ランダム荷重による疲労亀裂伝播

(第2報) 実験とシミュレーションとによる予測

正員 板 垣 浩* 正員 石 塚 鐵 夫*
正員 関 隆 広**

Fatigue Crack Propagation under Random Loading (2nd Report)
—Prediction of Crack Growth by Fatigue Tests and Simulations—

by Hiroshi Itagaki, *Member** Tetsuo Ishizuka, *Member**
Takahiro Seki, *Member***

Summary

An efficient method to generate narrow band stationary Gaussian random load sequences for fatigue test is proposed. Fatigue crack propagation tests under stationary Gaussian random stress intensity factor process were carried out with 3 different power spectral densities to see the effect of load profile on the growth rate. The reciprocals of the experimentally obtained growth rate were plotted on the Weibull probability paper to find that slight change in the band-width has little effect on the probability distribution of the resistance to the fatigue crack propagation. Simulations of crack growth using the data obtained by the previous tests showed a good agreement with the experiments. It is confirmed that the probability distribution of fatigue crack propagation life can be estimated by simulations provided that statistical data are supplied by the test method previously proposed by the authors.(ref. 7)

1. 緒 言

船舶などの構造物中の疲労亀裂の進展はランダム過程とみなされる荷重履歴のもとで生じる。従って、伝播寿命の予測は、与えられた確率的特性を持つ荷重履歴に応じてなされなければならない。理論的予測が可能であることが望ましいが、必ずしも可能ではなく、多くの仮定のもとに推定を行うので、その確からしさを実験で裏付ける必要がある。亀裂成長には材質の不均一に起因するばらつきがあるため¹⁾、同一の統計的特性をもつ荷重履歴を多数再現して、統計的解析に耐えるデータを入手しなければならない。実験上の難点として、1) 荷重履歴のシミュレーション及び2) 多数回の試験が先ず挙げられる。前者は特に小型コンピュータを用いるときには計算時間、シミュレートし得るプロセスの長さ等が問題であり、後者は実験時間と費用とが障壁となる。簡単に荷重を作るために、種々の方法が考えられるが^{2,3)}、どの様な方法であれ、真実に近い荷重の実験

的比較でその有効性が認められねばならないので、出来る限り実荷重に近い試験荷重をシミュレート出来なければならない。

本研究に先立って、比較的一般的なパワースペクトルをもつ荷重履歴と、それを簡易化したスペクトル(矩形)をもつ荷重履歴とを大型コンピュータで作成し、そのデータを小型コンピュータに送り、コンピュータ制御のもとで実験を行った結果、高周波成分は比較的、結果に寄与することが少ないこと、即ち、パワースペクトルとしては矩形型の狭帯域のもので充分であることが判明した⁴⁾。このことは、後述するように、ランダム過程のシミュレーションを計算時間の面で容易にする。

また、一度にシミュレート出来る履歴の長さの効果についても実験的に調べたが、ある程度の長さ(波数にして数百サイクル)あれば充分であることが判っている⁵⁾。これは充分長いランダム過程の初めの方の部分と終わりの部分とは殆ど相関が無いはずであるので当然ともいえる。計算時間をとらず大容量のメモリも不要となれば、小型コンピュータ制御の実験でランダム疲労亀裂伝播試験を行うことが可能になる。しかし、これだけでは第2の難点、試験数の

* 横浜国立大学工学部

** 横浜国立大学大学院

問題は解決しない。例えば試験条件の簡易化を検討するにしても、少なくとも平均値及び分散の様な数値を比較し検討せねばならないからである。

亀裂伝播を支配する応力拡大係数 (K 値) を制御して実験を行ない、同一試験片内で条件を変えて実験し、試験片毎の材質の変動の影響を少なくすると共に、試験片内の多数の点でのデータを収集することにより試験片数を非常に少なくし得ることを既に示してある^{4,6,7)}。本研究でも同様の手法を採用することによって試験数の問題を回避できる。

一方、実働荷重下の疲労寿命の確率分布を実験的に推定するには、ランダム K 値制御の試験は適当ではない。実働荷重のようにランダム応力過程のもとでの亀裂進展を調べる必要がある。此の場合は、寿命の確率分布を実験的に定めるには多くの試験片が必要である。実験に依らず実働荷重下の寿命を推定するには、材質と荷重の統計的変動の数値シミュレーションを用いる方法があるが、いわゆる荷重順序の影響を考慮しなければならない場合は、簡単にランダム荷重に適用できるようなモデルが無いので、シミュレーションが困難である。荷重順序の効果が無い、あっても安全側であるということが実験的に示されていれば、シミュレーションは非常に簡単になるのは言うまでもない。

以上のような観点から、本研究では、実働荷重のパワースペクトルを有効狭帯域の矩形スペクトルに置き換えられる場合について、マイクロコンピュータ向きのガウシアンランダム過程の発生法と、それを用いて行なった荷重のプロファイルの影響に関する実験及び数値シミュレーションについて述べる。

2. ランダム荷重のシミュレーション⁸⁾

本研究で使ったランダム過程のシミュレーション方法は、対象とするランダム過程のパワースペクトルを狭帯域の矩形スペクトルに置き換え可能な場合に、高速フーリエ変換 (Fast-Fourier-Transform : FFT)⁹⁾ を利用してガウシアンランダム過程の包絡線 (envelope) をシミュレートして、これよりランダム荷重のピークを求める方法である。(以下 ENVELOPE 法と称する) この方法によりシミュレーションに要する計算時間の短縮、同時にコンピュータに要求されるメモリの容量の軽減を達成出来ることから、マイクロコンピュータ制御によるランダム疲労試験が容易に行なえるようになった。以下、この ENVELOPE 法について簡単に述べる。

Δt 間隔でガウシアンランダム過程 $x(t)$ をシミュレートするときその個数を N 個とすると $x(k\Delta t)$ は、

$$x(k\Delta t) = \sum_{k=1}^N 2\sqrt{G(f_k)}\Delta f \cos(2\pi f_k t + \theta_k) \quad (1)$$

のように書けることはよく知られている。ここに $G(f)$ はシミュレートしようとするランダム過程 $x(t)$ のパワースペクトル密度関数である。

狭帯域ガウス性ランダム過程は次式で与えられるような包絡線 $A(t)$ を持つことがよく知られている。

$$A(t) = \sqrt{x(t) + \dot{x}(t)^2 / 2\pi f_c} \quad (2)$$

ここに $f_c = \sigma_{\dot{x}} / 2\pi\sigma_x$ は見かけの周波数と言われる。 $\dot{x}(t)$ は (1) 式より、近似的に、 $f_k \approx f_c$ として

$$\dot{x}(k\Delta t) = -2\pi f_c \sum_{k=1}^N 2\sqrt{G(f_k)}\Delta f \sin(2\pi f_k t + \theta_k) \quad (3)$$

と表わせる。よって、この包絡線を利用すると、即ち、 $\Delta t_e = 1/2f_c$ 間隔で $x(t)$ 及び $\dot{x}(t)$ をシミュレートして $A(t)$ を求めれば、近似的に荷重系列の山と谷をシミュレートでき、FFT のサイズを大幅に減少出来る。Fig. 1 に示すように、例えば 1 cycle 当り 128 個のデータで 512 波のランダム荷重系列を従来の FFT だけによる方法で求める場合、総データ数は 65536 ($=2^{16}$) である。これに対し ENVELOPE 法では 512 波のランダム荷重系列は 1024 ($=2^{10}$) の山と谷で与えることが出来るため、FFT のサイズは FFT だけによる方法の 1/64 となり、これは計算時間の短縮、コンピュータのメモリの節約につながる。ENVELOPE 法はマイクロコンピュータにおいて非常に有効なシミュレーション

Fig. 1 Approximation of peaks of narrow band random process

ョン方法であると言える。ENVELOPE 法を用いてランダム荷重試験を行なう場合には、得られた荷重系列の隣合う一組の山 (peak) と谷 (trough) から、次式のように peak と trough との間を余弦波で近似しランダム荷重データとする。ここで n は peak-trough 間の分割数である。

$$\text{amp} \times \cos\left(\frac{\pi}{n} \times i\right) + \text{mean} (i=0, \dots, n-1) \quad (4)$$

$$\text{但し } \text{amp} = \frac{\text{peak} + \text{trough}}{2}, \text{ mean} = \frac{\text{peak} - \text{trough}}{2} \quad (5)$$

本法において与えるパワースペクトルの形状とこれより得られるランダム荷重波形の一例を Fig. 2, Fig. 3 に示す。パワー一定のままバンド幅を変えた 3 種類のパワースペクトルを用意し、バンド幅の小さいものから順に narrow1, nar-

Fig. 2 Idealized power spectra for the experiments

Fig. 3 Examples of time history with the spectra in Fig. 2

row2, narrow3 と呼ぶことにする。これらのパワースペクトルから得られる荷重のプロフィールは、Fig. 3(1)のように振幅の変化が緩やかな波形から、Fig. 3(2), Fig. 3(3)のように振幅の変化が激しい波形となる。これらの荷重系列も、対応するパワースペクトルの呼称と同様に narrow1, narrow2, narrow3 と呼ぶことにする。なおこれらの荷重系列の振幅の確率分布は (2) 式で表わされる包絡線の確率分布に等しいことから、近似的に Rayleigh 分布となる。

3. 実験及び解析

3.1 実験方法

供試材は海洋構造物用の高張力鋼 BS4360 (GR50D) であり、その化学成分及び機械的性質を Table 1 に示す。実験には標準 CT 試験片を用いた。その試験片形状及び寸法を Fig. 4 に示す。

実験法は、従来著者等が行ってきた方法⁴⁾である。ランダム荷重の発生は、前述の ENVELOPE 法により荷重データを計算するが、マイクロコンピュータで 1 回の計算から発生するデータ 2^{10} 個分 (512 波) を以下“1 storm”と呼ぶことにする。亀裂長さの自動計測において、亀裂開口変位 (COD) 及び荷重の測定は、精度を確保するために storm と storm の間に非常にゆっくりと直線的に変化する繰り返し荷重を 1 波発生し、その間の測定値を亀裂長さの計算に用いた。また亀裂長さの自動計測とともに読み取り顕微鏡を

Table 1 Chemical composition and Mechanical Properties

C	Si	Mn	P	S	Nb
.15	.40	1.32	.016	.004	.26

yield point	tensile strength	elongation
371 MPa	522 MPa	30.0 %

Fig. 4 Shape and dimension of specimen

使用して目視による測定も行った。応力拡大係数 K 値は測定した亀裂長さより計算で求める。試験データは、亀裂が 0.4 mm 増える毎に、亀裂長さ、storm 数、 K 値などをディスクに記録する。

3.2 実験結果

今回行った全ての実験の条件を Table 2 に示す。

まず予備的な実験として荷重制御によるランダム疲労試験を 3 本行なった。実験結果は、storm 数 N_s に対して亀裂長さ a をプロットしたものを、4 章においてシミュレーション結果とともに示すことにする。また K 値制御によって K 値が定常ランダム過程となるような疲労試験を 1 本行ない、ランダム荷重下でもランダム過程である ΔK の rms を制御することによって亀裂伝播率がほぼ一定で進展することを確認した。

以上の結果をふまえて、Fig. 3 に示した 3 種類のランダム荷重系列を用いて、 K 値制御によって K 値が定常ガウス過程となるような疲労試験を行なった。試験片毎の材質のばらつきの影響を除くために、1 枚の試験片の中で 3 種類のランダム荷重を亀裂が 4.0 mm 伸びる毎に切り換えて負荷した。また 3 種の荷重系列の負荷順序を変えて試験を行なうことによって負荷順序による影響も考慮できるようにした。

実験より得られた $a \sim N_s$ 曲線を Fig. 5 に示す。同図 (1) は、負荷順序を narrow1 (n1), narrow2 (n2), narrow3 (n3) の順で繰り返した場合で、同図 (2) は、n2, n1, n3 の順で繰り返した場合での結果である。亀裂伸長の様子は直線的に進み、負荷順序の影響はみられない。Fig. 5 の結果を明確にするため、各荷重系列毎の最小自乗法近似による平均亀裂伝播率を Table 3 に示す。また、同表に予備試験で行なった荷重系列 narrow2 のみによる K 値制御試験の結果も示す。各試験片についてみると、narrow1 による平均亀裂伝播率が若干小さいことが判る。

Table 2 Test condition.

Specimen No.	Crack (mm)	Target value for control	Random serie
1R2 3R1 3R3	25~55	ΔP_{rms} 9.8 P_{mean} 20.6 P_{max} 40.2 (kN)	narrow2
4R3	25~65	ΔK_{rms} 12.4 K_{mean} 25.4 K_{max} 50.2 (MPa $\sqrt{mm}$)	narrow2
1R3 2R2 2R3			n2-n1-n3*
4R1 4R2			n1-n2-n3*
3R2			n1-n1' **
5BS1			n3-idp***

* (n1 = narrow1, n2 = narrow2, n3 = narrow3)

** (n1' = narrow1')

*** (idp = independent)

Fig. 5 Crack length vs. number of storms

Table 3 Crack growth rates. (narrow1, narrow2, narrow3)

Specimen No.	narrow1	narrow2	narrow3
1R3	2.25	2.50	2.65
2R2	2.12	2.32	2.41
2R3	1.89	2.10	2.20
4R1	2.00	2.29	2.31
4R2	2.05	2.27	2.34
4R3	—	2.29	—

($\times 10^{-2}$ mm/storm)

$a \sim N_s$ 関係を直線近似すれば亀裂の平均的な伝播率が得られるが、局所的な伝播率の変動をみるために、亀裂測定間隔 0.4 mm 毎の亀裂伝播率の逆数 dN_s/da をとり、その確率をワイブル確率紙に試験片 5 本分全てプロットしたものを Fig. 6 に示す。同図から亀裂伝播率は荷重系列によらず 3 母数のワイブル分布で各々表わし得ることが判る。直接探索法によって推定したワイブル分布のパラメータ及びその曲線も同図に示す。この図から narrow2 と narrow3 の結果は明らかに同一とみなせるが、narrow1 による結果は亀裂伝播率が小さい方にずれている。試験片別に同様の整理をしてみたがこの傾向に変化はなかった。この差の理由を検討するために、各荷重系列の振幅の確率密度を調べ、相違が無いかを検討した。この結果を理論値 (Rayleigh 分布) と併せて Fig. 7 に示す。全体を表わす (1)

Fig. 6 Weibull plot of dN_s/da obtained from the experiments (narrow1, narrow2, narrow3)

Fig. 7 Probability density of peak

において違いは見られないが、曲線の裾を拡大した(2)から narrow2 及び narrow3 の密度は理論的に充分近いのに

反し, narrow1 の密度は理論値よりかなり小さいことが判る。これは, ENVELOPE 法においてパワースペクトルの幅を狭くするとフーリエ級数の項数が少なくなり, 振幅の大きい部分が現れにくくなる為であると思われる。そこで Fig. 2 に示したパワースペクトル narrow1 について, 周波数分割幅 $\Delta f' = \Delta f/4$ とし (中心周波数 $f_c = 2048\Delta f'$, スペクトル幅 $96\Delta f'$), 得られた包絡線の値を 4 個おきに抜き取り正負のピークとみなし荷重系列を作成した。以下これを narrow1' と呼ぶ。narrow1' の大振幅部分の密度は Fig. 7 に示すように理論と殆ど変わらないことが判る。

Fig. 6 においてみられる dN_s/da の確率分布の違いが大振幅荷重によるものかどうかを実験によって検討するため, K 値制御疲労試験を行なった。1 枚の試験片で亀裂が 10 mm 伸びる毎に, narrow1 と narrow1' とを交互に負荷して亀裂伝播の様子を比較した。この結果を Fig. 8 に示す。同図には参考のため, Fig. 6 で推定した narrow3 の dN_s/da の分布曲線をプロットする。データ数が少ないためデータがワイブル分布に従うと決めることは出来ないが, narrow1' は narrow1 より亀裂伝播率が大きくなる傾向を示し, Fig. 6 にみられる narrow1 のずれが大振幅の出現確率が低いことによるものであることを示唆している。但し, 後述する数値シミュレーションでは, このような効果は顕著ではなかったので, 実験においては, 何らかの意味で, 大振幅の現れる storm と大振幅の現れない storm の干渉効果があるようである。

先の 3 種類の荷重系列は荷重順序に従属性を持っていたが, この荷重順序が完全に独立の場合に亀裂伝播に影響を及ぼすかを実験で確かめるため, Rayleigh 分布に従う乱数を発生させ, これを荷重振幅とするランダム荷重系列(以

Fig. 8 Weibull plot of dN_s/da obtained from experiments (narrow1', narrow1)

下 independent と呼ぶ)を作成し、K 値制御疲労試験を行なった。1枚の試験片で亀裂が10mm伸びる毎に narrow3 と independent を切り換えて負荷して、亀裂伝播の様子を比較した。この結果を Fig.9 に示すが、narrow3 と independent との間には、実験結果に大きな違いはみられなかった。この実験より、振幅の確率分布が理論値に合うようにランダム荷重をシミュレートした時、荷重順序の影響は殆ど現れないことが判った。

4. 亀裂伝播シミュレーション

4.1 亀裂伝播モデル

疲労亀裂伝播速度 da/dN を表わす式としてはパリス則によるものが広く知られている。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (6)$$

なお式中のパラメータ C , m は、材質の不均一性により一定の値を持たずに変動するとした場合、(6)式によって実験的に C , m の確率特性を求めるとすると m の値が変化することによって C の次元が一定とならず統計的に取り扱うことが困難になる。そこで(6)式に ΔK と同じ単位を持つ K_0 なるパラメータを加える。

$$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{\Delta K}{K_0} \right)^m \quad (7)$$

シミュレーションに用いる亀裂伝播モデルは(7)式を次式のように書き換えたものを用いた。

$$\frac{da}{dN} = C(x) \left(\frac{\Delta K}{K_0} \right)^{m_i} \quad (8)$$

ここで m_i は試験片 i の m で、試験片毎に異なるが試験片内では一定値をとるとする。また $C(x)$ は試験片内の亀裂先端位置 x における C で、 x について細かく変動すると

する。この変動が材質のばらつきに起因するとした場合には、 $C(x)$ の代わりに $C(x)$ の逆数である亀裂伝播抵抗係数 $Z(x)$ を考えた方が材料の持つ特性をよく表わし得ると思われる。よって以下からは亀裂伝播モデルにおいては $C(x)$ の代わりにこの $Z(x)$ を用いることにする。

$Z(x)$, m_i , K_0 の各パラメータについては別途に行なった同一供試材による ΔK 値一定疲労試験より次のような結果が得られている⁷⁾。

$$1) \quad K_0 = 32.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

$$2) \quad m \text{ は } N(\bar{m}, \sigma_m^2) \text{ の正規分布に従う。}$$

$$\text{但し } \bar{m} = 2.8, \sigma_m = 0.5$$

$$3) \quad Z(x) \text{ はワイブル分布に従う。}$$

$$F(z) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{z - \gamma}{\beta - \gamma} \right)^\alpha \right\} \\ \alpha = 4.2, \beta = 3.96 \times 10^6, \gamma = 2.34 \times 10^6 \quad (9)$$

$$4) \quad Z(x) \text{ の平均自己相関関数}$$

$$R(z) = \exp(-b_0 z) \cos(2\pi f_0 z) \\ b_0 = 0.25, f_0 = \frac{1}{64} \quad (10)$$

4.2 $Z(x)$ 及び m_i のシミュレーション

亀裂伝播のシミュレーションに先立って、4.1節に示した $Z(x)$, m_i の確率特性に基づいて $Z(x)$ 及び m_i のシミュレーションを行なった。 $Z(x)$ はワイブル分布に従う非ガウス確率過程であるため、通常のガウス確率過程を前提としたシミュレーションは使用できない。そこで Shinozuka 等の開発した非ガウス確率過程のシミュレーション¹²⁾を用いて、(9), (10)式に示したデータから $Z(x)$ をシミュレートした。なお実験から求めた $Z(x)$ は亀裂先端位置 x が 0.4 mm 進む間の平均的な亀裂伝播抵抗であるため、シミュレーションも 0.4 mm 間隔である。 m_i は $N(\bar{m}, \sigma_m^2)$ に従うガウス乱数とした。但し、実験から求めた m_i の範囲を考慮して、 m_i の最大値及び最小値をそれぞれ 2.0, 4.0 と設定してこれを超えるものは省いてある。このためシミュレーションによって得られる m_i の確率分布は、打ち切りのあるガウス分布 (Truncated Gaussian Distribution) となる。

4.3 亀裂伝播シミュレーションとその結果

ランダム荷重の繰返し荷重 1 回毎の亀裂進展量 da_j 及びその時の亀裂長さ a を

$$da_j = \frac{1}{Z(x)} \left(\frac{\Delta K_j}{K_0} \right)^{m_i} \quad (11)$$

$$a = \sum da_j \quad (12)$$

としてシミュレーションを行なった。この時、亀裂が 0.4 mm 伸長する毎に亀裂先端における材質が変化するとし亀裂伝播抵抗 $Z(x)$ の値を変化させる。ある初期亀裂長さ a_0 からスタートして a が 0.4 mm 進展する毎に a とその時の storm 数を記録し、 a が予め定めた限界亀裂長さに達したとき試験片 1 本分の亀裂伝播シミュレーションを終了する。以上のフローチャートを Fig. 10 に示す。この一連

Fig. 9 Weibull plot of dNs/da obtained from the experiments (narrow3, independent)

Fig. 10 Flow chart of simulation of crack propagation

のシミュレーションを m_i の値を変えて繰り返し行なうことにより、実際にランダム荷重実験を行なうよりも短時間で多くの疲労亀裂伝播曲線を得ることができる。

4.3.1 荷重が定常ガウス過程の場合

荷重制御によるランダム疲労試験のシミュレーションを試験片 100 本分行なった結果を、実験結果と併せて Fig. 11 に示す。実験結果は 3 本ともシミュレーション結果の範囲内に収まっており、ランダム荷重下の亀裂伝播をシミュレートすることが可能と思われる。この手法で疲労亀裂伝播寿命の確率分布を推定する場合にはシミュレーションの本数を増やすことにより精度の高い推定結果を得ることが出来る。100 本のシミュレーションから推定した疲労亀裂伝播寿命の確率分布を次式に示す。

Fig. 11 Crack length vs. number of storms (simulations and experiments)

$$F(z) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{z-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^\alpha\right\}$$

$$\alpha = 2.24, \beta = 1.53 \times 10^3, \gamma = 1.02 \times 10^3 \quad (13)$$

(13)式より、亀裂が 25 mm～55 mm 伝播する場合の最小寿命は 1020[storm](5.2×10⁵[cycle])と予測される。

4.3.2 K 値が定常ガウス過程の場合

3 種類のランダム荷重系列を用いた K 値制御疲労試験のシミュレーションを試験片 20 本分行なった結果を Fig. 12(1)に示す。なお、シミュレーションに用いた荷重系列は全て narrow1-narrow2-narrow3 の順序で切り換えた。同図から、明らかに試験片内の亀裂伝播率が変動していることが判る。これがランダムに変動する ΔK によるものか材質のばらつきによるものかは一概には断定できない。 $Z(x)$ 及び m_i が変動せずに一定値をとるものとして、 $Z(x)$ 及び m_i の各々の平均値を用いてシミュレーションを行なった結果を Fig. 12(2)に示す。同図から、ランダムな ΔK による亀裂伝播率の変動は殆ど見当らず、これは実験結果とあわないことになる。よって、ランダム疲労シミュレーションにおいては、荷重のランダム性よりも材質のばらつきの方が亀裂伝播率の変動に影響を及ぼしているといえる。Fig. 12(1)のシミュレーション結果について、実験解析と同様に亀裂伝播率の逆数をワイブル確率紙にプロットしたものを Fig. 13 に示す。同図から、実験結果 Fig. 6 においてみられた narrow1 と narrow2, narrow3 との間のずれがシミュレーションでは現れなかったことが判る。これは出現確率の非常に低い大振幅荷重の効果を亀裂伝播モデルにおいて考慮していないためであると思われる。こ

Fig. 12 Crack length vs. number of storms (simulation)

Fig. 13 Weibull plot of dN_s/da (simulation) (narrow1, narrow2, narrow3)

の場合、大振幅荷重の効果を検討すると、narrow1のような非常に狭帯域で、なおかつ比較的短いランダム過程では、1回のシミュレーションにおいて同程度の規模の振幅が連続するので、振幅の小さい storm が大部分を占める中で、非常に希に大振幅を含む storm が現われることになる。このため、大振幅を含む storm が過ぎた後に振幅の小さい storm が長く続くと、遅延が起これとされる。storm と storm との間の干渉効果という意味で、ある種の荷重順序の効果であると言えよう。実験結果とシミュレーション結果を、各々の確率分布のパラメータの推定値によって比較すると、特性値で、narrow1において約15%、narrow2、narrow3においてそれぞれ約7%、約5%程、シミュレーション結果の方が亀裂伝播率の大きいことが判る。よって、亀裂伝播において荷重順序の効果は無視することはできないが、今回行った3種類の荷重系列による亀裂伝播シミュレーションでは、荷重順序の影響を考慮しなくても、推定結果は安全側となる。

また、narrow3とindependentとを用いたK値制御疲労試験のシミュレーションを試験片20本分を行った結果をFig. 14及びFig. 15に示す。Fig. 14には実験より得られた曲線もあわせてプロットしたが、実験結果の曲線は、20本のシミュレーション結果の範囲内で、亀裂伝播率が最も大きい曲線に近いことが判る。Fig. 15から、narrow3とindependentとの間には大きな差はなく、この点では実験と同じ結果になった。Fig. 9とFig. 15を比較すると、実験結果の方がシミュレーション結果より亀裂伝播率が大きくなっている。実験とシミュレーションを比較するには、実験のデータの数が少なく確率分布を推定するに至らないと思われることから、今後さらに実験数を増やす必要がある

Fig. 14 Crack length vs. number of storms (simulations and experiment) (narrow3, independent)

Fig. 15 Weibull plot of dN_s/da (simulation) (narrow3, independent)

う。

5. 結 言

ランダム荷重下の疲労亀裂伝播寿命の確率分布を推定することを目的として、実験あるいはシミュレーションに用いる荷重履歴のマイクロコンピュータに適した発生法を提案し、それを用いて荷重履歴のプロファイルの影響を調べた結果、次のような結論を得た。

狭帯域のランダム荷重であれば、バンド幅を多少変えても亀裂伝播率の確率分布関数には差がみられない。ただし、本研究で用いた包絡線をシミュレートする方法では、バンド幅を非常に狭くすると必然的に級数の項数が少なくなり、大振幅の部分で理論確率密度 (Rayleigh) より小さくなるために、平均伝播率が小さくなることがある。級数の項数は、本研究に関しては40程度で充分であった。この

頻度の非常に小さい大振幅荷重の効果は、一定振幅試験の結果を用いたシミュレーションでは現れなかったもので、ある種の荷重順序の効果ではないかと考えられる。即ち、非常に狭帯域の、しかも比較的短いランダム過程では、1回のシミュレーションでは同じ程度の振幅が連続するので、大振幅の荷重を多く含む非常に希な storm が現われた後に、小振幅の荷重が長時間続く storm が来ると遅延が起こるのではないと思われる。

また、ランダム荷重の振幅の確率分布が Rayleigh 分布に従う場合、荷重順序が独立となるように荷重を発生させ実験を行なったが、荷重順序が従属的である狭帯域ランダム荷重との間に差はみられなかった。条件を変えて同様の実験を追加したとき、この傾向に変化が無いことが確かめられれば、定常ランダム荷重試験をより簡便なランダム荷重発生法により行なうことが出来よう。

亀裂伝播シミュレーションにおいて、荷重順序を考慮に入れないシミュレーション（材質のばらつきは考慮）の結果は、実験結果より若干伝播率が大きくなる傾向がみられた。（特性値と比較して約 4～7%）。シミュレーション結果が安全側に出ていることから、荷重順序の効果を考慮しなくとも、予測には差は支えないと思われる。ランダム荷重試験とシミュレーションとを比較しても、ほぼ妥当な結果となっている。シミュレーションより推定した寿命の確率分布から、ランダム荷重試験における最小寿命は $1020[\text{storm}](5.2 \times 10^6[\text{cycle}])$ となった。この様に一定 ΔK 振幅試験で得られる材料パラメータの統計的性質を用いてランダム疲労亀裂伝播の伝播シミュレーションを行なえば、疲労亀裂伝播寿命の確率分布関数を求めることが可能である。

なお、本研究で触れていない点として、疲労亀裂伝播の K 値依存性（数種類の K 値による試験）、荷重振幅の確率分布の違いによる影響（例えば指数分布ランダム荷重の場合）等があるが、これらについて実験的に検討を行なうことが今後の課題となるであろう。

本研究に関して、日本造船学会材料分科会（主査東京大学町田進教授）より貴重な御意見を頂いた。研究全般に渡

り当時本学大学院留学生黄培彦氏（重慶大学科学研究処）に、また実験等において本学大学院生藤波貢氏らの協力を得た。ここに付記して謝意を表する。またこの研究は平成元年度文部省科学研究補助金（研究課題 疲労設計理念の実現法に関する研究）の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) 市川昌弘, 中村武夫: 疲労き裂伝ば速度の試験片内変動と試験片間変動の分離, 材料, 36-408, (1986)
- 2) 町田進, 大岡俊之他: 実働荷重下の疲労き裂伝播の研究, 日本造船学会論文集, 第 154 号, (1983), p. 396
- 3) 八木順吉, 富田康光他: ランダム荷重下での疲労挙動に関する研究, 日本造船学会論文集, 第 152 号 (1983) p. 361
- 4) 板垣浩, 石塚鐵夫, 関根登, 持永圭一郎: ランダム荷重による疲労亀裂伝播 (第 1 報) 小規模デジタルシステムによる試験, 日本造船学会論文集, 第 159 号 (1986) p. 358
- 5) Itagaki, H., Ishizuka, T., Huang, P., Ueki, T.: "Effect of the Length of Simulated Random Process on Fatigue Crack Growth", ICAEM (1988)
- 6) 板垣 浩, 石塚鐵夫, 黄 培彦: 疲労亀裂伝播のシミュレーションによる信頼性評価, 日本造船学会論文集, 第 165 号 (1989) p. 253
- 7) 板垣 浩, 石塚鐵夫, 黄 培彦: 疲労き裂伝播寿命の確率分布推定に関する実験的研究, 日本機械学会論文集 (A 編) 第 525 号, 第 56 巻 (1990) p. 1082
- 8) 板垣 浩: ランダム荷重のシミュレーションについて, 日本造船学会材料分科会資料 1-707-88 (1988)
- 9) 安居院猛, 中嶋正之: 「FFT の使い方」, 産報出版 (1981)
- 10) 日野幹夫: 「スペクトル解析」, 朝倉書店 (1977)
- 11) Keith Ortiz and Anne S. Kiremidjian: "Time Series Analysis of Fatigue Crack Growth Rate Data", Eng. Fracture Mechanics, 24-5 (1986)
- 12) Yamazaki, H. and Shinozuka, M.: "Digital Generation of Non-Gaussian Stochastic Fields", Technical Report, Department of Civil Engineering Mechanics, Columbia University (1986)