

昭和55年度 卒業論文

プログラム荷重下の
疲労き裂進展特性の評価

指導教官

中沢 一 教授

小林 英男 助教授

機械物理工学科

学 7132

小川 武史

目次

1章	緒言	1
2章	供試材および実験方法	2
2.1	供試材および試験片	2
2.2	疲労試験	4
2.2.1	プログラム荷重試験方法	4
2.2.2	下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の測定方法	5
2.3	き裂開閉口挙動の測定	6
3章	実験結果	
3.1	一定振幅荷重試験 ($r=1$)	
3.1.1	き裂進展速度	14
3.1.2	き裂開閉口挙動	15
3.2	プログラム荷重試験	
3.2.1	$r=0.5$	16
3.2.2	$r=0.25$	17
3.3	き裂進展速度の比較	18
4章	検討および考察	
4.1	ASME sec XI との比較	32
4.2	下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の検討	33
4.3	プログラム荷重下のき裂進展速度の検討	35
5章	結言	46
	参考文献	47

＝ / 章 緒言 ＝

実際の構造物にはランダムな変動荷重が作用する。従来から疲労き裂進展挙動に荷重変動履歴が顕著な影響を及ぼすことがよく知られており、構造物の設計に際してはき裂進展特性を考慮する必要がある⁽¹⁾。現在、変動荷重下のき裂進展特性はランダム荷重試験とプログラム荷重試験で評価されている。ランダム荷重試験は実働荷重状態を忠実に模擬する方法であるが、プログラム荷重試験ではその頻度分布を考慮し、より簡便に疲労き裂進展特性を調べることが可能である。また、このようなプログラム荷重下のき裂進展特性を予測する際に、き裂進展に関与しない変動荷重の打切りを与える疲労き裂進展に対する下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の存在は、まわめて重要である。最近、従来から行われてきた応力拡大係数範囲 ΔK 漸減試験により測定された ΔK_{th} について、問題が提起されている⁽²⁾。

本研究では、原子カプラントの荷重頻度分布を模擬したブロック状8段プログラム荷重を用いて、広範囲にわたる疲労き裂進展特性の評価を行い、また ΔK_{th} の測定基準とそのプログラム荷重下のき裂進展特性の予測への適用についての検討をした。

— 2 章 供試材および実験方法 —

2,1 供試材および試験片

供試材は、原子炉圧力容器用SFVV3鋼である。その製造行程および熱処理条件を表2,1および表2,2に示す。素材には実機と同一条件の $620^{\circ}\text{C} \times 26\text{h}$ の応力除去焼鈍(S.R.)が施されている。したがって、後述するように試験片に同一条件でS.R.を施した場合でも、材料特性は変化しないものと考えられる。また、その化学性分および機械的性質を表2,3および表2,4に示す。

試験片は素材の板厚の $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$ の部分から(この部分では機械的性質が一定している)L-T方位(荷重が供試材鍛造方向, き裂伝播方向が供試材板厚方向)に採取した。試験片形状は図2.1に示す1インチコンパクト試験片で、厚さ 12.5 mm であり、ASTM規格E647-78Tに従って製作した。

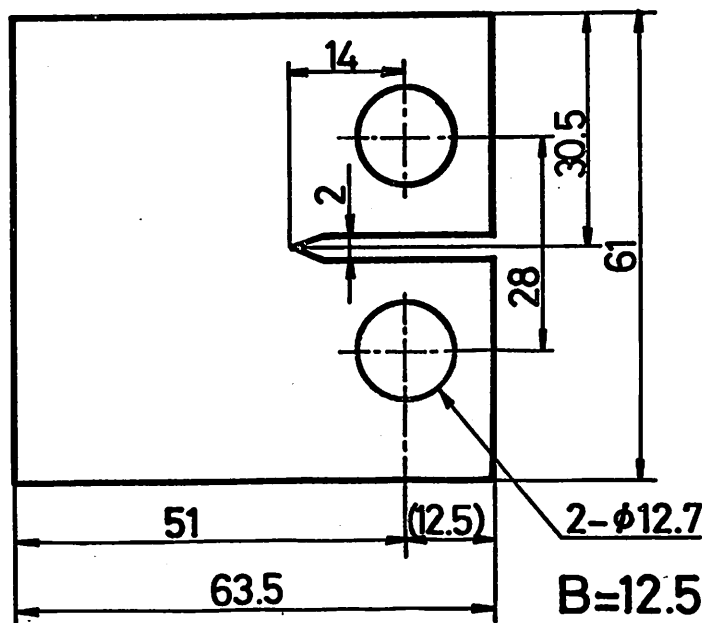


図2.1 試験片形状

表 2.1 Manufacturing Sequence of Test Materials

Process	Condition
Melting and Refining	Electric Furnace
↓	
Ingot Making	
↓	
Forging	Thickness 165 mm
↓	
Heat Treatment (1)	Normalizing and Tempering
↓	
Gas Cutting	Test Material Sampling
↓	
Heat Treatment (2)	Quenching and Tempering
↓	
PWHT	
↓	
Gas Cutting	Test Block Sampling
↓	
Shipping	

表 2.2 Heat Treatment

Heat Treatment	Holding Condition	Cooling Condition
Normalizing	910°C x 8 h	Air Cool
Tempering	660°C x 7 h	Air Cool
Quenching	890°C x 8 h	Water Quench
Tempering	650°C x 8 h	Air Cool
PWHT	620°C x 26 h	Furnace Cool (<50°C/h)

表 2.3

Chemical Composition of Material (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V	Al
0.18	0.22	1.46	0.003	0.005	0.69	0.15	0.05	0.57	<0.01	0.029

表 2.4

Mechanical Properties of Material

Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
459.6	594.9	31.2	74.4

1MPa=0.102kgf/mm²

2.2 疲労試験

実験には、MTS社製クローズドループの±10 t_{on} 電気油圧式疲労試験機を用い、常温大気中で荷重制御（応力比、 $0 < R \leq 0.1$ ）で行った。なお荷重振幅一定の実験は $R = 0.06$ で行った。また繰返し速度は80 Hz以下である。

き裂進展速度はその都度試験を中断し、光学顕微鏡(100倍)によりき裂長さを測定し、求めた。き裂長さとしては両表面の平均値を用いている。

応力拡大係数 K は $0.2 \leq \alpha < 1.0$ の範囲で十分な精度を持つ次式により求めた。⁽³⁾

$$K = f(\alpha) \cdot P / B \cdot W^{1/2} \quad (2.1)$$

$$f(\alpha) = \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{1/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (2.2)$$

ここで、 α は試験片両表面で測定したき裂長さの平均値、 W は試験片幅、 B は試験片厚さ、 P は荷重である。

2.2.1 プログラム荷重試験方法

実験に用いたプログラム波は Haibach により提案された⁽⁴⁾分布波である。ガウス型の累積頻度分布を $\alpha = 0$ 、一定荷重の累積頻度分布を $\alpha = 1$ とし両者の間を比例配分すればその比例定数により α の数値が与えられる(図2.2)。試験は $\alpha = 0.5$ および $\alpha = 0.25$ の場合について、1 ブロックの $\Delta K-N$ 累積頻度分布を8個のステップに分割し、そのブロックを繰

返した。ブロック内の荷重順序は漸増型に限定した(図2.3)

1 ブロックの繰返し数は $R=0.5$, $R=0.25$ ともに $d\%N > 10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ mm/cycle}$ の範囲に対して 10^4 回, $d\%N < 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ の範囲に対して 10^6 回とした。それぞれのステップ分割を表2.5, 表2.6 および表2.7に示す。このブロックによりブロック中の最大荷重 σ を漸増, 漸減または一定に保ち, き裂進展速度を測定した。また, 1ブロックのき裂進展量が大きい場合には, ステップ毎にき裂長さを測定し, $\Delta K/\Delta R$ の誤差を最小となる様に σ を減少させた。ここで σ はブロック中の最大の ΔK である。

2.2.2 下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の測定方法

疲労き裂進展の下限界値を示す下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} が現在までに種々の材料について得られているが, 必ずしも一定した条件により得られたわけではない。通常行われている ΔK 漸減試験(図2.4)における ΔK の減少率や予き裂導入条件などに対する一定した基準は設けられていない。これに対しASTMでは ΔK 漸減試験により ΔK_{th} を求める標準方法が検討されつつある⁽⁵⁾。ASTM(案)では応力拡大係数漸減に起因する過渡現象(き裂進展の遅れ遅延)の影響を取り除くために以下の制限を設けている。

ΔK 勾配

$$\frac{1}{\Delta K} \frac{d\Delta K}{da} \geq -0.08 \quad (\text{mm}^{-1}) \quad (2.3)$$

き裂進展速度 da/dN 測定範囲

$$\Delta a \geq 0.5 \quad (\text{mm}) \quad (2.4)$$

ここで Δa はき裂進展量である。

ΔK_{th} は $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ の速度域をほぼ等分割する 5 点以上の測定点を最小二乗法により直線近似し, $da/dN = 10^{-7} \text{ mm/cycle}$ に外挿することにより決定する。

本実験では式 (2.3) をほぼ満足する勾配を用い, 予き裂導入時の応力拡大係数範囲 ΔK_I を大幅に変えて ΔK_{th} を決定し, ΔK_{th} に対する ΔK_I の影響を調べた。また式 (2.4) に対しても検討した。

さらに ΔK_{th} に達した試験片に応力除去焼鈍 (620°C , 1h , 表 2.2 参照) を施し, ΔK_{th} 以下から ΔK 漸増試験を行い ΔK_{th} の検討をした。

2.3 き裂開閉口挙動の測定

超音波法によるき裂開閉口挙動の測定は図 2.5 に示すように, 試験片上端面 (Top-on) の, 疲労き裂先端とほぼ一致する場所の板厚中央部に垂直探触子を設置し, 試験機の繰返し速度を 0.1 Hz として, 疲労サイクルにおけるエコー出

カの変化を読み取ることにより行^(b)た。

荷重-エコー出力($P-\Delta E$)曲線の代表的な例を図2.6に示す。これによると、荷重の増加に伴いエコー出力が増加しているが、 $P-\Delta E$ 曲線は(b),(d)の折れ曲り点を持っている。簡単なモデルを用いてき裂先端の変形を推測すると図2.6の(a)~(e)は図2.7の(a)~(e)に対応していると考えることができる。(a)~(b)においてき裂はほぼ完全に閉じており、(b)~(d)においてき裂は徐々に開き、(d)点でき裂先端が開口する。(d)~(e)はき裂先端の鈍化過程であると考えられる。従って、き裂が開口する荷重 P_{op} は図2.6の(d)点により求められ、これから開口比 U は次式により求めた。

$$U = \Delta P_{ess} / \Delta P = (P_{max} - P_{op}) / (P_{max} - P_{min}) \quad (2.5)$$

このモデルは低 ΔK レベルにおける疲労き裂の不連続進展挙動には適用され得ない。しかしながら、この場合においても $P-\Delta E$ 曲線はき裂先端の不連続面の変化をとらえていると考えることができ、き裂先端領域の平均的なき裂開閉口現象がとらえられていると考えられる。

表 2.5

p=0.5

Step No.	$\Delta K_j / \overline{\Delta K}$	$n_j(\text{cycles})$	$\Sigma n_j(\text{cycles})$
1	0.562	6050	6050
2	0.637	2800	8850
3	0.712	918	9768
4	0.787	200	9968
5	0.862	27	9995
6	0.925	3	9998
7	0.975	1	9999
8	1.000	1	10000

表 2.6

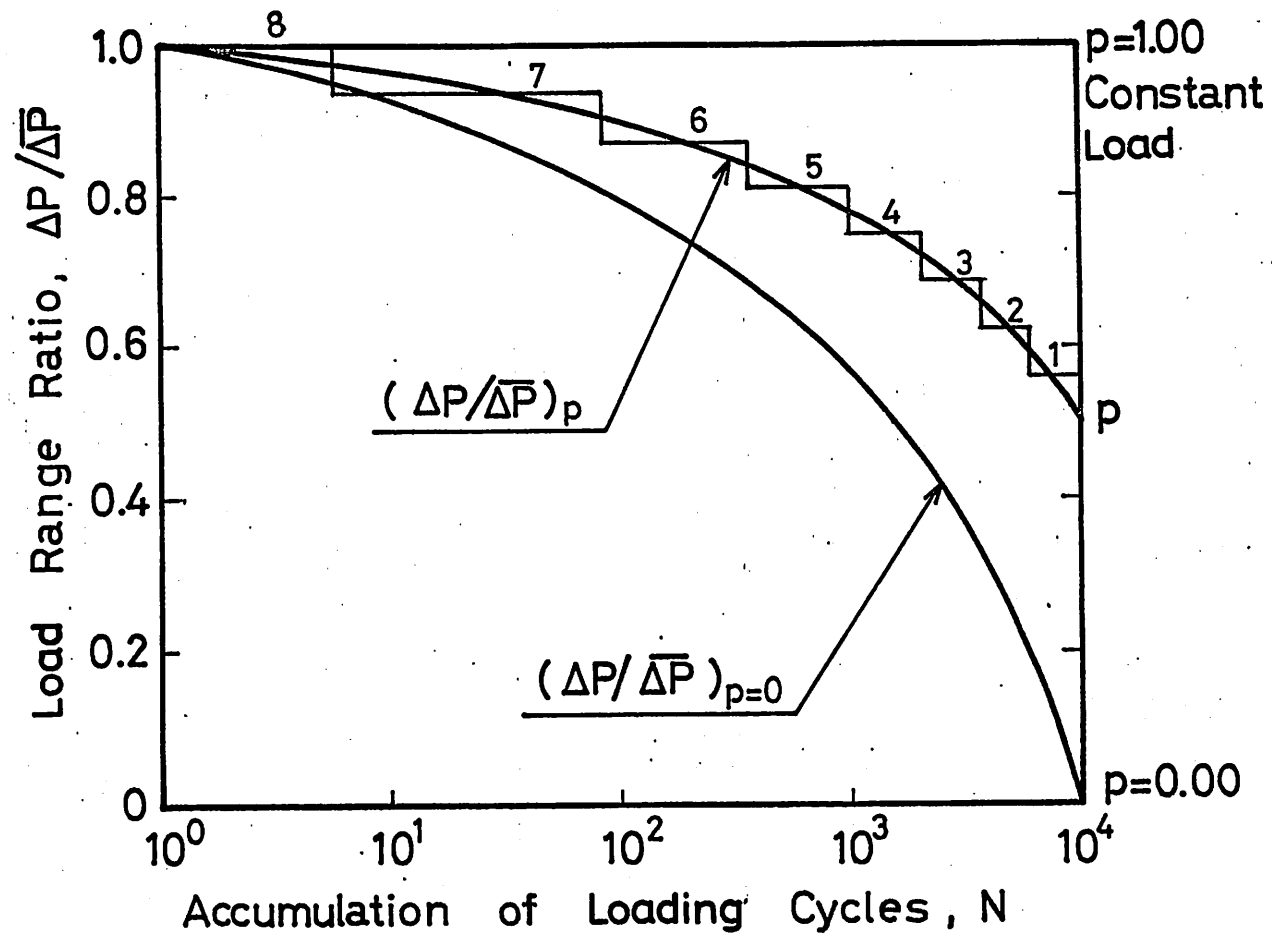
p=0.25

Step No.	$\Delta K_j / \overline{\Delta K}$	$n_j(\text{cycles})$	$\Sigma n_j(\text{cycles})$
1	0.344	6050	6050
2	0.456	2800	8850
3	0.569	918	9768
4	0.681	200	9968
5	0.794	27	9995
6	0.877	3	9998
7	0.962	1	9999
8	1.000	1	10000

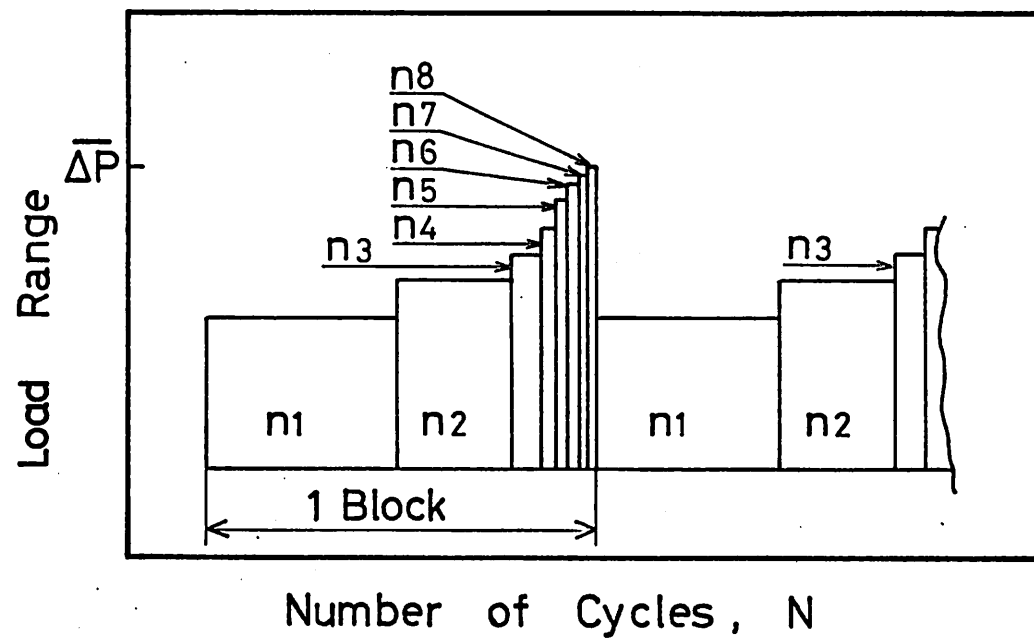
表 2.7

p=0.25

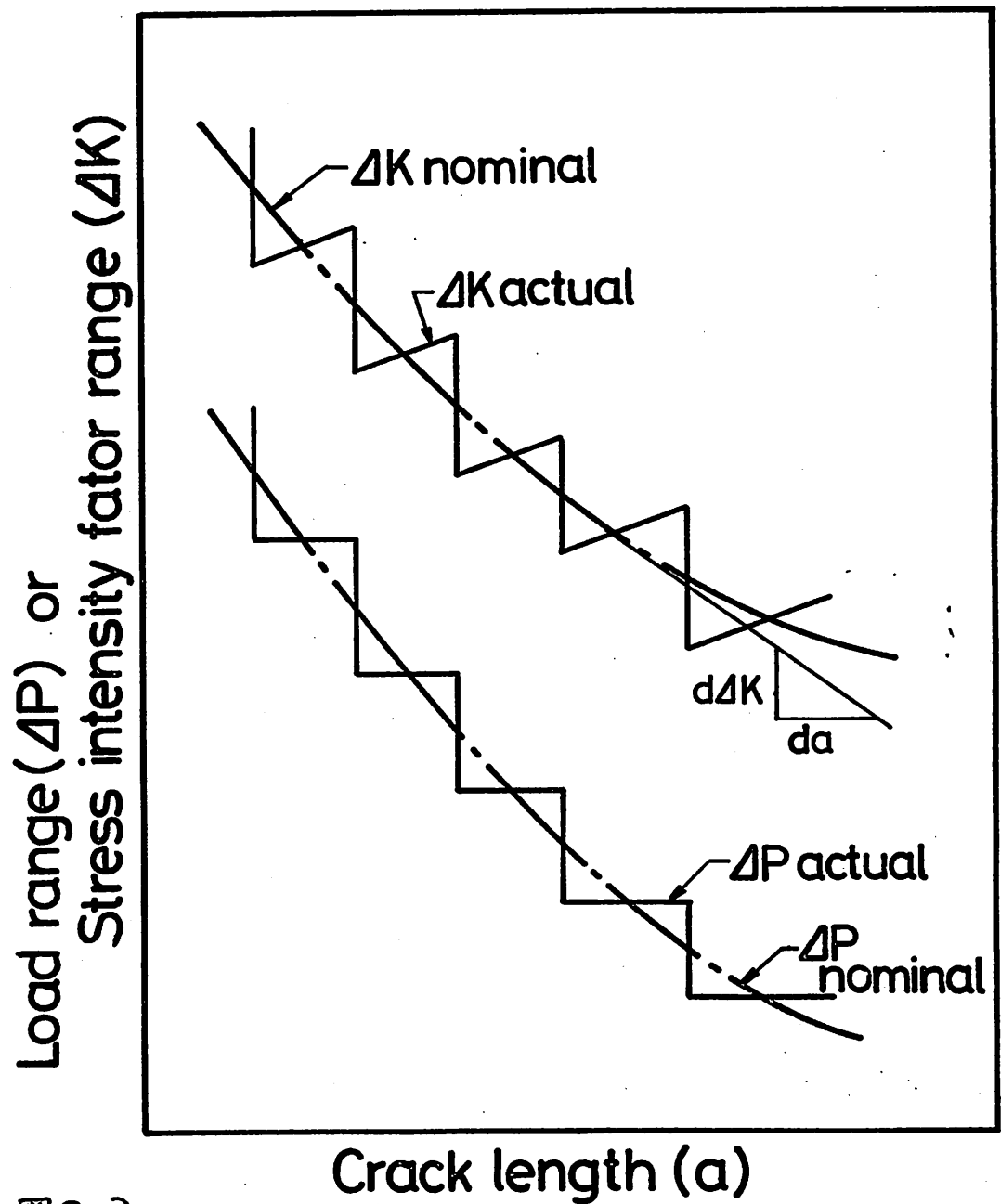
Step No.	$\Delta K_j / \overline{\Delta K}$	$n_j(\text{cycles})$	$\Sigma n_j(\text{cycles})$
1	0.344	605000	605000
2	0.456	280000	885000
3	0.569	92000	977000
4	0.681	19982	996982
5	0.794	2720	999702
6	0.877	280	999982
7	0.962	16	999998
8	1.000	2	1000000



2.2 Illustration for p-type Block



2,3 Loading Sequence



2.3

Typical K-decreasing test

by stepped load shedding

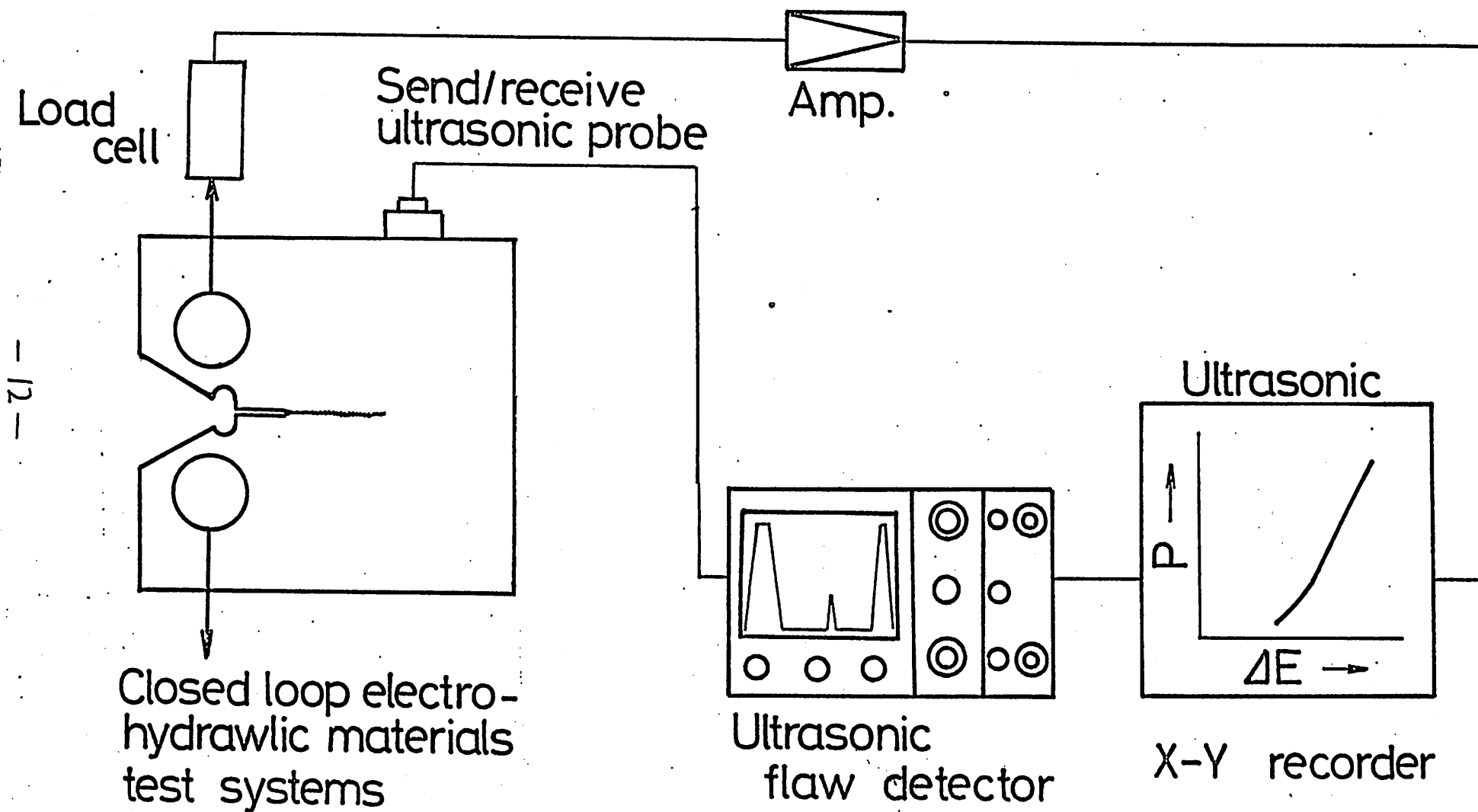


図 2.5 き裂開閉口挙動の測定法の概略図

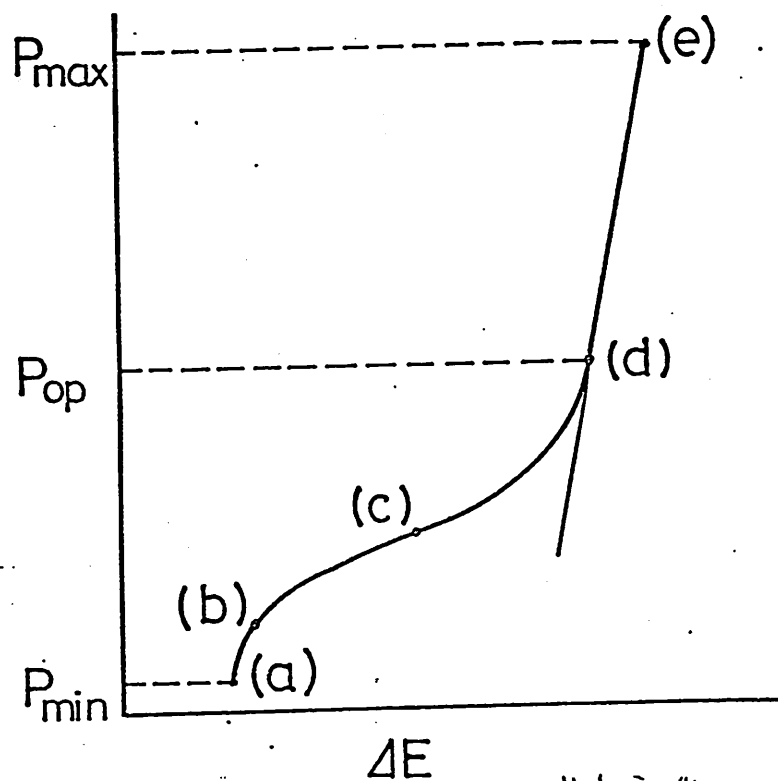


図 2.6 荷重変化に対するエコー出力変化

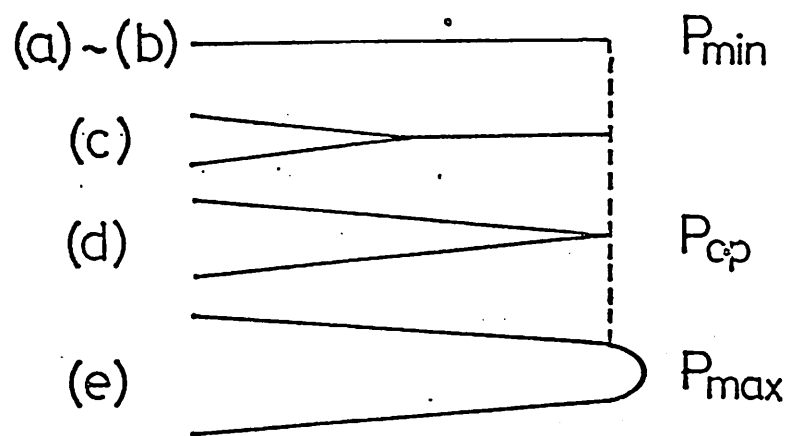


図 2.7 き裂先端変形のモデル

— 3 章 実験結果 —

3.1 一定振幅荷重試験 ($\rho=1$)

3.1.1 き裂進展速度

き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK を両対数プロットした結果を図3.1に示す。第2b段階のき裂進展速度は次式により直線近似される。

$$da/dN = C \Delta K^m \quad (3.1)$$

$$m=3.23, \quad C=2.18 \times 10^{-9} \quad (3.2)$$

ここで da/dN の単位は mm/cycle , ΔK の単位は $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。ただし採用したデータは以下の条件を満足するものに限定した。

$$da/dN > 5 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle} \quad (3.3)$$

$$W-a > \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{\max}}{S_{0.2}} \right) \quad (\text{ASTM規格 E647-78T, 小規模降伏条件}) \quad (3.4)$$

ここで $K_{\max} = \Delta K / (1-R)$, $R=0.06$, $S_{0.2}$ は0.2%耐力(降伏応力)である。式(3.3)および式(3.4)より ΔK の範囲は次式で与えられる。

$$11.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} < \Delta K < 44.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad (3.5)$$

また, 2.2.2 で述べた ASTM (案) により決定された ΔK_{th} は次式で与えられる。

$$\Delta K_{th} = 7.86 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad (25.4 \text{ kgf/mm}^2) \quad (3.6)$$

従来から用いられている疲労き裂が進展する限界として決定した ΔK_{th} は次式で与えられる。

$$\Delta K_{th} = 7.03 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad (22.7 \text{ kgf}/\text{mm}^{3/2}) \quad (3.7)$$

実験は予き裂導入時の応力拡大係数範囲 ΔK_I が大幅に異なる1, 2の試験片により求めたが、 ΔK_{th} はほぼ一致している。試験片1, 2の ΔK 漸減状態を図3.2に示す。これにより、試験片2は式(2.3), 式(2.4)を満足し、試験片1も式(2.3)はほぼ満足している。

次に、 ΔK_{th} に至った試験片2に応力除去焼鈍(620℃, 1h, 表2.2参照)を施し、 ΔK_{th} 以下から ΔK 漸増試験を行うとき、裂は荷重漸増毎に進展開始と停留を繰返し、見掛上の ΔK_{th} は増大する(コーキング効果⁽⁷⁾)。図3.3にき裂長さ a と繰返し数 N の関係を示す。またその時のき裂進展速度と ΔK の関係を図3.4に示す。

3.1.2 き裂開閉口挙動

式(2.5)により定義された開口比 ν は図3.5に示される様に漸減試験と漸増試験とでほぼ一致している。

Eller⁽⁸⁾の有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} は次式で与えられている。

$$\Delta K_{eff} = U \Delta K = K_{max} - K_{op} \quad (3.7)$$

これを用いた $\frac{da}{dN} - \Delta K_{eff}$ 関係を図3.6に示す。Ellerの提案した表示式は次式である。

$$\frac{da}{dN} = C' \Delta K_{eff}^{m'} \quad (3.8)$$

図3.6は式(3.8)をほぼ満足しており、その傾き $m' \approx 2$ である。

図3.7は、応力除去焼鈍(620°C , 1h , 表2.2参照)を施した後、 $\Delta K = 6.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ($20 \text{ kgf}/\text{mm}^{3/2}$) で荷重振幅一定試験により得られた $d\alpha/dN$, U を繰返し数 N に対して比較したものである。予き裂導入後応力除去焼鈍を施すと主裂は理想き裂に近くなり U は大きくなるが、 ΔK_{th} 以下の繰返し荷重が加えられると、主裂が進展するに従って開口比 U は低下し停留してしまう。

測定された開口比 U を用いてき裂開口応力拡大係数 K_{op} は次式により計算される。

$$K_{op} = K_{max} - K_{eff} = \Delta K (1/(1-R) - U) \quad (3.9)$$

ΔK と K_{op} の関係を図3.8に示す。 ΔK 漸増試験ではコーキング効果のため ΔK 漸減試験の K_{op} の結果と一致していない。しかし、主裂進展が開始してからは ΔK 漸減試験での K_{op} の結果と一致している。

3.2 プログラム荷重試験

3.2.1 $R = 0.5$

主裂進展速度 $d\alpha/dN$ と ΔK の二乗平均値(r.m.s値) ΔK_{rms} を両対数プロットした結果を図3.9に示す。

ここで、 ΔK_{rms} は次式により求めた。

$$\Delta K_{rms} = \sqrt{\sum_{j=1}^8 \Delta K_j \frac{n_j}{N_t}} \quad (3.10)$$

$$N_t = \sum_{j=1}^8 n_j \quad (3.11)$$

ΔK_j はステップ j での ΔK 値、 n_j はステップ j での繰返し数である。表2.5の値を用いて計算すると次式が得られる。

$$\Delta K_{rms} = 0.605 \Delta K \quad (3.12)$$

ここで、 ΔK はブロック内の ΔK の最高値である。データの最小二乗法を行い直線回帰すると次式が得られる。

$$da/dN = C \Delta K_{rms}^m \quad (3.13)$$

$$m = 3.03, \quad C = 2.87 \times 10^{-9} \quad (3.14)$$

ここで、 da/dN の単位は $mm/cycle$ 、 ΔK_{rms} の単位は $MPa\sqrt{m}$ である。データ点の範囲は式(3.4)にほぼ準じ次式を用いている。

$$W - a > \frac{4}{W} \left(\frac{K_{max}}{S_{0.2}} \right)^2 \quad (3.15)$$

3.2.2 $\rho = 0.25$

表2.6 および表2.7で示されたプログラム波によるき裂進展速度と ΔK_{rms} について両対プロットした結果を図3.10 および図3.11に示す。 ΔK_{rms} は式(3.10)で示した通りである。計算により次式が得られる。

$$\Delta K_{rms} = 0.413 \Delta K \quad (3.16)$$

ここで、 ΔK はブロック内の ΔK の最高値である。図3.10のデ

一夕の最小二乗法を行い直線回帰すると式(3.13)の C , m の値は下記となる。

$$m = 2.90, \quad C = 2.64 \times 10^{-9} \quad (3.17)$$

ここで, da/dN の単位は mm/cycle , ΔK_{rms} の単位は $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。
また, 採用したデータの範囲は $p=0.5$ の場合に準じている
(式(3.15)参照)。

図3.11のデータにより2.2.2で述べたASTM(案)により決定された $\Delta K_{rms, th}$ は次式で与えられる。

$$\Delta K_{rms, th} = 8.73 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad (28.2 \text{ kgf}/\text{mm}^{3/2}) \quad (3.18)$$

なお, $da/dN < 10^{-8} \text{ mm/cycle}$ とする $\Delta K_{rms, th}$ は下記である。

$$\Delta K_{rms, th} = 6.19 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad (20.0 \text{ kgf}/\text{mm}^{3/2})$$

3.3 き裂進展速度の比較

図3.12に $p=1$, $p=0.5$ および $p=0.25$ の実験結果を比較して示す。直線回帰により得られた式(3.2), 式(3.14)および

表3.1

p	m	C
1	3.23	2.18×10^{-9}
0.5	3.03	2.87×10^{-9}
0.25	2.90	2.64×10^{-9}

式(3.17)の C , m の値を表3.1に示す。 ΔK あるいは ΔK_{rms} に対するき裂進展速度 da/dN の大小関係は下記のとおりである。

$$(da/dN)_{p=1} > (da/dN)_{p=0.5} > (da/dN)_{p=0.25} \quad (3.19)$$

2.2.2で述べたASTM(案)に従った ΔK_{th} あるいは $\Delta K_{rms, th}$
(5)

の大小関係は式(3.6)あるいは式(3.18)により下記である。

$$(\Delta K_{th})_{p=1} > (\Delta K_{rms, th})_{p=0.25} \quad (3.20)$$

しかし，図3.12よりわかる様に $da/dN \simeq 2 \times 10^{-8} \text{ mm/cycle}$ 以下ではき裂進展速度は逆転し次式の関係となっている。

$$(da/dN)_{p=1} < (da/dN)_{p=0.25} \quad (3.21)$$

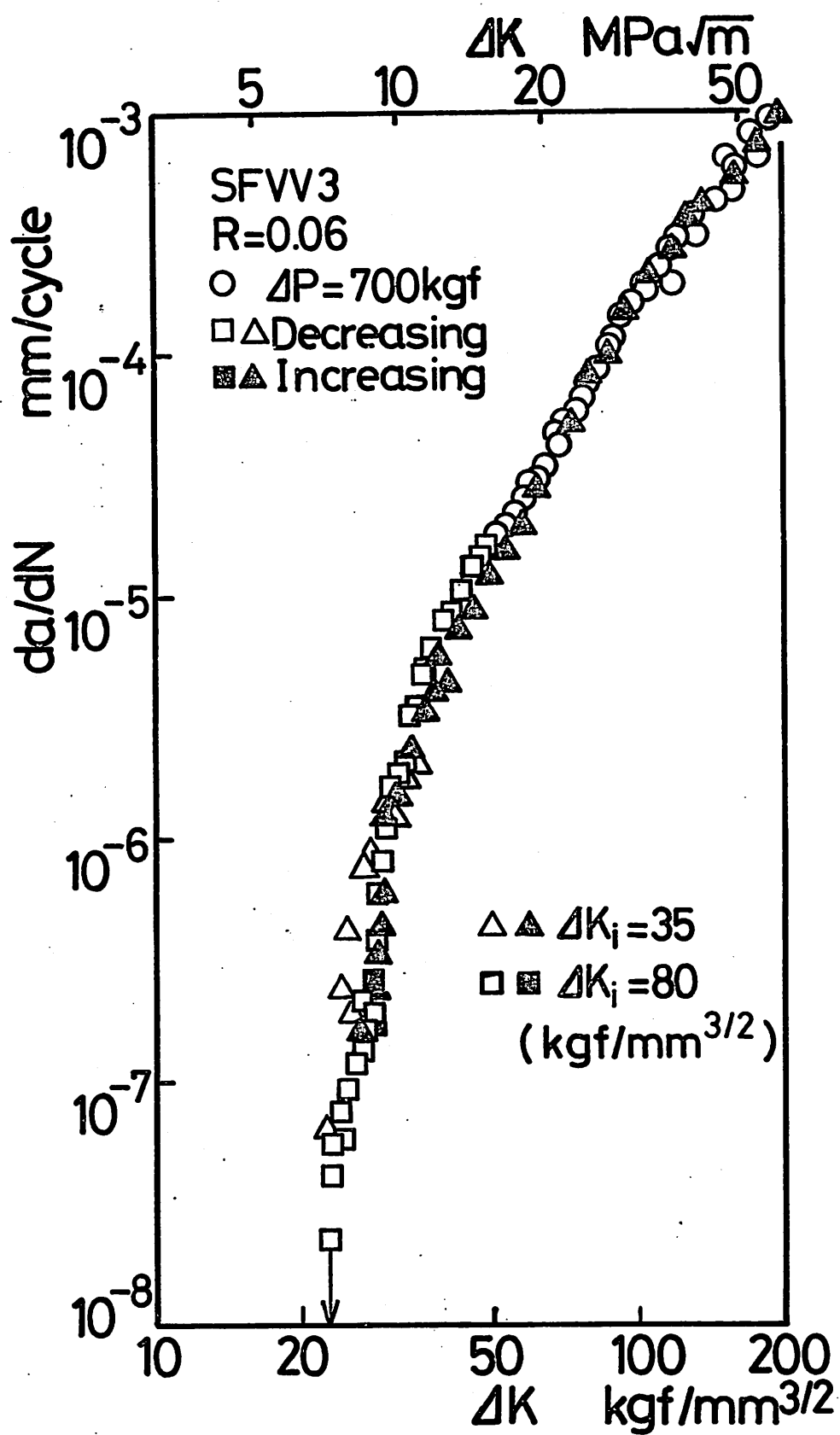


図3.1 $\frac{da}{dN}$ - ΔK の関係 ($\nu=1$)

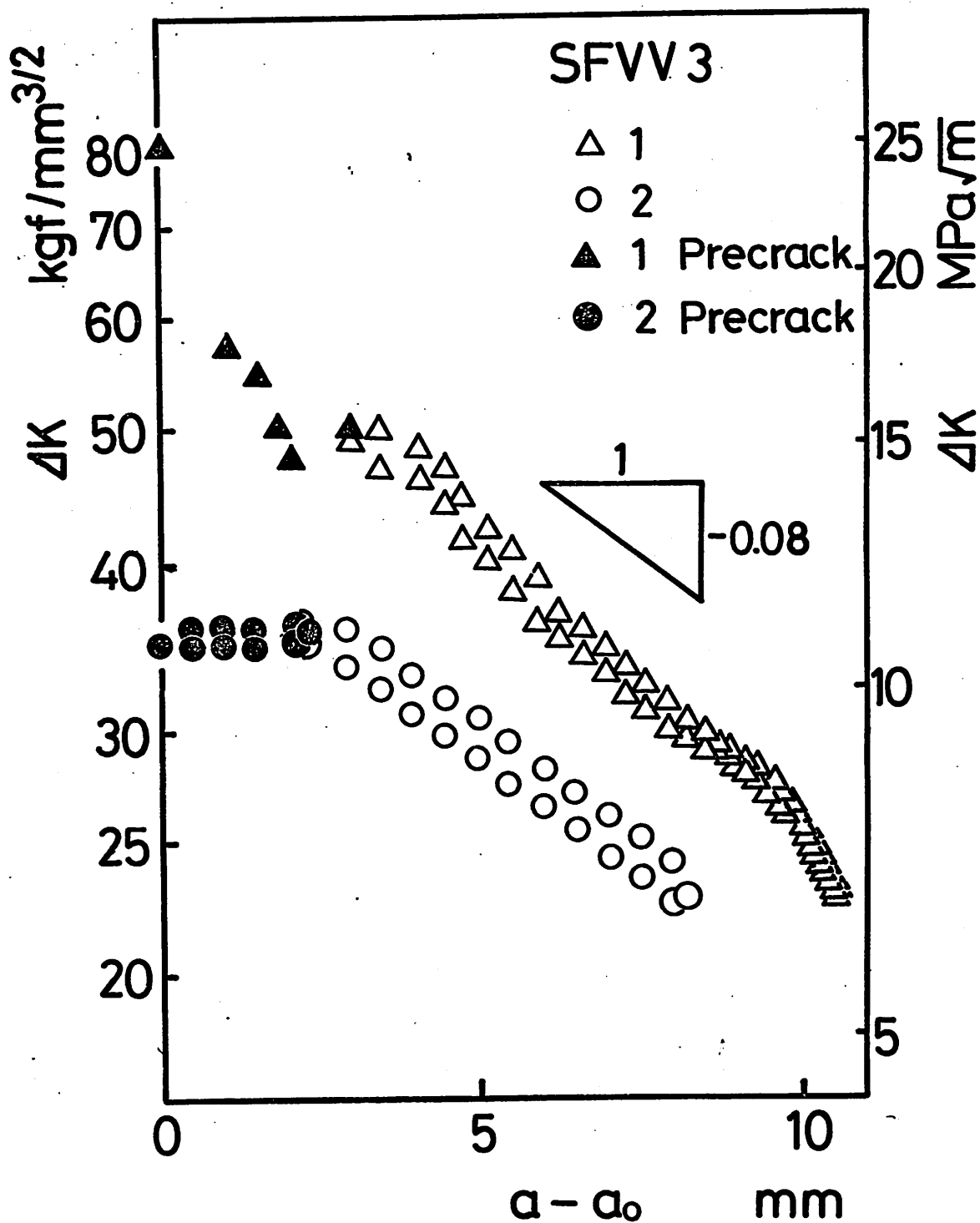


図3.2 ΔK 漸減勾配 (ΔK - a の関係)

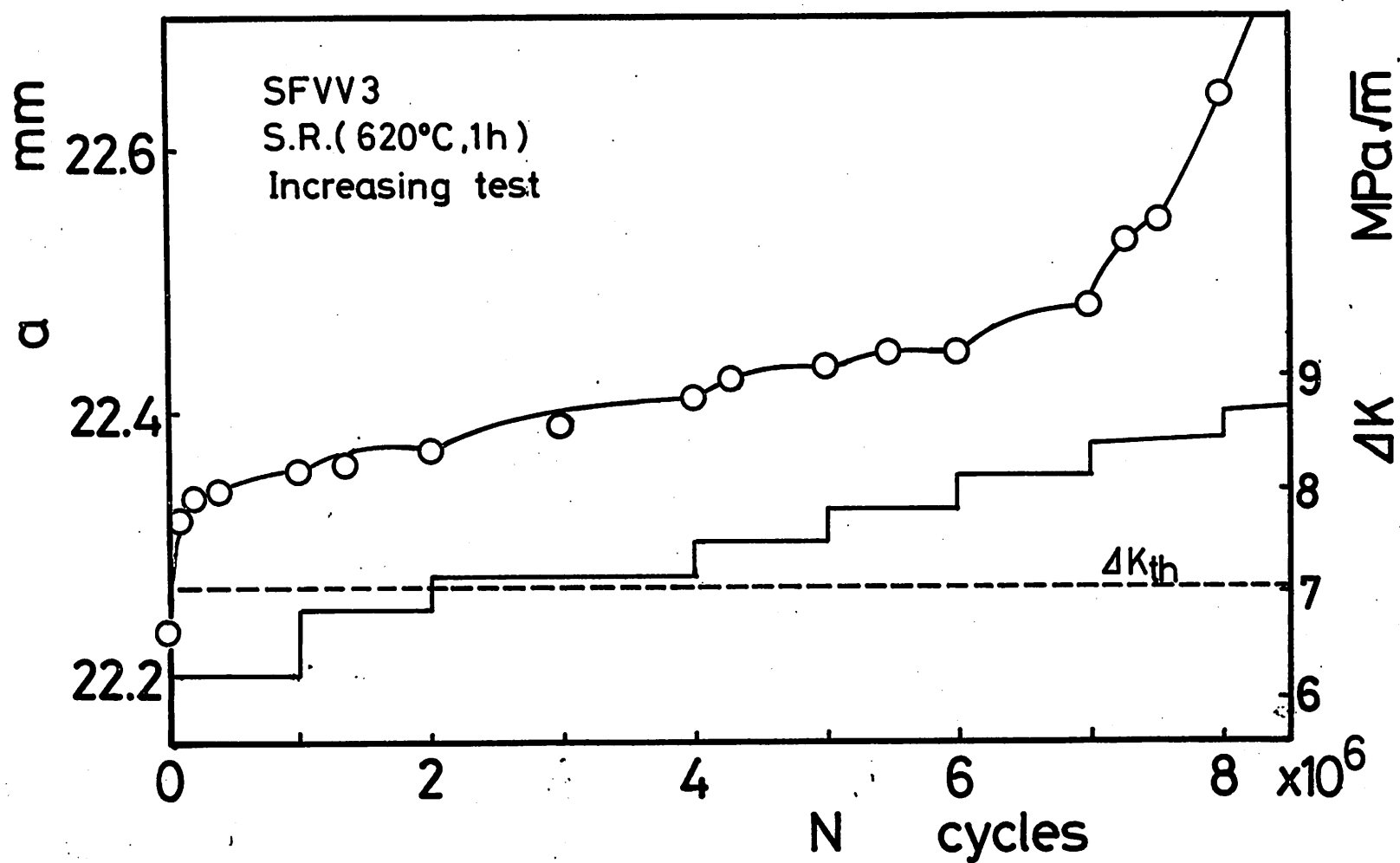


図 3.3 S.R. (1h) 試験片からのき裂進展特性

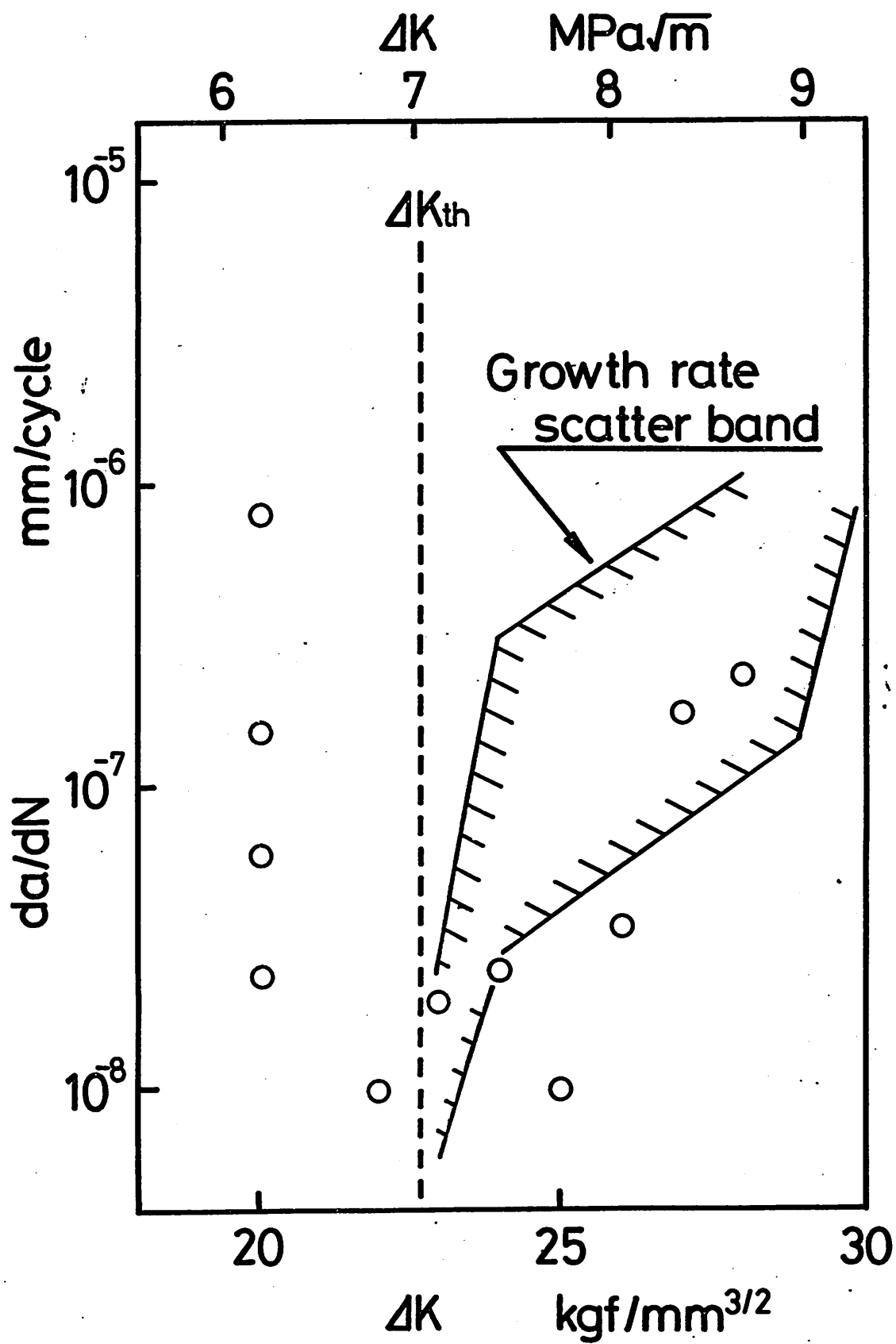


図3.4 SRした試験片からのき裂進展速度

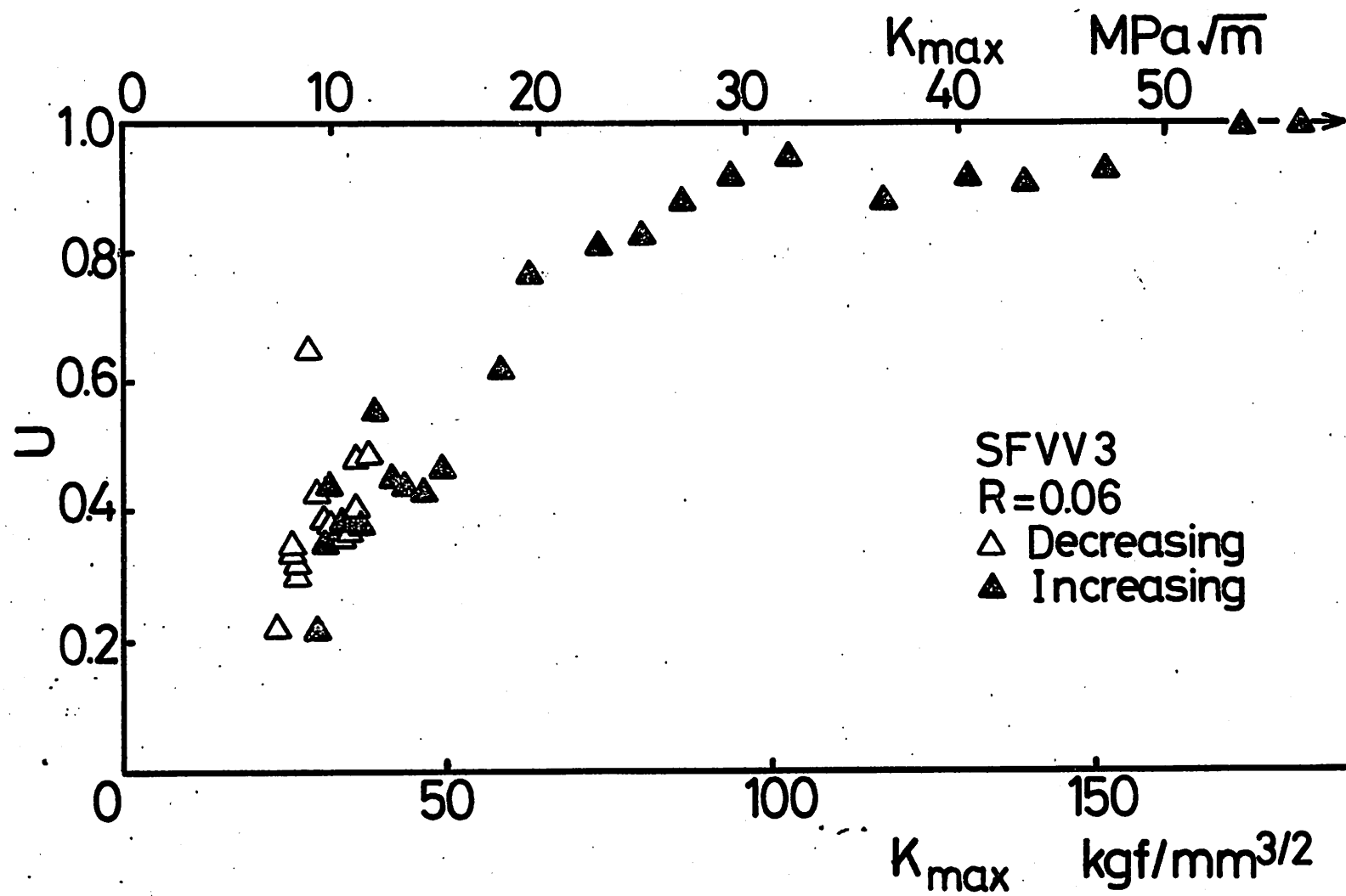


図 3.5 開口比 U - K_{max} の関係

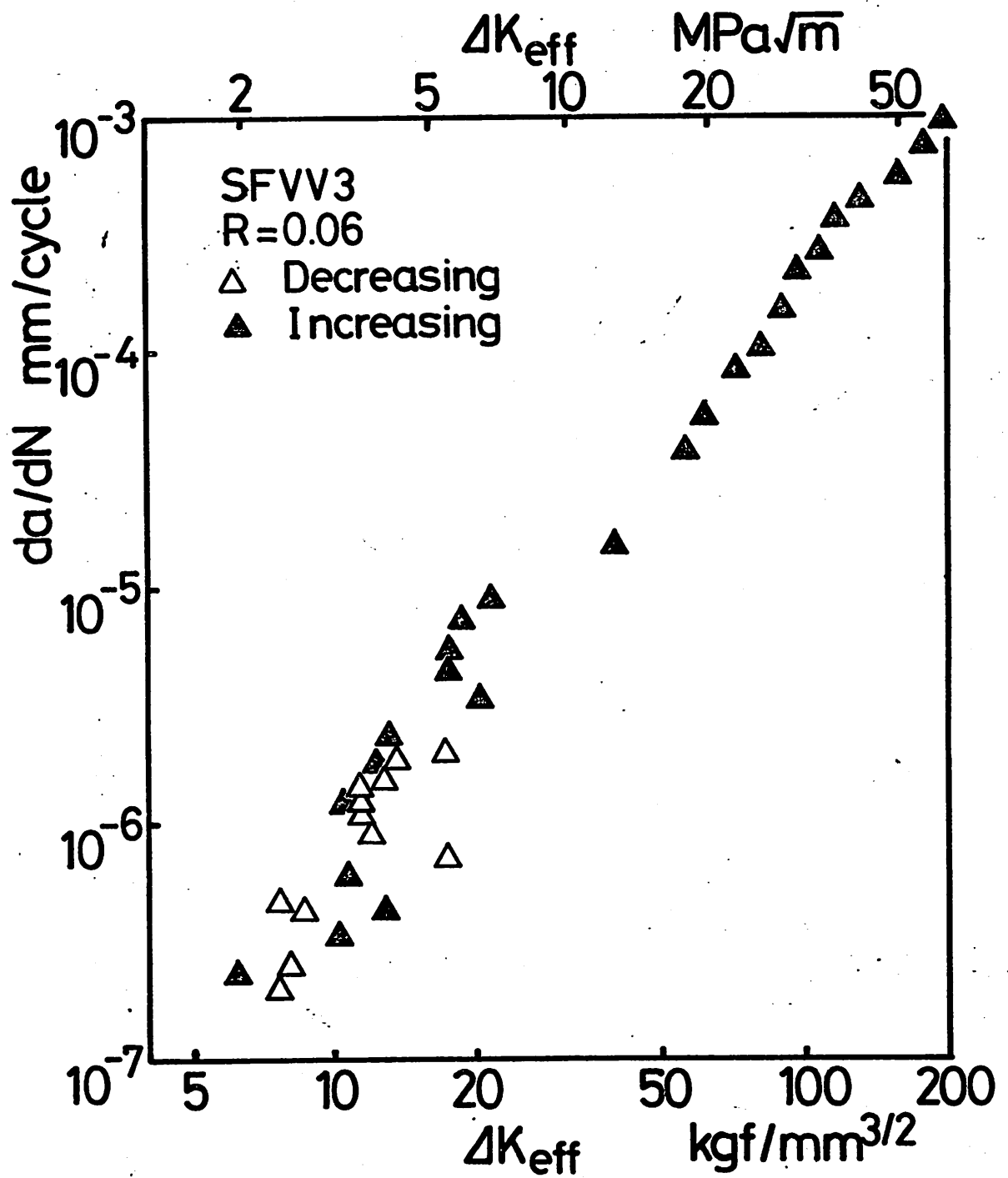


図 3.6 $da/dN - \Delta K_{eff}$ の関係

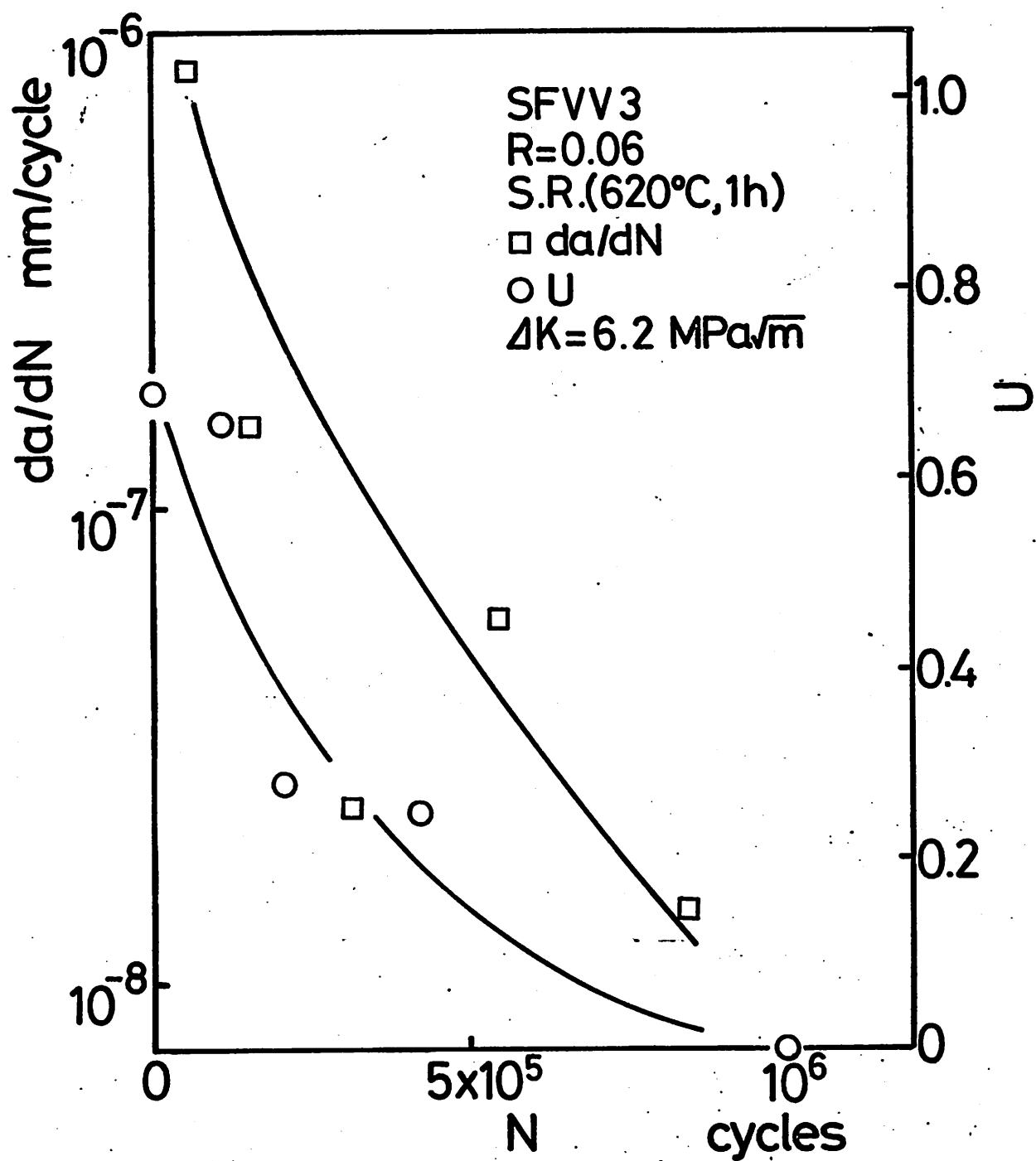


図3.7 S.R.した試験片からの $\frac{da}{dN}$, ΔK と繰返し数の関係

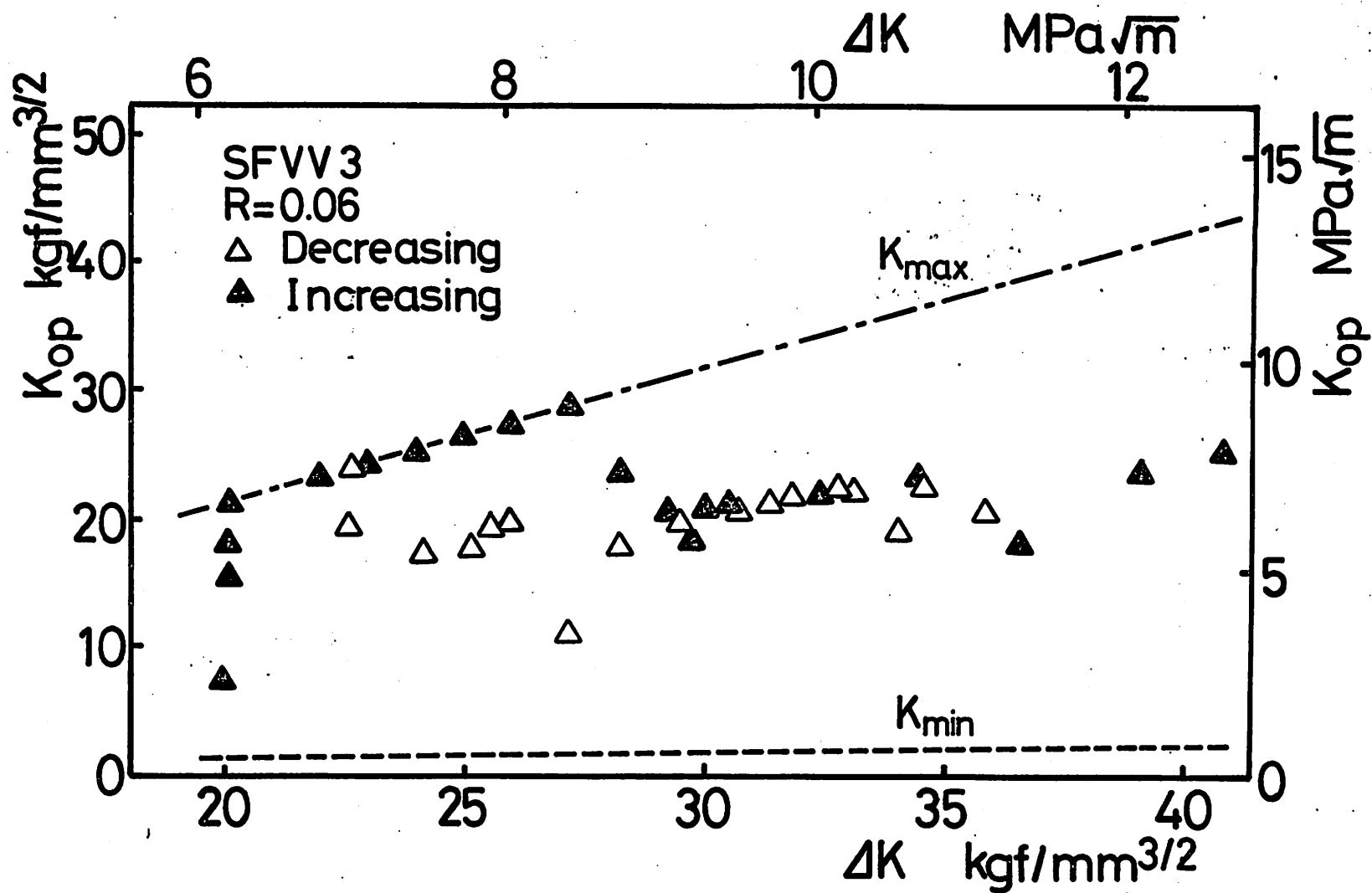


図3.8 K_{op} - ΔK の関係.

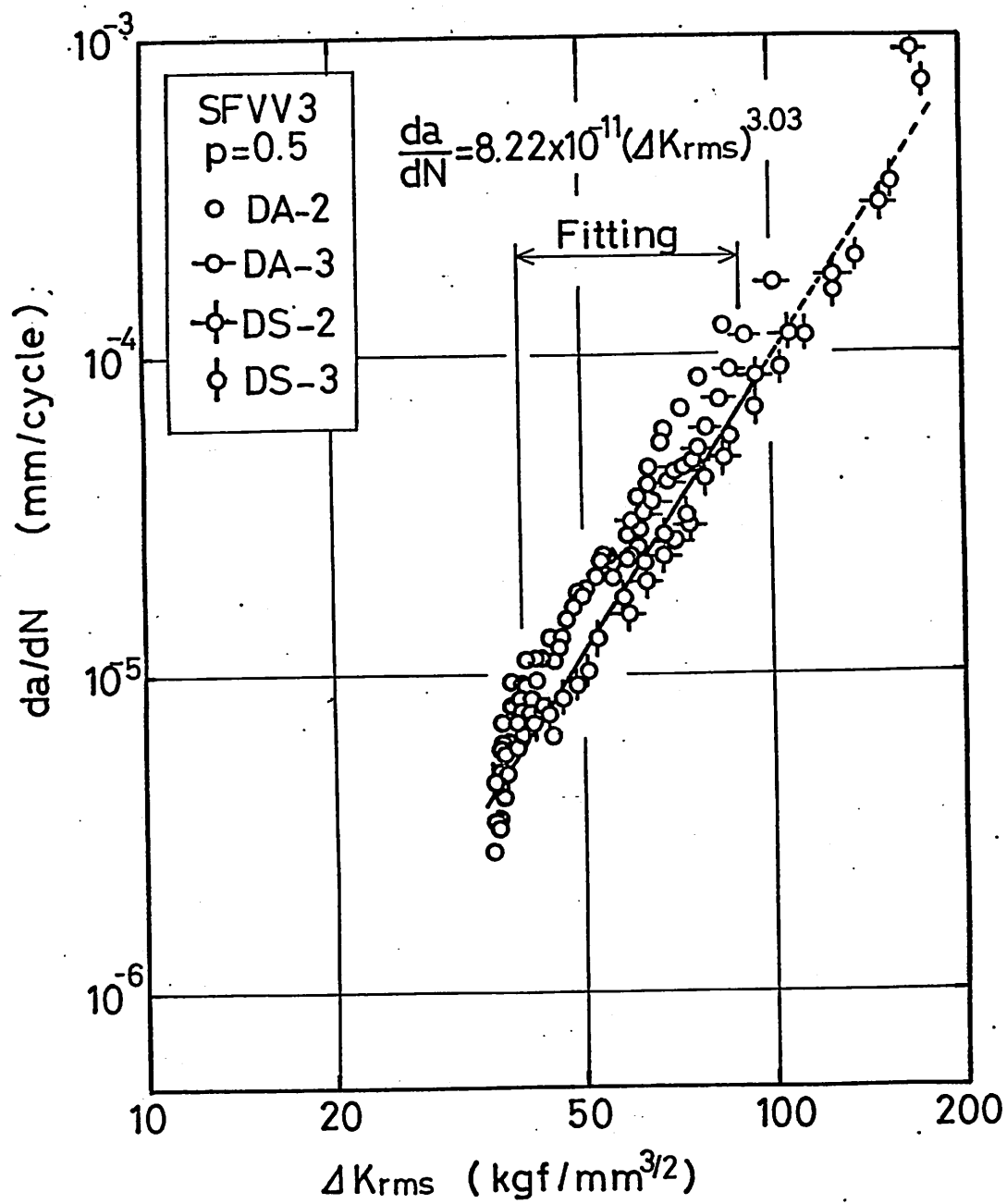


図 3.9 $\frac{da}{dN} - \Delta K_{rms}$ の関係 ($p=0.5, 10^4$ 回)

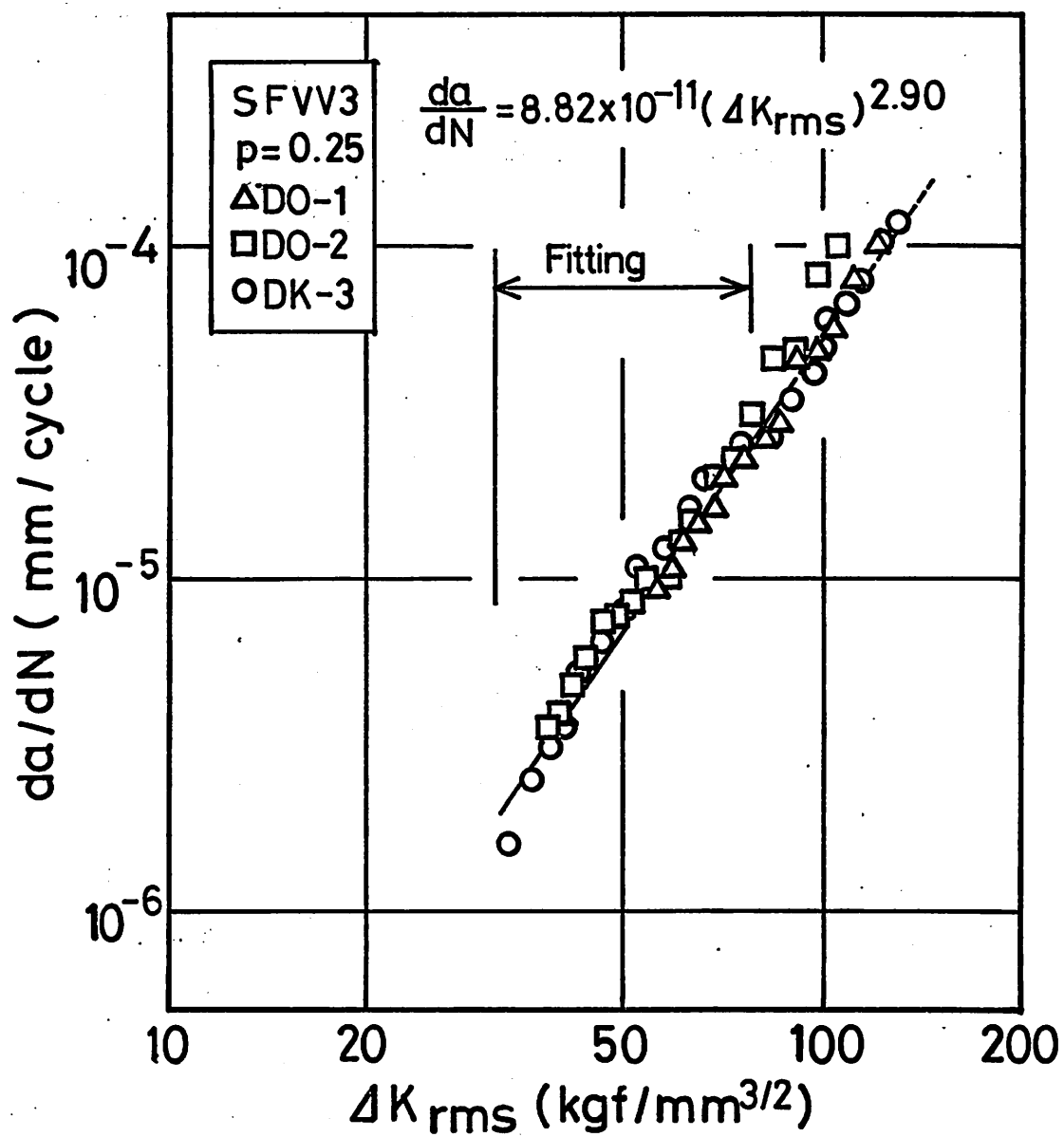


図 3.10 $\frac{da}{dN} - \Delta K_{rms}$ の関係 ($p=0.25$, 10^4 回).

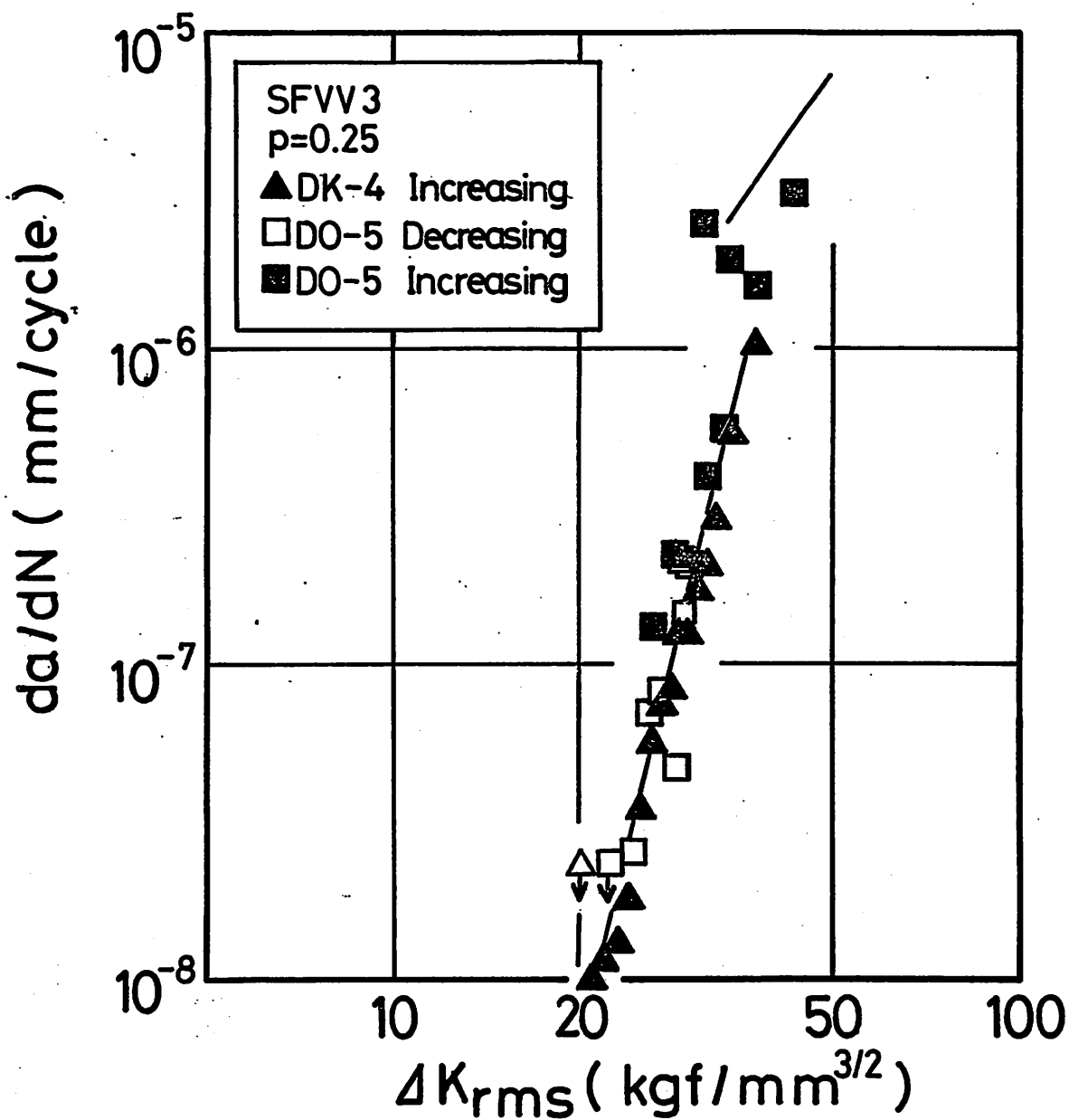


図 3.11 $da/dN - \Delta K_{rms}$ の関係 ($p=0.25, 10^6$ 回)

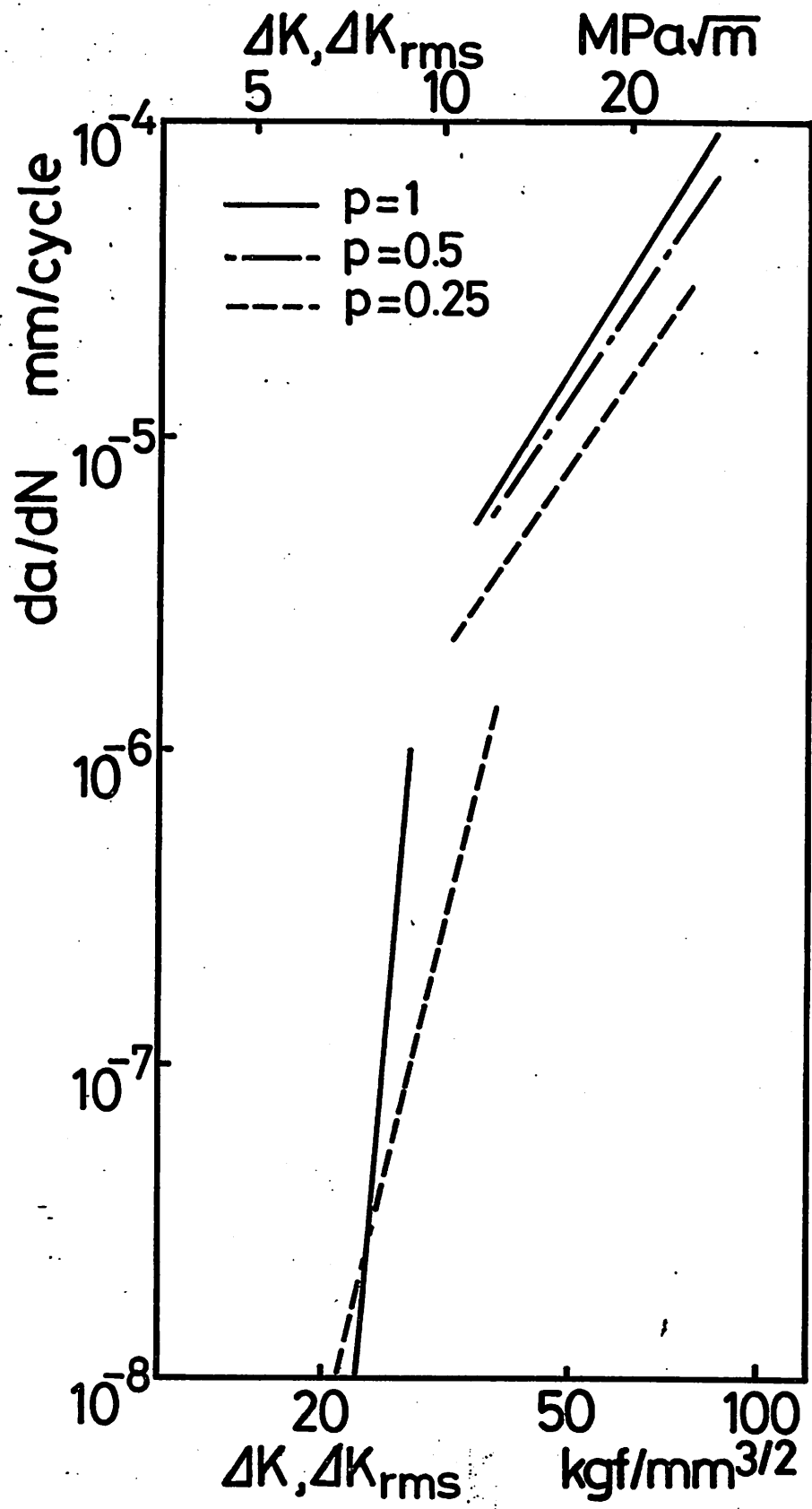


図 3.12 $p=1$, $p=0.5$ および $p=0.25$ のき裂
 進展速度の比較

=4章 検討 および 考察=

4.1 ASME sec XIとの比較

ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec XI Appendix A では原子炉圧力容器用鋼を対象として式(3.1)における C , m の値を下記とした大気中における疲労き裂伝播速度 da/dN 曲線が与えられている⁽⁹⁾。

$$m = 3.726, \quad C = 4.81 \times 10^{-10} \quad (4.1)$$

ここで, da/dN の単位は $mm/cycle$, ΔK の単位は $MPa\sqrt{m}$ である。

式(4.1)は従来得られている原子炉圧力容器用鋼についてのデータの最上限を与えるもので, それを用いる限り疲労き裂伝播に対して保守的評価が得られると解釈されている。

図4.1に $r=1$ (一定振幅)の場合の結果を式(4.1)と比較して示す。実験結果に対して $\Delta K > 21 MPa\sqrt{m}$ ($68 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$) の範囲においては保守的評価となるが, $\Delta K < 21 MPa\sqrt{m}$ の範囲において逆に非保守的評価となることが明らかである。A533-B鋼についても同様の事が指摘されている。

式(4.1)が特に低 ΔK 域において非保守的評価を与える原因として以下の事が考えられる。従来得られている式(4.1)のバックデータは高 ΔK 域に集中している。ここではデータの分散帯が広く, 逆にデータの少ない低 ΔK 域での分散帯は狭い。従って, データの最上限を与えるような直線をついた場合, 式(4.1)のように m の値は著しく大きく見積もられ

ることになり，その結果低 ΔK 域での多くのデータが集積され分散帯が広くなれば上述の直線が非保守的評価となることはむしろ当然である。 ΔK の全域にわたって保守的評価を与えるためにはさらにデータを集積し，データの中央線として最小二乗法で直線回帰を行って m を定め，上限を与えるようにそれを平行移動して c を選ばべきであると考えられる。

4.2 下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の検討

疲労き裂進展に対する下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} には疲労予き裂導入開始から最終に至る応力拡大係数範囲 ΔK の履歴が影響を及ぼす。従来， ΔK_{th} に及ぼす ΔK 履歴は以下のように考えられてきた。

疲労き裂を導入した試験片の疲労限度(き裂進展の開始)に対応する応力拡大係数範囲 ΔK を $\overline{\Delta K}$ とすれば $\overline{\Delta K}_{th}$ は真の応力拡大係数範囲 ΔK_{th} および疲労予き裂導入の最終の ΔK に対して次式の関係がある⁽¹⁰⁾。

$$\overline{\Delta K}_{th} = \Delta K_{th} + \alpha(\Delta K - \Delta K_{th}) \quad (4.2)$$

あるいは

$$\overline{\Delta K}_{th} = \Delta K_{th} (\Delta K / \Delta K_{th})^\beta \quad (4.3)$$

上式において $\alpha, \beta > 0$ であり，通常は $\Delta K > \Delta K_{th}$ であるので

必ず $\Delta K_{th} > \Delta K_{th}$ となり $\Delta K = \Delta K_{th}$ の場合に限る $\Delta K_{th} = \Delta K_{th}$ が得られることになる。

ここで、応力除去焼鈍により、材料特性が変化しないある種の鋼に対しては予き裂導入後に応力除去焼鈍を施せば予き裂はほぼ理想き裂とみなす事ができる。図4.2に理想き裂からの疲労き裂進展挙動を模式的に示す。真の下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} 以下の ΔK で理想き裂に繰返し荷重を加えた④の場合にはき裂は進展を開始するがき裂の進展に判い速度は減少し停留してしまう(図3.3, 図3.4参照)。

これに対し ΔK_{th} 以上の ΔK で理想き裂に繰返し荷重を加えた⑤の場合には最初繰返し塑性域が無いことによりき裂進展速度は速いがき裂ののびに従って定常値すなわち真の疲労き裂進展速度に至る。この様に応力除去焼鈍の可能な材料に対しては複数の試験片を用いて真の ΔK_{th} を決定することができる。

しかし上述したように、一般の材料は疲労予き裂導入後材料特性を変化させないで応力除去焼鈍を行うことは不可能である。そこで疲労予き裂導入開始から最終に至る ΔK をある ΔK 勾配で漸減すれば式(4.2), 式(4.3)の ΔK が最小におさえられき裂進展が停止する下限界の ΔK は真の ΔK_{th} に等しくなると解釈され2.2.2で述べた ΔK 漸減試験による ΔK_{th}

の測定法が考えられた。

ところが図(4.3)および図(4.4)に示されている様に疲労予き裂導入開始の応力拡大係数 ΔK_i が ΔK 漸減により決定した ΔK_{th} に顕著な影響を及ぼす例が報告された⁽²⁾。これが事実ならば主裂先端からうはるか後方の主裂壁に残された塑性ひずみが主裂先端の変形に影響することになり、疲労主裂進展速度の応力拡大係数による表示にも疑問がもたれる。

しかし、3.1.1で示したように ΔK_i の ΔK_{th} に及ぼす顕著な影響は認められず式(2.3)で述べたASTM(案)の勾配条件をほぼ満足する ΔK 漸減試験を行うならば、 ΔK 漸減試験により真の ΔK_{th} が決定できると考えられる。

図(4.5)、図(4.6)および図(4.7)は以前に行われた ΔK 漸減試験の ΔK 勾配を示したものである。各試験とも式(2.3)の ΔK 勾配条件をほぼ満足しており、以前に求められた ΔK_{th} は真の ΔK_{th} であると考えられる。

4.3 プログラム荷重下の主裂進展速度の検討

プログラム荷重下の主裂進展速度を式(3.10)で定義された ΔK_{rms} により評価すると広範囲の主裂進展速度域において保守的評価が得られるが、下限界近傍においては式(3.21)に示されているように非保守的となっている。

$p=1$ (一定振幅) のき裂進展速度は式(3.1)で表わされている。

プログラムの荷重 ($p=0.5, p=0.25$) の場合にステップごとのき裂進展速度 $(da/dN)_j$ が式(3.1)に従うとすれば次式が成立する。

$$(da/dN)_j = C \Delta K_j^m \quad (4.4)$$

したがって1ブロック当りの平均的なき裂進展速度 $(da/dN)_p$ は線型加算則により以下の様に予測される。

$$\begin{aligned} (da/dN)_p &= \frac{\sum_{j=1}^8 (da/dN)_j \frac{n_j}{N_t}}{\sum_{j=1}^8 \Delta K_j^m \frac{n_j}{N_t}} \\ &= C \Delta K_m^m \end{aligned} \quad (4.5)$$

ここで、 N_t は式(3.11)で表わされる様に1ブロックの繰返し数であり、 ΔK_m は次式で定義される ΔK_i の m 乗重み平均である。

$$\Delta K_m = \left(\sum_{j=1}^8 \Delta K_j^m \frac{n_j}{N_t} \right)^{1/m} \quad (4.6)$$

式(3.10)との比較からわかるように ΔK_{rms} は式(4.6)においての $m=2$ の場合にほかならない。

式(3.2)に示した $p=1$ の場合の $m=3, 23$ を用いると次式が与えられる。

$$p=0.5 : \Delta K_m = 0.609 \Delta \bar{K} \quad (4.7)$$

$$p=0.25 : \Delta K_m = 0.427 \Delta \bar{K} \quad (4.8)$$

第2b段階に相当するデータの最小二乗法を行い直線回帰

すると次式が得られる。

$$da/dN = C \Delta K_m^m \quad (4.9)$$

$$p=0.5 \quad : \quad m=3.03, \quad C=2.81 \times 10^{-9} \quad (4.10)$$

$$p=0.25 \quad : \quad m=2.90, \quad C=2.37 \times 10^{-9} \quad (4.11)$$

ただし, da/dN の単位は mm/cycle , ΔK_m の単位は $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。

式(3.2), 式(4.10)および式(4.11)の m の値は若干差異がある。

これらの大小関係は下記のとおりである。

$$(m)_{p=1} > (m)_{p=0.5} > (m)_{p=0.25} \quad (4.12)$$

m の値は p の値の減少に判り小さくなる。また, 式(3.12)お

よび式(3.16)における C の値と式(4.10)および式(4.11)の比は

次式で得られる。

$$p=0.5 \quad : \quad \frac{C(\Delta K_m)}{C(\Delta K_{rms})} = \left(\frac{0.605}{0.609} \right)^{3.23} = 0.979 \quad (4.13)$$

$$p=0.25 \quad : \quad \frac{C(\Delta K_m)}{C(\Delta K_{rms})} = \left(\frac{0.413}{0.427} \right)^{3.23} = 0.898 \quad (4.14)$$

もし式(4.4)の線型加算則が成立するならば, 式(4.9)は $p=1$

(一定振幅) の場合の式(3.1)に一致するはずであるが, ΔK_{rms}

と比較した場合の式(3.19)と同様に同一 ΔK , ΔK_m に対するき

裂進展速度の大小関係は次のとおりである。

$$(da/dN)_{p=1} > (da/dN)_{p=0.5} > (da/dN)_{p=0.25} \quad (4.15)$$

この差は ΔK の変動によるき裂進展におよぼす遅延効果に基

いており p が小さくなるほど遅延効果が強くなることを示

している。しかも式(4.12)の関係から遅延効果は ΔK_m あるいは ΔK_{rms} のレベルにより異なる。また1ブロックの繰返し数によっても異なっている。すなわち式(4.4)のCの値のみを遅延効果を考慮して修正し、実験結果を予測する様な取扱いは有効でない。

式(4.4)の線型加算には ΔK_{th} は考慮されていない。遅延効果を除外しても ΔK が低下して、ブロック内での ΔK_j が ΔK_{th} 以下となるならばそのような ΔK_j の寄与は打ち切るべきである。図4.8に式(3.7)により与えられた ΔK_{th} を用いて $\Delta K_j < \Delta K_{th}$ となる ΔK_j の寄与の打ち切りを行、た線型加算則による計算結果および実験結果を示す。一般にプログラム波の場合には ΔK の変動による主裂の加速、遅延が生じ $\mu=1$ (一定振幅)の場合を基準とした線型加算による進展速度の予測は成立しないことが知られているが、⁽¹¹⁾線型加算則により保守的評価を得ることができると考えられる。

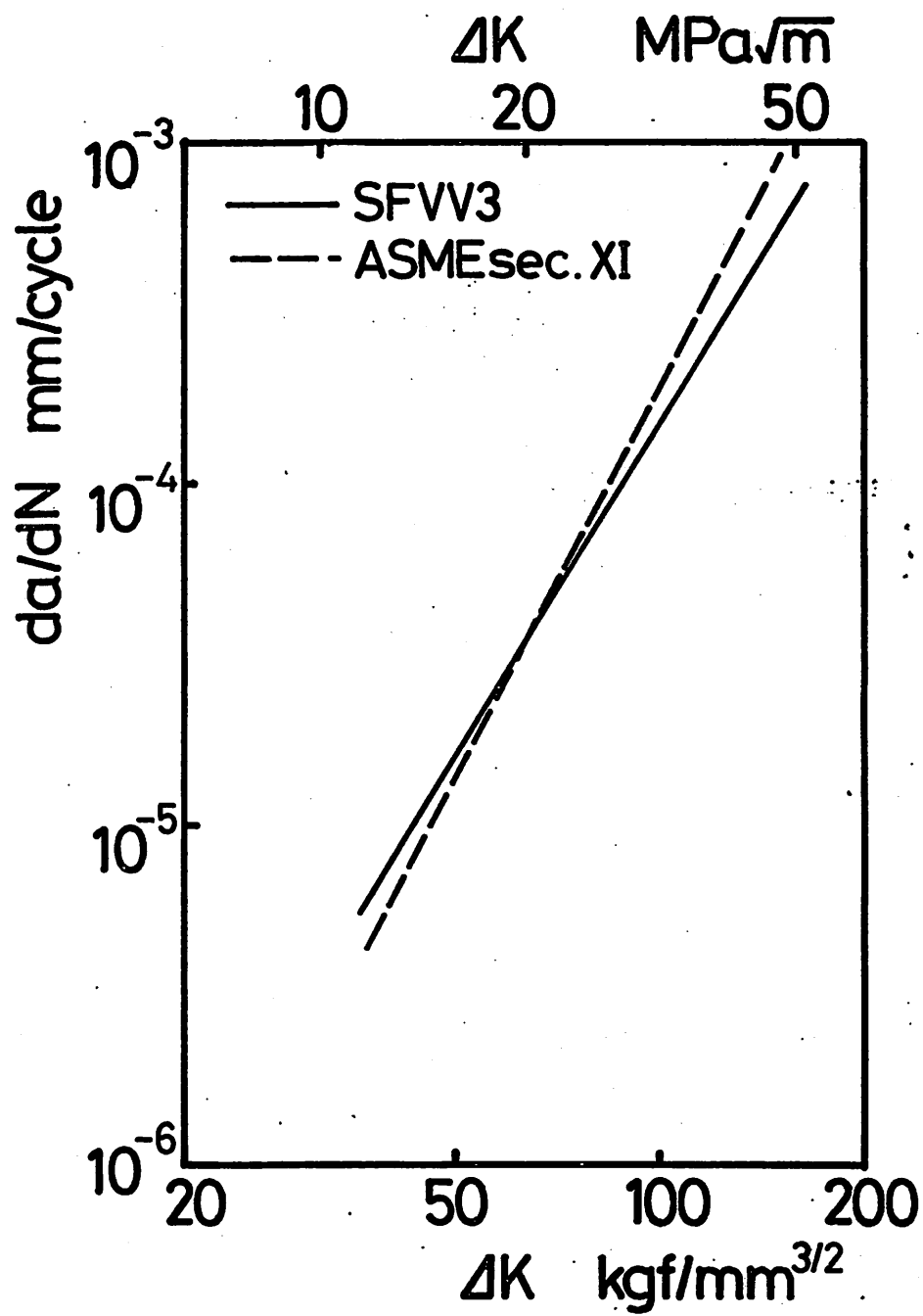


図4.1 ASME_{sec. XI}との比較

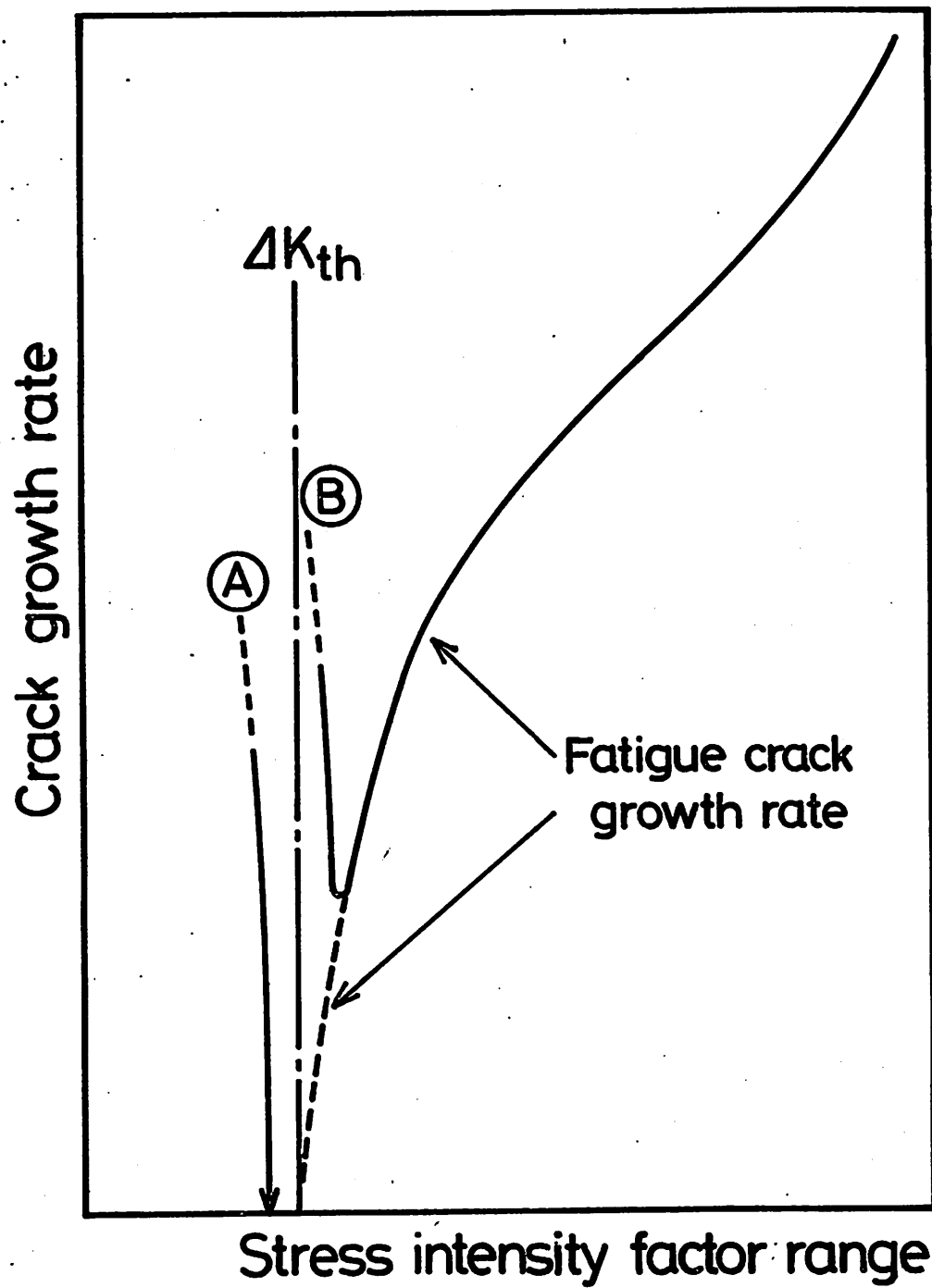


Fig. 4.2.
Crack growth rate from the ideal crack

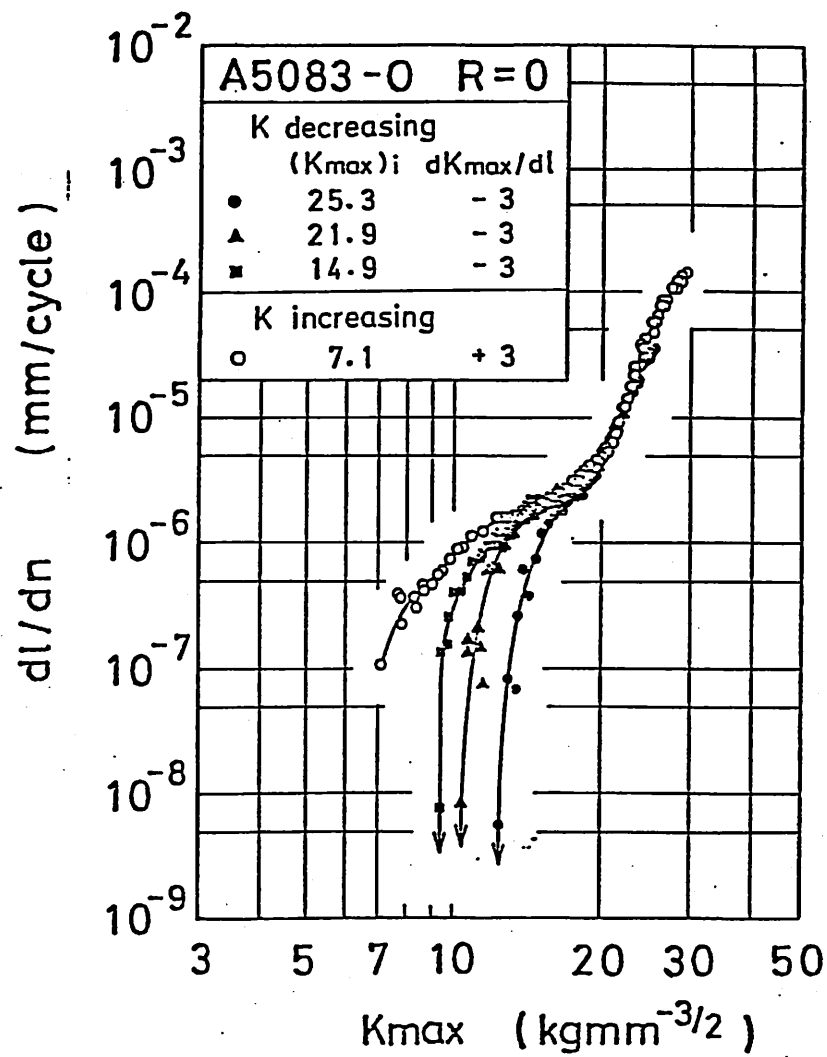
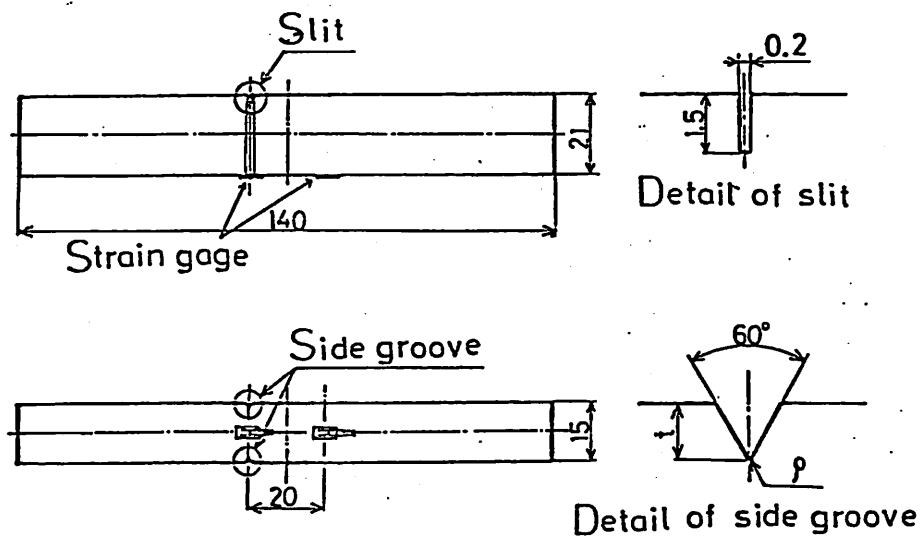


図4.3 き裂進展速度(dl/dn) - K_{max} の関係



Material	t	ρ
S35C , HT80	0.7	1.0
A5083-O, ZK141-T7	1.5	0.1

図4.4 試験片形状

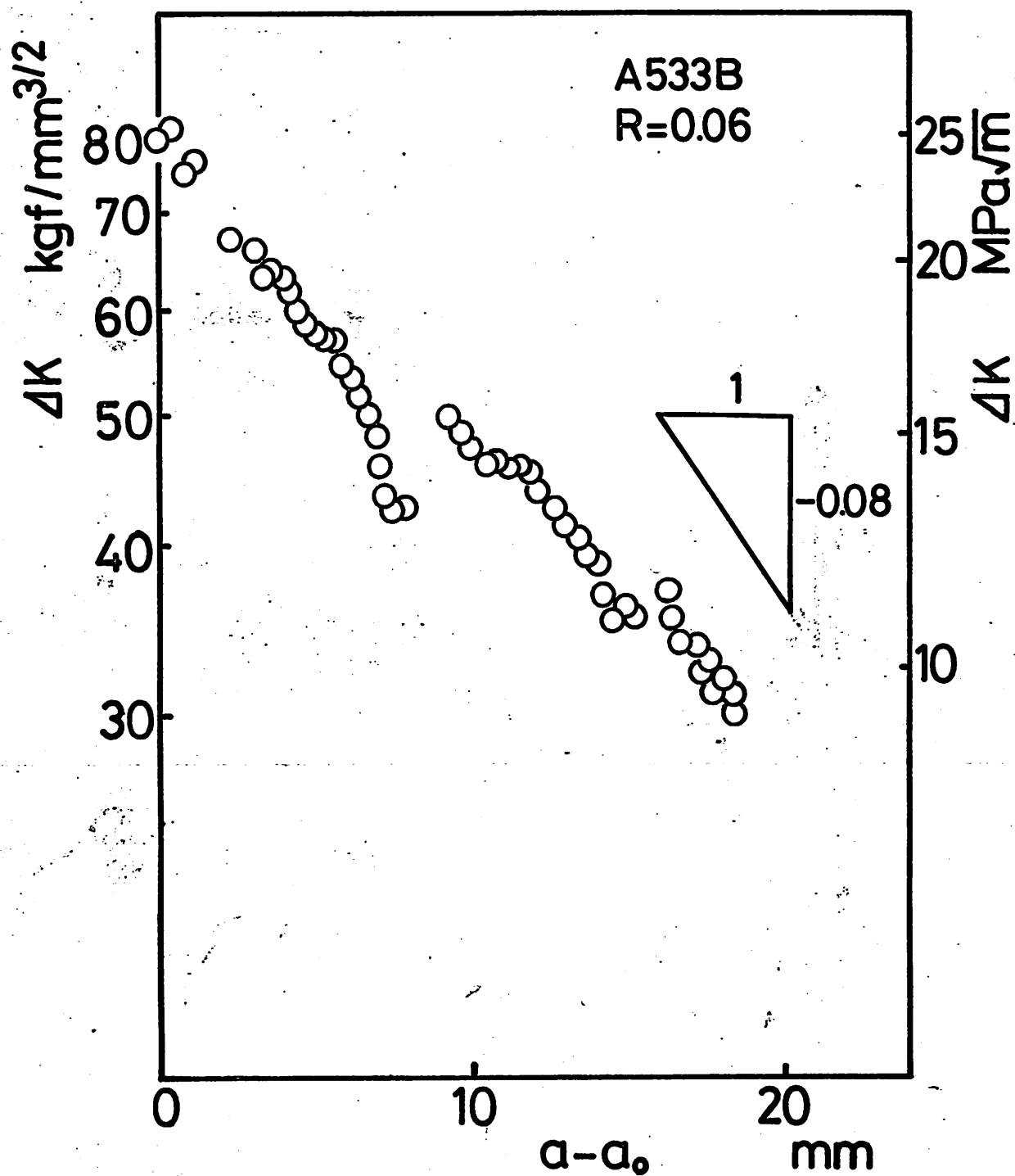


図4.5 ΔK 漸減勾配 (ΔK - a の関係).

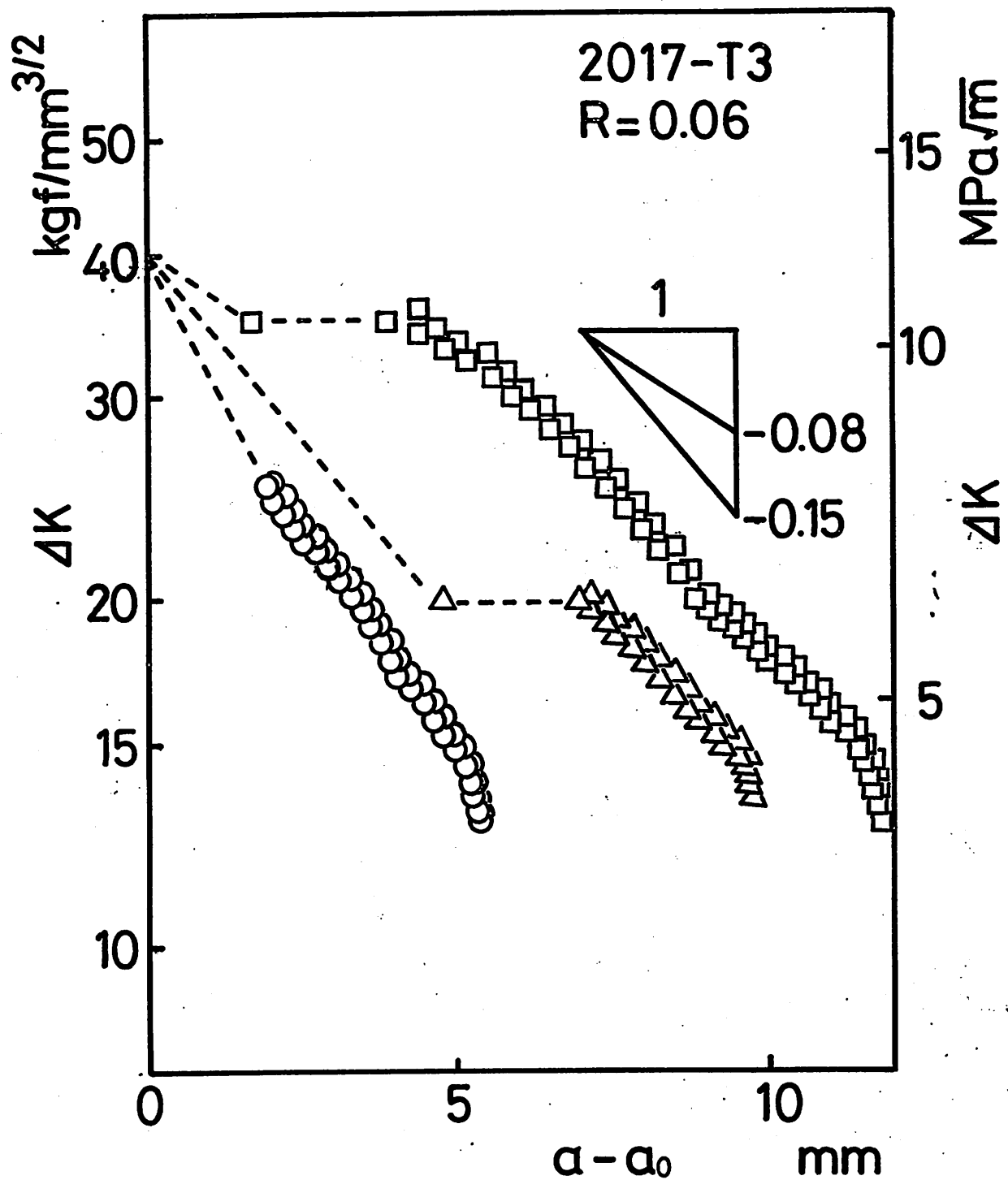


図4.6 ΔK 漸減勾配 ($\Delta K - \alpha$ の関係)

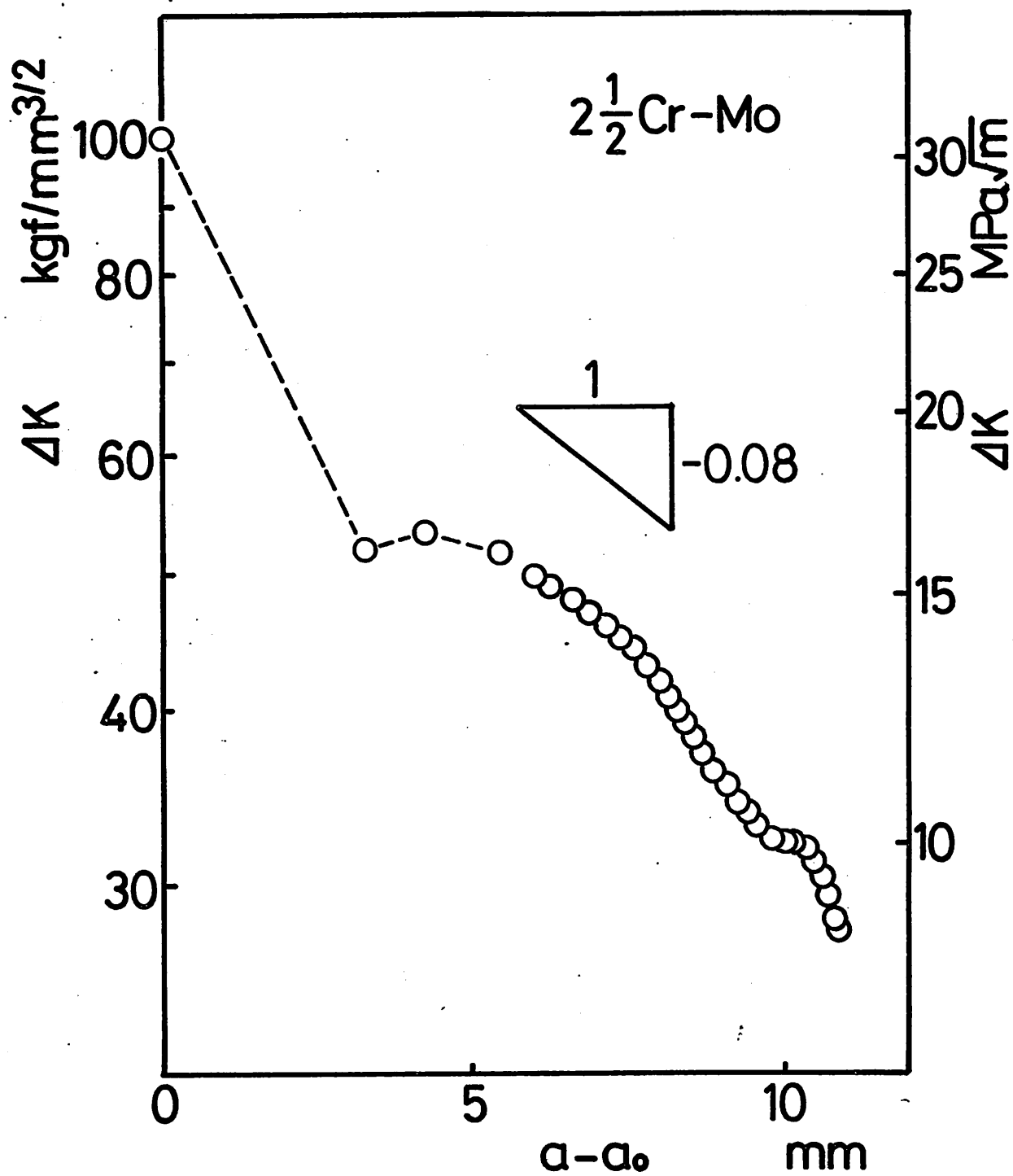


図 4.7 ΔK 漸減勾配 ($\Delta K - a$ の関係).

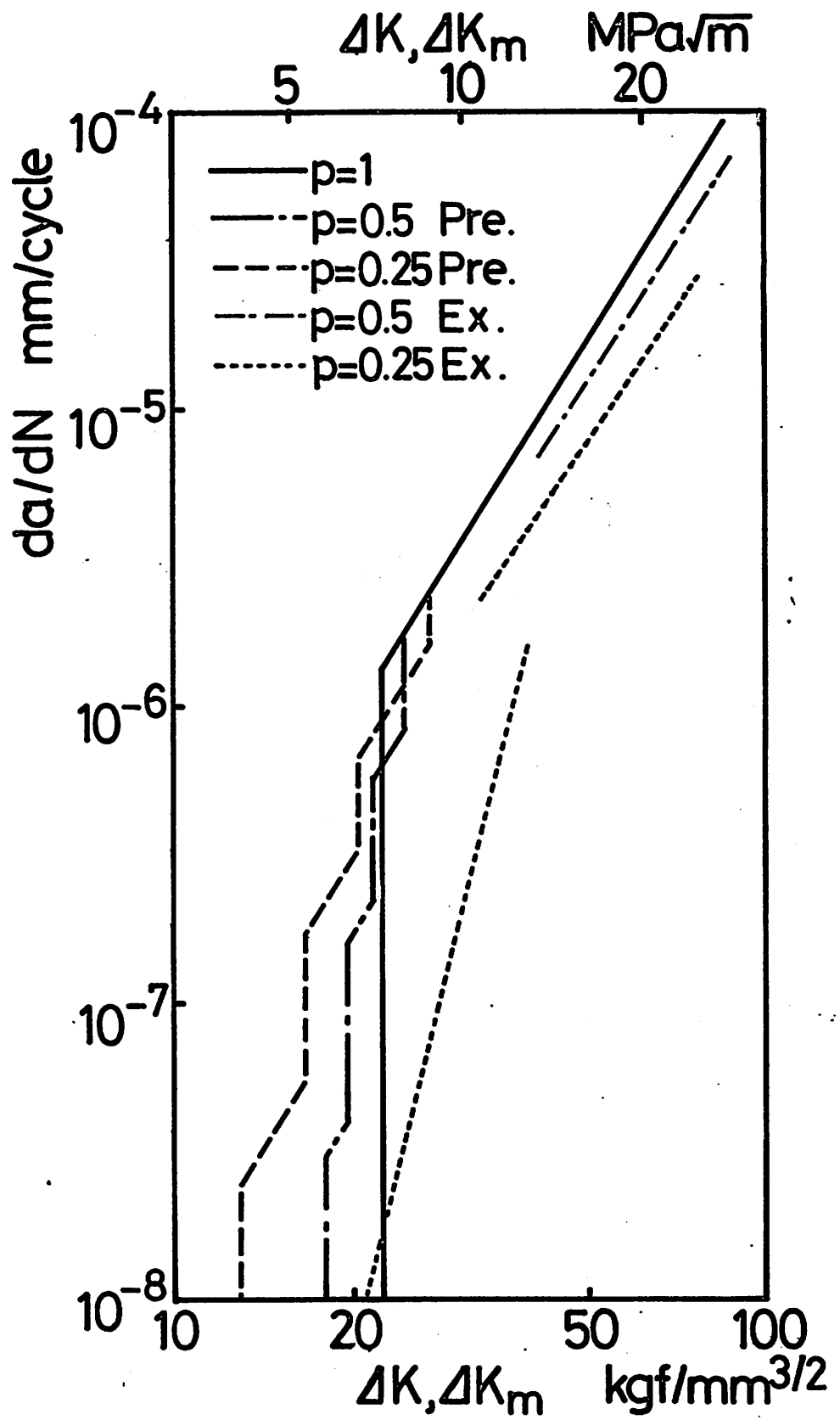


図 4.8 線型加算則により予測される主裂進展速度と実験結果の比較

—5章 結言—

原子炉圧力容器用SFV3鋼を用いて、一定振幅荷重試験およびプログラム荷重試験を行い、疲労き裂進展特性について以下の結論を得た。

1. 広範囲にわたるプログラム荷重下のき裂進展速度に対して、一定振幅荷重下のき裂進展速度を線型加算することにより保守的評価が得られる。
2. 遅延効果は同一 ΔK_{ms} あるいは ΔK_m レベルに対して、 ρ の低下とともに強くなる。しかも、その強さは ΔK_{ms} あるいは ΔK_m レベルにより、また1サイクルの繰返し数によっても異なる。
3. ASTM(案)の ΔK 勾配条件(式(2.3))をほぼ満足する ΔK 漸減試験により、真の ΔK_{th} が得られる。また、予き裂導入後に応力除去焼鈍を施した試験片により ΔK_{th} を決定するには、複数の試験片が必要である。
4. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI Appendix Aで与えられている設計直線は、低 ΔK 領域において非保守的評価となる。

参考文献

- (1)例えば ASTM, STP 595, "Fatigue Crack Growth under Spectrum Loads" など
- (2)菊川, 城野, 近藤, 日本材料学会第29期学術講演会前刷集, P164
- (3)Srawley, F.E., Intl. J. Fract. Mech., Vol. 12, P475 (1976).
- (4)飯田, 金子, "不均分布のロック荷重による累積疲労被害の一検討", 日本造船学会学術論文集, 144, P381 (1975).
- (5)Proposed Method of Test for Steady-State Fatigue Crack Growth Rates
- (6)平野, 石井, 小林, 中沢, "超音波法による疲労き裂進展挙動の測定", 非破壊検査, 30-1, P7 (昭56-1).
- (7)小林, 中沢, "停留き裂に関連した切欠き材の過小応力ならびにコーキング効果", 材料, 21-223, P267 (昭47-4)
- (8)Elber, W., ASTM STP 486, P230 (1971).
- (9)ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI, "Rules for In Service Inspection of Nuclear Power Plant Components" Division 1, 1977 Edition
- (10)中沢ほか, 機講論, No. 730-1, P41 (1973-4)
- (11)中沢, 小林, 機械の研究, 20-9, P1245 (1968).

謝 辞

本研究を遂行するに当り、数々の貴重なる御助言、御指導を賜、た中沢 一 教授、小林英男助教授、平野一美助手、中村春夫助手に深く謝意を表します。なお、本研究の一部は日本溶接協会原子力小委員会FRC委員会の共同研究の一環として行われたものであり、論文作製に当たり同委員会の関連研究成果の一部を参照した。ここに記して謝意を表します。最後に、研究を進める上で多大の御助力を与えて下さ、た固体力学講座の皆様に厚く御礼申し上げます。

昭和56年3月

小川武史