

高速進展開始直後のき裂に対する
コウスティック法の適用について*鈴木 新一^{*1}, 中 根 清^{*2}Application of Caustic Method to
Cracks Just after Beginning of Rapid Propagation

Shinichi SUZUKI and Kiyoshi NAKANE

Crack tip stress fields of cracks propagating at a speed of about 550 m/s are experimentally studied at the time of 18 or 73 μ s after crack initiation, and the following results are obtained. (1) In the direction along the crack, no effect of higher-order terms appears at either 18 or 73 μ s after crack initiation, and the singular field is developed as far as 9 mm from the crack tip. Hence, measurement of crack opening displacement always gives the true value of the dynamic stress intensity factor, K . (2) In the direction of 72 degrees from the crack propagation direction, the effect of higher-order terms strongly appears at 18 μ s after crack initiation, but it disappears at 73 μ s, and the singular field is developed as far as 5 mm from the tip. It can consequently be said that the higher-order terms affect K measurement by the caustic method if the measurement is carried out within several tens of microseconds after the beginning of rapid crack propagation.

Key Words: Fracture Mechanics, Brittle Fracture, Impact Strength, Fracture Toughness, Crack Opening Displacement, Crack Propagation, Material Testing, Caustic Method, Pulsed Holographic Microscopy

1. ま え が き

材料中に存在する静止き裂が、衝撃的な荷重を受ける場合や、脆性材料が破壊する際に発生する高速進展き裂においては、き裂の応力拡大係数 K が、短時間の内に大きく変化する。この動的応力拡大係数は、これまで主に、光学的手法によって測定されてきた。なかでもコウスティック法⁽¹⁾は、他の光学的手法に比べて光学系が単純である利点を有しており、動的応力拡大係数測定において、中心的役割を果たしてきた。その意味で動的破壊力学の実験的研究は、コウスティック法とともに発達してきたと言える。

しかし最近以下に示す場合にはコウスティック法が正しい K 値を示さないのではないかという疑問が出されている⁽²⁾⁻⁽⁶⁾。

(1) 静止き裂がきわめて短い時間 [μ s] に衝撃的な荷重を受ける場合。

(2) き裂が数百 m/s 以上の高速で進展を開始した直後。

(3) き裂が大きな加速度をもつ場合。

コウスティック法は、き裂先端付近に特異平面応力場が成立していることを仮定している。しかし、上記の場合においては、特異平面応力場が十分には発達しておらず、コウスティック法が真の K 値を与えないのではないかとされている。

前述のように、コウスティック法は、動的破壊力学の実験的研究において、中心的な役割を果たしてきた。したがって上記の三つの場合において、コウスティック法が真の K 値を与えるのか否かを明らかにすることは、今後の動的破壊力学の実験研究に大きな意味をもつ。

問題が重要であることから、これまでもいくつかの研究がなされてきた。Ma and Freund⁽²⁾は、き裂先端周辺に特異平面応力場が十分発達するにはある有限の時間が必要であることを理論的に示した。また青木ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾はコウスティック法の数値シミュレーションにより、上記の理論結果を支持する結果を得た。これらの結果は、上記の三つの場合においては、特異平面応力場が厳密には成り立っておらず、応力場の高次項成分の影響が、き裂先端の近くにまで及んでいることを示唆している。さらに Freund and Rosakis⁽⁶⁾は、動的き裂先端付近の応力場を記述する新しい高次項理論を

* 原稿受付 平成5年3月15日。

^{*1} 正員, 豊橋技術科学大学エネルギー工学系 (〒441 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。^{*2} 学生員, 豊橋技術科学大学大学院。

作り、それを高速進展開始直後のき裂の問題に適用した。その結果、高速進展開始直後のき裂においては、高次項成分の影響を無視できないことを示した。このような背景から、き裂先端付近の応力場に対する高次項成分の影響を明らかにする実験的研究が必要であることがわかる。しかし高速進展するき裂または、動的荷重を受けるき裂の先端付近の応力場を実験で詳細に調べることは技術的困難があり、Tippur ら⁽⁴⁾や Suzuki and Fukuchi⁽⁵⁾の研究が報告されているだけである。

以上のことをふまえ本研究では、上記の三つの場合の内の2番目の問題を取り上げ、実験による研究を行った。具体的には、PMMA 中を約 550 m/s の速度で進展するき裂を用い、き裂進展開始から 18 μ s と 73 μ s におけるき裂先端応力場を調べた。そして二つの時刻におけるき裂先端応力場への高次項成分の影響を明らかにした。測定には、パルスホログラフィ顕微鏡法による COD 測定⁽⁹⁾と、コウスティック光のホログラフィ記録・再生⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾を用いた。COD 測定により、き裂に沿った方向での高次項成分の影響を明らかにした。また、コウスティック光のホログラフィ記録・再生により、き裂の進行方向から 72° の方向での高次項成分の影響を調べた。

2. 試 験 片

本研究で用いた透明 PMMA 試験片(住友化学工業、スミベックス E, 250×190×3 mm)を図 1 に示す。試験片には長さ 70 mm の切欠きが設けられており、き裂はこの切欠き先端で発生する。切欠き先端の曲率半径は 1 mm である。試験片にあらかじめ引張荷重を加え、切欠き先端にナイフで傷を入れることにより、高速進展き裂を発生させる。そのき裂は、切欠き先端から 10 mm の所(観測領域 A)、または 40 mm の所(観測領域 B)のどちらかで観測される。き裂は発生から観測終了ま

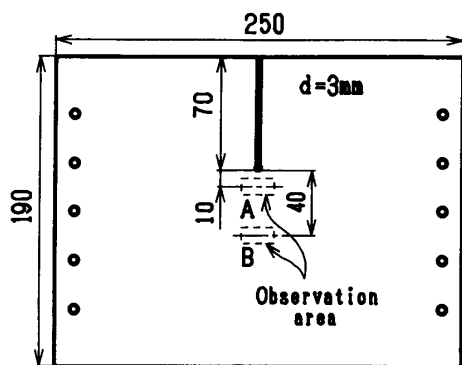


図 1 PMMA 試験片

での間ほぼ一定速度で進展し、その速度は約 550 m/s である。したがってき裂が進展を開始してから観測を行うまでの時間は、観測領域 A では 18 μ s、観測領域 B では 73 μ s である。高速き裂の発生、進展時には、き裂面に直角方向に強い応力波(縦波)が発生する。この応力波は試験片端面で反射した後、き裂に向かって戻ってくる。本研究では、この応力波がき裂に衝突する前に観測が終了するように十分大きな試験片を用いている。したがって試験片は無限平板とみなすことができる。

3. 測 定 原 理

3.1 COD測定⁽⁹⁾ パルスホログラフィ顕微鏡法を用い、高速進展き裂先端部の瞬間顕微鏡写真を撮影する。得られた写真から、き裂に沿ってき裂開口変位 COD を測定する。き裂先端近くに現れる特異平面応力場内では、COD は

$$COD = K_I(v) \alpha L(v) \sqrt{r} \dots\dots\dots (1)$$

と表される。ここで α は試験片材質により決まる定数、 $L(v)$ はき裂速度の影響を表す関数、 r は $\theta=180^\circ$ でのき裂先端からの距離である(図 2)。したがって、(COD, r) の測定値を式(1)に代入すれば、き裂の動的応力拡大係数 $K_I(v)$ が与えられる。式(1)は、特異平面応力場内での COD を表すものである。したがって、測定が特異平面応力場内で行われている限り、COD と r が変化しても、式(1)は一定の $K_I(v)$ を与え、それは真の K 値である。しかし COD 測定が高次項成分の領域で行われると、式(1)が与える $K_I(v)$ は一定にはならず、真の K 値からずれることになる。このことから、き裂に沿った方向($\theta=180^\circ$)で、特異平面応力場がき裂先端からどの程度遠くまで成り立っているかを知ることができる。

3.2 コウスティック法⁽¹⁾ 図 3 はコウスティック法の原理を示したものである。き裂は紙面に対して垂直に進展する。き裂先端部では強い引張応力のために試験片の板厚と屈折率が減少する。ここで試験片に平

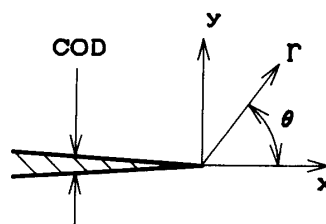


図 2 き裂と座標系

行光線を入射すると、き裂先端に近い光は大きく、遠い光は小さく外側に曲げられる。このため試験片の後ろに置かれたスクリーン上には光の来ない影の領域が現れる。これをシャドウスポットと言う。シャドウスポットの外側は光が集中するために、いちだんと明るくなった円環状の領域が現れる。この明るい円環のことをコウスティックと呼ぶ。コウスティックを形成する光を逆にたどっていくと、試験片の上に円を描くことができる。この円を初期曲線と呼ぶ。すなわち、初期曲線上を通過した光線がコウスティックを形成する。動的応力拡大係数 $K_I(v)$ とコウスティック径 D 、初期曲線半径 r_0 の間には次のような関係がある。

$$K_I(v) = \beta F(v) \frac{D^{5/2}}{Z_0 d}, \quad D = 3.17 r_0 \dots \dots \dots (2)$$

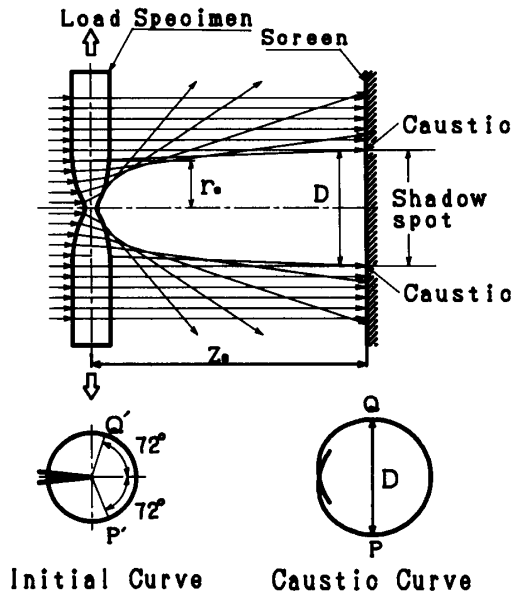


図 3 コウスティック法の原理

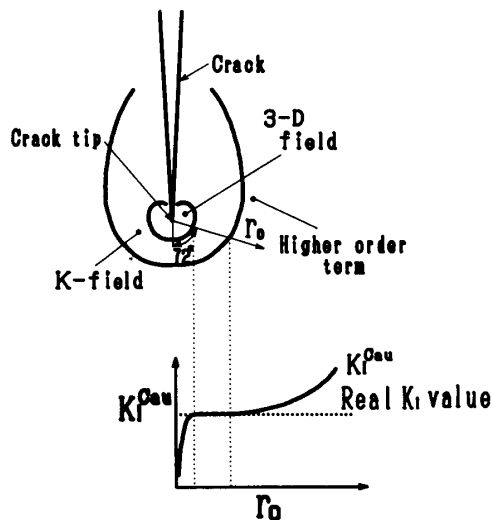


図 4 き裂先端の応力場とコウスティック法

ここで β は試験片材質により決まる定数、 d は試験片板厚、 Z_0 は試験片からスクリーンまでの距離、 $F(v)$ はき裂速度の影響を表す関数である。コウスティック径 D は、コウスティック曲線上の 2 点 P, Q 間の距離である。点 P, Q に到達する光線は、初期曲線上の 2 点 P', Q' を通過した光線であり、この 2 点 P', Q' はそれぞれき裂の進展方向から測って 72° の方向にある。したがってコウスティック法は $\theta = 72^\circ$ の方向の応力場を用いて K 値を測定していることになる。

上述のようにコウスティックは、初期曲線上を通過した光線によって形成される。コウスティック法は、この初期曲線が、き裂先端周辺に現れる特異平面応力場の中にあると仮定している。

図 4 は、高速進展き裂先端付近の応力場を模式的に示したものである。き裂先端に極近い領域には三次元応力場が存在する^{(5)(10)~(13)}。三次元応力場の外側には $1/\sqrt{r}$ に比例する特異平面応力場が広がっている。さらにき裂先端から遠ざかると、応力場の高次項成分の影響が現れてくる。もし、初期曲線が特異平面応力場の中に入っていればコウスティック法から得られる K 値は常に正しい値を示す。しかし初期曲線が三次元

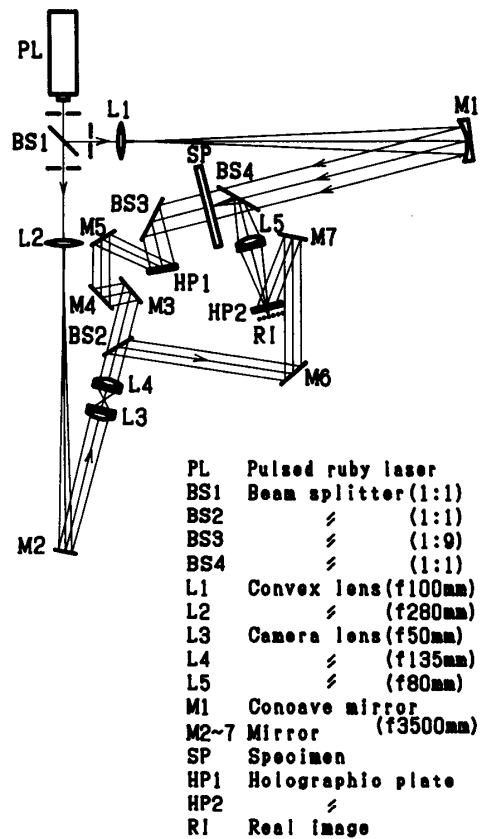


図 5 ホログラフィ記録用光学系

応力場や、高次項成分の領域に入ると、コウスティック法は正しい K 値を示さないことになる。このことを逆に利用し、コウスティック法により求まる K 値と真の K 値を比較することにより、特異平面応力場が成立している領域を知ることができる⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾。

4. 実験方法

高速進展開始直後のき裂における高次項成分の影響を調べるために、本研究ではパルスホログラフィ顕微鏡法による COD 計測⁽⁹⁾とコウスティック光のホログラフィ記録・再生⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾の同時計測を行った。その光学系を図5に示す。き裂は試験片 SP の中を紙面に垂直な方向に進行する。き裂が進展を開始し観測領域 A または B に達した時点でパルスレーザー PL を発振させホログラフィ記録を行う。

4・1 き裂先端部の実像の記録 パルスレーザー PL から出た光は、ビームスプリッタ BS 1 で二つに分けられる。BS 1 で反射した光はレンズ L 1 を通過し、凹面鏡 M 1 で反射して平行光線となる。この平

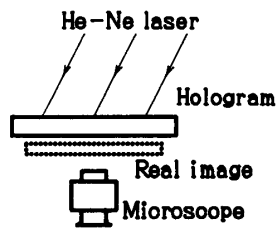


図6 き裂先端部実像の再生

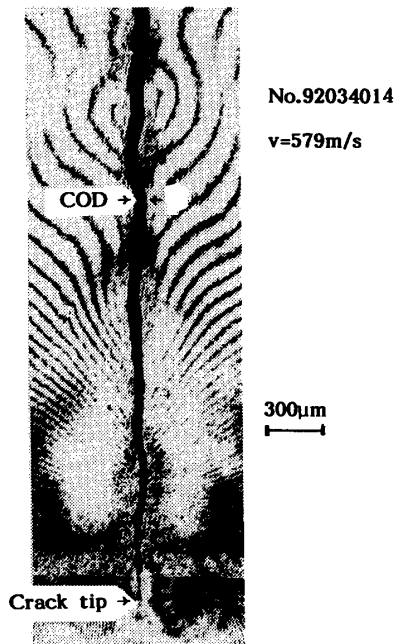


図7 高速進展き裂の瞬間顕微鏡写真

行光線はビームスプリッタ BS 4 を透過し試験片 SP に垂直に入射する。試験片 SP に入射した平行光線の一部は試験片表面で反射する。この反射光は BS 4 で反射し、レンズ L 5 を通過してホログラフィ乾板 HP 2 に入射する。レンズ L 5 は、約2倍に拡大されたき裂の実像 RI を HP 2 の後ろに作る。これがき裂先端部のホログラフィ記録に用いる物体光である。

ビームスプリッタ BS 1 を透過した光は、レンズ L 2, L 3, L 4 を通過して平行光線になる。この平行光線はビームスプリッタ BS 2 で二つに分けられる。BS 2 で反射した光は鏡 M 6, M 7 で反射した後ホログラフィ乾板 HP 2 に斜めに入射する。これが参照光である。こうしてき裂先端部の実像 RI がホログラフィ記録される。

4・2 コウスティック光のホログラフィ記録 試験片 SP に垂直に入射し、試験片を透過した光は、コウスティック光となる。コウスティック光はビームスプリッタ BS 3 で反射した後ホログラフィ乾板 HP 1 に入射する。これが物体光である。

ビームスプリッタ BS 2 を透過した平行光線は鏡 M 3, M 4, M 5 で反射した後 HP 1 に斜めに入射する。これが参照光である。このようにして高速進展き裂コウスティック光のホログラフィ記録が行われる。

4・3 き裂先端部の実像の再生 現像処理の後、ホログラム HP 2 に He-Ne レーザ光を入射することにより、き裂先端部の実像 RI が再生される(図6)。再生された実像を顕微鏡拡大し撮影することによりき裂先端部の写真が得られる。このようにして得られた高速進展き裂先端部の写真の一例を図7に示す。き裂開口変位 COD をき裂先端からの距離 r の関数として測定することができる。得られた (COD, r) のデータから式(1)を用いて、き裂の動的応力拡大係数 $K_I(v)$

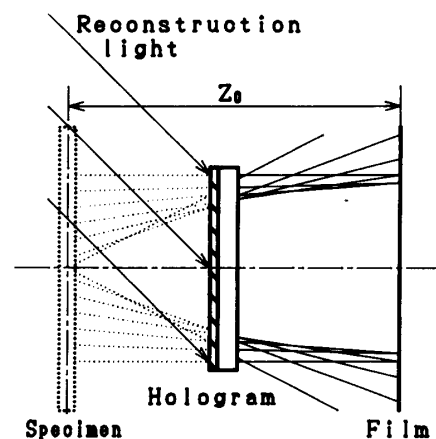


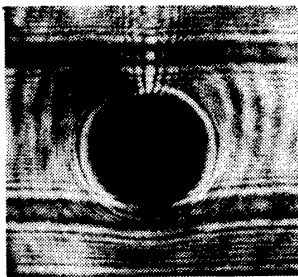
図8 コウスティック光の再生

を求める。

4・4 コウスティック光の再生 現像処理の後、ホログラム HP 1 に再生光(ルビーレーザー光)を入射し、記録されたコウスティック光を再生する(図 8)。試験片からフィルムまでの距離 Z_0 を変えながら再生することにより、あらゆる Z_0 でのコウスティックの写真を得ることができる。このようにして再生されたコウスティックの一例を図 9 に示す。写真よりコウスティック径 D を測定し、式(2)を用いて、初期曲線半径 r_0 および動的応力拡大係数 $K_I(v)$ を求める。

5. 実験結果および考察

5・1 き裂進展開始後 18 μ s (観測領域 A) 図 10 (a) にき裂進展開始から約 18 μ s 後に観測領域 A でホログラフィ記録を行った場合の実験結果を示す。横軸はき裂に沿った方向におけるき裂先端からの距離 r , または、初期曲線半径 r_0 を表す。縦軸は COD 測定により得られた動的応力拡大係数 K_I^{COD} または、コウスティック法より求めた動的応力拡大係数 K_I^{Cau} を、真の K 値 K_I^{Real} で無次元化したものである。この図から、COD 測定より求めた動的応力拡大係数 K_I^{COD} は、



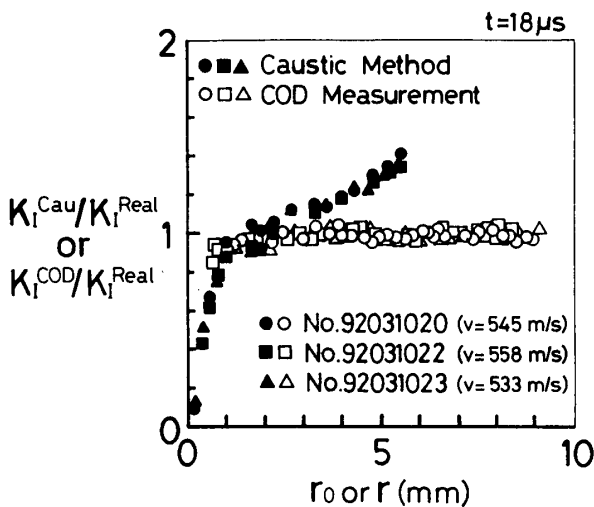
No.92034014
 $v=579\text{m/s}$
 $Z_0=1400\text{mm}$

図 9 再生されたコウスティックの一例

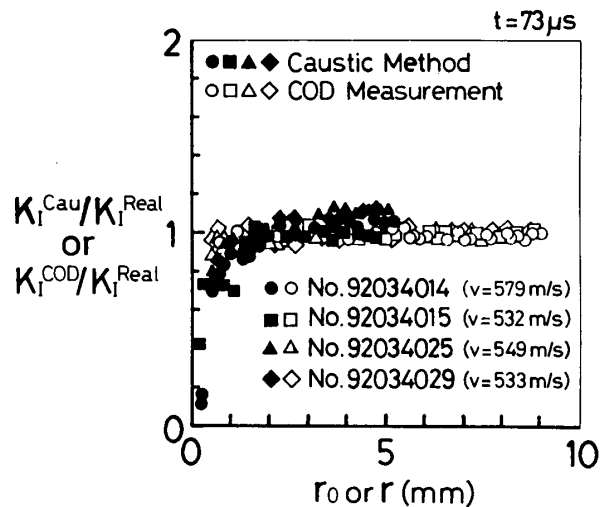
き裂先端から 9 mm までの領域で一定値を示していることがわかる。このことは、き裂に沿った方向では、き裂先端から 9 mm までの領域で高次項成分の影響が現れておらず、特異平面応力場が成立していることを意味している。したがって COD 測定は、常に真の K 値を与え得る。このことから、COD 測定より得られた K 値 (K_I^{COD}) の平均値を真の K 値 (K_I^{Real}) とし、それを縦軸の無次元化に用いた。

それに対して、コウスティック法から求めた動的応力拡大係数 K_I^{Cau} は、一定値を示していない。初期曲線半径 r_0 が 1.5 mm 以下の領域では、 K_I^{Cau} が K_I^{Real} より小さい値を示している。これは、き裂先端近傍に現れる三次元応力場の影響によるものである^{(5)(10)~(13)}。 K_I^{Cau} は、 $r_0=1.5$ mm 前後で真の K 値、 K_I^{Real} と一致するが、 r_0 が大きくなるにつれて K_I^{Cau} は増加し、 $r_0 > 1.5$ mm の領域では、 K_I^{Cau} は K_I^{Real} よりも大きな値を示している。これは、応力場の高次項成分の影響⁽¹⁴⁾であると考えられる。このようにき裂進展開始から 18 μ s 後(観測領域 A)では、コウスティック法により得られた動的応力拡大係数が一定値を示す領域が存在せず、真の動的応力拡大係数と一致しない。したがって、 $\theta=72^\circ$ の方向においては特異平面応力場は成立していないと言える。

5・2 き裂進展開始後 73 μ s (観測領域 B) 図 10 (b) はき裂進展開始後 73 μ s に観測領域 B でホログラフィ記録を行った場合の実験結果である。COD 測定より求めた動的応力拡大係数 K_I^{COD} は、き裂先端から 9 mm までの領域で一定値を示している。これは、上述のき裂進展開始後 18 μ s(観測領域 A)の場合と同じであり、き裂に沿った方向で特異平面応力場が成立



(a) き裂進展開始後 18 μ s



(b) き裂進展開始後 73 μ s

図 10 COD とコウスティックから求めた K_I 値

していることがわかる。他方、コウスティック法から求めた動的応力拡大係数 K_I^{Cau} は、 r_0 が 1.5 mm 以下の領域において、 K_I^{Real} より小さい値を示している。これはき裂進展開始後 18 μs (観測領域 A) の場合と同様、三次元応力場の影響である。しかし r_0 が 1.5 mm 以上の領域では、 K_I^{Cau} は K_I^{Real} に一致している。したがって、き裂進展開始後 73 μs (観測領域 B) では、き裂進展方向から 72° の方向においても高次項成分の影響がなくなっており、特異平面応力場が成立していることがわかる。

上記の結果から、次の二つのことが言える。

(1) 高速進展開始直後のき裂先端部の応力場には、高次項の影響が強く現れる。しかし、高次項の影響には方向依存性があり、き裂に沿った方向では高次項の影響はない。

(2) 高次項の影響は時間とともに減少し、本研究では、その緩和時間は数十 μs であった。

5.3 高次項の発生 高速進展開始直後のき裂において、高次項の影響が強く現れるのは、次のような理由によると考えられる。

高速進展き裂は、試験片に設けられた切欠先端から発生する。き裂発生以前は、切欠先端に強い応力集中をもつ応力場 σ_N が試験片中に広がっている [図 11(a)]。切欠先端でき裂が発生すると、切欠先端近傍の応力場は変化し、その変化は、応力波の形で試験片中を広がっていく [図 11(b)]。切欠先端から応力波の波頭までの距離 r_w は、 $r_w = c_I t$ で与えられる (c_I は縦波速度、 t はき裂発生から測った時間)。き裂発生時に

生じる縦波の外側には、き裂発生の影響はまだ伝わっておらず、き裂発生以前の応力場 σ_N がそのまま残っている。他方、き裂先端近傍には、応力拡大係数 $K_I(v)$ で表される特異応力場が発生する。しかし、過去の研究から、特異応力場が成立している領域の大きさ r_s は r_w に比べてかなり小さいと推察される。したがって、特異応力場はき裂先端の極近傍のみに限られており、き裂先端から少しでも離れると、応力場の高次項の影響が強く現れると考えられる。

Ma and Freund⁽²⁾ は、衝撃荷重を受けて進行するき裂の応力場の解析を行った。そしてき裂進展開始後に、 $\theta = 0^\circ$ (図 2 参照) の方向に特異応力場が広がっていく速さは、縦波速度の 1/20~1/40 であることを示した。また青木、木村⁽⁷⁾ は有限要素法を用い、衝撃荷重を受ける静止き裂の先端に特異応力場が広がっていく速度を求めた。そして、 $\theta = 0^\circ$ の方向に特異応力場が広がっていく速さは、縦波速度の約 1/50 であるという結果を得た。すなわち、特異応力場が成立している領域の大きさ r_s は、き裂先端から放射される縦波の半径 $r_w (= c_I t)$ の約 1/20~1/50 である。上記の解析で用いられた境界条件や初期条件は、本研究での実験条件と異なる。また、上記の結果は、 $\theta = 0^\circ$ での結果であるのに対し、本研究は $\theta = 72^\circ$ と 180° での測定であるため、単純な比較をすることには注意を要する。しかし、 $r_s \approx r_w/20$ と仮定するならば、 $t = 18 \mu\text{s}$ のときには、 r_s は約 2 mm となる。したがって、 $r > 2 \text{ mm}$ の領域では高次項の影響が現れることになる。また、 $t = 73 \mu\text{s}$ の時には、 r_s は約 8 mm となり、高次項の影響は十分小さくなると予想される。図 10 に示したコウスティック法の測定結果は、上記の数値解析結果を支持している。

5.4 高次項の方向分布 図 10 の結果からわかるように、き裂に沿った方向 ($\theta = 180^\circ$) では高次項の影響は現れていない。Tippur ら⁽⁴⁾ は CGS 法を用いて高速進展開始直後における試験片板厚の変化を測定し、高次項成分の影響を調べた。そして、 θ が増加するにつれて高次項成分の影響が小さくなる結果を得ている。したがって、Tippur らの結果と本研究の結果とは定性的に一致すると言える。

き裂に沿った方向で高次項成分の影響が現れないのは、次のような理由によると考えられる。 $\theta = 0^\circ$ または 72° の方向では、特異応力場が発達する速さは縦波速度の 1/20~1/50 と小さく、特異応力場はき裂先端近傍のごく限られた領域にしか存在しない。しかしき裂に沿った領域 ($\theta = 180^\circ$) は、き裂先端が過去に通過してきた領域であり、したがって、き裂先端に現れる

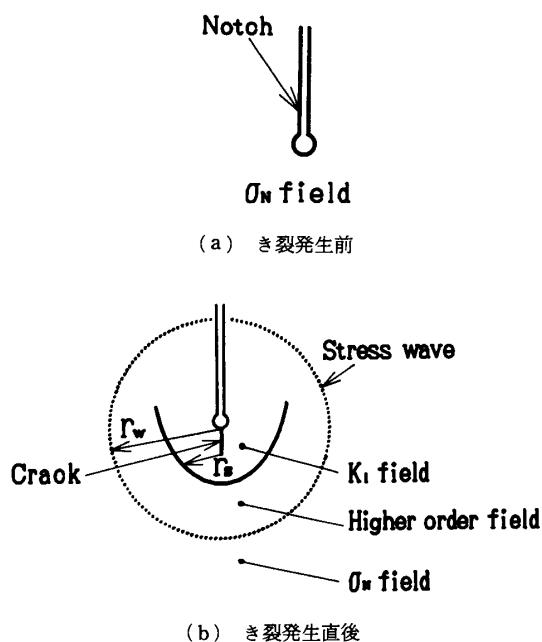


図 11 き裂発生による応力場の変化

特異応力場の支配をすでに受けている領域と考えられる。その結果、き裂に沿った方向では広い範囲にわたって高次項成分の影響を受けないのであろう。

6. 結 論

約 550 m/s の速度で進展するき裂を用い、進展開始から 18 μ s 後と 73 μ s 後におけるき裂先端付近の応力場を実験的に調べた。その結果以下の結論を得た。

(1) き裂に沿った方向においては、き裂進展開始から 18 μ s と 73 μ s の両方の時刻で、高次項成分の影響が現れていない。すなわち、き裂進展方向から 180° の方向では、き裂進展開始後の時間にかかわらず、特異平面応力場が成立している。したがって、COD 測定はつねに真の K 値を与える。

(2) き裂進行方向から 72° の方向では、進展開始から 18 μ s の時刻において高次項成分の影響が強く現れており、特異平面応力場が十分には成立していない。それに対して進展開始から 73 μ s 後では、72° の方向においても高次項成分の影響はなくなっており、き裂先端から 5 mm までの範囲で特異平面応力場が成立している。したがって、き裂発生直後の数十 μ s の間は、コウスティック法に高次項の影響が現れる。

本研究の実施にあたり、本学学生・細井規生君の協力を得た。ここに感謝する。

文 献

- (1) Kalthoff, J. F. (Kobayashi, A. S. 編), *Handbook on Experimental Mechanics*, (1987), 430, Society for Experimental Mechanics, Inc.
- (2) Ma, C. C. and Freund, L. B., *J. Appl. Mech.*, **53** (1986), 303.
- (3) Takahashi, K. and Arakawa, K., *Exp. Mech.*, **27** (1987), 195.
- (4) Tippur, H. V., Krishnaswamy, S. and Rosakis, A. J., *Int. J. Fract.*, **52** (1991), 91.
- (5) Suzuki, S. and Fukuchi, S. (Rossmanith, H. P. and Rosakis, A. J. 編), *Dynamic Failure of Materials*, (1991), 219, Elsevier.
- (6) Freund, L. B. and Rosakis, A. J., *J. Mech. Phys. Solids*, **40-3** (1992), 699.
- (7) 青木・木村, 機論, **58-554**, A (1992), 1785.
- (8) 青木・野々山, 天谷, 機論, **58-553**, A (1992), 1650.
- (9) Suzuki, S., Homma, H. and Kusaka, R., *J. Mech. Phys. Solids*, **36-6** (1988), 631.
- (10) 鈴木・細田, 機論, **55-517**, A (1989), 1974.
- (11) Yang, W. and Freund, L. B., *Int. J. Solids Struct.*, **21-9** (1985), 977.
- (12) Rosakis, A. J. and Ravi-Chandar, K., *Int. J. Solids Struct.*, **22-2** (1986), 121.
- (13) 清水・島田, 非破壊検査, **27-7** (1978), 399.
- (14) 西岡・村上・大石・前田, 機論, **58-552**, A (1992), 1353.