

レーザーピーニングによる溶接部の疲労強度向上とき裂の無害化

横浜国立大学 大学院工学研究院
教授 高橋 宏治
(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015211)

キーワード：レーザーピーニング，溶接部，圧縮残留応力，疲労強度

1. 研究の背景と目的

溶接部では溶接余盛の形成に伴う応力集中や熱影響による引張残留応力の発生により、疲労き裂や応力腐食割れ等の疲労強度上有害な表面欠陥が発生しやすい。そのため、非破壊検査による探傷が行われているが、非破壊検査には検出限界が存在し、それ以下の欠陥は検出されない。しかし、検査で見落とされた欠陥が起点となって破壊事故が発生するケースも多く、信頼性保証上の課題となっている。

著者らは、既往の研究において、き裂状人工表面欠陥(半円スリット)を導入した高強度鋼の平滑試験片に対してショットピーニング(SP)を施工し、表面部に圧縮残留応力を導入することにより、深さ 0.2 mm の半円スリットが無害化されることを明らかにしている²⁾。また、溶接部については、溶接止端部に半円スリットを導入したステンレス鋼³⁾および低炭素鋼⁴⁾の溶接試験片に対してニードルピーニング(NP)を施工することにより、両者ともに深さ 1 mm 程度の半円スリットが無害化されることを明らかにしている。以上の研究成果より、非破壊検査とピーニングによる欠陥の無害化を組み合わせることで、部材の信頼性の大幅な向上が期待される。

近年、原子力発電プラントでは、原子炉内の溶接部における応力腐食割れの発生防止にレーザーピーニング(LP)が高い有用性を有することが確認されており、すでに実用段階にある⁵⁾。LPは、図 1 に示すように、水中で材料に短パルスレーザーを照射することで材料表面に発生するプラズマの膨張を水の慣性により抑制し、エネルギーを集中させることで、衝撃波の発生を誘起するピーニング法である。衝撃波が材料内部を伝播することで、材料表面部に塑性変形が生じ、圧縮残留応力が導入される。LPは自動制御で正確な施工が可能であり、溶接部を局部的に施工することに適している。

LPの施工で溶接部に生じた欠陥の無害化が可能であれば、溶接部の信頼性の向上と検査の合理化によるコスト削減効果が期待される。そこで、本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼の溶接継手を対象に、欠陥の無害化に適した施工条件を選定し、その施工条件下における溶接継手の疲労限度向上ならびに無害化可能な欠陥寸法について調査した。

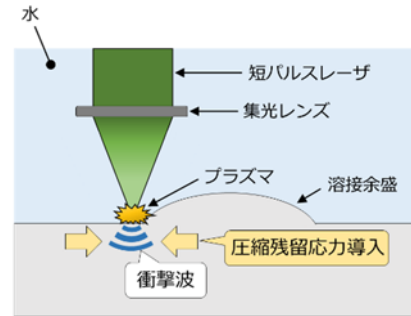


図 1 LP 施工による圧縮残留応力導入メカニズム

2. 供試材および試験片作製方法

2.1 供試材

供試材にはオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 を用いた。SUS316 の化学成分および機械的特性をそれぞれ表 1 および表 2 に示す。

表 1 SUS316 の化学成分 (質量%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.04	1.00	0.91	0.034	0.002	10.13	16.82	2.05

表 2 SUS316 の機械的特性

0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	ビッカース硬さ HV
306	582	182

2.2 試験片作製方法

図 2 に示すように、縦×横×厚さ=280 mm×220 mm×7 mm の寸法に機械加工した素材板中央部に半径 1.5 mm 深さ 0.5 mm の U 字開先を加工し、溝部に表 3 の溶接条件にて TIG 溶接を施工した。試験片は素材板の圧延方向が試験片の長手方向に一致するように短冊状に切り出すことにより作製した。溶接試験片の形状および寸法を図 3 に示す。

表 3 溶接条件

層数	パス数	溶接姿勢	溶加棒直径 [mm]	電流 [A]	電圧 [V]	溶接速度 [cm/min]
1	1	下	Φ3.2	160	9	13

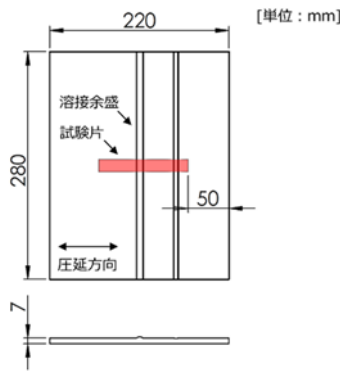


図 2 溶接板と試験片採取位置の関係

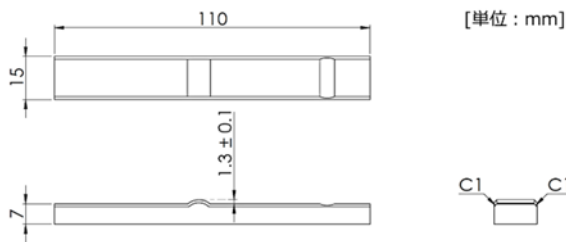


図 3 試験片形状および寸法

3. LP 施工条件の最適化

3.1 LP 施工条件ならびに施工方法

LP に使用したレーザーは波長 532 nm の Nd : YAG レーザで、パルス幅 t は 6.2 ns、1 秒あたりのパルス発振数（周波数）は 10 Hz である。本研究では、単位面積あたりに投入されるエネルギーを表すパワー密度 G と単位面積あたりの照射痕の重なりを度合いを表すカバレッジ C_v に着目した。 G と C_v の違いが LP 施工後の残留応力分布に与える影響について調査するべく、表 4 に示す 6 種類の条件を設定した。なお、 G および C_v は以下のように計算した。

$$G [\text{W}/\text{cm}^2] = (E_p/t) [\text{W}]/A_p [\text{cm}^2]$$

$$C_v [\%] = A_p [\text{mm}^2] \times N_p [1/\text{mm}^2] \times 100$$

ここで、 A_p はスポット面積、 N_p は照射密度である。 A_p はスポット径 D より照射面積を計算することで求められる。

LP の施工範囲は図 4 に示すように、両側の溶接止端部より 10 mm の位置を始点および終点として溶接余盛と熱影響部をカバーする範囲とした。施工にあたっては、試験片を電動ステージの台座に固定し、始点から接線方向にステージを動かし、1 列分レーザーを照射した後、溶接線垂直方向にステージをずらして溶接線方向へさらに 1 列照射する動きを繰り返すことにより、所定の範囲にレーザーが照射されるようにした。

表 4 LP 施工条件の一覧

番号	E_p [mJ]	D [mm]	N_p [1/mm ²]	G [GW/cm ²]	C_v [%]
LP1	120	1.0	38	2.5	3000
LP2	250			5.1	
LP3	370			7.6	
LP4	490			10	
LP5	490		64	10	5000
LP6	480		127	10	10000

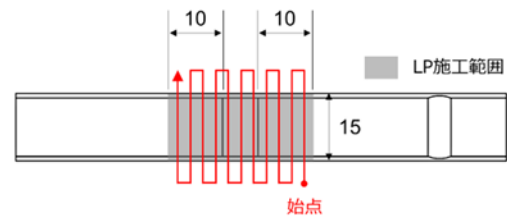


図 4 LP 施工の範囲および順序

3.2 残留応力測定方法

溶接継手の疲労破壊は主に溶接止端部を起点として発生するため、溶接止端部近傍の残留応力は溶接継手の疲労強度に大きく影響する。そこで、溶接まま材と表 4 に示した 6 条件で LP 施工した試験片について、図 5 のように溶接止端部近傍の長手方向残留応力を測定した。残留応力測定には X 線回折応力測定装置を使用し、 $\cos \alpha$ 法により残留応力を計測した。コリメータは $\phi 1.0$ mm（照射径： $\phi 2.0$ mm）のものを使用した。オーステナイト系ステンレス鋼は結晶粒が大きいので、試験片を静置した状態では十分な X 線回折ピークが得られなかったが、試験片の角度を変えて揺動しながら X 線を照射することにより、残留応力の計測に十分な回折ピークが得られた。深さ方向の残留応力分布は電解研磨と測定を交互に繰り返すことにより測定した。

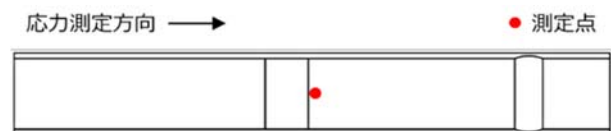


図 5 残留応力測定点および応力測定方向

より測定した。

3.3 残留応力測定結果

溶接まま材の残留応力分布を図 6 に、パワー密度 G のみが異なる場合の残留応力分布を図 7 に、カバレッジ C_v のみが異なる場合の残留応力分布を図 8 に示す。図 6 と図 7 ならびに図 8 を比べると、いずれの施工条件でも溶接により表面部に生じた引張残留応力が LP の施工によ

り圧縮残留応力に変化していることがわかる。

図 7 より、 G の違いが残留応力分布に与える影響をみると、最表面部に導入される圧縮残留応力は G が 2.5 GW/cm^2 から 7.6 GW/cm^2 までは G の増大とともに大きくなる傾向が見られるが、 10 GW/cm^2 まで G を増大させるとかえって小さくなっている。これは、 G を増大させるとピーニングの強度が上がる一方、入熱量も増大するため、最表面部では熱の影響が大きくなり、圧縮残留応力が小さくなったものと考えられる。また、いずれの施工条件でも圧縮残留応力は、深さ $0.05 \text{ mm} \sim 0.1 \text{ mm}$ で最大となっており、その大きさは G が大きいほど大きくなる傾向が見られる。さらに、 G が大きいほど、同一深さに対する圧縮残留応力の大きさが大きく、残留応力がゼロとなるクロッシングポイントも大きくなる傾向が見られる。

次に、図 8 より、 C_v の違いが残留応力分布に与える影響をみると、先述の G をパラメータとしたときほど残留応力分布に大きな差はないように見える。ただし、最表面部については 10000% のように、 C_v を大きくしすぎると圧縮残留応力が小さくなっているが、これは先述の G の影響と同じく熱影響の増大によるものと考えられる。

著者らの過去の研究⁶⁾より、深くまで大きな圧縮残留応力が導入されるほど、より大きな欠陥を無害化できることがわかっている。さらに、溶接部では最表面部に応力集中が生じるため、最表面の残留応力の値もできる限り大きいことが望ましい。以上の観点から各残留応力分布を比較すると、 $G = 7.6 \text{ GW/cm}^2$ 、 $C_v = 3000\%$ の施工条件（表 4 の LP3）が最適であると考えられるので、この施工条件を最適施工条件と決定した。

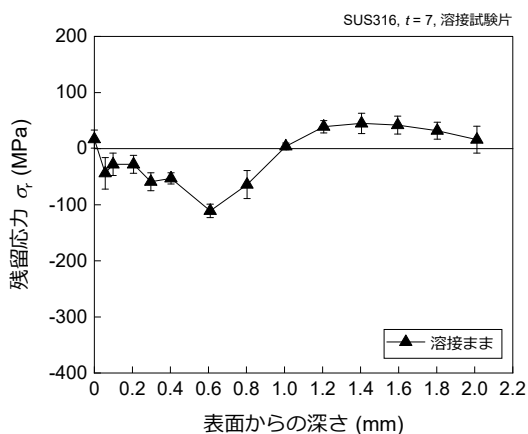


図 6 溶接まま材の残留応力分布

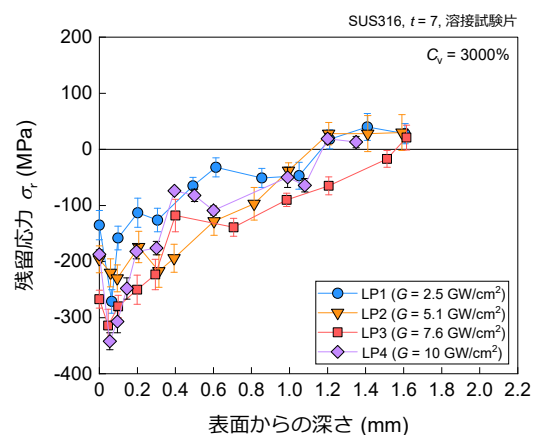


図 7 各パワー密度 G における残留応力分布

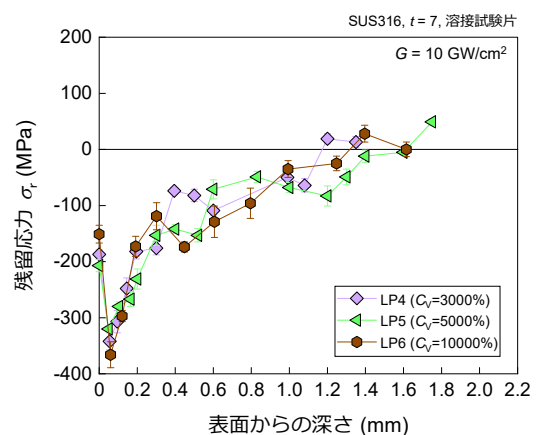


図 8 各カバレッジ C_v における残留応力分布

4. 疲労試験方法

表面欠陥が疲労強度に与える影響について、LP 施工前後での違いを調査するため、疲労試験を実施した。

表面欠陥は溶接止端部に発生する疲労き裂を想定し、図 9 に示すように溶接試験片の溶接止端部にできる限り近い位置（溶接止端部より 0.1 mm 以内）にアスペクト比 1 の半円スリットを放電加工により導入した。半円スリットの寸法は深さ $a \text{ (mm)}$ / 表面長さ $2a \text{ (mm)} = 0.2 / 0.4$ とした。スリットの開口幅は 0.1 mm 程度である。

試験片準備のフローを図 10 に示す。疲労試験に供した溶接試験片は溶接まま (W) 材、LP 施工 (WL) 材、スリット導入 (WS) 材、LP 施工後スリット導入 (WLS) 材の 4 種類である。LP 施工は 3・3 節で決定した最適施工条件で実施した。WLS 材について、LP 施工後にスリットを導入したのは、スリット導入後に LP 施工した場合にスリット内部でプラズマが発生し、スリット内部で余分なピーニング効果が生じることを避けるためである。

疲労試験の荷重負荷形式は三点曲げであり、油圧サーボ式疲労試験機を使用して荷重一定制御のもと、試験を実施した。三点曲げ試験治具と溶接試験片の位置関係を図 11 に示す。三点曲げのスパン長さは 80 mm で、スリット部に最大曲げ応力が作用するようになっている。応力比 R は 0.05, 繰返し周波数は 20 Hz である。本研究では繰返し数 1×10^7 回で試験を打ち切り、 1×10^7 回の繰返しに耐えた最大の応力振幅を疲労限度とした。

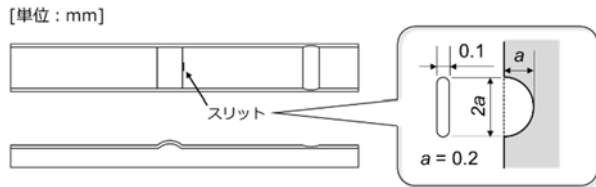


図 9 スリット導入位置およびスリット寸法

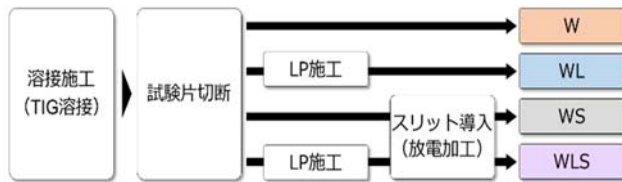


図 10 試験片準備のフロー

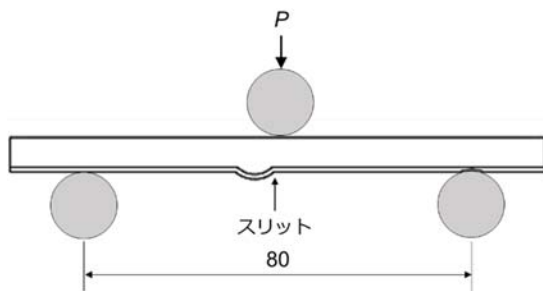


図 11 三点曲げ試験治具と溶接試験片の位置関係

5. 疲労試験結果

疲労試験により得られた $S-N$ 線図を図 12 および図 13 に示す。図 12 はスリットを導入していない試験片のデータで、図 13 はスリットを導入した試験片のデータである。

図 12 より、WL 材の疲労限度は W 材に比べて 23% 上昇しており、LP 施工により、溶接継手の疲労強度が向上することがわかった。一方、図 12 および 13 より、WS 材の疲労限度は W 材に比べて 15% 低下したが、WLS 材の疲労限度は WS 材に比べて 64% 上昇し、疲労限度は WL 材と同等以上の値となっている。したがって、LP 施工により深さ 0.2 mm のスリットが疲労限度に与える影響を強度上無害化できることがわかった。

WLS 材について、疲労試験中に破断に至った試験片の破面を観察したところ、半円スリットとは別の位置が疲労き裂の発生起点となっていることがわかった。したがって、き裂発生起点からも、LP 施工により、深さ 0.2 mm のスリットを無害化できていることがわかった。

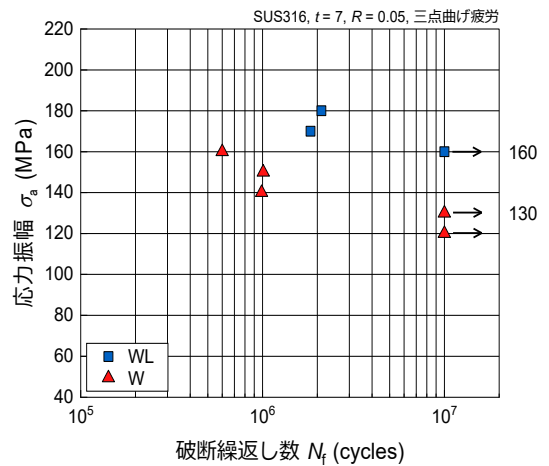


図 12 $S-N$ 線図 (スリットなし)

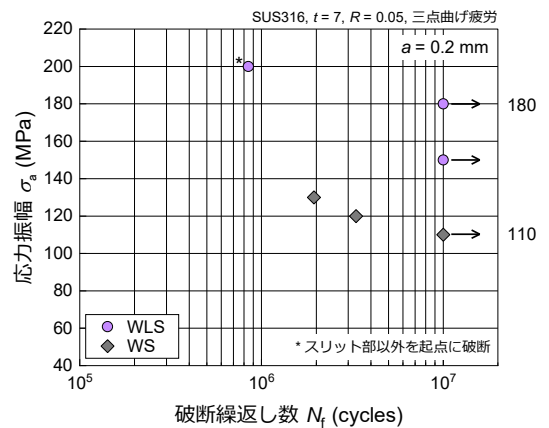


図 13 $S-N$ 線図 (スリットあり)

6. 結言

本研究では、オーステナイトステンレス鋼 SUS316 の溶接部を対象として、レーザーピーニング (LP) 施工による疲労強度向上効果と溶接止端部に表面欠陥を有する場合の無害化挙動について調査した。

まず、溶接試験片の溶接部に対して、パワー密度 G とカバレッジ C_v の異なる 6 種類の施工条件で LP 施工し、残留応力分布を測定した。できる限り大きな表面欠陥の無害化が期待できる条件として、 $G = 7.6 \text{ GW/cm}^2$, $C_v = 3000\%$ の施工条件を最適施工条件と決定した。

最適施工条件で溶接試験片に LP 施工を行い、疲労試験を実施した。LP 施工により、溶接継手の疲労限度は 23% 向上することがわかった。また、溶接継手の疲労限度を 15% 低下させる深さ 0.2 mm の半円スリットを LP 施工により、強度上無害化できることがわかった。疲労き裂発生起点もスリット部以外に遷移しており、スリットの影響が無害化されていることが確認できた。

謝 辞

本研究の一部は平成 27 年度（公財）天田財団一般研究開発助成(AF-2015211)のご支援によるものであり，ここに謝意を表します。レーザーピーニングの実施においては新東工業株式会社の澁谷紀仁氏と桑野文亮氏に，残留応力測定，疲労試験の実施と評価においては横浜国立大学大学院生の笛木隆太郎氏にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 寺田博之. わかりやすい構造破壊の防止技術—破壊力学の基礎から学ぶ—. 東京, 養賢堂, 2006, 133p.
- 2) 高橋宏治, 天野利彦, 花折和也, 安藤柱, 高橋文雄. き裂状表面欠陥を有する高強度鋼のショットピーニングによる疲労限度向上と表面欠陥の無害化. 材料. 2009, vol. 58, no. 12, p. 1030–1036.
- 3) 笛木隆太郎, 安部央矩, 高橋宏治, 安藤柱, 北條恵司, 半田充. 溶接止端部にき裂を有するステンレス鋼のピーニングによる疲労限度向上とき裂の無害化. 圧力技術. 2015, vol. 53, no. 3, p. 140–148.
- 4) 高橋宏治, 北條恵司, 安部央矩, 安藤柱, 岡崎慎司. ピーニングによる圧力容器の安全性向上に関する基礎研究. ボイラ研究. 2013, no. 381, p. 15–22.
- 5) 佐野雄二, 小畑稔, 濱本良男, 嶋誠之. レーザピーニング技術の開発と原子炉炉心シュラウドへの適用. 材料. 2000, vol. 49, no. 9, p. 1067–1068.
- 6) 北條恵司, 高橋宏治, 安藤柱, 笛木隆太郎, 岡田秀樹. ショットピーニングによる表面き裂の無害化寸法に与える材料硬さの影響. 材料. 2015, vol. 64, no. 11, p. 859–864.