

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04608

研究課題名(和文)高周波機械衝撃処理を施した溶接継手の疲労強度ならびに板厚効果に及ぼす応力比の影響

研究課題名(英文)Effect of stress ratio on fatigue strength and thickness effect of welded joint improved by HFMI

研究代表者

丹羽 敏男(NIWA, Toshio)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：10208267

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：公称応力では大きくばらついていた実験結果が修正MIL-HDBK-5法に基づく等価応力を用いることで、継手種別、板厚、応力比に依らず統一的に整理可能であった。すなわち、本研究で評価対象とした圧縮応力の範囲では疲労強度改善効果の減少が生じるほどの影響は確認されず、応力比が-0.3の疲労強度改善効果、及び板厚効果であっても、応力比が0.05の場合のそれと同様に、等価応力を用いることで先述のばらつきの範囲内で評価可能であると言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

溶接鋼構造物の大型化・厚板化が進むなか合理的、且つ経済的に溶接鋼構造物を設計・製作するため、溶接継手の疲労強度改善技術としてHFMI処理が注目されている。同処理による溶接継手の疲労強度改善効果に関するIIWの指針では、片振り引張応力条件下に限定されており、供用中に圧縮応力が生じる船舶などの構造物に対応した指針とはなっていない。

本研究で評価対象とした圧縮応力の範囲では疲労強度改善効果の減少が生じるほどの影響は確認されず、応力比が-0.3の疲労強度改善効果、及び板厚効果であっても、応力比が0.05の場合のそれと同様に、等価応力を用いることで先述のばらつきの範囲内で評価可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Even if there are differences of joint type, plate thickness, and stress ratio, it had confirmed that the experimental results are unified by equivalent stress which is evaluated by the modified MIL-HDBK-5 method. It means that even if the stress ratio is -0.3, improvement of the fatigue strength and the thickness effect is evaluated with the equivalent stress such as in the case of stress ratio is 0.05.

研究分野：疲労

キーワード：材料・構造力学 疲労強度改善効果 超音波ピーニング 板厚効果 応力比

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

溶接鋼構造物の大型化・厚板化が進むなか合理的、且つ経済的に溶接鋼構造物を設計・製作するため、二次加工処理による疲労強度改善効果を明確にし、この効果を設計基準等へ反映する動きが活発であった。例えば、各船級協会の設計基準にはグラインダ処理による疲労強度改善に関する基準が盛り込まれている。また、国際溶接会議 (IIW) では高周波機械衝撃処理 (HFMI 処理) に注目し、HFMI 処理による疲労強度改善効果に関する指針の素案を作成中であった¹⁾。なお、研究代表者らのグループでは、平成 23 年度から平成 26 年度の 4 年間、グラインダ処理、ショットピーニング処理、及び HFMI 処理の一種である超音波衝撃処理 (UIT) を施した荷重非伝達型十字継手を製作し、これら二次加工処理の疲労強度改善効果に関する研究を実施し、この成果を公表した²⁾。

HFMI 処理では、主に圧縮残留応力を付与する効果で疲労強度が向上するため、高応力比になるほど疲労強度改善効果は減少し、特に高い応力比下では疲労強度改善効果が消滅する事例が報告されている³⁾。IIW では、HFMI 処理による応力比影響について応力比 R が 0 から 0.52 までの範囲を 4 段階に分類して指針を作成したが、その指針は片振り引張応力条件下 ($R = 0$) にのみ対応したものである。しかしながら、船舶などの構造物では供用中に圧縮応力が生じるが、HFMI 処理による疲労強度改善効果は、圧縮降伏を伴うと減少すると報告されている⁴⁾。このため、応力比が正のみならず、両振り応力条件下 ($R < 0$) における HFMI 処理による疲労強度改善効果を明確にする必要がある。

加えて、板厚が厚くなるほど疲労強度が低下することは、板厚効果として知られており、共通構造規則 (CSR) では、溶接鋼構造物に対して一律 1/4 乗則が義務付けられているが、この 1/4 乗則では過度に安全側評価となる懸念があった⁵⁾。しかしながら、HFMI 処理された継手の板厚効果、特に両振り応力条件下において検討された事例は皆無であった。

このような背景から、両振り応力条件下における HFMI 処理による疲労強度改善効果、及び板厚効果について検討を実施すべく本研究の提案を行った。

2. 研究の目的

溶接鋼構造物の大型化・厚板化が進むなか合理的、且つ経済的に溶接鋼構造物を設計・製作するため、IIW では溶接継手の疲労強度改善技術として HFMI 処理に注目し、同処理による溶接継手の疲労強度改善効果に関する指針が作成された。HFMI 処理では、主に圧縮残留応力を付与する効果で疲労強度が向上するが、高応力比側でその改善効果が減少する。IIW の指針でも応力比の影響は検討されているが、片振り引張応力条件下に限定されており、供用中に圧縮応力が生じる船舶などの構造物に対応した指針とはなっていない。そこで、両振り応力条件下における HFMI 処理による疲労強度改善効果、及び板厚効果を検証し、現行の指針等に反映することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 供試材

供試材は板厚 10mm、22mm、40mm、及び 50mm の JIS G3106 の SM490A である。Table 1、Table 2 にミルシート記載の機械的性質、及び化学組成を示す。

Table 1 Mechanical properties.

Plate thickness, t	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
10 mm	390	537	24
22 mm	397	538	27
40 mm	381	568	29
50 mm	339	552	34

Table 2 Chemical compositions (%).

Plate thickness, t	C	Si	Mn	P	S
10 mm	0.11	0.25	1.34	0.017	0.002
22 mm	0.13	0.22	1.27	0.019	0.006
40 mm	0.14	0.26	1.49	0.014	0.002
50 mm	0.15	0.24	1.3	0.016	0.004

(2) 試験片

試験片の製作に当たり、板厚毎に 2 体の荷重非伝達型十字継手を製作した。一例として Fig. 1 に板厚 22 mm の十字溶接継手の形状と寸法を示す。

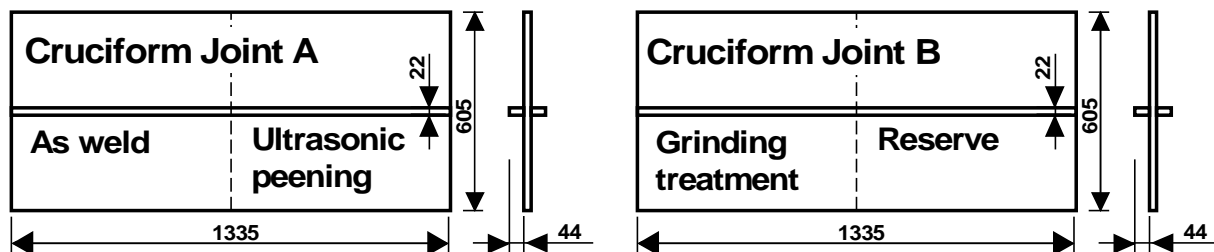


Fig. 1 Size and shape of cruciform Joint (Unit: mm).

物質材料研究機構（NIMS）物質・材料データベースによると^{6,7}，付加物の厚さが主板厚と同じ，且つ付加物高さが主板厚の2倍以上の場合には，付加物高さは疲労強度にほとんど影響しないため，付加物高さは主板厚の2倍の値とした．溶接は炭酸ガスアーク溶接にて行い，指定脚長はCSRのF2⁸相当とした．F2は強力甲板を除く船側外板などの要件である．

製作した十字継手より，疲労試験片，並びに残留応力計測用試験片の採取を行った．一例として板厚22mmの疲労試験片，並びに残留応力計測用試験片の形状と寸法をそれぞれFig. 2，Fig. 3に示す．

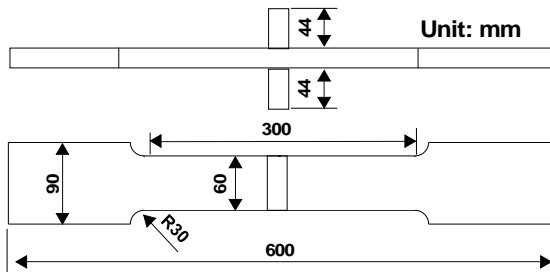


Fig. 2 Size and shape of specimens for fatigue test.

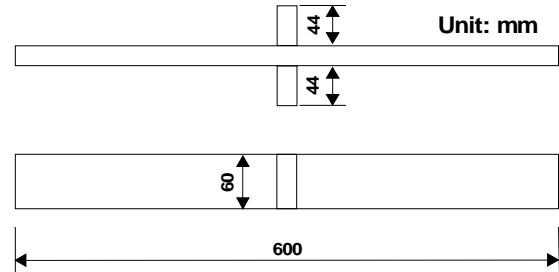


Fig. 3 Size and shape of specimens for measuring residual stress.

十字継手 A の半分からは溶接まま材の試験片の採取を行った．残りの半分については，HFMI 処理材の試験片の採取を行った．HFMI 処理材については，同処理後に試験片を採取すると，付与された圧縮残留応力が解放されることが予想されたため，試験片採取後に同処理を実施した．十字継手 B の半分について，グラインダ処理後に同処理材の試験片の採取を行った．十字継手 B の残り半分は予備として十字継手のまま保管を行っている．

(3) 疲労試験

Fig. 4 に示すように，溶接止端から 6~7mm の位置にひずみゲージを貼付し，試験開始時のひずみ振幅の記録を行った．き裂発生に伴いひずみ振幅が初期振幅から 5% 低下したサイクル数をき裂発生寿命 N_f と見なし，インク浸透法によりき裂発生位置・き裂形状の記録を行った．その後，試験片が破断するまで疲労試験を継続実施した．なお，試験開始から破断までに要したサイクル数を破断寿命 N_f とした．

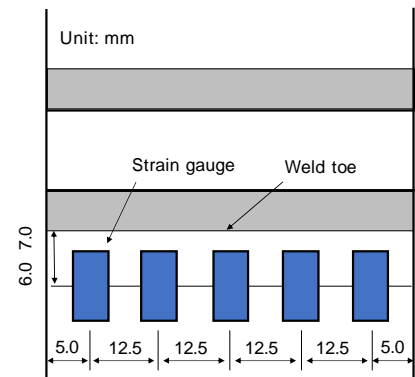


Fig. 4. Schematic illustration of strain gauge position for detecting crack initiation.

(4) 止端形状の計測，及び応力集中係数の算出

疲労試験を行う前にシリコンラバー印象材を用い，溶接止端形状の型取りを行った．疲労試験を行った後，破面からき裂発生位置を確認し，き裂発生位置における溶接止端形状の計測を行った．Fig. 5 に一例として疲労破面と溶接止端形状計測位置の関係を示す．

得られた計測結果を Heywood・西田⁹の式に代入することにより，溶接止端位置における応力集中係数の算出を行った．なお，複数のき裂が確認されている場合には，複数個所で応力集中係数を算出し，最も大きな値をこの試験片の応力集中係数とした．

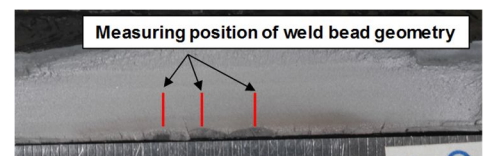


Fig. 5. Example of fracture surface and measuring position of weld bead geometry

(5) 残留応力の計測

溶接まま材，HFMI 処理材を対象として，ASTEM E837-13a に準拠した穿孔法により溶接ビード近傍の試験片表面における残留応力の計測を行った．HFMI 処理を施すと降伏応力に近い圧縮応力が付与されることが一般的であるが，本研究で得られた残留応力は引張応力，あるいは値が小さな圧縮応力であった．この理由として，穿孔法で残留応力計測を行う際のひずみゲージ貼付位置が溶接ビードから離れていたことが挙げられる．従って 4 節で述べる等価応力 S_{eq} の算出に当たり，本研究の HFMI 処理材の残留応力は，既報²の HFMI 処理材の平均値とした．参考として，板厚 10mm の HFMI 処理材の残留応力計測用のゲージ貼付位置を Fig. 6 に示す．

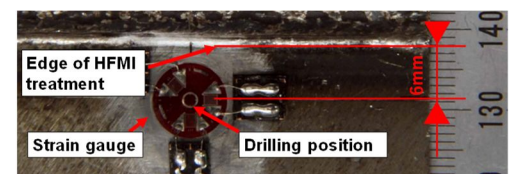


Fig. 6 Example of strain gauge position for measuring residual stress.

なお，溶接まま材の残留応力は穿孔法により得られた値とし，グラインダ処理材の残留応力は $\cos\alpha$ 法を用いた X 線残留応力測定装置により計測した値とした．

(6) 疲労試験結果

本研究で得られた実験結果，及び応力比が 0.05 の既報の結果²⁾を Fig. 7, Fig. 8 に示す．ここで， S_n は公称応力範囲， N_i は 3.3 節で定義した疲労き裂発生寿命， N_f は破断寿命である．応力比が-0.3の結果においても，HFMI 処理材が最も高い疲労強度を示している．

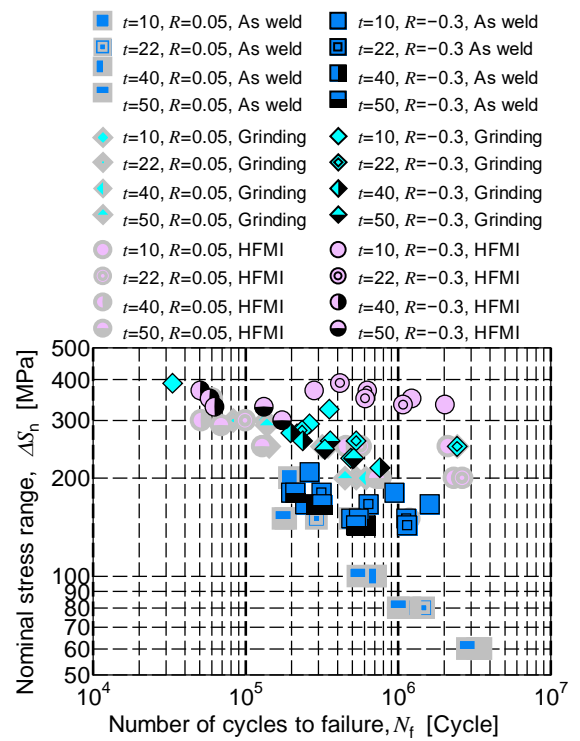
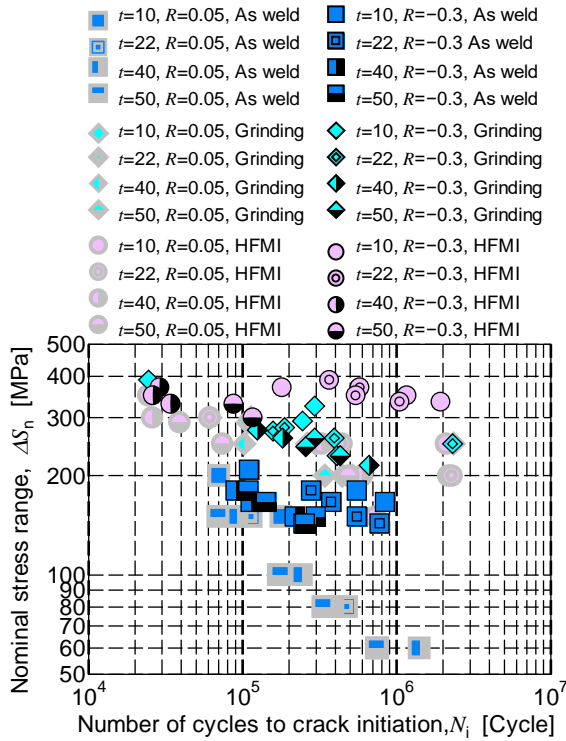


Fig. 7 Relation between nominal stress range and number of cycles to crack initiation.

Fig. 8 Relation between nominal stress range and number of cycles to failure.

4. 研究成果

米軍航空宇宙車両構造用金属材料規格の手引き (MIL-HDBK-5)¹⁰⁾では，全ての材料の S-N 関係を(1)式，及び(2)式の等価応力範囲 S_{eq} と疲労寿命 N で表している．

$$S_{eq} = S_{max} (1 - R)^m \tag{1}$$

$$\log S_{eq} = a + b \log N \tag{2}$$

ここで， S_{max} は負荷した最大応力， R は応力比， m は S_{eq} - N の関係を最適化する指数である．MIL-HDBK-5 は航空機用の材料を対象とするため，取り扱われている溶接継手は，スポット溶接重ね継手に限定されており，MIL-HDBK-5 の等価応力には，溶接止端の応力集中や残留応力の影響が含まれていない．溶接構造物の評価も可能となるように，MIL-HDBK-5 による疲労強度評価法を修正し，溶接止端の応力集中と残留応力の影響を考慮した等価応力で疲労強度を評価する手法が松岡らにより提案された修正 MIL-HDBK-5 法である¹¹⁾⁻¹³⁾．

Fig. 7, Fig. 8 に示した結果を修正 MIL-HDBK-5 法により整理して，Fig. 9, Fig. 10 に示す．応力比の正負によらず修正 MIL-HDBK-5 法に基づく等価応力を用いることで，発生寿命，破断寿命ともにおおよそ統一的に評価可能であることを確認した．ただし，実験結果から直接得られる N の常用対数と，Fig. 9, Fig. 10 の図中に示す m, α, β の値を用いて(2)式の S_{eq} - N 関係から算出される N の常用対数との誤差の標準偏差 $\sigma(\alpha)$ は $\sigma(\alpha_i)$ が 0.334， $\sigma(\alpha_f)$ が 0.294 であった．なお，下付文字 f は，破断寿命 N_f に基づく“破断”を表し，下付文字 i は，き裂発生寿命 N_i に基づく“発生”を表す．また，参考文献 2)において標準偏差と表記されている数値は，分散の誤りであることに注意を要する．

公称応力では大きくばらついていた実験結果 (Fig. 7, Fig. 8) が修正 MIL-HDBK-5 法に基づく等価応力を用いることで，継手種別，板厚，応力比に依らず統一的に整理可能であった．すなわち，本研究で評価対象とした圧縮応力の範囲では疲労強度改善効果の減少が生じるほどの影響は確認されず，応力比が-0.3の疲労強度改善効果，及び板厚効果であっても，応力比が 0.05 の場合のそれと同様に，等価応力を用いることで先述のばらつきの範囲内で評価可能であると言える．

今後の課題として，実験データが不足しているため追試験による検証が必要である．また，

HFMI 処理材の残留応力について、3.5 節で述べたように溶接止端近傍の残留応力が得られておらず、疲労き裂発生位置における圧縮降伏現象の検証が不十分である。この点についても追試験による詳細な検討が必要である。加えて、修正 MIL-HDBK-5 法では応力勾配の影響が考慮されていないため、応力勾配の影響を採り入れることで、更にはばらつきの小さな統一的评价が可能になると期待される。

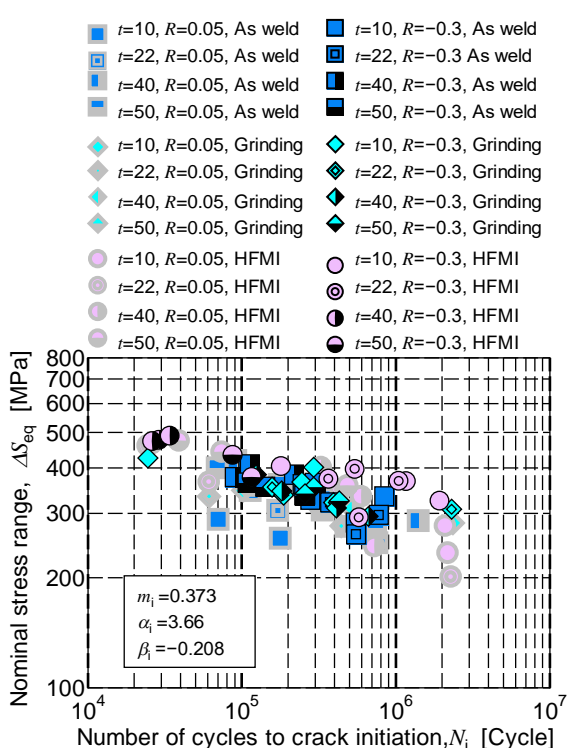


Fig. 9 Relation between equivalent stress range and number of cycles to crack initiation.

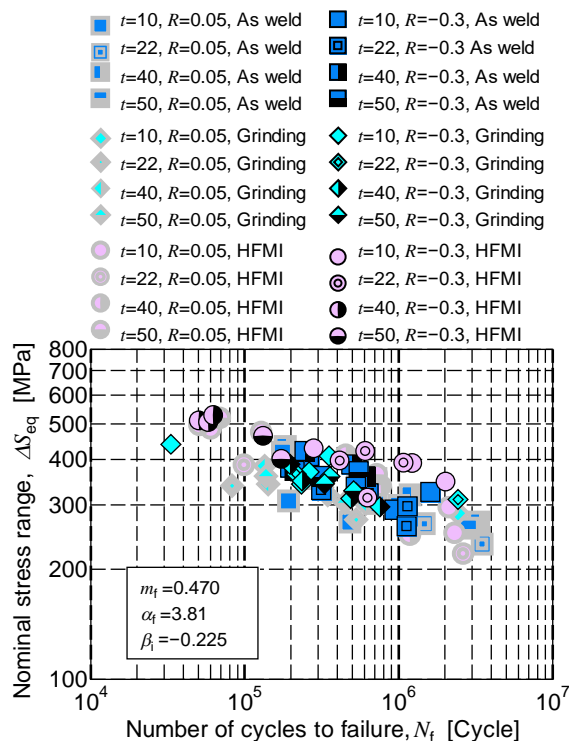


Fig. 10 Relation between equivalent stress range and number of cycles to failure.

参考文献

- 1) G. B. Marquis and Z. Barsoum: IIW recommendations on High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints, Springer: Singapore, 2016.
- 2) T. Iwata, T. Niwa, Y. Tanaka, T. Ando, Y. Anai: Thickness Effect on Fatigue Strength of Welded Joint Improved by HFMI, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol.34, No.4, pp.249-259, 2016
- 3) T. Okawa, H. Shimanuki, Y. Funatsu, T. Nose, Y. Sumi, Effect of preload and stress ratio on fatigue strength of welded joints improved by ultrasonic impact treatment, Welding in the World, Vol.57, No.2, pp.235-241, (2013)
- 4) 原純哉, 下田太一郎, 出口貴則, 毛利雅司, 福岡哲二, 小汐啓介, 加野大地: 船体構造における超音波ピーニングを用いた疲労強度改善に関する研究第1報, 日本船舶海洋工学会論文集, 第10号, pp.599-602, (2010)
- 5) 岡田哲男, 山本規雄, 毛利雅志: 疲労強度に及ぼす板厚効果に関する研究と規則へのフィードバック, 日本船舶海洋工学会誌, Vol. 60, pp27-37, 2015.
- 6) 金属材料技術研究所: 金属材料研究所 疲れデータシート, No. 13 (1979) & No.20 (1980)
- 7) 物質・材料研究機構: 物質・材料研究機構 疲れデータシート, No. 91 (2003), No. 96 (2004), No. 99 (2006), No. 108 (2009), and No. 114 (2011)
- 8) Class NK: Rules for the Survey and Construction of Steel Ships; Part CSR-B Common Structural Rules for Bulk Carriers 2015 (2015), p.265 & pp.406-409.
- 9) 田垣徳幸, 近藤明雅, 山田健太郎, 菊池洋一: 溶接継手の疲労寿命に与える隅肉溶接止端形状の影響, 土木学会論文報告集, 第324号, pp.151-159, 1982年
- 10) Department of Defense Handbook MIL-HDBK-5J: Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures, United States Department of Defense: Virginia, 2003.
- 11) K. Matsuoka and Y. Kobayashi: Influence of Maximum Stress on Fatigue Crack Initiation Life of Welded Steel Joints and Notched Plates, Welding in the World, Vol.42, No.6, pp.18-24, 1999.
- 12) T. Iwata and K. Matsuoka: Fatigue Strength of CP Grade2 Titanium Fillet Welded Joint for Ship Structure, Welding in the World, No.48, No.7/8, pp40-47, 2004.
- 13) 松岡一祥他: 鋼溶接継手の疲労き裂発生寿命の一評価法, 日本造船学会論文集, Vol. 178, pp513-522, 1995.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 津村秀一、穴井陽祐、安藤孝弘、岩田知明、丹羽敏男	4. 巻 第28号
2. 論文標題 応力比が負の条件下におけるHFMI処理の疲労強度改善効果に関する検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本船舶海洋工学会講演会論文集	6. 最初と最後の頁 443-448
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 津村秀一、穴井陽祐、安藤孝弘、岩田知明、丹羽敏男
2. 発表標題 応力比が負の条件下におけるHFMI処理の疲労強度改善効果に関する検討
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	津村 秀一 (TSUMURA Shuuichi) (10782526)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員 (82627)	
研究分担者	安藤 孝弘 (ANDO Takahiro) (30425756)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員 (82627)	
研究分担者	岩田 知明 (IWATA Toshiaki) (50358397)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員 (82627)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	穴井 陽祐 (ANAI Yousuke) (60470051)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局 等・研究員 (82627)	