時効性鋼の $S-N$ 特性と $P-N$ 特性の関係*

(S-N 線図における疲労限度の存否に関連して)

榎 本 信 助** 山 本 晴 生*** 大 川 功****

Relation between Fatigue $S-N$ and $P-N$ Characteristics of Age-Hardenable Steels(Study on Existence of Definite Fatigue Limit in $S-N$ Diagram)

by

Nobusuke ENOMOTO

(Faculty of Technology, Seikei University, Musashino)

Hareo YAMAMOTO

(Faculty of Engineering, Meisei University, Hino)

and Isao OHKAWA

(Faculty of Technology, Seikei University, Musashino)

It was expected by the authors that the existence of the 'knee' on the $S-N$ curve would be related to the instability of the structure of metals and the sudden bend of the $P-N$ curve would correspond to this knee. With this expectation in mind, the effects of the age hardening ability of materials on the $S-N$ diagram and on the $P-N$ diagram were studied by fatigue testing.

Two kinds of rimmed steel were prepared for testing; specimens A , in which the age hardening ability was attained through heat treatment, and specimens B , in which the ageing process in specimens A was completed by leaving them in room temperature. The $S-N$ diagram and the $P-N$ diagram were made from rotating fatigue testing (the test speed of 1500 cycles per minute).

As a result, for the test on specimens B , the knee did not appear on the $S-N$ diagram and the $P-N$ diagram showed a logarithmic normal distribution. On the other hand for the specimens A , the knee appeared in the $S-N$ diagram near $N=10^6$ and also the bending point in the $P-N$ diagram near $N=5.8 \times 10^5$. It was concluded that these effects were due to the ageing ability of the material.

(Received Feb. 9, 1976)

1 緒 言

炭素鋼および合金鋼の疲労に関する $S-N$ 曲線は、多くの場合、明りょうな曲折点 (knee) を示す特徴をもつことが知られている。しかし、これらを熱処理の観点から検討してみると、一般に焼入処理を施した材料では、限界繰返し数 10^4 ないし 10^6 回付近に、曲折点がみられるが、焼なまし材ではこれが認められないようである。たとえば日本学術振興会第 129 委員会第 5 分科会で収集した、国内 $S-N$ データにつき、平滑試験片の熱処理と $S-N$ 線図との関係を対比してみると、少数の例外を除いて、炭素鋼、合金鋼を通じて一般に(1)焼なまし材および焼ならし材には、曲折点が

存在する証拠が認められない、(2)焼入材および焼入焼もどし材は $N=10^6$ ないし 5×10^6 の近傍に明らかな曲折点が存在している。なお、軸受鋼の場合、油焼入後 150℃, 1 hr の低温加熱材では、曲折点が全く存在していない。

他方、 $S-N$ 曲線の曲折点と、 $P-N$ 曲線（正規確率紙上の疲労破壊率と $\log N$ の関係線図）の曲折点³⁾が対応するという実験結果が得られている。Weibull は、繰返し応力水準によって、 $P-N$ 線図が直線および曲線を含む特性は、特定の材料母集団がもつ個性であると考え、いわゆる Weibull 分布を提唱している。

Table I²⁾⁻¹⁴⁾ は内外で行なわれた疲労寿命の統計実験における $S-N$ 曲線と $P-N$ 曲線との関係を、とくに試料の熱処理に注目して調べたものである。各データを検討してみると、概して(a)焼なましまたは供給のまま

* 原理受理 昭和51年2月9日

** 正 会 員 成蹊大学工学部 武蔵野市吉祥寺

*** 正 会 員 明星大学工学部 日野市程久保

**** 成蹊大学大学院 武蔵野市吉祥寺

*1 低温焼なましは含めない。

Table I. Types of frequency distribution of fatigue life of metals.

Materials	Heat treatment*	Repeated loads**	Number of stress levels	Number of specimens at each level	Total number of specimens	Frequency distribution type***	Number of cycles at knee of $S-N$ curve	Number of cycles at skew point of $P-N$ curve	References
0.14% C-steel	A	RB	3		65	N			3)
0.19% C-steel	A	TC	3		45	N			4)
SS 41 steel	A	RB	2	34	69	N			11)
German steel	—	RB	1	235		N			6)
Armco iron, steel, Cu, Al	A	T	10	20	1 000	N			7)
75 S-T Al-alloy	—	RB	6		165	N			8)
6061-T6 Al-alloy	—	RB	4	9 19	46	N			9)
0.45% C-steel	—	RB	6	20		S			10)
30 CN 11 steel	QT	RB	4	3	876	S	2×10^6	10^6	2)
35 CD 4 steel	QT	RB	11	59		S	10^6	10^6	
SS 41 steel	N	RB	2	35		S			
	—	RB	2	35		S		2×10^6	11)
0.47% C-steel	QT	RB	8	22		S	5×10^5	1.5×10^5	
SCM 4	QT	RB	6	7 9	43	S	10^6	10^6	13)
75 S-T 6 Al-alloy	Q	TT				S			14)
5083-0 Al-alloy	—	RB	4	19	76	S	5×10^5	10^6	9)
5% Sn-phos. bronze	T	PB	16	48	768	S	2×10^6	4×10^6	5)

* A=annealed, Q=quenched, T=tempered, N=normalized.

** RB=rotating bending, PB=plane bending, TC=tension-compression, TT=pulsating tension, T=torsion.

*** N=logarithmic normal distribution, S=logarithmic normal at high stress level and skewed at low stress level.

(成形後長時間経過)の材料では、 $S-N$ 曲線には明りょうな折れ曲がりが見われず、寿命分布形は繰返し応力水準のいかにかわらず、対数正規分布形をなすものが多い、(b)焼入、焼もどし材では、 $S-N$ 曲線に明りょうな折れ曲がりを生じ、 $P-N$ 線図は繰返し応力の大きい水準では対数正規分布をなし、疲労限度に近い水準では正の方向へ skew し、 $S-N$ 線図の限界繰返し数と、 $P-N$ 線図の skew 限界繰返し数とはほぼ一致し、大きな隔りはみられない。

以上の $S-N$ 線図と $P-N$ 線図の特徴および対応から、(1)、(a)に属する材料は組織が安定し、結晶中に固溶元素の残留が少ないか、または成形後、長時間を経過して安定しており、(2)、(b)に属する材料では、固溶元素が結晶中に残留し、格子変態とともに析出変化を起しやすく、不安定な状態にあることを想起すると、 $S-N$ 曲線の knee と、 $P-N$ 曲線の折れ曲がりとが対応する可能性が予想される。なお、熱処理を行わず、供給のままの材料は、両範ちゅうに属しているが、これらは加熱、加工などによる組織の不安定性の残存程度に依存することが考えられる。

著者らは $S-N$ 線図および $P-N$ 線図の折れ曲がり、材料の組織の不安定性と関係があるものと予想し、とくに時効性の有無が、これらの線図に及ぼす影響を調べるため、リムド鋼を用い、熱処理によって時効性を付与した試料と、これを常温時効によってほぼ終了させた試料の2種類を用意し、疲労試験を行なって $S-N$ 線図と $P-N$ 線図を作成し、両者の関係を検討し、疲労限度機構について考察した。

2 $S-N$ 曲線と対数正規形 $P-N$ 特性

曲線について

繰返し荷重の作用を受ける材料の、内部摩擦と塑性ひずみサイクルについての著者の1人¹⁵⁾の測定によると、一応力サイクル中に消費される内部摩擦エネルギー ΔW_f と、応力振幅 S との間には

$$\Delta W_f = \alpha S^m \quad (1)$$

の関係が見いだされた。式中、 α 、 m は定数である。このエネルギーのうち、一部は内部ひずみエネルギーの蓄積に、一部はへき開(ひずみエネルギーの解放)に費やされ、残りは熱として拡散されると考えられる。定応力繰返しにおいて、1サイクルごとのひずみエネルギーの解放増分と、内部ひずみエネルギーの蓄積の増分との差 ΔW_f が疲労破壊に寄与するものとし、これを次のように仮定した。

$$\Delta W_f = C(S - S_0)^n \quad (2)$$

ここに C 、 n は定数である。 S_0 は疲労破壊を生じない最大限界応力である。^{*}定応力繰返し試験において、へき開に寄与するエネルギー ΔW_f が一定値 K に達して、疲労破壊が完了すると考えると、

$$C(S - S_0)^n N_f = K \quad (3)$$

ここに N_f は破壊までの繰返し数である。

上式が時効その他の材料の不安定性を考慮しない場合の $S-N$ 関係を与える。(3)式において $K/C = N_0 S_0^n$ とおき、対数をとると

$$n \log \left(\frac{S}{S_0} - 1 \right) = -\log N_f + \log N_0 \quad (4)$$

n をパラメータとして、 $\log(S/S_0)$ と $\log N_f$ との関

*2 この応力以下の応力サイクルでは、転位の揺動によって熱消費が行なわれ、またき裂は停留する、いわゆる振弾性範囲である。

Fig. 1. S-N diagram.

Fig. 2. $(S-S_0)$ -N diagram.

係を描くと Fig. 1 が得られる。(3)式を変形すると

$$S-S_0 = bN_f^{-1/n}, \quad b = (K/C)^{1/n} \quad (5)$$

となり, 多く利用される Stromeier の実験式と一致する. また(4)式において, 縦軸を $\log(S/S_0-1)$ にとって描くと Fig. 2 となる. これは Weibull が S-N データの解析に利用しており, たとえば Ravilly の焼なまし銅の疲労データを $\log(S-S_0)$ 対 $\log N$ 線図にプロットし, その寿命中央値を連ねると, きわめてよい直線となることを指摘している.¹⁶⁾

つぎに, 疲労破壊の過程を考えると, き裂発生要因と, き裂成長の要因が, 非常に多くの因子によることは一般的に認められており, したがって, その確率的過程は, 幾つかの因子が競合する事象と考えるのが妥当であろう. 一つの主要因子を拾いだすことは, 現在成功していないし, 事実困難であろう. ただ, ふつうの正規形においては, それらの因子が, 算術級数的に作用するのに対し, 疲労の場合は幾何級数的に働くため, これが対数正規形寿命分布をもたらす原因と考えられる. すなわち, ある疲労状態を X_0 とすると, それが繰返し数の経過 $N_0, N_1, \dots$ につれて N_n までに, 不作為に独立した比例的变化 $v_1, v_2, \dots, v_n$ を受けて成長するとしよう.

$$N_1 \text{ において } X_1 = X_0(1+v_1)$$

$$N_2 \text{ において } X_2 = X_1(1+v_2) = X_0(1+v_1)(1+v_2)$$

$$\dots\dots\dots$$

$$N_n \text{ において } X_n = X_0(1+v_1)(1+v_2)\dots\dots(1+v_n)$$

とする. その対数をとると

$$\log X_n = \log X_0 + \log(1+v_1) + \dots\dots + \log(1+v_n) \quad (6)$$

となる. Gibrat¹⁷⁾ は, このような場合の度数分布は, $v_i < 1$ の場合は対数正規分布形になることを証明している. さらに一つ一つの変数(因子)が, 完全な確率変数をなすものでなくても, それらの確率事象がほとんど幾何級数的過程をとるとすれば, 中心極限定理によって, それらの組み合わせられた総合分布は対数正規形となる.

以上は同一母集団についていえることであり, 各応力水準における繰返し寿命が, いずれも対数正規分布をなす事例は多い.

3 実 験

試料は CH10R (リムド鋼) で, 直径 18 mm の丸棒素材から疲労試験片を切削して仕上げ, これを熱処理した. 熱処理は, まず 920℃, 1 hr 真空加熱し, これを空冷して粒度調整をした. 空冷は酸化を防ぐため, 真空状態のまま磁性管を炉筒から引きだして冷却した. つぎに 700℃, 1 hr 真空加熱, 水冷したものを A 材と名づけた. A 材は時効性を保持するため, 熱処理後, 約 -20℃ の冷所に保存し, 疲労試験に際しとりだして使用した. また, A 材を常温中に 120 hr 以上放置して, 時効をほぼ完了させたものを B 材とした. A 材の

Fig. 3. Variation of hardness after heat treatment.

Table II. Chemical composition and mechanical properties of materials.

Chemical composition (%)	C	Si	Mn	P	S
	0.11	0.01	0.39	0.016	0.018
Specimens				A	B
Mechanical properties	Yield point (kg/mm ²)			25.6	32.5
	Tensile strength (kg/mm ²)			46.0	50.0
	Elongation (%)			32	28
	Reduction of area (%)			72	69
	Vickers hardness number			212	305
Mean diameter of crystals (μm)				~16	~16

常時時効によるかたさ変化の一例を Fig. 3 に示す。供試材の化学成分、機械的性質および結晶の大きさを Table II に示す。

疲労試験には小野式回転曲げ試験機（容量 10 kg・m, 回転速度毎分 1550）を用い、試験片の標準寸法は、平行部直径 10 mm, 平行部長さ 38 mm, つかみ部フィレット半径 25 mm である。真空加熱処理後の試料表面の酸化は軽微であったが、疲労試験開始時に仕上り面を 04 番エメリー布で軽く研磨した。

寿命分布試験は、曲げ応力水準 32.0, 29.0 および 26.5 kg/mm² の 3 水準（A 材ではさらに 27.8 kg/mm² を加えて 4 水準）で 10 本以上の試料を試験した。Figs. 4 および 5 は、それぞれ A, B 両材の回転曲げ疲労試験の結果の S-N 線図である。図中の各応力水準にひかれた短線分は、寿命分布の非破壊率 $P=50\%$

Fig. 4. S-N diagram for specimen A.

Fig. 5. S-N diagram for specimen B

の値を示す。Figs. 6, 7 は同じく A, B 両材の P-N 線図である。横軸は破断繰返し数の対数値をとり、縦軸には非破壊率 P および破壊率 $P' (=100-P)\%$ を示す。 P' の計算には植位法を用い、 n 個の試験において m 番目の測定値の期待破壊率 $P' = m/(n+1)$ を用いた。

4 考 察

4・1 B 材の寿命試験結果について

B 材は、かたさ測定結果から推して、時効をほぼ終

Fig. 6. P-N diagram for specimen A.

Fig. 7. P-N diagram for specimen B.

了した材料と考えられ、その S-N 線図 (Fig. 5) では、曲線には明らかな knee が現われていない。この曲線について (3) 式をあてはめると

$$(\sigma - 17.65)^{5.55} N_f = 6.36 \times 10^{11} \quad (7)$$

が得られる。これを図中に破線で示した。この曲線の水平漸近線は $\sigma_0 = 17.65 \text{ kg/mm}^2$ であるから、この値が理論的疲労限と考えることができる。しかし、実用的時間強度 $\sigma(10^7)$ あるいは $\sigma(2 \times 10^7)$ の値は σ_0 よりかなり大きい。P-N 線図 (Fig. 7) に示す各応力水準の寿命分布は、ほぼ対数正規分布をしているとみてよい。

4・2 A 材の寿命試験結果について

時効をもつ A 材の S-N 線図 (Fig. 4) では、繰返し数 10^6 回付近に knee が現われ、明らかに耐久限の存在を示している。これに対して、P-N 線図 (Fig. 6) においては、応力水準 32 kg/mm² の分布図を除いて、 $\log N = 5.8$ の近傍に折れ曲がり現象がみられ、しかもこれが曲線分布というより、折れ曲がりともみた方が近いように思われる。このように折れ曲がり点が、

Table III. Bending point of P-N curve for B specimens.

Stress level (kg/mm ²)	log N at bending point	Test time elapsed (hr)
29	5.7	6.13
27.8	5.8	6.24
26.5	5.95	6.40

*3 この値は植位点および計算の誤差を含み、おおよそ値である。

$S-N$, $P-N$ 両曲線ではほぼ一致する実験結果は, 前述のように他の研究者の実験結果にもみられるところである。

$P-N$ 線図 (Fig. 6) における曲折点を, 各応力水準について拾いだしてみると Table III のようになり, 繰返し応力が大となるに従って, 曲折点は早期に現われている。これは繰返し応力により供給されるひずみエネルギーが大きいくほど, 時効が速く進むものと説明されよう。なお, 常温における A 材のかたさ (Fig. 3) は 10 hr から 100 hr の間に顕著に上昇しており, これを Table III と対比すると, 繰返し応力により時効が促進されているものと判断される。

4・3 A, B 両材料の対比

A, B 両材料を比較すると, 同一ロットの材料であり, 熱処理も同じであり, したがって顕微鏡的組織にも外見上の相違はない。著者らが把握している相違点は, 熱処理後の時効性の有無 (したがって, これに伴う機械的性質の相違) のみである。したがって, 両材料のそれぞれ $S-N$ 線図および $P-N$ 線図における相違は, この時効性の有無が関与していると考えられる。すなわち, A 材においては, 繰返し数 (およびその間の時間) の経過に従って, 元来有している寿命の対数正規性が, 後天的に変化するものが現われ, 正規母集団から, 確率的に右方 (すなわち寿命延伸の方向) へ移行したものを生じ, これに対応する $S-N$ 曲線も, 元来, 有限寿命範囲の曲線がなだらかな曲線 (たとえば Fig. 4 中に点線で示した曲線) であったものが, 確率的に 10^6 回程度の繰返し数に耐えた試料は, 急速に強度を増し, knee を現わすものと考えられる。

5 結 言

時効性材料において, その $S-N$ 線図における曲折点 (knee) および対数正規確率紙上の $P-N$ 線図における折れ曲がり, 材料の組織的不安定性に基づくものとの仮定のもとに, 時効性材料について両線図の対比を行なった。CH10R リムド鋼を用い, 熱処理によって時効性を付与した試料 (A 材) と, これを常温放置して時効をほぼ終了した試料 (B 材) を使用し, 回転曲げ疲労試験機により, 寿命の統計試験を行なった。

その結果, B 材では $S-N$ 線図に明りょうな knee が現われず, $P-N$ 線図も対数正規分布形となった。これに対し, A 材では $S-N$ 曲線において, $N=10^6$ 付近に明りょうな knee を生じ, $P-N$ 線図にもほぼ同じ N 値のところに折れ曲がりを生じた。これらの曲折の原因は時効性の進行によるものと判断された。

(昭和50年11月20日 シンポジウム「疲労における最近の諸問題」にて講演)

参 考 文 献

- 1) 学振 129 委, 金属材料疲れ強さ資料, 第 II 篇 1, 高サイクル疲れ強さ資料 (1969).
- 2) Esquerre, R., *Revue de Metallurgie*, **LVI**, 260 (1959).
- 3) Yokobori, T., *J. Phys. Soc. Japan*, **6**, 81 (1951).
- 4) Yokobori, T., *ibid.*, **8**, 265 (1953).
- 5) Torry, M. N., and G. R. Gohn, *Proc. ASTM*, **56**, 1091 (1956).
- 6) Müller Stock, H., *Mitt. Kohle u. Eisenforschg.*, **2**, 583 (1938).
- 7) Ravilly, E., *Publ. Sci. du Ministère de l'Air*, No. 129, 52 (1938).
- 8) Sinclair, G. M., and J. T. Dolan, *Trans. ASME*, **75**, 867 (1953).
- 9) 松村克己, 伊藤正夫, 田中英司, 竹内勝治, 住友軽金属技報, **15**, 19 (1974).
- 10) Kogaiev, V. P., *Vestn. mäs (SSSR)*, **39**, 35 (1959).
- 11) 河本 実, 中川隆夫, 伊吹幸彦, 孝橋 徹, 材試, **9**, 736 (1960).
- 12) 西島 敏, 増田千利, 材料, **22**, 1097 (1973).
- 13) 田中道七, 藤井 勉, 材料, **22**, 1090 (1973).
- 14) Freudenthal, A. M., *Proc. ASTM*, **53**, 896 (1953).
- 15) Enomoto, N., *JSME (1967) Semi-International Symposium*, 47 (Sept. 1967) Tokyo
- 16) Weibull, W., *Fatigue Testing and Analysis of Results*, Pergamon Pr. 175 (1961).
- 17) Gibrat, R., *Les inégalités économiques*, Paris (1931).
- 18) 日本材料学会, 金属材料疲れ試験便覧, 60 (1968) 養賢堂