ぜい性プラスチック破面模様の二次元定量式の検討*

瀧 本 昭 夫**, 吉 村 裕 二***

Discussion of the Two Dimensional Equation
of Surface Markings in Brittle Plastic Plates

by Akio TAKIMOTO and Yuji YOSHIMURA

The equation of surface markings approximated in two dimensions in the previous report is discussed on its variation of the ratio of the limiting velocity of a secondary crack to the velocity of a primary crack, β' , to extend the applicability of the equation over the general cases. The β' value is assumed to change along with the primary crack propagation as well as in a small interference distance of a marking. The latter is the special case for producing the abnormal fracture surface markings having their especially larger or smaller cusps. We have obtained the variations of the dynamic stress-intensity factor and the dynamic strain-energy release rate with respect to the primary crack propagation distance. These variations most likely control the e/C_{02} and d/C_{02} values and their fluctuations of the observed surface markings.

Key Words: Plastics, Fracture Surface, Surface Markings, Variation of Surface Markings, Dynamic Stress-Intensity Factor, Dynamic Strain-Energy Release Rate

1. 緒 言

前報⁽¹⁾では加速度モデルによる破面模様の二次元定量式を提唱し、不飽和ポリエステル樹脂の短い中央き裂付引張試片の破面上に現れる点(小円), だ円, WST だ円および放物線などの破面模様やそれらの定量関係をよく表現し得ることを報告した。また破面模様を支配している主たる量 e/C_{02} (干涉開始距離/二次き裂核の大きさ) 値は一次き裂伝ば距離とともに増加する傾向を示し、一次き裂が二次き裂を活性化しはじめる距離(臨界距離)と二次き裂核の大きさの比, d/C_{02} 値も一次き裂伝ば距離とともに増加する傾向も示した。

この報告ではまず加速度モデルにおいて、一次き裂速度が一破面模様長さ(すなわち干涉距離)内で定速度であり得ると仮定したことを検討し、次に二次元定量式中の二次き裂最大(限界)速度と一次き裂速度比, すなわち $\beta' = V_{2\max}/V_1$ の変動による破面模様変化を検討した。小円, だ円など両端閉そく模様の長さおよ

び幅の定量関係 a/C_{02} , b/C_{02} は当然 β' 値により変化し、その少しの変動幅を考えることによりほとんどの実験データを表現し得ることを示した。また変形だ円, だ円などの両端閉そく模様および放物線や双曲線などの一端開放模様の最小弦長と干涉開始距離の比, l/e 値と e/C_{02} 値の定量関係も β' 値の変動幅を考慮することにより前者の変動範囲をよく表し得る。これら破面模様の定量関係に及ぼす β' 値の影響は、主として β' 値の一次き裂伝ば距離による変動を考え検討した。次に一破面模様を描く干涉距離内でも β' 値の変化を考える必要のある模様, すなわち l/e 値の特に大きいあるいは小さい値をもつ模様も、相対的にはむしろ少数ではあるが、現れている。これらは干涉距離内で β' 値の減少あるいは増加を伴うもの、すなわち β' 値破面模様内変化の場合として同じ破面模様の定量式を用い表現できることを示した。なおこの論文では放物線模様と呼ばずに一端開放模様としたのは、一見放物線に見えるものでも、だ円模様の前半よりなるもの、放物線模様および双曲線模様の3種類が含まれているためである。同様に変形だ円やだ円模様なども両端閉そく模様とした。

一次き裂伝ば速度とその先端部の動的ひずみエネルギー解放率 $\mathcal{D}_D$, や動的応力拡大係数 K_D , の計算解は

* 昭和58年11月7日 中国四国支部・九州支部合同山口地方講演会において講演, 原稿受付 昭和59年12月24日。

** 正員, 山口大学工学部 (〒755 宇部市常盤台 2557)。

*** 准員, 新日本製鉄(株)光製鉄所 (〒743 光市島田 3434)。

Sh⁽²⁾や, Freund⁽³⁾などにより与えられており, $\mathcal{D}_D/\mathcal{D}$ 値や K_D/K 値 ($\mathcal{D}, K$ は各静的な値) はき裂伝ば速度の増加とともに減少する。また Homalite-100 などを用いた実測値でも K_D/K_c 値 (K_c : 静的破壊じん性値) や $\mathcal{D}_D/\mathcal{D}_c$ 値 ($\mathcal{D}_c$: 臨界ひずみエネルギー解放率) は一次き裂伝ば速度の増加とともにガンマ字形 (Γ) 曲線を描いて増加することが報告されている^{(4)~(7)}。これら計算解および実験解はいずれも試片形状および負荷様式によつては一次き裂伝ば距離の増加によりき裂速度の増加とともに, K_D および $\mathcal{D}_D$ 値が増加することを示している。ここでは材料定数など類似の不飽和ポリエステル樹脂の破面模様であることと試片寸法も後者^{(4)~(7)}の例のごとく有限であることより, 上述の Γ 関係を用いて一次き裂伝ば速度とともに増加する K_D および $\mathcal{D}_D$ の値を求め, e/C_{02} および d/C_{02} 値の相対一次き裂伝ば距離, C_1/C_{01} 値, による変化を検討した。ここで一次き裂限界速度, $V_{1\max}$ 値, に E および ρ 値より算出した範囲内の変動幅を考えると, き裂伝ば初期から破断に至るまでの e/C_{02} および d/C_{02} 値変化を適切に説明できる。これらの値は K_D や $\mathcal{D}_D$ 値の C_1/C_{01} 値による増加および変動傾向と類似のものを示し, 後者の大きさが前者の変化および変動に関与していることが明らかとなった。

記 号

- a, b : 両端閉そく模様の長, 短軸長さ
- C_{01}, C_1 : 一次き裂半長および伝ば距離
- C_{02}, C_2 : 二次き裂半長および伝ば距離
- d : 臨界距離
- e : 干渉開始距離
- $\mathcal{D}, \mathcal{D}_D$: 静的および動的ひずみエネルギー解放率
- $\mathcal{D}_c$: 臨界ひずみエネルギー解放率
- K, K_D : 静的および動的応力拡大係数
- K_c : 静的破壊じん性値
- l : 干渉模様の二次き裂核上最小弦長
- n_1, n_2 : 一次および二次き裂伝ばの材料定数
- $V_1, V_{1\max}$: 一次き裂伝ば速度および限界速度
- $V_{2\max}$: 二次き裂限界速度
- V_c : き裂伝ば速度
- V_l : 縦波の速度
- x : 干渉模様の x 軸方向距離
- α_2 : C_2/C_{02}
- β' : $V_{2\max}/V_1$

2. 解 析 結 果

2.1 β' 値の検討 両端閉そく模様および一端開

放模様を二次元的に近似定量し得る破面模様の式

$$\begin{aligned}
 & \sqrt{\alpha_2 - 1} \sqrt{\alpha_2 - (n_2 - 1)} + n_2 \ln [\sqrt{\alpha_2 - 1} \\
 & + \sqrt{\alpha_2 - (n_2 - 1)}] - \frac{n_2}{2} \ln(2 - n_2) = \beta' \left(\frac{d+x}{C_{02}} \right) \\
 & \dots\dots\dots (1)
 \end{aligned}$$

は先に報告⁽¹⁾した。なお前報⁽¹⁾ではき裂伝ばの定数, n , を用いたが, ここではこの値を明確にするため二次き裂伝ばの定数, n_2 , とした。この式で一次き裂が定速度で伝ばすると仮定している距離は, 一破面模様を描く微小距離 (以後, 干渉距離と呼ぶ) 内のことであり, 破断に至るまでの大きな伝ば距離では当然加速度を伴って, $V_1 = V_{1\max} \cdot f(C_1/C_{01})$ で増加することは前報にも述べた。ここでは試片半幅 ($W = 120$ mm) に対して短く鋭い中央き裂 ($C_{01} = 4.88$ mm) を考えているので, 一次き裂伝ば速度には Berry⁽⁸⁾の定応力条件の解

$$\begin{aligned}
 f\left(\frac{C_1}{C_{01}}\right) &= \frac{V_1}{V_{1\max}} \\
 &= \sqrt{\left(1 - \frac{C_{01}}{C_1}\right) \left[1 - (n_1 - 1) \frac{C_{01}}{C_1}\right]} \dots\dots\dots (2)
 \end{aligned}$$

を考え, 一次き裂伝ばの定数, n_1 は Chubb⁽⁹⁾ の実験報告も参考にして, $1.85 \leq n_1 \leq 2.0$ を仮定していることも前報⁽¹⁾に報告した。したがって V_1 値の C_1/C_{01} 値による変化率は, 式(2)を微分して,

$$\begin{aligned}
 f'\left(\frac{C_1}{C_{01}}\right) &= \frac{d(V_1/V_{1\max})}{d(C_1/C_{01})} = \frac{1}{2\left(\frac{C_1}{C_{01}}\right)^2} \\
 &\times \left\{ \frac{n_1 + 2\left(\frac{C_{01}}{C_1}\right)(1 - n_1)}{\left[1 - \frac{C_{01}}{C_1}\right]^{1/2} \left[1 - (n_1 - 1) \frac{C_{01}}{C_1}\right]^{1/2}} \right\} \\
 &\dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

となり, $n_1 = 1.99$ を仮定した各 C_1/C_{01} 値における $f'(C_1/C_{01})$ 値は, 各々 $C_1/C_{01} = 2.0$ で 2.49×10^{-1} , 5.0 で 3.98×10^{-2} , および 20.0 で 2.49×10^{-3} のごとく C_1/C_{01} 値とともに急激に減少する。一方 C_1/C_{01} 値の小さい域で現れる一破面模様の干渉距離は, 一般に C_1/C_{01} 値が小さいほど小さくなる。例えば両端閉そく模様のそれらの値は後述の図5に示すように $C_1/C_{01} = 2.0$ 近傍ではせいぜい $20 \mu\text{m}$, 5.0 では $100 \mu\text{m}$, 20.0 では $200 \mu\text{m}$ となり, 干渉距離内での一次き裂の速度変化は各々, $1 \times 10^{-3} \cdot V_{1\max}$, $8 \times 10^{-4} \cdot V_{1\max}$ および $1 \times 10^{-4} \cdot V_{1\max}$ となりほとんど無視し得る程度となる。したがって上述の一次き裂伝ば速度がほとんど定速という仮定が可能となる。今一破面模様を描く干渉距離内で一次き裂が定速で伝ばすると式(1)の速度比 $\beta' = V_{2\max}/V_1$ ($V_{2\max}$ も同距離内で定数とすると) も定数となる。しかし一次き裂の伝ばとともに $V_1 =$

$V_{1\max} \cdot f(C_1/C_{01})$ で加速度を伴って変化するため

$$\beta' = \frac{V_{2\max}}{V_{1\max} \cdot f(C_1/C_{01})} \dots \dots \dots (4)$$

となり、 $V_{1\max}$ に特定の定数値を設定すると β' 値は $f(C_1/C_{01})$ の逆数に比例して減少し、 $V_{2\max}$ (定数値) の大きさにより種々変動し得る。なおここでは $V_{2\max} \leq V_{1\max}$ としている。この考えによれば $\beta' \approx 1$ および $\beta' < 1$ 域の両端閉そく模様および一端開放模様の多くは一次き裂を定速とした式(1)で表現し得る。しかしこれらの域の一端開放模様のうち頭部の開き(すなわち l/e 値)の比較的小さいものはすべて両端閉そく模様の前半で表現できるとは限らず、なかには干涉距離内で $[V_{2\max}$ 値の増加または V_1 値の振動(急激な減少)による] 初期 β' 値が干涉の進行とともに漸次増加することにより生じる模様も含まれていると考えられる。事実この仮定により l/e 値の小さい一端開放模様[図8(b), 後述]も式(1)で表現し得ることを確かめている。また、一次き裂伝ば初期は $f(C_1/C_{01})$ 値が大きいので短い干涉距離内で一次き裂が定速で伝ばし難く、むしろ V_1 値が増加することも考えられる。この場合は一破面模様を描く間に(主として V_1 値の増加による) β' 値の減少を招くことになる。式(1)で β' 値の連続的な減少を仮定して描いた両端閉そく模様[図8(a)の例, 後述] および一端開放模様は頭部の開きの大きい(すなわち l/e 値が $\beta' \approx 1$ の場合より大きい)ものを示すことも確認している。以上のごとく、 β' 値が一次き裂伝ば距離(すなわち C_1/C_{01} 値)により変化し得るとともに変動し得る(以後 β' 値一次き裂伝ば距離変動と呼ぶ)し、一破面模様の干涉距離内でも変化(以後 β' 値破面模様内変化と呼ぶ)し得る。

2.2 β' 値変化と破面模様定量関係 図1は干涉距離内を一次き裂が定速で伝ばする場合の両端閉そく模様の相対長・短軸長さ、 $a/C_{02} \cdot b/C_{02}$ 値の β' 値一次き裂伝ば距離変動による解析解を $n_2 = 1.99$ について

図1 干涉模様の相対長・短軸長さに及ぼす β' 値 (β' 値一次き裂伝ば距離変動) の影響

示している。同じ b/C_{02} 値でも β' 値が1.0より大きくなるとともに大きな a/C_{02} 値、すなわち長い両端閉そく模様を示しており、 $\beta' = V_{2\max}/V_1$ の関係で V_1 を定速とすると、 $V_{2\max}$ 値が大きくなり二次き裂速度が速い時の破面模様に相当する。逆に β' 値が1.0より小さい場合は同じ b/C_{02} 値で a/C_{02} が小さくなり、二次き裂速度の遅い時の破面模様を示している。なお図中に記入していないが V_1 値が定速でも β' 値を1.6近傍まで変化させて模様を描くことができ、この場合 $a/C_{02} \cdot b/C_{02}$ 値ともにさらに小さな域に限られることになる。次に同様、 β' 値一次き裂伝ば距離変動の場合について、両模様の l/e 値と e/C_{02} 値の関係を β' 値をパラメータとして図2に示した。上図で述べたとおり両端閉そく模様の β' 値一次き裂伝ば距離変動の解として、 $\beta' \approx 1.6$ 近傍の値まで求めているが、それらは図2では (β' 値の増加とともに e/C_{02} 値および l/e 値が非常に小さくなるため) $\beta' = 1.0$ 線上より少々上の値までを表現するにすぎない。これらのほかに β' 値一次き裂伝ば距離変動の解で一模様を完全に表現し得るものは、 $\beta' \approx 1.0$ 線近傍以下の両模様の多く、 $\beta' \approx 1.2$ 線近傍以下の多数の一端開放模様(すなわち両端閉そく模様の前半としておよび双曲線模様等)を含んでいる。次に β' 値破面模様内変化による場合は β' 値を定数値として定量表現することはできず、便宜上図2の特定 e/C_{02} 値上での β' 値に基準をおいてのみ検討することができる。この変化を考える必要のあるむしろ特殊な場合は、主として V_1 値の増加による β' 値減少模様(例えば $\beta' = 2.5 \sim 1.0$ まで減少)、すなわち上述の β' 線以上の両模様(相対的に少数ではあるが)、がまず考えられ、いずれも頭部の開きの大きいもの(例えば $e/C_{02} \approx 4$ で $l/e \approx 6.5$ 位のものまで)であり、ほかに $V_{2\max}$ 値の漸次増加または V_1 値の振動(急激な減少)による β' 値増加現象(例えば $\beta' = 0.7 \sim 1.0$ ま

図2 干涉模様の相対弦長と相対干涉開始距離に及ぼす β' 値 (β' 値一次き裂伝ば距離変動) の影響

で増加) による一端開放模様などが考えられ、いずれもこの図で検討するのが適切である。したがって図2は β' 値一次き裂伝ば距離変動による定量関係を示し、 $\beta'=1.0$ を基本とし、 $\beta'=2.5\sim0.05$ まで変動する種々の場合を含めた干涉模様頭部の l/e 値と e/C_{02} 値の関係を表現している。図の β' 値一定の曲線では e/C_{02} 値の増加とともに l/e 値は増加し、その漸近値は β' 値に依存している。また β' 値が大から小になるに従って l/e 値は小さくなる。一方、一次き裂伝ばとともに e/C_{02} 値が単調に増加し β' 値も式(4)のごとく同様に減少すると仮定すれば、 l/e 値は漸次小さくなることをも示している。

2.3 一次き裂伝ばによる動的応力場の変化 一次き裂速度が式(2)の関係で加速を伴って伝ばするとしても、実際の現象は数式で与えられるような滑らかな1本の曲線を描いて変化することは考え難く、平均的な値は式(2)に近いものを示すとも、当然その速度は階段状あるいは振動を伴いながら伝ばすることが知られている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。事実、一次き裂の伝ばとともに多数の二次き裂核を発生し、干涉しあいながら伝ばすることを考えても、また一次き裂線上で生成する破面模様の多少によっても一次き裂先端の局部的速度あるいは平均伝ば速度(試片厚さ方向に均一として)に変動のあることが予測される。この V_1 値の変動幅の大きさを C_1/C_{01} 値とともに表現することは困難であるが、 $V_{1\max}$ 値に変動幅をもたせた $V_1\cdot(C_1/C_{01})$ 関係を考え、ここではその上・下限値の間で V_1 値が変動すると仮定した。Homalite-100 などにおけるき裂伝ば速度と動的応力拡大係数の測定結果は先述のとおり種々報告されており、これらの Γ 字形の関係は各実験条件の違いにもかかわらず、両者の変化傾向を適切に表現していると考えられるので、それらより K_D 値と V_1 値(すなわちこの論文の V_1 値)の関係式を求め、上述

の $V_1\cdot(C_1/C_{01})$ 値の変動関係と組合せて一次き裂伝ば距離によるき裂先端の動的応力拡大係数、 K_D の大きさを求め、 V_1 値の変動すなわち $V_{1\max}$ 値をパラメータとして図3に示した。ここでは参考にした論文⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾の材料定数は類似しているとして求めているが、この図は当然加速度を伴って伝ばする一次き裂とともに K_D 値はどのように変化するかを示すものであり、縦軸の絶対的な大きさを問うものではない。 K_D 値は C_1/C_{01} 値の増加に伴って増加するとともに変動域も大きくなる。またそれらの大きさは $V_{1\max}$ 値に依存している。なおここでは $V_{1\max}$ 値を400 m/s前後から $\pm 25\%$ すなわち ± 100 m/sの変動幅を仮定して図示した。次に K_D 値より動的ひずみエネルギー解放率、 $\mathcal{D}_D$ を算出⁽³⁾し、 $\mathcal{D}_D$ 値と V_1 値の関係式を求め、 $\mathcal{D}_D$ 値の C_1/C_{01} 値による変化および変動の様子を求めた。図4はその結果であり、 K_D 値と同様な変化および変動をすることがわかる。

3. 実験結果および検討

3.1 破面模様測定値と β' 値 前報⁽¹⁾では $C_{01}=4.35$ mmの結果の一部を報告し、破面模様を定量し得ることを示したので、ここでも同一試片で全破面にわたっての測定を試みたが空気中の塵などにより破面が汚染され測定し難かった。したがって同様な試片($C_{01}=4.88$ mm)を準備し、この試片の全破面にわたる破面模様変化を測定した。なお実験方法はSEMによる破面観察を加えた外はすべて前報と同じである。この試料は一次き裂半長、 $C_{01}=4.88$ mm、試片の半幅、 $W=120$ mmなので $C_1/C_{01}\approx 24.6$ で破断する。この試片の全測定破面模様(3715個)のうち約24.6%は両端閉そく模様、75.4%は一端開放模様であり、 C_1/C_{01} 値による模様数のヒストグラムを描けば前者

図3 動的応力拡大係数の相対一次き裂伝ば距離による増加および変動域と一次き裂限界速度変動幅の関係

図4 動的ひずみエネルギー解放率の相対一次き裂伝ば距離による増加および変動域と一次き裂限界速度変動幅の関係

は $C_1/C_{01} \approx 12$ に最大数を示し、後者は $C_1/C_{01} \approx 18$ に最大数を示す模様分布をしている。もっとも $C_1/C_{01} \approx 18$ 近傍以後からは一端開放模様の核が不明確なものが多く、それらは測定模様数に含めていない。なお種々の一次き裂長さの試片で破断に至るまでの全破面模様測定を行い、一次き裂長さが短くなるほど両端閉そく模様と一端開放模様の比が小さくなることも明らかとなった。2・1 節で述べたように一破面模様の干涉距離が C_1/C_{01} 値の増加とともに変化する様子を知るため、両端閉そく模様の長軸長さ、すなわち a 値の C_1/C_{01} 値による変化を図 5 に示した。干涉距離は C_1/C_{01} 値に伴って増加するとともに変動幅も大きくなり、その上限値は約 $200 \mu\text{m}$ を少々超えているが、多くの模様はむしろ $30 \mu\text{m}$ 前後までに集中している。したがって多くの破面模様、特に C_1/C_{01} 値がある程度大きいところでの破面模様では、干涉距離内の一次き裂速度変化も小さく、ほとんど定速として破面模様を定量し得ることがわかる。

図 6 は両端閉そく模様の b/C_{02} 値に対する a/C_{02} 値の変化と変動幅を示している。図中には $\beta' = 1.0$ および 1.0 ± 0.1 までの β' 値一次き裂伝ば距離変動の解析解を参考までに示した。いずれも b/C_{02} 値の増加と

もに a/C_{02} 値が増加し、その変動幅も大きくなっていく。図 1 で検討したように、同じ b/C_{02} 値では β' 値が大きいほど a/C_{02} 値も大きくなっている。ここでは $\beta' = 1.01$ 以上の解を図示していないが、前述のとおり V_1 値定速の解では β' 値が大きくなるほど、 b/C_{02} 、 a/C_{02} 値ともさらに小域に限られてくる傾向が実験的にもよく現れている。なお両端閉そく模様の多くのデータは、この図のように $a/C_{02} \cdot b/C_{02}$ 値がわりあい小域に集中しているのもその部分のデータだけを示し検討したが、それら全域のデータを示せば縦・横軸ともさらに大きくなる。

次に $l/e \cdot e/C_{02}$ 値の関係を両端閉そく模様の頭部については図 7 (a) に、一端開放模様の頭部については図 7 (b) に示した。なお図 7 (b) には実際、約 2800 個のデータを描くことになるがその多くは $l/e \approx 4$ 近傍に集中しているため、この図はその概略の分散を示していることになる。いずれも e/C_{02} 値の増加とともに $l/e \approx 4$ 近傍を上・下に振動しながら、その上限値とともに振動幅も減少している。なおこれら図中には β' 値一次き裂伝ば距離変動の解を $\beta' = 2.5 \sim 0.05$ まで変

図 5 一破面模様干涉距離の相対一次き裂伝ば距離による増加と変動域

図 6 両端閉そく模様の相対長・短軸長さとの解析曲線

(a) 両端閉そく模様の相対弦長と相対干涉開始距離および解析曲線

(b) 一端開放模様の相対弦長と相対干涉開始距離および解析曲線

図 7

化させて参考までに記入してみた。両端閉そく模様(測定数 913 個, 内有核個数 143 個)の二次き裂核, C_{02} , の平均値は $0.27 \mu\text{m}$ であるので $e/C_{02}=20$, すなわち平均的には干渉開始距離 $e \approx 5.4 \mu\text{m}$ の模様頭部長さまでの検討を図 7 (a) に, また一端開放模様(測定数 2802 個)の C_{02} の平均値は $0.34 \mu\text{m}$ であるので $e/C_{02}=20$, すなわち $e \approx 6.8 \mu\text{m}$ の模様頭部長さまでのそれを図 7 (b) に示していることになる。したがって前記定量式で $\beta' \approx 2.5$ を上限とし, それ以下の変動を考えれば両破面模様の頭部の定量表現は可能となる。これらデータは図 2 の $l/e \cdot e/C_{02}$ 値関係の β' 値一次き裂伝ば距離変動による解析解に示したように β' 値の増加とともに同一 e/C_{02} 値では l/e 値が大きくなり, $V_{2\text{max}}/V_1$ の比, すなわち V_1 値に比べて $V_{2\text{max}}$ 値が大きいほど模様の二次き裂核上の開きが大きくなることを示している。しかし実際には β' 値一次き裂伝ば距離変動によるものだけでなく, $l/e \approx 4$ 近傍以外の模様には β' 値破面模様内変化によるものも含まれていると考えられる。

3.2 模様形状定量と β' 値 次にこれら β' 値破面模様内変化による破面模様形状の定量例を紹介する。 β' 値は, $V_{2\text{max}}/V_1 = V_{2\text{max}}/[V_{1\text{max}} \cdot f(C_1/C_{01})]$ で与えられ, もし一破面模様を描く短い干渉距離内で C_1/C_{01} 値とともに V_1 値が増加または変動すれば, β' 値は減少または変動し得ることや, $V_{2\text{max}} \leq V_{1\text{max}}$ の仮定は先に述べた。今, $C_1/C_{01}=1.50$, $n_1=1.99$ とす

ると式 (2) より $f(C_1/C_{01}) \approx 0.3367$ となり $\beta' = V_{2\text{max}}/(0.3367 \cdot V_{1\text{max}})$ で $\beta' \leq 2.97$ ($V_{2\text{max}} \approx V_{1\text{max}}$), すなわち β' 値は上限値 2.97 以下の値をとり得る。また二次き裂の速度は当然, 零から限界速度 $V_{2\text{max}}$ 値まで種々の値をとり得る。なぜなら一次き裂が $V_{1\text{max}} \cdot f(C_1/C_{01})$ なる速度で伝ばしてきても必ずしも二次き裂核になり得るすべてが二次き裂として伝ばしはじめ $V_{2\text{max}}$ 値に至るとは限らず, そうでないものも当然あり得る。したがって下限値は $V_{2\text{max}}=0$ となり, その β' 値は零となり得る。このように β' 値は変動し得ることになる。そこで基本的に $\beta' > 1$ なる場合の l/e 値をもつ模様には干渉距離の増加とともに β' 値が初期の値から減少して 1.0 (またはそれに近い値) に近づこうとする模様, また $\beta' < 1$ なる場合の l/e 値をもつ模様には β' 値が初期の値から増加して 1.0 (またはそれに近い値) に近づこうとする模様が考えられる。これらのうち前者の条件で模様頭部を表現できるものには, C_1/C_{01} 値の小さな域の e/C_{02} 値の小さなもので, V_1 値の変化がわりあい大きいために生じるものと, e/C_{02} 値の大きい場合は V_1 値の振動(増加)によるものがあり, それらの実験的傾向は図 7 (b) にも現れている。したがってこの域の模様は式 (1) で β' 値の減少を仮定して定量すれば比較的よく表現し得ることになる。今図 8 (a) にそのような両端閉そく模様の破面模様観察例と, 式 (1) により β' 値減少を仮定して求め

A Both End Closed Marking (dimensions in μm)

(A) An Observed Fracture Surface Marking

$C_1/C_{01} = 3.32$ $a = 17.6$
 $e = 0.48$ $b = 3.85$
 $C_{02} = 0.28$ $e/C_{02} = 1.73$
 $l = 2.25$ $l/e = 4.74$

(B) The Predicted Interference Marking by Eq.(1)

(a) 両端閉そく模様頭部の特に大きい実例と β' 値破面模様内変化による干渉模様

An One End Opened Marking (dimensions in μm)

(A) An Observed Fracture Surface Marking

$C_1/C_{01} = 4.86$
 $e = 0.70$
 $C_{02} = 0.25$
 $l = 1.95$
 $l/e = 2.79$

(B) The Predicted Interference Marking by Eq.(1)

(b) 一端開放模様頭部の特に小さい実例と β' 値破面模様内変化による干渉模様

た干渉模様を比較した。図中(A)は $C_1/C_{01} \approx 3.3$ で観察されたもので、 $e/C_{02} = 1.73$ における $l/e = 4.74$ の両端閉そく模様である。図2やこれまでの検討からわかるとおり V_1 値が定速の解、すなわち β' 値を定数としては、式(1)によりこの模様を表現することは困難である。しかしこの模様の干渉距離 $17.6 \mu\text{m}$ 内で、 β' 値の減少(この場合 $2.5 \sim 1.0$ 、この大きさは測定し得る性質のものではない)を仮定すれば、測定値、 e 、 C_{02} 、を用いて式(1)によりほとんど同じ形状の干渉模様〔図中(B)〕を表現することができる。なお(A)、(B)両図の形状の違いは a 値で 0.4% 、 b 値で 3.1% の誤差で表現されている。一端開放模様でも l/e 値の大なるもの、すなわち $\beta' > 1$ の頭部をもつものも同様に定量できる。したがって $\beta' > 1$ でその頭部を近似表現できる模様は、干渉距離内において主として V_1 値が増加することによる β' 値の減少を伴っているものと考えられる。次に $\beta' < 1$ なる範囲での短い両端閉そく模様は、 V_1 値定速解で容易に表現できる。しかしこの域の一端開放模様の l/e 値は標準の放物線模様の値 ($l/e = 4$) より小さいため、これらのうち両端閉そく模様の前半よりなるもの以外はやはり β' 値の破面模様内変化(この場合は増加)を考える必要がある。一次き裂の近接により活性化された核が二次き裂として伝ばし、両者の干渉により l/e 値の小さい一端開放模様の頭部を形成した後、その小さな β' 値のまま模様生成を続けることなく、 C_2/C_{02} 値がある程度増加しはじめると、小さな初期 β' 値が V_1 値の大きさに影響されて〔 $V_{2\max}$ 値が漸次大きくなるかまたは V_1 値の振動(急激な減少)によることもあろう〕少し大きくなるとするならば、以後の干渉距離内で β' 値が少々増加することも考え得る。 l/e 値が小さくて干渉距離の長い実際の一端開放模様例を図8(b)、(A)に示し、同時に β' 値漸次増加により式(1)で定量した模様を同図、(B)に示した。図中(A)は $C_1/C_{01} \approx 4.9$ 近傍の

一端開放模様で、 $e/C_{02} = 2.8$ での $l/e = 2.79$ をもち、一端開放模様の頭部の開きとしてはわりあい小さいものである。この場合、干渉距離(ここでは約 $20 \mu\text{m}$ を表示)内での β' 値の増加 ($\beta' = 0.70 \sim 0.94$) を考え、 e 、 C_{02} の実測値を式(1)に代入して模様を描けば、図中(B)のようにほとんど同じ形状の干渉模様を表現することができる。ちなみに図中(A)、(B)の l/e 値の違いは 2.5% である。また l/e 値が小さくて干渉距離の長い両端閉そく模様も、同様に β' 値漸次増加を考えることにより式(1)で定量表現し得る。以上両模様頭部の特定 e/C_{02} 値における l/e 値を近似し得るものは、模様内で β' 値が減少するもの(主として V_1 値の増加による)および増加するもの〔 $V_{2\max}$ 値の増加または V_1 値の振動(急激な減少)による〕を含んでおり、これらは式(1)でその干渉模様を表現し得ることを示した。

3.3 一次き裂伝ばによる模様測定値の変化および変動 一次き裂速度がその C_1/C_{01} 値とともに変動し得ることは前にも述べた。今、一次き裂先端が試片厚み(ここでは 4 mm)の直線長さをもって進行すると仮定しても、その線上を横切る破面模様数変化は C_1/C_{01} 値により図9のごとく変わる。すなわち一次き裂伝ばとともに生成する破面模様数が増加する。したがって一次き裂先端で干渉する模様数が V_1 値の変動に関与しているとすれば、進行方向および厚さ方向にも V_1 値が変動し得るものと考えられる。

次に一端開放模様の有核のものすべてについて、 e/C_{02} 値の C_1/C_{01} 値による変化を一次き裂の破断に至るまで、図10に示した。 e/C_{02} 値は C_1/C_{01} 値とともに増加し、その変化域も大きくなる。今、これらの図に前述の $V_{1\max}$ 値の変動を考えて求めた K_D (または $\mathcal{D}_D$)・ C_1/C_{01} 値の関係〔図3または図4〕を重ねてみると、一次き裂の伝ばとともに、 K_D や $\mathcal{D}_D$ 値の増加

図9 き裂進行方向垂直線上を横切る破面模様数の一次き裂伝ば距離による変化

図10 一端開放模様相対干渉開始距離の一次き裂伝ば距離による増加および変動域と動的応力拡大係数の増加および変動幅解析曲線

図 11 両破面模様相対臨界距離の一次き裂伝ば距離による増加および変動域と動的応力拡大係数の増加および変動幅解析曲線

する現象および $V_{1\max}$ 値の変動幅が大きいほど K_D や $\mathcal{D}_D$ 値の変動域も大きくなる様子がわかり、変動を伴いながら高速で伝ばする一次き裂先端の K_D や $\mathcal{D}_D$ 値の大きさが破面模様の e/C_{02} 値の大きさを支配しているものと考えられる。なお図 10 にこれらのうち $K_D \cdot C_1/C_{01}$ 値の関係を参考までに点線で表示した。また、点線に付した番号(1)～(7)は、 $V_{1\max}$ 値の大きさの違いによるものを表しており、各々(1) $V_{1\max} = 480$ m/s, (2) 460 m/s, (3) 440 m/s, (4) 420 m/s, (5) 400 m/s, (6) 360 m/s および (7) 300 m/s を仮定して算出した曲線である。もっとも K_D , $\mathcal{D}_D$ 値や $V_{1\max}$ 値の絶対的な大きさは正確とは限らないが、短く鋭い中央き裂の高速伝ばにおけるその C_1/C_{01} 値による増加傾向は正しいであろう。また両端閉そく模様の結果も全く同様な関係を示すことはいうまでもない。

次に $e/C_{02} \cdot C_1/C_{01}$ 値のデータより $n_2 = 1.99$ を用いて式(1)により求めた相対臨界距離、 d/C_{02} 値、の C_1/C_{01} 値による変化を両破面模様の結果とも図 11 に示した。一次き裂が二次き裂核を活性化し、二次き裂が伝ばしはじめる d/C_{02} 値も e/C_{02} 値同様、 C_1/C_{01} 値とともに上限値は増加しその変化域も大きくなり、一次き裂速度の増加による K_D や $\mathcal{D}_D$ 値の変動傾向に支配されているものと考えられる。なおこの図にも $K_D \cdot C_1/C_{01}$ 値の変化曲線(点線)を前図と同様な考えおよび方法で記入した。

4. 結 言

ぜい性プラスチック破面模様二次元定量式(破面模様の式)を検討するため、一次き裂半長 $C_{01} = 4.88$ mm を主とする短い中央き裂付引張試片による破壊試験を行い、破断に至るまでのき裂伝ば距離上の破面模様の諸測定および解析などを行い次の結言を得た。

先に報告した二次元定量式に含まれる二次き裂限界速度と一次き裂速度の比、 β' 値は $\beta' = 1$ 以外の大きさにも変化する値であり、その一つは一次き裂伝ば距離による変動である。これは一破面模様を描く短い干渉距離内では二次き裂限界速度($V_{2\max}$)および一次き裂伝ば速度(V_1)が定数であるが、干渉距離よりはるかに大きな一次き裂伝ば距離、 C_1/C_{01} 値、とともに V_1 値が増加または変動することにより、 β' 値($= V_{2\max}/V_1$)が変動すると考えるものである。この場合、一破面模様を描く間は β' 値が定数であるので、破面模様の $a/C_{02} \cdot b/C_{02}$ 値、 $l/e \cdot e/C_{02}$ 値などの定量関係を破面模様の式で β' 値による変化として表現することができる。他の一つは、一破面模様内での変化、すなわち β' 値破面模様内変化である。この場合破面模様頭部が普通のだ円、放物線、あるいは双曲線模様よりも特に大きいものまたは特に小さいものを破面模様の式で近似表現することができる。頭部の大きいものは一破面模様内で β' 値が減少する場合で主として一次き裂伝ば速度の急激な増加域の模様、頭部の小さいものは一破面模様内で β' 値が増加する場合で $V_{2\max}$ 値の漸次増加または V_1 値の振動(急激な減少)に起因するものと思われ、干渉距離の比較的長い模様にみられやすいものである。この β' 値破面模様内変化では、一破面模様を描く間に β' 値が変化するので個々の破面模様の近似表現はできても、 $a/C_{02} \cdot b/C_{02}$ 値関係など模様の定量表現は一義的には求められない。これら β' 値の両変動を考慮すれば、実際に観察・測定されるほとんどの形状の模様を破面模様の式で表現することができ、また一次き裂伝ばによる破面模様の変化なども表現し得る。

一次き裂伝ば距離の増加とともにその速度が加速度的に増加し、その大きさが $\pm 25\%$ の変動域をもって伝ばするとして求めた動的応力拡大係数、および動的ひずみエネルギー解放率は、一次き裂伝ば距離の増加とともにその大きさおよび変動域も大きくなることを示している。これらの関係は破面模様の相対干渉開始距離(e/C_{02})および相対臨界距離(d/C_{02})の一次き裂伝ば距離による増加および変動傾向と酷似した関係を示している。これらのことは一次き裂伝ば距離の増加によりその先端近傍の動的応力の場の強さが大きくなり、少数あるいは多数の核を活性化させ二次き裂となり、破面模様を生じさせる現象をよく裏付けている。もちろん一次き裂速度の振動幅の大・小は動的応力拡大係数あるいは動的ひずみエネルギー解放率の大・小につながり、破面模様の相対干渉開始距離や相対臨界距離の大・小に関与していることも明らかである。

文 献

- (1) 瀧本・ほか3名, 機論, 49-443, A (昭58), 803.
- (2) Sh. G. C., *Inelastic Behavior of Solids*, (1970), 607, McGraw-Hill.
- (3) Freund, L. B., *J. Mech. Phys. Solids*, 20 (1972), 129.
- (4) Kobayashi, A. S. and Mall, S., *Exp. Mech.*, 18 (1978), 11.
- (5) Kobayashi, T. and Dally, J. M., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 627 (1977), 257.
- (6) Kobayashi, A. S., *Progress in Exp. Mech. Durelli Anniversary Volume*, (1975-4), 83.
- (7) Bradley, W. B. and Kobayashi, A. S., *Eng. Fract. Mech.*, 3 (1971), 317.
- (8) Berry, J. P., *J. Mech. Phys. Solids*, 8 (1960), 194.
- (9) Chubb, J. P. and Congleton, J., *Proc. Int. Conf. Dyn. Crack Propag.*, (1973), 439.
- (10) Van Elst, H. C., *Trans. Met. Soc. AIME.*, 230 (1964), 460.
- (11) 大谷・小林, 東京大学宇宙航空研究所報告, 17-1, B (昭56), 479.

討 論

〔質問〕 小川和雄〔青山学院大学理工学部〕

高分子材料における破面模様の定量化に対する詳細な検討を大変興味深く読ませていただいた。以下の諸点についてご教示いただきたい。

(1) 高分子材料のき裂伝ば挙動そのものに大きな影響を与え、当然破面形態にも影響を与えると考えられる初期き裂（ここでは約10 mm）の作成方法はどのようにされたか。また、伝ば挙動の再現性はどうか。

(2) 高分子材料だから力学特性は粘弾性挙動を呈すると考えられるが、負荷条件ならびに温度条件による破面模様はどのように変化するのか。

(3) 二次き裂の核はどのように形成されると考えたらよいか。

(4) 破面模様のあらさ（段差）はどの程度か。また、あらさは、模様による差、例えば、開放あるいは閉そく模様の違いによって変化するか。

〔回答〕 (1) 注型時約8 mm長さ×1 mm幅の中子を入れて固まった後に中子を抜きとる。き裂最終仕上げは、引張試験直前にカッタの刃を狭くまた薄くしたものを試片厚さ方向に垂直にあて、小さな衝撃を加えて両端に鋭いき裂を生成させる。したがってこの段階で上下・左右非対称き裂など生成状態が適切でない試片は実験に使用できない。伝ば挙動の再現性は使用するリゴラックおよび成型時の諸条件にも影響されるが、材料、初期き裂条件、試験条件がよく制御されると、実験範囲のばらつきは生じるがわりあいよい再現性が得られている。

(2) き裂伝ば速度の遅い過程では粘弾性挙動もみられ、高速伝ば過程になるにつれその挙動は極少にな

るものと思う。事実そのような変化をSEM破面写真でも確認している。負荷条件、例えば引張り、曲げなどの種類や、同一負荷でも負荷方法により破面模様の現れ方は変わるが、すべて一次き裂伝ば速度に支配されていると考えられる。したがって他の因子を一定にして、負荷条件によりき裂伝ば速度が遅くなると仮定すると、開放模様より閉そく模様のほうが現れやすくなり、粘弾性挙動も多く現れるものと思う。また温度上昇とともに一般にき裂伝ば速度が遅くなり、上述と同傾向の挙動が生じるものと思われる。

(3) 液状材料の混合・攪拌、注型時（空気中の塵など）微小不純物の混入によるものやリゴラック自身のWeak-Bondingの箇所が核生成に寄与していると考え、一次き裂が高速で伝ばし、その先端近傍の K_{I} 値や σ_{I} 値が大きいほど、基地と不純物またはWeak-Bondingの結合が切れて二次き裂核を生成するものと思う。

(4) 一破面模様の段差はJSM-T200による3200×～13500×の写真測定では、小さいもので0.12～0.19 μm から大きいもので1.97～2.20 μm 程度まで得ている。閉そく模様は一次き裂伝ば初期に生じるものが多く、中でもき裂伝ば速度の小さいところで生じるものは粘弾性挙動のためか、むしろ頭部の段差の大きいものも観察される。一方開放模様は一次き裂伝ば速度の大きいところで生じるものが多く、測定した範囲では段差の小さいものを得ている。破面全体はいうまでもなく後者のほうが模様密度が高くなり、粗くなる。