

# 準安定オーステナイト鋼の加工変態と低サイクル疲労について

瀧本 昭夫\* ・ 恒松 裕之\*\* ・ 稲富 俊隆\*\*\*  
 富尾 秀博\*\*\*\* ・ 片倉 和人\*\*\*\*\* ・ 出口 政美\*\*\*\*\*

## Strain Induced Martensitic Transformation and Low Cycle Fatigue in Metastable Austenitic Steels

Akio TAKIMOTO, Hiroyuki TSUNEMATSU, Toshitaka INATOMI,  
 Hidehiro TOMIO, Kazuto KATAKURA and Masami DEGUCHI

### Abstract

The effect of strain induced martensite on the fatigue life was investigated in the air and brine by using metastable austenitic steels. A center hole, double edge key-hole or groove notches were introduced in tensile and fatigue specimens as elastic and plastic strain concentrators.

Smooth specimens tested in tension exhibit the transformation product more in brine than in the air both in SUS 301 and 302. The induced martensite distribution around a center hole in tension shows a butterfly-wing type extent in the alloy D.

In the air and brine a fatigue crack propagates in three stages both in SUS 301 and 302. The fatigue life in brine is always shorter than that in the air. The volume of induced martensite in brine is usually more than that in the air and it is confirmed that the transformation starts at the earlier cycle in brine than in the air in SUS 301. The crack growth rate per unit cycle in the second stage increases with the designed stress concentration factor on the key-hole and groove notch specimens and the complete reversed relationship is observed on the center hole specimen in which the stress gradient is seemed to be another important factor. The fringes around freshly propagated fatigue cracks, corroded by brine, are often observed both in SUS 301 and 302.

### 1. 緒 言

準安定オーステナイト鋼に加工ひずみを与えると焼入れ処理同様に変態を起し  $\alpha'$  マルテンサイトや  $\epsilon$  中間相を生じる事は良く知られた事実である。これら変態機構については非常に詳しい研究報告が多い。しかし、実用設計に準じた設計応力集中係数を有する試片形状による加工変態の定量化に関するもの<sup>1),2)</sup>は非常に少ない。この報告では、加工誘起変態に敏感な材料

(転位および双晶マルテンサイトを生成しうるもの)を選び設計応力集中率と加工変態分布および加工変態量と低サイクル疲労寿命などの関係を調べた。

加工硬化性を増加させた材料である SUS 301 は、試片形状および切欠き形状によって非常に敏感な感受性を示し、その硬化能は設計因子により大きく変る様子を定量的に示した。また 18-8 ステンレスとして知られる SUS 302 も硬化能こそ前者程大きくないが、同様な傾向を示した。次に、空気中と海水中の引張り変形では塑性変形による発熱のためか、空気中の方が両材料とも小さな硬化能を示すことが分かった。疲労繰返し数に対する加工誘起変態量は、引張試験同様に SUS 301 の方が多い。双晶マルテンサイトを生成する Fe-Ni-C 鋼での切欠き周辺の加工誘起変態量の分布測定では、予想通り、蝶の羽根形の分布を成し、塑性変形域の拡がり方と類似したものを示した。

これら SUS 材の切欠き試片を用いた空気中および海中での低サイクル疲労試験では、定説通り

\* 生産機械工学科

\*\* 大学院工学研究科生産機械工学専攻

\*\*\* 大学院 工学研究科 生産機械工学専攻 (現・新日本製鉄株式会社八幡製鉄所)

\*\*\*\* 大学院 工学研究科 生産機械工学専攻 (現・新日本製鉄株式会社君津製鉄所)

\*\*\*\*\* 生産機械工学科 (現・太平洋工業株式会社)

\*\*\*\*\* 生産機械工学科 (現・新日本造機株式会社)

Manson-Coffin の関係  $d\epsilon_p = N^{-m} \cdot C$  が成立し、海水の方が約0.56倍の寿命になる事が分かった。亀裂割れ伝播速度  $dC/dN$  は、空気中および海水中とも大体3段階で移行し、切欠き底からの亀裂の発生およびそれ以後の伝播過程と共に加工誘起変態相の発生速度  $dM/dN$  ( $M$ : マルテンサイト量) および発生量が複雑に関与している。加工誘起変態を生じる材料でも疲労寿命は、設計応力集中と関係づけられるが、応力勾配および変態発生状況も重要な因子である事が判明した。尚、両 SUS 材とも海水中で疲労亀裂先端周辺に腐食縞 (Corrosion Fringe) を生じる事例も報告する。

## 2. 実験方法

供試材は、市販の SUS 301 および 302 で、前者は溶体化処理後酸洗仕上げした厚さ 1.2 mm の板材および

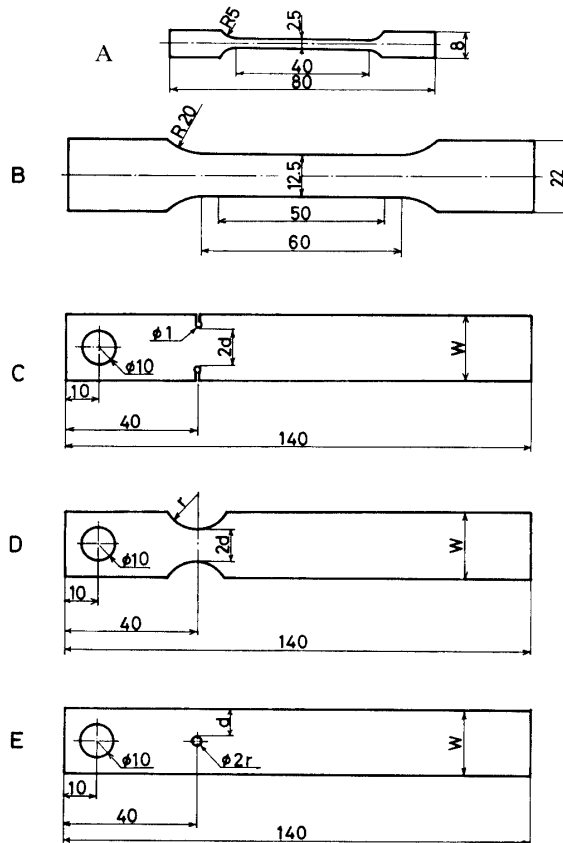


Fig. 1 Tensile and fatigue specimens employed.

後者は酸洗後少々のスキンプラス仕上げした厚さ 1.08 mm のものであり、これらの化学組成を Table 1 に示す。短冊状試片を圧延方向に平行に切出した後、所定の寸法に仕上げた。試片形状は、Fig. 1 に示すごとく小型 (タイプ A) および JIS 13B 型 (タイプ B) の平滑試片と両端キーホール切欠き付き試片 (タイプ C), 両端半円切欠き付き試片 (タイプ D) および中央一円孔付き試片 (タイプ E) の 5 種類である。試片表面および側面の仕上げは、180 番から 1000 番までの耐水研磨紙を用いて研磨した後、電解研磨 (電解液: 40% 硫酸と 60% リン酸) により鏡面状にした。設計応力集中係数 ( $K_t$ ) は、両端キーホール切欠き付き試片では正味幅を一定にし切欠き深さを変化させ  $K_t$  を 5 段階に変えた。同じく両端半円切欠き付き試片では正味幅を一定にし円孔径を変化させ  $K_t$  を 3 段階に変えて、 $\alpha_f$  (深いノッチの応力集中率) および  $\alpha_f$  値 (浅いノッチの応力集中率) より算出した<sup>3)</sup>。中央円孔付き試片では正味幅を一定にし円孔径を 4 段階に変化させ、 $K_t$  値は Peterson の図<sup>4)</sup> より得た値を用いた。

疲労試験機は、低サイクル (12 cpm) の片持ちはり式の両振り曲げ試験機でひずみ振幅 ( $J\epsilon$ ) は平滑試片により、全ひずみ振幅 ( $J\epsilon_t = J\epsilon_e + J\epsilon_p$ ) を 0.3% に調整した。試験環境は、空気中と海水中 (宇部市市波港付近で採取) の 2 種類に分け、海水は、亀裂長さ測定および X 線による加工誘起相発生量測定に都度に適当に交換した。尚、両条件共試験温度は、 $21 \pm 2^\circ\text{C}$  になるように努めた。疲労亀裂については、破断に至るまでの挙動を設計応力集中係数の大きさに応じて小刻みあるいは間隔をおいて試片をとりはずしその長さを顕微鏡下 ( $\times 600$ ) で測定した。特に海水中の初期亀裂の段階では、腐食模様観察のため一部写真撮影も行った。切欠き先端に接する  $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$  の領域を A 域と称し、この域に発生した平均加工誘起相量を X 線ディフラクトメーターを使用して直接比較法で定量分析した。

加工変態分布と応力集中率の関係については、双晶マルテンサイトを生成する Fe-Ni-C 合金 D を使用して断面および表面マルテンサイト量を調べた。短冊状試片での加工変態と引張りひずみおよび疲労サイクル

Table 1 Chemical Composition

(Wt %)

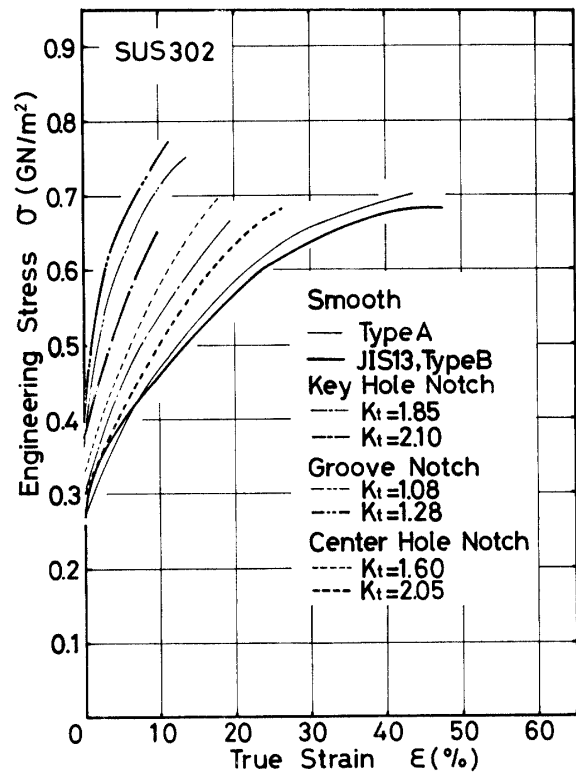
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	Fe
SUS301	0.108	0.49	1.11	0.027	0.009	7.44	17.25	0.022	Bal
SUS302	0.046	0.50	1.43	0.030	0.008	9.56	17.46	0.024	Bal
Alloy D	0.290	—	—	—	—	27.00	—	—	Bal

数との関係には、SUS 301 および 302 を用いた。

### 3. 実験結果および考察

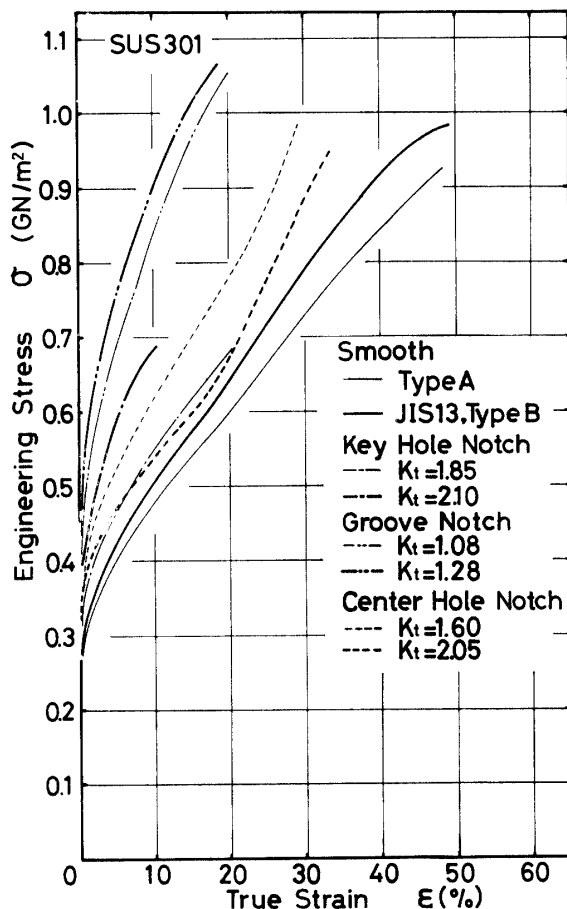
#### 3.1 引張応力とひずみ

準安定オーステナイトを有するステンレス鋼の中でも SUS 301 は最も加工誘起変態を生成し易い材料であり、SUS 302 はそれよりも安定な材料である。今、前者を用いた種々の試片の引張変形曲線を Fig. 2 (a) に示した。同様に後者の材料の結果を Fig. 2 (b) に示した。両図に示される如く塑性ひずみに対する正味公称応力の値は、平滑試片のものが一番低く、次いで中央円孔切欠き試片の  $K_t=2.05$  あるいは、両端キーホール付き試片の  $K_t=1.85$  のものがあらわれ、以後は、中央円孔付き試片の  $K_t=1.60$ 、両端キーホール付き試片の  $K_t=2.10$ 、両端半円付き試片の  $K_t=1.08$  となり最も大きな値は両端半円付き試片の  $K_t=1.28$  のものとなっている。従って、流動曲線を  $\sigma = k\varepsilon^n$  で表示し同一  $\varepsilon_p$  に対する流動応力の大きさを直接比較すると曲線が上に位置する程、加工硬化の度合いが大きくなり、同一材料である事を考えると、加工誘起変態量



(b)

Fig. 2 Flow curves of various type tensile specimens of SUS 301 (a) and 302 (b) in the air, which may be due to the different amounts of strain induced martensite.



(a)

の多少と直接関係していると考えられる。同じ事が Fig. 2 (b) についても言える。又、Fig. 2 (a) の方が Fig. 2 (b) より全体的に高い応力値を示している事も前者の加工誘起変態の容易さを示していることになる。尚、ここでタイプ C 試片とタイプ D 試片は、応力集中係数の大きさに依存しているが、タイプ E 試片については、 $K_t$  の影響よりも応力勾配、即ち  $I' = \partial\sigma / \partial x_{(x=0)}$  への依存度が勝っているためかタイプ E 試片のみ異った傾向を示している。又、切欠き付き試片は、平滑試片の引張強さよりも強くなっており、これは切欠きの導入による加工変態誘発が効果的に作用するという報告と一致している。

空気中および海水中の SUS 301 と 302 の引張挙動を Fig. 3 に示す。タイプ A 試片を用いた結果であるが SUS 301 および 302 の両方とも海水の方が強度が高くなっている。市販の 18-8 ステンレス鋼の  $M_d$  は常温から 100°C 前後であり、熱伝導率も炭素鋼に比べ 1/4 程度と低い事実<sup>5)</sup> および空気中での引張りに伴う温度上昇は加工誘起変態を抑制する作用をなし、海水中においては、冷却効果により加工誘起変態が促進さ

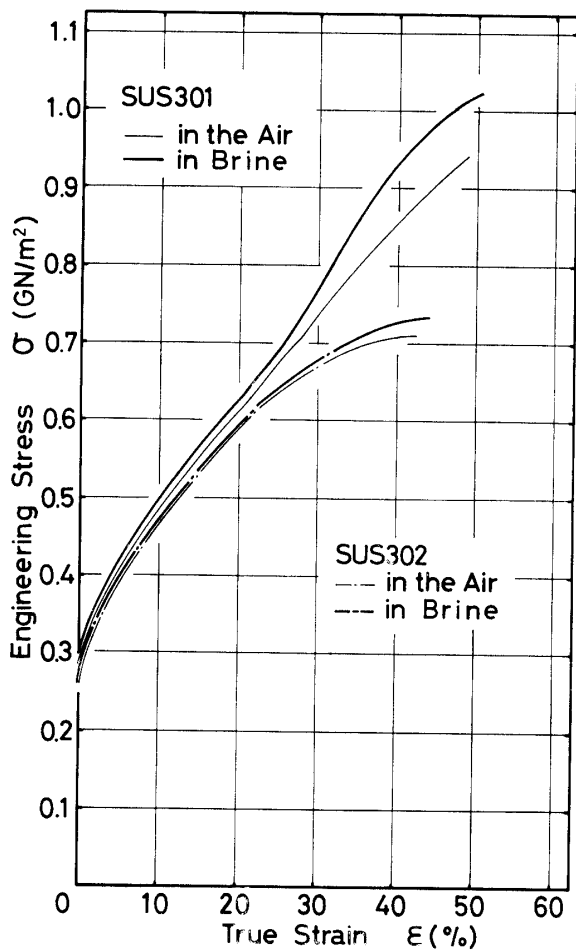


Fig. 3 Flow curves of the type A tensile specimens of SUS 301 and 302 both in the air and brine.

れやすい事などから上の現象が理解できる。又、海水中および空気中とも、SUS 301の方が SUS 302より高い応力値を示している事は前述の加工硬化性に伴うものである。

### 3.2 引張塑性ひずみおよび繰返し数と変態量

引張塑性ひずみと加工誘起変態相量の関係を Fig. 4 (a) に示す。Figs. 2 および 3 で予測した通り SUS 301の方が SUS 302に比べて変態量は、 $\epsilon_p = 20\%$ 近傍から極端に多くなっている。尚、後者は Cr および Ni 量が多くオーステナイトの安定化が得られている上に酸洗後少々スキンプラス仕上げをしたままであり、この事もオーステナイトを少々安定化させている要因の一つであろう。又、引張塑性ひずみ20%以上では、マルテンサイト増加が急激に多くなっている事実は Fig. 3 の  $\sigma-\epsilon$  曲線についても  $\epsilon_p \geq 20\%$  について SUS 301 と 302 の強度差が顕著に表われていることと良く一致している。次に短冊状試験片 (10×140×1.20 (or 1.08)

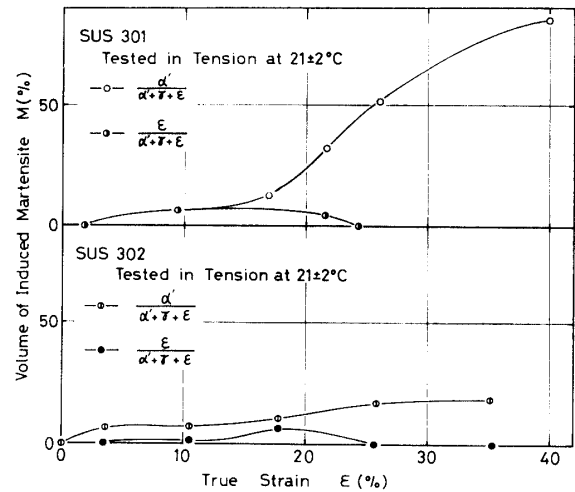


Fig. 4(a) Volume of the induced  $\alpha'$ -martensite and  $\epsilon$ -phase as functions of tensile strain both in SUS 301 and 302.

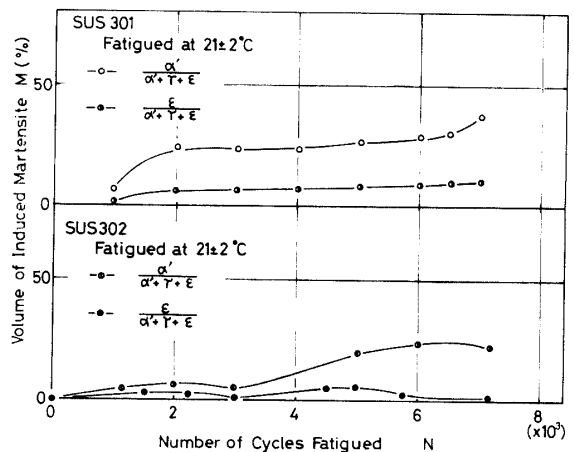


Fig. 4(b) Volume of the induced  $\alpha'$ -martensite and  $\epsilon$ -phase as functions of cycle fatigued both in SUS 301 and 302.

mm) を用いて行った加工誘起変態相量と疲労繰返し数の関係例を Fig. 4 (b) に示す。やはり前図の関係と同様に SUS 301の方が SUS 302に比べて変態量が多くなっている。18-8ステンレス鋼においては、繰返し数とともにマルテンサイト量が増加する事は他にも報告されている<sup>6)</sup>。

### 3.3 一円孔周辺のマルテンサイト分布

Fig. 5 (a) は、試片中央部に一円孔を導入し、引張塑性ひずみにより円孔周辺部に生成するマルテンサイト量を定量測定したもので、測定は、リニア・アナリシス法を用いた。尚、この試験にはマルテンサイト組織を検出しやすい材料として、双晶マルテンサイトを生成する Fe-Ni-C 合金 D を用いた。引張軸に直角を

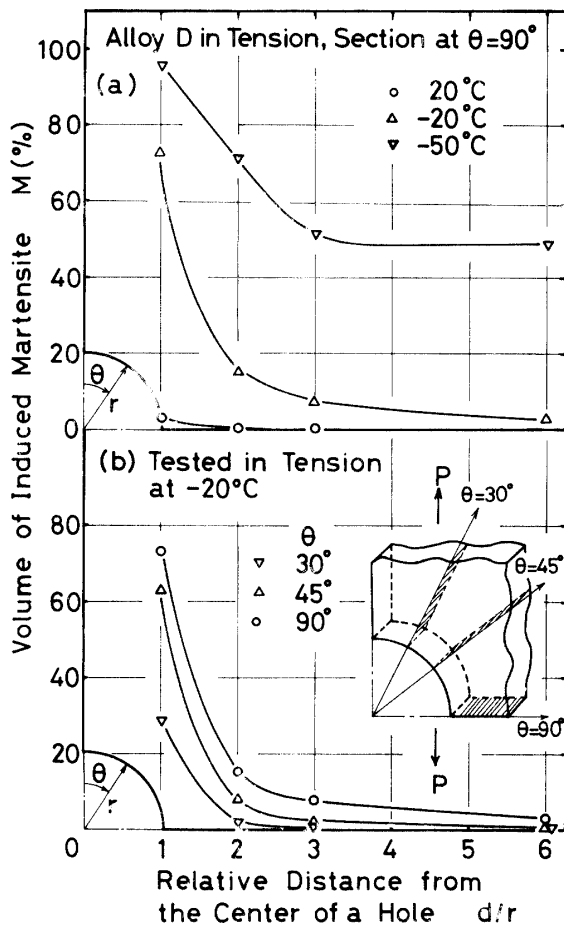


Fig. 5 Distributions of induced martensite around a center hole in tensile specimens. In (a) and (b) test temperatures and sectioned angles were varied, respectively.

なす断面での各温度による誘起マルテンサイト発生量と円孔縁からの相対距離の関係 (a) および引張軸から  $\theta$  をなす断面でのそれらの関係 (b) を示している。合金 D の  $M_s$  点は  $-60^\circ\text{C}$  近傍であり加工誘起変態のおこる上限は  $100^\circ\text{C}$  近傍であることが分かっている。Fig. 5 (a) は、 $M_s$  点に近づく程、つまり、 $20^\circ\text{C}$ 、 $-20^\circ\text{C}$  および  $-50^\circ\text{C}$  の順に変態量と共に分布も変る事実を示している。変形温度が室温に近い程、相対距離の増加と共に変態量は急激に減少している。弾性解によれば、その応力分布は板幅が穴径の 6 倍以上あれば無限板の解と殆ど等しくなる。弾性変形と塑性変形の本質的な違い、加工硬化指数および変形域の拡がり方と塑性ひずみ集中率の大きさなど複雑な要因が含まれているが、この図において  $d/r=6$  の位置においては、 $-50^\circ\text{C}$  の結果を除いては、変態量は殆ど零になり、弾性ひずみ分布と同様な傾向を示している。Fig. 5 (b) においては、引張軸から  $\theta=30^\circ$ 、 $45^\circ$  および  $90^\circ$

の断面の順に変態量は増加している。これも上述と同様な分布傾向を示している。 $-20^\circ\text{C}$  試験結果では  $\theta=90^\circ$  の断面で最大変態量を示しているが、この拡がり方は温度によっても変る事は明らかである。一般に塑性変形域の拡がり方は、円孔周辺に蝶の羽根形状のものが発生するが、Fig. 5 (b) の結果は、 $d/r$  が 6 になっても、 $\theta=90^\circ$  の面の方が他の面よりも変態量が多い。しかし、 $-50^\circ\text{C}$  変形の加工誘起相分布では、予想通り蝶の羽根形状の変態域の拡がりを見せ、 $M_s$  点に近い温度での加工誘起変態では、せん断ひずみまたは塑性域の拡がりと同様な傾向を示す事を確認している。

### 3.4 塑性ひずみ振幅と疲労寿命

種々の切欠きを持つ試片による低サイクル疲労試験に入る前にタイプ D 試片を用いた両振り曲げ試験 (110 cpm) で塑性ひずみ振幅 ( $J_{\epsilon_p}$ ) と疲労寿命の関係を両環境中で試験した結果を Fig. 6 に示す。SUS 301 のタイプ D 試片 ( $r=10\text{ mm}$ ) を用いたもので空気中および海水中とも 予期した通り  $J_{\epsilon_p}$  の増加と共に破断に到るサイクル数は減少し、その傾向は空気中および海水中ともほとんど直線で近似出来る。この関係では空気中の方が約 1.8 倍寿命が長くなることを示している。一般に Manson-Coffin<sup>7)</sup> の式は、

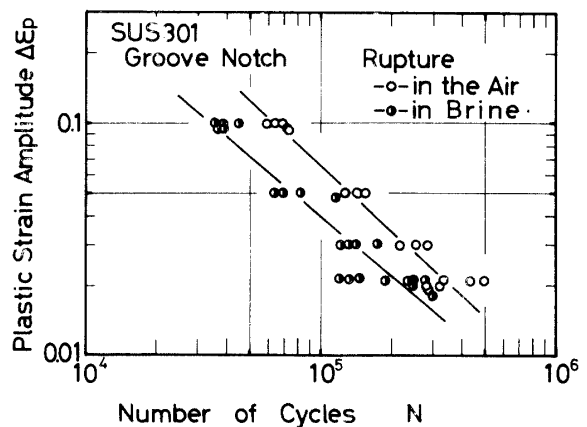


Fig. 6 Relationship between plastic strain amplitude and the number of cycles in SUS 301 fatigued both in the air and brine.

$$J_{\epsilon_p} = N^{-m} \cdot C$$

$J_{\epsilon_p}$ : 塑性ひずみ振幅

$N$ : 破断までの繰返し数

$m, C$ : 定数

で表わされ、Fig. 6 の関係より定数  $m$  と  $C$  を求めると

空气中  $\Delta \varepsilon_p = N^{-0.91} \cdot 2.2 \times 10^3$

海水中  $\Delta \varepsilon_p = N^{-0.85} \cdot 6.7 \times 10^2$

となる。これらの値は、Coffinの-0.5およびMansonの塑性ひずみに相当する値-0.6よりは小さい値を示しているが、これは、切欠き試片であることと、それによる加工誘起変態の促進効果によるものであろう。

3.5 亀裂長さと繰返し数

一定振幅における亀裂伝播速度  $dC/dN$  は、応力、ひずみ、初期割れ長さ、繰返し速度および疲労環境など多くの因子により影響され、経験的に得られた相関関係式も非常に多く提唱されている。例えば<sup>8)</sup>、Headなどによる応力と割れ長さの関係

$$dC/dN = A \cdot \sigma^m \cdot C^n$$

$\sigma$ : 亀裂に垂直な引張り応力

$C$ : 亀裂長さ

$A, m, n$ : 実験上の定数

や、Parisによる  $dC/dN$  と割れ先端の応力拡大係数振幅  $\Delta K$  の関係

$$dC/dN = A(\Delta K)^n$$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min}$$

およびこれに応力比  $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$  の影響を考えたものなどが中でも良く参考にされている。

ここでは、加工変態が疲労破断におよぼす影響を空气中と海水中で比較することを主眼とし、塑性曲げたわみを一定にした両振り疲労試験を行ったので亀裂伝播速度  $dC/dN$  は、単に繰返し数との関係で表示し、これらの間に顕著な差のあることを確認した。両端キーホール切欠き付き試片 ( $K_t = 2.05$ ) の亀裂長さ  $C$  と繰返し数の関係の一例を Fig. 7 (a) に示す。同図より  $C-N$  の関係は、3段階に移行する事が分かる。まず第1段階は亀裂が発生し急激に成長する期間で、第3段階は亀裂が急速に大きくなり破断まで至るもので、その中間の第2段階は、割合遅い過渡的な場合と考えられる。この図でも SUS 301の方が SUS 302よりも疲労寿命が長くなっている事は明白であり、タイプ A 試片による空气中および海水中での機械的性質を表わした Fig. 3 の関係とも一致する。又繰返し塑性ひずみにより試片の温度が上昇するという事実から、海水中での冷却作用による加工変態相の生じ方に起因していると思われる点は前述の通りである。両端半円切欠き付き試片 ( $K_t = 1.14$ ) および中央円孔付き試片

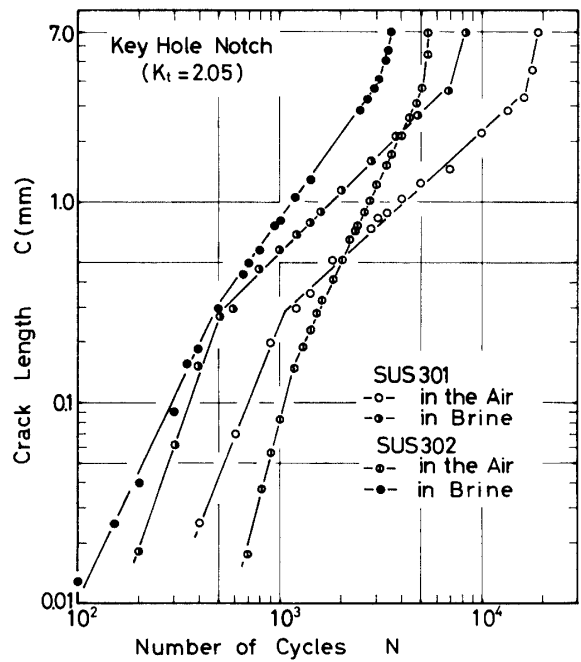


Fig. 7(a) Crack grow length versus the number of cycles on the key hole notch specimen of  $K_t = 2.05$ . Results in the air and brine both in SUS 301 and 302 are compared.

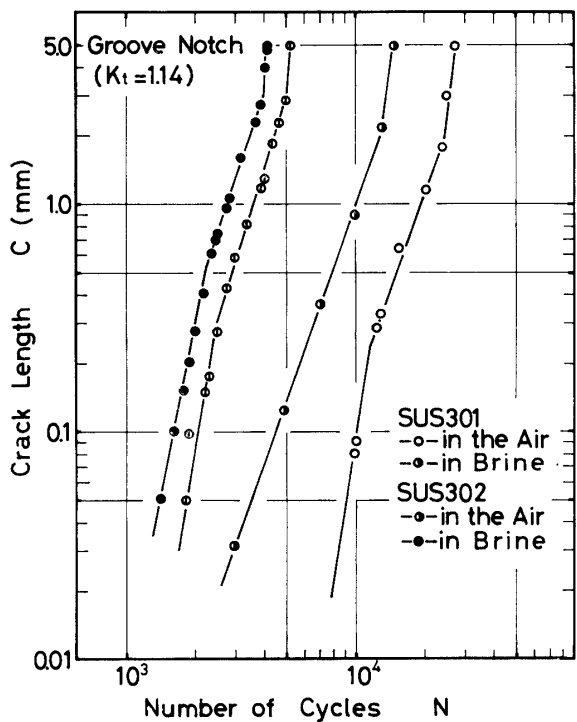


Fig. 7(b) Crack grow length versus the number of cycles on the groove notch specimen of  $K_t = 1.14$ . Results in the air and brine both in SUS 301 and 302 are compared.

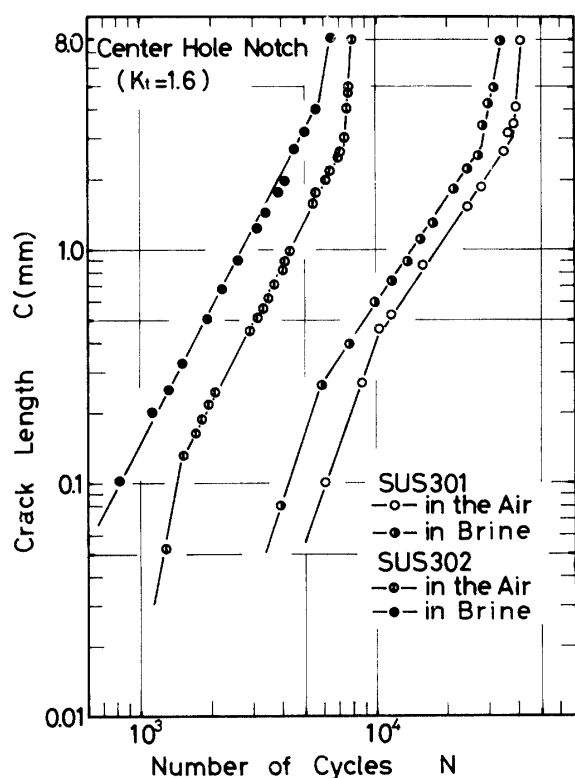


Fig. 7(c) Crack grow length versus the number of cycles on the center hole notch specimen of  $K_t=1.6$ . Results in the air and brine both in SUS 301 and 302 are compared.

( $K_t=1.6$ ) の亀裂進展長さ と繰返し数の関係を Figs. 7(b) および (c) に示す。これらも同様な関係を証明している。これらの図にみられるように、亀裂進展速度はいずれも 2 段階 (主として海水中) 又は 3 段階 (空気中および海水中) で表わされている。亀裂は切欠き底の応力またはひずみ集中部に発生し進展することになるが、これらに及ぼす個々の因子は色々考えられる。それらのうち表面仕上げ条件、機械加工ひずみおよび加工形状 (応力集中係数で統一出来るとする) などを固定した因子と考えると、環境 (空気中/海水中) および材料 (SUS 301/302) は主たる因子となる。図示されているごとく海水中では、亀裂発生および進展速度も早く疲労寿命も短い。これは、他の項目で示した通り海水中での加工誘起変態量の多い事実と関係していると思える。又、空気中と海水中の寿命差と変態量の関係は SUS 301 および 302 個々に説明出来るが、SUS 301 と 302 の材料比較では説明出来ない。その理由は、前者の溶体化処理材に比べ、後者は少々スキンプラスを加えたものであり、この条件の違いは合金組成の違いとも相まって、後で検討する如く加工硬化指数の差によるひずみ集中率の違いによるものであろう。

他の主たる理由としては、マルテンサイト発生速度 ( $dM/dN$ ) と発生量の違いによる 2 相混合比に依存している事が考えられる。

### 3.6 疲労寿命と応力集中係数

次に両端キーホール切欠き試片の疲労寿命と応力集中中の関係を Fig. 8 (a) に示す。応力集中係数が大きくなる程疲労寿命が低下している。SUS 301 と 302 の疲労寿命を比較すると、 $K_t$  が小さい程差が顕著に表われているが、 $K_t=2.05, 2.10$  となると近接している。空気中と海水中とを比較するとやはり海水中の方が寿命は短くなっている。又、亀裂長さ 0.1 mm の繰返し数をみても空気中の方が海水中よりも遅いことを示している。これは、Fig. 7 (a), (b), (c) の C-N 曲線から分かるように海水中の方が初期亀裂発生が早く、又 SUS 302 の方が 301 よりも亀裂の発生が早い傾向にある。両端半円付き試片の疲労寿命と応力集中係数の関係を Fig. 8 (b) に示す。タイプ C 試片と同様の傾向

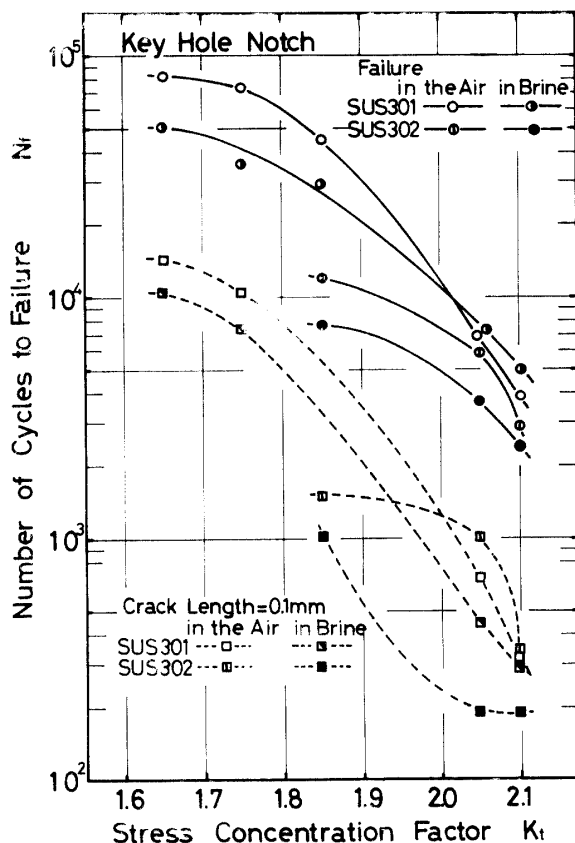


Fig. 8(a) Number of cycles to failure is plotted to the designed elastic stress concentration factor for the key hole notch specimen. Results in the air and brine both in SUS 301 and 302 are compared.

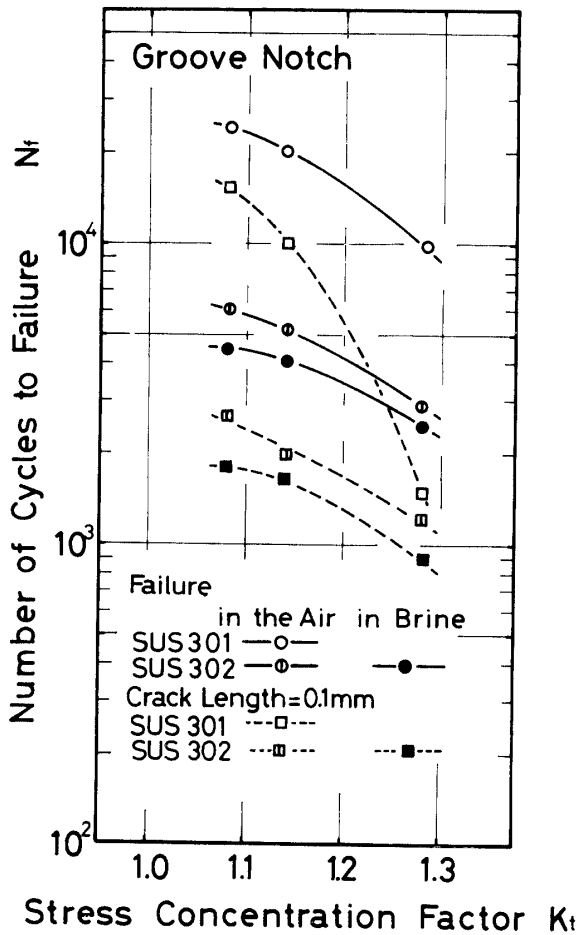


Fig. 8(b) Number of cycles to failure is plotted to the designed elastic stress concentration factor for the groove notch specimen. Results in the air and brine both in SUS 301 and 302 are compared.

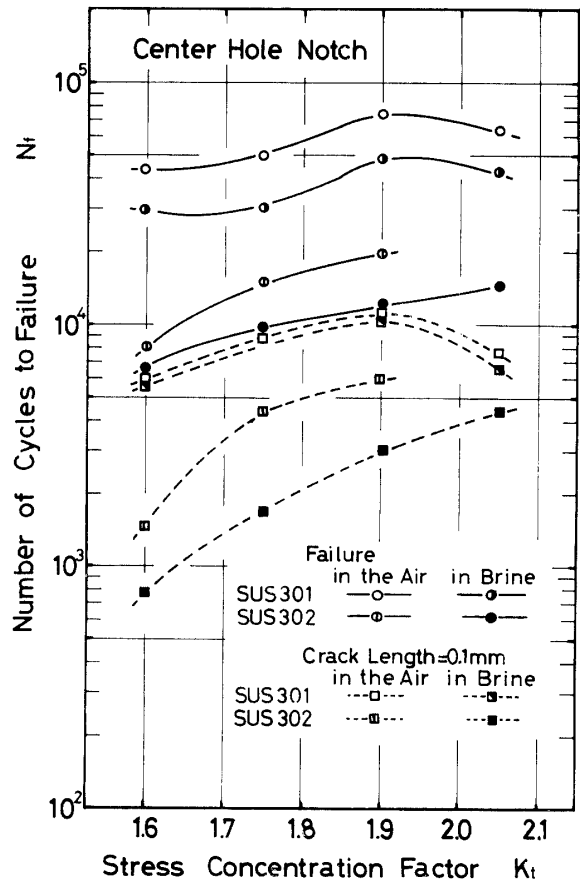


Fig. 8(c) Number of cycles to failure is plotted to the designed elastic stress concentration factor for the center hole notch specimen. Results in the air and brine both in SUS 301 and 302 are compared.

となる。中央円孔付き試片の疲労寿命と応力集中係数の関係を Fig. 8 (c) に示す。  $K_t=1.6$  の場合、穴径  $2r$  が 5 mm で、  $K_t=2.05$  では  $2r=1.5$  mm である。今、応力勾配  $I' = \partial\sigma / \partial x_{(x=0)}$  が  $K_t/r$  に比例すると考えると、  $K_t=1.6$  の方は応力集中係数は小さいが、  $I'$  値が小さくなり試験片幅方向に全体的に影響を受け易く、逆に  $K_t=2.05$  では、  $I'$  値が大きいため円孔の周辺のみ限定されるために、他の二者とは逆に  $K_t$  が大きいにもかかわらず疲労寿命が長くなるという結果が出るものと考えられる。

### 3.7 亀裂伝播速度と疲労寿命

第 3.5 項、亀裂進展過程の第 2 段階での両端キーホール切欠き付き試片、両端半円切欠き付き試片および中央円孔付き試片の亀裂伝播速度  $dC/dN$  と応力集中係数の関係の一例を Fig. 9 に示す。疲労寿命の短い

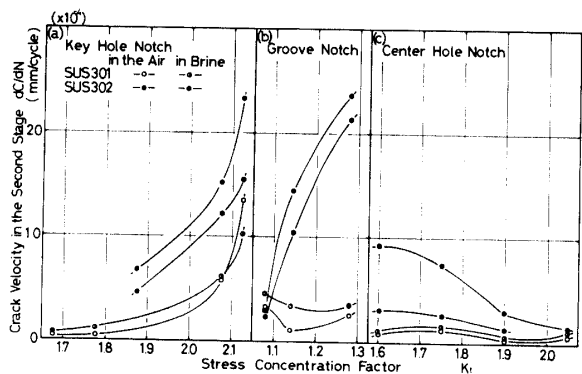


Fig. 9 Average crack growth rate per unit cycle in the second stage is plotted to the designed elastic stress concentration factor. (a), (b) and (c) indicate the results on the key hole, the groove and the center hole notch specimens, respectively.

程第 2 段階における亀裂伝播速度は速くなっている。SUS 301 の方が 302 に比べて亀裂伝播速度は遅くなっている。これは中間量の加工誘起相が効果的に働いた



ものと考えられる。これらの結果を考え合せると、SUS 301 では変態量および亀裂進展長さと同返し数の関係は、変態発生速度  $dM/dN$  が速いもの程、疲労寿命は短くなることを示している。変態相と疲労寿命の関係については、これまで多くの研究者によって報告されているが、現在では変態相が、疲労割れ伝播を促進させ有害であるという報告<sup>9)</sup>と、逆に効果的であるとの報告<sup>10)</sup>の二説に分れて未だ解明されていない。しかし、これ迄検討したように、これらの関係は変態相の発生速度 ( $dM/dN$ ) と発生量に依存している事が明らかになった。従って、当研究の変態量と同返し数の関係を示す Fig. 4 (b) で、SUS 301 と302を比較すると SUS 302 は変態相の発生に敏感でなく疲労寿命も SUS 301 より短い事は、マルテンサイト相による強化が期待し難い事になる。又、SUS 301 にみるごとく変態速度が速い程強化され易いが、余り急激に変態が進むと却って亀裂が進展し易くなり寿命が短くなる。

### 3.8 繰返し数と変態量

次に SUS 301 について、繰返し数と共にどのように加工変態量が変化しているかを示す。まず両端キーホール切欠き付き試片の A 域での加工変態量 (M%) と繰返し数の関係の一例を Fig. 10 (a) に例示した。応力集中係数  $K_t$  が大きい試片ほど少ない繰返し数でか

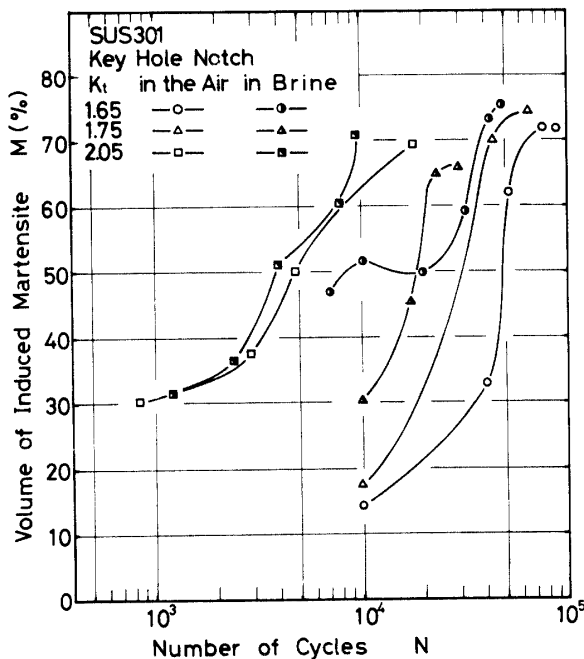


Fig. 10(a) Volume of induced martensite versus the number of cycles on the key hole notch specimen in SUS 301 both in the air and brine. The designed elastic stress concentration factor was varied in three steps.

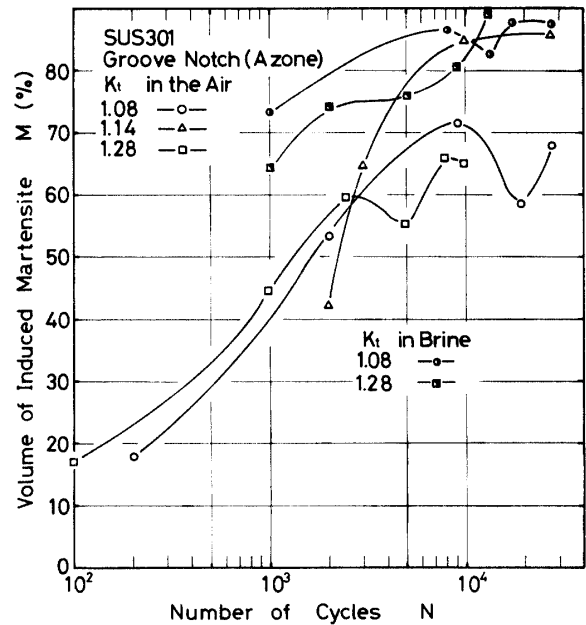


Fig. 10(b) Volume of induced martensite versus the number of cycles on the groove notch specimen in SUS 301 in the air. The designed elastic stress concentration factor was varied in three steps.

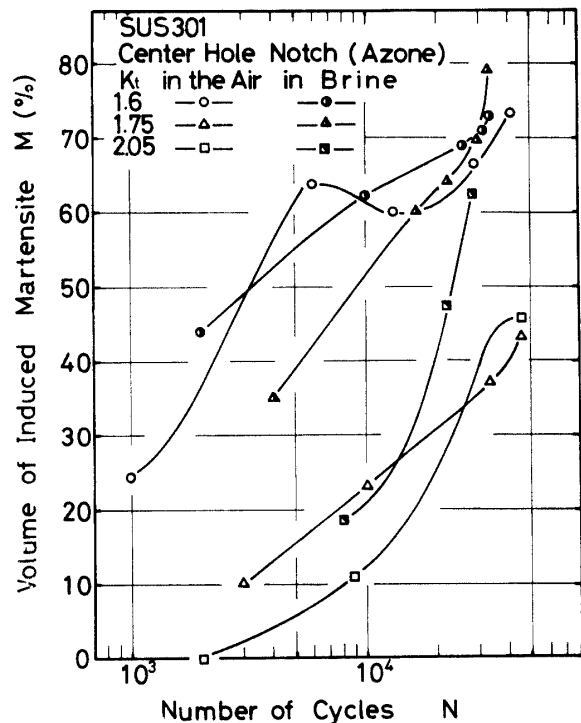


Fig. 10(c) Volume of induced martensite versus the number of cycles on the center hole notch specimen in SUS 301 both in the air and brine. The designed elastic stress concentration factor was varied in three steps.

つ多量に誘起相が発生している。又、海水中の方が空气中に比べて早く発生している。いずれの条件とも A 域における平均加工変態量が70~75%近傍に到達すると破断が生じている。両端半円付き試片の A 域での変態量と繰返し数の関係の一例を Fig. 10 (b) に示す。タイプ C 試片と同様に  $K_t$  が大きいほど加工誘起変態量が多い。Fig. 10 (c) には、中央円孔付き試片の A 域での加工変態量と繰返し数の関係の一例を示した。Fig. 2 (a) および (b) の  $\sigma-\epsilon$  曲線, Fig. 7 (c) の C-N 曲線および Fig. 8 (c) の  $N_f-K_t$  の関係からも分かる様に、前二者とは逆に  $K_t$  が小さい程早い繰返し数で多くの誘起相が発生している。しかし、これも加工変態速度 ( $dM/dN$ ) が速いものほど初期亀裂発生は早く、疲労寿命も短いという点で前の二者と同様の傾向を示している。

3.9 ひずみ振幅変動と加工硬化指数

以上疲労試験の結果を述べて検討してきたが、最後にひずみ振幅と繰返し数の関係を検討しておく必要がある。試験方法で述べたように、塑性たわみ  $\delta_p$  一定で、平滑試片では、 $J_{\epsilon_p}=0.3\%$ の条件ですべての試験を行ってきた。しかし、SUS 301 と 302の切欠き付き試片では、加工硬化の度合がきびしく、塑性ひずみ振幅と繰返し数の関係は、Fig. 11 のごとくなり同じ応力集中では、SUS 302 の方がひずみ振幅が大きくなることが測定されており、これは塑性応力集中または

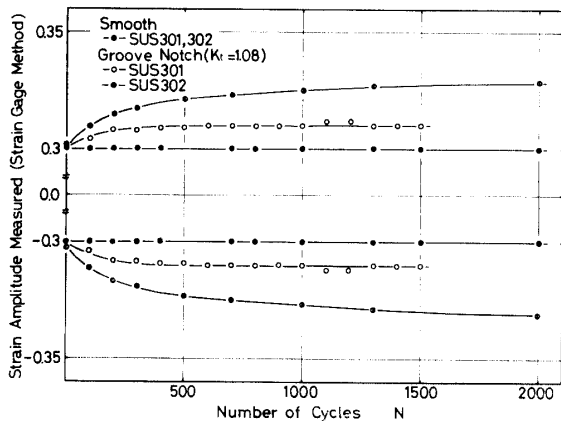


Fig. 11 Variation in plastic strain amplitude is shown as functions of cycle fatigued. Differences in materials and specimen configurations are given.

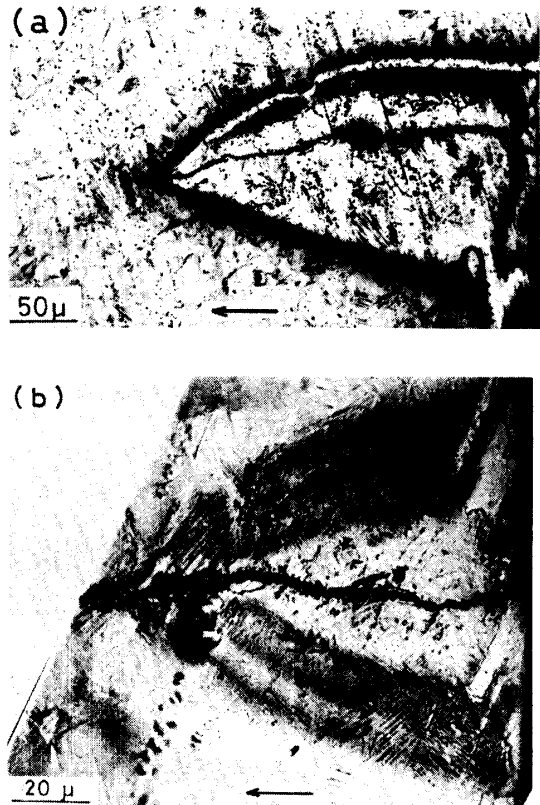
\* 引張試験における加工硬化指数は次の通りである<sup>(11), (16)</sup>

SUS 301	SUS 302
0.48( $e < 0.2$ )	0.43( $e < 0.2$ )
0.84( $e \geq 0.2$ )	0.52( $e \geq 0.2$ )

塑性ひずみ集中と加工硬化指数の関係<sup>(\*)</sup>からも証明される事実である。従って、SUS 302の方がより大きなひずみ振幅で疲労させたことになり、この材料因子も寿命低下に寄与している事が分かった。

3.10 腐食縞と疲労亀裂

SUS 301 および 302の切欠き付き試片を海水中で疲労試験すると、亀裂と共に亀裂の近傍、すなわち大きな塑性変形を伴った部分が海水中で腐食され、腐食縞を生じる。その例を Photo. 1 (a, b) に示す。一般にオーステナイト系ステンレス鋼は、耐食性にすぐれているが、海水中などの環境に含まれるハロゲンイオンにより、孔食、すき間腐食などの局部腐食を受けやすいといわれている<sup>(12)</sup>。一方、Rocha らは、異相の析出や変態がひずみによって加速されて、素地と異相界面の腐食を促進すると考えている<sup>(13)</sup>。又、冷間加工の影響による擬マルテンサイトを生成する場合は、耐孔食性、耐全面腐食性を損うおそれがあることも報告されている<sup>(14)</sup>。表面に存在する不動態皮膜は、ハロゲンイオンに弱い事<sup>(15)</sup> やすべり帯の発生による突き出しや入込みが生じ不動態皮膜を機械的に破壊することも報告さ



Photo(1) Corrosion fringes observed around propagated fatigue cracks in SUS 301 (a) and 302 (b) in brine are shown.

れている<sup>15)</sup>。従って、ここに示した例は、これらの事が重複して現われたものと思える。

#### 4. 緒 言

市販の SUS301 および 302 の薄板材を用いた切欠き形状と環境の変化による低サイクル疲労試験および合金 D の 1 円孔付き引張試験の結果より次の結言を得た。

- 1) SUS301 の方が SUS302 に比べて低サイクル疲労寿命が長くなる。
- 2) 空気中の方が海水中に比べて低サイクル疲労寿命が長くなる。
- 3) SUS301 では、加工誘起変態相の発生速度が早く、発生量が多くなると疲労寿命は短くなる。この場合、加工誘起相は疲労寿命に有害となる。
- 4) SUS302 では、加工誘起変態相発生量が SUS301 に比べて少なく、疲労寿命も短い。
- 5) 加工誘起変態相は、その発生速度 ( $dM/dN$ ) および発生量により疲労寿命に有役あるいは有害となる。
- 6) SUS301 および SUS302 の切欠き試片は、海水中の低サイクル疲労により、割れ近傍に腐食縞 (Corrosion Fringe) を生じる。
- 7) 応力集中を有する設計試片では、加工誘起相分布は、塑性域の拡がりに類似したものとなる。

最後に、本研究に使用した材料を提供して下さいました日新製鋼株式会社周南製鋼所研究所の御協力に深く感謝致します。また、研究の一部に使用した材料は、

筆者の一人が、英国リバプール大学時代に Prof. D. Hull の下で準備したものであり、謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 瀧本昭夫、稲富俊隆：日本機械学会講演論文集 (1977-10 創立80周年記、中国、四国、九州支部学術講演会)
- 2) 稲富俊隆：修士論文、山口大学 (1978)
- 3) 西田正孝：応力集中、森北出版 (1971)
- 4) R.E. Peterson: Stress Concentration Design Factors
- 5) 小田 明、田口敏一、宮川英明：材料 **26**, 280 (1977)
- 6) 友田 陽、佐賀清美、田名部菊次郎、黒木剛司郎：茨城大学工学部研究集報、**24** (1976)
- 7) 川田雄一、田中 実、島村昭治：機械材料学共立出版 (1978) p. 96~99
- 8) D. V. Nelson: Experimental Mechanics **41** (1977)
- 9) 例えば、D. Hennessy, G. Steckel, C. Altstetter: Metallurgical Transactions **3**, 415 (1972) など
- 10) 例えば、G. R. Chanani, S. Antolovich, W. W. Gerberich: Metallurgical Transactions **3**, 2661 (1972) など
- 11) 瀧本昭夫、内 正美：日本機械学会講演論文集、No. 805-1, 22 (1980)
- 12) 腐食防食協会編：金属防食技術便覧、P. 297
- 13) 大谷南海男：金属の塑性と腐食反応産業図書出版
- 14) 岡田秀彌、小野山征生：金属材料 (創刊 200 号記念) 10 月号 (1977) 70
- 15) 瀧本昭夫、恒松裕之、片倉和人、出口政美：日本機械学会講演論文集 (1980-11, 鳥取地方講演会)
- 16) 内 正美：修士論文、山口大学 (1981)

(昭和 56 年 4 月 15 日 受理)