

イオン結晶中のき裂進展と転位の発生

Generation of Dislocations at Crack Tips in Ionic Crystals

小泉 大一*・中村 和夫*・鈴木 敬愛*

Hirokazu KOIZUMI, Kazuo NAKAMURA and Takayoshi SUZUKI

1. 序

前報で,¹⁾我々は double cantilever 型の NaCl 結晶のき裂進展が、試料の降伏応力 τ_y が小さい場合には、塑性変形に助けられておこるとみなされる結果を報告した。すなわち、降伏応力 τ_y が 150 g/mm^2 以下の NaCl 結晶では、図1の2本の腕を引っ張ることによってき裂を進展させるのに必要な力は、降伏応力の大きいものほど大きな値となる。この傾向は多くの実用材料の場合とは逆である。²⁾このような比較的降伏応力の小さい NaCl の試料では、き裂が進展したあとで、最初のき裂先端に多くの転位が発生していることが観察される。本論文ではき裂先端で発生する転位の配列などについての観察結果ならびに、有限要素法による応力解析と光弾性実験の結果を合わせて報告する。

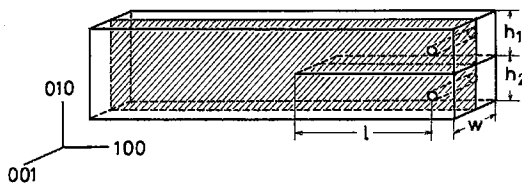


図1 試料の形状と転位を観察した面(斜線の面)
標準的な大きさは $h_1 = h_2 = w = 15 \text{ mm}$, $l = 15 \text{ mm}$

2. 実験

実験に用いた NaCl 単結晶の試料、へき開実験の方法等については前報¹⁾で報告した。き裂先端での転位の発生の様子をみるために、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 ($\tau_y \sim 220 \text{ g/mm}^2$) しておいた。腐食液は ZnCl_2 の CH_3COOH 溶液を用いた。

* 東京大学生産技術研究所 第1部

実験に用いたような形状の double cantilever 中の応力分布の状態を調べるために、試料と相似形のエポキシ樹脂の板による光弾性縞模様を観察を行った。

3. 結果

図2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、き裂は右から左へ進展する。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。

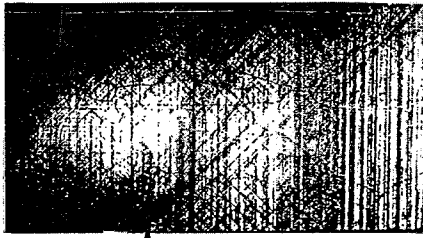
この図によると、降伏応力 τ_y の大きさによらず、転位は表面から入っており、特に、最初のき裂先端から発生しているものが多くみられる。最初のき裂先端から入った転位は、き裂の後方 45° の方向に深く入りこんでいる。

試料の結晶方位は図3のようになっている。NaCl 型イオン結晶のすべり系は、Burgers ベクトルが $a/2 \langle 110 \rangle$ すべり面が $\{ \bar{1}10 \}$ であり、図3に示す6つのすべり系が可能である。

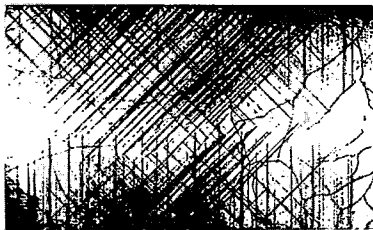
き裂の進行方向に対して 45° の方向にのびているピットの配列は、図3の (a) のすべり系の転位である。また、図2でたて方向に入っているピットの列は図3の (c) のすべり系の転位である。(b) のすべり系の転位は、図2では横に並んだピット列としてあらわれるはずであるが、これは全く認められず、平面ひずみ条件が満たされていることを示している。³⁾

き裂の進展に何らかの影響があったと考えられる塑性変形は図3の (a) の2つのすべり面で起こり、応力集中の最も大きいき裂先端から、このすべり系への転位の導入として観察される。

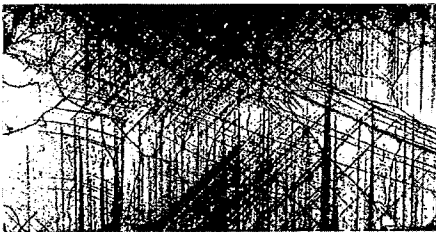
図2に見るとおり、き裂先端からこの2つのすべり面へ導入される転位は、主としてき裂後方へ深く侵入し、き裂前方へはわずかししか侵入しない。この差は、き裂先端を通る2つの (110) 面上のせん断応力を比較することによって理解できる。異方性をとり入れた応力場の計算を有限要素法で行った結果を図4に示す。図の一点鎖



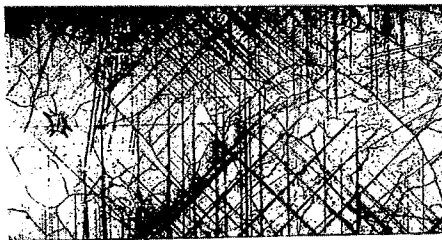
$\tau_y = 32 \text{ g/mm}^2$



$\tau_y = 70 \text{ g/mm}^2$



$\tau_y = 130 \text{ g/mm}^2$



$\tau_y = 135 \text{ g/mm}^2$

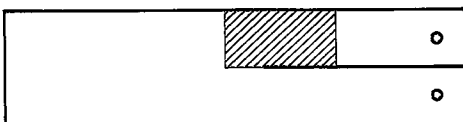


図2 き裂先端近傍(下図の斜線部)での転位配列
矢印は最初のき裂先端. き裂は右から左へ進む.

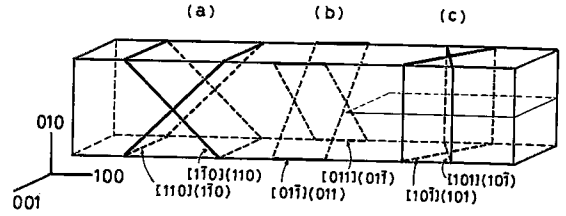


図3 試料の方位と可能なすべり系

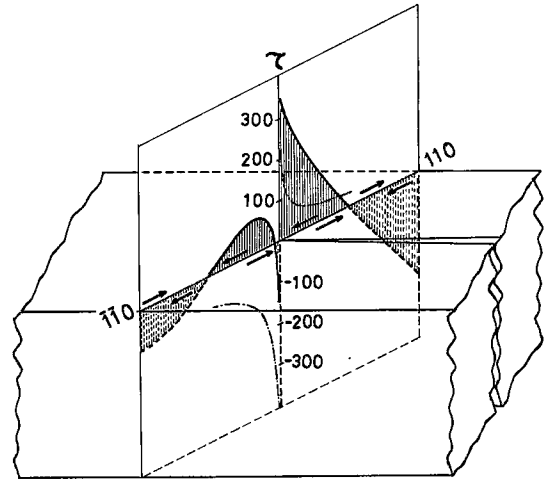


図4 有限要素法で計算したき裂先端を通る(110)面上のせん断応力

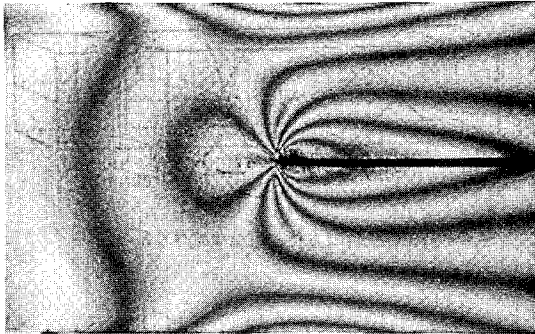
矢印はせん断応力の向き. 縦軸は外力1kg重に対する値を目盛っている(単位はg重/mm²). 一点鎖線はSrawleyとGross⁴⁾が与えた K_I から求めたせん断応力の値

線は Srawley と Gross⁴⁾ 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、

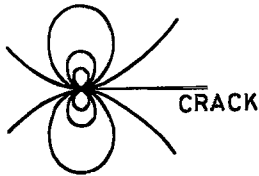
$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)$$

の形であらわされるとしたときのせん断応力の値である. 図4の結果は、き裂のごく近くから K_I を含む項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. この結果は Chang et al⁵⁾ の計算および、図5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5(b)のようになるはずである).

図4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



(a) Double cantilever 型試料の光弾性縞模様



(b) 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

図 5

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、転位は深く侵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、転位が深くまで侵入することを可能にしている。

図4の縦軸は、外力として1 kg 重の力をかけたときのせん断応力で目盛っている。これは前¹⁾に報告した力(300 ~ 600 g 重の力でき裂が進展する)と図2の転位列の長さ(腕の中央近くまで転位が侵入している)とを考えあわせると小さすぎるように見える。これは同符号の転位列では、端の転位が他の転位から押し出されることを考えれば説明できる。

図4に示したせん断応力の向きから、き裂先端から出ている転位は符号も含め図6のようになっていると考えられる。このような転位列はき裂前方に引張り応力の場をつくり、き裂進展を助ける働きをするはずである。これに関する詳しい議論は別に報告する。

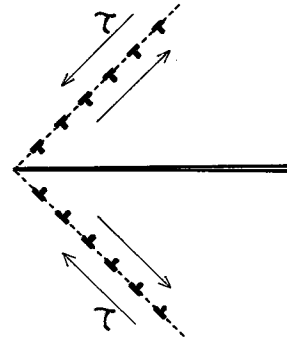


図6 き裂先端で発生する転位列の模式図

4. 結 論

比較的降伏応力の小さい NaCl 結晶でつくった double cantilever 型試料では、き裂進展の際に、き裂先端からき裂後方 45° の (110) すべり面に多数の転位が導入されることがエッチピット観察によりわかった。この結果は有限要素法による計算および光弾性実験から求めた応力場から理解できる。

5. 謝 辞

光弾性実験でご協力いただいた本研究所渡辺勝彦助教授、平野八州男技官に感謝いたします。本研究の一部は、昭和 55 年度選定研究費によって行ったものです。

(1980年11月14日受理)

文 献

- 1) 小泉大一, 中村和夫, 鈴木敬愛: 生産研究 **33**(1981) 46
- 2) W. S. Pellini et al: Naval Res. Lab. Rep. No. 6300 Washington D. C. (1965)
N. G. Feige and T. Murphy: Metals Eng. Q. **7** (1967) 53
- 3) S. M. Wiederhorn, R. L. Moses and B. L. Bean: J. Am. Ceram. Soc. **53** (1970) 18
- 4) J. E. Srawley and B. Gross: Mat. Res. Standards **7** (1967) 155
- 5) D. J. Chang, R. Muki and R. A. Westmann: Int. J. Solids Structures **12** (1976) 13