

# 進行クラック先端の高歪速度領域について

小林 昭・宗村 昌幸

High Strain Rate Region around a Running Crack Tip

By

Akira KOBAYASHI and Masayuki MUNEMURA

**Abstract:** High strain rate region around a running crack tip was investigated through non-contact measurement techniques. It is found that the crack velocity is a dominant factor, and that very large local disturbances exist even in the quasi-static loading case.

## 概 要

動的クラック伝播における、進行クラック先端の局所変形を、非接触手法により計測して、巨視的  
平均歪速度の3～5桁の大きさの局所歪速度が生じることが分った。更に、高歪速度破壊直前の弾性  
係数を実験的に求めて、線形弾性破壊力学的検討を行ない、極めて高い局所歪速度を得た。

## 1. ま え が き

動的クラック伝播現象の解明には、進行クラック先端近傍の局所的様相を調べる必要が必  
要である。これまでの若干の理論解析 [1] によれば、弾性体の進行クラック先端には、著  
しい高歪速度領域が存在するとされているが、その確証は充分では無い。ここでは、粘弾性  
体の動的クラック伝播における進行クラック前方の局所変形を、非接触手法により計測して、  
局所歪速度を求め、進行クラック先端との関連を調べ、更に実験的に得た、材料の高歪速度  
破壊直前の弾性係数と、クラック伝播速度とを用いた、線形弾性破壊力学的見地からの比較  
を行う。

## 2. 非接触手法による計測

電子光学的非接触手法により、試験片上の予想進行クラック径路上の、微小標点間（標点  
間長さ5 mm）の、クラック進行に伴う相対変位を計測して、局所歪速度 $\dot{\epsilon}$ を求めた。

### (1) 非接触計測装置

西ドイツZimmer社製 model 200X を用い、試験片幅中央に於て、5 mmの標点間の相  
対変位を動的クラック伝播中、刻々、電子光学的に追跡・計測した。その作動原理などにつ  
いては、文献2を参照されたい。

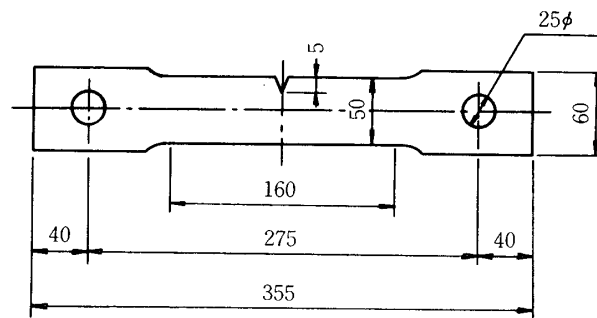
## (2) 試験片

住友化学製 PMMA (polymethyl methacrylate) (商品名 Sumipex) を用い、第1図のように製作した。

尚、クラック伝播速度  $\dot{C}$  の測定の為、実験にあたっては、試験片表面に第2図に示すような速度ゲージを塗布した。速度ゲージの詳細は、文献3に記述してある。

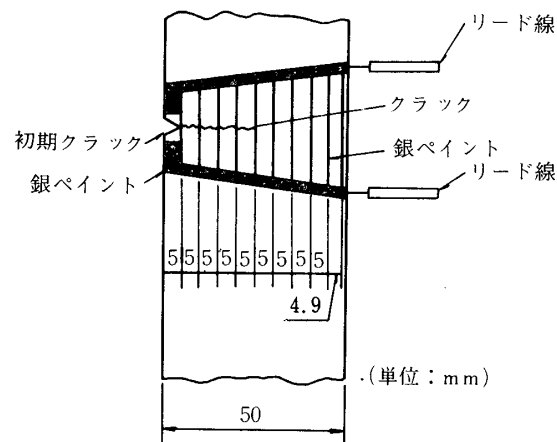
## (3) 定速度引張負荷装置

東洋ボールドウィン社製インストロン型 (UTM-1) 試験装置を用い、ストローク速度  $V = 5 \text{ mm/分}$  (巨視的平均歪速度  $\dot{\epsilon}_A = 3.03 \times 10^{-4} / \text{s}$ ) および  $500 \text{ mm/分}$  ( $\dot{\epsilon}_A = 3.03 \times 10^{-2} / \text{s}$ ) により負荷し、初期クラックよりモード I のクラック伝播を発生させた。



(単位: mm)

第1図 試験片



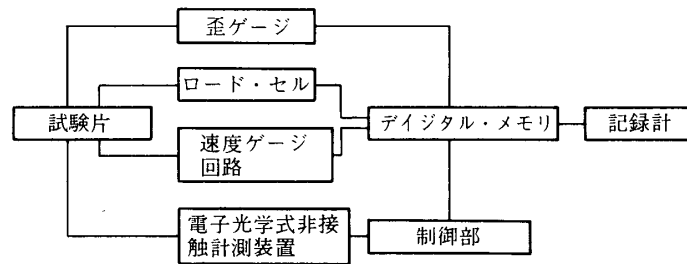
(単位: mm)

第2図 速度ゲージ

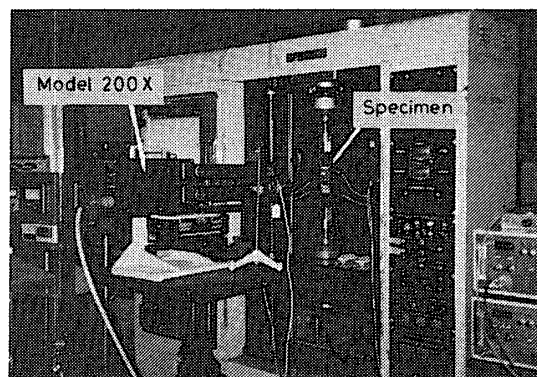
ここに、 $\dot{\epsilon}_A = \frac{V}{l_0}$  ,  $V = \text{ストローク速度}$  ,  $l_0 = 275 \text{ mm}$  (第1図参照) である

## (4) 計測ブロック図

第3図に示す計測系によった。Electro optical extensometer としては、西独・Zimmer社製 model 200 X (前述) を用いた。又、実験装置全景を第4図に示す。



第3図 計測ブロック図



第4図 実験装置

#### (5) 非接触手法による計測結果と検討

はじめに、記号について説明を行なう。

$C$  = 進行クラック先端の位置

$W$  = 試験片幅 = 50 mm

$Y$  = 非接触手法による計測位置 (試験片中央) から、進行クラック先端までの距離

$\delta$  = クラック進行に伴って生じる、非接触手法による標点間 (5 mm) の変位

$\dot{\epsilon} = \frac{d\delta}{dt} = \text{標点間 (5 mm) の局所歪速度}$

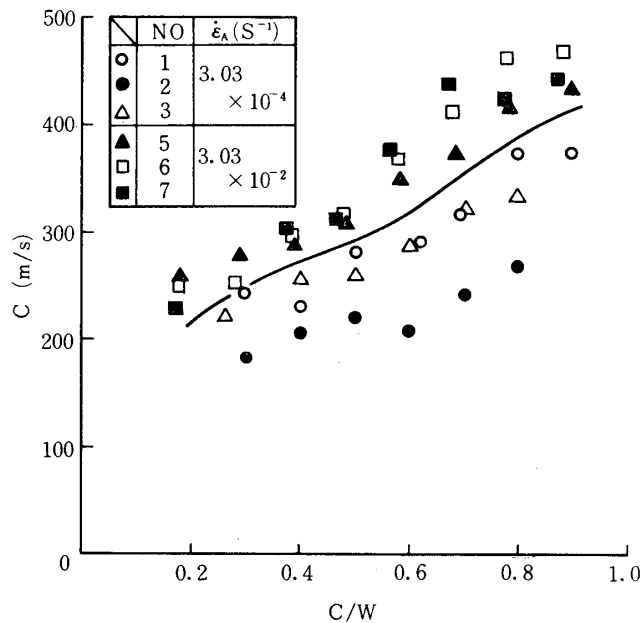
実験温度は 13 ~ 14°C であった。

##### (i) $\dot{C} \sim C/W$

速度ゲージ法によるクラック伝播速度  $\dot{C}$  は、従来の結果と同様で、このような準静的負荷 ( $\dot{\epsilon}_A \approx 10^{-2} \sim 10^{-4} / \text{s}$ ) でのクラック伝播でも、第5図に見られるように  $\dot{C}$  は、200 m/s から 400 m/s もの速度に達している。

##### (ii) $\delta \sim Y$

試験片中央 ( $C/W = 0.5$  即ち、 $W/2$  の位置) での非接触手法による標点間 (5 mm) の変位  $\delta$  は、第6図に示すように、クラック先端が近づきつれて増加し、 $Y = 0$  での通過

第5図  $\dot{C} \sim C/W$ 

時に最大0.08 mm程度になる。

(iii)  $\dot{\epsilon} \sim C/W$  および  $\dot{\epsilon} \sim Y$

クラック先端が非接触計測位置 ( $C/W = 0.5$ ) に近づくとつれて標点間の局所歪速度  $\dot{\epsilon}$  は増加し (第7図参照),  $Y = 0$  での通過時には, 略々  $200/s$  に達する. (第8図参照) 巨視的平均歪速度  $\dot{\epsilon}_A$  が,  $10^{-4}/s \sim 10^{-2}/s$  の準静的負荷状態では, ばらつきを考慮すると, 殆ど  $\dot{\epsilon}_A$  による差は見られず, 又,  $\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_A = 7,000 \sim 700,000$  にもなり, 進行クラック前方に局所的に非常に大きい歪速度が生じていることが分る. クラック伝播速度  $\dot{C}$  が,  $\dot{\epsilon}_A = 3.03 \times 10^{-4}/s$  および  $3.03 \times 10^{-2}/s$  の両場合の間に, 多少, 差が認められるものの, 概して,  $200 \text{ m/s}$  以上の値を示していることから, 局所歪速度  $\dot{\epsilon}$  は, むしろ, クラック伝播速度  $\dot{C}$  に依存していると考えられる.

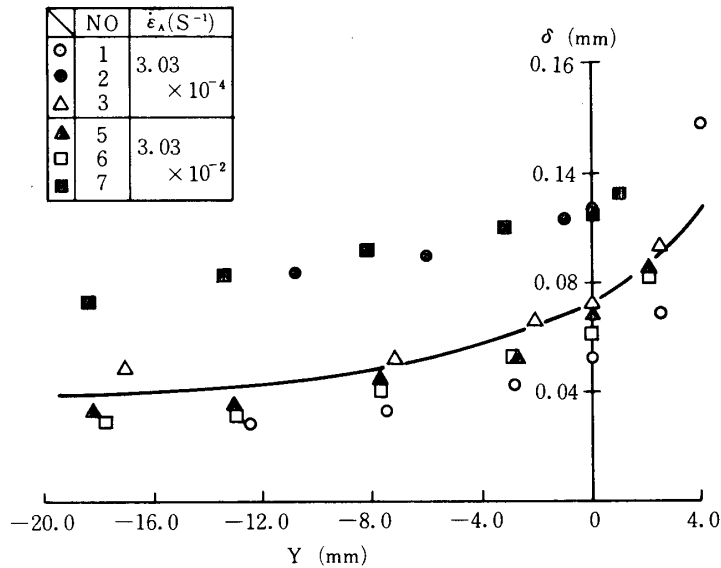
上述と同様の推察は, 先に著者らの行ったエポキシ樹脂による, 動的クラック伝播の動光弾性観察結果 (第9図) から得られる [4].

### 3. 破壊直前の弾性係数の実測

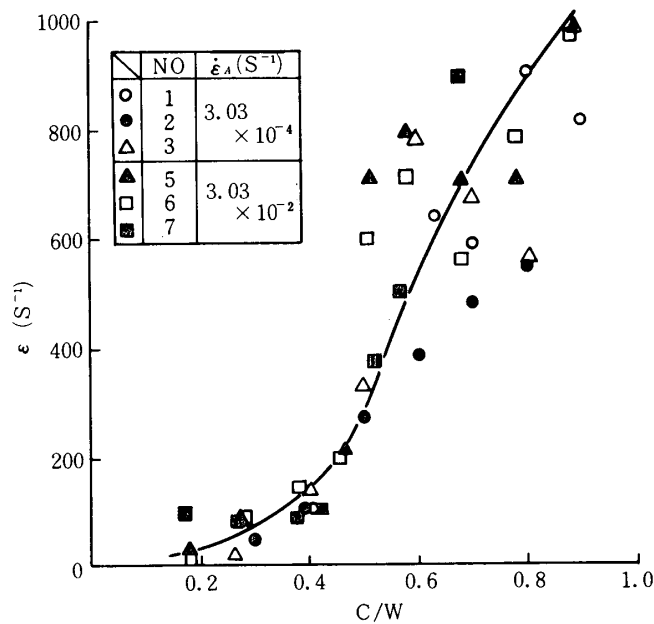
材料の破壊までの動的応力～歪曲線より決定する.

#### (1) 実験装置

東大宇航研の河田, 橋本, 金山らによる改良 Izod 型負荷装置 [5] (第10～11図)により,



第6図  $\delta \sim Y$



第7図  $\dot{\epsilon} \sim C/W$

引張速度 3.5 m/s (換算歪速度 421.7/s) を与えて、動的応力～歪曲線を求めた。

(2) 試験片

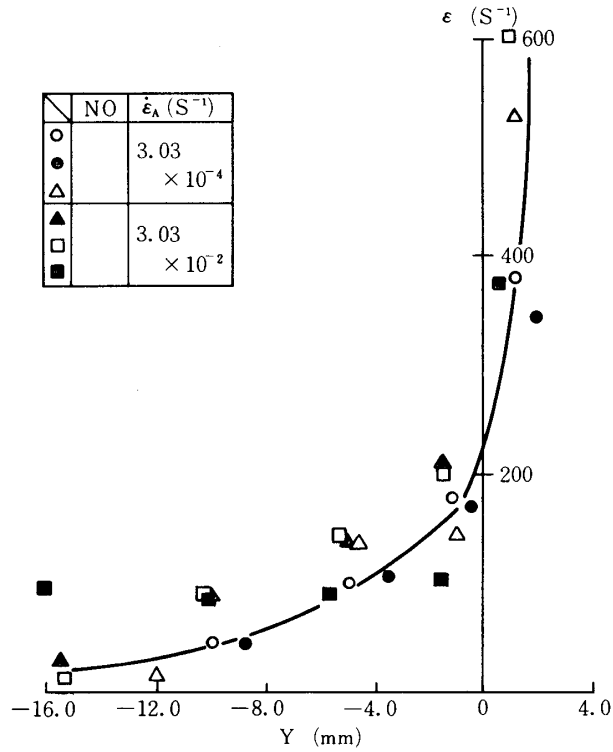
住友化学製 PMMA を、第 12 図のように製作・使用した。

(3) 計測ブロック図

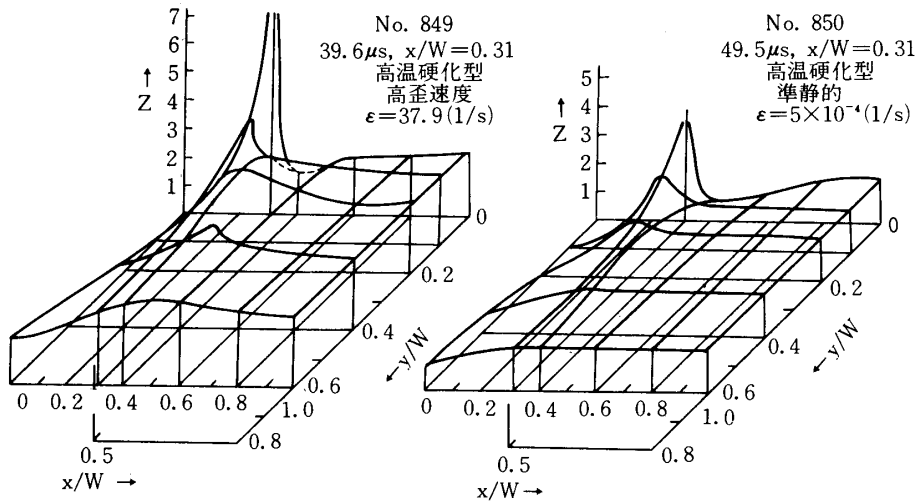
第 13 図に示す計測系により、実験を行った。

(4) 動的応力～歪曲線

20°C に於て得られた動的応力～歪曲線を第 14 図にかかげる。著しい凹凸がデータにあらわれているが、試験片の取付部分がややゆるいねじ式の為、雑音が生じたものと解される。



第8図  $\dot{\epsilon} \sim Y$

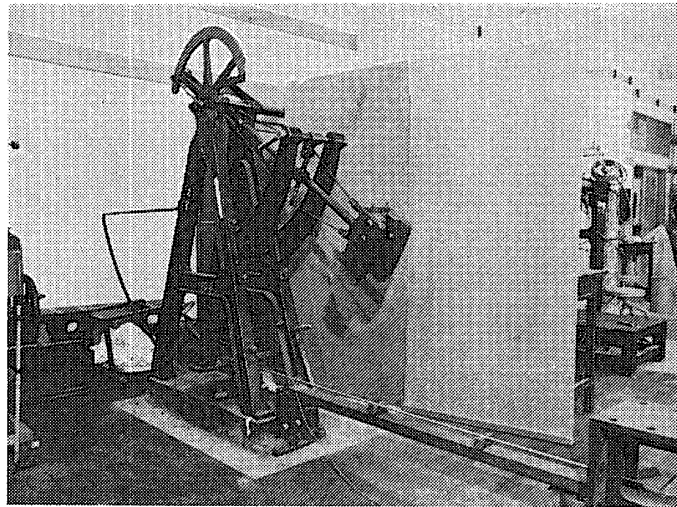


第9図 クラック伝播中のエポキシの主応力差変動

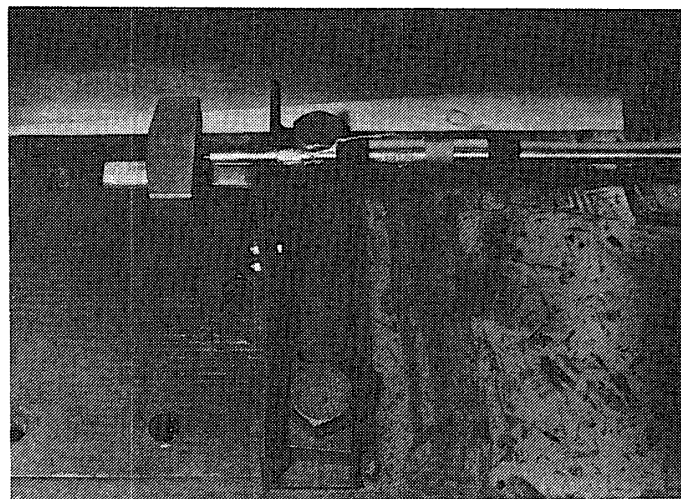
4. 線形弾性破壊力学による考察

PMMAは、本質的に粘弾性であるが、第一近似的に線形弾性破壊力学を適用して、理論的考察を行った。

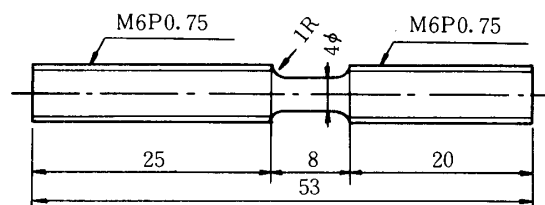
(1) 破壊直前の弾性係数の値



第10図 改良 Izod 型負荷装置

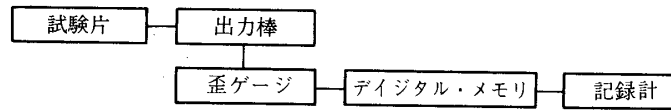


第11図 取付部詳細

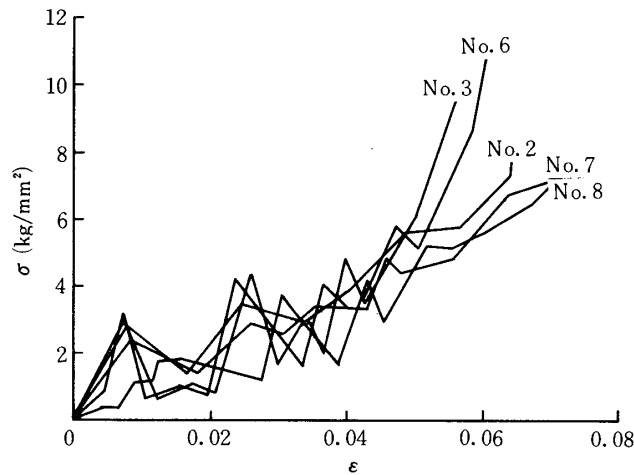


(単位：mm)

第12図 試験片



第13図 計測ブロック図



第14図 動的応力～歪曲線 (20℃)

前掲第14図より、破壊直前の弾性係数 $E$ は、ばらつきを考慮して、略々 $600 \text{ kg/mm}^2$ と考える。

## (2) 局所歪速度の理論的推定

Williams [1] の解析によると、PMMAについて、局所歪速度 $\dot{\epsilon}$ は、

$$\dot{\epsilon} = \frac{\pi \epsilon_Y^2 \dot{C}}{d}$$

で与えられる。但し、 $d = \text{critical crack tip displacement} = 0.002 \text{ mm}$ とする。又、 $\epsilon_Y = \text{降伏歪} = 0.05$ とする。

今、 $C/W = 0.5$  (非接触計測位置) では、 $\dot{C} \approx 300 \text{ m/s}$ より、 $\dot{\epsilon} \approx 1.18 \times 10^6 / \text{s}$ となる。

同じく Williams [1] により、

$$E = 10^5 \{ 0.95 + 3.98 \dot{\epsilon}^{0.109} \} \quad (\text{psi})$$

から、

$$\epsilon = \left\{ \frac{\frac{E(\text{psi})}{10^5} - 0.95}{3.98} \right\} \quad (1/\text{s})$$



となる。上式に  $E = 600 \text{ kg/mm}^2 = 853,200 \text{ psi}$  を代入すれば,  $\dot{\epsilon} \approx 370 / \text{s}$  を得る。

本実験では, クラック前方の局所歪速度として,  $200 / \text{s}$  程度を得たが, 上述のいずれの推定値もこれを上まわっているが, PMMA が本質的に粘弾性体であることにも起因するものと思われる。尚, 今後の究明を必要とするものである。

#### 謝 辞

東大宇宙航空研究所 小林研究室の大谷信男助手の有益な討論と助力, 小林春夫氏, 小玉堅司君, 藤井良成君の協力を, 夫々深甚なる謝意を表すものである。

1980年11月13日 材料部

#### 参考文献

- [ 1 ] J.G. Williams, Int'l. J. Fracture Mech., 8, 393 (1972)
- [ 2 ] Zimmer 社取扱説明書 (小林研究室資料)
- [ 3 ] A. Kobayashi, N. Ohtani & T. Sato, J. Appl. Polym. Sci., 18, 1625 (1974)
- [ 4 ] 小林 昭, 佐藤 正, 大谷信男, 東大宇航研報告 10, 4B, 835 (1974)
- [ 5 ] 河田幸三, 橋本彰三, 金山 登, 第5回衝撃工学シンポジウム講演集, 71, 東大宇航研 (1978)