

片側き裂付き引張試片の設計による破壊強度, き裂速度および破面模様の変化 (不飽和ポリエステル樹脂の場合)

瀧本 昭夫*・田中 稔**・藤井 敏男***

Variations of Fracture Strength, Crack Velocity and Fracture Surface Marks due to the Design of a Single Edge Notched Tensile Specimen (In the Case of Unsaturated Polyester Resin)

Akio TAKIMOTO, Minoru TANAKA and Toshio FUJII

Abstract

Brittle fracture strength and crack propagation velocity change with the design factors of a single edge notched tensile specimen, for example, the length to width ratio (L/W), the location and number of the loading pins, crack length (C_{01}) and its tip radius (ρ). Fracture strength shows a little change with an decrease in L/W when sharp tip radius specimens tensioned by two-bolts at near the left-side edge and it shows the notable change of strength when specimens tensioned by a pin. The specimens having the radius of 0.5mm, tensioned by a pin, show a strong effect of L/W compared with above two. Fracture strength in this case, of course, is larger than the former two cases. Fracture strength of those having a saw-cut tip decreases as the L/W decreases and the effect of L/W seems to be obvious. The measured crack velocity is generally larger the larger the fracture strength. The crack propagates very slowly (at the order of mm/sec.) for the small L/W specimens of sharp tip radius and it does very quickly (at the order of m/s) for the large L/W ones. The crack velocity of specimens having a saw-cut tip reaches to the maximum of about 600 m/s and it decreases as the crack propagates. The fracture surface marks of both end closed mark (like an ellipse) and one end opened mark (like a parabola) are observed on the saw-cut tip specimens and the crack arrest-lines dominates in specimens having a sharp tip radius. Detailed analysis of those marks are given.

1. 緒 言

片側き裂 (Single edge notch, 以後 SEN と略す) を有する試片の偏心引張り試験は試片厚さ (t), 幅

(W), 長さ (L), 初期き裂長さ (C_{01}), 設計因子や負荷様式 (集中または分布) および集中負荷作用位置などによって破壊強度, 破壊靱性, き裂伝ば速度などが変わるため非常に複雑である。にもかかわらず, 試片加工や引張試験およびその治具が比較的容易に準備できるため広範囲の研究に適用されている。たとえば, せい性プラスチックの高速 ($\approx 400\text{m/s}$) き裂伝ば速度の測定^{1),2),3)}や高強度合金鋼に対する ASTM, 面ひずみ破壊靱性試験 (コンパクト・テンション試片⁴⁾) など

*生産機械工学科

**生産機械工学科 (現, 日本電装株式会社)

***大学院 生産機械工学専攻

は代表的なものであろう。また、理論的な研究では二重片持梁 (Double Cantilever Beam, 以後 DCB と略す) として求めた高速き裂伝ば現象の動力学的な解も報告されている⁵⁾⁶⁾。

ここでは筆者らのファイナ・セラミックス片側き裂付き引張試験の研究⁷⁾と同時に進めている SEN または DCB 型不飽和ポリエステル樹脂引張試片による研究結果を報告する。これら試片の加工はセラミックス試片に比べ、当然容易であり安価なため、前述の設計因子や負荷様式による破壊強度、き裂伝ば速度、破面模様などへの影響を調べるのに適していることは言うまでもない。

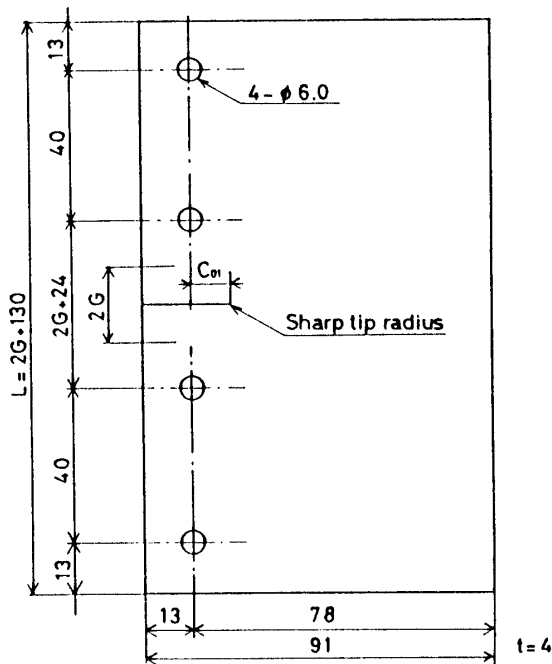
2. 実験方法

供試材は熱硬化性不飽和ポリエステル樹脂 (Unsaturated Polyester Resin, 以後 U P と略す) 薄板である。設計因子および負荷様式によって次の 4 種類の試験に分けた。まず、Test I では試片厚さ $t = 4$ mm, 試片全幅 $W_0 = 91$ mm, 試片長さ (L) を 130.94 mm から 442.0 mm まで 6 段階に変化させたものに鋭い先端を持つ片側き裂

(長さ 23 mm) を導入し、上下部各 2 本のボルトで締め付けて引張破断させた。これを Sharp tip radius, two-bolts と呼んだ。この例を Fig. 1 に示した。図のごとく、左端から 13 mm の位置上下を 6 mm ϕ のボルト各 2 本で治具 (16 mm 幅) に締め付けて破壊試験に供するものである。この場合正味試片幅 W は 78 mm, 初期き裂長さ $C_0 = 10$ mm, 試片ゲージ部半長 (上下治具間の距離の半分) G は 0.468 mm から 156.0 mm まで変化させたことになる。このうち $G = 0.486$ mm および 9.75 mm を持つものは明らかに DCB 型試片となる。次に Test II は同形状の試片を上下 1 本のピンで治具に取り付けたもので、これを Sharp tip radius, one-pin とした。ここでも G を 0.486 mm から 156.0 mm まで 6 段階に変化させた。Test III は厚さ、外形共に同じ試片でき裂先端半径 (ρ) を 0.5 mm とした鈍いき裂付き試片の one-pin によるものである。ここでも G は 9.75 mm から 156.0 mm まで 5 段階に変化させた。最後の Test IV はき裂先端を Saw-cut (0.5 mm 厚の糸ノコ歯による切断) のままとしたもので、やはり one-pin による試験である。 G はやはり 0.396 mm から 132.0 mm まで 7 段階に変化させた。全ての引張試験は 49 kN 容量の静的試験機 IS-5000 を用いて、温度 (20 \pm 2 $^{\circ}$ C), およびクロスヘッド速度を一定 (0.5 mm/min) として、大気中で行った。

ぜい性プラスチックのき裂伝ば速度は大体 400 ~ 600 m/s に達する上に、試片幅が 78 mm であるため破断に要する予想時間は $130 \sim 195 \times 10^{-6}$ sec である。その間にこれらの試片のき裂伝ば速度は加速・減速過程を経るため高速度カメラでは測定し難いので、速度ゲージ法^{1),8)}を用いた。これは試片表面に塗布した銀ペイント細線間をき裂が横切る速度をデジタル・ストレージ・オシロ・スコープ (DSO, 10 ns まで測定可能) で測定する方法である。

破面模様は光学顕微鏡 (1000 倍まで) または必要に応じて SEM により観察した。一次き裂および二次き裂伝ば速度の干渉により生じる模様は、当然、3次元の広がりをもっているが、ここでは平面的な形状の変化を調べ、それらの設計因子、負荷様式、き裂伝ば速度などによる変化を求めた。これら模様形状やき裂伝ば距離による変化は模様の理論式 (直線伝ばによる加速度モデル解^{9),10)}により近似定量および解析した。また、き裂伝ば速度測定結果よりき裂先端の動的応力拡大係数 (K_D)^{11),12),13)}の変化・変動を求めるとともに Freund の式¹⁴⁾による動的ひずみエネルギー解放率の変化も求め、これら模様の変化・変動を検討した。



Test I ; Sharp radius, two-bolts

G/W	0.006	0.125	0.5	1.0	1.5	2.0
L	130.9	149.5	208.0	286.0	364.0	442.0

Fig. 1 Design of an edge notched tensile specimen (the length is changed).

3. 結果および検討

3.1 破壊強度

鋭いき裂先端を有する SEN 引張り試片を 2 本のボルトで治具に取り付けた場合の破壊強度およびゲージ部半長と試片正味幅の比, G/W の関係を Fig. 2 に示した. G/W が 2.0 すなわち試片全長 $L=442.0\text{mm}$ のものから短くなるにつれて, 正味破壊強度 σ_f はやや増加した後, 非常に緩やかに減少している. 各 G/W の設計値で 2~5 本の重複試験をした結果である. き裂先端の鋭さ (sharp crack にするため, 細幅ノコギリで導入した溝先端にカッターの刃を入れ, 衝撃を加え自然き裂を少し走らせたもの) や試片厚さ方向へのき裂長さの不均一がデータ点のばらつきに反映していると考えられる. このように 2 本のボルトで保持すると, 治具による変形拘束が影響するのか G/W の影響は小さい. なお, データ点を結んでいる実線は各 G/W の平均値間を連結したものである. 次に Test II, すなわち同試片を one-pin 支持で引張り破断させると Fig. 3 のごとくなり, 明らかに G/W の影響を示す. G/W が小さくなるに従って σ_f は増加し, ピーク値を示した後 $G/W=0.125$ で急激に強度が低下している. なお, G/W をさらに短くして 0.006 近傍の設計にすると (極端な DCB 型試片), き裂が直進しなく (上または下側に曲がり) 試片の他端まで伝ばすとは限らない. この現象は他の大きさの試験でも, 同様に現れることが報告¹⁵⁾されている. $G/W=0.125$ の設計ではあるものはき裂が直進し, またあるものは上・下に着ながら S 字型を描いて伝ばする. したがって, この材料では $G/W=0.125$ 近傍がき裂の直進する設計限界であろう. なお, これら鋭いき裂先端を有する試片は two-bolts (Test I) で破壊させても, one-pin (Test II) で破壊させても, 正味破壊強度は最大 0.8MPa 近傍となる.

次に同一試片設計でき裂先端を $\rho=0.5\text{mm}$ と丸めて, その応力集中を小さくした場合 (Test III) の σ_f と G/W の関係を Fig. 4 に示した. やはり $G/W=2.0$ より減少するにつれ約 1.7MPa から約 2.0MPa 近傍まで強くなり ($G/W=1.0$ で最大), その後 G/W の減少とともに σ_f が減少している. その減少の割合は Fig. 3 の one-pin の例より更に大きい. また, き裂先端が Saw-cut 状態のまま one-pin 引張りのもの (Test IV) の結果を Fig. 5 に示した. $G/W=2.0$ から試片が短くなるにつれて, 漸次減少している. き裂先端が Saw-cut 状態ではたとえ $G/W=0.06$ と小さくなくても, き裂が試片他端まで直進伝ばする. G/W の小さい試片設計では, Sharp tip radius, one-pin の例 Fig. 3 に比

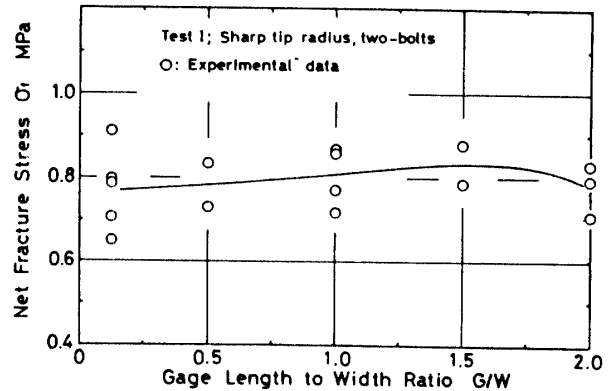


Fig. 2 Relationship between the gage length to width ratio and net fracture strength for the test I.

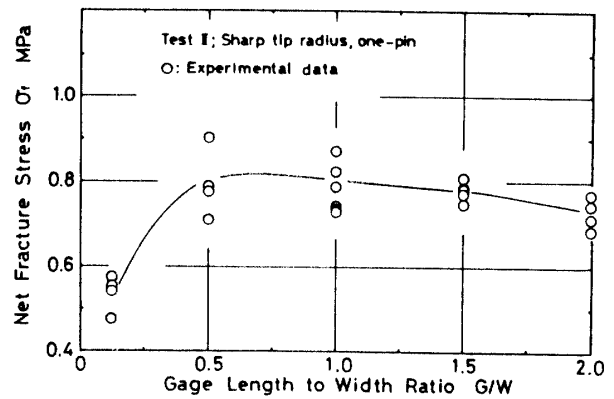


Fig. 3 Relationship between the gage length to width ratio and net fracture strength for the test II.

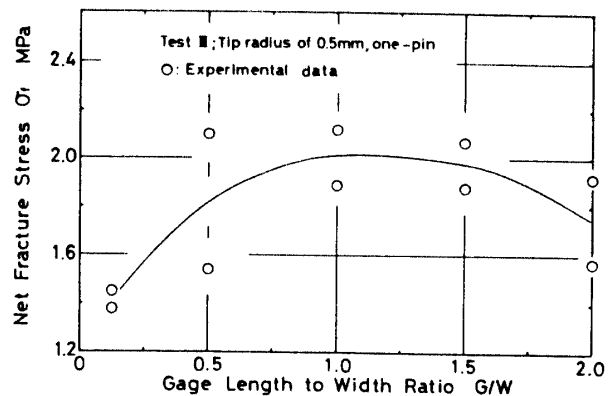


Fig. 4 Relationship between the gage length to width ratio and net fracture strength for the test III.

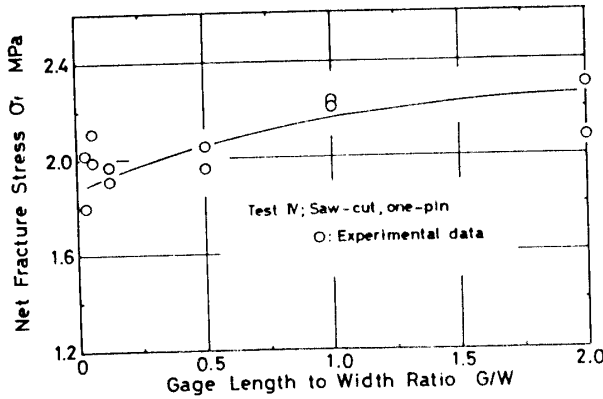


Fig. 5 Relationship between the gage length to width ratio and net fracture strength for the test IV.

べ同一試片設計でも、応力集中係数 (K_t)

$$K_t = 1 + 2 \times \sqrt{C_{01}/(\rho + 2\eta)} \quad (1)$$

ここで、

ρ : き裂先端半径

η : き裂先端の塑性域の大きさ

が小さくなり、破壊強度 (σ_f) は当然大きくなる。事実、Sharp き裂の σ_f は 0.8MPa 近傍しか達しないが、鈍いき裂試片や Saw-cut 試片は約 2.0~2.2MPa の破壊強度まで達している。

3.2 き裂伝ば速度変化

前項で述べたごとく鋭いき裂を有する SEN 引張り試験では破壊強度が低く、き裂も直進しない例が現れる。一方、鈍いき裂先端を持つものでは破壊強度が大きく、き裂もすべて直進している。一般にぜい性材料ではき裂伝ば速度は破壊靱性値と次の関係⁽⁶⁾

$$V_c = A \times (K_{Ic})^n \quad (2)$$

ここで、 A , n はクラック成長パラメータにあり、破壊靱性値 K_{Ic} は破壊強度と次の関係

$$K_{Ic} = \sigma_f \times \sqrt{\pi C_{01}} \times F(C_{01}/W) \quad (3)$$

にある。したがって、前項で述べた破壊強度も、き裂伝ば速度と密接な関係を持っている。また、試料破面に現れる模様形状や密度、それらの大きさなどの変化は、当然、き裂伝ば速度に依存している。

そこで各設計試片のうち、代表的なものを選定し、試料片側表面に銀ペイントをつけ、実際の伝ば速度を測定してみた。Fig. 6 は Test I, Sharp tip radius 試片, two-bolts 引張りによる速度変化である。G/W = 2.0 の試片はき裂の伝ばとともに約 200m/s まで加速されて伝ばし、相対き裂伝ば距離 $C_1/C_{01} \approx 6.0$ 近傍で $V \approx 0$ m/s 近くに減少し、それ以後は伝ば・停止過程

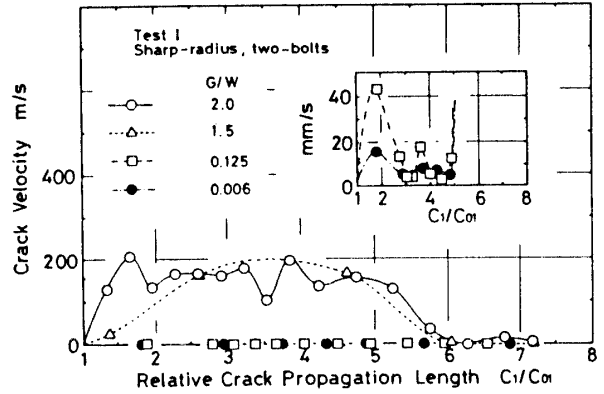


Fig. 6 Crack velocity change due to the relative crack propagation length for the test I.

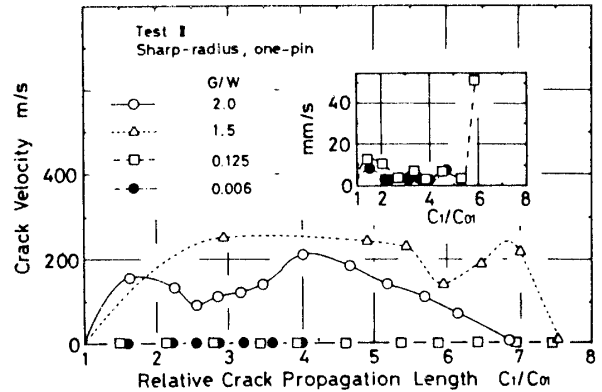


Fig. 7 Crack velocity change due to the relative crack propagation length for the test II.

を繰り返して破断に至っている。事実、破面上には上記 C_1/C_{01} 近傍より多くの Crack arrest line (き裂伝ば停止線) が観察されている。G/W = 1.5 の結果は初期の立ち上がりが遅いため伝ば距離全域にわたっての DSO のサンプリング時間の設定が難しく多くの測定点を得られていないが、点線で示したごとく約 200m/s の速度に達してから減少することが分かる。試片が G/W = 0.125 と短くなるとき裂伝ば速度が非常に遅くなり (前者の約 1/5000)、き裂伝ばが弱い加速・減速過程で特定の距離 ($C_1/C_{01} \approx 4.5$) だけ伝ばしてのち破断に至ることが分かる。G/W = 0.006 と非常に短くなり、DCB 型になるとさらに遅い速度 (一定間隔の平均速度 ≈ 20 mm/s) で伝ばし、 $C_1/C_{01} \approx 4.5$ 近傍から少し速い過程に移行している。このような破面には当然 Crack arrest line が非常に多く現れている。また、two-bolts の引張りによる変形拘束の強い場合は、G/W = 0.006 の設計試片でもき裂が直進伝ばしている。鋭いき裂付

き裂試片の one-pin による破壊試験結果 (Test II) を Fig. 7 に表した. Test I による場合とよく似ているが, $G/W=2.0$ および 1.5 では $C_1/C_0 \approx 7.0 \sim 7.5$ までき裂が高速過程で伝ばしてのち伝ば・停止過程が繰り返されている. この試験の $G/W=0.125$ および 0.006 の場合では, 初期き裂伝ば速度は前者より, より遅い平均値 ($15 \sim 10 \text{ mm/s}$) となっている. 後 2 者の試片では, き裂伝ば速度が遅いため, クロスヘッド伸びとともに試片の負荷作用点による大きな曲げたわみを生じ, き裂が直進しないのではないかと考えられる. $G/W=2.0$ の速度変化は $G/W=1.5$ の結果よりも小さく, σ_t と G/W の大・小関係 (Fig. 3) とよく一致している. 最後に, き裂先端が Saw-cut, one-pin (Test IV) の結果を Fig. 8 に示した. Test I および Test II とは異なり, $G/W=0.06$ の短い試片でもき裂速度は $300 \sim 400 \text{ m/s}$ の高速まで加速され, $C_1/C_0 \approx 2.4$ 近傍から減速過程に入っている. $G/W=1.0$ および 2.0 と試片が長くなるにつれ初期立ち上がり速度が大きくなっている. また, G/W が大きいほど加速過程から減速過程への移行も早いようである. Fig. 5 でふれたように G/W の減少とともに σ_t が段々小さくなっているが, 速度変化も G/W の減少とともに最大到達値が小さくなる. one-pin 負荷であるにもかかわらず $G/W=0.06$ 試片でき裂が直進伝ばしているのは, 高速伝ばによるものであろう. なお, Saw-cut 試片は試片幅, 試片長さは Test I, II, および III と同一であるが, C_0 が 20 mm と長いいため, 破断にいたる相対き裂伝ば距離 (C_1/C_0) が 3.3 と小さくなる.

次に同一 G/W を有する場合の Test の違いによるき裂伝ば速度を直接比較した. Fig. 9 は $G/W=0.006$ の結果である. 前項でも述べたように Test II のものは緩徐伝ば途中でき裂が速度ゲージ部外へ曲がってしまうためそれ以後のデータは得られてない. Test I のものは前者よりも強度が大きく (Fig. 2, 3 参照), $C_1/C_0 \approx 5.0$ 位まで緩徐過程で伝ばし速度も少し大きい. $G/W=2.0$ のよる結果を Fig. 10 に比較した. ここでは試片幅や長さが同一設計であるが Test IV のものは前述のごとく初期き裂長さ C_0 が異なるので同一横軸で表示するためにき裂伝ば距離の比率をとった. Test IV は破壊強度も大きく (約 2.2 MPa), 初期加速も非常に大きく現れてのち, 減速過程をたどっている. Test I および Test II は前者に比べ $0.75 \sim 0.78 \text{ MPa}$ と強度が低く, き裂速度も当然小さく現れている.

以上, SEN 引張り試片は設計因子 (G/W), き裂先端の鋭さおよび負荷様式などにより破壊強度が変わり, き裂伝ば速度も大きく変化する. この報告では, SEN

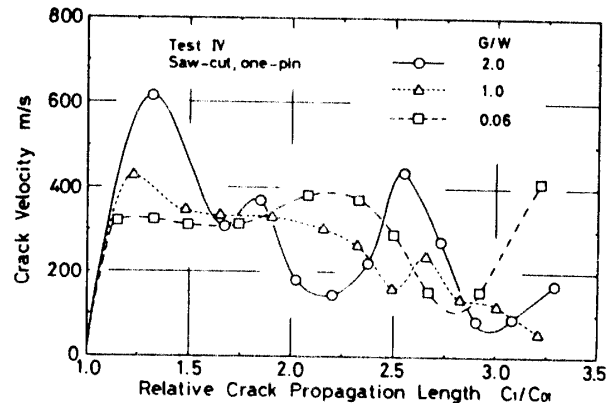


Fig. 8 Crack velocity change due to the relative crack propagation length for the test IV.

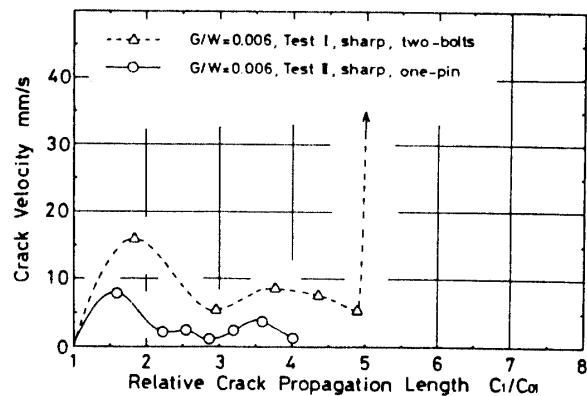


Fig. 9 Comparison of crack velocity of $G/W=0.006$ specimens for the tests I and II.

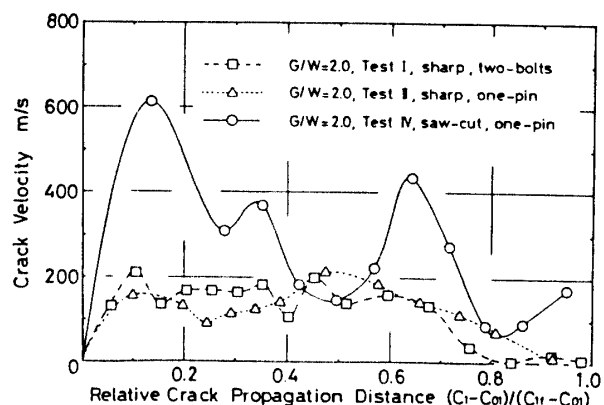


Fig. 10 Comparison of crack velocity of $G/W=2.0$ specimens for the tests I, II and IV.

引張り試片のうち、き裂内(初期き裂内に主たる引張り負荷が作用するもの¹⁷⁾)偏心負荷様式の結果を検討したが、主たる引張り負荷がき裂先端上に作用する場合やき裂外(き裂外負荷様式¹⁸⁾)にある場合は強度変化およびき裂伝ば速度変化がこれらと異なる²⁾ことは言うまでもない。

3.3 破面模様形状とその定量

ぜい性プラスチックの破面上には近似だ円状などの両端閉そく模様(Both end closed mark, 以後BECMと略す)や放物線状などの一端開放模様(One end opened mark, 以後OEOMと略す)が現れることは古くから知られており^{19),20)}これらは一次および二次き裂伝ば速度による干渉の結果であることは報告されている^{19)~22)}。

瀧本^{9),10)}らは、一次き裂が加速度を伴って伝ばする場合、そのき裂先端直前 d なる距離のところの核となる部分(不純物など)が動的応力の場の大きさにより刺激され、そこから二次き裂が発生し加速度を伴って伝ばし、両者が干渉して破面模様形成するモデル解を次のごとく導出している。

$$\frac{\sqrt{\alpha_2 - 1} \times \sqrt{\alpha_2 - (n_2 - 1)} + n_2 \times l \cdot n \{ \sqrt{\alpha_2 - 1} + \sqrt{\alpha_2 - (n_2 - 1)} \} - n_2 / 2 \times l \cdot n (2 - n_2)}{= \beta_1 \times (d + x) / C_{02}} \quad (4)$$

ここで、

$$\alpha_2 = C_2 / C_{02}$$

$$\beta_1 = V_{2max} / V_1$$

n_2 : 材料定数

d : 臨界距離

上式にみるごとく、一次き裂速度 V_1 が二次き裂核を活性化することにより模様を生成するため、 V_1 が非常に小さいと一次き裂先端の動的応力の場も小さく、二次き裂の活性化もなく、結果として、破面模様を生成しないことになる。これまで述べてきた設計試片の例でも Test I や Test II の $G/W = 0.006$ や 0.125 のものは予測通り BECM や OEOM を生成していない。これら試片のように一次き裂速度が遅くなるとき裂停止線がき裂伝ばの主たる形跡である。Fig. 11 は Test I, $G/W = 0.125$ 試片のき裂伝ば距離による停止線数の変化例である。この試片は mm/s 単位の平均き裂伝ば速度を示している。(Fig. 6)。この速度では停止線が生じ、その数はき裂伝ば距離が大きくなるほど多くなる。

き裂伝ば速度が Test IV (Fig. 8) のように大きくなると BECM や OEOM が生成される。Fig. 12(a) は $G/W = 0.06$ の試片、 $C_1/C_{01} = 1.07$ のところで観察されたもので、頭部に小さな丸い核(その直径を $2 \times C_{02}$ とす

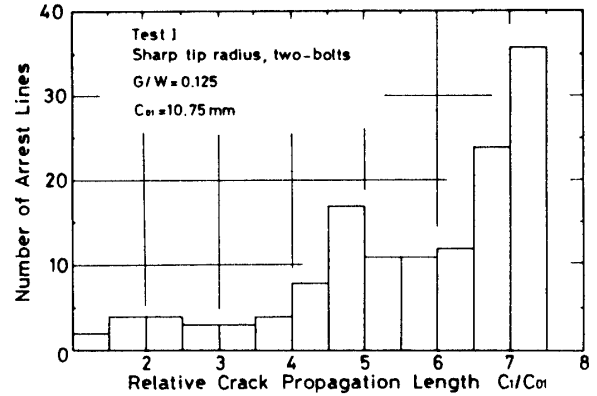


Fig. 11 Number of observed crack-arrest lines is plotted to relative crack propagation length for the specimen of with $G/W = 0.125$ in the test I.

る)を有する両端閉そく模様の一例である。その長さ a および幅 b は各々 $111.7 \mu\text{m}$, および $16.6 \mu\text{m}$ である。今、この模様を破面模様の近似式(4)で速度比 $\beta_1 = 0.55 \sim 0.98$, 材料定数 $n_2 = 1.6$, 干渉開始距離(模様先端から核の中心までの直線距離)の実測値 $e = 2.88 \mu\text{m}$, および $C_{02} = 0.96 \mu\text{m}$ を用いて定量表現したものが、その下の模様であり、一次および二次き裂の伝ば速度に基づいた式はこの模様をよく近似している。Fig. 12(b) は $G/W = 0.06$ 試片、 $C_1/C_{01} = 1.14$ の一端開放模様例である。頭部の核もはっきり見え、その C_{02} および e の測定値や β_1 , n_2 の仮定値より前式により近似定量したものが、その下の形状である。この模様もよく表現できている。一試片の破面上には、強度やき裂伝ば速度により非常に多くのこのような模様が生成されている。それらの中には、当然、これらの基本模様の変形したものも含まれ、例えば、Fig. 12(c) のような模様(かぶとがに模様と名付けている)や Fig. 12(d) のようなもの(ロケット模様と名付けている)もあり、後2者もまた一次および二次き裂伝ば速度に関与し、その生成機構も解明されている。ここでは紙面の都合でその近似定量にはふれていないが、式(4)で、 e , C_{02} , β_1 , および n_2 などによりこれら変形模様もよく近似定量することができる。Fig. 13 は Test IV の G/W によるこれら模様総数の変化である。 $G/W = 2.0$ 試片は破壊強度 ($\sigma_f = 2.2 \text{MPa}$) も強く、き裂伝ば速度が大きいため模様総数も多く、当然、そのき裂伝ば距離による密度も高い値に達している。 G/W が 1.0 および 0.06 と減少するにつれ、 σ_f , V_1 , 模様総数およびその密度も小さな値になっている。

次にこれら模様各部の諸寸法を光学顕微鏡下または

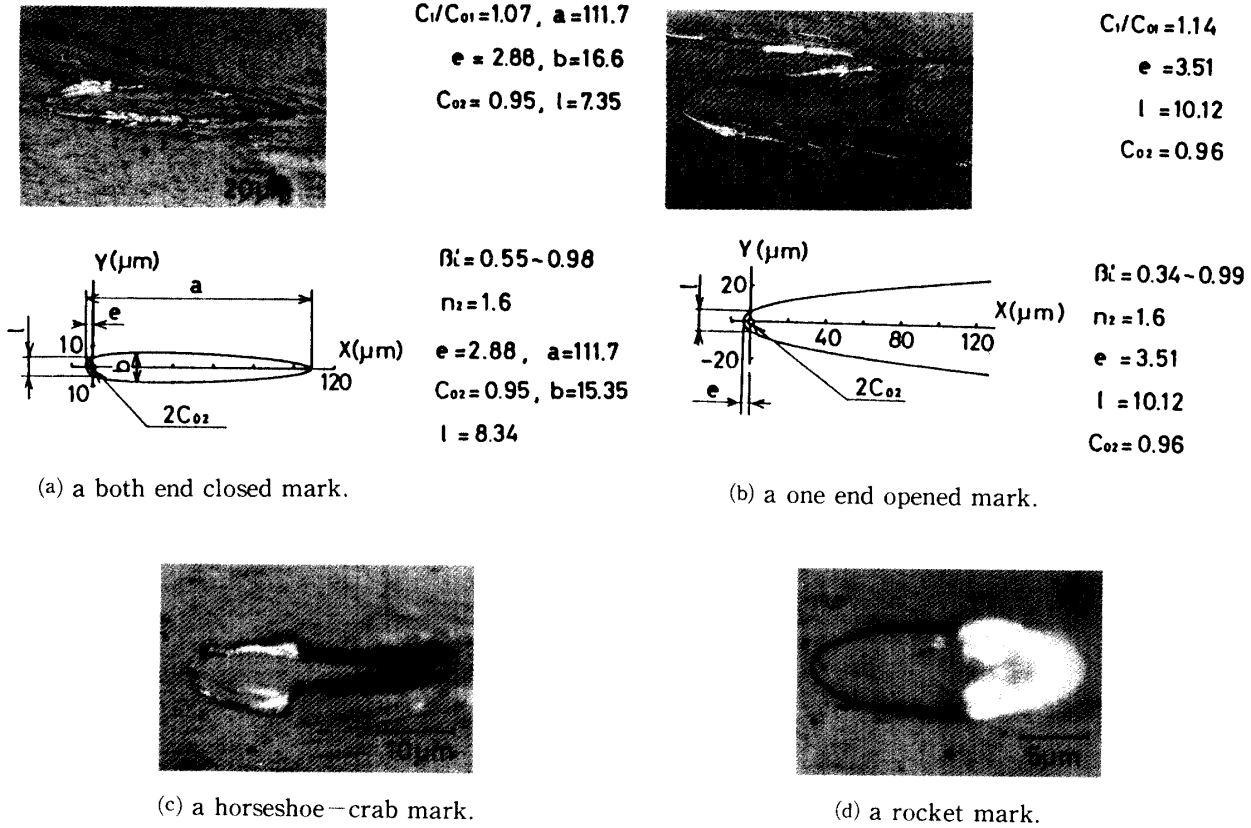


Fig. 12 Fracture surface marks observed on the specimen of $G/W = 0.06$ in the test IV and their analytical approximations by the equation of fracture surface marks. Eq.(4).

SEM 写真上で測定し、解析した結果を報告する。Fig. 14は Test IV, $G/W = 1.0$ 試片の破面上に観察された BECM の相対長さ a/C_{02} と相対幅 b/C_{02} 変化である。近似だ円模様の a/C_{02} が大きくなればなるほど、その相対幅 b/C_{02} も大きくなっている。△印は個々の模様測定値である。同図に破面模様の式(4)よりこれら a/C_{02} , b/C_{02} の理論関係を点線で描いた。β_iの小さいものほど、すなわち二次き裂伝ば速度が小さいほど太く短いだ円状になり、逆にβ_iが大きいほど細長いだ円模様が生成する関係を表している。理論曲線はデータ点をよく包括することができる。次に BECM および OEOM の頭部、二次き裂核上の模様最小弦長 l と干渉開始距離 e の比を e/C_{02} の大きさにより表してみると Fig. 15のごとくなる。この図は OEOM の測定例のみ示しているが、BECM でも同様の関係が得られる。図中点線で表したものは、式(4)に n_2 や β_i を仮定した理論曲線である。l/e が大きいものはβ_iが大きく、すなわち二次き裂速度の大きい場合で、多くの模様はβ_i≒1.0近傍にあることがわかる。β_i値を小さなステップで変化させて点線を描くとデータ点の上から下まで逐次近似できる曲線

が得られるが、ここではその代表的な3本の線で表現している。Fig. 16は OEOM, l/e 値のき裂伝ば距離による変化・変動を表している。中央部に非常に多くのデータが集中している。l/e 値は3.5近傍を中心に変動しており、前図から1.0近傍のβ_i値をもつ OEOM が、き裂伝ば初期 ($C_1/C_{01} \leq 2.25$) に生成されることを示している。

これまでにも述べてきたように破面模様の定量は干渉開始距離 e と二次き裂核 C_{02} の比 (相対干渉開始距離) e/C_{02} に支配されている。この値の小さいものは比較的近似だ円模様が多く、逆にそれらの大きいものは放物線模様が多い。今、Test IV, $G/W = 1.0$ 試片の OEOM の e/C_{02} 測定値がき裂伝ば距離とともに変化する様子を Fig. 17に示した。き裂伝ば初期は非常に大きな e/C_{02} の模様が生成され、き裂伝ばとともにそれが小さくなっている。模様の e/C_{02} が大きいということは一次き裂速度が大きく、その先端の動的応力場が大きいことを表しており、逆に、その小さいものはそれらの小さいことを表している。今、Fig. 8, $G/W = 1.0$ の一次き裂伝ば速度を DCB, 定応力き裂伝ば速度の

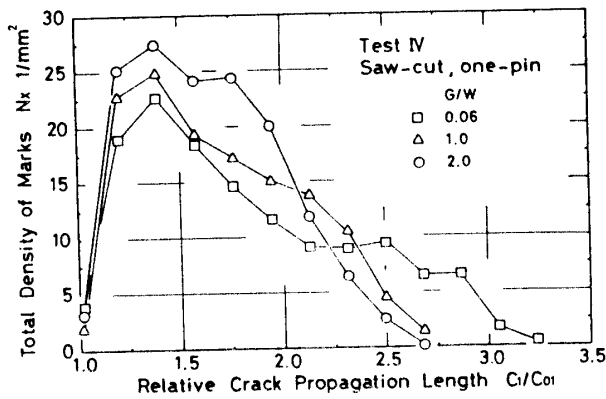


Fig. 13 Total density of fracture surface marks observed in a specimen is plotted to relative crack propagation length for the test IV.

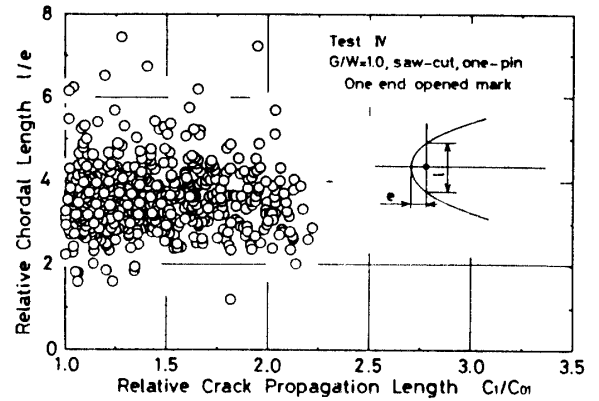


Fig. 16 Variation of the relative chordal length with respect to the relative crack propagation length for the specimen of $G/W=1.0$ in the test IV.

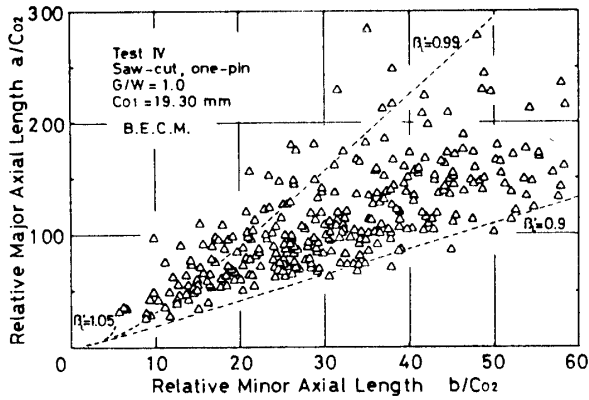


Fig. 14 Relation between the relative major and minor axial lengths for the specimen of $G/W=1.0$ in the test IV.

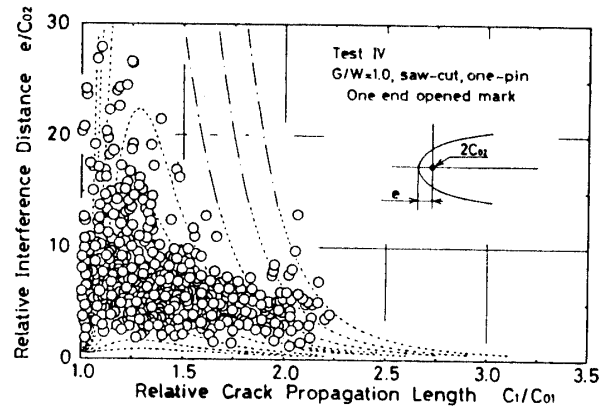


Fig. 17 Change of the relative interference distance due to the relative crack propagation length for the specimen of $G/W=1.0$ in the test IV.

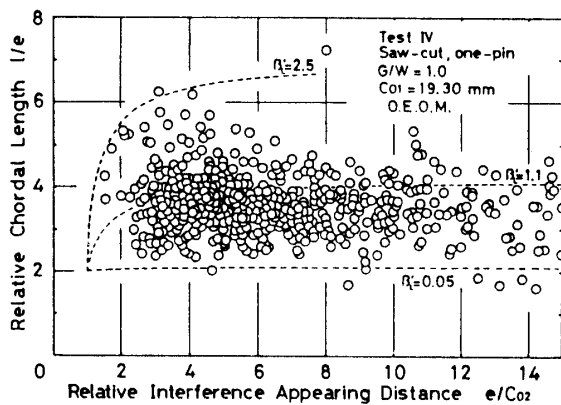


Fig. 15 Variation of the relative chordal length with respect to the relative interference appearing distance for the specimen of $G/W=1.0$ in the test IV.

理論解^{5),6)}

$$V_1/V_{1max} = (\alpha_1)^{-(1+\eta)/2\eta} \times \{1 - (1/\alpha_1)^{(2\eta+1)/\eta} - n_D \times (1 - 1/\alpha_1) \times (1/\alpha_1)^{(\eta+1)/\eta}\}^{1/2} \quad (5)$$

ここで、

$$V_{1max} = [6\eta^2 / (2\eta + 1) / (\eta + 1)]^{1/2} \times (\alpha I)^{1/2\eta} / (\rho h)^{1/2} \times P_c^{(\eta-1)/2\eta} \times C_{o1}^{-(\eta+1)/2\eta}$$

η : 非線形弾性を表すパラメータ

n_D : 材料定数

で近似すると後述の Fig. 19のごとくなり、速度測定値をかなりよく表現している。この式(5)による速度変化に速度と動的応力拡大係数 K_D の Γ 関数^{(11)~(13)}を組み合わせ、一次き裂伝ばによる K_D の変化を求めることができる。その上、き裂伝ば速度が振動を伴うものと仮

定すると K_D の変動幅も表現することができる^{23),24)}。このようにして求めた K_D 変化・変動曲線を Fig. 17 に点線で表した。点線は破面模様の e/C_0 の変化・変動を包括することができる。き裂伝ばとともにき裂先端の動的応力拡大係数が変化・変動することにより、各々の e/C_0 値を持つ破面模様が生成されると考えられる。なお、この図の K_D 値の縦軸の値は相対的な変化を表現したもので、絶対値の大きさは正しいとは限らない。Fig. 18 は前図の相対干渉開始距離より、破面模様の式(4)で $n_2=1.6$ として、一次き裂先端が二次き裂核を活性化する相対臨界距離 d/C_0 を求めて、 C_1/C_0 による変化・変動を表したものである。やはり、き裂伝ば初期には一次き裂が急加速されるため (Fig. 19 参考)、その先端

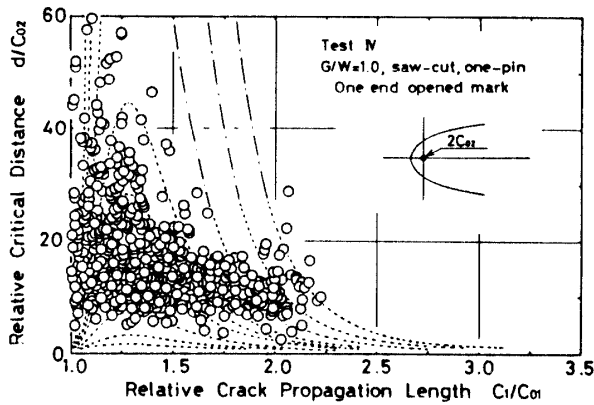


Fig. 18 Change of the relative critical distance due to the relative crack propagation length for the specimen of $G/W=1.0$ in the test IV.

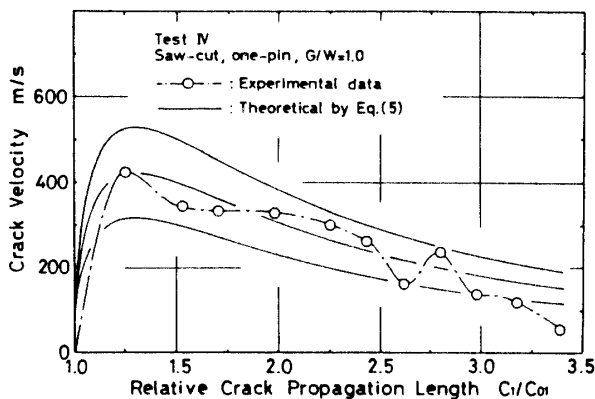


Fig. 19 Variation of the measured crack velocity due to the relative crack propagation length and its theoretical approximation by Eq.(5) for the specimen of $G/W=1.0$ in the test IV.

の大きな K_D 値により相対臨界距離の大きい破面模様が多く生成され、き裂伝ば速度の増加とともに段々と小さくなっていく。この図にも、前述の速度変化と Γ 関係より求めた一次き裂先端の動的応力拡大係数の変化・変動を点線で記した。これらの曲線はデータ点の傾向をよく表現している。 K_D より Freund の理論により動的ひずみエネルギー解放率 \dot{W}_D を求めたものも K_D 同様の変化・変動を示し、後者の値も破面模様の変化・変動に関与していることは明らかである。Fig. 19 は前述のように Test IV, $G/W=1.0$ 試片の速度測定値を DCB の理論解、式(5)で近似表現したものである。SEN 引張り試験、Test IV のような加速・減速伝ばをするものの速度変化はこの式でよく近似定量できることはほかにも報告¹⁵⁾されている。

4. 結 言

片側き裂付き引張試片の幅 (W)、厚さ (t) を一定にして、長さ (L) を種々変化させたものに、鋭いき裂、鈍いき裂 ($\rho=0.5\text{mm}$) あるいは Saw-cut き裂を導入し、two-bolts または one-pin で引張り破壊させた結果を報告した。破壊強度、き裂伝ば速度および破面模様などの上記因子による変化を検討し次の結言を得た。

- (1) 鋭いき裂を持つ試片の破壊強度は 0.8MPa 近傍の最高値を示し、鈍いき裂をもつものでは 2.1~2.2 MPa の強度を示した。
- (2) いずれの試験も、設計因子 G/W による影響を示し、鋭いき裂を有する試片の two-bolts 引張り (Test I) と one-pin 引張り (Test II) および鈍いき裂 ($\rho=0.5\text{mm}$) を有する one-pin 引張り (Test III) は G/W の減少とともに破壊強度が上昇・下降の変化を示した。Saw-cut き裂を有する試片の one-pin 引張り (Test IV) は G/W の減少とともに強度は単調に減少する。
- (3) G/W 減少による強度低下は Test III, Test IV, Test II, 及び Test I の順に大きく現れる。
- (4) き裂伝ば速度は鋭いき裂を有する試片の G/W の小さいものでは非常に遅い速度 (mm/s の単位) で伝ばし、鈍いき裂 (saw-cut) を有する試片では G/W が小さくても非常に速い速度 (m/s) で伝ばする。
- (5) いずれの試験も G/W の大きいほどき裂伝ば速度も大きくなり、破壊強度が大きいほど一般にき裂伝ば速度も大きい。
- (6) き裂伝ば速度の小さいものはき裂停止線が多く現れ、両端閉そく模様や一端開放模様が現れ難い。

逆に、き裂伝ば速度の大きいものは停止線がみられず多数の両端閉そく模様や一端開放模様が現れる。

- (7) だ円状の両端閉そく模様，放物線状の一端開放模様に加えてそれらの変形模様，すなわち，かぶとがに模様やロケット模様も現れ，いずれも破面模様の近似式でよく近似定量できる。
- (8) これら破面模様の定量値， a/C_{02} ， b/C_{02} ， e/C_{02} ， l/e ， d/C_{02} などの関係は破面模様の式でよく表現でき，それらの一次き裂伝ばによる変化・変動傾向は速度変化に基づいた動的応力拡大係数 K_D や動的ひずみエネルギー解放率 $\dot{\gamma}_D$ の変化・変動でよく表現できる。

参 考 文 献

- 1) Chubb, J. P., and Congleton, J., Int. Conf. Dyn. Crack Propag., (1973), 439
- 2) Kobayashi, T., and Dally, J. W., ASTM Spec. Tech. Publ., 627 (1977), 257
- 3) Bradley, W. B. and Kobayashi, A. S., Eng. Fract. Mach 3 (1971), 317
- 4) 岡村，線形破壊力学入門，(昭51)，219，培風館
- 5) Berry, J. P., J. Mech. Phys. Solid, 8 (1960), 194
- 6) Sih, G. C., Inelastic Behavior of Solids, (1970), 607, McGraw-Hill.
- 7) 瀧本・末久，機構論，No.875-1 (昭62-3)，34
- 8) 大谷・小林，東京大学宇宙航空研究所報告，17-1，B (昭56)，479
- 9) 瀧本・ほか3名，機論，49-443，A編 (昭58)，803
- 10) 瀧本・吉村，機論，52-476，A編 (昭61)，818
- 11) Kobayashi, A., Ohtani, N., Sato, T., J. Appl. Polym Sci., 18-6, (1974), 1625
- 12) Kobayashi, A. S., Prog. Exp. Mech., Durelli Anniversary Volume, (1975), 83
- 13) Kobayashi, A. S., and Mall, S., Exp. Mech., 18 (1978), 11
- 14) Freund, L. B., J. Mach. Phys. Slids, 20 (1972), 129
- 15) 瀧本・吉村，機論，52-476，A編 (昭61)，801
- 16) 西田，安田，セラミックスの力学特性評価，(昭61)，67，日刊工業新聞社
- 17) 瀧本・増田，機論，53-487，A編 (昭62)，490
- 18) 瀧本・ほか2名，機論，52-476，A編 (昭61)，809
- 19) G. R. Irwin, J. A. Kies, Welding J. (Res. Suppl.), (1952), 955
- 20) J. A. Kies, A. M. Sullivan, G. R. Irwi, J. Appl. Phys. 21 (1950), 176
- 21) Feltner, C. E., Univ. Illinois Theoretical and Appl. Mech. Report, 224 (1962), 1741
- 22) Berry, J. P., J. Appl. Phys. 33 (1962), 1741
- 23) 瀧本・ほか2名，機論，53-491，A編 (昭62)，1332
- 24) 瀧本・吉村，機論，53-493，A編 (昭62)，1754
(昭和63年4月15日受理)