

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420468

研究課題名(和文) 携帯型レーザーピーニング装置開発のための疲労強度向上効果確認実験

研究課題名(英文) Confirmatory experiments on enhancement of fatigue lives for development of portable laser-peening system

研究代表者

崎野 良比呂 (SAKINO, Yoshihiro)

近畿大学・工学部・准教授

研究者番号：80273712

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：レーザーピーニングは材料にパルスレーザーを照射して材料表面の強度上昇を図る技術である。レーザーピーニングによる圧縮残留応力の生成によって鋼構造物溶接部の疲労寿命が大きく向上することが確認されている。本研究では、現場でも容易に用いることができるレーザーピーニング装置の開発するため、低出力でのレーザーピーニング施工条件の選定し、その効果を残留応力測定と大型試験体での疲労試験で確認した。また、他のピーニング手法との比較と、レーザーピーニングのモデル化についての検討も行った。

研究成果の概要(英文)：Laser peening can introduce compressive residual stress to the surface and, therefore, is effective in enhancing the fatigue strength. This study targets confirmation of enhancing fatigue lives due to laser-peening with low pulse energy in order to develop portable laser-peening system. As a result, laser-peening condition with low pulse energy was selected, and effects of the laser-peening were confirmed by residual stress measurements and fatigue experiment with large scale specimen. Moreover, the results were compared with that of other types of peening. Numerical analysis models of laser-peening were also studied.

研究分野：鋼構造，溶接構造，破壊実験

キーワード：レーザーピーニング 疲労 残留応力 低出力 携帯 現場 ショットピーニング ハンマーピーニング

1. 研究開始当初の背景

産業及び社会基盤を支えている鋼構造物は、わが国の大切な社会資本ストックである。わが国の高度成長期に建設された多くのこれら社会資本ストックが徐々に設計寿命を迎えつつあり、そのリメイクやメンテナンスがわが国の喫緊の課題となりつつある。特に、近年の交通量/重量の増加にともない、自動車専用道路の橋梁に予想を遙かに超えた数と長さのき裂が見つかり、鋼橋の架け替えもしくは補修・補強による疲労強度強化の重要性が広く認識されてきている。

研究代表者らは、これら疲労き裂を防止するための手法として、レーザーピーニング(以下 LP と称す)に注目した。LP を行うと高い圧縮残留応力が生成されるため、応力腐食割れの防止に有効であることが知られており、原子炉の炉心シュラウド等に実用化されている¹⁾。さらに、疲労強度の向上効果についても一部金属で研究がなされている。しかし、大型鋼構造物に最も多く用いられている構造用鋼材や、ましてやその溶接部に対しての研究はなされていなかった。

そこで研究代表者らは、ピークエネルギー 200mJ の LP を採用し、様々な研究により、LP により非常に大きくて深い圧縮残留応力が生成されること、その向上効果の主要因は圧縮残留応力の生成であること、普通鋼のみならず高張力鋼 HT780 でも LP による著しい疲労寿命向上効果が発揮されることを明らかにした²⁾。また、光ファイバと水噴射ノズルを用いた”大型構造物用ノズル式レーザーピーニングユニット”を開発し、大型曲げ疲労試験体での疲労試験により、疲労寿命が大型試験体でも少なくとも 20 倍になることを確かめた。

2. 研究の目的

近年、小型 Q スイッチ YAG レーザが開発されてきており、大人なら一人で持てる重さのものも発売されてきている。研究室の開発レベルでは、子供でも片手で持てる重さのものも開発されてきている。LP 装置がハンドグラインダーのように携帯できれば、本手法は工場のみならず現場でも容易に用いることができる疲労強度向上手法となり、その用途が大きく広がると考える。ただし、小型 Q スイッチ YAG レーザの出力は現在数 mJ 程度、近い将来期待できる値では 20~50mJ 程度であり、これまでの研究で用いてきた出力 200mJ に比べて小さい。そこで、基礎的研究として、LP の施工条件(パルスエネルギー、照射径、照射密度)と残留応力の分布性状(表面残留応力の大きさ、圧縮残留応力の生成深さ)の関係性を明らかにする検討を進めており、低出力でも大きな表面圧縮残留応力もしくは深い生成深さが達成できる施工条件が明らかになりつつあった。

そこで本研究では、明らかになりつつある低出力の条件を選定し、溶接部に施工した場合の残留応力の測定と小型試験体の疲労試

験による疲労強度向上効果の比較を行う。これにより、小型 Q スイッチ YAG レーザの使用を前提とした、LP の効果的な施工条件を確定する。さらに、小型試験体の疲労試験では疲労強度が大きく評価されてしまうため、確定した施工条件を使用して、大型疲労試験体と実大疲労試験体によって効果を確認すると共に疲労強度向上効果を定量的に把握する。また、効果的な施工法(レーザーの条件、施工位置、施工順序等)をあらかじめ解析で明らかにすることを目的として、LP を FEM によりどのようにモデル化すればよいか明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 10mJ での LP 施工条件と効果の確認

残留応力測定

小さなパルスエネルギーで疲労強度を向上させることができると、低出力レーザー発振器および小径の光ファイバが使用でき、装置の小型化や施工性の向上が図れる。しかしながら既往の研究で用いた LP の施工条件では溶接試験体の疲労強度を向上させることはできなかった。そこで本研究では低出力でも大きな残留応力が生成される LP の施工条件を選定するため、パルスエネルギーを 10mJ で固定とし、照射径と照射密度を変化させて LP を施した。50×50×30mm の HT780 試験片 ($\sigma_u=812\text{MPa}$, $\sigma_y=745\text{MPa}$)に 10mm 角で 2 力所に LP を施し、その施工面の表面残留応力を X 線回折法(Cos 法)によって 4 方向から計測した。使用したレーザーは Nd:YAG レーザ(波長 532 μm)である。

疲労強度向上効果の確認

で選定された条件で実際に疲労強度が向上するか否か検討するため疲労試験を行った。試験体は厚さ 9mm の鋼板を V 開先突合せ溶接したものから切り出した。鋼板には HT780($\sigma_u=833\text{MPa}$, $\sigma_y=764\text{MPa}$)を用いた。溶接法は炭酸ガスを用いたガスシールドアーク溶接、溶接材料は 780MPa 級鋼用ソリッドワイヤを用い、表面 2 層、裏面 1 層とした。試験体の形状・寸法を図-1 に示す。この試験体の表裏両面の溶接止端部を含む幅 9mm、長さ 20mm の範囲に選定した条件で LP を施した。応力範囲は $\sigma = 200, 250, 300\text{MPa}$ の 3 水準、応力比 $R=0.1$ 、試験の打ち切り限界は 10^7 回とした。

(2) ショットピーニングおよび

フェムト秒レーザーピーニングとの比較

LP と一般的に使用されているショットピーニング(以下 SP)との直接的な比較は未だ行われていない。そこで LP と SP の直接的な比較検討を行うこととした。また、LP の中で

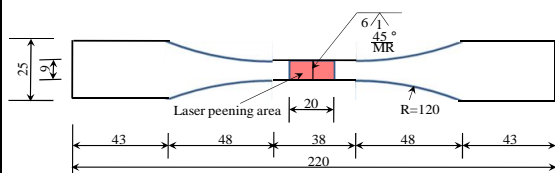


図-1 突合せ溶接試験体

も最新の技術であるフェムト秒レーザーピーニング（以下 FLP）との比較も合わせて行った。FLP と SP の施工条件を表-1,2 に示す。FLP は LP の中でも新しい技術であり、通常のナノ秒 LP よりもパルス幅が短い（フェムト秒）ものである。FLP の特徴はこの小さいパルス幅によってレーザーのピーク強度が高く十分な衝撃力を得ることができることにある。そのため従来の LP では必要であったプラズマ閉じ込め媒質やコーティング層といった前処理を施す必要がなく、気中処理を行うことができる。気中処理ができるようになれば、これまで LP では施工不可であった局所などの処理ができるようになるなどの可能性を秘めている技術である。

試験体は(1)と同様であるが、溶接ロットが異なっている。また、比較した LP も実験結果の精度を上げるために新たに試験体で再度実験を行っている。

(3)大型試験体の寸法の検討

これまで用いていた小型試験体の疲労試験では容易に多くの試験体を実験できるためパラメトリックな相対比較には有効であるが、疲労強度が実際の部材より大きく評価されてしまう。そのため定量的な効果の把握はできない。当初、最後に実大での疲労試験を計画していたが、研究協力者の異動により実現が難しくなった。そこで、どの程度大型にすれば実大の場合と同じ結果が得られるかの検討を行った。また、今回行う大型試験体による曲げ疲労試験での疲労寿命と、既往の研究で行ってきた引張での疲労寿命の比較に関する実験も行った。

試験体は、ベースプレートに 6mm のリブを 780 キロ鋼ソリッドワイヤ回し溶接したもので、鋼材はいずれも HT780 である。試験体の一例を図-2 に示す。40-9, 150-16, 150-9, 150-6, 95-9 試験体の 5 種類の試験体で実験を行った(ハイフンの前がベースプレート幅

表-1 FLP の施工条件

パルスエネルギー (mJ)	0.7	焦点距離 (mm)	70	パルス幅 (fs)	120
カバレッジ (%)	1963	波長 (nm)	800		

表-2 SP の施工条件

粒種・粒径	アラウンド (アルミナ) 60 (250~212ミクロン)	吹き付け速度 (圧力)	6(Mpa)	吹き付け時間	約90秒
-------	-------------------------------	-------------	--------	--------	------

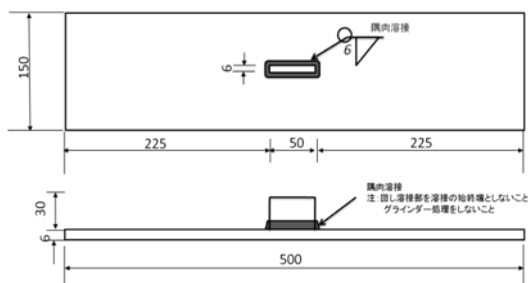


図-2 150-6 試験体

を、後が板厚を表す)。

曲げ疲労試験は 4 点曲げで行い、加力ピンの間隔は 450mm と 250mm とした。試験ではひずみ測定とクラックゲージによる測定を行った。ひずみゲージは溶接部の止端部 5mm の所に貼り付けき裂の発生を、クラックゲージは板幅方向の中心から 15mm の位置に貼り付けき裂の進展をモニタリングした。

(4)XRD による溶接部残留応力測定におけるコリメータ径の影響

別予算によって X 線残留応力測定装置を購入し、本研究にも適用できるようになった。そこで、大型試験体リブ回し溶接部の残留応力を測定する際のコリメータ径の影響を明らかにする実験を行った。実際の大型試験体のリブ回し溶接部をコリメータ径を変えて測定し、結果を比較した。鋼材種は SM490 と HT780 を用いた。

(5)大型試験体による低出力 LP の効果確認

大型試験体での低出力 LP の効果を明らかにするため残留応力測定と疲労試験を行った。また、ハンマーピーニング（以下 HP）との疲労強度向上効果の比較も行った。

試験体は 150-9 試験体で材質は HT780 である。LP の照射条件は、出力 20mJ、照射径 0.4mm、照射密度 180Pulse/mm² で、試験体 No1, No2 は照射範囲 20mm × 30mm、No3, No4 は照射範囲 10mm × 30mm とし照射範囲条件の影響も検討した。NP 試験体および HP 試験体も同じ試験体を用いている。

(6)LP のモデル化の検討

1 辺 3 mm の立方体を 8 節点ソリッド要素で作成した。材料は HT780 を想定した完全弾塑性体（弾性係数：E = 200 GPa、ポアソン比：ν = 0.3、降伏応力：σ_y = 800 MPa）とした。実際のピーニングのプロセスは極めて短時間の動的現象であると考えられるが、本解析では動的効果は考慮しておらず、静的問題として取り扱っている。

剛体変位を拘束し、上表面の 1 mm × 1 mm の領域にレーザーピーニングによる深さ方向の変位を模擬した強制変位を与えた。別途実施したレーザーピーニングによる深さ方向の変形計測結果では、平均的に約 5 ~ 10 μm の変位が生じていた。よって、解析においては強制変位を付与した後のスプリングバック（弾性回復）を考慮し、残留変位が 5 ~ 10 μm 程度となるように強制変位量 d (μm) を試行錯誤的に検討し、d = 50 μm と定めた。また、ピーニング速度と移動順序を考慮し、1 ステップに 1 節点ずつ変位を与え、変位を付与する節点を移動させた。実際のピーニング条件では 10 mm × 10mm の領域を 1 分間 60Hz で施工することから、解析ではピーニング領域の格子間隔は 0.2 mm とし、1 mm × 1 mm の領域が 36 回打撃される状況を模擬した。

4. 研究成果

(1)10mJ での LP 施工条件と効果の確認

残留応力測定

照射径 0.25mm の場合、照射密度が 216 お

よび 288Pulse/mm² 共に (レーザを照射する際のステージの移動方向の残留応力成分) で-400MPa 程度, (ステージの移動方向と直角方向の残留応力成分) で-750MPa 程度の非常に大きな値となっており 20mJ での施工条件として選定した照射径 0.4mm、照射密度が 180Pulse/mm² と比較しても大きな圧縮残留応力が生成された。照射径 0.3mm の場合でも で-330MPa 前後, で-650MPa 以上と 20mJ の条件と同等の値となった³⁾。残留応力の板厚方向分布も計測したが、照射径 0.25mm、0.3mm いずれの場合でも 2mm 近くまで圧縮残留応力が生成されていた。

そこで、照射径 0.25mm、照射密度 216 Pulse/mm² をパルスエネルギー10mJ での LP 施工条件として選定した。

疲労強度向上効果の確認

試験結果から得られた S-N 曲線を図-3 に示す。比較のため、LP を施していない試験体 (NP) と 20mJ での結果(LP(20mJ))の結果も載せている³⁾。LP(10mJ)は $\sigma = 250\text{MPa}$ では破断せず、打ち切り限界に達した。

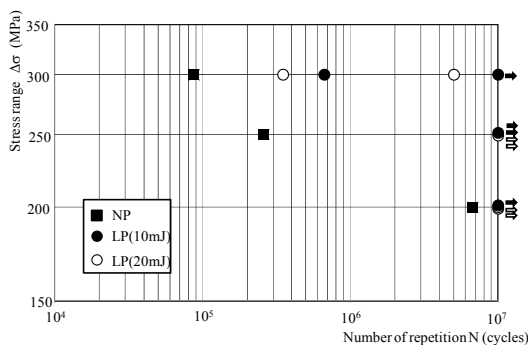


図-3 S-N 曲線 (低出力 LP の効果)

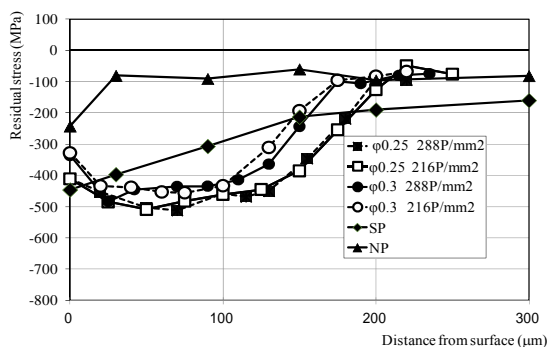


図-4 残留応力の板厚方向分布 (LP と SP の比較)

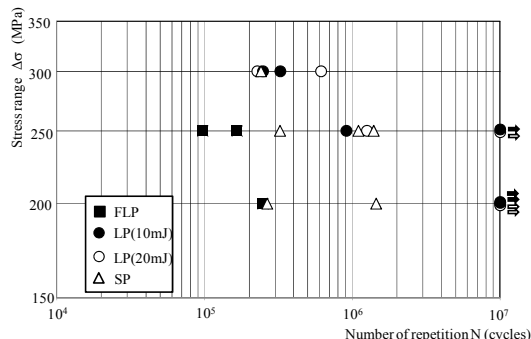


図-5 S-N 曲線 (LP-SP-FLP 比較)

$\sigma = 300\text{MPa}$ では 1 体は 65 万回程度で破断したが、もう 1 体は打ち切り限界に達した。これらの結果は、LP(20mJ)での結果および高パルスエネルギーでの施工条件 (パルスエネルギー 200mJ, スポット径 0.8mm, 照射密度 36Pulse/mm²)の結果 ($\sigma = 250\text{MPa}$ で $>10^7$ 回, $\sigma = 300\text{MPa}$ で 124×10^4 回および 135×10^4 回で破断)²⁾ と同等であり、非常に大きな疲労強度向上効果であると言える。

(2) ショットピーニングおよび

フェムト秒レーザピーニングとの比較

測定した残留応力の板厚方向分布を図-4 に示す。SP と出力 10mJ の LP の残留応力分布との比較を示している。圧縮残留応力の最大値が-450MPa 程度に対し、0.3、216P/mm² の LP と 0.25、288P/mm² の LP を施した試験体は圧縮残留応力の最大値が-500MPa を超す結果となった。各測定点では LP と比較して SP も圧縮残留応力の値は大きな差異は見受けられなかった。

疲労試験から得られた S-N 曲線を図-5 に示す。LP (10mJ)、LP (20mJ) については(1)と同様、非常に大きな疲労強度向上効果が確認された。SP は応力範囲の同じ LP より破断寿命が短いものが見られ、同じ応力範囲の SP 同士で値に大きな違いがあり、ばらつきが出ることがわかった。FLP の疲労寿命は非常に短かった。今回のロットの試験体では NP の実験を行っていないが、FLP の効果はほとんどないと推定される。これは FLP を施す際の焦点距離の調整が難しいため、適正値の残留応力を試験体に付与することが出来なかったためと考えられる。

(3) 大型試験体の寸法の検討

実験結果の一例を図-6 に示す。これより、板厚は 6mm 以上であればき裂発生寿命・進展

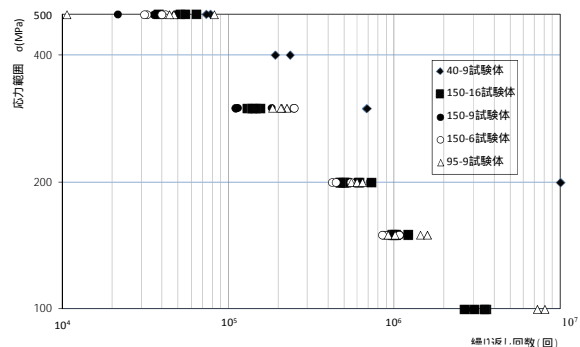


図-6 破断寿命の比較

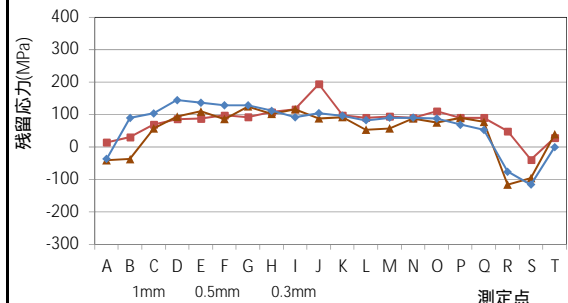


図-7 溶接部の残留応力測定結果(SN490)

寿命のいずれにも大きな影響を及ぼさないこと、板幅は 95mm 以上必要であることが明らかとなった。また、ベースプレート幅の違いによる破断寿命の差異は疲労き裂発生寿命の影響であることが明らかとなった。

これより、本研究では大型試験体として 150-9 試験体を用いることとした。

(4)XRD による溶接部残留応力測定における コリメータ径の影響

実験結果の一例を図-7 に示す。母材の結果では粒径の小さい HT780 の方が小さなコリメータ径でもばらつきが小さかったが、溶接部では SN490 の方がばらつきが小さい結果となった。溶接による粗粒化の影響が考えられる。

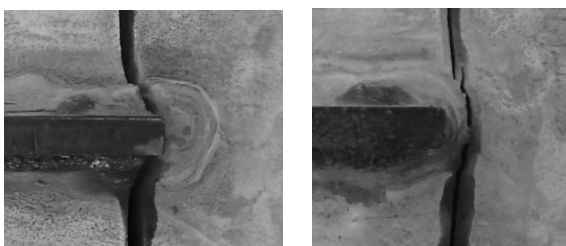
よって、本研究ではコリメータ径 1mm を用いることとした。

(5)大型試験体による低出力 LP の効果確認

残留応力は、レーザ照射外部は引張残留応力が 50MPa ほどだが、レーザ照射内部は -300MPa ほどの圧縮残留応力が測定されていた。このことから大型試験体であっても、出力 20mJ の LP で大きな圧縮残留応力を付与することができることが分かった。またレーザ照射範囲によって圧縮残留応力の大きさは変化していなかった。

き裂写真の一例を図-8 に示す。NP はどちらもベースプレート側止端部にき裂が発生している。LP は照射範囲 10mm×30mm のものは一部レーザ照射範囲内からき裂が発生している。照射範囲 20mm×30mm のものはリブ側止端部、またはベースプレート側止端部でもレーザ照射範囲外からき裂が発生している。このことから照射範囲によりき裂発生位置が変わることがわかった。

疲労試験結果の一例を図-9 に示す。NP と



(a)リブ側止端部 (レーザ照射範囲外) (b)ベース側止端部 (レーザ照射範囲内)

図-8 き裂発生箇所比較

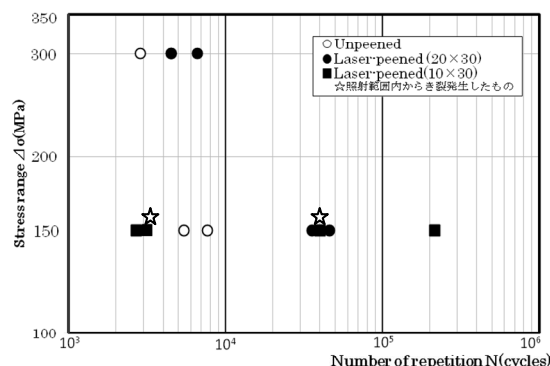


図-9 き裂発生寿命の比較 (LP 大型)

比較して LP は応力範囲 300MPa では約 2.3 倍、150MPa では約 6.5 倍～28.2 倍とき裂発生寿命が大きくのびていた。LP で寿命が伸びている照射範囲 20mm×30mm のものはリブ側からき裂が発生しており、NP 試験体とはほぼ変わらない照射範囲 10mm×30mm のものはベースプレート側止端部からき裂が発生している場合がある。照射範囲の狭いものは LP の効果があまり見られない結果となった。

HP との比較においては、LP と同様にリブ側止端からき裂が発生したため定量的な比較はできていないが、いずれのピーニングも疲労強度向上効果が大きいと言える。定量的な比較が今後の課題である。

(6)LP のモデル化の検討

モデル上表面における x 方向および y 方向の中心線の深さ方向変位を図-10 に示す。上述の変位付与方法 (強制変位 d = 50 μm) により残留変位が概ね 5~10 μm 程度となることを確認した。また、ピーニング領域中央における残留応力の深さ方向分布を比較すると、別途固有ひずみ法で求めた残留応力分布と傾向は概ね類似していることが分かった。また、x 方向に比べ y 方向の応力成分の方が、より大きな圧縮応力が導入されていた。

実構造物の溶接部を想定すると、ピーニング領域周辺の拘束状態や溶接残留応力がピーニングによる残留応力導入効果に影響を及ぼすことが想定される。この影響について基礎的な検討を行うため、y = 0 mm および y = 3 mm の両面において、(a) y 方向変位を拘束したモデル (Y_Fix)、(b) y 方向に 0.4 y に相当する引張応力を与えたモデル (0.4Sy)、(c) y 方向に 0.8 y に相当する引張応力を与えたモデル (0.8Sy) に対し同様の解析を実施した。

拘束あるいは応力を与えた y 方向の応力成分に注目すると、拘束を与えたモデルは無拘束、無応力の Base モデルと比べ応力分布の変化はほとんどないが、引張応力を与えた 0.4Sy モデルおよび 0.8Sy モデルでは、表面近傍の圧縮応力が導入される深さが減少した。特に、0.8Sy モデルでは圧縮応力導入深さが表面から 0.3mm 程度まで減少した。一方、応力作用方向に直交する x 方向成分の場合も、

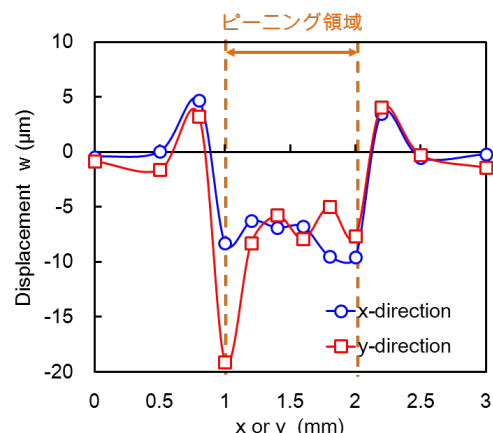


図-10 残留変位

定性的に同様の傾向が見られた。引張応力を y 方向に作用させた状態で上表面に深さ方向の強制変位を与えると、導入される残留変位が無応力状態の場合に比べ小さくなった。このため、応力を作用させた y 方向に限らず x 方向の残留応力導入効果も小さくなったと考えられる。これらの結果から、初期引張応力が導入された部位にピーニングを行う場合、無応力状態の部位よりも圧縮残留応力導入深さが減少することに留意が必要であると言える。

<引用文献>

- 1) Yuji SANO: Residual Stress Improvement on Metal Surface by Underwater Irradiation of High-Intensity Laser, Journal of Japan Laser Processing Society, 9, (2002), 163-170.
- 2) Yoshihiro SAKINO, Yuji SANO, Rie SUMIYA and You-Chul KIM: Major factor causing improvement in fatigue strength of butt welded steel joints after laser peening without coating, Science and Technology of Welding and Joining, 17-5, (2012), 402-407.
- 3) SAKINO Yoshihiro, SANO Yuji, TAKAGI Akiyoshi and SATOU Ryoji: Effect of Laser Peening Condition under Low Pulse Energy on Fatigue Strength of Butt-welded Joint, Preprints of the National Meeting of J.W.S, 94, (2014), 214-216.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

吉永諒平、崎野良比呂、真鍋顕宏：大型試験体によるショットピーニングの疲労寿命向上効果の検討、日本建築学会中国支部研究報告集、査読なし、40巻、2017、303-306

吉田和矢、崎野良比呂：各種鋼材およびリブ溶接部の X 線残留応力測定結果に及ぼすコリメータ径の影響、日本建築学会中国支部研究報告集、査読なし、40巻、2017、195-198

中田涼介、栗原康行、真鍋顕宏、崎野良比呂：ハンマーピーニング処理した高張力鋼溶接部の残留応力と疲労寿命、日本建築学会中国支部研究報告集、査読なし、40巻、2017、295-298

崎野良比呂、中前公宏、松田知貴：リブ溶接部の曲げ疲労寿命に及ぼすベースプレートサイズの影響、近畿大学工学部研究報告、査読なし、第49巻、2015、25-30

〔学会発表〕(計8件)

吉永諒平、崎野良比呂：大型試験体によるショットピーニングの疲労寿命向上効果の検討、日本建築学会 28 年度中国支部研究報告会、2017/3/5、島根大学 (島根県松江市)

吉田和矢、崎野良比呂：各種鋼材およびリブ溶接部の X 線残留応力測定結果に及ぼすコリメータ径の影響、日本建築学会 28 年度中国支部研究報告会、2017/3/5、島根大学 (島根県松江市)

中田涼介、崎野良比呂：ハンマーピーニン

グ処理した高張力鋼溶接部の残留応力と疲労寿命、日本建築学会 28 年度中国支部研究報告会、2017/3/5、島根大学 (島根県松江市)

Yoshihiro SAKINO : Investigation of Main Factor on Enhancing Fatigue Performance of Welded Structural Steel Plates due to Laser Peening, 10th Int. Conf. on Trends in Welding Research & Int. Welding Symp. of Japan Welding Society (9WS)、2016/10/12、Hitotsubashi hall (Tokyo, Japan)

崎野良比呂：ベースプレート幅と板厚がリブ溶接部の曲げ疲労寿命に及ぼす影響、溶接学会平成 28 年度秋期全国大会、2016/9/15、Hotel 天坊 (群馬県渋川市)

塩出修平、崎野良比呂：リブ溶接部の疲労寿命に及ぼす載荷方法とベースプレートサイズの影響、溶接学会平成 28 年度秋期全国大会、2016/9/14、Hotel 天坊 (群馬県渋川市)

崎野良比呂：リブ溶接部の曲げ疲労寿命に及ぼすベースプレートサイズの影響、溶接学会秋期全国大会、2015/9/4、北海道科学大学 (北海道札幌市)

崎野良比呂：レーザーピーニングの低パルスエネルギー化が突合せ溶接部の残留応力と疲労寿命に及ぼす影響、溶接学会秋期全国大会、2015/9/4、北海道科学大学 (北海道札幌市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.archi.hiro.kindai.ac.jp/laboratory/STEL/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

崎野良比呂 (SAKINO, Yoshihiro)

近畿大学・工学部・准教授

研究者番号：80272712

(2) 研究分担者

廣畑 幹人 (HIROHATA, Mikihiro)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50565140

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

佐野 雄二 (SANO, Yuji)