



Title	実働荷重下の疲労き裂進展とき裂開閉口挙動に関する研究
Author(s)	近藤, 良之
Citation	大阪大学, 1981, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/24574
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

実働荷重下の疲労き裂進展と
き裂開閉口挙動に関する研究

昭和55年11月

近 藤 良 之

実働荷重下の疲労き裂進展と
き裂開閉口挙動に関する研究

昭和55年11月

近 藤 良 之

目 次

第1章 緒 論	1
第2章 試験装置およびミニコンピュータによるき裂開閉口挙動 の自動計測	9
2.1 疲労試験機	9
2.1.1 動電形面内曲げ試験機	9
2.1.2 電気油圧サーボ試験機	11
2.2 き裂長さおよびき裂開閉口挙動の測定法	12
2.2.1 測定回路	15
2.2.2 荷重, 変位信号検出法	16
2.2.3 直流増幅器	20
2.2.4 き裂長さの較正	21
2.3 ミニコンピュータによる自動計測システム	23
2.3.1 変動荷重信号発生法	25
2.3.2 荷重-変位ヒステリシスの自動計測	26
第3章 低K領域における実働荷重下の疲労き裂進展	32
3.1 緒 言	32
3.2 供試材料および試験方法	33
3.3 S35Cの試験結果	36
3.3.1 2段多重変動荷重試験 (R=0の場合)	36
3.3.1.1 ΔK_{eff} に基づくき裂の進展則	36
3.3.1.2 変動荷重下の ΔK_{eff} の推定法と修正進展曲線	41
3.3.1.3 修正進展曲線による推定法とマイナー則の比較	45
3.3.2 3段多重変動荷重試験 (R=0の場合)	46
3.3.2.1 $N_H/N_L = 40/40000$ に中レベルK値を	

重畳させた場合	47
3.3.2.2 $N_H/N_L = 40/1000$ に中レベルK値を 重畳させた場合	49
3.3.3 平均を有する荷重振幅の評価法	50
3.3.4 広帯域変動荷重の波形カウント法	57
3.3.5 ランダム変動荷重試験	60
3.3.5.1 ランダム変動荷重信号発生法	60
3.3.5.2 試験結果の解析法	64
3.3.5.3 試験結果	70
3.3.5.4 考 察	72
3.4 A 5083-O の試験結果	73
3.4.1 2段多重変動荷重試験 (R=0の場合)	73
3.4.1.1 ΔK_{eff} に基づくき裂の進展則	73
3.4.1.2 変動荷重下の ΔK_{eff} の推定法と修正進展曲線	81
3.4.2 3段多重変動荷重試験 (R=0の場合)	82
3.5 結 言	87

第4章 き裂開閉口挙動に及ぼす荷重履歴の影響とそれを考慮した

疲労き裂進展試験法	91
4.1 緒 言	91
4.2 供試材料および試験方法	92
4.3 真空焼鈍した予き裂材の疲労き裂進展挙動	95
4.3.1 き裂進展開始条件と K_{th} 条件の比較	95
4.3.2 き裂開閉口挙動に及ぼすK値履歴の影響	99
4.4 低K領域における疲労き裂進展試験法の再検討	102
4.4.1 S 35C の場合	103
4.4.2 HT 80 の場合	107
4.4.3 A 5083-O の場合	109

4.4.4	ZK141-T7の場合	111
4.4.5	き裂開口比Uの挙動	111
4.5	K漸増法で求めた K_{th} の変動荷重による消失	114
4.6	き裂開口点 K_{op} に及ぼすK値履歴の影響と実働荷重下の き裂進展速度の推定法	115
4.7	結 言	118
第5章	比較的高いK値領域における実働荷重下の疲労き裂進展	121
5.1	結 言	121
5.2	供試材料および試験方法	121
5.3	一定振幅荷重試験	123
5.4	2段多重変動荷重試験	125
5.5	重畳変動荷重試験	129
5.6	ランダム変動荷重試験	131
5.7	結 言	133
第6章	結 論	136
謝 辞		139

第 1 章 緒 論

実働荷重を受ける機械，構造物の疲労強度設計において，多くの機械部品では冗長度がなく，フェイルセーフ的設計が困難であるので巨視き裂の存在を許すことができず，巨視き裂の発生が使用限界寿命となる。それに対し大形溶接構造物などにおいては切欠き，不溶着部，欠陥等の存在は避け難く，実働荷重下で軽量化，高性能化を要求する場合にはどうしてもき裂の発生進展を許さざるを得なくなる。しかしこのような構造物においては冗長度の高い構造形式をとることにより，たとえき裂が発生進展したとしても直ちに破壊に至らないような設計を行うことが可能であり，損傷許容設計⁽¹⁾として積極的に取り入れられている。

き裂進展を許容する設計法としては対象に応じて種々の方式が考えられるが，いずれの場合においても実働荷重下のき裂進展量をできるだけ精度良く推定することが最も重要な課題となり，これまでも一定振幅荷重⁽²⁾や変動荷重^{(3)~(2)}に関して多くの研究が行われている。従来の変動荷重に関する研究の多くは，応力拡大係数 K で整理した一定振幅荷重試験のき裂進展曲線に線形累積則を適用するという方法を基本にしているようであるが，この方法は必ずしも実際の進展挙動を適切に表現しておらず，荷重レベルやパターンによっては不都合な結果を与えることが知られている。たとえば比較的高い K 値領域においては少数回の過大荷重負荷によるき裂進展の加速⁽⁷⁾と，それに引き続く遅延現象^{(4)~(6)}などの著しい非線形累積の挙動が現われる。また大荷重が周期的に繰り返し負荷される場合にも同様に遅延現象が現われ，き裂進展寿命の推定に著しい影響を及ぼし，高い K 値領域における線形累積則はおおむね安全側すぎる推定結果を与えるようである^{(1)~(3)(23)}。逆に低 K 領域においては進展下限界条件以上の荷重によって発生したき裂は，下限界条件以下の荷重によっても進展するため，これを無視したマイナー則では危険側の推定を与えることが知られている⁽¹⁴⁾⁽¹⁹⁾⁽²³⁾。

以上のことから瞬間の K 値，即ち K_{\max} および K_{\min} ，あるいは $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ と $R = K_{\min}/K_{\max}$ が直接き裂進展速度を支配していないことが示唆され，さらに精度良い推定を行うためにはき裂進展メカニズムをも考慮し，これ

をより直接的に支配するパラメータを導入する必要があることがわかる。疲労き裂進展速度を直接に支配するパラメータとしては例えば繰り返しき裂先端開口変位 $\Delta CTOD$ などが考えられるが、通常の試験条件においてこれを実測することはいまだむずかしく、しかもあまりにマイクロな情報であるため設計パラメータとして実用することは困難である。そこで本研究では、これとより密接な関連を持ち、かつマクロに測定が可能なパラメータとしてき裂閉口現象を考慮した有効応力拡大係数 ΔK_{eff} を取り上げ、オンラインに実測することを考える。

き裂閉口現象 (crack closure)⁶⁵⁾ とは、進展している疲労き裂はき裂前方に形成される塑性域の中を進展し、き裂面に残留塑性変形を残すため、ある引張り荷重レベルまでは疲労き裂の先端が開かない現象であり、疲労き裂の進展に有効なのは、き裂先端が開いている範囲の荷重範囲であると考え、これに線形破壊力学を適用し、有効応力拡大係数 ΔK_{eff} を求め、それをパラメータとして用いるものである。これはき裂進展現象に、より近いパラメータであるため、一定振幅荷重のみならず一般の変動荷重下のき裂進展問題をも解決しうる可能性があるとして広く注目を集めてきている。

有限要素法^{66)~68)} や各種の力学モデル^{69)~71)} による解析的な研究も活発に行われており、変動荷重下のき裂開口点の変化をシミュレートした結果、過大荷重や Hi-Lo 荷重による遅延現象の傾向を説明できるなどの結果が報告されている。

菊川らも、ひずみゲージを用いて試験片内部を含めてき裂進展量とき裂開閉口挙動を高精度に計測できる除荷弾性コンプライアンス法を開発してこれらを実測し、疲労き裂進展および開閉口挙動は平面応力状態の試験片表面と平面ひずみ状態の試験片内部では異なり、内部の方がき裂開口点が低くき裂が先行し、内部の挙動が全体をほぼ支配するため、内部の挙動に注目する必要があることを指摘した⁶⁷⁾⁶⁸⁾。さらに、広範囲の材料についてき裂進展下限界条件を含む低レベルの領域で一定振幅荷重下の進展挙動を調べ、鉄鋼材料においては ΔK_{eff} についてもき裂進展下限界条件 $(\Delta K_{eff})_{th}$ が存在することを見出した。また ΔK_{eff} で整理すれば進展速度に及ぼす応力比の影響が説明できることなども示し⁶⁷⁾、他の研究者によってもほぼ同様の結論が得られている^{69)~72)}。

この考え方は変動荷重下のき裂進展問題に対しても有効と考えられ、前述のようにモデルにより現象を説明しようとする試みも多く行われており、定性的にはある程度成功している。しかし今まで開閉口挙動をオンライン・リアルタイムにサイクルごとに測定することが困難でほとんど行われていなかったためか、変動荷重下のき裂開閉口挙動を実測し現象を解明しようとした例は極めて少ない。そこで著者らは先に低K領域の定常な2段多重変動荷重試験を行い、除荷弾性コンプライアンス法を用いてオンライン・リアルタイムにき裂開閉口挙動を測定し、き裂進展下限界条件をはさむ変動荷重下では、 ΔK_{eff} に対する下限界条件が消失し、それ以下の ΔK_{eff} でもき裂が進展することを見出した。また比較的高いK値領域では ΔK_{eff} が減少する結果として遅延現象が現われることなどを示し、先に指摘したようなK値に基づくマイナー則^(註)による見積りでは合わない場合でも、 ΔK_{eff} に対して修正マイナー形の修正を行えば、これを用いて $(\Delta K_{eff})_{th}$ の上下にわたり ΔK_{eff} の各レベルに対する進展量がほぼ推定でき、これを加算することにより精度良い推定が行えることなどを明らかにした^{22~24,43}。

しかしながら先の研究においては実測した ΔK_{eff} を用いて議論しており、 ΔK_{eff} そのものを見積る方法については触れていなかったため、外荷重条件から速度推定を行う段階には至っていなかった。

註 本論文では「一定振幅荷重試験のき裂進展曲線を用いたき裂進展量の線形累積則」をマイナー則と呼び、「一定振幅荷重試験のき裂進展曲線を両対数線図上で、き裂進展下限界値以下に直線で延長した線図を用いたき裂進展量の線形累積則」を修正マイナー則と呼ぶことにする。これに対し ΔK_{eff} で整理した進展曲線は、 $(\Delta K_{eff})_{th}$ の消失を修正すれば若干の場合を除き現実に各レベルでのき裂進展量をそれぞれほぼ推定し得ることが確かめられており、進展量はブラックボックスの中にはなく加算できる量で、この時の線形、非線形は累積に対してではなく各レベルでの進展量が独立にその時の ΔK_{eff} で定まり、相互に干渉しないか否かを意味するので、これを区別するため「 ΔK_{eff} に関する修正マイナー形の推定法」と称することにする。

そこで本研究では先の研究をさらに発展させ、外荷重条件 K 値と進展速度 dl/dn の関係を K と ΔK_{eff} の関係および ΔK_{eff} と dl/dn の関係に分けて考え、き裂開閉口挙動を高精度にかつサイクルごとに分離して測定して、変動荷重下のき裂開口点が何によって決定され、どのような値になるかを明らかにすることにより、外荷重条件から ΔK_{eff} を見積る方法を見出し、それに後者の関係である ΔK_{eff} に関する進展則を明らかにして適用し、き裂進展量を推定する方法を構成することを試みる。

本研究に際してはき裂開閉口挙動測定の高精度化のために試験片にサイドグループを設け、試験片表面付近まで平面ひずみ状態を実現させることにより、き裂進展を支配している試験片内部の挙動を取り出すようにし、さらに小規模降伏を満たすような条件で試験を行い、平面ひずみでかつ小規模降伏条件を満たした、試験片形状等によらない材料特性としてのき裂開閉口挙動が得られるように配慮した。またミニコンピュータを用いた自動計測システムを構成し、オンライン・リアルタイムに変動荷重の各サイクルを分離して測定できるようにした。

また本研究では荷重パターンとして、取り扱いが容易で、しかも現実の実働荷重にも多くみられ実用性も高いにもかかわらず、今まで比較的取り上げられることの少なかった定常的な実働荷重を対象とし、ランダムを含む任意のパターンが定常的に繰り返される場合を取り扱い、単発的な非定常荷重はひとまず除外した。また荷重範囲は進展下限界条件近傍から $K = 200 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 程度までの広い範囲を対象とするが、進展寿命の大きな部分を占めるのは低速度領域での進展であることを考慮して低 K 領域の挙動を重点的に取り上げ、そこで得られた取り扱い法が高い K 値領域においても適用可能であることを確かめるという方法で広い K 値範囲について検討することにする。

本論文は6章より成っている。第1章は緒論であり、本研究の目的と方針について述べた。

第2章では本研究で用いる疲労試験装置、き裂開閉口挙動の自動計測システムおよび試験法全般について述べる。

第3章では低K領域における変動荷重下のき裂進展量の推定法を検討する。方針としてはまず解析の容易なプログラム荷重を用いて基本的な性質を明らかにした上で、ランダム変動荷重に拡張することにする。そこでまず、低K領域においては K_{th} の消失という現象が起こるためこれに注目しつつ $R=0$ の2段多重プログラム試験を行い、フラクトグラフィ的手法を併用して ΔK_{eff} による進展則を求めるとともに、変動荷重下の ΔK_{eff} を推定する基本的な方法を検討する。次にこれを広帯域変動荷重に拡張するために、重畳波形等のプログラム波形を用いて平均応力を有する小振幅の評価法を検討するとともに波形カウント法を決定する。以上の準備が整った段階で種々のパワースペクトルを有する擬似ランダム変動荷重を負荷して任意の実働荷重に対して ΔK_{eff} を推定する方法を検討し、先の進展則と組み合わせ、き裂進展量を求める一般的な方法を提案する。

第4章ではき裂進展とともにK値が増加する場合と減少する場合の一定振幅試験を行い、き裂開閉口挙動を測定した。その結果K増加過程では塑性域寸法の2～3倍程度き裂が進展すればき裂開口点は定常値に達するが、K減少過程ではいったん上昇した開口点は低下しにくく、塑性域寸法よりはるかに長い領域にわたって荷重前歴の影響が残り、開口点は高めの値をとるため、通常行われているように前段階のK値に対する塑性域寸法程度き裂を進展させてからデータをとるという方法で試験を行ったのでは、K漸増過程とK漸減過程で進展挙動に差があることが明らかになった。

したがってき裂状欠陥からの疲労き裂進展問題のようなK漸増過程に対しては、開口点が上昇してゆくK漸増法で求めた結果を採用する必要があることを指摘し、K漸増法による新しい K_{th} 試験法を提案する。

同様に変動荷重についても最大K値が漸増する場合と漸減する場合でき裂開口点は異なるため進展速度は異なるので、これを推定する場合の注意点を述べる。

第5章では比較的高いK値領域において変動荷重試験を行い、第3章で低K領域に対して見出した取り扱い法が高いK値領域に対しても適用できることを確認する。

第6章は結論であり、本研究で得られた結果をまとめて述べる。

第 1 章 の 参 考 文 献

- (1) 上山, 日本航空宇宙学会誌, 25-276 (1977), 1.
- (2) K 値で整理したものとして例えば
Paris, P.C. and Erdogan, F., Trans. ASME, 85 (1963),
528.
平均応力の影響を調べたものとして例えば
Klesnil, M. and Lukáš, P., Mat. Sci. Engng., 9 (1972),
231.
 K_{th} について調べたものとして例えば
Sasaki, E., Ohta, A. and Kosuge, M., Trans. NRIM,
19 (1977), 183.
総説として例えば
北川, 材料, 26-284 (1977), 482 ; 材料, 26-285 (1977),
590 などがある。
- (3) ASTM STP 415 (1967).
- (4) Wheeler, O.E., Trans. ASME, J. of Basic Engng.,
94 (1972), 181.
- (5) Trebules, V.W., Jr., Roberts, R. and Hertzberg, R.W.,
ASTM STP 536 (1973), 115.
- (6) Wei, R.P. and Shih, T.T., Int. J. of Fracture, 10-1
(1974), 77.
- (7) 小寺沢・本上, 材料, 23-252 (1974), 730.
- (8) Matsuoka, S. and Tanaka, K., Engng. Frac. Mech., 8
(1976), 507.
- (9) ASTM STP 595 (1976).
- (10) 川原・岩崎, 日本造船学会論文集, 第 142 号 (1977), 261.
- (11) Porter, T.R., Engng. Frac. Mech., 4 (1972), 717.

- (12) Schijve, J., *Engng. Frac. Mech.*, 5 (1973), 269.
- (13) 川原・岩崎, 日本造船学会論文集, 第144号(1978), 359.
- (14) 三沢, 材料, 27-300 (1978), 865.
- (15) 小寺沢・志茂, 材料, 25-276 (1976), 875.
- (16) Paris, P.C., *Fatigue - An Interdisciplinary Approach*, (1964), 107, Syracuse University Press.
- (17) Barsom, J. M., *ASTM STP 595* (1976), 217.
- (18) 北川・福田・西山, 日本機械学会論文集, 43-371 (1977), 2439.
- (19) 薄・岡村, 日本機械学会論文集, 44-386 (1978), 3322.
- (20) 薄・岡村, 日本機械学会論文集, 45-390 (1979), 92.
- (21) 総説として例えば 大路, 材料, 26-287 (1977), 801.
- (22) Kikukawa, M., Jono, M. and Tanaka, K., *Proc. of ICM II* (1976), 716.
- (23) Kikukawa, M., Jono, M., Tanaka, K. and Kondo, Y., *ICF 4, vol. 2, Waterloo, Canada* (1977), 1109.
- (24) Kikukawa, M., Jono, M., Tanaka, K. and Kondo, Y., *Int. J. of Fracture*, 13 (1977), 702
- (25) Elber, W., *ASTM STP 486* (1971), 230.
- (26) 小倉・大路・大久保・芝野, 日本機械学会論文集, 42-358 (1976), 1615.
- (27) Newman, J.C. Jr., *ASTM STP 590* (1976), 281.
- (28) 白鳥・三好・宮本, 日本機械学会論文集, 43-374 (1977), 3577.
- (29) Homma, H. and Nakazawa, H., 1975 Joint JSME - ASME *Applied Mechanics Western Conference* (1975), 56.
- (30) 白鳥・三好・宮本・森, 日本機械学会講演論文集, No 760-9 (1976), 111.
- (31) Gray, T.D. and Gallagher, J.P., *ASTM STP 590* (1976), 331.
- (32) Adetifa, O.A., Gowda, C.V.B. and Topper, T.H., *ASTM*

- STP 595 (1976), 142.
- (33) Bell, P.D. and Wolfman, A., ASTM STP 595 (1976), 157.
 - (34) Elber, W., ASTM STP 595 (1976), 236.
 - (35) Dill, H.D. and Saff, C.R., ASTM STP 595 (1976), 306.
 - (36) Budiansky, B. and Hutchinson, J.W., Trans. ASME, J. of Appl. Mech., vol. 45 (1978), 267.
 - (37) 菊川・城野・田中・高谷, 材料, 25-276 (1976), 899.
 - (38) 菊川・城野・近藤・山木・山田, 材料, 29-317 (1980), 155.
 - (39) Katcher, M. and Kaplan, M., ASTM STP 559 (1974), 264.
 - (40) Shih, T.T. and Wei, R.P., Engng. Frac. Mech., 6(1974), 19.
 - (41) Ohta, A., Kosuge, M. and Sasaki, E., Int. J. of Fracture, 14-3 (1978), 251.
 - (42) Vazquez, J.A., Morrone, A. and Ernst, H., Engng. Frac. Mech., 12-2 (1979), 231.
 - (43) 菊川・城野・近藤, 材料, 27-302 (1978), 1096.

第 2 章 試験装置およびミニコンピュータによる き裂開閉口挙動の自動計測

本章では疲労き裂進展試験に用いた疲労試験装置，除荷弾性コンプライアンス法によるき裂長さと同閉口挙動の測定法，ミニコンピュータによる変動荷重信号発生法および変動荷重下の荷重-変位ヒステリシスの自動計測等，試験法全般について述べる。

2.1 疲労試験機

本研究は K_{th} 近傍からかなり高い K 値条件までの広い領域を対象とするので，同一の試験機で全領域をカバーすることは困難である。そこで試験条件に応じて試験機を使いわけ，低 K 領域では小形の動電形面内曲げ試験機を，比較的高い K 値領域では電気油圧サーボ試験機を用いた。

2.1.1 動電形面内曲げ試験機

低 K 領域においては，き裂開閉口に伴う変形の変化が大きく，除荷弾性コンプライアンス法⁽¹⁾⁽²⁾によるき裂開閉口挙動の測定が容易でしかもき裂長さ測定の分解能が高いことから，片側き裂を有する小形板状試験片を用いた面内曲げ試験を採用することにした。また試験機としては比較的容易に高い周波数で試験が可能な動電形面内曲げ試験機を用いた。

試験装置の外観図を図 2.1 に，概略図を図 2.2 に示す。駆動方式は動電形加振器（最大加振力 ± 75 kg）により発生させた上下方向の加振力を，面内および面外の曲げ荷重を逃がすように十字形に配置した曲げ逃がし板を介して水平な腕に伝え，試験片に一樣曲げモーメントを負荷するものである。なおこの負荷方式によれば若干の軸荷重も負荷されるが，それによる応力は曲げ応力に対して 1% 以下であるのでその影響は小さいと考えられ，ここでは除外して取り扱った。第 3 章と第 4 章の一部ではこの試験装置を用いた。

負荷モーメント測定には，試験機腕の上下のフランジ部にひずみゲージをそれぞれ

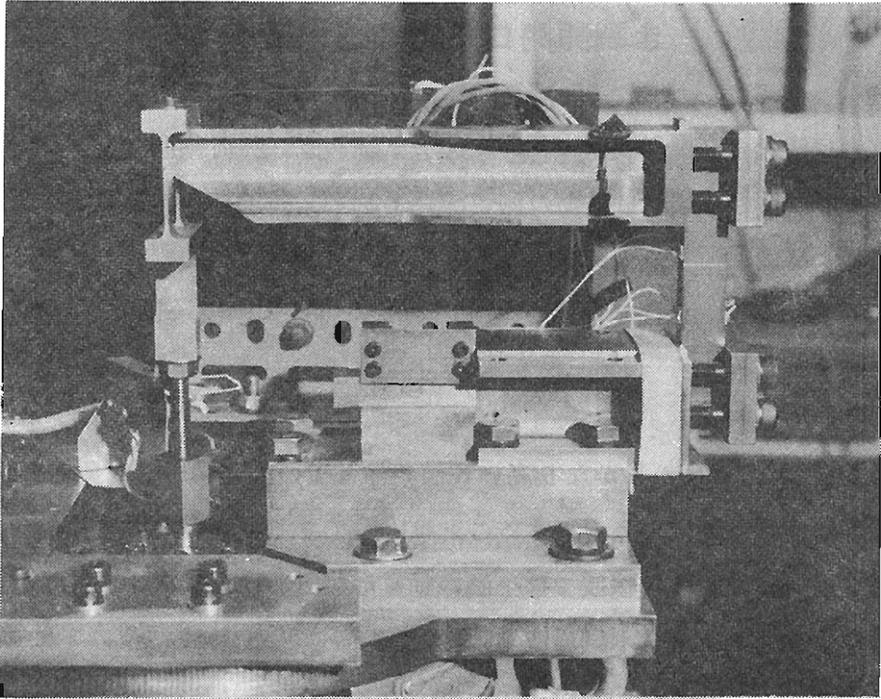


図 2.1 面内曲げ試験機

れ 2 枚ずつ貼ってブリッジを構成し、その出力と負荷モーメントを予め校正して用いた。

低 K 領域で用いる標準的な試験片 ($150 \times 21 \times 15$ でサイドグループを有する S 3 5 C 材でき裂が入っていないもの) を取り付けた場合の試験装置の周波数特性を図 2.3 に示す。

第 4 章の一部の試験ではさらにき裂長さの測定の分解能を上げるため、より小さな寸法の試験片を用いた。試験片寸法を小さくすると試験装置全体の剛性が低下して固有振動数が低くなり、試験周波数が高くとれなくなる。それを避けるために荷重伝達腕を小形軽量なものに変え、固有振動数が十分高くなるように配慮した。この場合の試験装置の外観図を図 2.4 に、概略図を図 2.5 に示す。駆動方式は先のものと同ーである。 $113 \times 15 \times 4$ の S 3 5 C 材の試験片でき裂が入っていないものを取り付けた場合の試験装置の周波数特性を図 2.6 に示す。

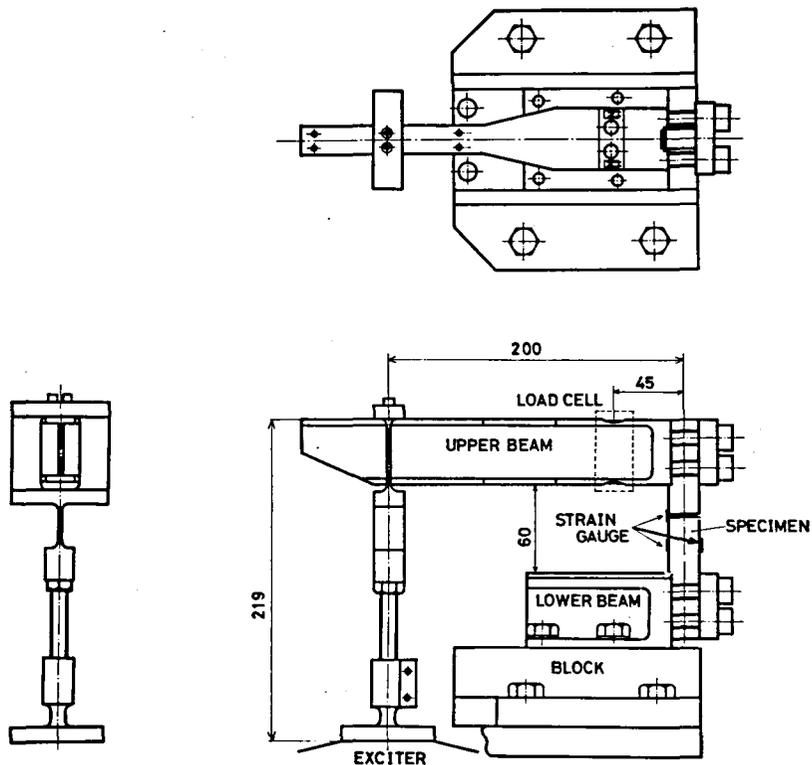


図 2.2 面内曲げ試験機概略図

2.1.2. 電気油圧サーボ試験機

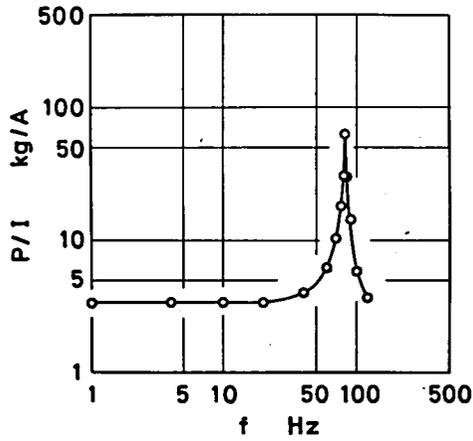
高いK値領域においては試験片も大形化するため、荷重容量の大きな試験機が必要となる。そのため電気油圧サーボ試験機を用い、中央切欠き試験片による引張り圧縮試験を行った。試験装置の外観図を図 2.7 に示す。試験機のアクチュエータおよびサーボバルブの仕様をそれぞれ表 2.1, 2.2 に示す

表 2.1 アクチュエータ仕様

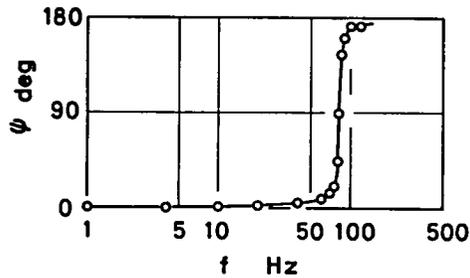
Capacity (ton)	Stroke (mm)
± 15	± 24

表 2.2 サーボバルブ仕様

Model No.	Rated flow (l/min)	Rated input signal (mA)	Coil resistance (ohms±12%)
MOOG 76-103	38	15	200



(a)出力荷重特性



(b)位相特性

図 2.3 面内曲げ試験機の周波数特性

2.2 き裂長さおよびき裂開閉口挙動の測定法

き裂長さならびにき裂開閉口挙動は除荷弾性コンプライアンス法により測定した。除荷弾性コンプライアンス法については文献(1), (2)に詳しく述べられているので、以下に概要のみを述べる。

除荷弾性コンプライアンス法は2つの特徴を有している。第1はき裂開閉口挙動測定の高精度化である。き裂を含む試験片の変位と負荷荷重とのヒステリシスを描かせると、図 2.8 (a)のよういき裂開閉口によるコンプライアンス変化のためにヒステリシスは折れ曲がるが、このままではき裂開口点に対応する折れ曲がり

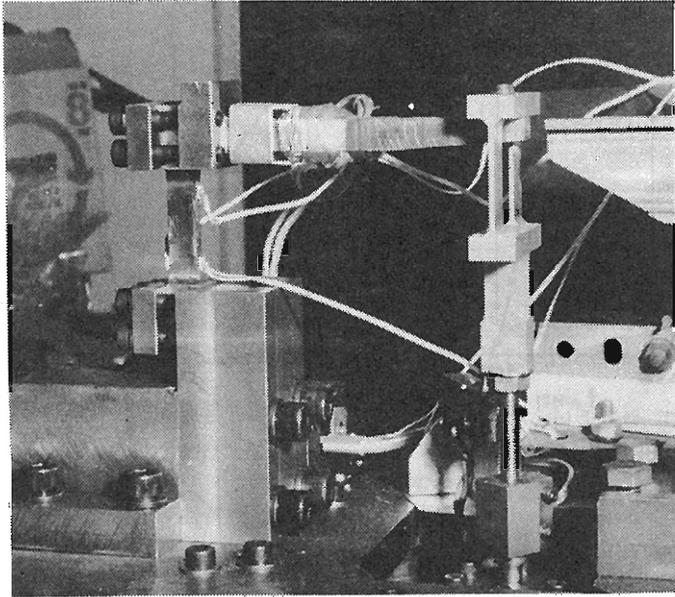


图 2.4 小形面内曲げ試験機

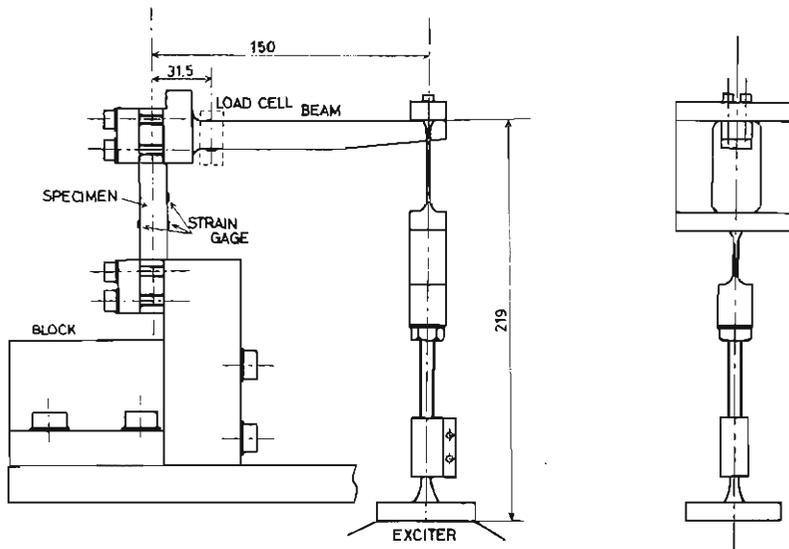
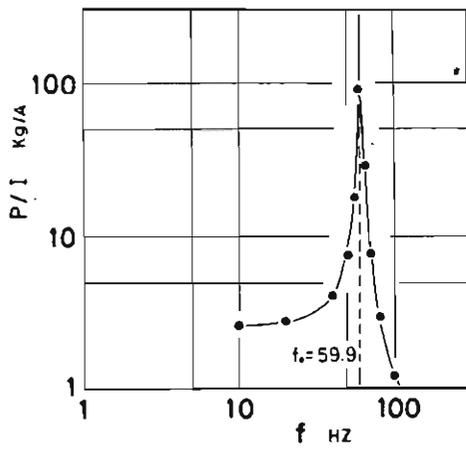
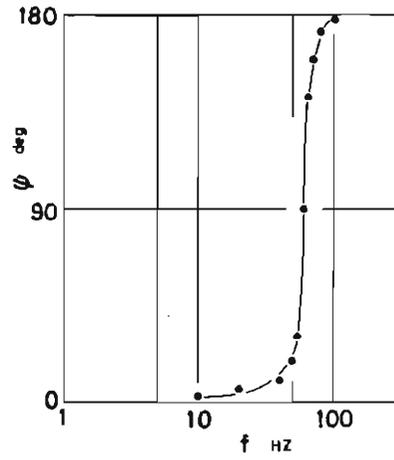


图 2.5 小形面内曲げ試験機概略図



(a) 出力荷重特性



(b) 位相特性

図 2.6 小形面内曲げ試験機の周波数特性

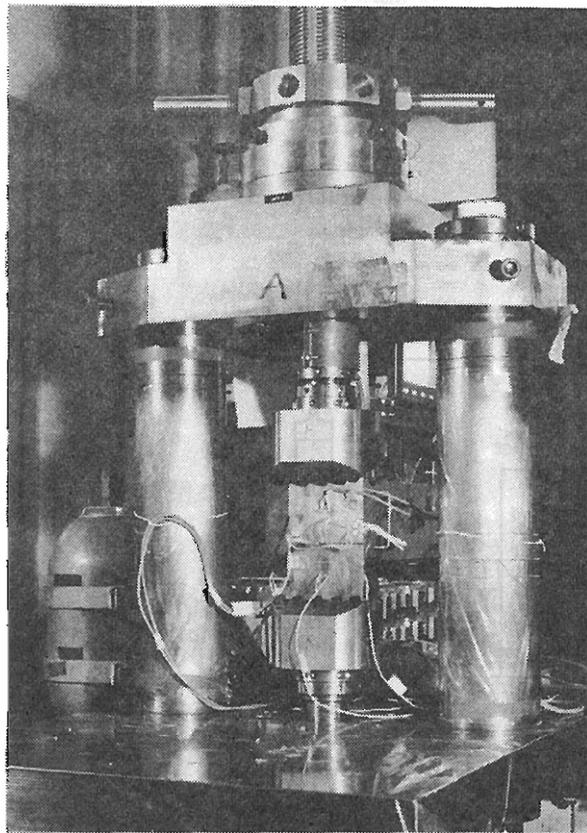


図 2.7 電気油圧サーボ試験機

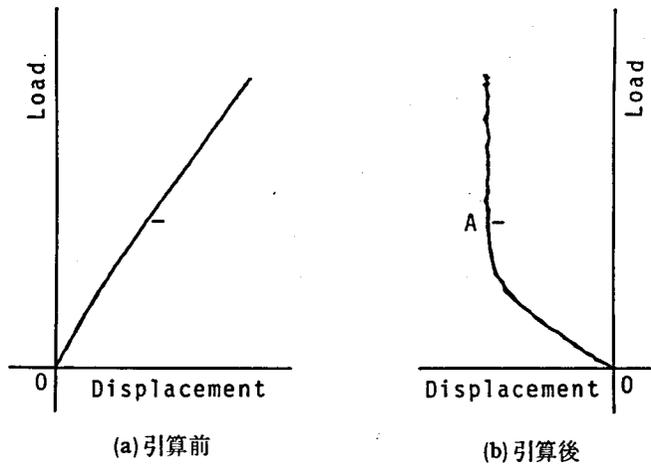


図 2.8 荷重-変位ヒステリシス

は明瞭ではない。それに対し図 2.8 (b) は、後述の引算回路を用いてヒステリシスのき裂開口範囲の除荷弾性線が荷重軸に平行になるように、変位信号から荷重に比例する弾性成分を引き去りさらに増幅したものであり、き裂開口に対する折れ曲がりが見えなくなり、き裂開口点の測定精度が向上する。ここでき裂開口点とはき裂が完全に開いた点であり図 2.8 (b) の点 A である。

第 2 の特徴は試験片内部を含めた平均的なき裂長さが測定できることである。き裂進展に伴って除荷弾性線が傾いてゆくのを、引算回路のポテンショメータ (1000 目盛) により引算量を調節し、除荷弾性線が常に荷重軸と平行になるようにすれば、ポテンショメータの目盛からき裂長さを知ることができる。これはき裂が開いている範囲の弾性コンプライアンスに相当するものを測定していることになり、このコンプライアンスの 0.1 % の変化に対応するき裂長さ変化を検出できる。以上が除荷弾性コンプライアンス法の概要である。

2.2.1 測定回路

除荷弾性コンプライアンス法による測定回路を図 2.9 に示す。破線で囲んだ部分が引算回路であり、それ以後の回路は測定用の A-D 変換器に入力するための増幅部と、ノイズをできるだけ除去するためのハイカットフィルタである。以下

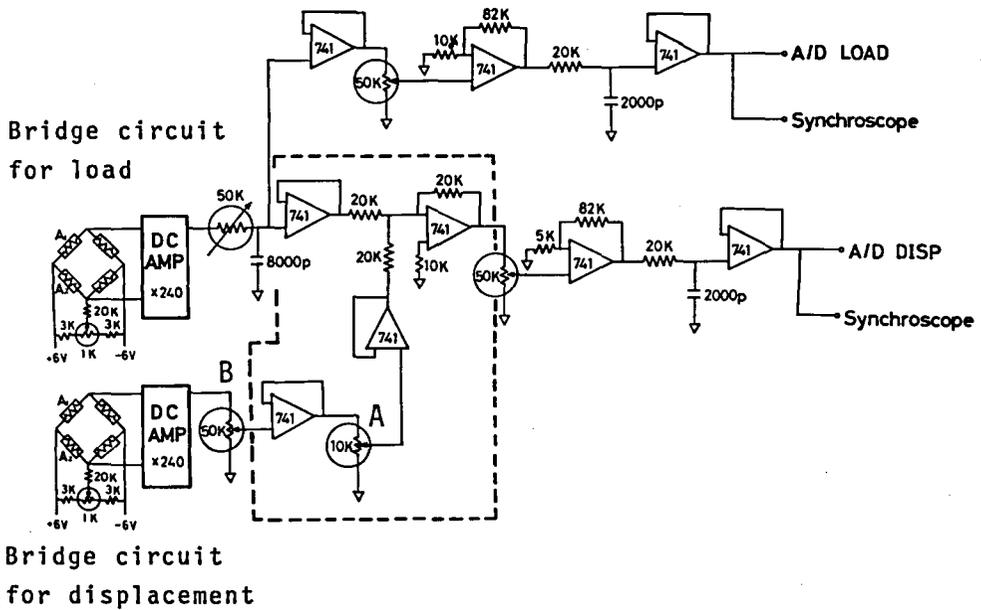


図 2.9 測定回路図

に各部分について詳しく述べる。

2.2.2 荷重，変位信号検出法

試験片に負荷される荷重と試験片の変位の信号は、ひずみゲージを用いたブリッジ回路により検出しているが、信号の検出位置が面内曲げ試験片と中央切欠き試験片で異なるのでそれぞれの場合に分けて述べる。

(i) 面内曲げ試験片の場合

信号検出位置の概略図を図 2.10 に示す。荷重信号はできるだけき裂の影響を受けないように、き裂面から板幅寸法程度離れた位置に表裏 2 枚のひずみゲージ B, C (共和電業製, KFC-2-500-C1-11 又は 23,

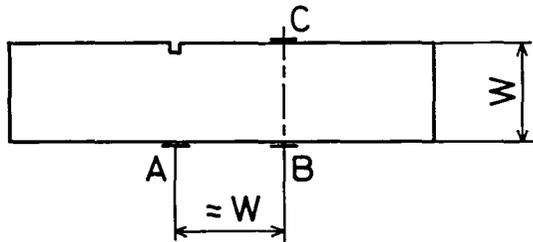


図 2.10 信号検出位置

ゲージレングス 2 mm , 抵抗 500 Ω) を貼り付け, 曲げ応力のみを測定するようにブリッジを構成して検出した。

変位信号は試験片の変形挙動をできるだけ感度よく安定に測定できるように考慮して, き裂と反対側の背面に貼り付けたひずみゲージ A (B, C と同一のひずみゲージ) により検出した。

(ii) 中央切欠き試験片の場合

信号検出位置の概略図を図 2.

11 に示す。荷重信号は板幅中央で, き裂面から板幅寸法の半分程度離れた位置に表裏 2 枚のひずみゲージ B, C (共和電業製 KFC-5-500-C1-11, ゲージレングス 5 mm , 抵抗 500 Ω) を貼り付け, 引張り応力のみを測定するようにブリッジを構成して検出した。

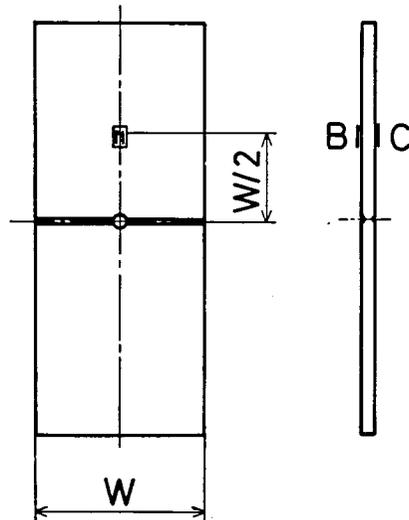


図 2.11 信号検出位置

中央切欠き試験片では左右 2 本のき裂が発生するので, 試験片全体としての平均的な変形挙動をとらえるために, 中央切欠き部におけるき裂開口変位を変位信号として取り出すことにした。切欠き部では最大 0.2 mm 程度の変位が生じるためこれを忠実に取り出すことは従来の方法では幾分困難である。即ちひずみゲージを切欠き部のみを除いて全面試験片に貼り付けるとゲージに過大なひずみが局部的にかかり破損する。これに対処するため Schmidt ら⁽³⁾ が用いた方法にならない, 切欠きをまたいで長さ 40 mm のセロハンテープを貼り, その上からゲージレングス 70 mm のひずみゲージを貼り, ゲージにかかるひずみを分散させるように試みたが, この方法ではセロハンテープの部分でゲージが浮いているため, 非線形性やヒステリシスループを生じるなどの不具合が生じた。また別の方法としてはクリップゲージを用いる方法⁽⁴⁾⁽⁵⁾ があるが, 通常クリップゲージでは高い周波数での使用が困難で, 測定時に試験周波数を下げる等の好ましくない操作が必

要となる。

そこで本研究では次に述べるような、固有振動数が十分高く、周波数特性のみならず位相特性も十分で、線形性、安定性にすぐれ、比較的高い周波数まで使用可能な特殊な形のクリップゲージを試作して用いた。図 2.12 が概略図である。

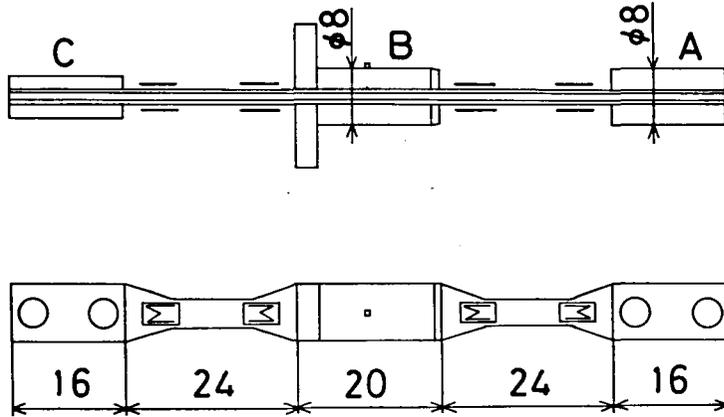


図 2.12 クリップゲージ

その構造は上下 2 枚のバネ板の両端部をスペーサをはさんでブロック A, C で剛接し、中央部にも取り付けのためのブロック B を設け、左右対称の形にし、中央部の変位を検出するようになっている。ブロック B は組み立てた状態で直径 8mm の円筒面となるようにし、さらに上側ブロックには中央部に点接触のための小さな突起を設けている。これを中央切欠き部に設けたリーマ仕上げした直径 8 mm の取り付け穴に挿入すれば、ブロック B は図 2.13 のように下側は取り付け穴と円筒面で面接触し、上側は点接触到近い状態で取り付けられることになる。ブロックを剛接にすることにより、バネ板は両端固定支持で支持点が平行に移動する変位を受けようになり片持ち式のものに比べ剛性が高く、接触

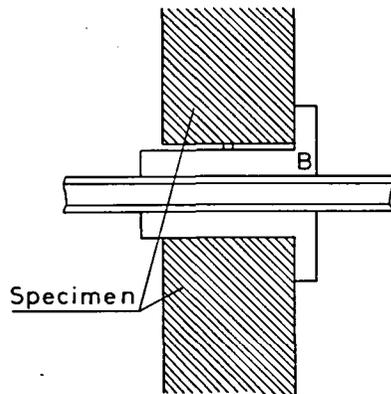


図 2.13 クリップゲージの取付状態

状態の影響の少ない安定性のすぐれた構造となる。したがって若干の圧縮側の初期取り付け変位を与えて装着すれば、クリップゲージが生じる反力で十分試験片に押し付けられ、かなり高い周波数までよく追従する。また上側半分を点接触としたことにより、取り付け精度をそれ程要求しなくとも非線形性やヒステリシス

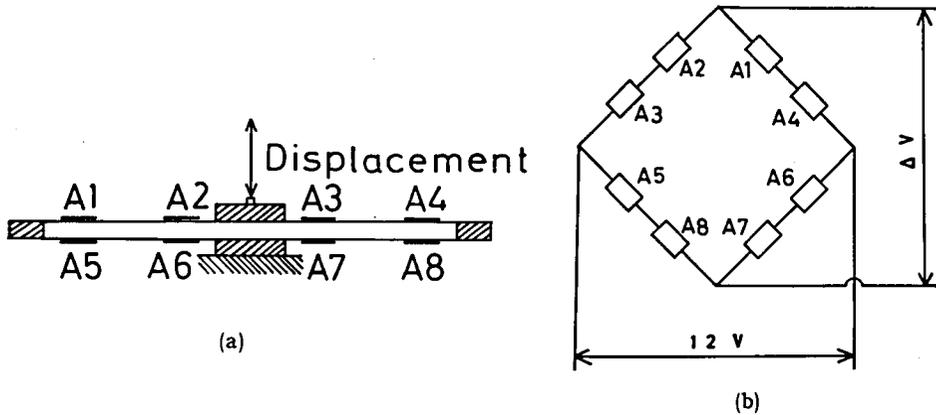


図 2.14 クリップゲージの結線図

ループは生じなくなり、安定した応答が得られる。変位信号検出には図 2.14 (a) に示すように、上下のパネ板に貼り付けたひずみゲージ A 1 ~ A 8 (共和電業製, KFC-2-500-C1-23, ゲージレングス 2 mm, 抵抗 500 Ω) を (b) 図のように結線し、ブリッジを構成して取り出した。このようにブリッジを構成すれば、工作精度の不足等に起因した左右のアンバランスは相殺され、鉛直方向のみの変位量が検出できる。図 2.15 に変位量とブリッジゲージ出力の関係を示しておく。なおクリップゲージの材料はパネ板が 315 °C で 2 時間時効処理し、弾性限を高くしたベリリウム銅板であり、スパー

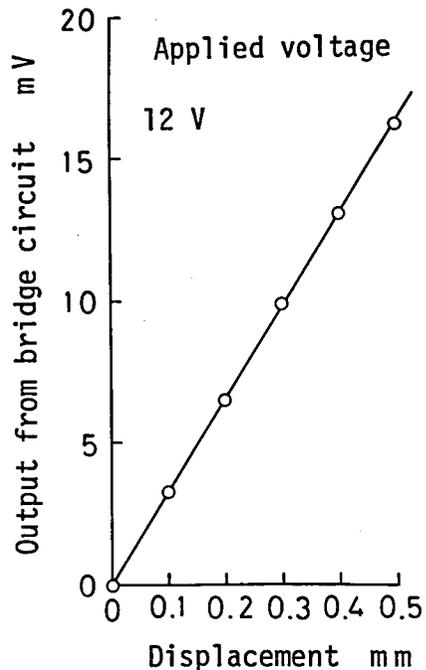


図 2.15 クリップゲージの出力特性

サ及びブロックは黄銅である。ブロック等の剛接はゲージレングスが明確に定まるように半田付け接合とした。以上のような構造にすることにより，工作精度や取り付け精度をそれ程要求することなく，線形性，位相特性，追従性にすぐれた変位検出が可能となった。

2.2.3 直流増幅器

前節で述べた方法で検出した荷重および変位のブリッジ出力電圧を増幅した後，引算回路へ入力する。ブリッジ出力電圧の増幅には市販の動ひずみ計が手軽であるが，高精度計測の点からは直線性，増幅率の安定性，ノイズレベルなどの面で十分でない。そこで本研究では次に述べるように演算増幅器を用いて低ノイズで特に直線性，増幅率の

安定性のよい直流増幅器を試作して用いた。

図 2.16 に回路図を示す。増幅器は 2 段増幅とし，前段には PMI 社製の低ドリフト，低ノイズタイプの OP アンプ OP-10 を用い平衡入力とし，後段に

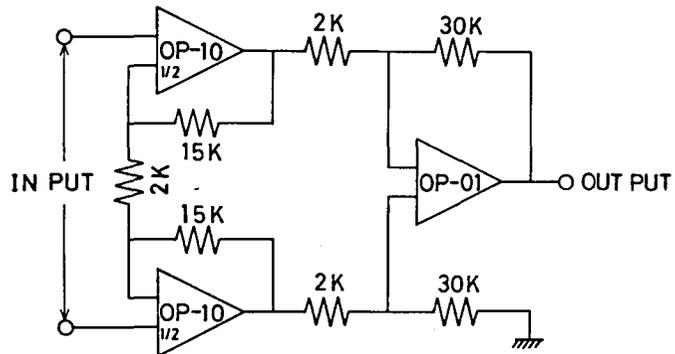


図 2.16 直流増幅器回路図

は同社製の OP-01 を用い不平衡出力としている。また抵抗器は共和電業製の超精密抵抗器（温度特性 $0 \pm 1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ）を用い，増幅器の零点変動をできるだけ小さくするとともに，増幅率の安定性をよくした。増幅器のゲインは 47.6 dB であり，図 2.9 の回路に組み込み適当なハイカットフィルタを通過させた後のノイズレベルはひずみ量の入力換算値の P-P で約 $2 \mu\text{strain}$ である。なおブリッジ電源としては全ての場合について，図 2.17 に示す定電圧電源装置で発生させた $\pm 6 \text{ V}$ の直流電圧を印加した。

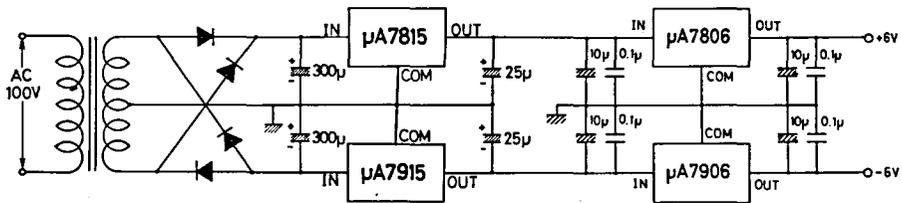


図 2.17 ブリッジ電源回路図

2.2.4 き裂長さの較正

図 2.9 の引算回路中のポテンシオメータ A は変位信号から荷重信号に比例する弾性変形分を差し引く引算量を調節するためのものであり、その引算量とき裂長さが対応することは既に述べた。本節ではこのポテンシオメータ目盛とき裂長さの較正法について述べる。

まず実際の試験に用いるものと同じ形状寸法の試験片を取り付け、疲労き裂が発生していない状態で引算回路のポテンシオメータ A の目盛を初期値 $P_0 (=995)$ に設定し、ポテンシオメータ B でゲインを調節し弾性線を荷重軸と平行にする。以後 B の目盛は固定する。次に疲労き裂進展試験を行い、き裂が 1 ~ 2 mm 進展するごとに荷重の増減を繰り返し、破面にビーチマークを残すとともに、その時の荷重-変位ヒステリシスの除荷弾性線を荷重軸に平行にするポテンシオメータ A の目盛 P を記録する。試験終了後破断面に残るビーチマークは、後に示すようにサイドグループ付き試験片では表面付近で若干先行し、サイドグループなしの試験片では板厚中央部で先行し、き裂前縁形状は一直線にはならない。そこでき裂長さとしてはこれらを平均した長さを用いることにし、ここでは簡単のためにき裂の面積が等しくなるような矩形断面を考えた面積平均き裂長さを採用した。このようにして P とき裂長さの較正曲線を作成しておけば、以後は P を測定すればき裂長さを知ることができる。ただし個々の試験片ごとにゲージ率や試験片寸法に若干のばらつきがあるので、必要に応じて初期状態（スリット（長さ l_0 ）のみの時に $P_0 = 995$ とする）で除荷弾性線が荷重軸に平行になるようにポテンシオメータ B で変位信号のゲインを調節する。

校正曲線はPとき裂長さをそれぞれの初期値で無次元化し、 $(W-l)/(W-l_0)$ を最小自乗法で P/P_0 の5次多項式に回帰して用いた。ただしWは板幅で、き裂長さは慣習に従い、片側切欠き試験片ではき裂全長を l で、中央切欠き試験片ではき裂半長を a としき裂全長を $2a$ で表示した。以下に各試験片の校正曲線を示しておく。

第3章と第4章の一部で使用した図3.1および図4.1(b)の $150 \times 21 \times 15$ のサイドグループ付きの面内曲げ試験片で、初期スリット長さ $l_0 = 1.5\text{mm}$ に対する校正曲線を図2.18に示す。

第4章の一部で使用した図4.1(a)の $113 \times 15 \times 4$ のサイドグループなしの面内曲げ試験片で、初期スリット長さ $l_0 = 1\text{mm}$ に対する校正曲線を図2.19に示す。

第5章で使用した図5.1の $240 \times 100 \times 7$ のサイドグループ付きの中央切欠き試験片で、初期スリット長さ $2a_0 = 13\text{mm}$ に対する校正曲線を図2.20に示す。

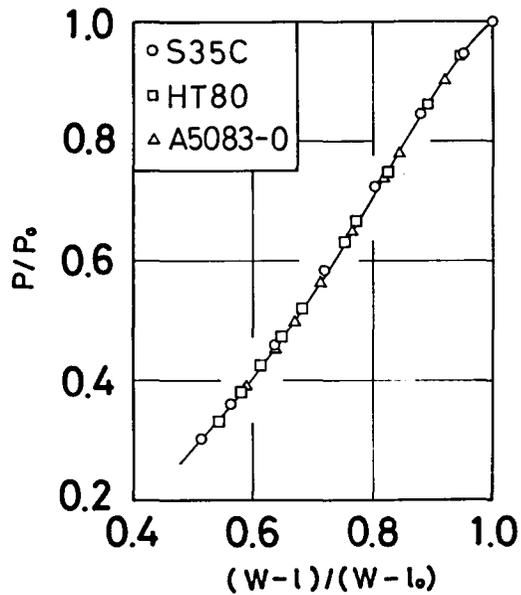


図 2.18 き裂長さ校正曲線
(面内曲げ試験片)

き裂進展速度は図2.21に示すように、所定の距離 Δl あるいは Δa を進展するのに必要な繰り返し数 ΔN を用いて、片側切欠き試験片の場合

$$dl/dn = \Delta l / \Delta N \quad (2-1)$$

中央切欠き試験片の場合

$$da/dn = \Delta a / \Delta N \quad (2-2)$$

として求めた。

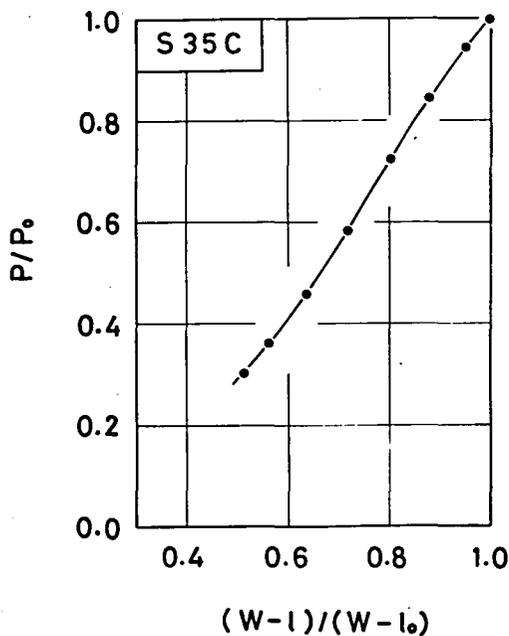


図 2.19 き裂長さ校正曲線
(小形面内曲げ試験片)

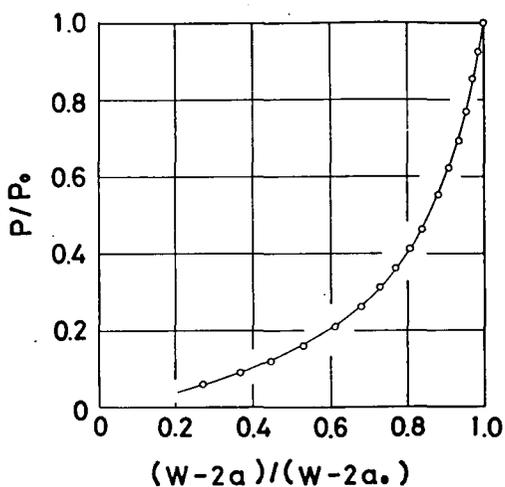


図 2.20 き裂長さ校正曲線
(中央切欠き試験片)

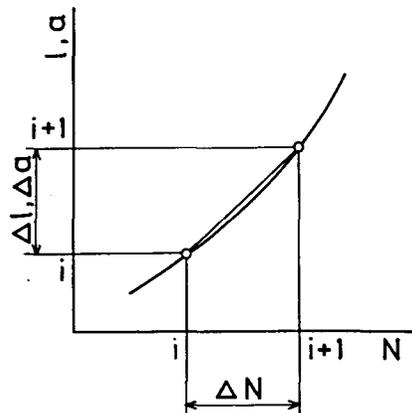


図 2.21 き裂進展速度の求め方

K 値は微小区間 $l_i \sim l_{i+1}$ に対して最終点 l_{i+1} についての K 値で代表させた。なお K 値の計算式は各試験片について該当する章で示す。

2.3 ミニコンピュータに

よる自動計測システム

変動荷重による疲労き裂進展試験を行うには、所定の変動パターンの荷重信号を作成して試験機を駆動し、それと同期して負荷荷重値や荷重-変位ヒステリシスを計測する必要があるが、変動が激しい荷重パターンの場合は人力によってこれを行うことは不可能であり、どうしても

自動計測が必要となる。本研究ではミニコンピュータ、D-AおよびA-D変換器等を用いてオンライン・リアルタイムにこれらを行う自動試験システムを構成して用いた。

図 2.22 に試験システム全体のブロック線図を示す。2台のミニコンピュータを使用しており、変動荷重信号発生用にはHITAC 10-IIを、荷重-変位ヒステリシスの計測用にはMELCOM 70/25を用いた。2台のミニコンピュータは1台の発振器の信号によって同期して動作するようにしているため、荷重負荷と計測は周波数はもちろん位相まで同期した試験が可能である。さらに2台のミニコンピュータは図中に示すタイミングパルス (timing pulse) によって結合されている。これは荷重信号発生用のHITAC 10-IIから、変動荷重パターンの適当な時点で計測開始合図用のパルス信号を送り、計測用のMELCOM 70/25はそのパルス信号を検出すると同時に計測を開始するようにしたものである。このようなタイミングパルスを用いることにより、変動荷重パターン中の1サイクルずつを指定して取り扱うことができるようになる。

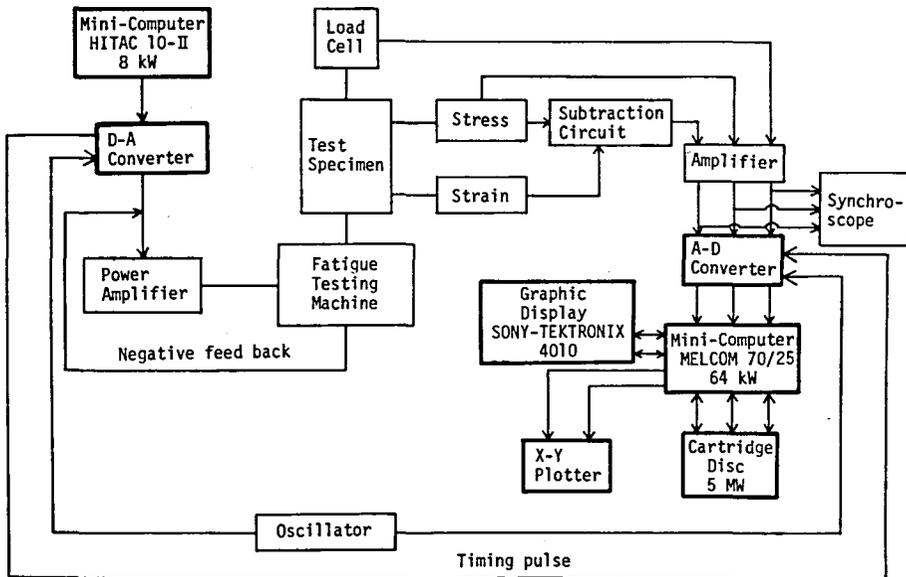


図 2.22 自動計測システムブロック線図

以下に荷重信号発生と荷重-変位ヒステリシス計測に分けて、各荷重パターンに対するプログラミングの基本的な考え方について述べる。

2.3.1 変動荷重信号発生法

荷重信号の発生にはミニコンピュータ HITAC 10-II (主記憶 8 KW, サイクルタイム 0.9 μ 秒)を用い、波形 1 サイクルを 100 点で構成するようにデジタル的に荷重波形の信号を計算し、前述の発振器信号により同期をとりながら、D-A 変換器 (10 ビット, 出力はフルスケール ± 10 V, セットリングタイム約 5 μ 秒, 4 チャンネル)を介してアナログ信号として出力した。各種の変動パターンの作成法を以下に述べる。

(i) 一定振幅荷重試験の場合

本研究では K 値制御による一定振幅試験を行う。き裂長さに対して連続的に K 値を制御するのは幾分困難であるので、ここでは微小量 (0.1 ~ 0.2 mm) き裂が進展するごとに公称応力を調節し、小さきみの階段状荷重を負荷する方法をとった。そのために予め所定の K 値履歴を与えるような公称応力値をき裂長さに対して計算し、それを主記憶に格納しておく。別に荷重波形として余弦波 1 サイクルを 100 等分した数値を記憶させておいて、所定の公称応力が出るように 1 サイクルの荷重信号を演算し、繰り返し出力する。その後はき裂が所定の長さだけ進展するたびに外部から指令を与え、新たな公称応力値に対する振幅の荷重信号を出力するという方法を採用した。

(ii) 多段多重変動荷重試験の場合

変動荷重信号データを全て記憶しておいて繰り返し出力する方法も考えられるが、その方法では小容量のミニコンピュータの場合長い周期の変動荷重試験は困難である。そこで多段多重波形の場合は、変動波形 1 ブロック内の各段の K 値レベルとそのひん度を主記憶に格納しておく。別に荷重波形として記憶しておいた余弦波 1 サイクル分 100 点のデータを用い、各段の K 値レベルに応じて適当な倍率を掛け、その段のひん度数分のサイクル数を出し、最終段までいけば再び先頭から繰り返すようにした。このような方法によれば小容量のミニコン

ピュータでも十分長い周期の変動試験が行える。なおこのプログラムでは各ブロックの先頭の数サイクル手前で測定開始合図用のタイミングパルスを出力するようにしているので、これを用いてブロックの先頭から計測できるようになっている。

(iii) 重畳変動荷重および擬似ランダム変動荷重試験の場合

重畳変動波形の場合は、予め波形1ブロック分の極値の数値列を主記憶に格納しておく。別に荷重波形として記憶しておいた余弦波の半波50点のデータを用いて、相次ぐ2つの極値の間をつなぐように演算し出力する。1ブロックの最後まで出力すれば先頭に戻って繰り返すようにした。本プログラムにおいても(ii)と同様に各ブロックの先頭でタイミングパルスを出力し、測定開始合図用とした。

擬似ランダム荷重の場合は、後に3.3.5節で述べる方法で任意のパワスペクトル密度を有する擬似ランダム波をデジタルシミュレーションで求め、1ブロックの波形の極値を探索し、その極値列を主記憶に格納しておき、上述の重畳波の場合と同様にして出力した。

2.3.2 荷重-変位ヒステリシスの自動計測

自動計測用には次に示す性能を有するミニコンピュータMELCOM 70/25を用いた。

主記憶容量	64 KW (1W = 16ビット)
サイクルタイム	0.5 μ 秒
演算速度	加減算 1.75 μ 秒 乗算 11.25 μ 秒 除算 13.85 μ 秒
外部記憶装置	カートリッジディスク (記憶容量 5 MW)
A-D変換器	マルチプレクサ8チャンネル, 入力フルスケール ± 10 Vを12ビット(うち符号1ビット)に変換,

	変換速度 (マルチプレクサ切換え, A-D 変換, 読み込みを含む) 約 50 μ 秒
表 示 装 置	システムタイプライタ (CASIO タイピュータ model 501T), CRT グラフィックディスプレイ (SONY TEKTRONIX 4010), X-Y プロッタ (SONY TEKTRONIX 4662)

自動計測の基本的動作は、荷重信号発生に用いたものと同じ発振器の信号により同期をとりながら、タイミングパルスを利用して荷重変動 1 ブロック分の荷重と変位の信号ならびにロードセル出力を A-D 変換器を介して主記憶に読み込むものである。なおき裂長さについては引算回路のポテンショメータにより手動で測定した。波形信号のサンプリング間隔は、荷重-変位ヒステリシスに含まれるき裂開口点に対する折れ曲がり十分な精度でサンプリングできるように考慮して、波形 1 サイクルを 100 点に分割して読み込んだ。これよりひずみ信号に含まれる高調波成分は試験周波数の 50 倍まで表現できる。また荷重振幅読み込みの精度は、極大値の補間を行わないでも 0.05% 以内となり⁽⁶⁾これは A-D 変換の 1 デジット (digit) 相当程度で問題とならない。

自動計測プログラムは、ヒステリシスの読み込み過程と、き裂長さ、開口点の判定等の処理過程に分かれている。通常は実験終了後に処理を行うが、本計算機は RDOS (Realtime Disk Operating System) のもとでマルチタスク処理が可能であるので、読み込みならびに処理プログラムを別々に登録しておき、オンライン・リアルタイムに計測しながら、あき時間に処理を行うこともできるようになっている。

以下に各変動パターンに対する読み込みと処理のプログラミングについての考え方を述べる。

(i) 一定振幅荷重試験の場合

読み込みプログラムでは 1 サイクル分の荷重信号 100 点, 変位信号 100 点

分の計 200 ワードを主記憶上に用意してある。所定の長さき裂が進展した時点で、外部から指令を与えることによりプログラムを起動し、引算後の荷重-変位ヒステリシス 1 サイクル分の読み込みを行う。

基本的には以上でよいが、実際の計測においては次の方法により高精度化をはかった。即ち、一定振幅試験のようにヒステリシスの形状が短時間についてみればほとんど変化しない定常波形については、用意した 1 サイクル分のメモリの上に任意のサイクル分のデータを、位相をあわせてたし込んで、平均することにより、荷重波形と同期しない機械的、電気的なノイズを減少させるようにした。図

2.23 (a) は 1 サイクル分だけをサンプルした場合の荷重-変位ヒステリシスであり、ノイズがみられる。これに対し上述の方法で 20 サイクル分を重ね合わせて平均すると同図(b)のようになり、ノイズがかなり低減し、開口点判定の精度は向上する。これはノイズが平均 0、分散 σ^2 の独立なランダム過程であるとすれば、この過程を n 回加え合

わせて平均すれば、平均 0、分散 σ^2/n の過程となるというサンプリング定理⁽⁷⁾を利用したものである。たし込む回数 n を大きくする程その効果は顕著であるが、あまり長時間にわたって行うとその間にヒステリシスの形状が変化する恐れがあるので、ここでは 10 ~ 20 回にとどめた。

次に処理プログラムでは、読み込んだデータを用いてグラフィックディスプレイに荷重-変位ヒステリシスを出力し、カーソルを使ってき裂開口点を判定する。さらに引算回路のポテンショメータの目盛を入力することにより、き裂長さ、 K 値の最大値 K_{\max} および最小値 K_{\min} と振幅 ΔK 、実断面公称応力 σ_{net} 、塑性

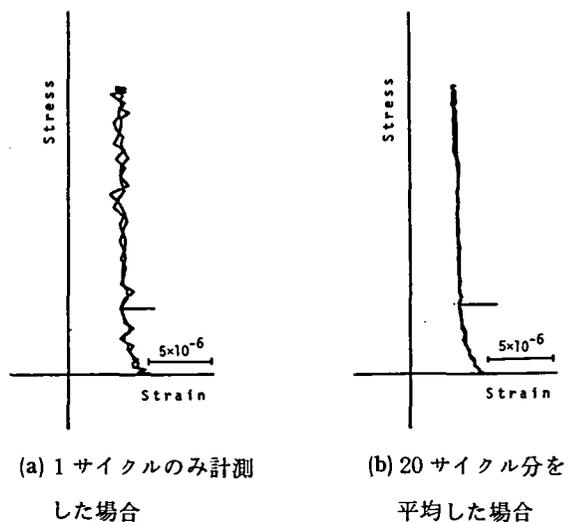


図 2.23 荷重-変位ヒステリシス

域寸法 ω ，き裂開口比 U ，き裂開口点 K_{Op} ，有効応力拡大係数 ΔK_{eff} 等のデータを計算し，印字した。また記録保存用として $X-Y$ プロッタに荷重-変位ヒステリシスを出力した。

なお荷重-変位データは読み込みの際，両信号を同時に $A-D$ 変換することはできないので，まず変位信号を1点読み込んだ後，マルチプレクサを切換えて荷重信号を1点読み込んで一対のデータとしている。したがって読み込んだままの変位信号と荷重信号の間には， $A-D$ 変換器の変換速度に相当する約 $50\ \mu$ 秒の差があるので，そのままヒステリシスを描かせると位相差が生じ，試験周波数が $40\ \text{Hz}$ 程度になると無視できない程度になる。そこでここでは高調波成分の少ない荷重データに対し，直線補間により位相調整を行い，両者間の位相差をなくすようにした。

(ii) 多段多重変動荷重試験の場合

読み込みプログラムは，所定の長さだけき裂が進展した時点で，外部から指令を与えることによりプログラムを起動する。まずプログラムは荷重信号発生用のミニコンピュータからのタイミングパルスを待つルーチンに入る。変動荷重パターンの先頭で出力されるタイミングパルスを検出すると同時に計測を開始し，1ブロック分のデータを読み込んで一時主記憶に蓄えた後，ディスク装置にデータ転送を行う。その後プログラムはいったん終了し，コントロールをモニタプログラムに返し，次回の起動を待つ状態に移る。以上が基本的動作である。

長い周期の変動荷重パターンになると，全てのサイクルのデータの読み込みを小容量のミニコンピュータで行うことは幾分困難である。しかし予備実験の結果によれば，定常な多段多重波形の場合にはき裂開口点はあまり著しく変化しないので，必ずしも全てのサイクルについて計測する必要はないことがわかった。そこでここでは全てのサイクルについて計測することはせず，1ブロック中の適当な間隔で波形をサンプルすることにした。さらに前節と同様に定常荷重波形の部分では，適当なサイクル分をたし込んで平均し，ノイズ低減をはかることにした。そのための方式として，2つの数列 $L(I)$ ， $M(I)$ ($I=1\sim 25$)を用意し，タイミングパルスを基点として $L(I)$ サイクル読みとばした後 $M(I)$ サイクル分を連

続してたし込み、平均して主記憶に格納する。次はL(2)サイクル読みとばした後M(2)サイクル分について計測するというようにしてIを更新し、I = 25まで終った段階で1ブロック中の適当な25サイクルが計測できるようにした。なおL(I), M(I)設定の際には、荷重変動の激しい付近で密にサンプリングを行うように配慮した。

処理プログラムは前述の一定振幅試験用のものと同様の方針でデータ処理を行った。

(iii) 重畳変動荷重および擬似ランダム変動荷重試験の場合

不規則変動荷重の場合、計測は次の2つのプログラムを用いて行った。第1の荷重-変位ヒステリシスの読み込みには(ii)の多段多重波形の場合と同様のプログラムによって、き裂開口点を横切りそうな荷重サイクルを重点的にサンプリングしてき裂開口点を測定した。この場合は荷重が不規則に変動するため平均化できないので、1サイクルずつ読み込んだ。

第2のロードセル出力読み込みについては、全てのサンプル点を記憶するのは膨大な記憶容量を必要とするので、ここでは極値のみを記憶させることにした。そのためにタイミングパルスを検出した後計測を開始し、読み込みを行いながら演算して極値のみを残していくことにし、1ブロック分の極値列をいったん主記憶に格納した後ディスク装置にデータ転送を行った。試験結果の解析法については第3章で述べる。

第 2 章 の 参 考 文 献

- (1) 田中, 大阪大学博士論文, (1975).
- (2) 菊川・城野・田中・高谷, 材料, 25-276 (1976), 899.
- (3) Schmidt, R.A. and Paris, P.C., ASTM STP 536 (1973), 79.
- (4) Ohta, A., Kosuge, M. and Sasaki, E., Int. J. of Fracture, 14-3 (1978), 251.
- (5) Vazquez, J.A., Morrone, A. and Ernst, H., Engng. Frac. Mech., 12-2 (1979), 231.
- (6) 山川, 日本機械学会誌, 73-621 (1970), 1401.
- (7) Games, P.A. and Klare, G.R., Elementary statistics, 241, McGraw-hill.

第 3 章 低 K 領域における実働荷重下の疲労き裂進展

3.1 緒 言

疲労き裂進展開始直後で、負荷される K 値が小さい低進展速度領域での進展は、き裂進展寿命の中でも大きな部分を占めるため、このような低 K 領域でのき裂進展挙動を明らかにすることは重要である。

低 K 領域におけるき裂進展の問題でまず考慮しなければならないのはき裂進展下限界条件 K_{th} との関係である。いままで K_{th} 以下の荷重では疲労き裂は進展しないと考えられており、実際の設計にもこの考え方が用いられているが、実働荷重に対してはこの方法では不十分なようで、現実の破壊事故にもこのことから生じているものがあるようである。

それに関する一つの重要な要因として、 K_{th} をはさむ変動荷重下では K_{th} が消失し、 K_{th} 以下の荷重によってもき裂が進展することが Kikukawa ら⁽¹⁾、小寺沢ら⁽²⁾ により指摘され、 K_{th} は必ずしも実働荷重に対する進展下限界条件とはならないことがわかってきた。

著者らはこれまでにき裂開閉口挙動を考慮した立場からこの問題を検討し、 K_{th} をはさむ 2 段多重変動荷重下では、 K_{th} のみならず $(\Delta K_{eff})_{th}$ も消失することを示し、き裂進展量は ΔK_{eff} に基づく修正マイナー形の推定法で見積りが可能であることなどを明らかにした⁽¹⁾⁽³⁾。

さらにそれらの基礎研究をふまえた上で、本章では低 K 領域における任意の実働荷重パターンに対してき裂開閉口挙動を測定し、有効応力拡大係数 ΔK_{eff} に基づいたき裂進展速度の推定法を構成することを試みる。そのためにはまずき裂開閉口現象をオンラインに実測して、K 値と進展速度の関係を、K と ΔK_{eff} の関係および ΔK_{eff} と進展速度の关系到分けてそれぞれの現象を調べ、各種の変動荷重パターンがそれぞれの関係に及ぼす影響を明らかにし、現象を理解した上で進展速度の推定法を検討することにする。

本章での研究は最終的にはランダム変動を含め任意の定常的な実働荷重によるき裂進展を取り扱うことを目指すが、まず解析の容易なプログラム荷重を用いて

ランダム荷重を取り扱う上で必要な基本的な性質を明らかにした上で、ランダム変動荷重に拡張することにする。

方針としては、低K領域においては K_{th} の消失という現象が起こるため、これに注目しつつまず応力比 $R = 0$ の2段多重変動荷重試験を行い、フラクトグラフィ的手法を併用して ΔK_{eff} に関する進展則を調べるとともに、変動荷重下の ΔK_{eff} の挙動を調べ、その基本的な特性をとらえて、これを推定する方法を検討する。

次に、より実働荷重に近いパターンとして3段多重変動荷重試験を行い、多段変動荷重に拡張する際の問題点を検討する。

一方、広帯域のランダム荷重を取り扱うには、小振幅に対するカウント法の問題およびその有する平均応力の効果の問題があるので、これらに対しそれぞれもっとも簡単で評価のしやすい重畳波形および低レベル荷重が平均を有する波形を用いて調べ、これらの一般的な取り扱い法を検討する。

以上の準備が整った段階で任意のパワースペクトル密度を有する定常ランダム荷重試験を行い、K値のレンジペア・ミーン2元ひん度分布からランダム荷重下の ΔK_{eff} を推定し、先に求めた進展則と組み合わせて実働荷重下のき裂進展量を求める一般的な方法を提案し、実験と比較検証する。

なお変動荷重下のき裂進展問題では当然のことながら一定振幅荷重下の進展特性と比較を行うことになるが、本章では広く行われているK漸減法で求めた一定振幅荷重下の進展特性と比較した。

3.2 供試材料および試験方法

供試材料は、き裂進展下限界条件におけるき裂開閉口特性が著しく異なる典型的な2種の材料として、 $(\Delta K_{eff})_{th}$ が有限な値となる中炭素鋼S35C焼準材と、 $(\Delta K_{eff})_{th}$ がほぼ0となる耐食性アルミニウム合金A5083-O焼鈍材をとりあげた。その化学成分、機械的性質を表3.1、3.2に示す。試験は図3.1に示す片側切欠きを有する板状試験片を用い、動電形面内曲げ疲労試験機により、周波数40Hzで行った。試験片には、残留応力が生じないように放電加工で

長さ 1.5 mm，幅 0.2 mm のスリットを入れ，クラックスタータとして用いた。本試験片の場合，き裂長さ測定 of 分解能は使用する領域で約 15 μm である。

試験片に図に示す寸法のサイドグループを付した場合の破面例を図 3.2 に示す。ビーチマークはほぼ直線状であることから，き裂前

縁のほぼ全領域で試験片内部と同様の進展挙動が実現されていると考えられ，き裂の進展を遅らせ開口荷重を引き上げる要因となる試験片表面の影響を減少させ

表 3.1 材料の化学成分

Material	化学成分 (%)							
	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr
S35C	0.38	0.72	0.25	0.01	0.015	0.04	0.02	0.13
Material	Mg	Mn	Si	Ti	Fe	Cr		
	A5083-0	4.46	0.63	0.18	0.017	0.19	0.12	

表 3.2 材料の機械的性質

Material	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Fracture ductility (%)
S35C	38.0	62.4	23.7	58.5	88.0
A5083-0	13.4 *	30.7	23.5	42.1	54.7

* 0.2% proof stress

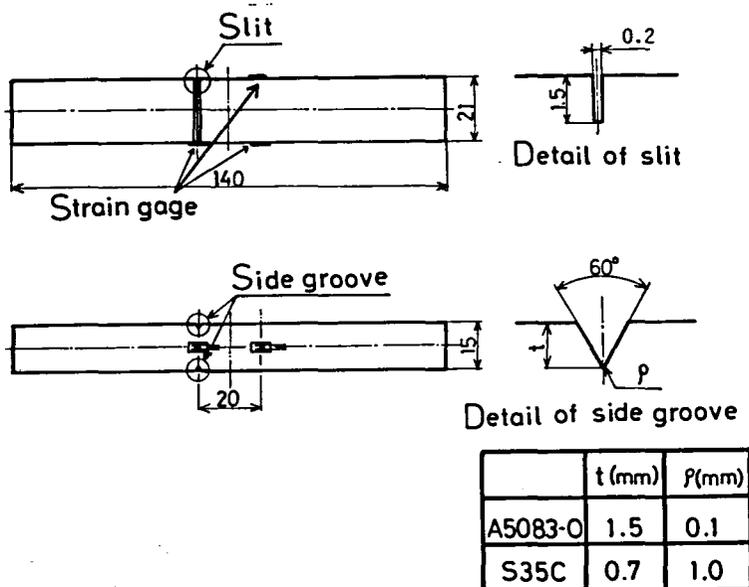
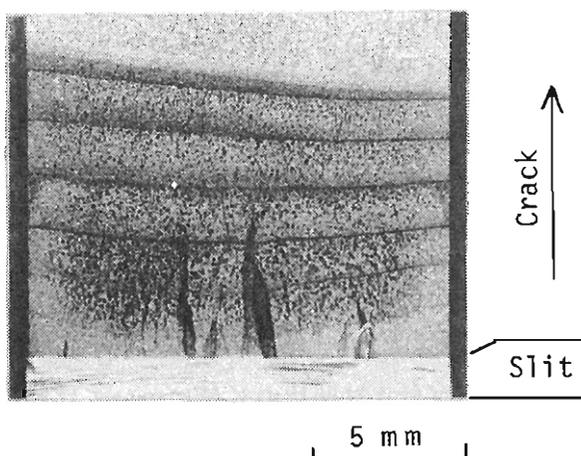


図 3.1 試験片形状

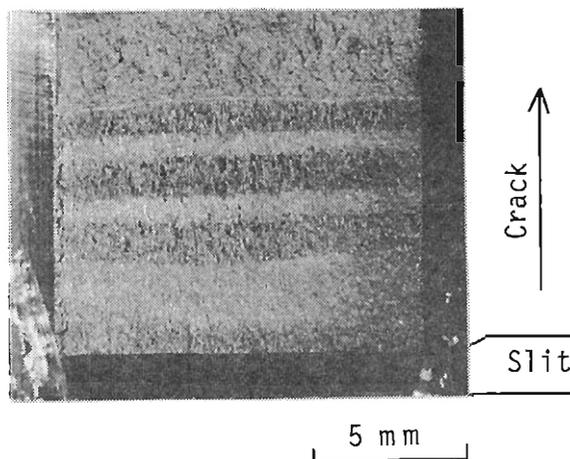
ることができた。このようにサイドグループを付すことにより板状試験片を用いてもほぼ平面ひずみ条件下の進展挙動が実現されると考えられ⁽⁴⁾、これにより平面ひずみ、小規模降伏条件を満たした、試験片形状等に依らない材料特性としての一般的な進展挙動が得られるものと考えられる。またそれに伴ってき裂開口荷重がき裂前縁のほぼ全領域で一致する結果として、荷重-変位ヒステリシスにおけるき裂開口に対応する折れ曲がりが見られ、これが進展挙動を主に支配すると考えられる平面ひずみ状態での開口点をほぼ正しく示すものと思われる。

応力拡大係数 K の計算は次のようにして行った。本

試験片はクラックスタータとして人工切欠きを有し、さらにサイドグループを有しているが、それらについては切欠きの影響が問題にならない程度の長さまでき裂を進展させてから試験を行うことにし、さらにサイドグループを付したことに對しては後に述べる補正を行うことにして、一様曲げモーメントを受ける片側切欠き試験片に対する次式⁽⁵⁾を用いて K を算出した。



(a) S 3 5 C



(b) A 5 0 8 3 - O

図 3.2 ビーチマークの例

$$K_I = \sigma \sqrt{l} Y \quad (3-1)$$

ただし $\sigma = 6M / (BW^2)$

$$Y = 1.99 - 2.47 (l/W) + 12.97 (l/W)^2 \\ - 23.17 (l/W)^3 + 24.8 (l/W)^4 \\ (0 \leq l/W \leq 0.6)$$

W : 試験片幅, B : 板厚, M : 負荷モーメント, l : スリットを含めたき裂長さ

サイドグループ付き試験片のK値については補正法がいくつか提案されているが^{(6)~(9)}, 未だ確定していないようであり, かつこの場合はあまり大きな差を生じない。そこで本研究ではとりあえず断面積の減少のみを考慮し, 公称応力としてサイドグループ底の公称応力を用い, $\sigma = 6M / (B_N W^2)$ (ただし B_N : サイドグループ底板厚) を (3-1) 式に代入してKを算出した。

なお本論文では応力拡大係数Kの単位として $\text{kgmm}^{-3/2}$ を用いた。

3.3 S35Cの試験結果

3.3.1 2段多重変動荷重試験 (R = 0の場合)

3.3.1.1 ΔK_{eff} に基づくき裂の進展則

まず応力比 $R = 0$ の一定振幅荷重下のき裂進展特性を求める試験を行った。試験はK値制御で $K_{\text{max}} = 64 \text{ kgmm}^{-3/2}$ からK減少率 $dK_{\text{max}} / dl = -10 \text{ kgmm}^{-3/2} / \text{mm}$ の割合で, き裂長さに対して直線的にK値を減少させ, 停留した条件を下限界条件として採用した。後に図3.6に示すようにき裂進展下限界条件は $(K_{\text{max}})_{\text{th}} = 30.9 \text{ kgmm}^{-3/2}$, $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}} = 6.3 \text{ kgmm}^{-3/2}$ であった。

2段多重変動波形, K値レベル, ひん度の定義を図3.3に示す。本節ではひん度比と低レベルK値を系統的に広範囲に変化させ, それらがき裂進展則に及ぼす影響を調べる。

まずひん度比の効果をみるためにK値レベルを $(K_{\text{max}})_{\text{th}}$ をはさむように $K_H / K_L = 50 \text{ kgmm}^{-3/2} / 29 \text{ kgmm}^{-3/2}$ に固定して, ひん度比を変えた試験を行

った。K 値履歴を一定振幅荷重試験とあわせるため、変動試験の場合もまず $K = 64 \text{ kgmm}^{-3/2}$ に上昇させた後、K 漸減法で K_H に至らせ変動試験に移行した。

図 3.4 に適当な間隔で自動計測した 1 ブロック分の荷重-変位ヒステリシスの例を示す。図中短い横線で示すき裂開口点は、

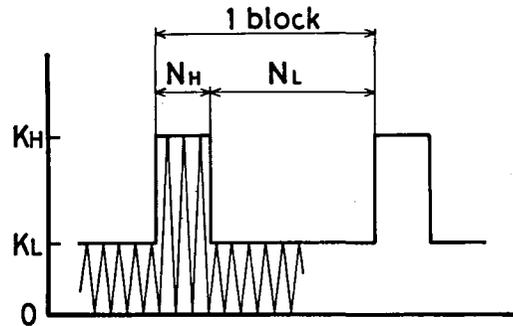


図 3.3 2 段多重変動荷重パターン

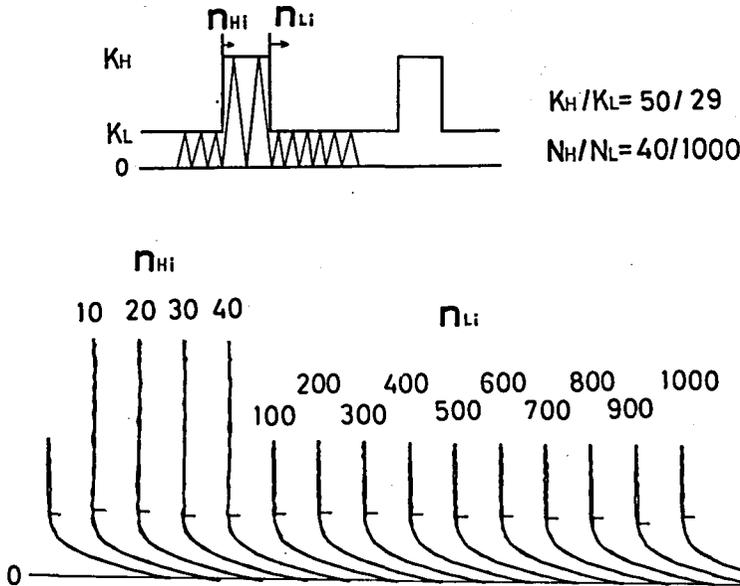


図 3.4 2 段多重変動荷重下の荷重-変位ヒステリシス (S35C)

本試験のような 1 ブロックの進展量が塑性域寸法より 2 桁程度小さい定常な 2 段多重変動荷重下ではあまり変化しないため、高低各 K 値レベルにおいてそれぞれ算術平均値 $(K_{op})_H$, $(K_{op})_L$ で代表させることにし、 ΔK_{eff} は $\Delta K_{Heff} = K_H - (K_{op})_H$, $\Delta K_{Leff} = K_L - (K_{op})_L$ として求めた。

破面には図 3.5 に示すような高低各 K 値レベルに対応する規則正しい縞模様が

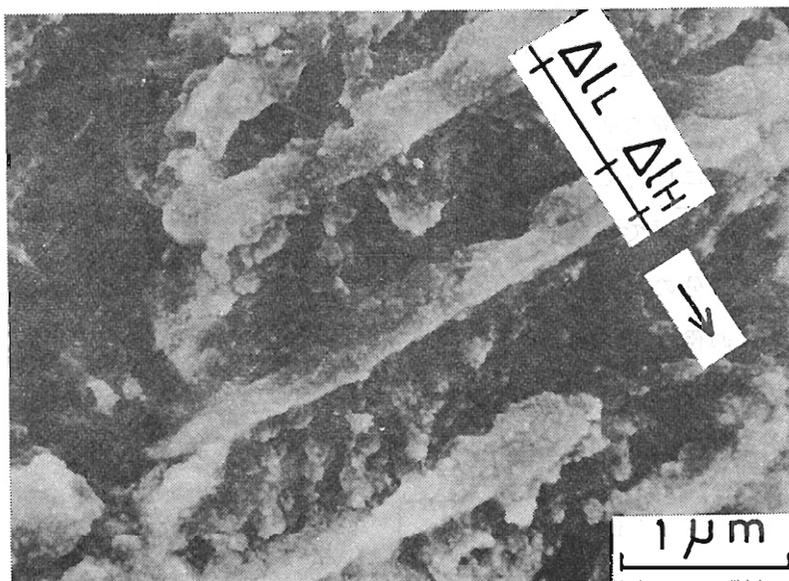


図 3.5 2 段多重変動荷重下の破面 (S35C)
 $K_H/K_L = 50 \text{ kgmm}^{-3/2} / 29 \text{ kgmm}^{-3/2}$
 $N_H/N_L = 40 / 1000$
 $\Delta l_H, \Delta l_L$ はそれぞれ高, 低レベルでの進展量
 矢印はき裂進展方向を示す。

みられ, $(K_{\max})_{th}$ 以下の荷重によってもき裂進展が起っていることが確認される。本例のように鋼系統の材料では高レベル K 値下のストライエーションは分離して観察できず, 破面には高レベル K 値の各サイクルでの進展量の総和として白くみえる平坦な縞が形成される。低レベル K 値下では軟鋼の低進展速度破面に多くみられる進展方向をむいた細かい筋が観察される。

この縞幅を対応する繰返し数で除してマイクロな平均速度として ΔK_{eff} に対してプロットしたものが図 3.6 の小さな □, ○, ◇, ◆ 印である。 $\Delta K_{eff} \approx 36 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 付近の一群が高レベル K 値下の速度であり, 一定振幅試験結果と良く一致している。そこで以後 1 ブロックの進展量が小さいとか, N_H が小さく高低各レベルの縞が明確にあらわれないなど, 破面観察により 1 ブロック内の両レベルでの進展量を分離して測定することが困難な条件については進展速度を次の

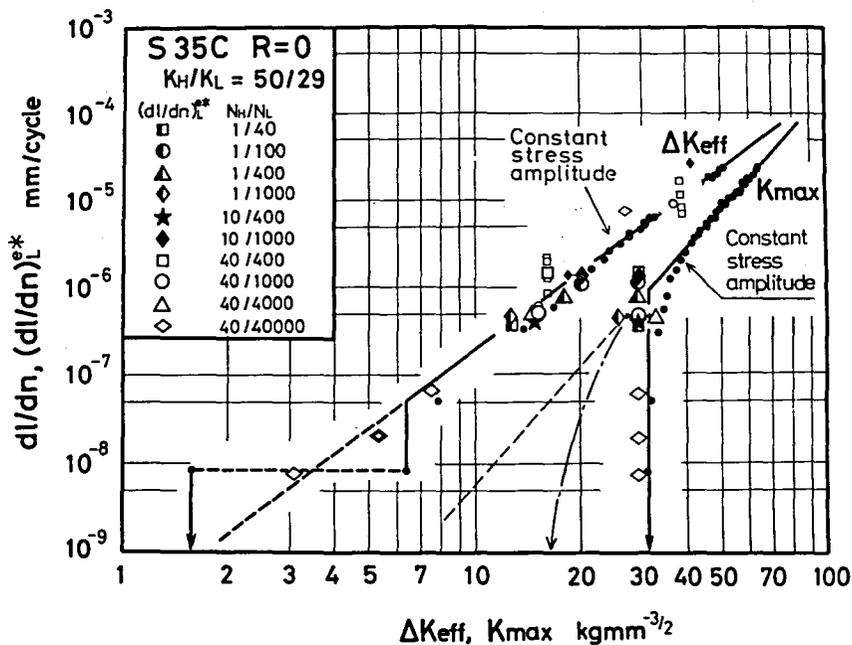


図 3.6 2段多重試験のき裂進展速度と修正進展曲線
(ひん度比を変えた場合)

ように整理した。実験で求めた1ブロックの平均速度を $(dl/dn)_{HL}$ とし、高レベルK値下の速度が一定振幅試験における同一の ΔK_{eff} に対する速度 $(dl/dn)_{\Delta K_{Heff}}$ に等しいと仮定し、さらに進展量の線形累積を仮定して、低レベルK値下の速度 $(dl/dn)_L^{e*}$ を

$$(dl/dn)_L^{e*} = \frac{1}{N_L} \left\{ (dl/dn)_{HL} \times (N_H + N_L) - (dl/dn)_{\Delta K_{Heff}} \times N_H \right\} \quad (3-2)$$

として求めた。図 3.6 に大きな白印で示したものが $(dl/dn)_L^{e*}$ であり、同種の小さな記号で示すマイクロな速度とほぼ一致しており、(3-2)式の推定が実際の進展挙動をよく表わしていることがわかる。

低レベルK値下の進展速度 $(dl/dn)_L^{e*}$ は K_{max} で整理すれば $(K_{max})_{th}$ 以下でも進展している。その理由は2つあり、第1はこれらの点の大部分では低レベ

ルK値が $(K_{\max})_{th}$ 以下でも、次節で述べるように高レベルK値の存在によりき裂開口点 K_{op} が低下し、低レベルK値に対して ΔK_{eff} が増加し、 ΔK_{eff} の下限界値以上になったことによるものであり、 ΔK_{eff} で整理すれば一定振幅結果によく一致している。第2は一部の◇印の点のように $(\Delta K_{eff})_{th}$ 以下でも進展することであり、変動荷重下では $(K_{\max})_{th}$ のみならず $(\Delta K_{eff})_{th}$ も消失し、 ΔK_{eff} に関する進展曲線を下限界値以下に延長した線によく一致することがわかる。

低レベルK値下の速度に対するひん度比の効果のうち、まず高レベルK値の繰り返し数 N_H の効果として◇、◆、○印（それぞれ $N_H/N_L=1/1000$ 、 $10/1000$ 、 $40/1000$ に対応する）をみると、 N_H の影響はほとんどないことがわかる。低レベルK値の繰り返し数 N_L の効果も、◇印を除く N_L が4000程度以下の条件はほぼ一カ所に集まっており、ひん繁に高レベルK値が負荷される条件に対しては N_L の影響はほとんどないことがわかる。◇印で示す $N_H/N_L=40/40000$ のみが他の条件に比べて速度が遅くなっているが、このようにS35Cでは低レベルK値の連続して繰り返される数が極めて大きくなると低レベルK値下の進展量が飽和し、平均速度が低下する。これは次節に示すように K_{op} が上昇することにより、 ΔK_{eff} が減少したためであり、その場合の速度も ΔK_{eff} によりよく説明される。

以上のように本材料についてはき裂開閉口挙動を考慮して ΔK_{eff} によって整理し、 $(\Delta K_{eff})_{th}$ が消失すると考えれば進展則に及ぼすひん度比の影響はなくなるようである。

次に応力レベルの効果を見るためにひん度比を $N_H/N_L=1/100$ に固定し、低レベルK値を種々に変えた。この時の速度を図3.7に示す。 K_{\max} 、 ΔK_{eff} のいずれによる整理においても下限界条件は消失している。 ΔK_{eff} による整理では、 ΔK_{eff} が有限の値となった条件に対してはき裂は進展し、 $\Delta K_{eff}=0$ となった条件に対しては1例を除きき裂進展はみられないことから、変動荷重下でき裂が進展するか否かは $(K_{\max})_{th}$ や $(\Delta K_{eff})_{th}$ では決まらず、 ΔK_{eff} の有無が

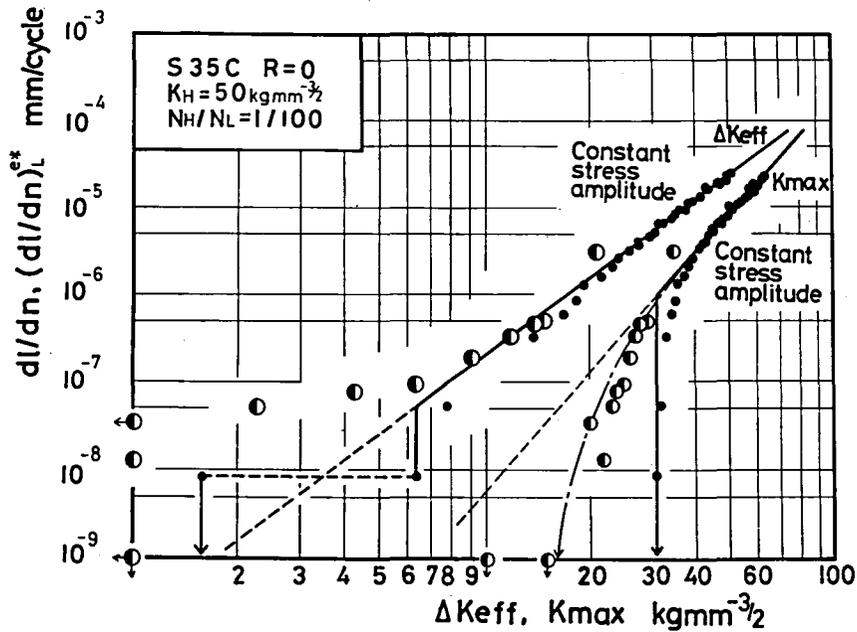


図 3.7 2 段多重試験のき裂進展速度と修正進展曲線
(K 値レベルを変えた場合)

条件となることがわかる。

以上の両実験より、変動荷重下のき裂進展量を推定するには、図 3.6 に示すように ΔK_{eff} で整理した一定振幅試験結果を、両対数線図上で下限界値以下に直線で延長した進展曲線を用いた修正マイナー形の推定法でよいと思われる。図 3.7 に示す速度は低レベルでの進展量が小さいために、進展速度の推定精度の関係上ばらつきが大きくなっているが、寿命推定の場合このばらつきは必ずしも大きな誤差をもたらさない。

3.3.1.2 変動荷重下の ΔK_{eff} の推定法と修正進展曲線

前節では ΔK_{eff} に基づくき裂進展則を求めたが、 ΔK_{eff} は前節までの段階では逐一実験で求めなければならない実用的見地からは不便である。そこで本節では変動荷重下の K_{Op} が何によって決定され、どのような値になるのかを調べることにより、 K_{Op} を推定する方法を見出し、それを用いて K 値から ΔK_{eff} を算出し、

前節で求めた進展則と組み合わせ、き裂進展速度を推定する方法について述べる。
 またこれを簡便に行うK値についての修正進展曲線について述べる。

図3.8は前節図3.6のひん度比をかえた試験における K_{op} を自動計測システムにより各K値レベルを分離して求めたものである。 K_{op} はひん度比によって影響されるが、高低両K値レベルを通じて一定であり、しかも◇印を除く条件に対して高レベルK値 K_H に対する一定振幅試験結果にほぼ等しい。(かなりのばらつきがみられるがひ

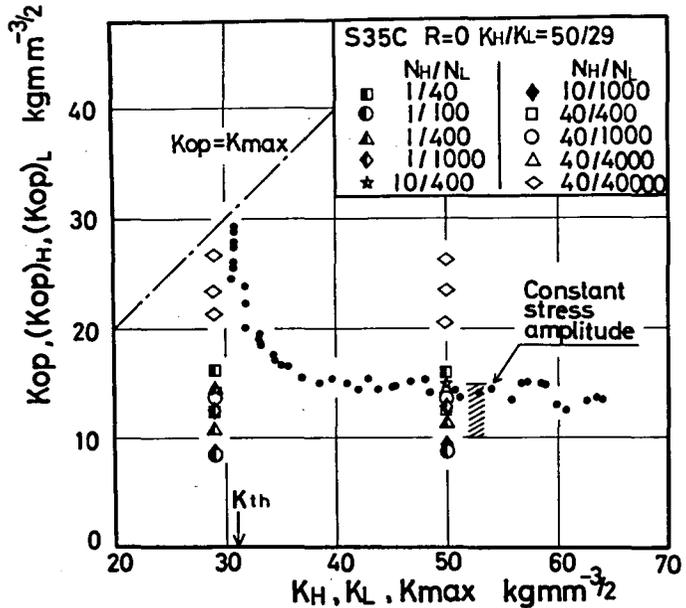


図3.8 2段多重試験のき裂開口点
 (ひん度比を変えた場合)

ん度比とは特に相関はなく、一定振幅特性にも斜線で示す範囲のばらつきがあり、一般に K_{op} は残留応力、荷重履歴などの影響を微妙に受けやすく、ばらつきが大きいので、試験片間のばらつきと思われる。)これは、本試験のような低K領域では1ブロックの進展量が高レベルK値下で形成される塑性域寸法より1~2桁程度小さく、き裂先端近傍のき裂進展に有効な開閉口を支配する場をほぼ高レベルK値が決定していると考えれば理解できるものと思われる。例外的な条件である◇印で示す $N_H/N_L = 40/40000$ のみがかなり高い K_{op} を示している。3点プロットしてあるのは荷重繰り返しとともに上昇してゆく過程を示したもので、このような現象はS35Cのような時効性材料においてみられることから、時効のような性質が関与していることが考えられる。このように低レベルでの連続した繰り返し数が非常に大きくなる場合には K_{op} はひん度比の影響を受けて上昇す

ることがあるが、最小値として K_H に対する一定振幅試験の K_{Op} をとれば安全側の見積りとなる。

図 3.9 は前節図 3.7 の低レベル K 値を変えた場合の K_{Op} である。この試験は低

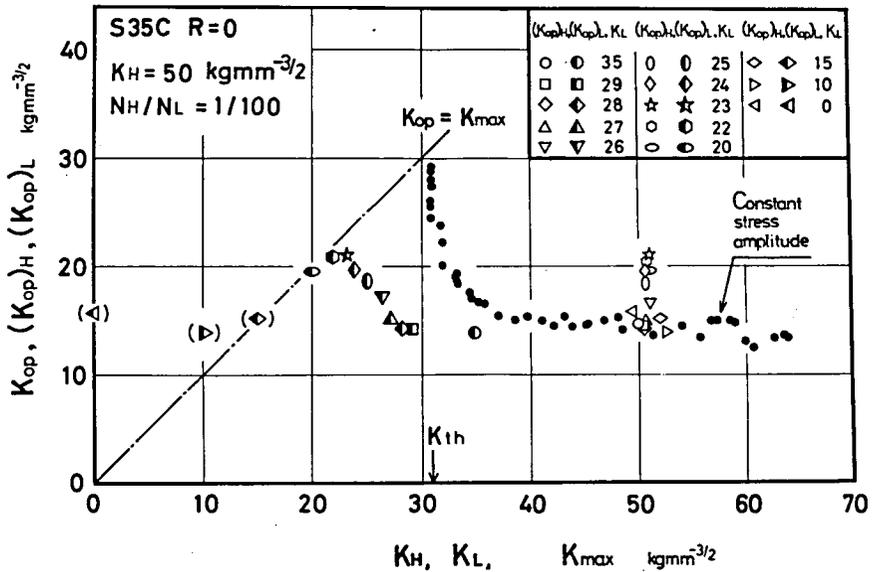


図 3.9 2段多重試験のき裂開口点
(K 値レベルを変えた場合)

レベル K 値を K_{th} より高いレベルから、各レベルでほぼ定常になるまで $10^3 \sim 10^4$ ブロック程度負荷し、低レベル K 値をほぼ $1 \text{ kgmm}^{-3/2}$ ずつ順次下げて試験を行ったものである。この場合も K_{Op} は高低両レベルを通じて一定であるが、その値は K_L が比較的高い領域では K_L に依存せず K_H に対する一定振幅試験結果に等しい。 K_L が低く K_{th} のすぐ下になると K_{Op} が上昇する傾向がみられるが、 K_L がさらに低くなり K_L によって開口が起こらない領域になるとそのような効果はなく、 $K_L = 0$ の間欠負荷の場合を含めて K_H のみが K_{Op} を決定し、 K_{Op} 以下の荷重振幅はき裂の進展にも開閉口挙動にも影響しないことがわかる。この現象は耐久限付近におけるコーキシング (coaxing) の現象に類似し、生じる K レベルの範囲が限られ比較的に狭いので、荷重が定常でもき裂進展に伴ない K レベルが変化するき裂進展の問題の場合、この現象を期待することは適当でない。したがってこ

の場合も最小値として K_H に対する一定振幅試験の K_{Op} をとって ΔK_{eff} を算出すれば安全側の見積りとなる。

以上のことから、試験した範囲内では進展速度の評価には上述の K_{Op} の上昇を見込まずに、一定振幅試験の $K_{max} \sim K_{Op}$ 関係から高レベル K 値 K_H に対して K_{Op} を推定してこれを $(K_{Op})_H$ とし、高低両レベルの K_{max} 値からこの $(K_{Op})_H$ を差し引き、それぞれの ΔK_{eff} を算出して、前述の ΔK_{eff} に関する修正マイナー形の推定法を適用すれば安全側の結果が得られる。

これを実用的な線図として、外的条件で容易に決まる K_{max} と一定振幅試験結果から推定できるようにするには次のようにすればよい。即ち、一定振幅試験の進展曲線を $(\Delta K_{eff})_{th}$ 以下にまで延長して

$$dl/dn = C (\Delta K_{eff})^m \quad (3-3)$$

とする。 ΔK_{eff} の推定値は

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - (K_{Op})_H \quad (3-4)$$

であるから変動荷重に対する修正進展曲線は

$$dl/dn = C \{ K_{max} - (K_{Op})_H \}^m \quad (3-5)$$

となり、この曲線に線形累積則を適用すればよい。

図3.6, 3.7に $K_H = 50 \text{ kgmm}^{-3/2}$ に対する修正進展曲線を一点鎖線で示すが、実際の進展挙動をよく表わしている。さらに、前節で示したように変動荷重下でも $\Delta K_{eff} = 0$ となればき裂進展は生じないことから、 $(K_{Op})_H$ より小さな K_{max} に対してはき裂は進展せず、変動荷重に対しても進展下限界条件が存在することになり、本条件に対する $(K_{Op})_H = 14.5 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 以下の低レベル K 値に対してはき裂進展が生じていないことがわかる。

$(K_{max})_{th}$ 以下の K 値による進展をも考慮する方法としてよく用いられているものに K_{max} に基づく修正マイナー則がある。それは図3.7に破線で示すように両対数で表示した一定振幅試験の $K_{max} \sim dl/dn$ の関係を $(K_{max})_{th}$ 以下に直線で延長するものであるが、図から明らかなようにこの方法は物理的な根拠がない便宜的なものであり、変動荷重に対する進展下限界条件の存在などは表わせない。また、この例では安全側推定を与えるからまだよいが、必ずしもそうとは限らず

後述の A 5083-O の場合には危険側の推定を与えることもあり、 K_{max} に基づく修正マイナー則は簡便ではあるが適当とはいえない。

3.3.1.3 修正進展曲線による推定法とマイナー則の比較

S 35 C は図 3.9 に示したように一定振幅荷重のき裂進展下境界条件付近で開口点が著しく上昇するが、このような材料が変動荷重をうけると開口点が大きく低下し、また $(\Delta K_{eff})_{th}$ が消失するため、下境界条件以下の荷重による進展を適切に評価しないと極めて危険となることがある。

そのような場合の進展挙動を調べるため、 $(K_{max})_{th}$ をはさむように K 値レベルを $K_H/K_L = 49.5 \text{ kgmm}^{-3/2} / 28.5 \text{ kgmm}^{-3/2}$ に固定し、 $N_H = 1$ として N_L を広範囲に変化させる試験を行った。図 3.10 はき裂進展速度をき裂進展速度比で整理し、 N_L に対して示したものである。

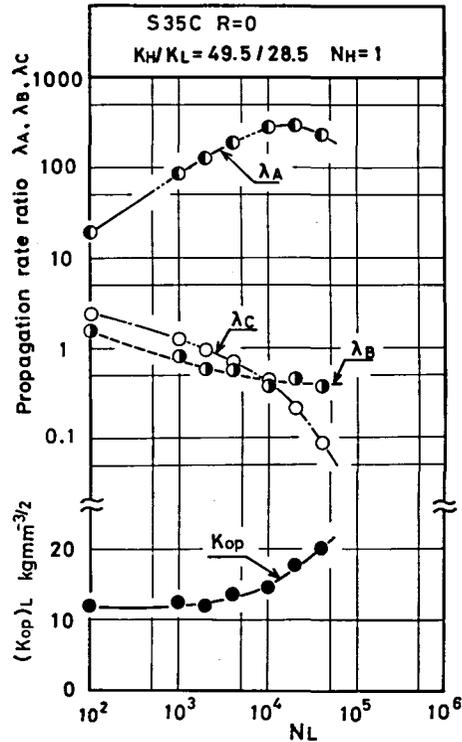


図 3.10 2段多重試験の進展速度比とき裂開口点 (N_L を広範囲に変えた場合)

なおき裂進展速度比とは、何らかの推定法で推定した 1 ブロックの推定平均速度に対する実際の平均速度の比である。

K_{max} に基づくマイナー則では

$$\lambda_A = (dl/dn)_{HL} / \{ (dl/dn)_{KH} \times N_H / (N_H + N_L) \}$$

(3-6)

実測した ΔK_{eff} に基づく修正マイナー形の推定法では

$$\lambda_B = (dV/dn)_{HL} / \left[\left\{ (dV/dn)_{\Delta K_{Heff}} \times N_H + (dV/dn)_{\Delta K_{Leff}} \times N_L \right\} / (N_H + N_L) \right] \quad (3-7)$$

修正進展曲線による推定法では

$$\lambda_C = (dV/dn)_{HL} / \left[C \left\{ \left\{ K_H - (K_{op})_H \right\}^m \times N_H + \left\{ K_L - (K_{op})_H \right\}^m \times N_L \right\} / (N_H + N_L) \right] \quad (3-8)$$

で定義する。

●印で示すマイナー則による λ_A は N_L の増加とともに増大してゆくが、これはマイナー則では $(K_{max})_{th}$ 以下の荷重による進展を無視しているのに対し、実際は低レベルK値下でも進展し、その進展量が N_L とともに増加してゆくからである。したがってこのような数値は低レベルK値下の進展速度の低下が起こらなければ N_L とともにいくらでも大きくなってゆく性質のものである。しかし前節でも指摘したように、 N_L が 10^4 を超えて増加すると●印で示すように K_{op} が上昇して ΔK_{eff} が減少する。その結果進展速度が低下し、低レベルK値下の進展量が極大を持つため、図 3.10 の●印で示す λ_A も約 300 程度で極大となっている。このようなマイナー則によれば危険側の推定を与える場合も、実測した ΔK_{eff} に基づき $(\Delta K_{eff})_{th}$ 以下のき裂進展を考慮した修正マイナー形の推定法では、●印で示す λ_B は 0.5 ~ 1 となり妥当な推定が行いうる。さらに修正進展曲線を用いる方法は○印で λ_C を示すように簡便な方法で安全側の推定が得られている。

3.3.2 3段多重変動荷重試験 (R = 0 の場合)

2段多重試験において低レベルK値繰り返し数が極めて大きくなると開口点 K_{op} が上昇する現象が見られた。これは設計の側からみれば安全側に働く要因であるが、よりひんばんな荷重変動により下がり得ることも考えられ、その場合には K_{op} の上昇を期待したのでは危険となることが考えられる。

そこで本節では2段多重試験で K_{op} が上昇するひん度比 $N_H/N_L = 40/40000$

に中レベルK値を重畳させ、 K_{op} の上昇を妨げる条件を見出すとともに進展則に及ぼす影響を調べる。なお本材料は破面観察による各レベルでの進展量の分離測定が困難であるので、進展速度は前節と同様の考え方による進展速度比によって評価した。荷重波形、K値レベル、ひん度比の定義を図3.11に示す。 K_H, K_L はそれぞれ $50 \text{ kgmm}^{-3/2}, 29 \text{ kgmm}^{-3/2}$ に固定した。

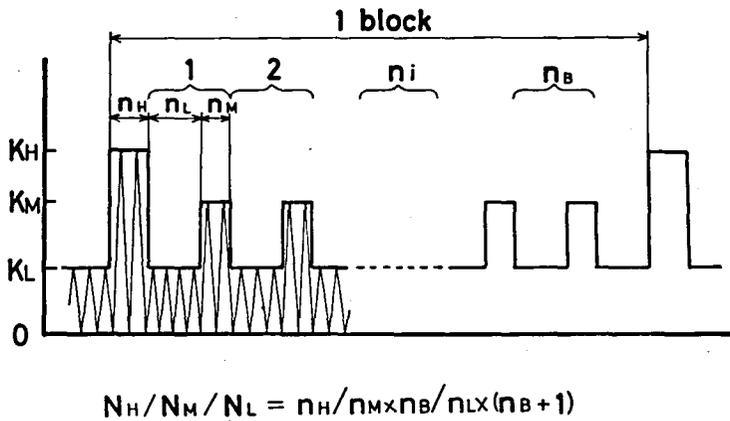


図3.11 3段多重変動荷重パターン

3.3.2.1 $N_H/N_L = 40/40000$ に中レベルK値を重畳させた場合

中レベルK値 K_M のレベルの影響を調べるため、 K_M が十分ひん繁に負荷されるよう K_L が10回ごとに K_M が1回負荷される条件に設定し、ひん度比を $N_H/N_M/N_L = 40/1 \times 3999/10 \times 4000$ とし、 K_M を種々に変えた。結果を図3.12に示す。●印で示す K_{op} をみると K_M が $40 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 以上では K_{op} の上昇を妨げる効果があるが、それ以下では K_{op} が上昇している。この $K = 40 \text{ kgmm}^{-3/2}$ は図3.8に示した一定振幅試験において K_{op} が上昇しはじめるレベルに一致することから、このレベル以下の K_M はいくらひん繁に負荷しても K_{op} の上昇を妨げる効果はないと考えられる。したがって以下の実験では K_M を $40 \text{ kgmm}^{-3/2}$ とした。

次に中レベルK値の負荷総数 $n_M \times n_B$ を4000程度で十分多くしておいて、

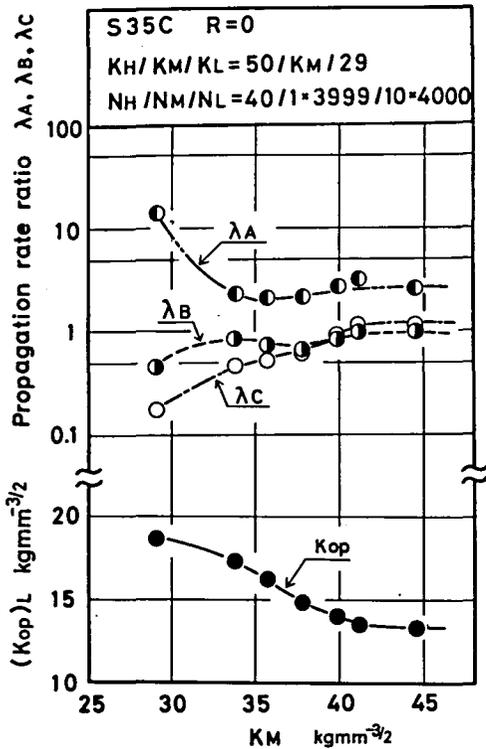


図 3.12 3段多重試験の進展速度比とき裂開口点 (K_M を変えた場合)

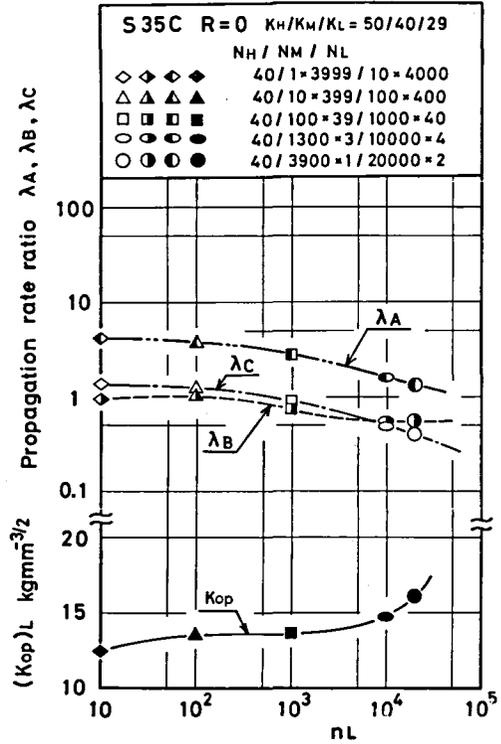


図 3.13 3段多重試験の進展速度比とき裂開口点 (n_B を変えた場合)

n_B をへらし n_L を増加する試験を行った。その結果を図 3.13に示す。黒印で示す K_{op} は $n_L = 10^4$ 付近から上昇していることから、中レベル K 値の総繰り返し数が十分多くても、かたまって連続して負荷される低レベル K 値の繰り返し数 n_L が大きくなる場合は開口点は上昇することがわかる。したがってひん繁に変動する荷重の方が相対的に危険であるといえる。

次に中レベル K 値 K_M がどの程度のひん度で負荷されれば K_{op} の上昇を妨げる効果があるかを調べるため、1小ブロックあたりの K_M の繰り返し数 n_M を1とし、小ブロック数 n_B を減少させて n_L を増加させる試験を行った。その結果を図 3.14に示すが、黒印で示す K_{op} は n_L が 10^3 程度で上昇しはじめています。しかしこの間隔 n_L は K_M の値にも依存し、例えば前節図 3.10に示した $K_M = K_H$

の極限では 10^4 回に 1 回程度の負荷でよい。

以上のことから、 K_{Op} の上昇を妨げる条件は K_M 、 n_M 、 n_L に依存して決まるため簡単には述べられないが、少なくとも適当な中レベル K 値が適当な間隔で負荷されると K_{Op} の上昇は妨げられ、高レベル K 値に対する一定振幅結果の K_{Op} に等しくなるまで容易に下がらるので、任意に変動する実働荷重に対して K_{Op} の上昇を見込むと危険となる場合があることがわかる。この意味からも強度評価のために実験室でランダム荷重波形をプログラム荷重波形に置き換えて試験する際には、できるだけひん繁な荷重変動が起こるように配慮し、短周期のプログラム波形に置き換える必要がある。

以上の各種の試験についてき裂進展速度をみると K_{max} に基づくマイナー則による λ_A は 2 ~ 20 程度で危険側の推定を与えるが、実測した ΔK_{eff} に基づく修正マイナー形の推定法による λ_B も、修正進展曲線による λ_C も 0.2 ~ 1 の値であり、 ΔK_{eff} による推定法が有効であることがわかる。

3.3.2.2 $N_H/N_L = 40/1000$ に中レベル K 値を重畳させた場合

2 段多重試験で K_{Op} の上昇もなく、き裂進展量も ΔK_{eff} に基づく推定法で表されるひん度比条件である $N_H/N_L = 40/1000$ に中レベル K 値を重畳させた。図 3.15 は主として K_M の総繰返し数 $N_M (=n_M \times n_B)$ を約 300 で一定にし、小ブロック数 n_B を変えたものである。全ての条件に対し黒印で示す

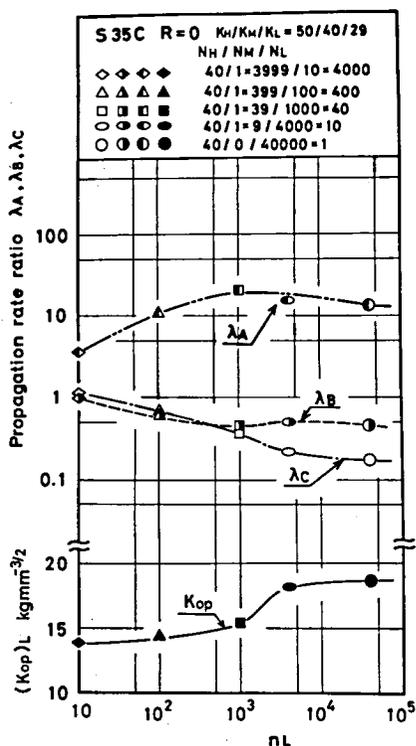


図 3.14 3 段多重試験の進展速度比とき裂開口点
(K_M のひん度の影響)

K_{Op} は一定であり, $N_M = 0$ の 2 段多重試験の場合と等しく, 進展速度比は λ_B, λ_C ともにほぼ 1 である。したがって多段多重条件だからといって危険になることはなく, ΔK_{eff} に基づく修正マイナー形の推定法でよいことがわかる。

3.3.3 平均を有する荷重振幅の評価法

航空機の G-A-G 荷重あるいは広帯域変動荷重に含まれる小振幅のように, 大きな平均荷重を有しながら変動する荷重パターンは実働荷重においてよくみられる。本節ではこ

のような変動荷重のモデルとして, 図 3.16 に示す低レベル K 値が応力比 $R > 0$ の平均成分を有する 2 段多重変動荷重パターンを対象とし, き裂進展則とともに ΔK_{eff} を算出する方法を検討する。

まず $R = 0$ の一定振幅荷重下のき裂進展挙動を求める試験を行った。K 値制御で $K_{max} = 55 \text{ kgmm}^{-3/2}$ から減少率 $dK_{max} / dl = -10 \text{ kgmm}^{-3/2} / \text{mm}$ の割合で, き裂長さに対し直線的に K 値を減少させた。き裂進展下限界条件は $(K_{max})_{th} = 23.5 \text{ kgmm}^{-3/2}$, $(\Delta K_{eff})_{th} = 8.2 \text{ kgmm}^{-3/2}$ であった。変動荷重下のき裂進展速度は (3-2) 式によって低レベル K 値下の速度について

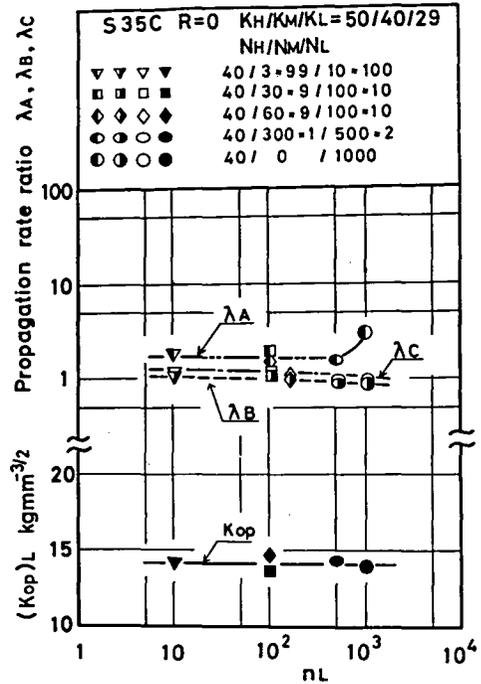


図 3.15 3 段多重試験の進展速度比とき裂開口点

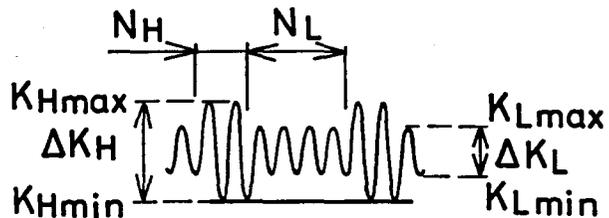


図 3.16 2 段多重変動荷重パターン

整理した。荷重条件は高レベルK値 ΔK_H については $R = 0$ ($K_{Hmin} = 0$) の片振り、 $K_{Hmax} = \Delta K_H = 50 \text{ kgmm}^{-3/2}$ で一定とし、低レベルK値 ΔK_L の振幅、平均、ひん度の3つのパラメータを変化させその影響を調べた。

まずK値振幅の効果をみるためひん度比を固定し、 $K_{Lmax} = K_{Hmax}$ とした波形で、低レベルK値の振幅 ΔK_L を種々に変えた試験を行った。この場合の荷重-変位ヒステリシスはその一例を図 3.17 に示すように、高レベルK値の存在により開口点 K_{Op} が低下し、低レベルK値下では全範囲で開口している。

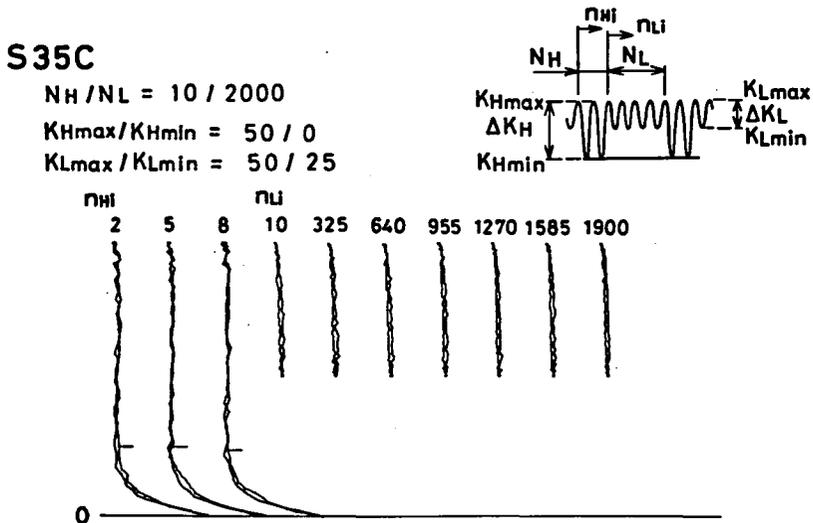


図 3.17 2段多重変動荷重下の荷重-変位ヒステリシス

高レベルK値に対する K_{Op} を K_{Hmax} に対してプロットしたものが図 3.18 である。広い範囲の条件に対して低レベルK値にかかわらず高レベルK値が K_{Op} を決定しており、しかもそれは一定振幅試験結果に一致していることがわかる。

き裂進展速度を ΔK_L に対してプロットしたものを図 3.19 に示す。図中・は $R = 0$ の一定振幅試験の $\Delta K \sim dl/dn$ 関係であり、破線が $\Delta K_{eff} \sim dl/dn$ 関係である。 ΔK で整理すれば白抜き記号のように、同じK振幅でも $R > 0$ のため・印の $R = 0$ の一定振幅試験結果より速度が速くなっており、また $(\Delta K)_{th}$ より低いK値でも進展しているため、平均応力を有している荷重振幅に対してはこれを適切に評価しないと非常に危険となることが示唆されている。

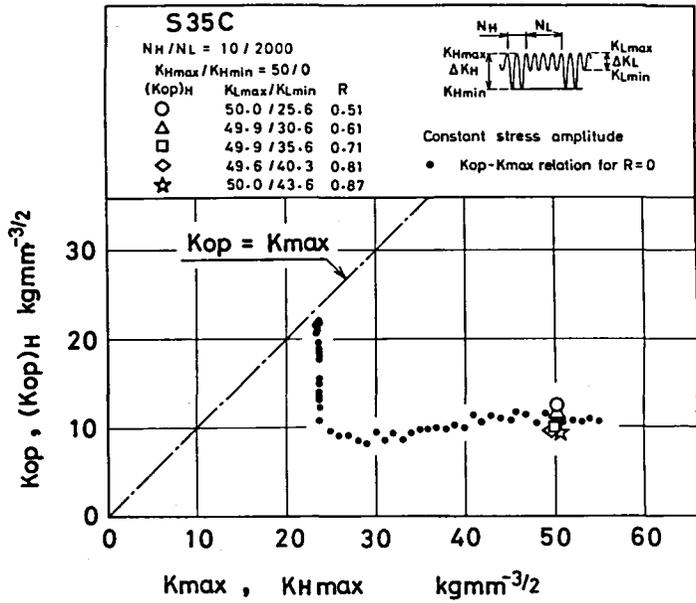


図 3.18 2段多重試験のき裂開口点
 (低レベルK値の振幅を変えた場合)

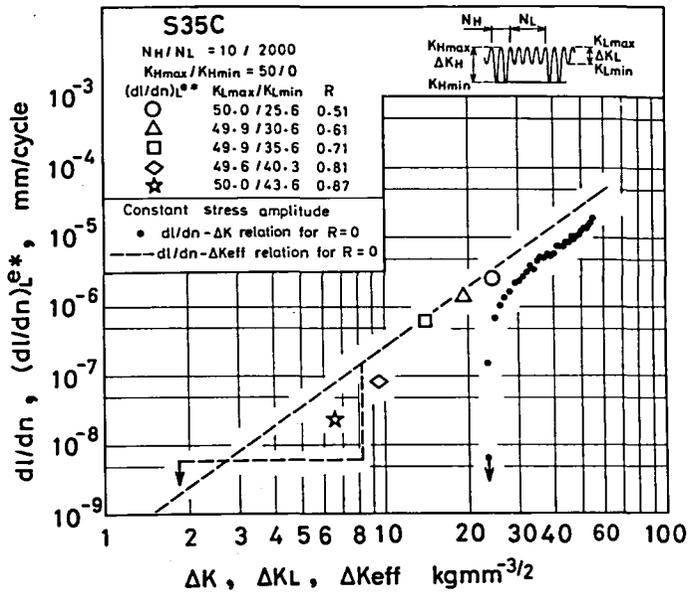


図 3.19 2段多重試験のき裂進展速度
 (低レベルK値の振幅を変えた場合)

本試験の条件では図 3.17 に示したように、低レベルK値下では全範囲で開口しているため $\Delta K_L = \Delta K_{eff}$ となり、速度は破線で示す一定振幅の $\Delta K_{eff} \sim dI/dn$ 関係とその延長線によく一致している。このようにき裂が開口している範囲の ΔK_{eff} を考えれば、進展速度に及ぼす平均応力の影響は現われず、平均応力は単にき裂の開閉口状態のみにかかわっていることがわかる。R が大きくなると ΔK_{eff} で整理しても平均応力の影響が現われるという報告もある⁰⁰ が、この実験範囲では $R = 0.9$ 付近まで開閉口挙動でよく説明されるようである。

次に低レベルK値の振幅 ΔK_L を $13.5 \text{ kgmm}^{-3/2}$ で一定にして、その平均を減少させる試験を行った。き裂開口点 K_{Op} を K_{Lmax} に対してプロットしたものを図 3.20 に示す。・印が $R = 0$ の一定振幅荷重試験結果である。 $K_{Lmax} \geq 25.7 \text{ kgmm}^{-3/2}$ の各条件に対しては K_{Op} は高レベルK値 $K_H = 50 \text{ kgmm}^{-3/2}$ に対する一定振幅結果にほぼ一致しているが、▷印で示す $K_{Lmax} = 21.1 \text{ kgmm}^{-3/2}$

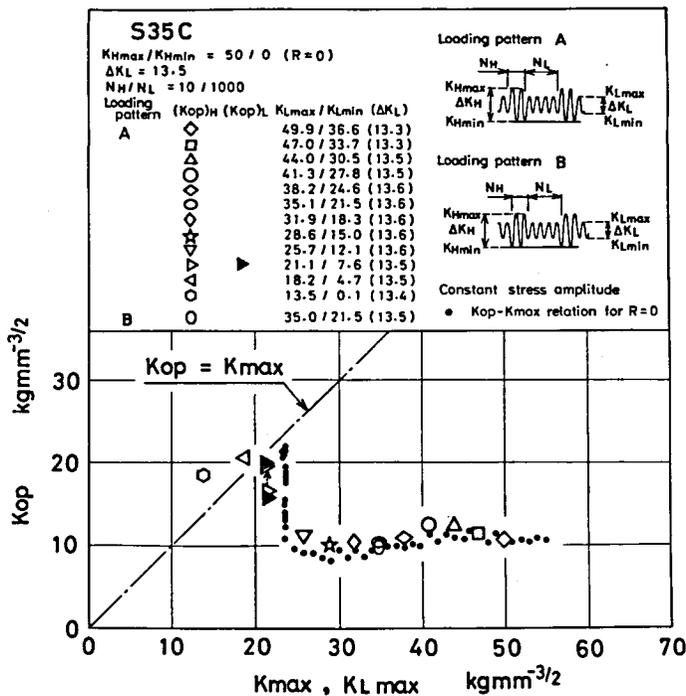


図 3.20 2段多重試験のき裂開口点
(低レベルK値の平均を変えた場合)

の条件に対しては K_{Op} が上昇している。これはこの条件に切り換えた直後のヒステリシスは図 3.2 1 (a) のようであったが、約 12000 ブロックの繰り返しの後に同図 (b) のように上昇したものである。図 3.20 の \triangleright 印が 2 つのプロットしてあるのはこの上昇の過程を示したものである。

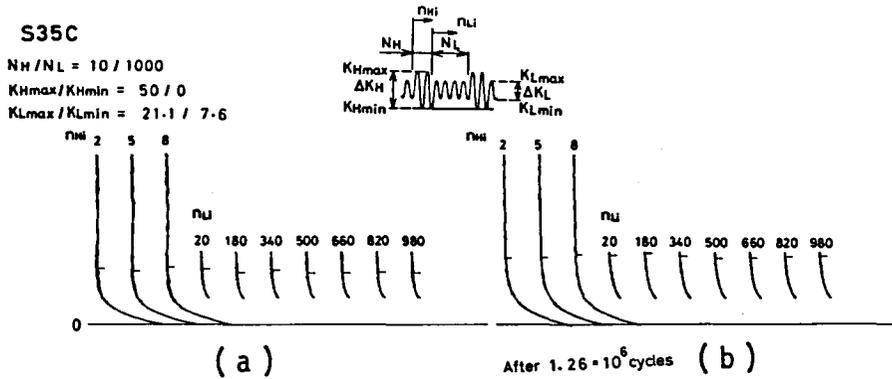


図 3.21 き裂開口点の上昇

低レベル K 値下の進展速度を ΔK_L に対してプロットしたものを図 3.2 2 に示す。 $K_{Lmax} \geq 25.7 \text{ kgmm}^{-3/2}$ の各条件についてはほぼ一カ所に集まっており、 $K_{Lmax} = 21.1 \text{ kgmm}^{-3/2}$ の条件に対する \triangleright 印のみがそれらより低い速度となっている。これは $K_{Lmax} \geq 25.7 \text{ kgmm}^{-3/2}$ の条件に対しては低レベル K 値下で全範囲が開口し、 $\Delta K_L = \Delta K_{eff} =$

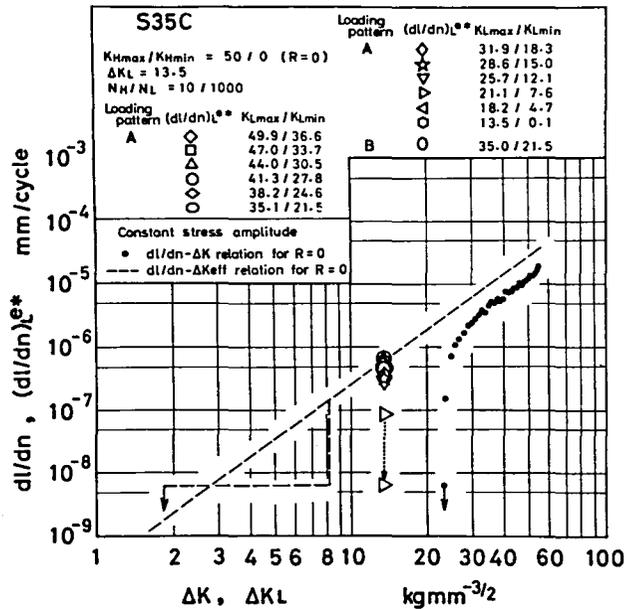


図 3.22 2 段多重試験の $\Delta K \sim dl/dn$ 関係 (低レベル K 値平均を変えた場合)

一定となっているためであり、破線で示す一定振幅の $\Delta K_{eff} \sim dl/dn$ 関係によく一致しており、荷重全範囲で開口するようになってしまえば、平均応力レベルの影響は現われないようである。一方▷印のみが低い速度となっているのは、先に述べたようにき裂閉口が生じたためである。

これを ΔK_{eff} で整理すれば図 3.23 のように全条件に対して一定振幅試験結果とそれを延長した線によく一致している。

なお図 3.20 に示した荷重パターン A, B とは、それぞれ低レベル K 値が高レベル K 値の負荷途中と除荷途中に入る場合の差を調べるために行ったものであるが、この差は全く現われていない。

次にひん度比の効果をみるため K 値の条件を $K_{Hmax} = K_{Lmax}$ で $\Delta K_L = 1.5 \text{ kgmm}^{-3/2}$ に固定し、ひん度比、特に低レベル K 値の繰り返し数 N_L を広範囲に変えた試験を行った。き裂開口点 K_{Op} は図 3.24 に示すように、全条件に対して高レベル K 値 K_{Hmax} に対する一定振幅試験結果にほぼ一致している。3.3.1 節の $R=0$ の場合は N_L が 10^4 を超えて大きくなると K_{Op} の上昇がみられたが、本節のように適当な平均荷重がかかっている場合は K_{Op} の上昇はみられない。また進展速度は低レベル K 値に対しては全範囲が開口しているため $\Delta K_L = \Delta K_{eff}$ となり、図 3.25 に示すように破線で示す $\Delta K_{eff} \sim dl/dn$ の関係によく一致しており、ひん度比の影響は開閉口挙動にも速度にも認められない。

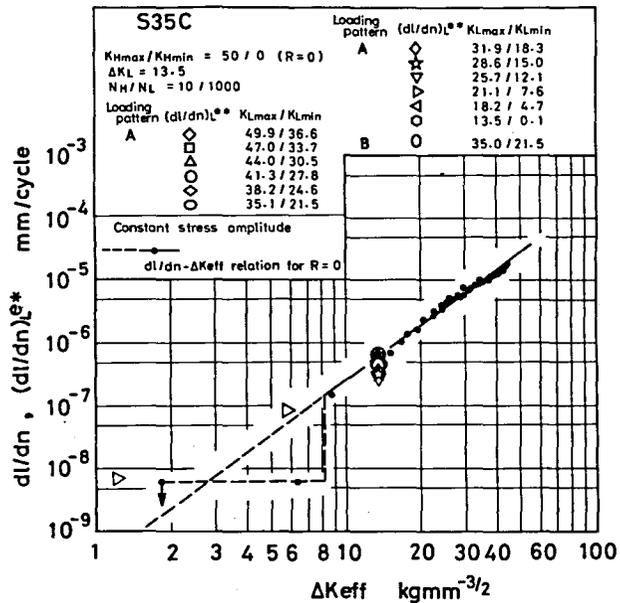


図 3.23 2段多重試験の $\Delta K_{eff} \sim dl/dn$ 関係 (低レベル K 値の平均を変えた場合)

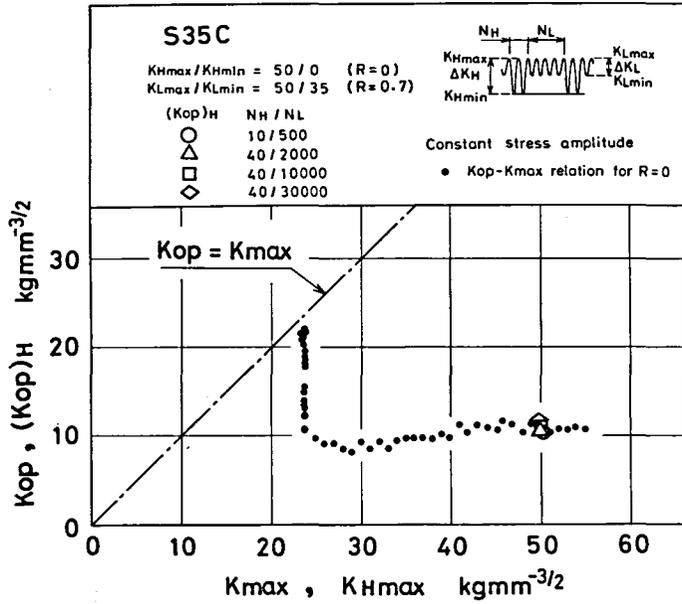


図 3.24 2段多重試験のき裂開口点
 (N_L を変えた場合)

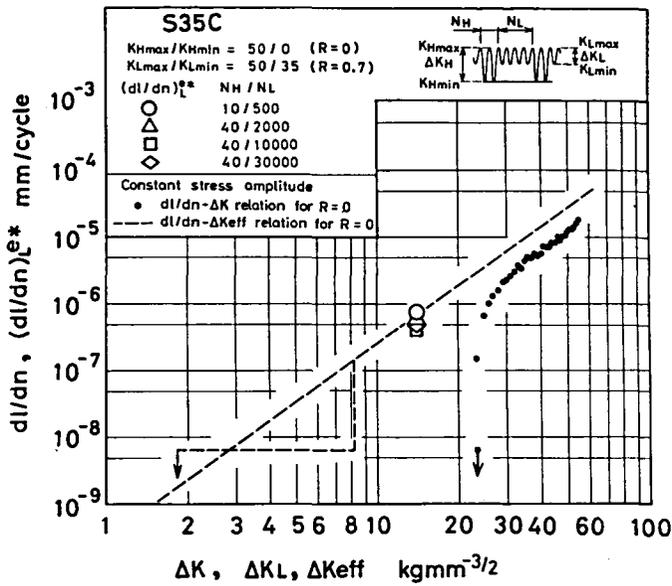


図 3.25 2段多重試験のき裂進展速度
 (N_L を変えた場合)

以上のことより、低レベルK値が $R > 0$ の引張り平均を有する変動荷重の場合も、 K_{op} は高レベルK値に対する一定振幅結果に等しくなることを用いて各レベルでの ΔK_{eff} を算出し、 ΔK_{eff} に基づく修正マイナー形の推定法を適用すればよいことがわかる。

3.3.4 広帯域変動荷重の波形カウント法

前節までの議論は狭帯域ランダム波形をモデルにしたものであり、荷重サイクルは明確に分離され、波形カウント法の考慮は不要であった。しかしこれを広帯域ランダム波形に拡張するには次の2点を解決する必要がある。

第1に荷重変動の帯域幅が広がると波形に小振幅が含まれるようになるため、これをサイクルに分解するためのカウント法が必要となる。第2に分解された波形のサイクルは平均応力を有しているためこれを評価する必要がある。

第2点については既に前節で検討し、き裂開閉口挙動を考慮して ΔK_{eff} で整理すれば平均応力の効果は説明できることを明らかにした。

第1点については、現時点では変動荷重下のき裂進展機構は必ずしも十分解明されておらず、進展機構の面からどのようなカウント法が適当であるのかは明らかでない。したがって本研究では小振幅による進展の効果が現われやすいプログラム波形を負荷して各カウント法の優劣を比較し、進展速度を最も精度よく推定できるカウント法を見出すことにする。

プログラム波形として図3.26に示す荷重パターンAの、正弦波の基本波に正弦波の二次波が重畳する波形を用い、二次波の個数を変化させた。比較のためK値のレンジペアを同一にしたB、Cの波形についても試験を行った。

波形カウント法についてはこれまでに平滑材の疲労に対して種々の方法が提案されてきた^{41)~43)}。それらはカウントする対象によって基本的に次の2種類に大別できる。第1は荷重波形の相次ぐ極値の差が損傷に寄与すると考え、それを半波として取り出すレンジ法である。第2は小さい方から順にレンジペアを取り出し履歴を考慮し、レンジペアにより損傷が蓄積すると考えるレンジペア法であり、レインフロ-法⁴⁴⁾、HL法⁴⁵⁾などは本質的にこれと同じものを取り出す方法である。

平均応力成分をも含めて取り出す場合は前者に対してレンジ・ミーン法があり半波法がその例である。後者に対してはレンジペア・ミーン法⁽¹²⁾があり、全波法⁽¹¹⁾はこれと同じものを取り出すものである。

き裂進展問題に対しては速度の支配因子である ΔK_{eff} に対してカウントを行えばよいことが容易に推測されるので、ここでは ΔK_{eff} についてのレンジカウント法とレンジペアカウント法を比較した。

重畳波形に対する荷重-変位ヒステリシスの例を図 3.27 に示す。図中短い横線で示す位置がき裂開口点

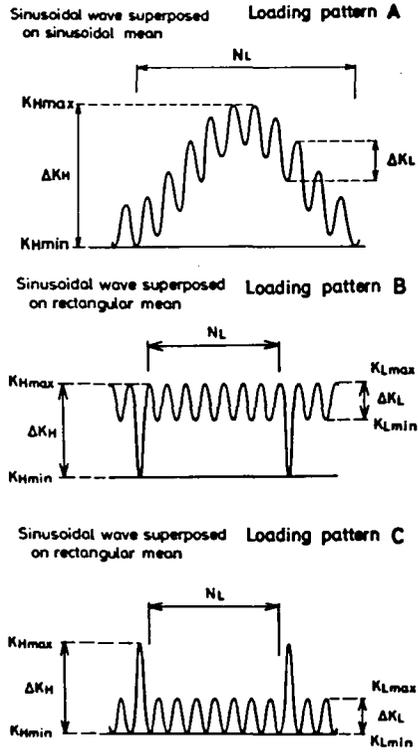


図 3.26 プログラム変動荷重パターン

S35C

Sinusoidal wave superposed on sinusoidal mean

$$NH / NL = 1 / 24$$

$$KHmax / KHmin = 50 / 0$$

$$\Delta KL = 14$$

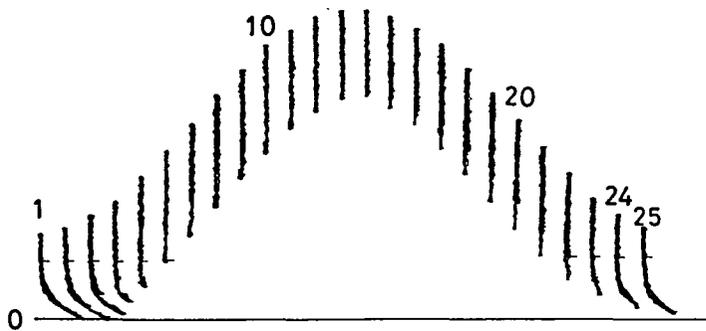


図 3.27 重畳変動荷重下の荷重-変位ヒステリシス

で、1ブロック中を通じてほぼ一定であり、このレベルより上のK値変動がカウン
 トの対象となる。

き裂進展速度は等価有効応力拡大係数 $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{eq}}$ によって整理した。ここで
 $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{eq}}$ は次のように定義する。何らかのカウン法により1ブロックの波
 形をN個の ΔK_{eff} のエレメント $(\Delta K_{\text{eff}})_i$ ($i=1\sim N$) に分解する。進展速度
 が ΔK_{eff} に基づく修正マイナー形の進展則で表わされるとし、それを dl/dn
 $= C(\Delta K_{\text{eff}})^m$ (本材料の場合 $m=2.91$ である) とすると、1ブロックの推定
 平均進展速度 $(dl/dn)^*$ は

$$(dl/dn)^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C \{ (\Delta K_{\text{eff}})_i \}^m \quad \text{となる。}$$

これと同じ速度を与える等価な $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{eq}}$ は

$$(dl/dn)^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C \{ (\Delta K_{\text{eff}})_i \}^m = C \{ (\Delta K_{\text{eff}})_{\text{eq}} \}^m \quad \text{から}$$

$$(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{eq}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{ (\Delta K_{\text{eff}})_i \}^m \right]^{\frac{1}{m}} \quad (3-9)$$

となり、これは ΔK_{eff} についての m 乗平均値である。もし仮定が正しければ実
 験で得られる平均進展速度 dl/dn と $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{eq}}$ の関係は、一定振幅の ΔK_{eff}
 $\sim dl/dn$ 関係に一致するはずである。

き裂進展速度を図 3.28 に示す。小さな・印が一定振幅の $\Delta K_{\text{eff}} \sim dl/dn$
 関係であり、大きな記号が $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{eq}} \sim dl/dn$ 関係である。いずれの波形
 に対しても、白抜き印で示すレンジペア法による整理は一定振幅結果とよく一致
 している。それに対して波形Aに対して黒印で示すレンジ法では、基本波に対す
 る ΔK_{eff} がカウンタされないため、約2倍程度危険側の推定となっている。

以上のことよりき裂進展問題に対する波形カウン法としては、 ΔK_{eff} につい
 てのレンジペアカウン法が適当であることがわかった。

なおK値のレンジペアを同一にした場合、荷重パターンB, A, C (□, △,
 ◇印に対応)の順に速度が大きくなっているが、これはこの順に $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{eq}}$ が
 大きくなっているためである。

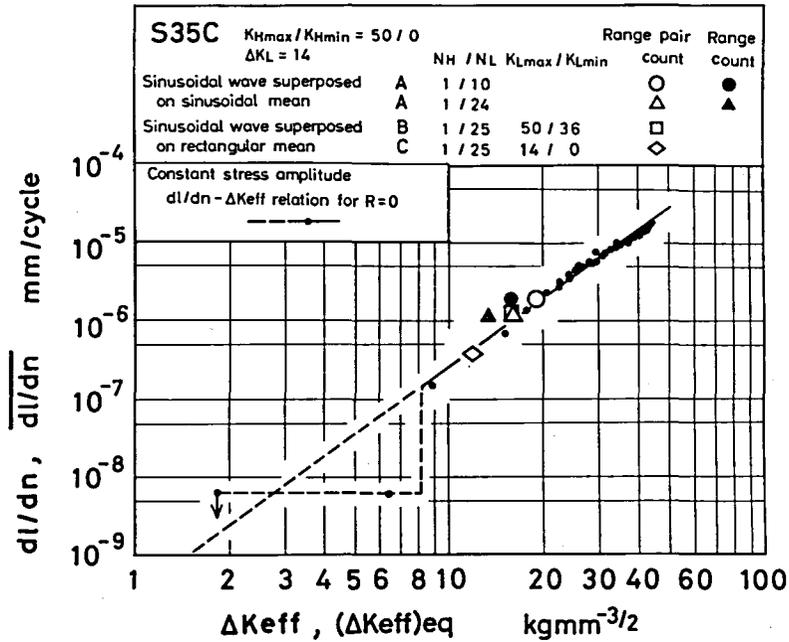


図 3.28 プログラム変動試験のき裂進展速度

3.3.5 ランダム変動荷重試験

前節までに得られた知見に基づいて、本節では任意のパワスペクトル密度を有する定常なランダム変動荷重によるき裂進展試験を行い、進展挙動を調べた後、K値のレンジペア・ミーンの2元ひん度分布を導入してランダム荷重下の ΔK_{eff} を算出し、一定振幅試験結果からランダム荷重下のき裂進展速度を推定する方法を提案する。本節では定常なランダム変動荷重を近似するものとして、定常ランダム荷重波形の一部を繰り返し負荷する場合に対応する擬似ランダム変動荷重を用いた。

3.3.5.1 ランダム変動荷重信号発生法

ランダム変動荷重信号発生法としては、実機の応力波形を記録して用いる方法、白色雑音発生器出力を適当な電氣的フィルタを通し所定のパワスペクトルを有する信号を作り出す方法、およびその過程を計算機によりデジタル的に行う方法などが考えられる。ここではパワスペクトル密度を任意に変えられること、周期

があまり長くない擬似ランダム波形であること、き裂開口点の自動計測システムにおいて荷重負荷と波形観測が同期して行えて便利であるなどの実験技術上の利点から、第3番目の計算機によるデジタルシミュレーションの方法を採用することにした。

定常ガウス性ランダム過程を作り出す方法は種々あるが、ここではランダム位相を有する余弦波の級数和による方法⁶⁹⁾を用い、以下に述べる手順で行った¹⁷⁾。

平均値0の定常ガウス性ランダム過程 $x(t)$ を次式でシミュレートする。

$$x(t) = \sum_{k=1}^N a_k \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (3-10)$$

ここで ϕ_k は $[0, 2\pi]$ の間で一様な確率変数で、たがいに独立である。 a_k は次のように与えられる。図3.29に示す $x(t)$ のパワースペクトル密度関数 $S(\omega)$ の正の ω 領域において、上限値 ω_u と下限値 ω_l の間を N 等分し

$$\Delta\omega = (\omega_u - \omega_l) / N \quad (3-11)$$

$$\omega_k = \omega_l + (k - \frac{1}{2}) \Delta\omega \quad (k=1, 2, \dots, N) \quad (3-12)$$

とするととき

$$a_k^2 = 4S(\omega_k) \Delta\omega \quad (3-13)$$

として与えられる。なお(3-10)式のモデルの場合は N の値にかかわらずエルゴード性が保証されている。

本節では進展速度に及ぼす速度効果がほとんど現われない周波数領域を対象とし、図3.30にパワースペクトル密度を示すような広帯域波 A 、一自由度振動系(減衰係数 $\zeta =$

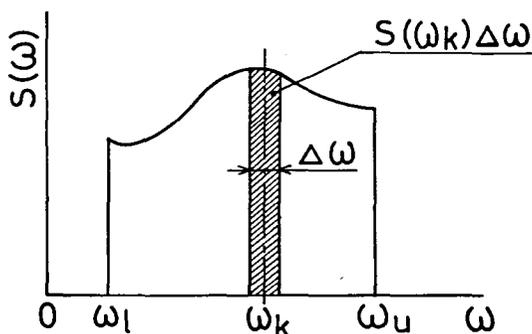


図3.29 パワースペクトル密度分布の分割

0.054) をモデルとした 狭帯域波 B (共振尖鋭度 $Q = 9.5$), 二自由度振動系をモデルとしパワースペクトル密度に 2 つの山がある C の 3 種の波形をとりあげた。このような 3 種の波形によりランダム荷重下のき裂進展の基本的な性質が明らかにできると思われる。

以下にそれぞれの波形に対して (3-10) 式のパラメータの決定の具体的な手順を箇条書きにして述べる。

(i) 計算時間の制限から, リアルタイムシミュレーションを行いながらそれを負荷するとすれば上限周波数が極めて低くなる。上限周波数を高くするには, 計算機

内にあらかじめ波形を記憶しておき, 順に出力する方法によらざるをえないが, この方法では記憶容量が小さい場合にはあまり長い周期の波形を負荷することができない。

そこでここでは前もってできるだけ精密な波形のシミュレーションを行い, その極値列のみを抽出して残し, 極値間を 40 Hz の余弦波の半波でつないで荷重信号とすることにした。この結果得られる擬似ランダム波形は, 局所についてみればもとの波形を時間軸について伸縮させているため, パワースペクトル密度は変化する。しかしき裂進展に対しては 40 Hz 付近では速度効果はあまりないことが知られているから, 荷重波形の極値とその順序さえ精密にあわせておけば, き裂進展挙動に与える影響は無視できるものと思われる。したがってこの波形は, 速度効果が現われない範囲では任意のパワースペクトル密度の荷重に代用して差しつかえないと考えられる。このような簡略化を行えば小さい容量のミニコンピュータでも比較的長い周期の試験が行える。

(ii) ランダム波形の極値の精度は波形 1 サイクルを何分割してシミュレートする

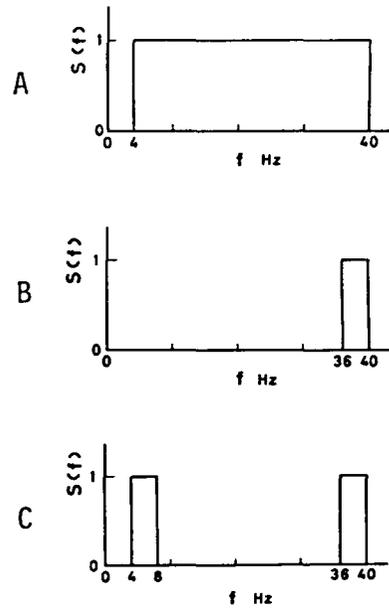


図 3.30 パワースペクトル

かに依存している。ここでは計算時間の制約から波形A, Cについては8分割, Bについては16分割した。その結果極値は波形A, Cについては5%以内, Bについては2%以内の精度で求められている¹⁰⁾。

(iii) Nは次のことを考慮して決定した。擬似ランダム波形が $3\sigma_{rms}$ 程度の成分まで含むようにするために、擬似ランダム変動1周期の極値の数を1000とした。それにしたがって1周期の長さは12.5秒となる。一方(3-10)式のモデルで作られる波形は周期性を有し、その周期 T_p は

$$T_p = 4\pi / \Delta\omega \quad (3-14)$$

で与えられる。(3-11)と(3-14)から

$$\begin{aligned} T_p &= 4\pi / \Delta\omega = 4\pi N / (\omega_u - \omega_l) = 2N / (f_u - f_l) \\ &= 12.5 \quad (\text{ただし } \omega_u = 2\pi f_u, \omega_l = 2\pi f_l) \end{aligned}$$

となり、波形A, Cについては $N=225$, Bについては $N=25$ が得られる。

(iv) ϕ_k は乗算形合同法により一様乱数を発生させ用いた。

(v) 以上のパラメータを用いて1000個の極値が得られるまでシミュレーションを行う。

(vi) 相次ぐ極値の間を余弦波の半波でつないで出力する。

このような方法で発生させた擬似ランダム波の一部分を図3.31に示す。この波形は平均値が0であるので、試験には1周期中に現われる最小値が0になるように適当な平均値を付加したものをD-A変換し、荷重信号として用いた。この波形を実際に試験片に負荷し、現われるK値の最大値 $(K)_{max}$ を $50 \text{ kgmm}^{-3/2}$ にしたときの経過ひん度分布、ピークひん度分布、レンジひん度分布の計数結果を波

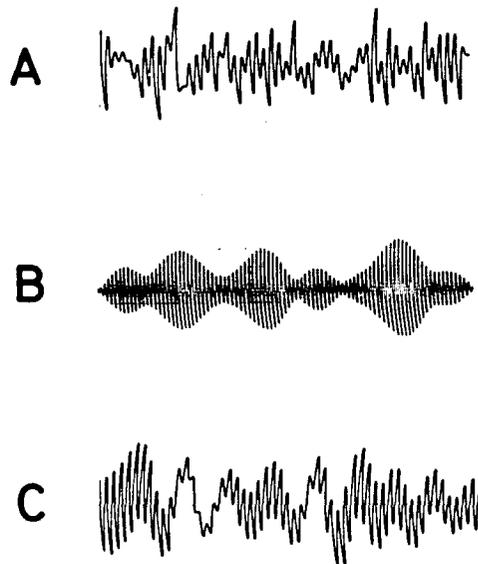


図3.31 擬似ランダム変動荷重波形

形 A, B, C について図 3.32 ~ 3.34 の(a), (b), (c)に示す。経過ひん度分布をみると片対数線図ではほぼ放物線形になっていることからガウス分布をしており、前述(i)の仮定は確率密度にはあまり影響を及ぼさないようである。また波形に $3\sigma_{rms}$ 程度までの成分が含まれており、本章で用いる擬似ランダム荷重の要件を満たすものが得られた。

3.3.5.2 試験結果の解析法

3.3.4 節で明らかにしたように、変動荷重下の進展速度は ΔK_{eff} レンジペアによって支配されているため、進展挙動の解析にはランダム荷重下の ΔK_{eff} レンジペアを算出する方法を見出す必要がある。本研究では実用をも考慮し、K 値のひん度分布からこれを求めるため、まず K 値のレンジペア・ミーンの 2 元ひん度分布を求め、それと別途求めたき裂開口点 K_{op} を組み合わせ、 ΔK_{eff} レンジペアひん度分布を求めることを考えた。

任意波形からレンジペア・ミーンを抽出するアルゴリズムとしては、レンジペア・ミーン法、全波法、HL法などがあるが、擬似ランダム波の場合は

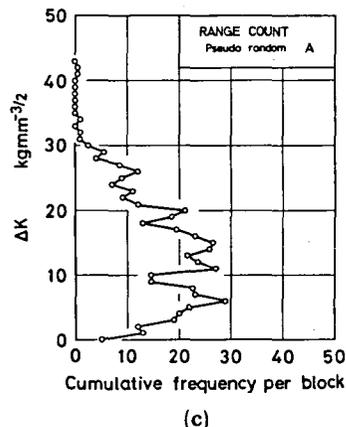
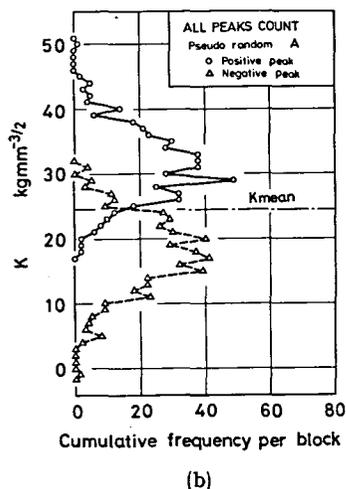
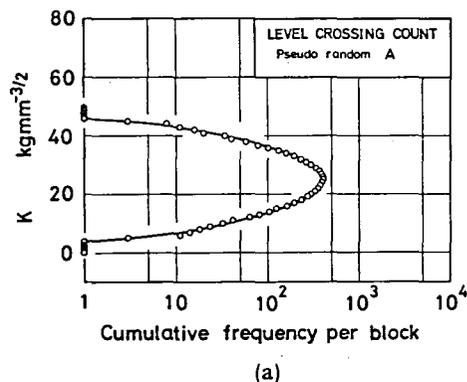
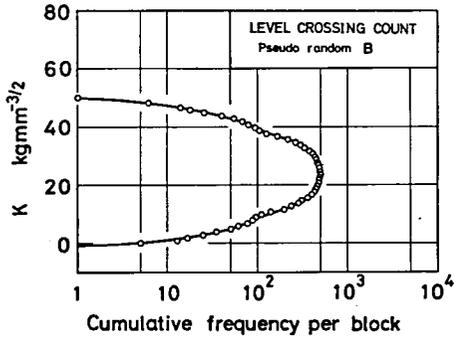
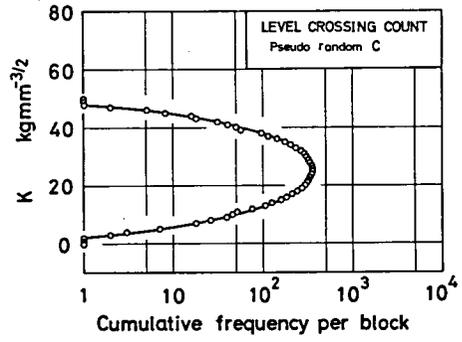


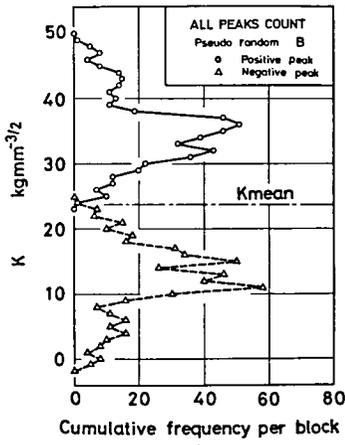
図 3.32 擬似ランダム A の K 値ひん度分布



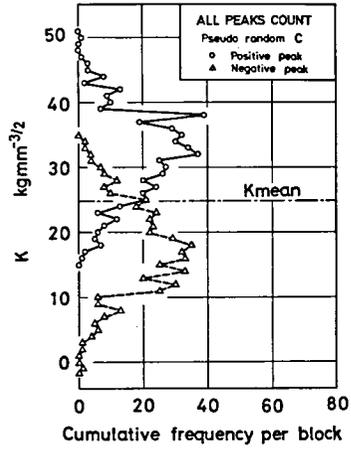
(a)



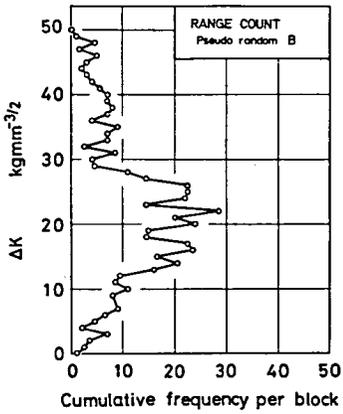
(a)



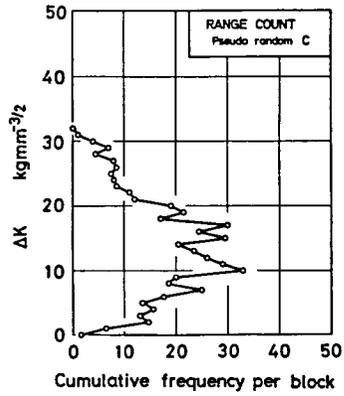
(b)



(b)



(c)



(c)

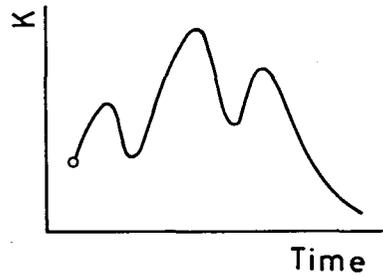
図 3.33 擬似ランダム B の K 値ひん度分布

図 3.34 擬似ランダム C の K 値ひん度分布

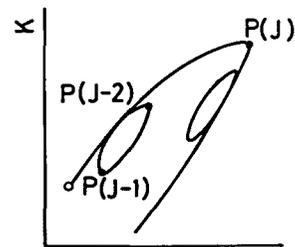
3者とも同一の計数結果を与えるので、ここではアルゴリズムの簡単さからHL法を採用した。以下にHL法について簡単に説明する⁽¹⁹⁾。図3.35(a)のようなK値の時間経過に対し、図(b)のような仮想的なヒステリシスループを考える。なおき裂進展問題に対し図(b)の横軸に何をとればよいかは明らかでないが、ここでは縦軸のK値についてのみカウントを行うので横軸は何であってもかまわないが、たとえばき裂先端開口変位のようなものを想定すればよいであろう。HL法はこのように想定した「ヒステリシスループが閉じたら、その時取り出し計数する」というものである。

それをサブルーチンにした場合のフローチャートを図3.35(c)に示す。まずカウントしたいデータの極値列を、時間経過の順にPEAK(I) (I = 1 ~ NP) とする。NPは極値の総数である。この極値を順次読み込みながら相次ぐ2個のレンジR1とR2の大きさを比較し、 $R1 \leq R2$ の場合のみR1を取り出し、レンジペアZRとミーンZMを記録する。ただし出発点P0はカウントの対象とせず、カウント終了後閉じないループとともに別に処理を行う。以上がHL法の概略である。

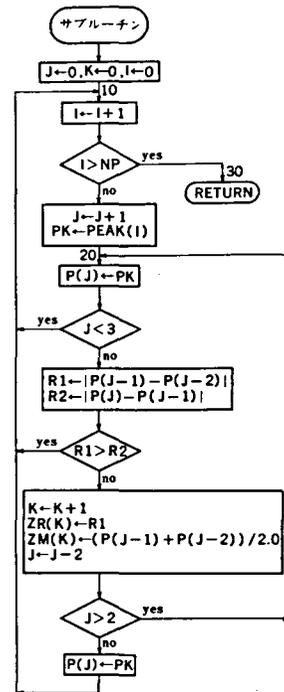
HL法によってK値のレンジペア・ミーンの計算を行う具体的な手順を以下に述べる。実験中にオンライン・リアルタイムにロード



(a)



(b)



(c)

図3.35 HL法⁽¹⁹⁾

セル出力をD-A変換し、極値探索を行い、1周期分の極値1000点のデータをディスクに格納する。実験終了後解析プログラムによりK値のレンジペア・ミーンカウントを行う。そのためにまずき裂長さの情報を用いてロードセル出力の極値列をK値の極値列に変換し、それをPEAK(I) (I = 1~1000)とした。擬似ランダム波では1周期内で必ずヒステリシスループは閉じるはずであるが、HL法では不適当な極値を出発点としてカウントを開始すれば閉じないループが残るとともに、出発点の特別な処理が必要となる。この不具合を避けるため、予め極値列をスキャンしてその最小値を探索し、それを先頭にしてカウントがスタートするように配列の添え字をずらし、さらにPEAK(1001) (=PEAK(1))を付け加えて最大のループもカウントされるようにした。図3.36~3.38に $(K)_{\max} = 35 \text{ kgmm}^{-3/2}$ に対するK値のレンジペア・ミーンの2元ひん度分布を、それぞれ波形A, B, Cに対して示す。

次にき裂開閉口挙動を考慮してK値のレンジペア・ミーン分布から ΔK_{eff} のレンジペア分布を求める方法について述べる。き裂開閉点を自動計測したところ、ランダム荷重下でもき裂開閉点は1周期を通じてほぼ一定であったのでこれを K_{op} とする。図3.39に示すようにこの K_{op} を縦軸の切片にとり、傾き1/2と

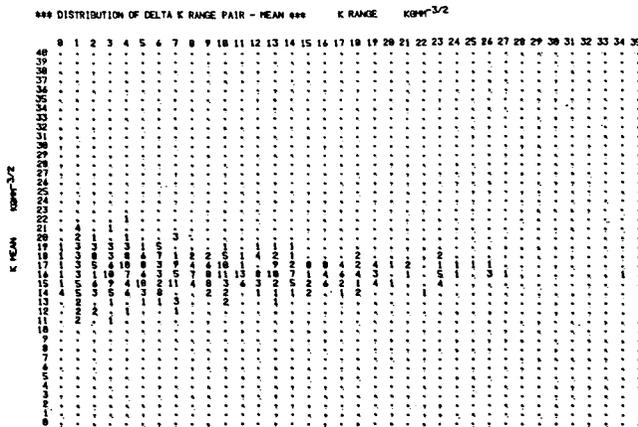


図3.36 擬似ランダムAに対するK値のレンジペア・ミーン分布
 $(K)_{\max} = 35 \text{ kgmm}^{-3/2}$

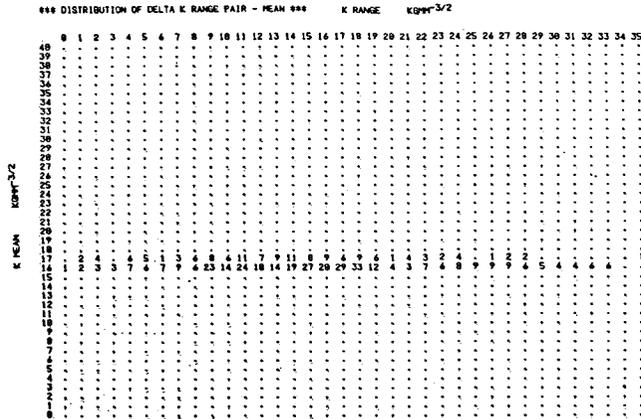


図 3.37 擬似ランダム B に対する K 値のレンジペア・ミーン分布
 $((K)_{\max} = 35 \text{ kgmm}^{-3/2})$

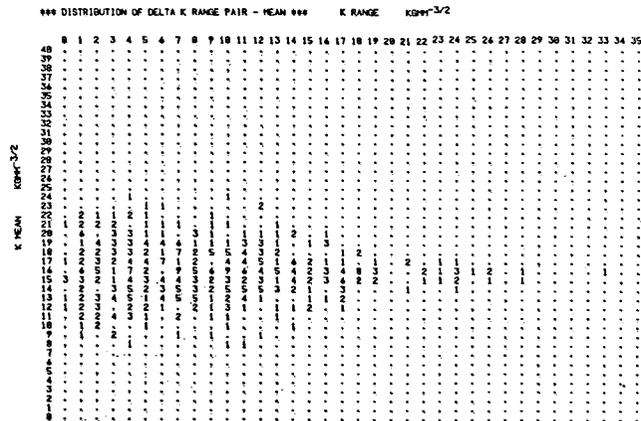


図 3.38 擬似ランダム C に対する K 値のレンジペア・ミーン分布
 $((K)_{\max} = 35 \text{ kgmm}^{-3/2})$

-1/2 の直線を引くと次の 3 つの領域に区分けされる。

- (I)は $K_{op} \leq K_{\min}$ であり, Kレンジペア $\Delta_{rp} K$ の全範囲で開口している領域。
- (II)は $K_{\min} < K_{op} < K_{\max}$ であり, $\Delta_{rp} K$ のうち一部分が開口している領域。
- (III)は $K_{\max} \leq K_{op}$ であり全く開口しない領域である。

ΔK_{eff} のレンジペア $\Delta_{rp} K_{eff}$ を

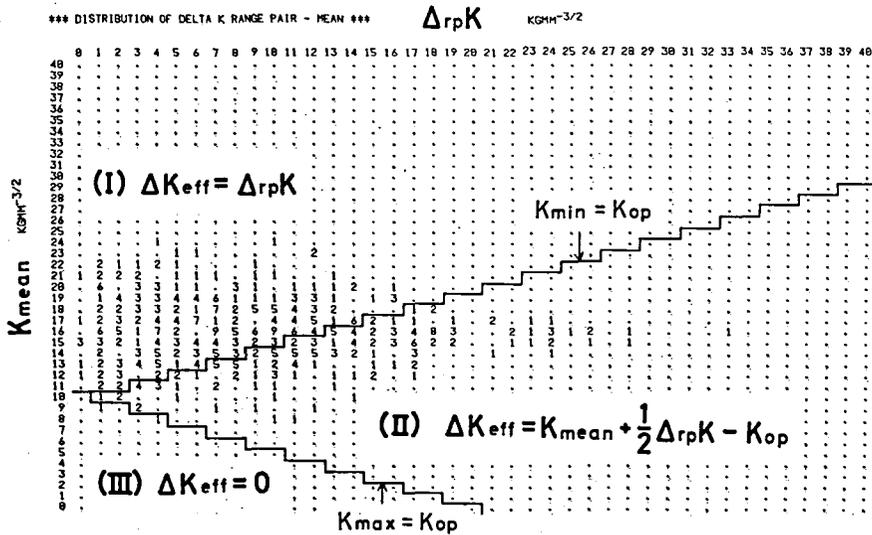


図 3.39 K 値のレンジペア・ミーン分布を用いた ΔK_{eff} の算出法

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{(I) 領域に対して } \Delta_{rp} K_{eff} = \Delta_{rp} K \\
 \text{(II) 領域に対して } \Delta_{rp} K_{eff} = K_{mean} + \frac{1}{2} \Delta_{rp} K - K_{op} \\
 \text{(III) 領域に対して } \Delta_{rp} K_{eff} = 0
 \end{array} \right\} \quad (3-15)$$

によって算出し、 $\Delta_{rp} K_{eff}$ の存在したもののみについて 1 周期の $\Delta_{rp} K_{eff}$ のひん度分布 $f_2(\Delta_{rp} K_{eff})$ を求める。3.3.4 節と同様の考え方により等価有効応力拡大係数を次式で算出する。

$$(\Delta_{rp} K_{eff})_{eq} = \left[\frac{\sum_{i=1}^k \{ (\Delta_{rp} K_{eff})_i^m f_2(\Delta_{rp} K_{eff})_i \}}{\sum_{i=1}^k f_2(\Delta_{rp} K_{eff})_i} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (3-16)$$

ただし k は $\Delta_{rp} K_{eff}$ のレベル数である。

一方平均進展速度は 1 周期の進展量 ΔL から

$$\overline{dl/dn} = \Delta L / \left\{ \sum_{i=1}^k f_2(\Delta_{rp} K_{eff})_i \right\} \quad (3-17)$$

として求めた。

3.3.5.3 試験結果

与えた荷重履歴は、K漸減法による一定振幅荷重試験のそれとほぼ合わせて、1ブロック中に現われるK値の最大値 $(K)_{max}$ を $50 \text{ kgmm}^{-3/2}$ として波形A, B, Cについて試験し、以後 $(K)_{max}$ 値を漸減させて各K値レベルで同様の試験を行った。

き裂開口点 K_{op} は擬似ランダム荷重の場合も1ブロックを通じてほぼ一定であり、それを現われるK値の最大値 $(K)_{max}$ に対してプロットしたものが図3.40

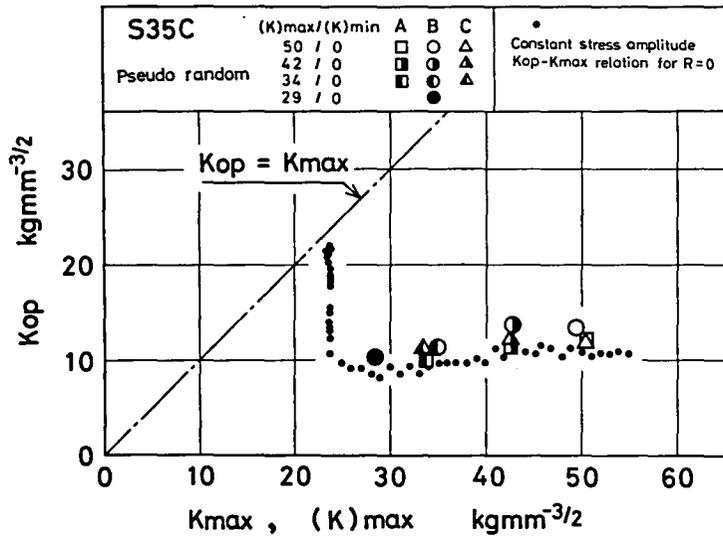


図 3.40 ランダム変動荷重下のき裂開口点

である。 K_{op} は、小さな・印で示す応力比 $R=0$ の場合の一定振幅試験結果にほぼ一致している。この場合最大のKレンジペア $(\Delta_{rp} K)_{max}$ は $R=0$ であることから、ランダム変動荷重の場合は $(\Delta_{rp} K)_{max}$ とその応力比 R がき裂開口点を決定していることがわかる。

この K_{op} の実測値を用いて(3-15)式で $\Delta_{rp} K_{eff}$ を算出し、ひん度分布 $f_2(\Delta_{rp} K_{eff})$ を求め、(3-16)式によって $(\Delta_{rp} K_{eff})_{eq}$ を求めた。 $(\Delta_{rp} K_{eff})_{eq}$ に対して平均進展速度 $\overline{dl/dn}$ をプロットしたものが図3.41である。 $(\Delta_{rp} K_{eff})_{eq} \sim \overline{dl/dn}$ 関係はK値の帯域幅やレベルによらず、小

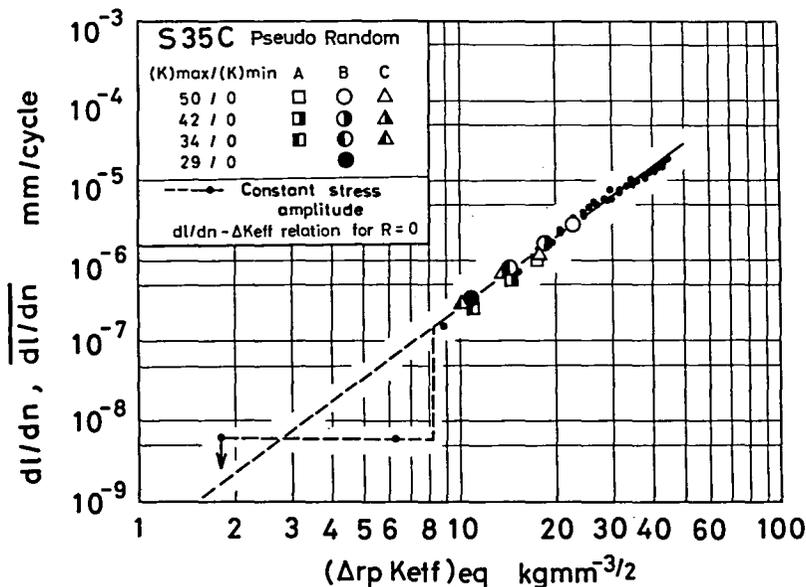


図 3.41 ランダム変動荷重下のき裂進展速度

さな・印で示す一定振幅の $\Delta K_{eff} \sim dl/dn$ 関係とよく一致していることから、 $\Delta_{rp} K_{eff}$ を考えれば進展速度に及ぼすパワースペクトル密度分布の形状やK値レベルの影響は現われないと結論できる。

進展速度は $(K)_{max}$ 、 σ_{rms} をほぼあわせた波形に対してはB、C、Aの順に速度が大であり、特にBのような狭帯域波形で速度が大きくなっている。これは帯域幅が狭くなる程大きなレンジペアの相対ひん度が増加するためである。

以上のことから、一定振幅荷重試験結果を用いて定常な実働荷重下の進展量を推定するには次のようにすればよい。まず実働荷重波形からK値のレンジペア $\Delta_{rp} K$ とミーン K_{mean} の2元ひん度分布 $f_1(\Delta_{rp} K, K_{mean})$ 分布を求める。そのうちの最大のレンジペア $(\Delta_{rp} K)_{max}$ のもつ応力比と等しい応力比の一定振幅荷重試験結果から、 $(\Delta_{rp} K)_{max}$ に対して K_{Op} を読み取り、(3-15)式で ΔK_{eff} レンジペアひん度分布 $f_2(\Delta_{rp} K_{eff})$ を求め、それに ΔK_{eff} 基づく修正マイナー形の進展則を適用すれば進展量が求まる。即ち

$$\Delta L = \sum_{i=1}^k C(\Delta_{rp} K_{eff})_i^m f_2(\Delta_{rp} K_{eff})_i \quad (3-18)$$

(kは $\Delta_{rp} K_{eff}$ のレベルの数)

となる。

あるいは、実働荷重波形もしくはその極値列を与えられた場合は、まずそのうちの最大のレンジペア $(\Delta_{rp} K)_{max}$ に対する K_{op} を先に求め、これより小さい極値を K_{op} で置き換えた極値列を作り、これから $\Delta_{rp} K_{eff}$ 列あるいはひん度分布を求める手順によってもよい。

3.3.5.4 考 察

本章で提案したランダム荷重下のき裂進展問題に対する取り扱い法の特徴は、「分解された荷重サイクルが有する平均荷重の効果を、き裂開閉口挙動を考慮して ΔK_{eff} で評価する」という点である。

このような広帯域波に含まれる平均荷重を有するサイクルの評価について、薄・岡村ら⁽²⁰⁾⁽²¹⁾はランダム荷重波形から分解された応力比Rを有するKレンジペア $\Delta_{rp} K$ は、同一の荷重条件(ΔK およびR)の一定振幅試験結果に等しい速度を有すると仮定して線形加算則を適用し、進展量を見積る方法を提案している。その考え方は分解されたサイクルは、荷重条件(ΔK およびR)が同じであれば、ランダム荷重下でも一定振幅荷重下と同一のき裂開口比 U を有していると仮定することと同等であると解釈できる。

しかし実際にはこの仮定は妥当とはいえない。それはもしそのように仮定すれば、き裂開口点 K_{op} は瞬時の ΔK とRで決定される値をとるために、ランダム荷重下では K_{op} が激しく変化することになるが、著者が K_{op} を実測した結果によればランダム荷重下でも K_{op} はほとんど変動せず、最大のKレンジペア $(\Delta_{rp} K)_{max}$ とそのRによって決定される一定の値をとっていた。したがって荷重条件(ΔK およびR)が同じであっても、一定振幅荷重下と変動荷重下ではき裂開口比が異なるため、速度も同一とはならないと考えられる。

もう1つ注目すべきことは、ランダム荷重下のき裂開口点が最大のKレンジペ

ア ($\Delta_{rp} K$)_{max} とそのRによって決定されることである。寿命推定においてはKレンジペアの最大値が推定精度を大きく左右するため、実機などから荷重データを記録したりまた負荷荷重値を予測したりする際には、中央付近の分布のみでなく、最大値についても十分考慮する必要がある。

3.4 A5083-Oの試験結果

3.4.1 2段多重変動荷重試験 (R = 0の場合)

3.4.1.1 ΔK_{eff} に基づくき裂の進展則

まずR = 0の一定振幅荷重下の進展挙動を求める試験を行った。試験はK値制御で $dK_{max}/dl = -3 \text{ kgmm}^{-3/2}/\text{mm}$ の割合で、き裂長さに対して直線的にK値を減少させ、停留した条件をき裂進展下限界条件として採用した。進展下限界条件は $(K_{max})_{th} = 1.38 \text{ kgmm}^{-3/2}$, $(\Delta K_{eff})_{th} = 0$ であった。使用した2段多重変動パターンはS35Cの場合と同じで、図3.3に示したものである。

ΔK_{eff} と進展速度の関係に及ぼすひん度比の影響を調べるために、K値レベルを $K_H/K_L = 26 \text{ kgmm}^{-3/2} / 17 \text{ kgmm}^{-3/2}$ に固定し、ひん度比 N_H/N_L を表3.3に示すように変えた。

表3.3 ひん度比条件 N_H/N_L

同表で横の行は N_L の影響を、縦の列は N_H の影響を広範囲に調べられるように、条件を系統的に選んだ。

	1 1000	1 100	1 40	1 20
	10 1000	10 500	10 100	
40 40000	40 8000	40 4000	40 1000	

適当な間隔で自動計測した1ブロック分の荷重-変位ヒステリシスの一例を図

3.42に示すように、本材料の場合もき裂開口点はほとんど変化していない。そこで本材料についても K_{op} は高低各レベルにおいてそれぞれ算術平均値で代表させることにし、 $(K_{op})_H$, $(K_{op})_L$ とし、 ΔK_{eff} を $\Delta K_{Heff} = K_H - (K_{op})_H$, $\Delta K_{Leff} = K_L - (K_{op})_L$ として求めた。

破面には図3.43に示すように高低の各K値レベルに対応する規則正しい縞模

様が観察される。 Δl_H で示すものが高レベルK値下の破面で、本例では高レベルK値下のストライエーションは明瞭でないが、別の $N_H = 2, 32$ とした試験ではそれぞれ図 3.44 (a), (b)に示すように、高レベルK値下で明瞭なストライエー

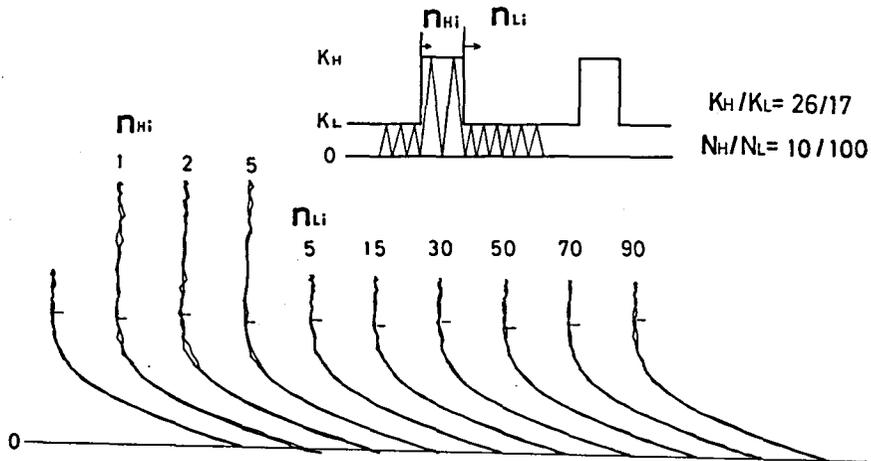
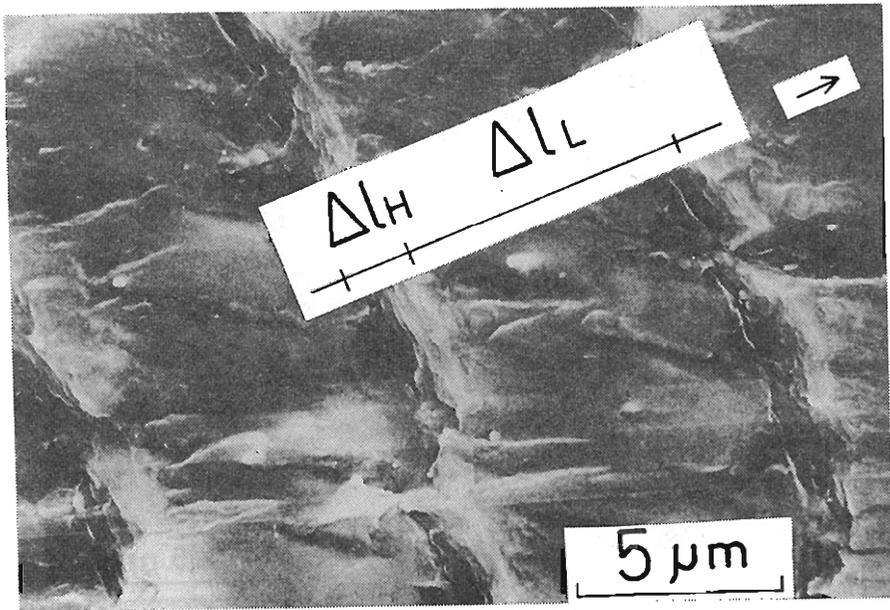


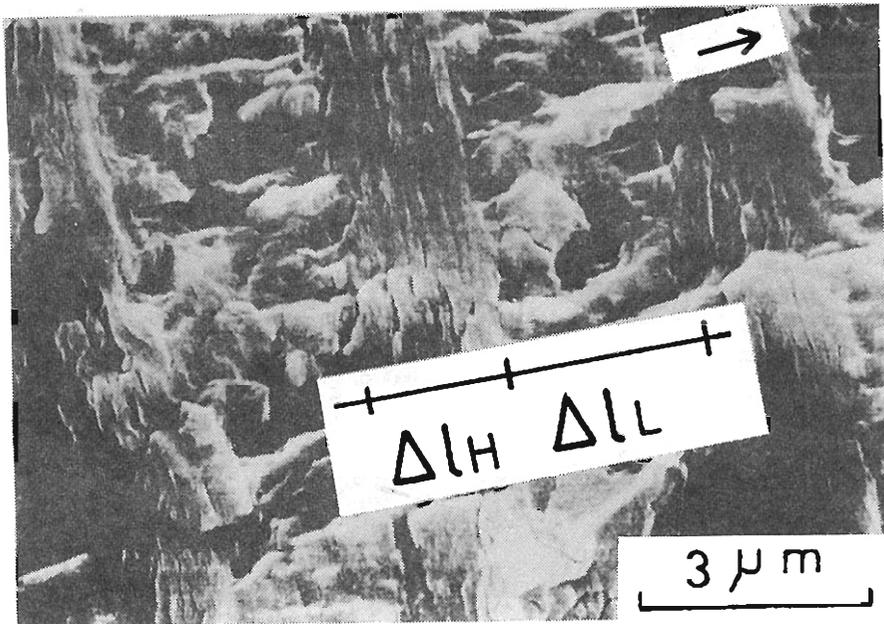
図 3.42 2段多重変動荷重下の荷重-変位ヒステリシス(A5083-O)

ションが観察され、き裂はストライエーション形成機構で進展しており、その間隔もほぼ一定であることが確認される。小寺沢⁽²²⁾は K_{max} が急に上昇する場合にはその第1サイクルで著しく加速され、極めて大きなストライエーションが形成され、その後荷重繰り返しとともに加速効果が減衰し、定常速度に漸近することを報告しているが、そのような巨大なストライエーション形成のためには、低い荷重レベルで進展させたき裂に大荷重を負荷し、ストレッチゾーン形成時のような状況が実現することが必要であると思われる⁽²³⁾、本研究のように小規模降伏条件をみだし、荷重が定常的に繰り返し負荷される場合には、低レベルK値から高レベルK値に切りかわっても、そのような加速現象はみられなかった。一方 Δl_L で示す低レベルK値下の進展跡には微視組織に対応すると思われる低進展速度破面の特徴がみられる。

この幅 Δl_H 、 Δl_L を対応する繰り返し数で除してマイクロな平均速度として図 3.45 に小さな黒印で ΔK_{eff} に対してプロットした。高レベルK値下の速

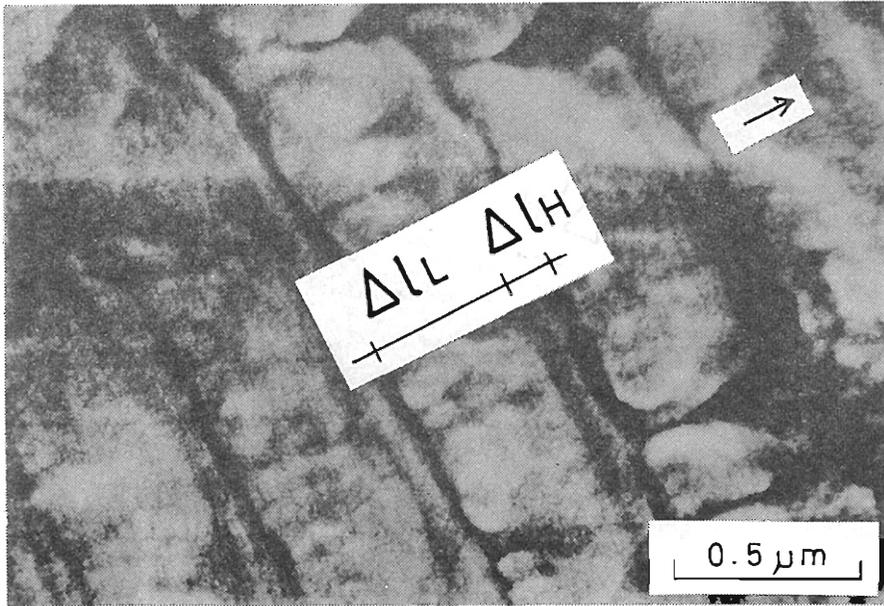


(a) $K_H/K_L = 26 \text{ kgmm}^{-3/2} / 17 \text{ kgmm}^{-3/2}$,
 $N_H/N_L = 40 / 40000$

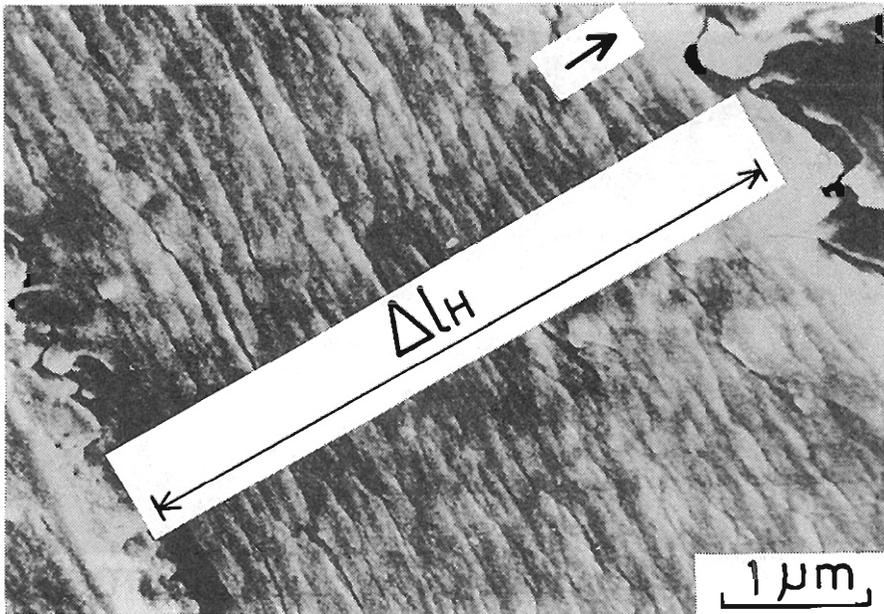


(b) $K_H/K_L = 26 \text{ kgmm}^{-3/2} / 17 \text{ kgmm}^{-3/2}$,
 $N_H/N_L = 40 / 1000$

図 3.43 2 段多重変動荷重下の破面 (A5083-O) Δl_H , Δl_L はそれぞれ高, 低レベルでの進展量, 矢印はき裂進展方向を示す



(a) $K_H/K_L = 24 \text{ kgmm}^{-3/2} / 12 \text{ kgmm}^{-3/2}$, $R = -1$, $N_H/N_L = 2/1024$



(b) $K_H/K_L = 24 \text{ kgmm}^{-3/2} / 12 \text{ kgmm}^{-3/2}$, $R = -1$, $N_H/N_L = 32/128$

図 3.44 2 段多重変動荷重下の破面 (A5083-O) Δl_H , ΔL_L はそれぞれ高、低レベルでの進展量, 矢印はき裂進展方向を示す

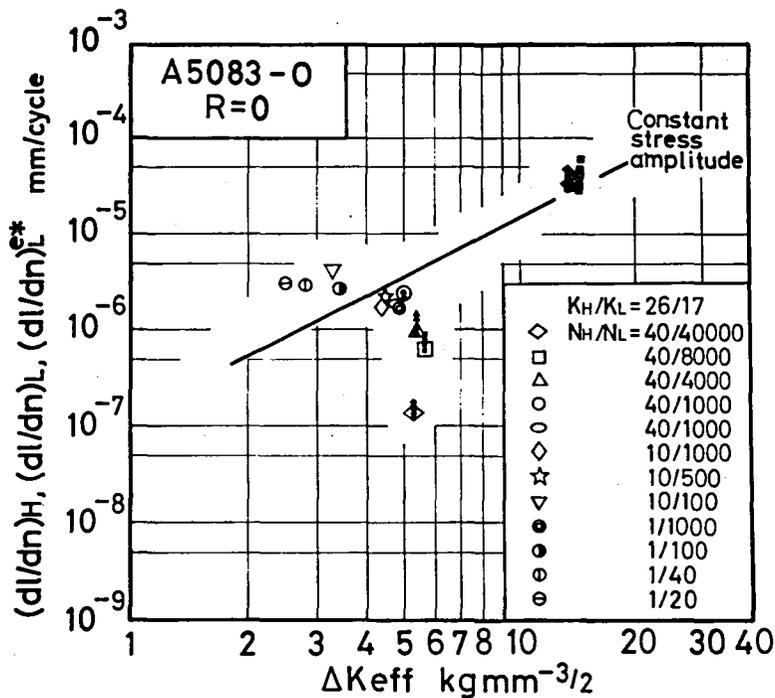


図 3.45 2 段多重試験のき裂進展速度
(ひん度比を変えた場合)

度は $\Delta K_{eff} \approx 14 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 付近の一群であり、 $\Delta K_{eff} \approx 5 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 付近の一群が低レベル K 値下の速度である。また白抜き印は (3-2) 式で整理した低レベル K 値下の推定速度 $(dl/dn)_L^{e*}$ であり、同種の小さい記号で示すマイクロな速度とよく一致している。以下に進展速度に及ぼすひん度比の影響を検討する。

高レベル K 値下の速度は ΔK_{eff} で整理すればひん度比に影響されず、一定振幅試験結果によく一致している。

一方低レベル K 値下の速度は ΔK_{eff} のみでは説明されず、ひん度比によって影響されている。まず N_H の影響として ○, ◇, ⊙ 印 (それぞれ $N_H/N_L = 40/1000$, $10/1000$, $1/1000$) をみるとほぼ 1 カ所に集まっており、 N_H の影響はほとんどないことがわかる。次に N_L の影響としては $N_L = 100$ 程度までは一定振幅結果より若干加速し、 N_L が数百程度になると減速の傾向がみられるようである。しかしこの範囲では全進展量に対する寄与が小さく、測定のばらつきが

大きいので実用上は $N_L = 1000$ 程度まではあまり顕著な影響がないとみて差しつかえなさそうである。しかし N_L が 1000 を超えて $10^4 \sim 10^5$ と大きくなると N_L の影響が著しく現われ進展速度は減少し、遅延が現われている。それは図 3.

46 に示すように低レベル K 値下の進展量 Δl_L は N_L が増加してもある数値、この場合は約 $6 \mu\text{m}$ で飽和し、 ΔK_{eff} が存在するにもかかわらず進展をほぼ停止するためである。先に 3.3.1 節で述べた S 35 C の場合にも N_L が増加すると低レベル K 値下の速度が低下する現象がみられたが、その場合はき裂開口点が上昇し ΔK_{eff} が減少して 0 に近づく結果、低レベル K 値下では進展しなくなると考えられたが、A 5083-O の場合開口点の上昇はみられずに減速が起こる。これが両材料で著しく異なる点である。

上で示した $N_L = 40000$ 程度ではき裂は低レベル K 値下で一時進展を停止したが、さらに N_L が大きくなれば、 ΔK_{eff} が有限の値を持つ以上、き裂は再び進展を開始するものと思われ、その場合の進展挙動の評価が必要となる。ところが低レベル K 値繰り返し数を極めて大きくした試験は容易ではないのでここでは図 3.47 に示すように、 $N_H/N_L = 40/40000$ の 2 段多重試験途中に高レベル K 値の負荷を中断して低レベル K 値のみを繰り返し、その後の進展速度と開閉口挙動を測定し、遅延とその回復の様子を調べた。同図には荷重減少後の進展量と速度の関係を示す。先に述べたように $6 \mu\text{m}$ 程度進展した点でき裂は一時停留し、 1.5×10^6 cycle の繰り返しの後再び進展を開始し、一定振幅試験結果 (4×10^{-6}

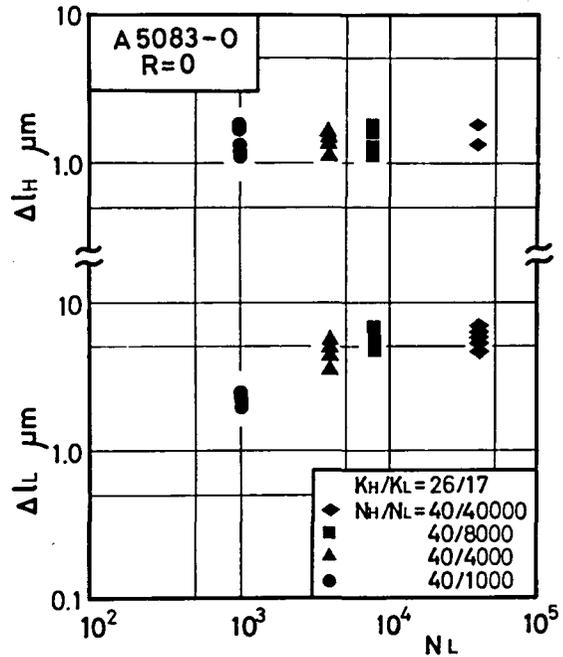


図 3.46 き裂進展量に及ぼす N_L の影響

mm/cycle) に向って復帰してゆく。塑性域寸法との関係でみると、 $\omega_r = 1/2\sqrt{2} \pi \cdot (\Delta K_H / 2\sigma_y)^2$ で示す平面ひずみ繰り返し塑性域内ではきつい遅延を示し、 $\omega_m = 1/2\sqrt{2} \pi \cdot (K_H / \sigma_y)^2$ で示す一方向負荷による塑性域寸法以上

$K_H/K_L = 26/17$
 $N_H/N_L = 40/40000$

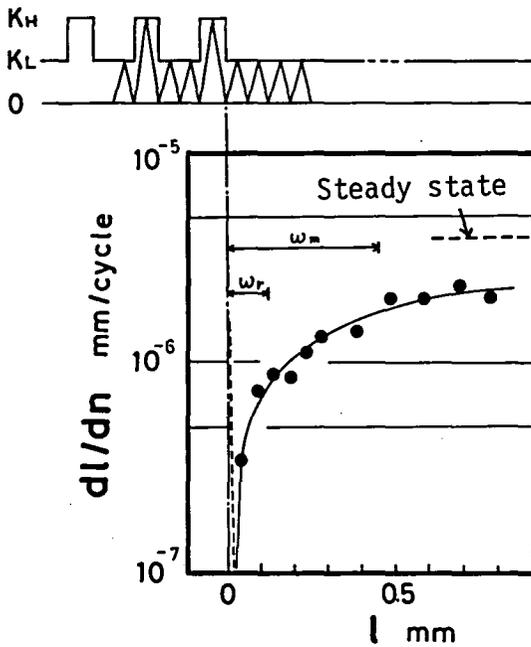


図 3.47 高レベルK値負荷後の低レベルK値下のき裂進展速度

にわたって遅延の影響が残っていることがわかる。なおこの間き裂開口点はほとんど変化しなかった。このように低レベルK値下では進展速度に分布があり、 ΔK_{eff} で整理しても線形則が成り立たない。このように速度が分布する現象については後に3段多重試験を行い、さらに詳しく検討する。

以上で述べたことから、本材料の場合低レベルK値下の速度に対しては N_L の影響が現われるが、一定振幅の $\Delta K_{eff} \sim dl/dn$ 曲線を用いた推定法ではほぼ安全側の推定ができる。

次にK値レベルの影響を調べるため、ひん度比を $N_H/N_L = 10/100$ に固定し、K値レベルは高レベルK値 K_H を $26 \text{ kgmm}^{-3/2}$ と $21 \text{ kgmm}^{-3/2}$ の2種類とし、それぞれに対し低レベルK値 K_L を、 $(K_{max})_{th}$ をはさむように $17 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 、 $15 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 、 $13 \text{ kgmm}^{-3/2}$ の3種類に選び組み合わせた試験を行った。K値履歴としては一定振幅試験のそれとあわせるように配慮し、まず $K_H = 26 \text{ kgmm}^{-3/2}$ について行い、K漸減法で $21 \text{ kgmm}^{-3/2}$ に至らせ $K_H = 21 \text{ kgmm}^{-3/2}$ の試験を行った。本試験条件では1ブロックの進展量が微小なためフラクトグラフィによる測定が困難であり、(3-2)式で $(dl/dn)_L^*$ を求め、

低レベルK値下の速度について整理した。

図 3.48 に $(dl/dn)_L^{e*}$ を K_{max} と ΔK_{eff} に対してプロットしたものをあわせ示す。

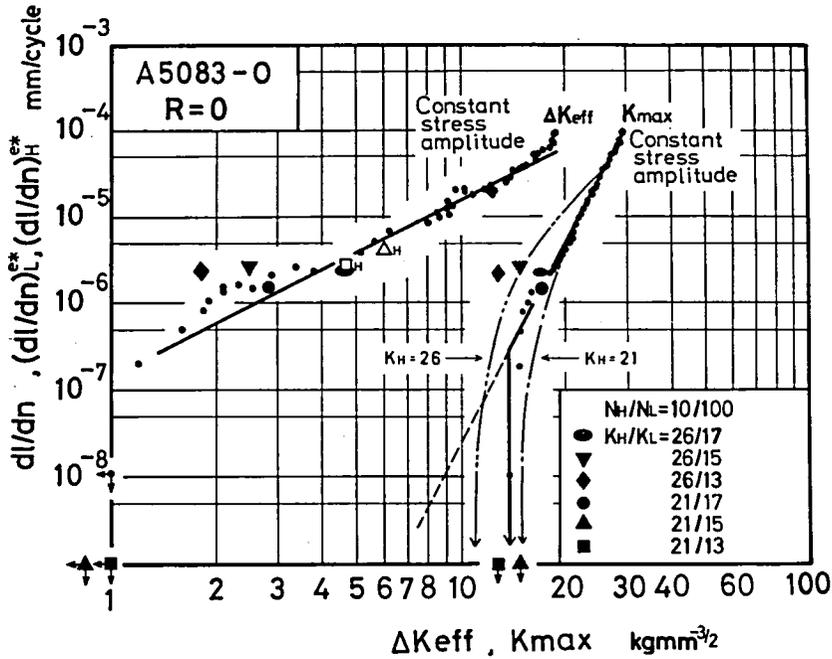


図 3.48 2 段多重試験のき裂進展速度
(K 値レベルを変えた場合)

ΔK_{eff} で整理したものをみると、低レベルK値下で ΔK_{eff} が有限の値となった条件 (●, ▼, ◆, ●印) に対しては $(dl/dn)_L^{e*}$ は有限となり、その値は小さな・印で示す一定振幅結果によく一致している。一方 ΔK_{eff} が 0 となった条件 (▲, ■印) に対しては $(dl/dn)_L^{e*}$ は 0 になったことから、この場合もき裂が進展するか否かは、 ΔK_{eff} の有無が決定していることがわかる。

以上のことから本材料の 2 段多重変動荷重下のき裂の進展則としては、ひん度比、K 値レベルによらず、 ΔK_{eff} で整理した一定振幅荷重による進展曲線を用いれば、ほぼ安全側の推定が可能である。

3.4.1.2 変動荷重下の ΔK_{eff} の推定法と修正進展曲線

自動計測した高低各レベルのき裂開口点 $(K_{op})_H$ 、 $(K_{op})_L$ をそれぞれ K_H 、 K_L に対してプロットしたものを図3.49に示す。なお()を付したものは、低レ

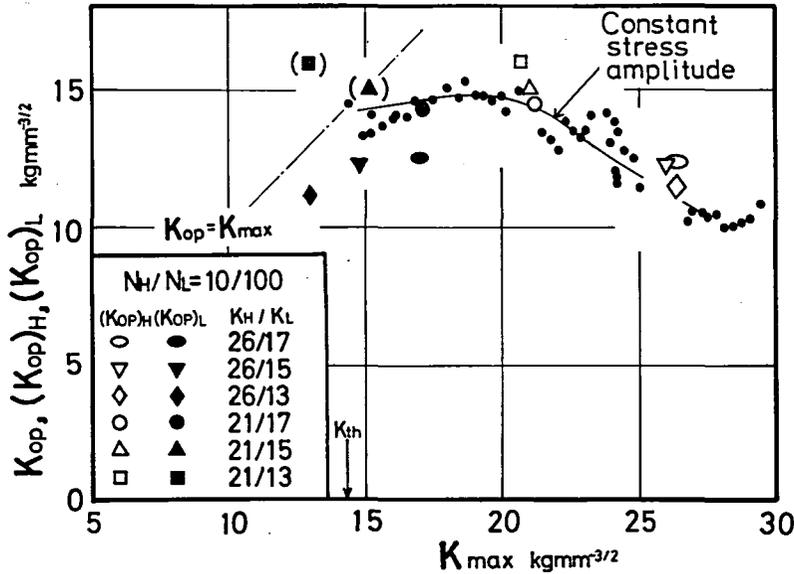


図3.49 2段多重試験のき裂開口点

ベル K 値下では開口せず $K_L \leq K_{op}$ となったもので、この場合の開口点も高レベル K 値下での開口点と同じと考え、その位置にプロットしたものである。同種の記号を用いて白抜き印で $(K_{op})_H$ 、黒印で $(K_{op})_L$ を示すが、各試験条件において $(K_{op})_H$ と $(K_{op})_L$ はほぼ等しく、しかもその値は小さな \bullet 印で示す一定振幅試験における関係の、高レベル K 値 K_H に対する K_{op} とほぼ等しい。

このことと前節の結果をあわせ用いれば進展速度を推定することができる。即ち、一定振幅荷重試験結果から高レベル K 値に対して $(K_{op})_H$ を推定して、高低各レベルの K_{max} 値からこの $(K_{op})_H$ を差し引き、それぞれの ΔK_{eff} を算出して、それに ΔK_{eff} に基づく一定振幅の進展曲線を用いたき裂進展則を適用すればよい。この結論は本材料の場合は $(\Delta K_{eff})_{th} = 0$ となるため、進展則を修正マイナー形と呼ぶ必要がない点を除いては、前節のS 35 Cの場合と全く同じである。

したがって本材料についても修正進展曲線による取り扱いが可能であり、以下にそれについて検討する。図 3.48 に進展速度を K_{\max} について整理したものを示す。

まず実験点についてみると $K_H = 26 \text{ kgmm}^{-3/2}$ の場合は高レベル K 値の存在により低レベル K 値下の K_{op} が低下し、 ΔK_{eff} が増加するため \blacksquare , \blacktriangledown 印の速度は一定振幅結果を上回っており、 \blacklozenge 印については $(K_{\max})_{th}$ 以下でも進展し、 $(K_{\max})_{th}$ は消失していることがわかる。 $K_H = 21 \text{ kgmm}^{-3/2}$ については \blacktriangle , \blacksquare 印の条件では進展がみられず、アルミニウム合金についても実働荷重に対する進展下限界条件が存在することが示されている。以上のような実験点に対し二点鎖線、一点鎖線はそれぞれ $K_H = 26 \text{ kgmm}^{-3/2}$, $21 \text{ kgmm}^{-3/2}$ に対して(3-5)式で求めた修正進展曲線であり、上に述べたような ΔK_{eff} の増減に起因する種々の進展挙動をよく表わしていることがわかる。

S 35 C の場合にも若干ふれたが、変動荷重下の進展速度を推定する方法としてよく行われるものに、 K 値で整理した進展曲線を K_{th} 以下まで直線で延長する修正マイナー則があり、図 3.48 に破線で示したものがそれである。図から明らかかなように実際の進展速度は、 K_H によっては修正マイナー則による推定線より加速される場合があり、また変動荷重下の進展曲線も無限に低い K 値領域まで延長されるわけではなく、ある所から下方に折れ曲がり、実働荷重に対しても進展下限界条件が存在するなどの現象が現われるが、修正マイナー則によったのではこれらの現象を取り扱うことができず、場合によっては危険側の推定を与えることがあるので注意を要する。

3.4.2 3段多重変動荷重試験 ($R = 0$ の場合)

前節の2段多重試験では低レベル K 値の繰返し数が極めて多くなると進展量の飽和がみられた。そこで本節ではその原因を調べるとともに、実働荷重により近いパターンとして3段多重試験を行った。荷重波形、 K 値レベルならびにひん度の定義は図 3.11 に示したものと同一であり、 K 値条件は $K_H/K_M/K_L$ で、ひん度比条件は $N_H/N_M/N_L = n_H/n_M \times n_B/n_L \times (n_B + 1)$ で示す。 n_B

は低，中レベル変動の小ブロック数である。ここでは2段多重試験において遅延の現われるひん度比条件である $N_H/N_L = 40/40000$ に種々の条件の中レベル K 値を重畳させる試験を行った。

自動計測した荷重-変位ヒステリシスの例を図 3.50 に示すように，短い横線で示す開口点はあまり変化していない。

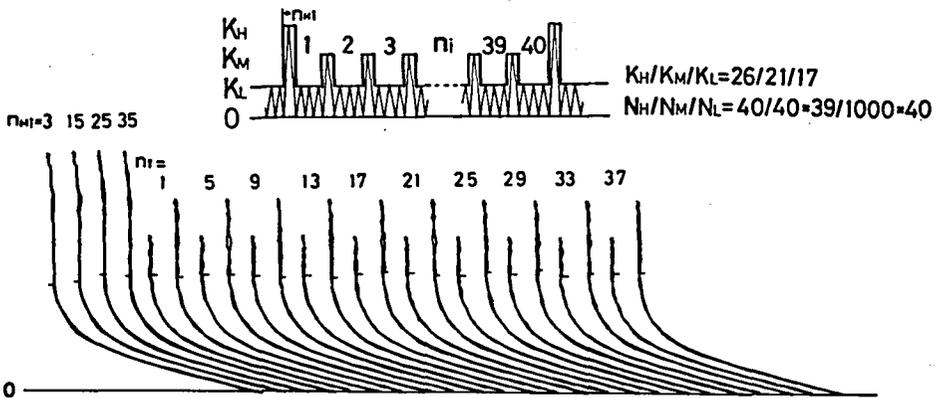


図 3.50 3段多重変動荷重下の荷重-変位ヒステリシス (A5083-O)

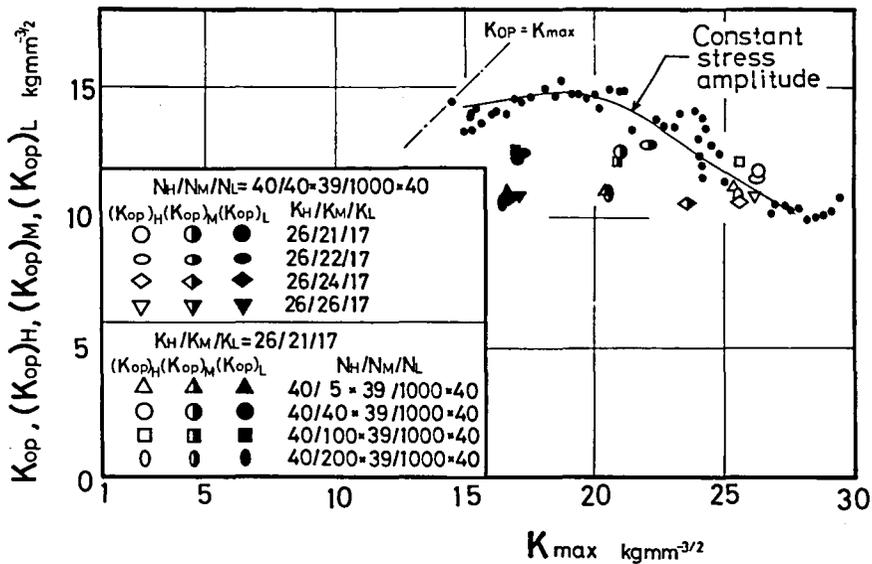


図 3.51 3段多重試験のき裂開口点

そこでここでも K_{op} は各 K 値レベルにおいて算術平均値で代表させることにし、その結果を図 3.51 に示す。各 K 値レベルにおいて K_{op} はほぼ一定であり、しかもその値は高レベル K 値 K_H に対する一定振幅試験における K_{op} とほぼ等しい。

次に進展速度について検討する。なお本節では全条件について破面観察が可能であり、速度は全てフラクトグラフィによるミクロな速度を用いた。破面には図 3.52 に示すような各 K 値レベルの進展量に対応する縞模様が観察される。1 小ブロックあたりの低レベル K 値下の進展量 Δl_L 、中レベル K 値下の進展量 Δl_M を 1 ブロック内の小ブロックの繰り返しの進行 n_i に対してプロットしたものを図 3.53 に示す。○印で示す Δl_M はほぼ一定であるのに対し、●で示す Δl_L は ΔK_{eff} がほぼ一定であるにもかかわらず変化しており、初期に比較的大きく、急激に減少して $n_i = 5 \sim 7$ (き裂進展量で約 $10 \mu\text{m}$ に対応) で極小値をとった後、徐々に増加している。

このような低レベル K 値下の進展速度の分布は、2 段多重試験において n_L が小さい間は若干の加速を示し、逆に n_L が大きくなれば約 $6 \mu\text{m}$ で進展量が一時飽和する挙動とよく一致している。即ち、 K 値を高レベルから低レベルに切り換えた直後数百サイクル以内は比較的速く進展するが、少し進展した位置でき裂進展に対する抵抗が増大して遅延現象を生じ、約 $6 \sim 10 \mu\text{m}$ 進展した位置で最も遅くなり、2 段多重試験ではその位置で低レベル K 値下の進展は停止するが、3 段多重試験の場合は中レベル K 値の存在によりその領域を脱出し、再び進展速度が増加してゆくものと思われる。このように A5083-O においては幾分複雑な進展挙動を呈することがわかった。

1 ブロック内の平均速度についてみると、図 3.54 に白印で示す高レベル K 値下の速度はほぼ一定振幅試験結果に一致している。それぞれ右半黒、黒印で示す中、低レベル K 値下の速度はいずれも一定振幅結果より低下しているが、これは前述のミクロに分布する速度を平均したことによっている。

黒印の低レベル K 値下の速度をみると、○印と◇印の間に分布している。○印、◇印はそれぞれ 2 段多重試験の $N_H/N_L = 40/1000$ と $N_H/N_L = 40/40000$ の場合であり、3 段多重パターンにおいて $K_M = K_H$ となった極限と、中レベル K

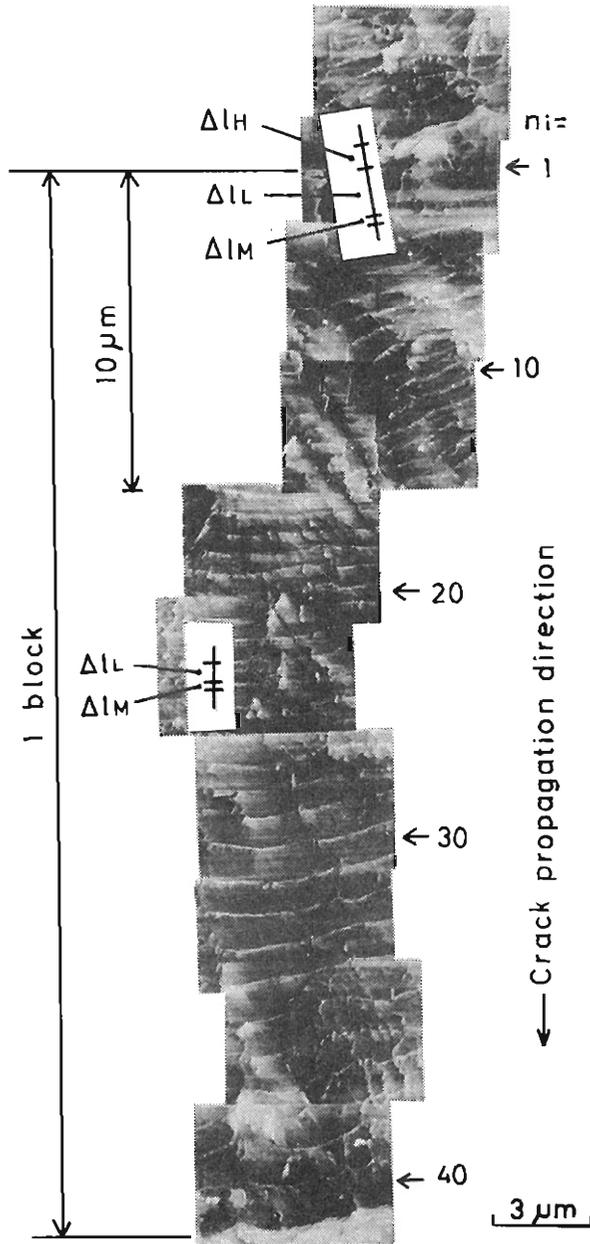


図3.52 3段多重変動荷重下の破面(A5083-O)

$$K_H/K_M/K_L = 26 \text{ kgmm}^{-3/2} / 21 \text{ kgmm}^{-3/2} / 17 \text{ kgmm}^{-3/2}$$

$$N_H/N_M/N_L = 40 / 40 \times 39 / 1000 \times 40$$

Δl_H , Δl_M , Δl_L はそれぞれ1小ブロックあたりの
高, 中, 低レベル下の進展量

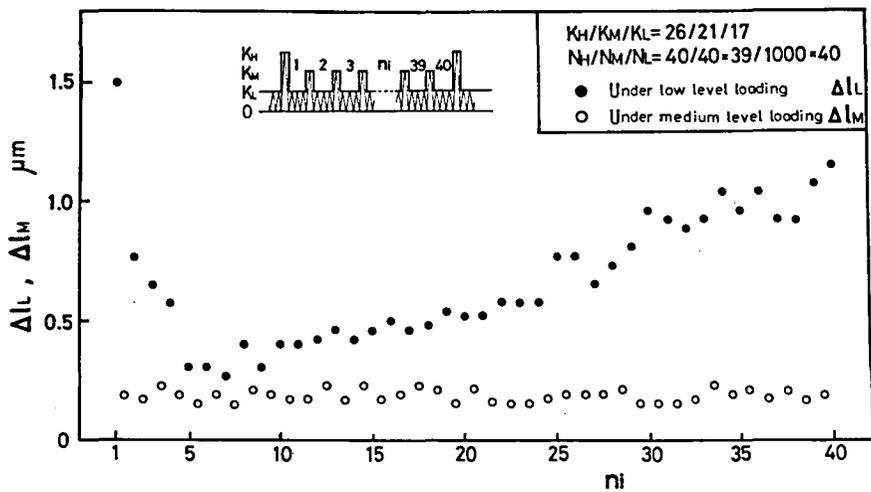


図 3.53 3 段多重試験の 1 ブロック内の小ブロックによる進展量の変動

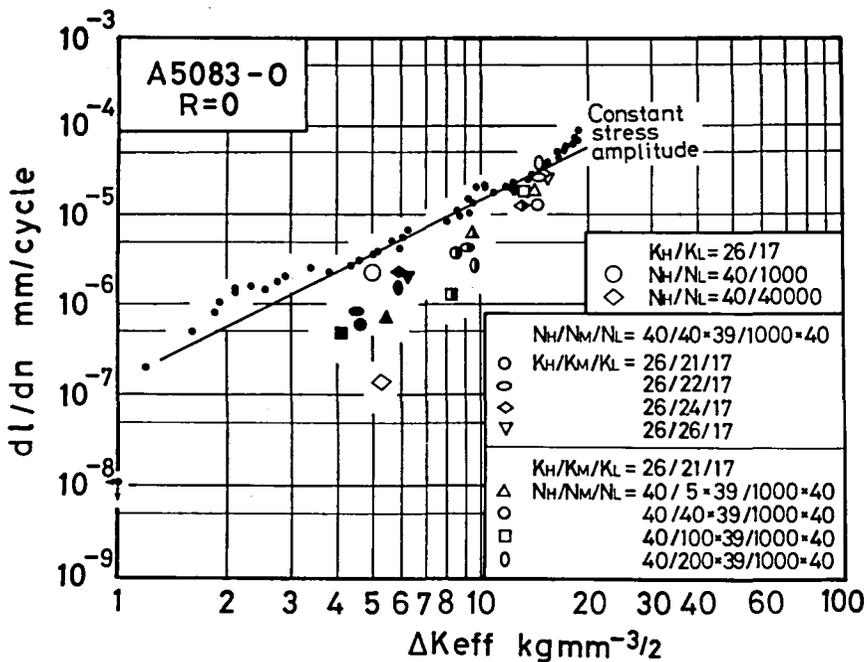


図 3.54 3 段多重試験のき裂進展速度

値を荷重しない極限に対応している。これより 3 段多重試験では中レベル K 値の存在により低レベル K 値下の速度は◇印より増加するが、○印で示す $K_M = K_H$

となる極限である 2 段多重条件が安全側の限界を与えることがわかる。

したがって 2 段多重条件に対しての安全側の推定線は自動的に 3 段多重条件に対しても安全側の推定線となることがわかり、3.4.1 節の結果から一定振幅試験の $\Delta K_{eff} \sim dl/dn$ 関係は安全側の推定線となる。

本章では高レベル K 値（厳密には最大の K レンジペア）の応力比が $R = 0$ の場合のみを取り扱ったが、異なった R の場合にも同様の考え方が適用できるものと思われる。

3.5 結 言

本章では K_{th} 条件を含む低 K 領域における実働荷重下の疲労き裂の開閉口挙動と進展挙動を明らかにした上で、それらの結果に基づいたき裂進展速度推定法を見出すことを目的とした。

試験は中炭素鋼 S 35 C と耐食性アルミニウム合金 A 5083 - O について、定常な片振りの 2 段および 3 段多重変動荷重、低レベル K 値が平均を有する 2 段多重変動荷重、重畳変動荷重および擬似ランダム変動荷重を負荷してき裂進展試験を行い、マクロなき裂進展挙動の測定に加えてフラクトグラフィによるマイクロな取り扱いを併用して検討を行った。得られた結果を要約すると次のようになる。S 35 C については、

(1) 2 段および 3 段多重変動荷重下では

(1.1) $(K_{max})_{th}$ のみならず $(\Delta K_{eff})_{th}$ も消失し、それ以下の K 値によってもき裂が進展する。

(1.2) き裂進展速度は、平均荷重が存在する場合も含め、一定振幅試験の $\Delta K_{eff} \sim dl/dn$ 関係を下限値以下に直線で延長した ΔK_{eff} に関する修正マイナー形の進展則で推定してほぼ差しつかえない。

(1.3) き裂開口点 K_{op} は荷重変動にかかわらず各 K 値レベルを通じてほぼ一定であり、通常それは高レベル K 値に対する一定振幅試験結果の K_{op} に等しくなる。

(1.4) 低レベル K 値が極めて多数回連続して負荷される場合は K_{op} が上昇するこ

とがあるが、適当な中レベルK値の存在により K_{op} は容易に下がりうるため、任意に変動する荷重に対しては K_{op} の上昇を見込まず、(1.3)で述べたように考える方が安全である。

(1.5)(1.2)と(1.3)を組みあわせて、一定振幅荷重試験結果から、定常な多段多重変動荷重下のき裂進展量を推定するK値に関する修正進展曲線を求めておく方法を提案した。即ち、一定振幅試験の $K_{max} \sim K_{op}$ 関係から高レベルK値 K_H に対する K_{op} を読みとり、これを用いて変動荷重下の ΔK_{eff} を算出し、 ΔK_{eff} に基づく修正マイナー形の推定法を用いて求めることができる。

(2) 広帯域変動荷重に対する波形カウント法としては ΔK_{eff} についてのレンジペアカウント法が適当である。

(3) 定常ランダム荷重の場合には、き裂開口点 K_{op} はK値変動にかかわらず1ブロックを通じて一定の値をとり、しかもそれは最大のKのレンジペア $(\Delta_{rp}K)_{max}$ とその応力比に対する一定振幅試験の時の K_{op} と等しくなる。

このことを用いてK値のレンジペア・ミーンの2元ひん度分布、もしくはK値の極値列から ΔK_{eff} のレンジペア分布を算出し、 ΔK_{eff} に関する修正マイナー形の推定法によりき裂進展量を推定することができる。

A5083-O材についても(5)に示す点では若干異なるが、ほぼS35Cの場合と同様で、

(4) 応力比 $R=0$ の定常な2段および3段多重変動荷重下のき裂進展量は、S35Cと同様の方法で推定を行えばほぼ安全側の結果が得られ差しつかえないが、 K_{max} に基づく修正マイナー則による推定は危険側の見積りを与えることもあり、不適当である。

(5) A5083-OはS35Cと異なり、一定振幅荷重下で $(K_{max})_{th}$ は存在するが、 $(\Delta K_{eff})_{th}$ は非常に小さくほぼ0であった。また2段多重試験で低レベルK値の繰り返し数が非常に多くなっても、S35Cと異なり K_{op} は上昇せず ΔK_{eff} は変らない。しかし進展速度が減少し進展量が飽和することおよびこれが中レベルK値の負荷により破られることはS35Cとほぼ同様の傾向であった。

第 3 章 の 参 考 文 献

- (1) Kikukawa, M., Jono, M. and Tanaka, K., Proc. of ICM II (1976), 716.
Kikukawa, M., Jono, M., Tanaka, K. and Kondo, Y., ICF 4, vol. 2, Waterloo, Canada (1977), 1109.
Kikukawa, M., Jono, M., Tanaka, K. and Kondo, Y., Int. J. of Fracture, 13 (1977), 702.
- (2) 小寺沢・志茂, 材料, 25-276 (1976), 875.
- (3) 菊川・城野・近藤, 材料, 27-302 (1978), 1096.
- (4) 菊川・城野・近藤・山木・山田, 材料, 29-317 (1980), 155.
- (5) Brown, W. F. Jr. and Srawley, J.E., ASTM STP 410 (1967).
- (6) Feed, C.N. and Krafft, J.M., J. of Materials, 1-4 (1966), 770.
- (7) Shih, C.F., de Lorenzi, H. G. and Andrews, W. R., Int. J. of Fracture, 13 (1977), 544.
- (8) Congleton, J., Int. J. of Fracture, 14 (1978), R65.
- (9) 北川・小島, 日本機械学会講演論文集, № 780-3 (1978), 161.
- (10) 太田・佐々木・小菅, 日本機械学会論文集, 44-386 (1978), 3354.
- (11) 河本・石川・尾上, 日本機械学会講演論文集, № 700-3 (1970), 65.
- (12) 菊川・大路・城野・溝口, 日本機械学会論文集, 35-278 (1969), 2020. ; 溝口, 大阪大学博士論文, (1972).
- (13) 中村・田中, 「機械の疲れ寿命算出法」, (1972), 養賢堂.
- (14) Endo, T., Mitsunaga, K., Takahashi, K., Kobayashi, K. and Matsuishi, M., Proc. 1974 Symp. on Mech. Behav. of Materials, (1974), 371.
- (15) 薄, 東京大学博士論文, (1976). ; 岡村・酒井, 日本機械学会講演論

- 文集, № 790-9 (1979), 89.
- (16) 竹内・山本, 日本造船学会論文集, 131 (1972), 97.
 - (17) 星谷, 「確率論手法による振動解析」, (1974), 鹿島出版会.
 - (18) 山川, 日本機械学会誌, 73-621 (1970), 1401.
 - (19) 岡村, 「強度の統計的取扱い」, (1979), 培風館.
 - (20) 薄・岡村, 日本機械学会論文集, 44-386 (1978), 3322.
 - (21) 薄・岡村, 日本機械学会論文集, 45-390 (1979), 92.
 - (22) 小寺沢, 材料, 23-252 (1974), 730.
 - (23) 平野・小林・中村・中沢, 日本機械学会論文集, 46-410 (1980),
1040.

第4章 き裂開閉口挙動に及ぼす荷重履歴の影響と それを考慮した疲労き裂進展試験法

4.1 緒 言

低K領域の一定振幅荷重下のき裂進展特性は現在ではK漸減試験によって求めている場合が多く、前章でもそれにならったが、そのような方法が用いられるようになった経緯をふり返り、その妥当性を検討してみる。

疲労き裂の問題がとりあげられるようになったのは、破壊力学の体系化以前にき裂の存在により耐久限が低下する現象に関連して考慮されたのがはじまりであり、Isibasi⁽¹⁾⁽²⁾は予き裂長さが長い程耐久限が低くなることを報告している。またFrost⁽³⁾は同様の研究を行い、予き裂長さ l と耐久限 N の関係を $\sigma^3 l = C$ の形に整理している。以上はいずれも試験片の破断、非破断を対象としたものであって、き裂の進展過程は取り扱われていなかった。

その後Parisら⁽⁴⁾が疲労き裂進展過程に対して破壊力学概念を適用し、き裂進展速度が応力拡大係数範囲のべき乗で表わされることを示して以来、疲労き裂の問題はK値による取り扱いが主流となり、き裂の進展下限界条件も K_{Ih} 条件として特性づけられるようになった。それに伴い試験法も変化し、本来ならばき裂進展曲線は平滑材のS-N曲線のように、各K値レベルにおいて試験片ごとに一定振幅K値を負荷するという方法で求めるべきであるが、実験の簡便さから1本の試験片に種々のレベルのK値を負荷し、広範囲の進展曲線を求め、それを一定振幅K値試験結果として採用するのが一般的となっている。その根拠としては、K値が任意の試験片形状、応力、き裂長さに対してき裂先端の応力場を記述できるパラメータであり、前段階のK値の影響領域、たとえば塑性域寸法程度き裂を進展させれば最初からそのK値を負荷した場合と同じ進展速度が得られると考えられることを前提としていることがあげられる。

このような考えに基づいて比較的高いK値領域では公称応力一定あるいはK制御によるK漸増試験が採用され、低K領域ではき裂進展下限界条件を求める必要上、適当なK値レベルから応力を減少させK漸減法によって進展速度を求め、き

裂が停留した条件を K_{th} 条件として採用するのが一般的な方法である。

しかしながら現実の構造物では定常荷重による K 漸増履歴を受けることが多く、このような荷重下でのき裂進展開始問題を取り扱う場合には、以下に実証するが、Frostが採用したように焼鈍した予き裂材に一定振幅荷重を負荷して進展下限界条件を求め、それを破壊力学的に解釈するのが望ましい。即ち、整理法としては破壊力学概念の方が優れているが、荷重前歴の影響を受けない状態で材料が示す最小の K_{th} を求める試験法としてはFrostの方法の方が望ましいと思われる。なぜならば現実に報告されている試験結果では、き裂強さ^{(5)~(7)}を限界き裂長さ⁽¹¹⁾以上のき裂について K 値に換算すると、鋼材に対し $K = 10 \sim 18 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 程度の値となり⁽¹¹⁾、通常の K 漸減法で求められているき裂進展下限界条件 $K_{th} = 15 \sim 30 \text{ kgmm}^{-3/2}$ ⁽⁸⁾に比してかなり小さな値となること、および K 漸減法では K 値の漸減率が進展速度に大きな影響を及ぼすこと⁽⁹⁾などから、現実に行われている K 漸減試験で得られた進展曲線や進展下限界値の中には、前歴の影響を受けないき裂状欠陥等からの進展開始問題に応用するには不適當なものも多いと考えられるからである。このように K 漸増過程と漸減過程の進展挙動に差があることに対し、著者はその差が両過程におけるき裂開閉口挙動の差に起因しているのではないかと考え、本章では焼鈍した疲労予き裂から K 漸増法で疲労き裂を進展させ、き裂開閉口挙動を測定し、 K 漸減試験の結果と比較して K 値履歴の影響を調べ、それに基づいて K 値前歴の影響を受けない条件に対する一定振幅 K 値下の進展挙動を求める試験法を提案する。

4.2 供試材料および試験方法

供試材料は鉄系材料としてS35C、HT80、アルミニウム系材料としてA5083-O、ZK141-T7を選んだ。材料の化学成分、機械的性質を表4.1、4.2に示す。試験は動電形面内曲げ試験機により周波数40Hz、応力比 $R = 0$ の片振りで行った。

焼鈍した予き裂材の進展挙動はS35Cについて調べた。その際には比較的短いき裂を用いて進展開始条件を求める試験を含むため、サイドグループの切欠き効

表 4.1 材料の化学成分

(%)

Material	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
S35C	0.38	0.72	0.25	0.01	0.015	0.04	0.02	0.13		
HT80	0.12	0.83	0.33	0.011	0.009	0.25	0.81	0.44	0.40	0.04
	Fe	Mn	Si	Mg	Zn	Cu	Ti	Cr	Zr	V
A5083-0	0.21	0.46	0.09	4.2	very small	0.01	0.03	0.17		
ZK141-T7	0.19	0.35	0.08	1.8	4.7	0.18	0.05	0.14	0.17	0.01

表 4.2 材料の機械的性質

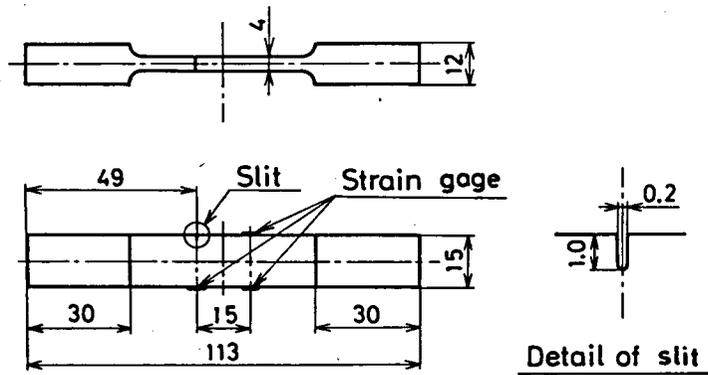
Material	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
S35C	38.0	62.4	23.7
HT80	78	83	34
A5083-0	14.3 *	30.3	26.0
ZK141-T7	31 *	38	18

* 0.2% proof stress

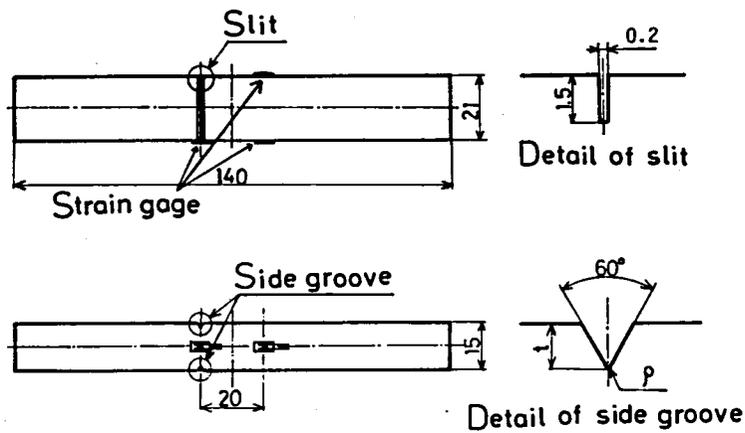
果が重疊することを懸念し、4.3節の場合のみサイドグループを付けないこととし、また、き裂長さ測定 of 分解能を良くするため寸法の小さい図 4.1 の試験片(a)を用いた。この場合き裂長さ分解能は使用する試験領域で約 10 μm である。破面に残ったビーチマークの例を図 4.2 に示すが、き裂は板厚中央付近で若干先行している。

限界き裂長さより短いき裂の進展下限界条件に関しては、応力拡大係数によって整理してもき裂長さの影響が現われ、短いき裂の K_{th} は長いき裂のそれよりも低くなるということが明らかにされており⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、小さな欠陥からのき裂進展問題には考慮が必要であるが、それは本研究の目的ではないので、ここでは長いき裂としての特性を示す領域で試験を行った。

各種の材料について前歴の影響を受けないき裂進展特性を求める試験には、図



(a)



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

(b)

図4.1 試験片形状

4.1に示す(b)のサイドグループ付き試験片を用い、サイドグループの切欠き効果があまり問題にならない程度に十分長くき裂を進展させてから試験を行った。

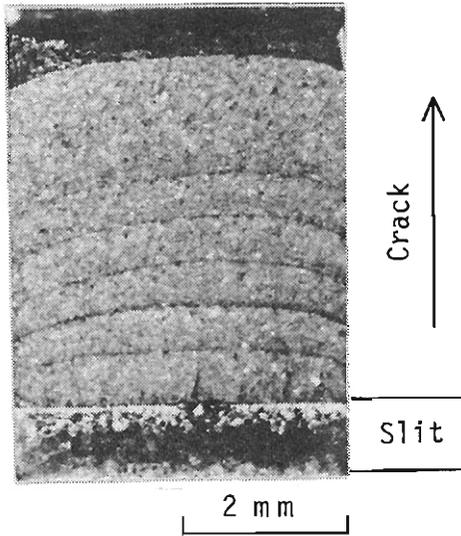


図 4.2 サイドグループを付けない場合のビーチマーク

予き裂作成には単一の貫通き裂で、スリットの影響が少なく、しかも小規模降伏を満たし易いように考慮し、予き裂をスリット底から 1 mm とし、スリットを含めたき裂長さが 2 mm になるようにした。き裂強さ試験では試験条件に対するき裂開口点より低い開口点を有する理想き裂状態の予き裂を作成する必要がある。そこで予き裂は導入時のき裂開口点の上昇を抑えるため応力比 $R = -1$ で入れ、

4.3 真空焼鈍した予き裂材の疲労き裂進展挙動

4.3.1 き裂進展開始条件と K_{th} 条件の比較

予き裂材の進展挙動と比較するため、まず通常の K 漸減法により K_{th} 試験を行った。 K 値履歴は $K_{max} = 40 \text{ kgmm}^{-3/2}$ から、 K 減少率 $dK_{max}/dl = -10 \text{ kgmm}^{-3/2}/\text{mm}$ で K 値を漸減させた。進展曲線は図 4.4, 4.6 に小さな \bullet 印で示すもので、進展下限界条件は $(K_{max})_{th} = 21.6 \text{ kgmm}^{-3/2}$, $(\Delta K_{eff})_{th} = 8.0 \text{ kgmm}^{-3/2}$ であった。

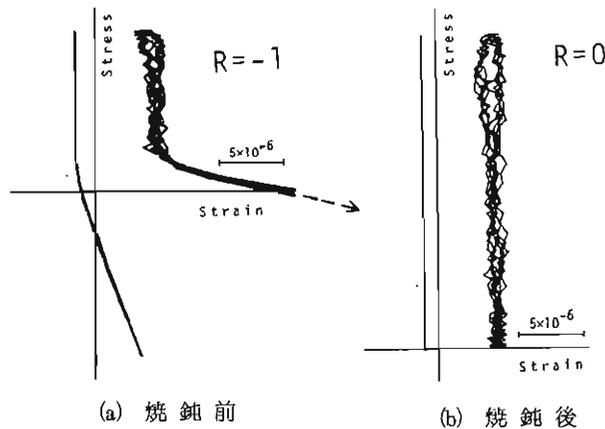


図 4.3 焼鈍前後の荷重変位ヒステリシス
それぞれの図で右側のヒステリシスは横軸を拡大したもの

その後 600℃, 1時間の真空焼鈍を施し, 残留応力除去を行った(以下これを予き裂材と称する)。図 4.3 に焼鈍前後の荷重-変位ヒステリシスを比較して示すが, 真空焼鈍によってき裂開口点はほぼ 0 に低下し, 理想き裂状態になっていることがわかる。

焼鈍した予き裂からのき裂進展試験は 3 種類の K 値履歴について行った。その結果を図 4.4 に示す。即ち,

(i) 図 4.4 の○印は公称応力 $\sigma_{gross} = 6.4 \text{ kg/mm}^2$ 一定で負荷したもので, き裂進展とともに K 値が増加する試験である。き裂が進展を開始した K_{max} の初期値 (K_{max})_i は $16.8 \text{ kgmm}^{-3/2}$ であり, K

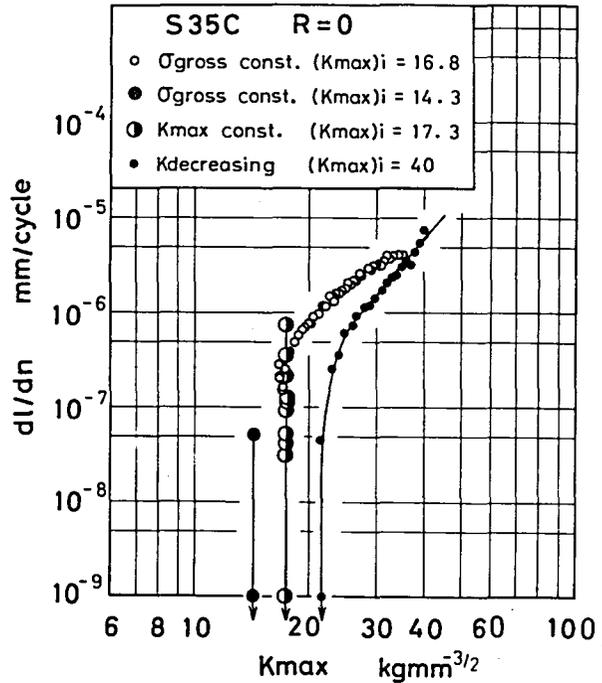


図 4.4 焼鈍予き裂材の $K_{max} \sim dl/dn$ 関係

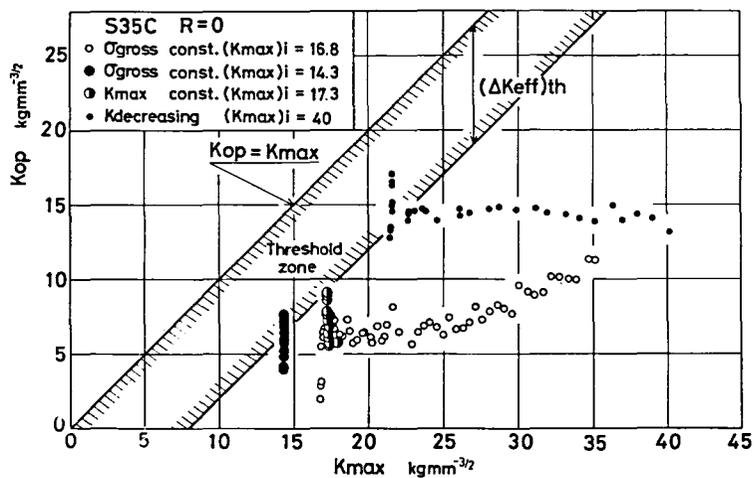


図 4.5 焼鈍予き裂材のき裂開口点

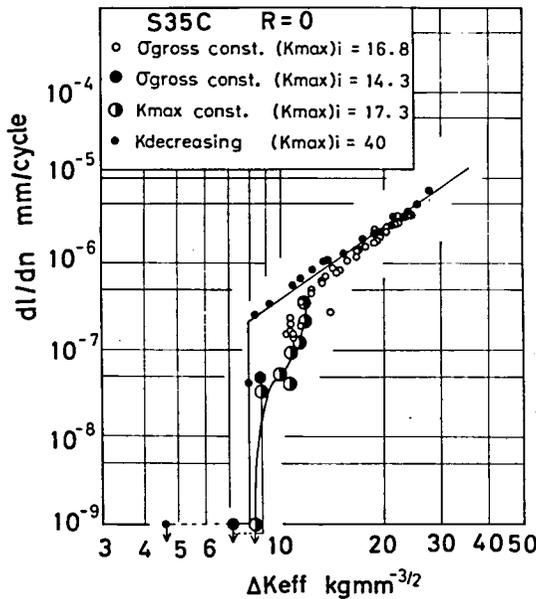


図 4.6 焼鈍予き裂材の $\Delta K_{eff} \sim dl/dn$ 関係

漸減法による $(K_{max})_{th}$ の値 $2.16 \text{ kgmm}^{-3/2}$ より低い値である。き裂進展の様相としては、進展開始後速度はいったん低下し、極小値をとった後増加にうつり、小さな \bullet 印の K 漸減試験の場合より速くなっている。この様相はき裂開口挙動によって良く説明される。即ち、図 4.5 にき裂開口点 K_{op} を \circ 印で示すように、最初ほぼ 0 であった K_{op} は進展初期に上昇し、やがて原点を通る直線（き裂開口比 U が一定の特性）に乗るとい

定常的な挙動に漸近してゆく。それに従って ΔK_{eff} は進展とともにいったん減少し、極小値をとった後増大する。このような ΔK_{eff} の変化に起因して上述の速度変化が起こるのであり、図 4.6 に示すように ΔK_{eff} で整理すればほぼ一本の帯で表わせる。また図 4.4 で \circ 印の K 漸増過程の速度が、小さな \bullet 印の K 漸減過程の速度より速いのは、図 4.5 に示すように K_{op} が \circ 印で示す焼鈍予き裂の方が、小さな \bullet 印の K 漸減過程の場合より低く、したがって ΔK_{eff} が大きいためであり、図 4.6 のように ΔK_{eff} で整理すれば過渡的な、変動の急激な部分を除き両者はほぼ一致する。

(ii) 図 4.4 の大きな \bullet 印は $\sigma_{gross} = 5.4 \text{ kg/mm}^2$ 一定で負荷したものであり、き裂はわずか（約 $10 \mu\text{m}$ ）進展した後、停留した例である。それは図 4.5 に K_{op} を示すように、進展とともに K_{op} が上昇し、斜線で示す ΔK_{eff} が $(\Delta K_{eff})_{th}$ 以下となるスレッシュホールドゾーン（threshold zone）に入ったため、図 4.6 に示すようにき裂が停留したものである。

(iii) 図 4.4 の \circ 印は進展とともに荷重を減少し、 K_{max} が $17.3 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 一定と

なるように制御したもので、この場合き裂は進展を開始するが、き裂長さの増加とともに K_{op} が上昇するため、約0.15mm進展した後スレッシュホールドゾーンに入りき裂は停留した。図4.7に破面写真を示すが、き裂が進展し停留に至ったことが確認される。このことよりき裂強さは進展開始の限界値ではなく、進展開始したき裂が連続進展せず停留に至る条件であるといえる。

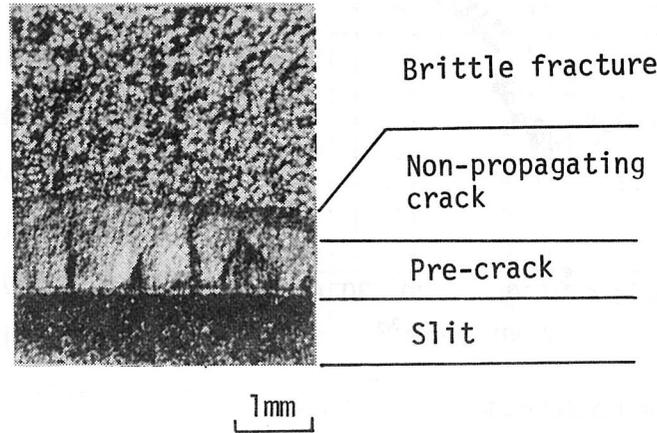


図4.7 焼鈍予き裂材の停留き裂
 $K_{max} = 17.3 \text{ kgmm}^{-3/2}$ ($R = 0$)

以上より、焼鈍した予き裂からの進展挙動は最初き裂開口点が0であったものが、き裂進展とともに K_{op} が上昇し、それに起因して速度が低下し、図4.5の大きな●、○印のようにスレッシュホールドゾーンに入り停留するものと、○印のように K_{op} が上昇してもスレッシュホールドゾーンに入らず連続進展するものに分けられる。また予き裂材のき裂強さも K_{th} 条件も ΔK_{eff} についてみる限り同一で、 $(\Delta K_{eff})_{th}$ が決定しており、 K_{max} についての両条件の差はそれを求めた際の K_{op} の差が原因となっていることがわかった。

ここで $(K_{max})_{th}$ としてどの値を採用するのが適当かについて考えてみる。焼鈍した予き裂の場合は K_{op} が低いために、 K_{max} が $(K_{max})_{th}$ 以下でも進展開始する。しかし K_{max} が $(\Delta K_{eff})_{th} < K_{max} \leq (K_{max})_{th}$ の場合はき裂が進展開始しても、 K_{op} の上昇とともに停留に至る。したがって $(K_{max})_{th}$ としては漸増するK値下で停留する K_{max} 値のうちの最大のものをとればよい。本材

料の場合は試験範囲内では(iii)で求めた $17.3 \text{ kgmm}^{-3/2}$ が適当である。ただし、後に示すように K_{op} が定常値まで上がりきるためには塑性域寸法の2～3倍程度の進展を要するため、き裂が停留するのは予き裂先端から塑性域寸法の2～3倍程度進展した点である。したがって連続進展させないためにはこの点の K_{max} 値を $(K_{max})_{th}$ より低く抑えておくことが必要で、たとえ進展開始時の $(K_{max})_i$ を $(K_{max})_{th}$ より低くしておいても、試験片寸法によっては塑性域寸法の2～3倍程度進展すれば K 値が上昇して $(K_{max})_{th}$ を超えてしまい破断に至ることがある。図4.4の○印がその例である。

なお、 K_{max} を $(\Delta K_{eff})_{th}$ 以下におさえておけば予き裂長さにかかわらずき裂進展は生じない。

従来の予き裂材の進展挙動に関する研究では、小林ら⁽¹²⁾ はき裂強さはき裂が進展を開始しない限界応力であると報告し、また石橋⁽¹³⁾ も「き裂材では、すでに存在するき裂の先端から進展し始めた疲労き裂が、同じ大きさの荷重の下で進行を止め、き裂先端に停留する現象はない」と述べている。しかしこれらの結論は必ずしも一般的であるとはいえない。その理由は、上述したようにき裂が停留するか否かはき裂進展に伴う K 値の上昇とき裂開口点 K_{op} の上昇のバランスにより決定されるからである。一定振幅応力下では K 値はほぼ \sqrt{I} に比例して上昇するため、小さな寸法の試験片の短いき裂長さの範囲ではき裂長さ増加による K 値の増加が著しいため、 K 値の増加の方が K_{op} の上昇より著しく、スレッシュホールドゾーンに入らないためき裂の停留は起こらない。しかし(iii)の K_{max} 一定の場合には停留したことから、大きな寸法の試験片で長い予き裂を有する場合は、き裂進展に伴う K 値の増加は緩やかであり、ほぼ K_{max} 一定のような状況が実現されるため、このような場合はき裂材でも一定振幅応力下で停留き裂が生じうると思われる。

4.3.2 き裂開閉口挙動に及ぼす K 値履歴の影響

前節の結果によれば通常の K 漸減試験によったのでは定常なき裂開閉口挙動が得られないため、荷重前歴の影響を受けない進展挙動を得ることができないこと

が明らかになった。その原因を調べるため、本節では予き裂材に階段状に増減するK値履歴を与え、荷重前歴がき裂開口挙動に及ぼす影響を調べる試験を行った。その結果を図4.8に示す。き裂開口点 K_{op} はK値が増加する場合は各レベルとも \leftrightarrow で示すように、 $\{ \leftrightarrow \text{は一方方向負荷による塑性域寸法 } \omega_m = 1/2\sqrt{2} \pi \cdot (K_{max}/\sigma_y)^2 \text{ (}\sigma_y \text{は降伏応力) の3倍を示す} \}$ 塑性域寸法の3倍程度進展すれば定常値に達しているが、最終段でK値を減少させた場合は破線で示す定常値に達するまでに、前段階のK値に対する塑性域寸法の約10倍程度を要している。また別の条件では図4.9のように、K値を漸減後一定に保った場合は K_{op} の低下がみられなかった場合もある。このように一度上昇した K_{op} は次の K_{op} の低下を妨げるためか、なかなか低下しにくいようで、K値が減少し K_{op} が低下する場合には、K値が増加し K_{op} が上昇する場合よりはるかに長く前歴が影響するようである。なお図4.1(b)に示したサイドグループ付試験片においても同様の現象が起こることを確かめた。

図4.8で得られた K_{op} の定常値を K_{max} に対して示したものが図4.10の○印である。前節で得たK漸増、漸減の試験結果を実線で示しているが、○印と比較

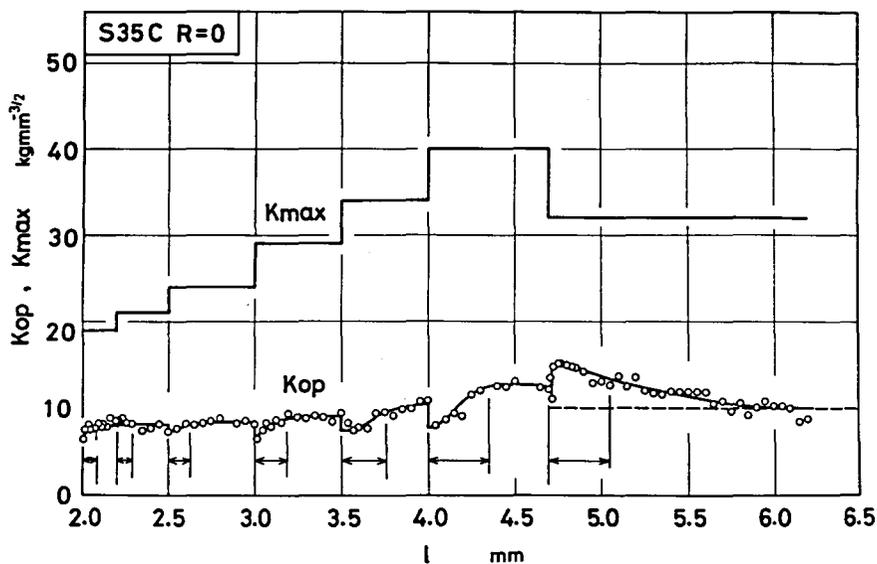


図4.8 き裂開口点に及ぼすK値履歴の影響

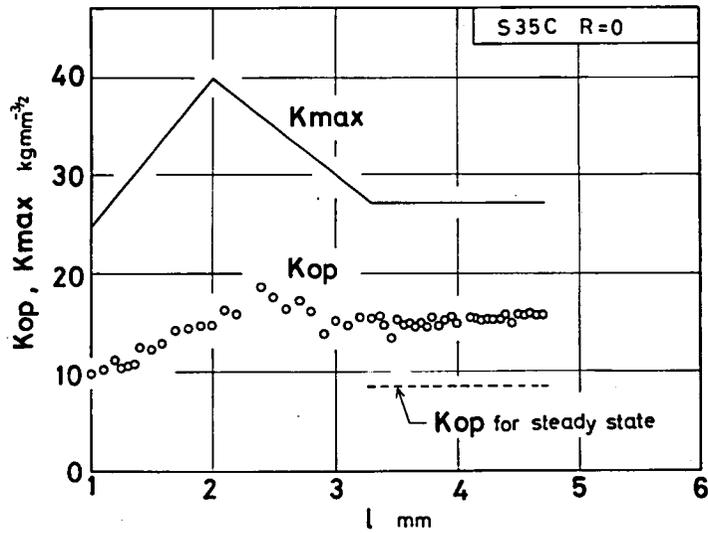


図 4.9 き裂開口点に及ぼすK値履歴の影響

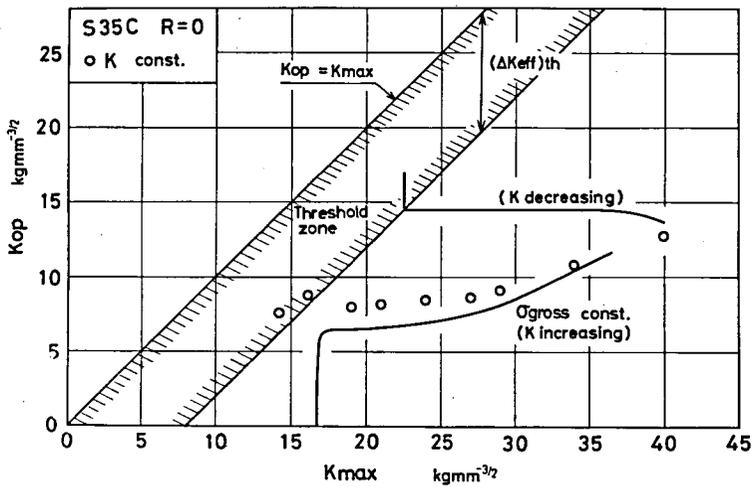


図 4.10 一定振幅K値下と漸増，漸減K値下のき裂開口点の比較

するとK漸増法の場合はほぼ定常値に近く，若干低い値となっているが，K漸減法の場合は上述のように影響域が大きく，それを抜け出さないうちにK値を減少させるため，定常値よりかなり高い値が得られている。

以上のことより，荷重前歴の影響を受けないき裂進展特性を求めるためには

K_{op} が上昇する方向に K 値履歴を与える必要があることがわかる。したがって荷重前歴の影響を受けない K_{th} 条件はき裂開口点を低くした理想き裂状態の予き裂材に K 漸増荷重を与えることによって求めることができ、それによって得られた K_{th} は一定振幅荷重下で材料が示す最小の K_{th} である。

4.4 低 K 領域における疲労き裂進展試験法の再検討

前節では荷重前歴の影響を受けない K_{th} を求めるためには、荷重前歴によってき裂開口点を上昇させない状態で K_{th} 条件に至らせればよいことを明らかにした。そのための一つの方法として前節では真空焼鈍した予き裂材に一定振幅荷重を負荷するという方法を提案したが、その方法では応力除去焼鈍によって材料の性質が変化する材料には適用することが困難であるし、また正確な K_{th} を求めるためには多数の試験片を要するという難点がある。

そこで本節ではこれらの点を考慮して焼鈍によらない別の予き裂作成法を考案し、さらに 1 本の試験片で荷重前歴の影響を受けない最小の K_{th} を求める実用的な試験法を提案する。

試験は予き裂作成と K_{th} 決定の 2 段階に分かれる。まず理想き裂状態の予き裂材を作成する必要があるが、その要件として K_{th} に対するものより小さな塑性域および低い K_{op} が要求されることを考慮して、次のような荷重条件で予き裂を導入すればよい。即ち、 K_{max} を $(K_{max})_{th}$ の予想値より小さくし、そのかわりに応力比 $R = -3$ 程度の大きな圧縮応力を付与して、き裂発生に必要な応力振幅を与えるとともに、圧縮応力により $R = 0$ の場合より K_{op} を上昇させないようにする。このような荷重条件でスリットの影響領域を越え、き裂前縁形状が一樣になる長さまでき裂を進展させればよい。

次に K_{op} を決定するには、このようにして作成した予き裂材に応力比 $R = 0$ の漸増荷重を与え、き裂が連続進展を開始する 1 ステップ手前の K 値を進展下限界条件 K_{th} として採用すればよい。以上が本方法の概要である。

なお、予き裂導入時に圧縮応力を負荷したことによる影響は今のところ明らかでないが、スリットによる応力集中はスリット底半径の $1/2$ 程度前方の位置で急

激に減衰するため、この領域を越えてき裂を進ませてやれば、き裂が閉じた状態では圧縮側の塑性変形はほとんど起こらないと考えられ、その影響は小さいと思われる。

本節ではこのような方法で K_{th} を求める一方、従来のK漸減法による K_{th} 試験をもあわせて行い、比較検討した。K漸減法による一定振幅試験で考慮すべきパラメータは減少を開始する際のK値の初期値、即ち最大のK値である $(K_{max})_i$ と、K値の減少率の2つである。現在広く行われている方法では $(K_{max})_i$ は影響しないと考え、主としてK値の減少率に関心が払われ、線形破壊力学の知識から荷重前歴の影響は前段階のK値に対する塑性域寸法程度進展すれば消失するであろうという推測に基づいて決定している場合が多い。その例としては、荷重を前段階の10%以内程度で階段状に減少し、塑性域寸法程度進展させた後データをとるという方法⁽¹⁴⁾が一般的であり、その他にこの条件を満たす程度に低い減少率で、K値を連続的にき裂が進展を停止するまで減少させる方法⁽¹⁵⁾がある。ここでは後者の方法を取り0.1mm進展するたびに荷重を調整し、き裂長さに対してK値を直線的に減少させる方法を採用し、Sasakiら⁽¹⁶⁾の研究を参考にし、K減少率を鉄系材料では主として $dK_{max}/dl = -10 \text{ kgmm}^{-3/2}/\text{mm}$ 、アルミニウム系材料については $dK_{max}/dl = -3 \text{ kgmm}^{-3/2}/\text{mm}$ に選んだ。

4.4.1 S35Cの場合

図4.11にK漸減試験と予き裂材のK漸増試験の結果を示す。まず○印は簡便な方法で作成した予き裂材を用いたK漸増試験結果であるが、●印で示す焼鈍した予き裂材による結果とほぼ一致しており、本簡便法は有効であることが確認される。よって以下では簡便法により予き裂を作成することにする。

種々の黒印はK漸減試験結果であり、 $(K_{max})_i$ の影響を調べるためK値の減少率はほぼそろえて、 $(K_{max})_i$ を変えたものである。それによればK漸減試験結果は大部分が○印のK漸増試験結果より速度が遅く、 $(K_{max})_{th}$ も高めに求まっており、 $(K_{max})_i$ が大きい程その傾向が強い。このことは4.3節でも述べたように、K漸増とK漸減の場合でき裂開閉口挙動が異なるからで、図4.12

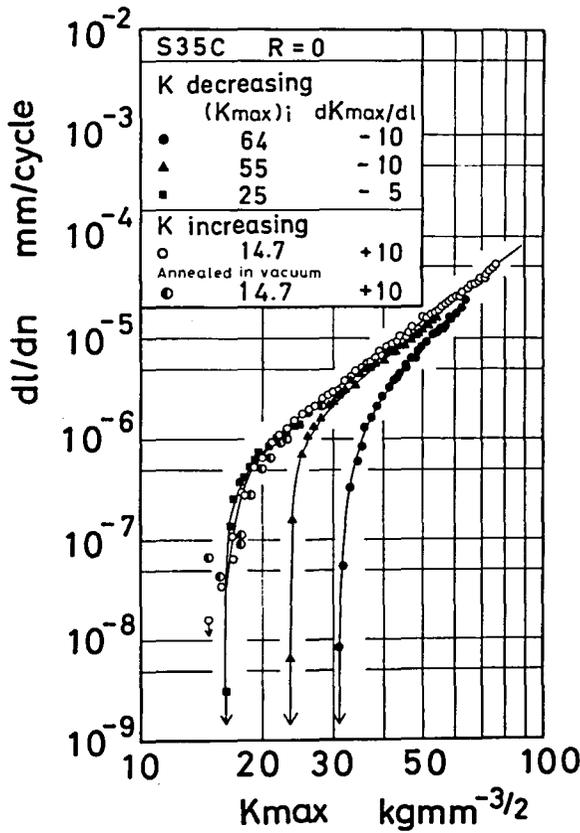


図 4.11 き裂進展速度に及ぼすK値履歴の影響

に示す K_{op} の挙動を考えるとよく理解できる。即ち、K漸減試験においては、スリットから最大K値 $(K_{max})_i$ までは○印のK漸増試験の結果に従って K_{op} が上昇するが、 $(K_{max})_i$ によっていったん上昇した K_{op} は、その後のK漸減過程においても低下しにくいために、○印で示すK漸増の場合より常に高めに位置しており、斜線で示す ΔK_{eff} が $(\Delta K_{eff})_{th}$ より小さくなるスレッシュホールドゾーンに達する $(K_{max})_{th}$ は高めとなる。 $(K_{max})_i$ が大き

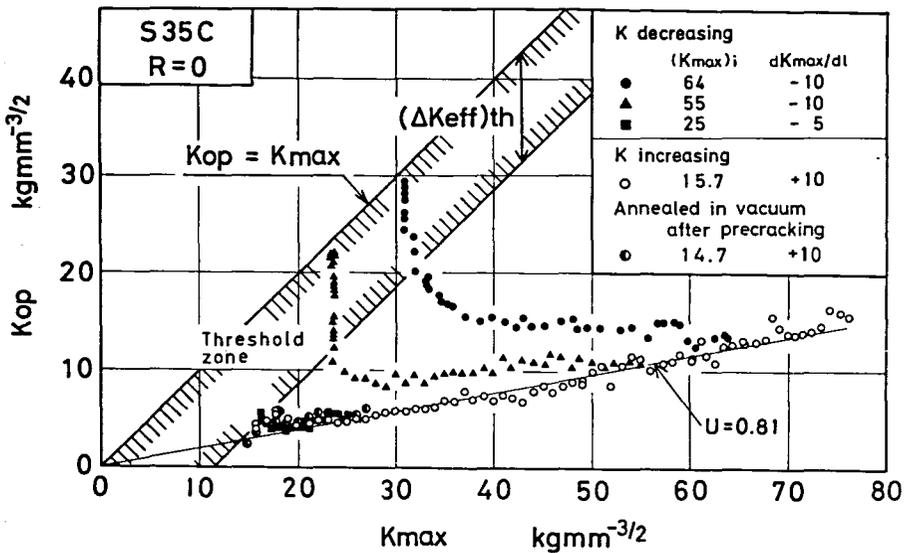


図 4.12 き裂開口点に及ぼすK値履歴の影響

い程この傾向が著しいのは、 $K_{max} \sim K_{op}$ 関係が○印のように右上がりの特性を有するためである。

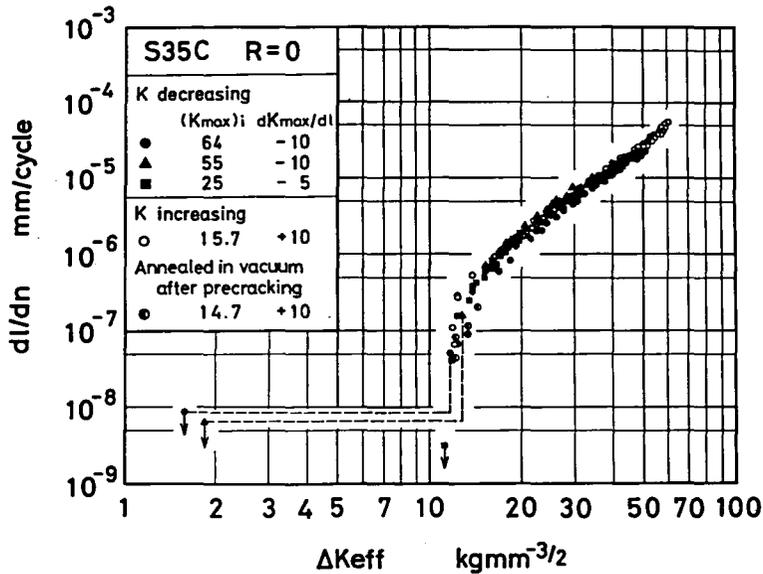


図 4.13 $\Delta K_{eff} \sim dl/dn$ 関係

これらの結果を ΔK_{eff} で整理すれば図 4.13 に示すように全ての条件に対してほぼ 1 つの曲線で表わされ、 $(\Delta K_{eff})_{th}$ ^(注) もほぼ同一の値となり、 $\Delta K_{eff} \sim dl/dn$ 関係に及ぼす試験法の差の影響は比較的小さいようである。これらのことより、以上の 3 図において○印の K 漸増試験結果が、前歴の影響を受けない一定振幅荷重下の進展挙動と考えられる。

以下に本方法に関し、2, 3 の点について考察する。まず K 減少率に関しては、

(注) S35C では下限界条件において荷重の繰り返しのつれて K_{op} が上昇し、 ΔK_{eff} が減少する場合がある。そのような場合は K 値を $(K_{max})_{th}$ に下げた後き裂は若干進展するが (最大 50 μm 程度)、その荷重下ではやがて K_{op} が上昇し完全に停止する。そこでここでは荷重を $(K_{max})_{th}$ に下げた直後の ΔK_{eff} を $(\Delta K_{eff})_{th}$ と定義した。

極めて緩やかな理想的なK漸減試験で、 K_{Op} に及ばず荷重前歴の影響を無くすることができれば、 $(K_{max})_i$ にかかわらず普遍的な $(K_{max})_{th}$ の最小値が求められるはずである。しかし前節の図4.9の結果から推測すると、通常の数十mm程度の寸法の試験片ではそのような理想的な条件を実現することは極めて困難なようであり、現実のK減少試験では $(K_{max})_i$ の影響を受けた $(K_{max})_{th}$ が求められている場合が多い。

次に、 K_{th} 条件とK漸増試験に関しては、K漸減試験で K_{th} を求めた後K漸増試験を行うことがある⁽¹⁵⁾が、たとえそのようにして同じ進展曲線が得られたとしても、 K_{Op} が上昇したままほぼ同じ値を保つ場合は当然そのような挙動を示すわけで、同じ進展曲線が得られるということが必ずしもその K_{th} が最小のき裂進展下限界値を与えている保証にはならないので注意を要する。

また K_{th} 試験に漸増荷重が用いられなかった理由の1つに、平滑材の耐久限度に関するコーキング効果からの類推で、 K_{th} 条件に対してもコーキング効果が現われることを懸念したことが考えられる。この効果に関する試験結果は少ないが、小林⁽¹⁷⁾がS35Cの切欠き材の破断に対する疲労限度に対して若干のコーキング効果を認めている。そのほか K_{th} については西谷⁽¹⁸⁾がSS41材を用いてK漸減法で K_{th} に至らせた後、 10^7 cycle毎にK値を $1 \text{ kgmm}^{-3/2}$ ずつ上昇させ、再びき裂が定常的に進展を開始する条件を調べ、その結果 K_{th} は33%上昇し、 K_{th} にもコーキング効果が現われることを報告している。このことを考慮して漸増荷重による K_{th} 試験の具体的な手順としては次の方法が適当であろう。1本の予き裂材に、 K_{th} の予想値より若干低いK値をコーキング効果があまり現われない約 $10^5 \sim 10^6$ cycle程度負荷⁽¹⁹⁾し、もしき裂進展が検出できなければK値を少し上げ次のステップに移るようにし、き裂進展が検出されるまで続けるとよい。き裂進展量の検出精度を $10 \mu\text{m}$ にすれば、これによって $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ mm/cycle}$ のレベルのき裂進展が検出できる。本章の結果はこのようにして得たものである。もしコーキング効果を懸念するならば、この方法で得られた K_{th} の1ステップ手前のK値を最初から負荷して確かめればよい。

以上の結果から、前歴の影響がないき裂進展下限界条件および一定振幅荷重下

の進展特性を求めるための試験法としては、 K_{op} が上昇する方向にK履歴を与えることが必要で、本材料の場合予き裂材のK漸増試験によるのが適当であると結論できる。ただしこの方法が採用できず、K漸減法によらざるを得ない場合には、 K_{op} の性質を考慮して、荷重前歴の影響を極力小さくするため、できるだけ低いK値からK減少を開始して K_{th} を求めれば、 K_{th} の最小値であるという保証はないものの、例えば図4.11の■印のようにほぼ妥当な値が得られるようである。

4.4.2 HT80の場合

$K_{max} \sim dl/dn$, $K_{max} \sim K_{op}$, $\Delta K_{eff} \sim dl/dn$ 関係の結果をそれぞれ図4.14, 4.15, 4.16に示す。本材料の進展挙動は前節のS35Cとほぼ同様であるので、特徴的な点のみを述べる。

まず第1に図4.16に示すように $(\Delta K_{eff})_{th}$ にも荷重履歴の影響があることである。即ち、●, ▼印のように高い $(K_{max})_i$ からK漸減法によって求めた $(\Delta K_{eff})_{th}$ は非常に小さいが、それ以外の■, ▲印の条件に対しては比較的大きな $(\Delta K_{eff})_{th}$ で停留している。定常進展領域ではほとんど影響がなく進展曲線には差がないが、 $(\Delta K_{eff})_{th}$ のみに差が出ており、その原因については今のところ不明である。

第2は、荷重前歴の影響を受けない $K_{max} \sim K_{op}$ 関係は図4.15の全条件を包絡する太い実線であり($K_{max} = 18 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 以下の○印は定常値でないので除く)、それは

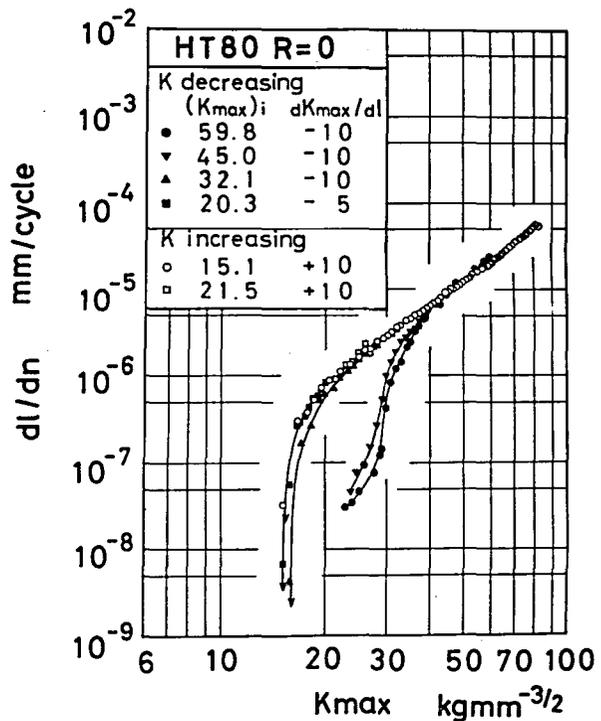


図4.14 き裂進展速度に及ぼすK値履歴の影響

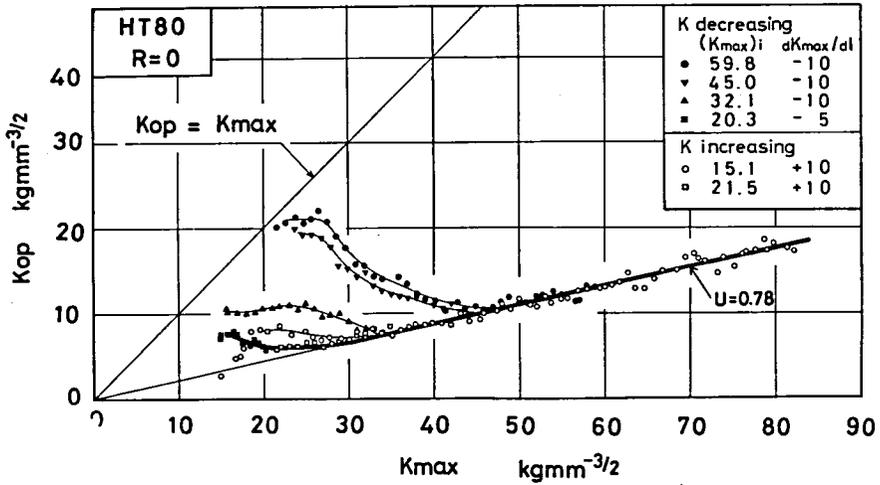


図 4.15 き裂開口点に及ぼすK値履歴の影響

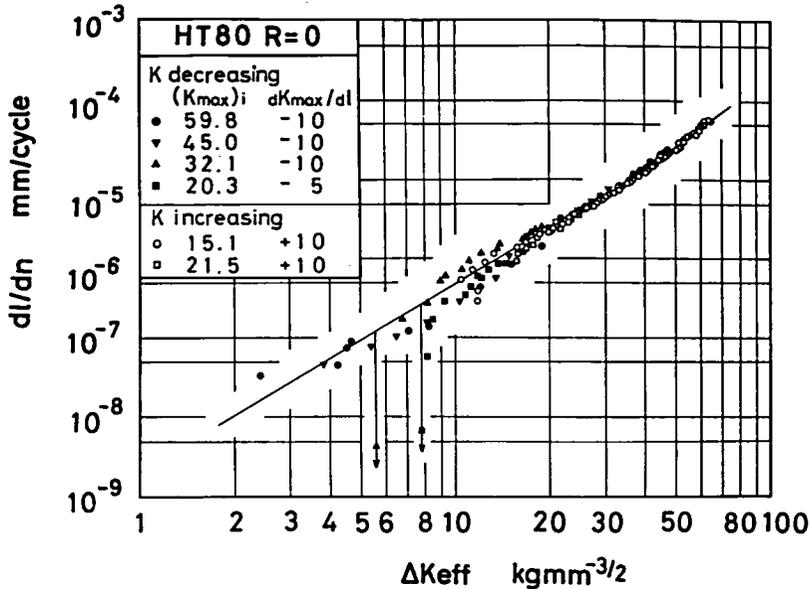


図 4.16 $\Delta K_{eff} \sim dl/dn$ 関係

$K_{max} = 30 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 以上では直線的に右上りであるが、それより低いレベルでは直線関係から離れて K_{op} が上昇し、 $K_{max} = 22 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 付近で極小値を持っている。先に述べた K_{op} が上昇する方向に試験するという原則からすれば、この

ような挙動を示す材料のき裂開閉口挙動を1本の試験片で求めることは不可能であり、 K_{op} の極小値を境として、それ以上の K 範囲については K 漸増法で、それ以下では K 漸減法で求め、それらを組み合わせてはじめて厳密な意味での前歴の影響を受けないき裂開閉口挙動が得られることになる。しかし現実には、 K_{op} の極小値を与える K_{max} を前もって知ることは不可能であるし、またこのような K_{op} の挙動が進展曲線に及ぼす影響は小さいため、実用的には予き裂材を用いた K 漸増試験で十分と思われる。

4.4.3 A5083-Oの場合

図4.17に $K_{max} \sim dl/dn$ 関係を示すように、○印の予き裂からの K 漸増試験結果は黒印の K 漸減試験結果を安全側に包含する形となる。

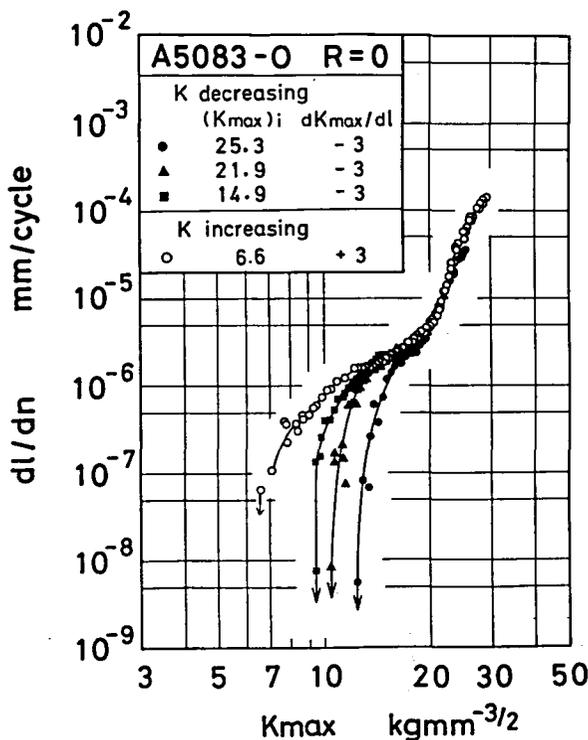


図4.17 き裂進展速度に及ぼす K 値履歴の影響

図4.18に黒印で示す K 漸減試験の場合の K_{op} の挙動は幾分複雑であり、鉄系材料と異なり、 K 減少とともにいったん上昇し、その後若干低下する傾向がみられる。しかしどこまでも低下を続けるわけではなく、各 $(K_{max})_i$ に応じて限界があるようで、あるレベルで水平に向かい下限界条件に至っている。このように K_{op} は幾分低下するもののやはり○印の K 漸増法の場合よりは高めとなっている。

き裂進展速度を ΔK_{eff} で整理すれば、図4.19のようにほぼ1つの帯で表わさ

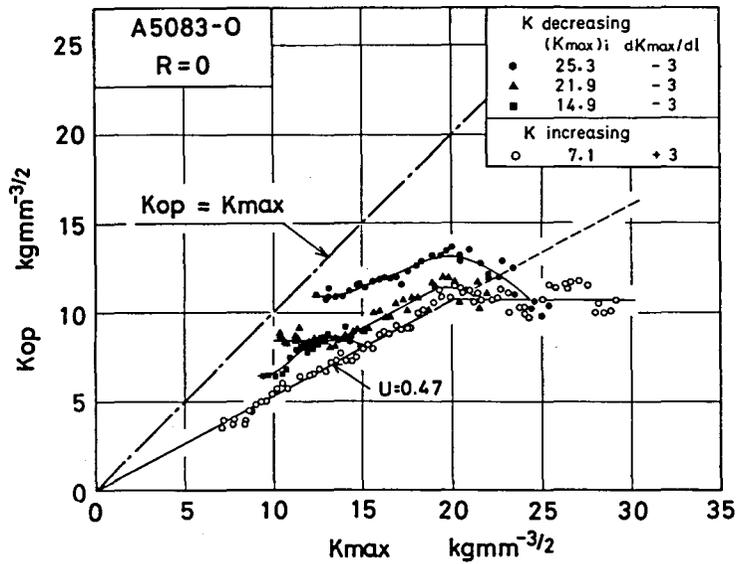


図 4.18 き裂開口点に及ぼすK値履歴の影響

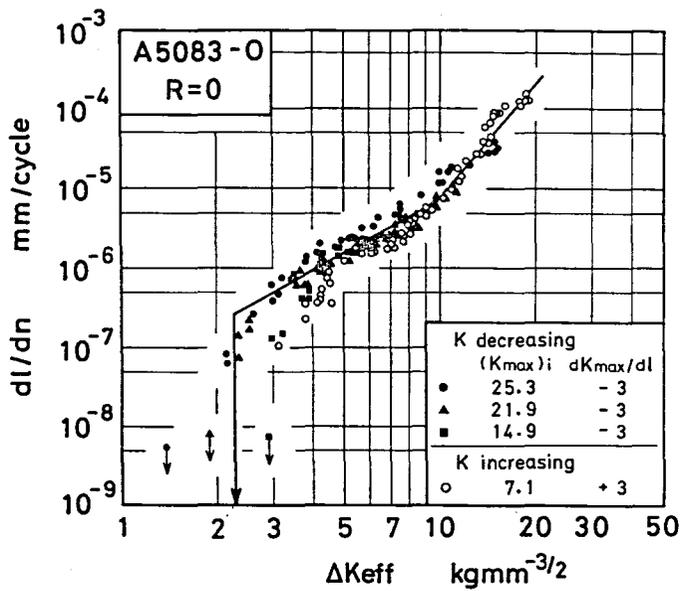


図 4.19 $\Delta K_{eff} \sim dl/dn$ 関係

れることから、本材料についても K 漸増と漸減の場合における進展挙動の差は K_{op} に及ぼす荷重履歴の影響で良く説明される。

なお $(\Delta K_{eff})_{th}$ については非常に小さな値であるが存在するようである。しかし同じ A5083-O でも、ロットが異なるが前章で用いたものについてはほぼ $(\Delta K_{eff})_{th} = 0$ であった。したがって A5083-O の場合は $(\Delta K_{eff})_{th}$ は存在しないと考えるのが適当で、存在するとしても極めて小さな値のようである。

4.4.4 ZK141-T7 の場合

$K_{max} \sim dl/dn$, $K_{max} \sim K_{op}$, $\Delta K_{eff} \sim dl/dn$ 関係をそれぞれ図 4.20, 4.21, 4.22 に示す。本材料の挙動も A5083-O とほぼ同様である。

本節で K 漸増法によって求めた各材料の $(K_{max})_{th}$ の値を表 4.3 にまとめて示しておく。

4.4.5 き裂開口比 U の挙動

S35C と A5083-O についてき裂開口比 $U (= \Delta K_{eff} / \Delta K)$ と K_{max} の

表 4.3 K 漸増法で求めた $(K_{max})_{th}$ ($R=0$ の場合)

Material	$(K_{max})_{th}$ ($kgmm^{-3/2}$)
S35C	14.7
HT80	15.1
A5083-0	6.6
ZK141-T7	5.0

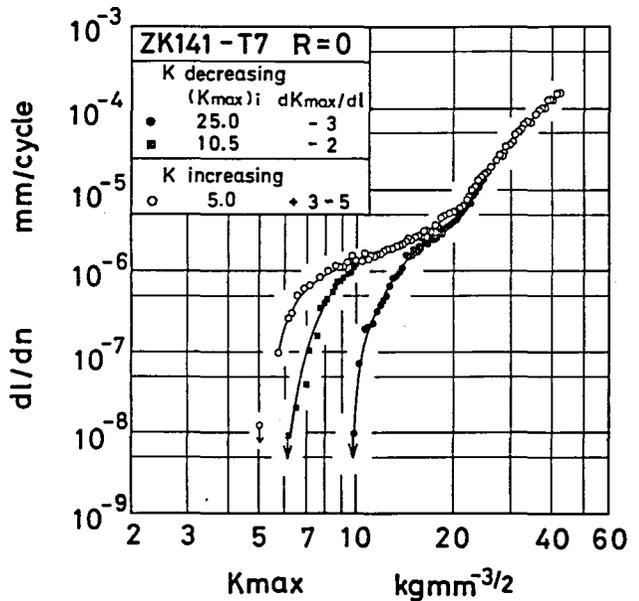


図 4.20 き裂進展速度に及ぼす K 値履歴の影響

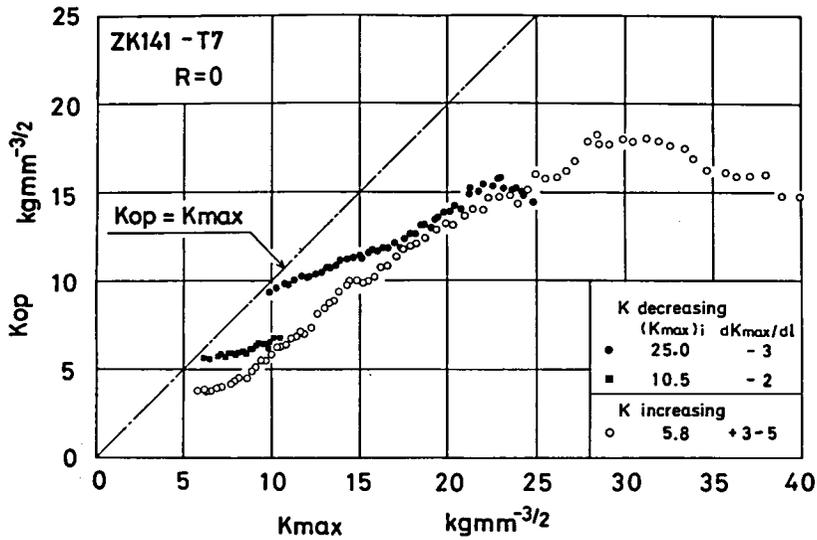


図 4.21 き裂開口点に及ぼすK値履歴の影響

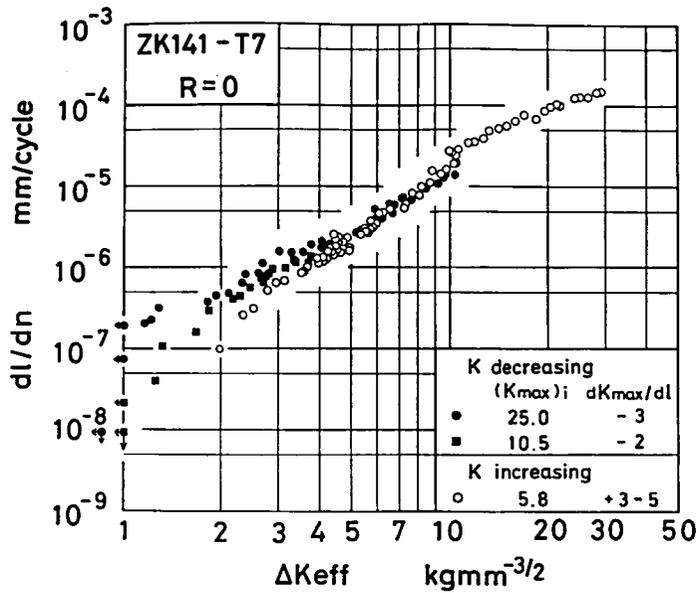


図 4.22 $\Delta K_{eff} \sim dl/dn$ 関係

関係を示したものが図 4.23 である。K 漸増法で求めた結果は白抜き印で示すように、S 35C についてはほとんどの試験範囲で U が一定である。A 5083-O

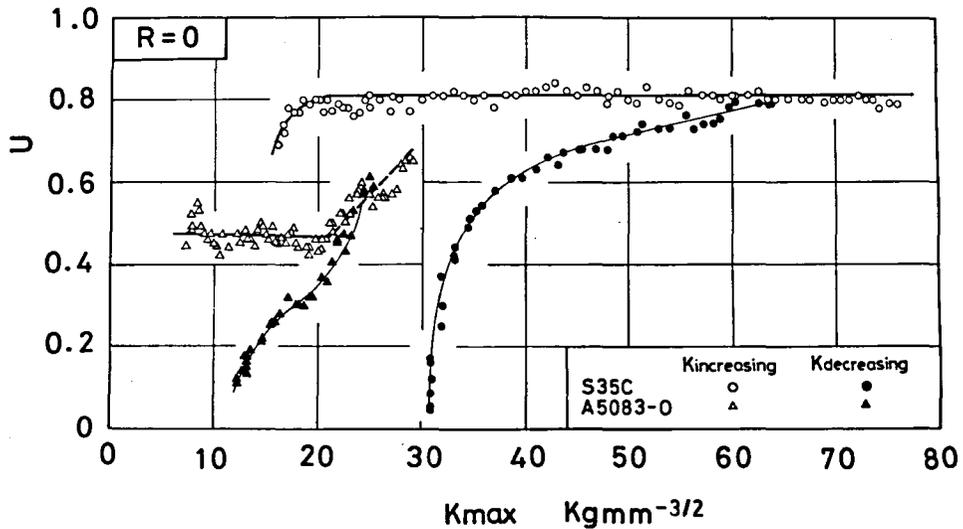


図4.23 き裂開口比Uに及ぼすK値履歴の影響

の場合はK値レベルに依存して低K領域ではほぼUが一定であるのに対しKが大きくなるとUが増加している^(注)。このようにき裂開口比UのK値レベル依存性は材料ごとに異なるようであり、それが材料のどのような性質と関係しているのかは今のところ明らかではないが、少なくともK漸増法で求めれば荷重前歴の影響を受けない挙動が得られると考えられる。

それに対しK漸減法による結果は代表的なもののみを黒印で示しているが、荷重前歴の影響を受けて、漸減条件が変われば異なったK値レベル依存性を示し、漸減法によったのでは材料特性としての挙動が得られないことがわかる。

同様に、下限界条件近傍の進展挙動に及ぼす応力比や材料組織の影響を調べる際にもK漸減法が用いられているが、その際にも開口点に及ぼす荷重前歴の影響を十分に考慮して、それぞれの因子の影響のみが純粹に抽出されるよう配慮する必要があるものと思われる。

(注) 当初、A5083-OにおけるUの増加は小規模降伏条件からの逸脱によるものではないかという疑いがあったが、別に行ったより大きな寸法の試験片においても同様の挙動がみられたことから、必ずしもそうではなさそうである。

4.5 K 漸増法で求めた K_{th} の変動荷重による消失

第3章では S35C と A5083-O について、通常の K 漸減法によって求めた K_{th} は変動荷重下で消失することを示したが、ここで次の疑問が生じる。それは第3章で対象とした K_{th} は荷重前歴の影響を受けて高めに求められたものであるが故に消失したのではないか、言い換えれば本章で求めた K 増加法による K_{th} は消失しないのではないかということであり、学問的にも実用上も重要な問題である。

そこで本節では S35C を用いて、本章で K 増加法により求めた $(K_{max})_{th}$ をはさんだ 2 段多重試験を行った。図 4.24 は応力比 $R = 0$ でひん度比 $N_H/N_L = 1/100$ 、高レベル K 値を $K_H = 25 \text{ kgmm}^{-3/2}$ で一定にし、低レベル K 値を $(K_{max})_{th}$ をはさむように変えた場合の低レベル K 値下の進展速度を ●印で示している。図中実線 C が本章で求めた K 漸増法による一定振幅試験結果であり、D および B はそれぞれ 3.3.1 節で求めた K 漸減法による一定振幅結果と、 $K_H = 50 \text{ kgmm}^{-3/2}$ に対する修正進展曲線である。同図より一定振幅 K 値下で材料が示

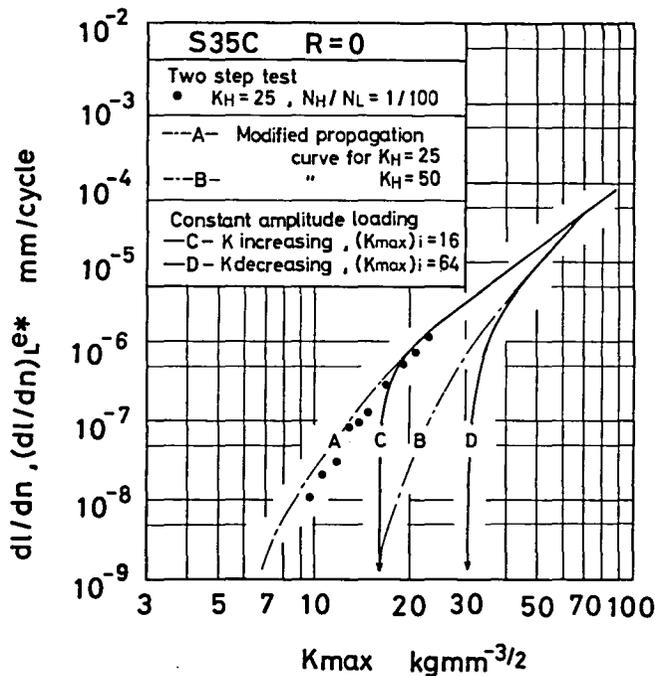


図 4.24 K 漸増法で求めた $(K_{max})_{th}$ の消失

す最小の進展抵抗と考えられるK漸増法による $(K_{\max})_{th}$ さえも、変動荷重下では容易に消失することがわかる。

なお本実験のK値条件は、3.3.1節でK漸減法で求めた $(K_{\max})_{th} = 30.9 \text{ kgmm}^{-3/2}$ と比較すれば、高低両レベルとも $(K_{\max})_{th}$ 以下となっており、 $(K_{\max})_{th}$ 以下の荷重ばかりでき裂が進展したことになり、全ての荷重を任意のK漸減法で求めた $(K_{\max})_{th}$ 以下に抑えたからといって、必ずしも安全とはならないことがわかる。

そこで、本章でK漸増法によって求めた $(K_{\max})_{th}$ についても、それ以下の荷重ばかりでき裂が進展するか否かを調べるため、高レベルK値を $(K_{\max})_{th} = 14.7 \text{ kgmm}^{-3/2}$ にほぼ合せるよう $K_H/K_L = 15 \text{ kgmm}^{-3/2}/10 \text{ kgmm}^{-3/2}$ に設定し、ひん度比を $N_H/N_L = 1/20$ とした2段多重試験を行った。その結果この条件下では 2.5×10^6 cycle 繰り返した後もき裂進展は検出されなかった。したがって全ての荷重をK漸増法で求めた $(K_{\max})_{th}$ 以下に抑えておけばき裂は進展せず、そのような荷重条件が保証される限りは、本章で提案したK漸増試験で求めた $(K_{\max})_{th}$ は一つの設計基準になりうると考えられる。

4.6 き裂開口点 K_{op} に及ぼすK値履歴の影響と実働荷重下のき裂進展速度の推定法

本章では一定振幅荷重の場合にK値履歴がき裂開口点に強く影響することを示したが、変動荷重の場合にもき裂の進展とともに最大K値が漸増あるいは漸減する場合には同様の効果が存在するであろうことが容易に想像される。このようなき裂開口点 K_{op} の挙動はき裂進展速度に著しく影響するため、き裂進展量を見積るためにはき裂開口点を正確に推定する必要がある。そこで本節ではKレンジペアの最大値が漸増および漸減する試験を行ってこの点を検討し、先に述べた実働荷重下のき裂進展速度の推定法を用いる際の注意点を述べる。

前述の推定法を用いる際に必要なパラメータは2つあり、第1は ΔK_{eff} で整理した進展曲線の傾き m であり、第2はき裂開口点 $(K_{op})_H$ である。

まず第1のパラメータ m は、例えば図4.13のように低K領域の定常進展域で

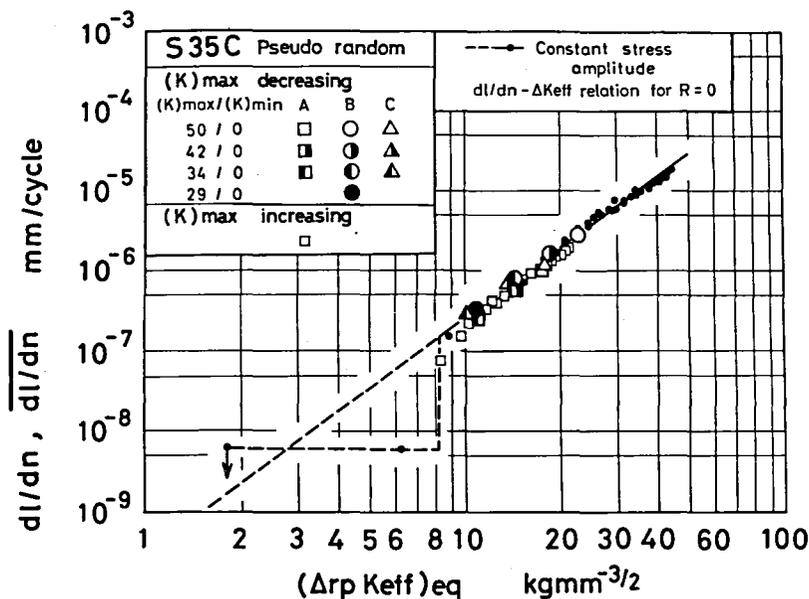


図 4.26 ランダム荷重下のき裂進展速度

ペアの最大値 $(\Delta_{rp} K)_{max}$ に対して、 K 漸増法で求めた同じ応力比の一定振幅試験結果から K_{op} を読みとればよいことになる。

次に、き裂進展とともに最大 K 値が減少してゆく場合は、過去に負荷された大きい K 値の影響がき裂べりの残留変形層を通じて記憶され、その後の K_{op} に影響するため、現在負荷されている K 値のみによって一義的に決定することはできず、過去の K 値履歴の影響を考慮する必要がある。わずかな実験例であり断言はできないが、擬似ランダム荷重に対して図 4.25 の小さな □ 印を除く各種記号は最大 K 値を減少させるようにしたものであり、小さな ● 印で示す最大 K 値履歴をほぼ同一にした一定振幅試験結果とほぼ一致していることから、き裂進展量があまり大きくない範囲の K 減少の変動荷重については、最大 K 値の履歴をあわせた一定振幅荷重試験の K_{op} をとればよいということが示唆されている。

しかし過去の大荷重の影響が無限の長さにわたって残ることは考えられず、進展とともに減衰してゆくとされるが、図 4.8 や 4.9 に例を示すように減衰の程度は K 値のパターンによっていろいろな様相を示し、今のところ一般的に述べる

ことはできない。これを知るためにはK値履歴が以後の K_{op} に影響を及ぼすメカニズムを解明する必要がある、適当なモデルを用いたシミュレーション等により明らかにされることを期待したい。

4.7 結 言

本章ではS35C, HT80, A5083-O, ZK141-T7の各材料について、き裂開口点に及ぼすK増加、減少履歴の影響を明らかにし、従来求められているK漸減法によるき裂進展特性が、荷重前歴の影響を受けて危険側に求められていることを指摘するとともに、荷重前歴の影響を受けない進展特性を求める方法を提案した。得られた結果をまとめると、

(1) き裂開口点 K_{op} はK増加過程では一方向負荷による平面ひずみ塑性域寸法の2～3倍程度進展すれば前歴の影響がなくなり、定常値に達するが、いったん上昇した K_{op} は低下しにくいいため、K減少過程では塑性域寸法よりはるかに大きな領域にわたって荷重前歴の影響が存在する。

この現象は平面ひずみ条件に近いと考えられるサイドグループ付き試験片においてもみられ、またHT80やZK141-T7のように比較的高強度の材料においてもみられることから、平面応力や大規模降伏等によるものではなく、一般的に現われる性質のようである。

(2) 荷重前歴の影響を受けないき裂進展挙動を求めるためには K_{op} が上昇する方向に試験する必要がある、したがってき裂進展開始条件は理想き裂状態の予き裂材を用いたK漸増試験によって求めるべきであり、それによって得られた進展下限条件は一定振幅荷重下で材料が示す最小の K_{th} である。

その方法を採用することが困難な場合は、荷重前歴の影響を極力小さくするため、できるだけ低いK値からKを漸減させて求めるとよい。

(3) 通常のK漸減法で求められている K_{th} とき裂強さの関係については、K値で整理すれば K_{th} はき裂強さより高めとなっているが、 ΔK_{eff} についてみれば両条件は同一であり、Kについての差は単に両条件を求める際の荷重前歴の影響によるき裂開閉口挙動の差に起因するものである。

(4) 本章でK漸増法で求めた荷重前歴の影響を受けない $(K_{\max})_{th}$ は変動荷重下では次のように挙動する。

(i) $(K_{\max})_{th}$ をわずかでも超えるK値が負荷されると $(K_{\max})_{th}$ は消失する。

(ii) 全ての荷重が $(K_{\max})_{th}$ 以下に制限される場合は $(K_{\max})_{th}$ の消失は起こらず、き裂進展は生じない。

(5) 第3章で提案した実働荷重下のき裂進展速度の推定法を用いる際き裂開口点は、最大のKレンジペアが漸増する変動荷重については、K漸増法で求めた一定振幅試験結果から推定すればよい。最大のKレンジペアが減少する変動荷重については、過去に負荷されたK値履歴の影響を受けるため、この影響を別途考慮する必要がある。

第 4 章 の 参 考 文 献

- (1) Isibasi, T., Mem. Fac. of Engng. Kyushu Univ. 12(1951), 281.
- (2) 石橋・瓜生・佐藤, 日本機械学会論文集, 19-87(1953), 34.
- (3) Frost, N. E., J. Mech. Engng. Sci., 5-1 (1963), 15.
- (4) Paris, P. C. and Erdogan, F., Trans. ASME, J. Basic Engng., 85(1963), 528.
- (5) 小林・中沢, 日本機械学会論文集, 33-254(1967), 1529.
- (6) 大内田・西岡・宇佐見, 日本機械学会講演論文集, №710-9(1971), 37.
- (7) 北川, 材料, 26-285(1977), 590.
- (8) 例えば北川, 材料, 26-284(1977), 482; 小林, 日本機械学会誌, 80-703(1977), 492; 文献(6)など.
- (9) 北川・池田・豊平・大平・Choy, Y. S., 日本機械学会講演論文集, №750-13(1975), 229.
- (10) Kobayashi, H. and Nakazawa, H., Proc. 1st Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, vol. II(1972), 199.
- (11) 北川・高橋, 日本機械学会論文集, 45-399(1979), 1289.
- (12) 小林・中沢, 日本機械学会論文集, 36-291(1969), 1789.
- (13) 石橋, 「金属の疲労と破壊の防止」, (1977), 138, 養賢堂.
- (14) 菊川・城野・田中・高谷, 材料, 25-276(1976), 899.
- (15) Ohta, A. and Sasaki, E., Engng. Frac. Mech., 9(1977), 655.
- (16) Sasaki, E., Ohta, A. and Kosuge, M., Trans. NRIM, 19(1977), 183.
- (17) 小林・中沢, 材料, 21-223(1972), 267.
- (18) 西谷・村田・森, 日本機械学会講演論文集, №760-13(1976), 118.
- (19) Kommers, J. B., ASTM Proceedings, 30(1930), 369.

第5章 比較的高いK値領域における実働荷重下の疲労き裂進展

5.1 緒言

本章では $K_{\max} = 200 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 程度までの比較的高いK値領域における実働荷重下の疲労き裂進展問題を扱う。冗長さの高い大形構造物では、実働荷重下で疲労き裂が発生しても疲労き裂進展期間が長いため、破壊靱性の大きい材料を用い綿密な検査、保全システムと組み合わせることにより、かなりの長さまでき裂が進展しても破壊に至らないような設計が可能である。このような構造物の設計にはき裂進展開始直後の低K領域から、より高い進展速度領域までを含む広範囲のK値条件に対して進展速度を精度よく見積る推定法が要求される。低K領域に関しては既に第3章および第4章で検討し、各種の変動荷重パターンに対する取り扱い方法を見出したので、本章では高いK領域での問題を扱う。本章での研究方針としては、低K領域で見出した推定法が高いK値領域まで適用可能かどうかを調べることにし、特徴の現われやすい代表的な荷重パターンについて試験を行った。

なお比較対象としての一定振幅荷重下の進展特性は、高いK値領域で広く行われているK漸増法によって求めたものを用いた。

5.2 供試材料および試験方法

供試材料としては構造用材料として用いられている焼入れ焼戻した高張力鋼HT80を用いた。材料は第4章で用いたものと同じロットのもので、その化学成分、機械的性質を表5.1, 5.2に示す。試験は図5.1に示す中央切欠きを有する板状試験片を用い、電気油圧サーボ疲労試験機により周波数10Hzで行った。

表5.1 材料の化学成分

Material	(%)									
	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
HT80	0.12	0.83	0.33	0.011	0.009	0.25	0.81	0.44	0.40	0.04

表 5.2 材料の機械的性質

Material	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
HT80	78	83	34

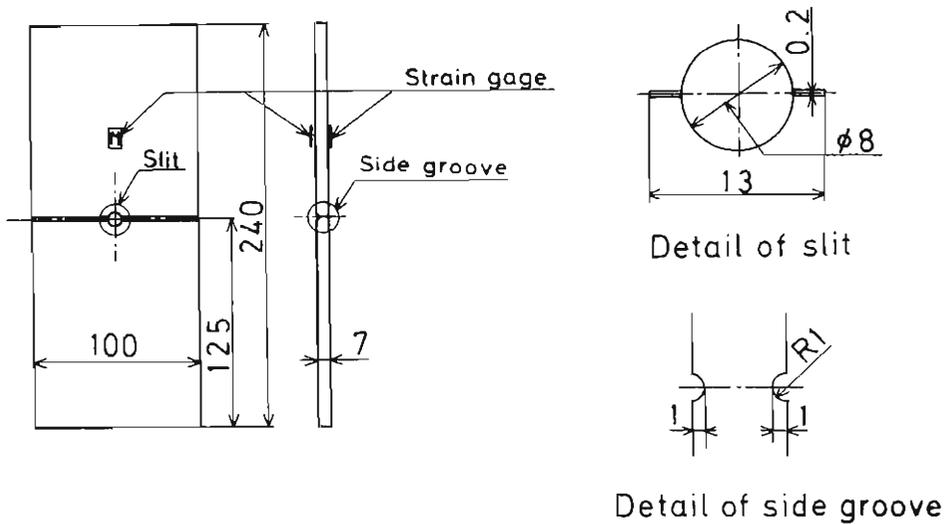


図 5.1 試験片形状

試験片には中央にクリップゲージを取り付けるために直径 8 mm の穴を設け、その穴の左右に放電加工で長さ $2a_0 = 13$ mm で幅 0.2 mm のスリットを入れ、クラックスタータとして用いた。本試験片の場合き裂長さ測定の分解能は使用する試験領域で約 30 ~ 60 μ m である。試験片の両面に図中に示すサイドグループを付

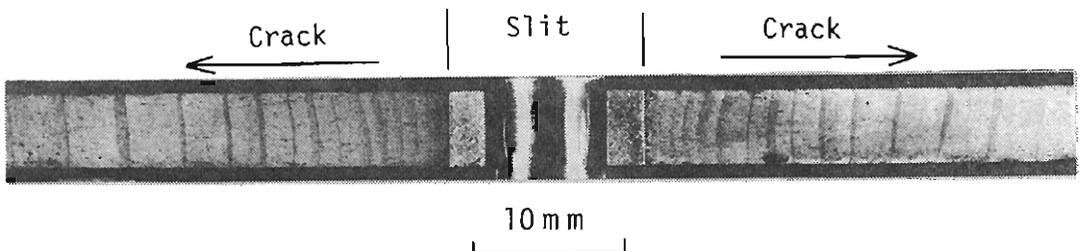


図 5.2 ビーチマーク

した場合の破面例を図 5.2 に示す。破面に残ったビーチマークがほぼ直線状であることから、サイドグループが有効に作用していることがわかる。中央切欠き試験片の場合スリットを中心として左右 2 本のき裂が進展するが、左右の長さには差があると、き裂長さの測定やき裂開閉口挙動の測定に支障がでる。そこでこれを極力避けるために、試験片取り付けの際に試験片側面にひずみゲージを貼って監視しながら、動的な面内曲げ荷重ができるだけ生じないように取り付けた。このようにすれば図 5.2 のように左右ほとんど同じ長さでき裂を進展させることができる。き裂開閉口挙動は厳密には左右のき裂で必ずしも一致していないかも知れないが、左右のき裂長さがほぼ同じであることから、き裂先端の状況もほぼ同じであろうと考えられ、ここでは中央切欠き部の変位を検出することにより平均的なき裂開閉口挙動を測定した。

応力拡大係数 K 値は第 3 章と同じくサイドグループによる断面積の減少のみを考慮し、公称応力としてサイドグループ底の公称応力を用い、Tada⁽¹⁾ による次式で算出した。

$$K_I = \frac{P}{B_N W} \sqrt{\pi a} \left\{ 1 - 0.025 \left(\frac{2a}{W}\right)^2 + 0.06 \left(\frac{2a}{W}\right)^4 \right\} \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)} \quad (5-1)$$

W : 板幅, B_N : サイドグループ底板厚, P : 負荷荷重, $2a$: 切欠きを含むき裂全長

5.3 一定振幅荷重試験

応力比 $R = 0$ の一定振幅荷重下の進展特性を求める試験を行った。試験はミニコンピュータにより漸増する荷重信号を発生させ、 K 値制御を行い、 $K_{\max} = 30 \text{ kgmm}^{-3/2}$ から K 値を $(dK_{\max}/da)/K_{\max} = 0.1 \text{ mm}^{-1}$ で漸増させる。即ちき裂半長 a が 0.2 mm 増加するたびに荷重を調節し、 K_{\max} を前段階の 2% ずつ増加させるようにした。

$K_{\max} \sim da/dn$, $K_{\max} \sim K_{op}$, $\Delta K_{eff} \sim da/dn$ の関係をそれぞれ図 5.3, 5.4, 5.5 に示す。図中・印が本試験の結果であり、実線は第 4 章で同一材

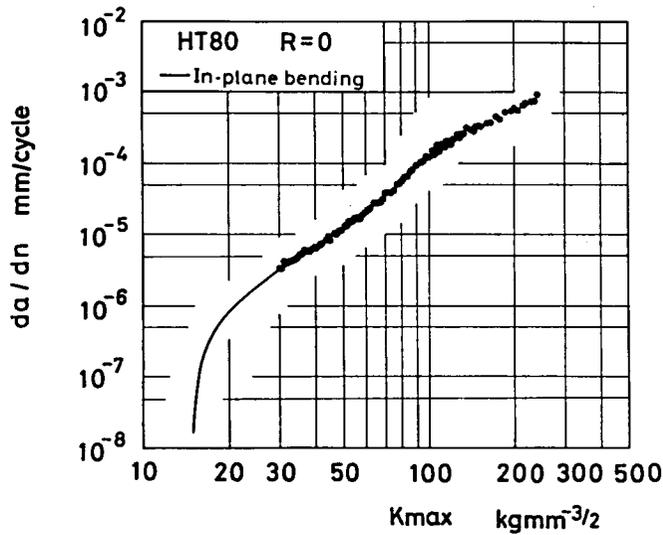


図 5.3 一定振幅試験の $K_{max} \sim da/dn$ 関係 (K 漸増法)

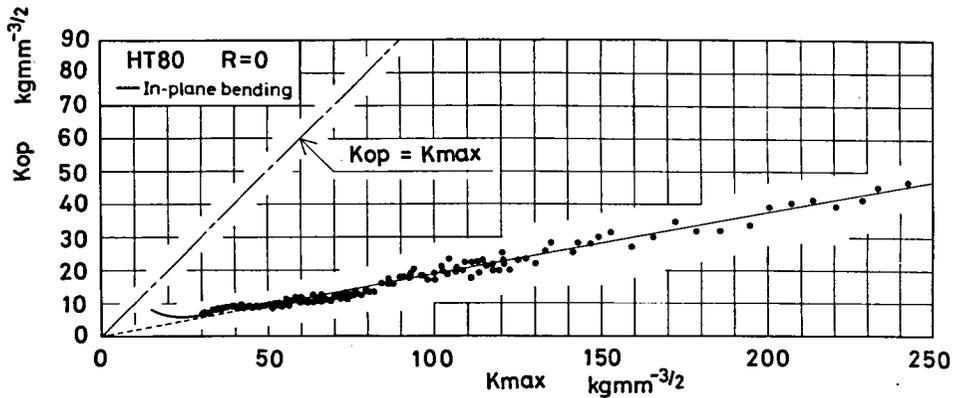


図 5.4 一定振幅試験のき裂開口点 (K 漸増法)

料について K 漸増法で求めた試験周波数 40 Hz の面内曲げ試験結果である。両試験結果は試験片形状、負荷方式が異なるにもかかわらず共通の試験範囲である $30 \text{ kgmm}^{-3/2} < K_{max} < 80 \text{ kgmm}^{-3/2}$ でよく一致している。また試験周波数が異なることによる影響もないようで、この程度の周波数範囲ではき裂進展挙動に及ぼす速度効果は現われないようである。

図 5.4 の $K_{max} \sim K_{op}$ 関係はほぼ原点を通る直線に乗っており、 $K_{max} = 250$

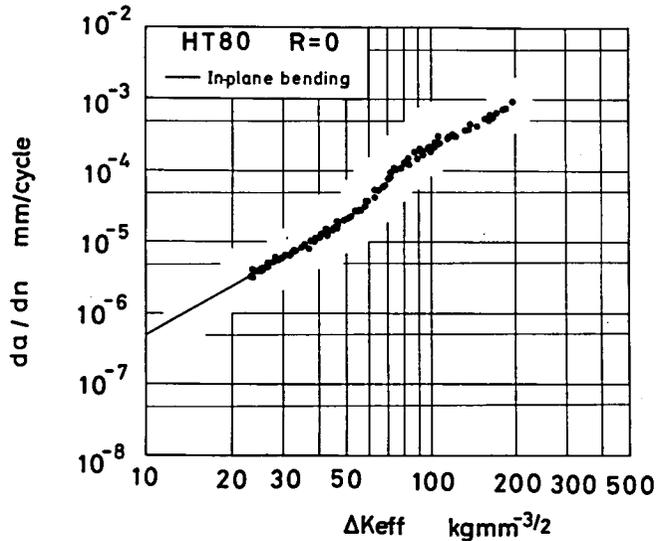


図 5.5 一定振幅試験の $\Delta K_{eff} \sim da/dn$ 関係

$kgmm^{-3/2}$ 付近までき裂開口比 U が一定の挙動を示し、広い範囲にわたって相似則が成り立っていることがわかる。

図 5.5 の進展曲線は $7 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle}$ 程度の進展速度を境にうねりがみられ、その上下で傾きも異なっている（べき指数 m は $da/dn = 2 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$ 以上で 2.0, $da/dn = 2 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle}$ 以下で 2.3）。このように $\Delta K_{eff} \sim da/dn$ 関係においてべき指数が異なっているのは、その速度を境に進展機構が変化していることによると考えられる。

以上の 2 種の試験を組みあわせることにより、かなり広い K 値領域に対して荷重前歴の影響を受けないき裂進展特性が得られた。

5.4 2 段多重変動荷重試験

第 3 章で低 K 領域における多段多重変動荷重試験の場合には、最高レベル K 値 K_H がき裂開口点 K_{op} を決定し、しかもその K_{op} は K_H に対する一定振幅荷重試験結果と一致すること、および進展速度は ΔK_{eff} に基づく修正マイナー形の進展則で表わされることなどを明らかにした。

本節では高い K 値領域においても同様の挙動を示すかどうかを調べるため、図

5.6の変動荷重パターンで、ひん度比を $N_H/N_L = 1/100$ に固定しておいて、高レベルK値 K_H を $80 \text{ kg mm}^{-3/2}$ と $120 \text{ kg mm}^{-3/2}$ の2種に設定し、低レベルK値を変化させる試験を行った。

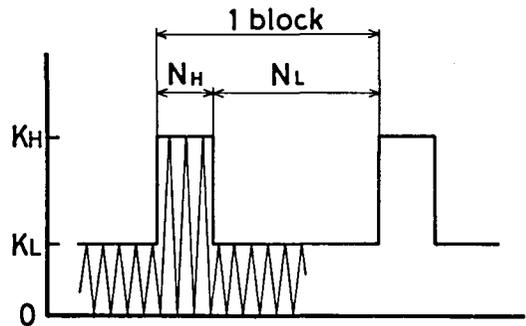


図 5.6 2段多重変動荷重パターン

低レベルK値下でのき裂進展速度 $(da/dn)_L^{e*}$ を(3-2)式により

計算して、 ΔK_{eff} に対してプロットしたものを図 5.7 に示す。 ΔK_{eff} で整理すれば全ての条件に対し一定振幅試験結果に良く一致しており、 ΔK_{eff} による取り扱いはこの領域でも有効であることがわかる。

高低各K値レベルにおけるき裂開口点 K_{op} を図 5.8 に示す。図中の右上がりの実線は一定振幅試験の $K_{max} \sim K_{op}$ 関係である。変動試験結果は $K_H = 120 \text{ kg mm}^{-3/2}$ に対して□, ■印, $K_H = 80 \text{ kg mm}^{-3/2}$ に対しては○, ●印で示しており、白印が高レベルK値, 黒印は低レベルK値に対する K_{op} である。図から明らかのように各条件について高, 低

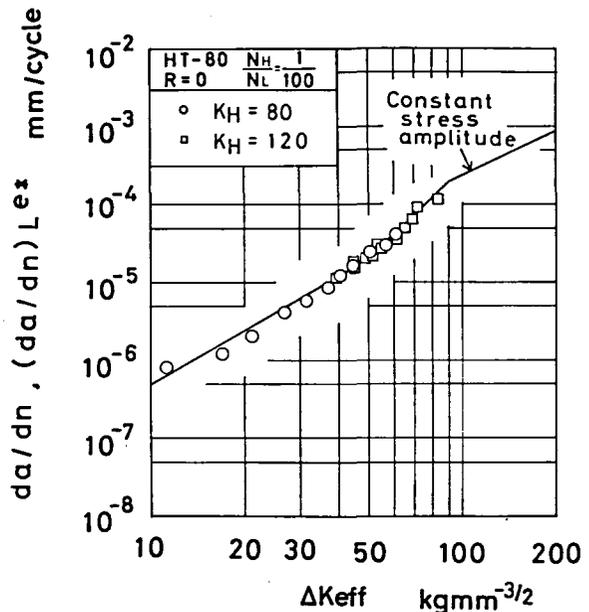


図 5.7 2段多重試験のき裂進展速度 (K値レベルを変えた場合)

各レベルを通じて K_{op} はほぼ一定であり、低レベルK値にかかわらず高レベルK値のみが K_{op} を決定している。しかもその値は K_H に対する一定振幅試験結果とよく一致している。ここで注目すべきことは、黒印で示す低レベルK値に対する K_{op} は高レベルK値の存在によって上昇し、一定振幅試験結果より高くなってい

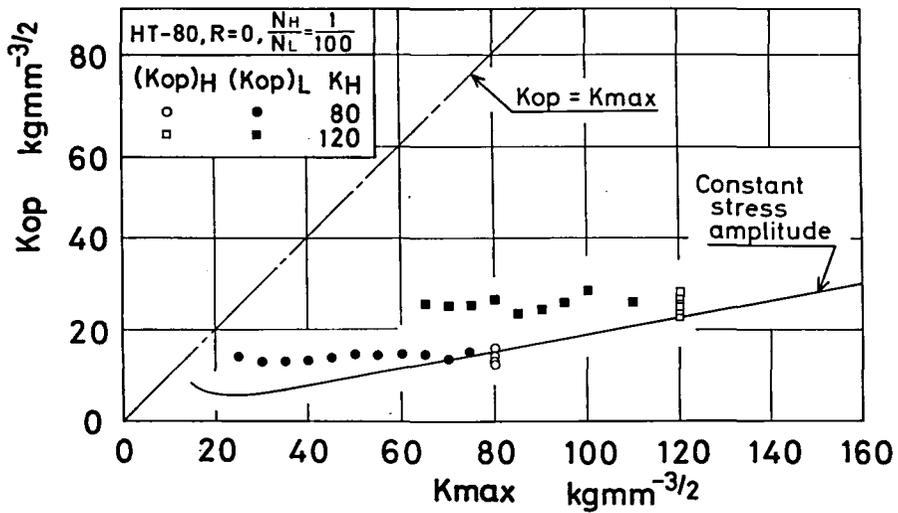


図5.8 2段多重試験のき裂開口点

ることである。その結果低レベルK値に対する ΔK_{eff} が一定振幅試験の場合より小さくなるため、低レベルK値下の速度を K_{max} に対してプロットすると図5.

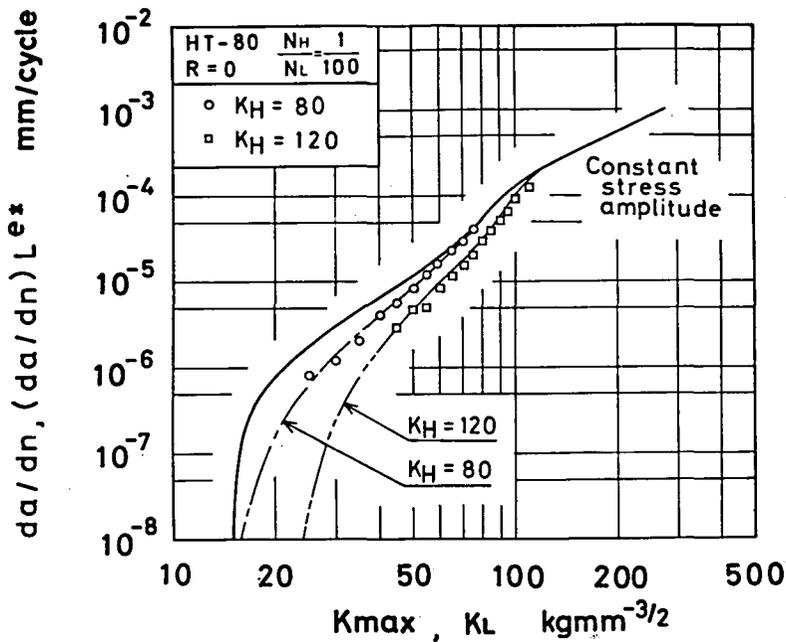


図5.9 2段多重試験のき裂進展速度と修正進展曲線

9のように、変動荷重下の速度は一定振幅試験の場合より小さくなっている。図中○印が $K_H = 80 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 、□印が $K_H = 120 \text{ kgmm}^{-3/2}$ に対するものであるが、図 5.8 に示したように K_H が高い程 K_{op} が高くなるため、図 5.9 の速度も同じ K_L についてみれば、 K_H が高い条件(□印)の方が K_H の低い条件(○印)より遅くなっている。このように変動荷重下ではある瞬間に負荷される K 値サイクルのみを規定しても速度は一意に決定されず、どのような高レベル K 値が負荷されるかによって影響されることがわかる。図中一点および二点鎖線はそれぞれ(3-5)式で求めた $K_H = 80 \text{ kgmm}^{-3/2}$ と $K_H = 120 \text{ kgmm}^{-3/2}$ に対する修正進展曲線であり、実験結果とよく一致しており、上述の状況をよく表わし得ている。

第3章以降に述べてきた結果を総合すれば、S35CやHT80のように $K_{max} \sim K_{op}$ 関係が右上りの特性を持つ材料において、 $R=0$ の定常な実働荷重によりき裂進展とともに K 値が増大してゆく場合の進展の様相は次のようになる。 K 漸増過程では K_H の増大とともに K_{op} も上昇するため、修正進展曲線の位置が変化してゆき、この過程を模式的に示すと図 5.10 のようになる。図中太い実線が K 漸増法による一定振幅荷重下の進展特性であり、 $a \sim e$ が修正進展曲線でこれは K_H の増大とともに右の方へ移動してゆく。なお曲線 a は一定振幅試験で得られ

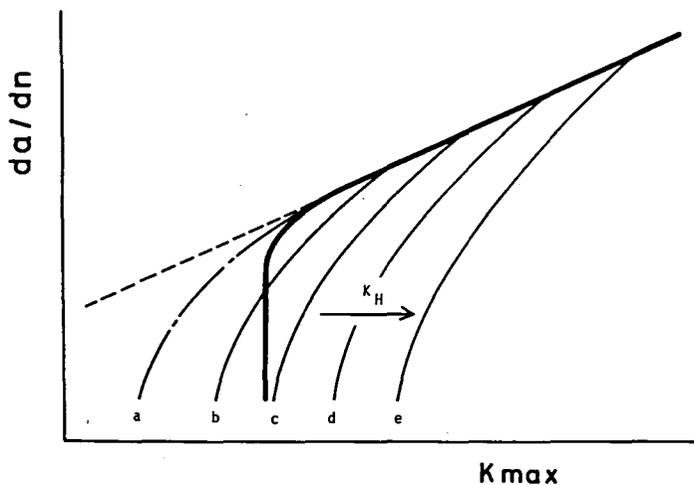


図 5.10 修正進展曲線、限界修正進展曲線と修正マイナー則による進展曲線

る最小のき裂開口点 $(K_{op})_{min}$ に対するもので、曲線 a より高い進展速度になることはなく、これが限界修正進展曲線ともいうべき安全側の限界線と考えられる。変動荷重下の進展速度を K 漸増法によって求めた一定振幅試験結果と比較してみると、 $(K_{max})_{th}$ 以上の比較的高い K 値領域では高レベル K 値の存在により K_{op} が上昇するため遅延現象が現われ、逆に低 K 領域においては $(\Delta K_{eff})_{th}$ が消失するため $(K_{max})_{th}$ 以下の荷重によっても進展し、見かけ上加速現象が生じる。

以上の修正進展曲線群 a ~ e に対し、破線で示す K 漸増法で求めた進展曲線を $(K_{max})_{th}$ 以下に直線で延長した修正マイナー則は全ての修正進展曲線を安全側に包含している。このように K_{op} が K_{max} の増加に伴い常に上昇する場合は修正マイナー則は安全側の推定を与えるが、大荷重が存在して K_{op} が上昇するような荷重パターンに対しては安全側すぎて、過剰品質を与えることがある。

このような場合設計に用いる推定法としては、(i)修正進展曲線による方法、(ii)限界修正進展曲線による方法、(iii) K_{max} に基づく修正マイナー則による方法の 3 種が考えられるが、いずれの方法によるかは設計対象、荷重の性質、き裂開閉口挙動に関するデータの有無等を考慮して適宜選択すればよい。

5.5 重畳変動荷重試験

第 3 章で低 K 領域においては、広帯域変動荷重に対する波形のカウント法としては、 ΔK_{eff} についてのレンジペアカウント法が適当であることを明らかにした。そこでは ΔK_{eff} についてのレンジペア法とレンジ法を比較したが、荷重条件を広範囲に変えることができなかつたため、その差は高々 2 倍程度のものであった。そこで本節ではより高い K 値領域を対象として、さらに試験条件を広範囲に選んで波形カウント法について検討する。

用いた荷重パターンは図 5.11 に示すような、三角波の基本波に正弦波が二次波として重畳する波形である。

き裂進展速度の整理については、進展曲線が図 5.5 に示したように全範囲を 1 本の直線で表わすことができないため、等価有効応力拡大係数による整理はでき

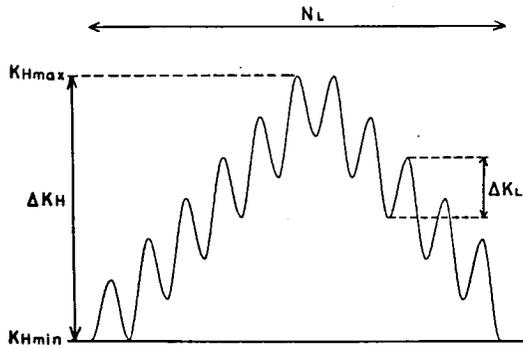


図 5.11 重畳変動荷重パターン

ない。したがってここでは進展速度比による整理を行った。進展速度比とは実際の 1 ブロックの進展量 Δa と各種の推定法による予想進展量 Δa^* の比であり、次のように定義する。

一定振幅荷重下の進展曲線を

$$da/dn = g(\Delta K_{\text{eff}}) \quad (5-2)$$

とする。レンジ法による推定では、 ΔK_{eff} のレンジのひん度分布を $f_1(\Delta_r K_{\text{eff}})$ とすれば、予想進展量は

$$\Delta a^* = \sum_{i=1}^k g(\Delta_r K_{\text{eff}})_i f_1(\Delta_r K_{\text{eff}})_i \quad (5-3)$$

(k は $\Delta_r K_{\text{eff}}$ のレベルの数)

となり、レンジ法による進展速度比 λ_{range} は

$$\lambda_{\text{range}} = \Delta a / \Delta a^* = \Delta a / \left\{ \sum_{i=1}^k g(\Delta_r K_{\text{eff}})_i f_1(\Delta_r K_{\text{eff}})_i \right\} \quad (5-4)$$

となる。

レンジペア法による推定では、 ΔK_{eff} のレンジペアのひん度分布を $f_2(\Delta_{\text{rp}} K_{\text{eff}})$ とすれば、同様に進展速度比 $\lambda_{\text{range-pair}}$ は

$$\lambda_{\text{range-pair}} = \Delta a / \left\{ \sum_{i=1}^k g(\Delta_{\text{rp}} K_{\text{eff}})_i f_2(\Delta_{\text{rp}} K_{\text{eff}})_i \right\} \quad (5-5)$$

(k は $\Delta_{\text{rp}} K_{\text{eff}}$ のレベルの数)

となる。

試験結果を整理して表 5.3 に示す。試験条件は最大の Kレンジペア ΔK_H を $147 \text{ kgmm}^{-3/2}$ で応力比 $R = 0$ に設定し、2 次波の Kレンジペア ΔK_L を $11.5 \text{ kgmm}^{-3/2}$ と $34 \text{ kgmm}^{-3/2}$ の 2 種類に選び、その個数 N_L を $10 \sim 130$ の間で変化させた。 $\Delta K_L = 11.5 \text{ kgmm}^{-3/2}$ のパターン A ~ D では、進展の大部分が基

表 5.3 重畳変動試験の進展速度比

Loading pattern	ΔK_H	ΔK_L	N_L	λ_{range}	$\lambda_{range-pair}$
A	147	11.4	12	7.64	0.993
B	"	11.0	26	8.39	0.903
C	"	11.5	48	6.75	0.930
D	"	11.5	130	4.10	0.870
E	"	34.4	10	2.58	1.07
F	"	31.5	22	2.58	1.09
G	"	34.0	45	1.99	1.12
H	"	32.5	110	1.45	1.04

本波によって生じているため、基本波をカウントしないレンジ法では λ_{range} が最大8以上となり、危険側の推定を与えている。また λ_{range} は N_L をふやした場合、 N_L とともにいったん増大し、最大値をとったあと減少するというように荷重条件に依存して複雑な挙動を示す。それに対してレンジペア法による

$\lambda_{range-pair}$ は荷重条件によらずほぼ1に近い値をとり、精度良い推定結果を与えている。

以上の結果からき裂進展問題においては、 ΔK_{eff} についてレンジペアカウントを行えばよいと結論できる。

5.6 ランダム変動荷重試験

第3章で低K領域におけるランダム変動荷重試験の場合には、荷重のパワスペクトル密度分布の形状や荷重レベルによらず最大のKレンジペア $(\Delta_{rp}K)_{max}$ とそれの有する応力比Rがき裂開口点を決定し、しかもそれが $(\Delta_{rp}K)_{max}$ に対する同じ応力比の一定振幅試験結果と一致すること、および進展量の推定には ΔK_{eff} のレンジペアに対し ΔK_{eff} に基づく修正マイナー形の推定法を適用すればよいことを明らかにした。

本節では高いK値領域においても同様の挙動を示すかどうかを調べるため、広帯域の擬似ランダム変動荷重を用いて、Kの最大値 $(K)_{\max}$ が $200 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 程度の領域まで試験を行った。荷重波形は3.3.5節で用いた擬似ランダム波形Aの速度を $1/4$ に落として負荷したものであり、1ブロックの周期は50秒である。荷重はK漸増法で負荷し、その履歴を一定振幅試験のそれとほぼ合わせるようにした。

き裂開口点 K_{op} は1ブロックを通じてほぼ一定であり、それを最大K値 $(K)_{\max}$ に対してプロットしたものを図5.12に示す。 K_{op} は右上りの実線で示す $R=0$

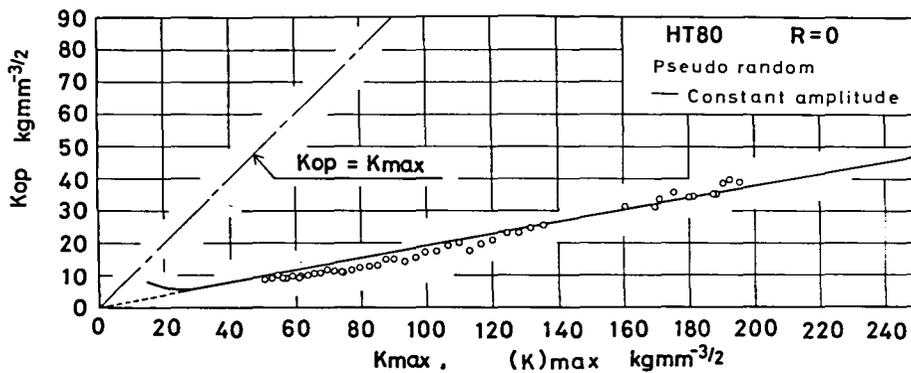


図5.12 ランダム変動試験のき裂開口点

の一定振幅試験結果に良く一致しており、最大のKレンジペア $(\Delta_{rp} K)_{\max}$ が $R=0$ であることから、ランダム荷重下では広い範囲のK値条件に対して $(\Delta_{rp} K)_{\max}$ とその有する応力比Rがき裂開口点を決定していることがわかる。

この K_{op} を用いて3.3.5.2節に示した方法で ΔK_{eff} のレンジペア分布を求め、進展速度を整理した。進展速度は前節と同様に進展速度比によって整理した。その結果を図5.13に示す。速度比 $\lambda_{range-pair}$ はほとんど1に近く良好な推定が得られており、 $K = 200 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 付近の高いK値領域まで ΔK_{eff} による取り扱いが有効であることがわかる。

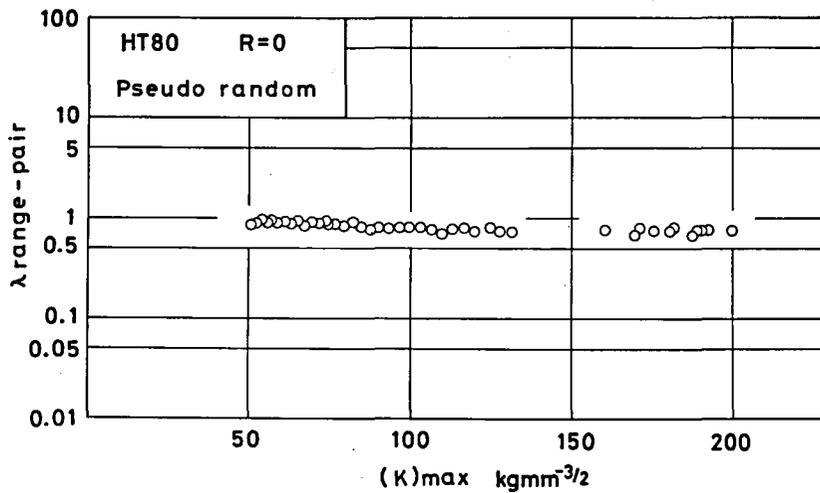


図5.18 ランダム変動試験の進展速度比

5.7 結 言

本章ではHT80を用い、 $K = 200 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 程度の比較的高いK値領域において2段多重、重畳、ランダム変動の代表的な荷重パターンを負荷してき裂進展挙動を調べた。

その結果、高いK値領域においても変動荷重下のき裂開口点は最大のKレンジペア $(\Delta_{rp} K)_{\max}$ とその有する応力比が決定し、これと同じ ΔK と応力比の一定振幅試験時の開口点に一致することがわかった。さらにそのき裂開口点を用いて ΔK_{eff} についてのレンジペアカウントを行い、 ΔK_{eff} についての修正マイナー形の推定法を適用すれば精度良い推定ができることを示した。

したがって低K領域において見出した取り扱い方法は、高いK値領域を含め広い範囲の条件について一般に適用できることがわかった。

ところで本研究で得られた上記の結論は、いずれも荷重変動の1周期が $10^3 \sim 10^4$ サイクルまでの荷重パターンの実験により得られたものであるが、1周期間のき裂進展量は塑性域寸法と比べれば1~2桁小さい。したがってこのような結論がどの程度の周期を持つ荷重変動にまで適用可能かは未だ実験的な裏付けはさ

れていない。しかし $(\Delta_{rp} K)_{\max}$ がき裂開口点を決定するという第1の結論については、第4章のき裂開口点は塑性域寸法よりはるかに大きい範囲にわたって荷重前歴の影響を受けるという事実より、安全側に見積って1周期のき裂進展量が塑性域寸法の程度までの条件について成り立つと思われる。またき裂進展量が ΔK_{eff} のレンジペアに支配されるという第2の結論については、き裂進展問題において過去の荷重がどのように記憶されレンジペアとして寄与するのかの詳細なメカニズムは未だ明らかでないが、恐らく1サイクルの進展量の 10^3 倍以上ある塑性域の重なりによるものと思われる。したがって塑性域寸法程度以上離れた点がレンジペアとして寄与することは考えにくい、塑性域寸法の数分の1程度では成り立つものと思われる。しかしそれ以上の範囲に対してもレンジペアとして考えておけば安全側となることから、前者とあわせると本研究の結論は1周期のき裂進展量が塑性域寸法程度までの変動荷重に対して適用して差しつかえないものと思われる。

第 5 章 の 参 考 文 献

- (1) Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R., The Stress Analysis of Cracks Handbook, (1973), Del Research Corporation

第 6 章 結 論

本研究では定常な実働荷重下の疲労き裂進展問題に対して、き裂進展速度をできるだけ直接に支配する因子でマクロに測定可能なものとしてき裂開閉口挙動を考慮した有効応力拡大係数を取りあげ、ランダムを含む各種のパターンの変動荷重に対してき裂開閉口挙動を高精度にかつサイクルに分離して測定し、現象を解明することを試みるとともに、その結果に基づいて、広範囲の荷重条件に対して適用できる進展速度の推定法を導き提案した。

問題の取り扱い方としては、周期的に繰り返される定常的な実働荷重に対し有効応力拡大係数 ΔK_{eff} を中間因子にとり、まず ΔK_{eff} 対するき裂進展則を調べ、一方外部荷重から定まる K 値条件に対するき裂開口点 K_{op} の挙動を調べて、変動荷重に対し ΔK_{eff} を推定する方法を見出し、両者を組み合わせ、定常ランダム荷重を含む定常的な実働荷重に対し K 値から進展速度を推定する方法を導いた。

広範囲の荷重条件を取り扱えるようにするために、荷重レベルは K_{th} を含む低 K 領域から $K = 200 \text{ kgmm}^{-3/2}$ 程度の高い K 値領域までを対象とし、特に低 K 領域においては K_{th} の消失に注目した。また任意のパワスペクトルを有するランダム変動荷重を含む一般的な定常実働荷重を取り扱うために小振幅の重畳する波形に対する平均荷重の効果と波形カウント法を検討した。

材料としては鉄鋼材料として S35C 焼準材、HT80 焼入れ焼戻し材、アルミニウム合金として A5083-O 材などを取り上げた。

得られた結果については各章の結言に記したが、その要点をまとめると以下のようなになる。

- (1) き裂開口点 K_{op} は K 増加過程では一方向負荷による塑性域寸法の 2 ~ 3 倍程度進展すれば定常値に達するが、 K 減少過程では前歴荷重によっていったん上昇した K_{op} は低下しにくいいため、これよりはるかに大きな領域にわたって荷重前歴の影響が存在する。
- (2) したがって K 漸減試験法による K_{th} 試験では、 K 値の減少率をかなり低くと

っても試験開始時の最大K値の影響を受けやすく、これをも十分低くし K_{th} の近くにとっておかないと、 K_{th} として高目の値が求まる恐れがあり注意を要する。

荷重前歴の影響を受けないき裂進展開始条件および一定振幅荷重下のき裂進展挙動を求めるためには、 K_{op} が0の理想き裂に近い状態の予き裂材に漸増するK値履歴を与え、 K_{op} が上昇する方向に試験する必要がある。そこで予き裂を作ってから真空焼鈍により K_{op} を下げる通常の方法の他に、深い切欠き試験片に K_{max} は低くし応力比Rを-1以下例えば-3程度にした繰り返し荷重を加え、 K_{op} の低い予き裂を発生させることをも試みた。

これらの方法によって作成した予き裂材を用いたK漸増試験で得た進展曲線は、任意のK漸減試験で求めた進展曲線を安全側に包含し、またそのき裂進展開始条件は一定振幅荷重下で材料が示す最小の K_{th} となることがわかった。

(3) 一定振幅荷重下でき裂進展下限界条件 K_{th} 、 $(\Delta K_{eff})_{th}$ が存在する場合でも、それをはさむ適当な変動荷重下ではいずれの下限界条件も消失し、それ以下の荷重によってもき裂が進展するため、 K_{th} 、 $(\Delta K_{eff})_{th}$ は小ひん度でもこれを超える荷重を含む実働荷重に対しては必ずしも設計基準とはならない。

(4) 応力比 $R = 0$ の定常な変動荷重下ではき裂開口点は荷重変動にかかわらずほぼ一定の値をとり、その値は通常変動荷重中に含まれる K_{max} の最大値と同じ K_{max} をもつ一定振幅荷重試験結果のき裂開口点に等しい。

(5) この場合き裂進展量は通常一定振幅荷重試験の ΔK_{eff} と進展速度の関係を下限界値以下に直線で延長した進展曲線によりほぼ定まり、いわば ΔK_{eff} に関する修正マイナー則を用いればほぼ安全側の推定となる。ここに安全側というのは K_{th} 以下、あるいはその付近の低レベルK値によるき裂進展には、負荷条件、材料によりある場合には K_{op} の上昇、き裂進展量の飽和など若干上記より安全側になる現象が生ずることがある。しかしその条件はかなり限られ、中間レベルの存在などにより妨げられるなど、必ずしも常に期待することはできないので、推定法の構成には考えないことによるものである。

(6) ランダム変動を含む任意のパターンの定常な変動荷重下では、き裂開口点は荷重変動にかかわらずほぼ一定の値をとり、その値は変動荷重中に含まれるK値

の最大のレンジペア $(\Delta_{rp} K)_{max}$ とこれに対応する応力比 R と同じ ΔK , R の一定振幅荷重試験結果に等しい。き裂進展量は ΔK_{eff} についてレンジペアカウントを行い, ΔK_{eff} に関する修正マイナー則を適用すればほぼ安全側の推定が得られる。

(7) したがって任意のパワースペクトル密度分布を有する定常な実働荷重下の進展速度を一定振幅荷重試験結果から推定するには次のようにすればよい。

即ち, まず実働荷重下の K 値のレンジペア・ミーンカウントを行い, K 値のレンジペアの最大値 $(\Delta_{rp} K)_{max}$ に対するき裂開口点 K_{op} を, $(\Delta_{rp} K)_{max}$ の有する応力比 R と同じ R の一定振幅荷重試験結果から読みとる。これが実働荷重下の K_{op} の推定値となるので, これを用いて K 値のレンジペア・ミーンの 2 元ひん度分布から ΔK_{eff} のレンジペア分布を算出し, これに ΔK_{eff} に関する修正マイナー則を適用すればき裂進展量を求めることができる。

なお定常実働荷重波形もしくはその極値列が順序を保存してそのまま与えられている場合には, これより直接レンジペアの最大値 $(\Delta_{rp} K)_{max}$ とその応力比 R を求めて K_{op} を推定し, 極値列の極値のうちこの K_{op} の値より低いものを全部 K_{op} の値で置き換え, これをレンジペアカウントして ΔK_{eff} のレンジペアを求めてもよい。

(8) 上記の推定法を適用する場合に, どの程度の長さの期間について $(\Delta_{rp} K)_{max}$ をとり, あるいは K_{op} をほぼ一定としてよいかについては実験的な研究はないが, 実用上き裂進展量がほぼ一方向性負荷による塑性域寸法程度まではよいものと思われる。

謝 辞

本論文を終るにあたり，本研究に対して終始御懇篤なる御指導と御鞭撻を賜った大阪大学 菊川 真教授，城野政弘助教授，ならびに本論文作成にあたり御校閲をいただいた大阪大学 浜田 実教授，大路清嗣教授および向井喜彦教授に対し深く謝意を表す。

また，本研究遂行にあたり御助力をいただいた大阪大学 安井一雄助手，当時大阪大学助手 安達正晴氏（現在 三菱自動車工業^株），大阪大学 崎原雅之技官，ならびに実験遂行，図面作成に御助力をいただいた土田智士，大久保由紀夫，是川紳一，合田泰規，三上省二，加藤憲男の諸氏ほか菊川研究室の方々に深く感謝する。

さらに，本研究で用いた材料のうち A5083-O，HT80 は^株神戸製鋼所より寄贈を受けた。記して謝意を表す。

