レーザピーニングによる高張力鋼溶接部の残留応力と疲労寿命の変化

大阪大学　接合科学研究所　正会員　○崎野　良比呂
大阪大学大学院　吉川　健一
東芝　電力システム社　佐野　雄二
大阪大学　接合科学研究所　正会員　金　裕哲

１．目的　レーザピーニングは、水等の透明媒質中に設置された材料に数 ns～数十 ns のパルス幅のレーザを照射して高圧のプラズマを発生させ、その衝撃力を利用して材料表面の強度上昇を図る技術である。レーザピーニングを行うと、材料の表面に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いる[1)]。また、この圧縮残留応力の生成によって、溶接部の疲労寿命の延長効果も期待されている。溶接構造用圧延鋼材（SM490）では、レーザピーニングによって溶接止端部に圧縮残留応力が生成され、溶接部の疲労寿命が延びることが明らかとなってきている[1)]。しかし、レーザピーニングの普通鋼に比べ強度および硬度の高い高張力鋼にたいする効果は明らかにされていない。本稿では、レーザピーニングによる高張力鋼(HT780）のすみ肉溶接部の表面残留応力と疲労寿命の変化について検討した結果を報告する。

２．残留応力の変化　試験体は、厚さ 9mm の板に厚さ 6mm のリブを脚長 6mm で全周すみ肉溶接を施したもので、鋼種は共に HT780（σ_Y＝804MPa, σ_U＝823MPa）である。溶接法は炭酸ガスアーク溶接とし、溶接材料は 780MPa 級鋼用ソリッドワイヤを用いた。形状・寸法を Fig.1 に示す。ただしリブは、X線回折による残留応力測定時の障害となるため、すみ肉溶接の実測の脚長である高さ 8mm の位置でワイヤーカットにより切断した。

まず、Fig.2 に示すリブ先端回し溶接部の A～H 点で示した位置の残留応力を測定した。その後、試験体の回し溶接部 2 ヵ所にレーザピーニングを 40mm×20mm の範囲で施し、再び同じ位置の残留応力を測定した。レーザピーニングの照射条件は、普通鋼に適用した条件と同様で、パルスエネルギー:200mJ, スポット径:0.8mm, 照射密度:3,600Pulse/cm^2, 照射周波数:60Hz とした。照射時には、供試材を載せたステージを移動させながら 0.17mm ピッチでパルスレーザを照射し、1 ライン照射した後に折り返して 0.17mm 下のラインを照射した。照射時のステージの移動方向は Fig. 1 での x 方向である。測定結果を Fig.3 と Fig.4 に示す。σx が x 方向（リブと直角方向）の残留応力成分、σy が y 方向（リブと平行方向）の残留応力成分である。レーザピーニングを施す前（○, △印）は、試験体の端部に近い A,E 点で-100MPa 以上の圧縮残留応力が測定されたが、その他の点では 0MPa 前後であった。

これに対しレーザピーニング後（●, ▲印）は、ピーニングを施して

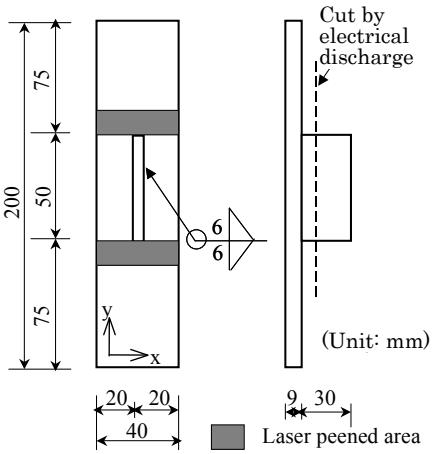


Fig.1　Fillet weld specimen

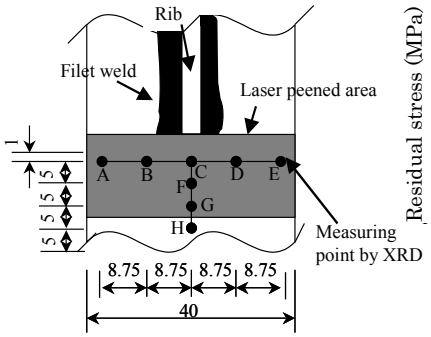


Fig.2　Measuring point of XRD

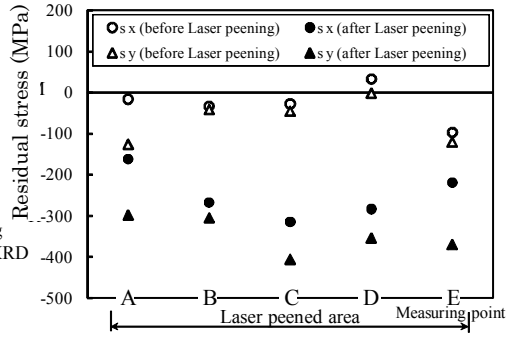


Fig.3　Residual stress (A,B,C,D,E)

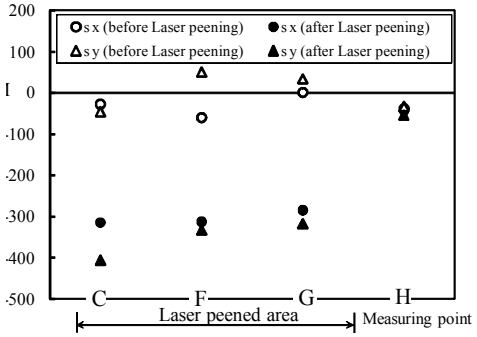


Fig.4　Residual stress (C,F,G,H)

キーワード　レーザピーニング　高張力鋼　残留応力　疲労強度　隅肉溶接
連絡先　〒567-0047　大阪府茨木市美穂ヶ丘１１－１　大阪大学　接合科学研究所　ＴＥＬ06-6879-8667

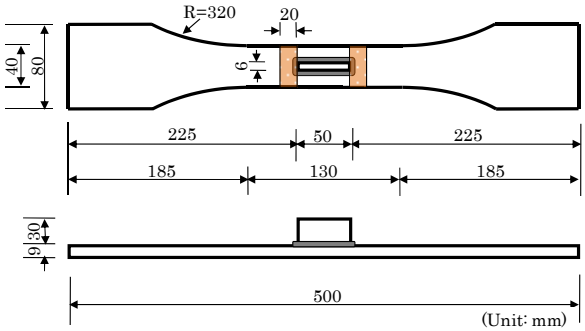
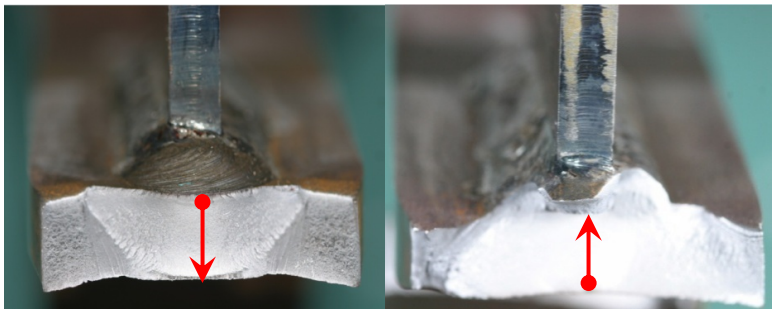


Fig.5 Fillet welding specimen



(a) NP, LP (Δσ≧450) (b) LP (Δσ=350 and 400MPa)

Fig.6 Fracture surface

いない H 点における残留応力は変化が無かったが、ピーニングを施したその他の点（A～G 点）では-150～-400MPa の大きな圧縮の残留応力が測定された。さらに、溶接止端に近いほど圧縮の残留応力の変化量は大きく、特に、疲労き裂の起点となる止端部に最も近い C 点でピーニング前と後の残留応力の変化量が最も大きい。これらより、溶接止端部も大きな圧縮の残留応力となっていると推定される。

３．疲労強度向上効果　疲労試験に用いた試験体の形状・寸法を Fig.5 に示す。鋼材・溶接材料共に前章と同じである。この試験体の回し溶接部 2 ヵ所に前章と同様の条件および方法でレーザピーニングを施した。この試験体を応力範囲 Δσが 200～600MPa の完全片振り疲労試験に供した。比較のためレーザピーニングを施していない試験体も同様の試験に供した。レーザピーニングを施していない試験体(NP と称す)とレーザピーニングを施した試験体(LP と称す)の破断面の写真を Fig.3 に示す。NP はすべて応力集中部である止端部からき裂が発生した。LP も 450MPa 以上では止端部からき裂が発生した。しかし、応力範囲 350MPa と 400MPa では、止端部からき裂が発生するという予想に反し、裏面からき裂が発生した。この様に、レーザピーニングを施すことによって、高張力鋼溶接部では応力範囲の大小によってき裂発生位置が変化し、比較的小さな応力範囲では応力集中のない裏面からき裂が発生することが明らかとなった。

疲労試験の結果から得た S-N 線図を Fig.7 に示す。NP は Δσ=200MPa では 3 体とも破壊せず 10^7 回に達したが、Δσ=250MPa で 3 体のうち 2 体が 10^7 回以下で疲労破壊した。Δσ=300MPa 以上ではすべて 10^6 回以下で疲労破壊した。これに対し、LP は、Δσ=300MPa でも 2 体とも破壊せず 10^7 回に達した。Δσ=350MPa では 2 体とも疲労破壊したが、寿命は 4×10^6 回以上であった。さらに，応力範囲 350MPa と 400MPa では止端部ではなく裏面からき裂が発生していることから、レーザピーニングを施した止端部の疲労限は、350Mpa 以上である可能性がある。これより、NP の 10^7 回疲労強度は 200MPa 、LP の 10^7 回疲労強度は 300MPa 以上であると考えられ、レーザピーニングを施すことにより 10^7 回疲労強度が少なくとも 1.5 倍になることが明らかとなった。LP も Δσ=400MPa 以上では 10^6 回以下で疲労破壊したが、いずれの応力範囲でも LP の疲労寿命は NP より向上した。また、NP と LP の疲労寿命の比は、Δσ=600MPa で約 1.5 倍，500MPa で約 3 倍，450MPa で約 4.5 倍，400MP a で約 7.5 倍，350MPa で約 54 倍と、応力範囲が小さいほど寿命比が大きくなる傾向が見られた。

４．まとめ　(1)普通鋼で用いたピーニング条件により、高張力鋼の回し溶接止端部にもレーザピーニングにより、大きな圧縮の残留応力が生成される。(2)レーザピーニングを施した高張力鋼回し溶接試験体では、応力範囲の大小によってき裂発生位置が変化し、比較的小さい応力範囲では応力集中のない止端部の裏面からき裂が発生する。(3)高張力鋼回し溶接止端部の疲労限は、レーザピーニングを施すことによって少なくとも約1.5倍になる。(4)レーザピーニングによる高張力鋼溶接部の疲労寿命の延長効果は応力範囲が小さいほど大きい。

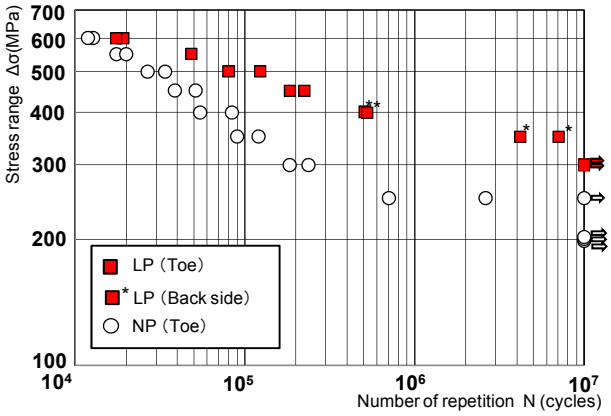


Fig.7　S - N diagram

謝辞　本研究は JFE21 世紀財団「大学研究助成」の補助を受けた。ここに深く感謝致します。

参考文献　1) SAKINO Yoshihiro, SANO Yuji and KIM You-Chul : Improving Fatigue Strength and Its Main Factor of Butt Welded Joints by Laser Peening, Proc. of National Symp. on Welding Mechanics and Design, (2009), 463-469.