材料の高速変形と破壊

4. 高速伝ばき裂[†]

高 橋 清*

1 はじめに

高速き裂の諸問題は多岐にわたる。理論的にも実験的にもその扱いには静止き裂にはない困難を伴っている。解析的手法によりこれを理論的に扱う場合には無限大の対象を仮定するので反射波の影響、ポアソン効果などは考慮されない。またほとんどの場合速度は一定として扱われる。一方実験においては試験片は常に有限の大きさ、厚さをもち、また延性のような力学物性の非直線形など理論的な扱いでは考慮されないさまざまな要因が存在する。測定の手段も非常に限られており、これらのことが実験的研究を難しくしている。

き裂速度($\dot{a}$)とき裂の進行に際して材料が示す強さすなわち破壊じん性(K_{ID})の二つは高速破壊における最も基本的なパラメータといえよう。この小稿では特に $\dot{a}$ と K_{ID} を取り上げてこれについて述べることにする。

2 き裂速度の測定法

高速き裂の諸特性は $\dot{a}$ (以下ではき裂長さを a 、速度を $\dot{a}$ 、加速度を $\ddot{a}$ とする)の関数として表されることが多いが、 $\dot{a}$ の正確な測定は重要であるが意外に難しい。そこで以下にまず現在使用されている $\dot{a}$ の測定法について述べる。

2・1 高速度撮影によるき裂速度の測定

$\dot{a}$ の測定で信頼のおける方法は撮影によるものである。記録媒体としてフィルムと電子メモリがある。フィルム式は高速度映画法と瞬間照明法に分けられる。前者は1個のレンズを通じて長いフィルムに像を駒撮りしていくのに対して、後者は必要な駒数だけのレンズとそれに1対1に対応する同数の瞬間光源を用い、像は一枚のシートフィルム上に記録される(いわゆるクランツ・シャルディン式カメラである)。一方電子式の場合は長尺フィルムを用いる代わりに一枚の電子画素面上に単眼レンズでとらえられた像を記憶させる方式で、画素面上の区画を複数個とることにより複数駒の撮影が可能となる。当然のことながら駒数はフィルム式のように多くとることはできない。また分解能の点でも現状ではフィルム式に比べてはるかに劣る。

しかしフィルムの現像処理をする必要はなく、迅速な画像処理が可能である。精密な定量測定にはむかないが第一近似的な測定用には良い。

光源の選び方はその光輝時間内に現象を過不足なくとらえるための適正な同期法と共に高速度撮影では重要なことである。可視光による撮影では(i)クセノン放電光、(ii)火花放電光、(iii)レーザ光などが用いられるが、それぞれ一長一短がある。(i)は光輝時間の調節や同期は比較的容易であるが電極の間げきが数mm以上あり、シャドウグラフィ用には光源のひろがりが大きすぎる。後述のようなシャドウパターン(コースティック像)を得るためにはレンズで集光した後にピンホールでひろがりをおさえる必要があるがこの場合フィルム式の高速度撮影のためには光量不足となりやすい。(ii)の火花放電光は一駒分の照明用ならば光量は容易に確保され、電極間げきは1mm以下におさえることもできるのでシャドウグラフィ撮影で鮮明な像が得やすい。しかし多数個の火花放電光の起動の制御には雑音対策が必要となる。(iii)のレーザ光は用いるカメラのタイプに関連してさまざまな使われ方をするが、高速度撮影のためにはいずれにしても高い出力を必要とし、光パルスとするためのチョッピング技術が要る。

フィルム式であれ、あるいは電子式であれ、高速度撮影されたき裂の先端部を視認して a および $\dot{a}$ を求める。例えば時間 Δt の間の a の変化 Δa から $\Delta a / \Delta t$ で $\dot{a}$ を求めることはよくなされる。この場合 Δa の測定誤差は $\dot{a}$ をばらつかせる原因の一つとなる。鋼などの測定例では実際に $\dot{a}$ が振動的に変化する場合もある。駒数が少ない場合には $\dot{a}$ のそのような変化が視認誤差によるのか実際に変化しているのかの判断がつかない。駒数は最低でも20は欲しい。

スティックスリップ的な極端に不連続的な進展をしていないことがわかっているときには a を t に関して多項式で表す方法¹⁾によりばらつきの問題を避けるようなデータ処理ができる。すなわち

$$a = \sum_{k=0}^n A_k t^k \quad (1)$$

† 原稿受理 平成3年2月27日

* 正会員 九州大学応用力学研究所 春日市春日公園

である。ここで A_k は得られたデータがこの多項式曲線に最も良く近似されるように最小二乗法の原理によって定められる。式(1)の時間微分により $\dot{a}$ が、また $\dot{a}$ の時間微分により $\ddot{a}$ が求まる。また $a(t)$ と $\dot{a}(t)$ から t を消去して $\dot{a}(a)$ が得られる。このようなデータ処理法により、データの数があるならば速度効果だけではなく加速度効果も検討できる¹⁾。筆者らは $n=9$ として9次の多項式を用いている。しかし n をいくつにするかは曲線がどのように変化しているかに依る。

2・2 導電性を利用したき裂速度の計測

秒速で例えば 100 m を越える高速き裂の $\dot{a}$ の測定を撮影により行おうとする場合には 10^7 円オーダの撮影装置を必要とする。より低速な場合も含めてもっと安価な装置で $\dot{a}$ を測定する方法には次のようなものがある。

(1) 導電塗料線、メッキ線、クラックゲージの利用

カラス口などを用いて市販の銀ペーストの細線(幅は 0.3~1 mm)を試験片表面に適当な間隔で塗布する。導電性材料の場合にはあらかじめ絶縁膜を塗布しておく必要がある。これらの塗料線をはしごのようにつなぎブリッジ回路の一辺に入れてはしごの一段一段がき裂の進展に伴い切断されるのを電気信号に変えて観測する。はしごの段数を増したい場合には塗料線の代わりに試験片表面にメッキ線を多数附着させる。これには電気回路基板の配線技術が用いられる。自分でこのような導電線づくりをするのが面倒な場合には市販されている図1のようなクラックゲージを利用する

図1 クラックゲージ

こともできる。例えば一枚の測定範囲が 25 mm であるゲージを2枚連続して接着すれば 50 mm の長さまで測定することができる。ブリッジアダプターも市販されている。これらのはしごゲージは簡易な反面き裂到来とゲージ線断の同時性が常に問題となるので結果の解釈においてはそのことを考慮しておく必要がある。

(2) 電気ポテンシャル法

金属のような導電性材料に高周波電流を流すとスキーン効果により周波数が高くなるほどに電流は表面近くを流れようとする。き裂の進展によってこの高周波電流の流れが邪魔される向きに電流を流し、き裂線の両側の電圧を測定してこれを a と関連づけることにより $\dot{a}(t)$ を測定する試みがある²⁾。

プラスチックのような非導電性材料の場合は表面にカーボン塗料(市販のスプレー)のような導電膜を塗布することにより同様の方法を用いることができる。この場合高周波電流を用いる代わりに直流を用い、膜の抵抗変化をき裂長さ a に関連づけて連続的に $\dot{a}$ を得る試みがある。いずれの場合も(1)で述べた“同時性”の問題はやはり避けられない。何らかの方法により同時性のチェックをすることが望ましい。

2・3 その他の方法によるき裂速度の計測

(1) 超音波フラクトグラフィ

引張負荷にせん断負荷をプラスすると主応力方向が変化する。ぜい性的に進行しているき裂に横波超音波を与えるときき裂先端部の主応力方向が超音波の周期で変化し、き裂にわずかではあるがうねりが生じる。このうねりは落射照明下の破断面上の顕微鏡観察で線(人工のワルナー線、超音波線とも呼ぶ)として認められる。この超音波線の間げきは非常に正確な2次元⁴⁾的な速度情報である。この方法は無機ガラスやぜい性ポリマーに利用することができる⁵⁾。超音波周波数には 100 kHz~10 MHz が用いられ、また、材料内でのパワーとしては材料強度の 1/1000~1/100 が必要である。

(2) ひずみゲージの利用

予想されるき裂線に沿って複数のひずみゲージを貼っておきゲージの出力からき裂の到来を知る。比較的大きな試験材で、2・2の方法がうまく用いられない場合やひずみ情報そのものも必要とする場合などに用いられる⁶⁾。

3 動的破壊じん性

3・1 動的破壊じん性の定義とその評価法

材料実用上の立場からは高速で走るき裂をいかにしたら停止させ得るかは重要である。特に動的破壊じん性 (K_{ID}) は重要で、これまでに多くの研究がなされている。

小規模降伏条件下で進展する高速き裂に対する破壊のクライテリアは静的破壊の場合と同じように応力拡大係数を用いて仮説的に与えられる。すなわち

$$K_d(a(t), t, \text{Load}) = K_{ID}(\dot{a}) \quad (2)$$

である。ここで K_d はき裂長さ、時間および負荷の関数としてのモード I 動的応力拡大係数である。右辺の $K_{ID}(\dot{a})$ はき裂の成長に対する材料の抵抗すなわち破壊じん性である。式(2)の K_{ID} が $\dot{a}$ との関係で実験ではどのようにとらえられているかを以下に見てみよう。この場合進行中のき裂に対して何らかの方法により式(2)の K_d すなわち K_{ID} を評価するわけであるが、その方法には boundary value 法と呼ばれる間接的な測定法と以下に述べる直接的な測定法がある。直接的な測定法には光弾性法とコースティック法がよく知られ

ている。高速き裂の問題を複雑にしている要因について1で述べたが、これらの方法で得られる K_{ID} が必ずしも一致しないことが¹⁰⁾あげられる。したがって高速破壊の理解のためには K_{ID} の測定がどのような原理によっているかを知ることは重要である。

(1) 光弾性法による K_{ID} の評価

これにはさまざまな方法がある。ここでは一例として2パラメータ法すなわちIrwin法を取り上げる。 K_{ID} は次の式から求まる。

$$K_{ID} = \left(\frac{N f_d}{d} \right) \sqrt{2\pi r_m} H(\theta_m \cdot \dot{a}) \quad (3)$$

N は等色線の縞次数、 f_d は動的光弾性感度、 d は試料厚さである。また r_m は図2に示すようにき裂先端

図2 等色線ループの r_m と θ_m

部で観察される縞輪の最大半径、 θ_m はその伏角である。 H は動的補正係数で θ_m と $\dot{a}$ の関数とされている。¹²⁾この方法の場合誤差を少なくするためにき裂先端から離れた位置 (far field) で N 、 r_m 、 θ_m を測定するので、 K_{ID} はfar fieldで評価されることになる。

金属のような不透明材料には光弾性被膜法が用いられる。¹³⁾

(2) コースティック法

透明な材料では透過法および反射法が、また不透明な材料では反射法が用いられる。その原理を透過法を例に述べる。

き裂先端部では強い応力集中があるので密度の低下と面外変形の発生がある。ここを通る光はそのために外側に屈折し、背後に影の領域を形成する。仮想的に背後にイメージ画 (ピント面) を設けるならばシャドウパターンとその輪郭のコースティックの像がここで撮影される。コースティックの直径 D が K_{ID} を与える。この場合 K_{ID} はき裂先端近傍の応力場 (near field) によって評価されることになる。ちなみに K_{ID} は図3のような光学系を用いた場合

図3 コースティック法の光学系の例
(クランツ・シャルディンカメラ利用)

$$K_{ID} = \frac{2\sqrt{2}\pi}{3m^{3/2}f^{5/2}cdz_0} D^{5/2} \cdot F(\dot{a})F'(\dot{a}) \quad (4)$$

で与えられる。ここで m は光学系の像の倍率で図3の場合 $z_1/(z_1+z_0)$ で与えられる。 f は D と後述の初期曲線の半径 r_0 の比である。光学的異方性をもつ材料の場合コースティックの像は二重構造をもち、 f に2種の値がある。例えばエポキシ樹脂の場合ダブルコースティック像の内側の直径を D ととると3.32という数値になる。アクリル樹脂の場合には異方性はほとんどなく f は3.17となっている。 $F(\dot{a})$ は動的補正係数、 $F'(\dot{a})$ は材料の光学異方性の動的補正係数で、エポキシ樹脂の場合には1に近いとされている。 c は応力・光定数である。 d は試料厚さである。コースティック像の形成に關する光線が透過する応力場はき裂先端から半径 r_0 の曲線 (初期曲線と呼ぶ) 上にあり、 $r_0 > (d/2)$ が測定の条件として必要なことが知られている。これは r_0 があまりに小さくなると式(4)が前提とする平面応力状態からはずれてしまうことが主たる理由と考えられる。

金属のような不透明材料に対しては試験片を鏡面のようにみがくことにより反射コースティック像を得て、 K_{ID} を評価することが可能である。¹⁵⁾この場合鏡面状にするための研磨作業はかなり骨の折れるものである。

3・2 鉄鋼材料における K_{ID} の $\dot{a}$ 依存性

式(2)では K_{ID} は $\dot{a}$ に一意に依存するものとして扱われている。しかしながら実際にはこの問題はまだ未解決で、 $\dot{a}$ の測定ではばらつきが大きくなりやすく、多くの場合この問題はばらつきの中に埋もれてしまいがちである。

図4は高強度鋼についての間接法による測定例である。ここでは K_{ID} は a と共に増加し、 $\dot{a}$ が200 m/sで約5割も増している。 $\dot{a}$ が減少すると共に K_{ID} も減少し、誤差の範囲内で K_{ID} と $\dot{a}$ は一意に対応しているように見える。

図5は4340鋼について同じく間接法によって得られた5種の実験結果をまとめたものである。⁸⁾この場合は $\dot{a}$ が500 m/sを越えるあたりから K_{ID} は増加に向かう。それまでは K_{IC} (静的な平面ひずみ破壊じん性) よりやや低い値をもつ。その理由は明らかではないが100 m/sのあたりで K_{ID} が最小値をとるように

図4 高強度鋼の K_{Ia} - a の関係 図5 4340 鋼の K_{Ia} - a の関係

見える。

図6は高強度鋼についてやはり間接法によって測定された例である。ここでは加速域と減速域でのデータが区別されて示されているが有意な違いは認められない。 a が大きくなるとデータのばらつきが大きくなるが第一近似的には K_{Ia} は a に一意に対応するように見える。

一方図7は直接法(この場合は反射コースティック法)による HFX760 鋼の測定例¹⁶⁾と FEM シミュレーションによる結果¹⁷⁾を示している。この結果によると $a > 200$ mm では K_{Ia} の計算および測定結果と a の変化は3者共合っているが、 $a < 200$ mm では a が一定であるにもかかわらず K_{Ia} の測定値は大きなばらつきの中で減少傾向を示し、また FEM の計算値とも合わない。この原因として、き裂の伝ばに伴って発生する波やその波の試験片の縁からの反射波が式(4)の D や a

図6 高強度鋼の K_{Ia} - a の関係 図7 HFX760 鋼の K_{Ia} - a - a の関係

の計測の誤差要因となったことが理由の一つとして考えられる。

3・3 高分子材料における K_{Ia} の a 依存性

この問題はモデル材料としてホマライト 100 を用いた光弾性法で、またアラルダイト B その他のぜい性高分子を用いたコースティック法でそれぞれ研究されている。ポリエステル樹脂の一種であるホマライト 100 (商品名) が光弾性法で多用されてきた理由はこのモデル材料の f_a (式(3)) の値がひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ にはほとんど依存しないことによる。またエポキシ樹脂の一種であるアラルダイト B (商品名) も光学定数 c (式(4)) の値が $\dot{\epsilon}$ に対してほぼ一定である性質が利用

図8 ホマライト 100 の $\dot{a}$ - K_{Id} の関係
(光弾性法およびコースティック法)

され、コースティック法のモデル材料となっている。

図8に光弾性法およびコースティック法(Ravi-Chandarらのデータ¹⁸⁾)で得られた K_{Id} - $\dot{a}$ の関係を示す。ここには4つの研究の結果がまとめられているが、次のようなことがいえよう。(i)研究者間(負荷のかけ方、試験片形状が異なる)のデータが大きくばらついている。(ii)同一研究者のデータでも $\dot{a}$ が大きくなると大きくばらつく。(iii) $\dot{a}$ の小さいところでは K_{Id} は $\dot{a}$ に依存せずほぼ一定である。一方、KobayashiのインパクトおよびSENの曲線では $\dot{a}$ が一定にもかかわらず K_{Id} のみが増加する“プラトー”が現れる。(iv)しかしDallyの曲線はこの範囲の $\dot{a}$ の増加に対して K_{Id} は増加傾向を示している。これらの結果からは K_{Id} - $\dot{a}$ の関係について一意に決まっているとする主張も、また、一意には決まらないとする主張も可能である。

一方、図9はアルダイトBについてコースティック法によって得られた結果である。これは、同一の $\dot{a}$ に対して試験片の形状が異なると K_{Id} の値も変わり、それぞれが別の K_{Id} - $\dot{a}$ 曲線上に乗ることを示している。両方の形状をミックスしたような試験片(RDCB・SEN)を用いると、一方(RDCB)の形状の試験片内にき裂があるときにはそれに固有の曲線上に K_{Id} はあり、他の形状(SEN)の試験片中にき裂が進むとその曲線上に乗り移る、という結果を与えている。現象的に“形状効果”としてこの結果を言い表すことができるが、その物理的意味づけは明確ではない。考えられることは(i)コースティック法そのものの性質による、(ii) $\dot{a}$ その他のパラメータが試験片の形状により変化しているのでその影響を反映している、

図9 異なった形状のアルダイトB
試験片の K_{Id} - $\dot{a}$ の関係

などであろう。 K_{Id} の値の違いは同一の $\dot{a}$ に対して約2割程度であるので、他の多くの実験例ではばらつきの中にかくれてしまう程度の量である。しかしコースティック法を用いるときには留意するべきことの一つであろう。

以上のいくつかの研究例は K_{Id} - $\dot{a}$ の関係についてより深く知るためには(i) $\dot{a}$ および K_{Id} の測定の実誤差をでき得る限り小さくする必要がある。(ii) $\dot{a}$ 以外のパラメータ例えば $\ddot{a}$ (加速と減速域)にも考慮をはらう必要がある、(iii)測定される K_{Id} 、 $\dot{a}$ 以外に、材料の破壊の“激しさ”ないし“抵抗の大きさ”を直接表すような絶対的な量(例えばピットマークやパラボラマークなどの二次元的破壊源の出現密度や粗さなど)を a や $\dot{a}$ の関数として同時にとらえておく必要があること、などを示唆している。筆者らのこれまでの研究では $\dot{a}$ のばらつきを避けるためにデータの数²⁰⁾は30(30駒のクランツ・シャルディンカメラを使用)とし、その処理法に2章で述べたような多項式近似法を用いている。そのようにして得られた結果の一例をホマライトの場合につき図10に示す。ここでは $\dot{a}$ の効果を知るために試験片の形状に工夫をこらし、き裂伝ばの前半では加速域が、後半では減速域が存在するようにした。図10からわかるようにこのような試験片を用いると K_{Id} - $\dot{a}$ の関係は一意ではなく、 K_{Id} - $\dot{a}$ の曲線に“ヒステリシス”が存在する。減速域での K_{Id} は常に加速域のものより大きな値をもつ。図10を図8と比較すると興味深い。図8で $\dot{a}$ の大きなところで K_{Id} が測定者間、測定者内で大きくばらついているのは図10のヒステリシスの存在が少なくともその理由の一部になっているのではないかと考えられる。

図10のようなヒステリシスは他の材料すなわちポ

図10 ホマライト100の K_{I0} - $\dot{a}$ の関係
(コースティック法)

リメチルメタクリレートやエポキシ（アラルダイト¹⁾D）など実験された全試験片と同様にみられた。その物理的意味が当然問題となる。上に述べた考え方にに基づき破面上の粗さを正確に定量化し、それと $\dot{a}$ や K_{I0} との関係を調べたが予想に反してやはり加速域と減速域とで一意の関係は存在しないことがわかった。一方、 $R^* \cdot \dot{a}$ という量（ここで R^* は K_{I0}^2/E の動的な成分を意味する）を用いた場合にはヒステリシスなしに粗さの形成や分岐の発現をよく説明できることがわかって^{21), 22)}いる。ちなみにこのパラメータ $R^* \cdot \dot{a}$ の次元は「単位時間当たり、単位幅のき裂が解放するエネルギー」にあたり、これがその物理的意味を表す。「単位時間当たり」の概念が入っていることは動的効果を説明するうえで重要であろう。

4 お わ り に

高速き裂について $\dot{a}$ および K_{I0} の評価の方法と両者の関係に話題をしばって述べてきたが他にも重要なことがいろいろとある。すなわち、応力波の影響、分岐、曲り（カービング）、停止、スティックスリップ的挙動、不安定な振動現象、モードI以外での高速破壊挙動、新しい評価手法などである。しかし K_{I0} の問題一つをとってみても、未知の部分が非常に多いことがこの小講からわかっていただけるであろう。問題はいろいろなことに関係している。測定においては $\dot{a}$ の精度を高めることが常に望まれるが、光弾性法やコースティック法など K_{I0} の評価法そのものについても吟味が必要であろう。また、より本質的な問題として、高速き裂のクライテリアとして式(2)が妥当か否かについて明解な解答が今存在していないことが指摘できよう。

参 考 文 献

- 1) K. Takahashi and K. Arakawa, Exp. Mech., **27**, 195 (1987).
- 2) A. J. Carlsson, Trans. Roy. Inst. Tech., Stockholm, p. 189 (1962).
- 3) Stalder, Ph. Beguelin, A. C. Roulin-Moloney and H. H. Kausch, J. Mater. Sci., **24**, 2264 (1989).
- 4) F. Kerkhof, Naturwiss., **40**, 478 (1953).
- 5) 高橋 清, 材料科学, **18**, 29 (1982).
- 6) T. Kanazawa, S. Machida, T. Teramoto and H. Yoshinari, Proc. 4th Int. Cong. Exp. Mech., SESA, p. 138 (1981).
- 7) B. Brickstad, Int. J. Fracture, **21**, 177 (1983).
- 8) Z. Bilek, in Crack Arrest Methodology and Applications, ASTM-STP 711, 240 (1980).
- 9) L. Dahlberg, F. Nilsson and B. Brickstad, Crack Arrest Methodology and Applications, ASTM-STP 711, 89 (1980).
- 10) 楊 槐堂, 桜田泰弘, 馬田俊雄, 高橋 清, 九州大学応用力学研究所所報, 第68号, 543 (1989).
- 11) G. R. Irwin, Proc. SESA, **16**, 93 (1958).
- 12) J. S. Dally, Exp. Mech., **19**, 349 (1979).
- 13) T. Kobayashi and J. W. Dally, Crack Arrest Methodology and Applications, ASTM-STP 711, 189 (1980).
- 14) J. Beinert and J. F. Kalthoff, Mechanics of Fracture, **7**, ed. by G. C. Sih, p. 281 (1981).
- 15) A. J. Rosakis, J. Duffy and L. B. Freund, J. Mech. and Phys. of Solids, **32**, 443 (1984).
- 16) J. F. Kalthoff, J. Beinert and S. Winkler, in Fast Fracture and Crack Arrest, ASTM-STP 627, 161 (1977).
- 17) T. Nishioka and S. N. Atluri, Eng. Frac. Mech., **16**, 157 (1982).
- 18) M. Ramulu and A. S. Kobayashi, Int. J. Fracture, **27**, 187 (1985).
- 19) J. F. Kalthoff, Proceedings of Workshop on Dynamic Fracture (California Institute of Technology, p. 11 (1983).
- 20) 新川和夫, 高橋 清, 日本機械学会論文集, A-53, 128 (1987).
- 21) 新川和夫, 高橋 清, 日本機械学会論文集, A-53, 1324 (1987).
- 22) K. Takahashi and K. Arakawa, "in Dynamic Fracture", p. 8, ed. by Homma and Y. Kanto (Proc. Oji Int. Sem. on Dynamic Fracture) (1989).