実働荷重下の疲労き裂伝播の研究

(第 1 報) ランダム荷重とブロック荷重との比較

正員 町 田 進* 正員 大 岡 俊 之**
渡 辺 佐 千 雄* 森 田 明 保*

Fatigue Crack Propagation under Service Loading

(1st Report) Comparison of fatigue crack propagation behavior under random loading
with that under block loading

by Susumu Machida, *Member* Toshiyuki Ooka, *Member*
Sachio Watanabe, Akiyasu Morita

Summary

Most of actual service loads for real structures are random in general and, moreover, are stationary processes in many cases. It is essential for the structural engineer to be able to estimate fatigue strength of structural members under the effect of such randomness in service loading on the basis of the conventional fatigue test data. Engineers are sometimes confronted with the necessity of prompt relevant action on cracks discovered by inspection in service or in fabrication.

A number of investigations on estimating methods for fatigue crack growth under random loading have been carried out, but most of them are based on the assumption that the random loading can appropriately be replaced by so-called "block loading". Experimental investigations on the comparison between fatigue behaviors under purely random loading and block loading and/or constant amplitude loading are quite limited.

In this paper, the authors have conducted fatigue crack propagation tests using a computer aided testing system, where random process required was generated by micro-computer, as well as block loading and constant amplitude tests. Experimentally obtained features and comparative discussion based on the experimental data are given.

記 号 一 覧 表

a : き裂長
 B : CT (コンパクトテンション) 型試験片の板厚
 β : 大型計算機によるシミュレーションで得られた
応力範囲の最大値
 C : Paris 則の材料定数
 da/dN : 疲労き裂進展速度
 ΔK : 応力拡大係数範囲
 ΔK_{eff} : 有効応力拡大係数範囲
 ΔK_{eq} : 等価応力拡大係数範囲
 $\Delta(K_{eq})_{RF}$: レインフロー計数法による等価応力拡大係
数範囲
 ΔK_{rms} : 応力範囲の rms 値 (root-mean-square) ΔS_{rms}

から得られた応力拡大係数範囲
 ΔK_0 : 一定振幅荷重試験における応力比 $R=0$ の場合
の有効応力拡大係数範囲
 $\Delta \omega$: 余弦級数和方法によるシミュレーションの際
の周波数の増分
 ΔS : 応力範囲
 $\Delta S_{max}, \Delta S_{min}$: ブロック荷重試験の各ステップに対応
する応力範囲のうち、最大のものおよび最小のもの
 ΔS_{eq} : 等価応力範囲
 ΔS_{rms} : 応力範囲の rms 値 (root-mean-square)
 $E(\cdot)$: 期待値
 ϵ : 不規則度
 η : CT (コンパクトテンション) 試験片のき裂長と
試験片幅の比 $\eta=a/w$
 $f_P(\xi)$: 応力範囲の確率密度関数

* 東京大学工学部船舶工学科

** 住友金属(株); 研究当時東大大学院

$\Gamma(\cdot)$: ガンマ関数

k : ブロック荷重試験におけるステップ(段)数

m : Paris 則の材料定数

N : 荷重繰返し数

N_B : ブロック荷重試験における累計ブロック数

N_d : 余弦級数和の方法におけるパワースペクトル分割数

N_0 : ブロック荷重試験における1ブロックの総繰返し数($\sum n_i$)

n_i : ブロック荷重試験における各ステップの繰返し数

ω : 振動数, 周波数

ω_0 : 余弦級数和の方法によるランダム波のベースになる周波数(スタート時 $\omega_0=0$)

ω_n : 1自由度力学系の固有振動数

ϕ_j : 余弦級数和の方法における $0 \leq \phi_j \leq 2\pi$ に一様分布するランダム位相差

R : 応力比 $R=S_{min}/S_{max}$

$R[\cdot]$: 自己相関関数

S_{mean} : 平均応力

S_{op} : き裂開口応力

$S_p(\omega)$: パワースペクトル密度

σ_{rms} : 応力の瞬時値の rms 値

σ_x : 標準偏差

U : き裂開口応力比

W : CT 試験片の幅

$\zeta, ZETA$: 1自由度力学系の減衰定数

1 緒 言

船舶, 航空機, 橋梁および圧力容器などの, 大形で複雑な構造物の製作において重要なことは, 要求される機能を果たすために, 材料, 設計, 施工, 運転および保守等の各段階における要求レベルを全体的なコストを考慮して最適にすることである。このため設計段階では, 使用条件に対して, 使用材料, 部材寸法を決定する。しかしこのような大形溶接構造物では, 多くの場合, 不可避免的に存在すると考えられる何らかの欠陥から, 荷重の繰返しを受けてき裂が発生, 伝播する疲労挙動が問題となる。

したがって合理的な疲労破壊防止の設計手法では, 採用した検査法の精度を基礎として初期欠陥寸法を仮定し, そのき裂が脆性破壊等の不安定破壊を起す限界寸法までに成長することのないような手だてを講じなければならない。このためには疲労き裂の成長挙動を精度よく推定することが必要とされる。

しかし構造物が受ける荷重は, 一般に不規則(ランダム)である場合が多く, 現在のところ多くの材料につい

て蓄積されている一定振幅荷重下での疲労データを, ランダム荷重下での疲労挙動の予測にどのように役立てるかが問題となる。

現在までにランダム荷重下あるいは実働荷重下での疲労寿命を, 一定振幅荷重下の疲労き裂伝播特性から推定する目的で多くの研究が行われてきた。しかしこれらの研究で使われている“実働荷重”は真のランダム荷重であるものは少なく¹⁾²⁾, 多くは擬似ランダムあるいはブロック荷重で, しかもそれらと真のランダム荷重との関連について論じたものは非常に少ない³⁾⁴⁾。

本研究においては, マイクロコンピュータを用いてランダム波形を発生させて疲労試験を行い, ランダム荷重下での疲労き裂伝播特性を調べるとともに, ランダム荷重の分布をもとにしたブロック荷重試験を行って, ブロック荷重下での疲労き裂伝播特性に対して考察を行い, 最後に両者の疲労特性を比較することによって, 両者の関連について論じた。

2 ランダム波形のシミュレーション方法

ランダム波形のシミュレーション方法としては, 種々の方法が提案されているが, 本研究においては Fig. 1 に示す質量-バネ-減衰器が構成する1自由度力学系にランダム外力が作用する場合の系の応答を用いる方法(1自由度系の応答法)および余弦級数和の方法によった。

1自由度系の応答法は, 系にランダム外力 $f(t)$ が作用する場合の運動方程式を(1)式のように定める。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (1)$$

(1)式を標準形に書き換えて,

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = f(t)/m \quad (2)$$

ここで, $\omega_n = \sqrt{k/m}$: 固有振動数

$\zeta = c/2\sqrt{m \cdot k}$: 減衰定数

(2)式をもとにして, 系のインパルス応答をシミュレートするためには, (3)式の計算を実行すればよい。

$$\left. \begin{aligned} x &= x_{00} \cdot u_1(t) + v_{00} \cdot u_2(t) + [\text{STEP}] \cdot u_3(t) \\ \dot{x} &= v_{00} \cdot v_1(t) + v_{00} \cdot v_2(t) + [\text{STEP}] \cdot v_3(t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで

Fig. 1 Vibrating mass with one degree of freedom

$$\begin{aligned}
u_1(t) &= \exp(-\zeta \omega_n t) \cdot \{\cos(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t) \\
&\quad + \zeta / \sqrt{1-\zeta^2} \cdot \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t)\} \\
u_2(t) &= \exp(-\zeta \omega_n t) \cdot \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t) / \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \\
u_3(t) &= 1 / (\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}) \int_0^t \exp\{-\zeta \omega_n (t-\tau)\} \\
&\quad \times \sin\{\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n (t-\tau)\} d\tau \\
v_1(t) &= -\omega_n / (\sqrt{1-\zeta^2}) \exp(-\zeta \omega_n t) \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t) \\
v_2(t) &= \exp(-\zeta \omega_n t) \cdot \{\cos(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t) \\
&\quad - (\zeta / \sqrt{1-\zeta^2}) \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t)\} \\
v_3(t) &= u_2(t)
\end{aligned}$$

[STEP]: $[-1 \sim 1]$ の一様乱数

(3) 式に対して, ω_n, ζ を決定すれば, $u_1(t) \sim v_3(t)$ の係数が計算され, 初期条件として x_{00}, v_{00} を与えることにより, x と v が計算される。 Δt ごとに $x \rightarrow x_{00}, v \rightarrow v_{00}$ と置き換えて計算し, x の値をトレースしてゆけば, 系の応答がシミュレーションできる。

次に余弦級数和による方法であるが, これはフーリエ逆変換を利用したもので, エルゴード性を有する定常ガウス過程が中心極限定理により, (4) 式を用いて計算することが可能で, 広く応用がされ, 実用性が確認されている⁵⁾⁶⁾。すなわちランダム波を次式のように表わす。

$$\begin{aligned}
y(k \Delta t) &= \{S_y(\omega_0) \Delta \omega\}^{1/2} \\
&\quad + \sum_{j=1}^n \left[2 \{S_y(j \Delta \omega) \cdot \Delta \omega\}^{1/2} \cos\left(\frac{\omega_j t}{N_d}\right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \phi_j\right) \right] \quad (4)
\end{aligned}$$

ここで, $S_y(\omega)$: パワースペクトル密度

ϕ_j : $0 \leq \phi_j \leq 2\pi$ に一様分布するランダム位相差

N_d : パワースペクトル分割数

ω_0 : ランダム波形のベースになる周波数 ($k=0, \omega_0=0$)

$\Delta \omega$: 周波数の増分

n : 連続波形を1回に発生しうる限界値

k : シミュレート点数

マイクロコンピュータを使用して実験を行うために, 計算時間の短縮化が必要である。このため本研究ではFFT(高速フーリエ変換)を用いて計算の高速化をはかった⁷⁾。

Fig. 2 に本実験に用いた5種類のパワースペクトルパターンを示す。SタイプのものはS1, S2, S3となるに従って, 周波数成分の幅が倍々と広がってゆく矩形スペクトルで, Dタイプのものは2つの離散的周波数帯域成分をもち, D2の方がよりこの間隔が広がっている。

本実験で実際に用いた周波数は, ほぼ5Hzまでのものであり, Fig. 3 にシミュレートされた波形の例を示す。

Fig. 2 Patterns of power spectrum investigated

Fig. 3 Example of generated random vibrations for given power spectrums

前述の2つのシミュレーション方法を比較してみると, 1自由度系の応答の方法は計算式が簡単であるため, 計算時間が短くてすむが, パワースペクトルの形状を任意に変化させて精度よいシミュレーションを行うことは困難である。一方, 余弦級数和の方法は任意のパワースペクトルを有する波形をシミュレートできるが, 1回の計算過程での繰り返し計算の回数が多く計算時間が長くなるため, 実験時に周波数の制限を受ける。

3 実験方法

3.1 供試材および試験片

実験に用いた供試材は一般構造用鋼のSS41で, 化学的組成と機械的性質をTable 1に示す。

試験片はFig. 4に示すようなコンパクトテンション型(CT)試験片で, 板厚9mm, 切欠先端部は0.15mmの幅でSaw Cutされており, 低応力の繰返しにより数mmの疲労予き裂を発生させ, これを初期き裂とした。試験片に対するK値の計算式はASTM E 647の規定に従ったもので, (5)式に示す。

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of tested steel

	C	Si	Mn	P	S
SS41	0.17	0.21	0.48	0.012	0.015

	σ_y kg/mm	σ_u kg/mm	EI %
SS41	28	44	33.4

Fig. 4 Compact Tension (CT) type specimen

$$\Delta K = \frac{\Delta S}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\eta)}{(1-\eta)^{3/2}} (0.886 + 4.64\eta - 13.32\eta^2 + 14.72\eta^3 - 5.62\eta^4) \quad (5)$$

ここで、 $\eta = a/W$, a : き裂長, W : 試験片幅

B : 試験の板厚, ΔS : 応力範囲

3.2 試験システム

ランダム荷重の試験システムの概要を Fig. 5 に示す。このシステムを簡単に説明すると、1 台のマイクロコンピュータをランダム波形発生専用として疲労試験機を制御し、もう 1 台を電気ポテンシャル法によるき裂長さの自動測定用（東京衡機製“クラックメーター”を使用

Table 2 Particulars of random loading fatigue tests

Specimen N O.	Specification	Nominal stress(kgf/mm ²)	
		Smean	ΔS_{rms}
RO1	ZETA = 0.01	1.91	0.23
RO2	" = 0.01	3.06	0.38
RO3	" = 0.05	3.06	0.38
RO4	" = 0.05	4.60	0.57
RS1	Spectrum : S1	3.06	0.38
RS2	" : S2	3.60	0.38
RS2'	" : S2	1.91	0.23
RS3	" : S3	3.06	0.38
RD1	" : D1	3.06	0.38
RD2	" : D2	3.06	0.38

した) とし、ランダム波形の Mean Cross の回数をカウントして、初期設定しておいた回数において測定したき裂長を自動的に記録した。ただし測定時の応力変動によってき裂先端部の開口位置も変わるので、ランダム荷重試験の場合はき裂長の自動測定の精度が落ちる懸念がある。そのためランダム波発生用のマイクロコンピュータは、き裂長さの測定用マイクロコンピュータに測定開始の指令を出すとともに、正弦波発生プログラムに移行して、一定応力時にき裂長さの測定を行い精度を確保した。測定終了後には、き裂長さの測定用マイクロコンピュータから逆に、もとのランダム波発生プログラムに戻るよう指令を出し、ランダム荷重試験を継続させた。なおマイクロコンピュータによるき裂長さの自動測定とともに、目視による測定も行った。

今回実験を行ったランダム荷重試験の詳細を Table 2 に示す。RO1～RO4 は減衰定数および応力条件をかえた 1 自由度系の応答を用いシミュレートしたものであり、RS1～RS3, RD1, RD2 は Fig. 3 に示した 5 種類のパワースペクトルパターンに対応した条件で、余弦級数和方法を用いてシミュレートしたものである。

またブロック荷重試験では、前述の波形発生およびき裂長さの測定を 1 台のマイクロコンピュータで行

Fig. 5 Random fatigue testing system used

Fig. 6 da/dN vs. ΔK obtained from constant load amplitude test

わせた。

4 実験結果, 解析および考察

4.1 一定振幅荷重試験

まず, 基礎データを得るために, 一定振幅荷重による疲労き裂伝播試験を行った。応力条件は初期の公称応力で, 最大応力 $S_{\max} = 3.06 \sim 1.15 (\text{kgf/mm}^2)$, 応力範囲 $\Delta S = 2.68 \sim 1.15 (\text{kgf/mm}^2)$, 応力比 $R = S_{\min}/S_{\max} = 0 \sim 0.5$ (そのうち $R=0$ が6本), 繰返し速度 $1.0 \sim 5.0 (\text{Hz})$ で8本の試験を行った。得られた $da/dN \sim \Delta K$ の関係を Fig. 6 に示す。本研究では, 疲労き裂進展における第II領域のみを取り扱うものとするため, 得られたデータを直線回帰によって Paris の式へのあてはめを行った。結果, 次の値を得た。

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (6)$$

$$C = 8.19 \times 10^{-12}, \quad m = 3.64$$

単位は kgf, mm 系である。

この直線を Fig. 6 に記入してある。

4.2 ランダム荷重下での疲労き裂進展

ランダム荷重下での疲労き裂進展速度と一定振幅荷重下での疲労き裂進展速度を直接比較することができないために, 何らかのパラメーターを用いて両者に関連づけなければならない。ここでは (7) 式で定義される等価応力範囲 ΔS_{eq}^9 を用いて整理することにする。

$$\Delta S_{\text{eq}} = \left\{ \int_0^\infty \xi^m f_P(\xi) d\xi / \int_0^\infty f_P(\xi) d\xi \right\}^{1/m} \quad (7)$$

$f_P(\xi)$: 応力範囲の確率密度関数

m : (6) 式の m の値, ここでは $m = 3.64$ とした。
ランダム波形が狭帯域の場合は, 極値の分布がレイリ

一分布に従うことが理論的に確かめられている。

そこで, 応力の瞬時値 $S(t)$ の rms 値を

$$\sqrt{E[S^2(t)]} = \sqrt{R_{ss}(0)} = \sigma_{\text{rms}} \quad (8)$$

ここで, $E(\cdot)$: 期待値, $R(0)$: 自己相関関数とすれば, (7) 式による等価応力範囲は

$$\begin{aligned} \Delta S_{\text{eq}} &= \left[\int_0^\infty \xi^{m+1} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_{\text{rms}}^2}\right) d\xi / \int_0^\infty \xi \times \right. \\ &\quad \left. \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_{\text{rms}}^2}\right) d\xi \right]^{1/m} \\ &= \left[\Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) \right]^{1/m} \sqrt{2} \sigma_{\text{rms}} \quad (9) \end{aligned}$$

ここで $\Gamma(\cdot)$: ガンマ関数

となり, 等価応力範囲 ΔS_{eq} が応力の瞬時値の rms 値である σ_{rms} と関係づけることができる。

(7) 式において $m=2$ とした場合が, Barsom⁹⁾ が結論した“疲労き裂進展速度 da/dN は, 応力範囲の rms 値 ΔS_{rms} によって与えられる”という場合に相当する。

また, 一定振幅荷重とランダム荷重の両試験における平均応力の有無によるき裂伝播速度の違いを, き裂開閉挙動にもとづいた Elber¹⁰⁾ 型の式を用いて調整し, 両者の比較に応力比の影響を除去する解析も行った。

まず, Elber と同様に, クリップゲージを用いて各応力範囲で開口応力 S_{op} を測定し, 開口応力比 U , 有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を求め, 次式を得た。

$$\begin{aligned} da/dN &= C[\Delta K_{\text{eff}}]^m = C[U\Delta K]^m \\ U &= 0.535 + 0.29 R \quad (10) \end{aligned}$$

ここで

$$\begin{aligned} U &= (S_{\max} - S_{\text{op}}) / (S_{\max} - S_{\min}): \text{開口応力比} \\ \Delta K_{\text{eff}} &= U\Delta K: \text{有効応力拡大係数範囲} \\ R &: \text{応力比} \end{aligned}$$

前述の一定振幅荷重試験での応力比の条件は $R=0$ が多いので, $R=0$ の時の ΔK_{eff} の値を ΔK_0 と表わすと, 任意の R の一定振幅荷重試験のき裂伝播速度は (10) 式より,

$$\begin{aligned} da/dN &= C[\Delta K_{\text{eff}}]^m = C[(\Delta K_{\text{eff}}/\Delta K_0) \cdot \Delta K_0]^m \\ &= C\{(0.535 + 0.29 R)/0.535\} \Delta K_0^m \\ &= C[(1 + 0.542 R) \cdot \Delta K_0]^m \quad (11) \end{aligned}$$

となる。なお (11) 式の R の値は, ランダム荷重試験と同じ平均応力を加えた時の値に修正したものである。この値を代入し, 応力比を考慮したき裂伝播速度を算出した。

まず, 比較的狭帯域ランダム波形に近いと考えられる1自由度力学系モデルの応答を用いる方法による RO1 ~ RO4 について, Barsom の提唱した ΔS_{rms} より計算される ΔK_{rms} による整理を行った。結果を Fig. 7 に示す。この図中で1点鎖線は, 応力比 $R=0$ の場合の一定振幅荷重下でのき裂進展速度 da/dN の平均値を示

Fig. 7 da/dN vs. ΔK_{rms} (root mean square of ΔK)

Fig. 8 da/dN vs. ΔK_{eq} (ΔK based on equivalent stress range)

す。また、破線は(11)式による推定線である。これを見ると、かなり危険側の推定を行っていることがわかる。余弦級数和方法による RS 1~RS 3, RD 1, RD 2 についても同じことがいえる。

次に(7)式における m の値を、実際の一定振幅荷重下での $da/dN \sim \Delta K$ の傾き、つまり $m=3.64$ とした場合を考えてみる。前述したと同様に RO 1~RO 4 について応力範囲の分布をレイリー分布と仮定して ΔS_{eq} を求めて、等価応力拡大係数範囲 ΔK_{eq} を計算して整理したものが、Fig. 8 である。

結果は、どの場合でも平均応力を考慮した破線よりもやや安全側の推定となっている。これは実際の試験時に

おける応力範囲の分布が、レイリー分布とは一致しないためではないかと考えられる。

ここで、平均ゼロの定常ガウス過程において、よく用いられる不規則度 ε (irregularity factor) を次のように定義する。

$$\varepsilon = [1 - \{\nu^+(0)/\nu_P^+\}^2]^{1/2} \quad (12)$$

ここで $\nu^+(0)$: プラス勾配での零値通過頻度

ν_P^+ : 極大点の頻度

したかつて、狭帯域ほど ε が0に近づき、正規分布に近くなる。本論文ではデータを整理、解析する際、この不規則度をランダム性を表わす目安として用いた。

不規則度の大きな一般のランダム波形については、狭帯域の場合のように応力範囲の分布が理論的には求められない。そこで大型計算機を用いて、余弦級数和方法により、(4)式を実験に用いられたと同じ5種類のパワースペクトルについてシミュレーションを行った。各スペクトルについて1,000個のピーク値が得られるごとに初期乱数を変更し、10,000個のピーク値が得られるまで継続した。ここで各スペクトルについてピーク値の分布を求めたものを Fig. 9 に示す。図中の曲線はレイリー分布を表わす。これを見ると当然のことながら、狭帯域と考えられる S1 スペクトルのものが最もレイリー分布に近く、広帯域波と考えられる D2 スペクトルがこれと最もかけ離れている。これは実験で求められた不規則度およびパワースペクトルから理論的に計算して得られた不規則度の傾向とも一致する。ここでの応力範囲の分布は、得られたピーク値に対しレンジ法によりカウントしたものである。

得られた応力範囲の分布をフェアリンクして、近似確率密度関数を求めた。これを(7)式に代入して $m=3.64$ として等価応力範囲 ΔS_{eq} を求め、等価応力拡大

Fig. 9 Distributions of peak stress obtained from simulated random loadings as compared with Rayleigh distribution

Fig. 10-a da/dN vs. ΔK_{eq} (ΔK based on equivalent stress range)

Fig. 10-b da/dN vs. ΔK_{eq} (ΔK based on equivalent stress range)

係数範囲 ΔK_{eq} を計算した。結果を、Fig. 10-a, 10-b に示す。

図より、RD 2, RS 2' (パワースペクトルは RS 2 と同じであるが、応力条件を RS 2 よりも低く与えた) に対しては平均応力を考慮した場合は、良い推定を行っているが、RS 2 に対しては、やや危険側の推定となっている。これに対し RD 1 に対しては、やや安全側過ぎる推定となっていることがわかる。

最後に波数の計数法について考察を行う。今までは単に相継ぐピーク値間を 1/2 サイクルとしてカウントするレンジ法を用いてきた。しかし一般的に、ランダム波形に対して有効とされるレインフロー法や、それとほぼ類

Fig. 11 Illustration of cycle counting by "Rainflow" method

似の結果が得られる方法がいくつか提案されている。ここではレインフロー法を例にとって考えてみることにする。

レインフロー法の波形カウントは、Fig. 11 の例に示すように、応力あるいはひずみを横軸に、時間軸を垂直下向きに縦軸としてとり、極大値と極小値とを結合した仮想の多重屋根に、上から流れ落ちる雨水の流れを考えればよい。この場合のカウントの約束は次の2点である。①流れは各屋根のつけ根より流れ出し、上から落下した流れと下の屋根を流れる流れがぶつかるポイントにおいて、流れ始めたポイントとの水平距離が長いものが流れ続け、短いものは止められる。②スタートした極大値あるいは極小値よりも絶対値の大きな極大値あるいは極小値が現われると流れは止められる。このように止められた流れの流れた水平距離を 1/2 サイクルとしてカウントするのが、レインフロー法である。

しかし、このままの方法ではアルゴリズムが複雑となるため、本研究ではより簡単化されたもの¹¹⁾を用いて波数をカウントした。最も広帯域ランダム波形である RD 2 に対して、レンジ法およびレインフロー法によってカウントされた応力範囲の分布を比較したものが、Fig. 12 で、明らかに両者の差が見うけられる。

このようにしてレインフロー法を用いて応力範囲の分布を求め、等価応力拡大係数範囲 (ΔK_{eq})_{RF} によって整理したものが、Fig. 13-a, Fig. 13-b である。これと Fig. 10-a, 10-b を比較してみてもわかることは、狭帯域波形の RS 1, RD 1 に対してはほとんど差が見られないが、広帯域波形の RD 2 に対しては、より安全側の評

Fig. 12 Comparison of distribution of cyclic stress range obtained from "Range-Mean" and "Rainflow" counting methods

Fig. 13-a da/dN vs. $(\Delta K)_{eq}$ based on Rainflow counting

価を行っており、波形カウント法による差は、広帯域ランダム波形に対して顕著に見られるのではないかと考えられる。

4.3 ブロック荷重下での疲労き裂進展

本研究において行ったブロック荷重試験は、応力範囲の分布をレイリー分布をもとにしたもの、およびシミュレーションにより得られた近似分布をもとにしたもので、ブロックの段数は8～10である。これらブロック荷重試験の詳細を Table 3 に示す。

ブロック荷重試験における等価応力範囲 ΔS_{eq} は、WES 2805-1980⁽¹²⁾の規定に従って、

Fig. 13-b da/dN vs. $(\Delta K)_{eq}$ based on Rainflow counting

$$\Delta S_{eq} = \left[\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^k (\Delta S_i)^m \cdot n_i \right]^{1/m} \quad (13)$$

ここで、 $N_0 = n_1 + n_2 + \dots + n_k$: 1 周期の総繰り返し数

k : 応力のステップ数

n_i : それぞれの応力ステップ ΔS_i での繰り返し数

と定義する。

以下考察を加えた項目ごとに述べる。

(a) 低応力成分の影響

まずブロック荷重試験下で、き裂進展にほとんど寄与しないと考えられる低応力範囲を省略した場合の影響について調べてみる。Fig. 14 に示すように B1 は $\Delta S_{max} = 4.10(\text{kgf/mm}^2)$ 、 $\Delta S_{min} = 1.07(\text{kgf/mm}^2)$ で8段階

Table 3 Particulars of block loading fatigue tests

Specimen N O.	Block Pattern	Block size N_0 (cycles)	Number of steps k	Initial nominal stress (kgf/mm ²)				
				S_{max}	S_{mean}	S_{min}	ΔS_{max}	ΔS_{min}
B 1		10000	8	4.10	—	0	4.10	1.07
B 2		171 93	10	4.10	—	0	4.10	0.40
B 3		10000	8	4.10	—	0	4.10	1.07
B 4		10000	8	4.10	—	0	4.10	1.07
B 5		10000	8	3.66	—	0	3.66	1.07
B 6		400	7	3.66	—	0	3.66	1.07
B 7		10000	8	4.61	3.06	1.51	3.10	0.69
B 8		10000	8	4.10	—	0	4.10	1.07
B 9		10000	8	3.10	—	0	3.10	0.69
B10		10000	8	5.11	3.06	1.01	4.10	1.07

Fig. 14 Cut-off effect of low stress level blocks on fatigue crack propagation

Fig. 16 Effect of block size on fatigue crack propagation

Fig. 15 Truncation effect of high stress level with low frequency of occurrence in block loading on fatigue crack propagation

のブロックで、B2は $\Delta S_{\max}=4.10(\text{kgf/mm}^2)$ 、 $\Delta S_{\min}=0.40(\text{kgf/mm}^2)$ で10段のブロックである。ここでの応力条件は、表も含めすべて初期の公称応力で表わす。B1, B2ともに応力範囲の分布はレイリー分布に従っており、B1はB2の小さな2つの応力レベルを省略したもので、B1の1周期の総繰返し数を10,000とした。B1, B2のき裂進展曲線をブロック数ベースで比較したものを、Fig. 14に示す。両者のき裂進展曲線はほぼ一致しており、この実験においては $\Delta S < 1.07(\text{kgf/mm}^2)$ の低応力レベルは省略しても差しつかえないと考えられた。

(b) 小頻度高応力の影響

B5は、B1の $\Delta S_{\max}=4.10(\text{kgf/mm}^2)$ （出現回数5回/ブロック：1ブロック=10,000サイクル）を一段下のステップに下げた（Truncationした）形のブロックである。Fig. 15に両者のき裂進展曲線を示す。B5の方がB1より速く進展しているのがわかる。B1の最大応力は1ブロックにつき5回出現しているだけであり、B5の最大応力に比べて約10%大きいだけである。

Fig. 17 Fatigue crack propagation rate observed in block loading as compared with constant amplitude loading

が、この最大応力が、かなりき裂進展の遅延をひき起こしていることがわかる。

(c) ブロックサイズの影響

ブロック荷重下の疲労き裂進展は応力範囲のレベルと頻度が同一であってもブロックサイズの影響を大きく受けることが知られており、本実験においてもB5とB6は、同じ応力範囲のレベルおよび相対頻度をもつが、1周期での繰返し数が、B5では10,000であるのに対してB6では400となっている。両者のき裂進展曲線の比較をFig. 16に示す。従来報告されているとおり、本実験においてもブロックサイズの小さい方が、疲労き裂進展が速くなっている。

(d) 一定振幅荷重試験との比較

平均応力をかけたブロック荷重下のB7とB10について、開口応力を考慮して一定振幅荷重下のき裂進展速度を推定したものの比較をFig. 17に示す。B7につ

Fig 18 Fatigue crack propagation rate observed in narrow-band random loading as compared with block loading

Fig 19 Fatigue crack propagation rate observed in wide-band random loading as compared with block loading

いては、ほぼ大略の一致を示しているが、B10 についてはやや安全側の推定となっている。これは最大応力範囲レベル $\Delta S_{\max}$ か、B7 では $3 \cdot 10 (\text{kgf/mm}^2)$ に対して B10 では $4 \cdot 10 (\text{kgf/mm}^2)$ と大きかったことによるのではないかと考えられる。

4.4 ランダム荷重下とブロック荷重下でのき裂進展の比較

まずレイリー分布をもとに応力範囲の分布を決定し、平均応力をかけたブロック荷重試験 B7 と広帯域ランダム荷重試験との比較を、等価応力拡大係数範囲で行ったものか、Fig 18 である。明らかに良い一致がみられる。

次に広帯域ランダム荷重試験と同じ応力範囲の分布をもつが、平均応力をかけない形のブロック荷重試験について、等価応力拡大係数範囲により比較したが、良い一致

は得られなかった。そこで広帯域ランダム荷重試験 RS3 と同じ応力範囲レベルおよび分布をもち、同じ平均応力をかけたブロック荷重試験 B10 とを比較したものが、Fig 19 である。

これは、両者が同一の応力範囲のレベルおよび分布をもつものであるから、同一の ΔK によって整理したものである。ここでも一致がみられず、明らかにブロック荷重下でのき裂進展速度の方が大きくなっている。これは広帯域ランダム荷重下での、応力の Sequence-Effect が遅延現象をひき起こしているためと考えられる。

5 結 論

本研究によって得られた主な結論は次のようである。

- 1) マイクロコンピュータを導入して、ランダム荷重およびブロック荷重疲労試験を行い、同時にき裂長さの自動計測を行って、自動試験システムを作成した。
- 2) ランダム荷重下での疲労き裂進展速度の推定は、
 - Barsom 流の ΔK_{rms} を用いると、平均応力を考慮しても危険側となる。
 - ランダム波形が狭帯域の場合は、等価応力拡大係数範囲 ΔK_{eq} を用いて、一定振幅荷重下の疲労特性よりほぼ良い推定が行える。
 - ランダム波形が広帯域の場合は、 ΔK_{eq} を用いても、多少危険側となる場合がある。しかしレインフロー法を用いるとやや改善されるか、より広帯域のものに対する効果が大きい。
- 3) ブロック荷重試験を行う場合には、もとになる荷重スペクトルよりの最大応力範囲、およびブロックサイズの決定に対して注意を要する。
- 4) ブロック荷重とランダム荷重試験との関係は、今回実験を行った範囲内では、
 - 狭帯域ランダム波形に対しては、ほぼ等価である。
 - 広帯域ランダム波形に対しては、ランダム荷重下では Sequence-Effect が顕著になり、ブロック荷重によるおきかえが困難な場合もある。
- 5) 今後の課題としては、き裂先端部の降伏挙動を簡単かつ適切に模擬するモデルを導入することによって、ここには行わなかった変動荷重下での Threshold の取扱、およびより不規則度の高いランダム波形についての研究を進める必要があり、現在実験中である。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、種々の御指導、御助力をいただきました、横浜国立大学 板垣浩教授をはじめ同研究室の皆様、航空宇宙技研 朝田洋雄博士、伊藤誠一氏に、またブロック荷重試験を協力して下さった当研究室学部生（当時）の長嶋伸吾（現 東京ガス）、岩下隆

氏（現 東芝）に深く御礼を申し上げます。

また、日本造船学会・溶接研究委員会・第1分科会にて、有益な討論ならびに数々の御教示をいただきましたことに深く感謝いたします。

なお、本研究の一部に、文部省科学研究費の援助を受けました。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 薄, 岡村: 定常ランダム荷重下の疲労き裂進展 (第1報), 機論 (昭 53), Vol 44, pp. 3322~3330.
- 2) 北川, 福田, 他: ランダム荷重下の鋼板中の疲労き裂伝ば特性, 機論, Vol 43, No. 371 (昭 52), pp. 2439~2449.
- 3) 岩崎, 川原: ランダム荷重下での疲労き裂伝ば (第4報), 日造論, No. 149 (昭 56), pp. 268~278.
- 4) 田中, 山元: ランダム荷重およびプログラム荷重のもとでの S 50 C 切欠き鋼材の疲労強度, 材料, Vol. 21, No. 227 (昭 47), pp. 766~771.
- 5) Shinozuka, M. & Jan, C. M.: Digital Simulation of Random Process and its Application, J. Sounds & Vibration, 25(1), 1972, pp 111~128.
- 6) 朝田, 伊藤: 輸送機の主翼下面に加わる実働荷重を模擬した疲れ試験, 機講論, No. 790-9 (1979), pp. 95~100.
- 7) Cooley, J. W., Tukey, J. W.: An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series, Mathematics of Computation 19 (April 1965), pp. 297~301.
- 8) 岡村, 板垣: 強度の統計的取扱い=構造強度信頼性工学 (昭 54), 培風館.
- 9) Barsom, J. M.: Fatigue-Crack Growth under Variable Amplitude Loading in ASTM A-514-B Steel, ASTM STP 536, pp 147~167.
- 10) Elber, W.: The Significance of Fatigue Crack Closure, ASTM STP 486 (1971), pp. 230~242.
- 11) 安藤, 安在: 簡明にされたレインフローアルゴリズム「P/V 差法」について, 材料, Vol. 30 (昭 56), pp. 89~93.
- 12) Method of assessment for defects in fusion welded joints with respect to brittle fracture, Japan Welding Engineering Society Standard, WES 2805-1980.