

硬さの制御による結晶の破壊機構の研究

Study on the Mechanism of Fracture by Controlling Hardness

小 泉 大 一*・鈴 木 敬 愛*

Hirokazu KOIZUMI and Takayoshi SUZUKI

1. はじめに

固体材料の破壊, すなわちき裂の発生と進展は, 多くの場合, その材料の塑性変形挙動と密接に関連している。大ざっぱに, 材料が巨視的な大きさで塑性変形することなく破壊する場合を「ぜい性」といい, 反対に, 破壊に至る前に大きな塑性変形を起こす場合を「延性」という。しかしながら, ぜい性材料といわれる材料でも, き裂の進展に際してき裂先端に局所的な塑性変形(絞り帯の発生)を生じるのが普通であり, 多くの場合, き裂先端部における塑性変形が, き裂の進展条件に深く関与している。

き裂の進展に塑性変形が関与しないとすれば, すなわち, 材料が微視的にも完全弾性体として扱えるならば, き裂の進展は単に弾性歪エネルギーを表面エネルギーに変換する過程にすぎない。この場合, き裂の進展条件は物質定数としての表面エネルギー γ_s (単位面積当たり) のみによって与えられる。き裂進展による弾性エネルギーの変化量 G (エネルギー開放率) は「破壊力学」と呼ばれる力学的手法によって, さまざまの形状や応力条件に応じて計算される。き裂が進展するか否かは, Griffith 条件

$$G = 2\gamma_s \quad (1)$$

によって与えられる。

さて, 材料が塑性変形を起こす場合に, き裂の進展がどのような機構で起こるのか, また, き裂が進展を開始する条件は何によって決まるのかを明らかにすることが我々の研究の目標である。そのために, 塑性変形の起こり易さを人為的に制御することによって, 塑性変形の難易度すなわち硬さとき裂進展の関係を測定すること, 同時に, き裂先端部に生じる塑性変形の様子を観察することが重要である。材料の硬さを制御する方法の一つは, 温度を変えることである。St. John¹⁾ は, この方法によって Si 単結晶の延性-ぜい性遷移温度が塑性変形速度によって支配されていることを明確にしている。硬さを制御するもう一つの方法は, 転位の運動の障害となる点欠陥を導入することである。NaCl 単結晶は, γ 線照射によ

って室温においても広い範囲で硬さを変えることができる。以下に紹介するのは, この方法で行った NaCl 単結晶中のき裂進展過程の測定と観察である。

2. 試験の概要

あらかじめ図1のように途中までき裂を入れた NaCl の単結晶を試験片として用いた。NaCl 単結晶の硬さ(降伏応力)は Co^{60} の γ 線で照射することによって 0.3~3

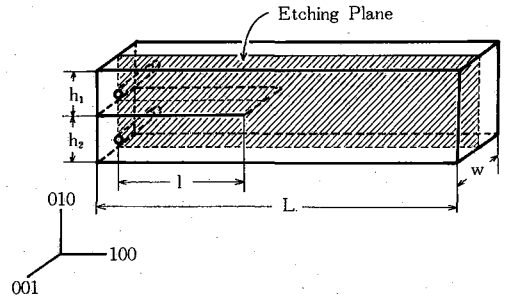


図1 試料の形状
標準的な大きさは, $h_1 = h_2 = w = 5\text{mm}$, $l = 15\text{mm}$, $L = 40\text{mm}$. 斜線の面は転位を観察した面

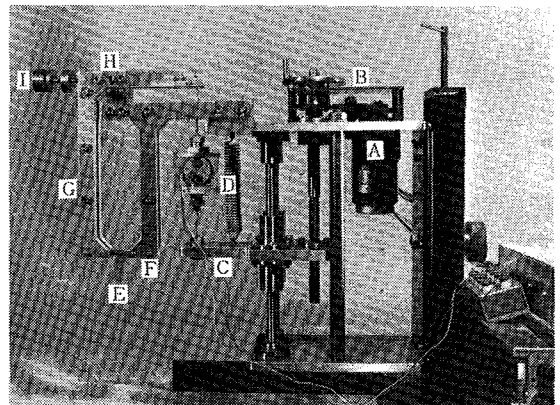


図2 実験装置

A: モーター, B: 減速ギア, C: 上下可動部, D: ロードセル, E: 試料, F, G: 試料 E に水平方向に力をつける部分 (F: 固定, G: ナイフエッジ H を支点として可動) I: つりあいをとるためのおもり

* 東京大学生産技術研究所 第1部

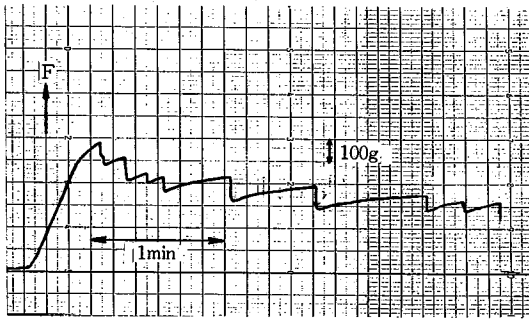


図 3 $\tau_y = 0.52 \text{ MPa}$ の試験片についての測定例

MPa の範囲で自由に変化させることができる。試験片作製後、必要のある場合には、適当量の γ 線を照射することにより降伏応力を大きくした。この試験片を図 2 の「カニのはさみ」のような構造の装置にとりつけ、試料の長軸が鉛直方向を向き、力が水平にかかるようにした。試料をとりつけてある部分を左右に 0.4 mm/min の速さで動かし、き裂が進むときの力を測定した。測定はおもに室温の空気中で行ったが、液体窒素につけて測ったものもある。比較的やわらかい試料についての測定例を図 3 に示す。力が急に減少しているところで、き裂が進展している。

き裂先端での塑性変形の様子を観察するために、試料が完全に割れたのち、中央部を図 1 の斜線の面でへき開し、その面を横切る転位の分布をエッチピット法により観察した。この際、転位が導入されたり、あるいは、動いたりするのを防ぐために、あらかじめ γ 線を $1 \times 10^7 \text{ R}$ 照射し、降伏応力を大きくしておいた。腐食液は ZnCl_2 の CH_3COOH 溶液を用いた。

3. き裂先端での転位の観察^{2,3)}

図 4 は、き裂先端で発生した転位のエッチピットの写真である。矢印が最初のき裂先端の位置であり、き裂は左から右へ進展する。図は一方の腕の一部についてしか示していないが、反対側の腕についても対称に転位が発生していることが確かめられている。

この図によると、降伏応力が小さい ($\tau_y < 1.5 \text{ MPa}$) 試験片では転位は表面から入っており、特に、最初のき裂先端から発生しているものが多くみられる。最初のき裂先端から入った転位は、き裂の後方 45° の方向に深く入りこんでいる。き裂が進展するときには、硬さによらずほぼ $2 \times 10^5 \sim 10^6$ 本の転位が入っている。

NaCl のようなイオン結晶では、へき開面と転位のすべり面の幾何学的関係が定まっており、単結晶でつくった図 1 の形の試料ではき裂進展の際にき裂後方へ $\{110\}$ 面に沿って多数の転位が進入する。き裂先端ではき裂前方の方が転位に働く応力が高いにもかかわらず、き裂

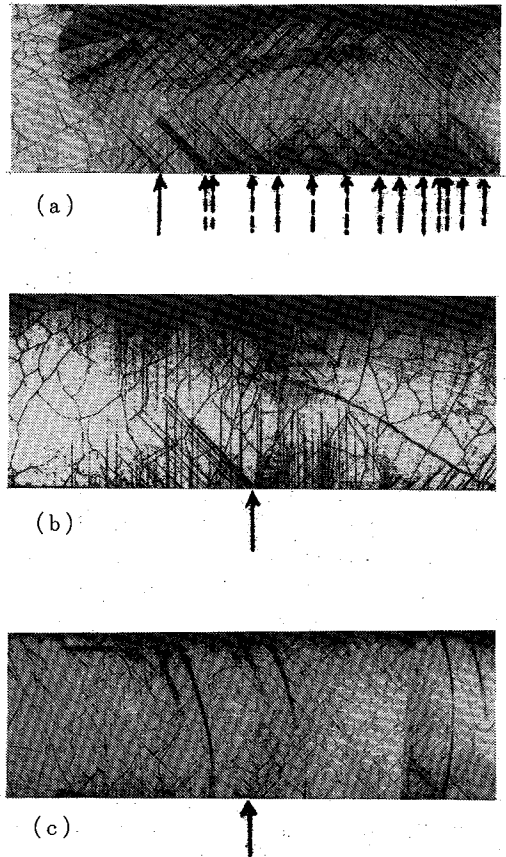


図 4 き裂面に垂直な面 (図 1 の斜線の面) での転位のエッチピット。³⁾ 矢印は最初のき裂先端の位置を示し、き裂は左から右へ進む。図 (a) の破線の矢印のところでき裂は止まり再び進展した。
(a) $\tau_y = 0.30 \text{ MPa}$ (b) $\tau_y = 1.35 \text{ MPa}$
(c) $\tau_y = 2.0 \text{ MPa}$

後方に多くの転位が進入するのは試料の形の影響をうけているからである。

降伏応力が大きい ($\tau_y > 1.5 \text{ MPa}$) 試験片では、き裂先端からほとんど転位の発生はみられない。

4. 限界応力拡大係数 K_{Ic} と降伏応力 τ_y ^{3,4)}

図 1 の形状の試験片では、限界応力拡大係数 K_{Ic} はき裂進展に必要な力 F_c を用いて

$$K_{Ic} = \frac{F_c}{wh^{1/2}} \times 3.46 \left(\frac{l}{h} + 0.7 \right) \quad (2)$$

で与えられる。 h は h_1 または h_2 である。

力の絶対値についての目安を得るために、力 F を標準の大きさの試料 ($h_1 = h_2 = w = 5 \text{ mm}$, $l = 15 \text{ mm}$) について換算しておくことも意味のあることである。実際の試料と標準の大きさの試料の限界応力拡大係数が同じに

なるようにして力を規格化すると、規格化された力 F_{nor} は

$$F_{nor} = 3.02 \frac{F_c}{wh^{1/2}} \left(\frac{l}{h} + 0.7 \right) \quad (3)$$

とあらわされる。(長さの単位は mm)

限界応力拡大係数 K_{Ic} の降伏応力 τ_y に対する依存性を図 5 に示す。図中の黒丸は液体窒素中での測定、白丸は室温の空気中での測定であるが、両者に有意差はなく、 F_{nor} が単に降伏応力 τ_y の大きさのみによっていることがわかる。

図 5 の実験結果は次のように要約できる：

(I) 降伏応力 τ_y が小さい範囲 ($\tau_y < 1.5$ MPa) で、

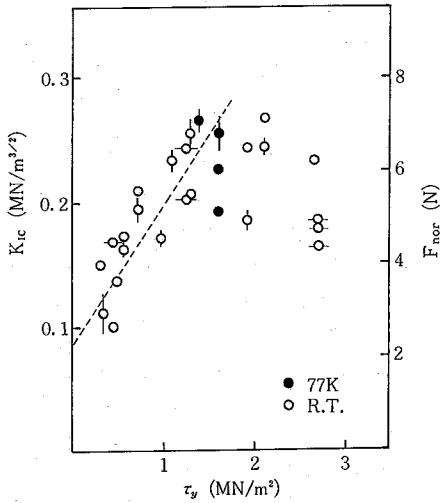


図 5 NaCl 結晶の破壊じん性値 K_{Ic} および標準の大きさの試料 (図 1) に換算した力 F_c と降伏応力 τ_y の関係。点線は (4) 式の関係

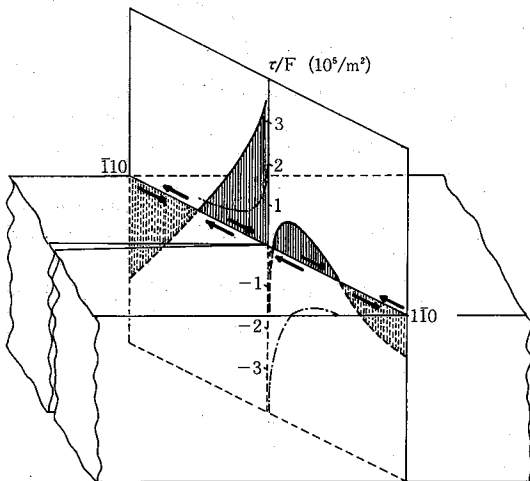


図 6 有限要素法で計算したき裂先端を通る (110) 面上のせん断応力。矢印はせん断応力の向き。一点鎖線は Srawley と Gross⁵⁾ が与えた K_I から求めたせん断応力の値

き裂進展に必要な力 F_c は降伏応力が大きくなるにつれて大きくなる。

(II) き裂進展に必要な力 F_c は降伏応力 τ_y を 0 に外挿しても有限な値にとどまる。

(III) 降伏応力 τ_y が (I) の範囲をこえて大きくなると、き裂進展に必要な力 F_c は一度最大値を通過して、減少しないしは一定値に近づくようにみえる。

上の (I), (II) における K_{Ic} と τ_y の関係はだいたい次のようにあらわされる。

$$K_{Ic} (\text{MN}/\text{m}^{3/2}) = 0.083 (\text{MN}/\text{m}^{3/2}) + 0.105 (\text{m}^{1/2}) \tau_y (\text{MN}/\text{m}^2) \quad (4)$$

5. き裂先端での応力分布²⁾

図 4 に見るとおり、き裂先端から導入される転位は、主としてき裂後方へ深く進入し、き裂前方へはわずかしか進入しない。この差は、き裂先端を通る二つの (110) 面上のせん断応力を比較することによって理解できる。異方性をとり入れた応力場の計算を有限要素法で行った結果を図 6 に示す。図の一点鎖線は Srawley と Gross⁵⁾ の式から求めた K_I の値を用い、き裂先端近傍の応力 σ_{ij} が角度の関数 $f_{ij}(\theta)$ を用いて、

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (5)$$

の形であらわられるとしたときのせん断応力の値である。図 6 の結果は、き裂のごく近くから K_I を含むだけで応力をあらわすのが適当でないことを示している。こ

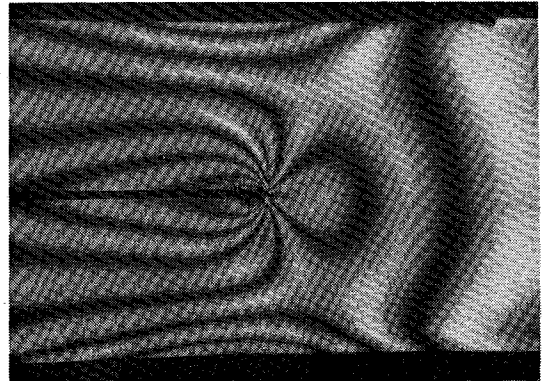


図 7 Double cantilever 型試料の光弾性縞模様

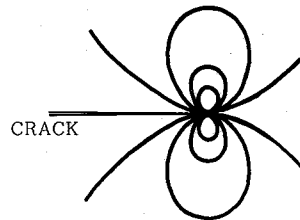


図 8 応力が K_I を含む項だけであらわされるとしたときに最大主応力差が等しい点を結んだ線

の結果は図7に示す光弾性縞模様から期待される結果と一致する。(もし K_I の項が良い近似を与えるならば、光弾性縞模様は図8のようなはずである)。

図6によると、き裂先端に十分近いところでは、転位を内部に入れるのに十分な大きさの応力が存在しており、このせん断応力によって同符号の転位が試料の内部に導入される。しかし、き裂前方では、き裂先端からの距離が大きくなると、せん断応力の向きが逆になり、転位は深く進入することができない。これに対し、き裂後方では、腕の中央までせん断応力は同符号であり、転位が深くまで進入することを可能にしている。

6. き裂進展の条件⁶⁾

き裂先端から進入した転位は結晶内部で交叉すべり等をくり返し増殖するであろう。増殖により最初にき裂先端から進入した転位と同符号のものと異符号のものがつくられる。同符号のものは最初の転位と同じ方向、すなわち内部へ動き、異符号のものは反対にき裂の方へもどるが、最終的には正負の転位は長距離の歪場が小さくなるように(したがって弾性エネルギーが小さくなるように)配列する。き裂先端から進入した転位と反対符号のものうちいくつかはき裂前方に押し出されて堆積し(図9)、微小き裂を形成する。

このような多数の転位が存在している領域では、転位間の間隔や運動は転位間相互作用によって決まり、外力にはあまりよらない。したがって、き裂先端の少し前方に集まる転位の数も外力にはあまり敏感でなく、すでに導入されている転位群(増殖したものも含めて)の大きさによってきまる。交叉すべりを起こして増殖する頻度も同様にすでに存在する転位群によって支配されるであろうが、転位群全体の数は進入した転位の数 n にほぼ比例して増加すると考えられる。けっきょく、き裂先端部に新しい微小き裂を作るために必要な数の転位が供給されるためには、ある一定数 n_c の転位がき裂先端から進入することが必要であろう。

実際に、き裂先端から進入した転位の数 n が臨界値 n_c に等しくなったときにき裂が進展するという考え方に立てば前章で述べた(I)~(III)を理解することができる。

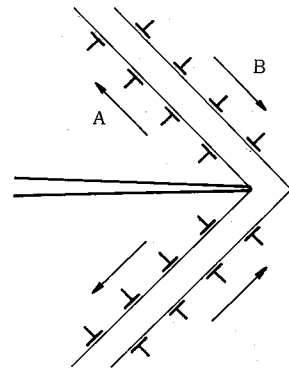


図9 き裂先端の転位群

A: き裂先端から進入する転位

B: 内部で増殖されき裂先端にもどってくる転位

7. おわりに

この研究は単結晶について行われたものである。多くの実用材料、とくに構造用材料は結晶粒の集合からなる多結晶体であるから、このような単結晶による研究の有用性には疑問を持たれがちである。しかし、多結晶中の結晶粒界は、一般にはきわめて強固なもので、塑性変形に対しても、破壊の進行に対しても強い抵抗となる。ある種の合金において塑性変形が粒界に集中して起こったり(粒界沁り)、不純物の偏析によって結合の弱くなった粒界に沿って破壊が進行する(粒界割れ)のは、むしろ特別な場合と考えるほうがよい。とはいえ、多結晶中でのき裂の進展と塑性変形の関係は、複雑な幾何学的問題を含んでおり、今後の大きな研究課題である。

(1984年3月23日受理)

参考文献

- 1) C. St. John: Philos. Mag. 32 (1975) 1193
- 2) 小泉大一, 中村和夫, 鈴木敬愛: 生産研究 33 (1981) 84
- 3) H. Koizumi and T. Suzuki: phys. stat. sol. (a) 68 (1981) 579
- 4) 小泉大一, 中村和夫, 鈴木敬愛: 生産研究 33 (1981) 46
- 5) J. E. Srawley and B. Gross: Mat. Res. Standards 7 (1967) 155
- 6) 小泉大一, 中村和夫, 鈴木敬愛: 生産研究 33 (1981) 206