

© 1990 ISIJ

 ///////////////  
 論文  
 ///////////////

# SUS304 ステンレス鋼の低温鋭敏化 に及ぼす応力の影響

今野 薫\*・千葉 浩幸\*<sup>2</sup>

## Influence of Stress on Low Temperature Sensitization of SUS304 Stainless Steel

Kaoru KONNO and Hiroyuki CHIBA

### Synopsis :

By using carbide nucleation-heat-treated SUS304 stainless steel specimens, the effect of various type of stresses applied during 500°C isothermal heat treatment on Low Temperature Sensitization (LTS) was examined. The Degree of Sensitization (DOS) was detected by means of the Electrochemical Potention-kinetic Reactivation (EPR) test and Strauss test. The main results of the study are as follows :

1) When constant tensile stress is applied to the specimens during isothermal heat treatment, the LTS was accelerated more than unstressed specimens. The degree of acceleration was larger when the applied stress was larger. The acceleration of the LTS was also seen even when the stress less than proof stress at the test temperature.

2) The electrochemical potentiokinetic reactivation ratio of the specimens after 100 h of the LTS test corresponded to strain rather than stress.

3) When alternating stress was applied to the specimens during the isothermal heat treatment, the LTS was accelerated even more than when constant tensile stress was applied.

**Key words :** SUS304 ; low temperature sensitization ; constant tensile stress ; alternating stress ; EPR test ; Strauss test.

### 1. 結 言

オーステナイト ( $\gamma$ ) 系ステンレス鋼は耐熱性、耐食性などがすぐれているので、発電プラントや化学プラント等の構造物材料として広く使用されている。しかし、固溶化処理された状態では十分な耐食性を有するこの  $\gamma$  系ステンレス鋼でも 500°C~800°C の温度範囲で加熱されると、ある種 (酸性溶液や高温高圧水など) の環境中で粒界腐食 (IGA) や粒界型応力腐食割れ (IGSCC) が発生することがある。これは鋭敏化現象として古くから知られており、多くの研究や解説<sup>1)2)</sup>が見られるが、最近でも、この現象が主原因と思われる損傷例が数多く報告されている<sup>3)4)</sup>。この現象の機構についてはいろいろな説が唱えられてきたが、Cr 欠乏説<sup>5)</sup>が最も妥当な機構として一般に受け入れられている。

固溶化処理された  $\gamma$  系ステンレス鋼が低温 (500°C 以下) で鋭敏化するには長時間を要するが、溶接熱影響

部のように一部粒界に Cr 炭化物が析出していると、その後の低温加熱で Cr 炭化物の成長及びこれに伴う鋭敏化の進展が比較的容易に起こることは比較的早くから知られていた<sup>6)</sup>。Povich<sup>7)8)</sup>はこの現象を低温鋭敏化 (LTS) と呼び、SUS 304 鋼管溶接熱影響部の IGSCC と関連して詳細な実験を行っている。実際の溶接熱影響部には、熱応力や拘束応力による塑性変形や残留応力が生じており、また各種プラントの起動・停止及び定常運転時に繰返し応力またはひずみを受けることが多く、単純な熱サイクルの場合よりも Cr 炭化物の粒界析出・成長を助長し、鋭敏化を促進させると考えられる。すでに高温クリーブ試験や高温疲労試験ではこの事実<sup>9)~12)</sup>が観測されている。

鋭敏化に及ぼす冷間加工の影響に関する研究は非常に多く、機構や影響因子等についてはほぼ解明されているように思われるが<sup>2)</sup>、熱サイクル中で応力またはひずみを同時に受けた場合の鋭敏化促進現象を取り扱った研究

平成 2 年 2 月 1 日受付 (Received Feb. 1, 1990)

\* 岩手大学工学部 (Faculty of Engineering, Iwate University, 4-3-5 Ueda Morioka 020)

\*2 東北日本電気(株)プリンタ部 (Printers Dept., NEC Tohoku Ltd.)

は少ない<sup>13)~16)</sup>。特に、炭化物析出の律速機構が高温側と異なると思われる 550°C 以下での鋭敏化<sup>17)</sup>の促進現象に関しては、定性的観察結果<sup>13)</sup>はあるが、LTS 促進現象を対象とした定量的・系統的な研究は現在のところ見当たらない。最近、現有設備の有効利用によるコスト低減の観点から長寿命化・延命化しようとする傾向があり、各種プラントの安全性・信頼性を確保する上で、LTS に関する詳細な研究は非常に重要と思われる。

本研究は、LTS に及ぼす応力効果を明確にするため、試験片に実機での残留応力と運転時の変動応力を模擬した一定引張応力及び繰返し応力を恒温 (500°C) 加熱中に負荷し LTS がどのように促進するかを、電気化学的再活性化試験 (以下、EPR 試験と略記) 及び硫酸-硫酸銅試験 (以下、Strauss 試験と略記) を行い検討したものである。なお、500°C 以下での負荷応力による LTS 促進に関しても、本実験の 500°C での結果とアレニウスの温度依存性<sup>7)</sup> から予測できると思われるが、その基礎情報を得ることが本研究の目的でもある。

## 2. 実験方法

Fig. 1 は本実験のフローチャートであり、詳細は以下のとおりである。

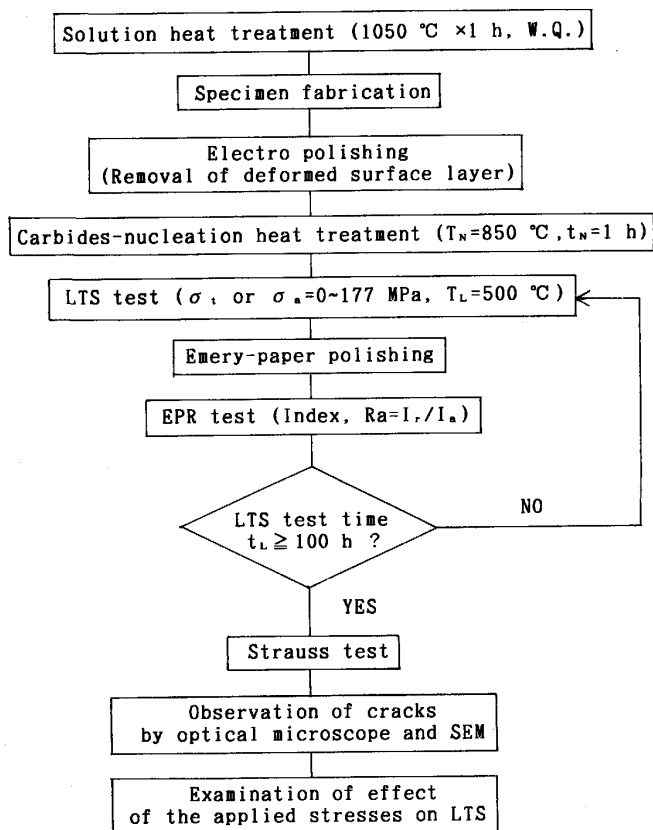


Fig. 1. Experimental procedure.

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of SUS304 stainless steel.

(a) Chemical compositions (mass%)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
0.05	0.46	1.24	0.027	0.019	18.55	8.22	Bal.

(b) Mechanical properties (Solution heat treatment : 1 050°C×1h→W.Q.)			
	0.2% proof stress	Tensile strength	Elongation
R. T.	284 MPa	598 MPa	60%
500°C	142 MPa	Not test	Not test

Grain size : No. 6

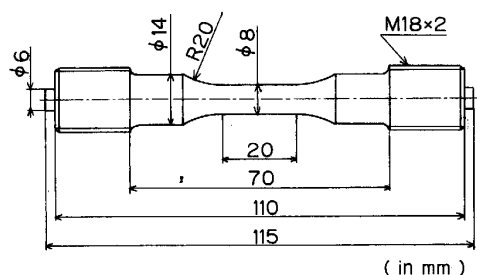


Fig. 2. Geometry and dimension of specimen.

### 2.1 供試材および試験片形状

本実験に使用した供試材は市販の SUS 304 ステンレス鋼棒 (φ19mm) であり、化学成分及び機械的性質を Table 1 に示す。試験片は固溶化熱処理 (1 050°C×1 h, 水冷) 後、Fig. 2 に示すような形状・寸法に機械加工した。

### 2.2 EPR 試験

鋭敏化度を定量的に測定するために JIS G 0580 に準じて EPR 試験を実施した。試験対象部は試験片平行部の表面であり、試験面はエメリー紙 (#150) で湿式研磨した。試験面積は 0.5 cm<sup>2</sup> であり、試験面以外はエポキシ樹脂で被覆した。分極曲線は、試験面を電解溶液 (0.5 mol/l H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0.01 mol/l KSCN, 30°C) に 5 min 浸せきし、自然電極電位が -350 mV (vs. SCE) 以下であることを確かめてから、100 mV/min の掃引速度でアノード分極し、+300 mV (vs. SCE) に到達後、直ちに電流がゼロになるまで逆掃引することによって求めた。鋭敏化度はアノード分極時の往路と復路における最大アノード電流密度 (往路 :  $I_a$ , 復路 :  $I_r$ ) の比で表した電気化学的再活性化率 ( $Ra = I_r/I_a \times 100$ ) を用いて評価した。 $Ra$  値は試験片平行部 3 か所を測定し、図中にはその平均値を示した。なお、ばらつきは  $Ra$  値によって異なり、 $Ra$  値が 13% 程度では測定値の約 ±10% であった。

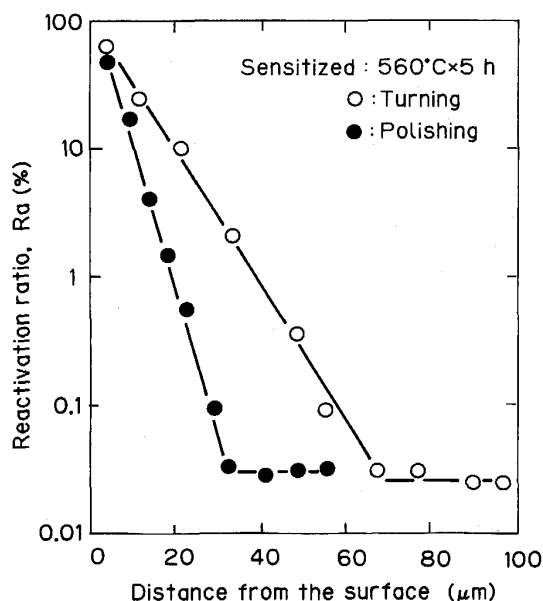


Fig. 3. Reactivation ratio in EPR test of deformed surface layers in the turned or emery-paper (#150) polished SUS304 stainless steel.

### 2.3 加工変質層の除去

$\gamma$ 系ステンレス鋼は冷間加工後鋭敏化熱処理を行うと著しく鋭敏化を加速する<sup>18)</sup>。本実験の場合、試験片製作のための旋削加工と前述の EPR 試験のための表面エメリー研磨を行っており、その後の加熱により表面近傍は著しく鋭敏化し、目的とする鋭敏化度測定障害になると考えられるのでこれを除去する必要がある。Fig. 3 は試験片と同一材料を同一条件で旋削加工またはエメリー紙 (#150) で湿式研磨した後、560°C で 5 h の鋭敏化熱処理を行い、 $R_a$  値の深さ方向の分布を測定した結果である。これより加工変質層の深さは旋削加工の場合は約 70  $\mu\text{m}$ 、エメリー研磨の場合は約 30  $\mu\text{m}$  と判断された。本実験では、試験片平行部を電解研磨により深さ 70~80  $\mu\text{m}$  除去した後、後述の核生成熱処理を行った。また、EPR 試験前の試験片表面は、湿式エメリー紙 (#150) で深さ 30~35  $\mu\text{m}$  除去した。

### 2.4 核生成熱処理

各種プラントで LTS が問題となるのは、運転初期の鋭敏化度は小さいがその後の低温加熱で鋭敏化が加速する場合であると思われる。LTS を促進する因子の一つは前もって Cr 炭化物またはその核が粒界に存在していることであり、このような状態の試料を得るための熱処理を Povich<sup>8)</sup> にならって核生成熱処理 (温度:  $T_N$ , 時間:  $t_N$ ) と呼ぶことにする。Fig. 4 は、650°C および 850°C で 1 h 電気炉で加熱後、送風機で強制冷却し、さらに 500°C で恒温加熱した場合、 $R_a$  値が時間とともに

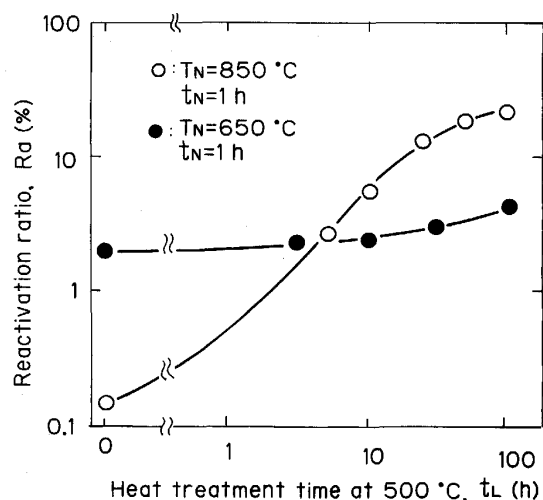
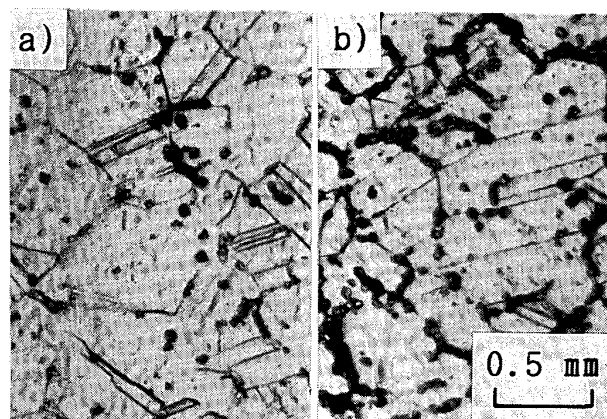


Fig. 4. Effect of nucleation heat treatment temperature on the progress of LTS detected by means of EPR test for SUS304 stainless steel.



a)  $T_N = 650^\circ\text{C}$ ,  $t_N = 1\text{ h}$  b)  $T_N = 850^\circ\text{C}$ ,  $t_N = 1\text{ h}$

Photo. 1. Micrograph of the nucleation specimen after oxalic acid etch test for SUS304 stainless steel.

どのように変化するかを調べたものである。 $R_a$  値の初期値は 650°C の方が 850°C の場合より大きいですが、途中で逆転するようになる。これは、Photo. 1 の 10% じゅう酸エッチ試験結果にみられるように 850°C の方が 650°C の場合より Cr 炭化物の粒界析出量が多く、その後の恒温加熱で粒界近傍の Cr 欠乏層が生成されやすいためと考えられる。本研究の核生成熱処理には、LTS が加速しやすい  $T_N = 850^\circ\text{C}$ ,  $t_N = 1\text{ h}$  を採用した。

### 2.5 LTS 実験

本 LTS 実験では、電気抵抗加熱炉を有するクリープ疲労試験機 (東京衡機製) を使用し試験片に恒温 ( $T_L$ ) 加熱と同時に各種応力を負荷した。温度は、試験片中央部の表面に押し当てた R 熱電対で測定し 500 $\pm$ 3°C の範囲になるように制御した。また昇温は荷重ゼロの制御

下で行い、450°Cで30 min、その後500°Cで約30 min保持し、試験片及び試験機各部の熱膨張がほぼ安定した後、荷重制御に切り替えて LTS 実験を開始した。負荷した応力形式は一定引張応力及び両振り繰返し応力（以下、繰返し応力と略記）の2種類で、一定引張応力値 ( $\sigma_t$ ) 及び応力振幅 ( $\sigma_a$ ) は 0, 118, 137, 156, 177 MPa の5種類である。繰返し応力の波形は応力保持時間 1 min、繰返し速度  $556 \times 10^{-5}$  Hz、平均応力ゼロの両振り台形波である。LTS 実験時間 ( $t_L$ ) は 100 h であるが、所定時間で実験を一時中断し、その時の試験片表面の  $Ra$  値を測定した。なお、本実験では、各種応力を負荷したときのひずみも同時に測定した。ひずみ測定には試験片平行部に石英棒を押し当てる方式の伸び計（標点：16 mm）を用いた。

## 2.6 Strauss 試験

EPR 試験で得られた  $Ra$  値と粒界腐食感受性の相関を調べる目的で、LTS 実験終了後 JIS G 0575 に準じて Strauss 試験を行った。本研究の場合、一本の試験片平行部から横断面の EPR 試験及び硬さ測定のための試料も採取するので、Strauss 試験のための試料大きさに制限があり、一般に行われている熱酸浸せき後の曲げ試験や引張試験が困難である。そこで本実験では次の方法により Strauss 試験を行った。

LTS 実験終了後の試験片平行部より、 $\phi 7.5 \times 10$  mm の棒状試料を採取し、JIS G 0575 に準じて Cu 入り硫酸・硫酸銅溶液中で 16 h 煮沸した。その後、試料を  $\phi 7.5 \times \phi 5.2 \times 5$  mm の円筒状に再加工し、円筒内面にテーパピン ( $\phi 5 \times \phi 6.3 \times 65$  mm) を打ち込んだ。この時、き裂発生のない場合の試料外径は約  $\phi 8.7$  mm（試料外表面がくぼ形状になり、正確な測定は困難）となり、試料外表面に生ずる計算上のひずみは約 16% である。結果の評価は、その時の円筒中央部横断面の最大き裂深さの測定と SEM による破面の観察によった。き裂深さの測定は測長目盛付き光学顕微鏡によった。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 LTS におよぼす一定引張応力の影響

Fig. 5 は恒温加熱中に種々の一定引張応力 ( $\sigma_t$ ) を試験片に負荷した時に  $Ra$  値がどのように変化するかを示したものである。LTS 実験時間の経過にともない  $Ra$  値が上昇しているが、この上昇傾向は負荷応力に関係しており、応力が大きいほど LTS が促進しやすくなっている。ここで、耐力 (142 MPa) 以下の応力 (118, 137 MPa) でも LTS が促進していることは注目される。また、応力 156 MPa 以下の場合には互いに似たような  $Ra$

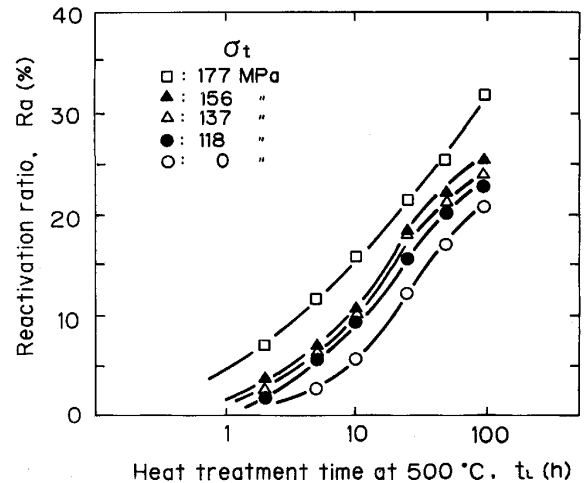


Fig. 5. Effect of constant tensile stress ( $\sigma_t$ ) applied during isothermal heat treatment on the progress of LTS detected by means of EPR test for carbides-nucleation-heat-treated SUS304 stainless steel.

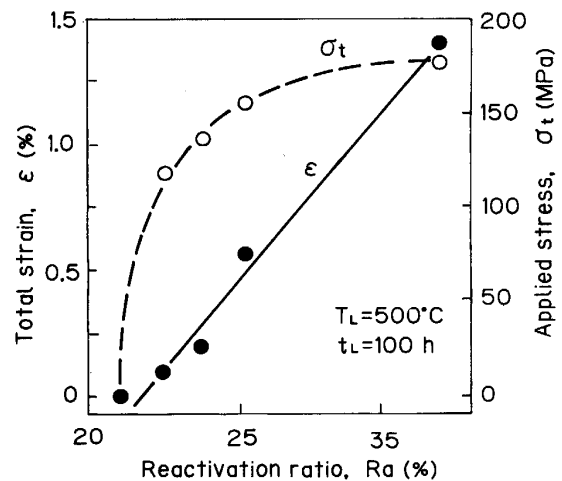


Fig. 6. Reactivation ratio in EPR test versus total strain and constant tensile stress for carbides-nucleation-heat-treated SUS304 stainless steel.

値の上昇傾向を示すが、177 MPa の場合は特異な傾向を示している。すなわち、156 MPa 以下の応力では、約 25 h まで  $Ra$  が急上昇し、約 50 h から緩やかになり、飽和する傾向にある。これに対し、177 MPa の応力の場合には他の応力の場合に比べ大きい  $Ra$  値になり、また約 50 h 以後も飽和傾向を示さず、100 h 以後もまだ上昇する傾向にある。

Fig. 6 は LTS 実験 100 h 後における  $Ra$  値と負荷応力及びその時の全ひずみ ( $\epsilon$ ) の関係を示したものである。 $Ra$  値と負荷応力とは比例していないが、 $Ra$  値と  $\epsilon$  に

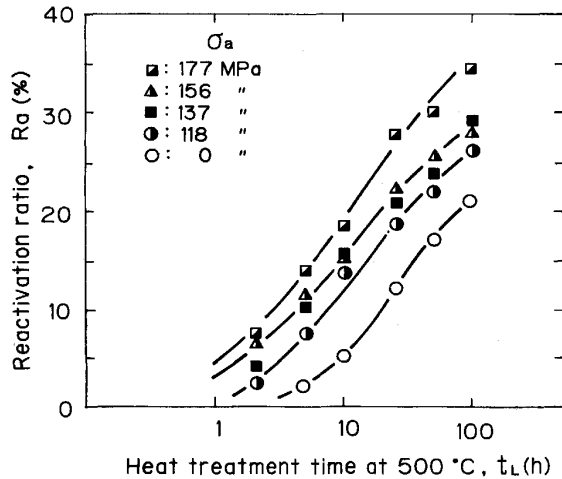


Fig. 7. Effect of alternate stress ( $\sigma_a$ ) applied during isothermal heat treatment on the progress of LTS detected by means of EPR test for carbides-nucleation-heat-treated SUS304 stainless steel.

は良い比例関係が見られる。このことは固体内の溶質の拡散係数は転位密度に比例し<sup>19)</sup>、転位密度は応力負荷によって生じた塑性ひずみに比例する<sup>20)</sup>ことと関連していると思われる。したがって、上記の LTS 促進現象の支配因子は応力よりはむしろひずみであることを示唆していると思われるが、これに関しては今後さらに実験・検討する必要がある。

### 3.2 LTS におよぼす繰返し応力の影響

Fig. 7 は恒温加熱中に種々の繰返し応力を試験片に負荷した時に  $Ra$  値がどのように変化するかを示したものである。一定引張応力の場合に比べて、ばらつきが大きいように見えるが、これは繰返し応力の圧縮過程で試験片に多少曲げ応力が生じたためと思われる。しかし、一定引張応力の場合と同様に、応力振幅 ( $\sigma_a$ ) が大きいほど LTS が促進しやすくなっている。 $Ra$  値は実験開始後 2 h 付近から急上昇し、156 MPa 以下の一定引張応力試験で見られたような 100 h 近傍での飽和傾向はみられない。繰返し応力の場合、応力振幅が 0.2% 耐力以下であっても LTS は 100 h 以後さらに相当進行するものと推測される。

Fig. 8 は LTS 実験時間 ( $t_L$ ) が 10 h 及び 100 h における  $Ra$  値を一定引張応力と繰返し応力の場合について比較したものである。10 h 及び 100 h とともに、すべての応力で繰返し応力の方が一定引張応力の場合より  $Ra$  値が大きくなっている。この傾向は、他の LTS 実験時間についても同じであり、繰返し応力の場合、一定引張応力の場合よりさらに LTS が促進しやすことを示している。一定引張応力負荷の場合の  $Ra$  値と  $\epsilon$  の関係

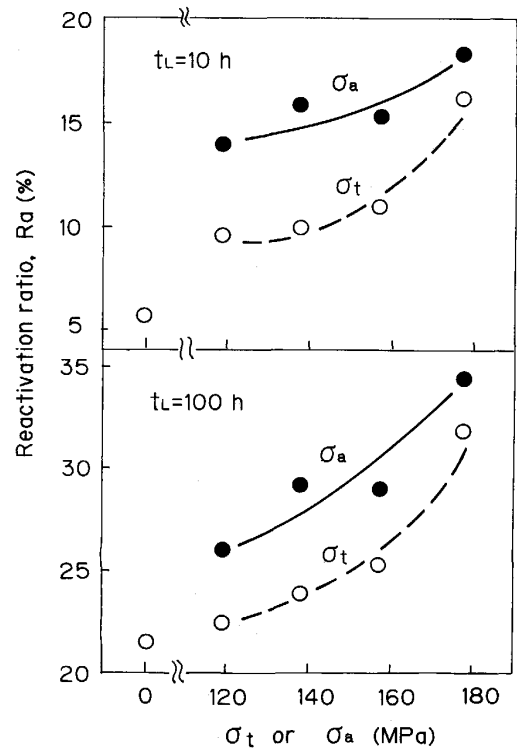


Fig. 8. Comparison of effects of constant tensile stress ( $\sigma_t$ ) and alternate stress ( $\sigma_a$ ) on LTS detected by means of EPR test for carbides-nucleation-heat-treated SUS304 stainless steel.

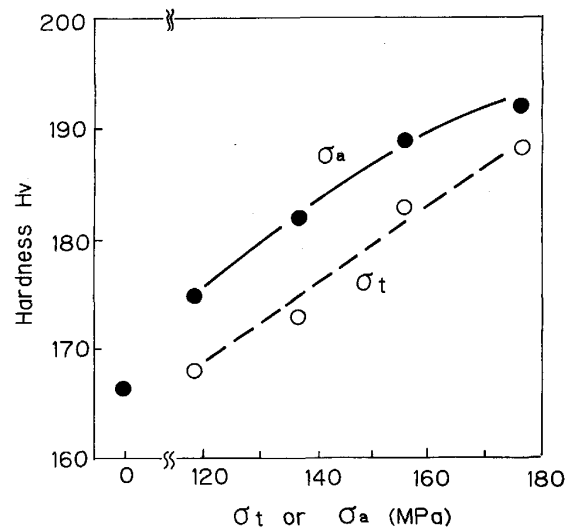


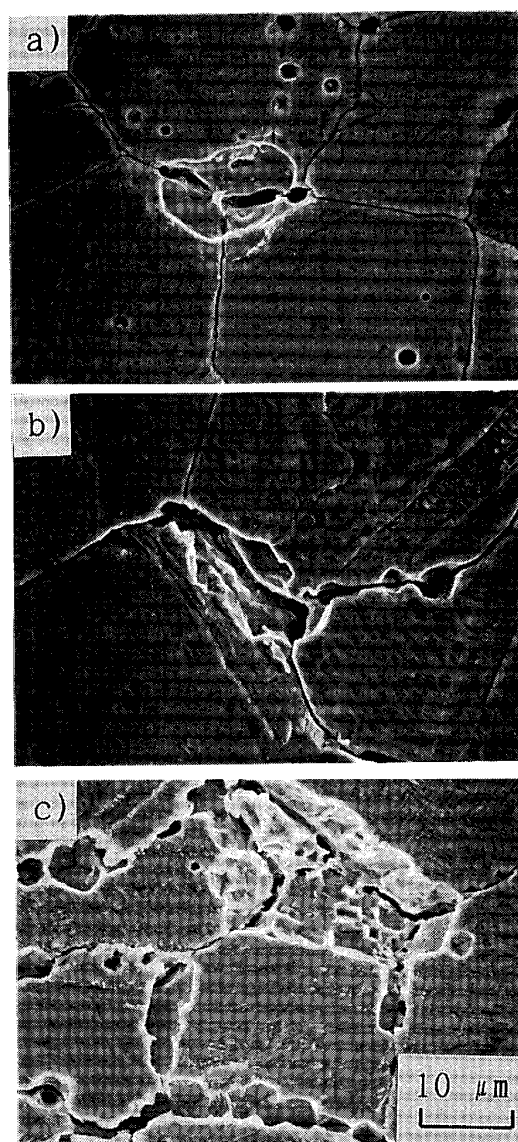
Fig. 9. Hardness of the constant tensile stressed specimen ( $\sigma_t$ ) and alternate stressed specimen ( $\sigma_a$ ) after 100 h of LTS test for carbides-nucleation-heat-treated SUS304 stainless steel.

(Fig. 6) のように、 $Ra$  値と繰返しひずみ (ひずみ振幅または塑性ひずみ幅) の関係を調べたが明確な関係は現時点では得られていない。これは本実験が荷重制御であり、繰返しひずみが繰返し数とともに変化すること、繰返し応力に伴う転位構造の変化が複雑なためと思われる

る。このことに関しては今後さらに検討する必要がある。

### 3.3 LTS 実験終了後の硬さ測定及び EPR 試験面の観察

Fig. 9 は各種応力で LTS 実験を 100 h 行った後の試験片硬さを示す。硬さは一定引張負荷材および繰返し負荷材ともに、負荷応力が大きくなるとともに高くなる傾向にあり、また繰返し負荷材は一定引張負荷材よりも高くなっている。すなわち応力条件が厳しくなれば粒界近傍に転位が集積しやすく炭化物の粒界析出が加速されること、および加工硬化により硬さが高くなるものと思われる。また、応力条件が厳しくなれば粒界のみならず、



a)  $\sigma = 0$  b)  $\sigma_t = 177$  MPa c)  $\sigma_a = 177$  MPa

Photo. 2. SEM of the etched structures of carbides-nucleation-heat-treated SUS304 stainless steel after 100 h of LTS test produced using EPR test.

粒内のすべり線などの欠陥部にも炭化物が析出するようになり、硬さがいっそう高くなったことも考えられる。Photo. 2 は、LTS 実験終了 (100 h) 後の試験片横断面の EPR 試験面の SEM 写真である。溶解は粒界近傍を起点とし粒内にも広がっている。その程度は応力条件が厳しいほど激しい。特に、繰返し応力負荷材の場合は一部の結晶粒が脱落するほど浸食されている。このことは負荷応力が LTS に影響し、応力条件が厳しいほど LTS が促進することを示している。しかし、高応力負荷材 ( $\sigma_t$  &  $\sigma_a = 177$  MPa) の場合は粒内が荒れており、粒内のすべり線などの欠陥部にも炭化物が析出し、その周辺が溶解したことが考えられ、 $Ra$  値には炭化物の粒内析出の影響も含んでいる可能性がある。結晶粒内に炭化物の析出があれば、熱酸浸せき試験で粒界腐食が見られないにもかかわらず、EPR 試験で高い  $Ra$  値が得られることがあり<sup>21)</sup>、EPR 試験は粒界腐食感受性のみを検出するとは限らない場合がある<sup>22)</sup>。本実験の高応力負荷材、特に繰返し応力負荷材の場合も、Photo. 2 に見られるように炭化物の粒内析出が疑われる。このような場合は EPR 試験と同時に、他の粒界腐食試験も合わせて行い、粒界腐食感受性を確認する必要がある。

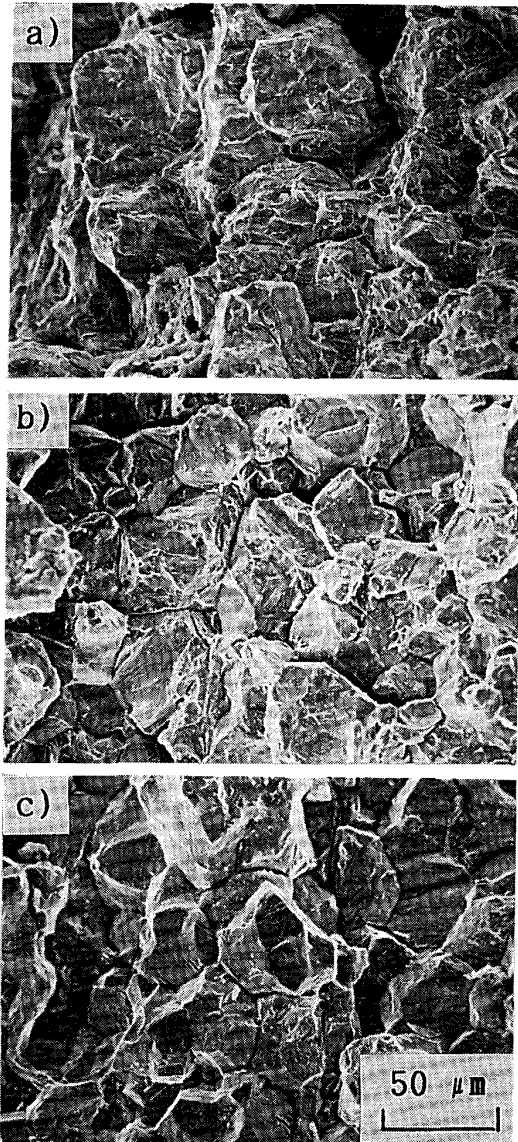
### 3.4 Strauss 試験

Table 2 は LTS 実験終了 (100 h) 後の Strauss 試験結果であり、き裂発生状態を負荷応力及び  $Ra$  に対応させて示したものである。 $\sigma_t = 177$  MPa と  $\sigma_a = 177$  MPa の場合は、テーパピンを打ち込んだときに破断したため、両者は比較できないが、無負荷材、 $\sigma_t = 118$  MPa 及び  $\sigma_a = 118$  MPa の場合を比較すると、明らかに応力条件に対応したき裂深さになっている。Photo. 3 は Strauss 試験における破面の SEM 写真であり、応力条件に対応した破面形態になっている。すなわち、無負荷試験材は巨視的には粒界割れのように見えるが、粒界面はディンプル模様が多く見られる。このディンプル模様はテーパピンを打ち込んだときの機械的延性破面であり、粒界に沿っての Cr 欠乏が不連続的であることを示している。繰返し応力負荷材はディンプル模様がほとんど見られず、ほぼ粒界脆性破壊となっており、粒界での Cr 欠乏がほぼ連続的であることを示している。一定引

Table 2. Maximum crack depth of LTS tested SUS304 stainless steel after Strauss test.

Stress (MPa)	0	$\sigma_t$		$\sigma_a$	
		118	177	118	177
$Ra$ (%)	21.1	22.5	31.9	26.0	34.4
Maximum crack depth (mm)	0.4	1.1	×	×	×

× : Rupture



a)  $\sigma = 0$  b)  $\sigma_t = 177$  MPa c)  $\sigma_a = 177$  MPa

Photo. 3. SEM of the fracture surfaces of carbides-nucleation-heat-treated SUS304 stainless steel after 100 h of LTS test obtained by Strauss test.

張応力試験材は無負荷試験材と繰返し応力試験材の中間の破面となっている。

硬さ測定及び EPR 試験面の観察において、高応力負荷材特に高応力繰返し試験片の場合は粒内にも炭化物が析出し、EPR 試験における  $R_a$  値は見かけの鋭敏化度を示している疑いがあったが、Strauss 試験によっても応力の LTS 促進効果が確認された。したがって、EPR 試験の  $R_a$  値には粒内炭化物の影響も多少含んでいる可能性もあるが、本実験の  $R_a$  値はほぼ粒界腐食感受性に対応しているものと思われる。なお、630°C での疲労試験では粒内のすべり線にも炭化物が析出するという報

告<sup>9)</sup>があるが、本実験の応力条件の最も厳しい繰返し応力負荷材について 10% しゅう酸エッチ試験を行った結果、粒内炭化物の存在は確認できなかった。この相違は実験温度や応力条件等が異なるためと思われるが、これについては今後さらに検討する必要がある。

#### 4. 結 論

SUS304 鋼の恒温熱処理 (500°C) 中に各種応力を負荷した場合の LTS 促進現象を、EPR 試験および Strauss 試験を行い検討した。得られた結果は次のとおりである。

(1) LTS 恒温熱処理中に一定引張応力が作用すると、恒温熱処理単独の場合に比べ鋭敏化が促進する。その促進度は負荷応力に依存している。

(2) 一定引張応力を負荷した LTS 実験 100 h 後の EPR 試験における再活性化率は、応力よりはむしろひずみに良く対応する。

(3) LTS 恒温熱処理中に繰返し応力が作用すると、一定引張応力の場合よりもさらに鋭敏化が促進する。その促進傾向は繰返し応力が大きいほど著しい。

終わりに本研究を遂行するにあたり激励と助言を賜った日本大学 北川英夫教授、東北大学 高橋秀明教授、庄子哲雄教授に深く感謝いたします。

#### 文 献

- 1) 久松敬弘, 小川洋一: 鉄と鋼, **63** (1977), p. 585
- 2) 小若正倫: 防食技術, **32** (1983), p. 526
- 3) 河原 徹: 腐食と対策事例集 (腐食防食協会編) (1985), p. 73 [海文堂]
- 4) 大塚 喬: 腐食と対策事例集 (腐食防食協会編) (1985), p. 77 [海文堂]
- 5) E. C. BAIN, R. H. ABORN and J. J. B. RUTHERFORD: Trans. Am. Soc. Steel Treating, **21** (1933), p. 481
- 6) C. S. TEDMON, Jr., D. A. VERMILYEA and J. H. ROSOLOWSKI: J. Electrochem. Soc., **118** (1971), p. 192
- 7) M. J. POVICH: Corrosion, **34** (1978), p. 60
- 8) M. J. POVICH and P. RAO: Corrosion, **34** (1978), p. 269
- 9) 篠田軍治, 桜井忠一, 川崎 正, 泉 久司: 材料試験, **9** (1960), p. 113
- 10) 山本俊二, 太田定雄, 大砂 寛: 材料, **13** (1964), p. 134
- 11) 平川賢爾, 時政勝行, 外山和男: 材料, **27** (1978), p. 943
- 12) 祐川正之, 志賀正雄, 浅野長一, 飛田芳光, 桐原誠信: 材料, **34** (1985), p. 1478
- 13) 上崎孝一, 紅露孝哉, 稲田貞役, 益本 功: 溶接学会誌, **43** (1974), p. 702
- 14) H. D. SOLOMON and D. C. LORD: Corrosion, **36** (1980), p. 395
- 15) 足立俊郎, 神余隆義, 前北杲彦: 日新製鋼技報, **45** (1981), p. 9
- 16) S. M. BRUEMMER, L. A. CHARLOT and D. G. ATTERIDGE: Corrosion, **44** (1988), p. 429

- 
- 17) 新井 宏: 鉄と鋼, **56** (1970), p. 44
  - 18) A. BOSE and P. K. DE: *Corrosion*, **43** (1987), p. 624
  - 19) P. G. SHEWMON: 固体内の拡散 (1989), p. 195 [コロナ社]
  - 20) 幸田成康: 金属物理学序論 (1987), p. 334 [コロナ社]
  - 21) 森 康彦, 服部成雄, 深井 晶, 幡谷文男, 佐々木良一:  
腐食防食協会春期学術講演会 (1979), A-104
  - 22) 梅村文夫, 川本輝明: 日本金属学会会報, **9** (1983),  
p. 894
-