

## 技術解説

# 原理原則に迫る現象解析- 2 : 疲労トータルソリューション技術

## Approaches for Fundamental Principles 2: Total Solution for Fatigue of Steel

野 瀬 哲 郎\*  
Tetsuro NOSE

大 川 鉄 平  
Teppei OKAWA

### 1. はじめに

鋼構造物は溶接により造られる場合が多いが、その鋼構造物が破壊に至る場合、その破壊の起点は溶接部であることが多い。溶接部は構造的に応力が集中しやすく、また種々の欠陥をその溶接部が包含する可能性があるからである。さらにライフサイクルコスト低減、環境負荷低減、安心、安全などの観点から、構造物の長寿命化、軽量化に対する社会的な期待が高まり、高機能鋼材の適用が望まれる傾向にあるが、高機能鋼材を適用すればするほど、溶接部に対し、より高い信頼性が求められている。

また、構造物が破壊に至る場合、その原因の8割が疲労に関連した事象であると言われている。その疲労対策として、高品質な鋼材の適用に併せて、応力の集中を回避する構造設計、溶接構造物であれば溶接欠陥の抑制、グラインダー処理などの後処理の施工などが取組まれてきたが、十分とは言えない。

新日本製鐵は、この溶接部の信頼性向上技術の開発に長年携わっており、その中で特に、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尽力し、高機能鋼材に安心、安全を併せて届けたいと考えている。当社の取組む、疲労トータルソリューションは、主に、①疲労き裂発生・進展抵抗に優れる鋼材、②疲労き裂の発生を抑制する高効率な溶接材料もしくは後処理技術、そして③疲労寿命の高精度な推定技術、からなる。以下では、この疲労トータルソリューション技術の概略について述べる。

### 2. 高疲労鋼材

一般に、応力集中部の無い平滑な部材の疲労限  $\sigma_w$  は鋼材引張強さ TS にほぼ比例し、TS が 1 300MPa 程度までの鋼材においては、 $\sigma_w = 0.4 \sim 0.6 \cdot TS$  程度となることが知られている。また、鋼材中を進展する疲労き裂の進展速度(応力振幅 1 サイクル当たりの進展量)は、疲労き裂進展の駆動力を表す破壊力学パラメータ有効応力拡大係数範囲

$\Delta K_{eff}$  が同一の場合、一般に鋼材組織に依らず、フェライト単相中もベイナイト単相中もマルテンサイト単相中もほぼ一定となる傾向が知られている。しかし、当社の長年の疲労研究により複相組織を呈する鋼において上記の例から外れる高疲労特性を示す鋼が開発されてきている。ここでは、厚板の事例として FM (Fatigue Moderation) 鋼を、薄板の事例として Cu 添加極低炭素鋼を、紹介する。

FM 鋼は、フェライト相とマルテンサイト相が層状に積層された組織的特徴を持つ(図 1 参照)<sup>1-4)</sup>。この層状組織内を層に垂直な方向に疲労き裂が進展する場合、その進展は著しく遅くなる。 $\Delta K = 20 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  の際の疲労き裂進展

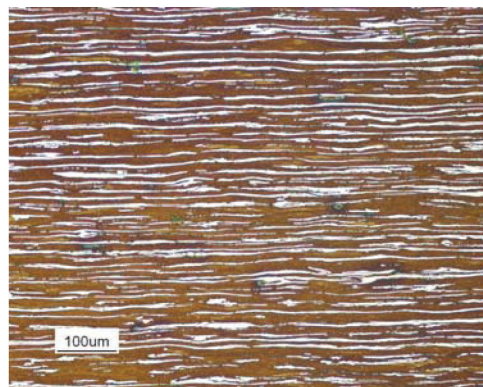


図 1 FM 鋼の組織形態(圧延方向断面)(白:マルテンサイト相, 茶:フェライト相)

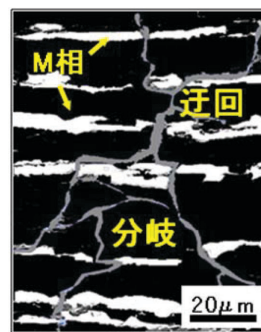


図 2 FM 鋼中のき裂進展形態(き裂は上から下へ進展)

\* 鉄鋼研究所 接合研究センター所長 工博 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

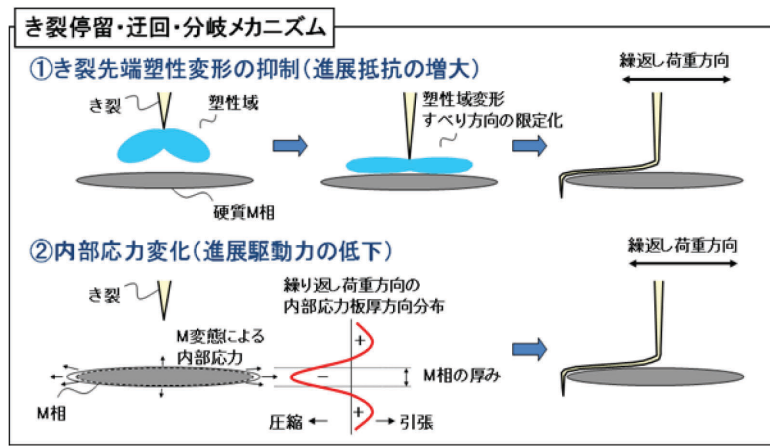


図3 き裂停留, 迂回, 分岐のメカニズム

速度を従来鋼と比較をすると約 1/10 程度となり、高い耐疲労特性を呈する。従来鋼では、疲労き裂は組織に依存せず直線的に進展するのに対し、FM鋼では、マルテンサイト相直上で停留、迂回、分岐を繰り返しながら進展していることがわかる(図2参照)。その停留、迂回、分岐のメカニズムとしては、硬く扁平なマルテンサイト相の存在によりき裂先端の繰り返し塑性変形が抑制されることによるき裂進展抵抗の増大に加え、マルテンサイト変態時に生じた変態膨張応力(マルテンサイト相中は圧縮残留応力)がき裂進展駆動力を低下させることに起因するものと考えられる(図3参照)。これらメカニズムについては、結晶弾塑性FEM解析<sup>5,6)</sup>およびMori-Tanaka平均場理論により定量的な議論がなされている。

490MPa級FM鋼の代表的な組成は0.12C-1.2Mn-0.5Si、機械的性質は降伏応力YS=394MPa、引張強さTS=506MPa、伸びEL=22%、板厚方向絞り値Φz=75%、シャルピー吸収エネルギー(-40℃)vE<sub>-40</sub>=239J(圧延方向断面)、142J(横断面)であり、疲労特性のみならず、強度、靱性のバランスにも優れており、今後、造船分野、橋梁分野などに普及されていくことが期待されている。

一方、Cu添加極低炭素鋼は、フェライト鋼中のCuの存在状態を制御した鋼である<sup>7-9)</sup>。

Cuを1.5%添加し熱間圧延空冷後450℃で1時間熱処理されたCu固溶強化鋼(代表的な組成は0.002C-0.2Mn-0.01Si-1.5Cu、引張強さTS=350MPa)では、疲労限 $\sigma_w$ が $\sigma_w = 0.69 \cdot TS$ と従来の鋼の疲労限度比0.4~0.6の範囲を超える特徴がある(図4参照)。また、低サイクル疲労試験において繰返し軟化が認められない特徴も有する。

疲労試験後の下部組織は、Cu無添加の比較鋼ではcell組織を形成しているのに対し、Cu固溶鋼ではvein状組織を呈しているのが確認されている(図5参照)。固溶Cuにより転位の移動が妨げられ、cell組織の生成を抑制し、表面すべり帯の間隔を狭めたことなどが疲労強度の向上に繋がったものと考えられる。

Cu添加極低炭素鋼は、熱処理温度によりCuの存在状態

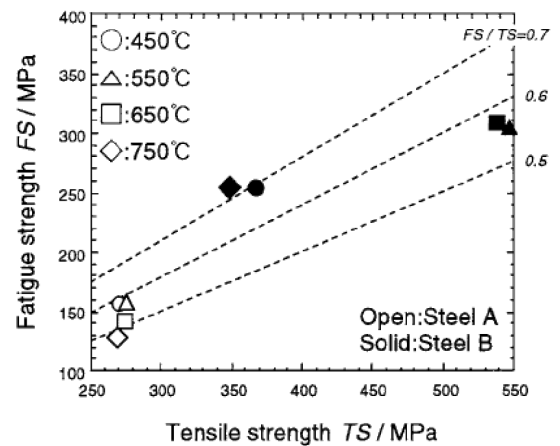


図4 引張強さと疲労強度の関係(Steel A:Cu無添加鋼, Steel B:Cu 1.5%添加鋼)

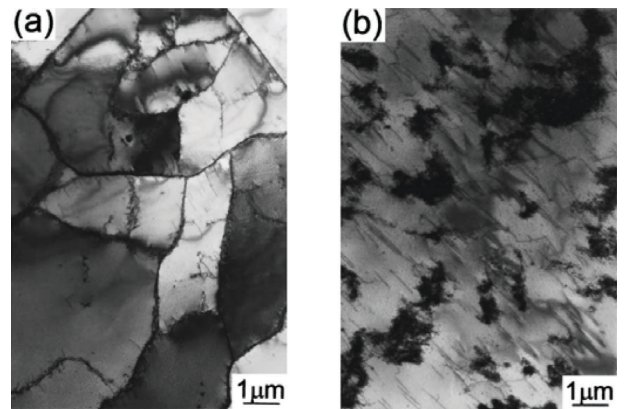


図5 繰返し負荷後の透過電子顕微鏡組織(1 000cycle後) ((a)Cu無添加鋼, (b)Cu1.5%固溶鋼)

を固溶状態から析出状態に変化可能で、強度レベルを300~550MPaと制御可能であり、自動車分野の適用部位に応じた展開が期待される。

### 3. 溶接部疲労対策

疲労対策としては、疲労き裂の発生を抑制することが理想的であるが、そのためには、微視組織レベルでの局所的な塑性繰返しを起こさせないことが重要である。局所的な



塑性繰返しが固執すべり帯の生成を誘起し、すべり面に沿ったき裂の発生を起こすことが知られているからである。塑性繰返し抑制には、き裂発生部位の鋼材強度レベル向上に加え、部材の各結晶粒に作用する応力レベルを塑性が起こらないレベルに下げることがあるが、基本的に平均応力を下げる、および、応力集中を抑制する等の対策が必要となる。

溶接部疲労改善技術としては、種々の方法が開発され、実用化されてきている。当社は長年疲労改善技術開発に取り組んできており、特に、溶接構造物の疲労き裂発生起点となることが多い溶接止端部の平均応力低減や応力集中抑制に関わる技術として、簡便な溶接後処理で疲労改善効果の大きいUIT (Ultrasonic Impact Treatment) 技術、および、溶接まで疲労改善効果のある LTT (Low Transformation Temperature, 低変態温度) 溶材に注力している。

UIT技術<sup>\*1)</sup>は、超音波振動を用いたピーニング技術の一種で、超音波加振された鋼製ピンを溶接止端部等に押し当てることにより施工領域からの疲労き裂の発生を抑制する技術である<sup>10-13)</sup>。UIT 処理 (ピン径 3 mm, 周波数 27kHz, 出力 1 000W) を溶接止端部に施した十字溶接継手 (KE36 鋼) の疲労寿命は未処理の継手と比較すると数倍から 10

\*1) UIT (Ultrasonic Impact Treatment) : Applied Ultrasonics, L.L.C 社の登録商標

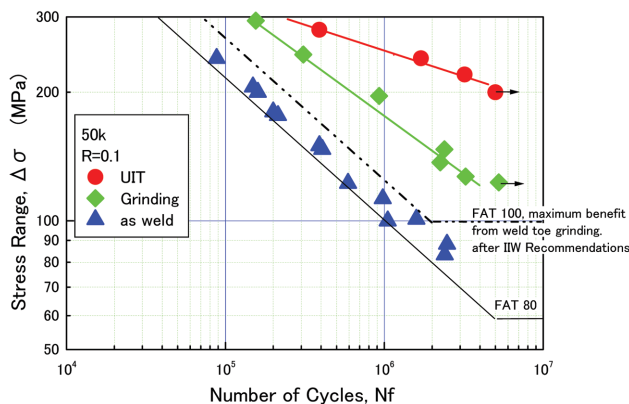


図 6 十字継手の疲労試験結果の例 (▲:溶接まま, ◆:グラインダー, ●:UIT)

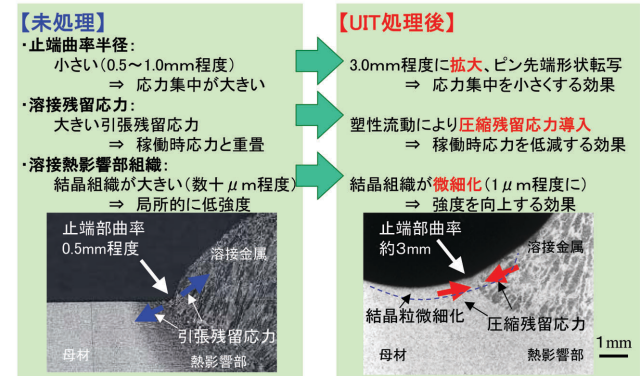
倍程度長く、著しい疲労特性改善が認められている (図 6 参照)。UIT の疲労改善効果は、実大形状の大型試験においても確認されている。また、先述の高疲労鋼との組合せにおいても大きな相乗効果が確認されている<sup>14)</sup>。

UITによる疲労き裂発生抑制のメカニズムは、①ピンを押し付けたことによる塑性流動により圧縮残留応力が処理部に導入され繰返し負荷の平均応力を低下させる効果、②先端に曲率を持ったピンの形状が塑性流動に伴い転写されたことにより溶接止端部の曲率が拡大し、止端部近傍の応力集中が低減された効果、そして③処理部表面の結晶粒微細化による硬度向上の効果、のそれぞれが重畳したものであることが推定されている (図 7 参照)。

このメカニズムに基づき、溶接止端部が消えるまで処理することなどを盛り込んだ施工管理基準を提案し、各用途に応じた承認を受けている。

実施工例としては、製鉄所の各種設備の疲労対策に多数採用され、設備長寿命化に貢献している。造船分野においては、LR, NK, ABS の各船級から承認を得、大手造船会社での適用が始まっており、32 万トン 鉱石運搬船ぶらじ丸の 25 年超耐久性を目指した疲労対策などに採用され普及が進んでいる (図 8 参照)。さらに現在、国内で造船分野向け UIT 研究会 (大学, NK, 造船 5 社と新日鐵が参

#### 【疲労性能向上のメカニズム分析】



疲労き裂発生を抑制 ⇒ 溶接部疲労信頼性が向上

図 7 UIT の疲労き裂発生抑制メカニズム



図 8 鉱石運搬船ぶらじ丸 (写真提供:三井造船(株)) でのUIT施工 (ホールド内)

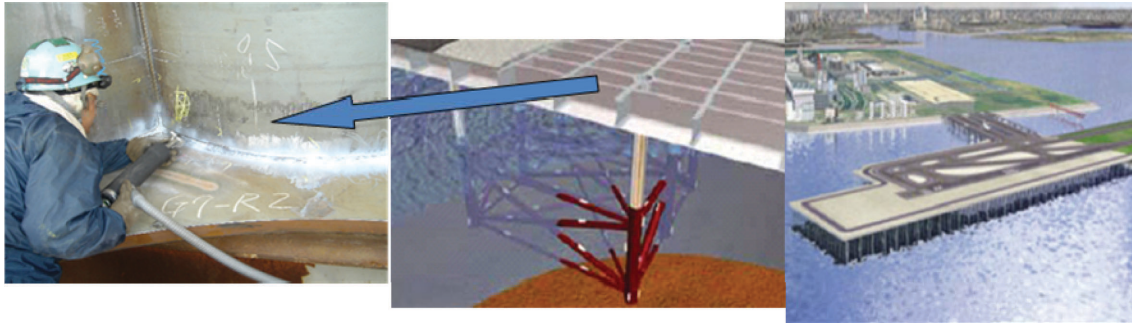


図9 羽田空港滑走路(中央・右図提供:羽田再拡張D滑走路JV)へのUIT適用(レグトップ部)

画)が設立され、国際船級ルール化(IACS-CSR改定)に向けて検討中である。橋梁分野では、国土交通省の新技術情報システムNETISに登録され、既設橋の補修を中心に検討が進みつつある。また海洋構造物では、羽田空港D滑走路ジャケットの疲労対策に採用され(図9参照)、総延長約40kmにおよぶ溶接止端部処理が施工され、滑走路の離発着における繰返し負荷に対する信頼性向上に寄与してきている。今後の更なる適用・普及が期待される。

LTT溶材は、オーステナイト相安定化元素を添加することによりマルテンサイト変態開始温度 $M_s$ 点を低温化した溶材である<sup>15-16)</sup>。

一般に通常溶材を用いて溶接を施す場合、局所的に加熱溶融した溶材が溶接終了時の冷却で収縮し、周りの部材の拘束により大きな引張残留応力場が溶接金属部および溶接止端部に生じる。この引張残留応力は、部材に加わる繰返し負荷の平均応力を高める作用があり、疲労特性を著しく減じることが知られる。LTT溶材はこの問題を克服すべく開発されたもので、オーステナイト相安定化元素であるNi, Cなどを添加することにより、 $M_s$ 点を塑性拘束が生じる550℃程度以下の350℃程度まで低温化し、そのマルテンサイト変態膨張によって室温近傍にて溶接金属部および溶接止端部領域に圧縮残留応力場を生じさせることを狙った溶材である(図10参照)。

Niを2.5%添加したLTT溶材(0.4C-2Mn-0.8Si-1Cr)を780MPa級鋼板の重ね継手に適用した場合では、溶接止端部近傍において、-450MPa程度の大きな圧縮残留応力が

計測され、その200万回曲げ疲労強度も従来溶材の220MPaと比べてLTT溶材では340MPa程度と著しく向上していることが確認されている。圧縮残留応力の生成挙動はFEM解析においても確認されている<sup>17)</sup>。

今後、自動車、建設機械、橋梁分野などでの普及が期待されている。

#### 4. 疲労寿命推定

作用する繰返し応力下において疲労破壊に至る寿命を知ることが、構造物の設計、維持管理に極めて重要である。当社は長年に渡り、各種鋼材の疲労試験データの蓄積とデータベース化を図ってきたが、併せて数値解析技術などによる寿命推定技術の開発にも力を割いてきている。多くの試験データを体系化することにより、簡易的な手法としては、鋼材強度、局所応力集中、そして局所残留応力を考慮した、局所領域に拡張された修正グッドマン線図(LEMGD: locally-expanded modified goodman diagram)により疲労強度を算定し、疲労寿命を推定する方法<sup>13)</sup>、また、極低サイクル領域にまでParis則の積分による寿命推定を拡張させた方法<sup>18)</sup>、などを提案してきている。さらに、最近では実構造物の板組、応力集中、残留応力、そしてランダム負荷をも考慮しながら、実用的に十分な精度を持った溶接構造物の疲労寿命予測システムの構築に成功している。

溶接構造物の疲労寿命予測システム<sup>19)</sup>の概要を図11に示す。本システムでは、溶接止端部に微小な初期き裂を設定し、重み関数法を用いた表面き裂応力拡大係数解析と、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>20)</sup>を組み合わせ、疲労き裂進展挙動を解析することで溶接構造物の疲労寿命を推定することが可能である。これにより溶接部形状に起因した応力集中と、溶接やピーニングに伴う複雑な残留応力分布の影響を考慮して応力拡大係数を算出し、さらにき裂先端部の塑性変形挙動とき裂面接触の解析からき裂開閉口荷重あるいはRPG(Re-tensile Plastic zone Generated load)荷重<sup>21)</sup>を推定することで、溶接構造物の疲労寿命を荷重順序や応力比の影響も含め正確に予測することができる。

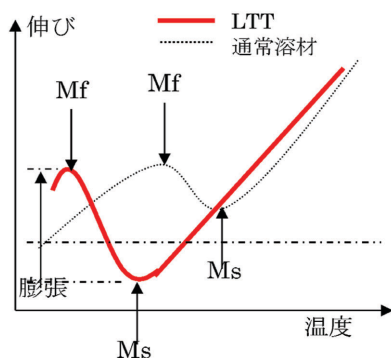


図10 LTT溶材の室温近傍での熱膨張挙動( $M_s=350^{\circ}\text{C}$ )



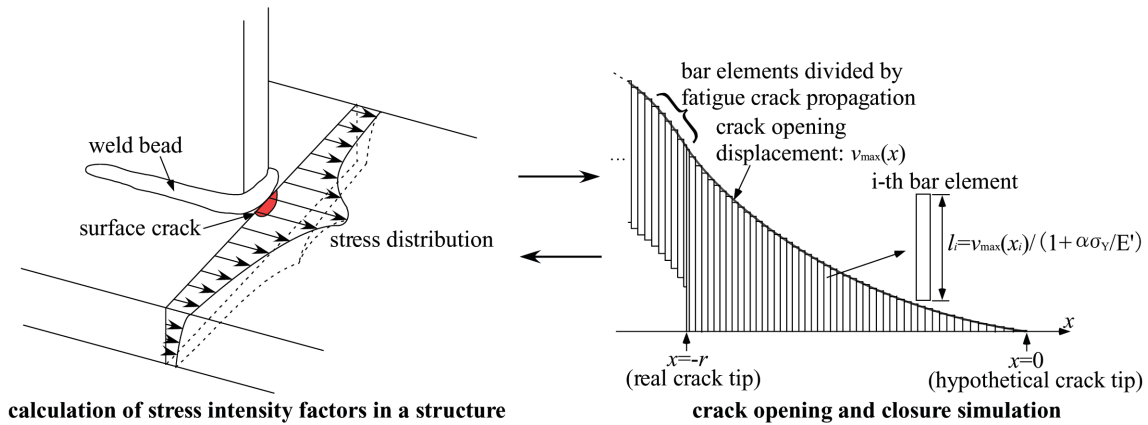


図11 疲労寿命予測システムの概要

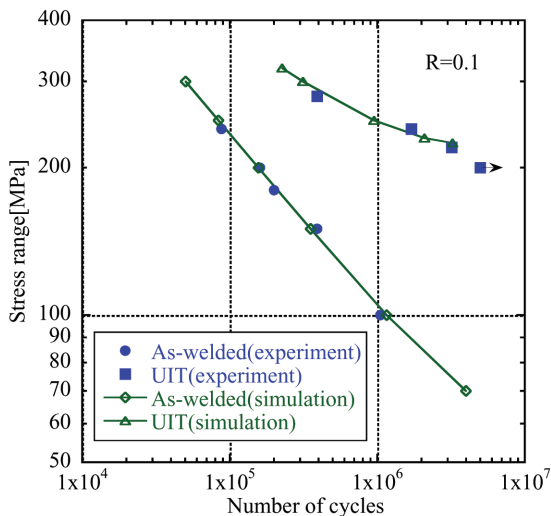


図12 十字溶接継手のS-N線図実験・解析結果

本システムの適用例として、溶接ままあるいはUIT処理を施した十字溶接継手のS-N線図の解析事例を図12に紹介する<sup>22)</sup>。本解析では、まず試験片の応力分布をソリッド要素を用いたFEMモデルによる弾性解析、溶接残留応力分布を同様のモデルを用いた熱弾塑性FEMの溶接シミュレーションによりそれぞれ算出した。UIT処理部の残留応力分布は、中性子回折法による測定結果<sup>23)</sup>を使用した。疲労き裂進展解析においては、深さ0.15mmの微小な半円き裂を初期設定し、疲労き裂進展則に修正Paris-Elber則を適用してき裂が板厚貫通するまで疲労寿命を推定した。解析結果は実験結果と極めて高精度に一致しており、本技術によりUIT等の後処理技術の効果を含めた溶接継手の疲労特性を定量的に推定できることが確認されている。

なお、高精度な寿命推定には精度の良い残留応力分布のインプットが必要となるが、当社では弾塑性熱応力解析<sup>12)</sup>と併せ中性子回折による三次元的な残留応力分布の非破壊計測技術<sup>23-24)</sup>も確立し、溶接部材中の複雑な残留応力分布の評価を可能としている。

## 5. まとめ

ここでは当社が取り組む疲労トータルソリューション技術に絞って、概略を紹介した。疲労トータルソリューションによる溶接部疲労信頼性向上は、鋼構造物の信頼性向上、ひいては、社会インフラストラクチャの長寿命化、環境負荷低減、安心、安全に大いに貢献するものと考えられる。引き続き、さらに信頼性の高い疲労ソリューションの構築に取り組み、当社鋼板に安心、安全も併せて顧客に届けて参りたい。

## 参考文献

- 1) 中島清孝, 島貫広志, 野瀬哲郎, 石川忠: 厚鋼板のマイクロ組織制御による疲労き裂進展抑制. 溶接学会論文集. 27 (1), 13-20 (2009)
- 2) 中島清孝, 島貫広志, 野瀬哲郎, 石川忠: 厚鋼板の疲労き裂進展特性に及ぼす第二相マルテンサイトの影響. 溶接学会論文集. 27 (1), 21-27 (2009)
- 3) 中島清孝, 島貫広志, 野瀬哲郎, 石川忠: 疲労き裂進展抑制鋼の溶接継手疲労特性. 溶接学会論文集. 27 (1), 28-33 (2009)
- 4) Nakashima, K., Shimanuki, H., Nose, T., Ishikawa, T.: Fatigue Properties of Welded Joints Using Steel with High Resistance to Fatigue Crack Growth. Welding International. 24 (5), 343-349 (2010)
- 5) 大沢直樹, 上野大輝, 下池亮, 橋本聖史, 中島清孝, 野瀬哲郎: 扁平マルテンサイト二相鋼内の疲労き裂伝播挙動の数値シミュレーション. 日本船舶海洋工学会論文集. (6), 387-397 (2007)
- 6) Osawa, N., Ueno, D., Shimoike, R., Hashimoto, K., Nakashima, K., Nose, T.: Numerical Study on the Fatigue Crack Propagation Behavior in Flattened Martensite Dual Phase Steel. ISOPE-2008. IV, 2008, p.229-235
- 7) 横井龍雄, 末廣正芳, 小山一夫: 極低炭素鋼の疲労特性におよぼすCuの影響. 材料とプロセス. 9 (6), 1377 (1996)
- 8) 丸山直紀, 杉山昌章, 横井龍雄, 高橋学, 岸田宏司: Cu添加鋼の

- 疲労特性とCuの存在状態. まてりあ, 39 (12), 967 (2000)
- 9) Yokoi, T., Takahashi, M., Maruyama, N., Sugiyama, M.: Cyclic Stress Response and Fatigue Behavior of Cu Added Ferritic Steels. J. Mat. Sci. 36, 5757-5765 (2001)
  - 10) Statnikov, E.S.: Comparison of Efficiency and Processibility of Post-Weld Deformation Methods for Increase in Fatigue Strength of Welded Joints. IIW Doc.XIII-1668-97, 1997
  - 11) 野瀬哲郎, 島貫広志, 中島清孝, 鈴木環輝: UITによる継手疲労強度向上機構. 溶接構造シンポジウム講演論文集. 2004, p.335-342
  - 12) 野瀬哲郎, 島貫広志: 重ね継手の疲労寿命に及ぼす超音波ピーニングの影響に関する実験及び解析. 日本機械学会論文集(A編). 74 (737), 166-168 (2008)
  - 13) 野瀬哲郎: 疲労強度向上向け超音波ピーニング法. 溶接学会誌. 77 (3), 210-213 (2008)
  - 14) 中島清孝, 島貫広志, 野瀬哲郎: 超音波衝撃処理と疲労き裂進展抑制鋼の相乗効果による溶接継手の疲労寿命向上. 日本船舶海洋工学会論文集. (8), 301-307 (2008)
  - 15) Kasuya, T., Sasaki, K.: Flux Cored Wire for Steel Sheet with Fatigue Strength Improvement. 溶接学会論文集. 27(2), 158s-162s (2009)
  - 16) 槽谷正: 継手疲労強度向上フラックス入りワイヤSX-ILD. 溶接学会誌. 78 (4), 244-247 (2009)
  - 17) Mochizuki, M., Mikami, Y., Iyota, M., Inoue, H., Kasuya, T.: Effect of Low Temperature Transformation Expansion on Residual Stress of High Strength Steel Welds. The Annual International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), 2009
  - 18) 野瀬哲郎, 本橋裕之, 増田智紀, 川西芳和, 伊藤努, 豊田政男: 高強度鋼管X80の極低サイクル疲労特性とパイプラインの耐震設計基準. 溶接構造シンポジウム講演論文集. 2004, p.265-272
  - 19) Okawa, T., Shimanuki, H., Nose, T.: Fatigue Life Prediction of Welded Structures under Variable Amplitude Loading. Second International Conference on Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading, Darmstadt, Germany, 1, 2009, p.433-442
  - 20) Okawa, T., Sumi, Y.: A Computational Approach for Fatigue Crack Propagation in Ship Structures Under Random Sequence of Clustered Loading. Journal of Marine Science and Technology. 13(4), 416-427 (2008)
  - 21) 豊貞雅宏, 丹羽敏男: 鋼構造物の疲労寿命予測. 共立出版, 2001
  - 22) 大川鉄平, 島貫広志, 野瀬哲郎, 鈴木環輝: 溶接継手の高精度疲労寿命予測-超音波衝撃処理による疲労強度向上効果の解析-. 溶接構造シンポジウム講演論文集. 2009, p.483-486
  - 23) 鈴木環輝, 太田典明, 大川鉄平, 島貫広志, 野瀬哲郎, ステファヌスハルヨ, 伊藤崇芳, 相澤一也: 中性子回折法による超音波衝撃処理した溶接継手の残留応力測定. 日本材料学会, 第45回X線材料強度に関するシンポジウム. 2011
  - 24) 鈴木環輝, 杉山昌章, 及川初彦, 野瀬哲郎, 今福宗行, 友田陽, 鈴木裕士, 盛合敦: 中性子回折法による鋼材溶接部の残留応力評価技術. 新日鉄技報. (390), 49-53 (2010)



野瀬哲郎 Tetsuro NOSE  
鉄鋼研究所 接合研究センター所長 工博  
千葉県富津市新富 20-1 ☎ 293-8511



大川鉄平 Teppei OKAWA  
大分技術研究部 主任研究員 工博

#### 執筆協力



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



横井龍雄 Tatsuo YOKOI  
鉄鋼研究所 薄板材料研究部 主任研究員



中島清孝 Kiyotaka NAKAJIMA  
大分技術研究部 主任研究員 工博