

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14970

研究課題名（和文）ニードルピーニングによるアルミニウム合金溶接止端部に生じた疲労き裂の無害化

研究課題名（英文）Rendering Fatigue Crack at the Weld Toe Zone Harmless by Needle Peening for Welded Joints of Aluminium Alloys

研究代表者

笛木 隆太郎（Fueki, Ryutaro）

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：80846056

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：液化天然ガス（LNG）の輸送に用いられているLNG運搬船のタンクには高い信頼性が要求され、定期検査では、疲労き裂等の欠陥が生じやすい溶接部を中心に非破壊検査が実施されている。しかし、非破壊検査には検出限界があり、深さ1mm以下の表面欠陥は検出されない場合が多い。本研究では、LNG球形タンクで使用されているアルミニウム合金A5083-0材の突合せ溶接継手について、溶接止端部にニードルピーニング(NP)を施工することにより、疲労強度が11%改善されるとともに、疲労強度を44%低下させる深さ1mmのき裂状表面欠陥が疲労強度上無害化されることを実験により明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

圧力容器等の定期検査では、疲労き裂等の欠陥が生じやすい溶接部を中心に非破壊検査が実施されている。しかし、非破壊検査には検出限界があり、深さ1mm以下の表面欠陥は検出されない場合が多い。本研究において、アルミニウム合金A5083P-0材の突合せ溶接継手の止端部にニードルピーニング(NP)を施工することにより、疲労強度が11%改善されるとともに、疲労強度を44%低下させる深さ1mmのき裂状表面欠陥が疲労強度上無害化されることが明らかとなった。この結果は、非破壊検査で検出されにくい欠陥をNP施工により無害化可能であることを示しており、タンクの損傷率低下に貢献する知見となりうるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：Tanks on LNG carriers used to transport liquefied natural gas (LNG) require high reliability. In periodic inspections, nondestructive testing is performed mainly on welds, where fatigue cracks and other defects are likely to occur. However, nondestructive testing has a detection limit, and surface defects with a depth of less than 1 mm are often not detected. In this study, the fatigue strength of butt-welded joints of aluminum alloy A5083-0 used in LNG spherical tanks was improved by 11% due to needle peening (NP). Furthermore, crack-like surface defects with a depth of 1 mm, which reduced the fatigue strength of welded joints by 44%, were rendered harmless by NP.

研究分野：破壊力学

キーワード：ニードルピーニング アルミニウム合金 溶接継手 金属疲労 欠陥の無害化 疲労試験

## 1. 研究開始当初の背景

発電用燃料や都市ガスとして用いられている液化天然ガス (LNG) の海上輸送には、LNG 運搬船が使用されている。LNG 運搬船にはタンクの形状が異なる複数の種類が存在するが、その中でも図 1 のような独立球形タンク方式 (モス型) は、タンク構造の信頼性が高く、耐スロッシング性にも優れることから、環境条件の厳しい海域にも適した船型として広く普及している。

LNG を貯蔵する球形タンクには長期にわたって高い信頼性を維持することが要求される。そのため、疲労き裂等の欠陥が生じやすい溶接部を中心に非破壊検査が行われ、タンクの健全性が評価されている。しかし、非破壊検査には検出限界が存在し、一般的な非破壊検査法において、深さ 1 mm 以下の欠陥は検出されにくいことが報告されている<sup>1)</sup>。

球形タンクには低温特性・溶接性に優れたアルミニウム合金 A5083-O が採用されている。しかし、アルミニウム合金は欠陥感受性が高く、小さな欠陥が疲労強度を大幅に低下させる。たとえば、アルミニウム合金に深さ 0.2 mm の半円スリットを導入した場合の 10<sup>7</sup> 回疲労強度は、平滑材のそれに比べて 62% 低下することが示されている<sup>2)</sup>。この結果は、検査で見落とされる微小な欠陥が、タンクの信頼性を大幅に低下させる可能性を示唆している。

研究代表者らは、溶接止端部にニードルピーニング (NP) を施工することで、非破壊検査で検出されないき裂が疲労強度に及ぼす影響を無害化し、溶接部の信頼性を向上させる構想を提案している。NP は、図 1 に示すように、鋼製のニードルピンを溶接止端部に繰返し打撃することで、溶接止端部の表面部に圧縮残留応力を導入する方法である。研究代表者らは、過去の研究においてステンレス鋼<sup>3)</sup>および引張強さ 800 MPa 級高張力鋼<sup>4)</sup>の突合せ溶接継手について、疲労強度の改善とともに深さ 1mm のき裂状表面欠陥が NP の施工により無害化されることを明らかにしている。



図 1 独立球形タンク方式の LNG 運搬船<sup>5)</sup>

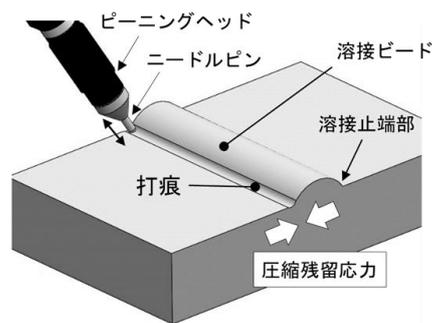


図 2 NP 施工の概要図

## 2. 研究の目的

アルミニウム合金の溶接部に対して NP を施工することにより、深さ 1 mm 程度の表面欠陥を無害化できれば、球形タンクの信頼性の大幅な向上が期待できる。しかし、研究代表者らがこれまでに研究対象としてきた鉄鋼材料と非鉄金属であるアルミニウム合金は、材料固有のき裂進展抵抗値が大幅に異なることなど、材料特性に大きな差があることから NP の施工による欠陥の無害化挙動も異なることが考えられる。そこで、本研究では、アルミニウム合金の突合せ溶接継手を対象に、無害化可能な欠陥寸法を疲労試験により明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

### 3. 1 供試材

供試材は板厚 20mm のアルミニウム合金 A5083P-O (以後、素材板) である。試験体の製作に用いた素材板の化学成分を表 1、機械的性質を表 2 に示す。表 2 に示した機械的性質は、素材板より JIS 規格 JIS-Z2241 (金属材料引張試験方法) の 5 号試験片を製作し、同規格に則り実施した引張試験 3 本の平均値である。

表 1 化学成分 (質量%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.16	0.21	0.04	0.68	4.35	0.11	0.01	0.02

表 2 機械的性質

0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]
171	326	22

### 3. 2 突合せ溶接継手の製作

図 2(a)に示すような形状および寸法の突合せ溶接継手を製作した。開先は X 型開先とし、溶接は MIG 溶接にて 4 層 4 パス施工した。溶加材にはアルミニウム合金 A5183 の  $\Phi 1.6\text{mm}$  のワイヤを使用し、シールドガスにはアルゴンガスを使用した。溶接ビード形状のばらつきを最小限にするため、ロボットによる自動溶接を行った。さらに、破壊起点を片面に限定するため、溶接後に裏面の余盛を研削除去し、研磨仕上げした。

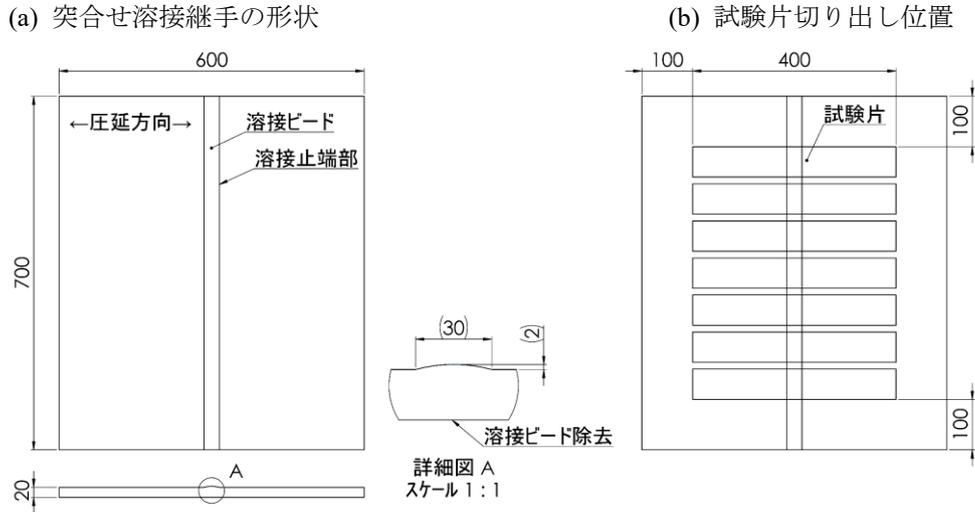


図 3 突合せ溶接継手の形状および試験片切り出し位置

### 3. 3 試験片の製作

疲労試験に供する試験片は図 3(b)に示すように突合せ溶接継手より幅 60mm×長さ 400mm ずつ短冊状に切り出して製作した。試験片の種類は図 4 に示すように、溶接まま材 (AW)、溶接止端部への深さ 1.0mm 半円スリット導入材 (1.0S)、溶接止端部への NP 施工材 (NP)、溶接止端部への深さ 1.0mm 半円スリット導入後 NP 施工材 (1.0S-NP) 材の 4 種類である。

スリットは図 5 に示すような表面き裂を模擬した半円形状のものを溶接止端部に放電加工で導入した。また、NP は東洋精鋼製の可搬型エアードルピーニング装置を使用し、表 3 に示す施工条件にて施工した。試験機のチャック部からの破断を防ぐため、すべての試験片を図 7 に示すようなダンベル型の形状に機械加工し、溶接部にて疲労破壊するようにした。

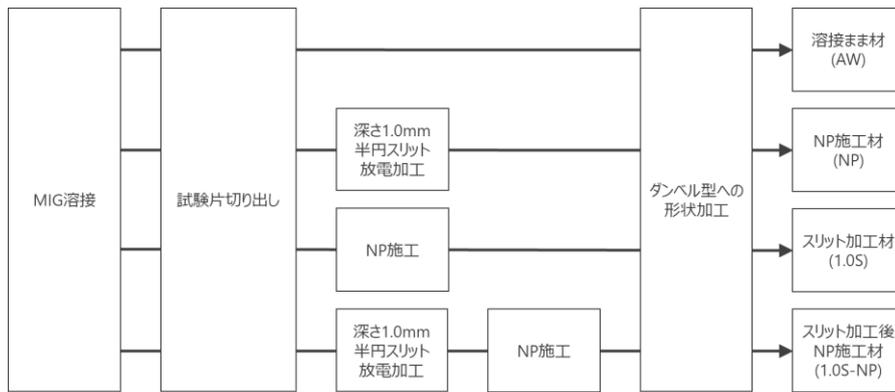


図 4 試験片製作フロー

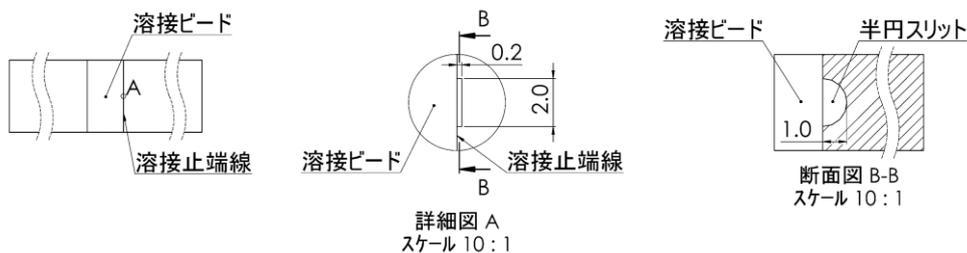


図 5 半円スリットの加工位置およびスリット形状

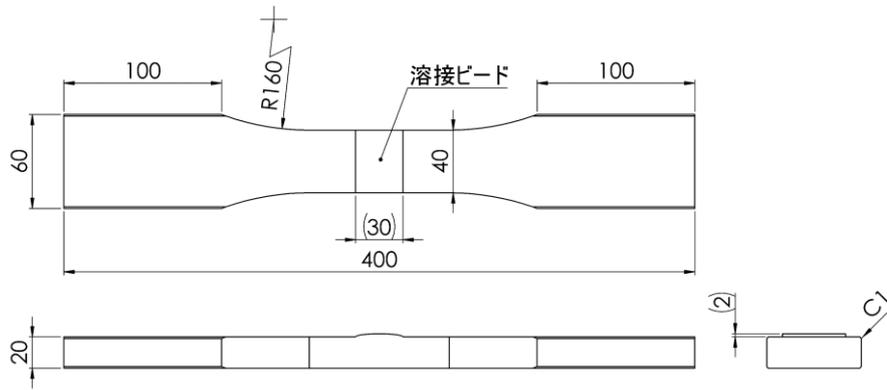


図6 疲労試験用ダンベル型試験片の形状

表3 NP施工条件

ニードルピン			装置設定	施工条件	
軸径 [mm]	先端曲率 半径 [mm]	材質	エア圧力 [MPa]	施工速度 [mm/s]	繰返し施工数 (パス数)
Φ3	R1.5	SUJ2	0.4	5	2

### 3. 4 疲労試験の実施

荷重容量 200kN の油圧サーボ式疲労試験機を使用し、正弦波の荷重制御にて、試験片長手方向に対する単軸引張疲労試験を実施した。応力比は 0.05，繰返し周波数は 5 Hz とした。疲労試験は  $2 \times 10^6$  回の繰返しをもって打ち切った。

## 4. 研究成果

### 4. 1 疲労試験結果

疲労試験結果の S-N 線図を図 7 に示す。図 7 でアスタリスク (\*) を付したプロットは、スリットを加工した 1.0S 材および 1.0S-NP 材において、試験片がスリット以外の箇所を起点に破壊したことを示している。

図 7 より，AW 材に対する NP 材の 200 万回疲労強度  $\sigma_{w,200}$  を比較すると，AW 材に対して NP 材の  $\sigma_{w,200}$  は 11% 高く，NP 施工により  $\sigma_{w,200}$  は改善されているが疲労強度の改善率としては大きくない。また，200 万回未満の NP 材の疲労寿命は AW 材の方より短い結果となっている。この要因としては，本研究で製作した溶接試験片の余盛高さが低く，溶接止端部の応力集中が大きいため，NP 施工により形成される打痕底部の応力集中が AW 材の溶接止端部における応力集中に比べて相対的に高くなっている可能性<sup>4)</sup>が考えられる。

次に，AW 材と 1.0S 材の  $\sigma_{w,200}$  を比較すると 1.0S 材は AW 材に対して 44% 低く，溶接止端部に導入した深さ 1.0mm の半円スリットが  $\sigma_{w,200}$  を大幅に低下させていることがわかる。これに対して，1.0S-NP 材の  $\sigma_{w,200}$  は 1.0S 材の  $\sigma_{w,200}$  と比べて 50% 高く，かつ NP 材と同値である。よって，深さ 1.0mm のき裂状表面欠陥を有する溶接継手の疲労強度改善に NP 施工は非常に有効であるといえる。

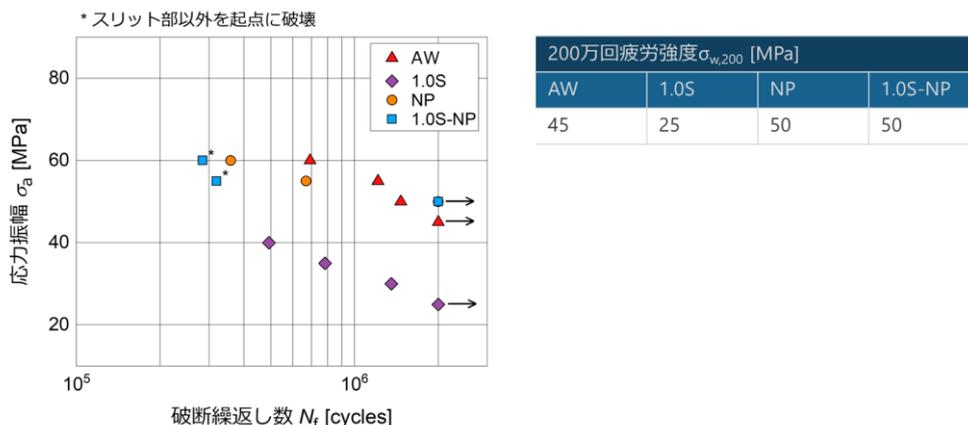


図7 S-N線図

#### 4. 2 破面観察結果

4 種類の試験片の破断面観察像を図 8 に示す。図 8(a)の AW 材の破面では、溶接止端部の複数個所を起点に疲労き裂が進展し、それらが合体して進展した痕跡がみられる。図 8(b)の 1.0S 材の破面では半円スリットの前縁部より疲労き裂が発生・進展した痕跡がみられる。図 8(c)の NP 材の破面では、試験片の角部付近から疲労き裂が発生し、進展した痕跡がみられる。図 8(d)の 1.0S-NP 材の破面では、1.0S 材と同じ形状・寸法の半円スリットを加工しているにもかかわらず、破面の様態は図 8(c)の NP 材と同様であり、1.0S 材の破面とは明らかに異なる様相を呈している。

#### 4. 3 NP 施工により無害化可能な欠陥寸法

研究代表者らの過去の研究<sup>4)</sup>では、溶接部における欠陥の無害化の定義を下記の条件(a)または(b)のいずれかを満たす場合と定義している。

- (a) 表面欠陥を有する溶接材に NP 施工した場合の疲労限度が溶接材に NP 施工のみ行った場合の疲労限度と比べて 90%以上まで向上すること。
- (b) 表面欠陥を有する溶接材に NP 施工した場合のき裂発生起点が表面欠陥部以外であること。

上記の定義のうち、疲労限度を 200 万回疲労強度  $\sigma_{w,200}$  と読みかえると、4.1 節で述べた通り、1.0S-NP 材の  $\sigma_{w,200}$  は NP 材と同値であることから、欠陥の無害化の条件(a)を満たしており、NP 施工により深さ 1.0 mm の表面欠陥が無害化されたといえる。また、4.2 節で述べたように、1.0S-NP 材で疲労破壊した試験片は半円スリット部とは別の位置から疲労き裂が発生していたことから、無害化の条件(b)も同時に満たしており、疲労強度および破壊起点の両方の観点で深さ 1.0mm の半円スリットが NP 施工により無害化されたといえる。

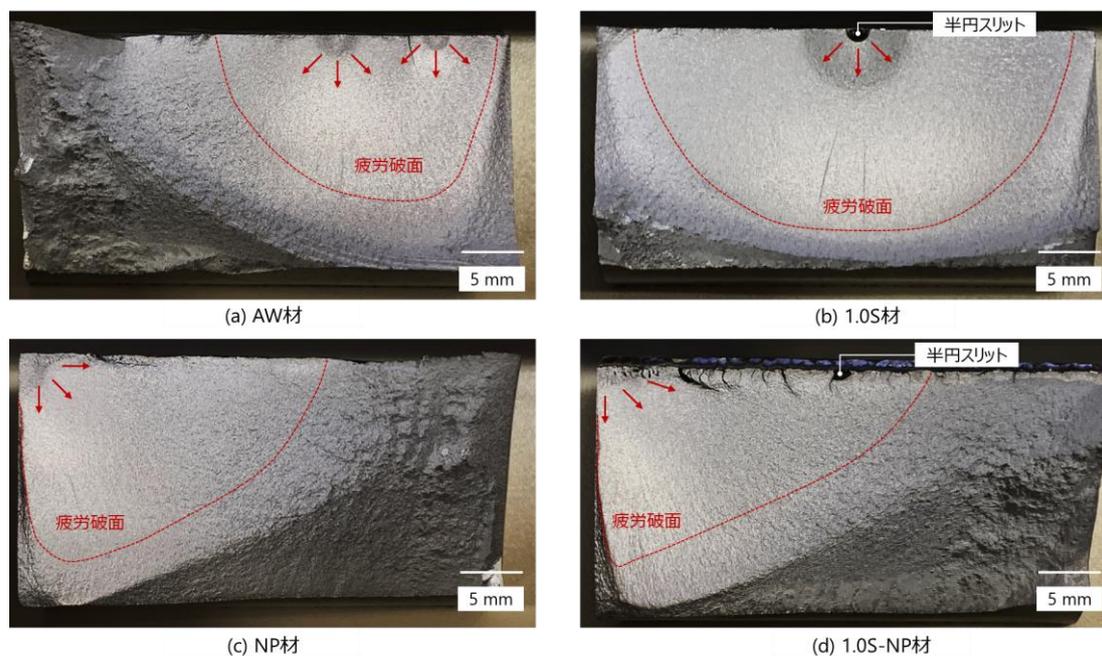


図 8 破断面観察像

#### <参考文献>

- 1) 三木千寿ら, 土木学会論文集, 386, pp.329-337, 1987.
- 2) K.Takahashi et al., Engineering Fracture Mechanics, 193, pp.151-161, 2018.
- 3) 笛木隆太郎ら, 圧力技術, 53, 3, pp.140-148, 2015.
- 4) R.Fueki et al., Metals, 9, 2, p.143, 2019.
- 5) 川崎汽船株式会社ホームページ <https://www.kline.co.jp/ja/service/lng.html>

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 FUEKI Ryutaro, TAKAHASHI Koji	4. 巻 70
2. 論文標題 Fracture Mechanical Estimation for the Maximum Defect Size Rendered Harmless by Peening for High Tensile Steel Welded Joint Containing a Surface Defect at the Weld Toe	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 465 ~ 472
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2472/jsms.70.465	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------