

動的クラック伝播挙動の微視的考察

その 1

大谷 信男・小林 昭

Microscopic Approach to Dynamic Crack Propagation Behavior

Part 1

By

Nobuo OHTANI and Akira KOBAYASHI

Abstract: Dissipation energy governing fracture is investigated in combination with crack velocity through microscopic approach. In results, correlations between crack velocity and dissipation energy are reasonably understood with the aid of microstructure mechanism.

概 要

クラック伝播挙動を支配する散逸エネルギーの動的挙動を明らかにするため、PMMA 板を用い、クラック先端での微視破壊機構に着目して、微視的観点から、その要因を検討した結果、動的クラック伝播領域での散逸エネルギーは、伝播速度に依存して増加する領域と、ほぼ一定の領域とがあり、前者では、延性破壊的機構即ち、2次クラックの存在が、後者では、脆性へき開的破壊機構の存在が、それぞれその要因となっていることが分った。

1. ま え が き

構造物の巨大化および高速化に伴い、動的破壊の問題は益々工業的にも重要な課題となって来た。特に破壊時の表面エネルギー、塑性変形エネルギー、粘性エネルギー等の、いわゆる散逸エネルギー (dissipation energy) は、そこでの動的クラック伝播挙動を支配しているため、この動的挙動を明らかにすることは、極めて大切なことである。この散逸エネルギーは、クラック速度に極めて強く依存することが明らかにされてきたが [1]~[3]、この依存性がどのような機構に基づくかを追究したものは少なく、僅かに Broberg [4] の報告にみられる程度である。この Broberg の model [4] においても、現実の破壊機構に基づいたものではないという欠点があり、またさらに、実際の散逸エネルギーの変化には、必ずしもクラック速度に依存していない領域がみられる [1][5] ことなど未だ不明の点が多い。

そこで、本研究においては、微視的観点から散逸エネルギー吸収要因を検討すべく、PMMA 板を用い、散逸エネルギー自体の計測が極めて困難な為、散逸エネルギーに関連する量としての動的応力拡大係数の変化挙動と、進行クラック先端での微視破壊機構が、どのような関係にあ

るかを、走査電子顕微鏡、光学顕微鏡、shadow spot法等を駆使して、実験的に説明を進めることを試みた。

2. 試験片および実験方法

使用材料は市販（住友化学製）のPMMA板で、これを機械加工により、図1(a),(b)に示すような形状の試験片にした。図1(a)に示す試験片は片面に5mm間隔で銀ペイント塗付の速度ゲージ法〔6〕によるクラック伝播速度と、shadow spot法〔7〕による動的応力拡大係数、伝播速度との測定に、また、図1(b)に示す試験片は干渉法によって、クラック伝播の低速度領域におけるクラック先端での微視破壊過程を直接観察するために、それぞれを用いた。ここで、試験片の初期切欠のうち、natural crackの形成には、疲労試験機を用いたが、その疲労条件は、繰り返し変位速度 $\approx 1 \text{ mm}/50 \text{ Hz}$ 、繰り返し数 ≈ 3000 とした。試験片を常温において、インストロン型引張試験機に取り付け、 $2 \text{ mm}/\text{min}$ にて負荷し、mode I型のクラックを進展させ、破壊実験を行なった。

図2は、Cranz-Schardin型超高速閃光装置の使用によるshadow spot法によって、動

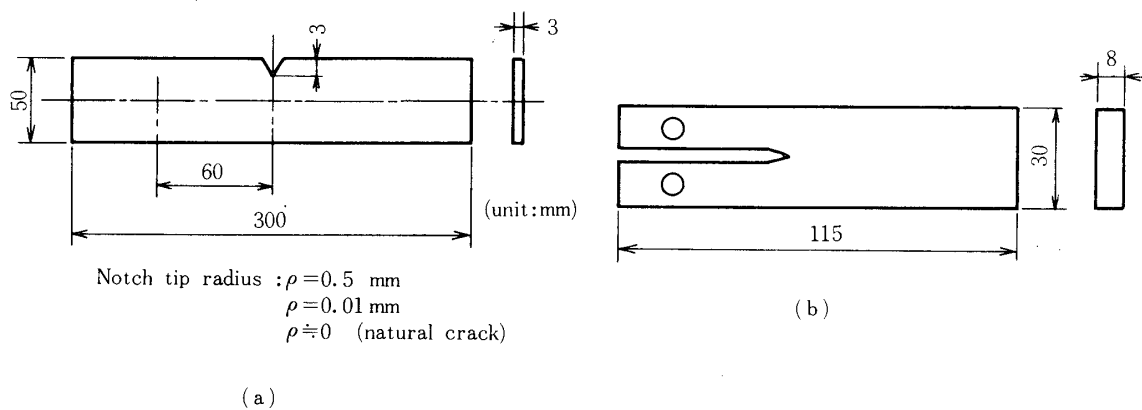


図1 試験片形状

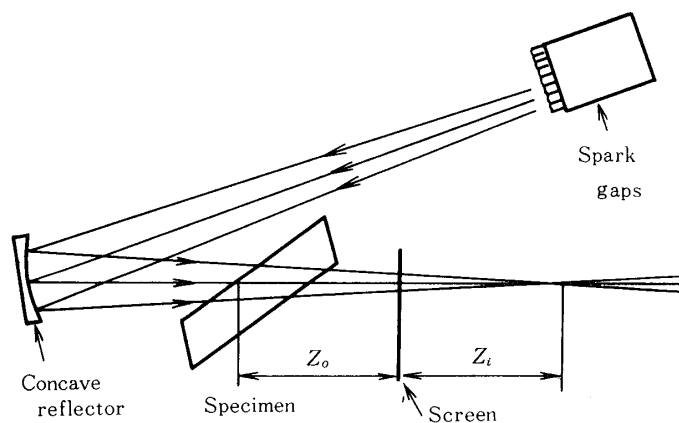


図2 装置の光学的配置

的応力拡大係数 K_D およびクラック長さ C を求めるための、光学的配置を示したものである。ここで、 K_D は図中のスクリーン上に投影された shadow spot の直径 D_t を測定することによって、次式 [7] より求められる。

$$K_D = \frac{1.671}{Z_0 \cdot t \cdot C_t \cdot \lambda_m^{1.5}} \left(\frac{D_t}{3.17} \right)^{2.5}$$

D_t : shadow spot 最大直径

Z_0 : 試験片～スクリーン間距離

Z_i : スクリーン～焦点間距離

$\lambda_m = Z_i / (Z_0 + Z_i)$

t : 板厚

C_t : stress-optical 定数 ($C_t = 0.54 \times 10^{-3} \text{ mm}^2 / \text{kg}$)

また、クラック速度 \dot{C} の計測には、通常速度ゲージ法を用い、その不連続な電気抵抗の変化を、ホイートストン・ブリッジ内での不連続な抵抗変化に変換し、そこから得られる出力を、高速デジタルメモリ計に入力し、記録することから \dot{C} を求めたが、詳細は文献 [6] を参照されたい。図3は、これらの計測の概略を、ブロック化して示したものである。図4は、干渉法によって、 \dot{C} の低速度領域におけるクラック先端での動的な微視破壊過程を、直接観察するため用いた装置の原理図を、示したものである。この方法はクラック又は craze material の上面と下面での光の光路差による干渉を利用し、その干渉縞よりクラック先端の形態を調べようとするもので、Kambour [8] が、クラック先端における静的な craze material の形態を調べるために開発した方法である。詳しくは文献 [8]～[9] を参照されたい。

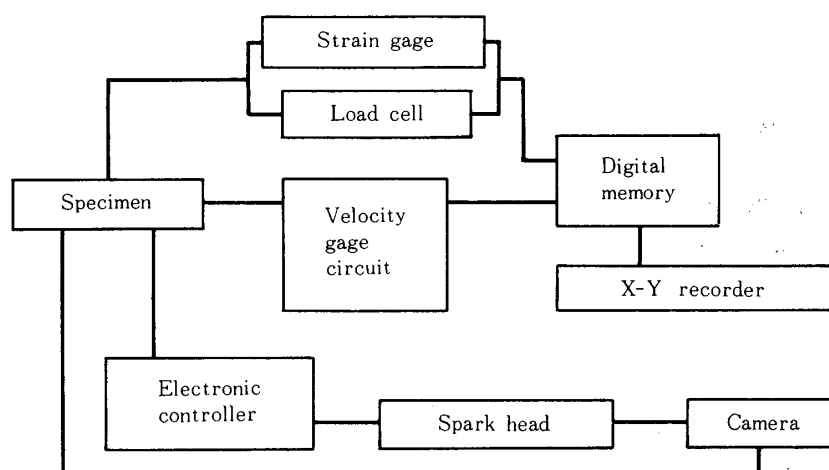


図3 計測ブロック図

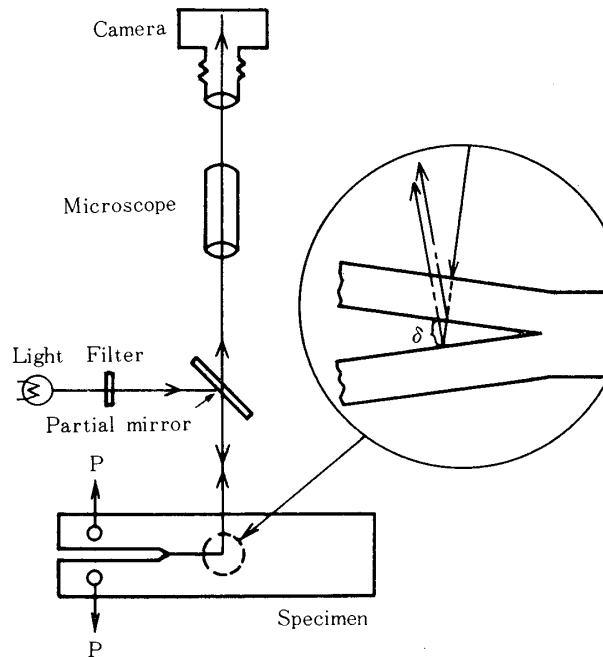


図4 干渉法に用いた装置の原理図

3. 実験結果および考察

3.1 動的応力拡大係数とクラック伝播速度の関係

図5は、動的破壊時において、shadow spot 法により、動的応力拡大係数 K_D を、又、shadow spot 法および速度ゲージ法により、クラック伝播速度 \dot{C} をそれぞれ求め、それらの関係を調べた結果である。これより、 K_D は、 $\dot{C} \approx 500 \text{ m/s}$ においては、およそ、初期の2倍にも達していることがわかる。特に、 K_D の増加は、主に $\dot{C} \geq 150 \text{ m/s} \sim 200 \text{ m/s}$ において著しいことが認められる。しかしながら、 $\dot{C} \leq 150 \text{ m/s}$ においては、 K_D はほんの僅かな増加が認められる程度で、巨視的には、ほとんど一定値を呈している。このような特徴は、他の高分子材料 [10]~[12] において認められる結果に比べ、それほど顕著ではないが、 \dot{C} にほとんど関係なく、ほぼ一定値を示す領域と、 \dot{C} に依存してその値が著しく増加する領域の2領域から成立しているものとみなすことができる。

3.2 動的応力拡大係数の変化と微視破壊機構との関係

(A) クラック伝播速度に依存しない領域

K_D が \dot{C} に関係なく、ほぼ一定値を示す領域における微視破壊機構を明らかにするため、この領域に対応する破面を、走査電子顕微鏡および光学顕微鏡で調べたところ、ここでの破面形態は、 \dot{C} によって多少の相違が認められるものの、およそ図6(a)にみられるような、irregular linesより成り立っていることが認められた。しかも、ここでの破面の roughness

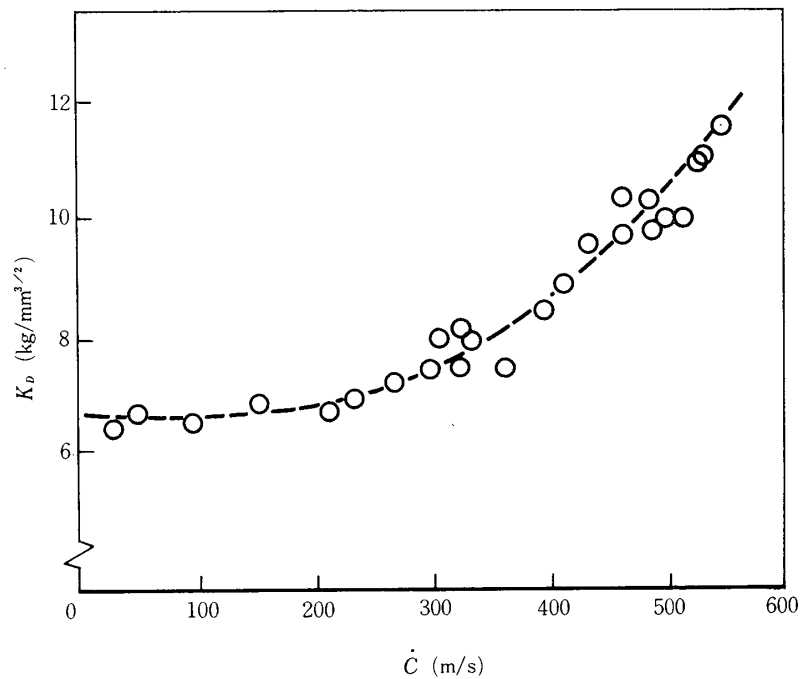


図5 動的応力拡大係数とクラック伝播速度の関係

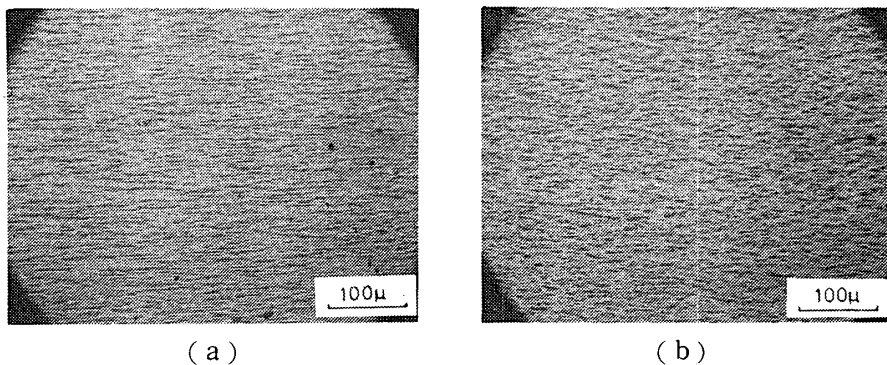


図6 irregular lines

は、図7に見られるように、ほぼ一定値を示していることから、この領域における破壊機構には、変化が生じていないものと考えられる [13]. よって、この領域においては、irregular lines を形成するような微視破壊機構によって破壊が進行しているものといえよう. この事実に基づいて、ここでは逆に、このような irregular lines が、どのような微視破壊機構によって形成されるのかに置き換えて調べた. まず、図1 (b)に示す試験片を用い、種々の負荷条件により、irregular lines 形成条件を求め、この条件でのクラック先端での微視破壊過程を、図4に示した干渉法によって調べた.

図8は、 $\dot{C} \approx 6 \text{ mm/s}$ で進行しているクラックが、破面上に図6 (b)に示すような irregular lines を形成する際、観察されたクラック先端の craze material の干渉縞の写真である.

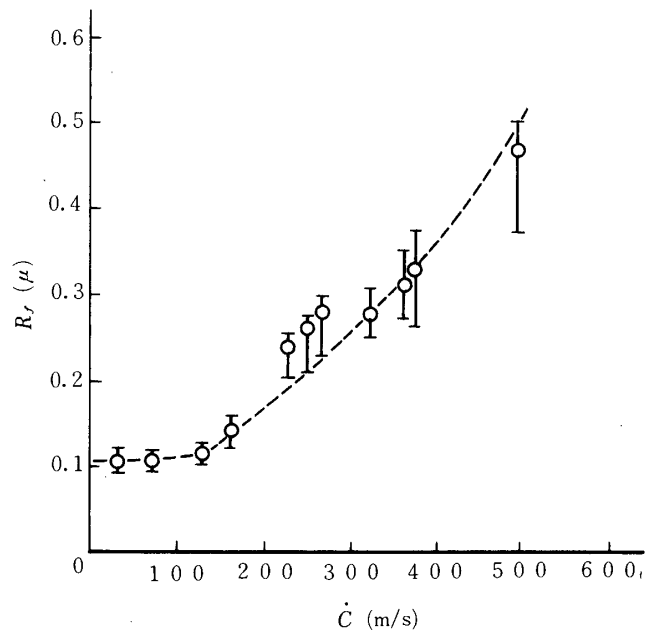


図7 クラック伝播速度による破面 roughness の変化

全体の縞は、craze material にみられる密な縞と、クラック面上に見られる粗い縞とから成立していることがわかる。この結果より、主クラック先端の craze material 層内には、顕微鏡 order の微視ボイドの発生、合体等は全く認められず、一様にクラックが進展していることが認められる。

図9は、図8にみられるようなクラック先端の craze material の干渉縞の観察結果に基づいて、その断面形態を図示したものである。ここで、craze material の厚さ δ の算出には次式 [9] を用いた。

$$\delta = \frac{n + 0.5}{2\mu_b} \cdot \lambda \dots\dots (\text{明色縞})$$

Direction of crack propagation \rightarrow

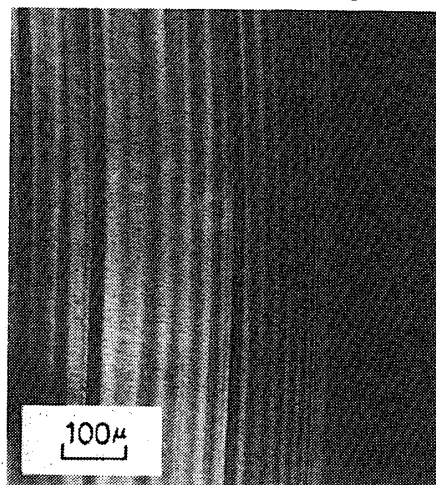


図8 クラック先端の干渉縞

$$\delta = \frac{n}{2\mu_b} \cdot \lambda \cdots \cdots (\text{暗色縞})$$

但し n : 縞次数, λ : 波長, μ_b : 反射率

この図より, クラックは, 先端に非常に微小な craze material 層を伴いながら, 進行していることが分る. このことは, 上述の結果との関連から, ここでのクラックは, その先端に, 通常の塑性域に相当する craze material を有してはいるものの, 本質的には, 脆性へき開的な破壊によって進行しているものと解釈される. 換言すれば, クラックが, 脆性へき開的な破壊機構によって進展する場合には, 破面上に irregular lines が形成されるが, \dot{C} が変化しても K_D は一定であると言えよう*.

以上のことから, K_D と散逸エネルギー D との間の $D \propto K_D^2 f(\dot{C})$ [14] なる関係を考慮すると, この領域で, 散逸エネルギーが, \dot{C} に係わりなく一定である主要因は, クラックが脆性へき開的な破壊機構によって進展するためといえる.

(B) クラック伝播速度に依存する領域

次に, K_D が著しく \dot{C} に依存する領域において, 微視破壊機構を調べると, この破壊機構は, 図7の結果から類推して, 前述の破壊機構に変化が生じていることが期待される. そこで, 破面形態を調べた結果, 前述の領域で認められたような, irregular lines のみよりな

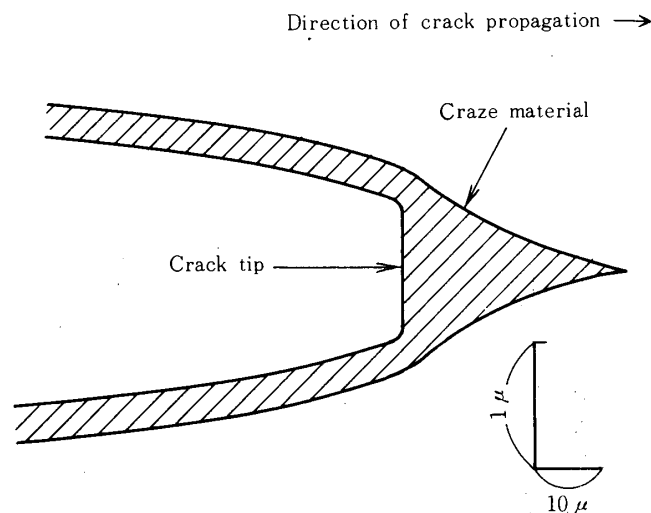


図9 クラック先端の craze material の断面形態

* このことはまた, クラック先端に原子 order の微小ボイドが, 介在しているとしても, クラックが脆性へき開的な機構で進行する場合には, \dot{C} による K_D の増加は起こらないとも解釈される.

る破面は認められず、全体にわたってパラボラ模様が、これと混在しつつ、 \dot{C} に依存して増加しているという、破面形態の変化が認められた。このことから、ここでの K_D の変化は、このパラボラ模様、即ち、2次クラックを形成する微視破壊機構と関連することが考えられる。そこで、この2次クラック形成(生成・成長)の過程を、微視的観点から調べ、その微視破壊機構を考察すると、一般に、パラボラ模様として、破面上に認められる2次クラックは、主クラックに先行して生じるものといわれている[15]ので、2次クラック生成の要因を把握するため、破面上の2次クラック核(pit)の近傍を走査電子顕微鏡により調べたところ、ほぼ、50%の割合で核の中心に、図10にみられるような、介在物の存在が認められた。このことから、2次クラックの形成は、主クラック先端の craze material 内の原子 order のボイドによって生成するのではなく、材料中に初期より存在する介在物を起点として生成するということが分る。また、ここでの2次クラックの成長過程は、同図より明らか如く、介在物の周りには、微視ボイドが形成されていること、および、このような核の周りの破面形状は、図11に示すような延性破壊の形状を呈していることが、認められている[16]ことなどから、介在物を起点として生じる、通常の延性破壊における、成長過程に類似しているものといえる。

以上のことから、ここでの微視破壊機構は、主クラック先端の craze material 内の介在物と craze material との剥離、これを起点とするボイド化、ボイド~ボイド間又は、ボイドと主クラックとの合体という延性破壊的機構および、脆性へき開的破壊機構より成り立っているものといえよう。しかし、破壊過程に、このような延性破壊的な微視破壊機構が介在する場合には、脆性へき開的な場合に比べ、より多くエネルギーが必要になるものと類推される[17]。よって、このような微視破壊機構が、 \dot{C} に依存して増加すれば、その増加に対応した K_D の増大が予想される。そこで、この微視破壊機構を代表する2次クラック核、特に、その密度 $(N_A)_P$ [$(N_A)_P = \frac{N}{A}_P$, : N :核(pit)の数, A :破面積]に注目し、これと \dot{C} の関係を

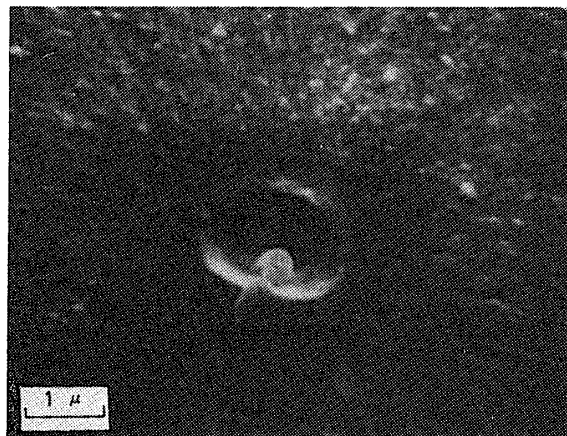


図10 2次クラック核の近傍に認められる介在物と微視ボイドの様相

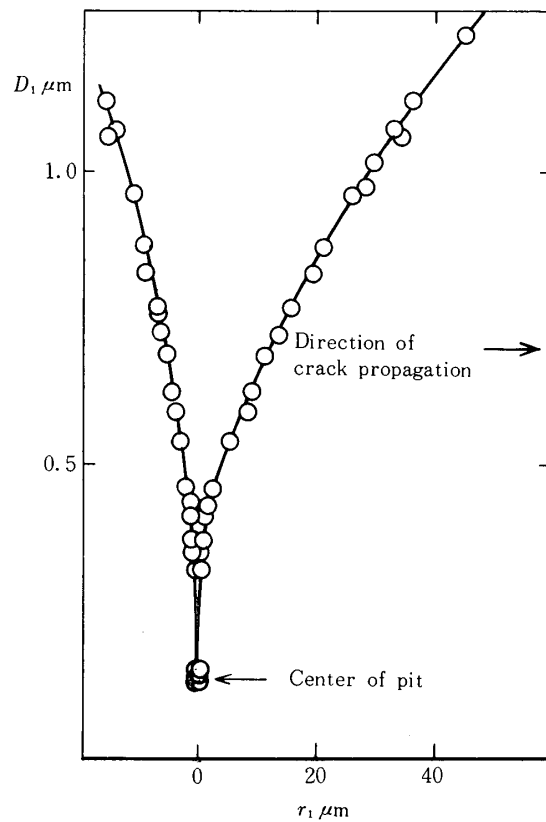


図11 2次クラック核 (pit) 周りの破面形状

調べた結果が、図12*である。これより、 $(N_A)_P$ は、 \dot{C} に比例して増加していることが認められ、この領域においては、破壊過程への2次クラック介在、即ち、延性破壊的な微視破壊機構の介在は、 \dot{C} に依存して増加していることが明らかになったといえよう。

この結果に基づいて、 K_D と $(N_A)_P$ の関係を整理した結果が、図13であるが、これらの関係は、およそ次式のように表わすことができる。

$$K_D = 1.15 \times 10^{-5} (N_A)_P + 6.87 \left[\begin{array}{l} K_D : [Kg/mm^{\frac{3}{2}}] \\ (N_A)_P : [mm^{-2}] \end{array} \right]$$

これにより、 K_D 即ち、散逸エネルギーは、 \dot{C} に対応した $(N_A)_P$ の増加に伴って、著しく増加することが認められる。よって、図6に認められる K_D の著しい増大は、破壊過程への2次クラックの生成・成長という介在が、 \dot{C} に依存して著しく増加するためであるといえよう。このことから、散逸エネルギー増加の著しい \dot{C} 依存性の要因は、2次クラックであるといえよう。

*これと、ほぼ同様な結果は、Carlsson [18] らのクラック成長の連続測定の結果にも認められることができる。

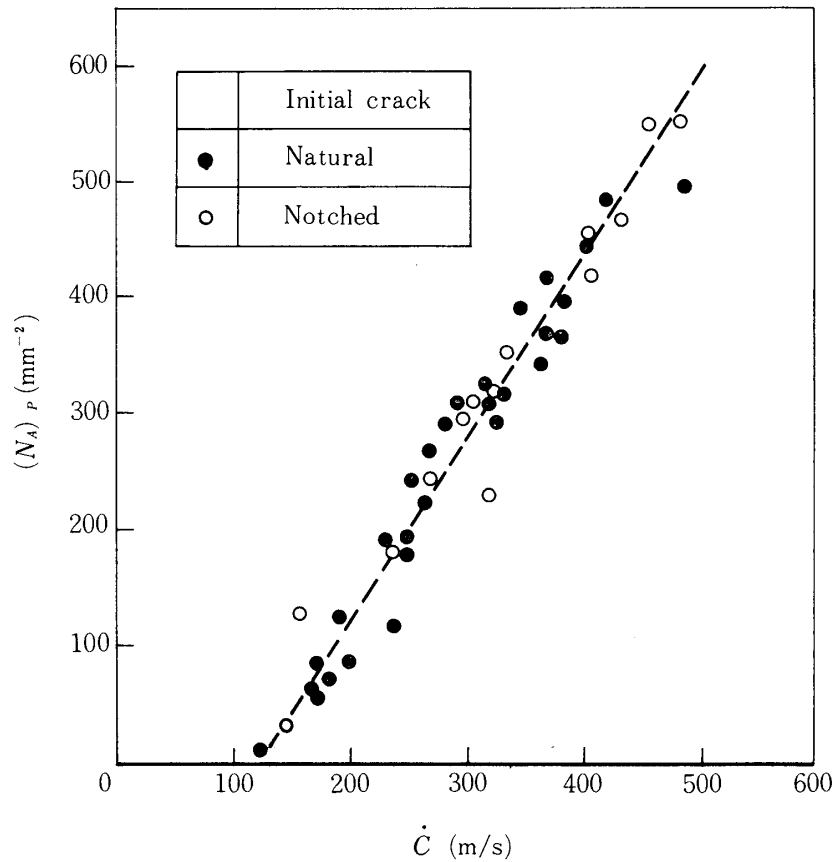


図12 2次クラック核密度とクラック伝播速度の関係

本研究に関連するものとして、Cotterell [19] による G (crack extension force) の $(N_A)_P$ への依存性に関する結果があるが、 $G \sim (N_A)_P$ 間には、比例関係が成立しているとし、 $\dot{C} \sim (N_A)_P$ は、無関係としているため、 $G \sim \dot{C}$ 又は、 $K_D \sim \dot{C}$ の関係を説明できないという不都合がある。

4. 結 論

クラック伝播挙動を支配する、散逸エネルギーの動的挙動を明らかにするため、クラック先端での微視破壊機構に着目して調べ、微視的観点からその要因を検討した結果、以下のことが明らかになった。

1. 動的クラック伝播領域における散逸エネルギーは、クラック伝播速度によってほとんど変化しない領域と、著しく増加する領域とがあり、前者には、脆性へき開的破壊機構が、後者には、脆性へき開のおよび延性破壊の機構が存在している。
2. クラック伝播速度に依存した散逸エネルギーの著しい増加は、2次クラックが、クラック伝播速度に依存して、著しく増加するためである。即ち、散逸エネルギーの増加の主要因は、

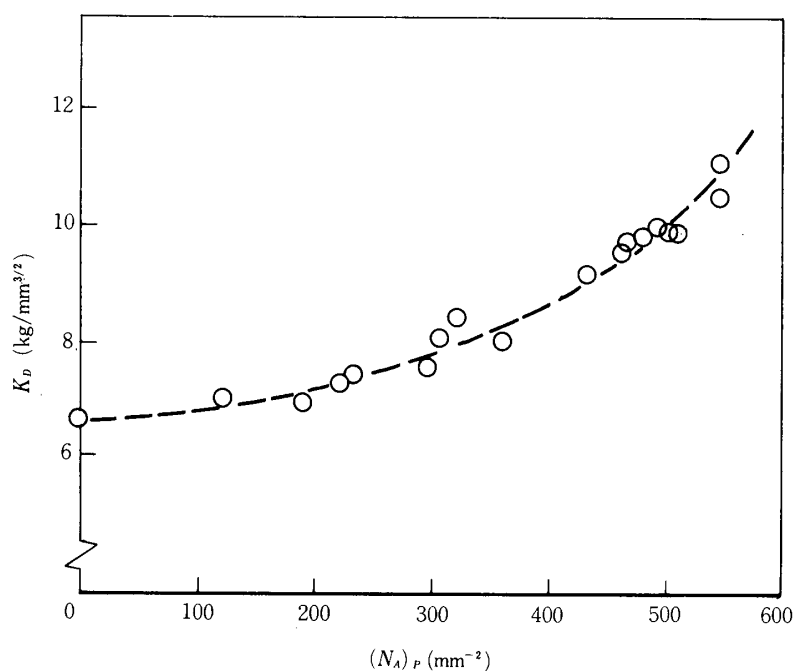


図13 動的応力拡大係数と2次クラック密度の関係

2次クラックの増加である。

3. 散逸エネルギーのクラック伝播速度の非依存性は、クラックが、脆性へき開的な破壊機構によって進展するためである。

謝 辞

本研究の遂行に当り、御協力いただいた、東京大学宇宙航空研究所、小林研究室の宗村昌幸君、小玉堅司君、藤井良成君に謝意を表わすものである。また、有益な御助言を賜った、小林春夫氏、同研究所、河田研究室の橋本彰三助手、および黒河邦彦前助手に感謝するものである。

1980年11月20日 材料部

参考文献

- [1] T.L. Paxson, R.A. Lucas, Dynamic Crack Propagation, ed. G.C. Sih, Nordhoff International Pub., The Netherlands, 415 (1973).
- [2] F. Nilsson, Eng. Fract. Mech., 6, 397 (1974).
- [3] H. Bergkvist, J. Mech. Phys. Solids, 22, 21 (1973).
- [4] K.B. Broberg, High Velocity Deformation of Solids, eds. K. Kawata, J. Shioiri, Springer-Verlag, N.Y., 182 (1978).
- [5] A.K. Green, P.L. Pratt, Eng. Fract. Mech., 6, 71 (1974).

- [6] 例えば, A. Kobayashi, N. Ohtani, T. Sato, *J. Appl. Polym. Sci.*, 18, 1625 (1974).
- [7] 例えば,
P. Manogg, *Proc. Int. Conf., Delft, North Holland Pub., Amsterdam*, 481 (1964).
P.S. Theocaris, *Trans. ASME, Ser. E*, 37, 409 (1970).
R. Schirrer, *Int. J. Fract.*, 14, 265 (1978).
- [8] R.P. Kambour, *J. Polym. Sci., A-2*, 4, 349 (1966).
- [9] 例えば,
H.R. Brown, I.M. Ward, *Polymer*, 14, 469 (1973).
G.P. Morgan, I.M. Ward, *Polymer*, 18, 87 (1977).
S.J. Israel, et al, *J. Met. Sci.*, 14, 2128 (1979).
- [10] T. Kobayashi, J.W. Dally, *ASTM, STP 627*, 257 (1977).
- [11] J.F. Kalthoff, et al, *ASTM, STP 627*, 161 (1977).
- [12] A.S. Kobayashi, S. Mall, *Exp. Mech.*, 18, 11 (1978).
- [13] 例えば, F. Erdogan, *Fracture, II*, ed. H. Liebowitz, Academic Press, N.Y., 553 (1968).
- [14] 例えば, L.R.F. Rose, *Int. J. Fract.*, 12, 799 (1976).
- [15] C.E. Feltner, Univ. Illinois, *Theoretical and Applied Mechanics Report*, 224 (1962).
- [16] F. Lednický, Z. Pelzbauer, *J. Polym. Sci.*, 38, 375 (1972).
- [17] H.P. Stüwe, *Eng. Fract. Mech.*, 13, 231 (1980).
- [18] J. Carlsson, et al, *Dynamic Crack Propagation*, ed. G.C. Sih, Nordhoff International Pub., The Netherlands, 165 (1973).
- [19] B. Cotterell, *Int. J. Fract. Mech.*, 4, 209 (1968).