

## 金属材料への破壊力学の適用に関する考察

中村 誠<sup>1</sup>・田辺 義一<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>(元)三菱重工業株式会社 〒852-8144 長崎県長崎市女の都2-39-17

<sup>2</sup>国立科学博物館理工学研究部 〒169-0073 東京都新宿区百人町3-23-1

### Remarks on the Application of Fracture Mechanics on Steels

Makoto NAKAMURA<sup>1</sup> and Yoshikazu TANABE<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>(Formerly) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 2-39-17 Menoto, Nagasaki-city, Nagasaki 852-8144, Japan

<sup>2</sup>Department of Science and Engineering, National Museum of Nature and Science,  
3-23-1 Hyakunin-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 169-0073, Japan

**Abstract** The fracture toughness  $K_{IC}$  of steels is experimentally estimated by the equation

$$K_{IC} = k\sigma_T \sqrt{\frac{I_{CP}}{E}}$$

where  $\sigma_T$  is true fracture stress,  $I_{CP}$  Charpy impact value,  $E$  Young's modulus and  $k$  a nondimensional constant.

This equation is applied to the estimation of  $K_{IC}$  of the materials that are supposed to be fractured according to the theory of the linear fracture mechanics including the range of general yielding conditions.

The physical basis of this equation is not yet clear and many problems resolved are discussed, which suggests that the framework of linear fracture mechanics will be retained with necessary change of basic concept of fracture.

**Key words:** fracture toughness, true fracture stress, Charpy impact value, estimation of fracture toughness, fracture mechanics.

### 1. 緒 論

織田等は金属材料の破壊靱性値を引張り試験および2 mm Vノッチシャルピー衝撃試験結果から求める推定式を提案している<sup>1),2)</sup>。この式は、簡潔であり、また、相応の精度を持つので、実用的には、相応の利用価値はあるもののように考えられる。

上記の論文では、この推定式に関しては、その形式の特徴に加えて、線形破壊力学の適用範囲が、従来考えられている応力範囲を遙かに越える範囲まで適用できることを示唆する事実等も示さ

れている。これらの事実は、学術的にも相応の価値があるものと考えられる。

しかし、その後の文献等を見る限り、この論文を引用したものはない。

そのために、この報告の著者の一人である田辺は、上記の推定式は、十分に活用されていないのではないかと疑念を持ち、その理由として、原論文では、この式の導出を次元解析によったとして、この式およびそれに関連する事項の意義や解釈についての説明が不十分であったために、その学術的価値が十分評価されていないためではないかと考えた。そして、上記の推定式およびそれに関連して明らかにされた事項は、実的にも学術的にも価値があるようであるので、上記の問題を

\* Corresponding author. E-mail: tanabe-y@kahaku.go.jp

修正した上で、再度世に示し、周知させることを原論文の著者の一人である中村に提案した。

これに対して、中村も推定式が存在そのものを周知させることは、必ずしも、それ程の意義はないかも知れないが、この式およびそれに関連した事項には、今日の目から見ても、学術的に問題とすべきものが含まれているので、これを明らかにすることはそれなりの意義があるかも知れないとして、その検討を行うことに同意した。

この報告は、上記のような経緯によって着手した検討の結果として明らかになったことを速報として示すものである。

なお、この問題は、中村としては、今日考えられている脆性破壊や破壊力学全体の体系の見直しを必要とするものようであるとの考えの下で、その検討を行っているが、ここに示す内容は、その基本となるものである。

## 2. 推定式の概要

### 2.1. 推定式

原論文の推定式とは以下のようなものである。

$$K_{IC} = k\sigma_T \sqrt{\frac{I_{CP}}{E}} \dots\dots\dots(1)$$

ただし、ここで

$K_{IC}$  = 破壊靱性値 (kgf/mm<sup>3/2</sup>)

$k$  = 無次元定数

$\sigma_T$  = 真破断応力 (kgf/mm<sup>2</sup>)

$I_{CP}$  = 2mm Vノッチシャルピー衝撃値 (kgf-mm/mm<sup>2</sup>)

$E$  = ヤング率 (21000 kgf/mm<sup>2</sup>)

とする。

図1に推定式を適用した試験結果の整理結果の一例を示す。

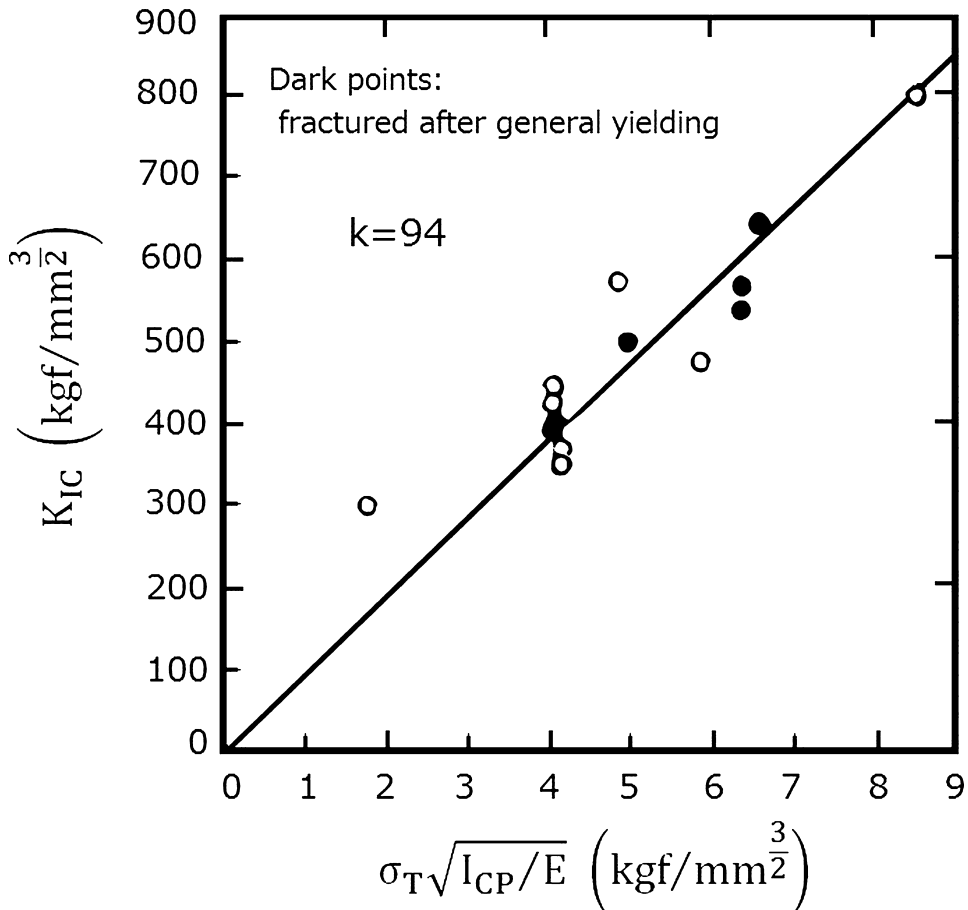


図1. 推定式による試験結果の整理の例

## 2.2. 推定式の補足事項

上記の推定式については、以下のようなことが想定されている。

- (1) 推定式は開口モードの破壊靱性値  $K_{IC}$  に関するものである。

これについては、著者等は線形破壊力学は開口モードの破壊にのみ適用すべきであって、剪断モードの破壊には適用すべきでないという見解を持っている。

- (2) 推定式の比例定数  $k$  は、試験法によって変化するものである。

これは、実験事実を示すと共に、亀裂が存在したときの採用すべき破壊靱性値は、その亀裂の種類と応力状態によって変化させるべきものであることを意味している。

- (3) 推定式は、公称応力が降伏強さを越えた場合の試験結果についても成立する。

これは、線形破壊力学は条件によっては、公称応力が降伏強さを越える範囲にまで、拡大適用が可能なことを示す。

以上のように、推定式は、その数式表示とは別に、線形破壊力学に対して一般の概念とは若干異なる

想定が行われている。

## 2.3. 推定式の導出過程の問題点

推定式の導出は、原論文では次元解析によって行ったとしているが、これは正確な表現ではない。

実際の推定式の導出は、切欠き破壊強さが真破断応力に比例し、また、2mm V ノッチシャルピー衝撃試験での50%破面率遷移温度すなわち50% FATT と関係する傾向を持つという他文献の試験結果および考察<sup>3)-5)</sup>を、その50% FATT 依存性を衝撃値そのものに対する依存性に置換えて整理することによって行ったものである。

勿論、このような発想に至るまでには、それ相当の関連試験や理論的な検討も行った。

図2は、その過程で行った  $G_{IC}$  の50% FATT 依存性と衝撃値のそれとの比較のために行った解析結果の一例を示す。この図は、材料の切欠き破壊強さと衝撃値は、共に、脆性破面の現れ易さに関係するという当時の考え方に基づいて、その依存性を比較したものの一例である。

この過程では、上記のような解析の他に、衝撃値および脆性破面の現れ易さや真破断応力の持つ意味などの検討も行ったが、ここでは、その詳細

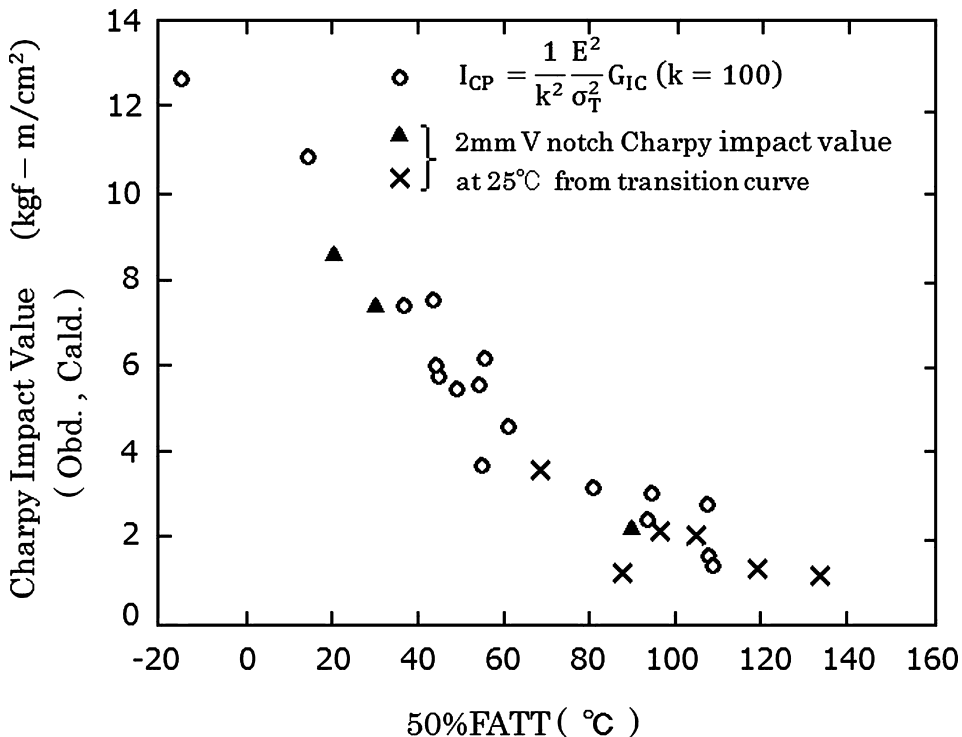


図2. 衝撃値の遷移温度依存性 (50% FATT) の実験値と計算値

は省略する。

推定式の妥当性は、そのようにして得られた式によって、種々の試験結果を整理した結果、当時としては相応の精度で成立することが確認されたので、相応の妥当性があると結論したものである。

勿論、この場合は、推定式の形式は、上記の脆性破面の現れ易さ等の問題などを考慮しても、それに対抗する相当の妥当性を持つことは検討済みであるが、ここでは、その詳細の説明は省略する。

ただし、推定式は、相互に依存関係を持つ真破断応力と衝撃値との関係のみで表しており、その依存関係に影響を与える降伏強さや引張り強さの役割の分離、解析は行われていないので、この点には問題がある。

したがって、今後の検討によっては、推定式の形式は若干の変更が必要になるものと考えられる。

ただし、そのような式であっても、その真破断応力および衝撃値依存性は、近似的には推定式の関係が維持されることには相違ない。

この報告は、直接的には、推定式の議論を行うものではないが、この式の援用が必要な場合は、上記のことを前提として行うので、この点は予め断っておく。

### 3. 金属材料に適用すべき破壊力学の理論

#### 3.1. 概説

今日では、一般には、線形破壊力学は弾性体の問題を取扱う理論体系であるから、弾塑性挙動を示す金属材料に適用するには、それ相当の補正が必要であると考えられている。

しかし、著者等は、これは誤りであり、実際には、現在提案されている補正法あるいはそのために提案されている破壊力学は、その成立範囲においては、線形破壊力学の定理は金属材料にも無修正で適用できるものであり、その修正法として提案されているものは、実用的には無用のものと考えている。また、理論的な面でも、それなりの見直しが必要ではないかと考える。

以下に、その理由を示す。

#### 3.2. 実験事実の経緯

線形破壊力学は、Griffithの理論と称するものをIrwinがそれと同値のものとして形式を変えて提案したものである<sup>(6)-8)</sup>。この同値性の主張については若干問題はあるが、ここでは、それを無視して、両者を同値のものとして共に線形破壊力学とみな

して論を進める。

金属材料に対する線形破壊力学の適用は、当初は、強さは非常に高いが、欠陥の存在によって、著しく低い応力で破壊を起す材料に適用された。このときに対象となった材料は、具体的には、超強力アルミ合金、チタン合金および超強力高張力鋼といわれるもので、これらは軍事用目的で性能が検討されていたものである。

線形破壊力学の適用性が次に注目されたのは、1953年を中心にした発電機およびタービンローターの脆性破壊事故に関連して、これらの材料にもそれが適用可能であることが明らかにされたことによるものである<sup>9),10)</sup>。

これらの材料は、当時としては通常の材料であり、今日からみると、かなり強さの低いものとされるものである。

ただし、この段階では、その適用が可能なのは、公称破壊応力が降伏強さよりも低い応力で起り、かつ、その破壊が脆性破壊と見なせる場合に限り、と考えられていた。

上述の推定式は、この発電機およびタービンローターの脆性破壊事故に関連して行われた実験結果を解析することによって得られたものであるが、その過程で、著者等が明らかにしたのは、それは、公称応力が降伏応力を越える場合や延性破壊が起こる場合でも、条件次第では、線形破壊力学の定理が適用できる場合があるということであった。

上記において線形破壊力学が適用できるという意味は、その定理が無修正で適用できるという意味である。また、この場合の線形破壊力学の定理とは、その幾何学的な関係の定理のことをいう。

#### 3.3. 理論の展開の経緯

上記の実験事実の確認の経緯と併行して、金属材料への破壊力学の適用に関する理論的な考察が進められてきた<sup>(6)-8)</sup>。

まず、最初の超強力合金に対する適用に関しては、多少の誤差はあっても応力状態の近似性を期待しての試みとして実験を行った結果、それが有効であったために、これを利用したというもののようである。

ただし、この事実を補強するためには、理論的な補強が必要であるとして、Griffithの理論で重要視されていると考えられていた表面エネルギーに対して、IrwinおよびOrowanが独立してその解釈を示した。これらについては、理論の精緻さの間

題は別として、その正当性と必要性については相当の疑問があるように思える。

次の議論は、亀裂の先端での降伏領域が大きくなる場合には、そのための補正が必要となるということで、破壊靱性値の降伏強さに対する比に応じて評価する亀裂長さを補正する方法が提案された。しかし、この提案は、材料が降伏強さに達したら加工硬化を起さずにそのまま変形を続けるという完全弾塑性体を想定した試算結果から誘導されたものであって、相当の加工硬化能を持つ実用材料にはそのまま適用できるものではなかった。

この問題は、さらに、発展してJ理論なるものとCOD理論なるものが提案されている。これらの理論は、前者は亀裂が進展するときの弾性歪みエネルギー解放率を精確に与える定理として提案されたものであり、後者はそのときの亀裂先端の開口率を規準として破壊の問題を考えようとするものである。

これらの理論の問題は、その妥当性と必要性を示す十分な実験事実がなく、また、現状では、実用材料の実際の性質に即した計算手段が十分には用意されていないということにある。

以上のような理論の展開の状況を見ると、実験事実は、無修正で線形破壊力学の定理が適用できる範囲が広がるということを示しているのに対して、理論の方は、益々難解になり、かつ、実用不可能な要求をしていることになる。

これは、論理的な見地から見れば、かなり奇妙なことといわざるを得ない。これは、いわば、どこかでボタンの掛違いがあったといわざるを得ないものとする。

以下に、何故にこのようなことになったのかについての見解を示す。

その要点は、Griffithの理論に対する誤解とIrwinの解説に対する過信にあると考える。

### 3.4. Griffithの理論の本質

#### 3.4.1. Griffithの理論の一般的な解釈<sup>6)-8)</sup>

上記のボタンの掛違いの原因は、Griffithが実験的に証明したとされるいわゆるGriffithの理論の解釈に誤りがあり、これに対して、後の理論展開は、これを前提として行われたことにある。

Griffithの理論として一般に理解されているのは、以下のようなものである。

すなわち、亀裂を内包する物体に力が作用するときに亀裂が進展を開始するのは、亀裂の進展によって起る弾性歪みエネルギー解放率 $G_I$ が亀裂の

進展によって新たに生成される亀裂面によって必要とされるエネルギー増加率 $G_{IC}$ に等しくなるときであるとするものである。

これを数式で表現すると次のようになる。

$$G_I = G_{IC} \dots\dots\dots(2)$$

この関係は、一般には、Griffithのガラスの実験で証明されたものとされている。

上記の場合は、亀裂の進展によって新たに生成される亀裂面に必要とされるエネルギー増加率は、亀裂面の表面張力に等しいとされている。この関係は次式で表される。

$$G_{IC} = \text{表面張力} \dots\dots\dots(3)$$

#### 3.4.2. Griffithの理論の実体

上記のような破壊条件の定式化は、Griffith自身が行ったものではない。これは、Irwinが行ったものである<sup>7)</sup>。

Griffithの原論文<sup>11)</sup>を見ると、以下のことがいえる。

Griffithが上記のようなことを想定して数式の誘導と実験計画を立てたことは事実である。

そして、その結果として、ほぼ、想定通りの結果を得ている。

しかし、実際の結果は、応力評価にして約10% (エネルギー評価にして約20%) の低い値しか得られなかった。これは、Griffith自身が指摘しているように実験的には成功といえるかもしれないが、理論的には首肯できない結果であるようである。

ただし、Griffithが想定した弾性歪みエネルギー解放率に対応して材料の抵抗値が定まるとする仮定は、その幾何学的条件の変化すなわち亀裂の長さの変化との関係で相当の程度の精度で成立することが示された。

原論文でのGriffithの考察は、上記の結果は、亀裂先端の破壊強さが通常測定される値の10倍あるいはそれ以上の強さであることが必要であり、それが実際に実現されるのかということの検討に費やされている。

また、上記のエネルギー論的な立場に立ったときの誤差の問題も考察もしている。そして、その理由は、時効による材料強さの低下であるとした。しかし、この考察には、若干の理論的な曖昧さが残されている。

このようなこともあってか、Griffith自身は、前述したようないわゆるGriffithの理論といわれるよ

うな定式化は、式の誘導過程でそれと同値ものを示したのみで、それを積極的には行わず、また、その成立を強く主張することもしていない。

上記の経緯を見ると、Griffithの理論の本質は、亀裂が存在する物体では、亀裂の進展は弾性歪みエネルギー解放率に対応する材料抵抗を仮定すれば、それによって、幾何学的な変化に対する破壊の問題が合理的に計算できるようになることを示唆したことにあるとしてよいようである。

これは、これで、破壊の法則に関する重要な発見であり、意義があるものといえる。

### 3.4.3. Griffithの理論の定式化

これはGriffith自身が示したものではないが、上述のGriffithの理論を定式化すると以下ようになる。

すなわち、亀裂を内在する弾性体では、亀裂の進展による弾性歪みエネルギー解放率 $G_I$ に対して、それに対応する材料抵抗として $G_{IC}$ が定まり、

$$G_I = G_{IC} \dots\dots\dots(4)$$

になったときに亀裂の進展が開始するとして問題を取扱うことができる。

この定式が一般の通念と異なるのは、材料の抵抗値としての $G_{IC}$ に対して、表面エネルギーの増加率という制約を除いたことにある。

このように表面エネルギーの増加率の制約を除くと、従来いわれていた不安定破壊と脆性破壊との関係の見直しも必要であるが、ここでは、広義の意味で問題とされている脆性破壊は、従来の破壊力学でいわれていた不安定破壊とは、必ずしも、同じものではないことを指摘し、詳細の説明は省略する。

### 3.4.4. 線形破壊力学の理論<sup>6)-8)</sup>

線形破壊力学は、上述のGriffithの理論で問題とされる弾性エネルギー解放率 $G_I$ は、公称応力あるいは荷重の自乗と比例する関係があり、直接にこれらと結びつけて議論できずに不便であることおよび数学的な不便さもあって、上記の $G_I$ の代わりに、応力集中度(応力拡大係数) $K_I$ によって問題を取扱おうとするものである。この提案は、Irwinによって行われたものである。

このとき、 $K_I$ と $G_I$ の間には、次のような関係がある。

$$K_I = \sqrt{\frac{EG_I}{1-\nu^2}} \quad \text{or} \quad EG_I = (1-\nu^2)K_I^2 \dots\dots(5)$$

ただし、ここで $\nu$ はポアソン比とする。

このとき、応力集中度 $K_I$ に対する材料抵抗は破壊靱性値といわれ、 $K_{IC}$ と表すことが慣習とされている。そして、 $G_{IC}$ との間で次の関係が成立する。

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{EG_{IC}}{1-\nu^2}} \dots\dots\dots(6)$$

線形破壊力学に関連しては、剪断力が加わる場合の結合則なるものが提案されているが、これは、破壊の法則の一般的な通念から見て意味がないものと考えられる。

ここでいう破壊の法則の一般的な通念とは、破壊の問題については、剪断成分は関係せず、おそらくは軸応力のみが関係するものとされていることをいう。これは、上記の(5)式の誘導でもそれが前提とされているものであるが、ここでは、その詳細の説明は省略する。

## 3.5. 金属材料での実験事実の解釈

### 3.5.1. 実験事実の意義

3.2.で示した線形破壊力学の金属材料への適用に対する実験事実は、上記の真の意味のGriffithの理論がそれぞれの状況に対しても成立することを実験的に示したもので、その意味では、それぞれの段階で、それは新しい発見とみなすべきものといえる。

したがって、その理由付けのための理論的な検討は、弾性体の場合の理論を出発点として行うのではなく、まず、そのような事実が成立することを事実として認めた上で行うべきものと考えられる。

従来この問題についての理論展開は、これに対して、 $G_{IC}$ が亀裂の進展に要する表面エネルギーの増加率に等しくなるとする従来の通念にとらわれていたことに問題があるようである。

### 3.5.2. 金属材料での線形破壊力学の成立の理由

Griffithが用いた弾性体での弾性歪みエネルギー解放率の概念は、一般的な立場に立てば、亀裂の先端近傍での応力状態を表す量といえることができる。

そして、これに対する材料抵抗は、その量がその値になったときに亀裂の進展を起す材料定数ということになる。

この概念は、弾塑性挙動を示す金属材料でもそのまま通用する。

ただ、弾性体の場合には、それが弾性歪みエネ

ルギーの解放率という明確な物理的意味を持っていたのに対して、金属材料の場合には、塑性変形の影響を受けて応力の再配分が起るためにその意味が曖昧になるということはある。

しかし、その応力状態が亀裂の先端から離れた部分とは独立の状態を維持しておれば、それが亀裂の先端近傍の応力状態を表すひとつの量としての概念を与えることには間違いない。

その物理的な意味については、その表現については詳細な吟味は必要であるが、一般的に言えば、亀裂の先端近傍の高応力側が塑性変形によるエネルギー消費が起った場合は、そのエネルギーは着力点の変位によって補充されるので、近似的には亀裂近傍の弾性歪みエネルギーと塑性歪みエネルギーの合計のエネルギー変化率あるいは面積率を与えるものとしてよいようである。

したがって、それに対する破壊抵抗は、同様に、破壊を起すときのその部分の弾性歪みエネルギーと塑性歪みエネルギーの合計の変化率あるいは面積率を表すことになる。

破壊抵抗がこのような意味を持つことについては、材料の破壊の問題を応力と強さとの関係で考える一般の考え方から見ると、一見、不自然なようにみえるが、これは金属材料に関しては不自然なことではない。

例えば、金属材料の引張り試験では、その破断は応力が真破断応力に達したときに起るとされているが、このときの延性も材料性質であり、したがって、これを考慮した塑性歪みエネルギーを考え、そのときの破断を、弾性歪みエネルギーと塑性歪みエネルギーの合計が一定になったときに起る現象として捉えることができる。このように考えると、通常の引張り試験の破壊強さは、弾性歪みエネルギーと塑性変形エネルギーの合計として定義できることになる。

上記の線形破壊力学の適用の際の材料抵抗は、このようなエネルギー論に基づいた破壊の法則のひとつの変形とみなすことができる。

#### 4. 破壊靱性値の物理的な意味

##### 4.1. 緒論

この章の目的は、推定式の妥当性を主張するものではなく、金属材料への線形破壊力学の成立理由を考察することにある。

そのためには、推定式の意味についての考察も

必要となるので、必要な範囲で、これについても説明する。

##### 4.2. 破壊靱性値の真破断応力依存性

推定式では、線形破壊力学で定義される破壊靱性値  $K_{IC}$  は真破断応力に比例する傾向があることを示している。

この比例傾向は、推定式の形式の当否は別にしても、実験的には、広く確認されているものである<sup>3),5)</sup>。

このような傾向を示す理由としては、金属材料の場合の亀裂の進展のためには、亀裂の先端に真破断応力に近い応力が作用する必要があるが、かつ、そのような条件で亀裂の進展が起ることを示唆しているものと考えられる。

この真破断応力は、Griffithがガラスの場合の切欠きの先端の強さとしてガラスの理想的な強さが実現していると仮定し、また、実証したものと対応する。

##### 4.3. 破壊靱性値の衝撃値依存性

推定式では、破壊靱性値は衝撃値の平方根に比例する傾向があることを示している。

この問題についても、上述の場合と同様に、推定式形式についての吟味が必要であるが、近似的にはそのような関係があるとしてよい。

衝撃値は、切欠きがある試験片を切欠き底から強制破壊をさせるときに、その破面形成に必要な弾性歪みエネルギーの合計値を与えるものである。これに対して、前述したように、破壊靱性値も類似の形状を持つ亀裂の先端から強制破壊をさせるときに必要な弾性歪みエネルギーの合計値を与えるものである。

したがって、両者の破壊の間の類似性に相当な相関性があるならば、破壊靱性値と衝撃値の間にも強い相関関係が期待できる。

ただし、その場合は、切欠きの形状やその量の定義の相違もあるので、その関係は比例的なものになる。そして推定式は、その比例関係のみに着目すれば、その通りになっていることを示しているものである。

ここで問題なのは、推定式は、その比例関係をさらに真破断応力によって補正しなければならないとしていることである。

この点については、真破断応力と衝撃値の値が直接に与えられている原論文の結果を見ると、推定式による整理結果と衝撃値単独との相関関係としては、図3および図4のような結果を与える。

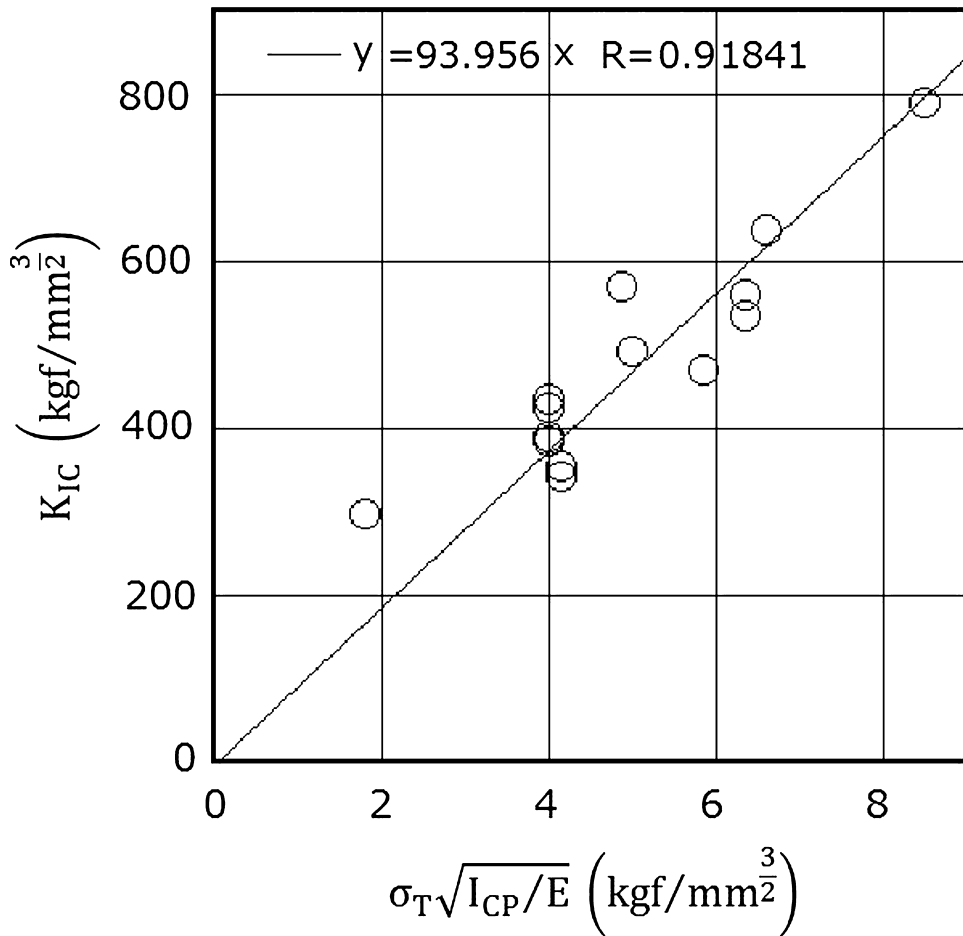


図3．推定式による整理結果の精度の例

(ただし、図中のRは最小自乗法におけるピアソンの相関係数とする。)

両者を比較すると、破壊靱性値との関係は、真破断応力による補正を行うとその相関性は向上するが、そのような補正をせずに直接に破壊靱性と衝撃値の関係をとっても、それなりの精度でその比例関係が成立する。

ここでは、詳細な説明は省略するが、この場合の真破断応力による補正の効果は、それ程強いものではない。したがって、上記の図4の破壊靱性値と衝撃値の平方根との関係は、それなりの確度をもって直接に比例関係にあるとしてもよい関係にあるようである。

このことは、金属材料の切欠き破壊と衝撃試験における破壊は、相当に強い類似性をもって起ることを示唆しており、そして、これが破壊靱性値

の衝撃値の平方根との比例関係の成立の理由であると考えられる。

#### 4.4. 公称応力が降伏強さを越える場合の成立理由

原論文で著者等が主張している公称応力が降伏強さを越える場合にも線形破壊力学が形式的に適用できるとする実験結果の材料性質をみると、真破断応力が降伏強さの約1.5倍以上の値の材料であることが分かる。

このような場合には、亀裂の進展の際の亀裂近傍の応力状態が真破断応力に近い応力範囲で規定されるものとするれば、公称応力が降伏強さを越えたとしても、亀裂先端付近の応力状態は、それによって大きく変化することはない。すなわち、この場合は亀裂先端付近の応力状態の独立性は維持される。したがって、この場合は、当然、線形破



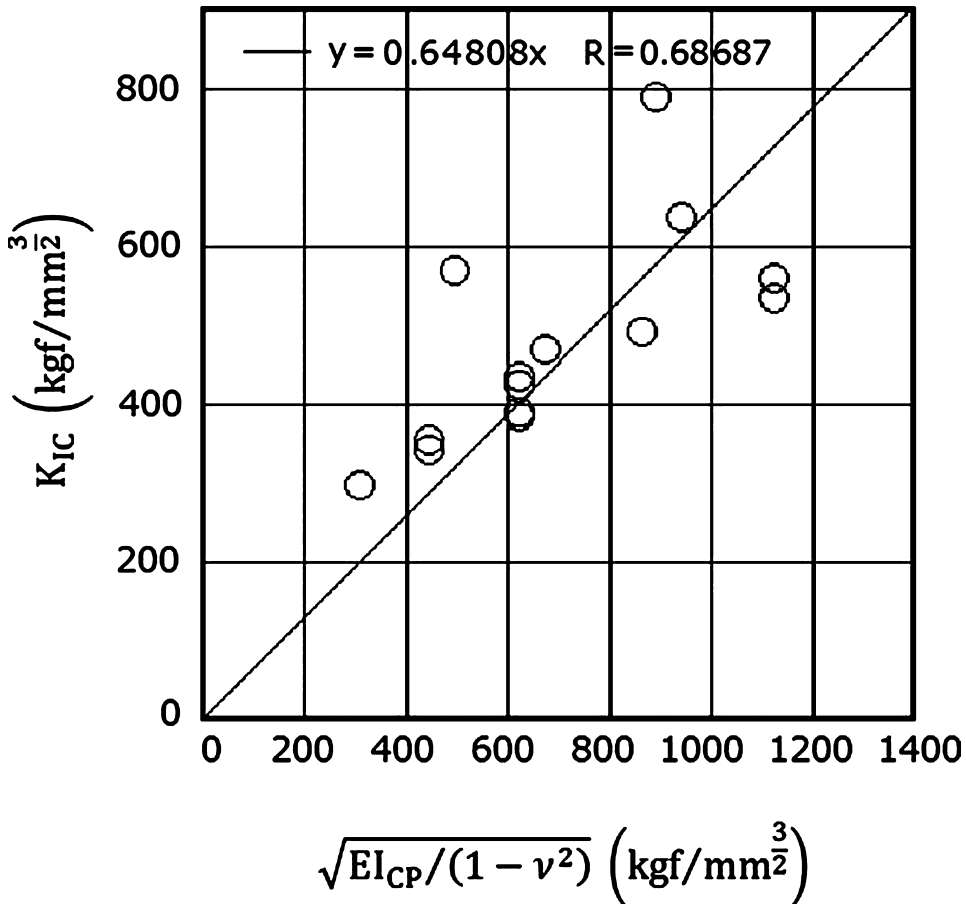


図4．破壊靱性値と衝撃値の相関関係整理結果の精度の例

壊力学の定理が適用できる．

これが原論文の実験結果で、公称応力が降伏強さを越えた範囲でも適用できた理由であると考えられる．

上述の考察から推定されるように、公称応力が降伏強さを越えた場合に、どの程度まで線形破壊力学が適用できるかは、真破断応力の降伏強さの相対比に依存する．したがって、この問題に関しては、実際の問題の取扱いにおいては、十分に慎重な判断が必要である．

## 5. その他の事項の考察

### 5.1. 線形破壊力学での結合則の問題

線形破壊力学の解説書では、破壊を起す力に剪断成分が含まれる場合の  $K$  および  $G$  の結合則なるものが示されている．

この発想は、亀裂が存在する場合の亀裂の進展は、亀裂の進展による弾性歪みエネルギーの解放率と表面エネルギーの増加率との釣合の問題として取扱うことができるという考え方に由来するものである．

しかし、亀裂が進展して、新たな破面を形成するためには、亀裂の先端での分離が起こることが必要であり、このような分離に剪断力やそれによって形成される弾性歪みエネルギーが寄与することは考えられない．

特に、金属材料の場合には、剪断力に対して材料の滑りによって、相当のエネルギーが吸収されるので、それが考えられているような破壊に対するエネルギーとして寄与することは考えられない．

したがって、少なくとも、金属材料では、この結合則は無視して、亀裂の進展は、想定される面に垂直な力あるいは軸応力のみを考慮すればよい

と考えられる。

前述したように、そもそも、線形破壊力学の基礎とされる Griffith の理論なるものは、一般の通念とは異なり、上述のようなエネルギーの釣合論とは異なるものである可能性がある。

したがって、この問題は、このような見地から再検討する必要があるものと考えられる。

## 5.2. 推定式の妥当性の問題

前述したように、織田等の推定式の真破断応力依存性は、衝撃値の依存性に比して相当に弱い相関性を表すものである。しかし、それはそれなりに精度の向上に寄与しており、その結果として、それ相当の精度が得られているので、推定式そのものは全体としては、それ相当の意義はあるものと考えられる。

この推定式は、当時の計算手段の事情もあって、さらに、考慮すべき降伏強さや引張り強さの影響や他の形式の式の成立の可能性の検討は十分になされないままに提案されたものである。

したがって、これらの影響については、今後の検討が必要であり、場合によっては、その形式は変化する可能性がある。この問題については、現在、分析作業を実施中である。

## 6. 結 論

最近の破壊力学の解説書の傾向を見ると、従来の理論の羅列的な解説に終わり、その実践的な適用法についての解説が、十分になされていないように考えられる。

これらの解説書は、最近の計算手段や数学理論の発展にあわせて、適切な解説を行っており、その意味では、十分に意義はあるものと考えられるが、破壊力学の目的は、破壊の問題を適切に処理することにある。

したがって、この報告に示したことの当否は別にしても、ここに示したような視点からの実践的

な適用法についての議論ないしは解説が必要ではないかと考えられる。

特に、ここで示した線形破壊力学の適用範囲の広さと推定式の意味については、この当否は別にしても、今後のこの問題の取扱いの面からも、十分に議論されるべきものとする。

## 参考文献

- 1) 織田貞一郎, 中村 誠, 川上浩司, 1975. 「鋼材の破壊靱性値と引張りおよび衝撃性質との関係」, 日本金属学会誌, 39(7), 725-735.
- 2) 織田貞一郎, 中村 誠, 川上浩司, 1975. 「小型試験法による破壊じん性推定法」, 三菱重工技報, 12(1), 100-107.
- 3) D. R. DeForest, D. L. Newhouse, B. R. Seguin, 1957. "Progress in the Development of Steam Turbine-Generator Rotor Materials", ASME. Paper. 57-A-280.
- 4) G. O. Sankey, 1960. "Spin-Fracture Tests of Nickel-Molybdenum-Vanadium Rotor Steels in the Brittle Fracture Range", Proc. ASTM. 60, 721-737.
- 5) A. J. Brothers, D. H. Winne, Discussion in Ibid 733-736.
- 6) "Fracture Toughness Testing and Its Applications", ASTM STP 381 (1981).
- 7) M. Janssen, J. Zuidema, R. J. H. Wanhill, 2004. "Fracture Mechanics", Taylor & Francis.
- 8) T. L. Anderson, 2005. "Fracture Mechanics: Fundamentals and Application", CRC Press.
- 9) D. H. Winne, B. M. Wundt, 1958. "Application of the Griffith-Irwin Theory of Crack Propagation to the Bursting Behavior of Disks, Including Analytical and Experimental Studies", Transactions of ASME. 80, 1643-1658.
- 10) G. O. Sankey, 1960. "Spin-Fracture Tests of Nickel-Molibdenum-Vanadium Rotor Steels in the Brittle Fracture Range", Proceedings of ASTM. 60, 721-737.
- 11) A. A. Griffith, 1920. "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids", Philosophical Transactions of Royal Society of London Series A, 221, 163-198.