

UP および PMMA 板材試片のき裂伝ば速度と破面模様 (大型中央き裂付き試片の結果)

瀧本 昭夫*・吉村 裕二**・小田 直樹**・藤井 敏男***

Relationship between Crack Velocity and Fracture Surface Marks in a Sheet Specimen of UP and PMMA

(Results of the Large Size Specimen Having a Central Crack)

Akio TAKIMOTO, Yuji YOSHIMURA, Naoki ODA and Toshio FUJII

Abstract

We have reported that both-ends-closed marks (BECM) like an ellipse and one-end-opened marks (OEOM) like a parabola or a hyperbola are observed in a fracture surface of unsaturated polyester (UP) resin. The total number of them and the competition of their densities in a specimen change with fracture strength, crack velocity and a primary crack length introduced. We have also reported that fracture surface marks observed in a polymethyl methacrylate (PMMA) specimen are mostly one-end-opened marks and the total number in a specimen is controlled by fracture strength, crack velocity and a primary crack length introduced.

Here, we compared the both results in UP and PMMA where the specimen design and dimensions are exactly same. In both cases the cracks are shown to propagate in three different conditions of a constant stress, a mixed and a constant strain and fracture strength decreases with an increase of the central primary crack length. It is discussed if the number of marks are mainly controlled by fracture strength of a specimen or by the mean crack velocity of it.

1. 緒 言

不飽和ポリエステル (Unsaturated Polyester, UP と略す) 樹脂やメタクリル (Polymethyl Methacrylate, PMMA と略す) 樹脂の破面には近似だ円状などの両端閉そく模様 (Both ends closed mark, BECM と略す) や放物線状などの一端開放模様 (One end opened mark, OEOM と略す) が生成され、それらの

形状、大きさ、模様密度などは破壊強度やき裂伝ば速度に関係していることが報告^{1)~10)}されている。これら模様は伝ばする一次き裂速度とその先端の核から発生する二次き裂速度の干渉によって生じることが知られている^{1)~4)}。試片の破壊強度やき裂伝ば距離と共に変化する破面模様の形状や大きさの変化は一次き裂の直線伝ばによる破面模様の式³⁾⁴⁾やその曲線伝ばによる式¹⁾²⁾でよく近似定量されるが、一試片の破面模様総数は破壊強度に主に支配されていると考えてよいのか、またはき裂伝ば速度 (平均き裂伝ば速度) に支配されるのかは明確にしがたい。なぜならば、破壊強度の大きい材料 (ここでは PMMA) は必ずしも平均き裂伝ば速度が大きいとは限らないし、逆に平均き裂伝ば速度の大きいもの (ここでは UP) は破壊強度が大きいとは限らな

* 生産機械工学科

** 大学院生産機械工学専攻

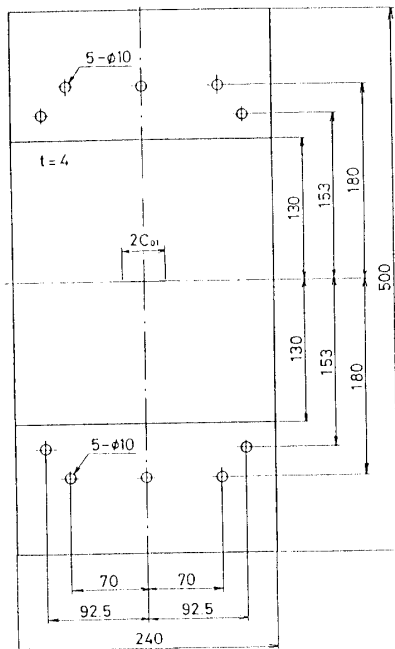
(現, 新日本製鉄株式会社)

*** 大学院生産機械工学専攻

い、ここでは両プラスチックの同一設計形状試片（中央き裂付き大型試片）の同一破壊現象（20℃試験ではUPはもろいため試験機のカrossヘッド速度0.5mm/minでぜい性破壊現象を示し、PMMAは前者より靱性が大きいいため試験機のカrossヘッド速度500mm/min、すなわち前者の1000倍の速さでぜい性破壊に近い現象を示した。）における中央き裂長さによる変化で前述の点を検討した。

2. 実験方法

UP 試片 4 mm厚板材は液状プラスチックをキャストし、PMMA 4 mm厚板材は市販のメタクリル樹脂キャスト板を用いた。大型引張試片形状は全長500mm、ゲージ部寸法260mm(長)×240mm(幅)×4 mm(厚)とし、その中央に一次き裂半長 $C_{01} \doteq 3$ mmから100mmまで種々の長さのものを導入した。Fig. 1にその略図を示した。これら試片は加工後、適切な温度および時間で後硬化処理(UP) および、ひずみとり焼鈍(UP, PMMA)をした。試験直前、カッタの刃で中央き裂先端に自然き裂に近い鋭い微小き裂を導入した。引張破壊試験は上下治具板による中央ピン負荷とし、49kN 容量試験機にてUPの試験速度は0.5mm/min、PMMAは500mm/min



$C_{01} \doteq 3 \sim 100$
All dimensions are in mm

Fig. 1 Tensile specimen design having a central crack.

で行った。破面模様数は光学顕微鏡400倍で観察し、必要に応じてSEMによる結果も参考にした。

中央き裂が左右に伝ばする速度はその伝ば予定経路上に銀細線(0.3mm幅)を垂直に付け、き裂がこれらを横切る時間をデジタル・ストレージ・オシロ(DSO, 100M サンプル/s)で測定した。中央き裂が左右に高速(約400m/s)で伝ばするものを便宜上それぞれチャンネル1, 2(Ch. 1, Ch. 2)と呼んだ。なお、中央き裂が長くなるとCh. 1, Ch. 2の伝ば開始時間は数十μsのずれが生じるものもあり左右同様な速度変化を示さない場合は先行チャンネルCh. 1の結果で検討した。

3. 結果および検討

3.1 一次き裂長さとの伝ば速度

中央き裂付き引張試片の一次き裂伝ば速度は一次き裂半長 C_{01} により変わる。Berry¹²⁾は試片半幅 W に比べ C_{01} が短い場合、すなわち相対き裂長さ C_{01}/W が小さいものでは、き裂は定応力条件で伝ばするとしてその速度解を与えている。

$$\frac{V_{1(\sigma)}/V_{1max(\sigma)}}{V_{1max(\sigma)} = \sqrt{(2\pi E)/(\kappa\rho)}} = \sqrt{(1-1/\alpha_1)[1-(n_1-1)(1/\alpha_1)]} \dots\dots\dots(1)$$

ここで n_1 : 材料定数

$V_{1max(\sigma)}$: 定応力条件での限界速度

また、Berry¹³⁾は一次き裂が長くなり C_{01}/W が大きくなると、き裂は定ひずみ条件で伝ばし、その速度解を導いている。

$$\frac{V_{1(\epsilon)}/V_{1max(\epsilon)}}{V_{1max(\epsilon)} = \sqrt{(2\pi E)/(\kappa'\rho)}} = \sqrt{(m+2\alpha_1^2)/[\alpha_1^2(m+2)]} \times \sqrt{(m+2)(\alpha_1^2-1)/(m+2\alpha_1^2-n_1(\alpha_1-1))} \dots\dots(2)$$

ここで n_1 : 材料定数

$V_{1max(\epsilon)}$: 定ひずみ条件での限界速度

$$m = A/(\pi C_{01}^2)$$

これらの解は一次き裂が短い場合および長い場合の理論解で、一次き裂長さの種々異なる試片や材料が異なる場合には前者および後者の適用範囲は明らかでない。瀧本らはUP大型試片のき裂伝ば速度測定結果で定応力条件が適用できる範囲は $C_{01} = 8$ mm ($C_{01}/W = 0.067$) 近傍までであることを証明し、また定ひずみ条件の適用範囲は $C_{01} = 40$ mm 近傍以上であると報告⁸⁾¹⁰⁾している。したがって、それら中間長さの中央き裂を有するものには定応力条件から定ひずみ条件へと漸次移行するとした混合条件解¹⁰⁾

$$V_{1(mix)}/V_{1max(mix)} = \begin{cases} V_1(\sigma)/V_{1max}(\sigma) & (1 \leq \alpha_1 \leq x_m^*) \\ (1-y_\epsilon)(V_1(\sigma)/V_{1max}(\sigma)) \\ + y_\epsilon(V_{1(\epsilon)}/V_{1max}(\epsilon)) & (x_m^* < \alpha_1 \leq \alpha_{1f}) \dots(3) \end{cases}$$

$$V_{1max(mix)} = \sqrt{(2\pi E)/(x''\rho)}$$

ここで $y_\epsilon = [(\alpha_1 - x_m^*)/(\alpha_{1f} - x_m^*)]^P$

$V_{1max(mix)}$: 混合条件での限界速度

$$x_m^* = C_{01}^*/C_{01}$$

$$C_{01}^* = C_{01} + \delta C_{01}$$

$$m^* = A/(\pi C_{01}^2)$$

を求め、この解が UP 試片の速度測定結果をよく近似するとしている。したがって、一次き裂半長 C_{01} が小から大に至るまでの速度変化は、定応力条件解、混合条件解および定ひずみ条件解で表現でき、 C_{01}/W と共に各条件域は Fig. 2 の一点鎖線（垂直に引いたもの）のごとく変化することを提案している。

一方、PMMA 大型試片、試験速度 500mm/min (UP 試片の 1000 倍の速さ) でも一次き裂半長によってき裂伝ば速度は定応力条件、混合条件および定ひずみ条件の三条件でよく近似定量することができることを証明している¹⁴⁾が、この材料ではその靱性のためか三条件の境界域はさらに拡散するものとして、むしろバンド幅 (Fig. 2 でハッチを入れた部分) で表現している。いずれにしても、 C_{01}/W による各条件域への変化はあたかも昼から夜に変わるごときの漸次変化であり、特定の C_{01}/W 値で表現しがたい。図中に定応力条件、混合条件および定ひずみ条件で破壊する場合の応力・ひず

みモデル図を記入している。また、破断に至る相対き裂長さの式 $(C_1/C_{01})_f = \alpha_{1f} = W/C_{01}$ も図中に曲線で記入した。

UP が定応力条件でき裂伝ばする場合の速度変化を Fig. 3 に示した。 $C_{01} = 5.53\text{mm}$, $C_{01}/W = 0.046$ のもので Ch. 1 および Ch. 2 の速度測定値は相対き裂伝ば距離 C_1/C_{01} と共に急上昇後、さらにゆるやかな増加を伴っていることがわかる。実線で示したのは定応力条件式(1)に $n_1 = 1.60$, $V_{1max}(\sigma) = 400\text{m/s}$ を用いて表現したもので、実験値はこの解でよく近似できることを示している。また、上下の実線はき裂伝ば速度が振動するものとして、 $V_{1max}(\sigma)$ に $\pm 25\%$ の振動幅を考慮して描いたもので、データ点はこの上下の実線の間に見られている。 Fig. 4 は PMMA, $C_{01} = 10.69\text{mm}$, $C_{01}/W = 0.089$ のもので、き裂伝ば速度はやはり C_1/C_{01} と共に急加速後、ゆるやかな増加を伴っている。式(1)の定応力条件解に $n_1 = 1.20$, $V_{1max}(\sigma) = 300\text{m/s}$ を入れて求めたのが実線である。上下の実線は $\pm 25\%$ の速度振動幅を考えたもので、実線はデータ点の変化・変動をよく表現している。次に UP, $C_{01} = 15.92\text{mm}$, $C_{01}/W = 0.133$ のデータを Fig. 5 に示した。 Ch. 1 および Ch. 2 と共に急加速後、ピーク値に達してのち減速過程にはいつている。式(1)による定応力条件解ではこの減速過程は表現できないし、かといって式(2)による定ひずみ条件解で表現するにも m の定義 [試料表面積と一次き裂長さの比 $m = A/(\pi C_{01}^2)$] 通りに求めた値 ($m = 78.4$) に

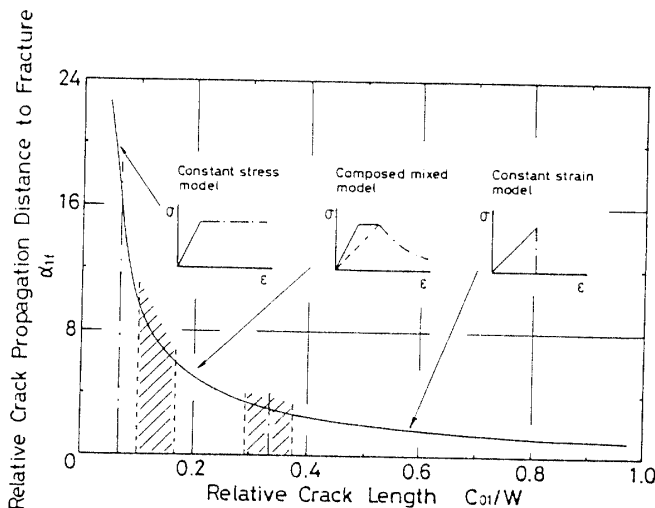


Fig. 2 Three different crack propagation conditions and the relative crack length C_{01}/W (The solid curve: $\alpha_{1f} = W/C_{01}$).

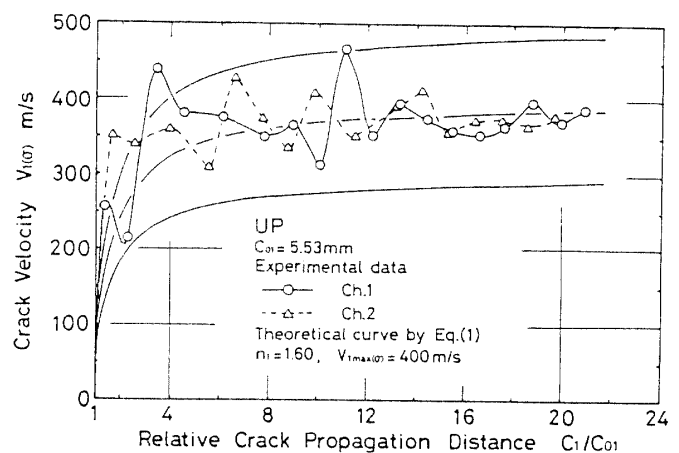


Fig. 3 Crack velocity change with respect to C_1/C_{01} (UP, $C_{01} = 5.53\text{mm}$, Constant stress condition).

よるものでは定応力条件の速度曲線よりさらに上側に現れ、データ点を表現することはできない。したがって式(3)による混合条件解で表現するのがよく、 $n_1=1.40$, $p=1.7$, $m^*=8$, $V_{1\max(\text{mix})}=380\text{m/s}$ として求めたものが中央の実線である。上下の実線は±25%の速度振幅を考えたものでデータ点をよく近似している。なお、図中 Ch. 2 の終わりに近い点が急上昇しているのは反射波による影響と考えられる。PMMA, $C_{01}=40.28\text{mm}$, $C_{01}/W=0.336$ のデータを Fig. 6 に表した。き裂伝ば速度は急加速後、ピーク値に達してゆるやかに減少している。この変化もやはり混合条件解でのみ適切に近似することができる。式(3)に $n_1=1.45$, $p=1.5$, $m^*=6$, $V_{1\max(\text{mix})}=350\text{m/s}$ を代入したのが実線で、上下の

曲線は±25%の振幅を考慮したものである。データ点はこれらの曲線でよく近似されている。一次き裂半長が一段と長くなると定ひずみ条件域となる。Fig. 7 は UP, $C_{01}=55.24\text{mm}$, $C_{01}/W=0.460$ のデータである。き裂伝ば速度は C_1/C_{01} と共に急上昇後、ピーク値に達して試片の自由境界 [試料端までの相対伝ば距離 $W/C_{01}=(C_1/C_{01})_f=2.17$]に至るまでにほとんど零に近付くと考えられる。このような速度変化を示すものは定ひずみ条件解でよく近似できる。中央の実線は式(2)で $n_1=1.99$, $m=6.5$, $V_{1\max(\epsilon)}=1400\text{m/s}$ で求めたもので、上下の実線は±25%の速度振幅を仮定したものである。理論解は測定値の傾向をよく表している。PMMA, $C_{01}=99.85\text{mm}$, $C_{01}/W=0.832$ のデータを Fig.

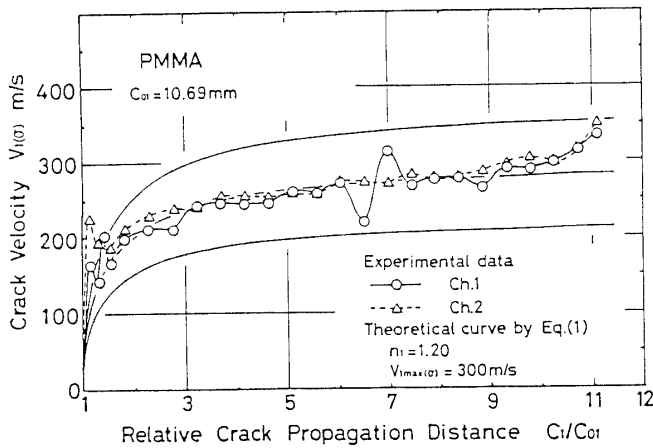


Fig. 4 Crack velocity change with respect to C_1/C_{01} (PMMA, $C_{01}=10.69\text{mm}$, Constant stress condition).

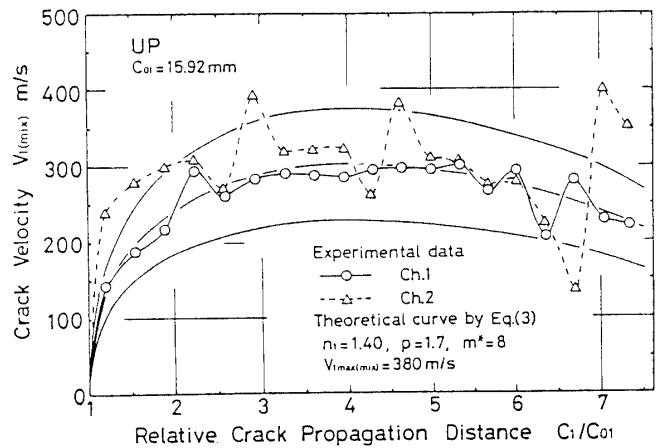


Fig. 5 Crack velocity change with respect to C_1/C_{01} (UP, $C_{01}=15.92\text{mm}$, Mixed condition).

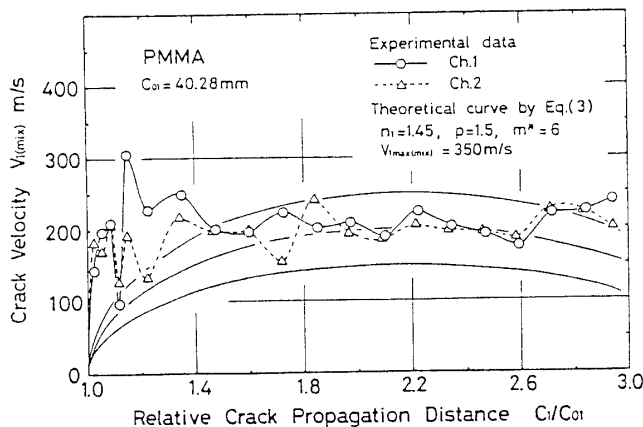


Fig. 6 Crack velocity change with respect to C_1/C_{01} (PMMA, $C_{01}=40.28\text{mm}$, Mixed condition).

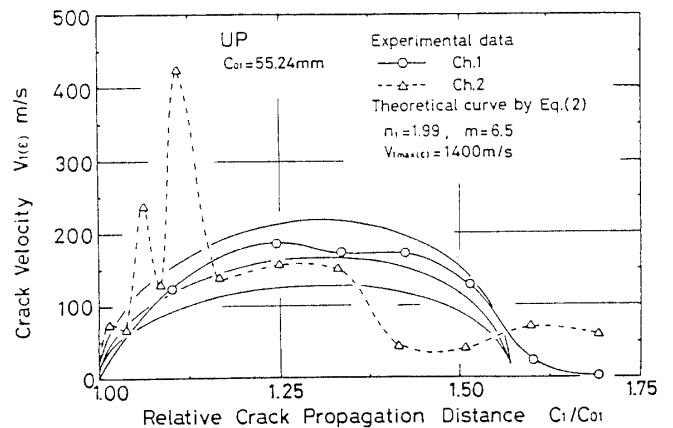


Fig. 7 Crack velocity change with respect to C_1/C_{01} (UP, $C_{01}=55.24\text{mm}$, Constant strain condition).

8に示した、 $C_{01}/W=0.832$ と非常に長い一次き裂であるが、やはり定ひずみ条件解でよく近似できる。曲線は式(2)に $n_1=1.98$, $m=6.0$, $V_{1max(\epsilon)}=5500\text{m/s}$ を用いて表現したもので、 $\pm 25\%$ の速度振動を考えた曲線はデータをよく近似している。以上、UP および PMMA の一次き裂長さ C_1/C_{01} による速度測定値の変化を示し各々定応力条件解、混合条件解および定ひずみ条件解でよく表現できることを示した。

次にこれら速度データを一試片につき一平均値 $V_m(\sigma, m_{1x}, \epsilon)$ で表したものと最大速度測定値 $V_{1max(\sigma, m_{1x}, \epsilon)}$ の関係を Fig. 9 に表した。UP (○印) および PMMA (●印) 共に、最大値が大きくなると共に平均速度も直線的に大きくなっている。次に $V_m(\sigma, m_{1x}, \epsilon)$ 値の相対き裂長さによる変化を Fig. 10 に表した。UP (○印) および PMMA (●印) 共に C_{01}/W が大きくなると共に平均速

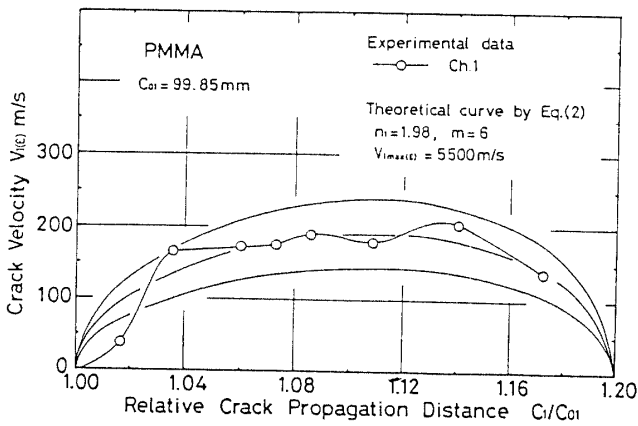


Fig. 8 Crack velocity change with respect to C_1/C_{01} (PMMA, $C_{01}=99.85\text{mm}$, Constant strain condition).

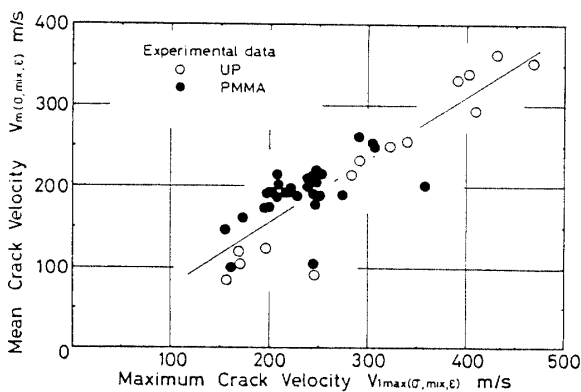


Fig. 9 Relationship between the mean velocity and the maximum velocity in UP and PMMA.

度が双曲線的に減少している。この傾向は Fig. 2 の α_{1r} の C_{01}/W による減少曲線と同様な傾向を示している。Fig. 11は、これら種々の長さの一次き裂を有する試片の破壊強度 (gross) 変化を示したもので、UP (○印) および PMMA (●印) 共に当然、 C_{01}/W が大きくなるほど破壊強度は小さくなっている。強度変化は定応力域で大きく、混合条件域および定ひずみ域へと移行するにつれ小さくなっている。

3.2 一次き裂長さと破面模様

前にも述べたように UP 試片の破壊強度の低いものでは BECM も多く観察され、逆に破壊強度の高いものでは OEOM も多く観察される。これらの個々の形状定量は破面模様の式でよく近似できることは他に詳しく報告⁸⁾⁹⁾している。ここでは一次き裂長さによる模様密度変化や両模様密度の C_1/C_{01} による競合状態を紹介する。

定応力条件で破壊する UP 試片、 $C_{01}=5.10\text{mm}$ の破面

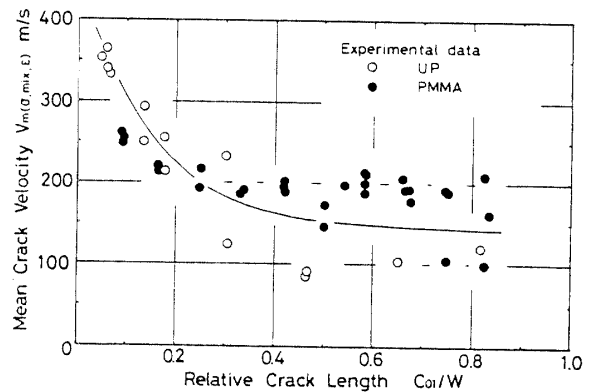


Fig. 10 Variation of the mean velocity with C_{01}/W for UP and PMMA.

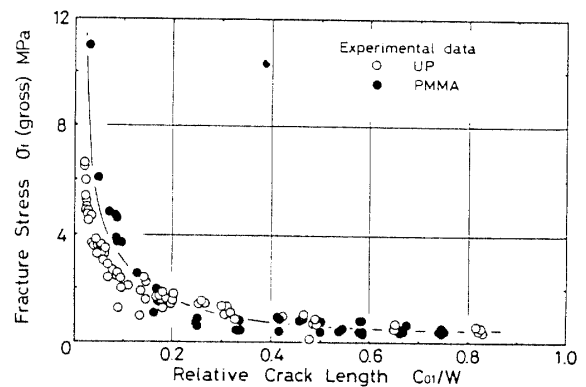


Fig. 11 Variation of the gross fracture strength with C_{01}/W for UP and PMMA.

模様密度変化を Fig. 12 に示した。この条件ではき裂伝ば速度が C_1/C_{01} と共に急上昇後、ゆるやかに増加する。 C_1/C_{01} の小さい間は速度も小さいため BECM (傾線を入れた棒グラフ) が多く現われているが、 C_1/C_{01} の増加と共に速度が大きくなるため、ほとんどが OEOM となっている。この試片はき裂伝ば中程からささくれ状分岐¹⁵⁾ 破壊を示し破面が粗くなり、その後の破面模様数は正確には測定できないため測定値は減少しているが実際は C_1/C_{01} と共に上昇すると考えられる。BECM は C_1/C_{01} のごく初期 ($C_1/C_{01} \approx 3.5$) でピーク値に達した後、 $C_1/C_{01} \approx 8$ でほとんどなくなり、全模様が OEOM となっている。一次き裂が長くなって、 $C_{01} = 23.85\text{mm}$ となると前項でも述べたように混合条件域になる。Fig. 13 はそのデータであり、この条件では前者 ($C_{01} = 5.10\text{mm}$) ほど速度が大きくないため、むしろ BECM が全域にわたって多く現れている。当然、OEOM は BECM より少な

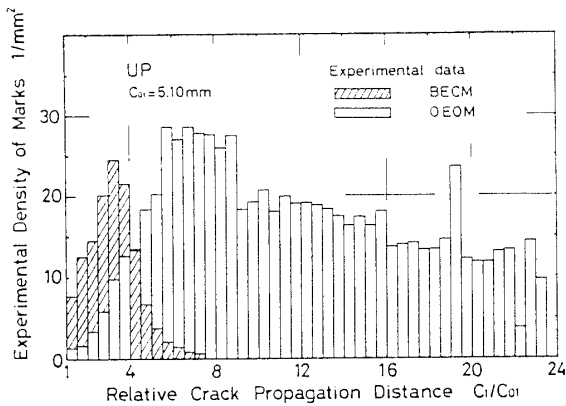


Fig. 12 Variation of the number of marks with respect to C_1/C_{01} (UP, $C_{01} = 5.10\text{mm}$, Constant stress condition).

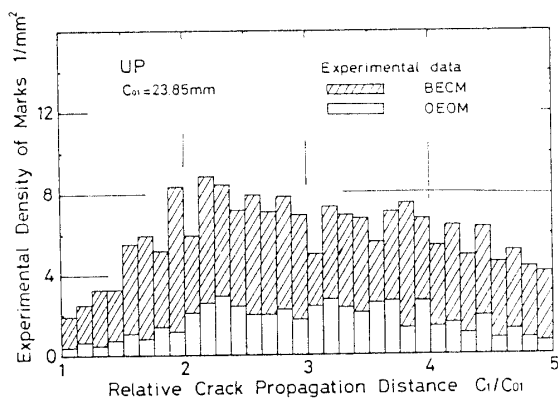


Fig. 13 Variation of the number of marks with respect to C_1/C_{01} (UP, $C_{01} = 23.85\text{mm}$, Mixed condition).

いがき裂伝ば速度と共に C_1/C_{01} 全域に現れている。BECM は少し手前、 $C_1/C_{01} = 2.4$ 近傍でピーク値を示し、OEOM は試片中程でピーク値に達している。一次き裂がさらに長くなると、き裂伝ば速度も一段と小さくなるため OEOM はほとんど現れず、速度の小さいところに生成する BECM ばかりとなる。Fig. 14 は $C_{01} = 58.42\text{mm}$ の結果である。この試片が破断する相対一次き裂伝ば距離は $(C_1/C_{01})_f = 120/58.42 = 2.05$ であるが、破断点に至る中程近くで BECM がほとんど現れなくなっている。Fig. 7 で検討したごとくこの域の試片では試片端に至るまでにき裂伝ば速度が零近傍に減少するためである。その C_1/C_{01} 域ではき裂停止線 (Arrest line) が少し現れている。このことは、一次き裂が非常に小さな速度で伝ばを繰り返して破断に至るものと考えられる。

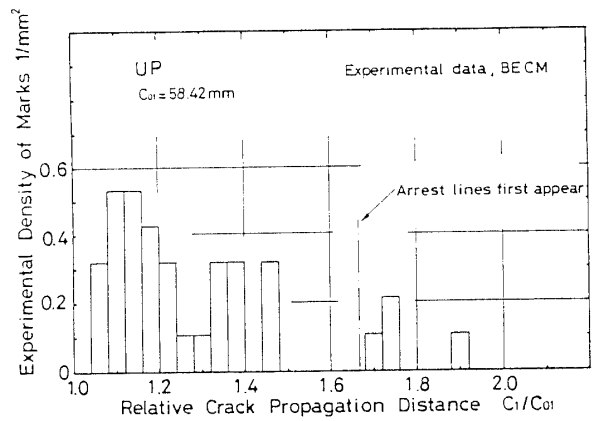


Fig. 14 Variation of the number of marks with respect to C_1/C_{01} (UP, $C_{01} = 58.42\text{mm}$, Constant strain condition).

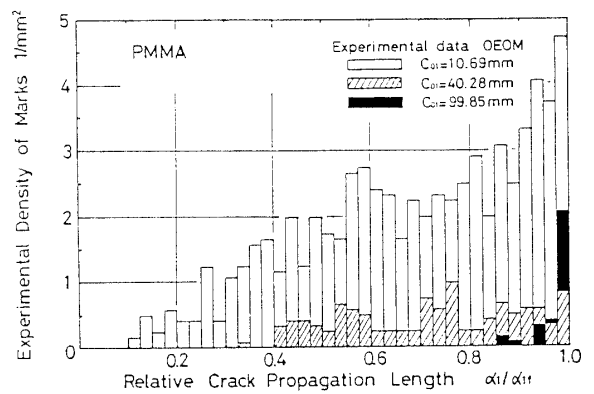


Fig. 15 Variation of the number of marks with respect to a_1/a_{1f} (PMMA, Constant stress, mixed and constant strain conditions).

次に PMMA の各破壊条件域での破面模様密度変化を紹介しよう。Fig. 15は $C_{01}=10.69\text{mm}$, 40.28mm , 99.85mm の C_1/C_{01} による模様密度変化を比較している。 $C_{01}=10.69\text{mm}$ では定応力条件域の一次き裂長さであり、OEOM 数は C_1/C_{01} と共に上昇し、Fig. 4 の速度変化とよく似ている。 $C_{01}=40.28\text{mm}$ の結果は、混合条件域のものであり、前者ほどき裂伝ば速度が大きくなるため (Fig. 6, 参照) OEOM 数もそれだけ少なくなっている。また、横軸の途中で弱いピーク値を示している。なお、破断点近傍の棒グラフの上昇は反射波による影響である。一次き裂がさらに長くなり、 $C_{01}=99.85\text{mm}$ となると黒棒グラフで示したようになる。速度がさらに小さく (Fig. 8 参照) なるため、非常に小さなピーク値を示した後、OEOM 数は減少する。この棒グラフでも、終わりのデータ点が高くなっているのは、反射波の影響が強く現れるためであろう。なお、ここには示さなかったが PMMA, $C_{01}=5.60\text{mm}$ の試片でも破面模様は C_1/C_{01} と共に急上昇して $C_1/C_{01}=7.50$ 近傍から減少している。これは UP 試片, $C_{01}=5.10\text{mm}$ の結果 (Fig. 12) で示したように、一次き裂が非常に短くなると途中から分岐破壊を起し、破面が非常に粗くなり模様数の測定が正確にできなくなるためである。また、Fig. 15では三条件の試片の模様数変化を直接比較するため、横軸を $C_1/C_{01}=\alpha_1$ と $(C_1/C_{01})_f=W/C_{01}=\alpha_f$ の比 α_1/α_f で表現している。したがって同一幅の試片でも C_{01} が大きいほどデータ点は右側に移行している。

以上 UP および PMMA 試片の一次き裂長さによる破壊条件は定応力条件、混合条件および定ひずみ条件と変化し、各試片の C_1/C_{01} による模様形状の競合や模様数変化はこれら条件の速度変化をよく反映していることを示した。

3.3 破壊強度、平均き裂伝ば速度および破面模様数

一次き裂が長くなり破壊強度が低下すると、当然、平均き裂伝ば速度も小さくなる。Fig. 16にこれら平均き裂伝ば速度と破壊強度の関係を表した。破壊強度が上昇すれば平均き裂伝ば速度は急上昇後、ゆるやかに増加する傾向を示し、いわゆる Γ 字形曲線を描いて変化している。また、UP (○印) 曲線より PMMA (●印) 曲線のほうが、よりいっそう Γ 字型に近い変化をしている。

破壊強度の大きい試片ではき裂伝ば速度が大きくなり、それらの試片は定応力条件域のものであり、他の二条件の試片に比べて破面模様密度も非常に高い値に達している。そこで、破壊強度と破面 (試片半幅) に現われる破面模様数 [いくつかの試片のデータは試片

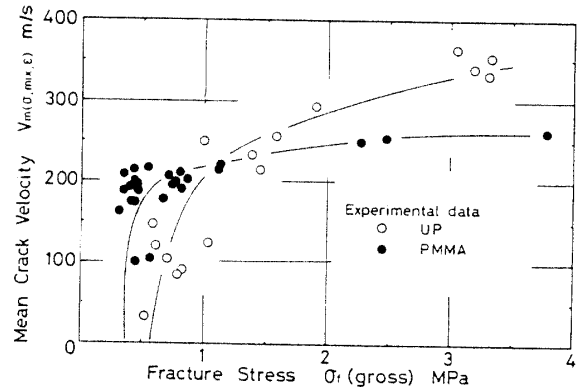


Fig. 16 Relationship between the mean velocity and gross fracture strength for UP and PMMA.

厚さ中央近傍 $0.50\text{mm} \times$ 試片半幅 W の模様密度を光学顕微鏡400倍で求め、その値を8倍して算出したものも含まれている]の関係を Fig. 17に示した。UP, BECM 数 (Δ 印) は $\sigma_f(\text{gross})$ と共に増え $\sigma_f(\text{gross})=3\text{MPa}$ 近傍でピーク値になり、そののち急に減少している。この破壊強度近くまでは両端閉そく模様が主たるものであるが、それより強くなると一端開放模様が主たるものとなっている。 $\sigma_f(\text{gross}) \approx 5\text{MPa}$ の BECM データ点 (Δ 印) は定応力条件の相対き裂伝ば距離 C_1/C_{01} が小さいところ、すなわち一次き裂速度が低い部分で生じたものである。UP 試片の OEOM 数は破壊強度と共に $\sigma_f(\text{gross})=3.5\sim 4.0\text{MPa}$ 近傍で急上昇している。この曲線を途中から一点鎖線で表しているのは、前にも述べたように、 $\sigma_f(\text{gross})$ が大きくなると破面が粗れて模様数を正確に測定しがたくなるためである。UP 試片の OEOM 数の S 字型曲線は模様数が無限に多くな

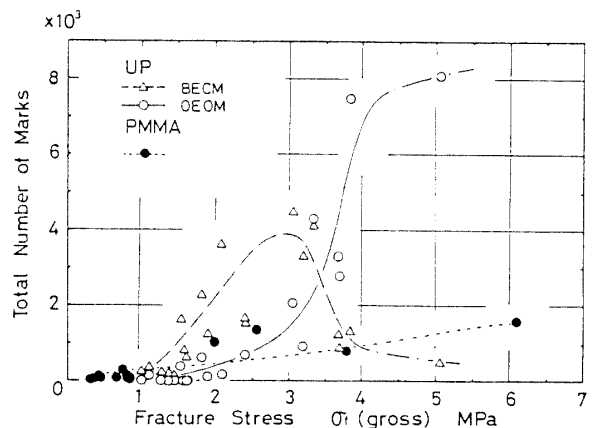


Fig. 17 Relationship between the total number of marks and gross fracture strength for UP and PMMA.

るのではなく、特定の密度になると分岐破壊を伴って伝ばすることによるためと考えている。一方、PMMAのOEOM数はUPのそれに比べて生成しがたいことが明らかであり、同一の σ_f (gross)値でもその曲線はむしろ下側に現れている。これはPMMAの靱性によるためであろう。一試片半幅に現れる破面模様数を破壊強度の変化で表したこの図は材料のもろさ(または靱性)や材質の強度特性(もろくて弱い、ねばくて強いなど)による影響が含まれているため、異なる材料では模様数と強度は一元的に表現しがたい。したがって、破面模様数(または密度)測定値からその時の破壊強度を予測することなどは困難となる。

Fig. 18は上記破面模様数を平均き裂伝ば速度で表現したものである。UP試片はぜい性が強いいためその平均き裂伝ば速度も大きい値まで達し、当然、破面模様数も多い。UP試片のBECM数は $V_m(\sigma, \text{mix}, \epsilon) = 200\text{m/s}$ 近傍から急上昇し、350m/s近傍までOEOM数より多く現れている。逆にUP試片のOEOM数は $V_m(\sigma, \text{mix}, \epsilon) = 250\text{m/s}$ 近傍から急上昇している。一方、PMMAのOEOM数は $V_m(\sigma, \text{mix}, \epsilon) = 150\text{m/s}$ 近傍から現れ、UPと似た増加曲線を示している。この設計形状ではPMMA平均き裂伝ば速度が250m/s近傍しか上昇しないためそれ以上の傾向は分からない。UP、PMMAの模様数の立ち上がり点の増加曲線の曲率は少し違うが、いずれも平均き裂伝ば速度の増加と共に破面模様数が双曲線的に上昇している。このようなデータ点をさらに多く求め、より信頼できる曲線関係を求めれば破面模様数や破面模様密度より平均き裂伝ば速度を予測することができ、速度と強度の関係(Fig. 16のごとき)より破壊強度と結びつけることも可能であろう。

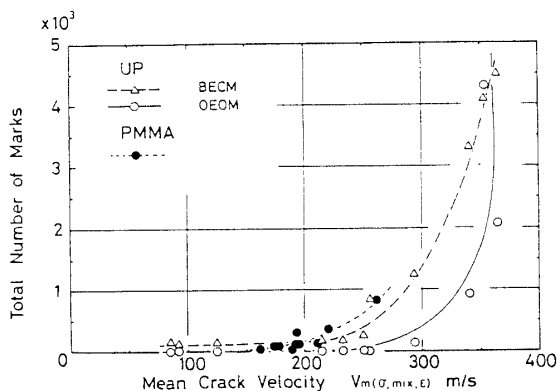


Fig. 18 Relationship between the total number of marks and the mean velocity for UP and PMMA.

4. 結 言

大型中央(一次)き裂付き板材試片の一次き裂半長 C_{01} を約3.0mmから100mmまで変化させ、き裂伝ば速度と破面模様との関係を調べた。一次き裂が短いものから長いものへとき裂伝ば様式が変化し、破壊強度は減少する。もろい不飽和ポリエステル樹脂(UP)と靱性のあるメタクリル樹脂(PMMA)の結果でこれらの検討を比較・検討し次の結言を得た。

- (1) UPおよびPMMA共に一次き裂が長くなるとき裂伝ば様式が定応力条件、混合条件および定ひずみ条件へと変化する。
- (2) 各条件域試片のき裂伝ば速度の相対一次き裂伝ば距離 C_1/C_{01} による変化はそれぞれの理論解でよく近似できる。
- (3) 各試片の平均き裂伝ば速度は相対一次き裂長さ C_{01}/W の増加と共に双曲線的に減少し、この傾向は破壊強度 σ_f (gross)の C_{01}/W による減少曲線に類似している。
- (4) 破面模様形状(両端閉そく模様および一端開放模様)の C_1/C_{01} による競合や破面模様密度(または数)の C_1/C_{01} による変化はき裂速度変化とよく対応している。
- (5) UP試片はもろくて、弱いため平均き裂伝ば速度が大きい値まで達し、模様数(または密度)もそれと共に大きな値まで増加する。
- (6) PMMA試片は靱くて、強いため、平均き裂伝ば速度は比較的小さく、模様数もUP試片ほど大きな値に達しがたい。
- (7) 破面模様数は破壊強度と共に変化するというよりむしろ平均き裂伝ば速度と共に変化している。

参 考 文 献

- 1) J. A. Kies, A. M. Sullivan, G. R. Irwin, J. Appl. Phys. 21 (1950), 176.
- 2) G. R. Irwin, J. A. Kies, Welding J. (Res. Suppl.), (1952), 955.
- 3) 瀧本・ほか3名, 機論, 49-443, A (1983), 803.
- 4) 瀧本・吉村, 機論, 52-476, A (1986), 818.
- 5) 瀧本・吉村, 機論, 52-476, A (1986), 801.
- 6) 瀧本・ほか2名, 機論, 52-476, A (1986), 809.
- 7) 瀧本・増田, 機論, 53-487, A (1987), 490.
- 8) 瀧本・ほか2名, 機論, 53-491, A (1987), 1332.
- 9) 瀧本・吉村, 機論, 53-493, A (1987), 1754.
- 10) 瀧本・ほか2名, 機論, 54-507, A (1988), 2039.

- 11) 瀧本・小田, 機講論, No.865-1 (1986-3), 16. 投稿中, 論文 No.88-0199.
- 12) Berry, J. P., J. Mech. Phys. Solid, 8 (1960), 194.
- 13) Berry, J. P., J. Mech. Phys. Solid, 8 (1960), 207.
- 14) 瀧本・ほか 3 名, 投稿中, 論文 No.88-1374.
- 15) 瀧本・ほか 7 名, 山口大学工学部研究報告, 31-2 (1981), 35.

(昭和63年10月15日受理)