

## 局所破壊応力理論に基づく高速亀裂伝播の有限要素解析モデル

03140954 西岡陽  
指導教員 柴沼一樹 講師

## 1. 研究背景・目的

近年、国際的な海上物流量の増加の中でコンテナ船の大型化が進み、船体の構造的強度を補うための使用鋼板の極厚化により脆性破壊によるリスクが高まっている。船体構造全体に致命的な損傷が及ぶことを防ぐため、亀裂の発生そのものを防ぐことだけではなく、発生した亀裂の伝播を制御し、停止（アレスト）させようという二重安全性の考え方が広まっている。二重安全性を実現するに当たり、材料のアレスト靱性だけではなく構造因子により亀裂停止を行う構造アレスト設計が注目されている。単純鋼板における亀裂の伝播・停止挙動については局所限界応力理論に基づく理論モデルが提案されており、挙動の支配方程式として有力であると期待されている。しかし、構造アレスト設計は複雑な形状を有していることから、亀裂停止メカニズムは明らかになっていない部分が多く、実験的評価にのみ依拠しているのが現状である。そこで、構造体の解析に適した有限要素解析に局所限界応力理論を導入し構造体に適用できるようになれば、メカニズムの解明や構造因子のアレスト性能の定量的な評価が可能になり、非常に有用であるものと考えられる。有限要素法のなかでも単純でロバスト性の高い節点力解放法による亀裂伝播解析は有効である。そこで、本研究では節点力解放法における反力減少手法の精度検証を行ったうえで、局所破壊応力理論の破壊条件に則り、まず二次元板を対象とした亀裂先端近傍の応力をクライテリオンとする節点力解放法に整合した高精度な亀裂伝播解析モデルの開発および検証を試みる。そしてそのモデルを三次元に拡張し、妥当性を確認する。

## 2. 節点力解放法に関する基礎検討

節点力解放法とは、有限要素法において亀裂伝播経路上に存在する各節点の対称条件による拘束を逐次解放することで動的亀裂の伝播を仮想的に再現し解析を行う手法である。拘束を解放することは、節点の反力を減少し 0 にすることに他ならないが、これには主に (a)反力を瞬間的に 0 にする手法(Jump), (b)反力を時間ステップにおいて線形に減少させ 0 にする手法 (Linear) の 2 通りの手法が存在する。

局所破壊応力理論においては亀裂先端近傍の応力がクライテリオンとなるため、その精度については検討する必要がある。最小要素サイズや亀裂長さを入力とすることで亀裂伝播部のみを合理的に詳細分割するプログラムによって作成されたメッシュを使用し、Jump, Linear それぞれの手法に対し亀裂先端近傍の応力を有限要素解析汎用ソフトウェア Abaqus 6.14 によって求め、Broberg の厳密解[2]との比較による精度検証を行

った。亀裂伝播速度ごとに得られた応力を厳密解で正規化した値を Fig. 1 に示す。

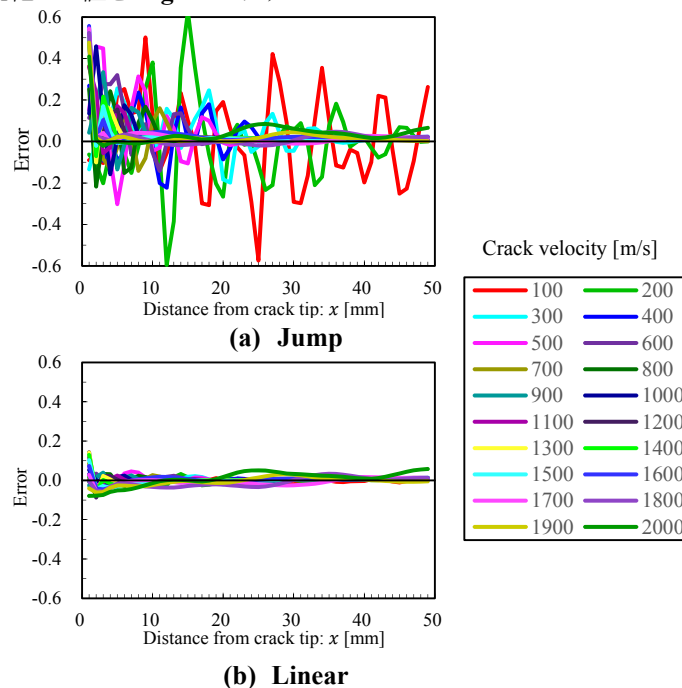


Fig. 1 Stress error at each node

この結果から、Jump による亀裂先端近傍応力の評価の精度は著しく悪く、Linear による反力減少を行うほうが妥当であることが確認された。したがって本研究で開発するモデルでは Linear による反力減少を用いる。

## 3. 二次元モデル

前節で述べた Linear による節点力解放法を用い、まず二次元を対象として局所破壊応力理論に基づく動的亀裂伝播モデルを開発し、その検証を行う。

局所破壊応力理論における破壊条件は特性距離を  $r_c$ 、破壊応力を  $\sigma_f$  として、式(3.1)で表される。

$$\sigma_{yy}[r_c] = \sigma_f \quad (1)$$

Linear による反力解放は有限要素法の 1 ステップが終了する瞬間に完了するため、反力解放が終了した瞬間に式(3.1)を満たすような亀裂伝播速度を事前に取得する必要がある。そのため、本モデルでは逆解析的に最適な亀裂伝播速度を取得するため同じステップを繰り返す、収束的に伝播速度を求める。収束計算においては、二分法とニュートン法を組み合わせ収束速度とロバスト性を確保したアルゴリズムを使用した。本モデルにおいて、亀裂先端近傍応力場に厳密解の存在する線形弾性体を対象として、最小要素サイズを 0.1mm、負荷応力を 200MPa、特性距離を 0.3mm、破壊応力を 1000MPa としたときに得られる速度履歴と

Broberg による厳密解から求まる速度履歴を併記したものを Fig. 2 に示す。

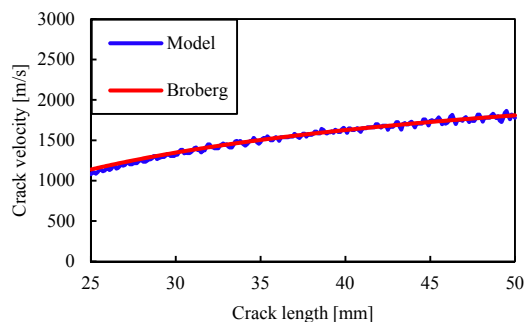


Fig. 2 History of crack velocity

わずかに振動が見られるものの、得られた速度履歴は厳密解をほぼ正確にあらわしている。特性距離を変化させたり、伝播速度域を変化させることによって同様の解析を行ったが、どの場合も 2. において検討した有限要素法による誤差を考慮すればほぼ正確に厳密解をあらわせることが確認された。

続いて、本モデルを弾塑性体に対して適用できるかを確かめるために亀裂伝播速度を取得する実験を行った。本実験では、亀裂伝播面にサイドグラーブを設けることで亀裂の挙動を二次元としてみなせるようにした。得られた亀裂伝播速度を入力として再現解析を行い、その結果得られた破壊応力をさらに入力として本モデルによる計算を行うことで、実験結果を再現できるかを試みた。その結果を Fig. 3 に示す。

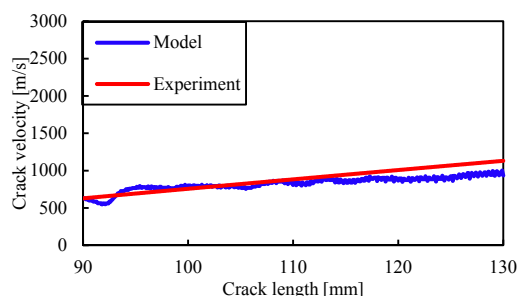


Fig. 3 Comparison of model and experimental results

得られた速度履歴は実験によって得られた亀裂伝播速度をよく表しているといえる。

以上より、弾性体および弾塑性体に対し厳密解や実験結果をよく表せていることから、本研究で開発した二次元亀裂伝播モデルの妥当性が示された。

#### 4. 三次元モデル

前節にて開発および検証を行いその正しさを確かめた二次元モデルを三次元へ拡張することを考える。三次元への拡張に際し、亀裂前縁の湾曲を考慮することが必要となる。本研究では簡単のため板厚方向要素分割数を 1 とし、亀裂前縁形状を二次曲線であらわすことで、板表面における亀裂伝播速度と板厚中心における亀裂伝播速度の 2 変数を未知数として、破壊条件 (1) を満たす最適な速度の組を収束的に求めることとした (Fig. 4)。多変数の場合の収束計算手法として、多変数ニュートン法を用いた。

最小要素サイズを 1mm、特性距離を 3mm、負荷応力を 200MPa としたときに、弾性体と弾塑性体で亀裂

伝播速度域が概ね等しくなるように破壊応力を定め計算を行い、得られた速度履歴から各亀裂長さにおける板表面と板厚中心の亀裂長さの差を Fig. 5 に示す。

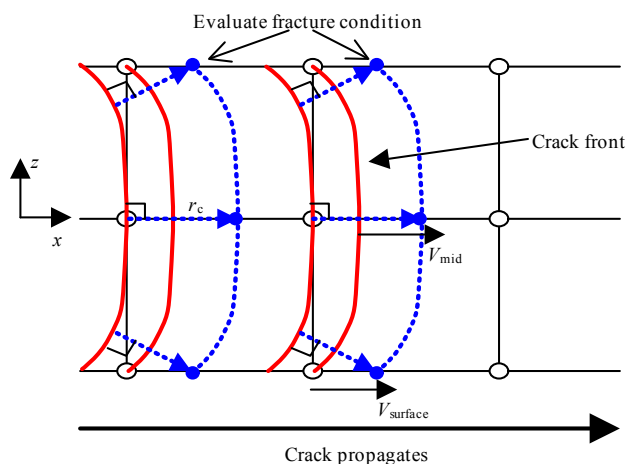


Fig. 4 3D model

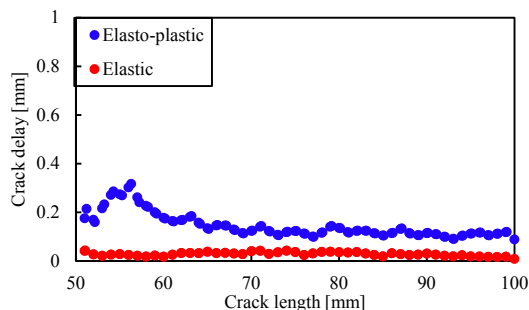


Fig. 5 Crack delay

図から、弾塑性体では弾性体に比べ顕著に亀裂の湾曲が起こることが確認できる。これは弾塑性体における塑性拘束の影響であると考えられる。また、弾性体において板厚を変化させて計算を行うと、板厚が薄くなるほど亀裂が湾曲する傾向が見られた。これは平面応力および平面ひずみ状態の差による影響であると考えられる。これらのように塑性拘束や板厚を考慮した亀裂前縁形状の挙動を定性的に再現できることが確認された。

#### 5. 結論

本研究では、有限要素法による動的亀裂伝播解析手法である節点力解放法に関し反力減少手法ごとに亀裂先端近傍応力場の精度検証を行なったうえで、局所破壊応力理論に基づく二次元モデルを開発し、その Verification を行った。さらに、三次元への拡張を行うことで三次元効果を考慮した亀裂先端の挙動を定性的に示すことができた。

今後の課題として板厚方向を複数要素で分割したモデルへの拡張が考えられる。これにより亀裂の三次元挙動を定量的に評価できるようになれば従来不可能であった構造アレスト性能の理論的説明が可能となるだろう。

#### 参考文献

- [1] 町田進, 吉成仁志, 安田真, 栗飯原周二, 日本造船学会論文集, 第 177 号, pp.243-258, 1995.
- [2] K. B. Broberg, Cracks and Fracture, Academic Press, 1999.