

高分子材料の疲れき裂成長について

北 川 正 義*

(1972年9月8日受理)

Fatigue Crack Growth in High Polymeric Solids

Masayoshi KITAGAWA

Abstract: — Fatigue crack growth in high polymeric solids was studied to investigate its mechanism and its law. A stress intensity factor was used to normalize the crack growth rate data. The geometry of fatigue striation was observed using a surface roughness meter and a interference microscope.

The results are briefly summerized as follows:

- (1) There are many similarities in fatigue crack growth behavior between of high polymeric solids and of metals.
- (2) The fatigue crack growth rate of high polymeric solids as well as metals is also expressed by the power law of the range of stress intensity factor.
- (3) The depth of striation is proportional to its spacing, and the geometry of striation is illustrated.

1. 結 言

材料の疲れ過程は、き裂の挙動に着目すると、き裂の発生、成長および最終の破断過程の三段階に分けることができる。それぞれの過程は、工学的にも物理的にも重要な意味を持っているが、いまだ明確にされていない。これらのうち、き裂成長過程は疲れ寿命のかなりの部分をしめることが知られている。特に、鋭いき裂や潜在的な欠陥がある材料では、平滑材以上にき裂の挙動は重要となる。

近年、き裂成長過程に関する研究は多く、いくつかの^{(1),(2)}総説も書かれている。それらは金属材料のき裂成長速度法則を主体としている。き裂成長速度は、線形破壊力学から導入された応力拡大係数の範囲 ΔK を用いて

$$\frac{dc}{dN} = D(\Delta K)^m \dots \dots \dots (1)$$

⁽³⁾で表わされる。ここで c : き裂長さ、 N : 繰返し数、 D および m : 材料などに依存する

* 茨城大学工学部精密工学科

定数である。疲れき裂成長機構を明らかにするには、これら定数項 D および m の関数形を求めていくことが必要であるが、いまだ確立されていない。 D および m は、応力比 P (最小公称応力と最大公称応力の比)、繰返し速度 w 、温度 T および環境剤などの諸因子の影響を受ける。これを調べるには、一連の系統的な理論研究および実験研究が必要であるが、現在のところ、横堀、Wei および James の研究を除いて極めて少ない。前報では、金属材料と高分子材料の疲れき裂成長挙動が類似している⁽⁸⁾ことに注目して、高分子材料を用いた実験から

$$\frac{dc}{dN} = A(\gamma)w^{-n}e^{\delta P}(\Delta K)^{m(T,\gamma)}e^{-\frac{Q}{RT}} \dots\dots\dots(2)$$

を提案した。ここで $A(\gamma)$: 表面エネルギー γ に依存する定数、 Q : 見かけの活性化エネルギー、 R : ガス定数、 $m(T, \gamma)$: 温度および表面エネルギーの関数、 n および δ : 材料定数である。温度依存性の形式は、 ΔK のかわりに応力項を代入すれば、クリープにおける Dorn⁽¹⁰⁾則および信頼性工学における故障速度と一致する。今後は指数項と温度および表面エネルギーの関係を明確化する必要がある。⁽⁹⁾

本報は、高分子材料の疲れに関する研究の一環として、ガラス遷移温度以下での高分子材料の疲れき裂成長を考え、金属材料の場合と比較し、疲れき裂成長速度法則検討の目安とすることを目的としている。^{(12)~(15)}

2. 試験片および実験方法

用いた材料は、市販されている厚さ 1mm ポリカーボネイト (PC)、二種のポリメチルメタアクリレート (PMMA-A, PMMA-C)、ポリ塩化ビニル (PVC) および ABS 樹脂の圧延板である。これを 130×40mm の矩形試験片に加工し、その側面中央部に片側スリット状切欠きをつけ実験に供した。切欠きは糸のこおよびかみそりの刃にてつけた。その際に生ずる残留歪を持つ領域は、偏光顕微鏡を用いた観察からわずかであることを確認した。

使用した試験機は、容量 100Kg のインストロン型引張試験機である。繰返し負荷は、等辺三角形波である。繰返し速度は 20~60cpm の間であり、この程度の相違は結果に与える影響は少ない。試験温度は 20~30°C の室温である。き裂長さは、グイアルゲージを取付けた読取り顕微鏡 (X40) にて測定した。成長速度は、き裂長さ対繰返し数のグラフ上での接線の傾きからもとめた。

なお、本報では応力拡大係数の範囲として、き裂長さと板巾の比に依存する修正係数を無視して $\Delta\sigma\sqrt{C}$ を採用した。 $\Delta\sigma$ は公称応力の変動範囲である。

3. 結果および考察

3.1 疲れき裂成長速度

き裂長さと繰返し数との関係の例を図 1 に示す。切欠き先端からき裂が発生、成長して、き裂がある一定長さに達した時点の繰返し数を零として描いてある。PC 材を除いた材料では、切欠きからき裂が発生するまでに、かなりの繰返し数を要する。たとえば、PVC 材では 5000 回の繰返しを必要とする場合もあった。一方、PC 材では負荷開始と同時にき裂は成長を開始する。この相違は、切欠き先端部においての繰返しによる損傷量の蓄積効果の相違によって生ずるであろう。

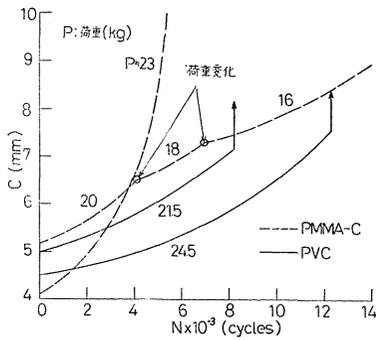


図 1 き裂成長曲線の例

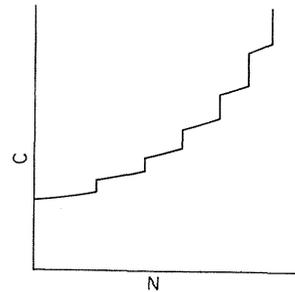


図 2 PVC 材のき裂成長形式の模形

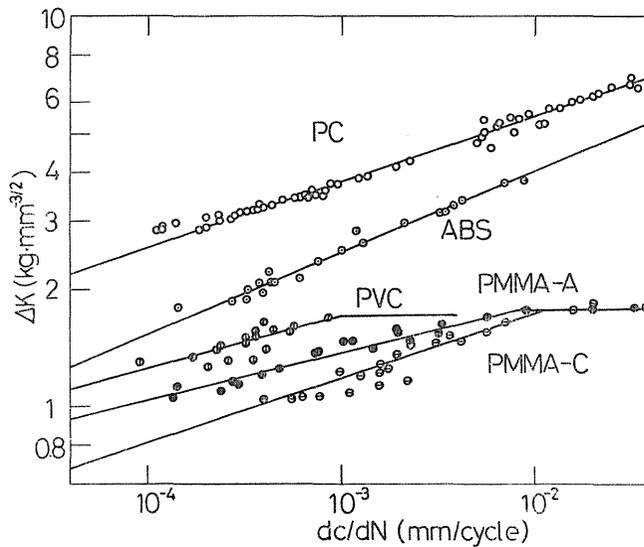


図 3 高分子材料の疲れき裂成長速度特性

き裂成長をより詳細に観察すると、PVC 材以外の材料では、1 回の繰返しごとにほぼ一様にき裂は成長するが、PVC 材では、図 2 に示すように、ある程度の繰返し数までは微量だけ成長し、その後の 1 回の繰返しで急激な成長を起す。⁽¹⁶⁾ この様相は他の研究者によっても観察されている。PVC 材では、実際には階段状のき裂成長を行う。これらを平均して、き裂成長速度を求めた。これを dc/dN と ΔK の両対数グラフ上で図 3 に示す。高分子材料においても (1) 式は成立する。PVC および PMMA 材では、 ΔK が一定値に近づくとき、き裂は急激成長を起し、図中に示す遷移点が現われる。この傾向は、金属材料にも観察されている。⁽¹⁷⁾ 図中に示す直線から、(1) 式の指数 m を求めると PC 材では $m \approx 6$ 、PMMA 材では $m \approx 6$ および 9 、PVC 材では $m \approx 7$ 、ABS 材では $m \approx 5$ である。他の結果によれば PC 材で $m \approx 5.4$ PMMA 材で $m \approx 4.52$ ⁽⁸⁾ となっており、本実験値に近い。⁽¹⁵⁾ このように高分子材料では、金属材料の場合に比べて指数 m の値は大きくなっている。さらに材料によって指数値はかなりことなり、Paris によって提案された 4 乗則が適当でないことがわ

かる。したがって、指数 m は材料に依存する定数と定義する方が妥当であり、材料固有の値たとえば表面エネルギー、ヤング率、降伏応力などの関数として求めていくことが必要である。

環境剤を接触させた場合の例を⁽¹⁸⁾図4に示す。環境剤(本実験では灯油)によって、(1)式の指数 m および定数項 D はかなり変化している。環境剤は一般に材料の表面エネルギーを減少させるので、このため D および m が変化すると考えられる。したがって(1)式は(2)式のように、表面エネルギーの関数として表わす方が妥当であろう。これについては、今後多くの系統的な実験結果の蓄積が必要である。

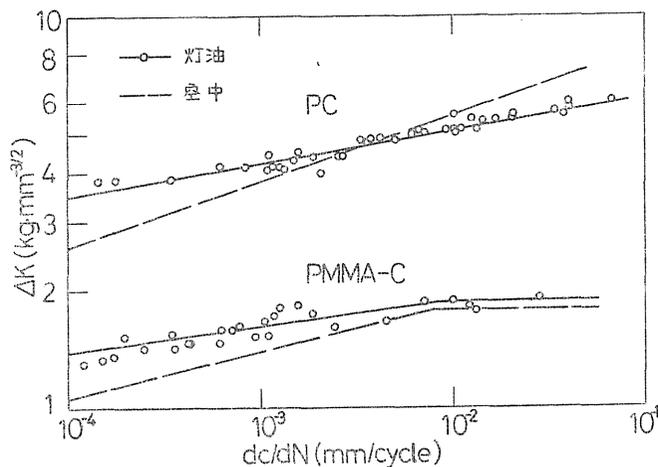


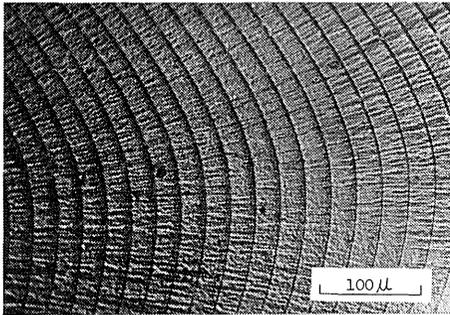
図 4 疲れき裂成長速度に及ぼす環境剤の影響

3.2 破面観察 破面の光学顕微鏡観察例を図5に示す。ABS 材では、破面にクロムを真空蒸着して観察した。用いた材料すべてについて、疲れ破面特有なストリエーションが観察される。このストリエーションは、PVC 材を除いて、1回の繰返しごとに形成されるが、PVC 材では、数百回(この回数は応力拡大係数に依存する)の繰返しの後に1個形成される。PVC 材のようなストリエーション形成過程は、低応力拡大係数の場合において、⁽¹⁹⁾アルミ合金や⁽¹⁴⁾PC 材に観察されているが、破壊じん性値近傍の応力拡大係数まで観察されるのは特徴的である。

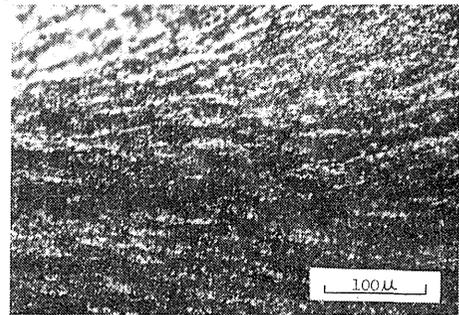
PC, PVC および ABS 材では、ストリエーションは板厚方向にほぼ一様であるが、PMMA 材ではかなり複雑な様相を呈している。き裂進行方向に対してストリエーションとは別の凸状の模様が見られ、この模様の所でストリエーションは急激に方向をかえている。この傾向は試験温度の上昇とともにいちじるしくなる。これは試験温度の上昇によって、材料の粘性の増加、き裂近傍のクレージングなどに原因するであろう。

環境剤を接触させた場合の例を図6に示す。破面には空孔、クレーズ割れなどが現われ、空中室温疲れに比べてより複雑になっている。さらに破面は全体的に脆性的な様相を呈する。このような脆化現象が図4に示す実験点の相違の原因であろう。

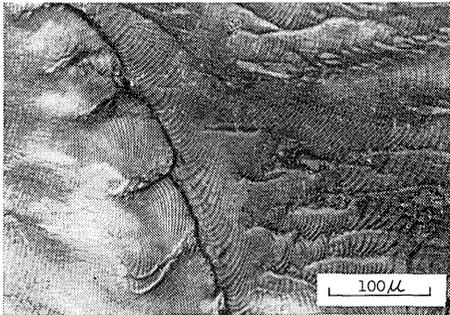
3.3 ストリエーションの形状 1サイクル中におけるPC材のき裂先端挙動の模様を図7に示す。⁽²⁰⁾負荷の増加とともにき裂端は鈍化し、き裂は次第に成長する。この状態は最大負



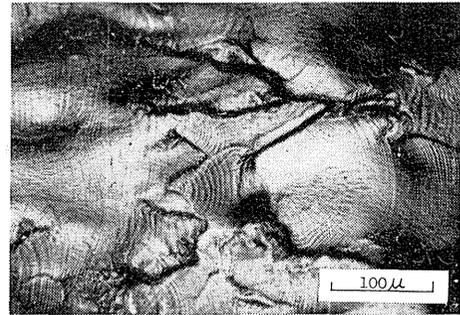
a) PC



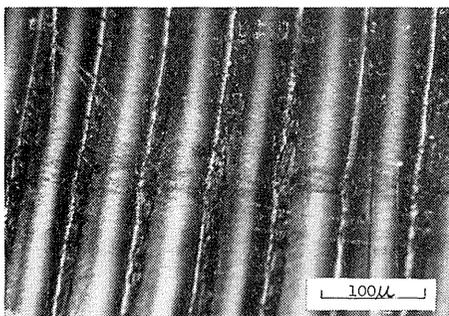
b) ABS



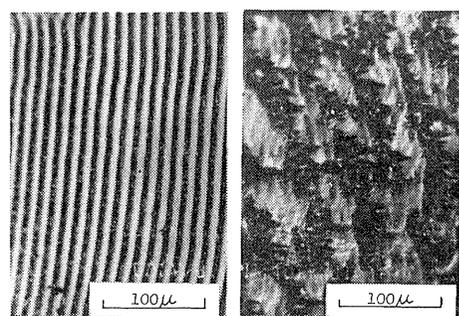
c) PMM-C (室温)



d) PMMA-C (55°C)



e) PVC (疲れ破面部)



f) PVC (脆性破面部)

図 5 高分子材料の疲れ破面観察の例

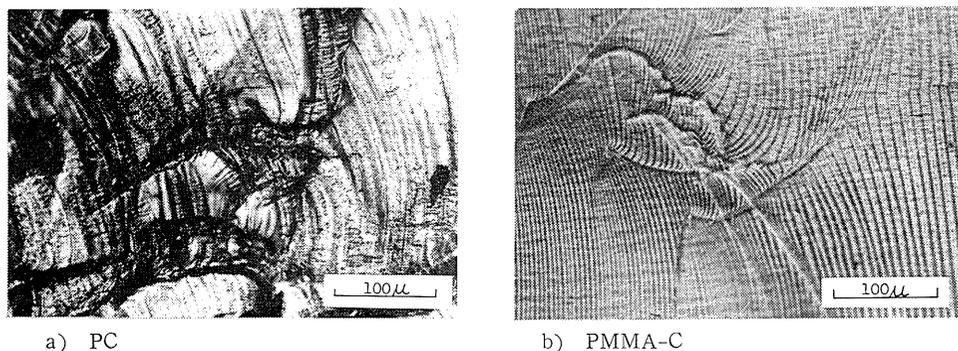


図 6 灯油中での疲れ破面の例

荷まで続く。最大荷重を超えて、除荷がはじまると、き裂端は閉じはじめる。残留歪および残留応力のため、き裂端が微量後退してき裂開口部に入り込む。除荷の間にはき裂はほとんど成長しない。このような過程の繰返しによってき裂は成長する。ストリエーションは、除荷時と負荷時の急激なき裂形状の変化によって形成されるであろう。したがって、ストリエーション凹部の深さはき裂端の開口変位または歪量に依存すると考えられる。ストリエーション間隔（本実験ではき裂成長速度と一致する）は、開口変

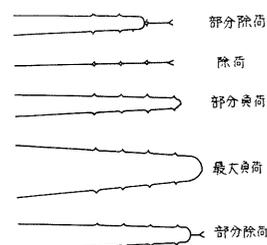


図 7 き裂先端部の変形と疲れ条痕形成機構

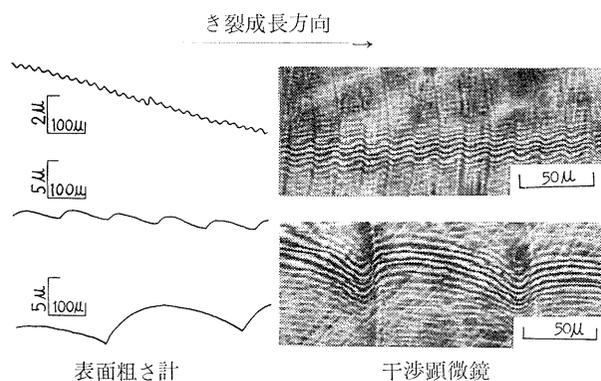


図 8 疲れ条痕形状の観察例 (PC)

位と密接に関係するので、間隔と深さとの間にも一定の関係が観察されるはずである。この意味においてストリエーションの間隔 δ と深さ h の関係を調べることは興味深い。これを調べるため、表面粗さ計および光学干渉顕微鏡を用いた。干渉顕微鏡での観察の際、破面にクロムを真空蒸着した。観察例を図8に示す。図8から明らかなように、ストリエーションの形状は対称でなく、き裂成長方向に対して凹部の立ち上がりが急になっている。また、ストリエーションの深さは、板厚中央部で最も深く側面に近づくにしたがって浅く

なる。この様相を模式的に図9に示す。板厚のほぼ中央部での δ と h の関係を図10に示す。測定方法によらずほぼ同様な傾向をとり、ストリーションの間隔の増加とともに深さも増す。図中に示す直線は、深さと間隔の比が $1/100$ の関係を示す。実験点はほぼこの直線関係に従っている。

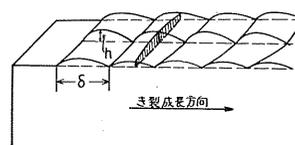


図 9 疲れ破面の模形図

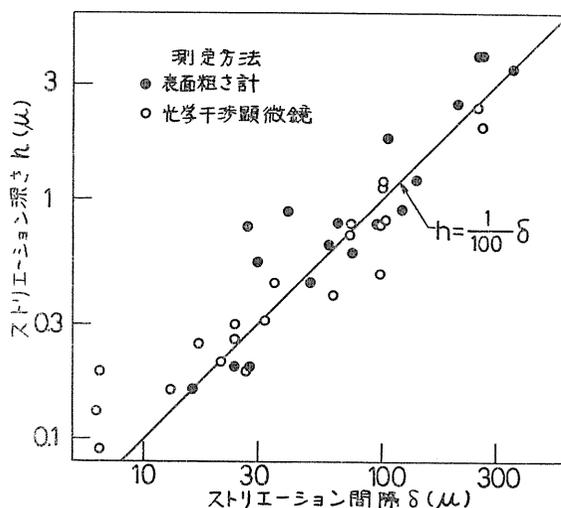


図 10 疲れ条痕の深さと間隔の関係

$$h = \frac{1}{100} \delta = \frac{1}{100} D(\Delta K)^m \dots\dots\dots(3)$$

疲れき裂成長速度法則を検討するには塑性力学的見地から (3) 式のような幾何学的関係式をも明らかにしていく必要がある。

4. 金属材料との類似性⁽⁸⁾

微視的な機構は別にして、高分子材料と金属材料の間に、疲れき裂成長挙動の類似点が多い。たとえば以下に示す点である。

- (1) 繰返しによって生ずるき裂端の塑性域長さは、破壊力学的計算結果と一致する。⁽⁸⁾
- (2) 応力拡大係数は結果を整理するに有効である。
- (3) き裂成長速度対応力拡大係数の両対数グラフ上で、速度特性は三種の領域に分類できる。⁽⁸⁾⁽¹⁴⁾
- (4) ストリーションが形成される。
- (5) 温度および繰返し速度依存性が類似している。⁽⁹⁾⁽²¹⁾⁽²²⁾⁽²³⁾

以上のように、巨視的な現象面での対応性は多くある。このように多くの類似性を考えれば、高分子材料は金属材料と同様な疲れき裂成長速度法則（速度過程論からの法則であろうが、破壊力学的に求められた法則であろうが）によって説明可能と考えられる。したがって高分子材料の疲れに関する研究は、それ自体の重要性ばかりでなく、金属材料の疲れ

き裂成長法則を推定可能であるという点にも意義がある。

5. 結 論

4種の高分子材料を用いて、疲れき裂成長に関する研究を行ない次のことが明らかとなった。

- (1) 応力拡大係数は、高分子材料に対しても、結果を整理するうえで有効である。
 - (2) き裂成長速度は、応力拡大係数の範囲の指数法則にしたがい、その指数値は材料によって相違し、一般に金属材料より高い値となる。
 - (3) ストリーションの形成過程を推定した。またその形状を観察し、対称でないことおよび深さと間隔は比例関係を示すことを明らかにした。
- 終りにあたり、本研究の実験に御協力頂いた本学大学院学生元村 桂君に謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 横堀武夫：第14回材料強度と破壊シンポジウム論文集，(1969) 89.
- (2) 北川英夫：日本機械学会誌，75巻，642号，(1972) 1068.
- (3) P. C. Paris and F. Erdogan：Trans. ASME, Ser. D, 92, (1970)121.
- (4) T. Yokobori: Physics of Strength and Plasticity, MIT Press, (1969) 327.
- (5) T. Yokobori and M. Ichikawa: Rep. Res. Inst. Strength and Fracture of Materials, Tohoku Univ., 4, (1968) 45.
- (6) R. P. Wei: Int. J. Fract. Mech., 4, (1968) 156.
- (7) J. A. Feeney et al.: Met. Trans., 1(1970) 1741.
- (8) 横堀武夫：材料，20巻，211号，(1971) 453.
- (9) 北川正義：機講論，No. 720-1, (昭47-4) 29.
- (10) J. E. Dorn: J. Mech. Phys. Solids, 3, (1954) 85.
- (11) 塩見 弘：故障物理入門，丸善。(1970) 77.
- (12) 横堀武夫，笹平誠一：機講論，No 187, (昭43-4) 125.
- (13) 横堀武夫，佐藤好一：機講論(仙台地方)前刷(昭45)
- (14) 永田雅一，鈴木 恵：材料，(1970) 455.
- (15) B. Mukherjee and D. J. Burns: Experimental Mech.,7(1971)433.
- (16) J. P. Elinck et al.: Int. J. Fract. Mech., 7 (1971) 277.
- (17) C. M. Carman and J. M. Katlin: Trans. ASME, Ser. D, 88 (1966) 792.
- (18) 北川正義：機講論(浜松地方)，No. 723-4, (昭47-6) 29.
- (19) 小寺沢良一：第17回材料強度と破壊シンポジウム論文集(1972) 34.
- (20) 北川正義：材料，21, (1972) 859.
- (21) L. A. James et al. Met. Trans., 2, (1971) 491.
- (22) J. T. Ryder and J. P. Gallagher: J. Basic Eng., Trans. ASME, Ser.D, 92, (1970) 121.
- (23) J. M. Barsom: Int. J. Fract. Mech., 7, (1971) 163.