

溶接構造物の疲労・破壊強度評価の 進歩と今後の展望

Development of Fatigue and Fracture Strength Evaluation of
Welded Structures and Future Prospects

後藤 浩二
Koji Gotoh

九州大学大学院工学研究院
海洋システム工学部門
教授

1 はじめに

本稿は、2017年6、7月に開催された西山記念技術講座「溶接構造物の疲労・破壊強度評価の進歩と今後の展望」に関する講演概要を紹介するものである。

船舶・海洋構造物、橋梁、鉄道車両、高層建築鉄骨構造等、多くの大型溶接構造物が社会インフラとして活用されている。これらの損傷形態は近年の母材性能の格段の進歩もあり、溶接継手を起点とする場合が大半である。図1に示す機械・構造物の破損事故例の分類^{1,2)}によれば、疲労破壊は全体の60%程度を占めており、脆性破壊等の不安定破壊の大半は疲労亀裂が一定レベルに成長したのちにこれを起点として生じていることを考慮すれば、溶接継手の疲労強度評価精度の向上が重要であろう。

大型溶接構造物は機械要素部品とは異なり、一般に変動荷重履歴条件下において稼働している。疲労亀裂成長には荷重履歴が大きく影響することが広く知られているが、構造物の

設計段階で荷重履歴を定量的に設定することが困難であるため、変動荷重の出現頻度を過去の実測例等を参照して設定し、これにS-N曲線と線形累積被害則を適用するという、いわゆるS-N curves approachを採用することが一般的である。この手法では、疲労破壊が生じたか否かは判定できるものの、疲労破壊と判定された段階での欠陥寸法を定量的に与えることはできない。大型構造物では少々の疲労亀裂を内在しても構造物の機能喪失には至らないため、単純に「疲労」「不安定破壊」などと個別の破壊限界評価を行うのではなく、微小な疲労亀裂の発生から伝播、ある程度成長した疲労亀裂を起点とする不安定破壊の発生までを連続して行える学問形態の構築が必要と考えられる。これを実現するためには、疲労強度評価も破壊力学的な取扱いによるべきものと著者は考えている。

このような状況を考慮し、本稿では、(1) 溶接継手の疲労設計規格および溶接品質が継手の疲労強度に及ぼす影響に関する研究動向、(2) HFMI (High Frequency Mechanical Impact) 手法による溶接継手の疲労強度改善技術に関する研究動向、(3) 疲労強度に及ぼす板厚影響に関する新たな知見、(4) 疲労損傷のモニタリングツールである疲労センサに関連する研究動向、(5) 著者らによる、変動応力履歴条件下における疲労亀裂成長履歴推定手法、について順次概説する。

2 溶接継手の疲労設計規格及び溶接品質の疲労強度に及ぼす影響に関する研究動向

溶接構造物の疲労強度評価に際しては、S-N曲線と線形累積被害則による手法によることが一般的である。このため、種々の溶接継手に対応した疲労設計用S-N曲線が規定され

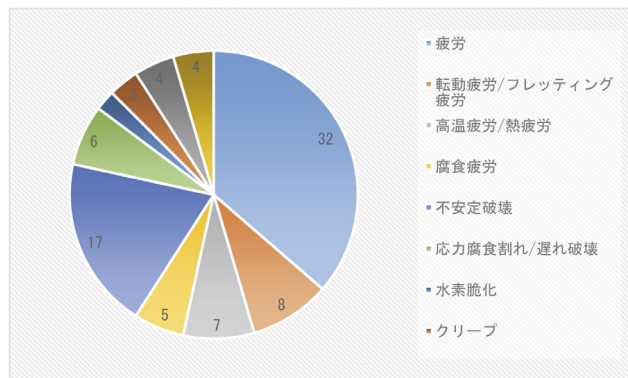


図1 機械・構造物の破損事例の様式別分類 (数値は%であり、データの出典は文献^{1,2)})

ている。国際的にはIIW (International Institute of Welding) 第XIII委員会 (疲労) と第XV委員会 (設計製作) の合同ワーキンググループによる、Fatigue design of welded joints and components³⁾がある。この中で、種々の様式を有する溶接継手毎にFAT (Fatigue class : 疲労等級) が指定され、FATに対応したS-N曲線を疲労設計曲線として使用する。継手に対する作用応力として以下の三種類のうちのいずれかを指定して疲労強度評価を行う。

- (1) 公称応力 (nominal stress) : 評価対象部位の断面で、溶接継手の構造様式や溶接止端形状に起因する応力集中を無視して与えられる。単純な継手であれば材料力学的に与えることができるが、複雑な不静定構造等ではFEMを用いて与えることができる。
- (2) ホットスポット応力 (structural hot spot stress) : 溶接止端形状のような局所的な形状影響による応力集中係数を除く、全ての構造詳細に起因する応力集中を考慮して与えられる。一般に、これを解析的に与えることは不可能であるため、FEMを用いて計算する。得られる応力値はFEモデル構築など解析作業に依存するため、指示されている注意事項に十分配慮する必要がある。
- (3) 有効切欠応力 (effective notch stress) : 溶接継手の場合、溶接止端形状を切欠と近似したときの切欠底における応力である。本手法は溶接止端あるいは溶接ルート部が疲労破壊の起点となる継手にのみ適用できる。

国内では日本鋼構造協会⁴⁾による「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」において種々の様式を有する溶接継手に対するS-N曲線が提示されており、継手に対する作用応力としては公称応力とホットスポット応力を採用している。2012年に発行された最新版における主要改定内容については文献⁵⁾にて紹介されている。

溶接継手で生じる不安定破壊の多くは、先行して発生した疲労亀裂がある程度の大きさに成長した段階を起点とするものであることも考慮し、上記のIIW文献やJSSC疲労設計指針でも破壊力学的手法に基づく疲労亀裂成長履歴評価法について言及されている。IIW規格では、現行のFATを破壊力学の理論背景に基づき新たに分類し直すための基準化が進められている。これにより、構造詳細のサイズ変更による影響の検討や、現行の疲労設計指針には含まれていない新しい溶接継手の評価も可能となることが期待されるが、理想的には設計外力履歴を設定し、変動荷重履歴条件下でも精度良く疲労亀裂成長履歴を予想できる、「次世代型」破壊力学的手法に基づく疲労設計が始まることを期待したい。

溶接部には施工不良等の原因で融合不良等の溶接欠陥が生じ、これが継手の疲労強度に影響を及ぼすことが懸念される。この問題に対して、IIW Guidelines on Weld Quality in

Relationship to Fatigue Strength⁶⁾では、ISO 6520-1で分類されている溶接欠陥とこれらの許容レベル、ISO 5817で規定された溶接品質レベルを紹介しつつ、これらの欠陥や溶接品質を有する継手の疲労強度との関係について言及しているが、疲労強度に及ぼす溶接品質の影響は、初期欠陥の位置や負荷様式にも大きく依存すると考えられるため、溶接品質と疲労強度の関係を一律に結び付けることは、危険側の関連付けになる可能性が懸念される。

3 溶接継手の疲労強度改善技術

溶接構造物の疲労損傷の大半は溶接継手部から発生、成長するものであるため、構造強度健全性担保の観点からは、何らかの処置を継手部に施すことで疲労強度を改善できれば好ましい。溶接継手の疲労強度改善手法として様々なものが提案されているが、原理的には疲労亀裂の発生が懸念される溶接止端部を中心に、1) 圧縮応力を付与する、2) 応力集中を緩和する、ための処理を施すことである。IIW Recommendations on methods for improving the fatigue strength of welded joints⁷⁾では、溶接継手の疲労強度改善手法としてBurr grinding, TIG dressing, Hammer peening, Needle peeningが採りあげられている。この中でBurr grindingとTIG dressingは溶接止端部を再溶融させて止端形状を滑らかにすることで応力集中を緩和する手法であり、二つのpeening手法は溶接止端形状を滑らかにすることで応力集中を緩和しつつ、溶接止端部近傍に圧縮残留応力を付与する手法である。したがって、Burr grindingとTIG dressing以上の疲労強度改善効果が期待できる。

Hammer peeningやNeedle peeningのように機械的な方法で溶接止端に残留応力を付与する方法として、近年、HFMI (High Frequency Mechanical Impact : 高周波機械的衝撃) が注目を集めている。この方法は、超音波圧電素子、超音波磁歪素子、圧縮空気のいずれかを用いて打撃圧子を高周波で振動させながら溶接止端等の被加工部に繰返し打ち込むことで、衝撃を受けた部位に塑性変形を生じさせることで溶接止端形状を滑らかにして応力集中を緩和するとともに、圧縮残留応力も付与するものである。従来のpeeningに対して装置を小型化できるなどの作業性に優れるとともに、被加工範囲が小さいので止端形状をより滑らかに仕上げやすいという利点を有している。現状では、超音波を用いるものとしてUIT (Ultrasonic Impact Treatment)、UP (Ultrasonic Peening)、UPT (Ultrasonic Peening Treatment)、HiFIT (High Frequency Impact Treatment)、UNP (Ultrasonic Needle Peening) が、圧縮空気をを用いるものとしてPIT (Pneumatic Impact Treatment) が提案されている。IIWに

においても2016年にHFMIを概説するIIW Recommendations on HFMI Treatment for improving the fatigue strength of welded joints⁸⁾を発行しており、今後利用がますます拡大するものと期待される。一方、従来のpeening手法との相違点やHFMI処理された継手の性状など、安心して実機に適用するためには調査しておくべき内容もあるため、特に近年、HFMI処理された継手の疲労強度に関する研究は多い。

HTMIによる疲労強度改善の度合いに関しては、そのメカニズムを定量的に解明することにより定量的な予測が可能になる。これについても種々の研究報告があるが、一部の事例を以下に紹介する。

3.1 UIT

UITの装置概要や基本原理などについては文献⁹⁻¹⁷⁾で詳細に説明されているのでこれらを参照していただきたい。UITによるピーニング処理は、ツール先端部と処理対象物の間に配置された硬質ピンが超音波振動によって励起され、対象物を連続的に打撃することで対象物表面に塑性流動を起こさせ、ピン先端形状を溶接部に転写するとともに、打撃表面近くに圧縮の残留応力を誘起する。溶接部へ適用する場合、硬質ピンを溶接止端線に沿うよう効率よく打撃できる。ピン先端形状がほぼ完全に転写されるまで繰り返し打撃を行い、溶接まま状態の溶接止端が見えなくなる程度まで施工することで溶接止端形状に起因する局所的な応力集中を緩和できる。また、硬質ピン形状の転写が完了すると打撃面全体から反力を受けるため、それ以上の変形が進みにくくなるため、UIT処理による溶接止端形状の変化は0.2~0.3 mm程度に止まる。UIT処理は溶接止端近傍に圧縮応力場を導入することを目的とした処理方法であるにも関わらず、溶接止端形状を滑らかに変化させる効果も副次的に生じるため、優れた疲労寿命改善効果が与えられると期待される。

3.2 エアツールを用いたハンマーピーニング

HFMI手法の利点である打撃処理箇所及び処理後の形状を目視で判断できるという利点を有しつつ、溶接施工現場で十分に普及しているフラックスチッパ等のエアツールを利用するピーニング手法も提案されている。たとえば、溶接現場で頻繁に使用されるフラックスチッパ先端のタガネを意図する止端形状に仕上げるのが可能なものに取り替えるだけで、安価かつ簡便にピーニング技術を適用できる。そこで、エアツールを用いたハンマーピーニング手法と疲労強度向上効果について、ピン先端形状、打撃位置、打撃後の外観による圧縮残留応力導入保証に関する検討が行われている¹⁸⁻²⁰⁾。

3.3 その他ピーニングに類する手法

溶接止端近傍に圧縮残留応力導入する方法としては、機械的な打撃以外にも、レーザピーニング^{21,22)}やウォータージェットピーニング^{23,24)}も提案されており、疲労強度向上や安定した圧縮残留応力の導入が可能であることが検証されている。一方、これらの手法は施工性の観点からUIT処理やハンマーピーニング処理と比較すると、工場内等での使用に限定されるのが現状であろう。

以上に紹介した手法による疲労強度向上対策は、疲労亀裂発生寿命の抑制ということに主眼が置かれているため、新造時に処理を施すことで極めて有効な対策として機能する。一方、一般の大型溶接構造物の建造や維持管理に費やせる経済的資源には制約を設けざるを得ないため、疲労亀裂の発生をすべて根絶することは事実上不可能である。また、疲労亀裂の発生イコール構造物の機能喪失とは言い難い側面もあるため、一旦疲労亀裂が発生しても、安定成長段階でこれを適切に補修できればよいという考え方も成立する。発生した疲労亀裂への補修対策としてはストップホール法の適用が一般的であるが、複雑な構造様式や狭隘箇所での施工が困難であることに加え、ストップホール自体が新たな応力集中源となることも懸念されるため、万能な補修方法といい難い。このような現状を鑑み、亀裂開口が見える鋼板表面をピーニング手法で打撃することで強制的に亀裂表面を閉口させることで亀裂進展を抑制できる、衝撃亀裂閉口処理 (Impact crack closure retrofit treatment : ICR処理)²⁵⁾が提案されている。ICR処理効果に及ぼす応力比、亀裂長、載荷方法の影響に関して詳細な検証が実施された資料²⁶⁾が公開されている。

4 疲労強度に及ぼす板厚影響に関する研究動向

疲労強度には板厚が影響を及ぼすことが知られており、実験室レベルの寸法を有する溶接継手を用いた疲労試験の結果の整理に基づき、板厚の1/4乗に反比例して疲労強度が低下する²⁷⁾ことが確認された。この知見はUK-HSE (英国エネルギー省) の設計指針改正²⁸⁾に初めて採用され、その後、同様の板厚影響に関する検討方法がIIWやJSSCをはじめとする、多くの規則、設計指針に採り入れられている。この知見は板厚20mm超程度の試験片により得られた結果であるが、大型溶接構造物ではより厚鋼板の利用が拡大していることから、従来の1/4則をそのまま採用することは問題であると認識されていた。一方、溶接継手の様式や荷重モードなどの様々な要因が板厚効果にも影響を及ぼすことから、「板厚の1/4乗に反比例して疲労強度が低下する」という簡単な知見をベースに疲労強度を検討するほうが無難であることから、1/4則

が引き続き採用された。

造船分野では、より安全で合理的な船体構造に関する規則を制定すべきとの機運から、IACS (国際船級協会連合) により、油タンカーとバラ積み貨物船を対象とする共通構造規則 (CSR-BC 及び CSR-OT) を 2006 年に発効させ、さらにこれら二船種の規則を統合した調和 CSR (CSR-B & T) が 2015 年に発効している。これらの規則において、S-N 曲線に基づく疲労強度評価が導入され、詳細な荷重計算と有限要素解析による作用応力評価、疲労強度に及ぼす平均応力影響や環境影響をも含む厳格なものとなったが、板厚影響に関しては 1/4 乗則がそのまま採用された。しかしながら、1/4 則をそのまま採用した結果、従来の疲労損傷実績から判断して全く問題の無い部位にも大幅な板厚増加が要求されることとなり、板厚影響評価法を再考すべきであるとの機運が高まった。そこで、実際の船体構造レベルでの板厚影響に関する種々の研究が実施された。中村ら²⁹⁾は、ロンジとウェブスティフナ間の溶接部の応力集中に関して検討し、板厚影響はほとんど無いことを示している。福岡ら³⁰⁾は I 型梁フランジ面への付加物溶接部に関する疲労試験と解析により、各種規則等で規定された板厚影響は過度に安全側の設定となっていることを示し、新たな板厚影響評価指数を提案している。

これらの研究により、通常の実験室レベルで使用される小型試験片と実際の船体構造では、疲労強度に及ぼす板厚の影響が異なることが明らかとなったため、2011 年に日本造船工業会において「疲労強度に及ぼす板厚効果検討委員会」を造船所 (10 社)、鉄鋼会社 (4 社) 及び日本海事協会と学識経験者により発足させ、実際の構造に即した板厚影響の評価法に関する研究が進められた。同委員会における成果は、幅広く公表³¹⁻³⁵⁾されるとともに、以下の結果が得られている。

- 1) 疲労強度に及ぼす板厚効果は、疲労亀裂発生領域である溶接ビード止端における応力集中係数と応力勾配に依存するものであるとして、ほぼ説明できる。またこの知見から、継手形式に応じて板厚影響の程度は異なることが判明した。
- 2) 十字継手では主板厚以上に付加物板厚が疲労強度に影響を及ぼしている。
- 3) 面外ガセット継手では、主板厚に起因する板厚効果はほとんど無い。
- 4) 十字継手では、IIW Recommendation⁴⁵⁾ による主板と付加物の板厚に関係に基づく修正法が有効である。
- 5) 溶接残留応力の影響はほぼ無視できる。
- 6) ホットスポット応力に基づく疲労強度評価を行う場合、従来のホットスポット応力の定義では、厚板になるほど応力参照点が応力集中部から離れるため、参照応力値を過少に評価してしまう。

上述の知見を考慮して IACS に提言を行った結果、CSR-B & T において以下に記す合理的板厚影響考慮手法が採用された。

- 1) 十字継手に対して、IIW Recommendation⁴⁵⁾ の手法を採用し、板厚影響を考慮する際の板厚 (参照板厚) について付加物寸法による上限値が設定された。
- 2) Girder などの主桁の上に付加物が設置される場合、ロンジの横桁貫通部に防撓材が取り付けられる場合の板厚影響指数が低減 (0.25 から 0.1 に) された。

5 新しい余寿命診断技術

溶接構造物が健全な状態で稼働し続けるためには、定期的な疲労等の損傷について検査し、万一損傷が見つかった場合は補修工事を行うという、「事後保全」の考え方に沿った対応が採られてきた。しかしながらこの考え方では、設計計画段階で予期できない形式の損傷形態の出現や、点検期間中は構造物を稼働できないことに起因する生産性の低下という問題がある。そこで、損傷の発生時期をあらかじめ定量的に予測し、これに応じた保守点検計画を立案、実施するという「予防保全」という思想に沿った対応が期待されている。このような考え方を採用するには、できる限り構造物で生じる損傷の進行度合いを定量的に把握することが必要であるため、これに資する技術の発展が必要不可欠である。

最初に述べたように、近年の構造物の損傷形態の大半は疲労であるため、疲労損傷の度合いを目視のような簡便かつ定量的に把握することができれば、予防保全の思想に沿った構造物の健全性診断や延命化が達成できるものと期待される。この方法として、疲労損傷が懸念される箇所にひずみゲージを貼付して一定期間の応力頻度または履歴を計測し、この結果と線形累積損傷則を用いて疲労被害度を評価することが行われている。しかしながら同手法では、特に構造物が大型な場合、ひずみゲージから計測機器までの配線の取り回しが面倒であるという問題も含め、計測システムがかなり大がかりなものになってしまう。これでは深刻な疲労損傷に対する懸念がある場合を除き、構造物の稼働中に計測を行うことをためらってしまうことになり、予防保全の思想の優位性は認めつつも、これを広く採り入れようとはならないと懸念される。

一方、仁瓶らにより提案された疲労センサ³⁶⁻³⁹⁾ (図 2 参照) を適用すれば、大掛かりな計測システムを用いることなく、比較的容易に評価対象部位の疲労損傷の程度を計測できるため、予防保全という考え方を広く普及させるための有用なデバイスであると期待される。この疲労センサとは一種の犠牲試験片とも理解できる。このセンサは、スリットを有するセンサ箔 (純ニッケル製) とベース箔 (インバー合金製) の二枚重ねで、センサ箔の両端がベース箔に接合された構造で

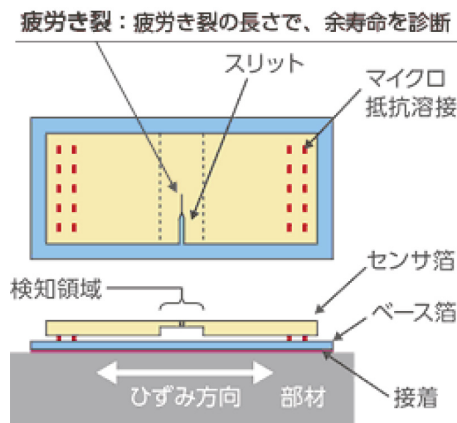
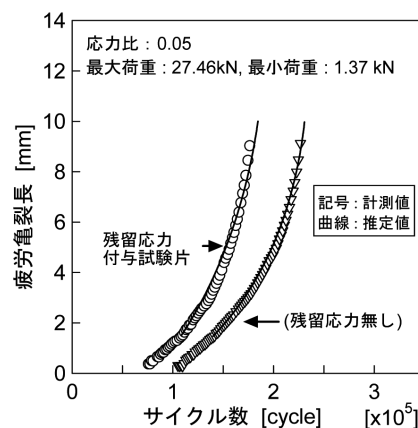
図2 疲労センサの基本構造³⁶⁾

図3 残留応力場における疲労亀裂成長解析結果

ある。これら箔同志はマイクロ抵抗溶接により接合されている。センサ部にある大きさ以上の繰返し負荷が作用するとセンサ箔中のスリットを起点として疲労亀裂が進展する。材質や箔厚さ等に独自の工夫を行うことで、センサ箔では評価対象部よりも短期間で亀裂が形成、伝播を促進する仕組みとなっている。ある一定期間センサを貼付し、その間に計測されるセンサ中の亀裂進展長さは、疲労センサに蓄積される疲労損傷の度合いに対応する。したがって、疲労センサと評価対象部位（溶接部）のS-N曲線の傾きが同等であることを利用して、評価対象部位の疲労損傷度を推定できる。また、センサ箔の亀裂進展増分の測定は、CCDカメラ等により直接センサから読み取る方法とレプリカ法という大掛かりな測定システムが不要であるという利点がある。さらに、センサ寸法は人差し指先端に乗る程度と非常に小さいことも、同センサの優れた点である。

疲労センサを用いた疲労被害測定結果に基づく船体疲労強度管理システム⁴⁰⁾が、(一財)日本海事協会から提案されている。海洋油田・ガス田の生産設備であるFPSOでの利用実績も報告されている。また、東京都建設局は「橋梁の管理に関する中長期計画～戦略的な予防保全型管理の実現に向けて～」⁴¹⁾を策定し、予防保全型管理を可能とする技術として疲労センサを活用した疲労損傷予測手法を紹介している。さらに、(一社)日本クレーン協会の「経年クレーンの特別査定指針(JCAS1102)」を制定し、この特別査定を実施する手段の一つとして疲労センサの活用を紹介している⁴²⁾。

6 疲労亀裂伝播挙動の定量的評価に基づく疲労強度評価

大型溶接鋼構造物の疲労設計はS-N曲線と累積損傷被害則を基に評価されるため、単に疲労破壊が生じるか否かのみの

判断に留まり、疲労亀裂の成長挙動は考慮できない。また、疲労試験で得られるS-N曲線から推定される寿命はあくまでも疲労試験片の寿命であるため、実鋼構造物においてどの程度の大きさの亀裂に対応するか未だ明確にされていない⁴³⁾。また、実験室ベースで取得されたS-N曲線そのものについても、破断時の亀裂寸法を定量的に取りまとめているわけではない。一方、大型溶接構造物中の構造強度健全性担保の観点に立てば、仮に疲労亀裂が発生しても安定的に成長している最中に適切な補修を施せばよいので、成長中の疲労亀裂を起点とする脆性破壊発生を防止することが特に重要であろう。これを定量的に行うには疲労亀裂長さを把握することが必要不可欠である。ところがParis則に代表される破壊力学的手法を適用しても、初期欠陥の仮定に応じて推定結果が異なることに加え、変動荷重下の非線形効果（荷重レベルが変化した直後に生じる過渡現象）を定量的に考慮できないため、特に不規則な変動荷重履歴下において定量的に疲労亀裂成長履歴を推定することは困難である。荷重履歴の疲労亀裂成長に及ぼす影響を定量的に評価するには疲労亀裂に特有の亀裂開閉口挙動の考慮が必要不可欠である。この亀裂開閉口挙動に関する数理モデルは複数提案されているものの、現状では亀裂結合力モデルに基づく評価手法が優れていると言われている⁴⁴⁾。

以下では、著者らによる亀裂結合力モデルに基づき疲労亀裂開閉口挙動を定量的に考慮した疲労亀裂伝播解析手法の事例を紹介する。以下の図表で紹介する計算結果の数値等は特に断りが無い限り、文献^{45,46)}に示されたものである。

図3は中央貫通亀裂を有する帯板の一部をガス加熱し、強制的に亀裂先端近傍に引張残留応力を付与した試験片とそうでないものに同一の一定応力振幅を付与した時の疲労亀裂成長を推定した結果である。残留応力場を定量的に考慮することで、精度よく疲労亀裂成長を予測できていることが確認できる。図4は中央貫通亀裂を有する帯板に、同図中の上図

に示す嵐モデル⁴⁷⁾ 変動荷重履歴を作用させた場合の疲労亀裂成長推定結果である。このような複雑な荷重履歴条件下でも、疲労亀裂開閉口挙動を定量的に考慮することで、精度良い亀裂成長履歴の予測が可能である。

実構造物中での疲労亀裂は、溶接止端等の応力集中部から複数の表面亀裂状欠陥として発生し、成長と共に合体を繰返しながら単独の表面亀裂に成長し、さらに板厚貫通亀裂に成長するという履歴を経る。現状の数値シミュレーション技術でこの履歴を忠実に再現することは困難であるため、以下に示す考え方1)～3)にしたがって表面亀裂成長挙動を評価している。

- 1) 複数の表面亀裂が存在する状況を仮想的な単一表面亀裂に置き換えて力学的に等価な状況を作り出す。
- 2) 「等価分布応力法」⁴⁶⁾と称される、K値を介して表面亀裂問題を無限板中に存在する板厚貫通亀裂問題に置き換える手法を採用する。
- 3) 溶接止端のような応力勾配を有する箇所からの疲労亀裂発生について転位論的考察を加味し、かつ破壊力学的手法と連続した評価が可能な力学モデルを構築⁴⁶⁾することで、初期欠陥を仮定することなく、疲労亀裂成長解析を可能とする。

図5は面外ガセット継手に一定荷重振幅が作用する場合の疲労亀裂成長予測の結果である。本実験においては疲労亀裂長の計測を行っていないため実験との比較はS-N曲線に留まっているが、破断の定義を実験及び解析で統一していることを勘案すれば推定結果は良好な精度を有していると判断できる。図6は面内ガセット継手に一定荷重振幅が作用する場

合の疲労亀裂成長予測の結果であり、定量的な疲労亀裂成長予測が行えていることが確認できる。同図中で推定された疲労亀裂成長予測が不連続に変化している箇所は、表面亀裂が板厚貫通状態に推移した時点に対応する。

図7は構造要素がブロック荷重履歴を受ける際の疲労亀裂成長挙動に関する推定結果と実測値の比較⁴⁸⁾を示すが、比較

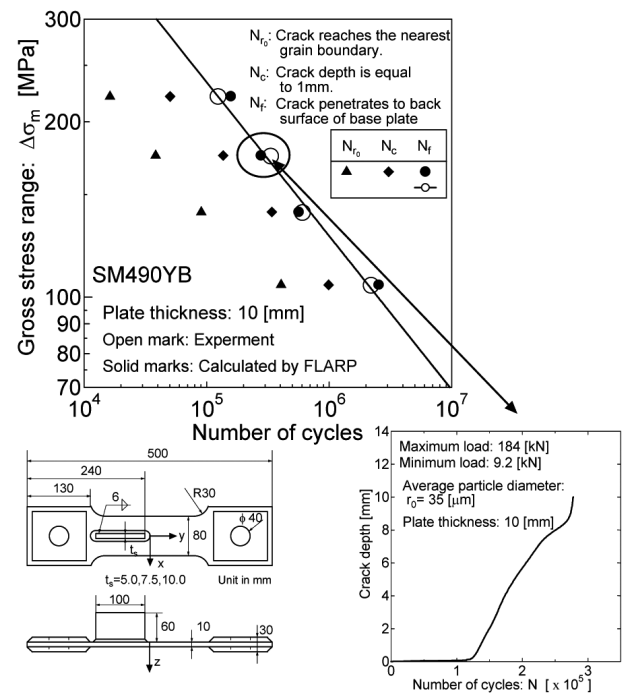


図5 面外ガセット継手角回し部から成長する疲労亀裂の成長解析結果(初期亀裂無しで計算)

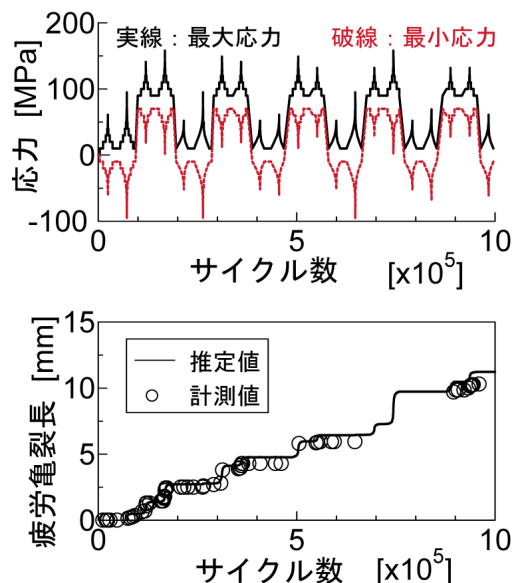


図4 嵐モデル応力履歴条件下における疲労亀裂成長解析結果

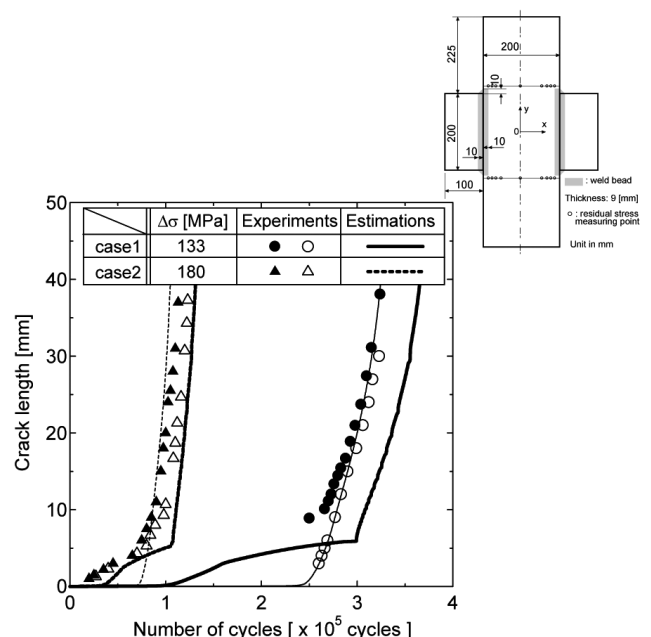


図6 面内ガセット継手角回し部から成長する疲労亀裂の成長解析結果(初期亀裂無しで計算)

的良好な精度で疲労亀裂成長履歴を推定できている。図5～7の解析では、いずれの場合も評価対象位置における残留応力分布を考慮している。

ここで紹介した疲労亀裂成長履歴の推定は、いずれも単軸の繰返し载荷条件下における場合である。一方、大型溶接構造物には様々な形式の外力が様々な方向から複合的に作用し、位相差を有して各外力が作用する場合がむしろ一般的である。このような状況に曝される構造物の疲労強度を評価するには、多軸・複合载荷条件下における定量的評価手法の構築が必要であり、船体構造に代表される板材と骨材から構成される大型溶接構造物では面内二軸载荷条件下において精度良い疲労亀裂成長挙動推定手法の構築が期待される。

そこで著者らは、位相差を有する二軸引張载荷条件を単軸条件に置き換える手法を提案し、これと疲労亀裂開閉口シミュレーションを用いることで、同载荷条件下における疲労亀裂成長履歴の推定が可能であることを示した。図8に結果の一例を示す⁴⁹⁾。図中の破線は試験片を全幅200mmの中央貫通亀裂試験片と近似した結果であり、同図中の実線は二軸载荷状態を等価分布応力法により等価な単軸状態に変換した場合の結果である。なお、同様の負荷履歴を面外ガセット溶接継手に与えた場合についても、提案手法により亀裂成長履歴を推定できることも示している⁵⁰⁾。

船体の構造強度評価において、whippingやspringingによる高周波応力成分が静水中縦曲げ応力と低周波の波浪縦曲げ応力に重畳した場合の影響を適切に考慮する必要性が指摘さ

れている。著者らは、上述の亀裂結合力モデルに基づく疲労亀裂開閉口シミュレーションを発展させ、重畳応力条件下において疲労亀裂伝播に有効な応力履歴を抽出する基準を実装させた疲労亀裂伝播解析コードを構築した⁵¹⁻⁵³⁾。図9は複数の重畳応力作用下における疲労亀裂伝播履歴の実測と提案シミュレーションによる推定の比較図の例である。提案手法により重畳応力履歴条件下でも比較的良好な精度で疲労亀裂成長履歴を推定できることが確認できる。

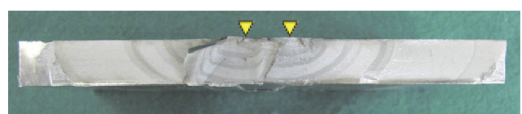
重畳応力条件下における疲労強度評価については、本格的な研究が十分に蓄積された状況とは言い難いため、種々の载荷条件下における疲労試験データの蓄積が必要である。これに資する試験システム⁵⁴⁻⁵⁶⁾も提案されており、今後のデータの蓄積により、重畳応力条件下における疲労強度評価に関する指針が確立していくものと期待される。

7 まとめ

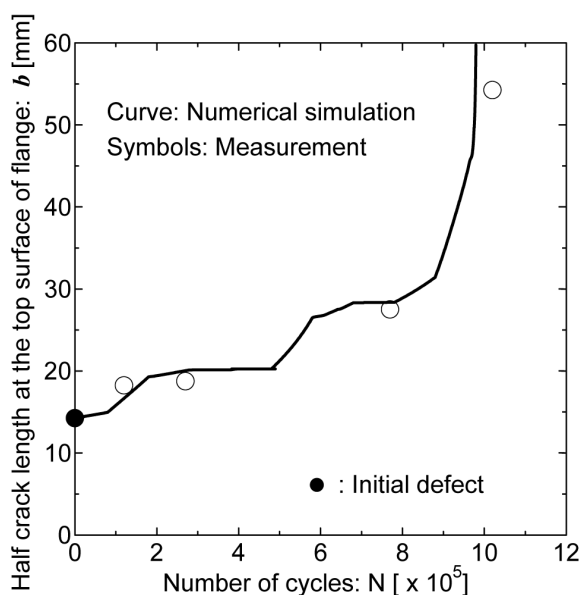
少し古い資料になるが、1950年代から2002年までの主な疲労破壊事故を俯瞰した資料⁵⁷⁾によれば、近年に大きな損傷事故が頻発している。一方、金属材料の疲労等に起因する破壊事故による経済的損失はGDPの約4%⁵⁸⁻⁶⁰⁾、金属材料の腐食対策費はGNPの3～4%に相当する⁶¹⁾と推定されており、破壊事故による損失と腐食対策コストは途方もない金額になると懸念される。さらに上述の調査が行われた以降に、ようやく社会インフラの延命化に対する関心が高まってきた状況



(a) ブロック変動荷重（三転曲げ）を受ける構造要素試験体



(b) 疲労破面（黄色▽印は疲労亀裂発生源）



(c) 初期欠陥からの亀裂伝播履歴の推定結果と実測結果の比較

図7 ブロック荷重履歴を受ける構造要素試験体中で成長する疲労亀裂成長挙動

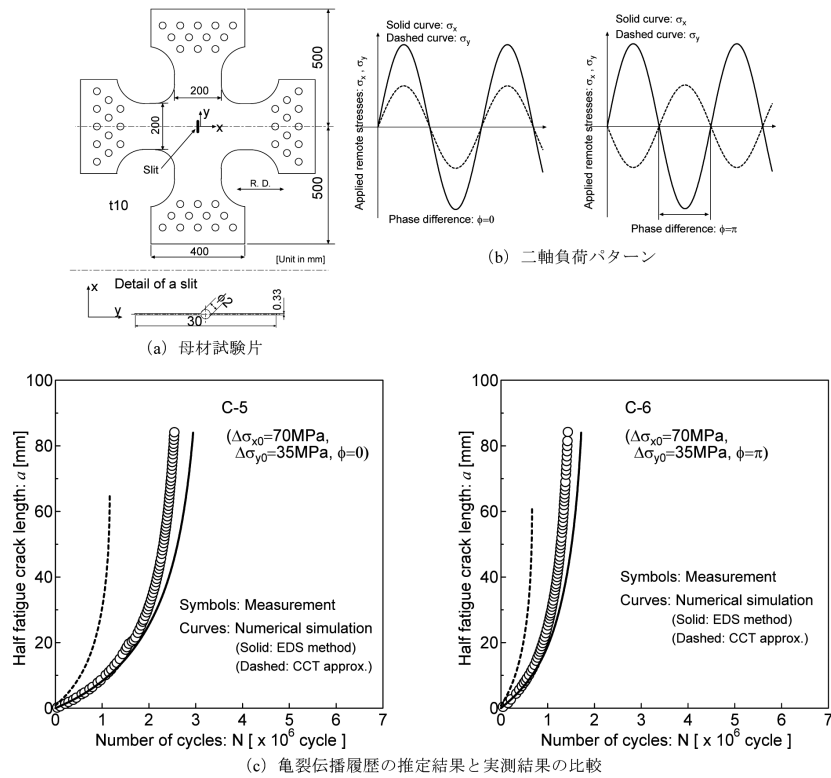


図8 位相差を有する二軸繰返し負荷条件下における疲労亀裂伝播挙動

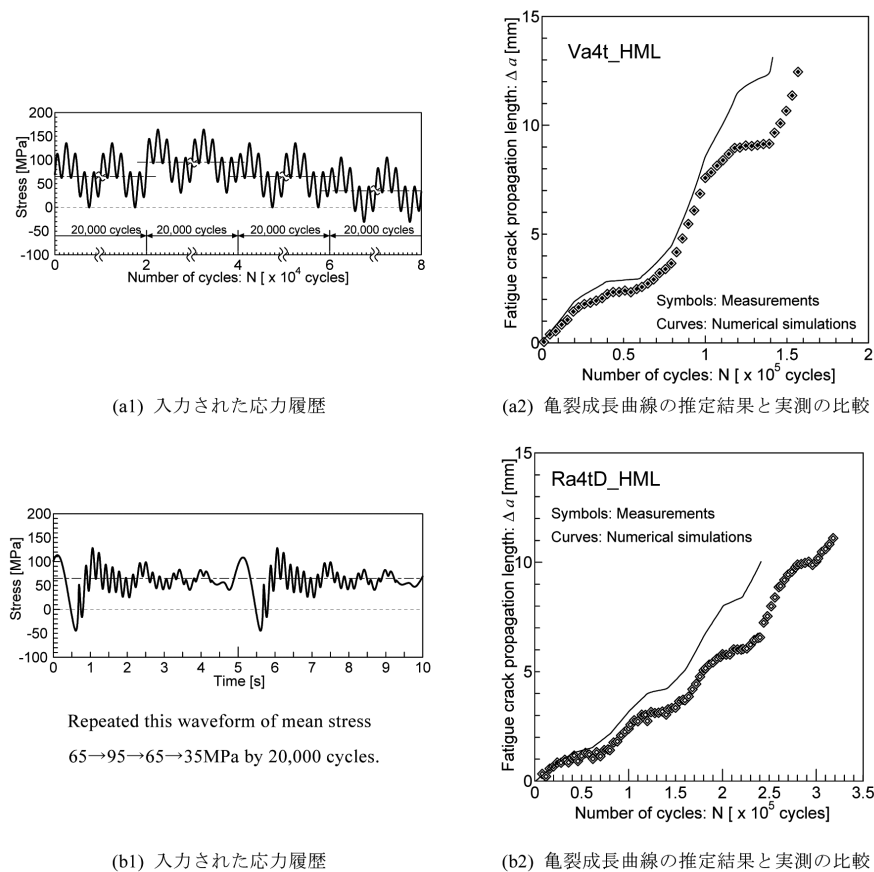


図9 重量応力条件下における疲労亀裂成長挙動（中央貫通亀裂試験片）

を考慮すれば、損傷等への対策コストは調査時点以上に高額になるものと懸念される。2011年度国土交通白書によれば、2011年度から2060年度までの50年間に必要な社会資本の更新費用は190兆円程度と推計され、投資総額水準が現状レベルで推移すれば2037年時点で維持管理・更新費さえも賄えなくなると指摘されている。一方で、世界的な経済状況及び事故を未然に防止するための投資は、結果として何も起こらなかった場合は「無駄な」投資と思われる現状⁵⁷⁾を鑑みれば、損傷対策に投資できる財源は抑制されざるを得ないと懸念される。

損傷事故を予防するために必要な費用は、万一事故が生じた場合の損害に比べると圧倒的に少ないことは多くの事故解析結果からも明白である。本稿で採りあげた新しい疲労モニタリングデバイスも登場していることや、延命化手法や疲労亀裂成長解析の手法が急速に発展している最近の状況を考慮すれば、旧来の疲労強度評価手法に固執することなく最新の知見を積極的に導入することで、大型溶接構造物の供用期間を大幅に延長し、社会インフラの維持に必要な費用の抑制が可能になると考えられるため、疲労強度評価、延命化対策等の総合的な研究の進捗が期待されるとともに、耐疲労性能を更に向上させた鋼材が溶接材料との組み合わせを考慮しつつ開発されることを期待している。

謝辞

本稿を取りまとめるに当たり、有益な情報をご提供いただきました、岩田知明氏(国立研究開発法人海上技術安全研究所)、島貫広志氏(新日鐵住金株式会社)、森影康氏(JFEスチール株式会社)、山本規雄氏(一般財団法人日本海事協会)、仁瓶寛太氏(川重テクノロジー株式会社)に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 技術資料：機械・構造物の破損事例と解析技術，日本機械学会，(1984)
- 2) 日本材料学会：疲労設計便覧，養賢堂，(1995)，1.
- 3) A.F.Hobbacher：IIW Recommendation for Fatigue Design of Welded Joints and Components，Springer，(2016)，ISBN：978-3-319-23756-5.
- 4) 鋼構造物の疲労設計指針・同解説 一付・設計例一，日本鋼構造協会，(2012)
- 5) 森猛：JSSC日本鋼構造協会機関誌，1 (2010) 1.
- 6) B.Jonsson, G.Dobmann, A.F.Hobbacher, M.Kassner, and G.Marquis：IIW Guidelines on weld quality in relationship to fatigue strength，(2016)
- 7) P.J.Haagensen and S.J.Maddox：IIW Recommendations on methods for improving the fatigue strength of welded joints, IIW-2142-10, (2013)
- 8) G.B.Marquis and Z.Barsoum：IIW Recommendations for the HFMI treatment for improving the fatigue strength of welded joints, (2016)
- 9) 島貫広志：日本溶接協会溶接情報センターWE-COMマガジン，20 (2016)
- 10) 島貫広志：溶接学会誌，86 (2016) 2, 198.
- 11) 菅田登，島貫広志，沢登寛：KANRIN (日本船舶海洋工学会誌)，(2015) 60, 8.
- 12) 島貫広志，田中睦人：新日鐵住金技報，(2014) 400, 100.
- 13) T.Okawa, H.Shimanuki, Y.Funatsu, T.Nose and Y.Sumii：IIW Document No. XIII-2377-2011, (2011)
- 14) 野瀬哲郎：溶接学会誌，77 (2008) 3, 210.
- 15) H.Shimanuki and T.Okawa：International Journal of Steel Structures, 13 (2013) 1, 155.
- 16) 島貫広志，森猛，大川鉄平，田中睦人：溶接構造シンポジウム2011 講演論文集，(2011)，387.
- 17) 島貫広志，木下昌彦，森猛，田中睦人：土木学会第68回年次学術講演会，I-543 (2013)
- 18) Y.Morikage, S.Igi and K.Oi：Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2013, (2013)，PVP2013-97655.
- 19) 中西克佳，森影康，川畑篤敬，柄一：土木学会論文集，71 (2015) 1, 10.
- 20) 森影康：九州大学博士論文，(2016)
- 21) 崎野良比呂，吉川健一，佐野雄二，角谷利恵，金裕哲：溶接学会論文集，31 (2013) 4, 231.
- 22) 佐野雄二，向井成彦，小畑稔，加藤裕美，山本哲夫：溶接学会誌，75 (2006) 7, 579.
- 23) 榎本邦夫，平野克彦，望月正人，黒沢孝，斎藤英世，林英策：材料，45 (1996) 7, 734.
- 24) 大屋寿三，沖村浩司，太田高裕，市岡丈彦：三菱重工技報，36 (1999) 6, 328.
- 25) 山田健太郎，石川敏之，柿市拓巳：土木学会論文集A, 65 (2009) 4, 964.
- 26) 舘石和雄他：道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告書レポート，No.24-8, (2015)，<https://www.mlit.go.jp/road/tech/jigo/h24/pdf/report24-8.pdf>, (accessed on 10. Feb. 2017.)
- 27) T.R.Gurney：Proceedings of the 8th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, (1989)，1.
- 28) UK Department of Energy：Offshore Installation, Guidance on Design and Construction, 3rd Ed., Her Majesty's Stationary office, (1984)

- 29) T.Nakamura and S.Yamamoto : Proceedings of 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, 2 (2007), 687.
- 30) T.Fukuoka and F.Mochizuki : IIW document XIII-2333-10, (2010)
- 31) N.Yamamoto, M.Mouri, T.Nakamura, S.Tanaka, T.Sugimura, H.Negayama, R.Yasunaga, T.Okada, H.Shimanuki, Y.Morikage, N.Furukawa, A.Inami, T.Mori and Y.Sumu : Proceedings of 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference, (2012), 159.
- 32) N.Yamamoto, M.Mouri, T.Okada and T.Mori : IIW document XIII-2434-12, (2012)
- 33) T.Okada, N.Yamamoto, M.Mouri and T.Mori : Proceedings of Tanker Structure Cooperative Forum 2013 Shipbuilders Meeting, Paper No.3.1, (2013), 66.
- 34) N.Yamamoto, M.Mouri, T.Okada and T.Mori : Welding in the World, 58 (2014) 3, 329.
- 35) 岡田哲男, 山本規雄, 毛利雅志 : KANRIN (日本船舶海洋工学会誌), (2015) 60, 27.
- 36) 川重テクノロジー(株) : <http://www.kawaju.co.jp/fs/index.html>, (accessed on February 22, 2017)
- 37) 仁瓶寛太 : KANRIN (日本船舶海洋工学会誌), (2014) 55, 19.
- 38) 仁瓶寛太 : 設計工学 (日本設計工学会誌), 47 (2012) 11, 507.
- 39) 小林朋平 : 大阪大学博士学位論文, (2016)
- 40) 小岩敏郎, 高野裕文, 宇佐美陽生, 土橋宏嗣, 山本規雄, 寺井幸司, 孝岡祐吉, 下田太一郎, 仁瓶寛太, 小林朋平 : 平成18年度ClassNK研究発表会講演集, (2006), 11, https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/research/seminar/old/H18_02.pdf, (accessed on February 22, 2017)
- 41) 東京都建設局 : 橋梁の管理に関する中長期計画～戦略的な予防保全型管理の実現に向けて～, (2009), (概要版は http://www.jma.or.jp/nde/plaza/pdf/1119_a2.pdf 参照)
- 42) 日本クレーン協会 : 経年クレーンの特別査定指針, 日本クレーン協会規格JCAS1102-2007, (2007)
- 43) W.Schütz : Engineering Fracture Mechanics, 54 (1996) 2, 263.
- 44) J.Schijve : Fatigue of Structures and Materials (2nd ed.), Springer, (2009), 359.
- 45) M.Toyosada, K.Gotoh and T.Niwa : International Journal of Fatigue, 26 (2004) 9, 983.
- 46) M.Toyosada, K.Gotoh and T.Niwa : International Journal of Fatigue, 26 (2004) 9, 993.
- 47) 富田康光, 河辺寛, 福岡哲二, 田所誠次郎 : 日本造船学会論文集, 170 (1991), 631.
- 48) K.Gotoh, M.Takuno, K.Okada and S.Kusuba : Proceedings of OMAE2014, (2014), OAME2014-23413.
- 49) K.Gotoh, T.Niwa and Y.Anai : Marine Structures, 42 (2015), 53.
- 50) 清水啓司, 後藤浩二, 穴井陽祐, 丹羽敏男 : 日本船舶海洋工学会講演会論文集, (2016) 23, 247, 2016A-GS7-3.
- 51) 後藤浩二, 松田和貴 : 日本船舶海洋工学会論文集, 17 (2013), 74.
- 52) 松田和貴, 村上幸治, 後藤浩二 : 日本船舶海洋工学会論文集, 20 (2014), 131.
- 53) K.Matsuda and K.Gotoh : Marine Structures, 41 (2015), 77.
- 54) N.Osawa, T.Nakamura, N.Yamamoto and J.Sawamura : Proceedings of OMAE 2014, (2014), OMAE2014-23856.
- 55) 大沢直樹, 中村哲也, 山本規雄, 沢村淳司 : 日本船舶海洋工学会論文集, 22 (2015), 175.
- 56) 大沢直樹, 中村哲也, 寺井幸司, 山本規雄, 岩田麟太郎 : 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 23 (2016), 127.
- 57) 村上敬宣 : NSK Technical Journal, (2003) 675, 1, <http://www.jrcm.or.jp/jrcmnews/0311jn205.pdf> (accessed on February 22, 2017)
- 58) Economic Effects of Fracture in the United States, Part 1 : A Synopsis of the September 30, 1982 Report to NBS by Battelle Columbus Laboratories, National Bureau of Standard, Washington, DC, National Measurement Lab., March, (1983), U.S. Department of Commerce, national Information Service.
- 59) Economic Effects of Fracture in the United States, Part 2 : A report to NBS by Battelle Columbus Laboratories, national Bureau of Standard, Washington, DC, National Measurement Lab., March, (1983), U.S. Department of Commerce, national Information Service.
- 60) The Economic Effects of Fracture in Europe, Final Report, Study Contract No.320105 between European Atomic Community and The Stichting voor Toepassing van Materialen (Delft-Nederland and) Project leader and Rapporteur : Professor Faira, (CEMUL Centro de Mecanica e Materiais da Universidade Tecnica de Lisboa Portugal), (1991), Commission of the European Communities.
- 61) 腐食コスト調査委員会 : 材料と環境, 50 (2001), 490.

(2018年8月30日受付)