

特別講演

□第171回春季講演大会学術功績賞受賞記念特別講演
(平成28年3月23日)

破壊靱性に及ぼす転位の効果

Effect of Crack-tip Dislocations on Fracture Toughness

東田賢二 国立高等専門学校機構
佐世保工業高等専門学校 校長
Kenji Higashida 九州大学 名誉教授



*脚注に略歴

金属材料の破壊靱性の理解は、加工硬化のそれと並ぶ材料科学上の難題である。その理由のひとつは、「靱性」の概念がそもそも物理的に何を意味するのかが必ずしも判然としていない、或いは、少なくとも分かりにくいということにある。1971年10月京都で開催された「Toward Improved Ductility and Toughness」という国際シンポジウムの会議録「鋼の強靱性」の冒頭に、鈴木秀次先生の「延性と靱性の原子論的基礎づけ」と題する論文が掲載されている。そしてその論文の最初に次のような記述がある¹⁾。

「延性と靱性は明快に定義できる定量的概念ではなく、変形や破壊に関する諸性質を総合した概念である。これらの性質はより基本的な過程、例えば局所的応力集中の緩和、機械的エネルギーの消散及び吸収、加工硬化、亀裂の成長などに依存している。」(原文まま)

この記述の中で特に「明快に定義できる定量的概念ではなく」の箇所は、格子欠陥論を基盤とした材料科学の分野で日本を代表した大家の言葉として率直に受け止めるべきであると同時に、当時の多くの格子欠陥研究者が破壊現象の研究に対して持っていた意見を代弁したもののように思われる。すなわち「靱性」という物性は、結晶格子欠陥を中心とした物理的背景を土台に定量的に取り扱おうとすると、それを拒む多くの曖昧さを含んだ問題であるとの認識である。しかし1980年前後、そのような状況を打開しようとする兆しが、格子欠陥研究者の中に現れて来たように思われる²⁾。その1つが、き裂 (crack) の先端を、丁度、転位 (dislocation) と同じように弾性特異性を持つ線欠陥として捉えることにより、「き裂とその他の格子欠陥との相互作用」という切り口で、き裂の挙動を議論する動きが出てきたことである。言うまでも

なく、結晶性材料の塑性変形の問題は今日、転位論を基盤として議論されている。一方破壊の問題については、き裂がその主役であり、き裂の力学としての破壊力学が確立されているが、上記の動きは、そのような固体力学と材料科学の学際的・融合的研究と言えるかもしれない。

そこで表1は、き裂進展と転位運動を対比させたものである。個々の転位の運動を考えたとき、転位がある安定な格子位置から次の安定位置に至るまでのエネルギー障壁をパイエルスナバロ障壁 (Peierls-Nabarro barrier) と呼ぶ³⁾。一方、き裂の進展に際しても、1つ1つの原子間結合の切断に要するエネルギー障壁がき裂進展方向の格子間距離を周期として存在するはずであり、それを格子トラップ障壁 (lattice trapping barrier) と呼ぶ^{4,5)}。両者はいずれも、その移動に際しての格子間距離を周期とするエネルギー障壁という意味で同等のコンセプトと言える。

次に応力場の中にある転位に作用する力としてピーチ・ケーラー力 (Peach-Koehler force) が良く知られているが³⁾、

表1 き裂進展と転位運動の対比

(a) 格子トラップ障壁 Cohesive zone	←→ Peierls potential 転位芯
(b) クラック進展力	←→ Peach-Koehler力
(c) クラックと結晶欠陥との相互作用	←→ 転位-溶質原子, 転位-転位相互作用など
(d) 破壊靱性と材料組織	←→ 固溶硬化, 加工硬化 細粒硬化, 析出硬化など

* 昭和50年京都大学工学部卒業、同55年同大学院工学研究科博士課程修了後、同57年に京都大学助手 (工学部冶金学科) に採用され、平成4年九州大学助教授 (工学部材料工学科) に昇任、同19年九州大学大学院教授 (工学研究院材料工学科) に昇任し、現在に至っている。

これをき裂の問題に置き換えて見てみると、応力場の中にあるき裂先端に作用する力として、応力拡大係数の2乗に比例するき裂進展力 (crack extension force) に対応する⁶⁾。

以上のような転位とき裂先端の類似性に基づけば、転位論に基づいて固溶硬化 (転位-溶質原子相互作用) や加工硬化 (転位-転位相互作用) が議論されるように、き裂とその他の結晶格子欠陥との相互作用を用いて、き裂進展に及ぼす格子欠陥の影響を考慮することが出来るはずである。すなわち、破壊に対する抵抗力 (靱性) に及ぼす材料組織の影響もまた、き裂-格子欠陥相互作用を基盤とした定量的取り扱いが可能になるのではと期待される。そのためには、き裂と結晶格子欠陥との相互作用の定式化が必要になる。これに関して先駆的の仕事を行った研究者の1人が、き裂-転位相互作用を定式化し、転位によるき裂先端局部応力の遮蔽効果を提唱した Robb Thomson である⁷⁾。

まず図1に示すような σ_0 の外部応力が負荷されたときのモードIき裂を考えると、そのき裂先端近傍 ($r\theta$) の座標点における応力成分 σ_{ij} は式 (1) で与えられる。

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \dots\dots\dots (1)$$

ここで $f_{ij}(\theta)$ は角度関数であり、 K_I は外力による応力拡大係数 (stress intensity factor) で、式 (2) で表わされる (ここではモードIき裂とする)。

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (2)$$

このように、弾性的な挙動を取る連続体中のき裂先端近傍の応力は、き裂のモードによらず、 r がゼロに近づくと $1/\sqrt{r}$ に比例して無限大に発散する。応力拡大係数 K_I はそのようなき裂先端での応力発散の程度を一義的に定義すると同時に、前述のようにその2乗がき裂進展力に比例するという明快な物理的意味を持つ。

次に、き裂先端近傍に転位が導入されると、その転位の内部応力もまたき裂先端近傍で発散するはずであり、それは式

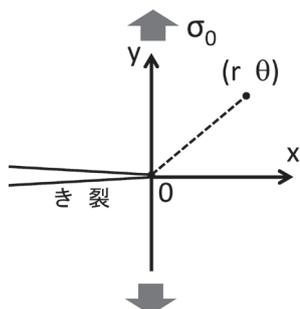


図1 き裂先端を原点とした極座標系

(1) と同様の形で次式のように書ける。

$$\sigma_{ij}^D = \frac{k_{ID}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \dots\dots\dots (3)$$

ここで k_{ID} は転位による応力拡大係数への寄与である。そこで外部応力に加えて転位の内部応力が存在するとき、その全応力は式 (2) と (3) の和で表わされる。

$$\sigma_{ij}^r = \sigma_{ij} + \sigma_{ij}^D = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \dots\dots\dots (4)$$

ここで k_I は局部応力拡大係数と呼ばれ、次式で示される。

$$k_I = K_I + k_{ID} \dots\dots\dots (5)$$

この局部応力拡大係数 k_I は、外力による応力拡大係数 K_I (外部応力拡大係数) に加えて、転位の内部応力の寄与 k_{ID} も考慮した、き裂先端近傍の実質的な応力拡大係数である。このような局部応力拡大係数 k_I が存在する時、き裂進展力 (エネルギー開放率とも呼ばれる) F_c は平面ひずみの条件下で、式 (6) で与えられる。

$$F_c^2 = \frac{k_I^2}{E} (1-\nu^2) \dots\dots\dots (6)$$

そして、き裂進展の臨界条件はグリフィス理論で与えられる。すなわち、き裂進展力 F_c が表面張力 γ_s に達すると破壊が起こる。これは次式 (7) で表わされる。

$$F_c = (K_I + k_{ID})^2 \left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) \geq 2\gamma_s \dots\dots\dots (7)$$

これより、き裂が進展する時の外部応力拡大係数 K_I 、すなわち破壊靱性値 K_{IC} は次式 (8) のように書ける。

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{1-\nu^2}} - k_{ID} \dots\dots\dots (8)$$

式 (8) において、第1項は原子間結合の切断に必要な項であり、第2項は転位の内部応力の寄与を示している。すなわち、材料の靱性は基本的に2つの因子、すなわち

- (1) 応力集中に対する抵抗力となる原子間結合の強さ、
 - (2) 応力集中を和らげる塑性緩和能力、
- によって支配される。そしてこの式 (8) により、破壊靱性値というマクロな力学物性を転位という微視的な格子欠陥に直接結び付けることができる。また第2項の k_{ID} は、一般に負の値 (外部応力と逆符号) を持つため、転位の導入により破壊靱性値 K_I は増加する。すなわち転位が導入された場合、その内部応力による局部応力拡大係数 k_{ID} は、一般に外力による応力集中を緩和低減する。この現象は恰も、き裂先端に集中

しようとする応力場を転位が遮蔽しブロックしているように捉えることが出来るため、転位によるき裂先端局部応力の遮蔽効果 (crack-tip shielding by dislocations) と呼ばれるようになった。図2はその様子を直感的に示した計算結果である²⁾。左図はその計算モデルで、引張応力により亀裂先端から刃状転位のペアが生成された状態を示している。右図はこのモデルに基づき、き裂面に作用する法線応力の分布を計算した結果である。但し、この計算では外力は付加しておらず、転位による内部応力のみを寄与を示している。なお図中の陰影は、応力値が負 (圧縮) であることを意味する。図中、転位の存在する場所に特異性が現れているが、それに加えて、き裂先端にも特異性が生じ、しかもそれは圧縮応力である。すなわち引張外力のもとで導入された転位の内部応力は圧縮応力の発散 ($k_D < 0$) を生み出し、そしてこの圧縮応力は外力による引張応力の発散を緩和 (遮蔽) し、き裂進展を抑制し破壊靱性値を増大させることになる。なお k_D の値は、転位的位置、性格 (バーガースベクトルの刃状、ラセン成分の大きさ、符号) が決まれば具体的に計算できる⁷⁾。そしてそれは2次元問題だけでなく三次元空間に広がった転位ループについても定量的に計算可能である⁸⁾。

以上、転位による応力遮蔽効果の考え方について概説したが、この効果は次のような形で実証されている。

- (1) き裂先端応力場の可視化：イオン結晶やシリコン結晶など透光性モデル結晶中のき裂先端近傍の応力状態を光弾性法を用いて可視化し、図2の理論計算に対応する転位によるき裂先端応力遮蔽場 (圧縮応力場) を観察した^{9,10)}。
- (2) 超高压電子顕微鏡法による遮蔽転位の解析：き裂先端近傍に生成された転位の性格付けを詳細に行い、文献8)の計算手法を用いて、式(8)中の k_D を具体的に計算し、そこで観察されたき裂先端近傍の転位が、遮蔽効果の役割を果たしていることを立証した¹¹⁾。

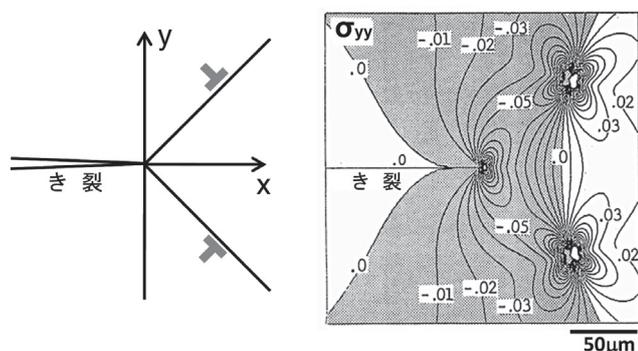


図2 転位による応力遮蔽効果。左図は計算モデル。外力はゼロ。右図はき裂面に垂直な法線応力分布。陰影領域は圧縮応力 (応力の単位: MPa)

- (3) 破壊靱性試験による遮蔽効果の立証：き裂遮蔽転位を導入した試料とそれを消滅させた試料の2種類を準備し、いずれも転位が動けない低温で破壊靱性試験を行って靱性値を比較し、遮蔽転位の存在により靱性値が大きく増加することを示した¹²⁾。

表2は鉄系合金での一例で、Fe-5wt.% Si単結晶のECT試験片に前変形で遮蔽転位を導入したものと、その後の焼鈍でそれを低減したものとを3本づつ準備し、77Kで破壊靱性試験を行い、その破壊靱性値を測定した結果である。遮蔽転位を含む試料の靱性値の平均が $25.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であるのに対して、低減した試料のそれは $12.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であり、いずれも脆性破壊しているにも拘らず、遮蔽転位の存在によって靱性値が大きく増加している。

以上、「塑性変形が何故、破壊靱性値を増加させるのか?」「き裂先端近傍での塑性緩和機構の主体は何か?」との問いに対して、「転位」による応力遮蔽効果を中心に述べてきた。このような考え方に基づいて、

- (a) 延性—脆性遷移 (Ductile-to-brittle transition, DBT)²⁾、
 - (b) 破壊靱性やDBTに及ぼす添加元素の効果¹³⁾、
 - (c) 結晶粒微細化による強度・延性改善の両立¹⁴⁾、
- などの諸問題について理解を深めることが可能である。

さて「靱性 (toughness)」という物性は、例えば上述の K_{IC} というパラメータを用いれば、材料の破壊抵抗の定量的指標となるが、それは結局、材料の如何なる能力を意味するものであろうか? 図3は塑性緩和によるき裂先端近傍の応力分布の変化を概念的な模式図で示したものである。曲線Aは、ある外部応力負荷のもとで全く塑性緩和の起こっていない

表2 転位遮蔽効果の靱性値への寄与 (Fe-5wt.% Si)

試料	Fe-Si	
	K _{IC} (MPa√m) Average	
遮蔽転位有り	25.9 24.0 26.6	25.5
遮蔽転位無し	12.5 12.5 12.9	12.6

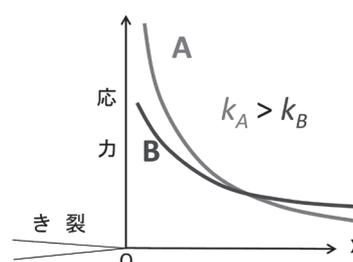


図3 塑性緩和による応力分布の変化を示す模式図

モードIき裂先端前方の応力分布(き裂面に平行な面に作用する法線応力成分)を示している。曲線Bは、曲線Aの時と同じ外部負荷のもとで、き裂先端から転位が放出された結果、その遮蔽効果によって局部応力拡大係数が低下した状態を示している(すなわち $k_A > k_B$)。ここで、曲線AとBの両者について原点0からx軸に沿って十分遠方まで積分すれば、その値は、外部負荷は同一であることから一致するはずである。このことは、曲線Aでき裂先端近傍に集中していた応力の一部がそのまま、曲線Bではき裂先端から遠く離れた領域に広く薄く再分布したことを意味する。そこでは転位がその応力再分配を引き起こす基本素子として機能し、それが弾性的特異点として内部応力源の役割を果たし、応力集中を緩和している。その結果、局部応力拡大係数は減少し、き裂進展力は低減され、破壊は抑制される。ここで注意すべきことは、き裂先端近傍での塑性変形による応力緩和は決して応力の一部消滅ではなく、集中応力の再分配であるということである。つまり靱性とは、「き裂先端に集中しようとする応力の分散能力」を示すもので、これは外部負荷により発生した「ストレス」を、内部応力を通して材料のなかで協力して分かち合う自然界の強かな「ストレス対処法」と言えるかもしれない。

本稿を終えるにあたり、恩師の高村仁一先生、成田舒孝先生、そして田中將己九大准教授を初めとする京大・九大時代の研究室やご関係の皆様へ深甚なる謝意を表すものである。

参考文献

- 1) 鋼の強靱性, 日本金属学会, 日本鉄鋼協会共編, (1972)
- 2) 東田賢二, 田中將己: 鉄と鋼, 97 (2011), 195.
- 3) 教科書として, 加藤雅治著: 入門転位論, 裳華房, (1999)
- 4) R.Thomson, C.Hsieh and V.Rana: J.Appl.Phys., 42 (1971), 3154.
- 5) N.Bernstein and D.W.Hess: Phys.Rev.Lett., 91 (2003), 025501.
- 6) 教科書として, 村上裕則, 大南正瑛編: 破壊力学入門, オーム社, (1979)
- 7) R.Thomson: Solid State Physics vol.39, Academic Press, New York, (1991), 1.
- 8) H.Gao: J.Mech.Phys.Solids, 39 (1991), 157.
- 9) K.Higashida, N.Narita, K.Matsunaga and R.Onodera: Phys.Stat.Sol. (a) 149 (1995), 429.
- 10) K.Higashida, M.Tanaka, A.Hartmaier and Y.Hoshino: Mater.Sci.Eng., A 483-484 (2008), 13.
- 11) K.Higashida, N.Narita, M.Tanaka, T.Morikawa, Y.Miura and R.Onodera: Philos.Mag., A82 (2002), 3263.
- 12) K.Higashida, M.Tanaka, E.Matsunaga and H.Hayashi: Materials Science and Engineering A, 387 (2004), 377.
- 13) 前野圭輝, 田中將己, 吉村信幸, 白幡浩幸, 潮田浩作, 東田賢二: 鉄と鋼, 98 (2012), 667.
- 14) T.Shimokawa, M.Tanaka, K.Kinoshita and K.Higashida: Physical Review B, 83 (2011), 214113.

(2016年6月3日受付)