金属材料疲労強度データベースによる SCM 435 鋼の超長寿命確率疲労特性の解析*

酒井達雄^{*1}, 田中伸明^{*2}, 岡田憲司^{*3}
古市真知子^{*4}, 西川出^{*5}, 菅田淳^{*6}

Statistical Fatigue Properties in Ultra-Long-Life Regime for SCM 435 Steels Based on JSMS Database on Fatigue Strength of Metallic Materials

Tatsuo SAKAI, Nobuaki TANAKA, Kenji OKADA^{*7},
Machiko FURUICHI, Izuru NISHIKAWA and Atsushi SUGETA

^{*7} Takamatsu National College of Technology,
355 Chokushicho, Takamatsu-shi, Kagawa, 761-8058 Japan

In reliability assessment of mechanical structures in the long period, it is important to clarify the fatigue characteristics in such a long sequence of cyclic loading. Thus, ultra-long life fatigue properties of SCM 435 steel were experimentally examined in rotating bending. In addition, high cycle fatigue data of the same kind of steels were extracted from the Database on Fatigue Strength of Metallic Materials published by JSMS. These results and original data obtained by the authors were put altogether, and the statistical fatigue properties of this kind of steels were analyzed as duplex $P-S-N$ characteristics.

Key Words: Fatigue, Ultra-high-cycle Regime, Database, Statistical Analysis, SCM 435 Steel, Duplex $P-S-N$ Property

1. 緒 言

鉄鋼材料の $S-N$ 曲線は一般に $10^5 \sim 10^6$ 回程度の寿命域で水平に折れ曲り明りような疲労限度を呈することが知られており、機械・構造物の疲労設計において、この疲労限度を基準とした耐久設計が広く普及している⁽¹⁾。しかし、近年、高強度鋼や表面処理鋼に対して繰返し数が 10^7 回以上の超長寿命域において $S-N$ 曲線が再び下降するという実験結果がしばしば報告されている^{(2)~(17)}。この事実はこれらの材料の疲労限度を基礎とする従来の耐久設計が、実は本来の耐久設計を与えないことを意味しており、機械構造物の長期信頼性保証の観点から、現在、金属材料の超長寿命域における疲労特性の解明が国内外ともに大きな課題となっている。

この観点から材料強度確率モデル研究会(代表者: 立命館大学理工学部教授 酒井達雄)⁽¹⁸⁾の共同研究として、SUJ 2 鋼⁽¹⁹⁾や SCM 435 鋼等、いくつかの高強度鋼の長寿命疲労特性に関するラウンドロビンテストが進行中である。本共同研究では独自に開発された 4 連式回転曲げ疲労試験機が使用されているが、試験片に発熱を伴わない速度(3 150 rpm)で疲労試験を実施しており、 10^9 回の応力繰返しに 200 日を要し、研究遂行上、多大の時間が必要である。このような状況下で著者らは SCM 435 鋼に関し、ギガサイクル領域まで対象とした超長寿命域疲労試験を完了した。

本報では、こうして得られた SCM 435 鋼に対する著者らの疲労試験結果を報告するとともに、日本材料学会より公開されている「金属材料疲労強度データベース」⁽²⁰⁾をもとに、共同研究の一環として、同一材料、類似疲労試験条件下での疲労試験データを検索し、著者らの実験結果と併合することにより統計解析に必要な分量の実験データを確保した上で、SCM 435 鋼の超長寿命域確率疲労特性の解析を試みた。

2. 供試材料および実験方法

本研究で用いた材料はクロムモリブデン鋼(SCM 435)であり、その化学成分を表 1 に示す。熱処

* 原稿受付 2003 年 8 月 5 日。

^{*1} 正員、立命館大学理工学部(☎ 525-8577 草津市野路東 1-1-1)。

^{*2} 正員、日本精工(株)(☎ 251-8501 藤澤市鵜沼神明 1-5-50)。

^{*3} 正員、高松工業高等専門学校(☎ 761-8058 高松市勅使町 355)。

^{*4} 高松工業高等専門学校。

^{*5} 正員、大阪工業大学工学部(☎ 535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)。

^{*6} 正員、大阪大学工学部(☎ 565-0871 吹田市山田丘 2-1)。

E-mail: okada@takamatsu-nct.ac.jp

理は焼入れ(1 128 K-1.8 ks+Oil. Cooling)の後、焼戻し(873 K-3.6 ks+Water Cooling)の調質を行った。このような調質処理を行った後の本材料の機械的性質を表2に示す。試験片は図1に示す砂時計型であり、応力集中係数は $\alpha=1.08$ である。

図2は直径10 mmの試験片チャック部表面から深さ方向に測定したピッカース硬さの分布状態を示す。図2においてピッカース硬さは試験片横断面上に均一に分布しており、表面近傍も含めてほぼ一定値(HV 326)を示し、本研究で使用した材料の硬さ分布について加工層の影響は見られない。

本研究で使用した試験機は材料強度確率モデル研究会で独自に開発した4連式回転曲げ疲労試験機であり、その写真を図3に示す。本試験機は1台のモータにより平ベルトを介して2本の主軸を回転させ、この2本の回転軸の両端に1本ずつ試験片を装着する方式になっており、同時に4本の試験片に対する疲労試験が実施できる。試験速度については試験片に発熱を生じないような速度(3 150 rpm)とし、常温・大気中で疲労試験を実施した。試験機の構造の詳細については別報⁽¹⁹⁾を参照されたい。疲労試験の手順としては、最初に負荷応力を $\sigma_a=900$ MPaとし、応力階差 $\Delta\sigma=100$ MPaを設定して順次設定応力を下げながら実験を行い、 $N=10^7$ で初めて未破壊が生じた時点(応力 $\sigma_a=400$ MPa)で応力階差を $\Delta\sigma=20$ MPaに設定し、その直前の応力 $\sigma_a=500$ MPaをもとに $\sigma_a=480$ MPaからステアケース試験を開始した。ステアケース試験

には10本の試験片を割り当てた。このとき $N=10^7$ における打ち切り試験片については、ステアケース法による実験終了後に、同一応力レベルで $N=10^9$ まで試験を継続した。

3. 実験結果

今回の疲労試験で得られた実験結果をS-N線図として示したのが図4である。打ち切り繰返し数を $N=10^7$ としてステアケース法で得られた本材料の疲労限度は $\sigma_w=520$ MPaであり、この値を固定して日本材料学会標準(JSMS-SD-6-02)「金属材料疲労信頼性評価標準：S-N曲線回帰法」⁽²¹⁾の中の疲労限度型片対数折れ線モデルを採用し、同学会標準に添付されている解析ソフトにより回帰されたS-N曲線が図中の実線である。横軸の目盛りの $1E+7$ や $1E+9$ は 10^7

Fig. 2 Hardness distribution

Table 1 Chemical composition [mass.%]

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
0.36	0.19	0.66	0.012	0.007	0.01	1.01	0.02	0.20

Table 2 Mechanical properties

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
902	991	17.0	67.3

Fig. 1 Specimen

Fig. 3 Photograph of fatigue testing machine

や 10^9 等を示す。図中の $S-N$ 曲線は $N=3 \times 10^5$ 付近で折れ曲り、明りょうな疲労限度を呈することがわかる。なお、ステアケース法に伴う $N=10^7$ における打ち切り試験片は、前述のとおりその後すべて $N=10^9$ まで疲労試験を継続実施したが、図4に示したとおり、 $\sigma_a=520$ MPa で1本の試験片が $N=5.704 \times 10^8$ で破断した以外は、すべての試験片が $N=10^9$ を超えるまで負荷を繰返しても疲労破壊を生じなかった。したがって、いくつかの高強度鋼についてしばしば報告されているような表面起点型破断および内部起点型破断の各破壊形態ごとの $S-N$ 曲線が別々の場所に重なって現れることに起因する二重 $S-N$ 特性⁽¹⁹⁾⁽²²⁾⁽²³⁾は、本材料については観察されなかった。しかし、 $N > 5 \times 10^8$ の超長寿命域で1本の試験片が破断しており、破面観察の結果、表面付近で裂が発生していたが、表面起点・内部起点の識別は困難であった。したがって、内部起点型破断に対する $S-N$ 曲線が $N=10^9$ 程度の超長寿命以降の領域で新たに現れる可能性も否定できないことを付記する。

4. JSMS 金属材料疲労強度データベースによる確率疲労特性の解析

4.1 併合 $S-N$ データと疲労寿命分布 4章では、3章の実験結果と日本材料学会で編集された金属材料疲労強度データベース⁽²⁰⁾に収録されている SCM 435 鋼の疲労試験結果の中から、3章とほぼ同一疲労試験条件下の疲労試験データを検索・併合して確率疲労特性を解析する。

3章の疲労試験で $\alpha=1.08$ なる応力集中係数の砂時

Fig. 4 $S-N$ diagram for SCM 435 steel

計型疲労試験片を用いたのは、片持回転曲げ荷重のため、平滑材ではチャック部で破壊するので、これを避けて環状切欠部で裂を発生させ、材料本来の疲労特性を得るための措置である。したがって、特に材料の切欠効果を対象としているのではなく、むしろ平滑材の長寿命疲労特性の解明が主たる目的であった。この観点から、日本材料学会の上記データベースの検索にあたり、応力集中係数については $\alpha < 1.09$ なる条件下の SCM 435 鋼に関する疲労試験データに限定し、回転曲げ荷重下の実験結果を検索した。こうして検索された試験データのシリーズ番号、引張強さ、熱処理条件および応力集中係数を一覧表にまとめたのが表3である。荷重形式はすべて均一回転曲げ疲労試験機によるものであり、3章の実験で用いた片持回転曲げ疲労試験機によるものはなかったが、回転曲げ荷重様式としてデータを併合することは可能であると考えた。

図5は、3章に示した著者らの実験結果(●印)と表3に示す31シリーズの疲労試験結果(○印)をすべて

Table 3 List of material code-series in JSMS database

Code-series	Tensile strength (MPa)	Heat treatment	Stress concn. factor	Type of Specimen
106-000	655		1.00	Round bar, Smooth specimen
106-007		1053K 2.88ks Furnace		
204-080	1018	1143K 1.8ks AC, 1123K 1.8ks OQ, 873K 1.8ks WC.		
204-081	1003			
204-085	983	1123K 1.8ks AC, 1123K 1.8ks OQ, 873K 1.8ks WC.		
204-087	707	1123K 1.8ks AC		
204-095	1041	1123K 1.8ks AC, 1123K 1.8ks OQ, 873K 1.8ks WC.		
204-100	1373	1143K 1.8ks AC, 1123K 1.8ks OQ, 873K 1.8ks WC.		
204-105	1756	1123K 1.8ks AC, 1123K 1.8ks OQ, 573K 1.8ks WC.		
204-110	708			
204-111	1021	1123K 1.8ks AC, 1123K 1.8ks OQ, 873K 3.6ks WC.		
204-112	686	1123K 1.8ks AC.		
204-113	957	1123K 1.8ks AC, 1123K 1.8ks OQ, 873K 3.6ks WC.		
226-021	965	1143K 1.8ks AC, 1128K 1.8ks OQ, 873K 3.6ks WC.		
226-022	965	1143K 1.8ks AC, 1128K 1.8ks OQ, 873K 3.6ks WC.		
226-023	965	1143K 1.8ks AC, 1128K 1.8ks OQ, 873K 3.6ks WC.		
231-130	1245	1123K 2.52ks OQ, 773K 2.52ks OQ.		
231-140	1010	1123K 2.52ks OQ, 873K 2.52ks OQ.		
231-150	775	1123K 2.52ks OQ, 873K 2.52ks OQ.		
246-000	986	1143K 1.8ks AC, 1128K 1.8ks OQ, 873K 3.6ks WC.		
246-001	986	1143K 1.8ks AC, 1128K 1.8ks OQ, 873K 3.6ks WC.		
246-020	965	1143K 1.8ks AC, 1128K 1.8ks OQ, 873K 3.6ks WC.		
246-021	1011	1143K 1.8ks AC, 1373K 3.6ks OQ, 873K 3.6ks WC.		
106-001	1881	1123K 3.6ks OQ, 423K 5.4ks AC.	1.04	Round bar, Hourglass specimen
106-002	1654	1123K 3.6ks OQ, 723K 5.4ks OQ.		
106-003	1351	1123K 3.6ks OQ, 873K 5.4ks OQ.		
106-004	973	1123K 3.6ks OQ, 873K 5.4ks OQ.		
106-005		1123K 3.6ks OQ.		
106-006		1123K 3.6ks OQ, 873K 5.4ks OQ.		
219-042	1030		1.02	
342-036	1029			

併合してプロットした $S-N$ 線図であり、縦軸には応力振幅をとっている。表 3 からわかるとおり、引張強さ σ_B はシリーズごとに 686 MPa～1 881 MPa の範囲で大きく変動しており、このような強度レベルの差に起因して、各シリーズごとの $S-N$ データは図中で大きく散らばっている。強度レベルが高ければ $S-N$ 曲線も高強度側に現れ、強度レベルの低下に伴って $S-N$ 曲線は低強度側に現れるからである。図中で、著者らの実験結果(●印)は全データに関する大きな散布帯の中でほぼ中央に位置しており、この事実は本材料の引張強さ($\sigma_B=991$ MPa)が全シリーズの強度レベルの中心に位置することによるものと判断される。

ここで、 $S-N$ 特性を強度レベルに関して標準化するために、応力振幅 σ_a を引張強さ σ_B で除した σ_a/σ_B を縦軸にとって、図 5 の $S-N$ 線図を再プロットしたものが図 6 である。図 5 と比較して、実験点が共通の散布帯に集まってくる傾向が認められる。これは構造用炭素鋼に関し別報⁽²⁴⁾でも確認されている特徴であり、強度レベルの異なる金属材料の $S-N$ データの標準化として、本法の有効性を示すものである。また、このことは従来より指摘されているように、疲労強度と引張強さの間に強い相関性があることに起因するも

のである⁽²⁵⁾。なお、図中に示したいいくつかの曲線については、後で説明することとする。

上述のとおり、図 6 中には引張強さ σ_B で標準化された大量の $S-N$ データがプロットされているので、これをもとに SCM 435 鋼の確率疲労特性の解析を試みる。最初に、図 6 中の全データについて、縦軸の σ_a/σ_B をいくつかの応力階差に区分し、各階層内に含まれるデータをその階層内の平均応力振幅における疲労試験結果とみなす。こうして、いくつかの同一応力レベルにおける疲労寿命分布データが得られるので、これらのデータを基礎として疲労寿命分布を解析することができる。図 7 は図中に示した四つの応力区分ごとの疲労寿命分布をワイブル確率紙上にプロットしたもので、縦軸の累積確率については次式のランク法で計算した⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾。

$$F(x_i) = \frac{i-0.5}{n} \dots\dots\dots (1)$$

図中の応力区分の説明の右端()内の数字は、それぞれの応力区分に含まれる実験データの点数を示す。

図中の曲線の内、負荷応力 σ_a/σ_B が 0.6 以上の二つの応力区分については、式(2)の 3 母数ワイブル分布を前提として、相関係数法⁽²⁶⁾⁽²⁸⁾で推定された各母数値を持つ分布関数を示しており、実験結果の分布特性をよく表示している。

$$F_w(N) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{N-C}{B}\right)^A\right\} \dots\dots\dots (2)$$

なお、上式中の A は形状母数、 B は尺度母数、 C は位置母数である。上方の二つの応力区分については上に凸な単一のワイブル分布でよく表示できるが、下方の二つの応力区分については破壊確率がある値に飽和していったん分布曲線が水平に近付いた後、 10^7 回の付近からこの分布関数が再び上方へ伸び、分布曲線に第二の凸部が現れる特徴がある。このように、 σ_a/σ_B について 0.6 付近の値を境界として、これより高応力側

Fig. 5 $S-N$ diagram for entire data

Fig. 6 σ_a/σ_B-N diagram ($P-S-N$ diagram)

Fig. 7 Fatigue life distributions

では疲労寿命分布が単一ワイブル分布でよく表示できるが、これより低応力側では単一ワイブル分布で表示することは困難で、なんらかの第二の成分を含む混合分布で表示する必要があると考えられる。図中、 10^7 回を超える長寿命域では矢印付きの打ち切りデータも含まれるので、第二の寿命成分の詳細な分布特性を解析することは現段階では困難であるが、このような低応力域ではなんらかの二つの寿命成分が混在することは明確である。なお、本報ではこのような低応力域における第一成分の寿命分布については 10^7 回程度で飽和しているように認められるので、 $N=10^7$ における破壊確率を近似的に飽和破壊確率 F_{ks} とおいて、第一の寿命成分の分布関数を次式で表示する⁽²⁹⁾。

$$F_{\text{mix}}(N) = F_{ks} F_w(N) = F_{ks} \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{N-C}{B} \right)^A \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

図7中の低応力側の寿命分布における第一の成分の付近を通る曲線は式(3)による分布関数を示すものである。

先に図6中に示したいくつかの曲線は、 $\sigma_a/\sigma_B \geq 0.6$ の高応力域では式(2)により、 $\sigma_a/\sigma_B < 0.6$ なる低応力域では式(3)を基礎として、応力区分ごとに各破壊確率(1%, 10%, 50%, 90%, 99%)のパーセント点を求め、これらの点を折れ線で結んだ P - S - N 曲線である。なお、 $N > 10^7$ なる長寿命域における実験データが十分でないので、本報の解析結果をこのような長寿命域まで外挿することは困難であり、また、各シリーズごとに打ち切り繰返し数が異なるので、 10^7 回をはるかに超える超長寿命域まで P - S - N 曲線を描くことは避けることとした。

4・2 二重 P - S - N 特性の解析 著者らはこれまでに軸受鋼(SUJ 2)やニッケルクロムモリブデン鋼(SNCM 439)等の高強度鋼について、ギガサイクル域に至る超長寿命域疲労試験を行って、このような広範

な寿命域における疲労特性が図8の模式図に示すような二重 S - N 曲線でうまく説明できることを明らかにした⁽¹⁹⁾⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。すなわち、これまで二段折れ曲り S - N 曲線のような表現が使用されていた超長寿命域疲労特性が、実は図に示したように表面起点型破断および内部起点型破断の各破断形態ごとの S - N 曲線が、それぞれ別々の場所に重なって現れる二重 S - N 曲線として把握すべきことを示した。また、このような二重 S - N 特性は材料の強度レベルが高くなるほど明確に現れ、強度レベルが低下すると現れなくなることが報告されており⁽²³⁾、この点を考慮して表3の疲労試験データの中から、 $\sigma_B > 1\,300$ MPa なる強度レベルの実験データに絞って S - N 特性を詳細に調べた。

図9は、データベース内のシリーズ番号：204-100の疲労試験データであり、図中に縦の波線で示したように 10^6 回程度以下の短寿命域データとこれより右側にプロットされた長寿命域データに分離される傾向が認められる。このような分離現象は強度レベルの高い金属材料に対していくつかの実験結果が報告されている⁽³²⁾。なお、上記データベースには破面写真は収録されていないので、個々のデータについて厳密に表面起点型・内部起点型の区別をすることができない。したがって、本報では一つの試みとして S - N 線図にプロットされた実験点の配置関係をもとに分離点の左側のデータは表面起点型破断、分離点の右側のデータは内部起点型破断と解釈して破断形態を区別することとした。なお、 $\sigma_B > 1\,300$ MPa なる強度レベルのSCM 435 鋼に関する疲労試験データは5シリーズあり、これらの試験結果については、いずれもこのような分離現象が見られたので、この方法ですべて破断形態を区別した。この分離現象がやや不明確な場合は、図7の寿命分布を参照しながら、第一の寿命成分に含まれるものは表面起点型、第二の寿命成分に含まれる

Fig. 8 Schematics of duplex S - N characteristics

Fig. 9 S - N diagram for code-series 204-100

ものは内部起点型として破断形態を識別した。

これらの実験結果に対して、表面起点型破断と内部起点型破断の各破断形態ごとに最小二乗法で直線回帰を行って各形態ごとの $S-N$ 曲線を求めたところ、図 9 の例に見るとおり、内部起点型破断のほうが表面起点型破断よりも $S-N$ 曲線のこう配が緩やかであった。この点については別報⁽³⁰⁾で述べたとおり、表面起点型破断では大気中のき裂進展が寿命を支配し、内部起点型破断では材料内部の真空中のき裂進展が寿命を支配することに起因している。すなわち、疲労き裂進展則 $da/dN=C(\Delta K)^m$ の中のパラメータ m の逆数が $S-N$ 曲線のこう配を与え、大気中より真空中のほうがこの m 値が大きいことに起因することがわっている。

次に、図中の表面起点型の $S-N$ 曲線をもとに $N=10^5$ における時間強度を求め、これを σ_s と表記する。また、内部起点型の $S-N$ 曲線をもとに $N=10^7$ における時間強度を求め、同様にこれを σ_i と表記する。こうして求められた σ_s と σ_i をもとに、以下のように各破断形態の $S-N$ 曲線を標準化する。すなわち、疲労試験の各シリーズごとに各破断形態の σ_s と σ_i が決まるので、表面起点型破断については応力比を σ_s で除した σ_a/σ_s により、内部起点型破断については応力比を σ_i で除した σ_a/σ_i により、各形態ごとの $S-N$ 曲線を標準化することとする。

図 10 は、先に述べた $\sigma_B > 1300$ MPa なる強度レベルの 5 シリーズの疲労試験データについて、ここで標準化した σ_a/σ_s および σ_a/σ_i を縦軸にとって再プロットした結果である。3 章に示した著者らの実験結果は、 $\sigma_B=991$ MPa なる SCM 435 鋼に対する疲労試験結果であり、 $\sigma_B > 1300$ MPa の条件を満足していないが、表面起点型破断のオリジナルデータであるから、参照データとして同図に□印でプロットしてある。表面起

Fig. 10 Normalized $P-S-N$ diagram ($\sigma_B > 1300$ MPa)

点型破断データの付近を通る曲線群は前述の日本材料学会標準 (JSMS-SD-6-02)⁽²¹⁾ に沿って、疲労限度型の片対数斜交双曲線モデルを採用して回帰した $P-S-N$ 曲線である。また、内部起点型破断データの付近を通る曲線群は同様に連続低下型の片対数直線モデルを採用して回帰された $P-S-N$ 曲線である。なお、破壊確率はいずれも左側の曲線から順に 1%, 10%, 50%, 90%, 99% の $P-S-N$ 曲線を与えている。いずれの $P-S-N$ 曲線も各破断形態ごとの実験結果のばらつき特性をよく表示しており、本報で対象とした超長寿命域確率疲労特性の解析法として十分な妥当性が確認される。

なお、表 3 に示した全検索結果について、著者らのオリジナルデータとともに同様に応力比を標準化して図 10 内に重ねてプロットした結果、全データが図 10 の $P-S-N$ 曲線内に、ほぼ収まることも確認してある。したがって、金属材料の超長寿命域確率疲労特性の解析にあたり、図 10 のような表面起点型と内部起点型の二組の標準化 $P-S-N$ 曲線を基礎とすれば、比較的少数の疲労試験データをもとに定量的な確率疲労特性の解析が可能である。

最後に、本報で提案した手法で SCM 435 鋼の超長寿命域確率疲労特性を定量解析する手順をフローチャートとして図示したのが図 11 である。すなわち、所定の熱処理で任意の強度レベルに調節した SCM 435

Fig. 11 Flowchart for analysis of duplex $P-S-N$ property of SCM 435 steel in wide life range

鋼について、ある新たな 1 シリーズの超長寿命域疲労試験データが得られたとき、最初に①で表面起点型破断データと内部起点型破断データを区別する。ここで表面起点型データについては②で $S-N$ 曲線を回帰し、③で σ_a/σ_b を縦軸とする $S-N$ 曲線の標準化を行う。その後、④で図 10 の最終解析結果をもとに $P-S-N$ 特性を解析する。一方、①で内部起点型として区別された疲労試験データについては、⑤で $S-N$ 曲線を回帰し、⑥で σ_a/σ_f を縦軸とする $S-N$ 曲線の標準化を行う。その後、⑦で図 10 の最終解析結果をもとに $P-S-N$ 特性を解析する。こうして、各破断形態の $P-S-N$ 特性が解析された後に、⑧で両破断形態の $P-S-N$ 特性を重ね合わせるにより、ギガサイクル領域まで含めた広範な寿命域における確率疲労特性を定量的に評価することができる。

最後に、本報では $S-N$ 線図にプロットされた実験点の目視的な分離現象をもとに、適宜、寿命分布曲線の特徴を参照しながら表面起点型と内部起点型の破断形態の識別を行ったが、これはあくまでも便宜的な手法であり、本来は破面観察を行ってき裂発生箇所を確認して識別すべきものである。また、超長寿命域における破断データでも表面起点型破断が混在する例も報告されている。したがって、解析結果の精度を上げるために、今後、さらに超長寿命域における $S-N$ データを蓄積するとともに破面観察も行って、破断形態の明確な識別を行う必要がある。

5. 結 言

SCM 435 鋼に関する著者らの実験結果と、日本材料学会編集金属材料疲労強度データベースから検索された類似条件下の疲労試験データを併合して長寿命確率疲労特性を解析した。本研究で得られた結論を要約すれば以下のとおりである。

(1) 著者らの実験結果によれば、 $\sigma_b=990$ MPa 程度の強度レベルに調質された SCM 435 鋼については、ギガサイクル領域まで疲労試験を実施しても内部起点型破断はほとんど発生せず、表面起点型破断と内部起点型破断の混在による二重 $S-N$ 特性は現れないことがわかった。

(2) 日本材料学会編集の金属材料疲労強度データベースから検索された SCM 435 鋼に関する類似試験条件下の疲労試験データをもとに、本材料の二重 $S-N$ 特性の発生条件を調べた結果、強度レベルが $\sigma_b > 1300$ MPa なる条件を満足するような高強度調質材に関し、明確な二重 $S-N$ 特性が現れることがわかった。また、負荷応力レベルに関しては、 $\sigma_a/\sigma_b < 0.6$ 程度の

低応力域において上記の二重 $S-N$ 特性が現れる傾向が確認された。

(3) 通常の高サイクル疲労の寿命域からギガサイクル領域に至る極めて広い寿命域における確率疲労特性 ($P-S-N$ 特性) を解析する手法として、 $N=10^5$ における時間強度 σ_5 で表面起点型 $S-N$ データを標準化し、 $N=10^7$ における時間強度 σ_7 で内部起点型 $S-N$ データを標準化してデータを併合し、各破断形態ごとの標準化 $P-S-N$ 特性を解析して両者を重ね合わせる方法が有効であることを示した。

本研究の遂行にあたり、SCM 435 鋼の素材調達および熱処理に関し、住友金属工業(株)総合技術研究所・山本三幸氏のご協力をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表する。

文 献

- (1) 日本材料学会編、疲労設計便覧、(1995)、397-402、養賢堂。
- (2) 塩澤和章・魯連涛・石原外美、材料、**48** (1999)、1095-1100。
- (3) 増田千利・西島敏・田中義久、機論、**52**-476, A(1986)、847-852。
- (4) 外山和男・菅田登・宮原光男、熱処理、**32** (1992)、315-320。
- (5) 金澤健二・西島敏、材料、**46** (1997)、1396-1401。
- (6) Kanazawa, K. and Nishijima, S., *Fract. Defect.*, **1** (1998)、369-374。
- (7) 村上敬宣・野本啓志・植田徹・村上保夫・大堀学、材料、**48** (1999)、1112-1117。
- (8) 村上敬宣・植田徹・野本啓志・村上保夫、機論、**66**-642, A(2000)、311-319。
- (9) 阿部孝行・古谷佳之・松岡三郎、機論、**67**-664, A(2001)、1988-1995。
- (10) 浅見克敏、熱処理、**25** (1985)、123-128。
- (11) 浅見克敏・杉山好弘、熱処理、**25** (1985)、147-150。
- (12) Naito, T., Ueda, H. and Kikuchi, M., *Met. Trans.*, **A**, **15** (1984)、1431-1436。
- (13) 浅見克敏・弘永昌幸、材料、**43** (1994)、12-17。
- (14) Wang, Q. Y., Berard, J. Y., Rathery, S. and Bathias, C., *Fat. Fract. Eng. Mater. Struct.*, **22** (1999)、673-677。
- (15) 越智保雄・酒井達雄、材料、**52** (2003)、433-439。
- (16) Mughrabi, H., *Haverei-Technische Mitteilungen*, **56** (2001)、300-303。
- (17) Sakai, T., Sato, Y. and Oguma, N., *Fat. Fract. Eng. Mater. Struct.*, **25** (2002)、765-773。
- (18) 材料強度確率モデル研究会編、材料強度の統計的性質、(1992)、(i)~(iii)、養賢堂。
- (19) 酒井達雄・武田光弘・塩澤和章・越智保雄・中島正貴・中村孝・小熊規泰、材料、**49** (2000)、779-785。
- (20) 日本材料学会編、金属材料疲労強度データベース、(1996)、FD。
- (21) 日本材料学会編、金属材料疲労信頼性評価標準 [S-N 曲線回帰法、(2002)、5、日本材料学会。
- (22) 酒井達雄・佐藤陽介・小熊規泰、機論、**67**-664, A(2001)、1980-1987。
- (23) 武田光弘・酒井達雄・小熊規泰、機論、**68**-670, A(2002)、977-984。
- (24) 酒井達雄・安井秀昭・田中道七、材料、**36** (1987)、915-921。

- (25) 文献(1)の12・4節.
- (26) 酒井達雄・田中道七, 材料, **31** (1982), 941-947.
- (27) 下河利行, 航空宇宙技術研究所報告, 464号, (1976), 1-8.
- (28) 酒井達雄・田中道七, 材料, **29** (1980), 17-23.
- (29) 岡田憲司・西川出・酒井達雄・久世佳弘・西島敏・菅田淳, 機論, **64**-618, A(1998), 249-256.
- (30) Sakai, T., Shintani, T., Okada, K., Fukui, S., Sogawa, T. and Oguma, N., *Proc. EcoDesign2001*, (2001), 438-443.
- (31) 酒井達雄・武田光弘・田中伸明・金光学・小熊規泰・塩澤和章, 機論, **67**-663, A(2001), 1805-1812.
- (32) Wang, Q. Y., Berard, J. Y., Dubarre, A., Baudry, G., Rathery, S. and Bathias, C., *Fat. Fract. Eng. Mater. Struct.*, **22** (1999), 667-672.