

# き裂進展解析による溶接構造物の疲労寿命予測

## Fatigue Life Prediction of Welded Structures Based on Crack Growth Analysis

大川 鉄 平\*  
Teppei OKAWA

島 貫 広 志  
Hiroshi SHIMANUKI

野 瀬 哲 郎  
Tetsuro NOSE

鈴 木 環 輝  
Tamaki SUZUKI

### 抄 録

き裂進展解析による溶接構造物の疲労寿命予測システムを開発した。本システムではき裂開閉口挙動をシミュレーションすることにより、残留応力や荷重順序の影響を適切に考慮して疲労寿命予測することが可能である。また、超音波衝撃処理等の疲労強度向上技術の効果を高精度に予測することができる。

### Abstract

A fatigue life prediction system for welded structures has been developed based on crack growth analysis. In the developed system, the fatigue life can be predicted taking into account the effects of the residual stress and the load sequences by the crack opening and closure simulation. Furthermore, the effect of fatigue strength improvement techniques, such as UIT, can be accurately predicted by the developed system.

## 1. 緒 言

近年のエネルギー問題の深刻化に伴い、船舶、橋梁、建設機械等の溶接構造物の延命化やライフサイクルコスト(LCC)改善に対する社会的要求は益々高まっている。これらの構造物は溶接部の疲労設計を基準に使用する鋼材の板厚や構造詳細が決定されることが多く、構造物の限界設計化や維持管理効率化のためには疲労寿命予測の高精度化が必要不可欠と考えられる。また、溶接部の疲労対策として、グラインダ、ティグ(TIG)ドレッシング、ハンマーピーニング、超音波衝撃処理(以後UIT)<sup>1,2)</sup>等による溶接止端仕上げ処理が行われるが、これらの効果を適切に評価できる手法は未だ十分確立されていない。

新日本製鐵では、溶接構造物の信頼性向上のために疲労破壊に対するトータルソリューションの構築と提供に取り組んでおり<sup>3)</sup>、その一環として高精度疲労寿命予測システムの開発を進めてきた<sup>4,5)</sup>。この疲労寿命予測法は、破壊力学によるき裂進展解析をベースとしたものであり、疲労き裂の発生が想定される溶接止端部に微小な初期表面き裂を設定し、表面き裂の最深部と表面部について応力拡大係数を算定後、き裂開閉口モデルにより有効応力拡大係数範囲を求め、疲労き裂進展則の適用により疲労き裂伝播挙動

をシミュレーションする。き裂開閉口モデルとは、き裂結合力モデルの応用によりき裂進展部の残留塑性域を棒要素を用いて離散的に表現し、き裂開閉口挙動をシミュレーションする手法<sup>6,7)</sup>であり、これにより疲労き裂伝播挙動に及ぼす残留応力や荷重順序の影響を正確に考慮することができる。本稿では、疲労寿命予測法の概要について述べるとともに、溶接継手への適用事例を紹介する。

## 2. 疲労寿命予測法の概要

### 2.1 表面き裂の成長・合体シミュレーション

図1に溶接部での一般的な疲労き裂成長挙動の模式図を示す。疲労き裂は高い応力集中が存在する溶接止端部に

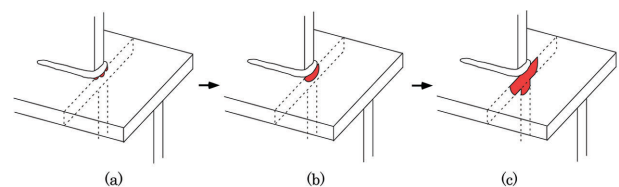


図1 溶接構造物の疲労き裂成長挙動  
Behavior of fatigue cracks in a welded structure  
(a) Initiation of cracks, (b) Propagation and coalescence of surface cracks, (c) Propagation of a through-the-thickness crack

\* 大分技術研究部 主任研究員 工博 大分県大分市大字西ノ洲1 〒870-0992

沿って複数発生し、それらが成長・合体して単一の表面き裂を形成する。この表面き裂が成長して部材板厚を貫通し、さらに板厚貫通き裂が成長して最終破壊に至る。本疲労寿命予測法では、溶接止端部に複数の微小な初期表面き裂を設定し、それらの表面き裂の成長・合体シミュレーションを行うことにより、き裂が板厚貫通するまでの疲労寿命を求める。シミュレーションの手順を以下および図2に示す。

- (1) 3次元ソリッド要素を用いた溶接継手のFEM解析を実施し、疲労き裂進展を想定する断面の応力分布、残留応力分布をそれぞれ求める。
- (2) 溶接止端半径  $\rho$  等の溶接部局所形状から応力集中係数  $K_t$  を辻による推定式<sup>9)</sup>により算出し、得られた  $K_t$  を用いてGlinkaによる切欠き底近傍の応力分布表示式<sup>9)</sup>を適用して溶接止端部近傍の応力分布を求め、FEMにより得られた応力分布と滑らかに接続する。
- (3) 重み関数法<sup>10)</sup>により、(1)(2)で得られた応力、残留応力分布を用いて溶接止端部に定義された複数の表面き裂の最深部及び表面部の応力拡大係数を算出する。
- (4) き裂結合モデルを応用したき裂開閉シミュレーション<sup>4)</sup>により、有効応力拡大係数範囲  $\Delta K_{eff}$  (き裂開口区間に対応する応力拡大係数範囲) を各き裂の最深部と表面部について算出する。き裂開閉シミュレーション法については次節にて概要を説明する。
- (5)  $\Delta K_{eff}$  規準の疲労き裂進展則に基づき、所定の繰返し数  $\Delta N$  に対応するき裂進展量  $\Delta a$  を各き裂の最深部と表面部について求め、それぞれの部位でき裂を延長する。
- (6) 隣接するき裂の合体を判定し、合体と判定された場合

はき裂を再定義する。き裂の合体判定と再定義の方法はWES2805-07<sup>11)</sup>に従う。

- (7) き裂深さが板厚に達した場合は解析を終了し、その時点の繰返し数を破断寿命  $N_f$  とする。板厚に達していない場合は繰返し数  $\Delta N$  を加算して(3)に戻る。

## 2.2 き裂開閉シミュレーション

疲労き裂はき裂先端で形成された引張塑性域内を進展することで、き裂面に残留塑性域が形成され、それにより疲労き裂は最小荷重に至る以前に閉口することが知られている。また、鉄鋼材料の疲労き裂進展速度は、応力比、残留応力、荷重履歴の影響を顕著に受けるが、これらは疲労き裂の開閉挙動と密接な関係があり、疲労寿命の高精度推定には、疲労き裂開閉挙動を解析することが重要である。

き裂が閉口した状態は、き裂先端近傍の応力特異性に影

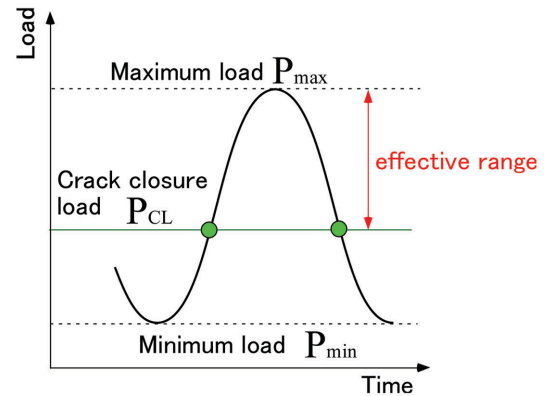


図3 有効荷重範囲の定義  
Definition of effective load range

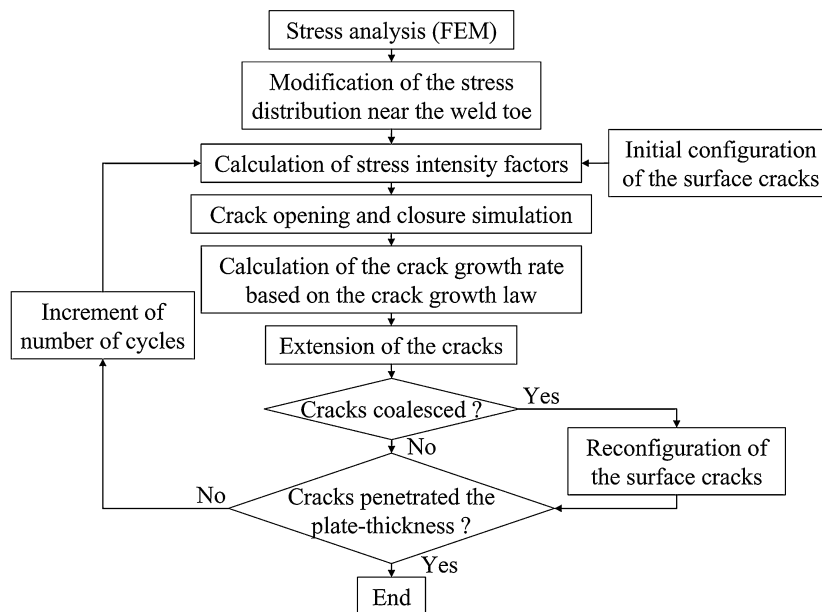


図2 疲労き裂進展解析手順  
Procedure of the fatigue crack propagation analysis

響を及ぼさないことから、き裂が開口している荷重範囲(図3参照)のみ疲労き裂進展に寄与することとなり、下記の疲労き裂進展則が成立することが知られている。

$$da / dN = C \{ \Delta K_{eff}^m - (\Delta K_{eff,th})^m \} \quad (1)$$

ここに、 $da/dN$ は疲労き裂進展速度、 $\Delta K_{eff}$ は有効応力拡大係数範囲(き裂開口区間に対応する応力拡大係数範囲)、 $C$ 、 $m$ 、 $\Delta K_{eff,th}$ は材料定数である。

有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{eff}$ はき裂開閉シミュレーション法<sup>4)</sup>により推定することができる。き裂結合モデルの考え方により、最大荷重時のき裂開口変位 $v_{max}(x)$ を次式により計算できる。

$$v_{max}(x) = \frac{2\sqrt{2(-x)\hat{K}_{max}}}{E'\sqrt{\pi}} - \frac{2\alpha\sigma_Y}{\pi E'} \int_0^x \ln \left| \frac{\sqrt{\xi} + \sqrt{-x}}{\sqrt{\xi} - \sqrt{-x}} \right| d\xi \quad (2)$$

$$E' = \begin{cases} E & \text{for plane stress} \\ E / (1 - \nu^2) & \text{for plane strain} \end{cases}$$

ここに、 $\hat{K}_{max}$ は最大荷重時の仮想き裂先端における応力拡大係数、 $\sigma_Y$ は降伏応力、 $\alpha$ は引張塑性拘束係数、 $r$ は引張塑性域寸法、 $E$ はヤング率、 $\nu$ はポアソン比、 $\xi$ はき裂先端から集中力対までの距離である。また、 $-r < x < 0$ は仮想き裂領域、 $x < -r$ は実き裂領域にそれぞれ対応し、各領域での $v_{max}(x)$ は、 $-r < x < 0$ では塑性変形による仮想的なき裂開口変位、 $x < -r$ では実き裂開口変位をそれぞれ表す。

ここで、図4に示すように、仮想き裂領域に $v_{max}(x)$ を基に弾完全塑性体の棒要素を配置する。仮想き裂領域に配置された棒要素は、疲労き裂が進展していくことにより上下に分断され、残留塑性域としてき裂面に残されていくものとする。これにより、荷重1サイクル毎のき裂開閉挙動を逐次解析することが可能となり、応力比、残留応力、荷重履歴の影響を適切に考慮して $\Delta K_{eff}$ を算定することができる。

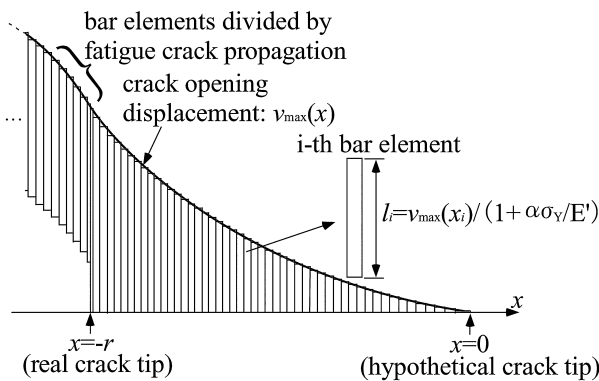


図4 き裂開口変位に基づく棒要素の配置  
Configuration of bar elements based on the crack opening displacement

### 3. 変動振幅荷重を受ける溶接継手の疲労寿命予測

#### 3.1 応力・残留応力解析

面外ガセット溶接継手を対象として解析を行った。まず、3次元ソリッド要素を用いて試験片のFEMモデルを作成し、試験片に単位引張応力が作用する際の応力分布を弾性解析により求めた。図5に試験片形状、図6に溶接止端部近傍のメッシュ分割図をそれぞれ示す。ヤング率を206GPa、ポアソン比を0.3とした。解析結果データより、溶接止端部を含む板厚断面の応力分布を抽出し、2.1節の手順(2)に従って応力集中係数 $K_t$ を算出して溶接止端部近傍の応力分布を修正した。応力集中係数の計算では、溶接止端半径を1mm、フランク角度を32.4°とし、応力集中係数は $K_t = 3.04$ となった。

残留応力分布は、熱弾塑性FEMにより推定した。母材と溶接金属の材料特性は同一とし、常温(20°C)での降伏応力を350MPa、ヤング率を206GPa、ポアソン比を0.3、応力-ひずみ曲線はバイリニア型として加工硬化係数はヤング率の1/100とした。降伏応力、ヤング率、加工硬化係数、熱伝導率、比熱、線膨張係数は、文献<sup>12)</sup>を参考にして温度に依存して変化する値を設定した。溶接入熱は900J/mmの熱量を溶接ビード全体に同時に加えるものとし、その後、雰囲気温度20°で3600秒間試験片表面より放熱する条件とした。応力解析の場合と同様に図4に示す断面の残

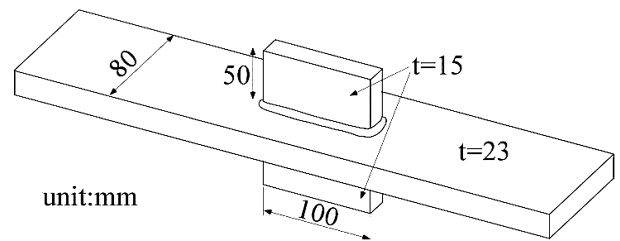


図5 面外ガセット溶接継手  
Out-of-plane welded gusset joint

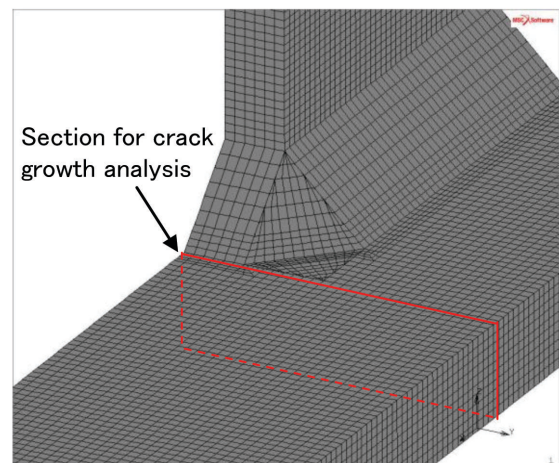


図6 有限要素解析モデル  
Finite element model

留応力分布を抽出し、疲労き裂進展解析に供した。なお、応力・残留応力解析のソルバーにはMSC.Marc 2005r2を使用した。

### 3.2 疲労き裂進展解析条件

初期き裂は面外ガセット溶接のトウ部で試験片幅中心部に1つ設定した。初期き裂寸法は、IIW<sup>13)</sup>の溶接部からの疲労き裂進展解析に用いる推奨初期き裂寸法を参考にして深さ0.15mmの半円状とした。疲労き裂伝播定数は、日本鋼構造協会の da/dN- $\Delta K$  平均設計曲線<sup>14)</sup>より  $C = 1.5 \times 10^{-11}$ ,  $m = 2.75$ ,  $\Delta K_{eff,th} = 2.9$  [MPam<sup>1/2</sup>] とした。なお、これらの定数は WES2805-07<sup>11)</sup>等でも提示されているが大きな違いは無い。塑性拘束係数  $\alpha$  は、最深部では  $\alpha = 2.5$ 、表面部では  $\alpha = 1.3$  とした。これは最深部では平面ひずみ状態、表面部では平面応力状態と仮定できるためであり、これらの  $\alpha$  の値は弾塑性 FEM 解析により求めた。

### 3.3 解析・実験結果の比較

下記の2ケースの荷重条件で疲労き裂進展解析と疲労試験を実施した。

L.C.1: 応力範囲 100MPa, 応力比 0.1 の一定振幅荷重 (10万サイクル毎にピーチマーク導入)

L.C.2: L.C.1 の試験条件において 20万サイクル毎に 200MPa の過大応力を負荷

なお、疲労試験に使用した試験片は、母材は JIS G 3106 SM490B 鋼板、溶接ワイヤは JIS Z 3312 YGW11 ソリッドワイヤを使用し、脚長約 10mm で CO<sub>2</sub> 隅肉溶接により作製した。

図7に疲労き裂成長曲線の解析結果と実験結果を比較して示す。図中の横軸は繰返し数、縦軸はき裂深さをそれぞれ表しており、実験結果のき裂深さは破面のピーチマークにより測定した。実験結果では、L.C.2はL.C.1の2倍近

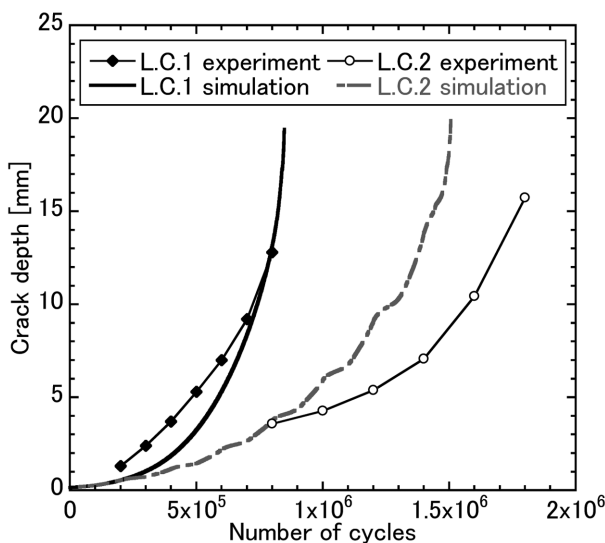


図7 疲労き裂成長曲線  
Fatigue crack growth curves

くの疲労寿命となった。これは、L.C.2では、過大荷重が作用した際に疲労き裂進展の遅延が生じるためである。解析結果と実験結果は良好に一致しており、疲労寿命予測システムにより過大荷重の影響を正確に考慮して溶接継手の疲労寿命を予測できることが確認できる。

## 4. UIT による疲労強度向上効果の解析

### 4.1 試験片

試験片形状を図8に示す。継手形式は荷重非伝達型十字溶接継手であり、母材は JIS G 3106 SM490B 鋼板を使用し、JIS Z3313 YFW-C50DR のフラックス入りワイヤを用いた CO<sub>2</sub> 隅肉溶接により作製した。

試験片の主板側溶接止端部にはUIT処理を施した。UIT処理には、Applied Ultrasonic社製のEsonix™ 27 UIS, 先端部曲率半径 3 mm, 直径 3 mm のUIT専用ピンを用いて周波数 27kHz, 出力 1 kW 程度, 処理速度 100mm/min 程度で処理した。UIT処理前後の溶接部断面形状を図9に示す。UIT処理前は溶接止端部の曲率半径  $\rho$  が 0.3mm 程度であったものが、UIT処理後はピン先端形状が転写されたことで止端曲率半径  $\rho$  は 3 mm 程度となっている。

### 4.2 応力分布の推定

3.1節と同様に、単位引張応力を受ける試験片の弾性応力分布を、3次元ソリッド要素を用いたFEM解析により求め、溶接止端部を含む板厚断面の応力分布を抽出後、溶接止端部近傍の応力分布を溶接部形状を考慮して修正した。応力集中係数の計算では、溶接ままに対しては溶接止端半径を 0.3mm, UIT処理後に対しては 3 mm とし、フランク角度はUIT処理の有無にかかわらず 45° とした。その結果、応力集中係数は溶接ままで  $K_t = 4.02$ , UIT処理後は  $K_t = 2.03$  となった。図10に応力分布修正前後の試験片幅中心部での溶接止端部近傍の応力分布を示す。

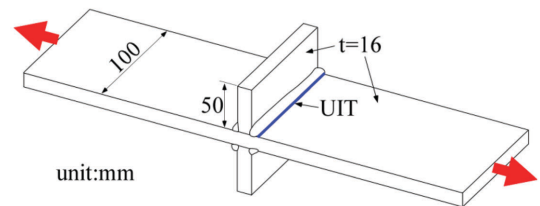


図8 十字溶接継手  
Cruciform welded joint

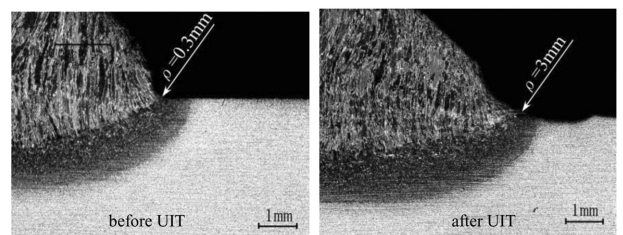


図9 溶接止端形状  
Geometry of the welded-toe

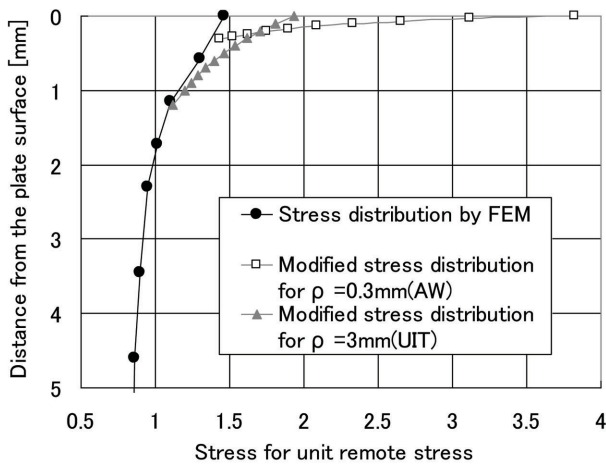


図10 溶接止端部近傍の応力分布  
Stress distribution near the weld-toe

### 4.3 残留応力分布の推定

溶接ままの残留応力分布は、3.1節と同様に熱弾塑性FEMにより推定した。一方、UIT処理後の残留応力分布は、中性子回折法<sup>15,16)</sup>による測定結果を使用した。測定装置は、日本原子力研究開発機構東海研究所の残留応力測定用中性子回折装置を使用し、計測に供した試験片は、溶接止端部にUIT処理を施したT字溶接継手（主板の板厚29mm，幅50mm，縦板の板厚12mm，材質SM490B）であり、継手形状が疲労試験片とは異なるが、材料の強度レベルは同等であり、同様のUIT処理が施されているため、UIT処理部近傍の残留応力に大きな違いは無いものと仮定した。試験片幅中央のUIT処理部表面から深さ方向に1～5mmの範囲を1mmピッチで計測した。ただし、表面部は測定を行っていないため、母材降伏応力の1/2となる-175MPaと仮定した。

図11に試験片幅中心部の溶接止端部近傍における、溶接ままに対する残留応力分布のFEM解析結果とUIT処理後の残留応力分布測定結果を示す。溶接ままでは表層近傍

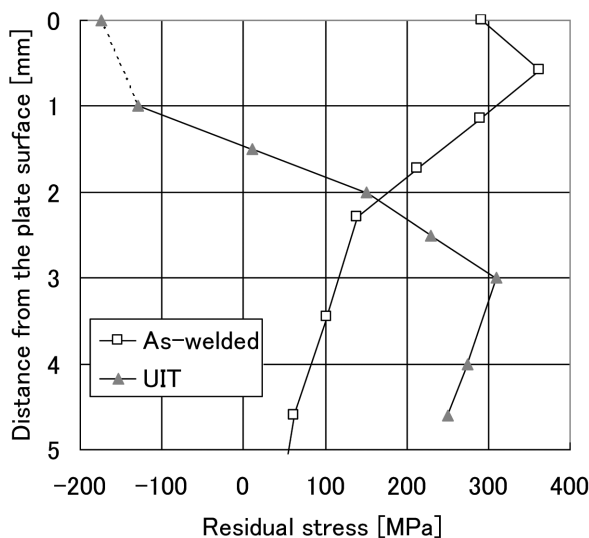


図11 溶接止端部近傍の残留応力分布  
Residual stress distribution near the weld-toe

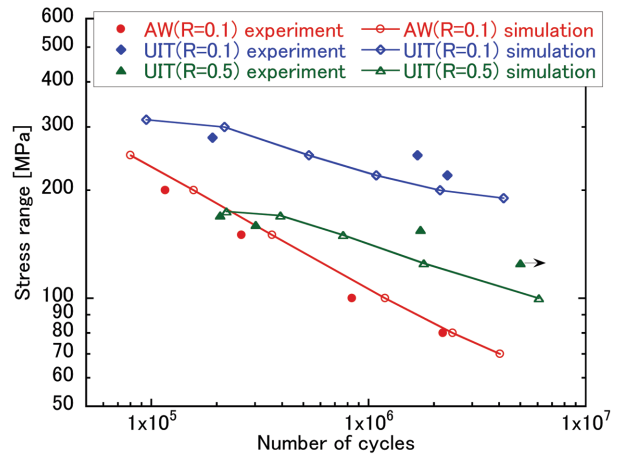


図12 解析、実験によるS-N曲線  
Simulated and experimental S-N curves

において降伏点レベルの高い引張残留応力が生じているのに対し、UIT処理後では表面から深さ1mmの位置で-130MPa程度の圧縮残留応力が計測され、深さが増すに従い徐々に引張に変化する傾向が確認された。

### 4.4 解析・実験結果の比較

解析及び疲労試験により得られたS-N曲線を図12に比較して示す。解析と実験はいずれも溶接まは応力比0.1、UIT処理後は応力比0.1と0.5について実施した。なお、疲労き裂進展解析の初期き裂は溶接止端に沿って均等に5つ設定した。その他の条件設定は3.2節と同様とした。また、横軸の繰り返し数Nの定義は、解析では仮想き裂先端が板厚に到達した時点またはき裂進展によりリガメント断面積が減少したことで最大荷重時に全断面降伏と判定された時点とし、疲労試験では試験片が破断した時点とした。

図12より解析と実験結果は良好に一致していることが確認できる。応力比0.1の条件下では、UITを施すことで疲労強度が溶接ままに比べて2倍以上に向上した。一方、応力比0.5の条件下ではUITによる疲労強度向上効果は応力比0.1に比べて低下する傾向がある。疲労寿命予測システムにより、十字溶接継手のUITによる疲労強度向上効果を応力比の影響も含め定量的に予測できることが判明した。

## 5. 結 言

溶接構造物の疲労寿命予測システムを開発した。本システムでは溶接止端部に微小初期き裂を設定し、表面き裂の成長・合体挙動をシミュレーションすることにより、き裂が板厚貫通するまで疲労寿命を推定する。また、き裂結合モデルを応用してき裂開閉口挙動をシミュレーションすることにより、残留応力や荷重順序の影響を適切に考慮して疲労き裂進展挙動を解析することが可能である。溶接継手試験片を対象として、疲労寿命に及ぼす過大荷重の影響とUITによる疲労強度向上効果を本システムにより解析

し、疲労試験結果と良好に一致することを示した。今後、本システムを船舶、橋梁、建設機械、プラント分野等の溶接構造物の疲労設計及びメンテナンスに適用し、溶接構造物の信頼性向上、長寿命化、環境負荷低減に貢献していきたい。

#### 参考文献

- 1) Statnikov, E. Sh. et al.: IIW Doc.XIII-1346. 1996
- 2) 野瀬:溶接学会誌. 77(3), 210(2008)
- 3) 野瀬 ほか:新日鉄技報. (391), 156(2011)
- 4) Okawa, T. et al.:Proc. 2nd Int. Conf. Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading. Darmstadt, 2009-3, DVM/ASTM, Vol.1, p.433
- 5) 大川 ほか:溶接構造シンポジウム講演論文集. 2009, p.483
- 6) 豊貞 ほか:鋼構造物の疲労寿命予測. 共立出版株式会社, 2001
- 7) Okawa, T. et al.:J. Mar. Sci. Technol. 13(4), 416(2008)
- 8) 辻:西部造船会会報. 80, 241(1990)
- 9) G.Glinka: Eng. Fract. Mech. 22, 839(1985)
- 10) American Petroleum Institute:API Recommended Practice 579 Fitness-for-Service. 2000
- 11) 日本溶接協会:溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法. 2007
- 12) 上田 ほか:技術者のための溶接変形と残留応力攻略マニュアル. 産報出版, 2007
- 13) Hobbacher, A. F.:Int. J. Fatigue. 31, 50(2009)
- 14) 日本鋼構造協会:鋼構造物の疲労設計指針・同解説. 技報堂出版, 1993
- 15) 鈴木 ほか:新日鉄技報. (390), 49(2010)
- 16) 鈴木 ほか:X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集. 2010, p.56



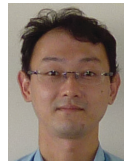
大川鉄平 Teppei OKAWA  
大分技術研究部  
主任研究員 工博  
大分県大分市大字西ノ洲1 ☎ 870-0992



島貫広志 Hiroshi SHIMANUKI  
鉄鋼研究所 厚板・鋼管・形鋼研究部  
主幹研究員 工博



野瀬哲郎 Tetsuro NOSE  
鉄鋼研究所  
接合研究センター所長 工博



鈴木環輝 Tamaki SUZUKI  
先端技術研究所 解析科学研究部  
主任研究員