ファイン・セラミックス破面における うろこ状模様の一考察*

瀧 本 昭 夫*¹,

末 久 智 文*²

Discussion of a Scalelike Fracture Surface Mark in Fine Ceramics

Akio TAKIMOTO and Tomofumi SUEHISA

Scalelike marks are usually observed in the fracture surface of a Si_3N_4 specimen tensioned to fracture at 20°C and 500°C. They are the regularly shaped marks, ellipselike and parabolalike ones along with other irregularly shaped marks. The regularly shaped marks are carefully observed and analyzed in the same manner of defining an ellipselike mark (both ends closed mark, BECM) and a parabolalike mark (one end opened mark, OEOM) observed in unsaturated polyester resins (UP) and PMMA, as reported previously. The marks in a smooth specimen are mostly the OEOMs where the crack velocity often reached about 4500m/s at maximum and the BECMs are dominated in the fracture surface of a single edge-notched tensile specimen in which the crack velocity reached the maximum value that is less than the above. The variation of the marks and the mechanism of forming these marks seem to be the same with the cases in UP and PMMA, and they are discussed in detail from the points of fracture strength and the crack velocity change. The shapes of the marks are approximated by the equation of fracture surface marks.

Key Words: Fine Ceramics, Tensile Properties, Crack Propagation, Fracture Surface, Both Ends Closed Mark, One End Opened Mark, Fracture Strength, Crack Velocity

1. 緒言

筆者らはこれまで不飽和ポリエステル樹脂およびメタクリル樹脂薄板材のぜい性破面上に現れる破面模様を調べ、一次き裂および二次き裂伝ば速度の干渉による破面模様の近似式により定量した^{(1)~(3)}。ファイン・セラミックスはプラスチックの様に連続体ではなくサブ・ミクロンから数ミクロン径の粒子からなる焼結体であるためプラスチックにみられる様な輪郭のはっきりした破面模様が現れないが、構成粒子の大きさ近傍の凹凸のある輪郭をもつうろこ状模様(プラスチックに関する報告との整合性から、以後破面模様と呼ぶ)が観察されるものもある。これら破面模様はプラスチックにあらわれる小円状やだ円状の両端閉そく模様(Both ends closed mark, BECM と略す)と放物線状または双曲線状の一端開放模様(One end opened mark, OEOM と略す)および不規則形状(それら形状のく

ずれたものなど)のものがあり、 Si_3N_4 系セラミックスなどの破面に多く観察されている。ここでは、 Si_3N_4 系セラミックス平滑試験片と片側き裂付き引張(Single edge-notched tension, SENT と略す)試験片の20°Cおよび500°Cの破壊試験で観察したものを検討した。き裂伝ば速度の速い平滑試験片ではOEOMが多く観察され、速度の小さいSENT試験片ではBECMが主たる模様を占めている。この事実は、これまでのプラスチックの結果^{(5)~(9) (11) (12)}と非常によく似ている。ここでは、これら模様形状やその解析結果を報告すると共に、破壊強度やき裂伝ば速度などの測定結果からも検討した。なお、 Al_2O_3 系や ZrO_2 系セラミックスでも同様な観察や解析をしているが、ここでは紙面の都合で Si_3N_4 系セラミックスに焦点を絞り報告した。

2. 実験方法

平滑引張試験片は全長58mm×グリップ幅11mm×厚さ2mmで中央に12mm(長さ)×4mm(幅)×2mm(厚)の平行部をもつ形状とした。SENT試験片の長さ、全幅、正味幅(導入したき裂長さを除いた幅)、負荷作用点位置および一次き裂長さ(C_0)などの寸法はCompact-

* 昭和62年3月9日 中国四国支部第25期総会講演会において講演, 原稿受付 平成元年2月28日。

*¹ 正員, 山口大学工学部 (〒755 宇部市常盤台 2557)。

*² 准員, 松下電送(株) (〒153 東京都目黒区下目黒 2-3-8)。

tension型試験片¹³⁾の設計に従った。ここではき裂伝ば速度と破面模様変化の測定を目的としたため板厚を4mmとし(板材が厚くなると板表面層と板厚中心近傍のき裂伝ば速度が異なると考えられる), 切欠先端半径は0.5mm以下とした。使用したセラミックスは Si_3N_4 に少しの Y_2O_3 , Al_2O_3 , AlN を添加した(サイアロン)常圧焼結材である。

20℃および500℃における引張破壊試験は49kNの試験機(IS-5000)を用い, クロスヘッド速度0.5mm/minとした。なお, 平滑試験片用治具は上下方向等の偏心引張りを防ぐため下側のガイド付きケース内を上側のスライダが移動する特殊な治具(ピンによる負荷)を用いた。500℃試験は攪拌翼付きの炉中で, 試験片表面(測定端子の接触による)温度が所望の温度に達してのち約30分保持し, 破壊した。

平滑およびSENT試験片, 20℃のき裂伝ば速度は試験片表面につけた銀ペイント細線をき裂が横切る時間をデジタル・ストレージ・オシロ(100MHz)で測定し求めた。破壊試験片例を図1に示した。なお, 500℃試験では銀ペイントの性質上速度測定ができない。

破面模様は主として光学顕微鏡(最大1500倍)で調べ, 必要に応じてSEMでも観察した。これら破面模様形状を二次元破面模様の式で近似定量した。セラミックスは試験片加工が困難でありSENT試験片の切欠き先端半径 r などを自由にコントロールできないため, 破壊強度やき裂伝ば速度に及ぼす r の影響を求め難い。従って, これらに関しては加工が容易でかつ非常にぜい性を示すプラスチック(不飽和ポリエステル樹脂, UP

と略す)でも上記平滑およびSENT試験片を用意し, 同条件の破壊試験結果から, 設計形状やき裂先端半径などによるデータを一部参考にした。

3. 結果および考察

3.1 セラミックスの破面模様 Si_3N_4 系セラミックス平滑試験片を20℃で引張破壊したものの例を図1(a)に示した。これら試験片の応力・ひずみ曲線は直線的な立上がりののち破壊し, 典型的なぜい性破壊を示した。この試験片形状のものは20℃および500℃を問わず, ほとんどのものがゲージ部内で破壊した。表面につけた細線は速度測定用の銀ペイントで, 平滑試験片では4~5本を用いた。図の破壊面(水平面)は多小の分岐を伴っている。分岐のなるべく少ない(写真右端のような)破面全容の写真を図2(a)に示した。左端中央付近から右にき裂が伝ばしている。平滑試験片は後述した様に破壊強度 σ_f が強い上にき裂伝ば速度 V_f も速く, 分岐現象を伴うため破面は粗く, 大・小無数の白い模様がき裂伝ば方向に放射状に分布している。図2(b)はSENT試験片の破面であり, 前者の約2.5倍に拡大した。この試験片は一次き裂(人的に導入したもので, ピン穴中心からき裂先端までの長さ C_{01} が約16mm)先端に速度測定のため12~20本の銀細線を表面につけている。破断に至るき裂伝ば距離 C_{1f} (C_{01} 先端より右端まで)は約38mmとなるが, この写真はき裂スタート点近傍の一部分である。平滑試験片に比べ分岐することがなく, 破面は平坦で無数の小さな白い

(a) 平滑試験片

(b) SENT試験片

図1 破壊試験片写真

(a) 平滑試験片

(b) SENT試験片

図2 破面写真例

模様がみえる。後述したようにSENT試験片の破壊強度や伝ば速度が前者に比べ小さいためこの様な模様が生じる。

これら破面に観察される模様のうち、多くのものはUPやPMMA破面で観察されたような小円状やだ円状で近似できる両端閉そく模様(BECM)と放物線状や双曲線状で近似できる一端開放模様(OEOM)をなしている。図3(a)はSENT試験片に観察されたBECMの例である。セラミックスは微細粒の焼結体であるため、模様輪郭は粒子径近傍のJigzag状をなしているが全体として近似だ円模様である。同様にSENT試験片の例を図3(b)、また平滑試験片の例を図3(c)に示した。いずれも左から右に一次き裂が伝ばしている。次に、平滑試験片に主として現れる放物線状模様を図4に示した。図4(a)は上記、近似だ円模様と比べて明らかに後部が広がり放物線状をなしている。平滑試験片の同様な模様例を図4(b)〔この模様は三次元方向にもより広がっているため全面に焦点を合わせにくい〕および後部の広がりの一層大きな(双曲線状)ものを図4(c)に示した。これら模様の長さも前者よりは大きい(プラスチックと同様)。OEOMはこのように模様が大きくなるため、セラミックスのものはその周辺のいずれかの部分が少し浮き上がっている(または、平面状でない)ものが多い。図5はSEMによるOEOMの例で頭部周辺が浮き上がっている様に見える。ここで、参考までにこれまで報告してきたプラスチック(UP)のBECMおよびOEOMの例を図6に示した。セラミックスと同寸法形状のUP平滑試験片でも放物線状模様が主たるものを占め、SENT試験片($r \approx 0.22\text{mm}$ でセラミックスの r と類似の大きさのもの)では逆に大半の模様がBECMである⁽¹⁾。これらセラミックスのBECMはUPのそれより非常に短いのは、後述したようにセラミックスでは一次き裂伝ば速度が非常に速く、二次き裂がそれほど速くないためであろう。

3・2 BECMおよびOEOMの近似定量と解析

プラスチックの破面模様は一次き裂伝ば速度 V_1 と、き裂核より走る二次き裂伝ば速度 V_2 の干渉により生成する。著者らはこれら両き裂伝ば速度による破面模様の二次元定量式を報告⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾してきた。上述したようにセラミックスでも一次き裂伝ば速度の速い〔後述図14(a)および16(a)〕ものでOEOMが主たる模様を占め、速度の遅いもの〔後述、図14(b)および16(a)〕でBECMが主をなしていることは、プラスチック同様、一次き裂と二次き裂の干渉によりこれら模様が生成していると考えられる。セラミックスは微少粒子の

図3 両端閉そく模様と破面模様の式による近似定量 (a), (b)および(c)

(a)

$C_1 = 2280$
 $e_{SUP} = 5.0$
 $\ell = 19.51$
 $C_{O_2 SUP} = 0.5$
 (all in μm)

$\beta'_L = 1.17 \sim 1.06$
 $n_2 = 1.70$
 $C_{O_2 SUP} = 0.5$
 $\ell = 19.51$
 (all in μm)

(b)

$C_1 = 1580$
 $e_{SUP} = 5.0$
 $\ell = 22.96$
 $C_{O_2 SUP} = 0.5$
 (all in μm)

$\beta'_L = 1.47 \sim 1.02$
 $n_2 = 1.70$
 $C_{O_2 SUP} = 0.5$
 $\ell = 22.96$
 (all in μm)

(c)

$C_1 = 3250$
 $e_{SUP} = 10.0$
 $\ell = 43.94$
 $C_{O_2 SUP} = 0.5$
 (all in μm)

$\beta'_L = 1.42 \sim 1.02$
 $n_2 = 1.70$
 $C_{O_2 SUP} = 0.5$
 $\ell = 43.94$
 (all in μm)

図4 一端開放模様と破面模様の式による近似定量 (a), (b)および(c)

焼結体であり二次き裂核となりうる点は微少粒子そのものや粒子間結合部などいろいろ考えられるが、プラスチックの二次き裂核[図6(a), (b)の頭部の核]の様な明確なものは観察されない。したがって今、二次き裂核を微細粒子径またはその近傍と仮定し(例えば、二次き裂半長 $C_{O_2} = 0.5 \mu m$)破面模様の式⁽¹⁾⁽²⁾

$$\frac{\sqrt{\alpha_2 - 1} \sqrt{\alpha_2 - (n_2 - 1)} + n_2 \ln [\sqrt{\alpha_2 - 1} + \sqrt{\alpha_2 - (n_2 - 1)}] - \frac{n_2}{2} \ln (2 - n_2)}{2} = \beta'_L \left(\frac{d + x}{C_{O_2}} \right)$$

... (1)

で前述の模様形状を近似定量してみた。なお、模様形状を近似するに当たり、前述の模様写真(図3および4)右側に記した諸寸法で二次き裂核と干涉開始距離⁽¹⁾を上記のように仮定したため、それぞれ $C_{O_2 SUP}$, e_{SUP} と記した。BECMの模様長さ a , 模様幅 b の測定値も図の右側に表した。これら模様の記号はプラスチックの報告⁽¹⁾⁽²⁾と基本的に同じものである。各図の下に式(1)による近似定量模様を表した。き裂伝ば速度の定数(n_2)は1.0~2.0の値であり⁽¹⁾⁽⁵⁾, 一次および

図5 一端開放模様SEM写真

(a) 両端閉そく模様

$a = 122.9$
 $b = 145.0$
 $C_{O_2} = 0.67$
 干涉開始距離⁽¹⁾ $e = 1.5$
 二次き裂核上最小弦長 $\ell = 5.0$
 (all in μm)

(b) 一端開放模様

$C_{O_2} = 0.50$
 $\ell = 8.3$
 $e = 2.6$
 (all in μm)

図6 UP試験片の破面模様

二次き裂速度の比 $\beta'_L = V_{2\max}/V_1$ は図3のBECMで1.0近傍より小さい値まで減少し、図4のOEOMでは1.0近傍より大きくなっていることもこれまでの報告と同じである。近似模様の右側にはそれぞれの定量値を記した。いずれの模様も式(1)でよく近似されている。

次にSENT試験片、20℃破面上に観察された近似だ円状模様の長軸長さ a のき裂伝ば距離による変化(試験片厚さが4mmあるがその中央近傍の伝ば距離による測定例)を図7に示した。模様の長軸長さはき裂伝ば初期($C_1/C_{0.1}$ の小さいところ)にやや大きいものも現れ、伝ば距離と共にその上限値が減少している。この傾向はUP、SENT試験片($r \approx 22\text{mm}$)の破面模様数などの変化傾向¹⁾と類似している。同様に模様短軸 b のき裂伝ば距離による変化を図8に示した。データ点は振動しながらも長軸同様の変化傾向を示している。これらの減少傾向は後述のセラミックス速度変化[図14(b)]とも類似したものを示している。SENT試験片ではOEOMがほとんど観察されないためOEOMの同様な変化を調べることはできない。また、平滑試験片では試片幅そのものが小さい上に、(後述のよう

図7 両端閉そく模様、長軸長さ a の相対き裂伝ば距離 $C_1/C_{0.1}$ による変化

図8 両端閉そく模様、短軸長さ b の相対き裂伝ば距離 $C_1/C_{0.1}$ による変化

に)高速伝ばのため破面が分岐し凹凸も大きくなるため、き裂伝ば距離によるこれら模様変化を調べることはできない。

次にSENT、20℃破壊試験片($\sigma_f = 11.3\text{MPa}$)の近似だ円状模様の長・短軸の関係を図9に示した。 b 値が大きくなると共に当然のことながら a 値も大きくなっている。なお、式(1)による a 、 b の解析関係を図中に示した。データは解析曲線の示す範囲近傍に現れている。図10はSENT、500℃破壊試験片($\sigma_f = 9.25\text{MPa}$)の a 、 b 関係図である。破壊強度も小さく、速度も小さいと仮定されるので、当然模様形状も小さくなるが、やはり、 a 、 b 関係は前者とよく似ており図中に示した解析曲線よく表現されている。

3・3 破壊強度と破面模様 平滑試験片の20℃および500℃における破壊強度を図11に示した。いずれも、大きなばらつきを示しているが、それぞれの平均値を結んだ点線では、高温破壊強度が室温のそれより少し低下している。SENT試験片は速度と破面模様変化を調べることを主目的とした6本の結果であり、そのうち20℃で5本、500℃で1本破壊したデータである。20℃のデータのばらつきは材料によるばらつきという

図9 両端閉そく模様の長・短軸長さとの理論解(20℃の結果)

図10 両端閉そく模様の長・短軸長さとの理論解(500℃の結果)

よりは、むしろ一次き裂先端の鋭さによるばらつきと考えられる。き裂先端は2~3mm 幅のSaw-cut先端に0.5mm 幅以下のさらに微少な切り込みを導入したものであるが、顕微鏡下でその先端最小半径(r)を求めると $r=0.27\text{mm}\sim 0.4\text{mm}$ の大きさであった。 r 値が大きいものから小さいものへとこれら試験片の破壊強度が順次、低く現れている。

平滑試験片、20℃および500℃のデータで強度と破壊確率の関係を求めた。図12はその結果であり、20℃ではWeibullの m 値が9.6となり、500℃では8.1となっている。 m 値が大きいほど、破壊強度のばらつきが小さくなるが、ここでは各々20本(常温)および16本(高温)の結果で、さらに多くの試験片数を用いれば m 値が少し変化するのもかも知れない。SENT試験片の結果は20℃で5本だけであるが、同様に強度と破壊確率の関係を図13に示した。前述したように、一次き裂先端半径 r の影響が敏感に含まれているため、さらに m 値が小さくなっている。また、強度から破壊靱性値を求めるにはさらに多くの試験片を用いたデータを必要とするのでここでは求めている。

20℃では平滑試験片の破壊強度がSENT試験片のそれに比べて約48倍となっている。強度の大きい平滑試験片ではOECMが主たる模様を占め、強度の小さいSENT試験片ではBECMが殆どとなっておりこれ迄報告したプラスチックの傾向^{(4) (5) (6) (11)}とよく一致している。また、SENT試験片の20℃と500℃の平均破壊強度の比は $\sigma_{f500^\circ\text{C}}/\sigma_{f20^\circ\text{C}}\approx 0.851$ と小さくなり、その影響が破面模様の a 、 b 関係(図9と図10)にも現れている。すなわち、20℃の a 値、 b 値は比較的大きい値(図9)を示しているのに比べ、500℃(図10)の a 値、 b 値は前者より小さい値を示し、一層小さな近似だ円状模様が主をなしていることになる。これまでの筆者らの報告^{(1) (2) (3) (4) (5) (6) (9) (11) (12)}でもそのような傾向が全般的に表れている。

図11 平滑およびSENT試験片の20℃および500℃破壊強度

3・4 き裂伝ば速度と破面模様 Si_3N_4 系セラミックス平滑引張試験片のき裂伝ば速度の測定結果を図14(a)に示した。3本の試験結果を表したが、いずれもき裂伝ば相対距離 C_1/C_{01} (ここで平滑試験片の C_{01} はき裂発生点の核の大きさの半分 $\approx 20\mu\text{m}$ とした)と共に急上昇し、すぐ分岐(黒印の近傍)している。表面に塗布した銀ペイント細線は分岐しながらも破断に要する時間を与えるため、その後のき裂伝ば速度も示した。したがって分岐後のデータは平滑試験片(分岐しない)のき裂伝ば速度ではない。分岐前のデータは初期値と他の一点だけであるが実線で結び(これ以上細かく銀細線をつけてもより正確な測定値を得るのは困難であった)、分岐後のものは点線で示した。また分岐しないで伝ばするとさらに高速の状態が続くと仮定して矢印でその方向を示した。多くの試験片について同様の速度データを求めたが、非常に高速($\approx 4000\text{ m/s}$)に達するとともに、大きな或は小さな分岐を生じるため正確な値を測定しがたくこれらの結果は図のような速度変化を表している。次にSENT試験片の速度変化の一例を図14(b)に示した。この試験片は分岐を伴わないで破壊したもので、 C_1/C_{01} ($C_{01}\approx 16\text{mm}$)

図12 平滑試験片の破壊強度と破壊確率(20℃および500℃)

図13 SENT試験片の破壊強度と破壊確率(20℃)

と共に速度は急上昇したのち、図のように減少している。データの最大値は約900m/s近傍まで加速され、そのあと急速に低下している。

セラミックス試験片のこのような速度変化がUP試験片でも現れるものか確認したのが次の図である。図15(a)は平滑試験片のもので試験片寸法はセラミックスと全く同一のものである。き裂伝ば速度はやはり急上昇してのち、UPでも分岐し(UPも非常にもろい材料であるので、高速度域では分岐を伴う⁽⁴⁾・⁽⁵⁾)、速度もセラミックス同様の变化傾向を示している。分岐がなければ矢印の方向に向かうことも考えられる。図15(b)はUP, SENT試験片のき裂先端半径 $r=0.22$ mmの結果である。速度は急上昇してのち急速に減少している⁽⁴⁾。以上、速度変化を検討したものはいずれも20℃, 引張試験機のクロスヘッド速度0.5mm/minの結果である。セラミックスとUPの到達速度の大きさは違っても、その変化傾向はよく似ている。なお、SENT試験片のデータに実線で示した曲線は前報⁽¹⁾でも報告したようにSihの理論解⁽⁶⁾

$$V_1 = V_{1\max} (\alpha_1)^{-\frac{1+\eta}{2\eta}} \left\{ 1 - (1/\alpha_1)^{-\frac{2\eta+1}{\eta}} - n_0(1-1/\alpha_1)(1/\alpha_1)^{\frac{\eta+1}{\eta}} \right\}^{1/2} \quad \dots (2)$$

(a) 平滑試験片

(b) SENT試験片

図14 Si₃N₄系セラミックス試験片、き裂伝ば速度の相対き裂伝ば距離による変化

ここで

$V_{1\max}$: 一次き裂の限界速度

$$\alpha_1 = C_1/C_{01}, \quad n_0 \leq 3.0, \quad \eta \leq 1.0$$

である。データ点は振動しながらもこの曲線のような加速・減速過程を経ている。

図16(a)はセラミックスの平滑試験片とSENT試験片の速度変化を比較したものである。平滑試験片は4500m/s近くまで急上昇し分岐を生じているのに、SENT試験片は900m/s前後から減速している。この図では平滑試験片およびSENT試験片の相対き裂伝ば距離 $C_1/C_{01} = \alpha_1 = 1$ から破断点 $(C_1/C_{01})_f = \alpha_{1f}$ までを両者、同じ横軸で表現するため、横軸を $(\alpha_1 - 1) + (\alpha_{1f} - 1)$ で表した。いずれも $(\alpha_1 - 1)/(\alpha_{1f} - 1) = 0$ で、き裂がスタートし、1.0の値で破断する。同様にUP試験片でも平滑試験片の速度とSENT試験片のそれを図16(b)に比較した。やはりセラミックスとよく似た速度変化を示している。

セラミックスのき裂伝ば速度が平滑試験片とSENT試験片で以上のように変化する。き裂伝ば速度の大きい平滑試験片では一端開放模様が主たるものを占め、速度の小さいSENT試験片では両端閉そく模様が主

(a) 平滑試験片

(b) SENT試験片

図15 UP試験片、き裂伝ば速度の相対き裂伝ば距離による変化

図16 平滑およびSENT試験片、き裂伝ば速度の相対き裂伝ば距離による比較

たる模様となっている。UP試験片の結果⁽¹¹⁾でも、速度と模様の同様な傾向が明確に現れている。一次き裂速度がその先端の二次き裂核を活性化して、そこから二次き裂が伝ばし、両者の干渉によって模様が生成する。そのため一次き裂伝ば速度が高いほど二次き裂核が強く活性化され、二次き裂速度が大きくなり両者の干渉模様は必然的に模様後部が開いたもの（一端開放模様）となる。逆に、一次き裂速度が小さいと二次き裂の活性化も弱く、二次き裂速度が小さくなる。この場合、一次、二次き裂の干渉模様はその後部が閉じたもの（両端閉そく模様）となる。セラミックスの平滑試験片とSENT試験片の一次き裂伝ば速度を比較した上記結果では、上述の一次き裂速度の大・小と生成模様形状の物性がよく一致している。二次き裂は固体内を伝ばするもので、その核 C_{02} も非常に小さいためたとえプラスチック(UPまたはPMMA)でも二次き裂速度を直接測定することはできない。セラミックスでも二次き裂速度を予測することはできないが、ここではプラスチックと同様に核から二次き裂が走り模様が生成するものとして検討した。

4. 結言

Si_3N_4 系セラミックス平滑およびSENT試験片を20°Cおよび500°Cで引張破壊をした。破面上に観察されるうろこ状模様をプラスチック破面模様同様に、その寸法などを測定すると共にそのき裂伝ば距離による変化を調べた。20°C試験ではき裂伝ば速度を測定し、強度や模様の関係を検討した。ファイン・セラミックスの破面模様も一次き裂伝ば速度に支配されている事実から破面模様の式による模様の近似定量をした。以上のことから次の結言を得た。

- (1) Si_3N_4 系ファイン・セラミックスの破面にはうろこ状模様が観察され、それらの模様の中には両端閉そく模様および一端開放模様の形状を呈したものが多く含まれている。
- (2) き裂伝ば速度の遅い試験片や破壊強度の弱い試験片では両端閉そく模様が多く見られ、き裂伝ば速度の速いものや破壊強度の強いものでは一端開放模様が主たる模様となっている。
- (3) これら模様は一次き裂伝ば速度によって支配されており両端閉そく模様や一端開放模様はプラスチックの破面模様と同様に、一次および二次き裂伝ば速度の干渉によってできることが考えられる。
- (4) これら模様は破面模様の定量式で近似することができる。

この研究に用いた引張治具および試験片は日立金属株式会社磁性材料研究所などで製作して戴いたもので同社に深く謝意を表します。

参考文献

- (1) 龍本・ほか3名, 機論, 49-443, A (1983), 803.
- (2) 龍本・吉村, 機論, 52-476, A (1986), 818.
- (3) 龍本・吉村, 機論, 52-476, A (1986), 801.
- (4) 龍本・ほか2名, 機論, 52-476, A (1986), 809.
- (5) 龍本・増田, 機論, 53-487, A (1987), 490.
- (6) 龍本・ほか2名, 機論, 53-491, A (1987), 1332.
- (7) 龍本・吉村, 機論, 53-493, A (1987), 1754.
- (8) 龍本・ほか2名, 機論, 54-507, A (1988), 2039.
- (9) 龍本・ほか3名, 機論, 54-508, A (1988), 2135.
- (10) 龍本・小田, 機論, 55-512, A (1989), 811.
- (11) 龍本・ほか3名, 機論, 55-519, A (1989), 論文No.88-1372A.
- (12) 龍本・ほか3名, 機論, 55-518, A (1989), 2130.
- (13) 例えは 岡村, 線形破壊力学入門, (1976), 219, 培風館.
- (14) Berry, J. P., J. Appl. Phys. Solids, 8 (1960), 194.
- (15) Berry, J. P., J. Appl. Phys. Solids, 8 (1960), 207.
- (16) Sih, G. C., Inelastic Behavior of Solids, (1970), 607, McGraw-Hill.