

会議：第75回 国際溶接会議 (IIW) 第 XIII (疲労 (Fatigue)) 委員会
開催場所：東京 (グランドニッコー東京台場) ※オンライン併用ハイブリッド
会議期間：令和4年7月17日～7月21日
海技研からの参加者：

岩田知明：構造・産業システム系長
津村秀一：構造・産業システム系 産業システム研究グループ 主任研究員

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 委員会及び溶接学会疲労強度研究委員会の委員として第 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

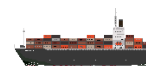
岩田は国内造船系委員として第 XIII 委員会及び WG に参加し、疲労強度改善法、疲労設計法、疲労データ評価法などに関して、討議への参加、情報収集、関係者間の連絡調整を行った。津村は、疲労強度改善法の適用範囲を拡張するため、応力比が負の条件下における改善効果に関する講演を行った。



委員会に出席した岩田

オンライン併用ハイブリッド開催

新型コロナウイルスの影響による入国制限の状況から、オンライン併用のハイブリッドではあるが、2019 年第 72 回以来 3 年ぶりの対面開催となった。2019 年以前と同様に、WG は開催されたが、第 XIII 委員会に関連する第 XV 委員会などとの合同委員会は今年も開催されなかった。合同委員会が無いことを除けば、今年の第 XIII 委員会のドキュメント件数並びに時間枠は、2019 年以前とほぼ同程度であった。



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

WG 2 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。また、長期間供与中の溶接構造物の寿命延長計画の開発、並びに溶接構造物補修事例データベースの維持・拡張を行ってきた旧 WG 5 も統合し、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。WG 2 には、サブワーキンググループ WG 2-1 (HFMI)、WG 2-2 (TIG 再溶融仕上げ)、WG 2-3 (ショットピーニング・ブラスト) が設置されている。新たに WG2-4 (グラインディング・プロファイリング) が設置された。

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、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、「Retrofitting Engineering for Fatigue Damaged Steel Structures (疲労損傷した鋼構造物の改造技術)」の発刊作業は遅れており、レビュー中である。

サブワーキンググループの進捗状況は以下のとおり。WG 2-1 では、上記 HFMI 処理の推奨発刊後の研究により取得されたデータに対して、母材降伏強度、板厚効果などが疲労強度改善効果に及ぼす影響について、再評価を行っている。WG 2-2 では、再溶融仕上げ後の溶接継手解析モデル簡易化のため、応力評価の参照点として、溶接止端側深さ 0.7mm 及び応力が最大となる位置の深さ 0.6mm を選定し、疲労強度評価を行っている。WG 2-3 では、50 の文献で得られた結果を解析し、ショットピーニングにより生じる圧縮残留応力は、鋼では母材引張強度の 25%以上、アルミニウム合金では母材引張強度の 40%以上、表層に限っては、鋼では母材引張強度の 60%以上、アルミニウム合金では母材引張強度の 50%以上であることを確認した。

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、名古屋大学、KIT Stahl-und Leichtbau (ドイツの公的材料試験研究所)、ドイツ溶接技術協会による「HFMI 処理効果の定量化」、フィンランドのラッペーンランタ大学による「ブラスト洗浄による溶接後処理をした荷重非伝達型溶接継手の疲労強度」、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、GSI Gesellschaft (ドイツの加速器施設)、ECOROLL (オハイオ州の工具メーカー) による「同種又は

* 高周波機械的衝撃：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むことにより、材料に塑性変形を生じさせ、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。



異種アルミニウム合金摩擦攪拌溶接部のディープロールによる疲労寿命改善」、グラーツ技術大学による「構造的ホットスポット応力解法による HFMI 処理鋼継手の疲労強度照査の確認」、ブラウンシュバイク工科大学による「高強度鋼溶接部の疲労強度最適化のための溶接シーム改善技術の特性」、大阪大学、CAE Lab、日立造船による「HFMI 誘起局所残留応力に及ぼすピーニング解析条件の影響に関する数値的検討」、ブラウンシュバイク工科大学による「低強度鋼および高強度鋼の溶接部の疲労強度向上可能性」、海技研による「応力比が負の条件下における HFMI 処理の板厚効果」、大阪大学、長崎総合科学大学、神戸製鋼、志賀強度接合研究所、矢島材料強度研究所による「全溶接姿勢に有効なビード延長法及び新型低変態温度溶接ワイヤによるボックス角継手の疲労寿命拡張」、岐阜大学、スウェーデン王立工科大学による「HFMI 溶接部のき裂開閉挙動を考慮した寿命延長解析」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
- 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
- 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

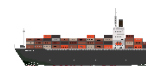
2 溶接構造の疲労設計規格に関する事項

JWG-XIII/XV では、主に溶接構造の疲労設計の推奨の改訂作業を行っている。

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。次の改訂作業が行われており、6 章 4 節「安全に関する統計考慮」(JWG-304-22)、3 章 7 節「試験に基づき決定される疲労抵抗」(JWG-305-22)、3 章 5 節 3 項 7 (新規)「疲労改善技術 : 7. HFMI」(JWG-306-22) などに関する項目の改訂案・新規提案が作成されている。

疲労設計推奨の各項目の改訂作業進捗状況は以下のとおり。公称応力解法については、構造詳細の分類に対して、近年得られた評価データに基づく新ユーロコード案との比較により綿密な分析が行われている。構造的応力解法については、極厚板の場合のホットスポット応力参照点の計測位置が適切かどうか討議されている。切欠応力解法については、新ユーロコード案と同様に、板厚により異なる切欠半径を導入することにより、板厚 5mm 以下への拡張が行われている。破壊力学については、今回の改訂では、基本的な概要のみが付録とされる予定である。板厚効果については、データベースを評価することにより、各種応力解法における上述の見直しのとおり、新しい手法が開発されている。疲労改善技術については、HFMI の項目が新たに導入される。溶接欠陥と疲労強度の相関については、IIW の溶接構造の疲労設計の推奨と溶接品質に関する ISO 5817*

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



との整合表は板厚 10mm を対象としており、板厚が過大になるほど過剰に安全側の評価となっているため、付録として整合表の拡張が行われている。

【今後の取り組み】

- 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では、切欠きに起因する効果などの疲労寿命が考慮されておらず、IIW の溶接構造の疲労設計の推奨と整合していなかった。そこで、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、ISO/TS 20273:2017 Guidelines on weld quality in relationship to fatigue strength としても 2017 年 8 月に発行している。

主な項目の進捗状況は以下のとおり。薄板構造物の溶接誘起変形については、角度不正に起因する応力倍率係数式を定め、様々な境界条件への拡張が行われた。高強度鋼の切断面の状態については、1160 のデータを用いて表面粗さ・硬さ・残留応力の複合的な影響に関する検討が行われた。高性能溶接部や構造については、幾何形状のデジタル計測からフランク角と止端半径を算出するためのラウンドロビンテスト†が 17 の機関により継続されており、フランク角は比較的正確に計測されるが、止端半径は機関毎に計測結果が異なることが報告された。積層造形による部材や構造の疲労挙動については、任意 3 次元形状き裂の応力拡大係数を効率的に評価する FEM 解析手法を導入するとともに、疲労強度改善技術や平均応力が積層造形による部材の疲労強度に及ぼす影響について評価が行われている。

ドイツのケムニッツ工科大学、ブラウンシュバイク工科大学による「指向性エネルギー堆積（DED：direct energy deposition）により積層造形された鋼部材の表面状態と疲労に及ぼす製造中の積層方向の影響」、ウクライナの Paton 溶接協会による「摩擦攪拌溶接による AA2024/AA5056 異種材薄板継手の疲労寿命」、大阪大学、広島大学、大阪公立大学による「き裂を有する T 型突合溶接継手の破壊パラメータ修正因子に基づく影響係数」について討論が行われた。

【今後の取り組み】

- 薄板構造物の溶接誘起変形（引張荷重下の補剛板に適用可能な解析ツールの開発）
- 表面粗さ・硬さ・残留応力の複合的な影響を考慮した高強度鋼の切断面の状態（要因毎の影響係数の解明並びに疲労設計指針への反映）
- 溶接切欠の影響・局所的な不完全部・材料の影響・最新溶接技術を考慮した高性能溶接部や構造（計測方法・計測者・計測装置がフランク角・止端半径の計測結果に及ぼす影響評価）
- 積層造形による部材や構造の疲労挙動（溶接欠陥・残留応力・表面形状の相互作用の特性解析とモデル化）
- 疲労照査のための幾何特性（切断面粗さなど）に関するガイドライン（WG1 と連携）

* 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。



4 応力解析に関する事項

WG3 では、ホットスポット応力解法（幾何形状に起因する構造的応力集中のみを考慮して評価する方法）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）による局部的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。

溶接ビードの局部的切欠による応力集中の影響は除いた構造的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（構造的応力(ホットスポット応力)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。溶接ビードの局部的切欠による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。

主な項目の進捗状況は以下のとおり。母材強度を考慮した有効応力解法については、材料の微細構造に起因する応力が高強度鋼では軟鋼より存在するため、微細構造に基づく等価構造長の導入について検討されている。また、Xiao-Yamada の手法では臨界距離を 1mm としているが、有効応力解法では、より小さい半径を取り扱っているため、臨界距離と板厚との依存性が評価されている。多軸応力状態の疲労評価については、切欠応力解法では、現在の疲労等級 225 に対して安全側ではない結果が生じているので、疲労等級 200 とすべきか検討されている。また、等価応力を算出せずに Gough-Pollard の式を適用する手法について検討されている。

ミュンヘン応用科学大学による「曲げ荷重下の高強度鋼及び超高強度鋼による薄板溶接管構造の寿命評価に及ぼす荷重履歴の影響」、ミュンヘン応用科学大学による「引張荷重下の S355J2H 鋼による溶接管構造の寿命評価に及ぼす荷重履歴の影響」、イタリアのパドヴァ大学による「変動荷重多軸局所応力下の鋼溶接継手の疲労寿命評価へのピーク応力法の適用」、フィンランド Aalto 大学による「トラクション力解法による複雑な溶接構造の疲労照査」、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、ハンブルグ工科大学、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 による「有効応力解法による材料強度の影響を考慮した溶接継手の疲労照査」、名古屋大学による「低サイクル疲労照査のための溶接止端局所歪振幅の簡易評価」、高速道路総合技術研究所、名古屋大学による「鋼床板溶接継手における U リブからデッキへ進展するルートき裂の参照応力による疲労寿命評価」、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、ブラウンシュバイク工科大学、ドイツのマクデブルク・シュテンドール応用科学大学による「法線方向と剪断方向の応力が作用する摩擦溶接鋼継手の疲労破壊挙動」について討論が行われた。

【今後の取り組み】

- IIW 推奨範囲内での薄板の疲労照査
- 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
- 多軸応力状態の溶接継手の疲労評価
- 局所応力解法（構造的ホットスポット解法及び有効切欠応力解法）の事例交換
- 「改善技術を施工した溶接部に対して切欠応力法を適用する際の手引書」の作成



- 切欠応力拡大係数（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）

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、ISO/TR（技術報告書）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）は発刊作業の準備中。

ハンブルグ工科大学、ブ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、シュトゥットガルト大学、KLÄHNE BUNG（ドイツの土木設計企業）による「突合継手のグライディング処理疲労強度改善効果の統計照査」、ハンガリーのミシュコルツ大学による「高強度鋼のガスマタルアーク溶接継手と電子ビーム溶接継手の疲労き裂進展設計曲線の比較」、大阪公立大学による「疲労き裂成長挙動に及ぼす試験片サイズと荷重条件の影響に関する基礎的研究」、フィンランドのラッペーンランタ大学による「レーザー切断による切欠を有する溶融亜鉛メッキ高強度鋼の定荷重並びに変動荷重下での疲労特性」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

WG6 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。

WG6 は議長不在で、後任選出の投票が今回行われたため、昨年に引き続き今年も活動報告は行われなかった。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」の作成作業は継続中。

小松製作所、大阪大学による「プラグ溶接部材におけるルート破壊疲労強度とルート部の溶接残留応力の関係に関する研究」、ミュンヘン応用科学大学、ブラウンシュバイク工科大学による「P(1/3)形及び線形スペクトル変動荷重下の HFMI 処理をした横付加物継手の残留応力の安定性」、IHI、大阪大学による「溶接継手の疲労き裂発生・進展寿命に及ぼす残留応力の影響に関する局所歪に基づく照査」について討論が行われた。

7 2022 IIW INTERNATIONAL CONFERENCE

「カーボンニュートラル達成と持続可能な開発推進のための革新的溶接接合技術」をテーマとした年次会議併催国際会議が行われた。最初に以下の8件の基調講演が行われた。

「カーボンニュートラルを実現するグリーン成長戦略」（経済産業省産業技術環境局）

「エネルギー転換における三菱重工業グループのイニシアチブ」（三菱重工業）

「積層造形：一度に未来を造る」（GE アディティブ）

「自動車産業の変革」（北米トヨタ自動車）



「浮体式洋上風力発電による再生可能エネルギー革命」(東京大学)

「船舶のゼロエミッション移行」(日本海事協会)

「ネットゼロ航空機産業の未来へ向かって」(IHI)

「次世代建築工法システム『シミズスマートサイト』による建設 DX イニシアチブ」(清水建設)

基調講演に続いて、最大17セッション同時開催で、全44セッションの一般講演(招待講演も含む)が行われた。積層造形(AM)、AI&DX、水素、新材料、将来技術、先進技術のそれぞれについて3~10のセッションが設けられ、各セッションでは4~6件の講演が行われた。

積層造形では、プロセスコントロール、材料特性、指向性エネルギー堆積(DED)、ワイヤーアーク積層造形(WAAM)、数値計算・予測、欠陥に関する講演が行われた。

AI&DXでは、溶接プロセス自動化、最適化・管理、教育訓練、検査、自動化、溶接品質予測、溶接品質計測、溶接者の技術評価に関する講演が行われた。

水素では、溶接プロセス、機械的特性、材料挙動に関する講演が行われた。

新材料では、異材抵抗スポット溶接、鋼溶接、異材FSW、ロウ付用材料、数値解析に関する講演が行われた。

将来技術では、非破壊検査、厚板溶接、摩擦溶接、アーク溶接プロセス、異材接合、ハイパワービーム、抵抗溶接、冶金に関する講演が行われた。

先進技術では、疲労破壊、FSW、レーザープロセス、溶接残留応力、計測・検査、アセスメントに関する講演が行われた。

8 次回会議予定

次回第76回国際溶接会議(IIW)は、2023年7月16日から21日までシンガポール共和国(マリーナベイサンズコンベンションセンター)で開催される。主催はシンガポール溶接協会。

また、第XIII委員会の2023年の中間会合は、2023年の3月にオンラインで開催される予定。

この文書に対するご質問は
海上技術安全研究所
構造・産業システム系長 岩田知明
iwata@m.mpat.go.jp

まで



Table 1 IIW の委員会構成

- C-I / Additive Manufacturing, Surfacing, and Thermal Cutting
- C-II / Arc Welding and Filler Metals
- C-III / Resistance Welding, Solid State Welding and Allied Joining Process
- C-IV / Power Beam Processes
- C-V / NDT and Quality Assurance of Welded Products
- C-VI / Terminology
- C-VII / Research Developments and Applications in Micro and Nano joining Technologies
- C-VIII / Health, Safety and Environment
- C-IX / Behavior of Metals Subjected to Welding
- C-X / Structural Performances of Welded Joints - Fracture Avoidance
- C-XI / Pressure Vessels, Boilers and Pipelines
- C-XII / Arc Welding Processes
- C-XIII / Fatigue of Welded Components and Structures
- C-XIV / Education and Training
- C-XV / Design, Analysis, and Fabrication of Welded Structures
- C-XVI / Polymer Joining and Adhesive Technology
- C-XVII / Brazing, Soldering and Diffusion Bonding
- C-XVIII / Quality Management in Welding and Allied Processes

Table 2 C-XIII 委員会（疲労）の構成

- Joint Working Group XIII-XV / Fatigue Design Rules
- C-XIII-WG1 / Fatigue Testing and Evaluation of data for Design
- C-XIII-WG2 / Fatigue Strength Improvement and Life Extension of Welded Components and Structures
 - C-XIII-WG2-SWG1 / HFMI (High Frequency Mechanical Impact)
 - C-XIII-WG2-SWG2 / TIG Re-melting Dressing
 - C-XIII-WG2-SWG3 / Shot Peening and Blast
 - C-XIII-WG2-SWG4 / Grinding and Profiling
- C-XIII-WG3 / Stress Analysis
- C-XIII-WG4 / The Influence of Weld Imperfections on Fatigue Strength
- C-XIII-WG5 (2018年に旧WG2と統合され廃止されたが、再開に向けて協議中)
- C-XIII-WG6 / The Influence of Residual Stress on Fatigue