弾性波動が誘起する面外変位と放射パターンを計測できるマルチチャンネルAEモニタリングシステムを用いれば、定量的な信号処理によって、微小破壊の発生場所(音源位置評定)や破壊のダイナミクスに関する情報を得ることが可能である。破壊のキネマティクスは縦波のモーメントテンソル解析によって、キネティクスは解析的応答

関数を用いた面外変位のシミュレーションによって推定できる。

(2) 微小亀裂はCT試験片の側壁部で発生し、時間の経過と共に中心部に進展する。側壁部ではMode-IIに近い破壊が多いが、中心部ではそのほとんどがMode-I破壊であった。

(3) AE原波形解析から推定された亀裂の大きさは  $10 \sim 30 \mu\text{m}$  で、断面観察結果とはほぼ一致する。亀裂進展速度は最大で約  $93 \text{m/s}$  にも達する。破壊の大きさと生成速度は、SCM鋼の水素脆性破壊のそれらよりもかなり小さい。

本研究は(社)日本鉄鋼協会材料の組織と特性部会の研究テーマ「高強度鋼の遅れ破壊」の一部として行ったものである。日本鉄鋼協会には研究費の一部を、また大同特殊鋼(株)には試験片を提供して戴いた。記して感謝する。

本研究を行うにあたり指導と協力を得た、当大学理工学部助手鈴木裕晶氏、大学院博士後期課程長秀雄氏に感謝する。

#### 文 献

- 1) 小寺澤啓司, 内田 仁, 小園泰史, 鶴井孝文, 材料, **45** (1996), 1078.
- 2) 羽木秀樹, 林 安徳: 材料, **37** (1986), 1442.
- 3) H.N.G.Wedley, C.B.Scruby, G.Shrimpton: Acta Metall., **29** (1981) 399.
- 4) 大平貴規, 岸 輝男: 日本金属学会誌, **46** (1982), 518.
- 5) 大平貴規, 岸 輝男: 日本金属学会誌, **47** (1983), 575.
- 6) 林 康久, 竹本幹男: 防食技術, **39** (1990), 347.
- 7) 林 康久, 寺澤知徳, 竹本幹男: 材料と環境, **40** (1991), 478.
- 8) 竹本 誠, 林 康久, 竹本幹男: 材料と環境, **43** (1994), 570.
- 9) 竹本 誠, 林 康久, 竹本幹男: 非破壊検査, **43** (1994), 637.
- 10) 竹本幹男: 材料と環境, **44** (1995), 494.
- 11) 丹羽義次, 小林昭一, 大津政康: 土木学会論文報告集, **314** (1981), 125.
- 12) M.Ohtsu: Mater. Eval., **45** (1986), 1070.
- 13) 大津政康: 材料, **32** (1983), 117.
- 14) M.Ohtsu: J.Acoustic Emission, **1** (1982), 130.
- 15) 大津政康: アコースティック・エミッションの理論と特性, 森北出版, (1988).
- 16) F.R.Breckenridge: J.Aoust. Soc.Am., **57** (1975), 626.
- 17) 山川宏二, 南野康幸, 松本圭一, 米沢俊一, 吉沢四郎: 材料, **29** (1980), 1101.