

© 1992 ISIJ

論 文

チオ硫酸イオンを含む塩化物水溶液中における
SUS316 L 鋼の応力腐食割れ感受性電位域

柴田俊夫*・春名匠*2

Susceptible Potential Region for Stress Corrosion Cracking of
SUS316L Stainless Steel in Chloride Solution Containing
Thiosulfate Ion

Toshio SHIBATA and Takumi HARUNA

Synopsis:

Susceptible potential region for stress corrosion cracking, SCC, of SUS316L stainless steel has been investigated in 20 mass% NaCl aqueous solution containing 10^{-2} kmol \cdot m $^{-3}$ thiosulfate ion by using a slow strain rate technique, SSRT. Potential from -400 to -340 mV_{Ag/AgCl} was controlled either chemically by changing the concentration of dissolved oxygen, DO, in the solution or electrochemically by using a potentiostat. In both cases, cracks always generated at pits. In case of controlling DO, free corrosion potential raised and a shape of pit and crack changed with increase in the concentration of DO. Strain at the maximum stress, e_{SCC} , was, however, independent of the concentration of DO, and depended on the number of cracks in the fracture surface. In case of applying potential, localized corrosion was found to generate beyond a critical potential of -370 mV_{Ag/AgCl}; cracks were observed from -370 to -340 mV_{Ag/AgCl} and pit size increased with increase in applied potential. e_{SCC} was found not to be sensitive to the applied potential, but to be mainly decided by the strain at which pit generated. The crack growth rate which was estimated by the analysis of the stress-strain curves was found to be almost constant in the potential range between -370 and -340 mV_{Ag/AgCl}.

Key words: stress corrosion cracking; slow strain rate technique; SUS316L stainless steel; chloride solution containing thiosulfate ion.

1. 緒 言

高合金鋼・高 Ni 合金などの高耐食性油井管が、硫化水素および塩化物を含む油井環境、いわゆるサワー環境¹⁾中において使用される²⁾場合、応力腐食割れ (SCC) の発生が認められ³⁾、油井管の材料寿命に対して重要な問題になっている。

現在、模擬サワー環境として NACE 溶液⁴⁾が広く用いられているが、我々は、この溶液に代わる、硫化水素を必要としない模擬サワー環境として注目されている、チオ硫酸イオン (S₂O₃²⁻) を含む塩化物水溶液⁵⁾⁶⁾を用いて、SUS316L 鋼溶体化材の SCC を低ひずみ速度試験 (SSRT) により調べ⁷⁾、SCC 感受性が NaCl 濃度、S₂O₃²⁻ 濃度および pH などに大きく依存することを明らかにした。また、SCC 感受性の高い試験条件におい

て試料の示す自然電位が狭い範囲に存在することを認めた。そこで、本研究では、SSRT 法を用いてチオ硫酸イオンを含む塩化物水溶液中の SUS316L 鋼の SCC 挙動を溶存酸素濃度および電位に注目して検討した。

2. 実験方法

供試材には Table 1 に示した化学組成の SUS316L 鋼溶体化材を用いた。この供試材は、ゲージ径 4 mm、ゲージ長 19.3 mm の丸棒型引張試験片⁷⁾に加工され、そのゲージ部は SCC 試験に供する直前にエメリー紙

Table 1. Chemical composition of SUS316L stainless steel (mass%).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
0.029	0.70	1.37	0.032	0.001	12.09	16.87	2.06	bal.

平成 2 年 4 月本会講演大会にて発表 平成 3 年 3 月 25 日受付 (Received Mar. 25, 1991)

* 大阪大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Osaka University)

*2 大阪大学大学院 (Graduate School, Osaka University, 2-1 Yamadaoka Suita 565)

(~6/0) で研磨された。

試験溶液は、前報⁷⁾において高い SCC 感受性を示した、20 mass% NaCl + 10^{-2} kmol \cdot m $^{-3}$ Na₂S₂O₃ 水溶液であり、HCl により pH 4 に調整した。この溶液の調整には、特級の試薬および蒸留水を使用した。溶液量は 9.0×10^{-4} m³ (900 mL)、液温は 353 K とした。

SCC 試験は SSRT 装置 (東伸工業製: MINI-1000T) にて行われ、ひずみ速度には比較的短時間で SCC を再現することができる 8.7×10^{-7} s $^{-1}$ を選んだ。参照電極には Ag/AgCl (3.3 kmol \cdot m $^{-3}$ KCl, 室温) を用い、以下に示すすべての電位はこの参照電極を基準に示した。

本実験では、溶液内の溶存酸素濃度の調整のため、試験片を装着するセルとは別の容器にて、酸素濃度の調節された酸素-窒素混合ガスを溶液中に吹き込み、ポンプ (排出量: 5.0×10^{-7} m³ \cdot s $^{-1}$ (30 mL \cdot min $^{-1}$)) にて試験溶液をセルと容器の間に循環させた。用いた混合ガス中の酸素濃度は、0, 2, 21, 50, 100 vol% とした。

実験手順を次に示す。3.6 ks 以上ガス吹込みを行った約 333 K の溶液を、試料を設置したセル内に導入し、セル内のヒーターにより 353 K に保持した。溶存酸素濃度を变化させる試験の場合には、溶液をセルに導入後 10.8 ks 自然浸漬状態に保持し、SSRT 試験を開始した。一方、定電位 SSRT 試験の場合には、応力無付加・自然浸漬状態中の局部腐食発生を防ぐために、試料を設置したセル内に溶液を導入した直後に、カソード電流が流れる電位である -400 mV を付加し、1.8 ks 保持後、所定の電位に設定し SSRT 試験を開始した。両試験中には、クロスヘッド変位、荷重および自然電位、または分極電流を同時に測定した。

破断した試料を詳細に検討するために、試料に付着している腐食生成物を、約 0.05 kmol \cdot m $^{-3}$ H₂SO₄ 中での超音波洗浄により除去した後、試料破面近傍を走査電子顕微鏡で観察した。

3. 実験結果

3.1 試験溶液の循環の有無による SCC 感受性の差異

本研究では、ポンプにより溶液を循環させるため、溶液の循環の有無による SCC 感受性の变化を調べた。試験は大気開放下で行われた。試料変形中の応力および自然電位の変化に及ぼす溶液の循環の影響を Fig. 1 に示した。ここで示されている応力およびひずみは公称量である。

循環溶液中と静止溶液中での応力の変化を比較すると、降伏応力には変化がみられなかったが、最大応力を

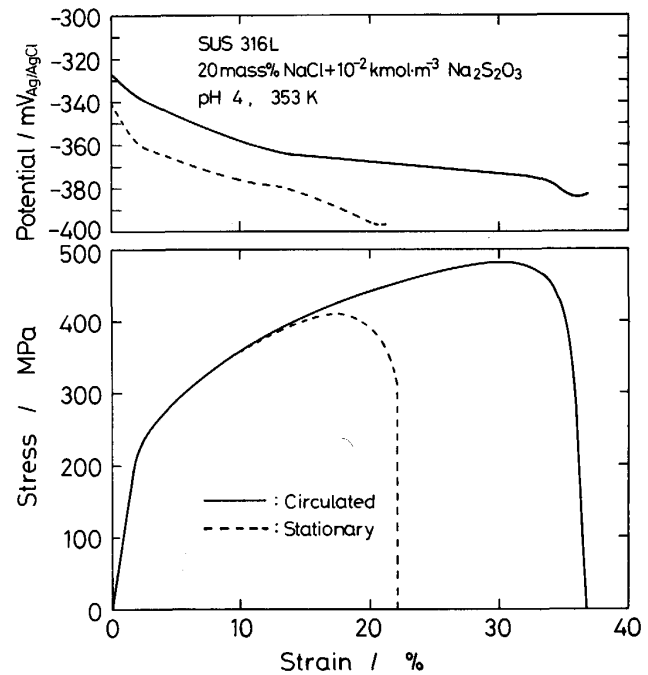


Fig. 1. Effect of circulation of the solution on the stress-strain curves with free corrosion potential.

示すひずみ量 (ϵ_{SCC}) は溶液を循環することにより増加した。また、溶液の循環によって、自然電位は全体的に上昇し、しかも、ひずみの増加に伴う自然電位の降下量は大きく減少した。また、ゲージ部に発生したき裂数は、静止溶液中では 15 個前後であったのに対し、循環溶液中では、6 個程度にまで減少した。この溶液の pH は 4 であるので、溶存酸素の還元反応が試料に対するカソード反応に大きな影響を与えていると思われる⁸⁾。したがって、溶液を循環させることにより溶存酸素濃度が増大し⁹⁾、自然電位が静止溶液よりも上昇すると思われる。また、循環溶液中では、溶存酸素の還元反応により試料のほぼ全表面で水酸化物イオンが形成され、試料表面の pH が増大し¹⁰⁾、不動態化皮膜が安定になるために、孔食の発生数が抑えられるものと思われる。

3.2 SCC に対する溶存酸素濃度の影響

SSRT 試験に先立ち、上述のガス吹込み法によって溶存酸素濃度が制御できることを確認するために、白金電極を用いて 20 mass% NaCl (pH 4) 循環溶液中でカソード分極曲線を測定した。この分極曲線には、-700 mV 付近で酸素の還元波が見られ、この電位での電流密度と吹込みガス中の酸素濃度との間には、一次の関係が認められた。したがって、この方法により溶存酸素濃度を制御できることが確認された。

次に、応力-ひずみ曲線および自然電位-ひずみ曲線に及ぼす溶存酸素濃度の影響を Fig. 2 に示した。すべて

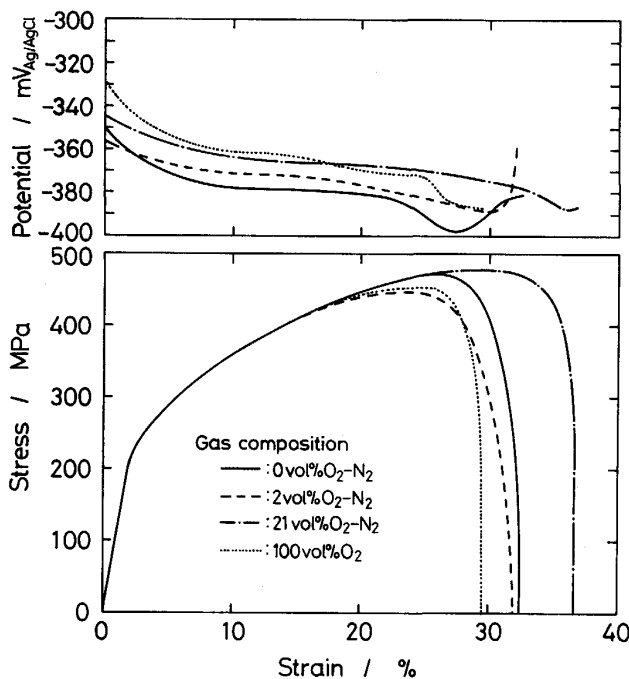


Fig. 2. Effect of the composition of the gas introduced into the solution on the stress-strain curves with free corrosion potential.

Table 2. Free corrosion potential, the strain at the maximum stress, e_{SCC} , and the number of cracks in the fracture surface depending on the composition of the gas introduced into the solution.

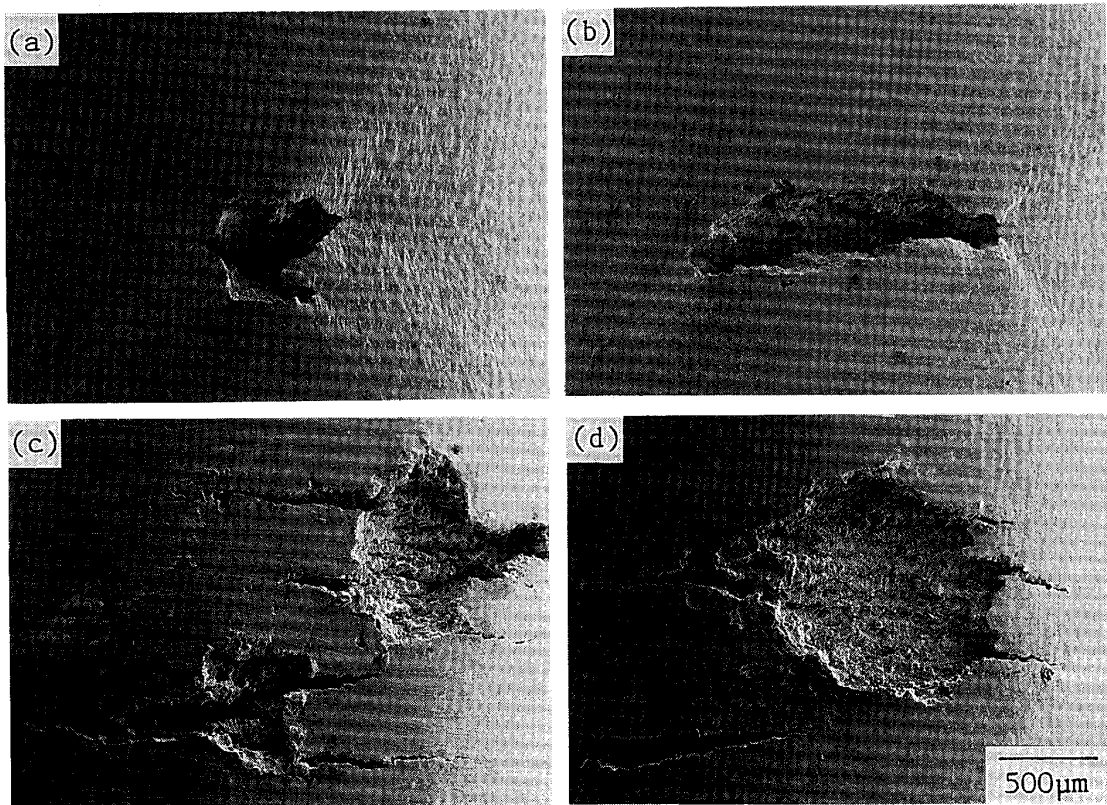
Gas composition	Corrosion potential (mV _{Ag/AgCl})	e_{SCC} (%)	Number of cracks in fracture surface
0 vol% O ₂ -N ₂	-382	26.9	1
	-380	26.3	1
	-378	20.9	2
	-375	19.1	2
2 vol% O ₂ -N ₂	-375	23.7	3
	-379	19.1	2
21 vol% O ₂ -N ₂	-366	30.9	1
	-366	30.9	1
50 vol% O ₂ -N ₂	-370	21.3	3
100 vol% O ₂	-360	24.9	2
	-365	21.1	3

の溶存酸素濃度において、自然電位は、試料を約5%変形させるまでに急激に低下し、その後ほぼ定常値を示した。最大応力まで変形させると、自然電位はさらに低下し、応力が低下するひずみ領域では自然電位は上昇し、やがて試料は破断した。Table 2に示した変形量12%における自然電位に代表されるように、自然電位は溶存酸素濃度の増加とともに上昇した。このことは、溶存酸素がカソード反応に影響を与えていることを示している。しかしながら、この溶存酸素濃度の変化に伴う自然電位の変化の差(約20 mV)は、従来報告されている

常温淡水中における差(500~1000 mV)¹¹⁾よりもはるかに小さい。溶存酸素濃度は、NaCl濃度の増加に伴い、また、温度の増加に伴い減少することが知られており、この溶液中の飽和溶存酸素濃度は常温淡水中と比較して非常に小さい。したがって、この溶液中では、溶存酸素濃度の変化に伴う自然電位の変化が小さくなったと思われる。一方、応力-ひずみ曲線を見ると、溶存酸素濃度の変化に対して、最大応力、もしくは e_{SCC} に変化が現れている。Table 2には、吹込みガス中の酸素濃度と e_{SCC} および破面内に認められたき裂数の関係も示した。この表から、 e_{SCC} と溶存酸素濃度の間には明確な関係がみられないことがわかる。しかしながら、き裂数の少ない破面を有する試料において e_{SCC} が増加する傾向が認められる。次に、破断後の試料側面に生じたき裂形状のSEM写真をPhoto. 1に示した。Photo. 1(a)から順に、吹込みガス中の酸素濃度が0, 2, 21, 100 vol%の条件でのき裂形状である。酸素濃度が0 vol%の場合、数個の食孔が観察され、そのいずれにおいてもき裂はほとんど進展せず、引張方向に垂直な方向の食孔端に、引張方向に対してほぼ45°の方向にひずみ線が明確に認められた。このことより、この酸素濃度(自然電位の定常値:-380 mV)では、試料に発生した食孔には力学的な作用しか働いておらず、応力腐食割れの条件にはなっていないことがわかる。一方、酸素濃度が2 vol%程度でも、食孔から引張方向に垂直な方向にき裂が進展したが、その先端では引張軸に対して45°の方向にひずみ線が認められ、き裂の進展が最終変形段階で困難になったことを示していると思われる。自然電位の定常値が-375 mV、最大応力近傍の自然電位が-380 mV以下であることを考慮すると、自然電位が定常値を示すひずみ域においてき裂が進展し、自然電位が-380 mV以下になるとき裂進展が停止するものと思われる。酸素濃度が21 vol%の場合、食孔の径が大きくなり、しかもき裂開口量が小さく、き裂長さも長くなり、き裂先端でひずみ線が認められなくなった。このことは、この条件(ほぼ全ひずみ領域で自然電位が-380 mV以上)でき裂の進展が容易に起こることを示唆すると考えられる。酸素濃度が100 vol%の場合、食孔径が非常に大きくなり、き裂長さは酸素濃度21 vol%の場合と変わらないが孔食底部にき裂が認められなかった。

3.3 SCCに対する付加電位の影響

上述のように、溶存酸素濃度の増加にともない、 e_{SCC} は明瞭な関係を示さなかったが、自然電位は上昇し、食孔およびき裂の形状が顕著に異なった。したがって、この系での応力腐食割れが電位に影響されることが示唆さ



(a) 0 vol% O₂-N₂ (b) 2 vol% O₂-N₂ (c) 21 vol% O₂-N₂ (d) 100 vol% O₂
 Photo. 1. Crack shapes depending on the gas composition.

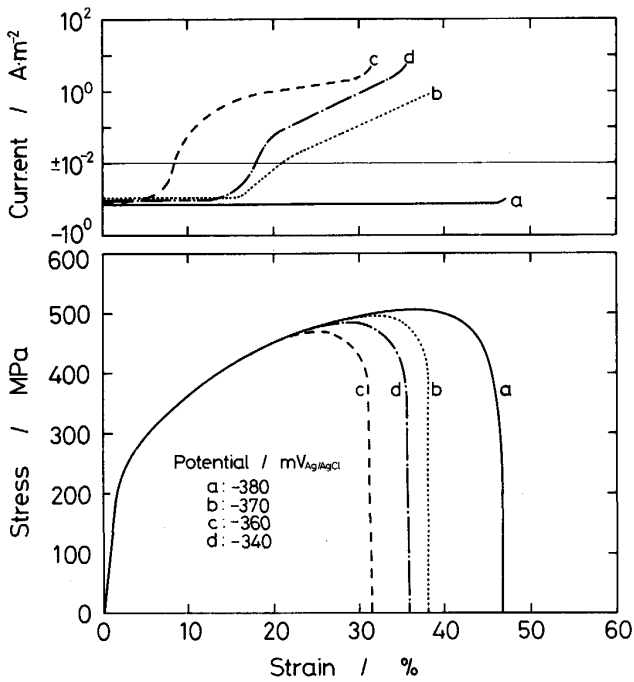


Fig. 3. Effect of applied potential on the stress-strain curves with current density.

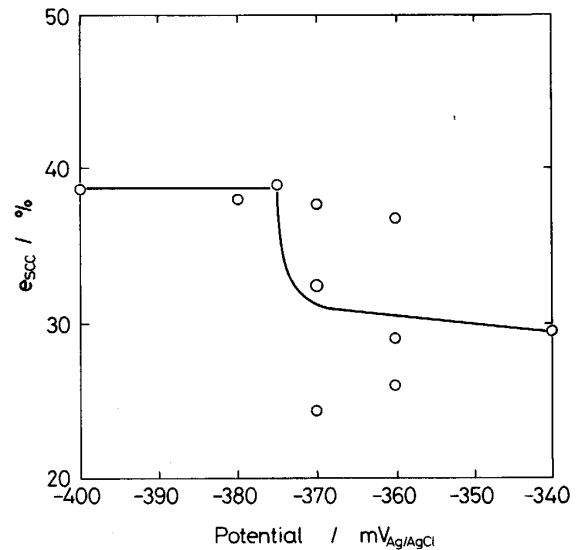
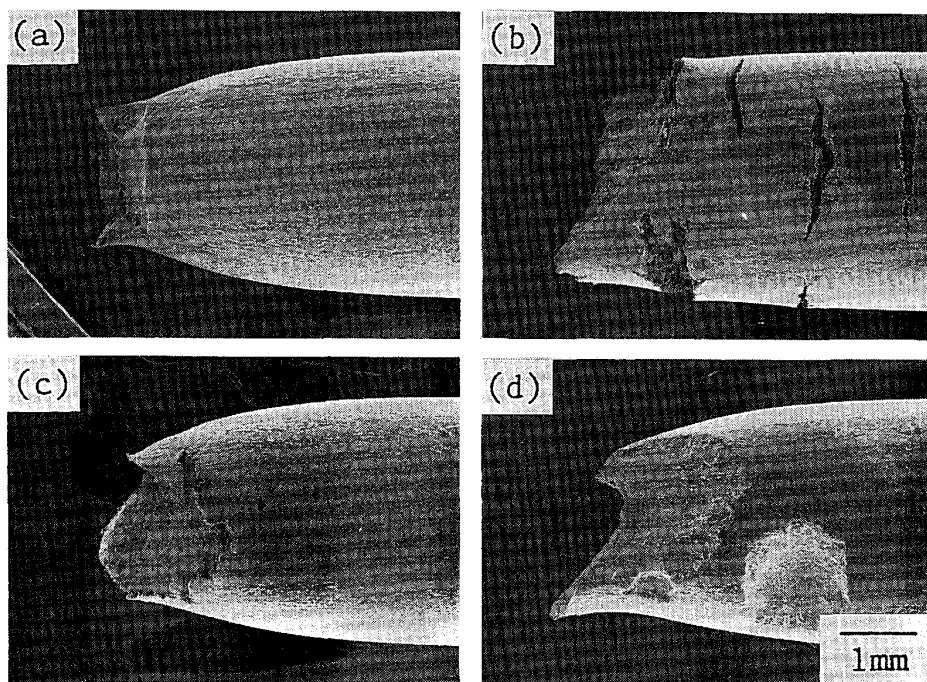


Fig. 4. Dependence of e_{SCC} on applied potential.

れた。そこで、次に定電位 SSRT 試験を行い、試料変形中の応力および電流密度の変化、ならびに、試料破断

後のき裂の形状を調べた。変形中の応力および電流密度の変化を Fig. 3 に示した。-375 mV 以下の電位では、試料が破断するまでカソード電流を示し、この電位域ではほぼ同程度の e_{SCC} を示した。一方、-370 mV 以上の電位では、変形中にカソード電流からアノード電流に変化し、アノード電流の増大方向へ変化し始めたときの



(a) $-380 \text{ mV}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ (b) $-370 \text{ mV}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ (c) $-360 \text{ mV}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ (d) $-340 \text{ mV}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$
 Photo. 2. Crack shapes depending on applied potential.

ひずみ量が小さいほど e_{SCC} も減少する傾向がみられた。次に、 e_{SCC} の電位依存性を Fig. 4 に示した。 -375 mV 以下の電位域では e_{SCC} に変化が見られず、ほぼ 38% と大きな値を示した。一方、 -370 mV 以上の電位域では e_{SCC} の減少が見られる。各電位での最小 e_{SCC} における割れ破面近傍を Photo. 2 に示した。 -375 mV 以下 (Photo. 2(a)) では、破断後の試料表面には孔食がみられず、延性破面を示していた。この電位域では、試験中カソード電流が流れていたことから、付加電位が臨界孔食電位以下になっており、局部腐食の発生が抑制されたと思われる。一方、 -370 mV (Photo. 2(b)) では微小食孔から成長したき裂が数多く見られ、破面は断面収縮率の小さな脆性破面を示した。この破面の詳細な観察から、前報⁷⁾と同様、き裂進展前期は粒界割れにより、き裂進展後期は粒内割れによりき裂が進展することが確認された。電位を上昇させるにつれ食孔径が大きくなり、 -340 mV (Photo. 2(d)) では、き裂がみられず、孔食の成長による破断が観察された。また、SCC 感受性を示したすべての試料には、その破面内に 2~3 個のき裂が認められた。これらのき裂形状の電位依存性は、溶存酸素濃度を変化させた SSRT 試験での、溶存酸素濃度に対応した定常状態の自然電位とき裂形状の関係 (Photo. 1) と非常によく一致した。

以上の結果をまとめると、SSRT 試験中の局部腐食発生の臨界電位は -370 mV であり、き裂の発生源は食

孔であった。破断後の破面観察により、き裂は $-370 \sim -340 \text{ mV}$ と非常にせまい電位範囲で観察され、電位が上昇するにつれて、き裂の進展より孔食の成長が優先することが認められた。

4. 考 察

4.1 孔食およびき裂の発生条件

定電位 SSRT 試験の結果、き裂の発生する電位域は $-370 \sim -340 \text{ mV}$ であり、また、このき裂は食孔を起点として成長したものである。したがって、この SSRT 試験条件における孔食発生の臨界電位は -370 mV とみなすことができる。この結果は前報⁷⁾で報告した、SSRT 試験中に測定した孔食電位 (電位ステップ法: $10 \text{ mV}-60 \text{ s}$) 約 -280 mV に比べ、非常に低い値となっている。動電位法による孔食試験法では、測定される孔食電位は定電位法よりも高く評価されることが知られている¹²⁾。本実験の定電位 SSRT 試験の場合、最も速く破断する条件において、破断には約 232 ks (約 2.7 日) を要するので、従来用いられる動電位法 (所要時間: 約 $1.2 \sim 3.6 \text{ ks}$) での測定値よりも低い、孔食発生の臨界電位に近い値が観測されたと思われる。

ところで、窒素ガスにより脱気した静止溶液中で荷重無付加の試料を自然浸漬試験すると自然電位は -400 mV 以下と低く、孔食は起こらない⁷⁾。脱気した循環溶液中では静止溶液中とは異なり、荷重無付加の試料が示

す自然電位は、浸漬初期に孔食電位（約 -200 mV）にまで上昇しその後降下した。また、試料表面には、前述したように孔食が発生していた。したがって、今回の脱気方法では溶液に微量の酸素が溶存していると考えられる。しかし、この脱気条件（定常状態の自然電位： -380 mV）では、食孔からき裂が発生しないこと、および、2 vol% の酸素濃度条件（定常状態の自然電位： -375 mV）でみられたように、変形前期では食孔からき裂が発生・進展したが、変形後期（自然電位 < -380 mV）ではき裂の進展が困難になったことより、き裂の進展には、約 -380 mV 以上の電位が必要であると思われる。

4.2 SCC 感受性と局部腐食発生時のひずみ量の関係

定電位 SSRT 試験では、分極電流がアノード方向に変化し始めたときのひずみ量 (e_f)、すなわち、局部腐食発生時のひずみ量が小さいほど e_{SCC} が減少する傾向がみられた。そこで、 e_f と e_{SCC} との関係を Fig. 5 に示した。この図より、 e_{SCC} は付加電位に依存せず、 $e_f \leq 30\%$ では e_f の増加にともない e_{SCC} がほぼ直線的に増加し、 $e_f > 30\%$ では e_{SCC} は約 38% とほぼ一定値を示すことがわかった。

一方、溶存酸素濃度を変化させた SSRT 試験の結果、破面内に 2 個以上のき裂を有する試料の e_{SCC} が、溶存酸素濃度に依存せず、20~25% の範囲でばらつきを生じた。また、これらの試料には、試験前にすでに孔食が発生していた。したがって、この試験における e_{SCC} は、Fig. 5 における $e_f=0\%$ のとき、すなわち、試験前に局

部腐食が発生したときの e_{SCC} に対応すると考えることができる。定電位試験の結果である Fig. 5 において、 $e_f=0\%$ にまで外挿したときの e_{SCC} 範囲は 20~25% となり、前述の溶存酸素濃度を変化させた試験での e_{SCC} 範囲と非常によく一致した。

したがって、溶存酸素は試料の自然電位を浸漬初期に孔食電位にまで上昇させることで孔食の発生に寄与し⁷⁾、SCC 試験中の自然電位を高める働きをするが、この自然電位範囲およびき裂の見られた定電位範囲では e_{SCC} は電位に依存せず、局部腐食発生時のひずみ量に大きく依存することが明らかとなった。

4.3 見かけのき裂進展速度

溶存酸素濃度を変化させた SSRT 試験の結果、溶存酸素濃度に対して e_{SCC} が相関性を持たず、破面に有するき裂数に依存する傾向がみられた。また、定電位 SSRT 試験の結果も合わせると、破面内のき裂数が 2~3 個の場合、 e_{SCC} は局部腐食発生時のひずみ量に依存した。そこで、破面内のき裂数を考慮して e_{SCC} を評価するために、次に示す見かけのき裂進展速度の推定を試みた。まず、非腐食環境中でこの材料の引張強さ (748 MPa: 真応力) と腐食環境中での最大荷重から計算される最大荷重時の SCC 破面面積を求め、その破面に存在するき裂数より 1 個当たりのき裂面積を求めた。次に、き裂形状を半円形と仮定し、き裂 1 個当たりの見かけのき裂半径 (R) を求めた。この R と局部腐食進展時間 (= $(e_{SCC} - e_f)/\dot{\epsilon}$, $\dot{\epsilon}$: ひずみ速度) との関係を Fig. 6 に示した。この図にみられるように、見かけのき裂半径 R は電位に依存せず、局部腐食進展時間に対してほぼ直線

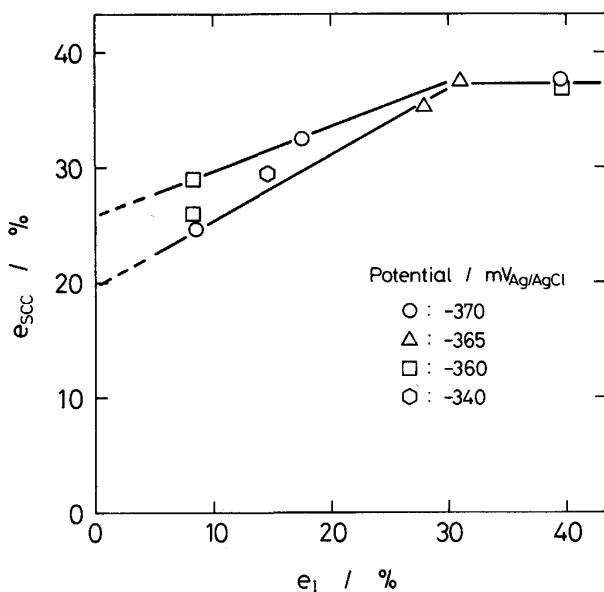


Fig. 5. Relations between e_{SCC} and the strain, e_f , at which current starts to increase to anodic direction.

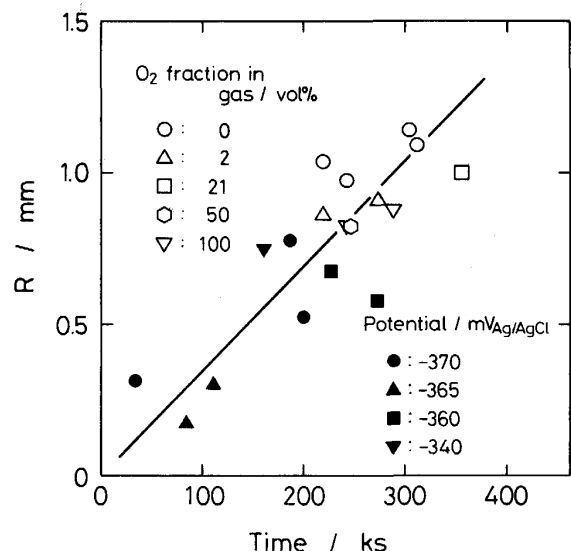


Fig. 6. Relations between the apparent radius of a crack, R , and time passed during crack growth.

的に増加することが明らかとなった。この直線の傾きで示されるき裂進展速度は溶存酸素濃度および付加電位に関わらずほぼ一定値 ($3.5 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) を示した。したがって、この結果より、今回検討した電位範囲 (溶存酸素濃度に対応した自然電位値を含む) では、き裂進展速度は電位に対して独立であり、また、破面に存在するき裂数が少ないほど、長時間に対する SCC 破面面積が減少するため、 e_{SCC} が増大することが明らかとなった。従来、SSRT 法で評価される SCC 感受性指数には、応力-ひずみ曲線から得られるパラメーター (e_{SCC} ・最大応力など) や SCC 破面率を用いる場合が多いが、これらのパラメーターから決定される SCC 感受性指数は、本実験のように、ゲージ部に発生するき裂数、さらには、破面内に存在するき裂数によって大きく変化するのでき裂数を考慮した SCC 感受性指数を検討する必要がある。

4.4 局部腐食形状と電位の関係

Photo. 1 にみられた溶存酸素濃度に対応したき裂形状は、定常状態の自然電位で整理すると、定電位試験で得られた、電位に対応したき裂形状に非常によく一致した。したがって、溶存酸素は、試料の自然電位を上昇させることにより SCC に影響を与えていると思われる。一方、き裂がみられた電位範囲は $-370 \sim -340 \text{ mV}$ と非常に狭く、見かけのき裂進展速度は、この電位域ではほぼ一定であった。また、孔食の成長は、電位の上昇にともないき裂の進展に対して優先し、 -340 mV 以上では孔食のみが観察され、き裂は認められなかった。この 30 mV という狭いき裂発生電位幅は、SUS304, 316 鋼/MgCl₂ 系¹³⁾や SUS310S 鋼/MgCl₂ 系¹⁴⁾にも見られている。久松ら¹⁴⁾¹⁵⁾は、孔食の成長速度が電位の増加とともに速くなり、しかも応力の影響を受けず、一方、き裂の成長速度はこの狭い電位範囲では電位の影響を受けないことを示した。そして、き裂は (孔食成長速度 < き裂進展速度) を満たす電位範囲で発生することを示唆した。本実験における局部腐食形状との電位の関係は、久松ら¹⁴⁾¹⁵⁾の結果と同様の傾向を示しており、鋼種・環境に関与しない、食孔を発生源とするステンレス鋼の SCC 挙動を示していると思われるが、その定量的評価 (孔食成長速度、き裂進展速度など) は、個々の局部腐食形状の経時変化を観察することにより行われる必要がある。

5. 結 言

低ひずみ速度試験を用いて、チオ硫酸イオンを含む塩

化物水溶液中の SUS316L 鋼の応力腐食割れ挙動を、溶存酸素濃度および電位に注目して検討し、次に示す点が明らかとなった。

(1) 溶存酸素濃度の増加にともない、自然電位は上昇するが、応力腐食割れ感受性は影響を受けなかった。

(2) 定電位低ひずみ速度試験によって、き裂発生電位は $-370 \sim -340 \text{ mV}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ であり、それ以下の電位ではき裂および孔食は発生しないことが確認された。また、この電位範囲において、電位が上昇するほど食孔の成長がき裂の進展に優先した。溶存酸素濃度に対応する自然電位においても同様の電位によるき裂形状の差が認められた。

(3) 検討した電位範囲では、低ひずみ速度試験による応力腐食割れ感受性は、破面内のき裂数および孔食の発生したときのひずみ量に依存した。

(4) き裂の成長条件を満足する最低電位は $-380 \text{ mV}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ であり、食孔から発生したき裂は、試験中、ほぼ一定のき裂進展速度で成長した。

最後に、本研究で用いた引張試験片をご提供いただいた住友金属工業株式会社研究開発本部鉄鋼技術研究所工藤越夫氏、ならびに、本研究に関してご討論いただいた日本鉄鋼協会特定基礎研究会応力下における腐食評価部会の皆様に深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) NACE standard MR0175-84 (1984)
- 2) 小川洋之: 第 133 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1990), p. 18
- 3) M. WATKINS and J. B. GREER: J. Petroleum Technology (1976) June, p. 698
- 4) NACE standard TM-01-77 (1977)
- 5) R. C. NEWMAN, H. S. ISAACS and B. ALMAN: Corrosion, **38** (1982), p. 261
- 6) 辻川茂男, 工藤越夫, 小川洋之, 酒井潤一, 藤原最仁, 福田 隆, 久原昭夫, 小野山征生, 玉置克臣, 泊里治夫: 腐食防食 '88 (1988), p. 368
- 7) 柴田俊夫, 春名 匠, 藤本慎司, 中根慎介: 鉄と鋼, **77** (1991), p. 1511
- 8) 岡本 剛, 柴田俊夫, 佐藤教男: 旭硝子工業技術奨励会研究報告, **15** (1969), p. 207
- 9) 小若正倫, 鮎川光夫, 長野博夫: 住友金属, **21** (1969), p. 185
- 10) H. H. UHLIG and R. W. REVIE: 腐食反応とその制御第 3 版 (1989), p. 98 [産業図書]
- 11) H. H. UHLIG and R. W. REVIE: 同上, p. 94
- 12) 金属の腐食・防食 Q&A (腐食防食協会編) (1988), p. 126 [丸善]
- 13) 小若正倫, 工藤越夫: 鉄と鋼, **62** (1976), p. 390
- 14) 篠原 正, 辻川茂男, 久松敬弘: 防食技術, **34** (1985), p. 283
- 15) 杉下隆雄, 辻川茂男, 久松敬弘: 腐食防食協会 '83 春期学術講演大会予稿集 (1983), p. 25