SUS 304 鋼の高濃度塩化物水溶液応力 腐食割れ中の高速脆性破壊*

田村 宙治**, 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

Fast Brittle Fracture During Concentrated Chloride SCC of Type SUS 304 Steel

Okiharuru Tamura** and Mikio Takemoto***

** Graduate School of Aoyama Gakuin University

*** Faculty of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University

This research aims to study the SCC fracture dynamics of a AISI 304 steel in 42 wt% MgCl_2 solution at temperature at 413 ± 4 K using the advanced acoustic emission (AE) signal processing. AE signals (out-plane displacement) from the Mode-I fracture were monitored by the special AE monitoring system. Source wave was estimated by using the transfer function experimentally determined. It was revealed that the brittle fracture in size of 10 to 40 μm generated at the maximum velocity of 40 m/s.

Key words : TG-SCC, AISI 304, cleavage fracture, AE source simulation, experimental transfer function

1. 緒 言

オーステナイト系ステンレス鋼の塩化物応力腐食割れ (SCC) については膨大な研究がなされてきたが, そのメカニズムについてはほとんど何も分かっていない。筆者らは, 組合せ応力を受ける SUS 304 鋼の濃厚塩化物 SCC では, 結晶粒サイズの劈開破面が観察されることを報告した^{1)~4)}。SCC に関する長い歴史の中で, 何ら明快な解の与えられなかった現象の一つは, 延性材料がなぜ比較的低い引張り応力と特定イオンのもとで脆性的破壊をするかである。割れ内の pH は塩化物の加水分解によって強酸性まで低下し, 歪誘起マルテンサイト相の水素脆性割れの可能性⁵⁾も示唆されたが, この種の現象が SCC を支配することは極めてまれである。AE は in-situ モニタリングが出来ることから, SCC のメカニズムの検討に用いられた。例えば, 岡田ら⁶⁾は色々な系での HE や SCC の AE モニタリングを行い, いわゆる APC-SCC では AE は検出されないと報告した。湯山⁷⁾も AE モニタリングを行ったが, 水素誘起割れによる AE は検出されるが, APC-SCC では十分な振幅

を持った AE は検出されないとの結論に達している。彼らが用いた AE モニタリング装置は, センサーや前置増幅器などによって歪められた波の解析に限られたため, 水素ガス発生などの副次的現象による AE やノイズとの区別が難しいという問題があった。JIS-G 0576 に規定されている沸騰 42% マグネシウム溶液では, 沸騰ノイズを除去するために 1 MHz 以上のハイパスフィルターも使われたが, この種のフィルターは AE 信号のモニターも不可能にした⁸⁾。環境劣化破壊を, 水素脆性割れと APC-SCC に大別しているように, SCC は活性経路のアノード溶解によるという既成概念が何らの根拠も持たず先行した嫌いが強い。

筆者らは, 鋭敏化 SUS 304 鋼の室温ポリチオン酸とフッ化物溶液による粒界型 SCC の AE を面外変位計測モニタリング装置と原波形解析システムを用いて検討し, この現象に高速脆性破壊が関与していることを明らかにした⁹⁾。破壊のダイナミックスの解明は, そのメカニズムを考える上で極めて大事であるが, この点に関する研究は極めて少ない。SCC については, 1980 年代に脱成分腐食層を示す系の SCC に関する実験を通して新しいモデルが提唱された。J. R. Galvele ら^{9), 10)}は, 脱成分腐食を受ける 2 元合金の SCC について, self mo-

* 腐食防食 '96 (東京, 1996 年) で発表

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

bility model を提唱した。このモデルは、割れ先端に存在する excess ad-atoms の割れ側面への拡散によって空孔が取り込まれ、この空孔の供給によって割れが進展すると考えている。割れ進展速度は、ad-atoms の表面拡散速度に律速され、モデル計算によれば 10^{-9} m/s 程度になる。この速度は、平均的 SCC 進展速度は説明できるが、SCC 伝播中に高速破壊が発生するかどうかについては何の情報も与えない。一方、Newman ら^{11), 12)}のグループは、Cu-Zn, Cu-Au 合金の NaNO_3 溶液による SCC についての AE モニタリングを行い、定電位制御下で観察される電流密度の瞬間的くり返し増大は、1 ms の時間精度内で AE (試験片が薄いのでラム (Lamb) 波を捉えていると考えられる) 発生と同期して観察され、これは破面に観察される terrace の大きさ (crack jump) と一致すると報告した。二元合金で見られる dealloyed layer は、延性基材に cleavage あるいは brittle 破壊を誘起するというメカニズムを考え、film-induced cleavage cracking と呼んだ。単結晶試験片の crack jump の大きさは 1 から 10 μm 程度であるとしているがその速度については議論していない。彼らの実験では、ノッチ先端周辺をラッカーでコーティングしており、脆性ラッカーの破壊が誘起するラム波を捉えた危険性もあるが、延性材料にかなり大きな劈開の terrace が生成するという新しい知見を得ている。Paskin ら^{13), 14)}は、分子動力学を用いたモデル計算を行い、脱成分腐食によって生成した皮膜がしかるべき条件 (皮膜厚さ、基材への coherency, lattice misfit : (基材料格子定数-皮膜の格子定数)/皮膜の格子定数) を持つ場合には、延性基材に short range cleavage (1~10 μm) 破壊が生成する可能性を示唆した。Flanagan ら¹⁵⁾のグループもほぼ同じ系の SCC について研究し、corrosion assisted cleavage (CAC) の可能性を示唆した。彼らが、fully plastic model によって推定した cleavage の大きさは最大 10 μm 程度で、その伝播速度は 1.2×10^{-6} m/s 程度であろうとしている。Film induced cracking は、当初粒内型 SCC に対して提唱されたが、F. Friederichs ら¹⁶⁾は、粒界型 SCC でもこのメカニズムが適用出来ること、瞬間的破壊速度は 5 から 40 mm/s に達することを報告した。彼らの論文でも議論されているように、Cleavage 破壊は必ずしも高速破壊を意味しないが、粒界破壊での瞬間的破壊速度は、平均的 SCC 速度の 4×10^4 倍程度になることを明らかにした。一方、筆者らが鋭敏化 SUS 304 鋼の粒界型 SCC の AE 原波形解析⁸⁾から求めた亀裂大きさは、数 10 μm に達し、その速度は最高 40 m/s にもなる。筆者らが明らかにした粒界脆性破壊の速度とは依然かなり (約 1000 倍) 異なっているが、系 (材料と環境の組合せ) が異な

り劈開割れの発生・伝播のメカニズムが異なっている可能性がある。

筆者らは、高濃度塩化物による SUS 304 鋼の粒内型 SCC の進展を溶液中で直接顕微鏡観察²⁾したが、滑りステップが発生しない低応力での SCC では、極めて細い割れ (前報では river と呼んだ) と、ある程度の幅を持った割れ (pool) の交番で進展することを報告した。Pool に該当する破面は劈開破面に酷似した 1 結晶粒サイズの鏡面状の (100) 面で、その伝播 (成長) 速度は river のそれに比べて極めて遅く、ほとんど停滞しているといった方が良いぐらいであった。この実験における伝播速度の計測は、時間間隔をおいた表面観察によるもので、時間分解能が低く、腐食がある程度進んで顕微鏡観察出来る幅になった後の話である。Pool と呼んだ SCC が、極めて高速の機械的 (あるいは劈開、脆性的) 破壊を起こし、その後のアノード溶解でゆっくり開口するようなプロセスも考えられるが、当時の技術ではそこまで解明出来なかった。その後開発した AE 原波形解析システムでは、変位型センサーが高温破損を招きやすいこと、沸騰 42% MgCl_2 溶液ではノイズが多いことから、塩化物 SCC の AE 計測を先送りしていた。

本研究では、未沸騰 42% MgCl_2 溶液 (413 K) による SUS 304 鋼の粒内型 SCC の AE 計測を行い、塩化物 SCC における脆性破壊の可能性について検討した。また、これまでの研究では、試験片が有限体であるにもかかわらず半無限等方弾性体の解析的応答関数を用いた原波形解析を行ってきた。破壊のダイナミックスは、縦波変位が正しく計測されていれば解析的に求めることが出来るが、反射波によって縦波が正確に抽出できない場合には誤った解を与えるおそれがある。そこで、有限試験片の弾性波応答関数を実験的に求めるとともに、これを用いた原波形解析を行った。この方法については、いくつかの制限と精度の問題があるが、小型試験片に使用出来るので紹介する。

2. 実験的応答関数

Fig. 1 に試験片を示す。試験片は小径の丸棒であることから AE センサーは両端面に設置せざるをえず、ノッチや側壁からの反射波を避けることは不可能である。この試験片の応答関数を実験的に求める手順をはじめに説明する。

半無限均質等方弾性体で、変位の食違い (開口方向ベクトル) が x_i 方向のダイポール現象 (破壊) が発生した場合の外部境界上の点 x における x_i 方向の変位 $U_i(x, t)$ は、媒体の第二種グリーン関数 $T_{ij}(x, t; x', t')$ と生成亀裂体積 $Ab_j(x', t')$ の畳込み積分 (1) 式で表される¹⁷⁾。

Fig. 1 Test specimen and AE sensors.

$$U_i(x, t) = Ab_j(x', t') * T_{ij}(x, t; x', t') \quad (1)$$

A は亀裂面積, b_j は開口変位量である。原波形 $Ab_j(x', t')$ は, 亀裂が時間 ΔT で生成し成長を停止すると考えれば, (2) 式のステップ関数で近似できる。

$$\frac{d(Ab_j(x', t))}{dt} = V_0 \sin^4\left(\frac{\pi t}{\Delta T}\right) \quad (2)$$

一方, 破面法線方向ベクトル n が $n_3 = 1$, 開口ベクトルが $b_3 = |b|$ の Mode I 型破壊に対する第二種グリーン (応答) 関数 T_{33} は応答関数 $G_{3i, i}$ (第一種グリーン関数 G_{3i} の x_i 方向空間微分) を用いて (3) 式で定義される。

$$T_{33} = (\lambda + 2\mu) G_{33, 3} + \lambda G_{32, 2} + \lambda G_{31, 1} \quad (3)$$

ここで λ, μ はラーメの定数である。(3) 式の $\lambda G_{31, 1}$ は $(\lambda + 2\mu) G_{33, 3}$ に比べて極めて小さい (100 分の 1) のでこれを無視すると, $U_3(x, t)$ は (4) 式で与えられる。

$$U_3(x, t) = G_{33, 3} * (\lambda + 2\mu) Ab_j(x', t') \quad (4)$$

$(\lambda + 2\mu) Ab_j(x', t')$ はモーメントの次元を持ち, サイズミックモーメントである。

Fig. 2 は, Fig. 1 の試験片に対して, 亀裂体積 $Ab_3 = 10^{-15} \text{ m}^3$ (生成時間: $1 \mu\text{s}$) の Mode-I 型破壊が誘起する端面の U_3 を, (1) 式と (4) 式で計算した結果である。縦波 (P 波) の変位は完全に一致しており, (4) 式が使用できることが分かる。すなわち, 実験的に $G_{33, 3}$ を求めれば, (4) 式によるくり返し計算によって破壊のダイナミックスを求めることができる。

ところで, 作用 (又は解放) 力の方向が x_3 であるモノポール現象 $F(t)$ に対する応答 U_3 は (5) 式で与えられる。

$$U_3(x, t) = G_{33}(x, t; x', t') * F(t) \quad (5)$$

すなわち, 第一種グリーン関数 G_{33} は (6) 式で求まり, これから $G_{33, 3}$ を求めることができる。

$$G_{33}(x, t; x', t') = U_3(x, t) * F(t)^{-1} \quad (6)$$

この方法で応答関数を求める場合に問題になることは, AE の周波数帯域を十分カバーできる広帯域の G_{33} , 言い換えれば極めて高速で, 再現性がありその物理量の分かっているモノポール現象が必要なことである。疑似音源として使われるシャープペンシルの芯の圧折 (point step-wise unloading, 解放力 3.5 N, 立ち上がり時間

Fig. 2 Out-of plane displacement simulated to Mode-I fracture using the theoretical transfer function T_{33} (a) and $G_{33, 3}$ (b).

$0.9 \mu\text{s}$) は, 再現性に優れているが周波数帯域がやや低いという問題がある。小径のガラスキャピラリーを圧壊する方法は, $0.5 \mu\text{s}$ 以下の立ち上がり時間を持つといわれ¹⁸⁾, 広帯域をカバー出来るが, 物理量のばらつきが大きく再現性に劣る。パルスレーザーアブレーションを用いれば, 立ち上がり時間 $0.2 \mu\text{s}$ 程度のインパルス状モノポールソース (レーザープラズマのモーメント移動による衝撃力¹⁹⁾) を与えることができるが, 物理量は表面状態によって変化しやすいという問題がある。後述するように, SCC 中における微小破壊の発生速度は $1 \mu\text{s}$ より遅いことから, ここでは再現性に優れたシャープペンの芯 (pentel, 2 H, $0.5 \text{ mm}\phi$, 圧折角 30°) を用いて応答関数を求めた。もう一つの問題は, 解の安定性と誤差の発生で, (6) 式を時間領域で行うと解は発散する。そこで, 実際の計算は (7) 式に従って周波数域で行い, $G_{33}(\omega)$ の逆フーリエ変換によって $G_{33}(x, t, x', t')$ を求める手法を用いた。 ω は角周波数である。

$$G_{33}(\omega) = \frac{U_3(\omega)}{F(\omega)} \quad (7)$$

また, $G_{33, 3}$ は G_{33} の時間微分によって求まるが, ステップ関数の $F(t)$ を与えた場合に (7) 式で求まる G_{33} はヘビサイドグリーン関数 G_{33}^H であるから, $G_{33, 3}$ を求めるためには 2 回の時間微分が必要である。しかし, 時系列離散化データの微分操作は, 不必要な誤差を生み出し解の精度を悪くする。実例を示してこの問題を論じる。

Fig. 3 は, 実験的応答関数を求める方法で, ノッチに沿って切断した面上でシャープペンの芯の圧折を行い, その応答を端面の変位センサー (DUNEGAN: S 9208) で検出する。センサー出力は高速 A/D コンバータ (オートニクス: APC 510, サンプル時間 50 ns , 分解能 10 bit) で時系列離散化データとした後ワークステーションで解析した。初期の SCC に対する応答関数を求めるため, 芯の圧折はノッチ先端から 0.5 mm 離れたところで行った。Fig. 4 は, 実験的応答関数を求める手順である。左列に実験データを, 右列に半無限媒

Fig. 3 Method to determine the experimental transfer function of elastic wave for small bar specimen.

体に対する解析的データを比較して示した。実験的応答関数は G_{ij} のように区別して示す。実測面外変位 (a) と解析的面外変位 (b) の初動縦波 (P 波) は一致しているが、縦波到達以降にいくつかの反射波が見られ、横波 (S 波) による変位は読みとれなくなっている。(7) 式によって求めた応答関数 $\bar{G}_{33}^H$ (c) では、初動縦波による応答関数 (矢印で P と表示) が見られるが、その後反射応答が見られる。 G_{33} は $\bar{G}_{33}^H$ の時間微分によって求められ 図(d)に示した。解析的第一種グリーン関数 (e) と比較すると、反射波のため相当異なっているが、初動縦波による応答はインパルスで (e) とよく一致している。ところで、 $G_{33,3}$ は (8) 式で与えられるが、

$$G_{33,3} = \frac{\partial G_{33}}{\partial x_3} \quad (8)$$

金属のような等方弾性体では、縦波の速度分散は無視出来るほど小さい (位相速度 V_p は 5790 m/s で一定) ので、微分演算子 ∂x_3 は $V_p \partial t$ で置き換えられ (9) 式となる²⁰⁾。

$$G_{33,3} = \frac{1}{V_p} \frac{\partial G_{33}}{\partial t} \quad (9)$$

すなわち、空間微分は時間微分に置き換わり、図 (d) の $\bar{G}_{33}$ から第二種グリーン関数 $\bar{G}_{33,3}$ は (f) のように求められる。この $\bar{G}_{33,3}$ を用いてノッチ先端での Mode-I 型破壊に対する端面の変位を計算すると Fig. 5 (a) となる。なお、ステンレス鋼の弾性率は $(\lambda + 2\mu) = 256$ GPa, 原波形パラメータは $\Delta Tr = 1.0 \mu s$, $Ab_j = 1.0 \times 10^{-15} m^3$ とした。半無限体に対する面外変位 (b) と比較すると、縦波の後に多くの反射波が見られ、今回用いた試験片では横波による変位は議論できないことが分かる。縦波変位は (a) と (b) では若干異なっているが、2 回の微分操作による誤差の発生、音源として用いた芯

Fig. 4 Procedure to determine the experimental transfer function (the left) and corresponding function for half space elastic medium (the right).

Fig. 5 Out-of plane displacement simulated to Mode-I fracture using the experimental transfer function (a) and theoretical Green's function of the second (b).

圧折の解放力のばらつきが考えられる。

なお、センサーによる応答遅れや波形ゆがみが見られるような場合、すなわちセンサー応答関数 $S(t)$ が無視出来ない場合には、(5) 式は (10) 式とすべきであるが、この場合には、センサーと媒体を一括した応答関数 $[S(t) * G_{33}(x, t; x', t')]$ が実験的に求まることになり、センサーの感度補正も一括して出来る。

$$U_3(x, t) = [S(t) * G_{33}(x, t; x', t')] * F(x', t') \quad (10)$$

3. 濃厚 $MgCl_2$ 溶液中におけるステンレス鋼 SUS 304 の応力腐食割れのダイナミクス

3.1 実験方法

Fig. 6 に実験装置を示す。試験片は機械加工後 1323 K × 900 s の溶体化処理を行った。濃厚塩化物試験法と

Fig. 6 Experimental setup for constant load chloride SCC.

して JIS G 0576 があるが、沸騰 42% MgCl_2 溶液 (BP. 418 K) では Fig. 7 (a) に示すような沸騰ノイズが多い。ノイズの周波数帯域 (b) は AE 周波数域 (0.5~1.5 MHz) にあり周波数フィルターで除去することができない。そこで、溶液温度を 413 ± 4 K とし沸騰ノイズを抑えた。初期応力 277 MPa の定荷重引張試験を行い、試験片伸びは差動トランスで計測し、腐食電位は飽和カロメル電極を用いて測定した。両端に設置した 2 つの変位センサー (DUNEGAN : S 9208) は耐用温度が約 393 K 程度であるため強制空冷した。センサー出力は、広帯域前置増幅器 (NF 回路ブロック : 9913) で増幅した後、8 チャンネル高速 A/D コンバーターで A/D 変換され、パーソナルコンピュータのハードディスクに蓄えた。変位計測型センサーを用いる AE モニタリングシステムが 10^{-13} m の面外変位を計測することは以前に報告²¹⁾した。

3.2 実験結果および考察

Fig. 8 に腐食電位の経時変化と AE 発生タイミングを示す。温度変動が大きいため電位はかなり変動した。最初の AE は実験開始 11.2 ks 後に検出され、終了までに 43 個検出された。AE は電位が卑方向に移行中、あるいは卑にある時に多く検出される傾向がある。AE 発生数ははかなり少なく、Newman らが黄銅について観察したような頻繁な AE 発生は観察されなかった。Newman らの使用した AE システムについては記載がないので詳細は分からないが、波形から推測すると加速度型センサーと、相当の波形歪みを与える市販増幅器を使用していると思われる。この種の計測装置は、感度は良いが、信号とノイズの区別が難しい。SCC による損傷は Fig. 9 に示すように粒内割れで、試験時間中の最大深さは約 0.45 mm であった。平均 SCC 伝播速度は 6.3×10^{-9} m/s である。

Fig. 7 Boiling noise (a) and its Fourier spectrum (b).

Fig. 8 Potential-time history with AE timing.

Fig. 9 Cross section of crack tip of the chloride transgranular SCC.

Fig.10 にチャンネル 1 (Fig. 1 の左端センサー) と 2 (右端センサー) による検出波の一例を示す。初動縦波到達時間差は $3.6 \mu\text{s}$ (理論上は $4.25 \mu\text{s}$) であった。一方、ノッチ先端では枝分かれした 4 本の SCC が最大 0.8 mm の広がりをもって発生していた。理論到達時間差と実測時間差の差は、 $0.65 \mu\text{s}$ で距離に換算すると 3.6

Fig. 10 Detected wave (data-number 2) and displacement simulated using the experimental transfer function (c, d) and theoretical Green's function (e, f).

mm ものずれになる。しかし、Fig.10(b) の波に見られるように2チャンネルの縦波振幅が小さく、 $0.5 \mu\text{s}$ 程度（伝播距離では 2.8 mm ）の読みとり誤差は避けられない。この読みとり誤差を考えれば、AE はノッチ先端部で発生したもので SCC に関与したものといえる。(c), (d) は実験的応答関数を用いて計算した面外変位で、縦波の後ろに見られる多くのピークは検出波とかなりよく一致している。(4)式による原波形解析は初動縦波のみに有効であるが、実験的応答関数は反射波の挙動も捉えており、検出波とシミュレーション波はよく一致している。一方、(e), (f) には、半無限等方弾性体を仮定した Mode-I 型破壊 ($n_3=1$, $b_3=|b|$) に対する面外変位を示す。解析のグリーン関数を用いて原波形を求めると、 $4.5 \times 10^{-16} \text{ m}^3$ の亀裂が $2.7 \mu\text{s}$ で発生したことになる。一方、実験的応答関数を用いて原波形を求めると $2.5 \times 10^{-16} \text{ m}^3$ の亀裂が $2.7 \mu\text{s}$ で発生したことになる。2つの方法で求めた生成時間は同じであるが、亀裂体積が約 1.8 倍程度違う。Fig.11 には、Fig. 8 の No. 7 の AE (a) に対し、実験的応答関数を用いて計算した面外変位を (b) に、また実験的および解析的応答関数から求めた原波形を (c) に比較して示した。(c) の実線 (α として示した) が実験的応答関数から求めた原波形で、破線 (β) が解析的応答関数で求めた原波形である。立ち上がり時間 ($1.0 \mu\text{s}$) は同じであるが、生成体積は解析的応答関数を用いた方が 1.2 倍大きくなっ

Fig. 11 Detected wave (data-number 7) and displacement simulated using the experimental transfer function (b) and the estimated source wave (c).

ている。どちらの値が正しいかは難しい問題であるが、実験的応答関数では2回の微分操作によって誤差を産みやすいこと、亀裂は必ずしも Mode-I 型ではなく若干傾斜した混合モードになりやすいことなどが原因と考えられる。しかし、オーステナイト系ステンレス鋼の塩化物 SCC においても、相当の頻度で高速の脆性破壊が発生していることは間違いない。AE 装置は、高速な面外変位をモニターすることを目的として開発されたものであり、高速破壊が発生しない限り AE は検出されないし、面外変位を計測すればノイズとの区別も可能である。例えば、Fig. 7 に示した沸騰ノイズによる AE は、縦波ポラリティが正であるが、Mode-I 型破壊ではこのような波は発生しないことからノイズとして除外できる。

Fig.12 に原波形パラメーター ΔTr と Δl 、試験時間の関係を示す。実験開始 20 ks から 55 ks までに検出された AE 数は少ないが、この期間は Fig. 8 (a) に示すように電位がゆるやかに貴方向にシフトする期間と対応している。破壊の ΔTr は $1 \mu\text{s}$ 以上で、実験的応答関数は十分とは言えないまでも AE 周波数帯域をカバーしている。 Δl は、亀裂形状を円盤状と仮定し、開口変位 b_3 を $1 \mu\text{m}$ とした場合の直径で $10 \sim 40 \mu\text{m}$ である。この大きさは、粒内破面に見られるテラスの大きさはもちろん、Newman や Flanagan らが報告した大きさよりもかなり大きく、前報で報告した pool 型割れの大きさに相当している。このシステムでは音源の位置評定が出来ないので、検出 AE が (100) 面の脆性的破壊によるものであるか否か議論はできない。なお、亀裂速度は最大で 41 m/s に達し、平均 SCC 伝播速度の 7×10^9 倍にも達している。破壊のダイナミクスは室温ポリチオン酸やフッ化物溶液による粒界型 SCC で推定されたものと近い値であった。

Fig. 12 Source parameter for the cleavage like fracture during the chloride SCC of SUS 304 steel.

環境劣化割れによる粒界型破壊は、高温溶融塩化物による粒界脆性破壊²²⁾も含めて、特定粒界の grain boundary decohesion によるものと思っている。一方、粒内型 SCC に見られる脆性破壊は特定な結晶方位に沿うメカノケミカル破壊によるものではないかと考えているが、それらのメカニズムについては依然分からない。縦波の定量解析では、ダイナミックスに関する情報は得られても、メカニズムについては何も得られないので、今後箔試験片を用いた表面弾性波の検出と高速ビデオ観察などを行ってメカニズムを検討する予定である。

4. 結 論

AE 原波形解析によって塩化物 SCC の速度を検討する目的で、有限試験片の波動応答関数を実験的に求める方法を検討し、SUS 304 の粒内型 SCC に脆性破壊が関与している実験的確認を得た。結果は以下のように要約される。

1) モノポール現象に対する応答から有限試験片の波動応答関数を実験的に求める方法を提案した。この方法は比較的遅い Mode-I 型破壊の縦波にしか適用出来ないが、反射波による応答も計算でき、破壊のダイナミックスの解析やノイズの分別に使える。

2) SUS 304 鋼の濃厚塩化物 SCC では、電位が卑方向に変化する時や卑電位にある時に破壊による AE が検出された。実験的応答関数を用いて推定した亀裂生成時間は $1 \sim 2 \mu\text{s}$ 、破壊規模は 1 結晶かそれ以下であった。この大きさは破壊面に見られる terrace の大きさより大きく、(100) 面の cleavage 型破壊の可能性がある。破壊速度は最大で 41 m/s にも達したが、鋭敏化 304 鋼の粒界型 SCC のそれとほぼ同じである。

(Manuscript received December 1, 1996 ;
in final form January 28, 1997)

引 用 文 献

- 1) 竹本幹男：防食技術，**30**，203 (1981).
- 2) 竹本幹男：防食技術，**31**，753 (1982).
- 3) 竹本幹男：防食技術，**32**，76 (1983).
- 4) 竹本幹男：防食技術，**32**，3 (1983).
- 5) H. E. Hanninen and J. A. Honkasalo : Proc. 6th ICMC, Sydney (1975).
- 6) 岡田秀弥：材料科学，**13**，24 (1976).
- 7) 湯山茂徳：防食技術，**35**，163 (1986).
- 8) 竹本幹男，中澤知之：材料と環境，**44**，166 (1995).
- 9) J. R. Galvele : *Corros. Sci.*, **35**，419 (1993).
- 10) J. R. Galvele, I. A. Maier and S. A. Fernandez : *Corrosion*, **52**，52 (1996).
- 11) K. Sieradzki and R. C. Newman : *Philosophical Magazine A*, **51**，95 (1985).
- 12) R. C. Newman, T. Shahrabi and K. Sieradzki : *Scripta Metallurgica*, **23**，71 (1989).
- 13) A. Paskin, K. Sieradzki, D. K. Som and G. J. Dienes : *Acta Metall.*, **30**，1781 (1982).
- 14) A. Paskin, K. Sieradzki, D. K. Som and G. J. Dienes : *Acta Metall.*, **31**，1253 (1983).
- 15) B. D. Lichter, W. F. Flanagan, J. S. Kim, J.C. Elkenbracht and M. van Hunen : *Corrosion*, **52**，453 (1996).
- 16) F. Friedersdorf, K. Sieradzki : *Corrosion*, **52**，331 (1996).
- 17) M. Ohtsu & K. Ono : *J. Acoustic Emission*, **3**，27 (1984).
- 18) N. N. Hsu and F. R. Breckenridge : *Mat. Evaluation*, **39**，60 (1981).
- 19) 長 秀雄，竹本幹男：材料科学，**31**，175 (1994).
- 20) 大平貴規，岸 輝雄：日本金属学会誌，**46**，518 (1982).
- 21) 林 康久，竹本幹男：防食技術，**39**，347 (1990).
- 22) 林健太郎，鈴木裕晶，竹本幹男：材料と環境，**46**，30 (1997).