

熱硬化性樹脂の脆性破壊におけるき裂分岐の開始条件

新川, 和夫
九州大学応用力学研究所 : 助手

高橋, 清
九州大学応用力学研究所 : 教授

<https://doi.org/10.15017/4785234>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 66, pp.285-293, 1988-10. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



熱硬化性樹脂の脆性破壊における き裂分岐の開始条件

新 川 和 夫* 高 橋 清†

概 要

改良を施したクランツ・シャルディン型高速度カメラを用いて、ホマライト 911 およびエポキシにおけるき裂速度および破壊靱性を測定した。その結果、き裂の分岐がき裂速度および破壊靱性値の大きな範囲で生じること、すなわちき裂分岐と関連した材料に固有のき裂速度または破壊靱性が存在しないことを明らかにした。それに対し、単位幅のき裂先端および単位時間あたりのエネルギー消費率が一定に達したときにき裂が分岐することを示した。

Key words: Brittle Fracture, Crack Branching, Homalite-911, Epoxy, Crack Velocity, Crack Extension Resistance, Caustic Method, High-Speed Photography

1. 結 言

材料の脆性的高速破壊においては、き裂が分岐することが知られている。このようなき裂分岐を理解するためには、材料の破壊変形による慣性力を無視することができず、動的効果を考慮しなければならないことが指摘されてきた。き裂分岐に関する理論解析は古くからなされており、分岐が生じるための力学的な条件が調べられてきた。例えば Yoffe¹⁾ は、き裂進展の速い高速度域ではき裂先端での主応力の方向が変化することを解析的に示し、それがき裂を分岐させる原因となることを示唆している。また実験的な研究においても、分岐が生じる力学的な条件が種々の材料において調べられてきた²⁻¹⁰⁾。その様な条件として、き裂速度の測定がなされており、分岐と関連した材料に固有の臨界き裂速度が存在するかどうかについて調べられてきた²⁾³⁾。しかし一方、き裂速度は分岐を生じさせるためには必ずしも十分な条件ではなく、むしろき裂先端での応力レベルが重要な役割を果たしているとの指摘もなされている。そして臨界き裂速度に代わる条件として、分岐の破壊靱性に対する依存性が示唆されてきた⁴⁾⁵⁾⁷⁾。これは、動的な破壊靱性がある値に達したときにき裂が分岐すること、すなわち分岐と関連した材料に固有の臨界破壊靱性が存在することを示唆するものである。しかし、両者の分岐条件もある限定された範囲では成立するものの、必ずしもこれまでに得られているき裂の分岐挙動を明確に説明するものではな

* 九州大学助手，応用力学研究所

† 九州大学教授，応用力学研究所

い。

本研究では熱硬化性樹脂であるホマライト 911 およびエポキシの破壊実験を行い、き裂の分岐挙動をコースティック法により測定した。その撮影にはクランツ・シャルディン型の高速度カメラを用いた。このカメラは、2つの異なるピント位置での像を同時に撮影できるように改良したものである。すなわち、コースティック像を撮影するためのイメージ面と試験片の両方にピントを合わせることができる。そのため従来の方法では観察することが困難であったき裂先端とコースティック像を同時に撮影することができた。コースティック像よりき裂進展抵抗力 R^* (破壊靱性に対応) を、また試験片の像よりき裂速度 $\dot{a}$ を求めた。そして、き裂の分岐点における $\dot{a}_b$ と R_b^* を求め、分岐挙動に及ぼす $\dot{a}_b$ および R_b^* の効果を調べた。また、き裂の分岐数に関する考察も行った。

2. 実験方法

2.1. 試験片

試料として厚さ 3.2 mm のホマライト 911 (CR-39)、および 5.0 mm のエポキシ樹脂 (アラルダイト D) を用いた。これらの材料は、比較的容易にき裂の分岐を生じさせることができる。各材料の物性値を表 1 に示す。本研究では各材料での縦波および横波超音波 (400 kHz) の伝ば速度を測定し、それらの値より動的材料定数を評価した。応力拡大係数 K_c は、高速破壊からき裂がアレストするときに得られた測

表 1 材料の物性値

	HOMALITE-911	EPOXY
c_1 m/s	2752	2600
c_2 m/s	1053	1170
E_d GPa	4.07	4.39
G_d GPa	1.44	1.60
ν_d	0.41	0.37
ρ kg/m ³	1300	1170
K_c MN/m ^{3/2}	0.32	0.64
c^* m ² /N	11.6×10^{-11}	7.0×10^{-11}

c_1 : 縦波速度, c_2 : 横波速度, E_d : 縦弾性係数, G_d : 横弾性係数, ν_d : ポアソン比, ρ : 密度, K_c : アレスト時応力拡大係数, c^* : 応力光定数

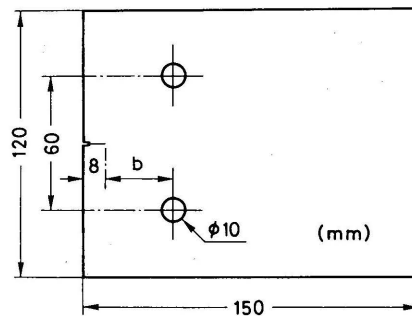


図 1 試験片形状

定値, すなわちアレスト時応力拡大係数である。なお応力光定数 c^* は, 準静的な実験より測定した値である。

図1に示すような形状および寸法の試験片を作製した。この形状の試験片を用いると, 1回のき裂進展において明確な加速と減速の両過程を得ることができる。また初期き裂先端とピンチャックの軸線までの距離を変えることにより, 加速性と減速性をある程度制御することができる¹¹⁾。本実験では初期き裂先端とピンチャックの軸線までの距離 l をホマライト 911 では約 35 mm, エポキシでは約 30 mm とした。これは, き裂の分岐を比較的に低い荷重で生じさせるためである。試料にはインストロン型万能試験機で引張り負荷を加えた。引張速度は 1 mm/min とした。

2.2 撮影方法

き裂進展挙動の測定には, クランツ・シャルディン型の高速度カメラを用いた。このカメラは, 2つの異なるピント位置での像を同時に撮影できるように改良したものである。その光学系の配置概略を図2に示す。カメラは図3に示すように, 30個の光源用放電ギャップと, 同数個のレンズを備えたカメラ・ボックスから成り立つ。各放電ギャップからの光は凹面鏡で反射され, 試料を通過した後, それぞれに対応するレンズ上に焦点を結ぶ。さらに光は撮影装置の内部でハーフ・ミラーにより2方向に分離される。1方向の光は試料面にピントを合わせたフィルムへ, もう1方向の光はイメージ面にピントを合わせたフィルムへ像を結ぶように設定されている。放電ギャップはあらかじめ定められた一定の時間間隔

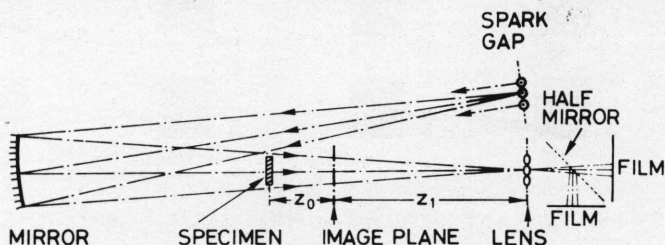
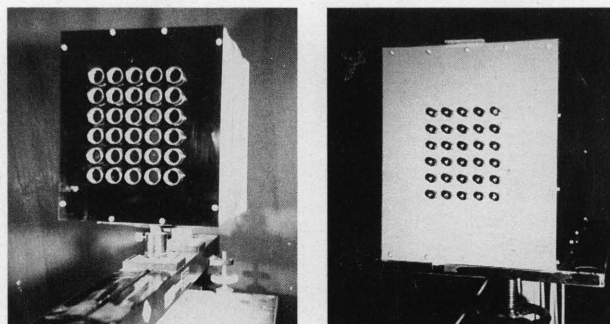


図2 光学系の配置概略図



カメラ・ボックス

光源 (放電ギャップ)

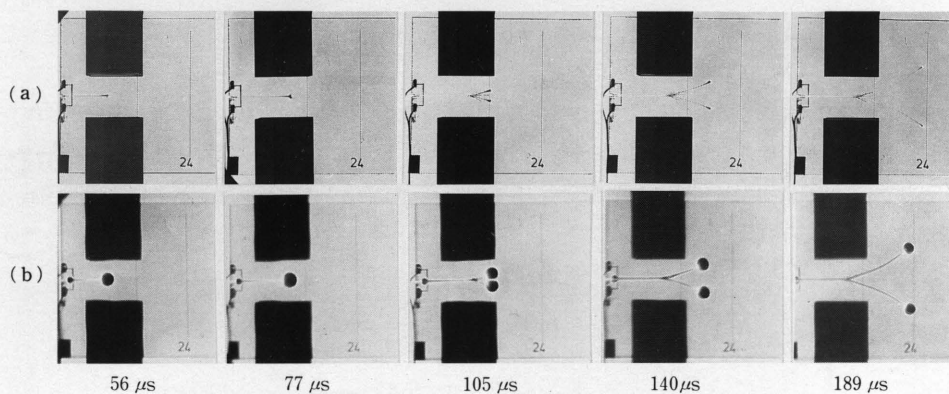
図3 クランツ・シャルディン型高速度カメラ

で発光するので、時々刻々と進展、変化するき裂先端およびコースティック像を30こまずつ撮影することができる。従来の方法ではコースティック像の内部にき裂先端が隠れるため分岐を生じる瞬間が曖昧であったが、本方法ではそれを明確に撮影することができた。

3. ホマライト 911 におけるき裂の分岐

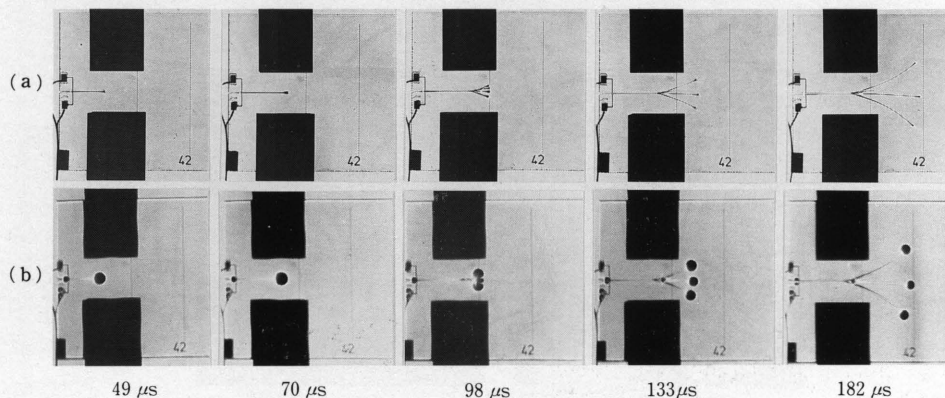
3.1 ホマライト 911 の分岐挙動

ホマライト 911 で得られた高速度撮影の結果例を図4、図5に示す。これらはいずれも30こまの中から適当に抜粋したものである。図4ではき裂が2つに、図5では3つに分岐している様子が示されている。各図において、(a)は試料面ピントで得られた像、(b)はイメージ面ピントで得られたコースティック像に相当する。ホマライト 911 における実験では、巨視的にみた場合、き裂は2つまたは3つに分岐する傾向がみられた。



$$\dot{a}_b = 503 \text{ m/s}, R_b^* = 386 \text{ N/m}, R_b^* \cdot \dot{a}_b \doteq 194 \times 10^3 \text{ J/ms}$$

図4 ホマライト 911 におけるき裂が2つに分岐した例 (a) 試料面ピント像 (b) コースティック像



$$\dot{a}_b = 533 \text{ m/s}, R_b^* = 337 \text{ N/m}, R_b^* \cdot \dot{a}_b \doteq 180 \times 10^3 \text{ J/ms}$$

図5 ホマライト 911 におけるき裂が3つに分岐した例 (a) 試料面ピント像 (b) コースティック像

3.2 き裂進展抵抗力 R^* と き裂速度 $\dot{a}$ の評価

本研究ではコースティック像の大きさがき裂進展を阻止しようとする抵抗力を表すものとする。そのような抵抗力を表す量としてき裂進展抵抗力 R^* [N/m] を導入する。 R^* はその次元から明らかなように単位幅のき裂先端で生じる抵抗力を表す。以下に R^* を求める手順を示す。

- (1) まずコースティック像の縦最大直径を測定する。
- (2) その直径より応力拡大係数 K_d を求める¹¹⁾。
- (3) 平面応力状態を仮定し、き裂進展抵抗力 R^* を次式で定義した¹²⁾。

$$R^* = (K_d^2 - K_c^2) / E_d \quad [\text{N/m}] \quad (1)$$

ここで、 K_c はき裂のアレスト時における応力拡大係数、 E_d は動的な縦弾性係数である (表 1 参照)。

き裂長さ a は、試料面ピントで得られた像よりき裂先端の移動距離を測定することによって求めた。 R^* と $\dot{a}$ の測定例を図 6 に示す。き裂速度 $\dot{a}(t)$ は多項式近似で表示した曲線 $a(t)$ (図 6 参照) を t に関し 1 回微分することにより求めた¹¹⁾。その結果を図 7 に示す。

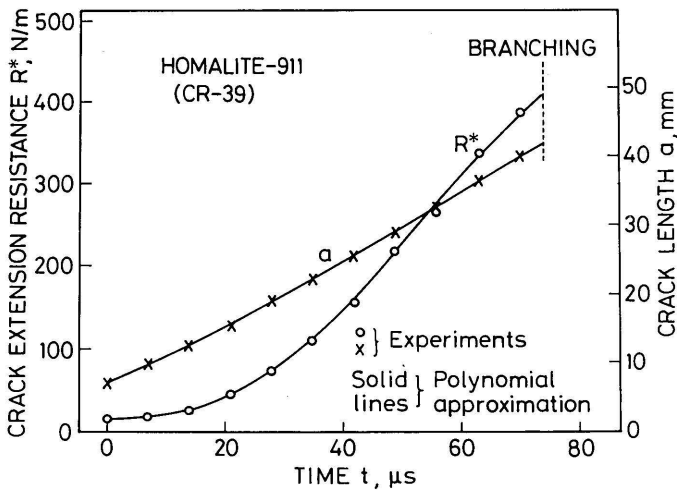


図6 ホマライト 911 におけるき裂進展抵抗力 R^* と き裂長さ a の時間的変化

3.3 ホマライト 911 のき裂分岐時における $\dot{a}_b$ および R_b^*

図 7 は、 $\dot{a}$ および R^* をき裂長さ a の関数として表示したものである。 $\dot{a}$ および R^* 曲線から明らかなことは、き裂の分岐が $\dot{a}$ のピーク点ではなく、 R^* の最大値で生じていることである。分岐点での $\dot{a}$ および R^* として、 $\dot{a}_b = 493 \text{ m/s}$ 、 $R_b^* = 412 \text{ N/m}$ が得られた。さらに図 4、図 5 の下にも対応する $\dot{a}_b$ 、 R_b^* をそれぞれ表示した。ここで注目すべきことは、分岐点における $\dot{a}_b$ 、 R_b^* が各試験片において大きく異なっていることである。

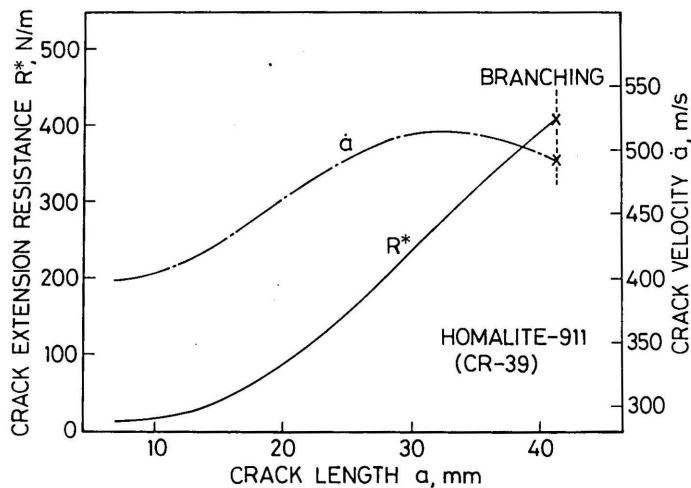


図7 ホマライト 911 におけるき裂進展抵抗 R^* とき裂速度 $\dot{a}$

3.4 ホマライト 911 のき裂進展抵抗力の $R^*(\dot{a})$ 表示

図7における R^* を $\dot{a}$ の関数として表示すると、図8に示すように $R^*(\dot{a})$ は $R^*-\dot{a}$ 平面上において1本の曲線となる。ここで矢印はき裂の進行過程を意味し、またき裂の分岐点はこの曲線上の最終点に相当する(ここで○、△印は巨視的なき裂の分岐数がそれぞれ2つ、3の場合を表す)。図8には、3つの試験片から得られた $R^*(\dot{a})$ 曲線、さらに19の試験片から得られた分岐点が示されている。各分岐点で

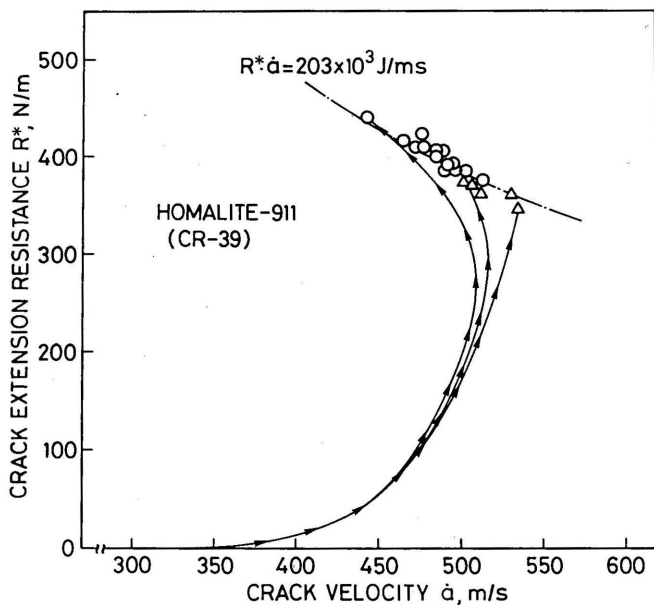


図8 ホマライト 911 におけるき裂進展抵抗力の $R^*(\dot{a})$ 表示

の $\dot{a}_b$, R_b^* の値をみると、両者は $\dot{a}$ および R^* の大きな範囲において分布している。従来から示唆されてきたように分岐と関連した材料に固有のき裂速度または破壊靱性が存在するならば、各試験片における $\dot{a}_b$ または R_b^* は一定値をとらなければならない。しかし、ここで得られた結果はこのこととは大きなへだたりがある。

3.5 ホマライト 911 のき裂分岐の $R^* \cdot \dot{a}$ 依存性

図7では、き裂の分岐が $\dot{a}_b = 493 \text{ m/s}$, $R_b^* = 412 \text{ N/m}$ で生じたことを示している。いまその分岐点で R_b^* と $\dot{a}_b$ の積をとると、 $R_b^* \cdot \dot{a}_b \div 203 \times 10^3 \text{ J/ms}$ が得られる。さらに図8の $R^* \cdot \dot{a}$ 平面上において、 $R_b^* \cdot \dot{a}_b$ を一定に保ったまま $\dot{a}$ と R^* を変化させると、一本の $R^* \cdot \dot{a} = \text{const}$ 曲線(一点鎖線で表示)が得られる。図8の結果で注目すべきことは、他の試験片で得られた分岐点があまのこの曲線上に乗っていることである。これは、 R^* と $\dot{a}$ の積がある一定値に達したとき、すなわち $R^* \cdot \dot{a}$ 平面上で表示したき裂の進展挙動が $R^* \cdot \dot{a} = \text{const}$ 曲線に達したときにき裂が分岐することを示唆するものである。 $R^* \cdot \dot{a} [\text{J/ms}]$ は、その次元から明らかなように、単位幅のき裂先端で単位時間あたりに消費されるエネルギーを表す。したがって $R^* \cdot \dot{a} = \text{const}$ 曲線が意味することは、き裂先端でのエネルギー消費率がその曲線に沿っては一定値を示すことである。

3.6 ホマライト 911 の分岐数に関する考察

図8に示すように巨視的にみた場合のき裂の分岐数を2つ、3つに分類し、各分岐点においてそれぞれ○、△印で表示した。この結果で注目すべきことは、若干のばらつきは存在するものの、500 m/s以下の低速度域ではき裂が2つ(○印)に、500 m/s以上の高速度域では3つ(△印)以上に分岐する傾向がみられることである。この結果は、き裂の分岐条件は前述のように $R^* \cdot \dot{a} = \text{const}$ で与えられるものの、分岐数に関しては $\dot{a}_b$ が重要な役割を果たしていることを示唆するものである。

4. エポキシにおけるき裂の分岐

4.1 エポキシのき裂進展抵抗力の $R^*(\dot{a})$ 表示

図9には、5つのエポキシ試験片から得られた $R^*(\dot{a})$ 曲線、さらに12の試験片から得られた分岐点が示されている。エポキシにおけるき裂は、破断荷重が比較的小さいときは図4、図5の場合と同様に2つ、3つに分岐した。しかし破断荷重が大きいとき、図10のようにき裂が4つ以上に分岐する場合が存在した。図9ではき裂の分岐数を巨視的に2つ、3つ、4つ以上に分類し、各分岐点においてそれぞれ○、△、□印で表示した。

エポキシとホマライト 911 の結果で異なることは、エポキシにおけるき裂の分岐が比較的低速度域で生じていることである。しかしホマライト 911 の結果と同様に、エポキシで得られた分岐点も、 $\dot{a}$, R^* の大きな範囲で分布している。したがってエポキシの場合も、分岐と関連した材料に固有のき裂速度または破壊靱性を一意的に決定することができない。

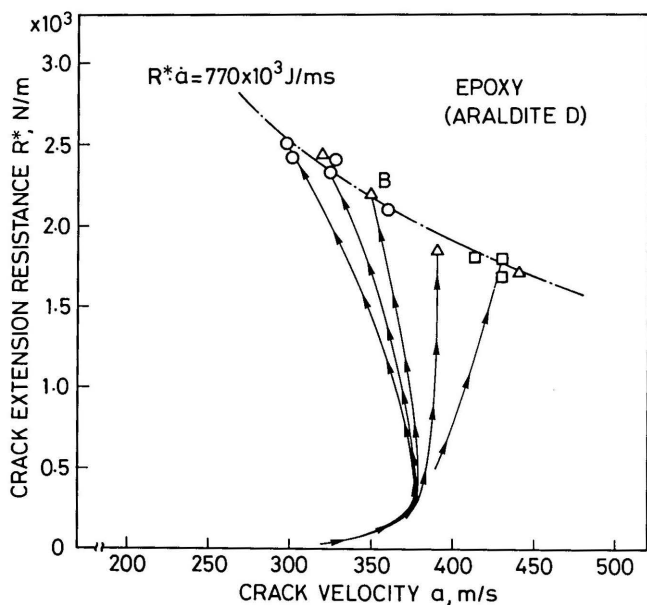
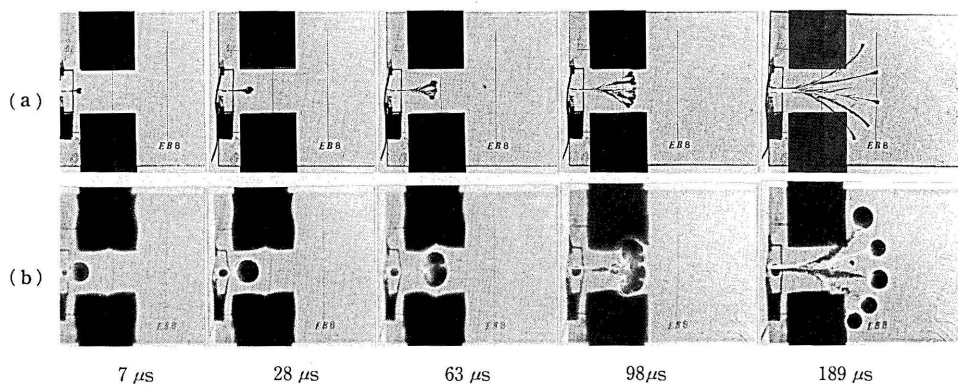


図9 エポキシにおけるき裂進展抵抗力の $R^*(a)$ 表示



$$\dot{a}_0 = 427 \text{ m/s}, R_0^* = 1810 \text{ N/m}, R_0^* \cdot \dot{a}_0 = 773 \times 10^3 \text{ J/ms}$$

図10 エポキシにおけるき裂が5つに分岐した例 (a) 試料面ピント像 (b) コースティック像

4.2 エポキシのき裂分岐の $R^* \cdot \dot{a}$ 依存性

図9のB点は、き裂の分岐が $\dot{a}_0 = 348 \text{ m/s}$ および $R_0^* = 2,210 \text{ N/m}$ で生じたことを示している。いまその点で R_0^* と $\dot{a}_0$ の積をとると、 $R_0^* \cdot \dot{a}_0 = 770 \times 10^3 \text{ J/ms}$ が得られる。さらにこの積を一定に保ったまま $\dot{a}$ と R^* を変化させると、B点を通る一本の $R^* \cdot \dot{a} = \text{const}$ 曲線(一点鎖線で表示)が得られる。図9の結果で注目すべきことは、他の試験片で得られた分岐点がほぼこの曲線上に乗っていることであ

る。これはホマライト 911 と同様に、き裂先端でのエネルギー消費率がある一定値に達したときにき裂が分岐することを示唆している。

4.3 エポキシのき裂分岐数に関する考察

図 9 の結果で注目すべきことは、き裂の分岐数がき裂速度 $\dot{a}$ によって変化していることである。すなわち、△印で示した分岐数 3 つの結果は $\dot{a}$ の大きな範囲においてばらついているものの、360 m/s 以下の低速度域ではき裂が 2 つ (○印) に、400 m/s 以上の高速度域では 4 つ (□印) 以上に分岐する傾向がみられた。この結果は、ホマライト 911 の結果と同様に、分岐数に関しては $\dot{a}_0$ が重要な役割を果していることを示唆している。すなわち $\dot{a}_0$ が大きくなると慣性力などの動的効果がき裂先端近傍において大きくなること、それがき裂の分岐数を増加させているものと解釈することもできる。

5. 結 言

ホマライト 911 およびエポキシの脆性破壊におけるき裂の分岐挙動を高速度カメラとコースティック法により研究した。き裂の分岐点におけるき裂進展抵抗力 R^* およびき裂速度 $\dot{a}_0$ を測定し、次のような結果を得た。

- (1) き裂の分岐点における R^* 、 $\dot{a}_0$ は同一材料でも各試験片によって大きく異なる。すなわち、材料に固有の R^* および $\dot{a}_0$ は存在しないようである。
- (2) き裂の分岐は R^* と $\dot{a}$ の積がある一定値に達したとき、すなわち $R^* \cdot \dot{a} = \text{const}$ になったときに生じる。ホマライト 911 に対するその値は約 $R^* \cdot \dot{a} = 203 \times 10^3 \text{ J/ms}$ である。一方、エポキシに対する値は約 $R^* \cdot \dot{a} = 770 \times 10^3 \text{ J/ms}$ である。
- (3) き裂の分岐数は $\dot{a}_0$ が大きくなると増加する傾向がある。

謝 辞

カメラ・ボックスを製作するにあたり九州大学応用力学研究所の早川愛喜氏、また高速度撮影を行うにあたり同研究所の馬田俊雄氏の助力を得た。さらに本研究を行うにあたり昭和 62 年度文部省科学研究費の援助を受けた。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Yoffe, E. H.: *Phil. Mag.*, **42** (1951), 739.
- 2) Congleton, J. and Petch, N. J.: *Phil. Mag.*, **16** (1967), 749.
- 3) Anthony, S. R., Chubb, J. P. and Congleton, J.: *Phil. Mag.*, **22** (1970), 1201.
- 4) Congleton, J.: (Shi, G. C. 編) *Dynamic Crack Propagation*. Noordhoff International Publishing (1973), 427.
- 5) Kobayashi, A. S., Wade, B. G., Bradley, W. B. and Chiu, S. T.: *Eng. Fract. Mech.*, **6** (1974), 81.
- 6) Dally, J. W.: *Exp. Mech.*, **19** (1979), 349.
- 7) Ramulu, M., Kobayashi, A. S., Kang, B. S. J. and Barker, D. B.: *Exp. Mech.*, **23** (1983), 431.

- 8) Ravi-Chandar, K. and Knauss, W. G.: *Int. J. Fract.*, **26** (1984), 141.
- 9) 青木 繁, 下川正樹, 平野昌広, 坂田 勝: 日本機械学会論文集(第1部), **41** 巻 347号(1975), 1942.
- 10) Kishimoto, K., Aoki, S. and Sakata, M.: *Archives Mechanics*, **33** (1981), 947.
- 11) 新川和夫, 高橋 清: 日本機械学会論文集 (A編), **53** 巻 485号 (1987), 128.
- 12) 新川和夫, 高橋 清: 日本機械学会論文集 (A編), **53** 巻 491号 (1987), 1324.
(昭和63年5月1日 受理)