ランダム荷重下の疲労き裂伝播挙動に及ぼす荷重履歴の影響について

正員 林 忠 宏* 正員 町 田 進**
正員 吉 成 仁 志**

Fatigue Crack Propagation Behavior under Various Random Amplitude Loading Conditions

by Chun Hung Lin, *Member* Susumu Machida, *Member*
Hitoshi Yoshinari, *Member*

Summary

By taking the crack closure concept into account, fatigue crack growth rate under constant amplitude loading can be evaluated by Paris' law. But under random loading condition fatigue crack propagation behavior becomes more complicated and is difficult to predict accurately from constant amplitude tests even if the crack closure concept is considered. Under constant amplitude loading condition, it is well known that the crack growth will decelerate when a single overload such as a spike load is applied, and this phenomenon becomes more remarkable as the load becomes larger, or/and, crack length becomes longer. From this, it can be expected that the fatigue crack growth rate under random loading shows a smaller value of exponent parameter m of Paris' equation than that obtained by constant amplitude tests, if equivalent stress intensity factor range (ΔK_{eq}) is introduced.

The fatigue crack propagation tests using CCT test specimens are carried out by applying 6 kinds of random load, each has the same value of ΔK_{eq} but has different peak load, sequence etc. The above mentioned expectation is approved qualitatively and a method to predict the crack growth rate for different type of random loading conditons is presented. Calculations based on Wheeler model and the closure concept method are also conducted for comparison. The method proposed in this study can predict propagation life better than others.

1. 緒　　言

ランダム荷重下の疲労き裂伝播の評価方法として，Paris則[1]による整理により，一定振幅荷重試験で得られた係数C，mを用い，ランダム荷重下の伝播速度を予測するもの[2)~7)]と，複雑なランダム荷重下のき裂伝播挙動を例えば二段荷重といった単純な変動荷重に置き換え，き裂伝播挙動に影響する因子，例えば，荷重履歴，開口荷重変動などを調べるもの[8)~14)]がある。前者はランダム波形の一波一波の変化にとらわれず，ある期間中の平均的進展量を予測するものであり，統計的な処理の色合いが濃いの対して，後者はき裂伝播を支配する要因を解明することが目的であって，問題を単純化して検討するものである。ある特定の条件下で行われた実験によると，この特定条件がき裂伝播速度に与える影響は分かるが，しかし，こういった研究では，ほとんどが定性的な説明にとどまっており，単純な条件下で得られた実験結果或いはモデルを複雑なランダム荷重問題に当てはめるのは困難である。従って，最終的には，支配因子の影響をできるだけ取り入れ，実際のランダム荷重実験を通すことによって，評価方法を定める方式に頼らざるを得ないのが現状である。

き裂伝播速度に影響を及ぼす数多くの要因及びそれぞれの影響の度合いをすべて解明するのは極めて困難ではあるが，工学的見地からすれば，重要な要因さえ把握すれば，実用に適する予測方法を得ることも可能と考える。これまで行われた様々な試みでは，定振幅荷重下の疲労き裂伝播挙動においてもっとも重要な因子とされるき裂開閉口現象[15)]の概念を用いて，ランダム荷重下のき裂伝播速度を予

* 東京大学工学部（現在台湾成功大学工学部）
** 東京大学工学部

原稿受理 平成5年7月7日
秋季講演会において講演 平成5年11月9，10日

測しようとする研究が最も多い[3)~7)]。しかし，開口荷重の予測手法が確立されていないことはともかくとしても，実測した有効応力拡大係数範囲を用いて評価した場合でさえ，き裂伝播速度は一致しない場合もあるため，このことから定振幅荷重下に比べて，ランダム荷重下におけるき裂開閉口現象の影響は相対的に小さく，開閉口現象のみでは正確に評価することが難しいとする報告もある[7)16)]。

一方，二段変動荷重の実験によれば，過大荷重を負荷した後，き裂伝播速度が負荷前より大幅に低下するといういわゆる遅延現象が起きることはよく知られている。この過大荷重の影響に関しては，負荷される定常荷重と，ランダム荷重下における荷重範囲の小さい荷重が負荷される時の状況が非常に似ていると考えられる。即ち，両者ともき裂の縁及びき裂先端近傍には，以前に負荷された高い荷重によって出来た寸法の大きな塑性域が既に存在しており，この塑性域の支配下で相対的に小さな荷重が負荷されるという状況である。従って，新しい塑性域が以前の塑性域を超えるほどの高荷重が負荷される場合を除いて，ランダム荷重の負荷過程は常に遅延状態におかれており，荷重範囲が同じであるとしても，定振幅荷重下よりランダム荷重下のき裂進展量は小さくなるであろう。言い換えれば，線形累積被害の概念に基づいて求められた，ランダム荷重における等価応力拡大係数範囲 ΔK_{eq} による予測は安全側となり，何らかの修正手法が必要となる。

そこで，本研究では，二段変動荷重実験から得られた知見をもとに，過大荷重による遅延度合とParis則による評価法との相関を検討し，予測手法を修正するには，Paris則の定数 m をパラメータとして導入する必要性を論じた。これを確認するため，荷重履歴の異なる定常ランダム荷重による疲労き裂伝播実験を行い，広範囲にわたるき裂開閉口荷重の変化を測定して，き裂伝播速度の推定にあたっての有効性を検証すると同時に，荷重履歴の異なる定常ランダム荷重下の疲労き裂伝播挙動の推定について考察した。

2. ランダム荷重下における遅延現象の評価

緒言で述べたように，ランダム荷重下の疲労き裂伝播速度に関する研究は，定振幅荷重実験により得られた結果を利用することが多い。具体的には，Paris則の係数 C 或いは，ΔK を修正して，ランダム荷重下のき裂伝播速度を予測するという手法がとられていた。しかし，Paris則によるき裂伝播速度の計算においては，C 及び ΔK だけでなく，m も重要な影響を与える。特にき裂長さが広い範囲にわたっての評価を行う場合，m 値による影響が一層顕著になる。確かに，定振幅荷重下では，振幅，応力比などの荷重条件が変わっても，m は殆ど変わらないため，材料定数と見なして良いと思われるが，外力がランダムになっても，その考え方をそのまま用いて良いかという疑問が生じる。そこで，これまでランダム荷重下のき裂伝播速度の評価によく用いられてきた，定振幅荷重下の m 値をランダム荷重下の問題にそのまま引用することの妥当性について検討してみた。

Fig. 1に示すように，過大荷重による遅延現象の評価パラメータとしては，過大荷重負荷時のき裂長さ a_1 が a_2 までに伸びるのに必要とする回数 N_d と，定振幅荷重下で a_1 が a_2 までに伸びるのに必要な回数 N_c がよく用いられている。すなわち，N_d/N_c は過大荷重影響下及び定振幅荷重下で，き裂長さが a_1 から a_2 になるまでの繰返し数の比であり，この値が大きいほど遅延が激しいことを意味する。周知のように，遅延現象が起きている a_1 から a_2 までの間では，伝播速度 da/dN は急激に減少し，ある最小値をとってから徐々に回復するという形態で変化する。従って，厳密に言うと過大荷重による影響の度合いは，過大荷重負荷時のき裂長さから伸びた量に関係するが，平均的に考えれば，N_d/N_c は，過大荷重影響下における定常荷重一波の平均進展量対定振幅荷重下における定常荷重一波の平均進展量の比の逆数となる。一方，この種の実験結果によると，過大荷重比 γ ($\gamma = P_{\max H}/P_{\max L}$) が一定であるにもかかわらず，$N_d/N_c$ はき裂長さ，または ΔK に依存することが報告されている[8)17)]。このように，過大荷重下においては，き裂進展とともに，遅延の度合いが激しくなる現象があるので，ランダム荷重下においても，相似の現象が起きる可能性が高いと考えられるが，これに関連する研究は殆ど見あたらない。そこで，単純化したモデルによる a-N Curveの計算を行い，その結果をParis則で整理してみることによって，ランダム荷重下における遅延挙動の傾向を予測し修正するにあたっての取扱い手法について検討した。

計算は次の仮定のもとに行う。

（1） き裂伝播速度 da/dN は次式で計算する。

$$da/dN = C(\Delta K)^m/(N_d/N_c) \qquad (1)$$

式の中の係数 C，m などは，定振幅荷重実験により得られた数値を用いた。遅延がき裂長さに依存しない場合，N_d/N_c を定数，依存する場合，き裂長さの単調増加関数とした。

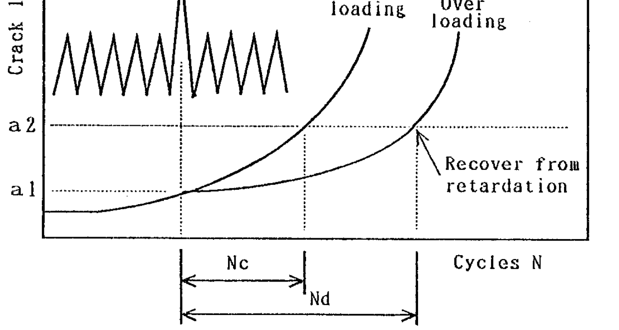

Fig. 1 Fatigue crack propagation curve under single overload

（2）　遅延現象が回復するまで，次の過大荷重は負荷しない。

（3）　過大荷重により出来た塑性域範囲内の N_d/N_c を定数とする。き裂先端がこの塑性域に到達すると，N_d/N_c は，新たにこの時のき裂長さに対応する値で与えられる。

（4）　塑性域寸法は Dugdale モデルにより，次式で計算する。

$$\omega=\pi/8(K/\sigma_Y)^2 \qquad (2)$$

（5）　き裂開閉口挙動は考慮しない。

計算の結果を Fig. 2 に示す。N_d/N_c が定数の場合（図の②），$da/dN-\Delta K$ Curve は定振幅荷重のそれと平行しており，遅延現象の修正は Paris 則の C のみによって行えるが，き裂が伸びるにつれて N_d/N_c が大きくなる場合（図の③，④），$da/dN-\Delta K$ Curve は定振幅荷重によって得られた Paris 則の係数 m より小さい値を示し，修正するには C だけではなく，m も考慮しなくてはならないことを示唆している。この計算は，単純な条件下で行われたもので，この結果からランダム荷重下のき裂伝播挙動を直接に推測することは出来ないが，緒言で述べたように，二段荷重下とランダム荷重下の遅延現象はそのメカニズムがよく似ているため，同じ傾向を持つことが十分考えられる。

本研究で実施する実験に用いられる試験片及び荷重条件下で，N_d/N_c はどう変動するかを確認するため，定振幅荷重と同じ条件(ただし，過大荷重比 $\gamma=2$)で，過大荷重による遅延挙動についての予備実験を行った。実験では，き裂伝播速度が過大荷重による遅延状態から回復してから，次の過大荷重をかけるという方式で行い，き裂半長が 31.65 mm になるまでの間に，全部で 5 回の過大荷重を負荷した。Fig. 3 に示す $a-N$ Curve 及び $da/dN-\Delta K$ Curve に基づいて，N_d/N_c を整理すると，Table. 1 に示すように，き裂が長いほど N_d/N_c が大きいことがわかった。

以上の検討結果から，ランダム荷重下の疲労き裂伝播速度を $da/dN-\Delta K_{eq}$ で整理する場合，ランダム荷重下の定数 m：m_r が定振幅荷重下の m より小さくなる可能性があり，しかも，γ が高いほど，N_d/N_c 値の増加率は，き裂の進展に従って高くなるという二段荷重実験の結果を考えれば，過大荷重が大きいほど，m_r が小さいという傾向になることも考えられる。この予測を検証するため，性質の異なるランダム荷重によるき裂伝播実験を行うことにした。

3.　ランダム波形の発生法と波形の性質

本研究で用いたランダム波形の発生は，余弦級数和法及び逆関数法の二種類によった。余弦級数和法については，既報[7]ですでに報告したため，説明を省略する。余弦級数和法では，パワースペクトルが決まると波形形状や性質が決まってしまう特性があり，荷重履歴の異なる波形の発生には向かないので，ここでは主として逆関数法を利用することにした。

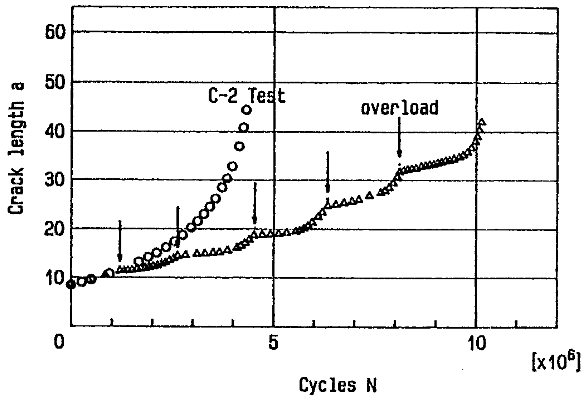

Fig. 3 (a)　a-N curve of single overload test

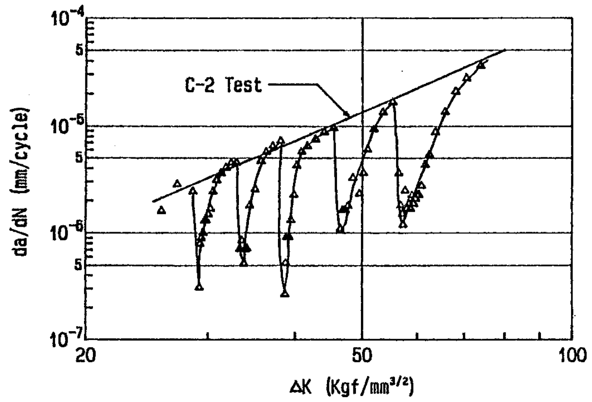

Fig. 3 (b)　$da/dN-\Delta K$ curve of single overload test

Table. 1　Result of retardation test by single overload

	First	Second	Third	Fourth	Fifth
a 1 (mm)	11.34	14.46	18.70	24.74	31.65
a 2 (mm)	12.80	16.61	22.53	30.65	41.22
N c (×10⁴)	44.49	44.11	49.13	43.10	35.91
N d (×10⁴)	103.0	157.0	158.0	171.0	199.25
N d／N c	2.32	3.56	3.22	3.97	5.55

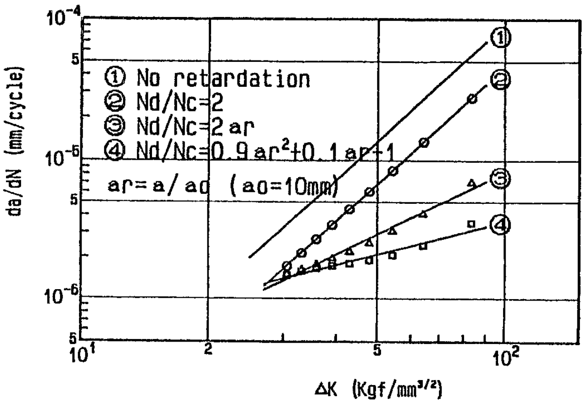

Fig. 2　Result of simulation under overload condition

あるランダム波形の荷重範囲の分布関数 $F(\varDelta P)$ が既知として，(0, 1) の一様乱数を順次に発生させ，分布関数の逆関数 $F^{-1}(\varDelta P)$ に代入して，得られた $\varDelta P$ を平均荷重 P_{mean} の直流成分に載せれば，任意の時系列のランダム波形を得ることができる。一様乱数の出現順序がランダムであるため，相隣り合う波の間には何の相関もない。そこで，相隣り合う波形が相関を持つランダム波形を生成する方法として，以下に述べる方法を考案した。

Fig. 4 に示すようにコンピュータで発生した第一個目の一様乱数 $(Y_1)_1$ $(i=1, j=1)$ を分布関数の逆関数に代入して $(\varDelta P_1)_1$ を算出し，その次の波の荷重範囲 $(\varDelta P_1)_2$ は，(3) 式で $j=2$ にし，(4)式に代入することによって求められる。ただし，$(Y_i)_j<0$ の場合(4)式の計算は絶対値を与えて行うことにした。

$$(Y_i)_j=RND_i-((\varDelta g/N)*(j-1)) \qquad (3)$$

RND_i：(0,1)の一様乱数

$i=1\sim\infty,\ j=1\sim N$　　N: One block の波数

$\varDelta g=1/g_n$　　g_n: $C.D.F$ の分割数

$$(\varDelta P_i)_j=F^{-1}((Y_i)_j) \qquad (4)$$

$$P_{max}(i, j)=P_{mean}+(\varDelta P_i)_j/2$$

$$P_{min}(i, j)=P_{mean}-(\varDelta P_i)_j/2 \qquad (5)$$

すなわち，コンピュータを用いて発生させた乱数 RND_i に対して，1 Block＝N 個の減衰波形が得られる。(3)式の‘−’記号を‘＋’にすれば振幅漸増の波形が求められるが，実用的には，出力の最大値の制限が必要となることもある。もちろん，Block 内の波形は互いに相関性を保っているし，$C.D.F$ の分割数 g_n を変えることにより減衰或いは漸増度合いの調整もできる。

まず，上記の方法により求めた4種類のランダム波形について説明する。

荷重範囲の分布関数は，次式のような二母数ワイブル分布を目標として，形状母数 α を変えて最大荷重範囲の異なる波形を発生させる。

$$F(\varDelta P)=1-\exp(-(\varDelta P/\beta)^{\alpha}) \qquad (6)$$

実験時のランダム波形信号発生プログラムの都合上，尺度母数は $\beta=50$ にし，形状母数として $\alpha=2$（レーレー分布），2.6 及び 7 の三条件で 1 Block 6 波((3)式の $N=6$) の減衰ランダム波形，さらに $\alpha=2$ で減衰なしの波形の合わせて 4 種類の波形を作った。この方法で得た波形を RWEI 1 ($\alpha=7$)，RWEI 2 ($\alpha=2.6$)，RWEI 3 ($\alpha=2$)，RWEI 4 ($\alpha=2$，減衰なし) とし，余弦級数和法で発生した波形を RW（広帯域），RN（狭帯域）とする。

Fig. 5 にランダム波形の荷重範囲の確率密度関数，Fig. 6 に波形の例を示す。RWEI 1 の振幅は大きく変わらないのに対して，RWEI 3，RWEI 4，RW，RN 波形では，振幅がかなり違うことがうかがえ，各波形の P_{mean} 及び $\varDelta P_{eq}$ を合わせたため，RWEI 1，RWEI 2，RWEI 3 の順に最大荷重が大きくなってくる。RWEI 3，RWEI 4，RN，RW では出

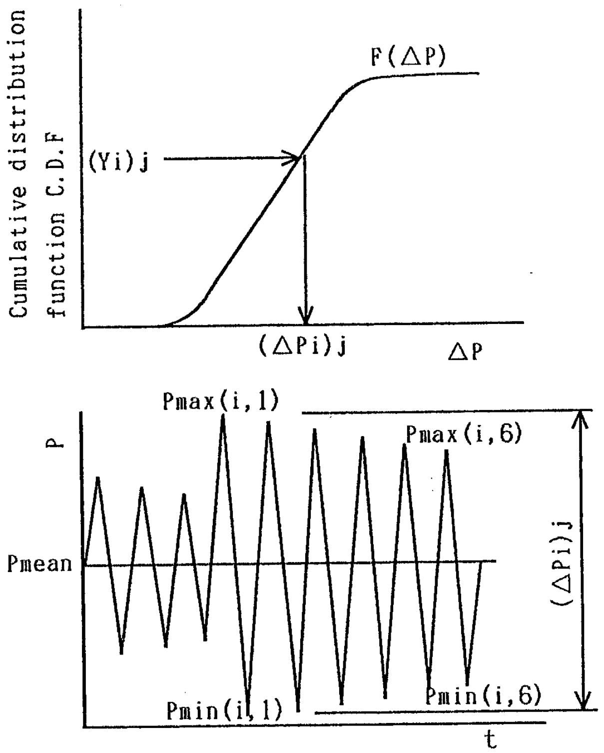

Fig. 4　Quasi-reverse function method for making random wave

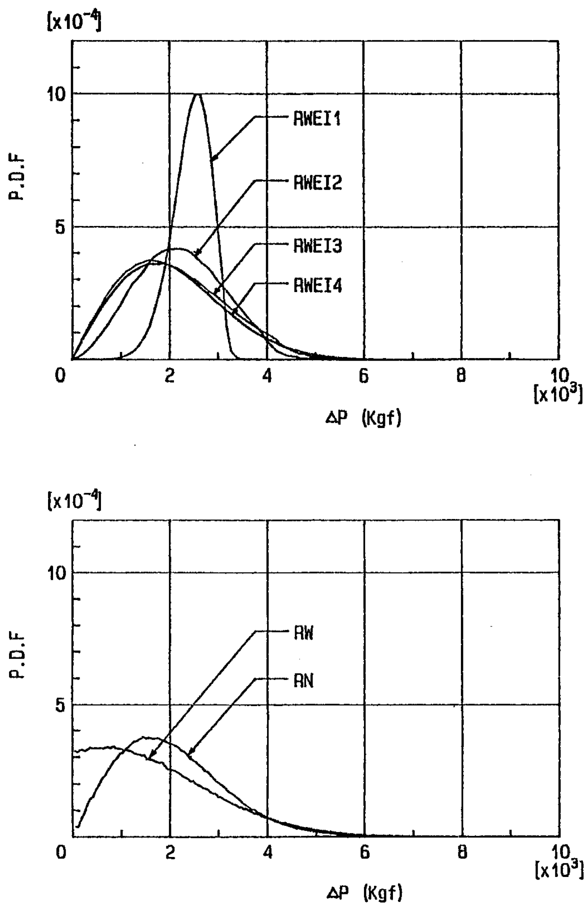

Fig. 5　Probability density function of random load

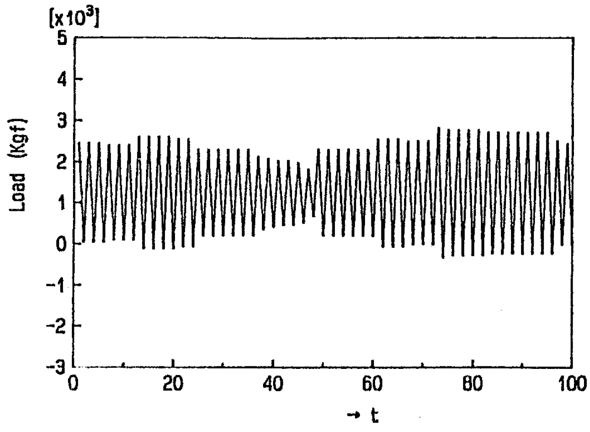

Fig. 6(a) Random loading wave (RWEI1)

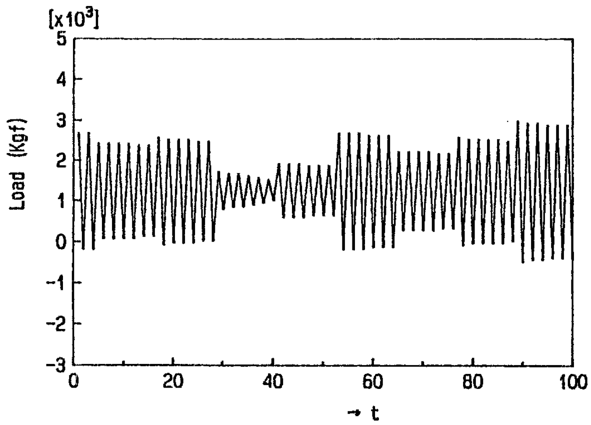

Fig. 6(b) Random loading wave (RWEI2)

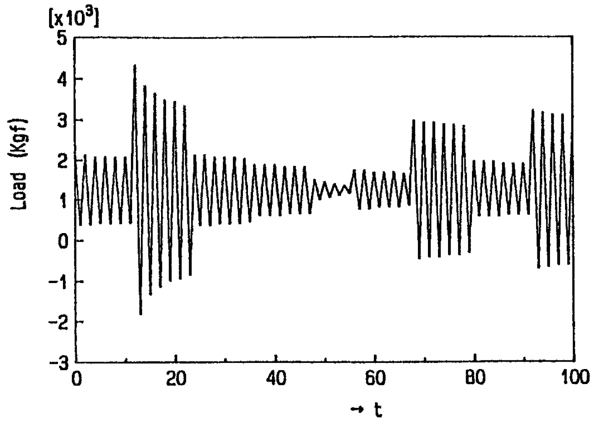

Fig. 6(c) Random loading wave (RWEI3)

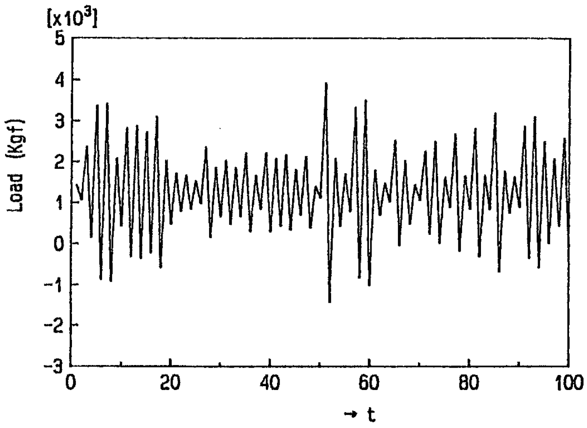

Fig. 6(d) Random loading wave (RWEI4)

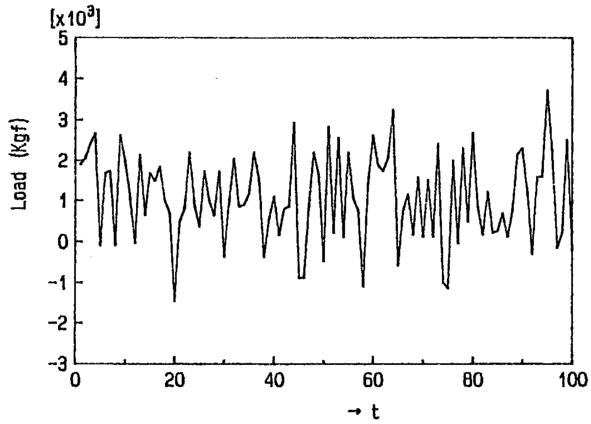

Fig. 6(e) Random loading wave (RW)

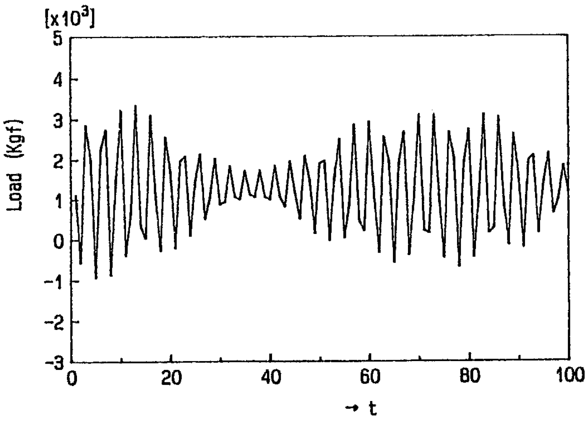

Fig. 6(f) Random loading wave (RN)

現順序，分布は異なるが，最大荷重はほぼ同値である。

4. 供試材，試験片及び実験方法

供試材は NK 規格 KAS-8711 構造用軟鋼で，板厚 20 mm の板を二枚にスライスして，板厚 4 mm まで研削した。加工による残留応力を除去するため焼鈍処理を行った。供試材の機械性質を Table. 2 に化学成分を Table. 3 に示す。

Table. 2 Mechanical properties

Ultimate stress σ_u(Kgf/mm²)	Yield stress σ_y(Kgf/mm²)	Elongation (%)
45	28	34

Table. 3 Chemical composition (wt. %)

C	Si	Mn	P	S
0.12	0.23	1.00	0.014	0.009

試験片は板幅130 mmで，板厚4 mmの中央切欠き付CCT試験片を用い，0.2 mm幅の機械切欠加工後，各試験条件の応力・波形によって約1 mm～2 mmの疲労き裂を進展させ，以後これを初期き裂（10 mm前後）とした。この試験片に対する疲労き裂伝播中の応力拡大係数Kの算定式として，次式を用いることにした。

$$\Delta K=\Delta\sigma\cdot\sqrt{\pi a}\cdot\sqrt{\sec(\pi\xi/2)}\cdot f(\xi) \quad (7)$$

ただし

$f(\xi)=1-0.025\xi^2+0.06\xi^4$

ここで，

$\xi=2a/W$

a：き裂半長

W：板幅

$\Delta\sigma$：公称応力範囲

負荷の制御は荷重制御により行った。き裂長さは電気ポテンシャル法により自動計測し，顕微鏡による目視も補助的に行って求めた。き裂開口荷重の測定はひずみゲージ法によった。開口荷重とき裂長さとの相関を調べるため，き裂長さが3～4 mm伸びる毎に，ゲージを貼り直して，開口荷重を計測した。実験は容量10 Tonのサーボ油圧疲労試験機を用い，12 Hzの速度で行った。

定振幅荷重実験は，Table. 4に示すように，応力範囲$\Delta\sigma$=4.8 kgf/mm^{2}で，応力比R=0及び0.52の二条件について行った。応力比R及び有効応力比Uは，$R=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$，$U=\Delta\sigma_{\mathrm{eff}}/\Delta\sigma$と定義する。

Table. 5にランダム荷重の実験条件を示す。過大荷重比は次式で定義する。

$$\gamma=\sigma_{\max}/(\sigma_{\mathrm{mean}}+\Delta\sigma_{eq}/2) \quad (8)$$

等価応力範囲$\Delta\sigma_{eq}$は線形累積被害則により次式のように計算する。

$$\Delta\sigma_{eq}=\left(\int(\Delta\sigma)^m\cdot f(\Delta\sigma)\cdot d(\Delta\sigma)\right)^{1/m} \quad (9)$$

Table. 4 Test conditions of constant amplitude loading

	$\Delta\sigma$ Kgf/mm^2	σ max Kgf/mm^2	σ mean Kgf/mm^2	σ min Kgf/mm^2	R	U
C－1	4.8	10.1	7.70	5.3	0.52	0.95
C－2	4.8	4.8	2.40	0	0	0.77

Table. 5 Test conditions of random loading

	σ max Kgf/mm^2	σ min Kgf/mm^2	σ meam Kgf/mm^2	$\Delta\sigma$ eq Kgf/mm^2	γ
RWEI1	5.95	-1.34	2.40	4.80	1.24
RWEI2	8.61	-3.99	2.40	4.80	1.79
RWEI3	11.70	-7.07	2.40	4.80	2.44
RWEI4	11.40	-6.75	2.40	4.80	2.38
RN	11.43	-6.88	2.40	4.80	2.38
RW	11.60	-7.77	2.40	4.80	2.42

$f(\Delta\sigma)$：$\Delta\sigma$の確率密度関数

定振幅荷重の実験条件に対応させるため，等価応力範囲$\Delta\sigma_{eq}$を4.8 kgf/mm^2, 平均荷重を$C-2$実験のそれと同値になるように設定した。

5. 実験結果及び考察

5.1 実験結果

定振幅荷重実験の結果をFig. 7に示す。Paris則で整理すると，mが殆ど同じで，応力比の違いによる伝播速度の差はCのみで表せる。実測の開口荷重を用い，$da/dN-\Delta K_{\mathrm{eff}}$で整理すると，その差は殆ど無くなる。なお，Fig. 7（c）に示すように，開口荷重レベルの変動は少量で，定振幅荷重下の開口荷重はき裂長さに依存せず，定数と見なして良いと考える。Fig. 7（d）の直線はParis則の材料係数

$C=48\times10^{-11}$

$m=2.8$ （Kgf-mm系）

で与えられる。

ランダム荷重実験のa-N CurveをFig. 8に示す。ランダム荷重下のき裂伝播寿命は$\Delta\sigma_{eq}$と等しい応力範囲を持つ定振幅荷重（$C-2$）のそれより長いことが確認された。しかし，波形によって，伝播寿命は$C-2$と殆ど同じのもあれば（RWEI 1），寿命が3倍前後のもある（RN，RWEI 3）。詳細な考察は，以下の3つのケースに分けて行う。

1・γが違う場合。

2・相隣り合う波形の相関の有無が違う場合。

3・応力範囲分布が違う場合。

5.1.1 γが違う場合

このケースでは，逆関数法によって得られたγの違いが著しいRWEI 1，RWEI 2，RWEI 3の結果を用いて検討する。$a-N$ Curveの結果から，γが大きいほど，伝播寿命が長くなる傾向がうかがえ，このデータをParis則で整理するとFig. 9となる。図中のΔK_{eq}の計算は（7）式に（9）式の$\Delta\sigma_{eq}$を代入することによって得られる。伝播速度の傾きは，γが小から大の順に小さくなり，Table. 6に示すように係数C_r, m_rは定振幅荷重下のC, mとかなり異なり，m_rが小さくなるのに対して，C_rが大きくなることが分かった。これは開閉口挙動が考慮されていないためであるからという可能性も考えられるので，実測の開口荷重（Fig. 10を参照）に基づいて，等価有効応力範囲$(\Delta\sigma_{\mathrm{eff}})_{eq}$を計算し，$da/dN-(\Delta K_{\mathrm{eff}})$による整理をしてみた。定振幅荷重下の開口荷重と同様にランダム荷重下の開口荷重もき裂長さに依存せず，殆ど一定であるため，$(\Delta\sigma_{\mathrm{eff}})_{eq}$と$\Delta\sigma_{eq}$の差が常に一定である。従って，$da/dN-(\Delta K_{\mathrm{eff}})_{eq}$による整理結果は$da/dN-\Delta K_{eq}$ Curveを左に平行移動する形となり，係数のC_rは変わるものの，m_rは変わらないことになる。しかし，このm_r値は定振幅試験のm値と大きく異なっている。

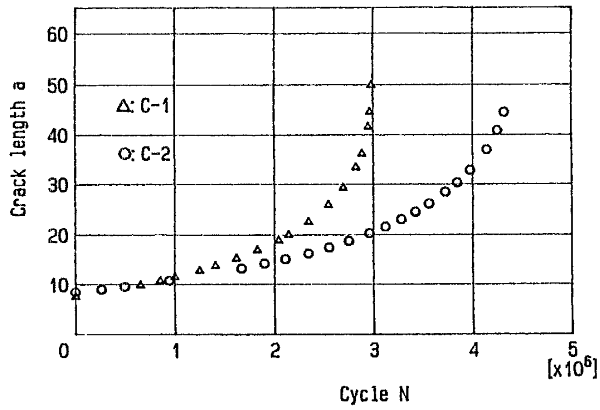

Fig. 7(a) a-N curve

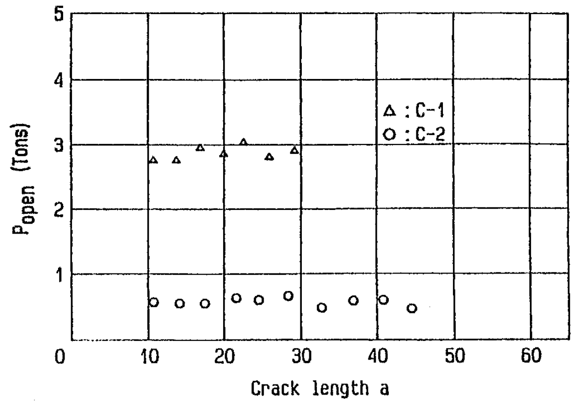

Fig. 7(c) $P_{open}-a$ curve

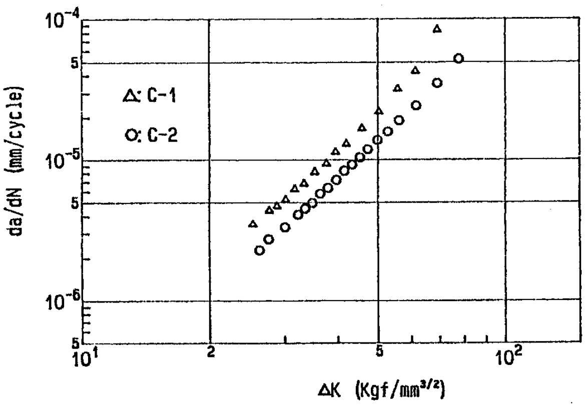

Fig. 7(b) $da/dN-\Delta K$ curve

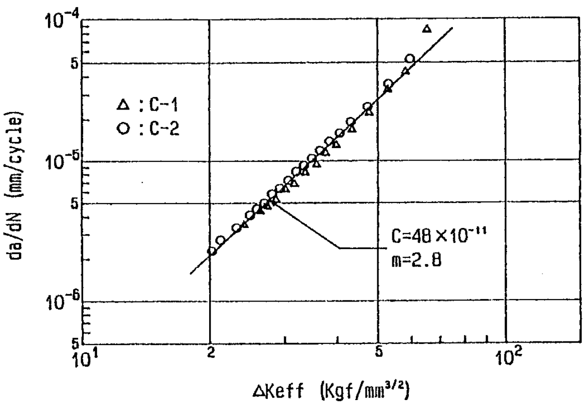

Fig. 7(d) $da/dN-\Delta K_{eff}$ curve

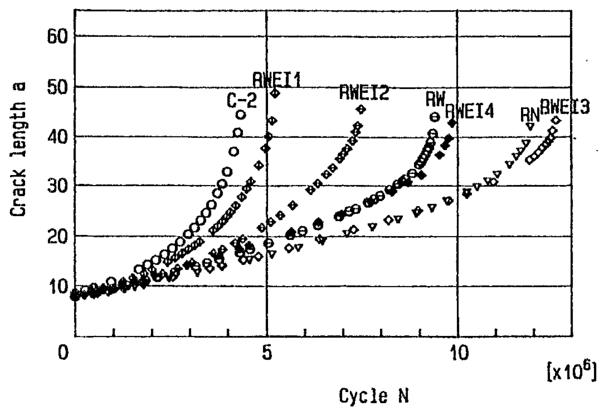

Fig. 8 a-N curve of random test

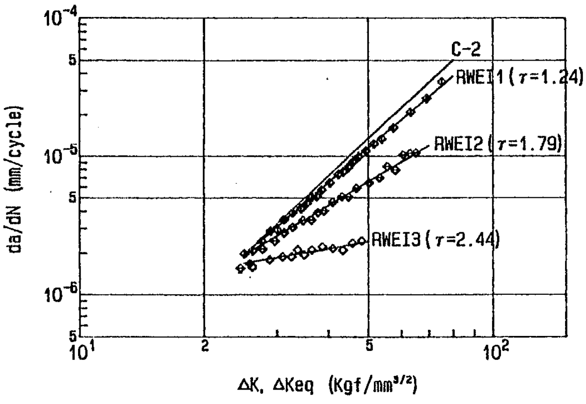

Fig. 9 $da/dN-\Delta K_{eq}$ curve

Table. 6 Test results of RWEI1, RWEI2, RWEI3

	C-2	RWEI1	RWEI2	RWEI3
C_r $(\times 10^{-11})$	24.6	49.24	640.82	32569
m_r	2.79	2.57	1.77	0.51

5.1.2 相隣り合う波形の相関の有無が違う場合

試験番号 RWEI 1, RWEI 2, RWEI 3 はそれぞれの応力範囲分布及び最大荷重が異なるので，相関の有無による差異を直接に比較することができない。応力範囲の分布及び γ がほぼ同じであり，相隣り合う波形の相関が全くない RWEI 4 と相関のある RWEI 3, RN の結果を用いて，検討を行うことにする。伝播寿命では，RWEI 3 と RN は殆ど変わらないが，RWEI 4 がやや速い結果を示す。相関が強い波形の伝播速度が遅いという傾向は過去の報告と一致する。

$da/dN-\Delta K_{eq}$ で整理すると，Fig. 11 となる。三者はほとんど同じ傾きを示すが，RWEI 4 だけが少し高 da/dN 位置

にあることがわかった。直接に比較しやすいように，m_r の平均値を取って，それぞれの C_r 値を計算した(Table. 7 を参照)。RWEI 4 の C_r が 3 割弱大きいことが分かった。すなわち，相隣り合う波形の相関の有無による伝播速度の相違は C_r で表すことが出来，修正するには C_r のみで行えることを意味する。なお，開口荷重レベルは前述したようにき裂長さと関係なく，ほぼ一定であり，RWEI 4 の 1.63 kgf/mm^2 は，RWEI 3 の 1.92 kgf/mm^2，RN の 2.31 Kgf/mm^2 と比べてやや小さい数字を示し，Table. 7 の C_r 値との対応が定性的に一致する。

5.1.3 応力範囲分布が違う場合

γ=2.4 の実験においては，異なる応力範囲分布を有するのは RW で，この実験の結果を用いて，RW と応力範囲分布が異なる残り 3 体（3 体ともほぼワイブルの形状母数 α =2) の実験結果とを比べながら検討する。Fig. 8 に示したように，き裂伝播寿命については，RW と，相隣合う波形の相関のない RWEI 4 とは同じであるが，Fig. 12 の $da/dN-\Delta K_{eq}$ Curve では，き裂伝播速度は，定振幅荷重のそれより小さいものの，傾きは RWEI 4 よりやや大きい結果を示す。m_r の値については，RWEI 4 の 0.5 に対し，RW は 1.03 となる。ランダム波形の応力範囲分布が違うと，き裂伝播速度の増加率も多少違ってくることがあるとしても，γ が大きいほど m_r が小さくなる傾向は間違いないと考える。

5.2 C_r, m_r との関係

以上の検討から，ランダム荷重下のき裂伝播速度を本論文での等価応力を介して計算するに際して，定振幅荷重の m をそのまま引用するのは不適切であることが分かった。しかし，m も修正すべき事実が判明したことは，き裂伝播速度の予測問題を一層複雑にする。すなわち，ΔK_{eq} は波形の性質の長期的統計資料により求められるとしても，C_r と m_r の両者とも明らかにしない限り，予測することができない。ランダム荷重下の開口荷重を予測することが難しく，実測の開口荷重による整理も良くないため，本研究では開口荷重を考慮しない推定法を以下のように提案する。

各実験の C_r, m_r と定振幅荷重の C, m を比べれば，m_r が減少するのに対して，C_r が増加する。さらに，Fig. 9 の $da/dN-\Delta K_{eq}$ Curve が示すように，き裂長さが小さく，ΔK_{eq} が小さい段階では，波形の種類に関係なくランダム荷重下の da/dN と定振幅のそれとはあまり違わないが，高 ΔK_{eq} 領域になるほどその差が顕著になる。各実験の $da/dN-\Delta K_{eq}$ Curve を低 ΔK_{eq} 領域に伸ばすと，ほぼ一点に集中する様子がうかがえる。この点をピボット点と考え，この点に対応する X 軸の値を $(\Delta K_{eq})_P$，Y 軸の値を $(da/dN)_P$ と定義する。すなわち，ΔK_{eq} が $(\Delta K_{eq})_P$ を上回ってから，遅延挙動による伝播速度の低下が顕著になり，定振幅荷重と違う傾向で進展する。実験データから，$(\Delta K_{eq})_P$ は 20～25 kgf/mm$^{3/2}$，$(da/dN)_P$ は 1.5×10^{-6} mm/cycle 前後で，従来，定振幅荷重試験で得られた ΔK_{th} と $(da/dN)_{th}$ に非常に近い。一方，Paris 則に log をかけて移項すると，以下のようになる。

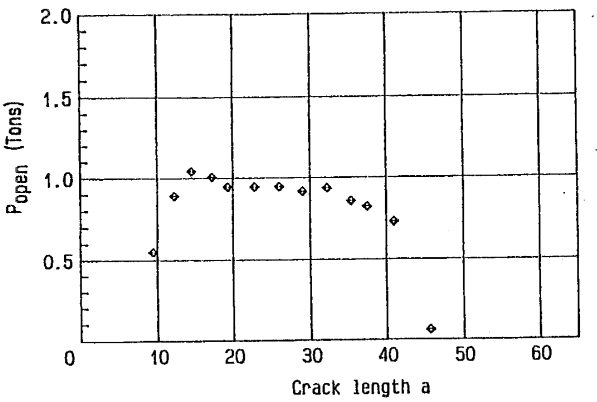

Fig. 10 Example of $P_{open}-a$ curve (RWEI2)

Table. 7 Test results of RWEI3, RWEI4, RN

	RWEI3	RWEI4	RN
C_r ($\times10^{-11}$)	33569	41350	32574
m_r	0.5	0.5	0.5

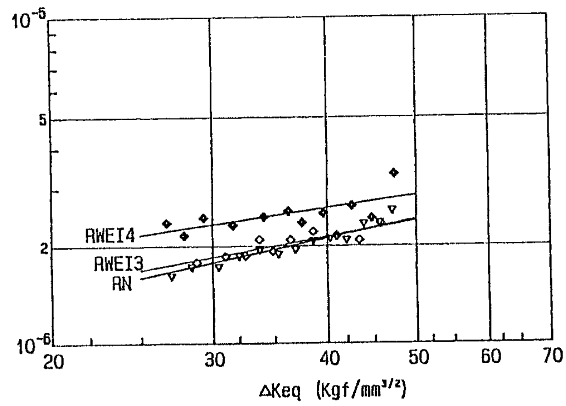

Fig. 11 $da/dN-\Delta K_{eq}$ curve

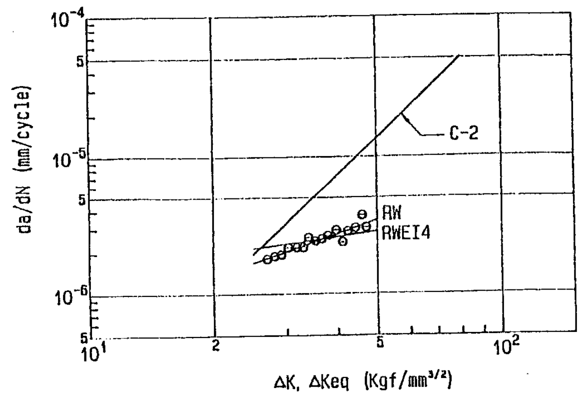

Fig. 12 $da/dN-\Delta K_{eq}$ curve

$$\log C = \log(da/dN) - m\log(\Delta K_{eq}) \qquad (10)$$

各ランダム荷重実験のき裂伝播曲線 $d/dN-\Delta K_{eq}$ Curve が一点に集中するならば，$(\Delta K_{eq})_P$ と $(da/dN)_P$ を上式に代入することによって，C_r，m_r 関係式がわかる。Y 軸を $\log C$，X 軸を m にして，各実験により得られた C_r，m_r を代入すると，これらのデータは傾き $-\log((\Delta K_{eq})_P)$，Y 切片 $(da/dN)_P$ の直線上に乗るはずである。Fig. 13 に $(\Delta_{eq})_P=23\ \mathrm{Kgf/mm^{3/2}}$，$(da/dN)_P=1.5\times10^{-6}$ mm/cycle として描いた結果を示す。各データが線上ないし，ごく近傍にあるため，ランダム荷重の種類によらずに，伝播速度曲線がピボット点を通過すると言って良いと考えられる。$(\Delta K_{eq})_P$ と $(da/dN)_P$ は定振幅荷重の ΔK_{th} と $(da/dN)_{th}$ と等しいと見なせば，C_r，m_r のいずれか一方が分かれば，残りの一方が算出できることになる。

遅延現象が過大荷重により出来た塑性域寸法に関係するとされているため，ここで，塑性域比 r_p を次のように定義し，m_r との関係を整理してみた。

$$r_p=\omega_r/\omega_c \qquad (11)$$

ω_r：ランダム荷重下き裂先端の塑性域寸法

ω_c：同平均荷重を持つ定振幅荷重の塑性域寸法

ω_c は簡単に求められるが，ω_r は最大荷重の出現確率及びき裂伝播速度に依存するため，正確に求めるのは困難である。便宜上波形の最大荷重を用いて計算することにした。縦軸が m_r，横軸が r_p の図に C-2 及びランダム荷重実験のデータをプロットしたのが Fig. 14 である。このように材料の m_r-r_p Curve がわかれば，ランダム荷重の波形の r_p から m_r を予測し，そして(10)式から C_r を算出することにより，伝播速度が計算できる。

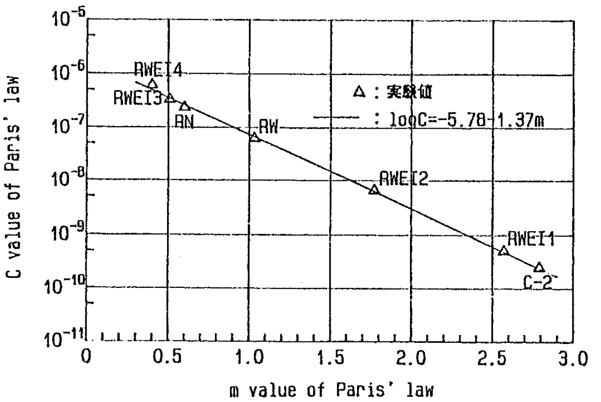

Fig. 13 C-m relation under different random loading

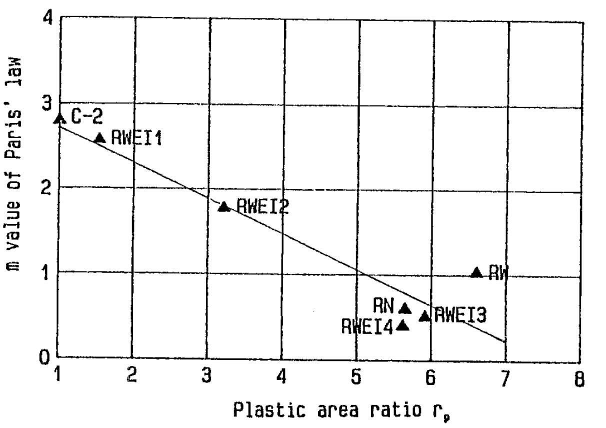

Fig. 14 m-r_p relation under different random loading

5.3 他方法との比較計算

この節では，過去に提案された推定法及び上述の整理法を用いて，伝播寿命のシミュレーションを行い，その優劣を比較する。本研究の方法の他に，Wheeler model と有効開閉口荷重整理法を使用する。まず，Wheeler model による予測は，切欠による初期の上昇段階及び破断前の降下段階を避けて，15 mm～25 mm の間について行った。Wheeler model の材料及び荷重条件により定まる定数 m_w を 1 にすれば，ランダム荷重の種類を問わずに，実測の伝播寿命の±30％以内という結果が得られるが，m_w をそのままにして，広範囲にわたり，計算を行えば，誤差が大きくなり，正しい予測が出来ない。例えば，幅 2000 mm の鋼板にある長さ 20 mm のき裂が，番号 RWEI 3 実験に用いられるランダム荷重のもとに，400 mm まで進展するとした場合，両者で 4 倍弱の違いを生じる (Fig. 15 を参照)。図中のデータは RWEI 3 実験結果の C_r，m_r を用いて計算した。Table. 8 にき裂長さが 100 mm，200 mm，300 mm，400 mm まで伸びるのに必要とする回数の比較を示す。誤差がき裂長さと比例して，段々大きくなることが分かる。それを修正するには，各き裂長さに応じて，最適 m_w を選

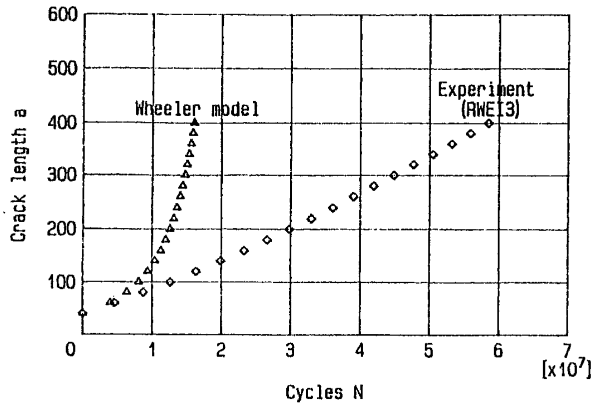

Fig. 15 Example of simulation based on Wheeler model

Table. 8 Comparison of calculation results

(×10⁴)	N_{100}	N_{200}	N_{300}	N_{400}
Experiment	1262	2982	4483	5853
Wheeler model	804	1260	1476	1608
$(\Delta K_{eff})_{eq}$ method	478	738	858	930
Proposed method	1095	2494	3661	4695

ぶしかないため，現実問題での対応性が問われる。

有効開閉口荷重整理法は，実測の開口荷重を用いて，$(\Delta K_{eff})_{eq}$ により計算を行う。Wheeler model による計算と同じように，定振幅荷重の m を使用するため，長期的な予測になればなるほど，誤差が大きくなる問題は依然として残る(Fig. 16 を参照)。

Fig. 13 に示す直線に従い，各実験に用いられている波形の r_p からそれぞれの m_r を求めてから，(10)式により C_r を算出する。この C_r，m_r 及び ΔK_{eq} を Paris 則に代入して，伝播寿命を計算する。Fig. 17 に計算結果を示す。Table. 8 に示すように，他の方法に比べて，誤差が小さいことがうかがえ，より有効な推定法であることを確認した。本論文で採用したランダム荷重の過大荷重比，波形の出現順序は，大きく異なっているにもかかわらず，提案した推定法は良好な結果を与えており，したがって任意のランダム荷重にも適用できる可能性があると考えられるが，このことを確認するにはさらに性質の異なるランダム荷重を用いた実験の必要があろう。

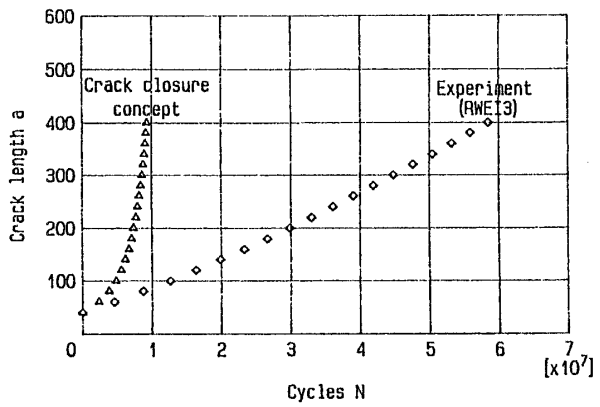

Fig. 16 Example of simulation based on crack closure concept

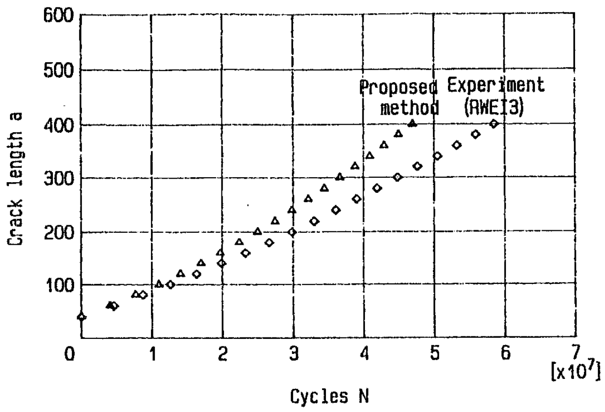

Fig. 17 Example of simulation based on method proposed

6. 結　　言

二段変動荷重実験により得られた知見をもとに，ランダム荷重下の伝播速度を ΔK_{eq} で整理する場合，最大荷重による遅延挙動の影響で，定振幅荷重で得られた係数 m は異なる値を示すはずと予測し，性質の異なる6種類のランダム荷重による疲労き裂伝播実験を実施して，これを検証した。得られた結果は以下の通りである。

1・ランダム荷重の等価応力範囲と定振幅荷重の応力範囲が一致しているにもかかわらず，ランダム荷重下の伝播寿命は定振幅より長い。$da/dN-\Delta K_{eq}$ による整理では，波形により異なる進展速度を示す。過大荷重比 γ が大きいほど，m_r が小さくなる傾向が確認できた。従って，ランダム荷重下の疲労き裂伝播を予測する際，定振幅荷重の m をそのまま利用すれば，多大の誤差を招く恐れがある。

2・応力範囲分布が同じの場合，相隣り合う波形の相関の有無による伝播速度の差異は，C_r で表せ，修正するには C_r のみでよい。

3・ランダム荷重の性質によって，伝播速度の傾向が違うが，$\Delta K_{eq} \fallingdotseq \Delta K_{th}$ (定振幅荷重下の下限界応力拡大係数範囲)のときその差がほとんどないことが実験結果によって判明した。従って，ランダム荷重下の m_r と C_r は一定の相互関係を保っていて，(10)式に ΔK_{th} と $(da/dN)_{th}$ を代入することによって，その関係は求められる。

4・新しい試みとして，ランダム荷重の ΔK_{eq}，塑性域比 r_p から予測した m_r 及び C_r を用いて，伝播速度の予測方法を提案し，シミュレーション計算を行った結果，従来の方法に比べて，誤差が小さく，有効であることが確認された。この推定は，任意のランダム荷重に適用できる可能性があると考えているが，さらに多くのランダム荷重を用いた実験によって確認する必要がある。

参　考　文　献

1) P. C. Paris and F. Erdogan : "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws" Trans, ASME, J. Basic eng., 85, (1963), pp 528
2) J. M. Barsom, : "Fatigue Crack Growth Under Variable-Amplitude Loading in ASTM ASIA-BSteel" ASTM, STP536, (1973), pp 147-167
3) 菊川，城野，三上："定常変動荷重下の疲労き裂進展とき裂開閉口挙動（アルミ合金の場合）" 材料，31巻，(1982) pp 483
4) 町田，大岡，渡辺，森田："実働荷重下の疲労き裂伝播の研究(第一報)" 日本造船学会論文集，154，(1983)，pp 396-406
5) 町田，吉成，渡辺，森田："実働荷重下の疲労き裂伝播の研究(第二報)" 日本造船学会論文集，160，(1986)，pp 396-406
6) 町田，吉成，渡辺，森田，石橋："実働荷重下の疲労き裂伝播の研究(第三報)—狭帯域ランダム荷重下の疲労き裂進展挙動の予測手法" 日本造船学会論文集，

162, (1987), pp 467-473
7) 町田, 吉成, 林:“広帯域ランダム荷重下の疲労き裂進展挙動の予測手法” 材料, Vol. 39, No. 433, (1990), pp 1126-1132
8) E. F. J. von Euw, R. W. Hertzberg and Richard Roberts: “Delay Effects in Fatigue Crack Propagation” ASTM STP513, (1972), pp 130-259
9) J. Schijve: “Effect of Load Sequences on Crack Propagation Under Random and Program Loading ” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 5, (1973), pp 269-280
10) R. P. Wei and T. T. Shih: “Delay in Fatigue Crack Growth” Int. J. of Fracture, Vol. 10, No. 1, (1974), pp 77-85
11) P. J. Bernard, T. C. Lindly and C. E. Richards: “Mechanisms of Overload Retardation During Fatigue Crack Propagation” ASTM STP 595, (1976), pp 78-97
12) C. Bathias and M. Vancon: “Mechanisms of Overload Effect on Fatigue Crack Propagation in Aluminium Alloys” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 10, (1978), pp 409-424
13) 城野, 金谷, 管田, 菊川:“単一過大荷重による平面ひずみ条件下の疲労き裂進展の遅延挙動” 材料, 第32巻, 第363号, (1982), pp 1383
14) S. Matsuoka and K. Tanaka: “The Retardation Phenomenon of Fatigue Crack Growth in HT80 Steel”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 81, (1976), pp 507-523
15) W. Elber: “The Significance of Fatigue Crack Closure” ASTM, STP486, (1971), pp 230-242
16) 田中, 加藤, 中山:“アルミニウム合金の二段変動荷重下におけるき裂進展速度の遷移現象について” 材料, 第39巻, 第442号, (1990), pp 945
17) 松岡, 田中, 神津:“過大荷重後の疲労き裂伝ぱの遅延現象におよぼす試験片板厚の影響” 日本機械学会論文集, (A編), 45巻, 398号, (1979), pp 1135
18) 得丸, 添田, 中溝, 秋月:“計数・測定＝ランダムデータ処理の理論と応用”, 培風館
19) 岡村, 板垣:“強度の統計的取扱い”, 培風館
20) 酒井, 岡村:“簡易波形計数法の検討とその適用による不規則荷重下疲労寿命の推定”, 機械学会講演論文集, No. 790-9, (1977), pp 89
21) 加藤:“広範囲の応力比条件下での疲労き裂伝播速度式の検討” 日本造船学会論文集, 153, (1983), pp 336
22) 岩崎, 加藤, 川原:“ランダム荷重下での疲労き裂伝播に及ぼす荷重頻度分布形状の影響” 日本造船学会論文集, 156, (1984), pp 523