

酸化物を生成する塩化物 SCC における AE と電位振動[†]

米津明生* 谷山嘉啓** 長秀雄**
小川武史*** 竹本幹男***

Acoustic Emission and Potential Fluctuation During Chloride SCC with Oxide in Its Surface

by

Akio YONEZU*, Yoshiro TANIYAMA**, Hideo CHO**, Takeshi OGAWA*** and Mikio TAKEMOTO***

Both the acoustic emission (AE) and corrosion potential fluctuation were monitored for chloride SCC of sensitized Type-304 steel plate under bi-axial stress state. Branched SCCs were produced from rectangular-shaped corrosion pits initiated by falling-off of surface grains and filled with chromium oxide in 30mass% MgCl₂ solution (363K). Both the AE and potential fluctuation were simultaneously detected at corrosion pit formation and SCC propagation. Two types of AE (Type-I and Type-II) were monitored. Type-I AEs with higher frequency components were detected during the pit growth and supposed to be produced by falling-off of surface grains due to intergranular attack, while a number of Type-II AEs (about 12 500 counts) with low frequency components were detected at SCC progression and supposed to be produced by cracking of the oxides. Though the AEs detected during SCC test are not the primarily signals from the SCC itself, secondary AE can be usefully utilized to monitor the SCC initiation and propagation as well as the corrosion potential fluctuation.

Key words: Type-304 stainless steel, Chloride-SCC, Bi-axial stress state, Lamb wave AE, Corrosion potential, Falling off of grain, Oxide fracture

1 緒 言

NACE G36-73 や JIS K 8159 で推奨された沸騰 42mass% の MgCl₂ 溶液を用いる応力腐食割れ (SCC) 試験では、オーステナイトステンレス鋼には孔食経路型 SCC が再現できにくいこと、鋭敏化鋼を用いても粒内型 SCC になりやすいことなどが指摘され、このような濃厚溶液が SCC 試験液として用いられることは少なくなった。この溶液は、加水分解反応で生成した塩酸のため pH は 1 にもなり、SUS304 鋼の脱不動態化 pH よりも低いことも指摘されている。¹⁾ 一方、25% 程度の低濃度 MgCl₂ 溶液では、100 時間以上の試験時間となり、²⁾ 短時間での SCC 試験を行うためには濃厚な溶液が必要である。

孔食や腐食生成物 (酸化物) の有無、ブランチングの有無、粒界と粒内型 SCC の割合などは、環境条件 (アニオンや酸化剤種と濃度、温度)、負荷状態 (応力レベルと軸性)、組織 (加工誘起マルテンサイトや鋭敏化のあるなし) に大きく依存する。筆者らは、SUS304 鋼の塩化物イオンによる SCC (以後、塩化物 SCC という) がアコースティック・エミッション (AE) を発生するか否かについて研究してきたが、孔食や腐食生成物の発生しない濃厚 MgCl₂ 溶液 (38mass%, 90 ~ 100℃) での粒内型 SCC では、AE は検出されないことを確認した。^{3), 4)} 42mass% MgCl₂ 溶液中での活性経路アノード溶解型 SCC で AE が

検出されないことは、1970 年代に岡田らによって報告⁵⁾ されている。AE を SCC のモニタリングに使用した研究はここ 20 年間ほとんど見当たらない。

AE が検出されるか否かは、APC-SCC のメカニズムを検討する上では重要である。すなわち、粒内型塩化物 SCC には AE を放出するような機械的破壊は関与しておらず、割れのように見える粒内侵食はアノード溶解によって生成していることを示唆している。一方鋭敏化鋼のポリチオン酸やフッ化物イオンによる粒界型 SCC では AE が検出される。⁶⁾ これらの系では、SCC 先端よりも 200 ~ 300μm 離れた場所まで結晶粒の脱落 (以後脱粒という) が観察される。脱粒が AE を放出していると考えられるが、詳しいメカニズムはわかっていない。

最近、粒内・粒界混在型塩化物 ESCC (外面 SCC) を持つ溶接 SUS304 鋼管の耐圧試験時の AE をモニタリングしたが、多くの高周波 AE が検出された。⁷⁾ AE は HAZ 域粒界 ESCC の脱粒と粒内 ESCC 内に生成した錯の破壊によって発生したものと推察された。ESCC を発生させた応力は 2 軸 (平面) 応力状態であるが、実験室での引張試験法の多くは単軸引張で、SCC 形態もかなり異なっている。構造物の SCC は、平面応力状態で発生しており、環境もマイルドで孔食や孔食内に腐食生成物が生成することが多い。加速 SCC 試験でえられた AE に関する結果、

[†] 原稿受理 平成 17 年 7 月 5 日 Received July 5, 2005

* 学生会員 青山学院大学大学院 〒229-8558 相模原市淵野辺, Graduate Student, Aoyama Gakuin Univ., Fuchinobe, Sagamihara, 229-8558

** 青山学院大学理工学部機械創造工学科 〒229-8558 相模原市淵野辺, Dept. of Mech. Eng., Aoyama Gakuin Univ., Fuchinobe, Sagamihara, 229-8558

*** 正会員 青山学院大学理工学部機械創造工学科 〒229-8558 相模原市淵野辺, Dept. of Mech. Eng., Aoyama Gakuin Univ., Fuchinobe, Sagamihara, 229-8558

すなわち粒内型塩化物 SCC では AE は検出されないという筆者らの結論は, AE による現場 SCC のモニターの可否を議論する上で誤解を招く恐れもある。現場装置の診断では, SCC 自身による AE (1 次 AE と呼ばれている) が検出できなくとも, SCC に密接に関係する現象からの AE (2 次 AE) が検出されれば, モニタリングが可能である。⁸⁾この場合, 2 次 AE は再現性よく検出されることが必要である。2 次 AE としては, 1) 孔食底や SCC 内における水素ガスの発生,⁹⁾ 2) 孔食底や SCC 内で発生した錯の破壊,¹⁰⁾ 3) SCC 破面の摩擦, 4) 粒界 SCC では脱粒^{4), 6)}である。このうち 4) は 1 次 AE とみなした方が良いかも知れない。

本研究では, 孔食経由型の枝分れ粒内・粒界混在型 SCC を再現するため, エリクセン式の面外押し負荷を与えた鋭敏化 SUS304 鋼の 30mass%MgCl₂ (90°C) による SCC 試験中の AE と電位振動^{11), 12)}を測定し, AE や電位振動がどのように SCC の検出に使用できるのか, AE はどのようなメカニズムで放出されているのかなどについて検討した結果を報告する。

2 実験方法

873K で 14.4ks 鋭敏化処理した 150 × 100mm の SUS 304 鋼板 (厚さ 3mm) に, 自作エリクセン型押し負荷装置を用いて面外押し変形 (円形山型) を与え, 等二軸引張り応力での SCC 試験を行った。試験装置を Fig. 1 に示す。直径 80mm のリング状固定治具の下側に試験片を設置し, 直径 38mm の鋼球をスクリュ式ジャッキを用いて上方向に押し上げて所定のひずみを与える。なお, ひずみは山の頂点に 2 方向ひずみゲージを接着して測定した。この試験における応力の大きさは SCC 下限界以上であればよく, 今回の実験では特に重要とはしなかったが, ひずみは周, 半径方向とも 0.1% とした。平面応力条件での計算応力は, 280MPa で等 2 軸引張り応力になっている。山形に変形した試験片の中央部に直径 50mm のガラス製

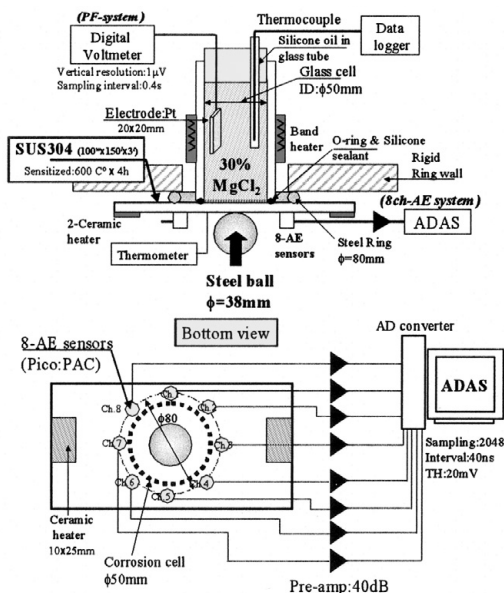


Fig. 1. Experimental setup for equi-biaxial SCC test.

セルを O リングを介して押当て, セル内試験液をバンドヒータで加熱する。なお, 加熱によってひずみはやや低下し, また試験片が長方形であるため, SCC の主伝搬方向は試験片長手方向と直交方向であった。試験溶液は 30mass% の MgCl₂ 溶液で, 温度は 363K に設定したが, 放熱が大きいため試験片にも 2 個の 10 × 25mm 板状セラミックスヒータを設置し, 鋼板温度を 343K に制御した。白金電極を参照電極として, 鋼板電位をデジタルポルトメータで測定し, 離散化データとしてパソコンに転送した。また鋼板の下面には, 8 個の小型 AE センサ (PAC 社製 PICO センサ, 受感部径 4mm, 共振周波数 0.45MHz) を直径 80mm の円上に等間隔に設置してラム波 (板波) AE を計測した。センサ出力は 40dB 増幅し, 高速 A/D コンバータ (Gage Applied Inc 社: Gage Scope 1250) でデジタルデータとして, すでに報告した波形解析システム: ADAS¹³⁾ (AE Data Acquisition and Analyzing System) に取込んだ。AE の音源位置は, ウェーブレット変換によって所定の周波数成分の経時変化を求め, 最大ピーク到達時間差を求め, 仮想音源走査法を用いて標定した。¹⁴⁾位置標定に用いた波は, 非対称 (うねり) 振動する基本モード (A₀ モード) 波である。ガボール関数を用いる連続ウェーブレット変換法や仮想音源走査法については簡単に後述するが, 詳しくは論文^{14), 15)}を参照されたい。なお今回は, 膨大な数の AE が検出されたため, 周波数領域でのウェーブレット変換を行なって計算時間を大幅に減少させた。

3 実験結果および考察

3.1 AE と電位振動

Fig. 2 は試験期間中の電位振動と累積 AE 数である。なお, 電位は Ag/AgCl 電極に換算して示した。試験期間中における白金電極の電位がほとんど変化しないことは, 塩橋照合電極をもつ別の実験で確認している。この試験では, 13 本の SCC が発生したが, 約 2 時間 (7.2ks) おきに行なった目視観察における最初の 4 本の SCC の発生タイミングを SCC: ①~④として時間軸に矢印で示し

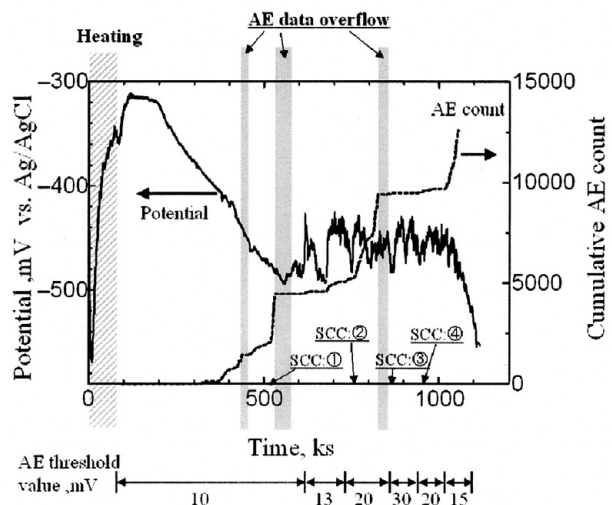


Fig. 2. Change of potential fluctuation and cumulative AE count.

た、図中に示した3本の垂直な灰色バンドは、AE発生数が高すぎて記憶容量を超えたため、データが保存できなかった時間帯である。このため、時間軸の外に示したように、AE取込みのしきい値は、最初の10mVから13→20→30→20→15mVに変化させた。したがって、発生頻度（累積発生曲線の勾配）を議論するための基準は全試験を通じて一定ではない。しかし、同じしきい値期間内なら発生頻度が高いか、低いかは議論できる。この実験では、しきい値を高めに変えているにもかかわらず、12500カウントものAEが検出されている。比較的高いしきい値でこれだけのイベントが検出されたのは塩化物SCCの実験では初めてのことであり^{3), 4)}なお、大型タンクの腐食検出は60dBの増幅率で10mVのしきい値で行われているため、本研究のAE計測設定値(40dB, 10mV)なら、現場装置のSCCモニタリングが可能である^{7), 8)}

腐食電位は220ksから卑方向にシフトしはじめ、600ks以降ではほぼ-440mV～-490mVの範囲で落ち着いていたが、激しい電位振動が観察されている。なお、ハッチングで示した120ksまでの電位変動は、試験液と試験片の加熱にともなうものである。最初のAEは320ksで検出され、次第に発生数が多くなったが、520ks頃に頻発した。この時には、約470 μ m径の矩形孔食から枝分かれしたSCC:①が成長をはじめた。孔食発生時間は正確にはわかっていないが、セル壁を通して観察された孔食は350ks頃である。このとき弱い電位振動が観察されており、AEも検出されている。この期間における詳細については3・4節で議論する。

しきい値を20mVにした720ks～830ks期間でも累積AEカウント数はステップ状に増加しているが、この時期にはSCC:②が発生している。このあとSCC:③や④が発生しているが、SCCの数が多くなるとAEと電位振動との対応が議論できなくなるので、AEと電位振動の関係についての議論はSCC:③の前までに限ることとする。

3・2 SCC形態

膨大な数のAEが検出された理由を調べるために、はじめにSCCの形態を調べた。すべてのSCCは矩形孔食から発生し、表面で激しく枝分れしながら成長し、SCC表面は黒く変色していた。しかし、進展SCCの先端部は金属光沢を示し、液中では輝いて見えた。なお、孔食からのガス（水素）の発生は観察されなかった。Fig. 3には実体顕微鏡による表面SCCを、Fig. 4にはSEM写真を示す。Fig. 3には、SCCの番号を示したが、押し出し点を中心とする直径10～20mmの円上に発生している。枝分かれ前の小さなSCCもある。もっとも大きなSCC:①は、X型の伝搬をし、45°以内に4～5の枝分かれを持っている。Fig. 4(a)は枝分かれを起こす前の小さなSCCであるが、ひび割れた酸化物（甲羅状酸化物という）で埋められた幅の広い部分:(b)、(c)と、酸化物のない細いSCC:(e)で構成されている。酸化物は直径5～10 μ mで甲羅状になっている。なお、断面酸化物のEPMA分析では、クロムと酸素元素が検出されており、FeやNiは検出されていない。酸化物はクロム酸・水酸化物と考

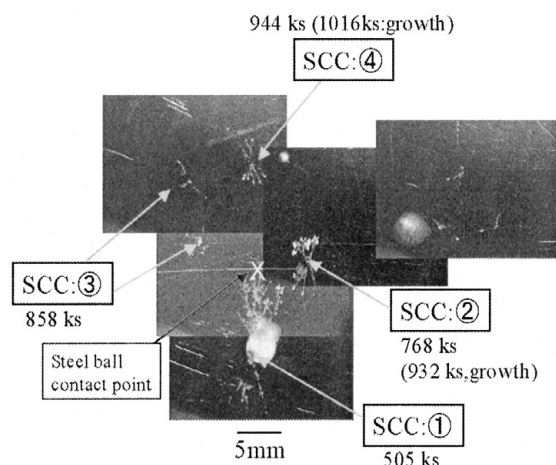


Fig. 3. Stereo-microscopic photo of surface SCC.

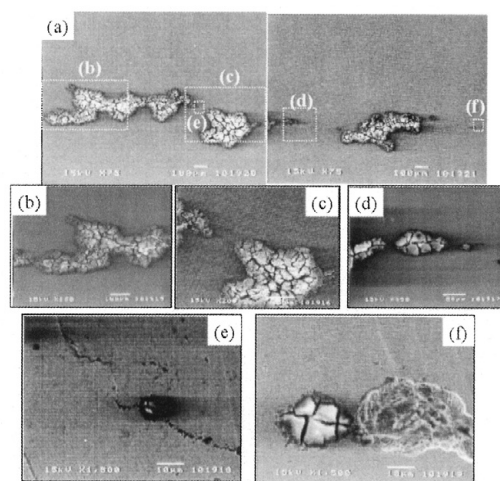


Fig. 4. SEM photos of surface SCC near SCC:②.

えられる。酸化物がある程度の大きさに成長したときに破壊して甲羅状に分裂するとすれば、膨大な数のAEが検出される。

SCC右先端の写真(f)では、甲羅状酸化物のない直径約20 μ mの食孔が見られる。この部分が金属光沢を放っているが、孔食底には数個の小さな食孔が見られる。Fig. 5にはレーザ顕微鏡によるSCC表面と断面A-A'の深さ分布を示す。甲羅状酸化物表面は、基材表面からほぼ30 μ m下にある。すなわち、表面の結晶粒が粒界腐食によって脱落したのち、表面下の粒内や粒界の腐食によって酸化物を生成しながら、その下からSCCが深さ方向に伝播したと思われる。すなわちFig. 4に示した甲羅状酸化物は、30 μ m程度表面下にできた酸化物で、表面から突出しているわけではない。表面粒子が粒界腐食を受けると、粒界に浸透した溶液のpHは加水分解反応によって低下するので、表面結晶粒が脱落するまでに表面下結晶粒やクロム欠乏層は激しい腐食を受けたものと考えられる。このためFig. 4に示した右端(f)では、酸化物がなく孔食底に小さな食孔が観察される。すなわちSCCの発生・伝播過程では、表面の結晶粒が脱落することによるAEと、甲羅状酸化物の生成によるAEの可能性があ

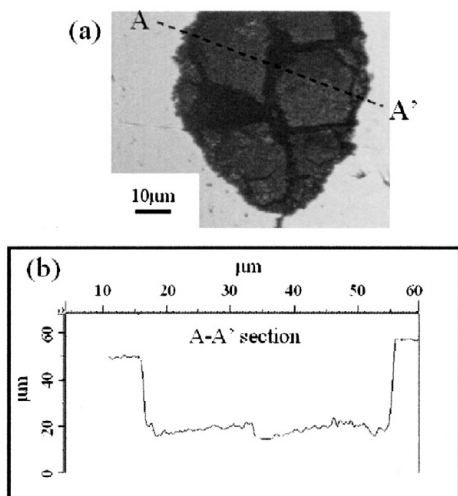


Fig. 5. Pit with surface oxide (a) and transverse depth profile (b) by laser microscope.

る。いずれも膨大な数に達するため、検出 AE も膨大な数に達するものと考えられる。Fig. 6 には甲羅状酸化物のない Fig. 4 (f) の断面光学顕微鏡（エッチングあり）と SEM 写真（エッチングなし）を示す。断面でも枝分れはほとんどないこと、食孔は矩形状であること、表面 SCC は粒界・粒内混在型であるが、内部では粒内型が支配的であることが特徴である。SEM 写真の表面食孔左 10 μm のところには、研磨中に脱落した小さな粒子痕が観察されており、クロム欠乏層に沿った腐食が進んでいたことが窺える。

30mass%, 363KMgCl₂ 溶液での単軸引張り SCC 試験では、Fig. 7 に示すように円状孔食を起点とする SCC が伝播するが、表面での枝分かかれは少なく断面で激しい枝分かかれが見られる。この SCC 形態は、2 軸応力 SCC 試験で生成する SCC 形態とは対称的である。Fig. 8 には、単軸応力²⁾と 2 軸応力試験で得られた孔食の幅と深さの関係を比較して示す。単軸応力試験の円形および楕円状食孔の深さ： d は幅： w のほぼ 30% 程度であるが、2 軸

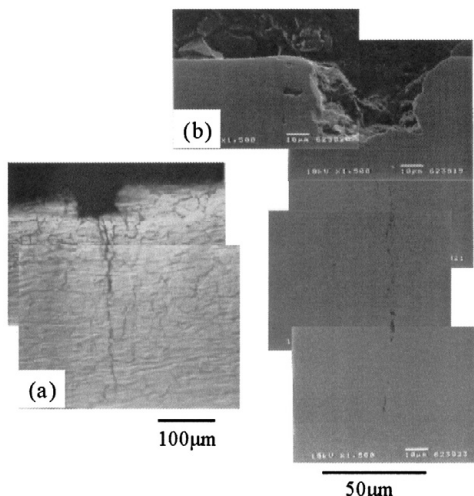


Fig. 6. Optical (a) and SEM (b) transverse photo of SCC front of Fig. 4 (f).

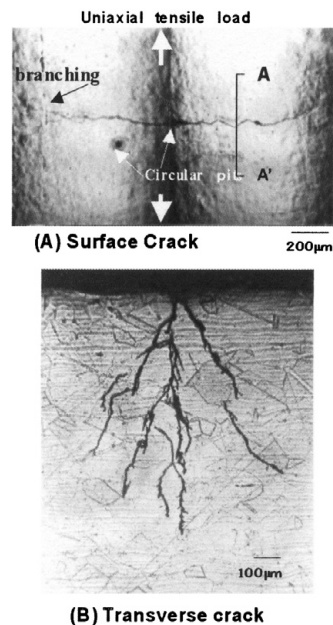


Fig. 7. Surface(a) and transverse(b) photos of SCC subjected to spring type uni-axial tensile loading.

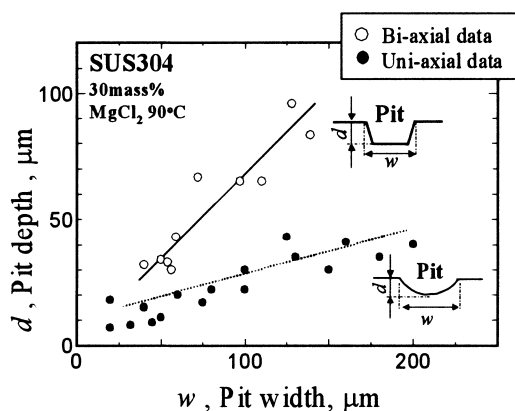


Fig. 8. Relation between pit depth d and width w .

応力腐食試験で発生する矩形孔食の深さは幅の 70% 程度で深い食孔になっている。孔食成長のメカニズムについては調べていないが、深い矩形孔食は、表面結晶粒が粒界腐食と 2 軸引張り応力によって脱落することによって生成されたものと考えられる。

3・3 AE 解析

AE 波形を詳細に調べると、2 種類に分類されることがわかった。Fig. 9 には 2 種類 (Type-I と Type-II) の波形と FFT, ウェーブレット係数等高線図を示す。Type-I は、Type-II よりも高周波数成分をもち、振幅の非常に小さい対称振動する So モード波¹⁶⁾も検出されている。Type-II の周波数成分は 0.15MHz 以下で、A₀ モード波である。以下には、Type-I と Type-II に区別して、それらの発生タイミングと電位振動の関係を議論する。

Fig. 10 には Type-I と Type-II AE に分けて累積数、振幅 (図の ● で、最大振幅波のピーク/ピーク電圧： V_{pp}) と電位の経時変化を示した。Type-I の AE は、SCC：①の起点となる矩形孔食が発生し始めた 360ks ま

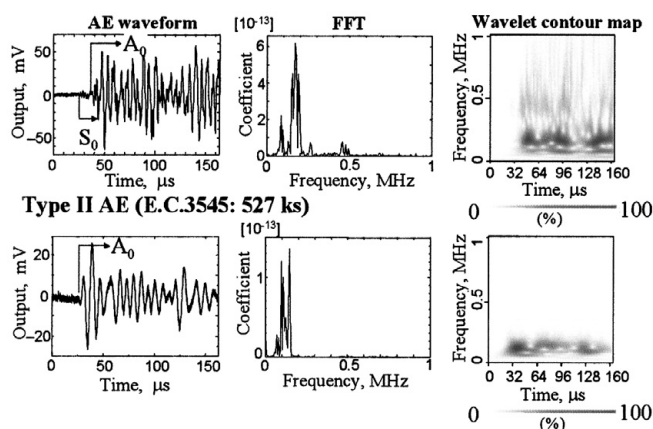


Fig. 9. AE waveforms, frequency spectra and wavelet contour map.

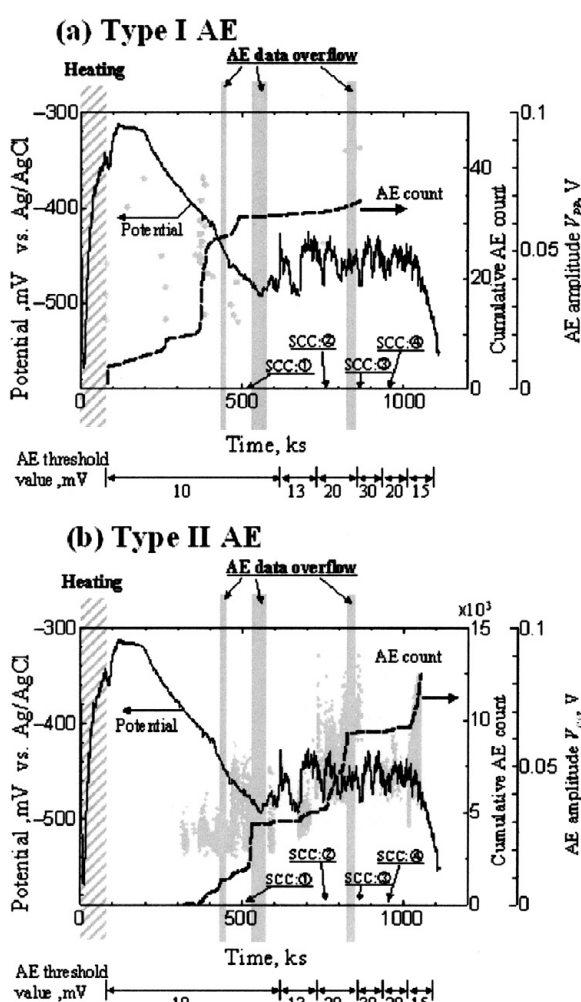


Fig. 10. Change of potential fluctuation and cumulative Type I AE (a) and Type II AE (b) count.

でに約 30 イベント検出されているが、その後の発生はほとんどない。一方 Type-II の AE は、枝分かれ SCC が成長しはじめた 500ks 近傍で急増 (2 000 イベント) したのちその発生は少なくなっているが、SCC : ②が成長し始めた 800ks で再び急増 (5 000 イベント) している。前述のように、全試験を通じて AE 計測のしきい値は一定でないため、同じしきい値期間のみでの議論になるが、

AE の急増はいずれも一定にしたしきい値の期間中に観察されている。振幅 (●) 値は、SCC : ①と②が伝播を開始する時期に大きくなっている。AE システムは、サンプリングできない時間 (デジタルデータにしてコンピューターに転送する時間で ADAS では約 100ms¹³⁾) をすぎて最初に来る波をサンプリングする。Type-I の AE 数が 500ks 以降でほとんどないのは、発生頻度の高い Type-II AE のサンプリングに集中したためと思われる。

AE がどのような現象によって放出されたかを推定することは容易ではないが、高周波数の Type-I AE が SCC : ①の孔食萌芽期に、Type-II AE が SCC 伝播期に検出されたことから判断すると、Type-I は表面結晶粒の脱落によって、Type-II は甲羅状酸化物の破壊によって生成された可能性が高い。溶接管 ESCC の耐圧試験中の脱粒による AE も、高い周波数成分 (センサ共振周波数 : 0.45MHz 近傍) が検出されていた。⁷⁾

検出 AE の発生源を調べるために音源位置標定をおこなった。ラム波のような分散性 AE 波から音源位置を標定するのは難しいが、ここでは連続ウェーブレット変換 (ガボール関数を母関数)¹⁷⁾を用いて、Type-I AE では 0.45MHz 成分の、Type-II AE では 0.15MHz 成分の経時変化を使用した。仮想音源走査法は、コンピューター上で仮想音源を走査させて各センサへの到達時間を計算し、到達時間差と計測時間差の差が最小になる位置を絞込む方法である。なお、SUS304 鋼板を伝搬する A₀ モード波の 0.45MHz における理論群速度は 3095m/s、0.15MHz におけるそれは 2771m/s である。¹⁸⁾

Fig. 11 には、位置標定に使用した Type-I および II AE のチャンネル (Ch.) 2, 4, 5, 8 による検出波とウェーブレット係数経時変化を示す。Type-I AE のウェーブレット係数経時変化 (b) では、Ch. 2, 5, 8 の初動ピークは明瞭でそれらの到達時間を正確に読取れるが、Ch. 4 の 30μs 付近の初動ピークは小さくて読み取れない。これは、周波数に対する感度特性が他のチャンネルと比較して異なり、0.45MHz のウェーブレット強度では明瞭なピークを得られなかったためと考えられる。そのため、図 (b) で

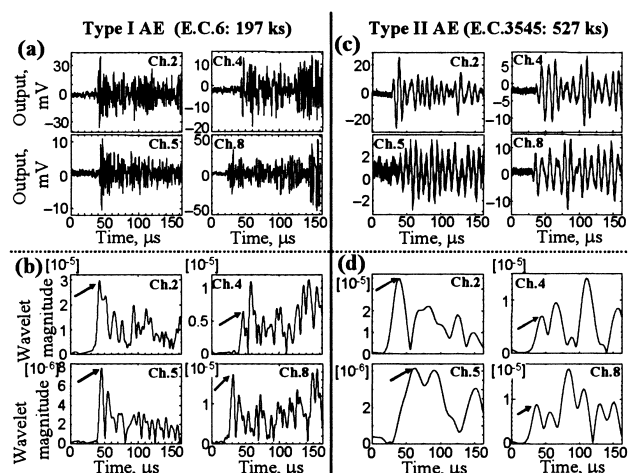


Fig. 11. Waveforms of type I (a) and type II (c) AEs, wavelet coefficient at 450kHz (b) and 150kHz (d).

は初動波から $15\mu\text{s}$ 後の明瞭に読取れるピークの到達時間を読み取った。なお、到達時間を $15\mu\text{s}$ 読み間違えると音源の位置は 30mm もずれる。Type-II では、ピークが鋭くないので到達時間誤差が数 μs に達する。Fig. 12 は、Type-I AE の位置標定結果である。楕円は SCC 発生位置で番号は Fig. 3 の SCC 番号である。AE が何処から発生したかを議論するには標定精度が悪すぎるが、多くは SCC : ① の右に集中している。SCC : ① の孔食からの AE と考えられる。Fig. 13 には 300ks から 800ks までの Type-II の音源位置の変化を示した。膨大な数の Type-II AE が検出されたが、4 個のセンサが十分な振幅をもつイベントは少なく、位置標定が出来たものはかなり少ない。300ks から 500ks では SCC : ① の右に集中している。700ks から 900ks では SCC : ② の右に標定されている。音源は全般的にやや右方向にずれているが、ある程度は SCC 発生順に追従している。しかし、Type-I の AE は高周波数であったが、破壊モードや速度が推定できる So モード波が十分な振幅で検出されていないため、音源の物理量についての議論はできなかった。

電位変動と AE の発生タイミング、振幅 (○および●)

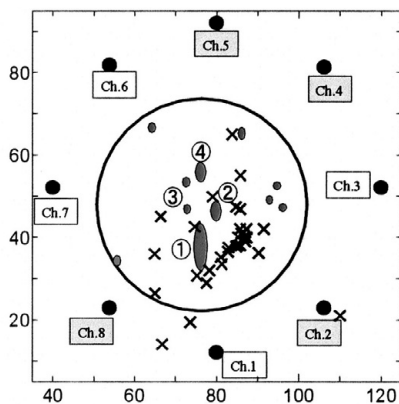


Fig. 12. Source locations of Type I AEs.

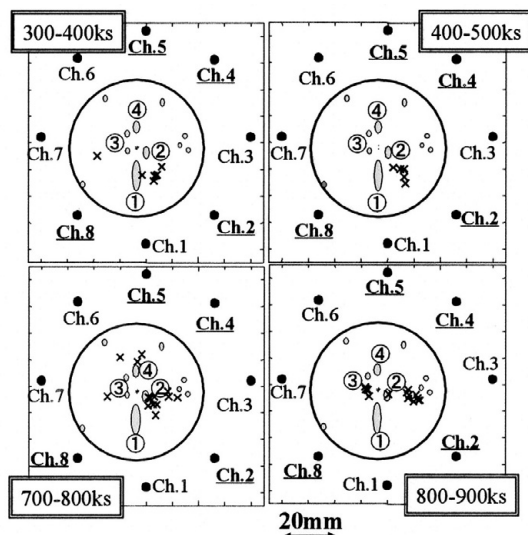


Fig. 13. Change of source locations of Type II AEs with four test time.

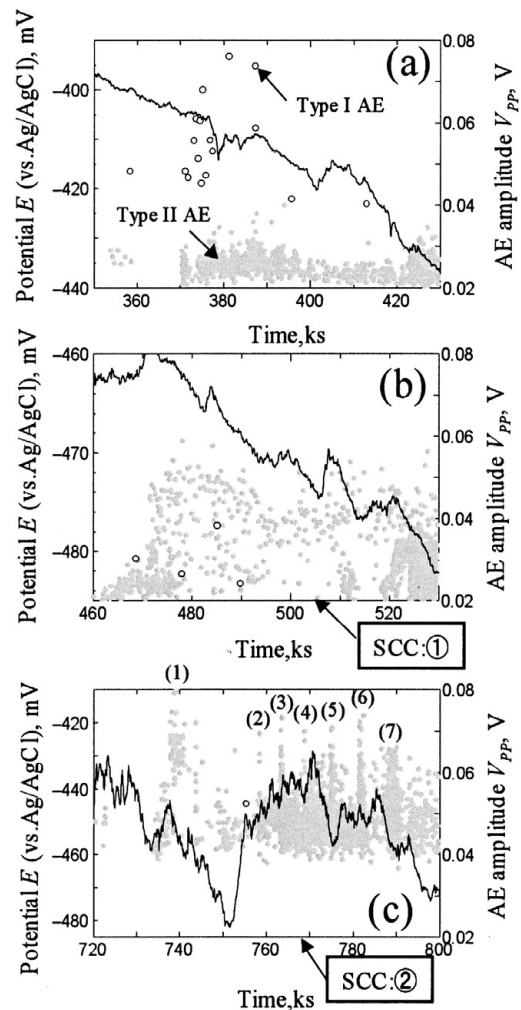


Fig. 14. Change of potential fluctuation and AE amplitude in 350-430ks (a), 460-530ks (b) and 720-800ks (c).

の関係を Fig. 14 にまとめた。(a) は 350-430ks, (b) は 460-510ks, (c) は 720-800ks でのデータである。(a) は SCC : ① の起点となる孔食の萌芽期で、377ks では卑方向の電位シフトと回復 (井上による RD-type¹⁹⁾) がみられ、10ks 早い時刻から 0.04V を超える Type-I の AE と小さな振幅の Type-II AE が検出されている。(b) は SCC : ① が成長を開始する期間で、電位変動はほぼ (a) と同じであるが、 0.04V 以上の振幅をもつ Type-II の AE が 470ks 頃から頻発している。クロム酸化物が割れはじめたものと思われる。(c) は SCC : ② の発生期間であるが、高周波数の RD-Type と思われる電位変動が頻発している。大きな振幅の AE が図中の (1)~(7) で示した時間帯で間欠的に多発しているが、(1), (2), (3), (6) は電位が卑方向へシフトしはじめる時刻とほぼ一致している。酸化物が破壊して沖合い溶液が錆の内部に浸透してアノード溶解を引き起すというメカニズムが考えられる。電位のシフト量は大きなものでは 20mV に達している。このシフト量は、酸化物を生成しない粒界型 SCC で観察されたシフト量 ($6 \sim 8\text{mV}$)¹²⁾ に比べて 2~3 倍も大きい。

4 結 論

面外押し変形を与えた SUS304 銅板の 30mass% MgCl_2 の 363K における SCC 試験中の AE と電位振動を測定し、SCC の発生が検出できるか否かを調べた。結果は以下の様に要約される。

(1) 等 2 軸引張り応力を受ける上記試験法では、矩形孔食を起点とする粒界・粒内混在型 SCC が進展するが、表面 SCC は初期から枝分かれし、甲羅状クロム酸化物が生成する。進展 SCC の先端には甲羅状クロム酸化物はみられず、孔食底には微細な食孔が観察される。

(2) 矩形孔食の深さは、単軸引張り試験で観察される楕円状孔食のそれよりも深い。孔食内のクロム酸化物は表面から 1 粒子程度低い高さである。表面層のほぼ 1 粒子層が粒界腐食によって脱落し、表面下粒子の腐食によって甲羅状の酸化物が生成するものと考えられる。

(3) この系では膨大な数の AE が検出され、卑方向に急速にシフトする電位振動 (RD-type) が発生した時に、0.04V 以上の大振幅な AE を検出した。AE 振幅と電位振幅の関係およびそれらの発生タイミングは、材料と環境、応力の組み合わせによって変化することが考えられるが、これらについては今後実験を重ねて定量化する必要がある。

(4) 孔食の発生時には RD-type の電位振動が観察され、高周波の AE (Type-I) が 30 イベント程度検出された。この AE は、粒子の脱落によって放出されたものと考えられた。一方 SCC が伝播し始めると、 A_0 モードが主成分の低周波数ラム波 AE (Type-II) が 12 500 イベントも検出されるが、クロム酸化物の破壊が AE 源になっているものと考えられる。

(5) かなり複雑な SCC 形態を示す SCC 試験条件において、電位振動と AE は孔食と SCC の発生伝播を精度よく検出した。AE の放出機構 (音源の物理) については未解明な点も多いが、上記 (3) のように粒界腐食にともなう粒子の脱落やクロム酸化物の破壊によるものと考えられる。

本研究は、文部科学省 21 世紀 COE プログラムおよびハイテクリサーチセンター整備事業の一環として行われた。関係者各位に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 辻川茂男, 材料と環境, **47**, 2 (1998).
- 2) 竹本幹男, 化学工学論文集, **6**, 441 (1980).
- 3) S. Fujimoto, M. Takemoto and K. Ono, J. Acoustic Emission, **19**, 63 (2001).
- 4) 竹本幹男, 材料と環境, **53**, 511 (2004).
- 5) H. Okada, Y. Yukawa and H. Tamura, Corrosion, **30**, 253 (1974) and **32**, 201 (1975).
- 6) 竹本幹男, 中澤知之, 材料と環境, **44**, 166 (1995).
- 7) 米津明生, 伊藤進一, 諸藤浩一, 佐藤昌一, 長 秀雄, 竹本幹男, 材料と環境, **54**, 329 (2005).
- 8) 竹本幹男, 長 秀雄, 米津明生, 日本非破壊検査協会第 4 回保守検査シンポジウム予稿集, **4**, 43 (2005).
- 9) D. G. Chakrapani and E. N. Pugh, Mett. Trans. A, **6A**, 1155 (1975).
- 10) H. Cho and M. Takemoto, J. Acoustic Emission, **22**, 224 (2004).
- 11) 井上博之, 山川宏二, 福田 望, 材料, **43**, 1400 (1994).
- 12) 藤本信也, 竹本幹男, 材料と環境, **53**, 309 (2004).
- 13) 林 泰久, 竹本幹男, 材料と環境, **40**, 478 (1991).
- 14) H. Yamada, Y. Mizutani, H. Nishino, M. Takemoto and K. Ono, J. Acoustic Emission, **18**, 51 (2000).
- 15) M. Takemoto, H. Nishino and K. Ono, Acoustic Emission-Beyond the Millennium, edited by T. Kishi, Elsevier, 35 (2000).
- 16) 笠間秀雄, 竹本幹男, K. Ono, 非破壊検査, **49**, 269 (2000).
- 17) AGU Vallien wavelet, www.Vallen.de/download
- 18) I. Viktorov, "Rayleigh and Lamb Waves" (1967) Plenum Press, New York.
- 19) 井上博之, 材料と環境, **52**, 444 (2003).