

した。あらかじめ用意した板材にメルトランを実施し、レーザ溶融が板裏側に到達した状態をレーザ接合の適正条件とした。レーザ溶接継手の形状確認のため、レーザ顕微鏡で突き合わせレーザ溶接継手の表裏を観察した。溶接継手表側の溶接部には平均 $50\mu\text{m}$ のくぼみが観察され、溶接継手裏側には平均 $140\mu\text{m}$ の突起部が存在した。表裏の形状の違いは、表側は溶融によりくぼみとなり、裏側は溶融した金属が重力により突き出したと考えられた。

引張試験は試験機容量 100kN の島津製作所オートグラフ AG-10 を用い、試験速度 0.5mm/sec 、破断まで一定速度で実施した。疲労試験は室温 23°C に空調した室温大気中で実施した。軸力負荷試験は、試験機容量 100kN のサーボ式油圧疲労試験機（島津製作所製）を使用し、周波数 1Hz 、応力比 $R=-1$ で行った。平面曲げ負荷試験は、試験機容量 25kN のモータ起動による疲労試験機（東京衡機製、PBF60型）を使用し、周波数 25Hz で行った。応力比は $R=-1$ と 0 の2条件である。

軸力負荷用疲労試験片は、全長 150mm 、幅 20mm 、 $R40\text{mm}$ 、最小幅 10mm 、平面曲げ負荷用疲労試験片は、全長 90mm 、幅 30mm 、 $R45\text{mm}$ 、最小幅 20mm である。いずれの試験片も溶接部が中央となるように試験片加工し、レーザ入力側に試験片の刻印を打痕した。平面曲げ負荷試験では試験片の取り付けは、刻印がある溶接継手表側（レーザ入力側）を上向きにして取り付けた。平面曲げ疲労の試験機の構造上、平均応力が高い $R=0$ の試験では、溶接継手裏側の最表面が最大応力となる。また、溶接継手は表側と裏側で形状が異なるので、溶接継手表側（レーザ入力側）を下向きにして取り付けた $R=0$ の平面曲げ疲労試験も実施した。

3. 実験結果と考察

3. 1. 引張試験結果

レーザ溶接継手から採取した3本の引張試験は強度延性にバラツキもなく引張強度の平均値は 1218MPa 、伸び 23.8% で、母材の引張強度 1220MPa 、伸び 18% とほぼ同程度強度と延性であり、破断位置は母材部であった。強度・延性も母材と同等であり、破断位置が母材部であることから、今回の突き合わせレーザ溶接継手は適正に接合されている。

3. 2. 母材（酸洗まま）の疲労試験結果

前報では主に 1180MPa スクラップ鋼板の鏡面研磨した試験片を用いて疲労試験を行い、 10^7 回疲労強度が他の鉄鋼材料の強度と同様に、母材の引張強度の約 $1/2$ であることを示した。本研究では母材を受け入れ状態の酸洗ままの表面をレーザ溶接することから、酸洗ままの母材の疲労強度特性を評価した。平面曲げ疲労試験データは材料の弾塑性特性から推定した応力値で整理すると軸荷重試験と一致する。Koe ら⁶⁾はこの方法で必要となる材料の弾塑性特性、すなわち繰返し変形における応力-ひずみ関係のパラメータを多くの材料を対象として評価し、種々の疲労強度が統一的に整理できることを示した。Fig.1 に Koe らの手法で応力補正した SN 特性を示す。 $R=-1$ の疲労限は 450MPa 、 $R=0$ の疲労限は 340MPa であった。Fig.2 に鏡面研磨試験片と酸洗ままの試験片の疲労限度線図を示す。酸洗ままの $R=0$ の試験結果は修正 Goodman 線近傍となる結果が得られている。以降、本研究の平面曲げ疲労試験結果は、Koe らの手法で補正した応力値を用いる。

3. 3. レーザ溶接継手の疲労試験結果

3. 3. 1. 応力比 $R=-1$

Fig.3 にレーザ溶接継手の応力比 $R=-1$ 疲労試験の実

験結果を示す。図中の \circ , \triangle , \square は3つの異なる継手板から採取した試験片による平面曲げ疲労試験結果を示し、 \blacksquare は軸疲労試験結果である。軸疲労試験は試験速度が 1Hz のためプロットは3点と少ないが、高応力側の破断寿命は平面曲げ疲労試験の破断寿命と良く一致した。一方、長寿命領域では軸疲労試験では $\sigma_a=300\text{MPa}$ で 10^7 回未破断であるのに対して、曲げ負荷はバラツキが大きくなり、 10^7 回未破断は、 246.6MPa で未破断3、破断が2本あった。Fig.4 に L0304 試験片 ($\sigma_a=246.6\text{MPa}$, $M=9.1 \times 10^5$) の SEM による破面観察結果を示す。SEM 像は全体像の上側が溶接継手表側（レーザ入力側）に相当する。通常平面曲げ疲労試験の $R=-1$ の応力条件では、両側の最表面で最大応力となるため、両側の表面から疲労き裂が発生し、疲労き裂は中央で合体する。しかし、レーザ溶接継手の破面は、Fig.4 の全体像の下側に位置する溶接継手裏側に存在する大きな欠陥から発生し、全体像の上側すなわち溶接継手表側（レーザ入力側）に相当する最表面近傍で疲労き裂が合体していた。同様に疲労破壊した他の試験片破面も継手

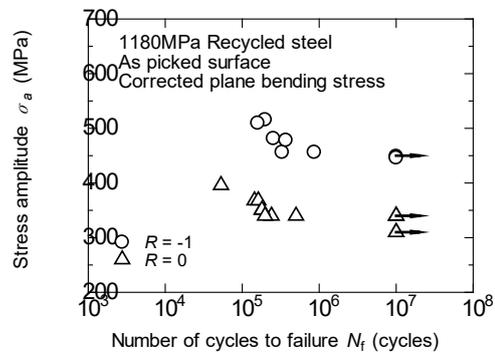


Fig.1 Result of corrected plane bending fatigue test of base material of 11801MP recycled steel.

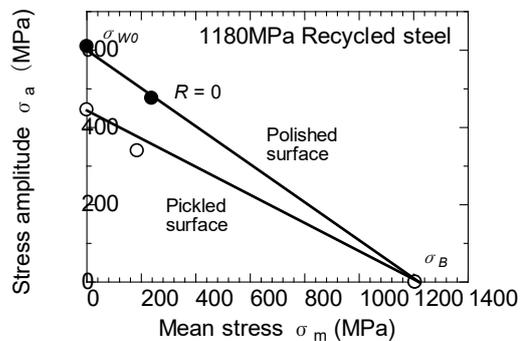


Fig.2 Fatigue limit diagram.

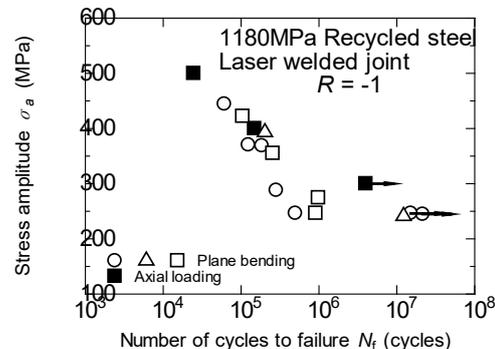


Fig.3 $R=-1$ fatigue test results for 1180 recycled steel plate laser welded

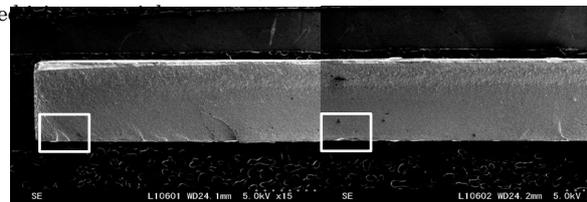




Fig.4 SEM observation results of fatigue fracture surface($R=-1$, $\sigma_a=246\text{MPa}$, $N_f=9.1 \times 10^5$ cycles). Maximum defect size, $\sqrt{\text{area}}=282 \mu\text{m}$.

裏側の欠陥を起点として継手表面に相当する最表面近傍で合体していた。

レーザー溶接継手のレーザー頭微鏡断面観察では、刻印がある溶接継手表側（レーザー入力側）に $50\mu\text{m}$ 程度のくぼみが観察され、溶接継手裏側には $140\mu\text{m}$ の突起が観察されたが、疲労破面の観察結果(Fig.4)から、溶接継手表側にはレーザー頭微鏡では検出できない深さ $100\mu\text{m}$ の欠陥がスリット状に存在している部位もあると考えられる。したがって、 $R=-1$ の平面曲げ疲労試験で疲労き裂の合体が中央ではなく、溶接継手裏側が疲労起点となった理由として、突起に沿って存在する $100\mu\text{m}$ のくぼみが応力集中源になったと考えられる。

3. 3. 2. 応力比 $R=0$

Fig.5 に $R=0$ の疲労試験結果を示す。図中の○, △, □は溶接継手表側（レーザー入力側）を上向きに取り付けた平面曲げ疲労試験結果を示し、■は軸疲労試験結果である。軸疲労試験は試験速度が 1Hz のためプロットは6点と少ないが曲げ疲労試験結果とよく一致した。平面曲げ疲労試験結果は3つの異なる継手板から採取した試験片(○, △, □)で、破断寿命にばらつきがほとんど無い。通常、溶接継手の疲労強度は溶接欠陥（ボイドや未溶融部）や溶接余盛り、溶接止端部の応力集中や残留応力の個体差などの影響により、破断寿命にばらつきが生じる場合がある。一方、本結果は疲労寿命のばらつきが比較的少なく、残留応力の影響は小さいものと考えられる。溶接継手表側（レーザー入力側）を上向きに取り付けた $R=0$ の平面曲げ疲労試験で破断した全ての試験片では、疲労起点はレーザー溶接継手裏側の深さ $100\mu\text{m}$ の欠陥であった。

疲労試験前のレーザー頭微鏡観察結果の通り、レーザー入力面とその裏面では溶接欠陥の様態に差異がある。そこで、平面曲げ疲労機への試験片の取り付けとして、溶接継手表側（レーザー入力側）を下向きに取り付け、溶接継手表側（レーザー入力側）で最大曲げ応力が付与される疲労試験を実施した。Fig.6 にレーザー入力面を最大応力とする疲労試験結果を●で示す。さらに、図中に酸洗ままの母材の疲労強度(×)を示す。溶接継手表側を上向きに取り付けた平面曲げ疲労試験結果(○, △, □)は疲労限度は 250MPa で SN データはばらつきが小さい。一方、溶接継手表側を下向きに取り付けた試験結果(●)は、SN データはばらつき、短時間で破断する試験も2点存在するが、疲労限は酸洗ままの母材(×)と同じ 340MPa と著しく改善した。Fig.7 に溶接継手表側を下向きに取り付けた疲労試験の破面を示す。起点は

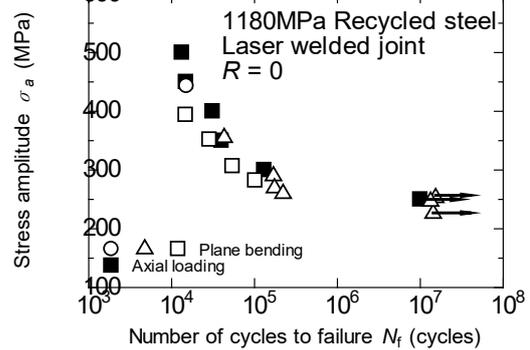


Fig.5 $R=0$ fatigue test results for 1180 recycled steel plate laser welded joint material

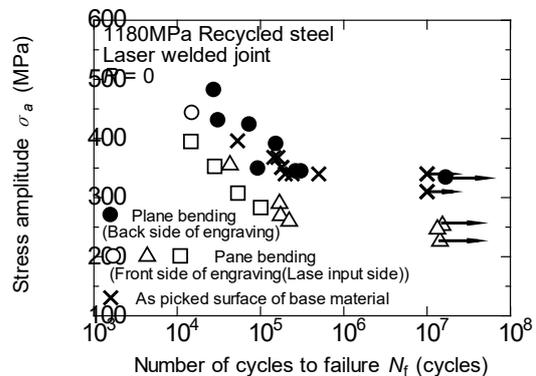


Fig.6 $R=0$ fatigue test results for 1180 recycled steel plate laser welded joint material. For open marks, the specimen was mounted with the engraved side facing up. For solid marks, the specimen was mounted with the engraved side facing down.

溶接継手表側（レーザー入力側）で疲労起点は刻印側であり、起点部には欠陥らしいものは見当たらない。Fig.8 に $\sigma_a=349\text{MPa}$ で試験した短時間で破断した試験片の疲労起点部を示す。疲労起点は刻印側であるが、深さ $220\mu\text{m}$ の大きな欠陥が存在していた。 $\sqrt{\text{area}}$ は $298\mu\text{m}$ である。SN データのばらつきはこの様な大きな欠陥が存在していたためと考察された。これまでレーザー溶接継手の疲労特性については、寿命の大部分がき裂進展過程で占められていることが報告されている^{7), 8), 9)}。溶接継手表側を上向きに取り付け平面曲げ疲労試験(○, △, □)でばらつきが小さい要因として、レーザー

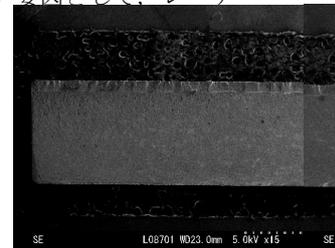
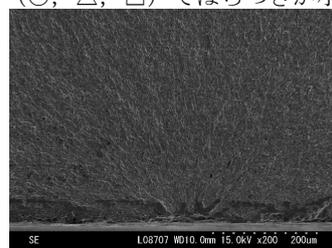




Fig.7 SEM observation results of fatigue fracture surface ($R=0$, $\sigma_a=365\text{MPa}$, $Mf=3.08 \times 10^5\text{cycles}$).

入力裏側に存在する深さ $100\mu\text{m}$ の比較的大きな欠陥が疲労起点となるため、き裂発生寿命が短く、疲労き裂進展寿命が支配的であると考えられる。一方、疲労強度が高い溶接継手表側を下向きに取り付けた疲労試験 (●) では、欠陥がほとんど無く表面からわずかな凹から疲労破壊が発生するためき裂発生寿命が長くなり結果的に疲労寿命が改善された。また、ばらつきについてはレーザー入力側でもまれに比較的大きなくぼみが存在した場合に寿命が短くなる。これらの結果からレーザー溶接継手は母材の強度を損ねない優れた溶接施工法であることを示している。

緒言で述べた通り、TB は主に内板に適用され、近年、外板にも一部使用されているが、今後ますます外板への適用が増加すると考えられる。外板に適用される場合、軸応力より曲げ応力が負荷される場合が多いと考えられる。レーザー接合部のレーザー入力側を車体外側 (最大曲げ応力側) にすることにより、優れた耐疲労特性を発現できる。近年の車体製造において、車体のルーフ (屋根材) をレーザー接合している車両もあり、外側から照射してレーザー接合すれば、優れた曲げ疲労特性を示すことが期待される。-

4. 結言

1180MPa 級リサイクル鋼板の突き合わせレーザー溶接継手を作製し、引張試験を実施した。また、荷重方式の異なる 2 種類の疲労試験を実施した。これらの結果から、1180MPa 級鋼リサイクル鋼の突き合わせレーザー溶接継手の強度特性が明らかになった。

(1) 本供試材の引張特性は、引張強度 1218MPa 、伸び 23.8% で、母材とほぼ同程度の強度延性であり、溶接部に異常はなく適正に接合されている。

(2) 母材 (酸洗まま) の 10^7 回未破断応力は、応力比 $R=-1$ は軸負荷、曲げ負荷ともに 450MPa であった。また、曲げ疲労試験の $R=0$ の 10^7 回未破断応力は 370MPa であり、疲労限度線図において修正 Goodman 線と重なったことから、本供試材の酸洗材の疲労強度も疲労限度線図で評価できる。

(3) 突き合わせレーザー溶接継手の $R=-1$ の疲労強度は低寿命では軸負荷、曲げ負荷で一致するが、長寿命域ではばらついた。曲げ負荷の疲労破壊破面は、レーザー入力裏側の約 $100\mu\text{m}$ の欠陥を起点として継手表面に相当する最表面近傍で合体していた。疲労限は 250MPa である。

(4) 突き合わせレーザー溶接継手の $R=0$ の疲労強度は軸負荷、曲げ負荷で良く一致し、疲労限は 250MPa である。

(5) レーザー入力側を最大応力側にして平面曲げ疲労試験機に取り付けた応力比 $R=0$ では疲労限は 340MPa と飛躍的に改善され、酸洗ままの母材と同じ疲労強度が得られる。

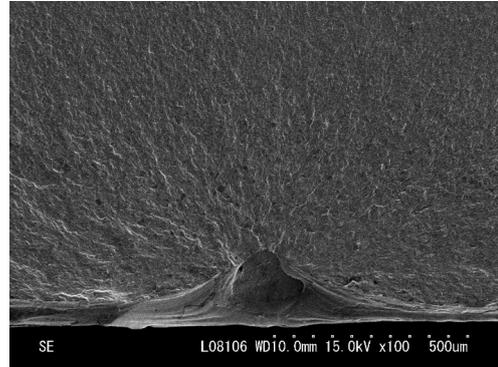


Fig.8 SEM observation results of fatigue fracture surface ($R=0$, $\sigma_a=349\text{MPa}$, $Mf=9.34 \times 10^4\text{cycles}$).

参考文献

- 1) (1) 森清和, 「自動車ボディへのレーザー溶接適用」, 溶接学会誌 72 (2003), 40-43
- 2) 樽井大志, 「自動車におけるレーザー加工技術の活用」, 精密工学学会誌 84 (2018) 404-407
- 3) 宮崎康信, 巽雄二郎, 泰山正則, 「自動車産業におけるレーザー加工技術の進歩」, レーザ加工学会誌 26(2019), 13-22
- 4) 中尾敬一郎「サイドパネルアウターへのテーラードブランクの適用」. 第 81 回レーザー加工学会講演論文集 (2014) ,75-78
- 5) 長島伸夫, 早川正夫, 長井寿, 升田博之, 中西栄三郎, 中西宣文, 岩崎勝, 「1180MPa 級のリサイクル鋼板の疲労強度に及ぼす荷重様式の影響」, 自動車技術会論文集, 53 (2022), 815-820
- 6) S.Koe, H.Nakamura, T.Tamenari and T.Okada, J. Soc.Mater.Sci.,Jpn, 32(1983), 522
- 7) 戸梶恵郎, 塩田裕久, 皆木亜由美, 宮田尚志, 「レーザー突き合わせ溶接継手の疲労強度」, 鉄と鋼, 85(1999), 66-70
- 8) 皆木亜由美, 戸梶恵郎, 「レーザー突き合わせ溶接継手の疲労き裂進展特性」, 鉄と鋼, 86(2000), 51-56
- 9) J.R.Hwng, J.L.Doong and C.C.Chen, Mater. Trans., JIM, 37(1996),1443