

## ESSO試験とFEMによる動的き裂伝播停止特性( $K_{ca}$ )の検討

鉄鋼材料の破壊形態は、低温になると延性からぜい性に遷移する。延性破壊は塑性変形を伴うねばりがある破壊であるのに対し、ぜい性破壊は降伏強度以下の低応力で発生するもろい破壊である。

ESSO試験とは、大型の破壊靱性試験のひとつで、ぜい性破壊のき裂伝播停止特性を求めたものである(第1表)。き裂伝播停止とは、対象としている部位にき裂が発生したとしても、最終破壊に至る前にき裂の伝播が止まることを指す。この特性は、大規模破壊を防止するためのフェイルセーフの性能として、船舶、パイプライン、低温タンク等に用いられる鉄鋼材料に求められている。

動的(衝撃)現象であるき裂の伝播過程を表すには、物体の慣性力を考慮した動的応力拡大係数を用いるのが適切だと考えられるが、高速で伝播するき裂先端の応力変位場を直接測定するのは困難であるため、ESSO試験においては、動的現象を静的状態(初期応力・停止き裂長さ)に置き換え、また、有限試験片寸法を無限板の一直線上のき裂群(tangent式)に置き換えて、応力拡大係数を算出している。

試験では求められない動的応力拡大係数の履歴を調べるため、汎用構造解析ソフト(ABAQUS)を用いて、き裂伝播を模擬した動的FEM解析を行った。ひずみゲージで実測した応力履歴と数値解析値を比較して動的FEM解析の妥当性を検証した後に、き裂伝播過程の動的応力拡大係数の履歴を求め、ESSO試験結果の応力拡大係数と比較検討した。

第1表 破壊靱性試験の分類

破壊形態	対象事象	試験片寸法	試験名
ぜい性	き裂発生	小型	$K_{Ic}$ 、CTOD
		大型	ディープノッチ
	き裂伝播停止	大型	ESSO
延性	き裂発生	小型	$J_{Ic}$



材料評価事業部  
材料技術部

遠藤 浩司



エンジニアリングメカニクス事業部  
CAE・実験解析技術部  
構造・プロセス解析技術室

清水 洋志

### B-1 ESSO 試験

#### 1-1 試験方法

##### 参考文献

- \*1) (社)日本溶接協会: 低温用圧延鋼板判定基準 解説5. (a) ぜい性破壊停止特性 WES3003-1995
- \*2) (財)日本海事協会: 脆性亀裂アレスト設計指針 附属書A 脆性亀裂伝播停止靱性 $K_{ca}$ 試験方法 2009年

ESSO試験は、米研究機関Esso Research and Engineering Co.に由来するためこのように呼ばれるが、現在国内においては日本溶接協会\*1)および日本海事協会\*2)にて規格化された試験方法を指す。

試験片寸法は500(W)×500(L)×元厚(t)mmとし、引張方向中央に長さ29mmの機械切欠を設ける。V型切欠の底は0.1Rに加工する。

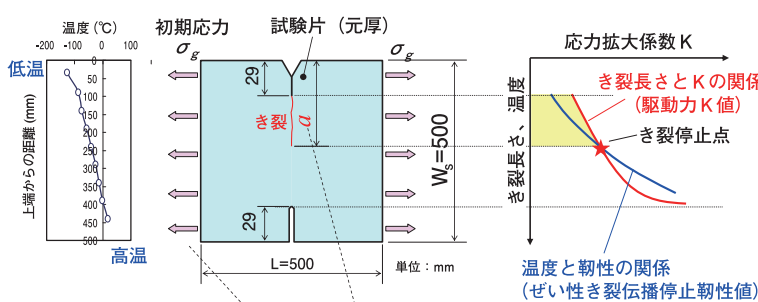
試験の手順は、試験片に所定の温度勾配を付与し、所定の引張応力を負荷した状態で、V型切欠にくさびを打ち込んでぜい性き裂を発生させる(第1図)。

き裂は試験片を貫通する方向に伝播するが、温度勾配により試験片の靱性はき裂が長くなるに従い上昇するので、き裂は貫通せずに停止する。

第1図の右グラフにき裂伝播停止の仕組みを模式的に示す。青線が試験片の温度と靱性の関係で、赤線がき裂長さと応力拡大係数(以下、K値)の関係である。赤

線はき裂を伝播させる力なので駆動力K値とも呼ばれる。き裂発生点(グラフの左上)ではK値が青線<赤線のためき裂は伝播するが、青線と赤線が交差する点でき裂は停止する。この停止点のK値は、(1)式のtangent式を用いて初期応力 $\sigma_0$ と停止き裂長さ $a$ から算出され、き裂停止温度におけるぜい性き裂伝播停止靱性値( $K_{ca}$ 値)となる。き裂停止温度は、等間隔に貼付した熱電対の温度計測値から求められる。このように1体の試験片から、1温度に対する $K_{ca}$ 値が得られる。文献2)のESSO試験規格では3温度以上の $K_{ca}$ 値を求め、アレニウスプロット(後述)を作成する。

第1図 ESSO試験の模式図



★ぜい性き裂伝播停止靱性値(アレスト靱性値)

$$\text{tangent 式: } K_{ca} = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \sqrt{\frac{2W_s}{\pi a}} \tan\left(\frac{\pi a}{2W_s}\right) \quad (1)$$

## 1-2 試験装置

ESSO試験に用いる大型試験機の一覧を第2表に示す。30MN横型引張試験機(写真1)は当社が保有する試験機の中で最大荷重容量であり、試験機の大きさは、全長10m、全幅3mである。横型油圧4連シリンダにより最大30MNの引張荷重を試験片に載荷でき、各シリンダの先端に取付けたロードセルを用いて荷重を計測する。最大載荷速度は約10mm/minであり、最大ストロークは450mmである。試験片の試験機への取り付けはピン結合により行う。そのため、ピン孔を設けた専用治具(タブ板)を試験片に溶接する。

第2表 大型試験機の一覧

試験機名	30MN横型引張	10MN横型引張	5MN油圧ジャッキ
荷重(MN)	30	10	圧縮:5、引張:2.3
ピン間距離(mm)	4,950~5,450	2,400~2,650	3,000
ストローク(mm)	最大450	最大400	最大850

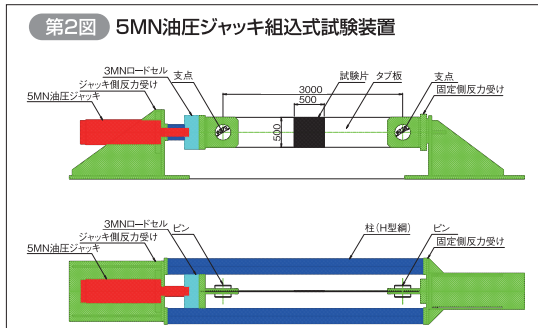
写真1 30MN横型引張試験機



5MN油圧ジャッキ組込式試験装置(第2図)は、5MN油圧ジャッキ、3MNロードセル、反力受け治具から構成され、床厚1.5mの鉄筋コンクリート製テストベッド上に設置されている。板厚16mm程度までの試験に適しており、パイプライン鋼管等のESSO試験に用いられる。

ぜい性き裂の発生は、試験片のV切欠に差し込んだくさびに、質量100kgの錘を落下させて行う。落下高さは最大2mまで可能である。

第2図 5MN油圧ジャッキ組込式試験装置



試験片の温度勾配の付与は、試験片上部を液体窒素で冷却し、下部をヒーターで昇温することで行う。液体窒素による冷却は自動噴霧装置を用いて省人化を図っている。これは試験片の温度をフィードバックして、目標温度との差異に応じて電磁弁を開閉し、適量の液体窒素を冷却箱に噴霧する装置である。試験片上部を冷却し、下部を昇温することで、試験片に一樣な熱流束が生まれ、適切な温度勾配(約0.3°C/mm)が付与される。

## 1-3 試験結果

一例として、板厚60mmの造船用厚肉鋼板の試験結果を第3図に、き裂伝播経路および破面を写真2に示す。絶対温度の逆数を横軸に、 $K_{ca}$ 値の対数を縦軸にとると、試験結果は直線で近似できる。このグラフをアレニウスプロットと呼ぶ。A材はB材よりもぜい性き裂伝播停止靱性に優れており、-10°Cにおける $K_{ca}$ 値は7000[N/mm<sup>1.5</sup>]程度である。(財)日本海事協会のぜい性亀裂アレスト設計指針では、 $K_{ca} \geq 6000$ [N/mm<sup>1.5</sup>]を要求しており、A材はそれを満たしている。vTrsはVノッチシャルピーの破面遷移温度で、シャルピー靱性とぜい性き裂伝播停止靱性は相関があると言われている。

第3図 ESSO試験結果(アレニウスプロット)

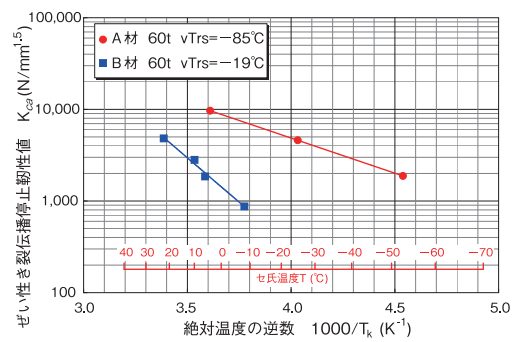
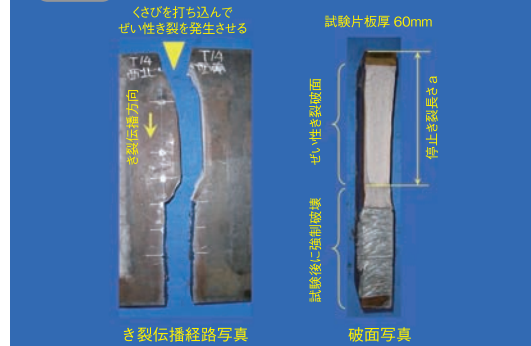


写真2 ESSO試験後の試験片(き裂伝播経路・破面)



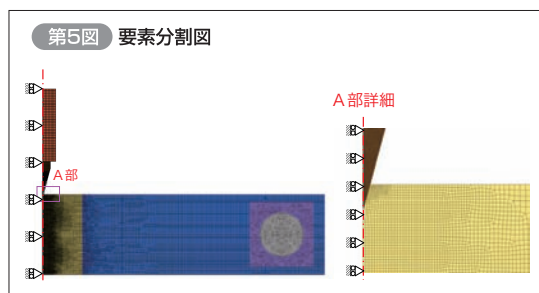
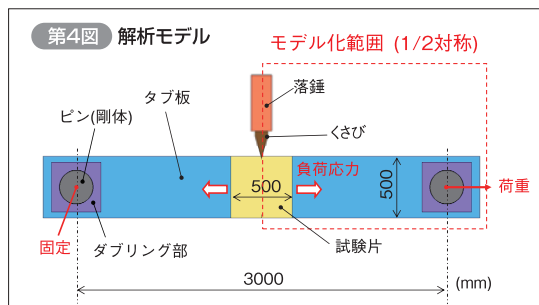
## B-2 FEM 解析による動的応力拡大係数

### 2-1 解析モデル

ESSO試験におけるき裂伝播過程の動的応力拡大係数の履歴を調べるため、汎用構造解析ソフト

(ABAQUS)を用いて、試験でのき裂伝播を模擬した動的弾性応力解析を行った。解析モデルは第4図に示す試験片の切欠き部で対称となる2次元モデルとした。第5図に解析モデルの要素分割図を

示す。解析では試験と同様にまず試験片との接触を考慮したピンに試験荷重を負荷することで試験片に引張応力(初期負荷応力)を付与した後、試験片上部の切欠きに挿入したくさびに落錘を衝突させて打撃による負荷を与えた。打撃後のき裂の伝



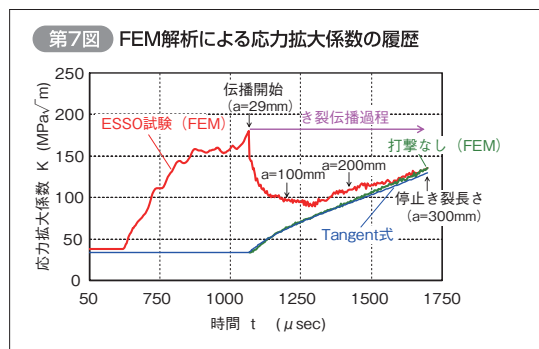
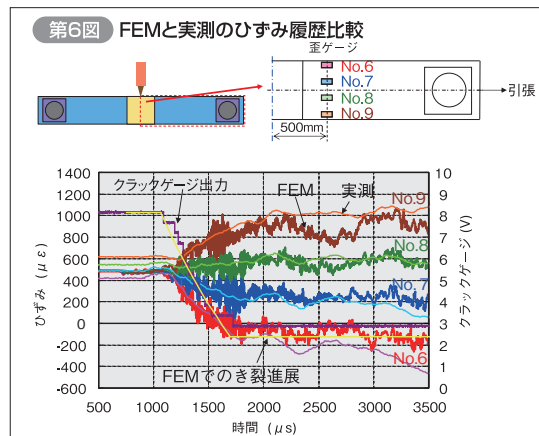
播は、進展部である試験片中央の対称面上の節点拘束をき裂伝播速度に応じて順に外していくことで模擬した。なお、き裂の伝播速度および打撃後のき裂伝播開始時間は、クラックゲージを用いたき裂伝播速度の試験実測値から近似して決定した。

## 2-2 解析結果

一例として、試験片板厚:14.3mm、初期負荷応力:  $\sigma_g=110\text{MPa}$ 、打撃エネルギー:  $E=490\text{J}$  (落錘質量: 100kg、落下高さ:  $h=0.5\text{m}$ )の試験条件における解析結果について報告する。第6図に試験片幅方向に貼付したひずみゲージによる計測データとFEM解析結果(ひずみの時刻歴変化)の比較を示す。両者はひずみの変化傾向および大きさがよく一致しており、動的FEM解析の妥当性が確認できた。この解析結果をもとにき裂伝播過程の動的応力拡大係数の履歴を算出した。動的応力拡大係数は、き裂伝播過程の時々刻々のき裂先端における応力分布から応力外挿法により算出した。第7図にFEM解析結果から算出したき裂伝播中の動的応力拡

動的FEM解析を用いて、き裂伝播過程の動的応力拡大係数の履歴を計算した。その結果、打撃直後は打撃の影響により動的応力拡大係数は上昇するが、き裂の発生とともに急速に減少し、ESSO試験のTangent式で求められる応力拡大係数に収束することがわかった。しかしながら、き裂伝播速度が高速になれば慣性力の影響が大きくなり、Tangent式による $K_{ca}$ 値は真の値と乖離する可能性が懸念される。そのため、FEM解析による検証が有効であると考えられる。

大係数の時間履歴(赤線)を示す。解析で得られたESSO試験における応力拡大係数の履歴は、打撃後(500 $\mu\text{s}$ 以降)はくさびによる開口効果により切欠き先端の応力拡大係数は上昇するが、き裂の伝播開始(約1000 $\mu\text{s}$ )とともに慣性力の影響により急激に低下し、その後はき裂の進展に従い緩やかに増加している。図中には、打撃なしでき裂が伝播する時の動的応力拡大係数の時間履歴(緑線)を合わせて示したが、打撃直後は打撃のない値(緑線)よりも打撃考慮(赤線)は高い値で推移しており、打撃による外力の影響が見られる。その後、き裂の伝播とともに打撃のない値に近づいており、ぜい性き裂伝播停止特性値( $K_{ca}$ 値)である停止き裂長さにおいては打撃による外力の影響は見られず、打撃なしと同等の値となっている。また、ESSO試験で用いられるTangent式による応力拡大係数(青線)も図中に示したが、解析を行った試験条件におけるき裂の伝播状態においては、打撃のない動的応力拡大係数の推移とよく一致しており、試験において妥当な $K_{ca}$ 値が評価できていることが確認できた。



ぜい性き裂伝播停止特性( $K_{ca}$ )を求めるESSO試験は、鉄鋼材料の開発と共に歩んでおり、近年では、超大型コンテナ船に用いられる降伏強度460MPa高強度厚肉鋼板の開発に寄与している。また、世界規模のエネルギー資源の開発・受給拡大を受け、低温タンクやパイプライン網の開発が計画されており、ESSO試験はますます求められるものと考えられる。

(共著: エンジニアリングメカニクス事業部 構造技術部構造評価技術室 深谷力、山城繁彦)