実用的な疲労亀裂伝播解析手法に関する研究

技術研究所　松田宏之、山本規雄

横浜国立大学　角洋一、川村恭己

1. 緒言

船舶の構造は多数のタンクが隔壁によって区切られることにより、それぞれ水（油）密性が保たれている。しかし、この隔壁が破損し水（油）密性が損なわれ機能損失に至る場合がある。その原因の一つとして疲労亀裂が考えられる。特に原油タンカー等の油タンクの隔壁を疲労亀裂が貫通することで油密性が損なわれた場合、海洋への油の流出による環境汚染などの甚大な被害につながることとなる。また、疲労亀裂は大きく進展することにより、構造物の崩壊（不安定破壊、座屈）を引き起こす可能性もある。

このような事態を避けるためにも、疲労亀裂が発生する可能性のある船体構造各部について疲労強度評価を行い、疲労亀裂の発生を防止する設計を行うことが大切である[1)]。さらに、万が一、疲労亀裂が発生・伝播した場合でも、構造物の崩壊や機能損失といった致命的な損傷を避ける設計、すなわち疲労亀裂を無害化する設計が望まれる。その為には疲労亀裂の発生や伝播挙動を精度良く評価・管理する実用的な手法が必要となってくる。

そこで、本研究では疲労亀裂の伝播挙動を高精度にシミュレートする手法を開発し、その手法を実船構造の亀裂伝播解析へ容易に適用できるような疲労亀裂進展経路予測システム（CrackPath propagation System、以下 CP-System という）の実用化について検討した。さらに検証実験として船体構造の一例として大骨端部を模擬した試験体により疲労亀裂伝播実験を行い、CP-System によるシミュレーション結果との比較・検討を行った。

2. 大骨端部の構造詳細と亀裂の無害化

船体構造において疲労亀裂の発生する可能性がある箇所として、応力集中を引き起こす構造的不連続部などがあげられる。そこで、本研究では水平桁などの大骨端部を例として検討を行った。構造詳細の一例を図 1 に示す。図 1 はダブルハルタンカーの水平桁と縦通隔壁との取り合い部を示しており、水平桁先端において、水平桁のフェイス材とウェブの取り合い部、および縦通隔壁と水平桁の取り合い部の 2 箇所に構造的不連続部がある。いずれの箇所も応力集中部であり、共用中の繰り返し応力により疲労亀裂が発生する可能性のある箇所である。ここで、フェイス材とウェブの取り合い部を A、縦通隔壁と水平桁端部の取り合い部を B とすると、A および B から発生する疲労亀裂の伝播経路としては以下の 4 種類の経路が考えられる（図 2）。

（A-1）　A 部の溶接止端に疲労亀裂が発生し、ウェブ内を湾曲して進展もしくは途中で停留する。

（A-2）　A 部の溶接止端に疲労亀裂が発生し、ウェブ内をほぼ垂直に横切り縦通隔壁を貫通する。

（B-1）　B 部の溶接止端のウェブ側に疲労亀裂が発生し、溶接ビードに沿って進展する。

（B-2）　B 部の溶接止端の縦通隔壁側に疲労亀裂が発生し、縦通隔壁を貫通し進展する。

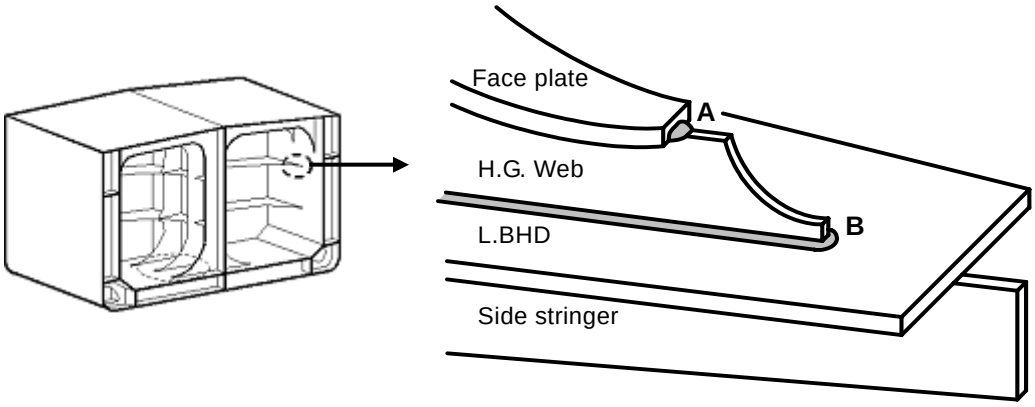


図１　大骨端部の構造詳細

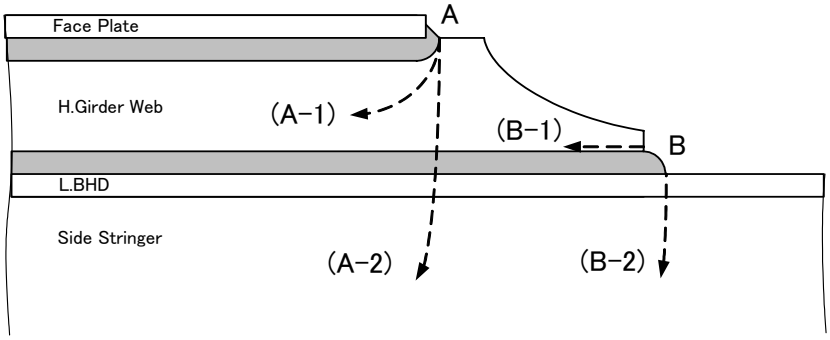


図２　大骨端部における疲労亀裂伝播経路

上記の疲労亀裂の中で(A-2)や(B-2)といった亀裂は、隔壁を貫通することにより水(油)密性が損なわれるため、このような亀裂の伝播は避ける必要がある。しかし(A-1)や(B-1)といった亀裂は水密性を損なうことがないため水(油)密性の点においては無害な亀裂であると言える。そこで、以下のように大骨端部の構造詳細を最適化できれば、亀裂の無害化が可能になると考えられる。

（１）　疲労亀裂が発生する場合であってもA部からの発生に留める。

（２）　A 部から疲労亀裂が発生したとしても、亀裂進展方向が（A-2）の方向にならないようにする。

ここで、(1)についてはウェブ先端の角度等をパラメータとして、大骨端部の構造詳細と疲労亀裂の発生点の関係について検討がなされている[2)]。

実際は、(A-1)の亀裂が発生した後遅延もしくは停留したとしても、平行して（B-2）のような亀裂が生じると機能喪失に至る可能性がある。しかし、(A-1)のように疲労亀裂が無害であれば、A 部からある程度進展して発見しやすくなった亀裂を発見し修理することで、B部からの危険な疲労亀裂の発生を未然に防止することができると考えられる。

3. 疲労亀裂進展経路予測システム（CrackPath propagation System）

CP-Systemとは横浜国立大学角研究室と本会研究所とで共同開発された、疲労亀裂の伝播挙動を高精度にシミュレーションすることができる疲労亀裂進展経路予測システムである。本システムの解析フローチャートを図 3 に示す。本システムはGraphical User Interface（以下GUI）を用いた専用プリプロセッサーにて定義された亀裂進展領域に、自動で要素分割・境界条件付与を行い、有限要素法により亀裂先端の応力場の解析を行う。求めた亀裂先端の応力拡大係数範囲ΔK_I、ΔK_{II}などの応力場パラメータより次のステップの亀裂進展方向を予測し、自動的に逐次計算を行い、疲労亀裂の進展経路を追跡する。各ステップの亀裂進展経路及び亀裂進展領域の変形状態・a-N線図はGUIを用いた専用のポストシステムによって確認することができる（図 4 参照）。本システムの特徴を記すと以下のようになる。

- 応力拡大係数は有限要素解と解析解との重ね合わせ法[3)]により算定する。これにより亀裂先端応力場の高次パラメータが算定できる。
- 亀裂進展領域の要素はPaving法を用いて四辺形要素を自動生成し計算精度を向上させた。また亀裂先端において、隣接する要素のサイズが急激に変化すると計算誤差が生じることから、亀裂先端の詳細なメッシュから境界の荒いメッシュまで要素サイズを徐々に変えたメッシングが可能である。[4,5)]
- 亀裂進展経路の予測は第一摂動法を利用し、亀裂進展時における亀裂先端の応力拡大係数の漸近表示を求め、局所対象条件（$\Delta K_{II}=0$）により経路を定める。
- 亀裂が進展しない周辺領域をスーパーエレメント化し、周辺領域の剛性及び荷重ベクトルを亀裂進展領域に取りこむ。これにより周辺領域の構造不静定性や亀裂進展に伴う荷重再配分を考慮することができる[6)]。また大規模な構造物に生じた疲労亀裂の伝播解析を小さな亀裂進展領域の解析と同じように扱うことができる。
- 亀裂進展速度は有効応力拡大係数範囲ΔK_{eff}およびパリス則を用いて評価し、応力比の効果を考慮することができる。
- 亀裂進展領域内の残留応力の影響を、線形重ね合せによりK値に反映させる。これにより残留応力の影響による疲労亀裂の加速･遅延挙動をシミュレートすることができる。
- 複数荷重条件が設定されている場合、荷重条件の中から最大の応力拡大係数と最小の応力拡大係数を用いて亀裂進展評価を行う。
- 設計者がモデル作成から結果の評価までを簡便に行うため、GUI を用いた専用プリポストプロセッサーを開発した。
- 実用的な計算時間で亀裂の進展経路が予測可能である。亀裂進展領域の大きさに依存するが、図 4 に示す程度の亀裂進展シミュレーション（500 節点、全 20 ステップ程度）であれば 10 分程度で亀裂の進展経路の予測が可能である。

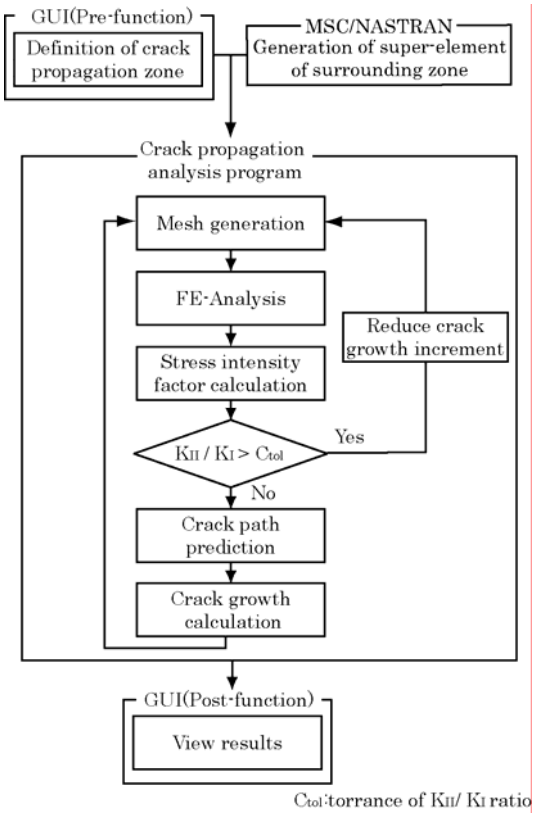


図 3　解析手順

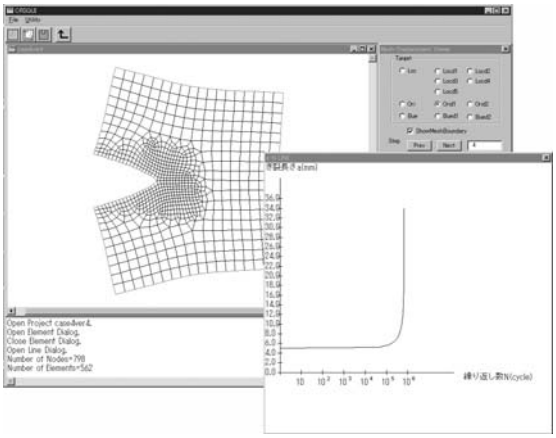


図 4　ポストプロセッサー

4. CP-System の実船構造への適用

実船等の大型構造物に発生した疲労亀裂の進展シミュレーションを行う場合、疲労亀裂が進展するステップごとに構造物全体の構造解析を実施する必要がある。この解析には膨大な時間がかかり実用的とは言い難い。そこで CP-System では実構造物に対しては以下のようにスーパーエレメント手法を用いてシミュレーションを行うことにより解析時間の大幅な削減を図った。まず、構造物において疲労亀裂が進展する領域（亀裂伝播領域）、進展しない領域（周辺領域）を設定する。亀裂が進展しない周辺領域は亀裂進展に伴う剛性・荷重条件が変化することはないため、この領域をスーパーエレメント化することにより、剛性マトリクスおよび荷重ベクトルを亀裂伝播領域との境界に縮約化することができる。これを CP-System により取り込み、以降は亀裂伝播領域のみについて亀裂進展シミュレーションを行うことにより周辺構造の剛性や亀裂進展に伴う周辺構造との応力の再配分を考慮することができる。

本手法により船体大骨端部から発生する疲労亀裂の進展シミュレーションを行った一例を図 5 および図 6 に示す。ダブルハルタンカーの水平桁と縦通隔壁の取り合い部において、水平桁フェイス材先端から発生し、水平桁内を進展する疲労亀裂を解析対象とした。図 5 右図に解析に使用したホールドモデルを示す。本モデルにおいて図 5 左図に示す赤色塗りつぶしの範囲を亀裂伝播領域に設定し、その他の周辺構造をスーパーエレメント化し構造解析を行うことによって境界上に剛性マトリクスおよび荷重ベクトルを縮約化した。これを取り込み CP-System により亀裂伝播領域内の亀裂進展シミュレーションを行った結果が図 6 である。図中の矢印で示す亀裂発生箇所から縦通隔壁に向かい疲労亀裂が進展していく様子がわかる。なお、図 6 中の赤色太線は周辺領域との境界を示している。このようにスーパーエレ

メント手法を採用することにより、船体構造に対してもCP-Systemにより疲労亀裂の進展シュミレーションを行うことが可能である。

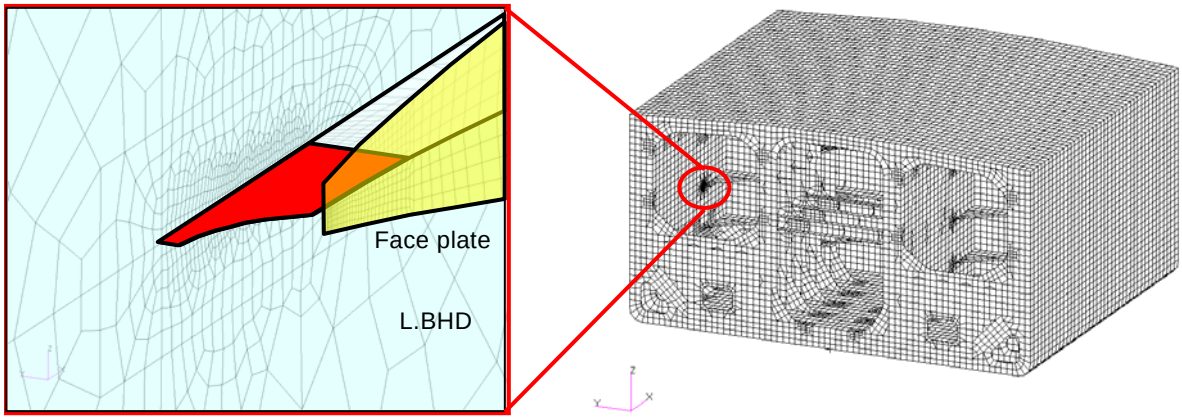


図 5　疲労亀裂伝播領域の設定

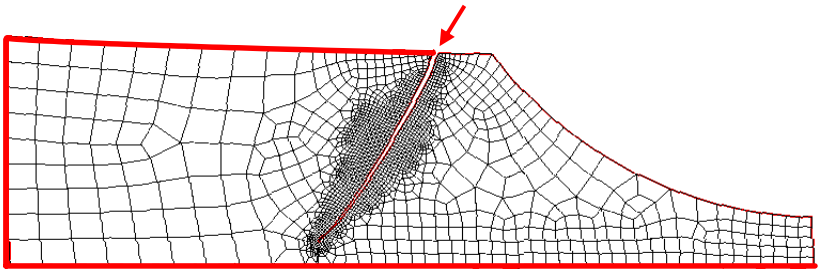


図 6　疲労亀裂伝播経路

5. 疲労亀裂伝播実験

CP-System の 3 次元構造物への適用性を検討する検証実験として、船舶の構造部材を模擬した試験体の疲労亀裂伝播実験を実施し疲労亀裂の伝播経路を観察した。

本実験では船舶の構造部材の一例としてダブルハルタンカーの水平桁端部を模擬した試験体を用いて疲労亀裂伝播実験を行った。試験体はKA32 同等鋼で製作し、その形状を図 7 に示す。大骨端部の構造詳細が疲労亀裂伝播経路に及ぼす影響を調査するために、I形断面の梁に取り付けるスティフナの端部形状を図8に示すような4種類用意し疲労亀裂伝播実験を実施した。なお、横浜国立大学角研究室において別途実施された小型試験体による疲労亀裂伝播試験の結果より、本試験体における疲労亀裂はA部から発生することが確認されている事から[7]、試験時間短縮のために図 7 に示すように疲労亀裂発生位置の溶接止端に沿った深さ 7mm程度の予亀裂を機械加工で作成した。

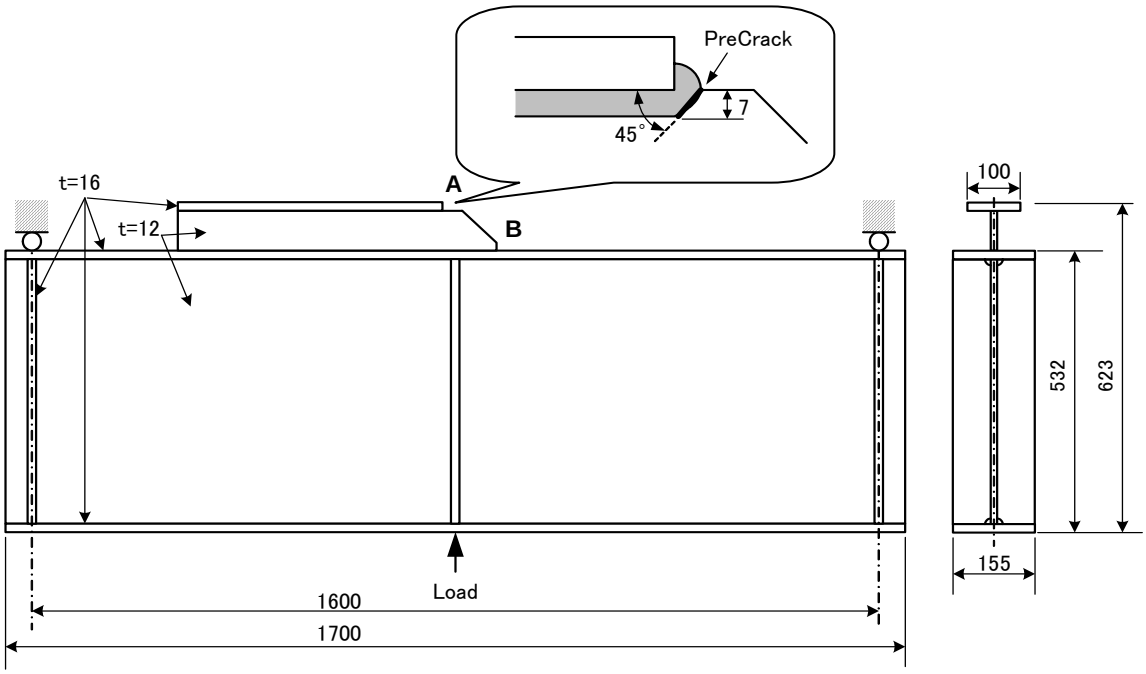
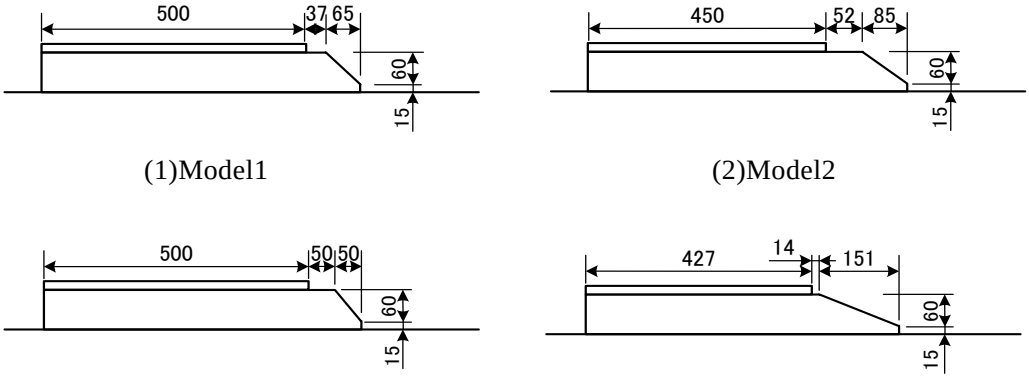


図 7　試験体形状



(1)Model1　(2)Model2

(3)Model3　(4)Model4

図 8　スティフナ端部形状

疲労試験は島津製作所製 50ton 電気油圧サーボ形疲労試験機を用いて荷重制御による三点曲げ疲労試験とした。荷重条件は最大荷重 450kN、最小荷重 22.5kN の応力比 0.05 とし、繰り返し周波数 4Hz（Model1 については 3Hz）、室温大気中にて実施した。

試験体には図 9 に示す位置にひずみゲージを貼付し（両面全 12 箇所）、疲労試験中のひずみ振幅を計測した。あわせて、予亀裂先端から疲労亀裂が進展する経路にクラックゲージを貼付し（図 9 に示す位置に両面で計 4 枚）疲労亀裂進展速度を計測した。また、疲労試験終了後にマイクロスコープにより疲労亀裂を撮影し、疲労亀裂の伝播経路の計測を行った（図 10）。

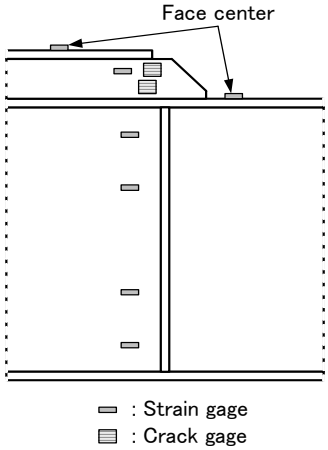


図 9　ゲージ位置

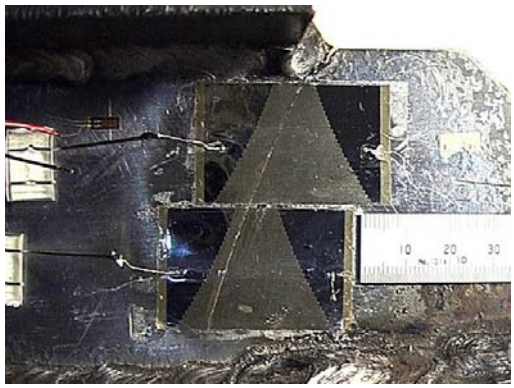
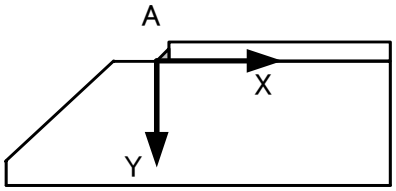


図 10　亀裂進展経路の計測

実験により得られた疲労亀裂の進展経路を図 11 に示す。A 部の溶接止端部を図中の原点とし、原点から最初の点までが予亀裂を表している。また、図中(a),(b)は試験体の表裏面を意味している。スティフナ端部形状の違いにより疲労亀裂の伝播経路に違いが出ていることが確認できる。試験体の表裏面で亀裂の進展経路に若干違いが見られるが、この原因としては、試験体製作時の溶接変形および予亀裂が表裏面で対称になっていなかったことなどが考えられる。



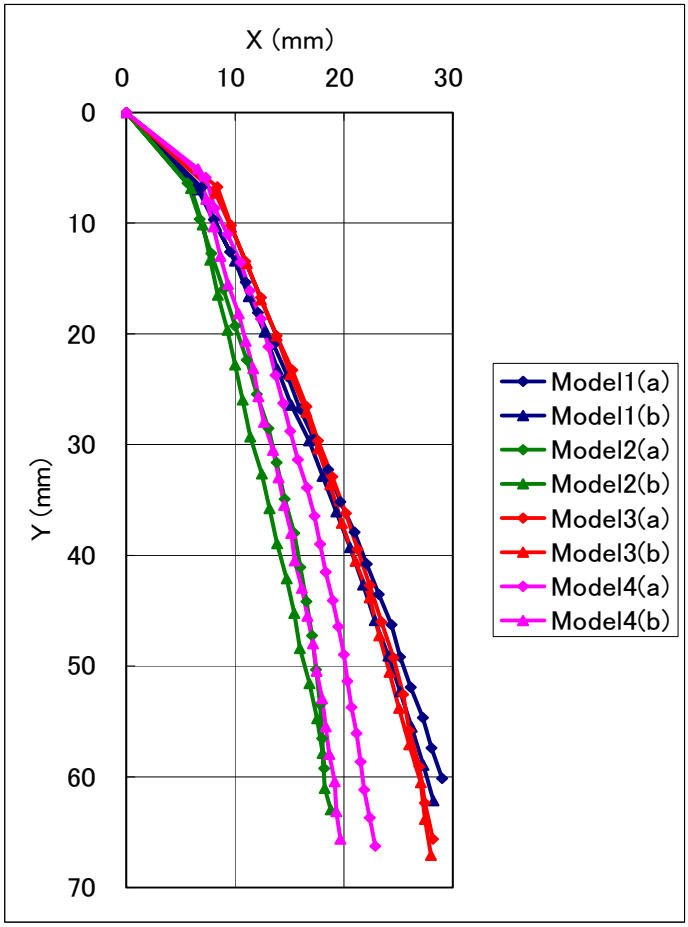


図 11　疲労亀裂伝播経路

また、Model 1 および Model 4 について、CP-System により亀裂進展シミュレーションを行った結果を実験結果とあわせて図 12 に示す。CP-System による予測結果は実験結果とよく一致していることがわかる。以上より、大骨端部形状の違いによる疲労亀裂伝播経路の変化を CP-System により実用的な精度で推定できることが確認された。

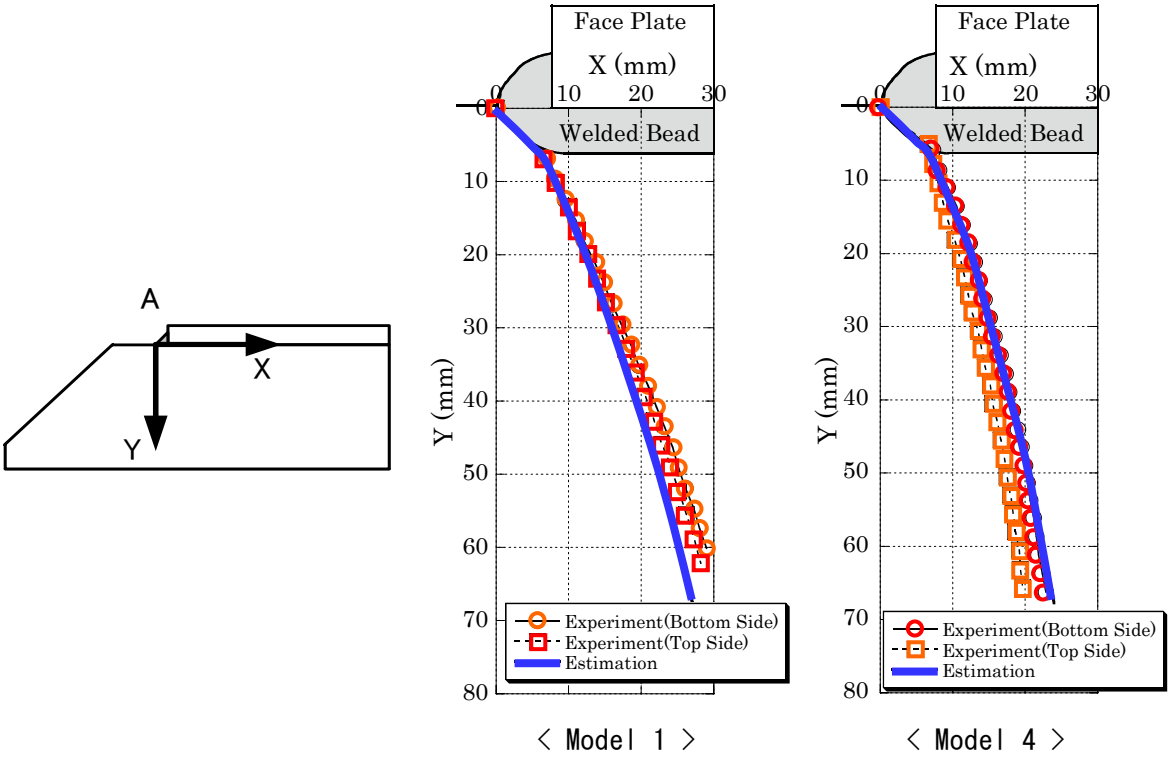


図 12　実験結果および CP-System による推定結果

6. 結言

実用的な疲労亀裂伝播解析手法について検討し、その手法を実船構造の亀裂伝播解析へ容易に適用できる疲労亀裂進展経路予測システム（CP-System）を開発した。更に、本システムの３次元構造物への適用性を検討する為に検証実験を行った。得られた結果を以下に纏める。

（１）　CP-System により、亀裂進展に伴うモデルの再メッシュ分割や構造解析、亀裂進展方向の決定などを自動的に行い、疲労亀裂進展領域内の疲労亀裂伝播解析を実施することができる。また、3 次元構造物における亀裂進展解析は、スーパーエレメント手法を採用し、亀裂進展の影響を受けない周辺構造の剛性・荷重条件を境界上に縮約化し、CP-System によりこれを取り込み亀裂進展領域内のみで伝播解析を行うことで、周辺構造の影響を考慮した疲労亀裂の亀裂伝播シミュレーションを実用的な精度、解析時間で行うことが可能である。

（２）　実船等の大型構造物に発生した疲労亀裂の進展シミュレーションを行う場合、疲労亀裂が進展する各ステップごとに構造物全体の構造解析を実施する必要があり、膨大な解析時間がかかり実用的とは言い難かった。しかし、スーパーエレメント手法の採用により、構造物全体の構造解析を一度行った後、疲労亀裂進展領域内でのみ CP-System により伝播解析を実施することで解析時間が大幅に短縮され、大型構造物に対しても実用的な疲労亀裂伝播解析が可能となった。

(３) CP-System によるシミュレーション結果と検証実験から得られた疲労亀裂伝播経路はよく一致し､本システムで用いている解析手法の基づき実用的な精度で疲労亀裂進展経路の予測が可能であることを確認した。

謝辞

本研究を実施するにあたり、石川島播磨重工株式会社　毛利雅志氏、横浜国立大学　大川鉄平氏から多大なご助力をいただきましたことに対し、ここに謝意を表します。

参考文献

１）例えば、日本海事協会　タンカーの構造強度に関するガイドライン、(2001)

２）毛利雅志、角洋一、川村恭己、佐川八恵子、山村暢隆：大骨端部における構造詳細が疲労き裂発生・伝播挙動に与える影響、日本造船学会講演会論文集、第 2 号 (2003)、pp.25-26

３）Y. Yamamoto and N. Tokuda: Determination of stress intensity factor in cracked plate by the finite element method, (1973), International Journal for Numerical Methods in Engineering, 6, pp.427-439.

４）Y. Kawamura, Y. Mu, and Y. Sumi: Development of an automatic quadrilateral mesh generator for the simulation of curved crack growth, (1999), Trans. Japan Society of Computational Engineering, Paper No.19990024.

５）川村恭己､角洋一､毛利雅志:メッシュ生成における要素形状の改善手法に関する考察、計算工学講演会論文集、Vol.8 (2003)、 pp.833-836.

６）Y. Sumi,：Fatigue crack propagation and computational remaining life assessment of ship structure, Journal of Marine Science and Technology, (1998), 3-2, pp.102-112.

７）毛利雅志、角洋一、川村恭己、松田宏之：疲労き裂伝播経路予測のシステム化と疲労試験による検証、日本造船学会論文集、第 194 号 (2003) 、pp.185-192.