

レーザー切断した板の曲げ加工特性

電気通信大学 知能機械工学科

教授 村田 眞

(平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007004)

キーワード:レーザー, 切断, 板材, 残留応力, 再加熱

1 緒言

レーザー加工では, レーザ光線をレンズで集光し, 発生する熱によって材料を融解して加工するため, 加工面には大きな熱影響が残る. このため発生する残留応力により, 特に薄板などの場合, 工作物に曲がり, 反りなどが発生し, 製品の精度・品質に大きな影響を与えている.

レーザー加工について, 現在まで切断品質に及ぼすレーザー加工条件の影響について, 数多くの研究が行われているが^{1)~3)}, レーザ切断における被加工母材の特性に注目した研究はあまり行われていない. そこで本研究では, レーザ切断後の板材について, 金属組織観察や硬さと残留応力測定を行い, レーザ切断面の加工変質層について考察を行った. さらに, YAG レーザを用いた再加熱による残留応力の低減効果についても検証した. 本研究は, 以上について検討を行っており, また板の曲げについて検討は行っていないのが現状である.

2 実験と解析の条件及び方法

2.1 試験片

鋼板 SPCC の板材 ($t=1.2\text{mm}$) から $50\text{mm}\times 300\text{mm}$ の試験片をレーザー加工機により切り出す. SPCC 材の化学成分を Table 1 に示す. Fig.1 にレーザー加工試験片の光学顕微鏡観察と硬さ測定の方法を図示する.

Fig.2 に残留応力測定の方法⁴⁾を示すように, 片面より板の外層を逐次除去し, 残った部分に曲げを起こさせ, 曲げによる曲率の変化を測定して残留応力を計算する.

Table 1 Chemical composition of material (mass %).

Material	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu
SPCC	0.041	0.01	0.16	0.0157	0.0125	0.025	0.01

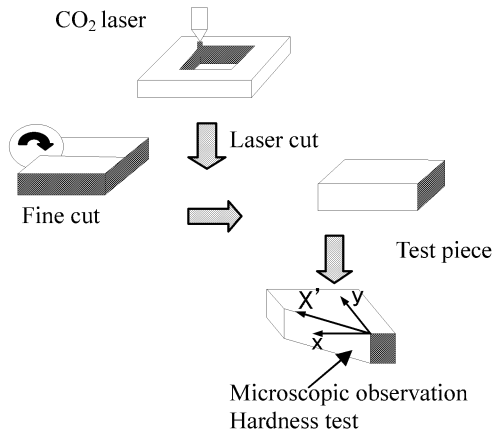


Fig.1 Schematic illustration for hardness test and microscopic observation

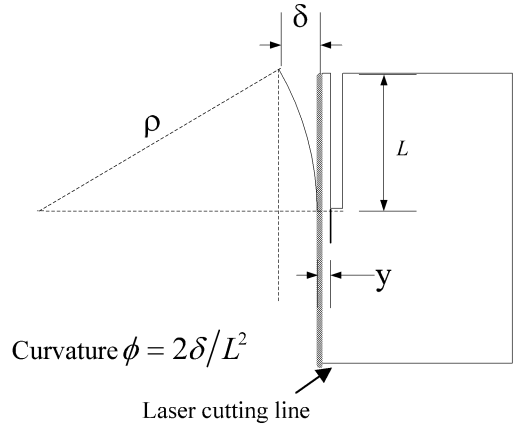


Fig.2 Measurement of residual stress

2.2 レーザ加工機

レーザー切断はアマダ製の炭酸ガスレーザー加工機を使用した. YAG レーザ処理ではアマダ製の YAG レーザ溶接機を用いた.

2.3 レーザ加工機の加工条件

レーザー加工機の場合, 加工条件が非常に多い. このため適正な加工条件の選択が難しい. 実験では切断面の形状精度が最も良い加工条件 (レーザー出力: 2.7kW , 加工速度: 5m/min , 焦点位置 = 被加工材上面, デューティ: 100% , ガス圧力: 0.8MPa , ノズル径: 0.3mm) を用い, アシストガスには窒素を利用した.

2.4 金属組織観察と硬さと残留応力の測定

金属組織の変化を考察するため, ナイタル (硝酸: 3% , エタノール: 97%) を用いて金属表面を腐食した後, 光学顕微鏡で観察する. 硬さはピッカース硬さ測定器を用いて 10g の荷重で測定した. 残留応力の測定は Fig.2 に示す機械的測定法を用いた. 炭酸ガスレーザー切断部の温度分布の測定は熱電対で行った. 熱電対の配置を Fig.3 に示す.

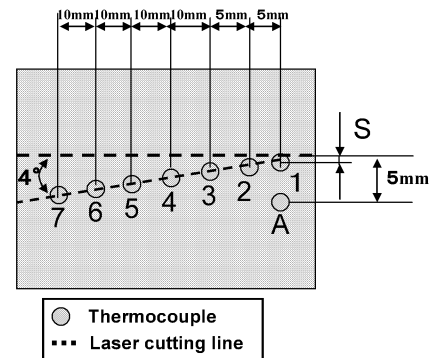


Fig.3 Measurement of temperature

3 実験結果および考察

3.1 炭酸ガスレーザー切断

レーザー加工では、発生する熱によって材料を融解して切断する。このため Fig.4 の顕微鏡による観察結果と、Fig.5 の硬さ試験結果から、切断面には熱影響が残っている。一般的な加工条件では、板厚 1.2mm の SPCC 材の場合、切断面の中央部における熱影響層の深さはほぼ 20–30 μm 程度ときわめて小さい、この熱影響層内の組織は連続的に変化しており、概略では Fig.4 のように三つの領域を考えることができる。マルテンサイトのような針状組織からなる領域 I、母材の領域 III、および両者の中間的な領域 II である。

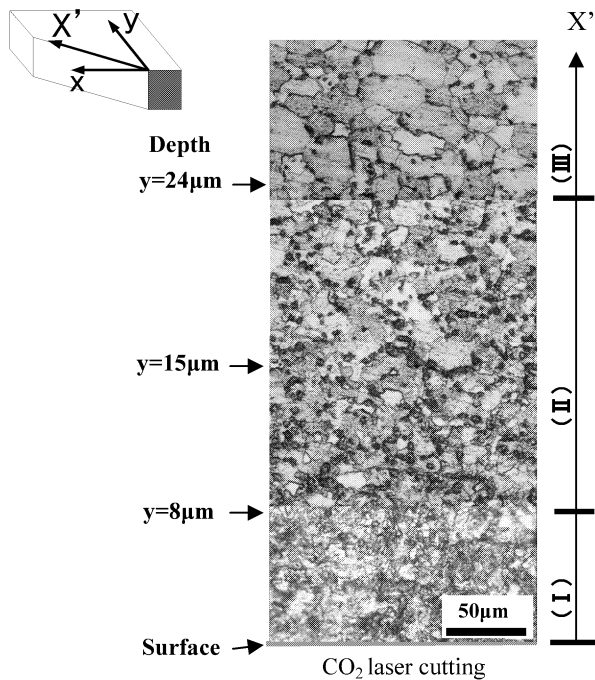


Fig.4 Microscopic observation

熱影響層の硬さ分布では、Fig.5 のようにレーザー切断された表面における硬さの平均値は $H_v=480$ であるが、母材と同等の硬さ(約 $H_v=185$)に至るまで漸次低下する。表面からの影響の深さは約 24 μm である。これらは母材と硬化表面との間の中間段階の組織と、熱影響の領域が存在しているためである。これはほぼ金属組織の観察結果と一致する。切断面の表面近傍 I では十分硬く、微細なマルテンサイトの硬化層が存在し、領域 II では中間段階組織の存在を示している。

Fig.6 は残留応力の測定結果を示す。レーザー切断では、切断面の表面近傍が急速加熱後、冷却されることによって、表面部と中心部の間の大きな温度差が生じるため、切断部近傍に引張り、幅中央部に圧縮の応力が発生する。相変態を伴う場合には、熱応力に変態応力が重畳されるので、複雑な変化をたどることが多い。しかし、Fig.4 に示すようにマルテンサイト変態はごく表面部にしか起らないため、全体としての残留応力分布は熱応力型を示す。切断部にお

いて切断中の熱勾配が大きいため、切断部近傍で応力の勾配が大きくなっている。その結果、発生する熱応力によりレーザー切断面に引張りの残留応力が存在する。その存在領域は表面下 1mm 程度にまで達し、最大値は 180MPa である。表面下 1mm から 10mm までは圧縮応力が存在し、その最大値は 80MPa である。

温度測定の結果を Fig.7, Fig.8 に示す。切断時の温度分布は熱源中心部付近で温度勾配が大きくなることを示した。特に、ビームと材料の接点である切断部で急激になり、後方へ行くに従って緩やかに尾を引くように等温線が分布する。

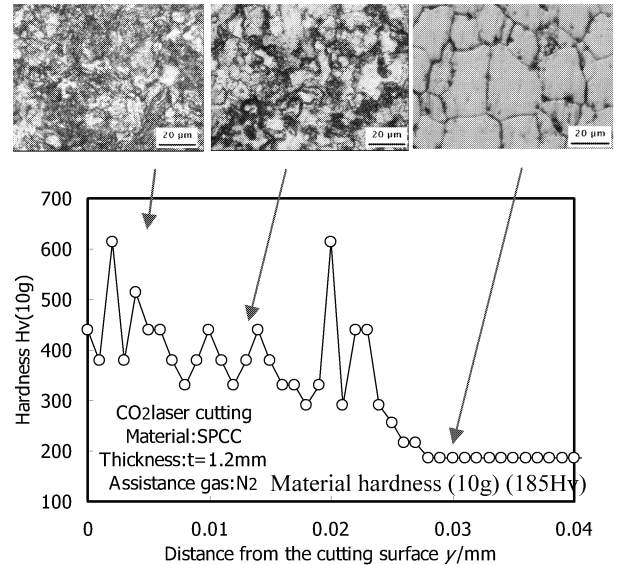


Fig.5 Hardness distribution

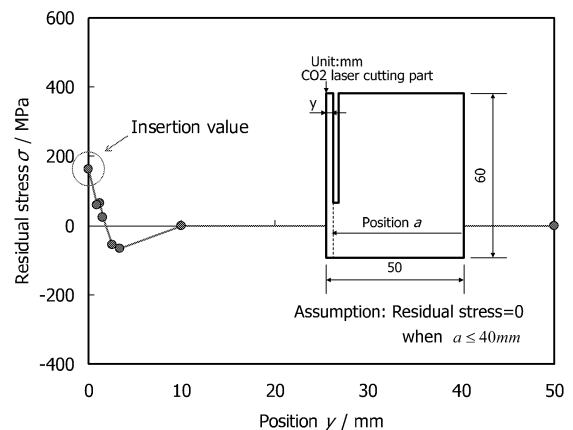


Fig.6 Residual stress distribution in laser cut plate

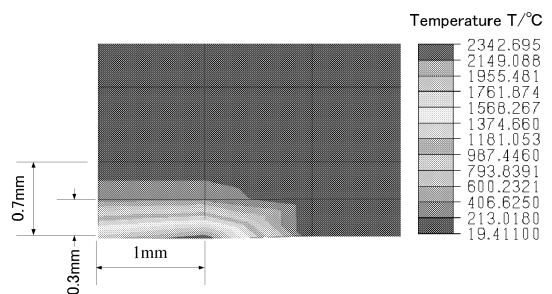


Fig.7 Temperature distribution at S=0mm

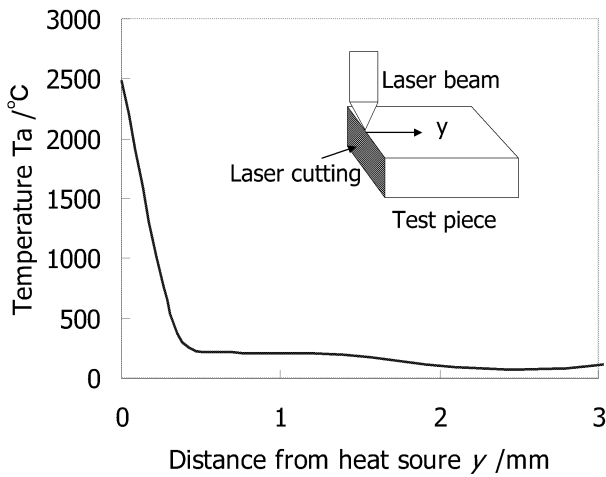


Fig.8 Temperature distribution in y direction from heat source

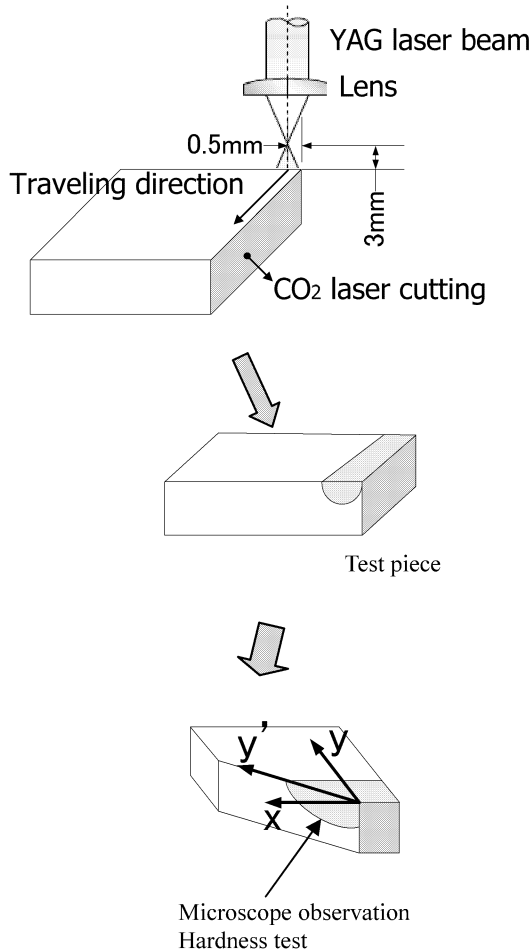


Fig.9 Schematic illustration for hardness test and microscopic observation

3. 2 YAG レーザ処理による再加熱効果

本実験では、YAG レーザの高効率で加熱できるという利点を利用し、CO₂ レーザ切断部に照射(再加熱)

実験を行い、切断部の金属組織、硬さ、残留応力にどのような影響を及ぼすかを調査した。炭酸ガスレーザー切断面から 0.5mm の位置に Fig.9 のように走査速度を 200~800m/min の範囲で変更しながら、YAG レーザ(Power:200W)による照射を行った。

Fig.10 に示すように YAG レーザ処理により熱影響層内の組織変化は熱処理前と同じように三つの領域から形成されるが、領域 I, II は処理前と比べて黒状物が少なくなり、粒径も大きくなっていることが明らかになった。これは YAG レーザ処理には焼鈍のような効果があるためと考えられる。

また、Fig.11 に YAG レーザ再加熱後の切断部の硬さ分布を示す。走査速度が硬さ分布に与える影響は少ない。Fig.5 に示す炭酸ガスレーザー切断の硬さ分布に対して、YAG レーザで再加熱した場合、全体的な硬さはほぼ一定であり、大きさは 500Hv から 300Hv までに下がった。

残留応力を Fig.12 に示す。YAG レーザによる再加熱後、引張残留応力の最大値は約 80MPa、圧縮残留応力の最大値は約 20MPa となった。YAG レーザで

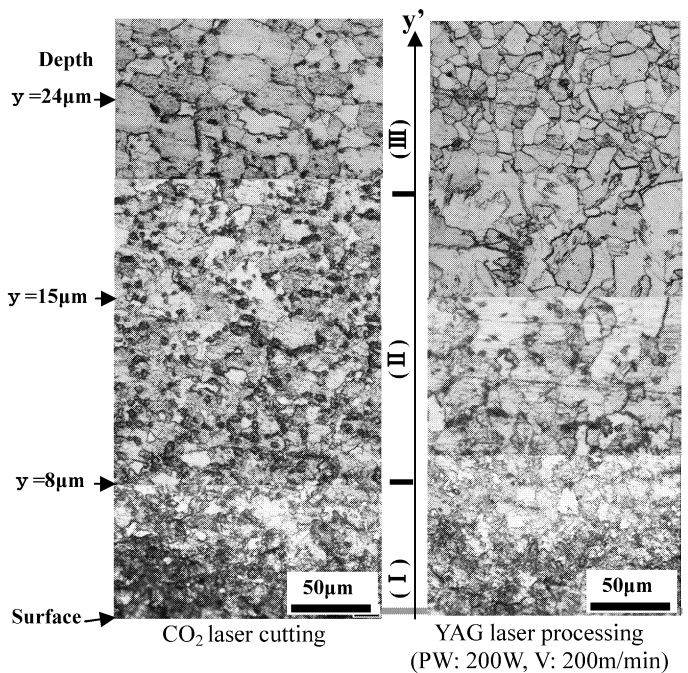


Fig.10 Microscopic observation

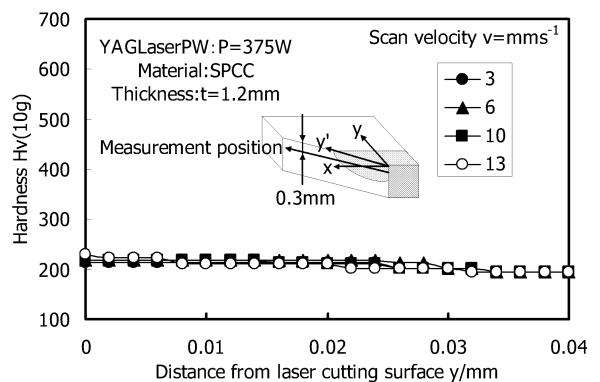


Fig.11 Influence of hardness by scan velocity

再加熱する前に比べると引張・圧縮残留応力はそれぞれ 100MPa, 60MPa 低減することができた. これは YAG レーザ再加熱による応力除去焼鈍した効果である. 以上より YAG レーザ照射による再加熱によって, 残留応力を低減できることが確認できた.

残留応力をさらに低減できる YAG レーザ再加熱で切断部の温度測定を行った. その結果を Fig.13 に示す. Fig.13 から YAG レーザ再加熱中心部付近の温度は 673°C であることから, 応力除去焼きなまし⁵⁾ と同じような応力除去効果が確認された.

4 結言

レーザ切断面の加工変質層について金属組織観察, 硬さ, 温度分布, 残留応力分布等を実験で検討した. さらには YAG レーザ再加熱法を提案し, 残留応力の低減効果についても検証した. 得られた結果は以下の通りである.

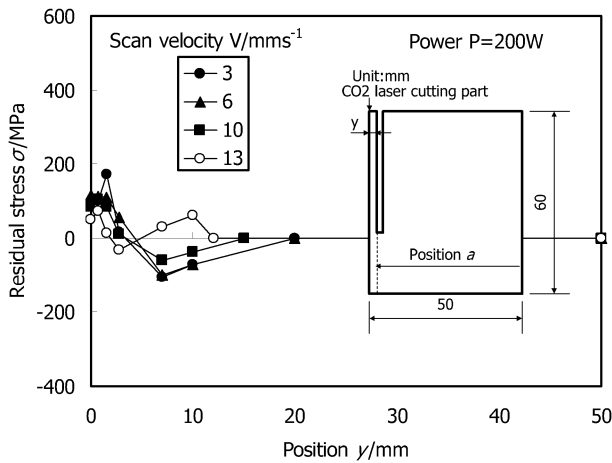


Fig.12 Residual stress distribution in the cutting part

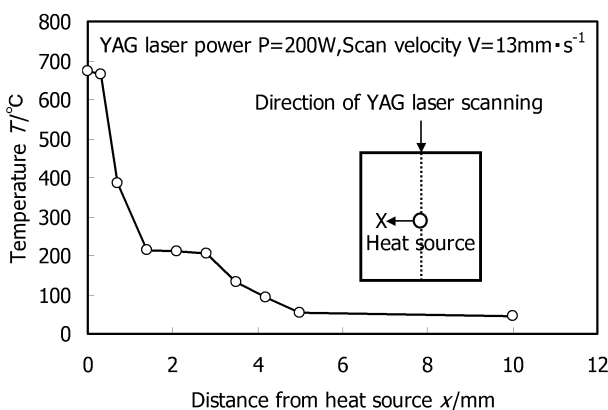


Fig.13 Temperature distribution in condition that residual stress can be decreased

1. CO₂ レーザ切断部の特性

- (1) 金属組織の観察により, 熱影響層はほぼ三つの領域から形成される. その全熱影響層の深さは約 20-30 μm 程度になると判明した.
- (2) 硬さ分布の測定により, 表面付近の硬さは比較的高いが, ばらつきが大きく, 母材との境界付近まで全体の硬さが低下していく. その距離は約 24 μm であり, 金属の組織と対応している.
- (3) レーザ切断面には引張・圧縮残留応力が発生し, 表面下 1mm 程度まで引張残留応力が存在し, その最大値は約 180MPa である. また表面下 1mm~10mm 程度まで圧縮残留応力が存在し, その最大値は約 80MPa である.
- (4) 切断時の温度分布は熱源中心部付近で温度勾配が大きくなる. 特に, ビームと材料の接点である切断部で急激になり, 後方へ行くに従って穏やかに尾を引くように等温線が分布する.

2. CO₂ レーザ切断部への YAG レーザ再加熱の効果

- (1) YAG レーザ処理により熱影響層内の組織変化は熱処理前と同じように三つの領域から形成されるが, 領域 I, II は処理前と比べて黒状物が少なくなり, 粒径も大きくなっていることが明らかになった.
- (2) 切断面の熱影響部の硬さ分布のバラツキを抑制し, 平均硬さを処理前の 500Hv から 280Hv までに低減できた.
- (3) YAG レーザ処理した後, 引張残留応力の最大値は約 80MPa, 圧縮残留応力の最大値は約 20MPa となった. YAG レーザ再加熱する前に比べると引張・圧縮残留応力はそれぞれ 100MPa, 60MPa 低減することができた.
- (4) YAG レーザの加熱最高温度は 673°C であることから, 応力除去焼きなましと同じような応力除去効果があると考えられる.

謝辞

この研究は天田金属加工機械技術振興財団のご援助により研究開発を行うことができましたことを記し, 天田金属加工機械技術振興財団に心より感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 金岡: 軟鋼厚板のレーザ切断面品質に関する研究, 日本機械学会論文集(C編), 57,539(1991)2441.
- 2) 布引ほか: ファジィ数値計画に基づく CO₂ レーザ加工条件の最適化, 精密工学会誌, 64,1(1998)116.
- 3) 金岡: レーザ加工の実務, 日刊工業新聞社, (2007)
- 4) 米谷: 残留応力の発生と対策, 養賢堂, (1975).
- 5) 河上益夫・田中良平・雑賀喜規: 熱処理の基礎(I), 日刊工業新聞社, (1970), 123.