

# 444 SNCM439 鋼の超長寿命疲労強度特性に及ぼす焼戻し温度の影響

## Effect of Tempering Temperature on Super-long Fatigue Behavior of SNCM439 Steel

正 塩澤 和章 (富山大工)  
丸山 泰宏 (富山大院)

○学 柴田 暢宏 (富山大院)  
正 西野 精一 (富山大工)

Kazuaki SHIOZAWA and Seiichi NISHINO, Toyama University, Gofuku, Toyama, 930-8555  
Nobuhiro SHIBATA and Yasuhiro MARUYAMA, Graduate Student, Toyama University

**Key Words** : Super-long fatigue, Sub surface crack, Fish-eye, Tempering temperature, SNCM439

### 1. 緒言

近年、高強度鋼や表面改質鋼等で高応力振幅・短寿命域の表面き裂発生型破壊に対する  $S-N$  曲線と低応力振幅・長寿命域の内部き裂発生型破壊に対する  $S-N$  曲線の存在が報告され<sup>(1)</sup>、特に長寿命域での内部破壊機構の解明が重要な課題となっている<sup>(2)</sup>。著者らはこれまでに、内部き裂発生型疲労破壊に重要な役割をする非金属介在物周囲の粗さの大きい領域(GBF 領域)が、材料組織中に存在する微細な球状炭化物の剥離によって形成されるとするモデルを提案した<sup>(3)</sup>。この球状炭化物は材料の種類や熱処理条件によって大きさや分布状態が異なることから、それらが長寿命域の内部疲労き裂発生に影響することが推察される。

本研究では、焼戻し温度の異なる 4 種類の SNCM439 鋼を用いて  $10^9$  回までの疲労試験を行い、 $S-N$  曲線及び内部き裂発生挙動に及ぼす焼戻し温度の影響について微視組織の立場から検討することを目的とした。

### 2. 供試材および実験方法

**2-1 供試材** 本研究に用いた供試材は Ni-Cr-Mo 鋼 SNCM439 であり、日本材料学会疲労部門委員会組織構造分科会の共同研究として提供を受けたものである。その化学成分を表 1 に示す。供試材には、1133K で 1h 保持後空冷の焼ならし、1123 K で 1h 保持後油冷の焼入れの後、4 種類の温度レベル (433K, 573K, 773K, 893K) で 2h 保持後空冷の焼戻しの熱処理を行った。試験片は最小断面直径 3mm の砂時計型試験片であり、応力集中係数は  $K_t=1.06$  である。試験片の最終仕上げは #100 砥石による研削仕上げである。

図 1 に各焼戻し材の組織観察結果を示す。図より、いずれの材料も焼戻しマルテンサイト組織であり、旧オーステナイト粒径は  $7.3\mu\text{m}$  程度である。各供試材の硬さ HV1/30 は 433K が 592, 573K 材が 477, 773K 材が 360, 893K 材が 321 であり、焼戻し温度が高いほど硬さは低下している。

**2-2 疲労試験方法** 疲労試験は 4 連式片持ち回転曲げ疲労試験機を用い、室温・大気中の実験室雰囲気下で、繰返し速度 3150rpm で実施した。また、打ち切り繰返し数は  $10^9$  回とした。

### 3. 実験結果および考察

**3-1  $S-N$  曲線** 疲労試験で得られた  $S-N$  曲線を図 2 に示す。図中には後述の破面観察結果に基づいて、表面き裂発生型破壊を生じた実験点を白印で示し、内部き裂発生型破壊を生じたそれを黒印で示した。また、矢印を付した実験点は  $10^9$  回で破断に至らなかった結果及び現在実験中であることを示す。図より、433K 焼戻し材の  $S-N$  曲線は、 $10^6 \sim 10^7$  回付近で折れ曲がり、表面き裂発生型破壊と内部き裂発生型破壊の二重  $S-N$  曲線となっていることが分かる。573K 焼戻し材の場合、表面き裂発生型破壊と内部き裂発生型破壊が生じているが、内部き裂発生型破壊は  $4 \times 10^8$  回以上の超長寿命域でのみ認められた。773K 焼戻し材及び 893K 焼戻し材では  $10^9$  回までの領域では表面き裂発生型破壊のみが観察され、内部き裂発生型破壊は認められなかった。また、表面き裂発生型破壊に対する疲労限度は焼戻し温度が高いほど低下しており、 $S-N$  曲線の折れ曲がり繰返し数も短寿命側に変化していることがわかる。一方、内部き裂発生型破壊の  $S-N$  曲線は 433K 焼戻し材と 573K 焼戻し材で差異が認められず

Table 1 Chemical compositions of SNCM439. (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.4	0.22	0.78	0.02	0.02	0.18	1.78	0.83	0.2

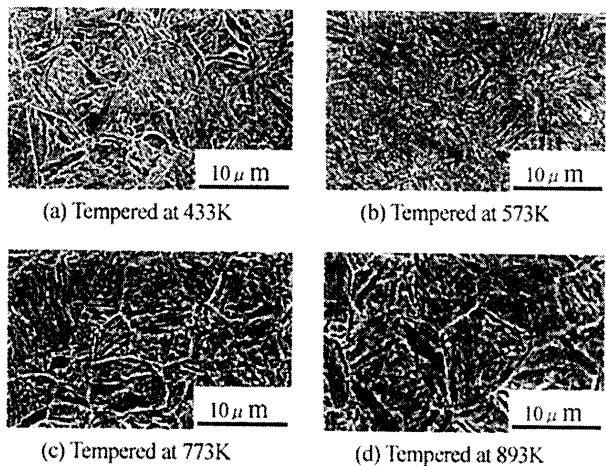


Fig. 1 Microstructures of SNCM439.

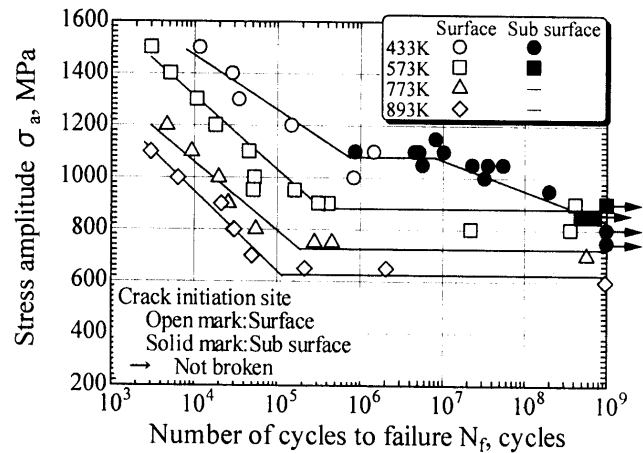


Fig. 2 S-N curves.

一本の  $S-N$  曲線で整理できる。

**3-2 破面観察結果** 破面観察の結果、疲労破壊形態は表面き裂発生型と内部き裂発生型の 2 種類に分類された。いずれの焼戻し材も表面き裂発生型破壊のき裂発生起点には介在物は認められず、無特徴なファセットが観察された。433K 及び 573K 焼戻し材で観察された内部き裂発生型破壊の破面には、SEM 観察の結果、図 3(a)に示すような介在物を起点とするフィッシュ・アイが観察され、介在物周囲には同図(b)に示す粗さの大きい白く輝いた領域(GBF, Granular-Bright-Facet)が認められた。

図 4 に三次元解析システムで測定した図 3(b)内の白線に沿う断面形状を示す。図より GBF 領域はその外側の領域と比較して

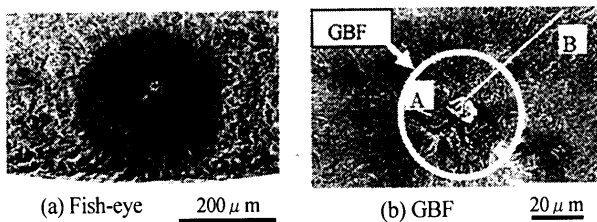


Fig.3 SEM observation for fish-eye of the specimen tempered at 433K ( $\sigma_a=1050\text{MPa}$ ,  $N_f=3.56 \times 10^7$ ).

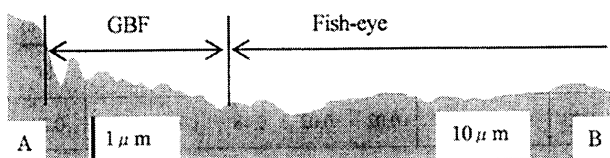


Fig.4 Surface roughness profile of fracture surface along the line A-B in Fig.3(b).

大きな凹凸を生じていることが分かる。GBF領域の粗さの平均値は、 $R_a=0.077\mu\text{m}$ 、 $R_{\text{max}}=0.375\mu\text{m}$ であり、フィッシュ・アイ領域のそれ( $R_a=0.021\mu\text{m}$ 、 $R_{\text{max}}=0.115\mu\text{m}$ )と比較して大きい。SUJ2鋼のGBF領域の粗さ( $R_a=0.195\mu\text{m}$ 、 $R_{\text{max}}=1.008\mu\text{m}$ )<sup>(3)</sup>と比較すると約4割程度の粗さである。

**3.3 内部き裂発生に及ぼす微視組織の影響** 著者らはこれまでに、SUJ2鋼等のGBF領域の形成には非金属 inclusion 周囲の微細炭化物の剥離が関係していることを指摘した<sup>(3)</sup>。同様の考えから、本供試材の433K及び573K焼戻し材で観察されたGBF領域を電子線分析装置(EPMA)で分析した結果を図5に示す。図よりGBF領域に高濃度の炭素が検出されることが分かる。

焼戻し温度の違いによる微細炭化物の大きさや密度を定量的に評価し、内部き裂発生に及ぼす微視組織の影響について検討した。図6に各焼戻し材に電解研磨を施し、微細炭化物を観察した結果を示す。電解研磨は早川らの方法<sup>(4)</sup>で行った。図より、いずれの材料においても組織中に多くの炭化物が存在しているが、その大きさは焼戻し温度が高いほど小さくなっていることが分かる。各焼戻し材の電解研磨により観察された炭化物の大きさと密度の関係を図7に示す。なお、観察は $18.5 \times 28\mu\text{m}^2$ の領域で行った。画像処理により求めた各焼戻し材の炭化物の平均径は433K材が $0.30\mu\text{m}$ 、573K材が $0.26\mu\text{m}$ 、773K材が $0.19\mu\text{m}$ 、893K材が $0.18\mu\text{m}$ であり、焼戻し温度が高いほど炭化物が微細化していることが分かる。また、炭化物の大きさは焼戻し温度が低い433K焼戻し材の場合、 $1\mu\text{m} \sim 0.1\mu\text{m}$ の広い範囲に分布しているが焼戻し温度が高くなるに従って大きな炭化物は減少する。773K焼戻し材では全ての炭化物が $0.5\mu\text{m}$ 以下、893K焼戻し材のそれは $0.4\mu\text{m}$ 以下となっている。また、前報で報告したSUJ2鋼の場合、球状炭化物の平均径は $1\mu\text{m}$ 程度であり<sup>(3)</sup>、本供試材のそれの約3倍程度である。GBF領域の粗さが微細炭化物の剥離によって生ずるものと考え、供試材中の炭化物の大きさによって破面に現れる粗さの程度は異なることになり、本供試材とSUJ2の差異が理解できる。773K及び893K焼戻し材の疲労試験で $10^9$ 回までに内部き裂発生型破壊を生じなかった理由は高温の焼戻しにより組織中の炭化物が微細化し、剥離が生じ難くなったためであると思われる。

**4. 結言**

(1) 4種類の温度条件で焼戻しを行ったSNCM439鋼の疲労試験を行った結果、433K及び573K焼戻し材では表面き裂発生型破壊と内部き裂発生型破壊を生じるが、773K及び893K焼戻し材では内部き裂発生型破壊は認められなかった。

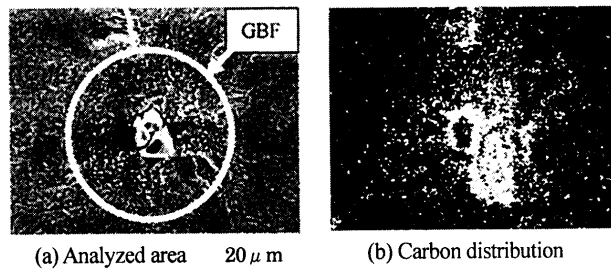


Fig.5 Carbon distribution around an inclusion of the specimen tempered at 433K ( $\sigma_a=1050\text{MPa}$ ,  $N_f=3.56 \times 10^7$ ) by EPMA.

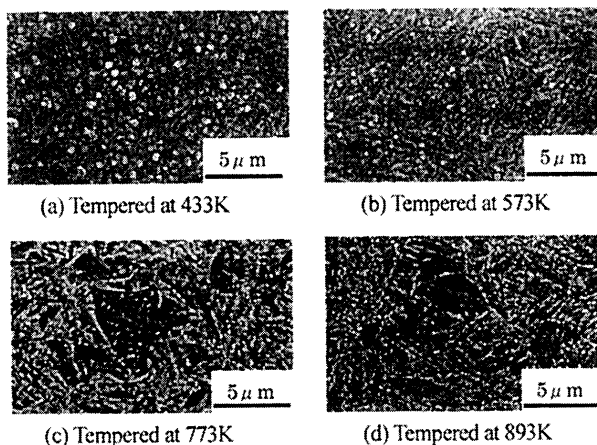


Fig.6 SEM observation for electropolished specimen surface.

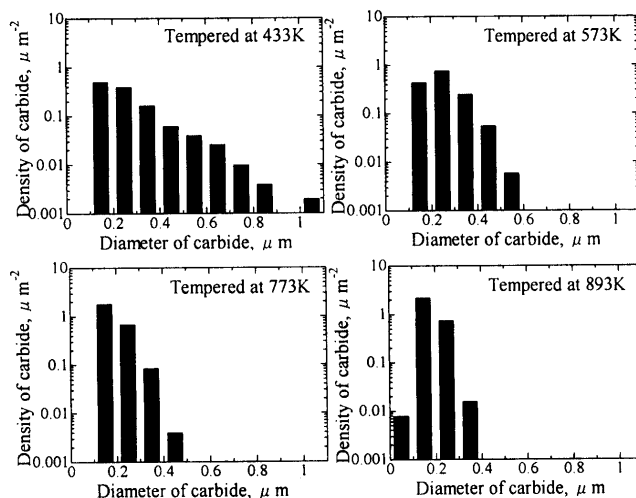


Fig.7 Size distribution of carbide particles on tempered specimen.

(2) 表面き裂発生型破壊に対する疲労限度は焼戻し温度が高いほど低下する。一方、内部き裂発生型破壊の寿命はほぼ一本のS-N曲線で整理され、焼戻し温度の影響は認められなかった。

(3) 内部き裂発生型破壊の起点となった inclusion 周囲には高濃度の炭素が検出され、GBF領域の形成には微細炭化物の剥離が影響する。この剥離は炭化物の大きさが影響し、高温焼戻しによって炭化物が微細化することによって剥離を生じ難くなることが推察された。

**5. 参考文献**

- (1) 塩澤和章, 魯 連涛, 石原外美, 材料, **48-10**, (1999), 1095-1100.
- (2) 塩澤和章, 日本機械学会誌, **103-981**, (2000), 494-495.
- (3) 塩澤和章, 森井祐一, 西野精一, 魯 連涛, 日本材料学会第26回疲労シンポジウム講演論文集, (2002), 141-144.
- (4) 早川正夫, 松岡三郎, 津崎兼影, 日本機械学会材料力学部門講演会論文集, No.02-05, (2002), 619-620.