

動的クラック伝播挙動の微視的考察

その2

大谷 信男・小林 昭

Microscopic Approach to Dynamic Crack Propagation Behavior
Part 2

By

Nobuo OHTANI and Akira KOBAYASHI

Abstract: Discrete extension observed during dynamic fracture is experimentally studied from the microscopic point of view. It is clarified that craze is a dominant factor in such an intermittently propagating fracture behavior.

概 要

高速クラック伝播における伝播速度の振動現象を究明するため、PMMA板を用い、主クラック先端に生じる2次クラックに着目して、微視的観点からこれらの関連を調べた結果、2次クラックが、振動現象の主要因となっており、しかもこれが、intermittentに生成するため、必然的に振動を伴うと共に、その密度がその規模に影響を及ぼすことが分った。

1. ま え が き

従来、高速クラック伝播時の伝播速度は、連続的な挙動を呈しているものとされ、論じられてきた。しかし、近年、クラックの成長は、振動（oscillation又はdiscrete extension）現象を呈しながら進展することが指摘されるようになってきた[1]～[3]。この振動現象を詳細に調べ、振動要因を的確に把握することは、伝播速度の振動現象のみならず破壊機構等、その本質に関しても主要な知見が得られるものと期待できる。

現在までの振動現象究明は、まず、最も可能性の高いものと信じられていた応力の自由境界反射説[1][2]が、反射波の周期非依存性により振動の直接要因とは、いい難くなってきた[3]。リガメント説[2]、クラック合体説[3]等もあるが、いずれも類推による説であり、現実のevidenceとの対応に基づいて解釈された説は、現在殆んど見当らない。

伝播速度の振動要因には、加速と減速に関係する2要因が考えられるが、これらは一方の要因によって他方の現象が、付随的に起き得ることが期待できることから、本質的には、いずれか一方の要因が、振動現象を起す原因となっているものと考えられる。従って、一般に認められている伝播速度とクラック進展抵抗との関係をみると、伝播速度の増加は、著しい

クラック進展抵抗を引き起していることが知られる [4]. このことは、クラック進展抵抗が伝播速度の増加に際し、その速度を減少させるような働きを有しているためと解釈され、ここでの振動現象も、抵抗に基づく伝播速度の減少を主原因として構成されている現象とみなすことができる.

一方、このような振動現象は、いままでの報告 [1]~[3] から類推すると伝播速度の減少は、局所的に起っているものといえる. このことは、主クラック先端近傍において、このクラックの進展を妨げるような抵抗が局所的に存在する必要を意味し、事実2次クラックは、主クラック先端の craze material 内の cavity [5] 又は一種の介在物 [5] [6] に生成し、延性破壊的機構によって成長し、その後、脆性へき開的破壊によって進展している主クラックと合体する [5] [7]. このような延性的破壊機構が破壊過程に介在する場合には、クラック進展抵抗は、その介在に対応して著しく大きくなり [6], また、この介在物の存在のみによっても、クラック進展抵抗の作用があるものと推定される [8].

以上のことから、主クラック先端に生成する2次クラックは、局所的クラック進展抵抗になり得ることが十分に期待できる.

本研究は、PMMA板を用い、この2次クラックに着目し、これと振動現象特に、伝播速度の減少との関連を調べ検討した結果に関するものである.

2. 試験片および実験方法

使用材料は、市販の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作製した. 図1(a)に示す試験片は shadow spot 法 [9] によりクラック伝播中の動的応力拡大係数 K_D とクラック伝播速度 \dot{C} の連続的な変化の測定に、また、図1(b)に示す試験片は両面に夫々銀ペイントにより通常速度ゲージ [10] と改良速度ゲージ [11] を塗布し、高速クラック伝播における伝播速度の測定に、それぞれ用いた. ここで、初期切欠の長さは、ノッチ半径を有する場合には、深さ5 mm, natural crack の場合には、この形成にカミソリを用い、深さ1~5 mmとし、常温においてインストロン型引張試験機に取り付け、0.1~2 mm/min にて負荷し、mode I型のクラックを進展させ、破壊実験を行った.

図2は、動的応力拡大係数 K_D およびクラック長さ C を、連続的に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る shadow spot の直径 D_I を求めることによって、次式 [9] より求められる.

$$K_D = \frac{1.671}{Z_0 \cdot t \cdot C_t} \left(\frac{D_I}{3.0} \right)^{2.5}$$

D_I : クラックに平行な shadow spot 最大直径

Z_0 : 試験片~スクリーン間距離

t : 板厚

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

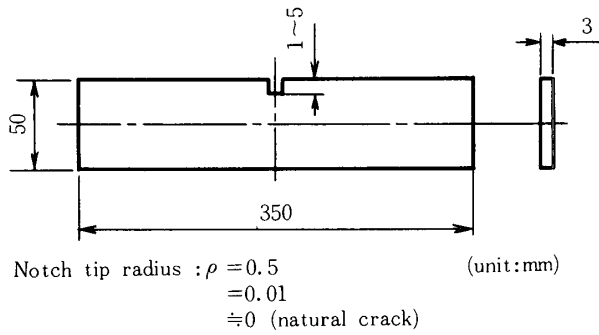
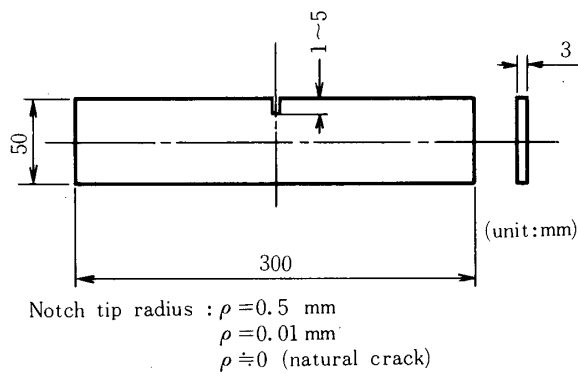


図1 試験片の形状

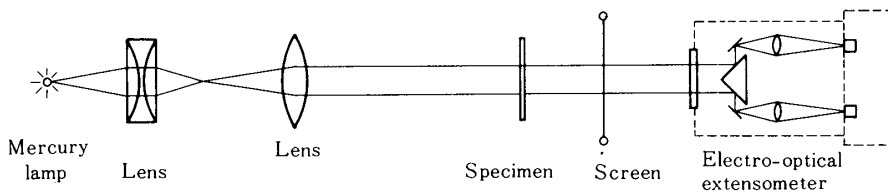


図2 装置の光学的配置

この D_I は、shadow spot の先端および後端の明暗および暗明境界部のクラック進展時における変化を、2軸の高速非接触変位計 (Zimmer model 200 X) にて、連続的に計測することによって求められる。また、shadow spot の先端および後端とクラック先端との関係は、図3(a)(b)の shadow spot の基本的形状にみられるように $5/4$ なる関係が存在していることが知られている [9] ので、クラック進展時における shadow spot の先端および後端の変化は、上述の方法によって知ることが出来、これより連続的なクラック長さ C を知ることができる。

また、改良速度ゲージの電気抵抗の変化を、ホイートストン・ブリッジの抵抗変化に変換

し、そこから得られる出力を超高速度デジタルメモリ計に入力して記録し、高速伝播中のクラック長さを連続的に求めた。ここで通常速度ゲージ法を併用した理由は、主にクラック進展の平行性、クラック位置の確認等に利用するためである。図4は、これらの計測における概略のブロック図を示したものである。

3. 実験結果および考察

3.1 2次クラックのアレスタ的効果

主クラック先端に生じる2次クラックは、前述したように局所的なクラック進展抵抗となり得ることが期待されるので、クラック先端近傍の応力状態又は散逸エネルギーに関連する量

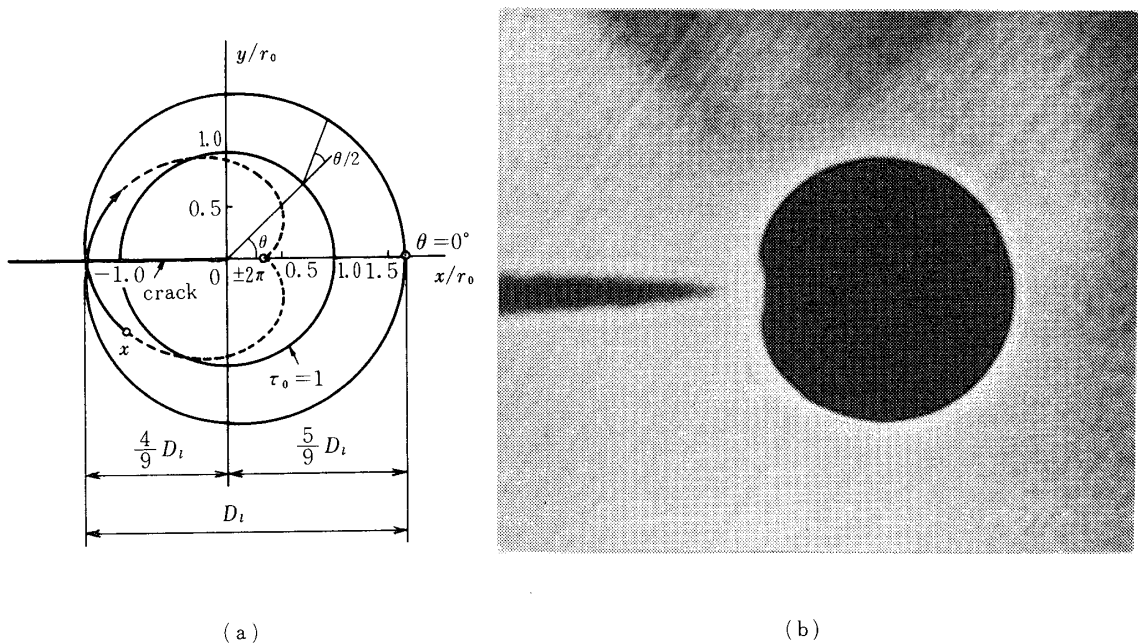


図3 shadow spotの基本的形状

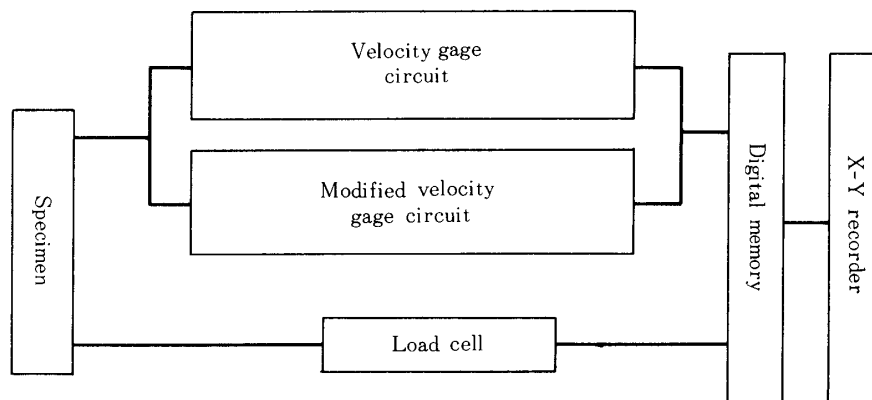


図4 計測ブロック図

として動的応力拡大係数 K_D を選び、この K_D および伝播速度 \dot{C} の2次クラックによる変化挙動を調べてみた。

図5は、2次クラック形成時における K_D 、 \dot{C} 、 C の時間的変化挙動を、shadow spot 法によって求めた結果である。これから、クラック伝播の初期においては、 K_D は \dot{C} に比例して大きくなるものの、 $K_D \approx 15 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 付近に達すると、 \dot{C} は急激に減少し始める。このような挙動の変化には、これに対応した破壊過程の変化が破面に現われることが期待される。そこで、破面を走査電顕および光学顕微鏡により、観察したところ $\dot{C} = \dot{C}_{max}$ の位置付近には、図6(b)にみられるような僅かな破面の凹凸が、また、その位置よりほぼ $300 \sim 350 \mu\text{m}$ 先方には、同図(a), (b)にみられるような2次クラックの生成を示すパラボラ模様が観察されたほかは、連続的な irregular lines のみが認められるだけであった。

\dot{C} の減少は、主クラック先端での craze material 層内の破壊過程に起因すると考えられるため、主クラック位置 ($\dot{C} = \dot{C}_{max}$) での僅かな破面の凹凸が、 \dot{C} の減少を引き起した原因を示す破面形態とは考えられない。よって残る2次クラックの生成を示すパラボラ模様のみが、この現象と対応しているようである。しかも、2次クラックと \dot{C} 減少開始間の距離 R' は、 $K_D \approx 15 \text{ kg/mm}^{3/2}$ とした場合、craze material 長さ R が、 $R = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_D}{\sigma_y} \right)^2 \approx 1.5 \text{ mm}$ [12]、(σ_y : 降伏応力) と見積られることから、 K_D が多少大きめの値であるにしても、主クラックが \dot{C} 減少点に達した時点で、既に $R' \leq R$ 、即ち、2次クラックは、この craze material 内

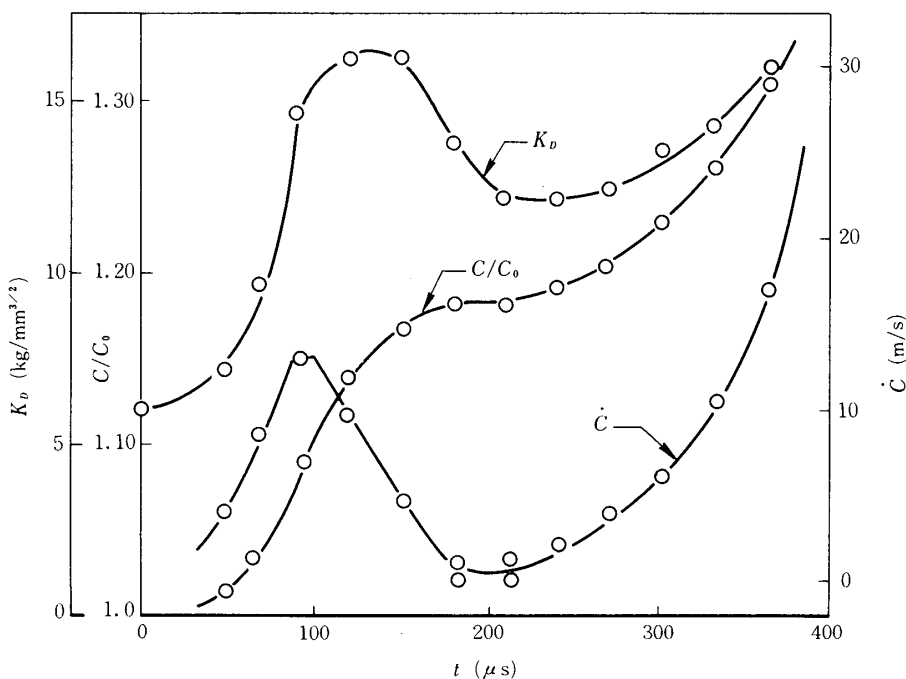


図5 2次クラック形成時における動的応力拡大係数、クラック長さ、クラック伝播速度の時間的変化

Direction of crack propagation →

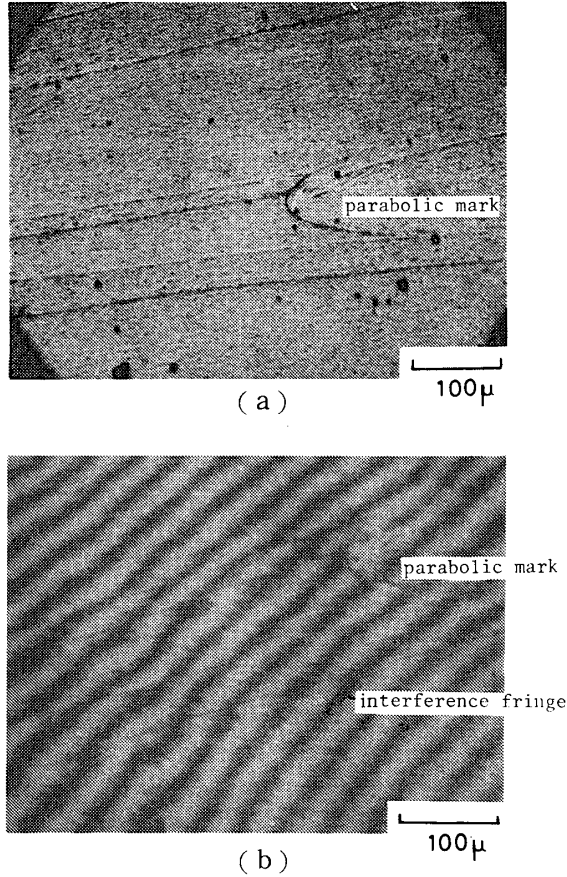


図6 破面上の2次クラック（パラボラ模様）とその近傍の微視形状

にあるといえる。よって、これらの事実から \dot{C} の減少は、2次クラックの生成・成長の過程に対応していることを示すものであるといえよう。ここでさらに、図5における K_D 、 \dot{C} の挙動をみると、 K_D は、 \dot{C} が減少している期間も漸増し、その後、 \dot{C} 同様減少する。 $K_D = (K_D)_{min}$ に達する点において、 \dot{C} は殆んど瞬間的ではあるが、停止することが認められる。この変化挙動に対応する破面上の形態は、上述の \dot{C} 減少において認められた破面から類推して、図6(b)にみられるように、2次クラック核のほんの僅か後方の凹凸と思われる。

これらの結果に基づいて、2次クラックの位置と K_D 、 \dot{C} の関連をまとめた結果が図7である。ここで、 $\dot{C} = \dot{C}_{max}$ 以前における K_D 、 \dot{C} を点線で示したのは、これらの点では、2次クラックが存在していないことを表わすものである。この結果より、まず、 K_D の変化に注目してその挙動を多少巨視的に考察してみると、 K_D は、2次クラックに接近するに従って大きくなるが、2次クラック核の直前に達すると急激に小さくなり、ほぼ2次クラック核近傍で最小値 $K_D = (K_D)_{min}$ を示す。しかし、2次クラックを通過した後は、またかなりの増加率で大きくなることが認められる。このような K_D の2次クラックに対する変化挙動は、クラックがアレスタに接近し、通過する際認められる K_D の変化と、全く類似の挙動であることが、

金沢 [13] らの結果との比較において認められる。さらに、この類似性はPMMAにおける現実のアレスタ実験 [14] においても認められるが、この場合は、 K_D の変化挙動のみならず、 \dot{C} の減少傾向にも、ここで認められた結果と殆んど同様の傾向が認められる。力学的な相似則が、ここでも成立すると考えられるから、2次クラックの生成・成長は、工学的アレスタ的、即ちクラック進展抵抗の働きをしているものと考えられる。

2次クラックに、このような効果が発生する原因としては、工学的には2次クラックの生成、即ち介在物とマトリクスとの剥離によるボイド化までの変形拘束効果、ボイドの円孔効果が考えられるが、現実には、これらの相互作用により、アレスタ効果が発生しているものと類推される。また、このことは、前述したようにエネルギー吸収の面からは、2次クラックの生成・成長が延性破壊的機構から成り立っていることに対応するといえる。この延性破壊的機構による破壊が、いかに多くのエネルギーを費やすかについては、Stüwe [15] のボイド形成エネルギーの計算に、その事実を認めることができる。

3.2 2次クラックと伝播速度の減少との関係

前節の2次クラックが、クラック進展への抵抗とされる要因が、真の伝播速度減少要因であるとすれば、高速クラック伝播の全領域（分岐領域を除く）における伝播速度の減少も、これに起因することが立証されなければならない。まず、種々の伝播速度で進展する場合の

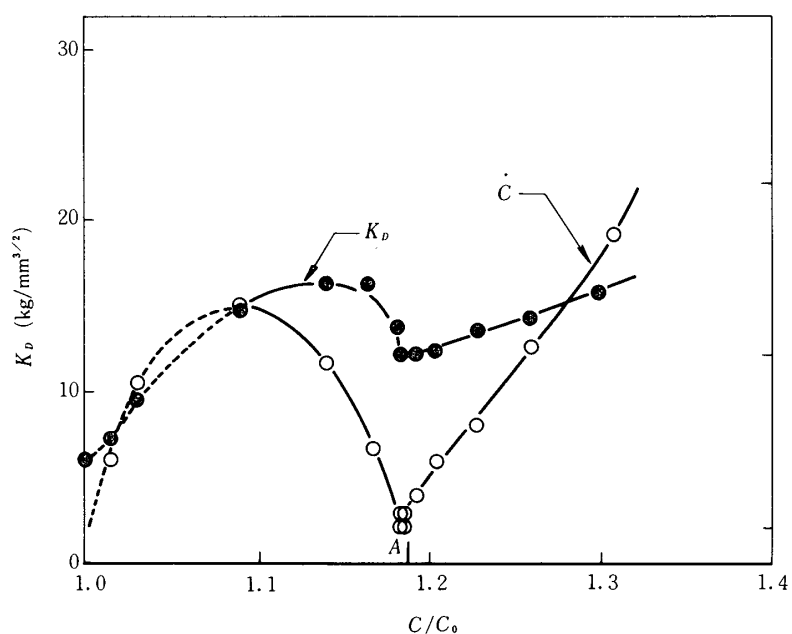


図7 クラックの進展時の動的応力拡大係数及びクラック伝播速度の2次クラックに対する挙動 (A: 2次クラックの位置)

クラックの振動現象を調べ、その結果の一例を、図8～図10に示す。

図中、実線によって示した \dot{C} は、改良速度ゲージ法により、また、通常の方法による伝播速度 \dot{C}_m は破線で、それぞれ示した。これらの結果より、 \dot{C} の振動は高速クラック伝

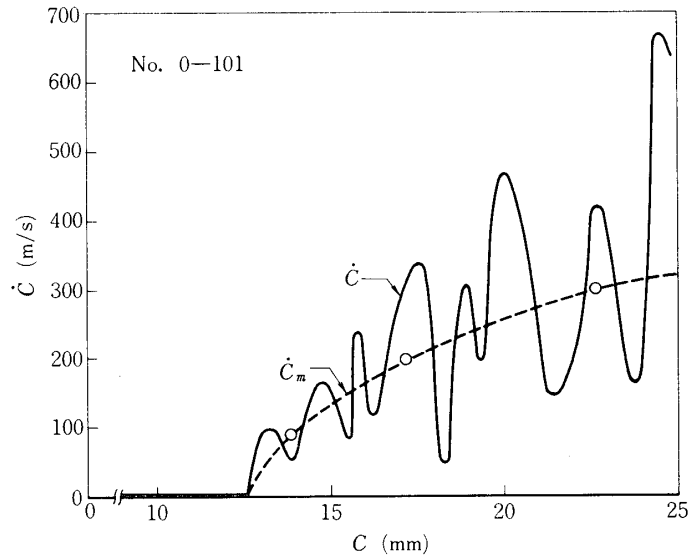


図8 クラックの進展に伴う高速クラック伝播速度の変化

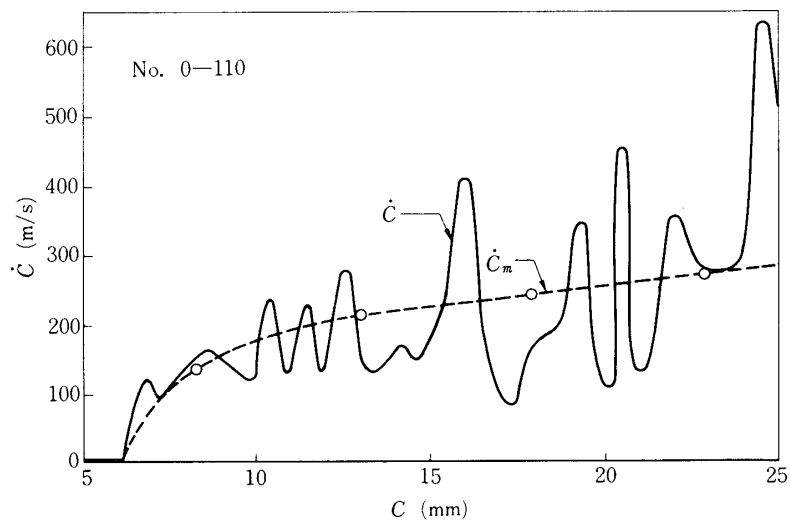


図9 クラックの進展に伴う高速クラック伝播速度の変化

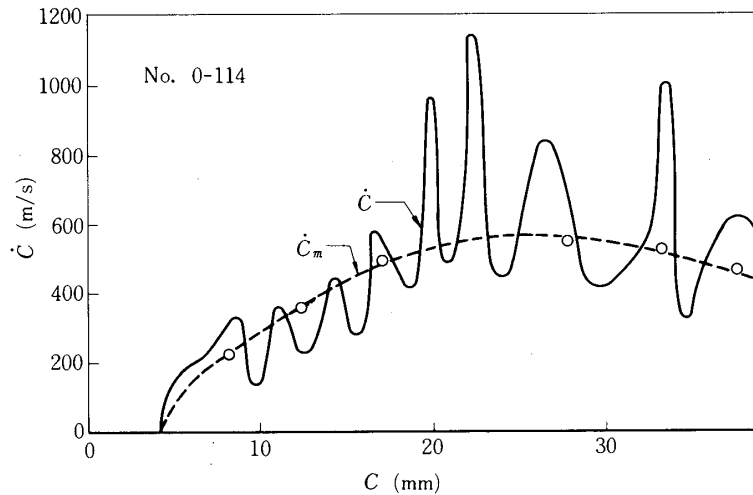


図10 クラックの進展に伴う高速クラック伝播速度の変化

播のほぼ全領域で生じ、しかも、その振動規模は、 \dot{C}_m に依存して大きくなる傾向があること等が認められる。これらの結果に基づいて、2次クラックのクラック進展抵抗、即ち、伝播速度の減少との対応を調べた結果の一例が、図11(a), (b)*, (c)である。この結果より、2次クラックの生成は、多少のばらつきがみられるものの、intermittentに、しかも、群をなして生じているという特徴が認められる。このような、2次クラックの生成が認められる直前においては、必ず伝播速度の減少傾向が確認される。また、2次クラック核は、前節で認められたと同様、ほぼ $\dot{C} = (\dot{C}_{min})_i$ (各振動における伝播速度の最小値)なる位置よりほんの僅か先方に、存在することが認められる。

3.3 2次クラック密度と伝播速度振動規模との関係

今、 $\dot{C} = (\dot{C}_{min})_i$ となる各位置においての2次クラックの核密度* $(N_A)_p$ を求め、これと各振動における伝播速度の減少値 $\Delta \dot{C}$ [$\Delta \dot{C} = (\dot{C}_{max})_i - (\dot{C}_{min})_i$, $(\dot{C}_{max})_i$ 各振動における伝播速度の最大値]との関係を調べると図12のようになる。

* 図11(b)は同図(a)の模式図である。

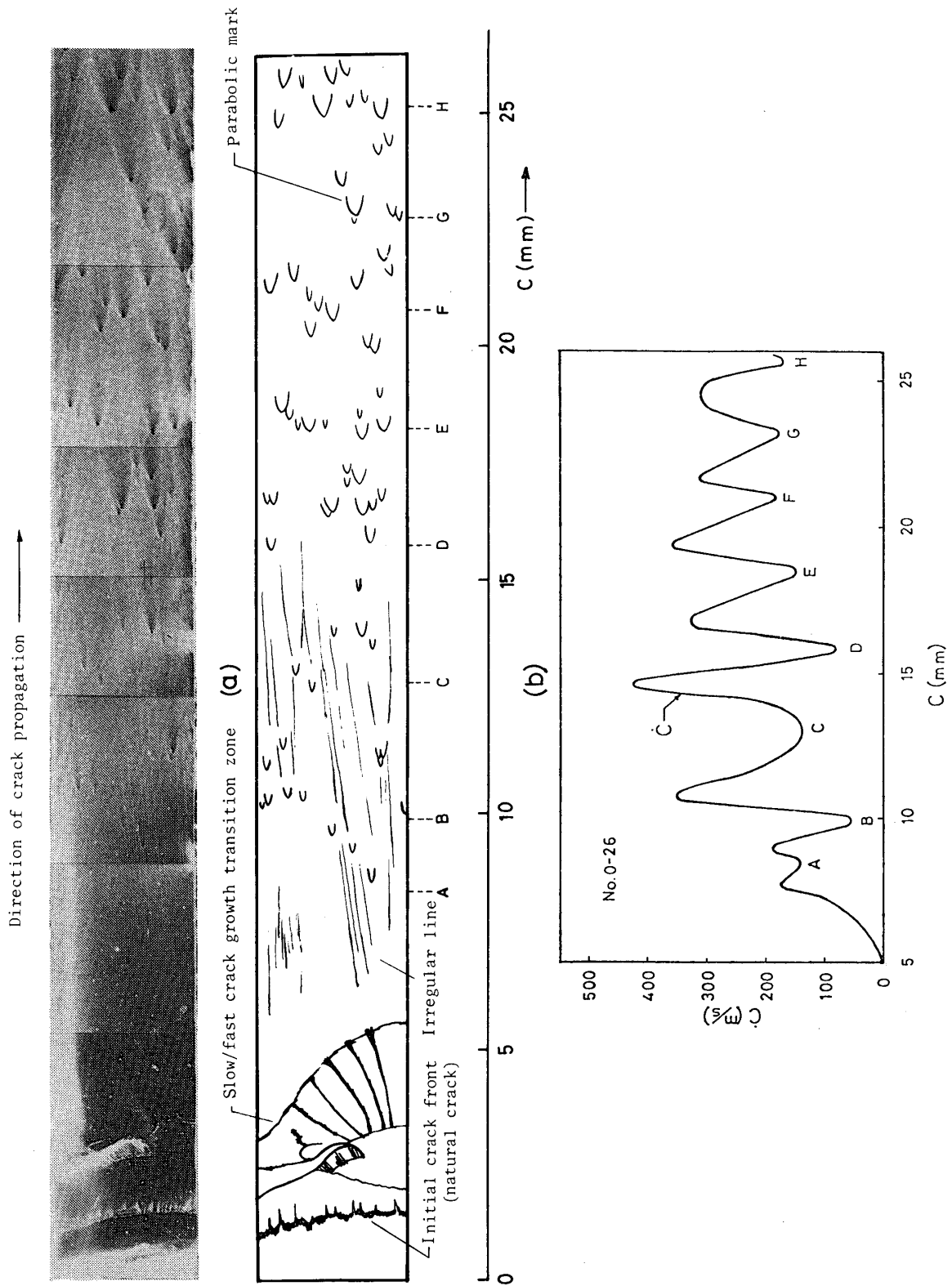


図11 高速クラック伝播速度の振動と2次クラックの関係

この結果より、 $\Delta \dot{C}$ と $(N_A)_P$ との間には $\Delta \dot{C}$ の小さい領域* を除き、ほぼ比例的な相関関係が存在しているといえる**。また、 \dot{C} 変化は図 11 に認められるように $\dot{C} = (\dot{C}_{min})_i$ に達した後は、付随的効果として常に加速度的に速くなる*** 傾向がある。この意味で 2 次クラックは、現実的のクラック伝播においては、伝播速度の減速要因であると共に、加速要因であるという 2 面性を有しているといえよう。このことは、結果的には振動の規模（振幅）に関係する。よって、これと上述の相関性の存在より、伝播速度の振動現象の規模は、2 次ク

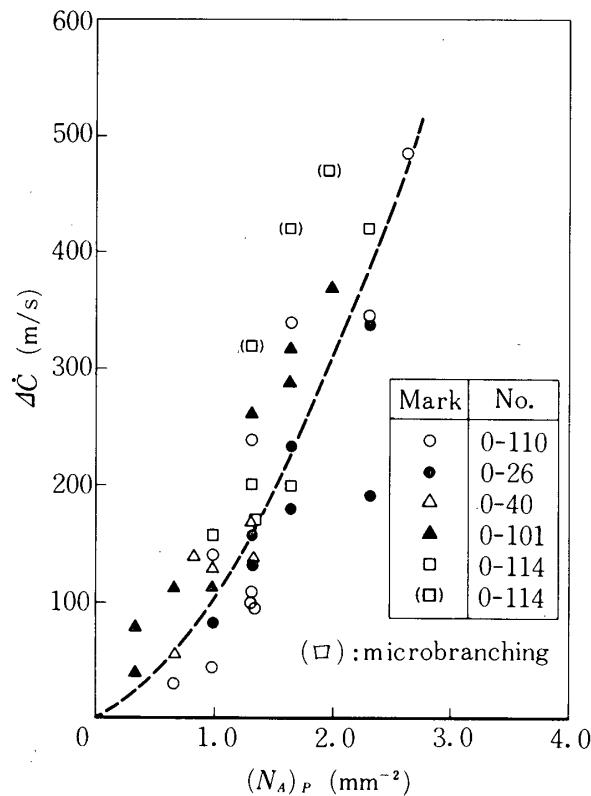


図12 高速クラック伝播速度減少と2次クラック密度の関係

- * 400 倍の顕微鏡により、2 次クラックの核数 N を全破面にわたって、幅 1 mm 間隔にて調べ、 $(N_A)_P = \left(\frac{N}{A_P}\right)$ [$A : (1 \times 3) \text{ mm}^2$] によりその密度を求めた。
- * 2 次クラックは、 $\Delta \dot{C}$ の小さい領域では、一定の K_D (又はそれに相当する \dot{C}) 以上に達しないと生成しないという効果を直接に受けるため、このばらつきが生じたものと考えられる。
- ** この関係は、破面に微視分岐が生じる場合においては、分岐エネルギー吸収の効果が関与するようになるため、適用が十分でなくなる傾向がある。
- *** これは、主クラックと 2 次クラックが、共に脆性へき開的に合体し始めることに起因するものと考えられる。

ラック密度に依存するものと解釈される。

さらに、先に認められた振動規模の \dot{C}_m 依存傾向を、この結果より考察してみると、一般に $(N_A)_P$ は上述したように、intermittentに生じる傾向がある。即ち、intermittentな $(N_A)_P$ は、 \dot{C}_m に依存して増加するといえる。このことと、 $(N_A)_P$ と $\Delta\dot{C}$ との相関性より、一般に $\Delta\dot{C}$ の規模は、 \dot{C}_m に依存すると解釈される。

4. 結 論

高速クラック伝播速度の振動現象を明確にするため、PMMA板を用い、主クラック先端に生じる2次クラックに着目し、微視的観点から、これらの関連を調べ検討した結果、以下のことが明らかになった。

1. 高速クラック伝播における伝播速度の振動要因は2次クラックである。
2. しかも、この振動規模は2次クラック生成密度に依存する。
3. また、高速クラック伝播の全領域で認められる伝播速度の振動現象は、intermittentな2次クラックの形成のため、必然的に表われる現象といえよう。

謝 辞

本研究の遂行に当り、実験およびデータ整理に対し御協力いただいた、東京大学宇宙航空研究所、小林研究室の木村雅幸君、伊藤徹弥君に謝意を表するものである。

1980年11月20日 材料部

参 考 文 献

- [1] H.C. van Elst, Trans. Met. Soc. AIME, 230, 460 (1964).
- [2] J. Carlsson, et al, Dynamic Crack Propagation, ed. G.C. Sih, Nordhoff International Pub., The Netherlands, 165 (1973).
- [3] 岩本, 学位論文, 東大工 (1980).
- [4] 例えば,
T.L. Paxson, R.A. Lucas, Dynamic Crack Propagation, ed. G.C. Sih, Nordhoff International Pub., The Netherlands, 415 (1973).
A.K. Green, Ph. D. Thesis, Imperial College, London Univ. (1967).
P.S. Theocaris, F. Katsamanis, Eng. Fract. Mech., 10, 197 (1978).
文献(6), p.74.
- [5] F. Lednicky, Z. Pelzbauer, J. Polym. Sci, 38, 375 (1972).
- [6] 大谷, 小林, 第10回宇宙航空材料シンポジウム講演集, 東大宇航研, 93 (1980).
- [7] J.A. Kies, et al, J. Appl. Phys., 21, 716 (1950).
- [8] F. Kerkhof, Dynamic Crack Propagation, ed. G.C. Sih, Nordhoff International Pub., The Netherlands, 3 (1973).
- [9] 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).
- [10] 例えば,

- A. Kobayashi, N. Ohtani, T. Sato, *J. Appl. Polym. Sci.*, 18, 1625 (1974).
- [11] A. Kobayashi, N. Ohtani, *J. Appl. Polym. Sci.*, 21, 1351 (1977).
- [12] 例えば,
H.R. Brown, I.M. Ward, *Polymer*, 14, 469 (1973).
- [13] 金沢, 町田, 的場, 造般協会論文集, 115, 78 (1964).
- [14] 文献 (3), p.222.
- [15] H.P. Stüwe, *Eng. Fract. Mech.*, 13, 131 (1980).