



受賞技術-7

溶接鋼構造物の疲労強度向上を可能にした耐疲労鋼の開発

Development of Anti Fatigue Steel Plates for Welded Structures

住友金属工業(株) 総合技術研究所 厚板条鋼研究開発部 主任研究員 菅田 登 Noboru Konda
 住友金属工業(株) 鋼板・建材カンパニー 厚板技術部 厚板技術統括 稲見彰則 Akinori Inami
 住友金属工業(株) 鋼板・建材カンパニー 厚板部 参事 勝元 弘 Hiroshi Katsumoto

住友金属工業(株) 総合技術研究所 厚板条鋼研究開発部 SC(シニアコンサルタント) 有持和茂 Kazushige Arimochi
 住友金属工業(株) 鋼板・建材カンパニー 厚板技術部 次長 大西一志 Kazushi Onishi

1 はじめに

疲労損傷の防止は、溶接構造物の設計、製作、保全の各段階において、今なお、強度健全性を確保する上で最も重要な検討課題である。ここでは、構造用鋼の疲労損傷について、従来の知見等について簡単に紹介する。その後、溶接継手の疲労損傷の特徴、溶接継手の疲労強度改善技術、耐疲労鋼(FCA-W鋼)の実構造物への適用、今後の展開について述べる。

2 構造用鋼の疲労損傷

変動荷重を受ける機械・構造物の破壊事故の多くは、それを構成する部材の疲労損傷が引き金となることが多く、破壊事故のうち約80%は何らかの形で疲労が関与していると言われる¹⁾。疲労損傷を今なお根絶できない理由として、初期における損傷領域の極めて狭いことが挙げられる。また、弾性範囲内の極めて小さな応力でも、疲労破壊の芽である疲労き裂が容易に発生することも挙げられる。船舶のような大型構造物においても、初期の疲労損傷領域は、サブmmオーダーとやはり極めて狭く、損傷初期段階での検査・探傷・保全を困難にしている。

母材鋼板では、鋼材の引張特性の高強度化に伴い、繰返しすべりに対する抵抗も高まるので、図1¹⁾に示すように、負荷モードにかかわらず、引張強さが1000MPaあたりまで、引張強度の上昇に伴い、疲労強度も単調に上昇する。

3 溶接継手の疲労損傷の特徴

溶接継手の疲労特性は、母材と同様、一定繰返し応力下での疲労破断寿命で評価され、SN曲線として表示することが

多い。図2にはSN曲線の一例として、十字すみ肉溶接継手の疲労試験結果²⁾を示す。溶接継手のSN曲線の特徴は、母材に比べ疲労限が明瞭には存在しないこと、また、疲労強度の絶対値は母材に比べかなり低くなること、である。

母材と溶接継手の疲労強度を比較した例として、図3に日本造船研究協会で行われた共同研究成果³⁾を紹介する。母材

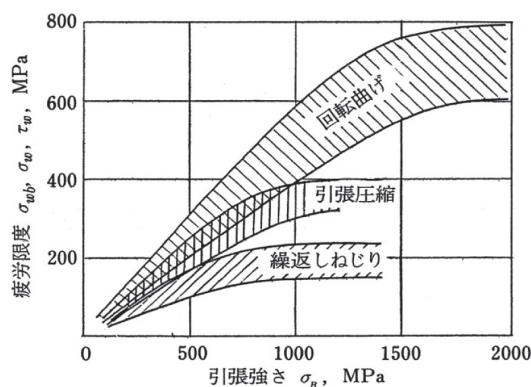


図1 疲労限度に及ぼす引張強さの影響¹⁾

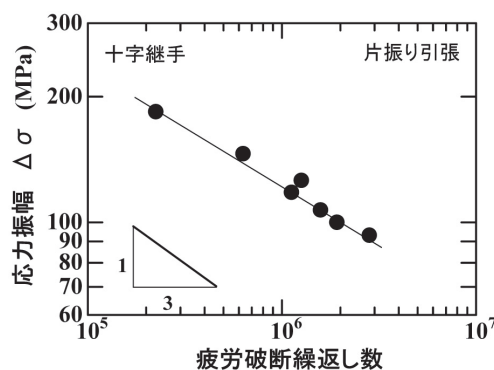


図2 溶接継手のSN曲線の一例²⁾

* H22年度文部科学大臣表彰科学技術賞開発部門受賞技術

に比べ溶接継手の疲労強度は、単に低強度側に位置しているだけでなく、継手疲労強度は母材の降伏応力にかかわらずほぼ一定の値となっていることが判る。この結果は、継手部の疲労特性で溶接構造物の部材寸法が決定される場合に、母材を単に高強度化するだけでは溶接部の疲労強度の改善に結びつかず、部材寸法の縮小ができず、結果として、構造物の軽量化に結びつかないことを意味している。

母材の場合と異なり、溶接継手の疲労強度が母材強度にかかわらずほぼ一定で、母材強度では向上しない理由として、主として以下の3点挙げられる。まず、溶接止端の形状的不連続部が応力集中源として働き、切欠き疲労となるためである。次に、母材降伏強度に対応したレベルの溶接残留応力が引張内部応力として働き、高強度材ほど継手疲労強度に不利に作用するためである。さらに、破壊起点部の金属組織は、溶接熱履歴の影響を受け、母材組織とは大きく異なり、疲労に対する抵抗性が劣化しているためである。

上記のうち、溶接残留応力は、継手疲労特性に特に大きく影響する重要な因子であり、継手疲労特性を評価する場合に注意を要する。すなわち、溶接継手の疲労試験を小型形状の試験体で実施する場合には、試験片加工に伴う溶接残留応力の解放に注意が必要である。小型試験体を用いると、同じ応力下で実構造物より寿命の長い結果が得られ、危険側の評価となる可能性がある。そこで、溶接残留応力の解放分を疲労試験荷重で補う方法が提案⁴⁾されている。また、船舶や橋梁等の分野では、膨大な労力を費やして大型構造モデルを用いた試験が実施されている。このような試験では、溶接残留応力の観点だけでなく、理論的裏付けに乏しい板厚効果に関する換算式を経ない点においても、信頼性の高い結果が得られることが期待される。

なお、鋼構造物の溶接継手部に対する具体的な疲労設計法に関しては、日本鋼構造協会⁵⁾や、船級協会⁶⁻⁸⁾から、実績のある継手疲労設計規格が提示されている。

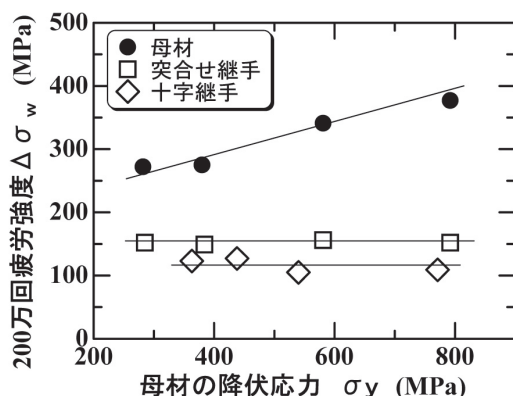


図3 疲労強度に及ぼす母材降伏応力の影響³⁾

4 溶接継手の疲労強度改善技術

溶接鋼構造物の疲労損傷を防止するため、従来から、設計面・施工面で数々の取組みがなされている。

設計面からの取組みとしては、有限要素法を初めとする各種応力解析により、精度の高い応力解析結果を比較的容易に活用できるようになっている。例えば、高精度の解析結果を利用する継手疲労設計法として、IIWを中心に検討が重ねられている有効切欠き応力法がある。

一方、施工面からの疲労損傷防止に関する取組みとしては、従来から、グラインダーなどによる余盛り止端部の形状仕上げがある。疲労強度向上効果がより顕著な、グラインダーに替わる方法として、UIT (Ultrasonic Impact Technology) が報告⁹⁻¹³⁾されている。改善効果が明瞭であり、今後の展開が期待されている。

このように、従来は、設計面、施工面からの改善に限られてきたが、最近になって、材料面からも有効な対策を提案できるようになった。

一例として、溶接により発生する引張残留応力の低減、さらには引張から圧縮への転換が可能で、特殊な溶接材料の開発成果がある¹⁴⁾。冷却過程における溶接金属のマルテンサイト変態での変態膨張現象が利用されている。画期的な発想に基づく日本発の独自技術であり、実用化が待たれている。

さらに、母材鋼板で溶接鋼構造物の疲労損傷を防止する技術が提案され、一部はすでに実用化されている。

例えば、表面細粒鋼と呼ばれる、表層に粒径 $2\mu\text{m}$ 以下の極細粒フェライト相を生成させ、疲労き裂の発生・進展を抑制する鋼板がある¹⁵⁾。

一方、住友金属工業では、母材鋼板の金属組織をフェライト（軟相）とベイナイト（硬相）の最適二相組織に制御し、かつ溶接熱影響部の組織も制御することにより、母材部での疲労き裂進展抵抗と溶接継手部の疲労強度を高めた。同時に、溶接構造用鋼として必要な、その他の機械的性質、溶接性などを従来鋼と同等レベルに維持し、耐疲労鋼を、開発・実用化した¹⁶⁾。最適二相組織による、き裂進展特性改善メカニズムを模式的に図4¹⁷⁾に示す。また、継手疲労き裂発生抑制に適した溶接熱影響部組織は、図5¹⁸⁾に模式的に示すように、Fusion Line部に硬化層がないものである。これにより、継手部は比較的フラットな硬度分布となり、疲労損傷領域の局在化を防止できる。

5 耐疲労鋼の実構造物への適用

耐疲労鋼は、疲労き裂の発生・進展の両過程で疲労損傷を抑制し、溶接鋼構造物の疲労強度健全性向上に寄与する鋼材

である。ここでは、住友金属工業の耐疲労鋼（FCA-W鋼）の船舶、橋梁への適用事例を紹介する。

まず、船舶に関しては、実船適用に向け、基礎的な検討¹⁹⁻²³⁾から始め、実船構造を念頭においた具体的な検討²⁴⁻²⁷⁾も重ねた。これらの成果を踏まえ、液化プロパンガス運搬（LPG）船に初めて適用された。この初適用を契機に、各種船舶、各地の造船所で採用いただき、適用実績が重ねられた¹⁸⁾。耐疲労鋼（FCA-W鋼）の特性をさらに積極的に活用すべく、船級協会を含めた検討^{28,29)}を経て、耐疲労鋼（FCA-W鋼）の疲労寿命延伸効果を疲労設計に活かす環境が整いつつある。図6²⁹⁾には、適用部位が限定されているものの、耐疲労鋼（FCA-W鋼）用として特認された疲労設計線図の一例を示す。

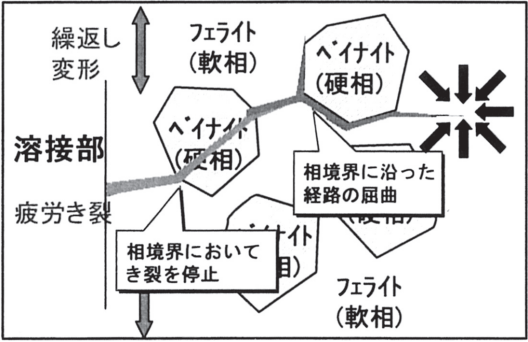


図4 疲労き裂進展特性の改善メカニズム¹⁷⁾

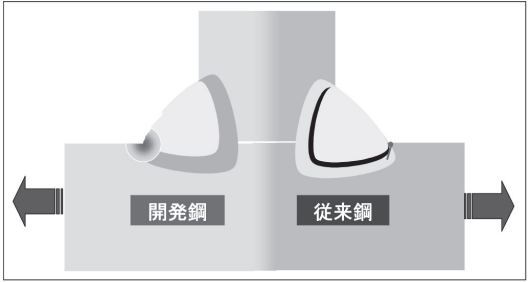


図5 硬化層の有無と疲労損傷領域の違い¹⁸⁾

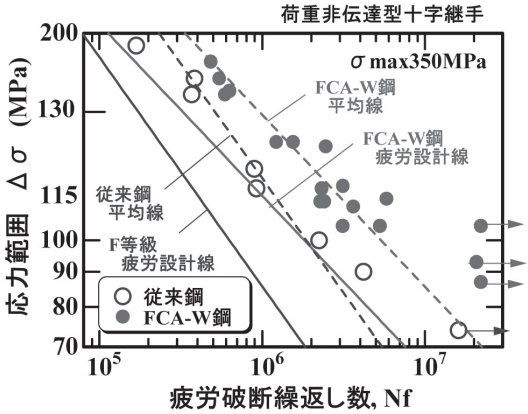


図6 耐疲労鋼の疲労設計線図の一例²⁹⁾

また、図7²⁹⁾には検討中の疲労設計線図案を示す。これらの疲労設計線図を利用することで、疲労寿命の延伸や、許容応力の上昇が可能となる。

図6の疲労設計線図に基づき設計された例³⁰⁾として、図8²⁹⁾にはモス型の液化天然ガス運搬（LNG）船を示す。モス型LNG船では、場合によっては、図9²⁹⁾に示す球形タンクと

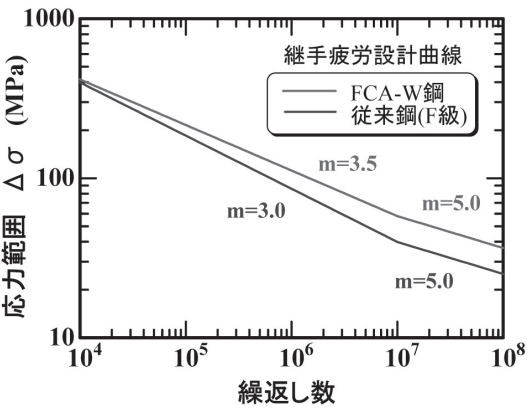


図7 疲労設計線図原案の一例²⁸⁾



図8 モス型の液化天然ガス運搬船の一例²⁹⁾

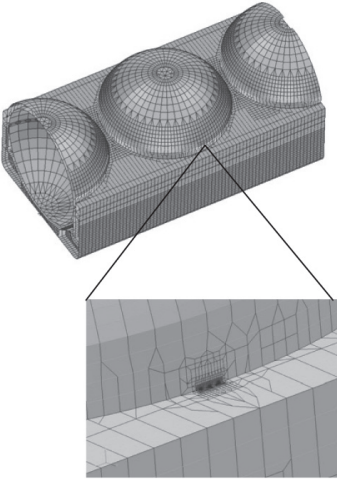


図9 船舶で高応力が懸念される部位の例²⁹⁾

甲板との接合部付近で応力の高くなる場合が考えられる。このような部位に耐疲労鋼を適用すると疲労寿命の延伸効果が顕著である。図10²⁹⁾には船舶における疲労設計で想定する最大応力範囲と、該当部位に従来鋼に替えて耐疲労鋼 (FCA-W鋼) を適用したときの疲労寿命延伸効果との関係を示す。中低応力域での延伸効果が特に顕著であることが判る。

今後、船舶の燃費向上は、地球環境保全の観点からも重要視され、構造軽量化のニーズがますます高まると考えられる。軽量化を阻害してきた溶接継手部の疲労強度に対し、鋼材からも寄与することが可能となった。

次に、橋梁への適用例を紹介する。橋梁への適用においても、まずは、基礎的な検討³¹⁻³⁷⁾から始め、実橋梁で測定された応力頻度分布を基に、船舶の波浪荷重に対して検討したのと同様、疲労寿命を推定し、耐疲労鋼による寿命延伸効果を確認した。

これらの検討の結果、和歌県の入野橋には耐候性仕様を兼ね備えた耐疲労鋼 (FCA-W鋼) が適用³⁸⁾された。さらに、高規格高速道路の高架橋の隅角部にも耐疲労鋼 (FCA-W鋼) が適用³⁹⁾されている。

なお、橋梁の疲労問題は、関係者の長年の努力により著しく改善されてきている。その一方で、一部の鋼床版においては、疲労損傷が散見されている。特に、トラフリブとデッキプレートの溶接接合部の疲労損傷のうち、リブ閉断面内の未溶着部を起点とする場合には、疲労き裂の発生・進展の検査が難しく、維持管理上の大きな課題となっている。このような検査の困難な部位でも耐疲労鋼 (FCA-W鋼) を適用することにより、疲労強度信頼性の向上に寄与できると期待され、それに向けた検討⁴⁰⁻⁴²⁾を進めている。

6 今後の展開

溶接鋼構造物の疲労設計では、主に溶接継手部の疲労特性

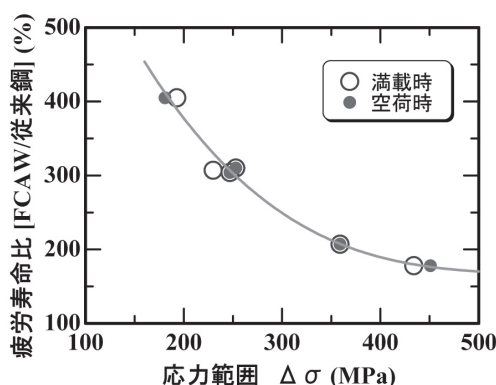


図10 実船での寿命延伸効果の解析例²⁹⁾

が照査される。継手疲労特性の更なる向上に向け、今後とも英知を積み重ねる必要がある。そのためには、溶接部の疲労データは貴重な財産として共有されることが望ましい。母材鋼板の疲労特性に関しては、疲労強度⁴³⁾、疲労き裂進展特性⁴⁴⁾に関するデータベースが既に存在する。それらに続く、溶接継手疲労特性のデータベース構築が喫緊の課題と考えられる。

また、設計・施工とともに、材料の観点からも継手疲労特性の改善が可能となった。しかし、材料による溶接継手の疲労強度改善は困難と言われてきたため、溶接鋼構造物の継手疲労設計体系では、一部を除き、鋼材依存性が考慮されていない。優れた材料特性を疲労設計体系に合理的に反映させるための手続き等を、船級協会など関係機関とともに今後、確立していく必要があると考えられる。

新たな機能鋼の実用化には、大学の先生方のご指導が不可欠であることは当然として、ユーザからのご支援、ご指導が開発初期段階から極めて重要である。本開発でも先生方、ユーザの方々から長年に渡り甚大なご指導、ご支援を賜っている。この場を借りて、篤くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 疲労設計便覧, 日本材料学会編, 養賢堂, (1995)
- 2) 平川賢爾, 小松英雄, 北浦幾嗣: 住友金属誌, 31 (1979) 4, 301-322.
- 3) 日本造船研究協会, 第202研究部会「海洋構造物の疲労設計法および溶接部の品質に関する研究」
- 4) A.Ohta, Y.Maeda, T.Mawari, S.Nishijima and H.Nakamura: Int. J. Fatigue, 8 (1986) 3, 147-150.
- 5) 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 日本鋼構造協会編, 技報堂, (1993)
- 6) 疲労強度評価ガイドライン: 日本海事協会, (2003)
- 7) Fatigue Assessment of Ship Structures: DET NORSKE VERITAS, (2003)
- 8) Offshore Installations: Guidance on design, construction and certification: Department of Energy, Fourth edition, (1990)
- 9) 中島清孝, 島貫広志, 野瀬哲郎: 日本船舶海洋工学論文集, (2008) 8, 301-307.
- 10) 野瀬哲郎: 溶接学会誌, 77 (2008) 3, 6-9.
- 11) 島貫広志, 野瀬哲郎: 溶接学会全国大会講演概要, (2007) 81, 230-231.
- 12) 原純哉, 下田太一郎, 出口貴則, 毛利雅志, 福岡哲二, 小汐啓介, 加野大地: 平成22年日本船舶海洋工学学会春季講演会論文集, 10, 2010S-G12-4.
- 13) 出口貴則, 毛利雅志, 下田太一郎, 加野大地, 小汐啓介,

- 福岡哲二：平成22年日本船舶海洋工学会春季講演会論文集, 10, 2010S-G12-5.
- 14) 久保高宏, 森影康, 天野虔一, 太田昭彦, 毛利雅志, 町田文孝：材料とプロセス, 12 (2000), 423-426.
 - 15) 石川忠, 間瀬秀里：CAMP-ISIJ, 10 (1997), 1168-1171.
 - 16) 誉田登, 有持和茂, 藤原和哉, 永吉明彦, 稲見彰則, 山下正人, 矢島浩：日本造船学会論文集, 第190号, 507-515.
 - 17) 誉田登, 有持和茂, 稲見彰則, 堺堀英男：溶接技術, 56 (2008) 8, 86-93.
 - 18) 稲見彰則, 鹿島和幸, 誉田登：日本船舶海洋工学会誌, 24, (2009), 6.
 - 19) 大沢直樹, 富田康光, 橋本聖史, 本田卓朗：日本造船学会講演会論文集, 2 (2003), 2003A-G1-1.
 - 20) 大沢直樹, 上野大輝, 下池亮, 橋本聖史, 稲見彰則：日本船舶海洋工学会論文集, 4 (2006), 258.
 - 21) 勝田順一, 牛島慎一, 誉田登, 久保論, 古賀脩平, 河野和芳：日本船舶海洋工学会論文集, (2011) 12, 209-217.
 - 22) 誉田登, 有持和茂, 稲見彰則, 高允宝, 渡邊栄一, 矢島浩：日本機械学会年次大会講演論文集, (2009), 117.
 - 23) 山下正人, 花木聡, 内田仁, 藤原和哉, 誉田登, 有持和茂, 稲見彰則：日本金属学会誌, 72, (2008), 897.
 - 24) N.Konda, K.Arimochi, K.Hirota, E.Watanabe, M.Tada, H.Kitada, T.Fukui, M.Yamamoto, Y.Kho and H.Yajima：Proc. of 23rd Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vancouver, (2004), OMAE2004-51058.
 - 25) H.Katsumoto, N.Konda, K.Arimochi, K.Hirota, A.Isoda, H.Kitada, M.Sakano and H.Yajima：Proc. of 24th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, (2005), OMAE2005-67298.
 - 26) 廣田一博, 杉村忠士, 有持和茂, 誉田登, 勝元弘：西部造船会々報, 109, (2005), 49.
 - 27) 廣田一博, 杉村忠士, 有持和茂, 誉田登, 稲見彰則：西部造船会春季講演会論文集, (2005), 101.
 - 28) N.Konda, A.Inami, K.Arimochi, Y.Takaoka, T.Yoshida and I.Lotsberg：Proc. of 11th Int. Sympo. on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Brazil, (2010), 1233-1242.
 - 29) J.Hara, Y.Takaoka, N.Konda, K.Arimochi, A.Inami, H.Dobashi and N.Yamamoto：Proc. of 24th Asian – Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting, Vladivostok (2010), 263.
 - 30) 住友金属工業株式会社 Home Page, <http://www.sumitomometals.co.jp/news/news/2008/news2008-03-24.html>, ニュースリリース2008, 2008年3月24日, 溶接部の疲労強度を向上させた世界初の高張力厚鋼板「FCA-W鋼」の開発—株式会社川崎造船場で建造されるLNG船に採用—
 - 31) 二村大輔, 松本健太郎, 坂野昌弘, 磯田厚志, 近藤伸介, 有持和茂, 誉田登：土木学会第59回年次学術講演会, (2004), I-536.
 - 32) M.Sakano, D.Nimura, A.Isoda, S.Kondo, K.Arimochi and N.Konda：Proc. of 3rd Int. Sympo. on Steel Structures, Soul, (2005), 683.
 - 33) M.Sakano, D.Nimura, K.Matsumoto, A.Isoda, S.Kondo, K.Arimochi and N.Konda：Proc. of Eurosteel 2005, B, (2005), 1.11-25.
 - 34) M.Sakano, D.Nimura, K.Matsumoto, K.Arimochi, N.Konda, A.Isoda and S.Kondo：Proc. of 2nd Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management, Kyoto, (2004), 838.
 - 35) 徳力健, 森猛, 誉田登, 中村宏：土木学会第64回年次学術講演会, (2009), I-176.
 - 36) 徳力健, 森猛, 誉田登, 中村宏：土木学会第65回年次学術講演会, (2010), I-128.
 - 37) 誉田登, 有持和茂, 松川靖, 広野正彦, 有馬博人, 森下泰光, 安田修, 望月正人, 豊田政男：溶接構造シンポジウム講演論文集, (2004), 35.
 - 38) 有持和茂, 誉田登, 西尾大, 山野達也, 森下泰光, 鷹羽新二, 安田修：溶接構造シンポジウム講演論文集, (2006), 223.
 - 39) 宇根孝司, 信永博文, 大城莊司, 利根川太郎, 中村宏, 三根克秀：橋梁と基礎, 5, (2010), 5.
 - 40) 有持和茂, 大西一志, 誉田登, 永木勇人, 森下泰光, 鷹羽新二, 安田修：溶接構造シンポジウム講演論文集, (2006), 233.
 - 41) 一宮充, 春日井俊博, 清川昇悟, 安藤隆一, 誉田登, 有持和茂：土木学会第63回年次学術講演会, (2008), 1-207.
 - 42) 一宮充, 春日井俊博, 清川昇悟, 安藤隆一, 誉田登, 有持和茂：土木学会第63回年次学術講演会, (2008), 1-208.
 - 43) 日本材料学会編, 金属材料疲労強度データ集およびデータベース
 - 44) 日本材料学会編, 金属材料疲労き裂進展抵抗データ集およびデータベース

(2011年2月9日受付)