金属材料疲労強度データベースによる 極低炭素鋼の回転曲げ確率疲労特性の解析[†]

岡田 憲 司* 岡 憲 司** 菅 田 淳***
酒 井 達 雄**** 西 川 出***** 境 田 彰 芳*****

Statistical Fatigue Properties of Ultra Low Carbon Steels under Rotating Bending Based on JSMS Database on Fatigue Strength of Metallic Material

by

Kenji OKADA^{*}, Kenji OKA^{**}, Atsushi SUGETA^{***}, Tatsuo SAKAI^{****},
Izuru NISHIKAWA^{*****} and Akiyoshi SAKAIDA^{*****}

In the research of fatigue of metals, fatigue properties of ultra low carbon steels are important as a fundamental reference data for structural carbon steels. Thus, fatigue test data for low carbon steel of S10C and pure iron in rotating bending were extracted from the “Database on Fatigue Strength of Metallic Materials” published by JSMS. Applying the JSMS standard (JSMS-SD-6-04) “Standard Evaluation Method of Fatigue Reliability for Metallic Materials –Standard Regression Method of *S-N* Curve–”, *S-N* curves were analyzed on the basis of the “semi-logarithmic bilinear model with fatigue limit” for the respective series of fatigue data. It was found that *S-N* property of the individual material was well normalized by tensile strength of σ_B . Based on this aspect, a number of fatigue data extracted were pooled altogether and *P-S-N* property was also analyzed by the above standard (JSMS-SD-6-04). Analytical results thus obtained are usefully applied as the fundamental data for the reliability design of the mechanical structures in the various areas.

Key words : Fatigue, Database, Statistical analysis, S10C, Pure iron, *S-N* curve, *P-S-N* curves, Regression model

1 緒 言

各種機械構造物の安全性や信頼性に対する社会的要請は一段と高まっており、実機の安全設計や信頼性解析のための基礎データとして広範な各種材料特性データの整備が重要課題となっている。この課題を克服するために、各種材料強度データを組織的に集積・整理して電子媒体上のデータベースとして編集し、これを有効利用しようとする企画が国内外で盛んに推進され、多くのファクト・データベースが構築されてきた。^{1)~5)}

このような経緯の中で、日本材料学会では広範な金属材料を対象にして国内の疲労強度データを組織的に収集・整理して1982年に金属材料疲労強度データベースを出版以来、データの追加収集やデバッグを重ねてきた。本データベースは金属材料疲労強度データ集として本の形態でも出版されており、1996年にElsevierとの共同企画として英文版のデータブックが海外出版されている。⁴⁾

一方、疲労試験で得られた実験結果をもとに当該材料

の*S-N*曲線を回帰するための標準的な方法を確立する趣旨から、日本材料学会において金属材料疲労信頼性評価標準【*S-N*曲線回帰法】と題する学会標準が2002年に制定され、2004年にはその改訂版⁶⁾が発行された。本学会標準には、その方法で実際に*S-N*曲線を回帰するためのソフトウェアを収録したCDも添付されており、現在、国内で広く利用されている。⁷⁾

本研究は、上記学会標準を用いて、上述の疲労強度データベースをもとにS10C鋼と純鉄に関する疲労試験データを検索し、機械構造用炭素鋼の基本的な疲労特性の一つとして、極低炭素鋼の確率疲労特性を定量的に解析したものである。

2 検索結果と利用した*S-N*曲線回帰モデル

疲労強度データベースに収録されているS10C鋼の試験シリーズ数(組数)は239である。このうち後述の検索対象とした化学成分の範囲をTable 1に示す。S10C鋼の機械的性質の範囲については、降伏応力：204～

† 原稿受理 平成19年4月6日 Received Apr. 6, 2007 ©2007 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 高松工業高等専門学校機械工学科 〒761-8058 高松市勅使町, Dept. of Mech. Engng., Takamatsu National College of Tech., Chokushi-cho, Takamatsu, 761-8058

** 高松工業高等専門学校機械工学科 〒761-8058 高松市勅使町, Dept. of Mech. Engng., Takamatsu National College of Tech., Chokushi-cho, Takamatsu, 761-8058

*** 正 会 員 広島大学大学院工学研究科 〒739-8527 東広島市鏡山, Graduate School of Engng., Hiroshima Univ., Kagamiyama, Higashi-hiroshima, 739-8527

**** 正 会 員 立命館大学理工学部機械工学科 〒525-8577 草津市野路東, Faculty of Sci. and Engng., Ritsumeikan Univ., Nojihigashi, Kusatsu, 525-8577

***** 正 会 員 大阪工業大学工学部 〒535-8585 大阪市旭区大宮, Faculty of Eng., Osaka Inst. of Tech., Asahi-ku, Osaka, 535-8585

***** 正 会 員 明石工業高等専門学校機械工学科 〒674-8501 明石市魚住町, Dept. of Mech. Eng., Akashi National College of Tech., Uozumi-cho, Akashi, 674-8501

343MPa, 引張強さ: 242 ~ 490MPa, 伸び: 29 ~ 44% であり, 絞り: 52.4 ~ 79.5% である.

他方, 純鉄の試験シリーズ数は 24 であり, このうち後述の検索対象とした化学成分の範囲を Table 2 に示す. これら純鉄の機械的性質の範囲は, 降伏応力: 147 ~ 221MPa, 引張強さ: 244 ~ 297MPa, 伸び: 39.6 ~ 48.5% であり, 絞り: 82.2 ~ 91.8% である.

上述のとおり, 降伏応力と引張強さの平均値については S10C 鋼よりも純鉄の方が小さく, 伸びと絞りについては逆に大きくなっている. しかし, いずれの特性値についても相互に範囲が重なっており, 材種により一義的に与えられるものでなく, 化学成分のばらつきや試験条件のばらつき等と関連して, かなりの変動幅をもつことに注意する必要がある.

今回の S10C と純鉄の検索対象は, 常温・大気中での丸棒および砂時計型試験片 (応力集中係数 $\alpha < 1.1$) の回転曲げ疲労試験による実験結果の中から, 後述の解析法と関連して引張強さ σ_B が明記されているものに限定した. なお, 引張強さ σ_B が明記されているもので, 熱処理が不明なものは検索に含めることとした. S10C 鋼は全 239 シリーズ中の Table 3 に示す 46 シリーズ (試験片本数にして 1161 本) がこれに該当する. 表は 46 シリーズのコード番号, 引張強さ, データのタイプ, データ数, 回帰 S-N 曲線の各パラメータを一覧表にまとめたものである. また, 同様の条件で検索した純鉄 4 シリーズに対する当該データを Table 4 に示す. JSMS の欄 (後で述べる) の右には試験片の応力集中係数, 試験片のタイプ, 荷重様式も示してある.

さて, 鉄鋼材料のような疲労限度を有する材料の S-N 曲線としては, 日本材料学会標準【S-N 曲線回帰法 (JSMS-SD-6-04)】⁶⁾に記載されている疲労限度型 S-N モデルが定着しており, 本報では片対数 (応力軸が等間隔目盛り) 折れ線モデルを選んだ. SN データの一例 (データシリーズ: 143-050) を Fig. 1 にプロットするとともに, S-N 曲線の回帰結果を示した. 図中の回帰式は次式で与えられる.^{6), 7)}

$$\sigma = -A \log_{10} N + B \quad (N < N_w), \quad \sigma = E \quad (N \geq N_w) \quad (1)$$

上式中の各パラメータは, A: 傾斜部勾配, B: 切片, E: 疲労限度 σ_w , N_w : 限界繰返し数である. 46 シリーズ中, 回帰の条件を満たして, 【S-N 曲線回帰法 (JSMS-SD-6-04)】に添付されたソフトウェアで自動的に S-N 回帰が行えたのは JSMS の欄に○印を付した 36 シリーズである. これ以外で□印 (189-020 の 1 シリーズ) は, データ集より $N = 10^7$ の疲労限度を読み取り, $\sigma_w = 235\text{MPa}$ とし

Table 1 Chemical composition of S10C. (mass %)

C	Si	Mn	P	S
0.09~0.12	0.16~0.29	0.38~0.45	0.025~ 0.06	0.01~ 0.031

Table 2 Chemical composition of pure iron. (mass %)

C	Si	Mn	P	S
0.01~0.02	0.01~0.18	0.13~0.28	0.009~ 0.01	0.007~ 0.01

Fig. 1 S-N diagram for code-series 143-050. (SN data)

て疲労限度を入力したものである. △印 (3 シリーズ) は「破断データ数が 4 点以上で $\sigma_{f,max} \geq 1.2\sigma_{f,min}$ 」の条件を満たさないが回帰が可能のため, 参考までに S-N 回帰を行った. △印の中には ST データ (ステアケース法による疲労試験結果) も含まれている. ×印 (6 シリーズ) は基本的な基礎条件を満たさないため回帰ができなかったものである. Fig. 1 には JSMS 標準の基礎要件を満たして S-N 曲線を描けた 37 シリーズ中, データ数 (試験片数) が 20 点以上ある 10 シリーズ中の 1 つであり, 疲労限度は $\sigma_w = 201\text{MPa}$ である.

Fig. 2 は PN データと SN データが混在した 3 シリーズの中の一例 (データシリーズ 256-010) を示すもので, 疲労限度は $\sigma_w = 211\text{MPa}$ である. ここで, SN データとは材料の S-N 特性を求めるための通常の疲労試験結果を示し, PN データとは疲労寿命分布を調べるために 1 応力レベルに多数の試験片を割り当てた統計的な疲労試験結果を示す.

次に, Fig. 3 は Fig. 1, Fig. 2 の実験点を含み, Table 3 に示した S10C 鋼に対する 46 シリーズの全実験点 (1161 点) と, Table 4 に示した純鉄 4 シリーズの全実験点 (67 点) を加えて一枚の片対数グラフにプロットしたものである. 図中に○印 (破壊データ), ●印 (非破壊データ) で示した S10C 鋼の疲労試験結果は今回のように検索条件をある程度限定すると, σ_a - N 図としてそのままプロットしても, 46 シリーズの全実験点がある範囲の帯状領域内に打点されることがわかる. しかし, Table 3 の当該欄に記載のとおり, 各シリーズの疲労限度は 133 ~

Fig. 2 S-N diagram for code-series 256-010. (PN + SN data)

Table 3 List of code-series of S10C in JSMS Database.

Code-series	Tensile strength (MPa)	Type of data	Number of data	Slope A	Intercept B	Fatigue limit σ_w	Number of cycles to failure limit N_w	JSMS	Stress concn. factor	Type of specimen	Type of loading	
110-017	409	SN	7	31.811	449.61	232.5	6.69E+06	○	1.00	Round bar, Smooth specimen	Rotating uniform bending	
110-018	409	SN	6	39.408	491.89	232.5	3.82E+06	○				
110-019	409	SN	6	32.815	450.12	237.5	3.02E+06	△				
110-020	409	SN	6	29.195	428.23	237.5	3.41E+06	△				
110-055	325	SN	37	37.273	405.72	164.5	2.96E+06	○				
110-057	422	SN	35	73.745	713.96	221	4.84E+06	○				
110-059	371	SN	21	54.763	521.91	183.5	1.51E+06	○				
143-040	397	SN	9	62.177	586.47	225.5	6.39E+05	○				
212-100	397	SN	7	45.585	489.44	181.5	5.69E+06	○				
143-661	423	SN	15	56.891	607.06	240	2.83E+06	○				
143-671	327	SN	10	38.858	430.37	154.5	1.26E+07	○				
197-032	348	SN	14	19.549	299.98	157.5	1.94E+07	○				
233-000	325	SN	14	41.957	431.19	147	5.93E+06	○				
233-011	242	SN	10	57.974	505.92	133.5	2.65E+06	○				
233-012	242	SN	1					×				
143-681	380	SN	13	60.463	569.88	191	1.85E+06	○				
197-026	391	SN	10	41.825	474.47	192.5	5.52E+06	○				
233-002	392	SN	16	46.102	502.91	191	5.83E+06	○				
127-000	451	SN	4	60.241	614.76	252.5	1.03E+06	○				
		PN	52									
127-003	490	SN	6	45.112	555.99	236.5	1.21E+07	○				
		PN	30									
143-601	335	SN	15	63.947	555.09	144.5	2.64E+06	○				
143-611	422	SN	10	60.315	608.76	230.5	1.87E+06	○				
197-034	389	SN	16	21.148	382.63	218.5	5.14E+06	○				
233-003	406	SN	17	67.211	625.83	218.5	1.15E+06	○				
201-090	373	SN	17	47.23	567.49	243	7.42E+06	○				
143-000	442	SN	11	98.786	825.03	270	4.15E+05	○	1.02	Round bar, Hourglass specimen	Rotating uniform bending	
143-050	397	SN	31	48.896	531.53	201	5.75E+06	○				
143-080	456	SN	24	77.288	735.65	270	1.06E+06	○				
143-111	377	SN	10	68.113	629.84	211	1.41E+06	○				
143-121	446	SN	11	82.038	807.26	299	1.57E+06	○				
143-131	444	SN	13	86.765	846.04	314	1.36E+06	○				
143-211	362	SN	10	62.471	596.09	211	1.46E+06	○				
143-221	423	SN	12	93.022	820.66	286.5	5.52E+05	○				
200-012	353	SN	14	76.884	652.85	201	7.53E+05	○				
311-000	386	ST	5					×				
311-007	373	ST	6	18.391	318.05	193.5	5.92E+06	△				
189-021	460	PN	18					×	1.06			
189-022	322	PN	19					×				
189-020	405	PN	100	77.018	724.28	235	2.25E+06	□	1.07		Ratating uniform cantilever	
256-010	406	SN	10	30.228	424.14	211	1.12E+07	○				
		PN	249									
116-160	372	PN	110					×				
116-170	387	PN	35					×				
259-013	406	SN	29	56.885	568.59	206	2.37E+06	○	1.09			
201-135	368	SN	10	61.234	613.55	241	1.21E+06	○				
201-140	368	SN	18	72.075	639.14	197.5	1.34E+06	○				
201-145	368	SN	12	51.043	523.59	191.5	3.21E+06	○				
Total number of specimen			1161	JSMS standard		○: 36	□: 1	△: 3	×	6		
				Total number of code-series					46			

Table 4 List of code-series of pure iron in JSMS Database.

Code-series	Tensile strength (MPa)	Type of data	Number of data	Slope A	Intercept B	Fatigue limit σ_w	Number of cycles to failure limit N_w	JSMS	Stress concn. factor	Type of specimen	Type of loading
179-000	277	SN	18	8.4748	226.74	166	1.47E+07	△	1.00	Round bar, Smooth specimen	Rotating uniform bending
179-002	244	SN	24	14.770	231.37	128	9.96E+06	○			
238-010	297	SN	9	45.507	466.27	159	5.65E+06	○			
238-022	297	SN	16	45.268	444.13	147	3.66E+06	○	1.01	Round bar, Hourglass specimen	
Total number of specimen			67	JSMS standard			○: 3	△: 1			
				Total number of code-series			4

Fig. 3 σ_a - N diagram plotted all data on S10C and PURE IRON.

299MPaの範囲に大きくばらついている。一方、△印（破壊データ）、▲印（非破壊データ）で示した純鉄の疲労試験結果は、S10C鋼の疲労試験結果の最下段付近に集中的に現れており、Table 4からわかるように疲労限度について128～166MPaの狭い範囲に含まれている。なお、【S-N曲線回帰法 (JSMS-SD-6-04)】に添付されたソフトウェアでは、別の材種の疲労試験データを併合してプロットする機能はないので、Fig. 3はExcelの機能を利用して作画したため、Fig. 1, 2とは作画形式が幾分異なる点は、読者のご了解を頂きたい。

3 各パラメータの分布と相関

Table 3には、前述のとおり、試験シリーズごとの引張強さ σ_B の他、片対数折れ線モデルを適用してS-N回帰によって得られた A 、 B 、 σ_w 、 N_w の値を示している。表中の46シリーズのS10C鋼の引張強さ σ_B の分布と、○印と□印の37シリーズの σ_w の分布を正規確率紙に描いたのがFig. 4であり、両者とも正規分布にほぼ適合しその分散も同程度である。日本材料学会標準【S-N曲線回帰法 (JSMS-SD-6-04)】⁶⁾では、回帰S-N曲線に対して疲労試験データの縦軸方向の分布が正規分布に従うことを仮定しているが、Fig. 4において疲労限度 σ_w の分布が正規分布によく適合する事実は、この仮定の妥当性を示すものである。

次に、Table 3に記載したS10C鋼の○印と□印の37シリーズとTable 4に示した純鉄の○印の3シリーズを加え、各シリーズごとに解析された各パラメータ間の相関係数 r をTable 5に示す。なお、()内の数値はS10C

Fig. 4 Normal distributions of σ_B and σ_w on S10C.

Table 5 Coefficient of correlation r on S10C and pure iron.

Coefficient of correlation r				
	A	B	σ_w	N_w
σ_B	0.4328 (0.3125)	0.6173 (0.5136)	0.8409 (0.8065)	-0.1964 (-0.1107)
A		0.9614 (0.9581)	0.6097 (0.5562)	-0.7226 (-0.7084)
B			0.7871 (0.7519)	-0.6601 (-0.6468)
σ_w				-0.3947 (-0.3627)

鋼の37シリーズのみについて求めた相関係数を示す。表中のパラメータの組合せのうち、引張強さ σ_B と勾配 A の関係を図示したのがFig. 5であるが、両者の間に明確な相関は認められない。また、 σ_B と切片 B の関係を同様に図示したのがFig. 6である。 B は1サイクルにおける破断応力となるので σ_B との関係が予想されたが、両者間の相関係数は $r = 0.617$ であり、それほど強い相関はないようである。一方、Fig. 7およびFig. 8に図示したように、 σ_B と疲労限度 σ_w の間ならびに傾斜部勾配 A と切片 B の間には強い相関があり、それぞれ相関係数は $r = 0.841$ 、 $r = 0.961$ となっている。Fig. 9は勾配 A と限界繰返し数 N_w の関係を示したもので、 $r = -0.723$ 程度の負の相関がみられる。このように A と B には強い正の相関があり、 A と N_w には逆に負の相関が認められる。Fig. 10は B と σ_w の関係を示したもので、 $r = 0.787$ 程度の弱い正の相関が認められる。以上の一連の相関関係を概観すると、引張強さ σ_B と疲労限度 σ_w の間ならびに勾配 A と切片 B の間には極めて強い正の相関があり、限界繰返し数 N_w と勾配 A の間には明確な負の相関があることが一つの特徴である。

Fig. 5 Relationship between A and σ_B

Fig. 6 Relationship between B and σ_B .

Fig. 7 Relationship between σ_w and σ_B . Fig. 8 Relationship between B and A . Fig. 9 Relationship between N_w and A . Fig. 10 Relationship between B and σ_w .

4 時間強度分布と P - S - N 曲線

引張強さ σ_B と疲労限度 σ_w の間に強い正の相関があることを前節で述べたが、この特徴を基礎として、S10C 鋼の各シリーズごとの疲労強度データに対し、引張強さ σ_B で標準化した負荷応力 σ_a/σ_B を縦軸にとって再プロットした S - N 線図が Fig. 11 である。この図を先に示した

Fig. 11 σ_a/σ_B - N diagram. (Bilinear regression model)

Fig. 3 と比較すると、大量の疲労試験結果が比較的狭い帯状領域に収まっていることがわかる。すなわち、Fig. 3 では、強度レベルの高いシリーズの実験点はばらつき範囲の上方に現れ、強度レベルの低いシリーズでは逆にばらつき範囲の下方に現れるが、引張強さ σ_B で標準化することにより、これらの実験点が共通の散布帯に収まることがわかる。なお、図中の曲線群については後で説明を加える。

ここで、純鉄に関する疲労強度データを同様に引張強さ σ_B で標準化して、S10C 鋼のデータとともに再度プロットしたのが Fig. 12 である。Fig. 3 では強度レベルの低い純鉄のデータが、いずれもばらつき範囲の下端部に打点されていたが、Fig. 12 ではこれらのデータがすべて散布帯の中央部に打点されており、引張強さ σ_B による負荷応力の標準化が材種を越えて有効であることがわかる。この手法の有効性は従来から報告されているが、機械構造用炭素鋼に限定しても全ての鋼種のデータが共通の散布帯に収まる訳ではなく、炭素含有量や熱処理条件により、いくつかの基本的なグループに分類されるとの報告もある。¹⁾しかし、炭素含有量が 0.1% 程度以下の低炭素鋼については、負荷応力を引張強さ σ_B で標準化することにより、純鉄も含めて極低炭素鋼として疲労特性をうまく標準化できることがわかった。

次に、Fig. 13 はいずれの寿命域においても時間強度分布が正規分布に従い、かつその分散が一定であることを示す模式図である。日本材料学会の S - N 曲線回帰法は

Fig. 12 σ_a/σ_B - N diagram. (plotted all data on S10C and PURE IRON)

Fig. 13 Scheme of fatigue strength distribution.

この原理を利用している。^{6), 7)}この基本的考え方の妥当性を確認するため, Fig. 11 の $S-N$ 線図において, 4 種類の異なる寿命値 (2×10^4 , 10^5 , 10^6 , 6×10^6) の廻りに寿命区分を設定し, 各区分に含まれる実験データを強度分布データとみなしてその分布特性を検討した. こうして得られた時間強度の分布を正規確率紙上に図示したのが Fig. 14 である. 4 つの寿命区分の幅は図中の左上部に示したとおりであり, () 内の数値はそこに含まれるデータ数である. いずれの寿命区分においても時間強度の分布はほぼ正規分布に従い, その分散はほぼ一定となっていることが確認される. このことは, ばらつきを伴う疲労試験データが得られたとき, 各データは回帰曲線の廻りにばらつくが, このばらつきを回帰 $S-N$ 曲線の縦軸方向の平行移動で評価でき, これが正規分布でよく表示できることを意味している. この事実を基礎として, 日本材料学会標準【 $S-N$ 曲線回帰法】では, 所定の $S-N$ 回帰モデルに対してすべて疲労試験データの縦軸方向の残差二乗和を最小とするようなパラメータを解析する方式になっている.^{6), 7)}

また, 上記【 $S-N$ 曲線回帰法】に添付された解析ソフトウェアは, 時間強度 (疲労強度) が正規分布に従うことを前提にして当該材料の $P-S-N$ 特性を解析し, $P-S-N$ 曲線を図示する機能を備えている. この機能を利用して Fig. 11 の標準化 $S-N$ データに対し, 実際に疲労限度型片対数折れ線モデルにより $P = 0.1, 1, 10, 50, 90, 99, 99.9\%$ なる 7 レベルの破壊確率を指定した $P-S-N$ 曲線を解析し, Fig. 11 中に各曲線を描いた. 各曲線は下

Fig. 14 Normal distributions of σ_a/σ_B .

から順に破壊確率 0.1%, 1%, 10%, 50%, 90%, 99%, 99.9% の $P-S-N$ 曲線を与える. 図において, こうして得られた $P-S-N$ 曲線は実験結果の分布特性をうまく表しており, $P=0.1\%$ (左端) と $P=99.9\%$ (右端) の折れ線で囲まれる領域内にはほぼ全ての実験点が含まれている. なお, この図の $P=50\%$ $S-N$ 曲線の疲労限度は 0.554 であり, この値は, Fig. 4 の $P=50\%$ における σ_B と σ_w の値から計算される $\sigma_w/\sigma_B = 216/390 = 0.554$ とよく整合している.

5 疲労寿命分布と $P-S-N$ 曲線

前節では, 時間強度の分布が正規分布に従い, その分散が寿命域によらず一定との仮定で $P-S-N$ 特性を解析した. これに対して, Fig. 15 に示すように疲労寿命分布の応力レベル依存性をもとに材料の確率疲労特性を解析する方法も提案されている.^{1), 8)~10)}この手法の基本的考え方は, いくつかの応力レベルでの疲労寿命分布をもとに, 所定破壊確率のパーセント点を読み取り, これを $S-N$ 座標上にプロットして同一破壊確率のパーセント点を線で結ぶことである.

Fig. 16 は, S10C 鋼に対する Fig. 11 の全データについて, 負荷応力レベル σ_a/σ_B を 5 種類の応力レベルに区分し, 各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ある. また, 図中の曲線はワイブル分布を適用し統計解析ソフトウェア STANAD¹⁰⁾を用いて得られた疲労寿命の分布関数を示すもので, いずれの負荷応力レベルにおいても, 計算結果は実験結果の分布特性とよく一致している. 最も低い負荷レベルの実験点が

Fig. 15 Scheme of fatigue life distribution.

Fig. 16 Fatigue life distributions for S10C.
(Weibull probability paper)

$N = 10^7$ において上方に折れ曲って打点されているのは、 $N = 10^7$ における多数の打ち切りデータが含まれていることによるものである。

この図の疲労寿命分布をもとに、破壊確率 $P = 1, 10, 50, 90, 99\%$ のパーセント点を読み取って、上述の方法で P - S - N 曲線を描いたのが Fig. 17 である。実験点がプロットされている σ_a/σ_B の位置は、各負荷区分に含まれる全実験点の負荷レベルの平均値のレベルに合せてある。図より、この手法で得られる P - S - N 特性は疲労限度付近の低応力域を含めた複雑な確率疲労特性をよく表示していると判断される。しかし、Fig. 16 からわかるように、疲労限度付近の低応力域になると破壊確率が飽和するので、この飽和破壊確率より高い確率のパーセント点が決まらず、当該領域の P - S - N 特性が解析できないという課題が残っている。本報で採用した日本材料学会標準【 S - N 曲線回帰法】⁶⁾では、前述のとおり時間強度の分布を基礎とした解析をしており、このような問題は発生しない利点がある。 S - N 曲線を回帰する際に寿命方向（横軸）の残差二乗和を対象とすると S - N 曲線の水平部付近では残差が定義できないという問題があるが、上記の【 S - N 曲線回帰法】は疲労強度方向（縦軸）の残差二乗和を対象としており、応力レベルおよび寿命レベルによらず残差二乗和が明確に定義できる点も大きな利点である。

6 結 言

日本材料学会「金属材料疲労強度データベース」から S10C と純鉄に関するデータを検索し、日本材料学会標準【 S - N 曲線回帰法】を用い、片対数折れ線モデルにて確率疲労特性を解析した結果、以下の結論を得た。

(1) S10C 鋼および純鉄に関する多数組の疲労強度データについて、引張強さ σ_B で標準化した負荷応力による S - N 特性を介して個別の疲労強度データを効果的に併合することができ、この方法で疲労特性に対する大標本データを確保できることがわかった。

(2) 上記の方法で得られた大標本データをもとに S10C 鋼および純鉄に関する確率疲労特性を解析した結果、日本材料学会標準【 S - N 曲線回帰法】により広範な応力域にわたり実験データとよく整合する P - S - N 特性を定量的に解析することができた。

(3) S - N 曲線の各パラメータ間の相関を調べた結果、傾斜部勾配 A と切片 B の間ならびに引張強さ σ_B と疲労限度 σ_w の間に強い正の相関がみられた。一方、傾斜部

勾配 A と限界繰返し数 N_w の間には、逆に明確な負の相関が確認された。

最後に、本報では疲労強度データベースをもとに S10C 鋼および純鉄に関する回転曲げ荷重下の確率疲労特性を解析したが、今後さらに種々の材種や軸荷重、ねじり荷重等、他の負荷様式についても解析を行い、機械構造物の安全設計や信頼性解析に必要な基礎データを蓄積する必要がある。

参 考 文 献

- 1) T. Sakai, H. Yasui and T. Tanaka, "Statistical fatigue properties of carbon steels for machine structural use based on JSMS database on fatigue strength of metallic materials", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.36, No.408, pp.915-921 (1987).
- 2) I. Nishikawa, K. Okada, T. Sakai, M. Goto and S. Nishijima, "Statistical fatigue properties of structural steels based on materials strength database for reliability design (MSDRD)", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, A, Vol.62, No.595, pp.632-639 (1996).
- 3) Editorial Committee of Database, "Database on fatigue strength of metallic materials" (1996) The Society of Materials Science, Japan.
- 4) Editorial Committee of Databook, "Databook on fatigue strength of metallic materials" (1996) The Society of Materials Science, Japan and Elsevier Science B.V..
- 5) T. Sakai, K. Halada and H. Yoshizu, "A new unified database construction system for different kinds of materials and its tentative operation", Proc. Int. Symp. of MITS2005, pp.68-72 (2005) National Institute the Materials Science, Japan.
- 6) JSMS standard (JSMS-SD-6-04), "Standard evaluation method of fatigue reliability for metallic materials -Standard regression method of S - N curve-" (2004) The Society of Materials Science, Japan.
- 7) T. Sakai and A. Sugeta, "Publication of the second edition of standard evaluation method of fatigue reliability for metallic material 【Standard regression method of S - N curves】", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.54, No.1, pp.37-43 (2005).
- 8) K. Okada, I. Nishikawa, T. Sakai, Y. Kuse, S. Nishijima and A. Sugeta, "Statistical analysis of fatigue properties of high strength steels based on MSDRD", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, A, Vol.64, No.618, pp.249-256 (1998).
- 9) K. Okada, T. Sakai, I. Nishikawa, A. Sugeta, T. Shimokawa and S. Nishijima, "Statistical fatigue properties of nonferrous metals based on the statistical aspect of crack initiation and propagation behaviors", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.50, No.1, pp.19-25 (2001).
- 10) T. Sakai, N. Tanaka, K. Okada, M. Furuichi, I. Nishikawa and A. Sugeta, "Statistical fatigue properties in ultra-long-life regime for SCM435 steels based on JSMS database on fatigue strength of metallic materials", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, A, Vol.70, No.696, pp.1102-1109 (2004).

Fig. 17 σ_a/σ_B - N diagram for S10C. (P - S - N diagram)