

高硬度鋼の超長寿命域における一定および 2 段変動振幅荷重下の疲労寿命

城 野 政 弘*

Fatigue Lives on High Hardness Steels under Constant and Two-step Variable Amplitude Loading in Ultra-high Cycle Regime

Masahiro Jono

Rotating bending, high cycle fatigue tests under constant and two-step variable amplitude loading were conducted on high hardness steels, SNCM439 and YXR7, in ultra-high cycle regime. Fatigue lives of both materials were found to reveal a step-wise $S-N$ curve, which tended to come down again in the long life region above 10^7 cycles. Some specimens of SNCM439 were ruptured by internal fracture mode at very high cycle fatigue regime around 10^8 cycles, while other specimens fractured by surface fracture mode. On the other hand, internal fracture mode due to a non-metallic inclusion only appeared on YXR7 specimens irrespective of fatigue lives. Load variation effects were investigated on SNCM439, and reported that high level loading may affect fatigue damage when it was loaded before low level loading or when two-step loading was frequently repeated in a short interval.

1. はじめに

高齢化設備時代の到来と機器の高性能化に起因して、多くの産業分野で様々な高サイクル疲労損傷の発生事例に直面しているが、疲労設計法を規定した通産省告示等においては 10^6 サイクルを超える高サイクル疲労設計法は明示されていない。それに対し、高強度材や表面硬化材においては 10^6 サイクル付近で一旦水平になった $S-N$ 曲線が 10^7 サイクルを超えて再び低下することが指摘されており、近年その重要さから国内外で共同研究を含む多くの研究が実施されている^{1)~3)}。その結果として、表面からき裂が発生し破壊にいたる通常の疲労に対し、 10^7 サイクルを超える超長寿命領域においては、内部介在物からき裂が発生し、前者とは異なる $S-N$ 曲線を示し、いわゆる 2 重 $S-N$ 曲線となるといわれている^{1), 2)}。しかしながらその詳細については、不明な点も多い。一方、実機の受ける長時間荷重は一定振幅であることは少なく、振幅、周期の変動するいわゆる変動荷重であることが多い。 10^7 サイクル以下の領域における変動荷重下の累積疲労損傷については多くの研究がある⁴⁾が、超長寿命域における検討はほとんどない^{5), 6)}。

本研究では、高硬度鋼を用いて超長寿命域における疲労試験を行い、一定振幅試験における $S-N$ 曲線を検討するとともに、2 段変動振幅荷重下の累積疲労損傷について検討を行った。

* 機械工学科

2. 試験材料および試験方法

試験材料としては、Ni-Cr-Mo 鋼 SNCM439 鋼とマトリクスハイス YXR7 を使用した。供試材料の化学成分を表 1 に示す。SNCM439 鋼は、焼きならし (860℃×60min→空冷)、焼入れ (850℃×60min→60℃油冷)、焼き戻し (180℃×120min→空冷) の熱処理を行ったもので、硬さを約

表 1. 供試材料の化学成分 (mass%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	W	V	Co	P	S
SNCM439	0.41	0.24	0.66	1.71	0.75	0.21	0.13	—	—	—	0.018	0.016
YXR7	0.80	0.85	0.33	—	4.86	5.73	—	1.21	1.23	0.18	—	—

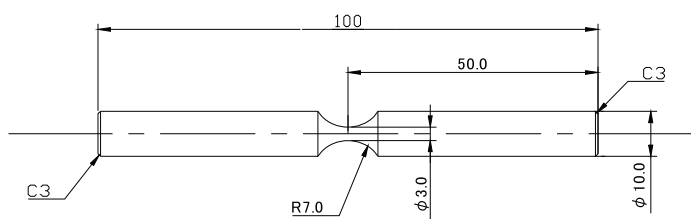


図 1. 試験片形状寸法

HV600 と高くしたものである。また、YXR7 も、焼入れ、焼き戻しにより、引張強さ 2100MPa、硬さ HV750 としている。試験片は図 1 に示すように砂時計型試験片で、最小断面直径は 3.0mm、応力集中係数は $\alpha = 1.06$ である。なお、試験片の切り欠き部表面は研削加工後に #400~2000 のサンドペーパーで仕上げた。

疲労試験は、図 2 に示す (株) ホーコス社製の 4 連式回転曲げ疲労試験機を用いて行った。試験速度は 3150rpm である。本研究のように 10^7 サイクルを超える超長寿命域における疲労試験を実施するには、長時間の試験が必要であり、通常の試験では困難である。そのため一度に 4 本の試験が実施できる 4 連式の回転曲げ疲労試験機を用いて効率的に試験を行った。

繰返し変動荷重振幅試験には、ラック・ピニオンシステムのリニアヘッドとタイマー付リミッタを組み合わせた自動荷重変動装置を試作し用いた。荷重変動部を図 3 に示すが、所定の時間毎に上部の重錘を載せた円板を上下させ、2 段繰返し変動荷重試験を可能としたものである。なお、



図 2. 4 連式回転曲げ疲労試験機



図 3. 荷重変動部

変動周期はタイマーにより 1 秒から 999 時間の間で任意に設定可能とした。

3. 実験結果および考察

3. 1 SNCM439 鋼の試験結果

3. 1. 1 一定振幅試験結果

SNCM439 鋼の一定振幅荷重試験結果を図 4 に示す。負荷応力 1200MPa 以上の領域では、1500MPa、1200MPa で長寿命側にばらつくものが各一点見られるものの、実験結果はほぼ右下がりの一本の直線で表すことができる。また、1200MPa、1100MPa の間では短寿命側と長寿命側にそれぞれ点が見られ、この間で $S-N$ 曲線は一度平坦に折れ曲がると考えられる。1100MPa 以下の領域では、ばらつきが大きいものの、最小自乗法を用いて直線を引くと再び長寿命側に低下する。このように硬さを非常に高くした本材料では、 10^5 サイクル付近で一旦水平になった $S-N$ 曲線が 10^7 サイクルを超えて再び低下するいわゆる 2 重 $S-N$ 曲線を示すことが確認された。このような 2 重 $S-N$ 曲線を示す原因は、超長寿命域で内部介在物からき裂が発生し、破断するためとされている¹⁾。

したがって本研究でも、これらの破壊機構を検討するため、全ての破断試験片の破面を実体顕微鏡（ ~ 70 倍）で観察し、破壊起点を同定するとともに、起点付近の様相について走査型電子顕微鏡により高倍率（50 \sim 3000 倍）で調べた。本試験では、図中 f を付した 2 点では、一例を図 5 に示すように、内部介在物を起点としてき裂が発生し、fish-eye を形成して破断したことが認められたが、 10^7 サイクルを超えて破断した場合でも、他の試験片では介在物起点の破壊は認められず、むしろ通常の疲労破壊のように表面から破壊が生じているように見受けられた。したがって超長寿命域の破壊が全て内部介在物を起点とするとはいえず、表面すべりでも起こり得るようにも考えられるが、表面直下に介在物らしいものが存在した場合もあり、詳細については今後の検討が必要かと思われる。

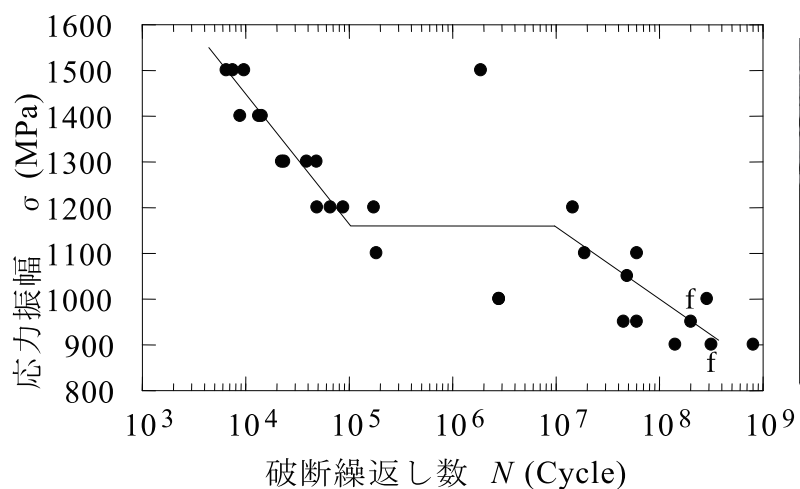


図 4. SNCM439 鋼の一定振幅荷重下の疲労試験結果

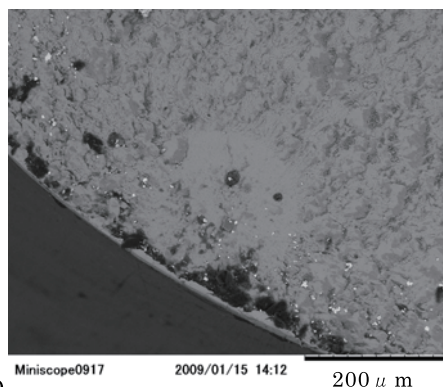


図 5. 内部起点型の fish-eye の例
($\sigma = 950\text{MPa}$ 、 $N = 2.03 \times 10^8$)

3. 1. 2 2 段変動荷重振幅試験結果

変動荷重試験として最も簡単な2段変動荷重試験を実施することにし、高レベル応力を通常の疲労寿命域である $\sigma_H=1300\text{MPa}$ (一定振幅試験時の破断繰返し数 $N_H=4.0\times 10^4$) と 1200MPa (同 9.0×10^4) に選び、低応力レベルとしては、超長寿命域となる $\sigma_L=1000\text{MPa}$ ($N_L=1.0\times 10^8$) として、低レベル応力を所定回繰返して後高レベル応力に切り替える Lo-Hi の2段2重変動荷重試験、高レベル応力から低応力レベルに切り替える Hi-Lo の2段2重変動荷重試験ならびに高、低応力を繰返し負荷する2段繰返し変動荷重試験を行った。

Lo-Hi の2段変動荷重試験結果を表2に示す。本試験では一次応力の $\sigma_L=1000\text{MPa}$ を一定振幅試験の寿命 $N=1.0\times 10^8$ 回に対して31～71%の回数(これを繰返し数比 $D=n/N$ で表示し、以下各応力レベルでの損傷値と呼ぶ) 負荷し、以後高応力レベル $\sigma_H=1300\text{MPa}$ に切り替え破断まで試験を行ったものである。なお、 $\sigma=1100\text{MPa}$ の一定振幅試験で $n=5.35\times 10^7$ 回で破断しなかった試験片を $\sigma_H=1300\text{MPa}$ に切り替えたものも参考として示している。累積損傷値 (D_L と D_H の合計) は、ばらつきのあるものの、ほぼ1となり、線形累積損傷則が成り立っているようである。

Hi-Lo 2段変動荷重試験結果を表3に示す。一次応力を 1300MPa と 1200MPa に選び、一次応力での損傷値 D_H を0.2～0.7に変化させ試験を行った。なお、表3の最下段に示した2本の試験片は、次に述べる2段繰返し試験の最初の荷重ブロックで破断し、2段2重試験となったもので、参考として示した。一次応力が 1300MPa と高い場合、 $D_H=0.2$ の1本を除いて、他の試験片では累積損傷値が0.5以下と二次応力での疲労寿命が短くなり、高レベル応力の負荷が低レベル応力での疲労寿命に大きな影響を与えていることがわかる。一方、一次応力が 1200MPa と $S-N$ 曲線の折れ曲がりレベルに近い場合は、累積損傷値は1以上となり、一次応力の繰返し数比が0.7とかなり大きくならない限り、二次応力の疲労寿命にはあまり影響しないようである。

次に、2段繰返し変動荷重試験結果を表4に示す。試験は図6に示すように高、低レベル応力の1ブロック内の繰返し数を、それぞれ n_H 、 n_L サイクルとし、それを繰返し負荷するものである。本試験では、高、低レベルの応力は、2段2重試験と同じく、 1300MPa と 1000MPa とし、高、低応力の負荷時間を $1\text{m}:1000\text{m}$ ($n_H=3.15\times 10^3:n_L=3.15\times 10^6$) と $0.5\text{m}:500\text{m}$ ($n_H=1.58\times 10^3:n_L=1.58\times 10^6$) の2条件を選び試験を行った。なお、負荷順序は図のように高レベル応力から負荷した。

表2. SNCM 鋼の Lo-Hi 2 段変動荷重下の試験結果

一次応力 $\sigma_L(\text{MPa})$	繰返し数 $n_L(\text{Cycle})$	繰返し数 比 D_L	二次応力 $\sigma_H(\text{MPa})$	繰返し数 $n_H(\text{Cycle})$	繰返し数 比 D_H	累積損傷値 D_L+D_H
1000	3.06×10^7	0.31	1300	2.40×10^4	0.60	0.91
	5.35×10^7	0.54		4.13×10^4	1.03	1.57
	7.07×10^7	0.71		2.56×10^4	0.64	1.35
1100	5.35×10^7	2.68		1.62×10^4	0.41	3.08

表 3. SNCM 鋼の Hi-Lo 2 段変動荷重下の試験結果 (R)は未破断

一次応力 σ_H (MPa)	繰返し数 n_H (Cycle)	繰返し数 比 D_H	二次応力 σ_L (MPa)	繰返し数 n_L (Cycle)	繰返し数 比 D_L	累積損傷値 $D_H + D_L$
1300	8.06×10^3	0.20	1000	3.40×10^8 (R)	3.40(R)	3.60(R)
	8.14×10^3	0.20		3.88×10^6	0.04	0.24
	1.23×10^4	0.31		1.99×10^7	0.20	0.51
	1.62×10^4	0.41		4.48×10^4	0.0004	0.41
	2.02×10^4	0.51		1.64×10^4	0.0002	0.51
1200	3.05×10^4	0.31		2.61×10^8 (R)	2.61(R)	2.91(R)
	5.05×10^4	0.51		1.01×10^8	1.01	1.52
	7.05×10^4	0.71		4.99×10^7	0.50	1.21
1300	1.58×10^3	0.04		2.72×10^5	0.003	0.043
	1.58×10^3	0.04		6.47×10^5	0.006	0.046

表 4. SNCM 鋼の 2 段繰返し変動荷重下の試験結果 ($\sigma_H = 1300\text{MPa}$ 、 $\sigma_L = 1000\text{MPa}$)

1 ブロックの繰返し数		破断までの繰返し数		損傷値		累積損傷 値 $D_H + D_L$
n_H (Cycle)	n_L (Cycle)	Σn_H	Σn_L	D_H	D_L	
3.15×10^3 (1m)	3.15×10^6 (1000m)	3.15×10^4	2.95×10^7	0.79	0.29	1.08
		3.15×10^4	3.01×10^7	0.79	0.30	1.09
		6.30×10^3	3.11×10^6	0.16	0.03	0.19
1.58×10^3 (0.5m)	1.58×10^6 (500m)	7.88×10^3	6.31×10^6	0.20	0.06	0.26
		1.42×10^4	1.34×10^7	0.35	0.13	0.48

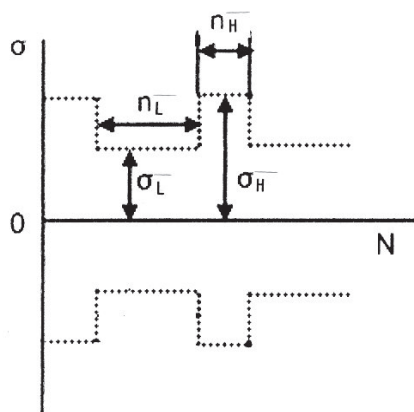


図 6. 2 段繰返し変動荷重波

負荷周期の長い 1m : 1000m の場合は、累積損傷値は、一例として小さいものも見られるが、ほぼ 1 となり、線形累積損傷則が成り立っているようである。それに対し、負荷周期を半分の 0.5m : 500m とした場合は、累積損傷値は 0.5 以下となり、荷重変動の影響がみられ、寿命を短くするようである。

以上実施した 3 種類の 2 段変動荷重試験の損傷値をまとめて図示したものを図 7 に示す。横軸は高レベル応力の損傷値 D_H 、縦軸は低レベル応力の損傷値 D_L で、1 - 1 を結ぶ線が、線形累積損傷則を示している。

Hi-Lo 試験の場合、一次応力が 1200MPa である test 2 では、試験点は直線の右上にあり、安全側であるが、1300MPa とした test 1 では損傷値が左下に集まり、危険側となっている。2 段階繰り返し試験では周期の長い test 1 ではほぼ線形損傷則が成り立つのに対し、周期が短くなった test 2 では直線の左側となり、変動荷重により寿命が短くなることを示している。

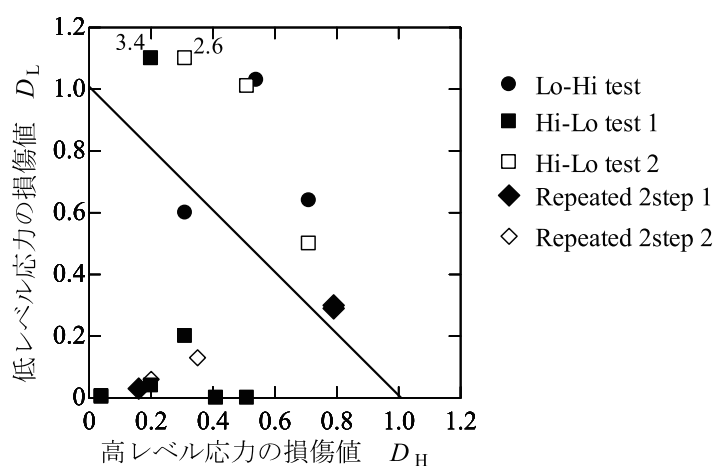


図 7. 2 段階変動荷重下の損傷値

3. 2 YXR7 の試験結果

マトリックスハイス YXR7 材の一定振幅荷重下の疲労試験結果を図 8 に示す。本研究では、 $S-N$ 特性とともに、短寿命域、 $S-N$ 曲線の折れ曲がり領域、超長寿命域に相当する各応力レベルで 10 本以上の試験を行い、疲労寿命分布の検討をも行った。図に見られるように $S-N$ 曲線は $\sigma = 900\text{MPa}$ で一旦水平になった後、 10^7 サイクルを超えた領域で再び低下する 2 重 $S-N$ 特性を示した。破面観察の結果から、全ての試験片は、一例を図 9 に示すように、アルミナを主成分とする球状の内部介在物を起点として破断した。図 10 は、き裂発生点となった介在物の大きさと表面からの位置を模式的に示すものであるが、便宜的に $b = r/L > 0.8$ の場合を表面近傍の介在物、 $b < 0.8$ を内部介在物からのき裂発生と定義し、また、後者では fish-eye 形成の有無を区別し、それぞれ S (Δ)、F (\bullet)、I (\circ) の記号で表し、図 8 中に示した。き裂発生点の介在物の

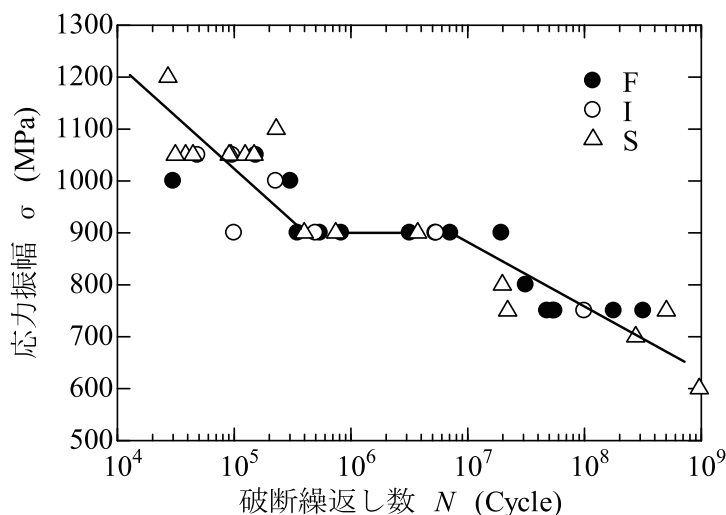


図 8. YXR7 材の一定振幅荷重下の疲労試験結果

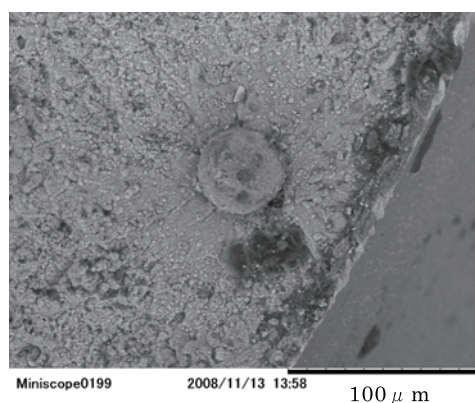


図 9. 内部介在物からの破断例
($\sigma = 1050\text{MPa}$ 、 $N = 1.54 \times 10^5$)

位置については、寿命が 10^6 サイクルを超える長寿命領域に対応する低応力域では、上記 3 タイプのものが混在していたが、寿命が 5×10^5 サイクル以下となる高応力域では表面近傍の介在物を起点としてき裂が発生して破断したものが多くなるようであった。

次に、疲労寿命分布の検討を行った。本研究では平均疲労寿命が 10^5 サイクルとなる $\sigma = 1050\text{MPa}$ 、 10^6 サイクルで $S-N$ 曲線の折れ曲がりとなる $\sigma = 900\text{MPa}$ 、 10^8 サイクルの超長寿命域である $\sigma = 750\text{MPa}$ で各 10 本以上の多数試験

片による疲労試験を行い、疲労寿命分布を求めた。疲労寿命分布は通常対数正規分布で表されることが多いので、ここでも対数正規確率紙上に試験点をプロットすることにより、分布の適合度を検討した。 $\sigma = 900\text{MPa}$ の結果を一例として図 11 に示す。寿命分布は、実線で示す理論分布線に対し、ほぼ一致しているようにも見えるが、詳細に検討すると長寿命側と短寿命側の 2 つに

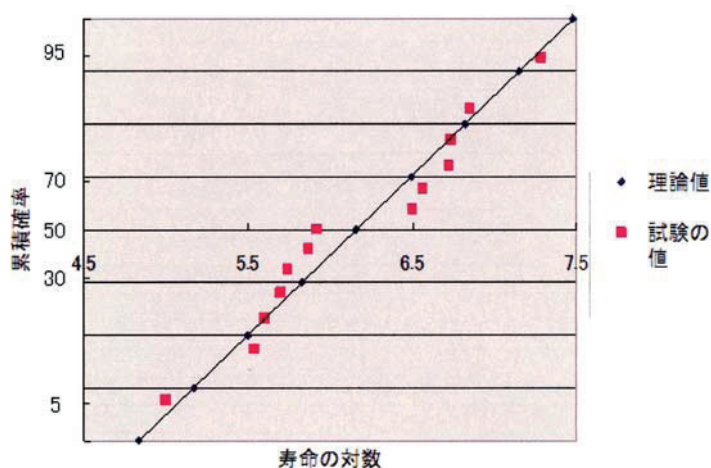


図 11. 疲労寿命分布 ($\sigma = 900\text{MPa}$)

寿命側と長寿命側の 2 つのグループに分け、それぞれについて同様のものを求め示している。 $\sigma = 1050\text{MPa}$ ならびに 950MPa の場合は、前述のようにばらつき（変動係数）が大きく、一つの分布で表すことは困難であったが、これを 2 つに分けると、それぞれ対数正規分布で表せ、変動係数も 5 % 程度に収まっている。なお、ばらつきの原因は介在物の大きさと位置に起因することが大きく、これらを考慮した破壊力学的検討を適用し、破壊起点となる介在物周りの応力拡大係数に対して破断寿命を整理すると、ばらつきは大きいものの、全体として右下がりの関係で表され、明確な 2 段の折れ曲がりはなく、 σ であるが、応力拡大係数の評価になお問題もあるので、詳細は今後の検討としたい。

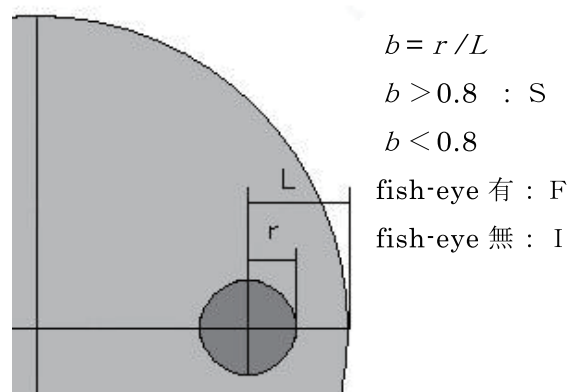


図 10. 介在物の大きさと位置の説明図

$$b = r / L$$

$$b > 0.8 : S$$

$$b < 0.8$$

fish-eye 有 : F

fish-eye 無 : I

表5. YXR7 材の疲労寿命分布特性のまとめ

応力 振幅 MPa	全体				短寿命側				長寿命側			
	平均 値	標準 偏差	変動係 数	適合 度	平均 値	標準 偏差	変動 係数	適合 度	平均 値	標準 偏差	変動 係数	適合 度
1050	4.88	0.25	5.19%	×	4.6	0.083	1.81%	○	5.06	0.103	2.04%	△
900	6.16	0.66	10.70%	×	5.62	0.306	5.44%	○	6.78	0.279	4.12%	○
750	8.01	0.476	5.94%	○	—	—	—	—	—	—	—	—

4. 結言

SNCM439 鋼と YXR7 を用いて、 10^7 サイクルを超える超長寿命における一定振幅および 2 段変動荷重振幅試験を行い疲労寿命の検討を行った。得られた主な結果は以下の通りである。

1. 焼入れ、焼き戻しにより硬さを HV600 以上とした両材料では、 10^7 サイクルを超える超長寿命域においても破壊が生じ、 $S-N$ 曲線は 2 段に折れ曲がる 2 重 $S-N$ 曲線となった。
2. SNCM439 鋼の超長寿命域の破壊は、内部介在物を起点とし fish-eye を形成して破壊したものもみられたが、必ずしも全てで内部破壊がみられるわけではなく、表面起点型破壊が超長寿命域でも起こり得ることが示唆され、破壊機構についてはさらなる検討が必要である。
3. YXR7 においては、低寿命域から超長寿命域にわたる全ての範囲で、内部介在物を起点とする破壊が認められ、大きいばらつきが認められた。寿命分布は対数正規分布で近似できるものの、ばらつきの大きい場合は、短寿命側と長寿命側の 2 つに分けたほうがより良い近似が得られた。
4. SNCM439 鋼における 2 段荷重変動試験では、高一低 2 段変動荷重試験ならびに繰返し周期を短くした 2 段繰返し変動試験において寿命が短くなり、荷重変動の影響がみられた。

謝辞 本研究の一部には、文部科学省科学研究費（基盤研究 C）ならびに福井工業大学特別研究費の援助を受けた。また、実験の遂行には、福井工業大学平成 19 年度ならびに 20 年度卒業生の竹岡直紀、田中祥吾、田村 慎、西村和久君らの協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 酒井達雄、検査技術、(2004.3)1/7
- 2) 塩澤和章、検査技術、(2004.7)10/17
- 3) Tatsuo Sakai and Yasuo Ochi ed., Proc. 3rd International Conference on Very High Cycle Fatigue, Shiga, (2004)
- 4) Masahiro Jono, Int. J. Fatigue, 27, (2005), 1006/1015
- 5) 中島正貴他、材料、54-11, (2005), 1305/1310
- 6) 中島正貴他、材料、55-9, (2006), 849/854
- 7) 小林将也、西村和久、福井工業大学平成 20 年度卒業研究論文

(平成 21 年 3 月 31 日受理)