SSRT法による応力腐食割れ

高野道典*

1. はじめに

最近原子炉における“ひび割れ”として社会的にも注目を集めている応力腐食割れ(SCC)に関して、迅速試験法、材料選定あるいは機構解明の立場から、低ひずみ速度法(slow strain rate technique, SSRT)が多く採用されるようになってきた。このSSRT法は、SCCにおける割れ発生検出のために、定速負荷試験法を採用したColemanら⁽¹⁾の着想を背景に、迅速試験法の開発という立場から発展させられたParkinsらの研究⁽²⁾と、SCCにおいてはすべりステップの腐食挙動が重要であるとの考え⁽³⁾から、すべりステップの生成速度を規制できるSSRT法を採用した、いわゆる機構解明の立場からの著者らの研究⁽⁴⁾の2つの背景があるように思われる。いずれの研究も1967年代に発表されたものであるが、爾来このSSRT法はSCC評価法の1つとして、多くの研究者によって採用され、1977年にはSSRT法によるSCCのシンポジウムが開かれ、ごく最近その報告書⁽⁵⁾が出版されている(SSRTの略称はこの報告書で使用されているので、本稿でもこれに従った。そのほか同じ手法であるが、slow extension rate technique, SERTあるいはconstant extension rate technique, CERTの略称も用いられている)。

このようにSSRT法は、従来のSCC試験における定荷重あるいは定ひずみ試験法と比較して歴史が浅く、したがってSSRT法による割れ感受性評価、他の試験法との対応性あるいはSCC挙動などに関して十分明らかにされてなく、今後の研究にまたねばならない点が多い。本稿ではこうした現状をふまえ、SSRT法によるこれまでのSCCの知見を述べたものである。

2. SSRTの特徴

SCCは静荷重あるいは静的ひずみ条件のもとで起こ

る現象として知られていたが、実際に割れが発生・伝播する場合、一般に前者では割れの進行にともなって応力は増加し、後者では応力緩和をとまらう。このようにSCC進行中に応力が変化すると、材料には局部的に転位の運動が起こり動的ひずみを生じることになる。環境における材料表面での動的ひずみの生成、すなわちすべりステップの生成がSCCに敏感に効くことは図1から明らかである⁽⁶⁾⁽⁷⁾。図はC-Mn鋼の1規定 Na_2CO_3 -1規定 NaHCO_3 水溶液(348 K)中における片持ち梁式定荷重試験の結果である。 -650 mV および -900 mV は、それぞれSCCを起こす電位と起こさない電位である。試料が動的ひずみを受けている状態では -650 mV でSCCを起こす(曲線A, D)が、ある時間経過して試料の動的ひずみが小さくなった段階で、試料をSCC電位に設定してもはや割れは起こらない(曲線C)ことを示している。透過電子顕微鏡による薄膜試料の直接観察においても、腐食媒中ですべりステップが生成することが、SCCの発生に対して重要であることが指摘されている⁽⁸⁾。

定荷重試験においては、荷重が大きいほど破断寿命が

図1 定荷重片持ち梁法によるC-Mn鋼の1規定 Na_2CO_3 +1規定 NaHCO_3 (343 K)中の梁変位とSCC電位の関係(-650 mV :割れる, -900 mV :割れない⁽⁶⁾⁽⁷⁾)。

* 東北大学助教授; 金属材料研究所
Stress Corrosion Cracking with Slow Strain Rate Technique; Michinori Takano (The Research Institute for Iron, Steel and Other Metals, Tohoku University, Sendai)
1979年6月11日受理

短いことが知られている。しかしながら SSRT 法でクロスヘッド速度 (CS; 一般にすべりの生成速度に対応する) を変えた実験では, SCC における力学的因子が応力値そのものではなく, すべりステップの生成速度に密接に関係していることが明確に示される。図 2 はインコネル 600 を 50%NaOH 水溶液 (413 K) 中で種々の CS で SCC 試験を行ない, 各 CS における応力-時間曲線を示したものである⁽⁹⁾。CS が遅くなるとともに SCC 破断寿命は低下し, CS が 1.7×10^{-9} m/s で SCC 感受性は最大となるが, さらに CS を遅くすると (CS = 1×10^{-9} m/s) SCC は起きがたくなる。この場合 CS = 1.7×10^{-9} m/s で破断した時の応力値よりもさらに大きな応力で, しかも 1.7×10^{-9} m/s の時の寿命よりも 3 倍近い試験時間を費しているにも拘わらず, 試料には割れはみられない。この事実は, SCC では荷重 (応力) 値が重要ではなく, その材料/環境系において適当な速度ですべりを生成させることが重要な意味をもつことを示している。このようにすべりステップの生成速度が SCC にとって本質的な役割を演ずることは, Adepoju ら⁽¹⁰⁾および Schwenk⁽¹¹⁾によっても指摘されている。

図 2 溶体化インコネル 600 合金の 50%NaOH (413 K) 中における各種クロスヘッド速度での応力-時間曲線⁽⁹⁾。

SSRT 法では定速引張あるいは定速曲げ負荷法を用いるので, 割れの進行とともに変化する割れ先端のすべりステップ生成速度を, 厳密にコントロールすることはできない。しかし CS あるいは曲げ速度を種々変えることによって, すべりステップの生成速度をある程度規制できるので, SSRT 法は従来の静的試験法よりも SCC の本質をついた試験といえる。

Parkins ら⁽¹²⁾⁽¹³⁾はこの方法と他の試験法を応力因子に関して比較し, その特徴を詳細に報告している。SSRT 法が迅速試験法であることは, ステンレス鋼⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾, Al 合金⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾, Ni 合金と Co 合金⁽¹⁸⁾および低合金鋼⁽¹⁹⁾な

どで明らかにされている。とくに高温水中における SCC 試験では, 従来 U 曲げ法が多く用いられ, すき間を付与して割れを促進する方法⁽²⁰⁾⁽²¹⁾が採られていたが, SSRT 法ではすき間がなくても迅速に割れを起こすことができるので, 最近では原子炉における SCC の促進試験としてこの方法が数多く採用されている^{(9)(22)~(33)}。そのほか SSRT 法は他の静的試験より過酷な試験である⁽¹⁵⁾⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾ので材料選定に対する有力な試験法の 1 つとしても知られている⁽⁶⁾⁽¹²⁾。

3. 他の試験法との相関性

前節では機構解明の上からもまた試験法としても, SSRT 法が優れた長所をもっていることを述べたが, ここでは割れ感受性が他の静的試験結果といかなる相関性をもつか, あるいはこの方法が常に SCC 試験法として有力な手段となりうるのかなどについて述べる。

図 3 は種々の低合金鋼の沸騰 NH_4NO_3 水溶液中における SCC を定みずみ試験と SSRT 法について比較した結果⁽⁶⁾である。各鋼の SCC しきい値と降伏応力の比で示される定みずみ試験による割れ感受性と, SCC 寿命と油中の破断時間の比で示される SSRT 法による感受性との間に相関性があることがわかる。同様の結果が $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 水溶液 (343 K) 中における炭素鋼について, SSRT 法と定荷重法の間にも確認されている⁽³⁶⁾。そのほか Al 合金に関して pH⁽¹⁶⁾, Cl^- イオン濃度⁽¹⁶⁾, カソード電流⁽³⁷⁾および時効時間⁽³⁸⁾の影響などについてもしらべられており, SSRT 法と静的試験で SCC 感受性により対応性のあることが示されている。また 12Cr 鋼における熱処理⁽³⁹⁾, 黄銅における熱処理および冷間加工⁽³⁹⁾, NaOH 水溶液中における 304 鋼および Ni 基合金の SCC 電位域⁽²⁸⁾などに関してしらべた結果でも, SSRT 法と他の試験法で割れ感受性により一致がみられている。

図 3 低合金鋼の沸騰 4 規定 NH_4NO_3 中における SSRT 法による割れ感受性と定みずみ法による SCC しきい値の関係⁽⁶⁾。

ショットピーニングによって材料表面を硬化すると、SCC 抵抗性を増すことは一般に知られているが、このことは高温水中におけるステンレス鋼の SCC の場合にも定荷重試験によって明らかにされている⁽²⁵⁾。しかし同じ材料/環境系で SSRT 法を用いた場合には、加工材よりもショットピーニング処理材の方が SCC を起こしやすいことが報告されている⁽²⁶⁾⁽²⁹⁾。図 4 は 304 鋼の空気飽和 562 K 水中における SCC 試験結果⁽²⁶⁾である。加工材をショットピーニング処理した材料は、加工材そのものより SCC 感受性が高いことがわかる。このことはショットピーニングによって、局部的応力集中が起きやすくなり、すき間効果を容易にするためであると説明されている⁽²⁹⁾。SSRT 法は材料に単純引張変形を与えるので、ショットピーニングによる硬化層が、部分的に破壊されれば、耐 SCC 性の効果は失われるであろう。同じような現象は、鋭敏化 304 鋼をレーザ処理して SSRT 試験を行なった場合にもみられる⁽⁴⁰⁾。レーザ処理によって鋭敏化鋼の表面層のみを標準組織にすると、15% 以下のひずみでは高温水中 SCC 抵抗性を示すが、それ以上のひずみ量になると SCC を起こすようになる。このように材料表面層の改善によって、耐 SCC 性を与えた材料に対しては、SSRT 法による試験結果の解釈には十分な注意が必要である。

図 4 空気飽和 562 K 水中における 304 鋼の応力-ひずみ曲線⁽²⁶⁾。

Al 合金の NaCl 水溶液中における SCC 感受性は、ひずみ速度依存性がないので SSRT 法の適用には問題があることが指摘されている⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾。また Cels⁽²⁷⁾も NaOH 水溶液中における Ni 合金の SCC 試験でも、定荷重法と SSRT 法の相関性に不明な点があることを述べている。

4. SCC 評価法

SSRT 法による SCC 試験では、一般に荷重(応力)-のび(ひずみ)の関係がえられる。この関係はその材料/環境系における SCC に対して多くの情報を提供してくれるので、感受性評価法も他の静的試験におけるより豊

富である。通常用いられている評価法として、腐食媒中における最大応力値($\sigma_{\max}$)または $\sigma_{\max}$ と腐食に対して不活性な環境(たとえば、空気中あるいは油中など)における最大応力値($\sigma_{\max}^{\text{air or oil}}$)の比($\sigma_{\max}/\sigma_{\max}^{\text{air or oil}}$)の比較、または同様の表示で応力の代りにのび、寿命あるいは破断後の断面積などを比較する場合がある。そのほか SCC 破断時の真応力⁽⁴³⁾、SCC 面積⁽⁴⁴⁾の比較などが行なわれている。またこうした評価法とは別に、独自の割れ感受性指数を用いている場合もある⁽²¹⁾⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。こうした評価法は、材料/環境系によって明確に示される場合とそうでない場合があるので、評価法として統一することは困難である。したがってそれぞれの系で最も適した方法を選ぶことが望ましい。また材料の選定に対しては、割れの伝播速度を比較するのがよいという意見もある⁽³⁵⁾。

Lyle ら⁽¹⁹⁾は高張力鋼の硫化物割れ試験で、寿命、のびおよび断面積減少の 3 方法によって割れ感受性をしらべ、断面積を正確に測定することは難しいので、断面減少率による評価では再現性のよい結果がえられなかったと述べている。いずれにしても SSRT 法では、試料は必ず破断するので、たとえば $\sigma_{\max}$ の減少がみられても、それが全面腐食による場合や孔食など局部腐食による場合がある。したがって破断後の試料に対して割れの確認が必要である。

5. SCC 感受性のひずみ速度依存性

SSRT 法の場合、一定環境条件では SCC 挙動はひずみ速度に大きく依存する。図 5 はある環境のもとで SCC 試験を行なった場合にえられる割れ感受性とひずみ速度の関係を模式的に示したものである⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾。曲線 1 は試料の破断に対して環境の影響がみられない場合である。曲線 2 は全面腐食、粒界腐食、孔食あるいは SCC が起こる場合であり、曲線 3 は SCC が起こる場合である。

SCC 感受性のひずみ速度依存性に関しては、多くの材料/環境系でしらべられており、曲線 2 に相当する SCC としてオーステナイトステンレス鋼の MgCl_2 水溶液中⁽¹⁴⁾⁽⁴⁵⁾および高温水中⁽²³⁾、軟鋼の NaOH 水溶液中⁽²⁾、低合金鋼の液体アンモニア中⁽⁴⁶⁾、 α -Ti 合金のメタノール-HCl 中⁽⁴⁷⁾などが知られている。SCC が起こる場合、曲線 2 に相当する SCC 挙動はひずみ速度をさらに遅くすることによって、曲線 3 のように感受性が再び低下するか、あるいは感受性はひずみ速度に依存しなくなる(曲線 2')ことが予想される。後者の例として Cu 合金のアンモニア水溶液中⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾、マルテンサイト鋼⁽⁵⁰⁾および Mg 合金⁽⁵¹⁾の NaCl 水溶液中などの SCC がある。また曲線 3 の例として α -Ti 合金⁽⁴⁷⁾および Mg 合金⁽⁵¹⁾の NaCl 水溶液、炭素鋼のメタノール中⁽⁵²⁾、軟鋼の H_2S

図5 SSRT 法によってえられる特徴的結果, E_F は破壊に要するエネルギー, これは応力-ひずみ曲線で囲まれる面積⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾. (曲線 2' は著者が加えた)

水溶液中⁽⁵³⁾, Ni 合金の NaOH 水溶液中⁽⁹⁾ および 304 鋼の $MgCl_2$ 水溶液中⁽⁵⁴⁾ における報告がある.

Scully ら⁽⁴⁷⁾⁽⁵⁵⁾ および Wearmouth ら⁽⁵¹⁾ は, ひずみ速度が遅い領域における曲線 2' および曲線 3 で示される SCC 挙動の差を, 生じたすべりステップにおける金属の溶解/再不働態化速度の大きさによって説明している. すなわち, 曲線 2' はすべりステップにおける皮膜修復がきわめて遅い条件の場合であり, 曲線 3 は皮膜修復が速に行なわれる条件の場合である. ひずみ速度が速い場合には, 腐食が進行する速度より速かに機械的破断を起こすようになるので, SCC 感受性は低下することになる.

中山ら⁽⁵⁴⁾ によると 304 鋼の 42% $MgCl_2$ 水溶液中では, SSRT 法でえられる割れ感受性と割れ形態の間には密接な関係があることが知られている. すなわち図 5 の曲線 3 における割れ感受性最大を示すひずみ速度近傍では粒内割れであるが, ひずみ速度がそれより遅くなるかあるいは速くなって, 割れ抵抗性が増してくると粒界割れの占める割合が大きくなる. この場合粒内割れから粒界割れへ遷移する機構は全く異なり, 遅いひずみ速度領域では粒内すべりステップが容易に再不働態化されることによって, また速いひずみ速度領域では粒内すべりステップは腐食に対して活性であることによって, それぞれ粒界割れを起こすようになる.

このように割れ感受性および割れ形態はひずみ速度に大きく依存するが, 割れ発生に要する応力値もまたひずみ速度に依存することが Beckら⁽⁵⁶⁾ によって示されている. 彼らは Ti-13V-11Cr-3Al 合金について 0.6 kmol/ m^3 KCl 水溶液中 -500 mV で荷重負荷速度と K_{ISCC} の関係をしらべ, CS が 1.7×10^{-5} m/s で K_{ISCC} は最も小さく, CS がそれより遅い場合あるいは速い場合のいずれの条件でも K_{ISCC} は増大することを認めている. 多く

の場合 K_{ISCC} の測定には, 定荷重あるいは定ひずみ法が用いられているが, K_{ISCC} が動的ひずみによって影響をうけることにも注意する必要がある.

SSRT 法は腐食媒中で試料に動的ひずみを与えることから潜伏期の長い SCC の場合, この方法が適用できるかどうか明かでなかった. しかし 304 鋼の 20% NaCl 水溶液 (372 K) 中における SCC に SSRT 法を適用し, 遅い CS (ひずみ速度 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-6} s^{-1}$) のもとで, 孔食あるいはすき間腐食をともなった割れが起こることが示され⁽⁵⁷⁾, 潜伏期を有する SCC の場合でも CS を適切に選ぶならば, SSRT 法は有効な試験法となることが明らかにされている.

一般に割れ感受性最大を示すひずみ速度の値は $10^{-5} \sim 10^{-6} s^{-1}$ であるが, 材料/環境系によっては大きく異なることがある. たとえばこの値は, α -Ti 合金の 3% NaCl 水溶液中で gauge length 3 cm の試片に対しては CS では 1.7×10^{-5} m/s である⁽⁴⁷⁾ が, 304 鋼の沸騰 42% $MgCl_2$ 水溶液中では R 0.2 の丸底ノッチ試片で CS 1.7×10^{-9} m/s 程度である⁽⁵⁴⁾. また同一材料/環境系においても, 試験片形状によって SCC 感受性に対する最適ひずみ速度が違うことも, ノッチ試片と平滑試片⁽⁵⁵⁾⁽⁵⁸⁾ あるいは曲率をあたえた試片と平滑試片⁽⁵²⁾ などについて報告されている.

6. 環境因子および材料因子の影響

SCC 挙動は環境によって大きく変化するが, 軟鋼の SCC 電位依存性を図 6⁽⁵⁹⁾⁽⁶⁰⁾ に示す. 図はひずみ速度 $2.5 \times 10^{-6} s^{-1}$ の場合, NaOH, Na_2CO_3 - $NaHCO_3$ および NH_4NO_3 水溶液中における SCC の電位依存性を示したものである. 各水溶液中における自然電位も同時に示し

図6 パイプライン用鋼の 33% NaOH (365 K), 1 規定 Na_2CO_3 + 1 規定 $NaHCO_3$ (365 K) および沸騰 20% NH_4NO_3 中における SSRT 法による SCC 電位域. (ひずみ速度 $2.5 \times 10^{-6} s^{-1}$)⁽⁵⁹⁾⁽⁶⁰⁾

であるが、環境によって割れ感受性および電位域が異なることがわかる。SCC 電位域に関しては、炭素鋼⁽²⁾⁽⁵³⁾⁽⁶¹⁾⁽⁶²⁾、低合金鋼⁽⁶³⁾⁽⁶⁴⁾、304 鋼^{(65)~(67)}、Ni 合金⁽⁹⁾⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾および Al 合金⁽³⁸⁾などについて報告されており、SCC の電位依存性が明確に示されている。また各種材料/環境系について pH⁽¹⁶⁾⁽⁶³⁾⁽⁶⁸⁾、温度⁽¹⁹⁾⁽³⁰⁾⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁸⁾⁽⁵³⁾⁽⁶⁷⁾⁽⁶⁸⁾、Cl⁻イオン濃度⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽²³⁾、各種アニオン⁽⁶⁹⁾の影響、および高温水中の溶存酸素の影響^{(23)(30)~(33)}についても SSRT 法でしらべられている。環境に腐食抑制剤を添加して、SCC 感受性を軽減する立場から抑制剤の効果をしらべた結果も、304 鋼の MgCl₂ 水溶液中⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾、炭素鋼の NaOH 水溶液中⁽²⁾および Na₂CO₃-NaHCO₃ 水溶液中⁽⁵⁹⁾⁽⁶⁰⁾、および低合金鋼の酢酸アンモニウム水溶液中⁽⁶³⁾について報告されている。

SSRT 法が迅速かつ過酷な SCC 試験法であることから、材料選定に対して有力な試験法の 1 つとなっている。これに関して高温水中の SCC における熱処理の影響⁽²³⁾⁽²⁴⁾⁽³⁰⁾⁽⁴³⁾、MgCl₂ 水溶液中における 304 鋼溶接材⁽⁷⁰⁾、Al 合金の SCC におよぼす熱処理の影響⁽¹⁷⁾⁽³⁸⁾および Na₂CO₃-NaHCO₃ 水溶液中の炭素鋼の SCC におよぼす添加元素の影響⁽⁶⁰⁾について報告がある。

7. SCC 伝 播 速 度

SCC の伝播速度を知ることは、割れ感受性評価、割れ寿命予測および機構解明の観点から重要な課題の 1 つである。Vermilyea らは皮膜破壊/再不働態化説の立場から、割れ伝播には割れ先端での皮膜破壊に要するひずみの大きさ、腐食量およびクリープ速度(ひずみ速度)が重要であることを指摘し⁽⁷¹⁾、この考えに基づいて理論的考察を行ない、割れ先端における腐食速度($\dot{l}$)と SSRT 法によるひずみ速度($\dot{\epsilon}$)の比、 $\dot{l}/\dot{\epsilon}$ が 1 回の皮膜破壊による割れ進行長さに相当することを示した⁽⁷²⁾。彼らはまた SSRT 法を用いて 304 鋼の高温 H₂SO₄ 水溶液中⁽⁷³⁾および Fe の NaOH 水溶液中⁽⁷⁴⁾における SCC 試験を行ない、 $\dot{l}/\dot{\epsilon}$ の値が皮膜破壊による割れ伝播距離に一致することを確認した。

SSRT 法を用いて割れの伝播速度を直接求めた例は数少ない。Scully ら⁽¹⁰⁾⁽⁷⁵⁾は Ti 合金の NaCl 水溶液中およびメタノール-HCl 中における割れ伝播速度を割れ長さの直接観察によって測定し、CS が遅い範囲では伝播速度は小さく、CS が速くなると伝播速度も大きくなることを示している⁽¹⁰⁾。また再不働態化が容易である NaCl 水溶液中では、割れの伝播する最小の CS は再不働態化し難いメタノール-HCl 中に比べて大きな値になることを示している⁽⁷⁵⁾。Parkins ら⁽⁷⁾⁽⁶²⁾⁽⁷⁶⁾も炭素鋼の Na₂CO₃-NaHCO₃ 水溶液中における伝播速度を、片持梁式定速負荷法によって測定し、割れ先端のひずみ速度が

増加するにともなって、伝播速度がひずみ速度に依存する領域と依存しない領域が現われることを示し、これらが破壊力学的手法で求められる応力拡大係数と伝播速度の関係に類似していることを示した。著者らも 304 鋼の MgCl₂ 水溶液中⁽⁴⁴⁾および H₂SO₄-NaCl 水溶液中⁽⁶⁷⁾における伝播速度を、腐食媒中における応力-ひずみ曲線の最大応力値までに進行した割れについてその平均の速度を求め、伝播速度がひずみ速度あるいは電位に依存することを示した。またパイプライン鋼の 33%NaOH 水溶液中における伝播速度に関しても報告があり、この場合 SCC の起こるひずみ速度範囲では、伝播速度はひずみ速度に依存しない⁽⁵⁹⁾⁽⁶⁰⁾。

最近 Kermani ら⁽⁷⁷⁾は黄銅のアンモニア水溶液中における割れ伝播速度を測定し、70Cu-30Zn 合金では CS が遅い領域で伝播速度は一定値を示し、CS が速い領域で CS とともに速度は増加することを見いだしている。この伝播速度と CS の関係は、同一材料/環境系で彼らが破壊力学的手法で求めた伝播速度と応力拡大係数の関係⁽⁷⁸⁾と全く一致している。また 65Cu-35Zn 合金では、伝播速度は CS とともに増加し、一定 CS では割れの初期で速度は遅く、後期では初期のほぼ 2 倍の伝播速度になることを示している。一定 CS で割れ成長とともに伝播速度が増加する傾向は、Ti-O 合金においてもみられている⁽⁷⁵⁾がその増加の程度はきわめて小さい。

寺本ら⁽⁷⁹⁾は 304 鋼の沸騰 42%MgCl₂ 水溶液中における割れ伝播速度を、割れ長さを直接観察することによって求め、図 7 の結果をえている。図は板厚 2.5 mm の場合であるが各 CS に対して割れ長さ(a/w)が増すとともに伝播速度は増加し、その程度は CS が遅いほど大きくなっている。CS が 8×10^{-10} m/s の場合には、速度は 2 桁近く増加している。この測定は単一割れの成長する範囲についてなされたものであり、CS が 1.7×10^{-7} m/s

図 7 304 鋼の沸騰 42%MgCl₂ 中における割れ伝播速度とクロスヘッド速度の関係⁽⁷⁹⁾。

で粒界割れである以外は、すべて粒内割れである。粒界割れの場合には粒内割れと機構が異なるので、伝播速度の CS 依存性には連続的な変化がみられない(図 7)。SSRT 法で伝播速度を詳細に測定すると上述したように速度は、一定 CS のもとでは割れの長さ、また一定割れ長さに対しては CS にそれぞれ依存することがわかる。このことは、割れの伝播が割れ先端のひずみ速度に大きく依存することを示すものである。

8. お わ り に

SSRT 法を用いて行なわれている SCC 研究の現状を述べたが、この方法が多くの特徴をもった試験法であると同時に、未だ解明されない問題も残している。たとえば材料表面層のみを改善した場合の結果の解釈、Al 合金への適用性、あるいは液体アンモニア中の SCC のように活性溶解型と水素脆性型で割れる場合には、SSRT 法は現象を見誤る危険性がある⁽⁴⁶⁾、などの問題点が指摘されている。さらに Parkins⁽⁶⁾や Solomon⁽²⁹⁾は、SSRT 法は構造物設計に対して役立つ資料を提供できない、と指摘している。SSRT 法が材料開発および選定に有効な手段であるとの結論の中にも、ほかの静的方法による長時間試験および電気化学的手法を併用することの必要性を述べた報告は数多い。SCC 機構に関しても新しい現象が発見されつつあるが、未だその数は少ない。今後多くのデータが蓄積され、SSRT 法が SCC 軽減に役立つ一手法として確立されることを願うものである。

文 献

- (1) E.G.Coleman, D.Weinstein and W.Rostoker: *Acta Met.*, **9**(1961), 491.
- (2) M.J.Humphries and R.N.Parkins: *Corros. Sci.*, **7**(1967), 747.
- (3) M.Takano and S.Shimodaira: *Trans. JIM*, **7**(1966), 186.
- (4) M.Takano and S.Shimodaira: *ibid.*, **8**(1967), 239.
- (5) *Stress Corrosion Cracking-The Slow Strain Rate Technique*, Ed. by G.M.Ugiansky and C.E.Johnson, ASTM, STP 665, (1979), (以下 STP 665 と記すことにする)。
- (6) R.N.Parkins: STP 665, p.5.
- (7) R.N.Parkins: *J. Strain Analysis*, **10**(1975), 251.
- (8) 高野道典, 下平三郎: *日本金属学会誌*, **29**(1965), 553.
- (9) 高野道典, 川嶋朝日: *防食技術*, **27**(1978), 340.
- (10) T.Adepoju and J.C.Scully: *Corros. Sci.*, **15**(1975), 415.
- (11) W.Schwenk: *Werkst. Korros.*, **29**(1978), 740.
- (12) R.N.Parkins *et al.*: *Br. Corros. J.*, **7**(1972), 154.
- (13) R.N.Parkins: *Theory of Stress Corrosion Cracking of Alloys*, Ed. by J.C.Scully, NATO, (1971), p.449.
- (14) 岡田秀弥, 細井祐三, 阿部征三郎, 山本 州: *日本金属学会誌*, **38**(1974), 646.
- (15) W.J.Daniels: STP 665, p.347.
- (16) H.F.de Jong: *Corrosion*, **34**(1978), 32.
- (17) G.M.Ugiansky *et al.*: STP 665, p.254.
- (18) A.I.Asphahani: STP 665, p.279.
- (19) F.F.Lyle Jr. and E.B.Norris: *Corrosion*, **34**(1978), 193.
- (20) H.R.Copson and G.Economy: *ibid.*, **24**(1968), 55.
- (21) 明石正恒, 川本輝明: *石川島播磨技報*, **17**(1977), 472.
- (22) D.A.Vermilyea: *Corrosion*, **29**(1973), 442.
- (23) M.Hishida and H.Nakada: *Corrosion*, **33**(1977), 332, 403.
- (24) M.Hishida and H.Nakada: *ibid.*, **34**(1978), 338.
- (25) 高久 啓, 後河内哲夫: *火力原子力発電*, **28**(1977), 1079.
- (26) M.J.Povich: *Corrosion*, **34**(1978), 162.
- (27) J.R.Cels: *Corrosion*, **34**(1978), 198.
- (28) G.J.Theus and J.R.Cels: STP 665, p.81.
- (29) H.D.Solomon, M.J.Povich and T.M.Devine: STP 665, p.132.
- (30) W.L.Clarke, R.L.Cowan and J.C.Danko: STP 665, p.149.
- (31) S.Abe, M.Kojima and Y.Hosoi: STP 665, p.294.
- (32) 平野秀朗, 黒沢辰雄: 1979 春期腐食防食講演会予稿集, p.2.
- (33) 菱田 護, 川久保 隆: 1979 春期腐食防食講演会予稿集, p.25.
- (34) 阿部征三郎: *日本金属学会会報*, **16**(1977), 15.
- (35) C.D.Kim and B.E.Wilde: STP 665, p.97.
- (36) 正村克身, 松島 敏: 97 回鉄鋼協会予稿集, (1979), 407.
- (37) D.E.Davies, J.P.Dennison and M.L.Mehta: *Corrosion*, **27**(1971), 371.
- (38) 平野秀朗, 高野道典, 下平三郎: *日本金属学会誌*, **40**(1976), 618.
- (39) J.F.Andrew, J.T.Heron and J.Stringer: STP 665, p.362.
- (40) T.R.Anthony and H.E.Cline: *J. Appl. Phys.*, **49**(1978), 1248.
- (41) H.Buhl: *Werkst. Korros.*, **29**(1978), 725.
- (42) H.Buhl: STP 665, p.333.
- (43) J.H.Payer, W.E.Berry and W.K.Boyd: STP 665, p.61.
- (44) M.Takano: *Corrosion*, **30**(1974), 441.
- (45) A.J.A.Mom *et al.*: STP 665, p.305.
- (46) 高橋 克, 浜田幾久, 内藤浩光: 1979 春期腐食防食講演会予稿集, p.75.
- (47) J.C.Scully and D.T.Powell: *Corros. Sci.*, **10**(1970), 719.
- (48) M.Takano: *ibid.*, **11**(1971), 813.
- (49) S.A.Bradford and T.Lee: *Corrosion*, **34**(1978), 96.
- (50) P.Suery: STP 665, p.320.
- (51) W.R.Wearmouth, G.P.Dean and R.N.Parkins: *Corrosion*, **29**(1973), 251.
- (52) 松倉亀雄, 佐藤一昭: *鉄と鋼*, **63**(1977), 1016.
- (53) 川嶋朝日, 高野道典, 橋本功二, 下平三郎: *日本金属学会誌*, **38**(1974), 247.
- (54) 中山武典, 高野道典: *防食技術*, **28**(1979), No.10 掲載予定.
- (55) D.T.Powell and J.C.Scully: *Corrosion*, **24**(1968), 151.

- (56) M.J.Blackbarn, J.A.Feeney and T.R.Beck: *Advances in Corrosion Sci. and Tech.*, vol.3, Ed. by M.G.Fontana and R.W.Staehle, (1973), p.67.
- (57) 中山武典, 高野道典: 防食技術, **28**(1979), No.10 掲載予定.
- (58) M.Takano and N.Totsuka: Corrosion in Press.
- (59) J.H.Payer, W.E.Berry and W.K.Boyd: *Stress Corrosion Cracking New Approach*, Ed. by H.L.Craig, ASTM STP 610, (1976), p.82.
- (60) J.H.Payer, W.E.Berry and R.N.Parkins: STP 665, p.222.
- (61) M.J.Humphries and R.N.Parkins: *Fundamental Aspects of Stress Corrosion Cracking*, NACE, (1967), p.384.
- (62) R.N.Parkins: *Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys*, NACE, (1977), p.601.
- (63) J.C.Parker and W.G.Pearce: Corrosion, **30** (1974), 18.
- (64) S.Shimodaira et al.: *Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys*, NACE, (1977), p.1003
- (65) M.Takano and S.Shimodaira: Trans. JIM, **9**(1968), 294.
- (66) M. Takano and R.W.Staehle: *ibid.*, **18** (1977), 780.
- (67) M. Takano and R.W.Staehle: *ibid.*, **19** (1978), 1.
- (68) 砂野豊治朗, 高野道典, 下平三郎: 日本金属学会誌, **40**(1976), 851.
- (69) A.Kawashima, A.K.Agrawal and R.W.Staehle: STP 665, p.266.
- (70) F.Stalder and D.J.Doquette: Corrosion, **33** (1977), 67.
- (71) D.A.Vermilyea: J.Electrochem. Soc., **119** (1972), 405.
- (72) D.A.Vermilyea and R.B.Diegle: Corrosion, **32**(1976), 26.
- (73) D.A.Vermilyea: J. Electrochem. Soc., **121** (1974), 1190.
- (74) R.B.Diegle and D.A.Vermilyea: Corrosion, **32**(1976), 353.
- (75) J.C.Scully and T.A.Adepoji: Corros.Sci., **17**(1977), 789.
- (76) R.N.Parkins and B.S.Greenwell: Metal Sci., Aug./Sept., (1977), 405.
- (77) M.Kermani and J.C.Scully: Corros.Sci., **19** (1979), 89.
- (78) M.Kermani and J.C.Scully: *ibid.*, **18**(1978), 883.
- (79) 寺本和啓, 高野道典: 日本金属学会誌, **43**(1979), 744.

<新刊案内>

強磁性体の物理(上)

—物質の磁性—

近 角 聰 信 著

著者は斯学の権威であり,すでに20年前に発行された同名の著作は名著とされ,John Wiley & Sonsより英訳出版されて全世界に行きわたっている.この20年間の学問の進歩は激しく,磁性の分野では特にそうであるので,今回の新版の出現はむしろ当然といえよう.

新版の特長的なところは,(1)基本的な磁気測定の諸法の概括的な紹介を入れたこと,(2)旧版発行以後急速に使われ出した微視的実験手段であるNMR,メスbauer効果,中性子回折, μ SR等の測定についての説明を加えたこと,(3)最後の章(物質の構造と磁性)に希土類金属化合物,スピネル,ガーネット,マグネトプランバイト等の酸化物,3d遷移金属化合物およびアモルファス物質等,具体的な新しい物質の磁性を説明したこと,などである.これらの記述は大体において現在のこの分野の最近の発展を概観するのに適しており,初心の読者は現在ということが問題に

なっているかについてのバランスのとれた知識を得るのに役立つものと思われる.

ただし序文で著者が述べているように,“記述の仕方も厳密な正確さよりは,むしろ直観的に物理的な概念を与えることに主眼をおいた”ためか,旧版に比し数式も内容の記述も簡略化されて,箇所によっては物理的イメージの把握もより困難になってしまっている面もあることは否めない.しかし記述すべき内容のぼう大化という実態から,これはやむを得ないことというべきであろうか.最近磁性材料関係の企業でも磁性の基礎知識をより深く必要とするようになってきているので,本書のように材料に連りうる事項をかなり広汎に取入れてある著書はその意味で有用であろうと思われる.未刊の下巻はこの点でさらに多くを期待できるであろう.

(H.W.)

[A5判 308頁 1978年 3,000円 装華房]