

イオン結晶中のき裂進展と降伏強度

Influence of Yield Strength on Crack Propagation in Ionic Crystals

小泉大一*・中村和夫*・鈴木敬愛*

Hirokazu KOIZUMI, Kazuo NAKAMURA and Takayoshi SUZUKI

1. 序

き裂の進展は、弾性エネルギー解放率 G が表面エネルギー γ_s に等しくなったときに起きるとする Griffith 条件

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

が広く受け入れられている。イオン結晶においてもこの式を用いてへき開面の表面エネルギーを求めようとする実験が数多く行われてきた。¹⁻³⁾ 興味の内容は表面エネルギーの評価にあり、実験は(1)式がよく成り立つと考えられている比較的降伏応力の大きなものについて行われることが多く、また、へき開の機構そのものに関心の払われることも少なかった。

NaCl 型イオン結晶は、(100)面がへき開面であり、 γ 線を照射することによって容易にその降伏応力を変えられることができる。そのため、へき開機構の研究用材料としてはすぐれたものである。

本研究では NaCl 単結晶を用い、降伏応力の小さな試料から、 γ 線を照射して降伏応力を大きくした試料までについて、き裂を進めるのに必要な力を測定した。その結果をもとに、き裂が進み始めるときの機構について議論する。

2. 実験方法

実験に用いた NaCl 単結晶の試料を図1に示す。NaCl の単結晶は試薬特級の粉末を用い、Czchoralski 法により空気中で作製した。各面が(100)を向いた直方体の試料をこの結晶からへき開でつくり、 2×10^7 R の γ 線を照射したあと、Gilman⁴⁾と同じ方法でき裂を途中まで入れた。この試料を760°Cで3時間焼鈍し、力を加えるための穴をドリルであけた。降伏応力を大きくする必要のあるときには、さらに γ 線を適当量照射した。

力は図2の「カニのはさみ」のような構造の装置を用い、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/

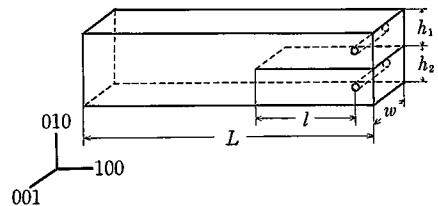


図1 試料の形状

標準的な大きさは、 $h_1 = h_2 = w = 5$ mm,
 $l = 15$ mm, $L = 40$ mm

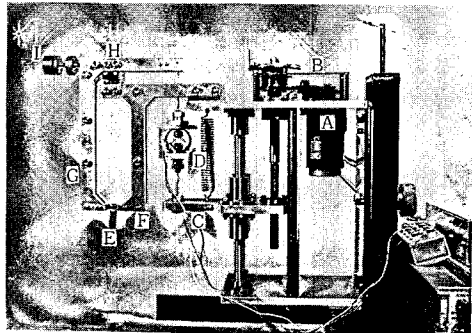


図2 実験装置

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
方向に力をかける部分 (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

minの速さで動かし、き裂が進むときの力を測定した。測定は主に室温の空気で行ったが、液体窒素につけて測ったものもある。降伏応力の小さな試料についての測定例が図3(a)である。力が急に小さくなっているところでき裂が進展している。

図1の形状の試料については、弾性エネルギー解放率 G は次の式であらわされる。^{9,10)}

$$G = \frac{6F^2 l^2}{Ew^2} \left\{ \frac{1}{h_1^3} \left[1 + 1.4 \frac{h_1}{l} + 0.5 \left(\frac{h_1}{l} \right)^2 \right] \right\}$$

* 東京大学生産技術研究所 第1部

$$+ \frac{1}{h_2^3} \left[1 + 1.4 \frac{h_2}{l} + 0.5 \left(\frac{h_2}{l} \right)^2 \right] \quad (2)$$

ただし、 F はき裂が進展するときの力、 E は Young 率で、NaCl では 4.87×10^{11} dyne/cm² である。

また、き裂進展のときの限界応力拡大係数 K_{Ic} は、

$$K_{Ic} = \frac{F}{wh^{1/2}} \times 3.46 \left(\frac{l}{h} + 0.7 \right) \quad (3)$$

で与えられる。⁹⁾ 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 ($h_1 = h_2 = w = 5$ mm, $l = 15$ 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

$$F_{nor} = 3.02 \frac{F}{wh^{1/2}} \left(\frac{l}{h} + 0.7 \right) \quad (4)$$

とあらわされる。

図3(a)に示した試料について、き裂が止まるごとにき裂先端の位置を測り、(4)式によって規格化した力 F_{nor} を求めると、図3(b)のようになる。この図は、初めに入れたき裂が焼鈍、 γ 線照射などの処理を行ったあ

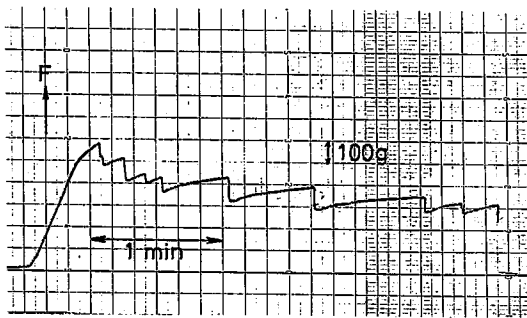


図3 (a) $\tau_y = 52$ g/mm² の試料についての測定例

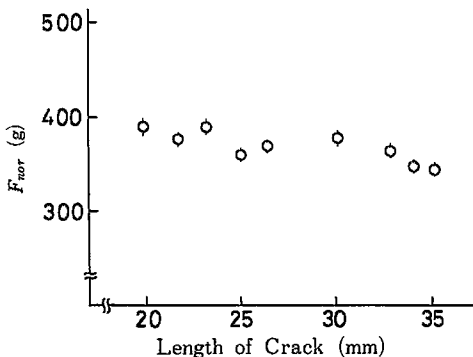


図3 (b) き裂を進展させるのに必要な力 (標準の大きさの試料に換算したもの)

とでも、新しいき裂と同じように振る舞うことを示している。

試料の厚さ w を2倍にした測定では、力の大きさも2倍になっている。したがって、本研究で用いた試料では平面歪みの条件がみたされている。

降伏応力は、同じロッドの結晶からとり出した試料について、へき開実験の試料と全く同じ処理をしたあと、通常の圧縮試験を行って求めた。

3. 結果と考察

Griffith 条件が成り立つとすれば(1)、(2)式から表面エネルギー γ が求まるわけであるが、塑性変形が伴う場合には、後述のように(1)式の γ は真の表面エネルギーのみを与えるとは限らず、塑性変形に要する仕事も含むことになるので、これをみかけの表面エネルギーとして γ^* と書くことにする。

図4にはこのようにして求めた“みかけの”表面エネルギー γ^* (すなわち、弾性エネルギー解放率の1/2)を、また、図5には(3)式および(4)式から求めた限界応力拡大係数 K_{Ic} と、標準の大きさの試料に換算したときのき裂進展に必要な力 F_{nor} を示した。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の縦方向のバーは、試料の2本の腕の高さの違い(図1の h_1 と h_2)による誤差をあらわしている。

図5によると、降伏応力 τ_y の小さなところで F_{nor} な

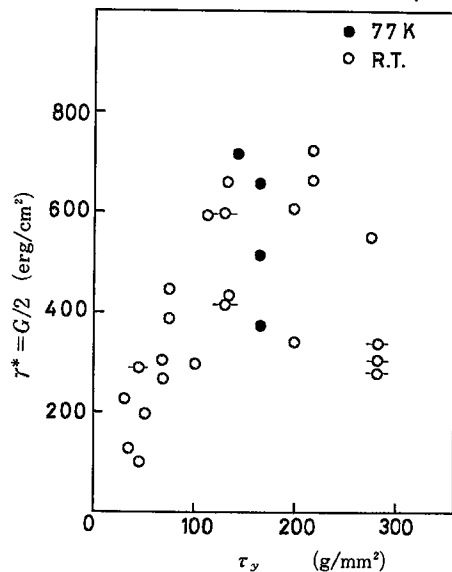


図4 みかけの表面エネルギー γ^* と降伏応力 τ_y の関係

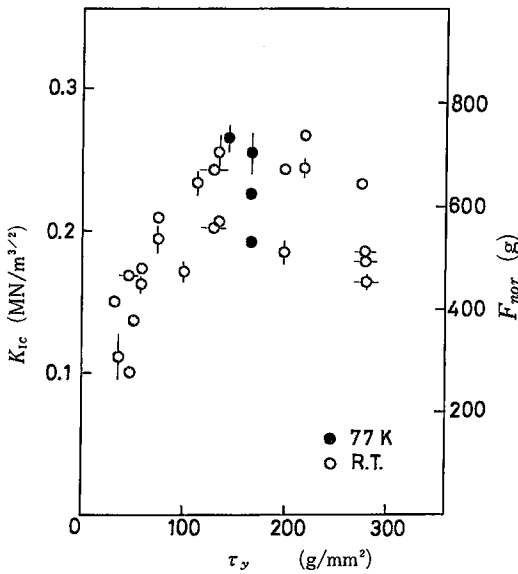


図5 限界応力拡大係数 K_{Ic} とき裂進展に必要な力 F_{nor}

いし K_{Ic} は τ_y の増加関数であり、 $\tau_y \sim 150 \text{ g/mm}^2$ よりかたくなると、 τ_y に鈍感になる。図4の γ^* は、 $\tau_y < 150 \text{ g/mm}^2$ で τ_y とともに単調に増加している。 K_{Ic} が τ_y に鈍感になるような τ_y の範囲では、 γ^* の値に大きなばらつきがみられる。

き裂先端では、 τ_y の小さな場合にかなり多数の転位がき裂進展の際に発生していることが認められる。これに対し、大きな τ_y の試料では転位の発生はごくわずかである。(き裂先端から発生する転位の観察については別に報告する)。以上のことを考慮すると、測定結果は、き裂先端で発生する転位がき裂進展に大きく関与すると思われる τ_y の小さな部分と、き裂先端の塑性変形が重要とは見做せない τ_y の大きな部分とに分けることができるであろう。 $\tau_y \sim 150 \text{ g/mm}^2$ がこれら2つの部分の境界にあたるものと思われる。

Orowan 流の考え方¹¹⁾によれば、塑性変形を伴う場合の Griffith 条件はみかけの表面エネルギー γ^* を用いて次のように書きかえられる。

$$G = 2\gamma^* = 2(\gamma_s + \gamma_p) \quad (5)$$

ここで、 γ_s は真の表面エネルギー、 $2\gamma_p$ は塑性変形に費やした仕事である。この考え方によれば、降伏応力 τ_y が増加すると塑性変形は容易でなくなるので、 γ_p は小さ

くなり、したがって γ^* は τ_y の減少関数であると期待される。ところが実験結果(図4)は、少なくとも $\tau_y < 150 \text{ g/mm}^2$ の範囲において、全く逆の関係にある。すなわち、Orowan 流の考え方がここでは明らかに成り立たず、また Griffith 条件のみがき裂の進展を支配するのではない。

τ_y が小さく塑性変形が起りやすい場合ほど、き裂進展に必要な力 F が小さくてよいことは、き裂進展で発生した転位が共同でき裂進展を促す方向に作用していると考えらるべきである。

転位がき裂進展を助ける機構については、へき開面と交叉する2つのすべり面上の転位の合体によりき裂核が発生するとする Cottrell の理論¹²⁾ や、堆積した転位をつくる応力場によってへき開が起こるとする Stroh の理論¹³⁾ がある。これらの理論を NaCl 型イオン結晶にもそのままあてはめていいものかどうかということについては、さらに検討が必要である。

なお、本実験に用いた試験装置「カニのはさみ」(図2)は本所試作工場の製作によるものである。記して感謝の意を表する。
(1980年10月11日受理)

文 献

- 1) J. J. Gilman: J. appl. Phys. **31** (1960) 2208
- 2) A. R. C. Westwood and T. T. Hitch: J. appl. Phys. **34** (1963) 3085
- 3) A. R. C. Westwood and D. L. Goldheim: J. appl. Phys. **34** (1963) 3335
- 4) G. E. Gross and P. L. Gutshall: Int. J. Fract. Mech. **1** (1965) 131
- 5) P. L. Gutshall and G. E. Gross: J. appl. Phys. **36** (1965) 2459
- 6) S. M. Wiederhorn, R. L. Moses and B. L. Bean: J. Am. Ceram. Soc. **53** (1970) 18
- 7) C. N. Ahlquist: Acta Met. **22** (1974) 1133
- 8) S. W. Freiman, P. F. Becher and P. H. Klein: Philos. Mag. **31** (1975) 829
- 9) J. E. Strawley and B. Gross: Mater. Res. Stand. **7** (1967) 155
- 10) S. M. Wiederhorn, A. M. Shorb and R. L. Moses: J. appl. Phys. **39** (1968) 1569
- 11) E. Orowan: Trans. Inst. Engrs. Shipbuilders Scotland **89** (1945) 165
- 12) A. H. Cottrell: Trans. AIME **212** (1958) 192
- 13) A. N. Stroh: Adv. Phys. **6** (1957) 418