



会 議：第 72 回 国際溶接会議 (IIW) 第 XIII (疲労 (Fatigue)) 委員会

開催場所：クラウンプラザ・ブラチスラヴァ、ブラチスラヴァ、スロバキア共和国

会議期間：令和元年 7 月 7 日～7 月 12 日

海技研からの参加者：

岩田知明：構造基盤技術系 基盤技術研究グループ長

#### 概要

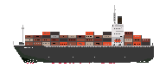
IIW (国際溶接会議) は、18 の委員会を中心に、ワーキンググループ・合同委員会を適宜設置し、各分野の専門家が集まって推奨/勧告 (Recommendation) ・指針 (Guidelines) 作成作業を行っている。また、ISO/TC 44 において溶接関係規格作成団体に指定されており、溶接に関して ISO/TC 44 で必要とされる既存 ISO 規格の改定案・新規 ISO 規格案の作成も行っている。第 XIII (疲労) 委員会では、独自の設計基準を設けていない造船所などで利用されている「溶接構造の疲労設計の推奨」・「溶接継手の疲労強度改善方法に関する推奨」・「溶接品質と疲労強度相関に関する指針」・「高周波機械的衝撃処理の推奨」等を、最新の知見や技術革新を反映させ随時更新・出版している。海技研からは岩田が第 XIII (疲労) 委員会の下部組織となる JIW (日本溶接会議) 13 委員会・溶接学会疲労強度研究委員会の会議報告作成担当として第 XIII 委員会に参加し、溶接構造物の設計・製作に影響を及ぼす推奨・指針・規格の改正・新規提案の動向、重点的な取り組みが推奨される研究課題、溶接疲労分野における最新の知見や技術革新の動向を調査し、国内関係者へ情報提供している。

#### 主な貢献

岩田は国内造船系委員として本委員会及び WG に参加し、疲労強度改善法、疲労設計法、疲労データ評価法などに関して、討議への参加、情報収集、関係者間の連絡調整を行った。



委員会に出席した岩田



## 主な審議結果

### 1 溶接継手の疲労強度改善技術に関する事項

WG2は、HFMI (High Frequency Mechanical Impact ; 高周波機械的衝撃\*)、低変態温度溶接ワイヤ†、ショットピーニングなどの溶接構造物の疲労強度改善技術を取り扱い、推奨指針の作成、並びにその裏付けデータを掲載した文書を発行してきた。一方、旧WG5では、主に疲労荷重の観点から、長期間供与中の溶接構造物の寿命延長計画の開発を行ってきたが、WG5の目的と活動はWG2と共通する部分もあるため、昨年、WG5が廃止されWG2に統合し、新たなWG2となり、溶接構造物の疲労強度改善・寿命延長・改造工学に関連する技術を取り扱うこととなった。旧WG5で行われてきた溶接構造物補修事例データベースの維持・拡張は、新たなWG2で継続する。なお、新たなWG2には、サブワーキンググループWG2-1 (HFMI)、WG2-2 (TIG再溶融仕上げ)、WG2-3 (ショットピーニング・ブラスト)が設置されている。

疲労強度改善技術に関する最新の推奨は、2013年発行の「IIW Recommendations on Methods for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints (溶接継手の疲労強度改善方法に関する推奨) : ISBN 9781782420644」並びに2016年発行の「IIW Recommendations on High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints (溶接継手の疲労強度改善用HFMI処理の推奨) : ISBN 978-981-10-2503-7」である。前者にはHFMIが含まれていないため、近年得られた知見を元に、施工手順・品質管理・疲労強度指針などHFMIに関する技術が盛り込まれた後者が発行された。また、旧WG5において完成間近で2013年以降中断されていた「Retrofitting Engineering for Fatigue Damaged Steel Structures (疲労損傷した鋼構造物の改造技術)」の発行作業は、新WG2に引き継がれ、レビュー検討会にて校正作業が行われている。一方、同じく旧WG5関連の「Life Extension Solutions by Repair and Retrofit Engineering of Welded Components (溶接構造物の修繕・改造工学による寿命延長方法)」の発行については、特に進展はなかった。

ミュンヘン応用科学大学とカールスルーエ工科大学の「腐食環境における溶接継手の疲労強度改善へのHFMI処理の適用」、ミュンヘン応用科学大学とブラウンシュバイク工科大学の「溶接まま及びHFMI処理をした軟鋼荷重非伝達型付加物継手の疲労強度に及ぼす応力波形1/3p値スペクトル型荷重履歴の影響」、名古屋大学、川田工業、MKエンジニアリングの「低変態温度溶接消耗品による片側溶接荷重非伝達型付加物横継手の疲労強度」、岐阜大学の「ICR (衝撃き裂閉口修繕) 機器でのハンマーピーニング及びUIT (超音波衝撃処理) によるSBHS700 (780MPa級鋼) 溶接継手の疲労強度向上」、オーストリアのレオーベン鉱山業大学、スウェーデン王立工科大学、フラウンホーファー研究機構の材料メカニズム研究所IWMの「変動荷重下でのHFMI処理をした鋼継手

---

\* 高周波機械的衝撃：超音波圧電素子（電気信号と力を返還する素子）、超音波磁歪素子（磁気信号と力を返還する素子）、圧縮空気のいずれかにより、円柱状圧子を高周波で振動させて被加工材に対して打ち込み、衝撃を受けた材料は塑性変形を起こし、局所幾何形状を滑らかにして応力集中を緩和させるとともに、圧縮残留応力が負荷されることにより引張の溶接残留応力を緩和させる。従来のハンマーピーニングに対して作業性に優れるとともに、被加工範囲が小さいので、より滑らかな形状に仕上げ易い。

† 低変態温度溶接ワイヤ：従来の溶接材料は組織変態点が500°C以上で、溶接後の冷却過程において収縮するため引張残留応力が発生し、無負荷でも引っ張られている状態になっている。この引張残留応力を低減させるため、変態点を200°C以下の低温とし、溶接後の冷却過程において膨張し圧縮残留応力を発生させることにより外部の引張力の緩和を可能としたNi-Crステンレス系材料を用いた溶接ワイヤのことである。



の疲労強度評価」、デンマークのオーフス大学、フィンランド Aalto 大学、スイス連邦工科大学の「共用荷重下での HFMI 処理溶接部の軽量化設計のための疲労寿命向上」、ブラウンホーファー研究機構の材料メカニズム研究所 IWM、カールスルーエ工科大学、ベルリン・ヘルムホルツ資源エネルギーセンター、ブラウンシュバイク工科大学の「一回の過負荷荷重負荷後の HFMI 処理付加物継手の残留応力開放」などについて討論が行われた。

#### 【今後の取り組み】

- TIG 再溶融仕上げにより改善された溶接部の疲労データのレビュー
- 母材強度・板厚効果・圧縮応力・変動荷重など現行ガイドライン発行後に新たに得られた疲労試験結果に対する HFMI ガイドラインの更なる検証・拡張
- ショットピーニング・ブラストを用いた疲労寿命改善
- 実荷重履歴下での大型構造物へ適用する場合の事例研究
- 土木工学以外の鉄道・航空機・発電所などの機械工学分野における疲労改善・寿命延長技術に関する適用事例収集
- XIII 委員会及び他の委員会の WG との連携体制の構築

## 2 溶接構造の疲労設計規格に関する事項

JWG-XIII/XV では、現行の IIW 推奨疲労等級を破壊力学計算に基づく新たな等級へ置き換えるため、溶接継手評価への破壊力学の適用の基準化が行われている。これにより、構造詳細のサイズ変更による影響評価や現行含まれていない新しい形状の評価が可能となる。しかしながら、疲労問題への破壊力学の適用は最先端の技術であり、現行の IIW 推奨で規定される溶接継手への標準化手法が明確でなく、包括的な文書が必要で、最初の草案を自発的に作成する担当者を募集中である。

溶接構造に関する最新の推奨は、2016 年発行の「Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components (溶接構造の疲労設計の推奨) 第二版 (2016 年版) : ISBN 978-3-319-23756-5」である。本推奨は各種疲労関連規則の付属規則として使用されるのみならず、学術分野の参考文献として広く引用されている。次の改訂に向けた作業が行われており、公称応力の算出方法、疲労抵抗、板厚効果、応力比・腐食・氷点下温度などを考慮した疲労強度の補正、ISO 5817\*で規定される欠陥の非破壊検査を用いた検出方法などについて討議が行われた。

荷重伝達型継手の板厚の影響に関するデータ収集・評価については、今後の疲労設計推奨の更新時に取り込む予定であるが、特に進展はなかった。溶接欠陥、疲労寿命、検査間隔、供与温度、脆性破壊の相互作用に関しては、第 10 委員会（破損を回避する溶接継手の構造性能）と連携して進めていく予定であるが、こちらも特に進展はなかった。

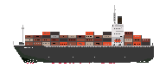
釜山国立大学とハルビン工科大学の「各種合金成分の影響を考慮した低温金属の疲労及び破壊特性に関する調査」、オークランド大学とミシガン大学の「溶接モーメント接続（モーメント力伝達可能継手）における T 型突き合わせ溶接部の完全溶け込みの効果的利用」などについて討論が行われた。

#### 【今後の取り組み】

- 溶接欠陥の疲労に及ぼす影響に関するレビュー

---

\* ISO 5817:2014 “Welding -- Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) -- Quality levels for imperfections”



- サイズ効果に関するレビュー
- 破壊力学を適用した推奨の開発
- 溶接構造の疲労設計の推奨の改訂

### 3 欠陥や溶接品質の疲労への影響に関する事項

WG4 では、第5委員会（非破壊検査及び溶接製品の品質保証）及び第18委員会（溶接及び関連プロセスの品質管理、旧 SC Qual：品質保証特別委員会）と連携して、溶接部周辺の溶接不完全部が疲労挙動に及ぼす影響について評価を行っている。

溶接品質に関する ISO 5817 や AWS-D1.1\*における欠陥の品質は疲労寿命を考慮していないため、IIW の疲労強度に関する推奨指針と整合していなかった。そこで、溶接品質と疲労強度の相関に関する指針が作成され、2016 年に「IIW Guidelines on Weld Quality in Relationship to Fatigue Strength（溶接品質と疲労強度相関に関する指針）：ISBN 978-3-319-19197-3」が発行された。この指針は ISO にも DTS（技術仕様書原案）として送られ、ISO/TS 20273:2017 Guidelines on weld quality in relationship to fatigue strength として 2017 年 8 月に発行している。

選択的レーザー溶融法（SLM：Selective Laser Melting、金属付加製造技術の1つ）により製造された部材の疲労強度に及ぼす表面状態の影響、微小欠陥相互作用に及ぼす材料特性の影響、破壊力学及び累積損傷則に基づいた内部欠陥を考慮した溶接部の寿命評価、溶接フランク角と止端半径を決定するためのラウンドロビンテスト<sup>†</sup>、薄板構造へのホットスポット応力法の適用に関する課題の比較分析、切断面の疲労強度に及ぼす影響を評価するためのデータ収集及び解析について討議が行われた。

近年、各分野において重要度が増している Additive Manufacturing（付加製造：3D プリント）に関して、昨年第 I、第 V、第 X 委員会と合同で AM に関するセミナーが開催されたものの、第 XIII 委員会では現状では十分な取り組みが行われていない。そこで、AM にも関心のある Prof. Martin Leitner が新たに WG4 の副議長となった。Prof. M. Leitner は WG2 のサブワーキンググループの1つ WG2-1（HFMI による疲労寿命改善）の議長でもある。第 XIII 委員会では、まずは AM により製造された部材の疲労を対象とした研究開発動向に関する調査を行い、今後必要に応じて新たな WG を設置する。

スウェーデン王立工科大学の「レーザースキャンに基づく溶接継手の疲労評価－溶接品質と疲労寿命の相関」、ブラウンシュバイク工科大学の「切断端面上の相互作用する切欠きの疲労強度に及ぼす影響」、フラウンホーファー研究機構の構造耐久性・システム信頼性研究所 LBF の「付加製造金属構造の疲労評価における欠陥の検討」などについて討論が行われた。

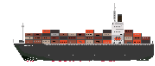
#### 【今後の取り組み】

- 切断面粗さなど疲労試験片の幾何特性に関するガイドラインを作成する。（他の WG と連携）
- 薄板構造物における溶接歪みや溶接変形の影響を評価するため、ロバスト<sup>‡</sup>モデルアプローチや新たな設計推奨について検討を行う。

\* AWS D1.1 “Structural Welding -- Steel”

† ラウンドロビンテスト：方法や装置の信頼性の検証のため複数の試験機関で同一の測定を行う共同作業。国際標準試験法の策定や標準試料の選定の際に行われる。

‡ ロバスト：外的要因による誤差因子にばらつきがあっても特性値のばらつきは小さい条件を採用するなどにより、外乱の影響によって変化することを阻止する内的な性質（頑健性）



- 溶接切欠、局所的な不完全部、高強度鋼、最新の溶接技術などの影響を考慮した高性能溶接を実現するため、全ての幾何特性をデジタル化した疲労解析を行う。
- 表面粗さ、硬さ、残留応力など、高強度鋼の切断面の状態の影響を考慮した設計推奨の改良を行う。
- 付加製造で製作された部材の疲労挙動評価のため、ブローホール・アンダーカット・溶接切欠形状など各種の欠陥の相互作用のモデリングを行う。

#### 4 応力解析に関する事項

WG3では、ホットスポット応力法（幾何形状に起因する構造的応力集中を用いて評価する方法）及び有効切欠応力法（き裂の影響を同等の影響を与える楔形形状に換算して評価する方法）による局所応力解析の情報交換、溶接継手の静的強度評価のための応力解析法指導書の作成（第15-A（設計）委員会と連携）を行っている。

溶接ビードによる切欠応力集中の影響は除いた形状応力解法の最新の設計者向けガイドは、2018年発行の「Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components - Designer's guide（ホットスポット構造応力解法による溶接部材の疲労解析－設計者向けガイド）：ISBN 978-981-10-5567-6」である。溶接ビードによる切欠応力集中の影響も考慮する切欠応力解法に関する最新の推奨は、2012年発行の「IIW Recommendations for the Fatigue Assessment of Welded Structures by Notch Stress Analysis（切欠応力解法による溶接構造物の疲労評価の推奨）：ISBN 9780857098559」である。

平均応力法（ノッチ底から一定距離の間の平均応力）や臨界距離法（ノッチ底から一定距離の1点の応力）の適用に関する評価が行われた。有効応力で20%異なる結果となった。この違いは解析手法の精度に起因するもので、現状では信頼性が十分ではなく、実験による検証が今後計画されている。また、板厚7mm以下の薄板への局所応力解析の適用に関する課題や、多軸疲労試験結果のデータベースの構築、管継手の「歪－寿命」解法を用いた多軸疲労解析における微細構造と残留応力の評価について討議が行われた。

ミュンヘン応用科学大学の「数値解析及びメタモデリング（評価対象固有のモデル構築）に基づく突き合わせ溶接継手の切欠係数の決定」、ドイツのクラウスタール工科大学とブラウンシュバイク工科大学の「切欠応力法における統計的な寸法効果を考慮することによる精度向上」、ブラウンシュバイク工科大学とオーストリアのレオーベン鉱山業大学の「X線コンピュータ断層撮影情報に基づく鋳造用レーザー溶接多孔質アルミ金型のFE構造解析」、ドイツのダルムシュタット工科大学、ジェノバ大学、フラウンホーファー研究機構の構造耐久性・システム信頼性研究所LBFの「切欠応力法・構造応力法・公称応力法に基づく比例加重下での溶接継手の多軸疲労基準の評価」、日本海事協会と広島大学の「タイプBホットスポット応力に関する研究」などについて討論が行われた。

##### 【今後の取り組み】

- 「疲労強度改善技術を施工した継手に対して（弾塑性）切欠応力法を適用する際の手引書」の作成
- 切欠応力強度係数（N-SIF）解法の適用（切欠応力の効果を数字で重みをつけ定量的に評価する）
- 平均応力法（ノッチ底から一定距離の間の平均応力）や臨界距離法（ノッチ底から一定距離の1点の応力）の適用



- 局部形状に基づいた溶接終始端の疲労評価
- 「歪-寿命」解法の適用による溶接構造の疲労評価
- 多軸応力状態の溶接継手の疲労評価

## 5 溶接構造物の疲労試験法及び疲労データ評価法に関する事項

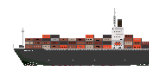
WG1 では、統計解析手法を正しく適用する手助けとするため、統計解析のためのベストプラクティス（最も効率の良い手法）推奨事項と関連した作業計画表（データシート及びスプレッドシート）の整備を行っている。

溶接構造の疲労試験の最新の推奨は、XIII-2140-06「Recommendations on the Fatigue Testing of Welded Components（溶接構造の疲労試験の推奨）」を元に ISO に TR（技術報告書）として送られた、ISO/TR 14345:2012「Fatigue -- Fatigue testing of welded components – Guidance」である。疲労試験データの統計解析に関するベストプラクティス指針「Best Practice Guideline for Statistical Analysis of Fatigue Results」原案（XIII-2807-19）が作成され、発行に向けて校正作業が行われている。

JWG-XIII/XV の事項で前述した「Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components 第二版（2016年版）」の3章7節3項 Evaluation of Data Collections において、異なる機関で実施された複数の疲労試験データセットを統合して統計解析を行う場合、ばらつきが大きく規則と整合しない事例が生じるため、見直しが必要である。疲労試験データセットの統合に関する見直し案（XIII-WG1-201-19）について討議が行われた。また、疲労試験に関するベストプラクティス指針「Best Practice Guideline for Fatigue Testing」の作成も予定されており、この新たな指針の目次案（XIII-WG1-203-19）の校正に関する討議が行われた。

デジタル画像相関法（DIC : Digital Image Correlation）による亀裂検出など新技術を用いる場合の正しい試験手法について検討が行われた。主板と同じ 8mm 板厚の面外ガセット継手を対象とした疲労試験により、歪みゲージと DIC（分解能 10 $\mu$ m）による検出精度の比較について報告が行われた。

フィンランドのラッペンランタ大学の「超高強度鋼荷重伝達型十字継手の疲労解析-4R（母材強度・残留応力・止端品質・応力比）法による平均応力の補正」、ハンブルグ工科大学の「氷点下での荷重伝達型及び荷重非伝達型付加物溶接継手の疲労強度」、イタリアのパドヴァ大学と Zanardi Fonderie（イタリアのミネルベの鋳物工場）の「オーステンパリング（ベイナイト組織を得るための等温焼入れ法）された延性鉄と鋼の異種アーク溶接継手の疲労特性」、イタリアのパドヴァ大学と Antonio Zamperla Spa（イタリアの遊具機器メーカー）の「ピーク応力法のマスター設計曲線から得られる溶接鋼構造詳細の疲労等級」、ピサ大学とフラウンホーファー研究機構の構造耐久性・システム信頼性研究所 LBF の「レーザービームまたは摩擦攪拌によるアルミ溶接継手の疲労評価」、フラウンホーファー研究機構の構造耐久性・システム信頼性研究所 LBF の「Integral Treatment（歪-寿命線図と応力-歪線図による疲労特性評価）を用いた低サイクル疲労領域の突き合わせ継手の疲労寿命評価」、ウクライナ科学アカデミー溶接研究所の「一定振幅及び変動荷重下におけるアルミリチウム合金薄板継手の高サイクル疲労挙動」、岐阜大学の「長寿命領域の変動荷重下における面外ガセット溶接継手の疲労強度の実験的研究」、岐阜大学、GRID（ポルトガルのコンサルティングエンジニア会社）、スイス連邦工科大学の「溶接まま面外ガセット継手の疲労試験データの再分析」、スウェーデン王立工科大学とカーゴテック（フィンランドの荷役機器メーカー）の「溶接構造の疲労寿命評価のばらつき関数-ラウンドロビン研究」などについて討論が行われた。



## 6 残留応力の疲労への影響に関する事項

WG 6 では、母材強度と疲労荷重の種類（高サイクル、低サイクル、高平均応力、変動荷重など）に特に関係して、溶接構造物の疲労強度に与える残留応力の影響に関する入手可能な情報や研究について、要約し批評を行っている。溶接構造物の目的適合性評価、残留応力をより適切に考慮した疲労設計推奨の開発が行われている。

残留応力を決定するためのベストプラクティス（最も効率の良い手法）ガイド「Best Practice Document on Residual Stress Determination in Welded Components」が作成されており、X線回折法を用いた溶接部の損傷しやすい領域における残留応力計測の好ましい条件と期待可能な精度を算定するためラウンドロビンテストが行われている。残留応力計測の評価対象は S460N の高強度鋼構造の突き合わせ溶接部である。正確な計測を行うための困難さが溶接シームの典型的な形状によって異なるため、溶接法はガスマタルアーク溶接とガスタングステンアーク溶接の両方としている。可搬式の小型の回折計ではよく用いられる  $\Psi$  モードの標準の実験室用回折計により計測は行われている。評価精度を向上させるため、ラウンドロビンテストへの更なる参加者を募集中である。別の計測機器を用いた新たな計測も計画されている。ラウンドロビンテストの結果は、溶接部の残留応力を実験的に決定するための実用的な推奨の基礎として用いられる予定である。

ラウンドロビンテストの次のステップとして、溶接部の残留応力を考慮した最先端の設計概念を開発する計画である。母材の疲労設計は、切欠きの影響を考慮した耐久限度線図により行われるが、横軸の平均応力を残留応力の影響を組み込んだ有効平均応力に置き換えることにより、残留応力の影響を取り込むことが可能である。残留応力の対象は溶接に起因するもののみならず、疲労強度改善技術など機械的な表面処理によるものも含まれる。

ブラウンシュバイク工科大学の「疲労荷重下での溶接部の残留応力を考慮した改良による現行の設計法の強化」、大阪大学の「スパイク荷重を伴う繰り返し荷重下での HFMI による圧縮残留応力の安定性に関する研究」などについて討論が行われた。

### 【今後の取り組み】

- 溶接継手における残留応力の影響に関連する更なるデータ収集
- 残留応力の影響を考慮した疲労データの解析と評価
- 溶接部材に適用するショットピーニングプロセスの解析
- 残留応力とその影響を評価するための工学モデルの評価

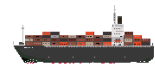
## 7 研究動向紹介

Cetim（フランス国立機械産業技術センター）では、溶接終始端の溶接ビード端部が疲労強度に及ぼす影響評価、疲労強度に及ぼす不連続アンダーカットの影響評価、溶接構造の疲労強度に及ぼす耐荷重の影響評価、付加物継手の止端部の残留応力に及ぼすパス数や溶接順序の影響評価が行われている。

アルセロール・ミッタルでは、超高強度鋼を適用した車台の薄板化のため溶接部の疲労挙動改善に関する開発が行われている。

IRDL（デュプイ・デ・ローム研究所）と DCNS（フランス艦艇造船所）では、赤外線放射温度計を用いた軍艦の溶接継手の疲労特性の高速評価に関する研究を 2020 年にかけて継続している。

フランス国鉄では、補修溶接後の亀裂進展の抑制や溶接部の疲労強度を改善するためにレーザーピーニングの研究を 2019 年にかけて継続している。



LAMPA（製造プロセス・材料耐久性に関する研究所）では、デジタル画像相関法（DIC：Digital Image Correlation）による亀裂検出など新技术を用いた溶接継手の高サイクル疲労強度評価に関する研究が行われている。

## 8 次回会議予定

次回第 73 回国際溶接会議（IIW）は、2020 年 7 月 19 日から 24 日までシンガポール共和国で開催される。主催はシンガポール溶接研究協会。

また、第 XIII 委員会の 2020 年の中間会合は、2020 年 3 月 12 日から 13 日まで大阪大学（吹田キャンパスまたは中之島センターのいずれか）で開催されることとなった。

この文書に対するご質問は  
海上技術安全研究所 産業システム系  
物理システム研究グループ長 岩田知明  
iwata@m.mpat.go.jp  
まで