

SUS304 鋼平滑材の疲労過程における 塑性誘起マルテンサイト変態量の発展

Evolution of Volume Fraction of Plasticity-Induced Martensitic Phase
during Fatigue Process of SUS304 Stainless Steel at Room Temperature in Air

東京理科大学工学部 中曾根 祐司 Yuji NAKASONE Member

The present study has investigated plasticity-induced martensitic phase transformation in fatigue of unnotched SUS304 plates. Martensitic phase transformation occurred in unnotched SUS304 plate specimens fatigued at room temperature in air. Volume fraction $V_{\alpha'}$ of α' martensite in the unnotched portion of fatigued specimens was measured by ferrite scope. The relations between the maximum value of $V_{\alpha'}$, $V_{\alpha'_{max}}$, and the number of load cycles N were represented by reverse sigmoidal curves for all the applied stress range $\Delta\sigma$ levels tested in this study. For the most portion of fatigue life, the value of $V_{\alpha'_{max}}$ remained almost constant. This value was increased with increase in the value of $\Delta\sigma$. The spatial distribution of $V_{\alpha'}$ in the specimens varied with N : i.e., continued cycling of stress made α' transformation localized near the central portion of specimens where the $V_{\alpha'}$ value reached as high as 35-40%. This value is more than doubled compared to the highest $V_{\alpha'}$ value found in the tensile tests of SUS304 at room temperature. Invisible cracks of 200 μ m in length were found in the high $V_{\alpha'}$ value region. These results imply that the measurement of $V_{\alpha'}$ in fatigued SUS304 components may detect crack initiation sites and may predict residual fatigue life.

Keywords: Martensite, Phase Transformation, Stainless Steel, Ferrite Scope, Non-Destructive Inspection

1. 緒言

SUS304 鋼は、不安定なマルテンサイト相を持つオーステナイト系ステンレス鋼として知られており、通常、室温近傍において延性かつ非磁性的特性を示すが、強変形や大きな応力を受けると、SUS304 鋼中のオーステナイト相の一部がマルテンサイト相に変態して、その部分が脆性かつ強磁性的な特性を示すようになる。

これまでに、著者らは、SUS304 鋼の室温中疲労において、疲労き裂近傍に塑性誘起変態によって発生した α' マルテンサイト相 (以下、「 α' 相」と略記) の分布状態を定量的に明らかにし、その変態領域を強制磁化して得られるき裂近傍の漏洩磁束密度分布からき裂長と負荷された応力拡大係数の最大値 K_{max} が推定できることを示した[1-4]。

本研究では、SUS304 鋼平滑平板疲労試験を室温・大気中(297 K)で行い、塑性変形誘起変態によって生じた α' 相量を測定し、それらの結果を応用して疲労による劣化・損傷を受けた SUS304 鋼の非破壊検査法の可能性を探ることとした。

連絡先: 中曾根祐司、〒102-0073 東京都千代田区九段北 1-14-6、東京理科大学工学部機械工学科、電話: 03-5228-86、e-mail: nakasone@rs.kagu.tus.ac.jp

2. 実験方法

2.1 SUS304 鋼平滑平板疲労試験

供試材には、表 1 に示す化学成分を持つオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を、また、試験片としては図 1 に示す平滑平板試験片を用いた。

疲労試験は、室温(297 K)下、繰返荷重速度 1 Hz、応力比 $R=0.1$ 、応力範囲 $\Delta\sigma$ を数レベル変化させて行った。図 2 に本試験で得られた S-N 線図を示す。なお、試験中は適当な繰返数で試験を中断し、次項に述べる手順に従って、試験片スパン中央の平滑平行部における α' 変態率 $V_{\alpha'}$ を測定した。また、繰返し数毎の荷重変化に

Table 1 Chemical composition of SUS304 tested (mass%).

| Material | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr |
|----------|------|------|------|-------|------|------|-------|
| SUS304 | 0.06 | 0.50 | 0.87 | 0.037 | 0.01 | 8.10 | 18.21 |

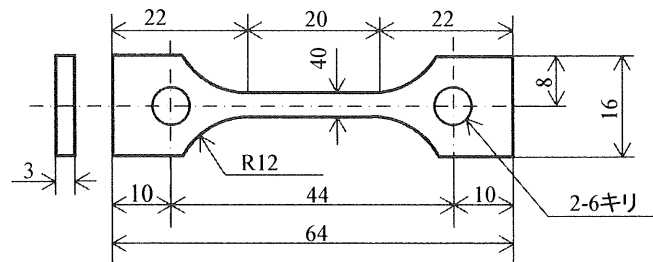


Fig. 1 Specimen geometry (unit: mm).

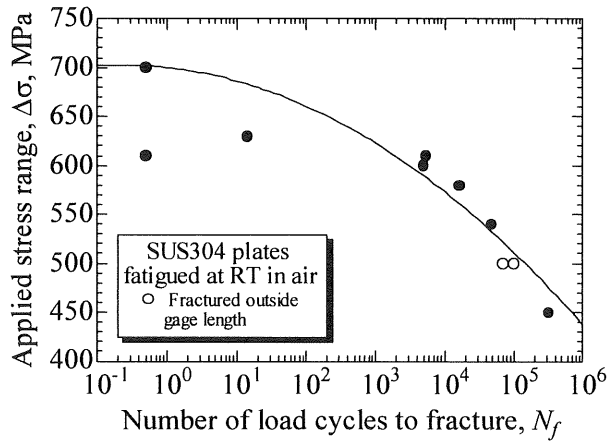


Fig. 2 S-N diagram of SUS304 at room temperature in air.

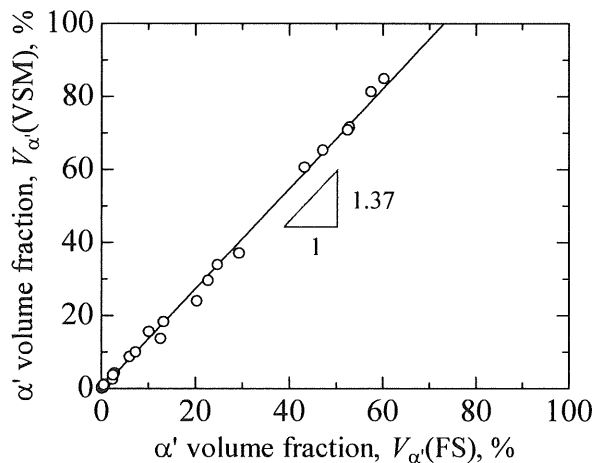


Fig. 3 Comparison of values of α' volume fraction $V_{\alpha'}$ measured by ferrite scope and those by VSM.

伴う試験片平滑平行部のゲージ長 10 mm のひずみの変化の計測も併せて行った。

2.2 α' 変態率の測定

均一な塑性変形を起こしたと考えられる SUS304 製平滑材の飽和磁化を検出精度の良い振動試料型磁力計 VSM で測定し、この飽和磁化から α' 変態率 $V_{\alpha'}$ の値を算出した[3][5]。この結果と X 線回折法から求めた $V_{\alpha'}$ (X-ray) およびフェライトスコープ (FS) $V_{\alpha'}$ (FS) の読みには図 3 のような良好な直線相関が見出されたことから[3][6]、本研究では、測定が容易な FS を用いて平滑平行部表面における $V_{\alpha'}$ の分布状態を決定した。すなわち、試験片の平滑表面に疲労変形前約 1 mm 間隔に設定した 27 点の格子点での FS の読み $V_{\alpha'}$ (FS) に VSM から求めた $V_{\alpha'}$ の値と FS の読み $V_{\alpha'}$ (FS) との関係から得ら

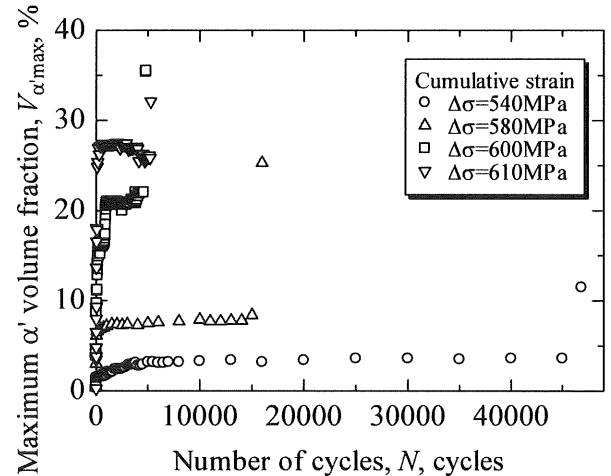


Fig. 4 Variation of maximum α' volume fraction $V_{\alpha'_{max}}$ with the number of stress cycles N in fatigued SUS 304 steel plates.

れた係数 1.37 (図 2 参照) を掛けて求められた値をその格子点における α' 変態率 $V_{\alpha'}$ の値とした。

3. 実験結果

3.1 α' 変態率の最大値 $V_{\alpha'_{max}}$ と繰返数 N の関係

図 4 に SUS304 平滑平行部中央における $V_{\alpha'}$ の最大値 $V_{\alpha'_{max}}$ の N による変化を示す。 $V_{\alpha'_{max}}$ と N の関係は、今回実験した $\Delta\sigma=540, 580, 600, 610$ MPa、いずれの応力レベルでも、図 4 のように、常に逆 S 字状の曲線を呈した。すなわち、試験開始前の FS の読みは、 δ フェライト量と考えられる 0.3 % 程度であったが、第 1 回目の応力負荷直後、 $\Delta\sigma$ の値に応じた FS の読みの急激な上昇が見られた。応力負荷後の FS の読みの著しい上昇は塑性誘起マルテンサイト変態による強磁性 α' 相の発生によるもの、すなわち、変態率 $V_{\alpha'}$ の増加と考えられる。その後、この $V_{\alpha'}$ の最大値 $V_{\alpha'_{max}}$ は疲労過程の大部分でほぼ一定の値を保ち、その値は $\Delta\sigma$ 値の増加とともに 4~28% と急激に増加した。さらに、 $V_{\alpha'_{max}}$ は、疲労寿命後期において急激な上昇を示し破断に至った。破断時の $V_{\alpha'_{max}}$ の値も $\Delta\sigma$ 値の増加とともに増加した。このことから $V_{\alpha'_{max}}$ 値の急激な上昇を捉えることで、疲労予寿命の推定が可能になると考えられる。

3.2 平滑試験片表面における α' 変態率 $V_{\alpha'}$ の分布

図 5(a)~(d) に、 $\Delta\sigma=600$ MPa の時の $N=0, 2000, 3000$ cycles および試験片破断時 $N_f=4837$ cycles の平滑試験片

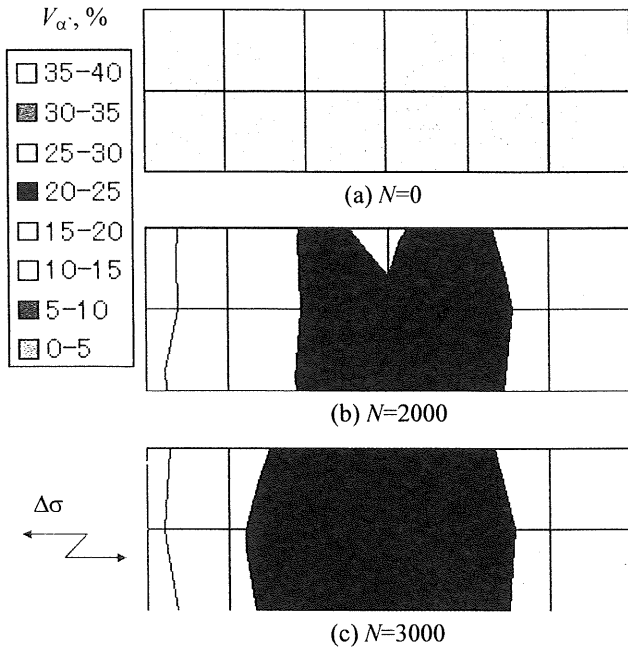


Fig. 5 Contour maps of V_{α} in a fatigued SUS304 measured by ferrite scope.

表面における V_{α} の分布を示す。図の横軸は試験片の長手方向、即ち、荷重負荷方向となっている。図 5(a) ($N=0$ cycle) の見掛けの V_{α} 値は全体的に 0.3~0.4 % の一様な分布になっているが、これは δ フェライト量と考えられる。試験開始と同時に V_{α} の値は全体的に上昇し、 $N=2000$ cycles (図 5(b)) で中央部に $V_{\alpha}=20\sim 25\%$ の高 V_{α} 領域が現れ、この部分に変形が集中したことが推測される。 $N=3000$ cycles (図 5(c)) で中央部の高 V_{α} 領域がさらに広がり、 $N=3800$ cycles で中央から少しずれた所に $V_{\alpha}=32\%$ の V_{α} 値の非常に高い狭い領域が出現し、そこから長さ約 $200\mu\text{m}$ の縁き裂 (図 6) が発生して試験片の破断 (図 5(d)) が起こった。破断後の測定から、この領域では、 $V_{\alpha}=35\sim 40\%$ となり、室温中の静的引張試験 (破断時で $V_{\alpha'_{avmax}} \cong 16\%$ [1][3]) と比べ、非常に高い V_{α} の値を示した。他の試験片でも、 V_{α} が最大値を示した箇所に約 $200\mu\text{m}$ の縁き裂が確認できたことから、供用中検査等で FS によって V_{α} を測定することによって可視き裂より小さなき裂の検出が可能になるものと思われる。

3.3 α' 変態率の平均値 $V_{\alpha'_{av}}$ と累積ひずみの関係

SUS304 では、ラチェット変形によって、繰返数とともにひずみが累積する傾向が見られた。図 7 に V_{α} の平均値 $V_{\alpha'_{av}}$ と疲労による累積ひずみの関係を示す。白印

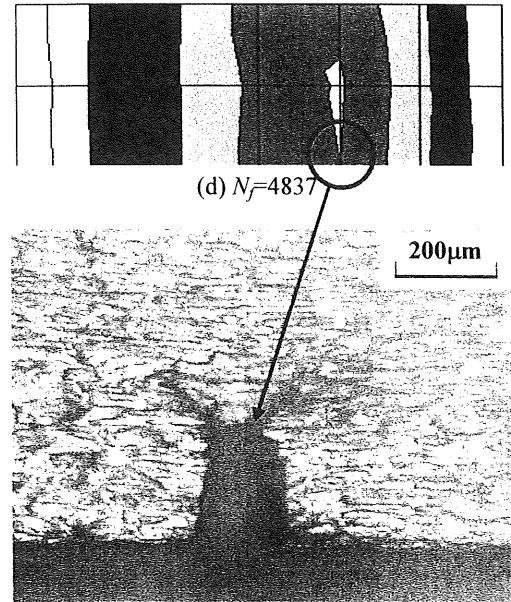


Fig. 6 Photograph of an edge crack found in a high V_{α} value.

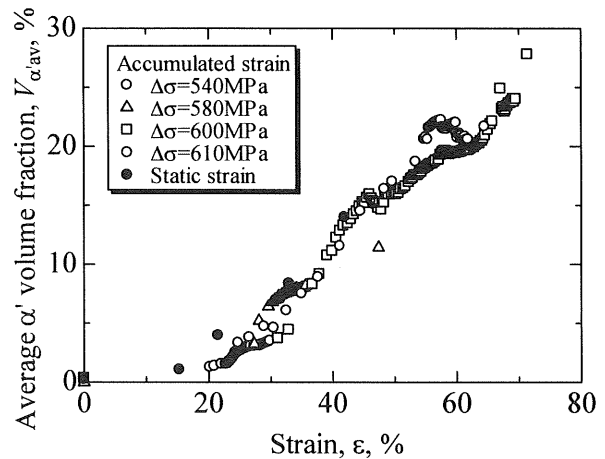


Fig. 7 Variation of average α' volume fraction $V_{\alpha'_{av}}$ with static and cumulative strains.

は、 $\Delta\sigma=540, 580, 600, 610$ MPa の平滑材疲労試験における $V_{\alpha'_{av}}$ と累積ひずみの関係、黒印は引張試験で得られた $V_{\alpha'_{av}}$ と静的ひずみの関係である。

引張試験では、 $V_{\alpha'_{av}}$ の最大値は約 16% だったが [1][3]、疲労試験ではラチェット変形によって累積したひずみによって $V_{\alpha'_{av}}$ の値は最大 28% となった。 $\Delta\sigma$ =一定であっても、累積ひずみによって誘起される α' 相の量は一方向負荷の場合よりもはるかに多い。従って、FS による劣化・損傷の非破壊的検出は一方向負荷による変形

よりも疲労変形のほうが容易になると考えられる。ただし、図7のように、 $V_{\alpha'_{av}}$ と累積ひずみの関係は、 $V_{\alpha'_{av}}$ と静的ひずみの関係とほぼ同じ曲線で表され、静的負荷、疲労負荷に関わらず、ある一定の変形を受けた場合には、ほぼ同量の α' 相が変態するものと考えられる。

4. 結 言

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 について、室温・大気中平滑平板材疲労試験における α' 相変態率 $V_{\alpha'}$ をフェライトスコープによって測定し、 $V_{\alpha'}$ の繰返数 N による変化と試験片表面での $V_{\alpha'}$ の分布を調べ、次のような結論を得た。

- 1) 平滑平行部中央での α' 相変態率の最大値 $V_{\alpha'_{max}}$ と N の関係は逆S字状の曲線を呈した。即ち、第1回目の応力負荷直後の急激な $V_{\alpha'_{max}}$ 値の増加、その後の疲労寿命の大半を占めるほぼ $V_{\alpha'_{max}}$ =一定なプラトー領域および破断直前の $V_{\alpha'_{max}}$ 値の急激な増加の3領域特性を示した。また、プラトー領域における $V_{\alpha'_{max}}$ の値と破断試験片の破面近傍における $V_{\alpha'_{max}}$ の値は、負荷応力範囲 $\Delta\sigma$ の値の増加とともに増加した。
- 2) $V_{\alpha'}$ の分布では、疲労の進行とともに試験片中央付近に $V_{\alpha'}$ 値の高い領域が集中する傾向が見られた。こ

の $V_{\alpha'}$ 値の局所化は、寿命後期でさらに顕著となり、 $V_{\alpha'}$ 値が最大となる箇所から長さ約200 μm の小さな縁き裂が発生して破断を誘発した。この領域での $V_{\alpha'}$ 値は35~40%にも達し、室温中の静的引張試験と比べて2倍以上の高い値を示した。

- 3) 疲労試験では、ラチェット変形によって累積したひずみによって、 α' 相変態率の平均値 $V_{\alpha'_{av}}$ は最大28%に達し、引張試験よりも高い値が得られた。ただし、 $V_{\alpha'_{av}}$ と累積ひずみの関係は $V_{\alpha'_{av}}$ と静的ひずみの関係とほぼ同じ曲線で表され、静的負荷、疲労負荷に関わらず、ある一定の変形を受けた場合には、ほぼ同量の α' 相が変態するものと考えられる。

参考文献

- [1] 中曾根ほか3名、機構論 No.00-17('00)、pp. 573-574.
- [2] 中曾根ほか3名、機構論 No.010-1('01)、pp. 107-108.
- [3] 日本 AEM 学会、電磁破壊力学調査研究分科会報告書、JSAEM-R-9803、1999；R-9903、2000；R-0005、2001.
- [4] 中曾根ほか2名、機構論 No.01-16('01)、pp. 579-580.
- [5] J. Ménard et al., Advances in Cryogenic Eng., **6**, pp. 587-589 ('60).
- [6] 中曾根ほか3名、日本 AEM 学会誌、Vol. 9-No. 2 ('01)、pp. 123-130.