変動荷重下でのガラス繊維強化複合材料の累積疲労損傷 に関する信頼性工学的研究*

市川 昌弘**, 秋田 敏**, 岸本 哲***

Reliability Engineering Approach to Cumulative Fatigue Damage of a Glass Fiber Reinforced Composite Material under Varying Amplitude Loading

by Masahiro ICHIKAWA, Satoshi AKITA, and Satoshi KISHIMOTO

The statistical nature of the cumulative cycle ratio, $D = \sum n_i / \bar{N}_i$, of a chopped-strand-mat glass fiber reinforced plastic under random and program loading has been studied experimentally, where $\bar{N}_i$ was the median life at the stress amplitude σ_i as obtained from the $S-N$ curve. In similar to the fatigue life N in constant amplitude tests, D followed a log-normal distribution approximately. The variance of $\log D$ in the random and the program load tests was approximately the same as that of $\log N/\bar{N}$ in the constant amplitude tests. This implies that the coefficient of variation of D is approximately equal to that of N . The mean of $\log D$ was not equal to zero, hence Miner's rule did not hold statistically. A phenomenological explanation of the tests results was attempted.

Key Words: Fatigue, Composite Material, Random Load, Cumulative Cycle Ratio, Statistical Nature, Log-Normal Distribution

1. 緒 言

さきに著者らは、ばね用洋白線について、二段二重試験（8条件につき各50個の試験片を使用）、二段四重試験（2条件につき66個と100個の試験片を使用）二段多重試験（5条件につき各約50個の試験片を使用）をおこない、累積繰返し数比は同一材料、同一条件下でもばらつきを示すことを示した^{(1)~(3)}。類似の結果は他の研究者によっても報告されている⁽⁴⁾。変動荷重下での疲労に対し信頼性工学的手法を適用するためには、種々の材料について種々の条件下で累積繰返し数比の統計的性質をしらべ、共通の特徴を抽出することが望まれる。

累積繰返し数比の統計的性質に関する従来の実験はほとんどが金属材料に関するものである。複合材料は軽量化などの目的で構造材料としての使用が増加しており、一定荷重振幅に対してだけでなく、変動荷重下での疲労寿命の統計的性質を知る必要がある。この問題に対しては谷本ら⁽⁵⁾による朱子織りガラスマット

FRPのランダム疲労試験、Schützら⁽⁶⁾による炭素繊維強化積層板のフライトシミュレーション変動荷重試験などが報告されているが、これらは比較的少数の試験片による実験であり、多数の試験片を用いて統計的実験をおこなった研究は見あたらないようである。

本研究では、チョップドストランドガラスマット強化プラスチックについて、一定荷重振幅試験、プログラム荷重試験、ランダム荷重試験をおこない、累積繰返し数比の統計的性質についてしらべた。

2. 累積繰返し数比の定義

一定荷重振幅下での寿命にはばらつきがあるから、累積繰返し数比を実験結果から計算するためには、何らかの代表寿命を用いる必要がある。実用上は $S-N$ 曲線による寿命を代表寿命とするのが便利である。 $S-N$ 曲線は、応力を独立変数とした最小二乗法により求めることが多い。 $S-N$ 曲線の直線傾斜部では疲労寿命は対数正規分布にほぼ従うことが多いから、このようにして求めた $S-N$ 曲線による寿命は平均寿命ではなく中央値寿命 $\bar{N}$ とみなすのが妥当であろう。本論文においても代表寿命として $S-N$ 曲線による寿命を用いることにする。したがって本論文における累積繰返し数比 D の定義は次式で表される。

* 昭和60年4月2日 第62期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和59年9月3日。

** 正員、電気通信大学（〒182 調布市調布ヶ丘1-5-1）。

*** 准員、科学技術庁金属材料技術研究所（〒153 東京都目黒区中目黒2-3-12）。

$$D = \sum(n_i/\bar{N}_i) \quad \dots\dots\dots (1)$$

一定荷重振幅での寿命が対数正規分布に従うとき、平均寿命 $\bar{N}$ と中央値寿命 $\bar{N}$ の間には $\bar{N} = \bar{N}\sqrt{1+\eta_N^2}$ の関係がある。ここで η_N は寿命の変動係数である。 η_N が応力レベルによらず一定であるとする $\sum(n_i/\bar{N}_i)$ と $\sum(n_i/\bar{N}_i)$ の間には次の関係がなりたつ。

$$\sum(n_i/\bar{N}_i) = \sqrt{1+\eta_N^2} \sum(n_i/\bar{N}_i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

著者らは前報⁽¹⁾⁽²⁾において、統計的平均としてのマイナー則として

$$E[\sum(n_i/\bar{N}_i)] = 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

を考え、その成立条件を明らかにした。式(2)を用いると式(3)は次のように書ける。

$$E[\sum(n_i/\bar{N}_i)] = \sqrt{1+\eta_N^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

後述(4章)のように本実験では $D = \sum(n_i/\bar{N}_i)$ は対数正規分布にほぼ従いまた D の変動係数 η_D は一定荷重振幅下での寿命の変動係数 η_N にほぼ等しいので、式(4)は次式と等価と考えてよい。

$$E[\log \sum(n_i/\bar{N}_i)] = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

本論文では、式(3)の成否の検討には式(5)を用いる。なお、以下において $\log$ はすべて常用対数を意味するものとする。

3. 実験方法

供試材はマトリックスとして不飽和ポリエステルを使用し、強化材としてランダムチョップドストランドガラスマットを使用した、ガラス繊維強化プラスチック RMC-310 (大日本インキ製)である。その素材構成を表1に、機械的性質を表2に示す。試験片はその長手方向が板 (300 mm×300 mm×6 mm) の圧延方向に

表1 供試材の素材構成

Matrix	polyester resin
Reinforcement	chopped strand glass mat
Glass weight content	60 %
Length of glass fiber	25.4 mm
Diameter of glass fiber	13 μ m

表2 供試材の機械的性質

Tensile strength (MPa)	236
Compressive strength (MPa)	346
Bending strength (MPa)	407

一致するよう切り出し、サイドカッタを用いて図1に示す形状に仕上げた。加工後、残留ひずみを取り除くため、80°C、2 h のアフタキュアをおこなった。試験片を試験機に取付けの際には、厚さ1 mm のアルミニウム板をつかみ部に接着した。

実験には電気油圧サーボ疲労試験機を用い、一定荷重振幅試験、ランダム荷重試験、およびプログラム荷重試験をおこなった。一定荷重振幅試験においては荷重信号として試験機付属の発振器によるサイン波を用いた。ランダム荷重試験においては、寿命のばらつきを求めるという目的から、信号源の安定性が不可欠であるので、マイクロコンピュータを用いて発生させた擬似的な狭帯域ランダム信号を用いた⁽⁷⁾。このランダム信号は10段階に設定した振幅 σ のサイン波がほぼレイリー分布に従う頻度でランダムに出現するものである。最大振幅 $\sigma_{\max}$ の大きさは図2に示すようにレイリー分布

$$P(\sigma) = \frac{\sigma}{\sigma_0^2} \exp\left(-\frac{\sigma^2}{2\sigma_0^2}\right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

の σ_0 の10/3倍にとり、各振幅の大きさはこれを10等分して、 $\sigma = (\sigma_{\max}/10) \cdot i$ ($i=1 \sim 10$) とした。プログラム荷重試験は図3のブロック荷重を破断まで繰返すもので試験機付属の発振器をプログラムすることで荷重信号を得た。この信号は一ブロックを17920回としランダム荷重試験の場合とおなじく10段階に設定した振幅のサイン波がレイリー分布にほぼ従う頻度で出現する。

図1 試験片形状

図2 レイリー分布

すべての試験とも信号の周波数は5 Hzであり、荷重は完全両振である。

試験中は試験片表面温度が $40 \pm 2^\circ\text{C}$ になるようコントロールした。

4. 実験結果

4.1 一定荷重振幅試験

4.1.1 S-N 曲線 応力振幅 σ が137.2 MPaから58.8 MPaの範囲にある10応力レベルにおいて、それぞれ5本から10本の試験片について一定荷重振幅試験をおこない、破断寿命 N を求めた。その結果を図4に示す。最小二乗法によって、 $\log \sigma$ と $\log N$ 間および σ と $\log N$ 間について直線回帰をおこない、S-N 曲線の表示式を決定した。最小二乗法の適用にあたっては応力を独立変数にとった。後述の累積繰返し数比の計算は、これらの二つのS-N 線曲を用いておこなったが、両者の間には際立った差は認められなかった。したがって、以下では両対数S-N 曲線による計算結果のみを述べることにする。このS-N 曲線は次式で表される。

$$\sigma^{7.944} N = 2.014 \times 10^{19} \dots\dots\dots (7)$$

4.1.2 破断寿命の分布 $\sigma = 68.6 \text{ MPa}$ と 98.0

図3 ブロック荷重

図4 S-N 曲線

MPaではそれぞれ10本の試験片について試験をおこなった。これらの破断寿命の対数正規確率紙へのプロットを図5に示す。これより破断寿命は対数正規分布にほぼ従うとみてよいであろう。

4.2 ランダム荷重試験 ランダム荷重試験は、最大応力振幅 $\sigma_{\max} = 98.0, 117.6, 137.2 \text{ MPa}$ の3種類の荷重レベルで、それぞれ約20本ずつ(表3参照)の試験片について試験をおこなった。式(7)のS-N 曲線を全応力範囲に外挿して(修正マイナー則の考えにより)、 $D = \sum(n_i/\bar{N}_i)$ を計算した。 D の対数正規確率紙へのプロットを図6に示す。これより D は対数正規分布にほぼ従うとみてよいであろう。また D の平均値 μ_D 、分散 σ_D^2 、変動係数 η_D と $\log D$ の平均値 $\mu_{\log D}$ 、分散 $\sigma_{\log D}^2$ の値を表3に示す。

4.3 プログラム荷重試験 $\sigma_{\max} = 98.0 \text{ MPa}$ において16本の試験片についてプログラム荷重試験をおこなった。 D の対数正規確率紙へのプロットを図7に示す。これより D はこの場合もほぼ対数正規分布に従うとみてよいであろう。また D の平均値 μ_D 、分散

図5 一定荷重振幅試験の寿命の分布(対数正規確率紙)

図6 ランダム荷重試験の D の分布(対数正規確率紙)

表 3 変動荷重試験における D および $\log D$ の統計値

	Group	$\sigma_{\max}$ MPa	Sample Size	$D = \sum n_i / \bar{N}_i$			$\log D = \log \sum n_i / \bar{N}_i$	
				Mean	Variance	Coeff. of Variation	Mean	Variance
Random	R-10	98.0	21	0.684	0.259	0.744	-0.277	0.1173
	R-12	117.6	20	0.770	0.274	0.680	-0.187	0.0625
	R-14	137.2	20	0.799	0.515	0.898	-0.211	0.1020
Program	P-10	98.0	16	0.802	0.300	0.682	-0.173	0.0681

図 7 プログラム荷重試験の D の分布 (対数正規確率紙)

σ_D^2 , 変動係数 η_D と $\log D$ の平均値 μ_{LD} , 分散 σ_{LD}^2 の値を表 3 に示す。

なお, 図 5~7 に対応して, 正規確率紙とワイブル確率紙へのプロットもおこなったが, いずれの場合も正規分布には良く適合せず, また 2 母数ワイブル分布への適合性も対数正規分布への適合性に比べて若干劣っていた。

5. 実験結果の統計解析

5.1 一定荷重振幅試験における破断寿命のばらつき 4.1.2 項で述べたように, $\sigma = 68.6$ MPa と 98.0 MPa での, それぞれ 10 本の試験片の $\log N$ は正規分布に従うので, この 2 応力レベルでの $\log N$ について等分散の検定をおこなった。検定によれば有意水準 5% で有意差が認められなかった。そこで $\log N$ の分散は応力レベルによらず一定と考え, 一定荷重振幅試験における 56 本の試験片全ての $\log(N_i/\bar{N}_i)$ をプールして $\log(N_i/\bar{N}_i)$ の分散を求めると, 0.1128 となった。応力レベルを固定すると $\log(N_i/\bar{N}_i)$ の分散は $\log N_i$ の分散に等しいから, 各応力レベルで $\log N$ の分散 $\sigma_{LN}^2 = 0.1128$ と考えてよい。

一方, ある量 x が対数正規分布に従うとき, x の変動係数 η と $\log x$ の分散 σ_L^2 の間には

$$\eta = \sqrt{\exp\{(2.3\sigma_L)^2\} - 1} \quad (8)$$

の関係が成立する。上式と $\sigma_{LN}^2 = 0.1128$ から, N の変動係数 η_N を計算すると, $\eta_N = 0.903$ となる。

なお上記のプールしたデータから $\log(N_i/\bar{N}_i)$ の平均値を計算するとほぼ完全に零となる。これは N_i が対数正規分布に従うとき $\log \bar{N}_i = \log \bar{N}_i$ が成り立つからであり, 当然の結果である。

5.2 ランダム荷重試験における $\log D$ の等分散, 等平均の検定 4.2 節に述べたように, 3 種類の荷重レベルでのランダム荷重試験における $\log D$ はそれぞれ正規分布に従うので, これら荷重レベルでの $\log D$ について等分散, 等平均の検定をおこなった。等分散の検定には Bartlett の方法⁽⁹⁾を用いた。検定の結果によれば, $\log D$ の分散と平均値にはいずれも有意水準 5% で有意差が認められなかった。

5.3 変動荷重試験における $\log D$ の等分散, 等平均の検定 3 種類のランダム荷重試験の結果に, プログラム荷重試験の結果を加えて, $\log D$ について等分散と等平均の検定をおこなった。等分散の検定結果を表 4 に, 等平均の検定結果を表 5 にしめす。検定結果によれば $\log D$ の分散と平均値には有意水準 5% で有意差は認められなかった。

5.4 一定荷重振幅試験の結果と変動荷重試験の結果の比較 変動荷重試験の結果すなわち, ブロック荷重試験の結果とランダム荷重試験の結果とをすべてプールした場合の $\log D$ を一定荷重振幅試験の結果と比較する。一定荷重振幅試験では $\log(N/\bar{N})$ が変動荷重試験の $\log D$ に対応する。

一定荷重振幅試験での $\log(N/\bar{N})$ と変動荷重試験での $\log D$ について, 等分散の検定をおこなう。一定荷重振幅試験についての $\log(N/\bar{N})$ の分散は, 5.1 節で述べたように 0.1128 である。変動荷重試験の結果の $\log D$ の分散は表 4 より 0.0889 である。等分散の検定結果を表 6 に示す。検定結果によれば, 両者の分散には有意水準 5% で有意差は認められない。これより $\log D$ の分散は $\log(N/\bar{N})$ の分散, すなわち $\log N$ の

表 4 変動荷重試験における $\log D$ の等分散の検定

Group	Degree of Freedom	Variance V_L^2	Variance V^2	χ^2	χ_0^2	
R-10	20	0.1173	0.0889	2.48	7.81 (5%)	$\chi^2 < \chi_0^2$
R-12	19	0.0625				
R-14	19	0.1020				
P-10	15	0.0681				

表 5 変動荷重試験における $\log D$ の等平均の検定

Group	Degree of Freedom	Mean $\bar{X}_i$	Variance V_w^2	Degree of Freedom	Mean $\bar{X}$	Variance V_b^2	F	F_0	
R-10	21	-0.277	0.0889	73	-0.215	0.0416	2.14	2.47 (5%)	$F < F_0$
R-12	19	-0.187							
R-14	19	-0.211							
P-10	15	-0.173							

表 6 $\log N/\bar{N}$ と $\log D$ の等分散の検定

Group	Variance	Degree of Freedom	F	F_0	
Constant amplitude	0.1128	55	1.27	1.63 (5%)	$F < F_0$
Variable amplitude	0.0889	73			

分散に等しい。しかるに D と N はいずれも対数正規分布にほぼ従っているから、式(8)の関係より、 D の変動係数 η_D と N の変動係数 η_N は本実験の場合ほぼ等しい。

次に、変動荷重の場合の $\log D$ の平均値について検討する。 $\log D$ の平均値は表5より -0.215 である。一方、式(5)から、統計的マイナー則が成立する場合 $\log D$ の期待値は零である。 $\log D$ の平均値が零であるという仮説について検定をおこなうと、有意水準 1% でもこの仮説は棄却される。したがって、式(5)は成立しない。すなわち統計的マイナー則〔式(3)〕は本実験の場合成立しない。

6. 考 察

4 章および 5 章で示したように、本実験によれば、

(1) D の分布形は一定荷重振幅寿命 N の分布形と同じく対数正規分布にほぼ従う。

(2) D の変動係数は N の変動係数とほぼ一致する。

以下ではこの性質の説明を試みる。次の仮定をおく。

(a) 一定荷重振幅下での寿命は対数正規分布に従い、その変動係数は、応力レベルに依存しない。

(b) 試験片集団内での各試験片の一定荷重振幅寿

命 N の順位は、応力レベルによって変わらない。

(c) 変動荷重下での疲労破壊の条件は

$$\sum(n_i/N_i) = \lambda \quad \dots\dots\dots (9)$$

で表される。ここで N_i は個々の試験片の寿命で、 λ は材料、負荷条件(荷重の順序など)に依存する定数である。

仮定(a)は $S-N$ 曲線の直線傾斜部では近似的に成立すると考えられる。仮定(b)は疲労寿命のばらつきが初期欠陥寸法など材料組織のばらつきに主として支配される場合は妥当であると思われる。仮定(c)は、この仮定から導かれる帰結の正否によって検証される性質のものである。

さて、変動荷重下での疲労寿命(総繰返し数)を $N_{fs} (= \sum n_i)$ とし、振幅 σ_i の相対出現頻度を P_i とすると

$$n_i = N_{fs} \cdot P_i \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(10)を式(9)に代入し、 N_{fs} についてとくと

$$N_{fs} = \frac{\lambda}{\sum(P_i/N_i)} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式(10)、(11)より

$$n_i = \frac{\lambda P_i}{\sum(P_i/N_i)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式(12)より

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{\lambda \sum(P_i/\bar{N}_i)}{\sum(P_i/N_i)} \\ = \lambda \cdot \frac{N_1}{\bar{N}_1} \cdot \frac{1 + \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{\bar{N}_1}{\bar{N}_2} + \frac{P_3}{P_1} \cdot \frac{\bar{N}_1}{\bar{N}_3} + \dots}{1 + \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{N_1}{N_2} + \frac{P_3}{P_1} \cdot \frac{N_1}{N_3} + \dots} \quad \dots\dots (13)$$

しかるに仮定(a)、(b)より

$$N_i/\bar{N}_i = N_1/\bar{N}_1 \quad \dots\dots\dots (14)$$

すなわち

$$\tilde{N}_i/\tilde{N}_i = N_i/N_i \quad \dots\dots\dots(15)$$

が成立する。式(13), (15)より

$$D = \lambda N_i/\tilde{N}_i \quad \dots\dots\dots(16)$$

D の平均値, 標準偏差, 変動係数をそれぞれ μ_D, σ_D, η_D とし, 一定荷重振幅寿命の変動係数を η_N とすると式(16)より次の(i)~(iv)がみちびかれる。

(i) D は一定振幅寿命と同様対数正規分布に従う。

$$(ii) \quad \mu_D = \lambda\sqrt{1+\eta_N^2} \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$(iii) \quad \sigma_D = \lambda\eta_N\sqrt{1+\eta_N^2} \quad \dots\dots\dots(18)$$

$$(iv) \quad \eta_D = \eta_N \quad \dots\dots\dots(19)$$

以上により, 本章のはじめに述べた(1), (2)の性質が説明される。なお, λ は仮定(c)に述べたように材料や負荷条件に依存する定数であるから, 式(17)は μ_D が荷重順序などに依存するという実験事実と矛盾しない。ただし, 以上の説明は現象論的であり, λ の値そのものはこの理論からは得られない。なお仮定(a)で一定振幅寿命として, 2母数ワイブル分布を仮定すると, D も2母数ワイブル分布に従うことになる。

7. 結 言

チョップドストランドガラスマット強化プラスチックについて, 一定荷重振幅試験, プログラム荷重試験およびランダム荷重試験をおこない, 累積繰返し数比 $D = \sum(n_i/\tilde{N}_i)$ の統計的性質についてしらべた。ここで $\tilde{N}_i$ はS-N曲線の与える寿命で, 中央値寿命に相当する。本実験より以下のことが明らかとなった。

(1) ランダム荷重試験およびプログラム荷重試験において, D は対数正規分布を示した。一定荷重振幅での疲労寿命 N も対数正規分布を示した。

(2) 3種類の応力レベルでのランダム荷重試験の間には, $\log D$ の平均値, 分散に関して有意差が認め

れなかった。また, プログラム荷重試験とランダム荷重試験の間にも $\log D$ の平均値, 分散に関し, 有意差が認められなかった。

(3) ランダム荷重試験およびプログラム荷重試験の全データをプールした $\log D$ の分散を, 一定荷重振幅での $\log(N/\tilde{N})$ の分散と比較した。これらの分散には有意差が認められず, (1)の結果と考え合せて, D の変動係数は N の変動係数にほぼ等しいことがわかる。

(4) ランダム荷重試験およびプログラム荷重試験の全データをプールした $\log D$ の平均値が零であるという仮説は1%の有意水準で棄却され, 統計的マイナー則は成立しない。

(5) D の分布形, 変動係数と一定荷重振幅での寿命 N の分布形, 変動係数との関係について, 現象論的説明を試みた。

終わりに, 本研究に対しご助言を賜った本学 田中栄学長に厚く感謝の意を表します。また供試材を提供いただいた大日本インキ(株)にお礼申し上げます。また実験に協力された本学学生 西正嗣, 田中敦史の両君に感謝致します。

文 献

- (1) 田中・秋田, 機論, 38-313 (昭47), 2185.
- (2) Tananka, S., Ichikawa, M. and Akita, S., *Int. J. Fatigue*, 2-4 (1980), 159.
- (3) Tananka, S., Ichikawa, M. and Akita, S., *Eng. Fract. Mech.*, 20-3 (1984), 501.
- (4) 例えば, 岡村・板垣, 強度の統計的取扱, (昭54), 111, 培風館.
- (5) 谷本・ほか2名, 材料, 30-339 (昭56), 1190.
- (6) Schütz, D. and Gerharz, J. J., *COMPOSITES*, 8-4 (1977), 245.
- (7) 秋田・ほか2名, インタフェース, 9-8 (昭58), 241.
- (8) 近藤・舟坂, 技術者のための統計的方法, (昭42), 129, 共同出版.

討 論

〔質問〕 中川 隆 夫〔神戸大学工学部〕

(1) 供試材料としてFRP(ガラスマット)を用いた理由がなんら述べられていない。問題としている点は特定の材料についてのものではないが, 特にFRPを使った理由がわからない。

(2) S-N曲線上の寿命値は中央値寿命とみなしてよいとあるが, 各応力レベルでの中央値は必ずしもS-N曲線上にはない。代表寿命値としてS-N曲線

上の寿命値をとるのはどうであろうか。特に, 平均値と中央値間の関係 $\tilde{N} = \tilde{N}\sqrt{1+\eta_N^2}$ を用いているが, $\tilde{N}$ としてS-N曲線上の寿命値を用いてよいであろうか。

〔回答〕 (1) 供試材料としてFRPを用いた理由は緒言で述べたつもりであるが, 補足すると, (a)累積繰返し数比 D の分布について金属材料ではかなり実験があるが, 重要な構造材料であるFRPについ

では実験がほとんどないので、FRP の場合を調べたいと考えたこと、(b) D の分布について金属材料の場合との類似性ないし相異性を調べたいと考えたこと、などの理由による。

(2) 図4において1応力レベルあたりの試験片数が少ないので、各応力での実験点だけからその応力での中央値を決めるよりも、すべての応力でのデータから $S-N$ 曲線を決め、この $S-N$ 曲線上の値を中央値とするほうがより合理的と思われる。各応力レベルでの実験点の中央値がこの $S-N$ 曲線上に必ずしもものっていないのは、標本数が有限である以上やむをえない。平均寿命についても同様であり、各応力レベルでの実験点だけから平均値を求めるより、上記のようにして決めた中央値 $\bar{N}$ から $\bar{N} = \bar{N} \sqrt{1 + \frac{1}{n}}$ として求めるほうが、全データを有効に利用した推定になっていると思われる。

〔質問〕 児玉 昭太郎〔東京都立大学工学部〕

多大な労力を要する実験に精力的に取り組まれ、有用な情報を提供されていることに敬意を表する。以下の二点につきご教示願いたい。

(1) 図4の $S-N$ 曲線の最低負荷応力は約60 MPa であるが、 $\sigma_{\max} = 98$ MPa のランダム荷重試験では、大半の負荷応力は60 MPa 以下となる。このことは、 D にどのような影響を及ぼすものか。

(2) 供試材は圧延行程を経ているようであるが、この処理により強度のばらつきは減少するか否か、ご存知であればお教えいただきたい。

〔回答〕 (1) $S-N$ 曲線を求めるための実験は応力振幅58.8 MPa まで行っている。 $\sigma_{\max} = 98.0$ MPa でのランダム荷重試験では10 応力レベルのうち5 応力レベルが58.8 MPa 以上にある。これらの応力レベルの出現する割合は全体の繰返し数の18.9%である。一方、これらの応力レベルでの繰返しによる D は、58.8 MPa 以下に S/N 曲線を外そうしてすべての応力レベルについて計算した D の96.3%であり、 D のほとんどは $S-N$ 曲線の求まっている範囲の応力レベルによって決定されている。

(2) 圧延行程の処理が強度のばらつきに及ぼす影響については未検討であり、今後の課題とさせていただきます。

〔質問〕 田中 道七〔立命館大学理工学部〕

ガラス繊維強化複合材の累積疲労損傷について明解な統計解析をされている点に敬意を表す。以下の点についてご教示願いたい。

(1) 図6のランダム荷重下の D の分布をみると、●印や○印でとくに D の小さい所に実験点があり、

付図1 ランダム荷重試験の $\log D$ のヒストグラム

対数正規分布を仮定するには多少無理があり、 D の小さい所で危険側の推定を行うことになると思われる。対数正規分布をあてはめたときの適合度はどの程度か。

(2) 変動荷重試験に対して統計的マイナ則が成立しないことについて、お考えがあればお聞かせ願いたい。

〔回答〕 (1) ランダム荷重試験の D の分布が対数正規であるという仮説について、適合度検定 (χ^2 検定) を行ったら、5%の危険率でこの仮説は棄却されないという結果を得た。ただしこの検定を3種類の荷重レベルのそれぞれについて行うには標本数が十分でないで、ランダム荷重試験の61本の試験片のすべての D をプールしたものについて検定を行った。 $\log D$ のヒストグラムを付図1に示す。図中の実線は $\log D$ に正規分布をあてはめたもので、 $\log D$ は全体の傾向としては正規分布でよく表される。斜線部はご指摘の図6の●印の点に対応するもので、正規分布からややはずれているようにもみえるが、左裾野部の実験点が少ないので現状でははっきりしない。

(2) 前報^{(1),(2)}で示したように、統計的マイナ則が成立するためには、(a) $N/\bar{N}$ の分布 (N は個々の試験片の寿命、 $\bar{N}$ は平均寿命) が応力レベルによらず一致する、(b) 信頼度曲線が乗移る、という二つの条件がともに満足される必要がある。本実験の場合、4・1・2項に述べたことから(a)は近似的に成立していると期待されるので、統計的マイナ則が成立しない主要な原因は(b)の条件が満足されていないためと推定される。(b)が満足されないのは、いわゆる応力干渉効果(金属材料の場合は例えばき裂進展の加速現象など)のためと思われるが、本実験の材料の場合はその物理的内容は明らかでない。