金属材料の静的強度および疲労強度特性値の 適合分布形について[†]

酒 井 達 雄* 戸 梶 恵 郎**
長谷川 典 彦** 中 島 正 貴***

Statistical Distribution Patterns of Static and Fatigue Properties for Metallic Materials

by

Tatsuo SAKAI*, Keiro TOKAJI**, Norihiko HASEGAWA**
and Masaki NAKAJIMA***

1 結 言

近年、科学技術の著しい発展とともに、各種機械構造物の安全性や信頼性の確保に関する要求が一段と高まる一方、これら機械構造物の使用環境はますます苛酷になりつつある^{1),2)}。機械構造物に作用する外力や各部材の強さは、ともに決定論的に与えられることは少なく、一般に固有のばらつきをもっている。したがって、このような機械構造物の安全性・信頼性を定量的に評価するためには、外力と強度の確率分布を同時に考えた結合事象としての取扱いが必要である³⁾。

この立場から、破壊確率を評価するためにS-Sモデルが提案され、機械設計の分野だけでなく、電子工学や品質管理などの各分野で幅広く適用されている⁴⁾。この手法に従って実際に機械構造物の安全設計や信頼性解析を行うためには、外力と強度両者の定量的な分布特性を明らかにしておくことが、最も基本的な事柄である。このうち、外力の頻度分布については機械構造物の種類や構造、使用環境等その用途に応じて、その都度、実測またはシミュレーションなどにより、頻度分布に関する基礎データが徐々に蓄積されつつある。他方、部材強度の分布特性については、従来より各種材料、各種荷重様式のもとで多くの実験結果が報告されているが、個別の報告にとどまるものが多い。したがって、これら個々の研究報告を収集・整理して、各種強度特性値の分布特性を体系的にまとめることは、材料強度の統計的性質に関する全体的傾向の把握と併せ、機械構造物の安全設計・信頼性解析に対する基礎データを与える点で重要と思われる。

以上の観点から、脚注に示す「材料強度確率モデル

研究会^{*1)}において、国内外の膨大な論文や研究報告を組織的に調査・収集するとともに、これらを材料種別、荷重様式、試験環境などをもとに分類し、各分類ごとに材料強度の適合分布形や分布特性値を系統的に明らかにする試みが企画された。収集文献の中から、この趣旨に沿う366件の論文が厳選され、強度特性値の分布に対する314件の貴重な図表データが抽出され、①金属材料、②複合材料、③セラミックスの分類を設けて、各材料ごとに大量の実験結果が整理された。その結果は(株)養賢堂発行の「機械の研究」に長期連載されており、本報では、その中から特に金属材料に絞って、それ以降に発表されたいくつかの論文をも含めて静的強度および疲労強度特性値の分布特性の全体的傾向を、「総説」として可能な限り簡潔に把握することを試みる。なお、本報では金属材料の各種強度特性値の分布特性に関する実験結果の系統的な整理が主題であり、これらの分布特性を支配する物理的因子の解明や確率論的考察については別の機会に譲ることとする。

2 静的機械的性質の分布特性

引張強さ、降伏点、伸び、絞り等の引張特性値、硬さ、破壊じん性値の各静的強度の外に、破壊じん性の代表値として利用されることの多い衝撃値をも含め、本節でこれら強度特性値の分布特性の全体的特徴を整

*1 「材料強度確率モデル研究会」参加者：五十嵐顕人（京都大学工学部）、石川 浩（香川大学経済学部）、木村雄二（工学院大学）、酒井達雄（立命館大学理工学部）、田中道七（立命館大学理工学部）、谷本敏夫（湘南工科大学）、戸梶恵郎（岐阜大学工学部）、鳥居太始之（岡山大学工学部）、中島正貴（豊田工業高等専門学校）、中易秀敏（大阪工業大学）、中山英明（大阪産業大学）、長谷川典彦（岐阜大学工学部）、福田収一（東京都立科学技術大学）、星出敏彦（京都大学工学部）、前川善一郎（京都工芸繊維大学）〔以上五十音順〕

† 原稿受理 平成3年10月17日 Received Oct. 17, 1991

* 正 会 員 立命館大学理工学部機械工学科 〒603 京都市北区等持院北町, Dept. of Mech. Eng., Ritsumeikan Univ., Kita-ku, Kyoto, 603

** 正 会 員 岐阜大学工学部機械工学科 〒501-11 岐阜市柳戸, Dept. of Mech. Eng., Gifu Univ., Yanagido, Gifu, 501-11

*** 正 会 員 豊田工業高等専門学校機械工学科 〒471 豊田市栄生町, Dept. of Mech. Eng., Toyota College of Tech., Eisei-cho, Toyota, 471

図1 SS41鋼, SM50A鋼, SM58鋼の
引張強さの分布

理してみたい。最初に上記強度特性値の分布に関する代表的な実験結果を紹介し、その後で前述の連載講座中に収録された全データを対象とした適合分布形に対する集計結果を示すこととする。

図1は日本鋼構造協会が調査した構造用鋼 SS41, SM50A, SM58 各材料の引張強さ σ_B の分布を正規確率紙に示したもので、いずれも図中で直線状を呈し、 σ_B が正規分布でよく表示されることがわかる^{3), 6), 7)}。このとき、引張強さの密度関数と分布関数は付録の式(1), (2)において $x = \sigma_B$ とおけばよい。図2は SM50A, SM58 鋼の引張強さ σ_B と降伏応力 σ_s の分布を併せて対数正規確率紙にプロットしたもので、この例ではこれら各強度の分布が対数正規分布でよく表示される⁷⁾。対数正規分布の確率密度関数と分布関数は付録の式(3), (4)で与えられる。このように、引張強さは正規分布と対数正規分布の両分布形に同程度に適合することが多い。しかし、降伏点については、一般に正規分布より対数正規分布の方がその適合性がよいことが報告されている⁸⁾。

図3は、アルミニウム合金 5083 の破断伸び ϕ と絞

図2 SM50A鋼, SM58鋼の降伏応力
および引張強さの分布

図3 A5083 アルミニウム合金の
伸びおよび絞りの分布

図4 SCM3鋼, SNCM8鋼, SUS304鋼
の硬さの分布

り ϕ をワイブル確率紙上にプロットしたもので、実験点がやや少ないが、これらの特性値はほぼ2母数ワイブル分布で表示してよいようである⁹⁾。ワイブル分布の確率密度関数と分布関数は付録の式(5), (6)で与えられ、2母数ワイブル分布の場合は $c=0$ とおけばよい。つぎに、図4は SCM3, SNCM8, SUS304 鋼の硬さの分布を示したもので、図中の記号 D, Q, O は順に上記各材料を示し、その右の数字は焼もどし温度の高低を表しており、数字が大なるほど、焼もどし温度が低い。このように硬さについては、他の報告も含め広範な材料に対して正規分布の適合性が確認されて

図5 シャルピー衝撃値の分布と温度との関係

図6 平面ひずみ破壊じん性値の分布

図7 J_c 値の分布

いる。⁸⁾

さて、材料のじん性を評価するために古くから衝撃試験が行われているが、図5はBS規格50D鋼に関する20°C、-20°C、-60°Cでのシャルピー衝撃値の分布特性を示したものである。G. O. Johnstonは、この結果から、吸収エネルギー E_c の分布に対して20°C、-20°Cでは対数正規分布でよく近似されるが、ぜい性破壊となる-60°Cでは2母数ワイブル分布によく従うことを示している。¹²⁾

一方、材料のじん性評価において破壊力学的手法による破壊じん性値に関するデータが蓄積されつつある。図6は、図中の各材料に対する平面ひずみ破壊じん性値 K_{Ic} の分布を正規確率紙に示したもので、実験点が少ないが K_{Ic} の分布はほぼ正規分布で近似できるようなのである。¹³⁾なお、材料や試験機の制約から K_{Ic} が実測し難いこともあり、その場合にはじん性値として J_c 値が採用される。図7は、原子炉压力容器鋼A508C1.3の-20°C、-60°Cにおける J_c 値の分布をワイブル確率紙上にプロットしたものであり、いずれも2母数ワイブル分布で近似して大きな問題はないようである。¹⁴⁾

以上、静的機械的性質の分布特性の代表例を示したが、前述の連載講座に含まれる実験結果全体にわたる各強度特性値の適合分布形の全容を表Iに示した。ここでは分布データ1組ごとに斜線“/”を記入して、適合分布形の頻度分布がわかるようにした。表より、引張特性のうち、引張強さおよび降伏応力については正規分布で表示される場合が多いが、時に対数正規分布の取扱いがなされている。なお、アルミニウム合金については破断伸び、絞りを含め、2母数ワイブル分布でよく表示される場合もある。

一方、硬さについては全件が正規分布で表示できるようである。これは硬さが一般に多数回の実測値の平均値で与えられ、中心極限定理からも推

測されるように、平均値の分布が正規分布に漸近することに対応するものと思われる。なお、衝撃値については対数正規分布で表示できることが多く、このうち、

表I 静的機械的性質の適合分布形に関する一覧表

	材種-特性値	正規分布	対数正規分布	ワイブル分布		その他
				2母数	3母数	
引張特性	S45C- σ_B	///				
	SM50A- σ_s, σ_B	/	//			
	SM58- σ_s, σ_B	/	//			
	SS41- σ_B	/				
	Bofors鋼- σ_B				/	
	A5083- $\sigma_{0.2}, \sigma_B, \sigma_T$			///		
硬さ	A5083- ϕ, ψ			//		
	S25C-H _v	/				
	S45C-H _v	###/				
	SCM3-H _v , H _a	###/				
	SNCM8-H _a	///				
	SUS304-H _a	/				
	SK5-H _v	//				
	St3s-H _a					Gumble分布 (/) Frechet分布 (/)
	A5083-H _v	//				
衝撃値	A7075-H _v	/				
	50D鋼- E_c		//	/		
破壊じん性値	SCM440- E_c		///			
	SAE4340- K_{Ic}	/				
	50kg級鋼板- δ_c			//		
	Admiralty P鋼- δ_c			///		
	50D鋼- δ_c			///		
	A508Cl.3鋼- J_c			//		
	HT80- δ_n, J_I	//	//	//		
	HT80- δ_c, J_c	//	//	//		
	Ti6Al4V- K_{Ic}	///				
	NiCoMo- K_{Ic}	/				
	Ti6Al6V2Sn- K_{Ic}	/				
	AZ774- K_{Ic}	/				
	A2024- K_{Ic}	///	/	/		
	A7050- K_{Ic}	///				
	A7075- K_{Ic}	/				
合計件数		49	14	21	1	

特性値 σ_B : 引張強さ, σ_s : 降伏応力, $\sigma_{0.2}$: 耐力, σ_T : 真破断応力, ϕ : 伸び, ψ : 絞り, H_v, H_a: 硬さ, H_a: 衝撃エネルギー, K_{Ic} : 平面ひずみ破壊じん性, δ_c : 限界き裂開口変位, J_c : 限界J積分値, δ_n : 伝ば開始き裂開口変位, J_I : 伝ば開始J積分値

低温のぜい性破壊域では上述のように2母数ワイブル分布による近似が望ましいようである。また、破壊じん性値については材種によらず正規分布の適合性がよく、時に2母数ワイブル分布による取扱いもなされているが、対数正規分布による表示の例は少ないようである。

3 疲労強度特性値の分布特性

3・1 疲労寿命分布

疲労強度特性値のばらつきに関するデータとして最も報告例の多いのは疲労寿命分布である。鉄鋼材料に対する疲労寿命分布の代表例として、XC10 鋼の回転曲げ荷重下の実験結果をワイブル確率紙に示したのが図8である。^{15), 16)} 寿命分布はいずれの応力においても図中に実線で示した3母数ワイブル分布によく従うが、耐久限度付近の低応力域では破壊確率がある値に飽和する現象がみられ、筆者の一人はこのような疲労寿命分布に対して飽和破壊確率で標準化した3母数ワイブル分布による定式化を提案している。¹⁷⁾

他方、非鉄金属の一例としてアルミニウム合金A2024-T4 切欠き材の平面曲げ荷重下での疲労寿命分布を図9に示す。この例ではいずれの応力でも実験結果は図中で直線状を呈しており疲労寿命分布が対数正規分布によく従っている。

上記連載講座中の全実験結果をもとに、各種金属材料の疲労寿命分布の適合分布形を先と同様に一覧表にしたのが表Ⅱであり、上段に鉄鋼材料、下段に非鉄金属に対する集計結果が示してある。表より、金属材料

図8 XC10 鋼の回転曲げ疲労寿命分布

図9 2024-T4 切欠き材の疲労寿命分布

の疲労寿命の分布形としては、圧倒的に3母数ワイブル分布が採用されており、その他、しばしば対数正規分布による近似がなされている。この対数正規分布による寿命解析の例は、非鉄金属において頻度が高いことがわかる。なお、特にばらつきが小さい場合や低サイクル疲労において稀に正規分布による表示もなされる例もあるが、これはむしろ例外的取扱いと考えるべきであろう。

3・2 疲労強度分布

一組のS-Nデータに対して、西島らは次の手法で疲労強度分布に関する一標本を抽出している。¹⁹⁾ すなわち、中央S-N曲線に対する各実験点の縦軸(強度)方向の偏差 $(\sigma - \sigma_m)$ を平均値 σ_m で除した相対強度偏差 r を次式で定義し、その分布特性を調べている。

$$r = (\sigma - \sigma_m) / \sigma_m \quad (1)$$

図10は、各種鉄鋼材料についてこの相対強度偏差の分布を正規確率紙上に示したもので、これらの分布がいずれも正規分布によく従うことがわかる。²⁰⁾

表Ⅱ 疲労寿命分布の適合分布形に関する一覧表

材種・荷重様式	正規分布	対数正規分布	ワイブル分布		その他
			2母数	3母数	
S10C-RB				### ###	混合ワイブル分布 (### ###)
S25C-RB				###	
S35C-RB				###	
S45C-RB					
SCM435-RB				###	混合ワイブル分布 (###)
SS41-RB					
XC10-RB				###	混合ワイブル分布 (###)
40 Kh 鋼-PB					
SB46B-RB					
マルエージ鋼-RB					
A2024-PB		###			混合対数正規分布 (###) Maxwell・Boltzman 分布 () 混合ワイブル分布 (###)
A2024 clad 材-AX		/		/	
75-S-T-RB					
A5083-RB					
アルミ合金-RB		/		/	混合ワイブル分布 限定対数正規分布 極値分布
A6061-RB	/			/	
A7075-RB		###			短寿命側裾野部
OFHC 鋼-AX		###		###	
合計件数	1	28	0	55	

荷重様式 RB: 回転曲げ, PB: 平面曲げ, AX: 軸荷重

図10 各種鉄鋼材料の相対強度偏差の分布

図11 XC10 鋼の時間強度分布

F. A. Bastenaire らによる回転曲げ荷重下の疲労試験結果¹⁵⁾をもとに、筆者らがいくつかの固定時間で時間強度分布を新たに解析して、これを図示したのが図11である。²¹⁾ いずれの固定時間にあっても、時間強度の分布は正規分布でよく表示されることがわかる。なお、S-N 曲線の勾配を介して疲労寿命のばらつきをすべて換算応力のばらつきに置き換える手法が、下河らにより提案されており、アルミニウム合金 A2024-T4 平板切欠き材に対するこの換算応力分布を正規確率紙上に示したのが図12である。^{18), 22)} これは疲労強度分布を直接求めたものではないが、図の換算応力分布はこの手法に立脚した時間強度分布を与えるものと考えられる。図より、換算応力の分布が幅広い応力域にわたり正規分布でよく表示できることがわかる。

つぎに、図13は $N=10^7$ の破壊確率と応力の関係を正規確率紙上にプロットしたもので、これは換言すれば耐久限度の分布を与えるものである。²³⁾ この結果はまた、上の図11で固定時間を $N=10^7$ にしたものにあたり、一連の結果より、金属材料の耐久限度は正規分布によく従っている。しかし、上下両裾野部の適合性をも考慮して、Beta 分布の採用を推奨する報告も

図12 2024-T4 切欠き材の換算応力分布

図13 応力と破壊確率の関係

図14 機械構造用炭素鋼の耐久比の分布特性

ある。²³⁾ さらに、機械構造用炭素鋼調質材の回転曲げ荷重下での耐久限度について、引張強さとの比をとって耐久比の分布を示したのが図14である。^{3), 24)} 図より、耐久比の分布についても正規分布で近似してよいようである。また、日本材料学会の疲労強度データベース²⁵⁾をもとに多くの鉄鋼材料に対する耐久限度の変動係数 CV を求め、その分布を対数正規確率紙にプロットしたのが図15である。^{26), 27)} (a)全鋼種、(b)炭素鋼、(c)合金鋼の各場合とも、実験点の直線性はあまり良好でないが、参考までに回帰直線が各図中に示されている。変動係

図15 耐久限度の変動係数の分布特性

数の値については1~10%の範囲に分布しており、ここでは分布形の議論でなく、CV値が1~10%の範囲に含まれることを強調しておく。

表Ⅲ 疲労強度分布の適合分布形に関する一覧表

材種・荷重様式	正規分布	対数正規分布	ワイブル分布		その他
			2母数	3母数	
<u>相対強度偏差分布</u>					
SUS403-RB	/		/		
S25C-RB	/				
S45C-RB	//				
SCM435-RB	///		/		
SNCM439-RB	///		//		
A5083-RB	/				
A7075-RB	/				
<u>時間強度分布</u>					
XC10-RB	### //				
XC100-RB	### ###				
A2024-PB	### /				
<u>換算応力分布</u>					
A2024-PB	### ### //				
<u>耐久限度分布</u>					
CH10A-RB					一樣分布(/)
S15C-RB			/		
S35C-RB	/		/		一樣分布(//)
SCM4-RB					一樣分布(/)
<u>耐久比の分布</u>					
全鋼種 RB	/				
炭素鋼 RB	/				
合金鋼 RB	/				
(一部 PB を含む)					
S35C + S45C + S55C RB	/				
<u>耐久限度の変動係数の分布</u>					
全鋼種 RB		/			
炭素鋼 RB		/			
合金鋼 RB		/			
(一部 PB を含む)					
合 計 件 数	53	3	6	0	

荷重様式 RB: 回転曲げ, PB: 平面曲げ

以上の例を含め、前述の連載講座中の全データに関する疲労強度の適合分布形を一覧表にしたのが表Ⅲである。表より、疲労強度に関しては圧倒的に正規分布による取扱が多く、一部、2母数ワイブル分布による表示も行われているが、相対強度偏差、時間強度、耐久限度、耐久比のいずれも正規分布で表示し、定量解析を行う手法が定着しているものと考えられる。

3.3 常温大気中での疲労き裂発生・伝ば挙動の統計的様相

3.3.1 き裂発生寿命・伝ば寿命の分布特性

一般に、疲労過程はき裂発生過程とき裂伝ば過程からなっており、き裂発生寿命を N_i 、き裂伝ば寿命を N_p とするとき、破断寿命 N_f は次式で表される。

$$N_f = N_i + N_p \quad (2)$$

機械構造物の耐疲労設計や信頼性解析において、 N_f の評価が重要であることは言うまでもないが、実際にはき裂発生でもって最終寿命と考えたり、潜在的に欠陥やき裂の存在が予想されるような場合には、 N_p が破断寿命を支配することになる。西島らは SM50A 鋼円孔付き平板試験片の面外曲げ疲労試験を実施し、 N_i 、 N_p および N_f の分布を調べている。²⁸⁾ 図 16 は各寿命を対数正規確率紙上に示したもので、 N_i はき裂長さが円孔中心から 1.5 mm に達したときの繰返し数で定義されており、 N_p は $N_f - N_i$ で計算されている。二種類の応力レベルにおいて、いずれの寿命も対数正規分布によく従うとともに、対数寿命の分散はほぼ同程度となっている。

図 17 は、試験片最小断面部に直径・深さとも 0.4 mm のドリル穴を付した欠陥材における N_i の分布を、ワイブル確率紙上に示したものである。²⁹⁾ N_i は円孔直径を含めてき裂長さ 0.6 mm になったときの繰返し数がとられている。図中の実線は実験点をもとに相関係数法により^{17), 30)} あてはめられた 3 母数ワイブル分布を示すもので、 N_i の分布は 3 母数ワイブル分布によく適合する。以上のように、 N_i 、 N_p の分布についていくつかの分布形による表示がなされているが、後述の一覧表からもわかるように、 N_i については 3 母数ワイブル分布、他方、 N_p については対数正規分布に従うと考えるのが最も合理的であろう。なぜなら、これまでに多数報告

図16 SM50A 鋼中央円孔付試験片の
平面曲げ疲労における寿命分布

図17 微小欠陥3個を有するSUS304 鋼丸棒
試験片の回転曲げき裂発生寿命分布

されている疲労寿命分布については、前述のとおり、3母数ワイブル分布の広い適合性が確認されており、 N_p に対数正規分布を仮定すると N_i については位置母数を含む3母数ワイブル分布を想定しなければ、整合性が失われるからである。

3・3・2 疲労き裂伝ば速度の分布特性 純アルミニウムの SEN 試験片に対して、完全片振り荷重下で得られた疲労き裂伝ば速度 da/dN の分布を対数正規確率紙上にプロットしたのが図18である。図中の7つのき裂進展段階における伝ば速度の分布はいずれも直線上に現れており、き裂伝ば速度の分布が対数正規分布によく適合することがわかる。

図18 純アルミニウムの片振り荷重下における
き裂伝ば速度の分布

図19 S15C 鋼の回転曲げ荷重下における
き裂伝ば速度の分布

つぎに、S15C 鋼の回転曲げ荷重下における da/dN の分布を同様に対数正規確率紙上に示したのが図19であり、いずれのき裂長さにおいてもき裂伝ば速度はほぼ対数正規分布に従う。木村らは、このような da/dN の変動がき裂伝ばに与する領域（き裂先端塑性域）内での組織的不均一性の程度に依存することを明らかにしており、き裂先端塑性域寸法 r_p と結晶粒径 d の比 (r_p/d) の増大に伴い、伝ば速度の変動係数は減少することが報告されている³²⁾。

3・3・3 き裂伝ば則パラメータの分布特性 第Ⅱ段階の疲労き裂伝ば挙動については、伝ば速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK との間に、次式の Paris 則が成立することが知られている³³⁾。

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (3)$$

上式中のパラメータ C , m の変動特性については疲労寿命解析の立場から多くの報告があるが、各パラメータの分布特性を実験的に調べた結果はかなり限られるのが現状である。

図20 S15C 鋼の回転曲げ荷重下における
き裂伝ば則パラメータの分布

図21 き裂伝ば則パラメータ
log C- m 間の相関

石井らは、炭素鋼 (S15C) に対してき裂伝ば則の変動特性を調べ、 C , m の分布に関する図20の結果を報告している。材料種別は結晶粒径をもとに A (14 μm), B (25 μm), C (55 μm), D (102 μm) に区別されており、いずれの材種についても、 C は対数正規分布、 m は正規分布によく従っている。なお、粒径が増大するほど、 C , m ともにその分散が大きくなる傾向があり、前述の木村らの実験結果の特徴と一致する点は興味深い。

つぎに、伝ば則パラメータ C と m の間には、片対数紙上で直線関係があり、次式の成立が確認されている。^{(31), (35)}

$$C = A \cdot B^m \quad (4)$$

図 21 は、多くの結果を整理した北川らの報告と上で紹介した石井らの実験結果を併せてプロットした C と m の相関関係である。この関係はアルミニウム SEN 試験片に対しても確認されており、広範な材種にわたり図中の共通の直線で表示される特徴が認められる。

3.3.4 微小疲労き裂伝ば挙動の統計的様相 き裂寸法が結晶粒径の十倍程度以内の微小疲労き裂の伝ば挙動については、一般に大きき裂の伝ば則から予想される伝ば速度に比較して、著しく速度が高く、さらに

図22 微小疲労き裂の伝ば特性

表Ⅳ 疲労き裂発生・伝ば特性値の適合分布形に関する一覧表 (常温大気中)

材種・荷重様式	正 規 分 布	対数正規分布	ワイブル分布	
			2 母数	3 母数
<u>き裂発生寿命分布</u>				
HT80-AX		//		//
SM50A-PB		//		
SCM435-RB				////
SUS304-RB				### /
A2024-PB		/		
<u>き裂伝ば寿命分布</u>				
SM50A-PB		//		
SCMV4-AX		////		
SPCI-PB		### //		
SUS304-RB				//
純アルミ-AX		### /		
A2024-PB		/		
<u>da/dN の分布</u>				
S15C-RB		///		
SCMV4-AX		### ## # //		
HT60-PB		### /		
純アルミ-AX		### //		
A2024-RB				### //
<u>伝ば則パラメータ C の分布</u>				
S15C-RB		////		
純アルミ-AX		/		
<u>伝ば則パラメータ m の分布</u>				
S15C-RB	////			
合 計 件 数	4	64	0	22

荷重様式 AX: 軸荷重, PB: 平面曲げ, RB: 回転曲げ

微視組織の影響を受けて、伝ば速度の変動が顕著となることが知られている。^{(36)~(39)}

図 22 はアルミニウム合金の回転曲げ荷重下の微小き裂伝ば挙動に関する田中らの実験結果であり、同図 (a) には全き裂に対する結果が、同図 (b) には主き裂の伝ば挙動が平均値と併せて示されている。主き裂に対する結果からわかるように、微小き裂は伝ば速度の顕著な低下と回復を繰り返しながら成長し、やがて大きき裂の伝ば則に漸近する。このことは、筆者の一人により純チタンに対しても確認されている。⁽⁴⁰⁾ また、微小き裂に対するこのような伝ば速度の一次的低下・回復現象は、結晶粒界や介在物に起因することが確かめられており、微視組織的諸因子の変動特性を基礎とした確率モデルにより、実験結果の変動特性がよく説明されることも報告されている。^{(38), (41)}

3.3.5 諸特性値の適合分布形 連載講座⁽⁵⁾

に収録された文献、さらにそれ以降に発表されたいくつかの論文を含む一連の文献を対象に、常温大気中における疲労き裂発生・伝ば挙動の各特性値について、その適合分布形を一覧表にまとめたのが表Ⅳである。き裂発生寿命については一部を除き、3母数ワイブル分布による表

示が定着している。他方、き裂伝ば寿命に関しては適合分布形として対数正規分布の採用が圧倒的に多い。また、き裂伝ば速度についてもほとんどが対数正規分布による取扱いがなされていることがわかる。

つぎに、き裂伝ば則パラメータに着目すると、 C については対数正規分布の適合性が良好であり、指数 m については正規分布による表示がなされている。なお、 m を定数とした取扱いも多く、この場合は C の分布はそのまま伝ば速度の分布を与えることになり、上記一覧表で両者の分布形がいずれも対数正規分布によく適合する事実に対応している。このときさらにき裂伝ば寿命も対数正規分布になることが解析的にも示されており³¹⁾、上表で伝ば寿命が対数正規分布によく従う事実と一致する。

3・4 腐食環境下での疲労き裂発生・伝ば挙動の統計的様相

3・4・1 疲労き裂長さの分布特性 腐食環境下での疲労き裂発生・伝ば挙動の統計的変動特性については、これまでの研究における観察の対象がもっぱら疲労き裂長さの分布特性に集中している。腐食環境では、応力の繰返しにとともに多数の微小なき裂が発生し、それらが成長するとともに相互に干渉・合体しながら最終破断に至る。図23はHT60鋼に対する純水中の

図23 HT60鋼の純水中での軸荷重疲労き裂長さの分布

図24 SCM435鋼の3%食塩水中でのねじり疲労き裂長さの分布

図25 S10C鋼の3%食塩水中での回転曲げ疲労き裂長さの分布

軸荷重疲労試験における各繰返し段階でのき裂長さの分布に関する北川らの実験結果である。いづれの段階においてもき裂長さの分布がほぼ正規分布に従い、繰返し数の増加とともにその平均値と分散の両者が増大する傾向がみられる。

腐食環境下での疲労き裂長さの分布について、ワイブル分布を基礎とした取扱いも多く報告されている。筆者らは3%食塩水中で繰返しねじり負荷を与えた場合のき裂長さ分布を調べ、図24の結果を報告しており⁴⁶⁾、ここではいづれもき裂長さの分布は3母数ワイブル分布によく適合している。 $N/N_f=0.55$ なる繰返し段階と比較し、 $N/N_f=0.65$ に至ると図中の分布曲線は右側へ移動し、き裂長さは平均的に増大するが、それ以降の繰返し段階ではこの分布曲線にあまり変動はなく、最大値付近の数個のき裂だけが優先的に進展する特徴がある。

図25は同じく3%食塩水中で回転曲げ疲労試験を行い、繰返し段階 $N/N_f=0.65$ におけるき裂長さ分布を調べた筆者らの実験結果で、各応力ともき裂長さの分布は3母数ワイブル分布に従い、応力が高くなるほど、平均的にき裂長さが増大するが、その下限値(位置母数)はあまり変化しない傾向が認められる。

また、石原らは3%食塩水中でAl合金の平面曲げ疲労試験を実施し、き裂長さの分布がワイブル分布に従うことを確認するとともに、き裂のアスペクト比についてもワイブル分布を基礎とした取扱いを試みていた⁴⁸⁾。さらに、き裂伝ば過程でき裂合体を伴う場合と単独伝ばする場合にき裂を区分し、複合ワイブル分布を仮定したいくつかの解析結果も報告されている⁴⁹⁾。

3・4・2 き裂伝ば則パラメータの分布特性 構造用鋼 SS41 を用い、石原らは3%食塩水中で平面曲げ試験を行って、合体を生ずる前のき裂について、式(3)のき裂伝ば則の成立を確認している。ここで得られた伝ば則パラメータ C および m の分布を図示したのが図26であり、参考のため、大気中での実験結果

図26 SS41 鋼の3%食塩水中での
き裂伝ば則パラメータの分布

を実線で図中に示した。図より、 C についてはほぼ対数正規分布に従い、指数 m については正規分布で近似できることがわかる。この事実は前述の大気中での結果と一致するが、 m は大気中と比べて平均的に小さく、 C については逆に大きくなる傾向がみられる。また、 C の分散が著しく大きくなり、腐食環境下での疲労き裂伝ば速度が相対的に速く、同時にばらつきも大きいことを示している。

なお、北川らは、HT60 鋼に対して純水中で軸荷重疲労試験を行い、き裂伝ば則パラメータ C の分布を調べており、 C の分布が正規分布でよく近似できることを報告している⁴⁵⁾。

3・4・3 諸特性値の適合分布形 連載講座⁵⁾に収録された全文献を対象に、腐食環境下での疲労き裂発生・伝ば挙動の統計的変動に関する各特性値について、その適合分布形を先と同じく一覧表にしたのが表Vである。表より、き裂長さの分布については一部を除き、ワイブル分布による取扱いが多い。位置母数についてはき裂観察における検出能力とも関連し、今後さらに

表V 疲労き裂発生・伝ば特性値の適合分布形に
関する一覧表（腐食環境）

材種・荷重様式（環境）	正 規 分 布	対数正 規分布	ワイブル分布	
			2 母数	3 母数
き裂長さ	###		//	### /// ### /// // // ###
HT60-AX（純水）				
S10C-RB（3%NaCl 水溶液）				
S10C-TW（3%NaCl 水溶液）				
SS41-PB（3%NaCl 水溶液）				
SCM435-TW（3%NaCl 水溶液）				
A2017-PB（3%NaCl 水溶液）			/// /	
<u>伝ば則パラメータ C</u>				
HT60-AX（純水）	//	///		
SS41-PB（3%NaCl 水溶液）				
<u>伝ば則パラメータ m</u>				
SS41-PB（3%NaCl 水溶液）	///			
<u>アスペクト比</u>				
A2017-PB（3%NaCl 水溶液）			/// /	
合 計 件 数	10	3	15	24

荷重様式 AX: 軸荷重, RB: 回転曲げ, TW: ねじり, PB: 平面曲げ

詳細な観察結果の蓄積が必要である。

つぎに、き裂伝ば則パラメータに関して、 C については対数正規分布に従い、指数 m については、正規分布に従うと考えるのが合理的と思われるが、 C についても正規分布を仮定した取扱いもある。また、き裂のアスペクト比の分布に関する実験結果も報告されているが、腐食環境下での疲労き裂伝ば挙動については実験技術上、大きな困難を伴い、実験結果は極めて限られるのが現状である。

4 結 言

国内外の膨大な文献をもとに、金属材料の静的機械的性質および疲労強度特性値の適合分布形を系統的に調べた。これらの文献にみられる適合分布形に関する全体的傾向を要約すれば次のとおりである。

(1) 静的強度に関して引張強さ、降伏応力、破断応力、伸び、絞り、ねじりは正規分布で表示されることが多いが、対数正規分布や2母数ワイブル分布に従う実験結果もかなり報告されている。硬さについてはほとんどが正規分布で表示され、衝撃値は対数正規分布に従う傾向が強い。なお、破壊じん性値については正規分布で表示されることが多いが、2母数ワイブル分布や対数正規分布で近似されることもある。

(2) 疲労寿命分布については3母数ワイブル分布による表示が圧倒的に多く、時には対数正規分布による表示も試みられている。他方、疲労強度分布に対しては時間強度、耐久限度とも、正規分布による取扱いが定着している。

(3) 常温大気中における疲労き裂発生寿命の分布形としては3母数ワイブル分布がよく適合し、他方、き裂伝ば寿命については対数正規分布による取扱いが定着している。

(4) き裂伝ば速度については、幅広いき裂進展段階において、対数正規分布によく従う。この事実はき裂伝ば則パラメータ m を定数と仮定するとき、いま一つのパラメータ C が対数正規分布に従うことに対応する。なお、両パラメータ間には、 $C = A \cdot B^m$ なる強い相関関係がある。

(5) 微小疲労き裂の伝ば挙動については、大きき裂の伝ば則から予想される速度に比較して著しく高い速度を示し、結晶粒界や介在物など微視組織の影響を受けて伝ば速度の顕著な変動を呈する。

(6) 腐食環境下でのき裂発生・伝ば挙動の統計的変動特性については、き裂長さの分布特性に関する報告が多く、このき裂長さ分布に対して2母数または3母数ワイブル分布による表示がなされている。なお、腐食環境および常温大気中ともき裂伝ば則パラメータ C は対数正規分布に従い、 m は正規分布に従うと考えてよいようである。

付録 代表的な分布形の確率密度関数 $f(x)$ と分布関数 $F(x)$

1. 正規分布 ($-\infty < x < \infty$)

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{s}\right)^2\right] \quad (\text{付1})$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad (\text{付2})$$

μ : 平均, s : 標準偏差

2. 対数正規分布 ($0 < x < \infty$)

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}sx} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{s}\right)^2\right] \quad (\text{付3})$$

$$F(x) = \int_0^x f(t) dt \quad (\text{付4})$$

$\mu: \ln x$ の平均, $s: \ln x$ の標準偏差

3. ワイブル分布 ($c < x < \infty$)

$$f(x) = \frac{a}{b} \left(\frac{x-c}{b}\right)^{a-1} \exp\left[-\left(\frac{x-c}{b}\right)^a\right] \quad (\text{付5})$$

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-c}{b}\right)^a\right] \quad (\text{付6})$$

a : 形状母数, b : 尺度母数, c : 位置母数

なお, 2母数ワイブル分布については $c=0$ とおけばよい。

(平成2年12月8日 第10回設計における信頼性工学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 政枝英雄, 材料, **31**, 1140 (1982).
- 2) 黒田 勲, 日本機械学会誌, **90**, 1338 (1987).
- 3) 西島 敏, 城野政弘, 材料, **31**, 410 (1982).
- 4) 塩見 弘, “故障物理入門” (1985) 日科技連出版社
- 5) 酒井達雄, 星出敏彦, 木村雄二, 戸梶恵郎, 中島正貴, 中山英明, 長谷川典彦, 谷本敏夫, 前川善一郎, 機械の研究, **39-9** (1987) ~ **42-2** (1990).
- 6) 西村 昭, JSCC, 日本鋼構造協会, **5**, 3 (1969).
- 7) 西村 昭, JSCC, 日本鋼構造協会, **5**, 68 (1969).
- 8) 酒井達雄, 鈴木幹彦, 日本機械学会論文集, **56**, 1775 (1990).
- 9) 岡田憲司, 石川 浩, 沖津昭慶, 金本勝行, 高松工業高等専門学校紀要, **13**, 19 (1977).
- 10) S. Nishijima, C. Masuda, T. Abe, E. Takeuchi, A. Komatu, A. Ishii, T. Matuyama, H. Sumiyoshi, Y. Tanaka and S. Otsubo, Trans. NRIM, **19**, 327 (1977).
- 11) 西島 敏, 阿部孝行, 材料, **26**, 50 (1977).
- 12) G. O. Johnston, ASTM STP 798, 42 (1983).
- 13) I. W. Schutz, AGARD Lecture Series, No. 62, 10-1 (1973).
- 14) 岩館忠雄, 田中泰彦, 小野信市, 渡辺十郎, 材料, **31**, 430 (1982).
- 15) F. A. Bastenaire, ASTM STP 511, 3 (1972).
- 16) 酒井達雄, 田中道七, 日本機械学会論文集, **48**, 11 (1982).
- 17) T. Sakai and T. Tanaka, Proc. Fatigue **84**, **2**, 1125 (1984).
- 18) 下河利行, 浜口泰正, 日本材料強度学会誌, **10**, 46 (1975).
- 19) 西島 敏, 材料, **29**, 24 (1980).
- 20) S. Nishijima, ASTM STP 744, 75 (1981).
- 21) 酒井達雄, 境田彰芳, 藤谷景三, 田中道七, 立命館大学理工学研究紀要, **41**, 79 (1982).
- 22) 下河利行, 浜口泰正, 日本材料強度学会誌, **9**, 1 (1974).
- 23) 田中道七, 岩谷隆史, 酒井達雄, 材料, **35**, 421 (1986).
- 24) 西島 敏, 材料科学, **17**, 12 (1980).
- 25) 田中道七, 新井淳一, 西島 敏, 城野政弘, 下河利行, 谷本敏夫, 酒井達雄, “金属材料疲労強度データベース” (1982) 日本材料学会
- 26) T. Tanaka, T. Sakai and T. Iwaya, CJMR, **2**, 125 (1987).
- 27) 田中道七, 岩谷隆史, 酒井達雄, 材料, **36**, 348 (1987).
- 28) 西島 敏, 竹内悦男, 材料, **27**, 884 (1978).
- 29) 田中道七, 酒井達雄, 岡田憲司, 日本機械学会論文集, A-50, 1166 (1984).
- 30) 酒井達雄, 田中道七, 材料, **29**, 17 (1980).
- 31) 酒井達雄, 田中道七, 材料, **28**, 880 (1979).
- 32) 木村雄二, 山田邦博, 清水真佐男, 国尾 武, 日本機械学会論文集, **42**, 1 (1976).
- 33) P. C. Paris, F. Erdogan, Trans. ASME, **85**, 528 (1963).
- 34) 石井 明, 越智保雄, 佐々木茂美, 材料, **38**, 1163 (1989).
- 35) H. Kitagawa, M. Misumi, Proc. ICM, **2**, 225 (1971).
- 36) 田中啓介, 日本機械学会論文集, A-54, 1 (1988).
- 37) 戸梶恵郎, 小川武史, 原田行雄, 安藤善司, 材料, **34**, 1160 (1985).
- 38) 酒井達雄, 戸梶恵郎, 小川武史, 日本機械学会論文集, A-57, 1514 (1991).
- 39) K. Tanaka, Y. Akinawa, “Advances in Fracture Research”, p. 869 (1989) Pergamon Press
- 40) 戸梶恵郎, 小川武史, 亀山宜克, 加藤容三, 日本機械学会論文集, A-56, 543 (1990).
- 41) 秋庭義明, 田中啓介, 材料, **38**, 1169 (1989).
- 42) 中島正貴, 機械の研究, **40**, 629 (1988).
- 43) H. Kitagawa, T. Fujita, K. Miyazawa, ASTM STP 642, 98 (1978).
- 44) 石原外美, 塩沢和章, 宮尾嘉寿, 神島裕児, 日本機械学会論文集, A-56, 494 (1990).
- 45) H. Kitagawa, Y. Nakasone, Proc. 25th Jap. Cong. Mat. Res., p. 69 (1982).
- 46) 戸梶恵郎, 安藤善司, 水谷日出男, 材料, **31**, 1204 (1982).
- 47) 戸梶恵郎, 安藤善司, 杉本幹哉, 中野典彦, 材料, **30**, 15 (1981).
- 48) 石原外美, 塩沢和章, 宮尾嘉寿, 材料, **31**, 390 (1982).
- 49) 石原外美, 塩沢和章, 宮尾嘉寿, 日本機械学会論文集, A-50, 1123 (1984).