資 料 TECHNICAL NOTE

高温における変動応力振幅下の疲労強度[†] (SUS 316 鋼, SCMV 4 鋼, SCM 435 鋼による実験結果)

岡 田 友 信* 中 村 宏*
堀 川 武* 恒 成 利 康**

Fatigue Strength under Varying Stress Amplitude at Elevated Temperatures (Test Results on SUS 316, SCMV 4 and SCM 435 Steels)

by

Tomonobu OKADA, Hiroshi NAKAMURA,
Takeshi HORIKAWA and Toshiyasu TSUNENARI
(Technical Research Laboratory, Kawasaki Heavy Industries Ltd., Akashi)

In order to develop an estimating method of fatigue damage caused by stress amplitude below fatigue limit, the present authors carried out several types of varying stress amplitude tests in the past. However, many of them were done at room temperature and only few investigations at elevated temperatures have been reported.

In the present study, repeated two-step varying stress amplitude tests which composed of a stress higher than the fatigue limit(overstress) and a stress lower than the fatigue limit(understress), were carried out on the smooth specimens of SUS 316, SCMV 4 and SCM 435 steels under rotating bending stress at temperatures up to 600°C. The fatigue data were analyzed by the Miner's and the modified Miner's laws, and the cumulative fatigue damage was discussed. The main results obtained are as follows:

(1) Under varying stress amplitudes, the understress gave a fatigue damage to the specimens and the cumulative fatigue damage calculated by Miner's law was less than unity.

(2) The modified Miner's law gave a conservative damage value for SUS 316 stainless steel at 600°C, although it gave poor damage values for SCMV 4 steel at 300°C and 500°C, and SCM 435 steel at 300°C.

(Received Jan. 21, 1983)

キー・ワード：高温高サイクル疲労強度，変動応力振幅試験，ステンレス鋼，低合金鋼，疲労損傷評価法

1 ま え が き

機械，構造物の疲労寿命推定法を確立するための研究の一環として，筆者らは一定応力 $S-N$ 線図の疲労限以下の応力振幅を含む変動応力振幅試験を実施してきた^{1,2)}。その結果このような低い応力振幅によっても疲労損傷が蓄積され，寿命推定に際してはこの影響を正當に評価する必要があることが明らかとなった。ただし，これらの研究結果は常温で行われた実験研究から得られたもので，金属の組織変化や酸化などが顕著となる高温環境下においてはこれまでほとんど検証され

ていない。この原因の一つとして，常温では実機に加わる実働応力が比較的簡単に把握できるのに対して，高温下では応力測定の問題などによってこれを正確に把握することが難しく，そのために疲労限以下の低応力振幅による影響に関して十分な認識がなかったことなどが考えられる。ところが，蒸気タービンやガスタービンの動翼およびロータディスクなどの高温回転機器では，起動および停止時に通過特性としての高い振動応力が，一方定格運転時にはこの振動応力が低くなるなど，起動一定格一停止サイクル中に応力振幅が変化することは良く知られている。このような高い振動応力は必ずしもすべて疲労限以上の応力振幅となるとは限らないが，ここでは高温下における変動応力振

[†] 原稿受理 昭和58年1月21日

* 正 会 員 川崎重工業(株)技術研究所 明石市川崎町

** 川崎重工業(株)技術研究所 明石市川崎町

Table I. Chemical compositions of the materials (wt. %).

Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
SUS 316	0.07	0.77	0.54	0.031	0.014	10.23	16.95	2.18	—	—
SCMV 4	0.11	0.22	0.46	0.011	0.014	2.31	0.09	0.99	0.07	0.01
SCM 435	0.40	0.29	0.77	0.019	0.015	1.07	—	0.17	—	—

Table II. Mechanical properties of the materials at high temperatures.

Mechanical properties	SUS 316				SCMV 4			SCM 435			
	R. T	300°C	400°C	600°C	R. T	300°C	500°C	R. T	300°C	400°C	500°C
0.2% proof stress (MPa)	212	—	136	112	472	432	382	1030	876	785	522
Tensile strength (MPa)	548	—	484	416	602	533	447	1160	1059	897	676
Elongation (%)	56.5	—	46.0	44.5	28.5	17.0	19.2	18.2	15.6	17.4	21.2
Reduction of area (%)	78.8	—	67.5	70.8	73.9	71.5	77.9	55.8	54.4	70.6	79.7

幅下での材料の疲労損傷について検討するために、起動・停止時の振動応力を疲労限以上の応力振幅、そして定格時の振動応力をそれ以下の応力振幅であると想定した二段多重変動応力振幅試験について実施した。

なお、本報ではこれらの試験をオーステナイト系ステンレス鋼と二種類の低合金鋼について行い、その結果、高温下においても常温の場合と同様、疲労限以下の応力振幅の繰返しによって疲労損傷が蓄積されることが明らかとなったので報告する。

2 実験方法

実験に供した材料はオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS 316)、2¼Cr-1Mo 鋼 (SCMV4) およびクロモモリブデン鋼 (SCM 435) である。三鋼種の化学成分を Table I に、そして疲労試験を行った温度における機械的性質を Table II に示す。この供試材のうち SCMV4 鋼だけは熱処理することなく供給のまま試験に供したが、SUS 316 鋼は溶体化処理 (1060°C×1 Hr, 水冷) を、そして、SCM435 鋼は焼入れ (860°C×1 Hr, 油冷) 焼もどし (600°C×1 Hr, 水冷) の熱処理を行っている。なお、SCM 435 鋼は通常、高温強度部材として使用されることは少ないが^{*1}、本研究では高温酸化による影響を大きく受ける場合の疲労損傷評価について検討するために試験を行ったものである。

用いた試験機は容量 100 N・m の小野式回転曲げ疲労試験機で、繰返し速度はすべて 3600 cpm である。さらに、試験片の加熱には容量 1.8 kW の電気炉を用いた。試験温度は試験片表面から約 3 mm 離れた位置に CA 熱電対を設置し、炉内の雰囲気温度が一定となるように制御した。なお、試験の開始に際しては約 2 時間無負荷で回転させて試験温度に達したのを確認した

Fig. 1. Shape and dimension of the specimen (mm).

Table III. Test wave and conditions of varying stress amplitude.

Materials	Temperature (°C)	σ_1 (MPa)	n_1 (cycle)	n_2 or ΔD_2
			$\Delta D_1 (=n_1/N_1)$	
SUS 316	600	235	800	$n_2=5 \times 10^8$
			1.4×10^{-1}	$n_2=2 \times 10^4$
			1.4×10^{-1}	$n_2=2 \times 10^5$
SCMV 4	300	343	5.0×10^8	$\Delta D_2=1.1 \times 10^{-2}$
			3.2×10^{-2}	
	500	343	4.5×10^8	$\Delta D_2=2.5 \times 10^{-2}$
			1.1×10^{-1}	
SCM 435	300	588	4.5×10^8	$n_2=5 \times 10^6$
			4.7×10^{-2}	
	300	588	1.0×10^8	$n_2=5 \times 10^6$
			3.2×10^{-2}	

*1 たとえば CrMo 鍛鋼はディーゼル機関のピストンクララン材として用いられている。

$\Delta D_2 (=n_2/N_2)$ is damage of modified Miner's law.

後所定の荷重を负荷した。Fig. 1 に疲労試験片の形状寸法を示す。これは試験部直径 8 mm の平行部付平滑試験片である。

疲労試験は一定応力振幅と変動応力振幅の二種類の試験について実施し、前者の試験によって $S-N$ 線図を求めた。一方、後者の試験は $S-N$ 線図の疲労限以上とそれ以下の応力振幅を交互に繰返す二段多重変動応力振幅で行い、Table III に試験条件を示す。ここで、 σ_1 は疲労限以上の応力振幅（以下過大応力と称す）で、 σ_2 は疲労限以下の応力振幅（過小応力と称す）である。なお、この試験では変動応力パターンによって σ_2 が疲労限以上となる場合も一部含まれている。

3 実験結果および考察

3.1 $S-N$ 線図

各試験温度における $S-N$ 線図を Fig. 2 (a)~(c) に示す。図中(a)の SUS 316 鋼では、300℃ の場合を除く他の試験温度において $S-N$ 線図が比較的短寿命範囲で折れ曲り 10^5 回以前で破断しないものは 10^7 回の繰返しにも耐える。しかし、300℃ の $S-N$ 線図については、実験点が少なく、厳密な比較はできないが、他の試験温度の場合より時間強度部分の傾きが緩やかで、かつ折れ曲り点も長寿命側にずれる結果が得られた。

Fig. 2 (b) の SCM V 4 鋼では、試験温度の上昇に伴って $S-N$ 線図の時間強度がほぼ平行に低下している。また折れ曲り点については $10^6 \sim 5 \times 10^6$ 回の範囲にあり、常温における炭素鋼などに似た $S-N$ 線図の形態を示している。

一方、Fig. 2 (c) に示した SCM 435 鋼については、高温度域で $S-N$ 線図の折れ曲りが認められなくなる傾向にあり、常温における腐食疲労での $S-N$ 線図に似た形態を示す。

これらの $S-N$ 線図から、SUS 316 鋼、SCMV 4 鋼は高温での耐酸化性に比較的優れた材料であるため高温度域においても常温の場合と同様疲労限が明りょうに現れたのに対して、SCM 435 鋼では高温下で酸化の影響を大きく受け明りょうな疲労限が得られなかったものと推察される。

Fig. 3 は三鋼種の各試験温度における疲労限 (σ_w) と静的引張強さ (σ_B) の比を縦軸に、横軸には試験温度をとって表示したものである。なお、図中“*”印

(a) SUS316 stainless steel.

(b) SCM V 4 steel.

(c) SCM 435 steel.

Fig. 2. Relation between the stress amplitude and the number of cycles to failure under constant stress amplitude tests.

で示したものは本実験範囲で疲労限が得られなかった SCM 435 鋼の 300℃ と 500℃ の結果で、ここでは 5×10^7 回での時間強度を便宜上疲労限として取扱った。この図から、SUS 316 鋼と SCMV 4 鋼での σ_w/σ_B は 300℃ 近傍で若干低くなる傾向はみられるものの、これ以上の温度域については常温の場合とはほぼ同程度の比率となり、本実験範囲では SUS 316 鋼の場合 $\sigma_w/\sigma_B = 0.44 \sim 0.48$ 、SCMV 4 鋼の場合 $\sigma_w/\sigma_B = 0.51 \sim 0.56$ となる結果が得られた。一方、SCM 435 鋼の場合は $\sigma_w/\sigma_B = 0.42 \sim 0.51$ と SUS 316 鋼の場合と

Fig. 3. Temperature dependence of the ratio of fatigue limit to tensile strength (σ_w/σ_B).

同程度の比率を示すものの、疲労限が得られなかった 300℃と 500℃での σ_w/σ_B の値が常温のときよりもかなり小さくなる。なお、400℃での比率が高くなっているのは、高温下での炭素鋼などに顕著にみられる青熱ぜい性による疲労強度の上昇によるためと考えられる。

以上のように、SUS 316 鋼、SCMV 4 鋼における σ_w/σ_B が試験温度により大きく変化しないことは、短時間での試験から得られる静的引張強さから長時間に渡る疲労限が求められることを意味している。さらに、これらの結果と常温における炭素鋼および低合金鋼での σ_w/σ_B を比べると、炭素鋼では $\sigma_w/\sigma_B = 0.44 \sim 0.62$ ³⁾、低合金鋼では $\sigma_w/\sigma_B = 0.35 \sim 0.64$ であることから、高温における σ_w/σ_B は常温の場合と本質的には変わらないものと思われる。一方、SCM 435 鋼については、高温度域で疲労限が得られなかったことから、静的引張強さから疲労限を正確に把握することはできない。これは SUS 316 鋼、SCMV 4 鋼に比べると高温酸化の影響を大きく受けるためと考えられる。なお、Fig. 3 中に一点鎖線で示したものは金材技研のデータシートなどから比較のために抽出した結果で、本実験結果は三鋼種の場合ともこれらの実験結果と傾向的に良く一致している。

3・2 二段多重変動応力振幅試験結果

疲労限以下の応力振幅を含む二段多重変動応力振幅試験の結果をもとに、高温下で応力振幅が変動するときの疲労損傷について以下に検討する。

最初に疲労限以上の応力振幅による疲労損傷のみを評価するマイナー則について検討する。Fig. 4 (a)~(c) は過小応力と疲労限の比 (σ_2/σ_w) を縦軸に、横軸にはマイナー則による疲労損傷度 ($D_{\sigma > \sigma_w}$) をとって整理したもので、 $D_{\sigma > \sigma_w}$ が 1 近傍にプロットされれば

(a) SUS316 stainless steel (600°C).

(b) SCM V 4 steel (300°C and 500°C).

(c) SCM435 steel (300°C).

Fig. 4. Relation between the ratio of second stress amplitude to fatigue limit (σ_2/σ_w) and the fatigue damage of Miner's law ($D_{\sigma > \sigma_w}$).

マイナー則が成立することになる。なお、一定応力 S-N 線図に若干のばらつきが認められたため、図中にはこのばらつき幅が疲労限以下の応力範囲に対しても同程度に存在すると仮定して一点鎖線で示した。SUS 316 鋼の 600℃による実験結果についてみると、 $n_1/n_2 = 800/5 \times 10^3$ の実験では過小応力にかかわらず

$D_{\sigma>\sigma_w} \approx 1$ となる結果が得られた。しかし、 n_1/n_2 が異なる場合には $S-N$ 線図のばらつきを考慮しても $D_{\sigma>\sigma_w} < 1$ となり、とくに過小応力による繰返し頻度 (n_2) が多い $n_1/n_2 = 800/2 \times 10^5$ の変動パターンにおいてマイナー則による損傷度が小さくなる傾向を示している。ただし、これらの実験結果を詳細に検討すると、 $\sigma_2/\sigma_w = 0.75 \sim 0.90$ の場合に $D_{\sigma>\sigma_w} < 1$ となり、 σ_2/σ_w が 1 に近づくほど、あるいは $\sigma_2/\sigma_w \leq 0.7$ の範囲では $D_{\sigma>\sigma_w} \geq 1$ となっている。 σ_2/σ_w が 1 に近い場合に $D_{\sigma>\sigma_w} \geq 1$ となる原因の一つとして、 σ_2 による疲労損傷の蓄積よりもむしろこの材料で顕著にみられるコーキング効果による強化作用の方が強く現れたものと考えられる。これはこの影響を最も受けやすいと思われる $n_1/n_2 = 800/2 \times 10^5$ の実験点が $D_{\sigma>\sigma_w} \gg 1$ となっていることから推察される。一方 $\sigma_2/\sigma_w \leq 0.7$ のときに $D_{\sigma>\sigma_w} \geq 1$ となるのは、コーキング効果よりもむしろ疲労損傷が蓄積されない過小応力を長時間繰返すことによって、過大応力により蓄積された疲労損傷を逆に回復させるようなことがあるものと推察されるが、この点については詳細に実験研究を行って検討する必要がある。したがって、本実験範囲では疲労限の 7 割以下の応力振幅による疲労損傷については蓄積されないと考えてよさそうである。さらに、 $D_{\sigma>\sigma_w} < 1$ となる場合についても、これまで常温下で得られた $D_{\sigma>\sigma_w} = 1/100 \sim 1/1000$ と著しく小さな値とはならないものと考えられる。

Fig. 4 (b) に SCM V 4 鋼の 300℃ と 500℃ における実験結果を示す。この材料では大部分の実験点が $S-N$ 線図のばらつきの下限線より小さな損傷度で破断しており、過小応力による疲労損傷の蓄積が認められる。しかし、この応力による蓄積の程度は常温の場合ほど大きくはなく、SUS 316 鋼の場合とほぼ同程度である。また、300℃ と 500℃ による実験点にはほとんど相違が認められず、本実験の範囲では試験温度による影響は少ないものと思われる。

SCM 435 鋼の 300℃ による結果を Fig. 4 (c) に示す。図から明らかなように、本供試材では SUS 316 鋼、SCM V 4 鋼の場合と異なり、 $D_{\sigma>\sigma_w}$ が著しく小さな値で破断し、とくに過大応力による繰返し頻度を少なくした $n_1/n_2 = 10^3/5 \times 10^6$ の変動パターンにおいて過小応力による疲労損傷の蓄積が大ききようである。このような結果が得られた原因については現在不明であるが、金沢らの研究によると本供試材では高温酸化による影響が大ききことから、き裂面に形成される酸化物によって低応力振幅ほど応力拡大係数が大きくなるという興味ある結果が報告されており、変動応力振幅下についてもこのような高温き裂伝ば特性が破断寿命の低下に影響していることも考えられる。

以上述べた三鋼種についての実験結果から、疲労限以下の応力振幅が破断寿命に及ぼす影響は高温下においても比較的大きく、とくに高温酸化が著しい SCM 435 鋼でこの影響が顕著にみられた。したがって、これらの材料に対しては高温下でマイナー則による疲労損傷評価法が必ずしも成立しないことが明らかとなった。そこで、この過小応力による疲労損傷度をも評価した場合の損傷評価法について以下に検討する。このような損傷評価法はこれまでに種々報告されているが、ここでは常温での疲労強度設計などに多く用いられている修正マイナー則によって疲労損傷を評価する。なお、実験結果の整理の都合上、本報では次式によって等価応力 (σ_{eq}) および繰返し数 ($\sum n_i$) を算出し一定応力の $S-N$ 線図上にプロットした。

$$\sigma_{eq} = (\sum \sigma_i^m \cdot n_i / \sum n_i)^{1/m} \quad (1)$$

$$\sum n_i = \sum n_1 + \sum n_2 \quad (2)$$

ここで、 m は次式で $S-N$ 線図を表示したときの応力振幅の指数である。

$$\sigma_a^m \cdot N_f = K \quad (3)$$

この整理方法では、実験点が $S-N$ 線図の時間強度を疲労限以下まで延長した線上に位置すれば累積損傷度 (D) が 1 となり修正マイナー則が成立することを意味する。

Fig. 5 (a)~(d) に修正マイナー則を適用したときの整理結果を示す。なお、図中には累積損傷度をパラメータとした両者の関係も一点鎖線で併記した。

Fig. 5 (a) は SUS 316 鋼の結果である。 n_1/n_2 にかかわらず実験点は修正マイナー則の直線 (図中破線で示す) 近傍、あるいはこの直線よりも長寿命側にプロットされ、本実験範囲では $D = 0.7 \sim 5$ となることがわかる。これは Fig. 4 (a) で示したようにマイナー則による損傷度がほぼ 1 近傍となることから当然このような結果となったもので、この材料では修正マイナー則により損傷を評価すると過小応力による損傷を過大に見積りすぎることを示唆している。

Fig. 5 (b) および (c) は SCM V 4 鋼の 300℃ と 500℃ における実験結果である。300℃ での実験結果についてみると、破断したすべての実験点が修正マイナー則の直線上あるいはそれよりも短寿命となり、 $D = 0.25 \sim 1$ の範囲にプロットされる。一方、500℃ の結果は 300℃ の場合よりも累積損傷度が 1 に近くなる傾向にありほぼ修正マイナー則が適用できることがわかる。

Fig. 5 (d) は SCM 435 鋼の 300℃ における結果である。この材料では実験点は $D = 0.15 \sim 1$ の範囲にプロットされ、 σ_{eq} が低くなるほど D の値が小さくなる傾向を示している。しかし、現状では $\sum n_i$ が 10^8 回までの繰返し数に対しては本実験範囲で最も累積損傷度の小さな $D = 0.15$ 程度に見積っておけばほぼ安全側

(a) SUS316 stainless steel (600°C).

(b) SCM4 steel (300°C).

(c) SCM4 steel (500°C).

(d) SCM435 steel (300°C).

Fig. 5. Relation between the stress amplitude and the number of cycles to failure under varying stress amplitude tests.

の寿命予測ができるものと思われる。

つぎに Fig. 5(a)~(d)に示した実験結果とこれまでの常温における変動応力振幅試験から得られた実験結果の比較を行う。なお、常温での変動応力振幅試験においても本実験結果と同様に疲労損傷が必ずしも線形に累積されず、変動応力パターンによって修正マイナー則を用いて算出した D がかなり変化することが報告されている。しかし、疲労損傷の評価に際しては損傷が線形に累積されるとする方が実用上取扱いが簡単となるため、累積損傷度を $D=1$ と固定せず変動応力パターンによる関数であるとして実機の疲労寿命を予測する方法が考えられる。そこで、変動応力パターンに相当する次式に示す $\bar{\eta}$ と D の関係について本実験結果と常温での結果を整理したのが Fig. 6である。

Fig. 6. Relation between D and $\bar{\eta}$.

$$\bar{\eta} = D\sigma_w / D \quad (4)$$

図から明らかなように、高温の場合においても、 $\bar{\eta}$ が小さくなるほど、換言すれば疲労限以下の応力振幅による損傷の占める割合が大きくなるほど累積損傷度が大きくなる傾向が認められる。また、SUS 316 鋼と SCMV 4 鋼による実験点は図中一点鎖線で示す常温での炭素鋼の下限線近傍あるいはそれ以上の累積損傷度で破断することから、これらの材料については常温での炭素鋼の場合と同程度に変動応力パターンの影響を見積っておけば良いことになる。なおこの累積損傷度の下限を示す直線はほぼ次式で与えられる。

$$D \cdot \bar{\eta}^{1/4} = 0.3 \quad (5)$$

一方、図中“●”印で示す SCM 435 鋼については炭素鋼の下限線よりもさらに小さな損傷度で破断する実験点がみられることから、このような高温酸化の影響が著しい場合の変動応力パターンの影響は、現時点では図中二点鎖線で示す常温での¹⁰⁾高硬度鋼と同程度に見積っておく必要があるものと思われる。

4 あ と が き

SUS 316 鋼, SCM V 4 鋼および SCM 435 鋼を用いて高温下で一定応力振幅および疲労限以下の応力振幅を含む二段多重変動応力振幅試験を実施し以下のことが明らかとなった。

(1) 一定応力振幅試験における疲労限と静的引張強さの比 (σ_w/σ_B) は SUS 316 鋼, SCM V 4 鋼については常温での炭素鋼および低合金鋼に対するものとほぼ等しく、高温下においても静的引張強さから疲労限を推定することができる。ただ、高温酸化の影響を大きく受ける SCM 435 鋼では明確な疲労限が得られない場合があるため、このような方法を用いて推定することはできない。

(2) 二段多重変動応力振幅試験結果をもとにマイナー則による疲労損傷評価法について検討すると、SUS 316 鋼の一部を除くほとんどの変動応力パターンにおいてマイナー則が成立せず、高温下においても疲労限以下の応力振幅による疲労損傷の蓄積が認められた。また、この過小応力による影響は高温酸化の影響を大きく受ける SCM 435 鋼の 300℃においてとくに顕著にみられた。

(3) そこで、過小応力による損傷をも評価するため

修正マイナー則を用いて累積損傷度 (D) を検討した結果、SUS 316 鋼では $D=0.7\sim 5$, SCM V 4 鋼では $D=0.25\sim 1$, そして、SCM 435 鋼では $D=0.15\sim 1$ となることがわかった。また、変動応力パターンによる D の変化を本実験結果と常温で得られた結果について比較すると、SUS 316 鋼, SCM V 4 鋼については常温での炭素鋼の場合と、一方 SCM 435 鋼は常温での高硬度鋼の場合とほぼ同程度であることがわかった。
(昭和51年6月30日 日本機械学会関西支部第235回講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 中村 宏, 田中真一, “機械の疲れ寿命算出法”, p. 101 (1973) 養賢堂.
- 2) 堀川 武, 大阪市立大学学位論文, “実働応力を受ける鉄鋼材料の疲労寿命推定法の研究”, p. 33 (1977).
- 3) 疲労強度の設計資料 (I), p. 13, p. 58 (1982) 日本機械学会.
- 4) 岡崎章三, 大阪府立大学学位論文, “高硬度鋼の疲労寿命推定とタフトライド処理鋼の疲労挙動に関する研究”, p. 146 (1978).
- 5) 金属材料技術研究所疲れデータシート, No. 7 (1978); No. 15 (1979); No. 23 (1980).
- 6) 金沢健二, 吉田 進, 材料, **22**, 257 (1973).
- 7) 金沢健二, 山口弘二, 鈴木直之, 佐藤守夫, 金尾正雄, 第20回高温強度シンポジウム前刷集, p. 75 (1982).
- 8) 例えば, 1) の文献, p. 72.
- 9) 中村 宏, 堀川 武, 鎌田敬雄, 山地成一, 日本機械学会論文集, **39**, 1059 (1970).
- 10) 中村 宏, 岡崎章三, 岡田友信, 関西造船協会誌, No. 164, p. 115 (1977).