

高張力鋼板曲げ加工部の残留応力と疲労寿命に及ぼす レーザー局所加熱の影響

広島大学大学院 先進理工系科学研究科
准教授 日野 隆太郎

(2019 年度 一般研究開発助成 AF-2019033-B3)

キーワード：高張力鋼板，曲げ加工，レーザー局所加熱，疲労寿命

1. 研究の目的と背景

自動車の足回り部品などの高張力鋼板曲げ加工製品において、疲労特性に及ぼす残留応力の悪影響が問題視されることがある。一般に曲げ加工を受けた板材の曲げ部内側表面には引張残留応力が生じており（図1 (a), (b)参照），この引張残留応力が成形品の疲労寿命に悪影響を与えると考えられている。そこでレーザー照射により曲げ部を局所加熱し引張残留応力を低減させたり疲労寿命を向上させたりするといった対策法がある（同図(c)参照）。しかし、レーザー照射に伴う曲げ部残留応力の変化、レーザー照射条件と曲げ部疲労寿命の関係などは未知の部分も多い。

そこで本研究では、高張力鋼板曲げ加工部のレーザー局所加熱が残留応力や疲労寿命に及ぼす影響について基礎的な調査を行うことを目的としている。強度レベルの異なる数種の高張力鋼板に単純なV曲げ加工を施して曲げ部の外側表面にレーザー照射を行い、曲げ疲労試験を行ってレーザー局所加熱が疲労寿命に及ぼす影響を調査した。またレーザー局所加熱に伴う曲げ部残留応力の変化を実測するとともに、硬さ分布や組織変化についても調査し、これらの因子と疲労寿命との関連を考察した。

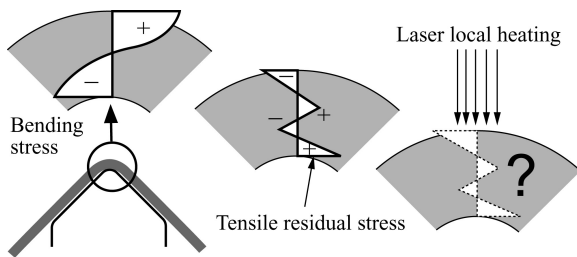


図1 V曲げ加工部の応力分布とレーザー局所加熱の模式図

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片

3種の高張力鋼板 SPFC590Y, 780Y, 980Y を供試材として用いた。いずれも板厚 1 mm の 2 相鋼板である。供試材の機械的特性を表 1 に示す。試験片形状は図 2 に示すとおりであり、ワイヤカット加工で作製した。試験片長手方向と圧延方向を一致させた。

表 1 供試材とその機械特性

	SPFC590Y	SPFC780Y	SPFC980Y
	0°/45°/90°	0°/45°/90°	0°/45°/90°
YS [MPa]	415.2/415.6/416.4	502.1/497.0/514.9	623.2/694.6/702.2
TS [MPa]	628.4/630.6/634.7	827.8/824.4/830.4	993.7/1081/1096
r value	0.92/0.89/0.91	0.67/0.72/0.69	0.75/0.85/0.82

*YS: Yield Stress, TS: Tensile Strength

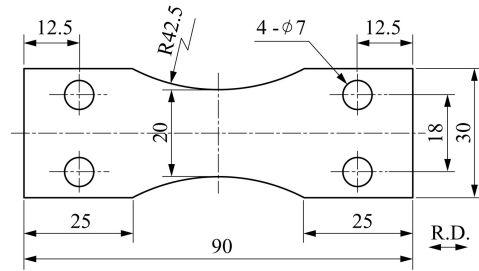


図2 V曲げおよび曲げ疲労試験片形状（単位：mm）

2.2 V曲げ加工

図3に示すようなV曲げ加工を実施した。パンチ幅 W_p とダイス幅 W_d はともに 22 mm，パンチ先端半径 R_p は 1 mm，パンチ先端角度は 90° である。V曲げにおいてパンチで板材を強圧下するボトムングは行わず，パンチ-ダイス間クリアランスが板厚の 1.2 倍となった時点で曲げを停止し，直ちに除荷した。パンチ速度は $0.03 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ とした。その後，次節に述べる要領で曲げ部のレーザー局所加熱を行った。

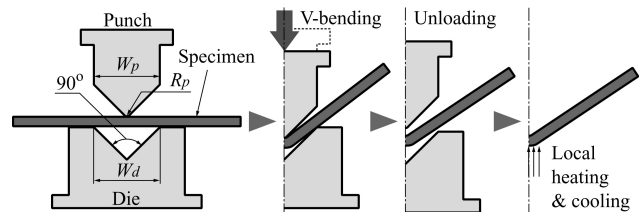


図3 V曲げ加工概略図

2.3 レーザ局所加熱

図4に示すようにV曲げ後の試験片を曲げの稜線が鉛直になるように固定し、曲げ稜線部外側表面に対してレーザ照射スポットを上方から下方へ1回スキャンして試験片幅全体に局所加熱を行い、空冷した。レーザ照射には半導体レーザ（Laserline GmbH製、LDF 6000-40）とレーザヘッド（Laserline GmbH製、LLK-Auto）を使用した。デフォーカス（焦点外し距離）0 mmのジャストフォーカスで照射スポット径は0.4 mmであり、照射スポット移動速度（スキャン速度）は $400\sim 600\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、レーザ出力は $75\sim 150\text{ W}$ の範囲で変化させた。

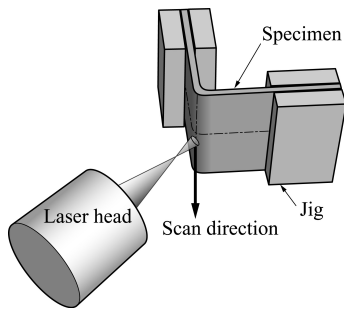


図4 レーザ局所加熱の模式図

2.4 残留応力測定

X線残留応力測定装置 μ -X360（パルステック工業株式会社製）²⁾を用いて、 $\cos\alpha$ 法によりV曲げ部内側・外側表面部における長手方向残留応力の板幅方向分布を測定した。図5に示すように曲げ中心部の外側Aと内側D、およびR止まり部の外側B・Cと内側E・Fの各線上において板幅方向に1 mm間隔で各19個の測定点を設定し、残留応力分布を求めた。X線照射スポットサイズは約0.3 mmとした。

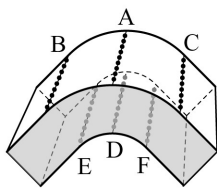
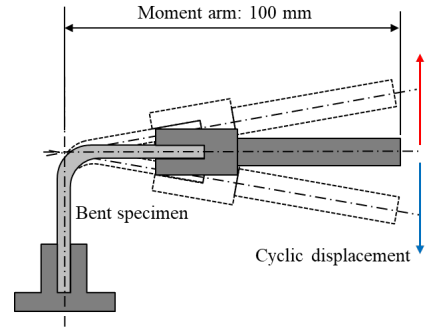


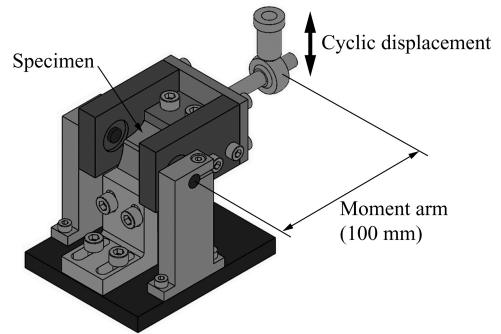
図5 残留応力測定位置

2.5 曲げ疲労試験

V曲げ加工後、およびレーザ局所加熱後の試験片に対して、曲げ変位一定方式の面外曲げ疲労試験³⁾を実施した。曲げ疲労試験の模式図を図6(a)に示す。試験は図6(b)の試験ジグを装着した油圧式サーボパルサー（株式会社島津製作所製）により実施し、繰返し速度1 Hzで両振りの曲げ変位を付与し、破断発生をもって試験を停止した。曲げ変位は図6に示す変位付与点（曲げ稜線から100 mmの位置）における変位振幅を $3.8\sim 12.5\text{ mm}$ の範囲で設定した。



(a) 曲げ疲労試験の概要



(b) 曲げ疲労試験ジグ

図6 曲げ疲労試験模式図

3. 研究成果

3.1 疲労寿命に及ぼすレーザ出力の影響

レーザ局所加熱におけるスキャン速度を $500\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ で一定としたときの、レーザ出力と曲げ疲労寿命の関係を図7に示す。図中凡例に記載した8 mm, 10 mmなどの数値は疲労試験における曲げ変位振幅である。またレーザ出力0 Wは非加熱試験片の結果を示す。

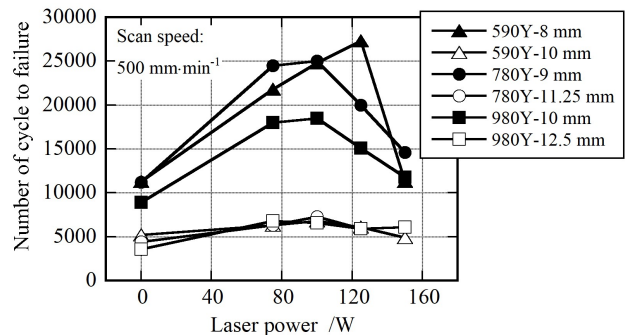


図7 曲げ疲労寿命に及ぼすレーザ出力の影響

3鋼種ともに曲げ変位振幅が小さい条件（黒塗りプロット）においては疲労寿命が大きく向上する最適なレーザ出力条件（おおむね100 W）が存在することがわかる。その最適値を超えてレーザ出力を過度に増大させるとかえって疲労寿命が低下し、非加熱試験片と同程度になることも

ある。一方、曲げ変位振幅が大きい条件（白抜きプロット）では全体的に疲労寿命が短く、レーザー出力の変化に伴う疲労寿命の変化は小さい。

3.2 疲労寿命に及ぼすスキャン速度の影響

レーザー局所加熱におけるレーザー出力を 100 W で一定としたときの、スキャン速度と曲げ疲労寿命の関係を図 8 に示す。3 鋼種ともに曲げ変位振幅が小さい条件（黒塗りプロット）ではスキャン速度を $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ としたときに疲労寿命が最も長くなった。一方、曲げ変位振幅が大きい条件（白抜きプロット）ではスキャン速度の変化に伴う疲労寿命の変化は小さい。

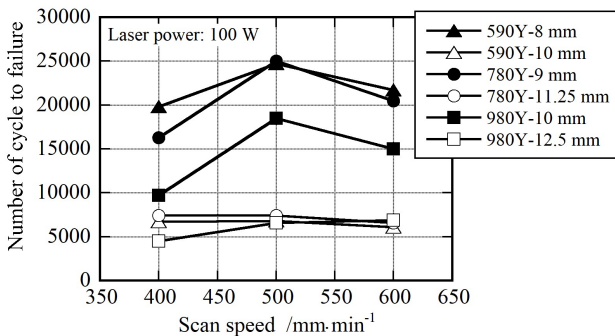


図 8 曲げ疲労寿命に及ぼすスキャン速度の影響

SPFC980Y 試験片においてレーザー出力を 100 W および 125 W としたときの、スキャン速度と曲げ疲労寿命の関係を図 9 に示す。曲げ疲労寿命に及ぼすスキャン速度の影響は、レーザー出力が変化しても定性的に同様であることがわかる。

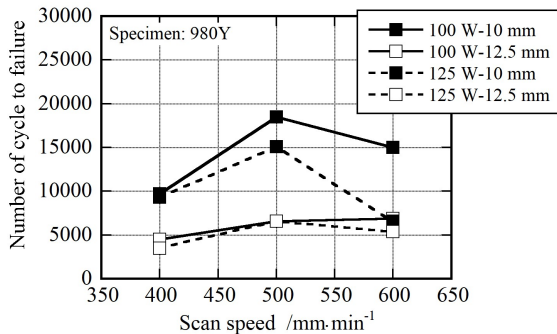
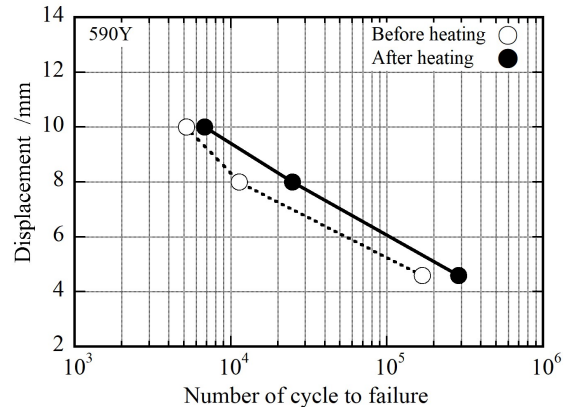


図 9 異なるレーザー出力条件下において SPFC980Y 試験片の曲げ疲労寿命に及ぼすスキャン速度の影響

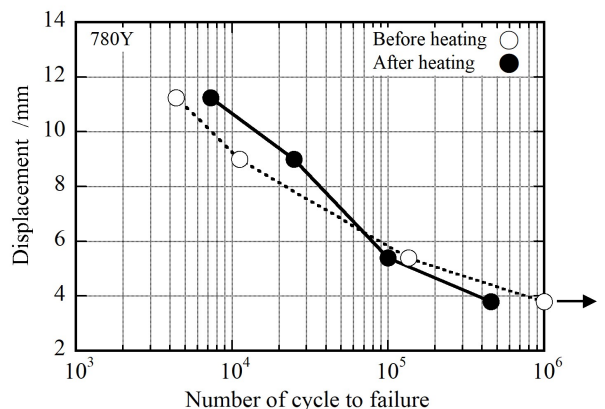
3.3 曲げ疲労寿命曲線

レーザー出力を 100 W、スキャン速度を $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ とした場合について、レーザー局所加熱前後の曲げ疲労寿命曲線を図 10 に示す（SPFC980Y 材の結果は SPFC780Y 材と類似のため省略）。曲げサイクル数が 10^6 を超えた時点で試験を終了している。曲げ変位の大きい低サイクル側では全鋼種において加熱前（白抜きプロット）よりも加熱後（黒塗りプロット）の疲労寿命の方が長くなる傾向があり、レ

ーザ局所加熱により疲労寿命が向上したことがわかる。また、鋼板強度が高いほど疲労寿命向上効果がやや大きくなる傾向が見られた。一方、曲げ変位の小さい高サイクル側では SPFC590Y 材を除く 2 鋼種においてレーザー局所加熱によりかえって疲労寿命が低下するという結果となった。



(a) SPFC590Y 試験片の場合



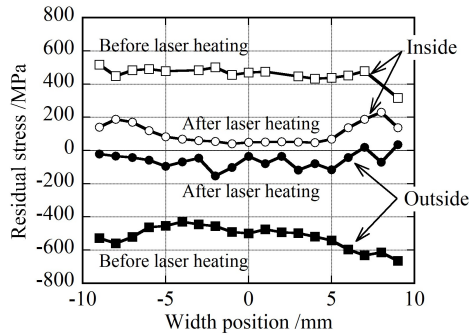
(b) SPFC780Y 試験片の場合

図 10 レーザ局所加熱前後の曲げ疲労寿命曲線（レーザー出力：100 W、スキャン速度： $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ の場合）

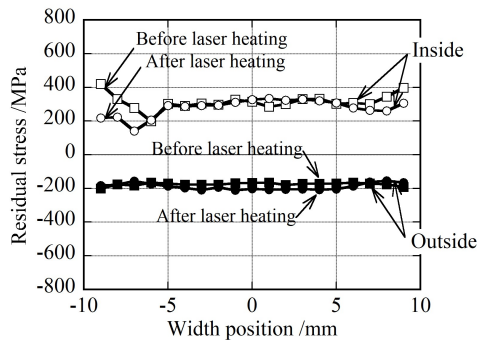
3.4 局所加熱による残留応力の変化

V 曲げ加工された 980MPa 級鋼板 SPFC980Y のレーザー局所加熱前・後に測定された長手方向残留応力の板幅方向分布を図 11 に示す。同図(a)は曲げ中心部（図 5 の A, D）の測定結果、同図(b)は R 止まり部（図 5 の B, C, E, F）の測定結果である。なお、R 止まり部については、B と C の平均値および E と F の平均値を図示している。

この結果から、曲げ中心部内側では、レーザー局所加熱前には大きな引張残留応力（平均 461 MPa）が作用しているが、加熱後には残留応力値が大幅に減少する（平均 103 MPa）ことがわかる。また、曲げ中心部外側でも加熱の影響で圧縮残留応力の絶対値が大きく減少している。一方、R 止まり部では局所加熱前の残留応力値が曲げ中心部よりも小さいこと、加熱を施しても残留応力値があまり変化しないことがわかる。



(a) 曲げ中心部における測定結果



(b) R 止まり部における測定結果

図 11 V 曲げ加工された SPFC980Y 板のレーザ局所加熱前・後における長手方向残留応力の板幅方向分布 (レーザ出力 150 W, スキャン速度 $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ の場合)

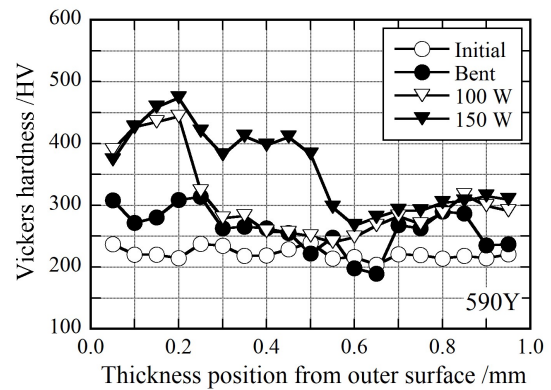
図は割愛するが、590MPa 級鋼板 SPFC590Y の残留応力は曲げ中心部内側で平均 199 MPa から平均 153 MPa へ減少となっており、SPFC980Y より残留応力変化量が小さかった。R 止まり部では SPFC980Y と同様に残留応力分布はほとんど変化しなかった。

3.5 局所加熱による硬さと組織の変化

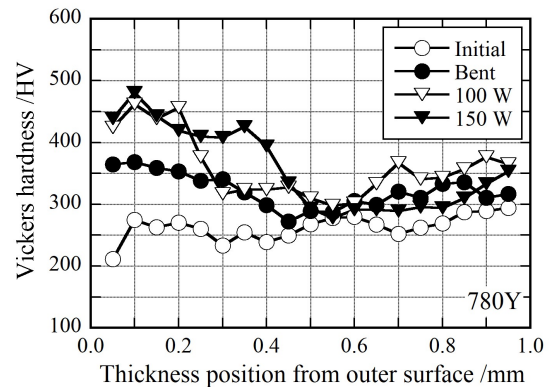
3 鋼種それぞれについて曲げ加工前 (受け入れ材), 曲げ加工後, レーザ出力 100 W および 150 W での局所加熱後 (スキャン速度は $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ で統一) の計 4 条件における試験片のビッカース硬さ分布を調査した。試験片中心線上における曲げ中心 (曲げ稜線) 位置に測定断面をとり, 曲げ外側表面から板厚方向に 0.05 mm 間隔で圧痕を打って硬さ分布を調査した。ビッカース硬さ試験の試験条件は圧子荷重を 100 gf, 荷重保持時間を 5 sec とした。

例として SPFC590Y, 780Y 材の試験片曲げ加工部中心断面におけるビッカース硬さの板厚方向分布調査結果を図 12 に示す (SPFC980Y 材の結果はこれら 2 鋼種と類似のため省略)。同図横軸には板材表側 (レーザ照射側) 表面からの距離を, 縦軸にはビッカース硬さをとっている。V 曲げ前の硬さ分布 (○プロット) は板厚方向に概ね一定で, 強度の高い材料ほど高硬度であった。V 曲げ後の硬さ分布 (●プロット) をみると, 板厚の中心部付近ではあま

り硬さに変化がなく, 板厚中心から離れて表面に近づくと硬度が高くなる傾向がある。この硬さの上昇は曲げ時の加工硬化によるものである。また, レーザ照射後の曲げ外側 (レーザ照射側) の硬さは照射前に比べて大きく上昇しているのに対し, 曲げ内側のレーザ照射後の硬さはあまり変化していないことがわかる。100 W での加熱 (▽プロット) に比べて 150 W での加熱 (▼プロット) の方が硬化する範囲が大きく, 150 W の局所加熱では板厚中心付近まで硬くなることがわかった。これらの傾向は全鋼種に共通であった。



(a) SPFC590Y 試験片の場合



(b) SPFC780Y 試験片の場合

図 12 試験片曲げ加工部中心断面におけるビッカース硬さの板厚方向分布 (スキャン速度 $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$)

次に組織観察結果の例として SPFC780Y 材のレーザ局所加熱前後の組織写真を示す。硬さ試験と同様に試験片中心線上における曲げ中心部に観察断面をとり, 曲げ加工後およびレーザ局所加熱後の組織を観察した。

図 13 は V 曲げ加工後の組織観察写真である。曲げ部外側表面 (図中 A 部), 板厚中心 (B 部), 内側表面 (C 部) の各部の組織に大きな違いはないように見受けられる。一方, 図 14 にはレーザ出力 150 W, スキャン速度 $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ でレーザ局所加熱を行った後の組織観察写真を示すが, 曲げ部外側表面のレーザ照射点から図中 A 部を経て B 部あたりまで熱影響による組織変化が生じている

ことがうかがえる。この組織変化が生じている範囲が、図 12 (b) ▼プロットの硬度上昇範囲に対応している。熱影響部において生じている変化の詳細については現時点では分析できていないが、部分的な焼入れ、再結晶による結晶粒微細化などが生じているのではないかと考えられる。

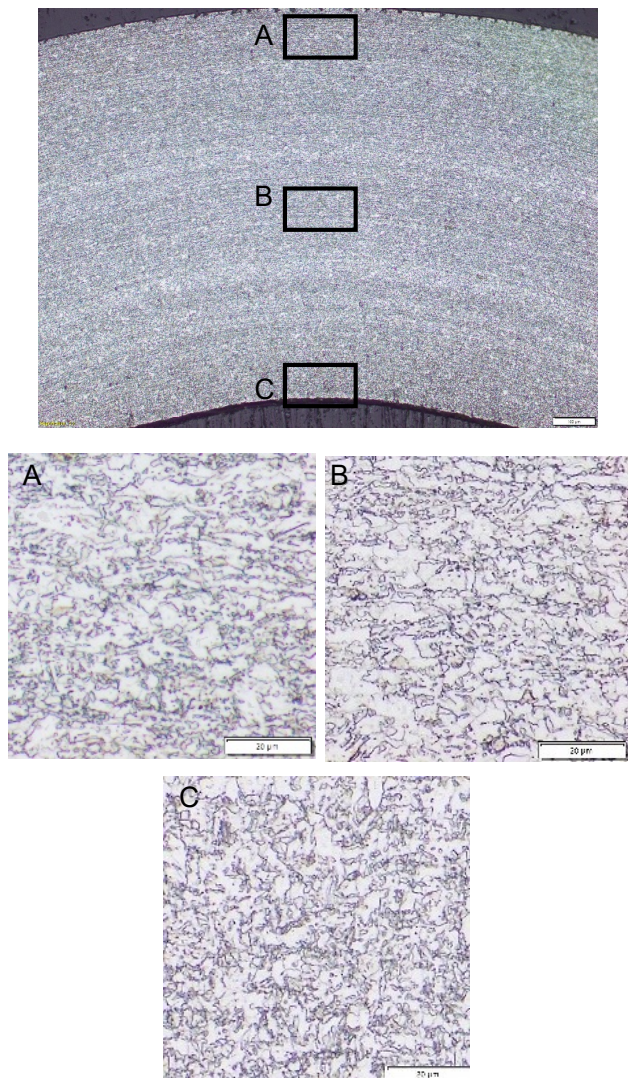


図 13 V 曲げ加工後の SPFC780Y 試験片の組織観察写真

3.6 曲げ疲労寿命に対するレーザー局所加熱の影響

以上の観察結果から、本研究でのレーザー局所加熱によって曲げ疲労寿命を向上させる効果と低下させる効果の両方が生じるものと考えられる。曲げ内側表面における引張り残留応力の減少 (図 11) は疲労き裂の発生・進展を相対的に遅らせ疲労寿命の向上に寄与するであろう。引張り残留応力が減少するメカニズムとしては、板厚方向の温度勾配に起因する熱弾塑性変形の影響⁴⁾や、加熱による転位の消失などが考えられる。また表面硬さの上昇 (図 12) や結晶粒微細化 (図 14) も疲労寿命の向上に寄与すると思われる。

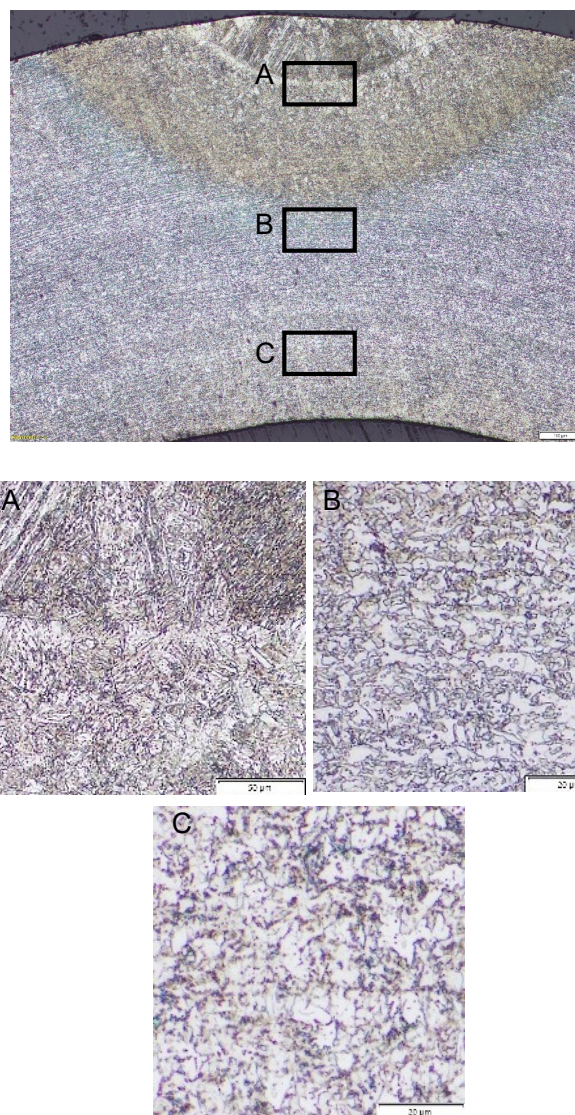


図 14 レーザ局所加熱後の SPFC780Y 試験片の組織観察写真 (レーザー出力 150 W, スキャン速度 500 mm・min⁻¹ の場合)

一方、硬化層の形成 (図 12) により板材は高強度層・低強度層の 2 層構造になるが、このような 2 層板が曲げ変形を受けると低強度層側の表面 (本研究の試験片の場合、曲げ内側表面) が相対的に早期に降伏し塑性ひずみを生じやすくなる。このことが曲げ疲労寿命にどのような影響を与えるかは未知である。またレーザー出力が高い条件では照射部表面のごく薄い層が部分的に熔融・凝固している可能性があり、これによる表面性状の変化が疲労特性に悪影響を及ぼすことも考えられる。

以上のような曲げ疲労寿命に対する影響因子のうちどれが支配的な影響を持つかは、レーザー局所加熱条件や曲げ疲労試験条件 (曲げ振幅など) により変化するものと思われるが、この点については十分な検討ができておらず、引き続き調査を進める必要がある。

4. 結び

高張力鋼板の V 曲げ加工部外側表面に対してレーザ局所加熱を行うことで、少なくとも低サイクルでの曲げ部疲労寿命は向上した。本研究の範囲内では、曲げ疲労寿命の向上効果が最大となる最適レーザ出力は 100 W、最適スキャン速度は $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ であった。一方で鋼種によっては高サイクルでの疲労寿命が加熱によりかえって低下する場合もあった。

V 曲げ加工部外側表面に対するレーザ局所加熱により、曲げ部内側表面の引張り残留応力の低減、曲げ部外側の硬化層の形成、結晶微細化などが生じ、これらが曲げ部疲労寿命に対して複合的な影響を及ぼすと考えられる。複数の影響因子のうちどれが支配的な影響を持つかはレーザ局所加熱条件や曲げ疲労試験条件により変化するものと考えられるが、これについてはまだ明らかにできておらず引き続き検討が必要である。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の 2019 年度一般研究開発助成 (AF-2019033-B3) を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表す。また、本研究の遂行にあたりレーザ装置使用に関してご指導・ご協力いただいた広島大学・山本元道教授、実験遂行に多大な協力をいただいた広島大学大学院生の足立涼斗君、錦織修一君、タイ王国 RMUTK の Komgrit Lawanwong 氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) 株式会社ワイテック, <https://www.ytec-gr.co.jp/technology/weightsaving.html>, 2023/5/20 参照.
- 2) 内山宗久: 第 324 回塑性加工シンポジウム, (2017), 17.
- 3) 大川輝・大川功: 材料, **64-12** (2015), 1026-1033.
- 4) 太田高裕・鴨和彦・朝田誠治・寺崎俊夫: 溶接学会論文集, **27-4** (2009), 307-315.