

討 10 脆性破壊の伝播停止現象に関する最近の研究

東京大学工学部 教授 金 沢 武

§1 はじめに

構造物の脆性破壊現象を研究室で近似的に再現するという目的で各種の大型試験法が提案され、実施されてきたが、これらの結果は主として設計工作技術（材料選定を含めて）の面から、溶接構造物の脆性破壊事故防止に対する有益な解決手段の基礎資料をあたえていることは衆知のことであろう。

脆性破壊特性は発生特性と伝播（停止）特性に分けて考えられているが、ここでは伝播（停止）特性と関連した諸問題についてのみ述べることにする。勿論一般の溶接構造物には、脆性破壊の発生が、その構造物の機能を制するものも数が多いが、船舶、原子炉あるいは特殊な圧力容器など脆性破壊事故が非常な災害をもたらすおそれのある構造物の設計、工作には伝播（停止）特性を基に考えなければならぬ。

§2 脆性破壊伝播停止特性を求めるための試験法とその解析

伝播停止特性は、二重引張試験（図1）または温度勾配型 ESSO 試験などによって求められる。伝播現象は低応力水準下で観察されるから弾性的取扱いが有効であること、クラックきわりの応力分布、ひずみエネルギー解放率などは通常の伝播速度、とくに停止に近い状態を考えるとほぼ静的な値とあまり違わないことなどからエネルギー論的破壊力学的解釈が適用できる。

図2はある温度での脆性破壊の伝播にはある限界値以上の応力が必要であるとの従来の解釈によると、温度勾配型と平坦温度型では、それぞれ異なった特性をあたえることを示したものである。しかし、破壊力学的な考え方を適用し応力の代りに

$$K_C = \sigma \sqrt{2B \tan(\pi C / 2B)} \quad (1)$$

ただし σ = 付加応力 B = 試験片幅 C = 停止クラック長さ
を採用すれば、温度分布による特性値の差がなくなる⁽¹⁾ことが吉沢⁽¹⁾、越賀⁽²⁾等によって明らかにされた。また K_C 値の温度依存性は次に示す Arrhenius 型の式で表わされることが秋田⁽³⁾、越賀⁽²⁾等によって示されている（図3）。

$$K_C = K_0 \exp(-R/T) \quad (2)$$

ただし K_0 , R は材料定数 T = 絶対温度

K_C 値は鋼板の板厚によって変化するもので図4にその結果を示してある⁽⁴⁾。図は厚板を機械切削によって減厚したものについて行った実験結果であるが、図より板厚効果はほぼ 40 mm 前後で飽和することが知れる。

なお軟鋼、高張力鋼、低温用鋼など広範囲にわたるタイプの鋼板について調査すると、上記の材料定数 R と K_0 の間には図5に示すような関係が越賀⁽⁵⁾によって示されている。したがって K_C を定める材料定数は1ヶとなり、図6に示すように $\log K_C \sim 1/T$ の直線関係にはほぼ定点を通るという一般的傾向がある。この理論的根拠は現在不明であるが、広範囲の鋼種について小型試験との相関関係などを考察する場合、材料特性が単一のパラメータで代表せうる点は具合がよい。この観点から日本溶接協会 WES 低温用鋼材質判定基準、日本鉄鋼協会低温用鋼 JIS 規格原案の制定が現在すすめられている。

§3 クラックアレスターに関する研究

前述した脆性クラック停止特性の破壊力学的解析は、クラックアレスターの効果の研究に発展した。

図7は溶接アレスター試験で、停止特性の異なる材料からなる混成試験片で、一杯温度下で靱性の劣る材料を貫通したクラックを靱性のすぐれたアレスト材に突入させその効果を調べるものである。貫通材の幅を変化させることにより、突入クラックの長さを種々に変えることができる。アレスト材の温度勾配型試験より求められた K_{IC} 値から停止クラック長さをパラメータとして計算される応力と停止温度の関係と溶接アレスター試験の結果とを比較した例を⁽⁶⁾図8に示す。これより温度勾配によるクラック停止現象と溶接アレスター試験片におけるような一様温度下での停止現象とでは、停止クラック長さを全く同等とみなすことには問題があることがわかる。すなわち例えば船体構造などにおいては、一部に良質の材料のクラックアレスターとして使用するという考え方があるが、この場合の条件は溶接アレスター試験の方がより実際に近い条件ということが出来、温度勾配型の試験から得られる結果は過度に安全側の推定を行なう傾向にあるようである。

前述の K_{IC} 値による整理法においては、停止クラック長さを大きくとれば停止温度はいくらでも上昇しうることになって直観的にも不自然であり、パラメータとしてのクラック長さは如何に長大なものでも、標準的なクラック停止試験でみられる程度の短いものと同様の物理的意味を有するものかどうかは重大な問題である。

木原⁽⁷⁾等は幅1300mmという広幅の試験片を用いて、図9に示すような各種の溶接アレスター試験を行なって、クラックアレスターの有効性について研究中である。これまでに得られた結果によると、広幅アレスター試験において式(1)と同様の手続きにより標準寸法の温度勾配型 ESSO 試験より得られる K_{IC} と同一の値を与えるためには、広幅アレスター試験片における長大停止クラックは長さを割引かねばならない、すなわち「実際の停止クラック長さ」と「有効クラック長さ」の関係として図10のような結果を得た。

この問題についてはこの他に巨大船建造に関する技術的問題の系統的研究活動の一環として、日本造船研究協会において2400mmとさらに幅の広い試験片を用いて研究が進行中であるが、今までに得られた結果を図10の中に示してある。これによると先の木原らの結果とことになっており、さらに検討しなければならない問題と考えられる。

また筆者ら⁽⁸⁾は各種の力学的なクラック阻止要素の模型について、そのクラック阻止効果を破壊力学的計算を行うことによつて考察し、クラックアレスターモデルつき二重引張試験片による実験的検討を行なって、前述の破壊停止条件の妥当性を別の方面から検討すると同時に、合理的なクラックアレスター設計の基本思想と基本的手法の追求を続けている。図11はこうしたアレスターモデル試験片の例であり、図12はスチフナアレスターからの阻止力が充分大きく、クラック進展力(ひずみエネルギー解放率に対応)を材料のクラック伝播抗力以下に下げればクラックを停止させることが定量的に説明される。

前記の有効クラック長さについての将来の研究成果をも合せて、このような方法をさらに発展させることによつて、与えられた条件においてクラックアレスターを設計する場合、如何なる寸法、材質のものを如何なる方法で設けたらよいかを定量的に決定出来るようになるであらう。

参考文献

- (1) 吉識、金沢、町田：造船協会論文集，118（1965）
- (2) 越賀、今沢、竹花：造船協会論文集，114（1963）
- (3) 秋田、池田：造船協会論文集，112（1962）
- (4) 日本溶接協会 LTW 委員会資料 LTW-49（1968）
- (5) 越賀：高圧力，VOL. 5，No. 6（1967）
- (6) 町田：博士論文（1964）

S 704

(7) 木原、金沢、池田：造船協会論文集，122（1967）

(8) 金沢、町田他：造船協会論文集，115（1964），116（1964），118（1965），121（1967）
122（1967），123（1968）未発表

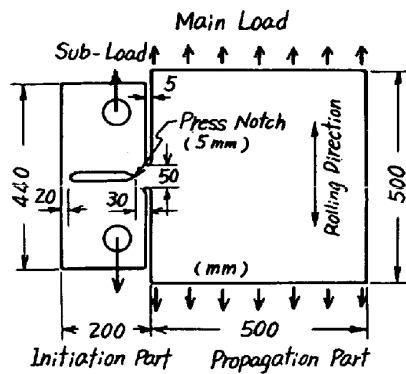
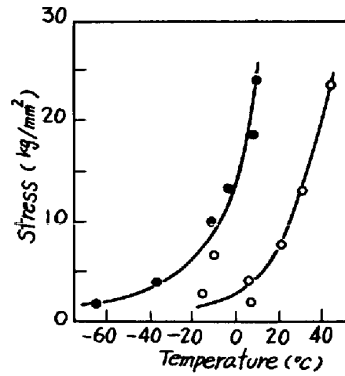
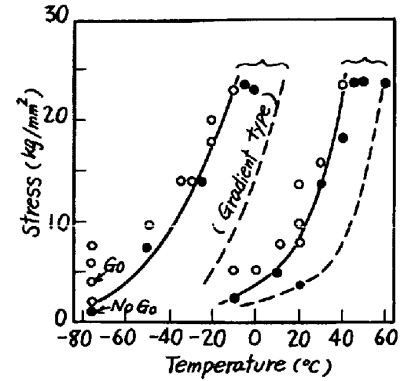


図1 二重引張試験片



(a) Gradient Type



(b) Flat-Temperature Type

図2 二重張張試験結果の例（吉識・金沢・町田）

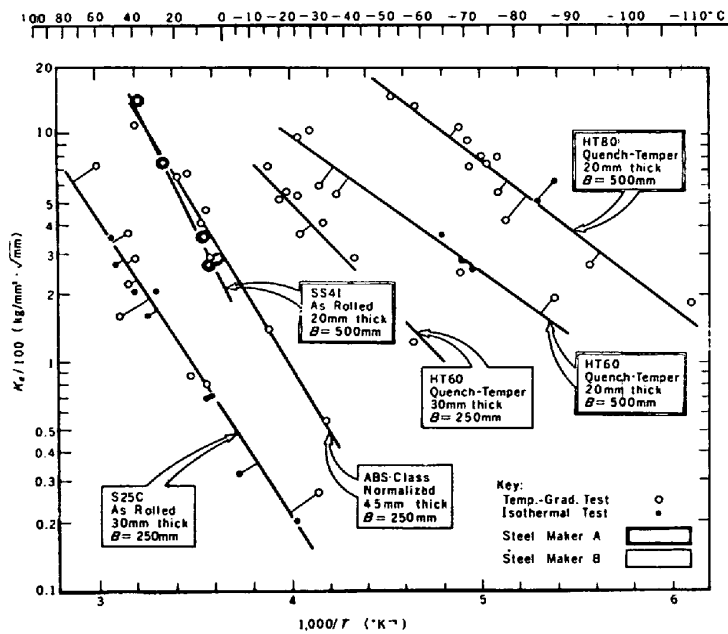


図3 K_c と T の関係

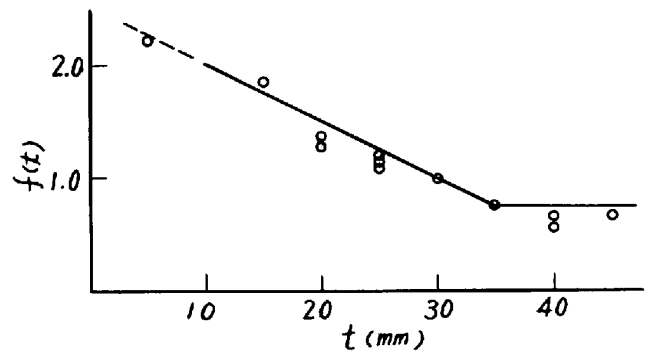


図4 板厚効果（板厚 $t=30$ mmのときの K_c 値を1としたときの任意板厚の場合の K_c 値， $f(t)$ ）

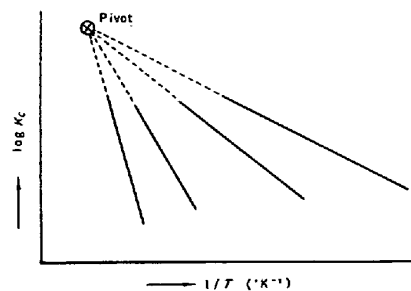


図6 $\log K_c \sim 1/T$ 関係にみられる一般的傾向（模式図）

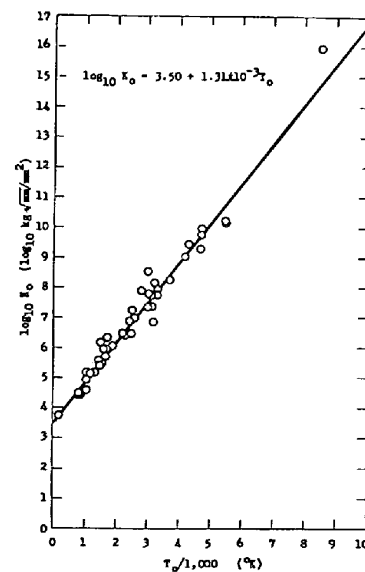


図5 T_0 と K_0 の相関

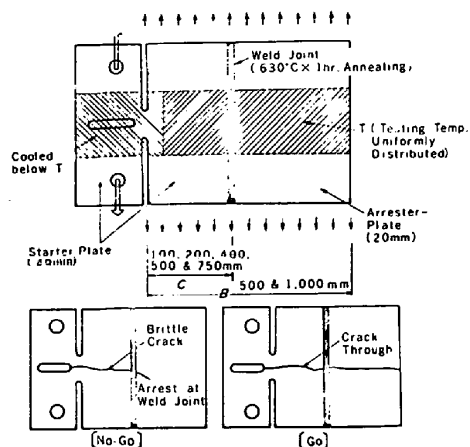


図7 溶接クラックアレスター試験

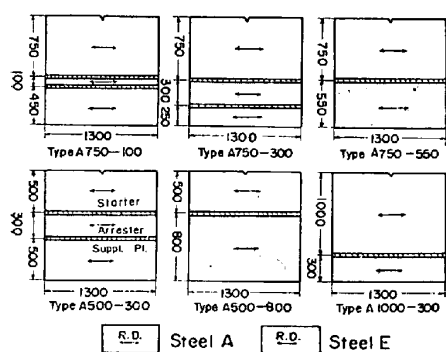


図9 クラックアレスター大型試験片(木原他)

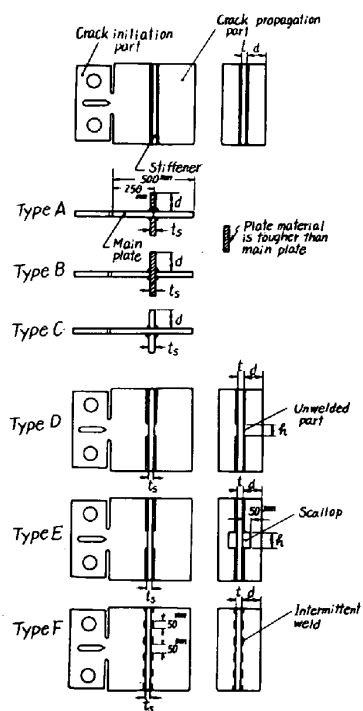


図11 アレスター模型試験片の例(金沢他)

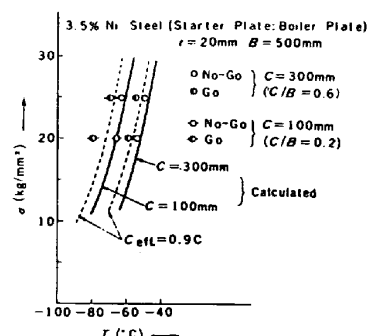


図8 溶接クラックアレスター試験結果

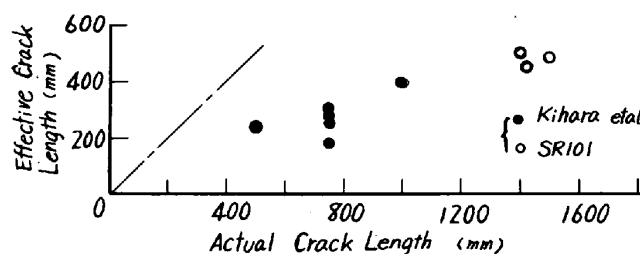


図10 有効亀裂長さと亀裂長さの関係

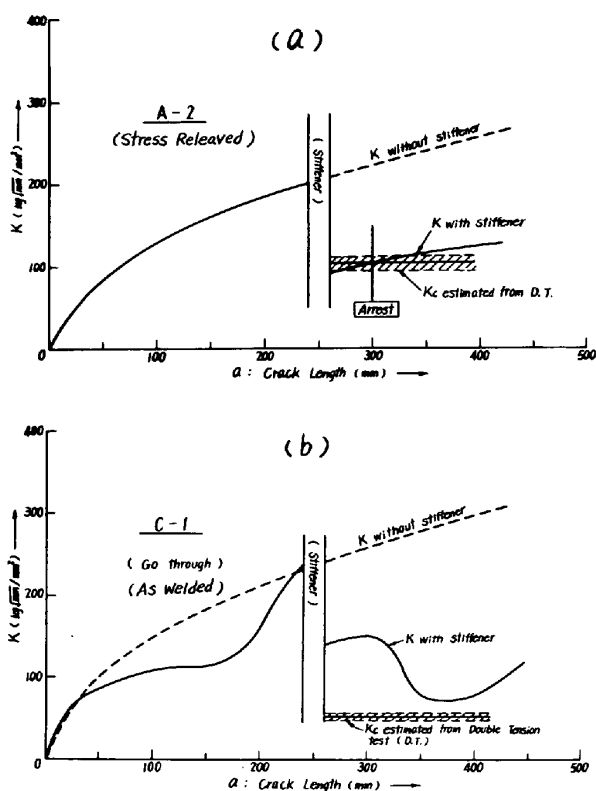


図12 ステフナー型アレスター模型の解析例