

半導体レーザーによる金属薄板成形システムの研究

千葉工業大学 工学部

教授 宮崎俊行

(平成 13 年度研究開発助成 AF-2001007)

キーワード：半導体レーザー、金属薄板、曲げ

1. 研究の目的と背景

レーザー加熱加工(穴あけ、切断、溶接など)では、試料には熱変形が生じる。特に薄板の加工においてはこれが顕著である。それゆえ、種々工夫してこの影響を最小限にしている。一方、この熱変形を積極的に利用した加工法がレーザーフォーミングとして提案され¹⁾、現象の考察もなされている²⁾⁵⁾。

この成形加工には、通常はCO₂レーザー、YAGレーザーなどの高出力レーザーが用いられ、実用化を目指した研究も進められている⁶⁻⁸⁾。この加工にはレーザー加熱加工の最も重要な条件である狭い領域のみにパワーを集中する高パワー密度を必要とせず、低パワー密度で可能である。すなわち、ビームの高いパワー、および平行性を必要としない。

半導体レーザーは収束性が悪く、除去加工などに必要な高パワー密度の実現は困難であるが、成形には十分適用できる。さらに、半導体レーザーはエネルギー変換効率(電気エネルギー→光エネルギー)が他のレーザーに比較して非常に高いこと、小型・軽量であることなどの特長を持っているため、産業用加工機器として有望である。

本研究は、SUS304 薄板を試料として、半導体レーザーを用いた成形システムの構築のための基礎的データを得ることを目的としている。本成形法は型を必要としないため、生産技術としては非常に柔軟性に富むシステムを構築できるものと期待できる。特に、レーザーの微細加工性と組み合わせると、金属箔、薄板を構造材とした小型機器、極限としては、マイクロマシンなどへの適用が考えられる。しかし、この成形特性は未だ明らかにはなっていない。また、本研究の実験結果からも明らかなように、わずかな条件の差によって変形方向が逆になるなどの現象もある。

本研究は、以上の観点より、まず現象をきちんと把握し、実用的な成形システムを構築するためのデータを蓄積することを目的とする。

2. 実験方法

用いたレーザー装置は主として最大出力 20W(発振波長 808 nm)である。コア直径 0.6mm、NA0.22 のファイバーで加工点まで導き、焦点距離 20mm のレンズで試料に集光・照射した。なお、一部の実験は最大出力 140 W の装置を使用した。

ビームの強度分布測定例を図 1 に示す。これは、直径 0.3 mm

のピンホールを通したビームのパワーを測定したものである。ほぼガウス分布に近い強度分布である。

つぎに、レンズ-試料表面間距離を制御し、試料表面上にお

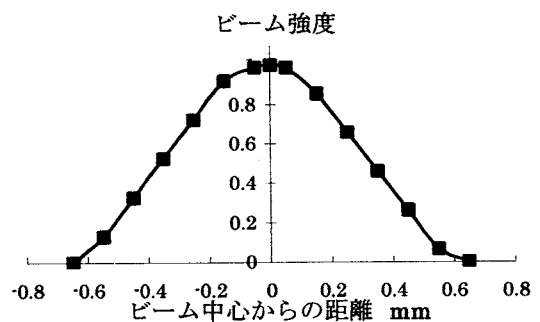


図 1 ビームの強度分布

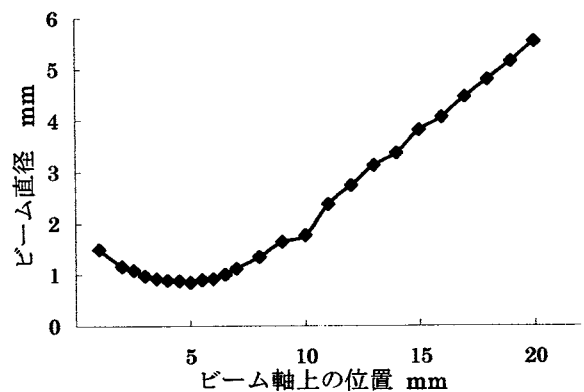


図 2 ビーム直径の変化

けるビーム径を求めた。結果を図 2 に示す。ビーム直径は図 1 の測定値において強度が中心の $1/e^2$ になる径を直径として定義したものである。なお、図 2 の横軸は、レンズ-試料間の実際の距離ではなく、装置の関係である任意の一点を基準として表示している。

図より明らかなように、最小直径は 0.9 mm である。ビーム直径を変化させた実験は、この図のデータを用いてレンズ-試料間距離を調整して行った。

試料は市販の SUS304 薄板を採用した。これを機械的に切断して長方形にし、また、寸法を調整した。試料素材の圧延時の方向や残留応力、切断時の残留応力が成形特性に影響するかどうかを調べるため、焼鈍した試料も作製した。焼鈍条件は、電

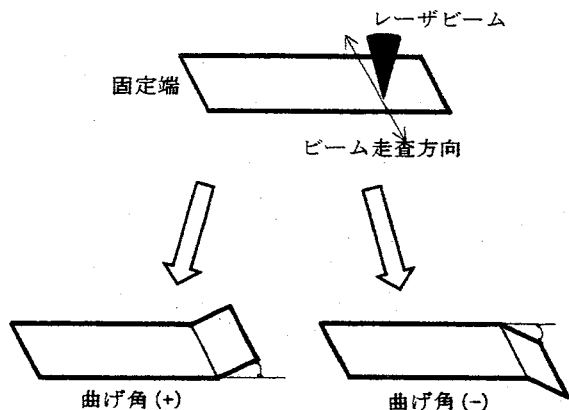


図3 実験方法

気炉で 800 °C まで加熱、その状態で 1 時間保持し、炉中で自然冷却させた。なお、この試料のビッカース硬さ (荷重 0.49 N) は、HV230、焼鈍しない試料の硬さは HV435 であった。

それぞれの実験条件は図および説明文中に詳細に示す。

試料は長方形の一端をクランプし、もう一方の端から 5 mm の位置を幅方向にビームを照射しながら走査した(図 3)。同じ条件であってもビーム照射側に曲がる場合も、反対側に曲がる場合もある。ビーム照射面側に曲がった場合を正 (+、ビーム照射側に対して凹) とし、反対側に曲がった場合を負 (-、凸) と表示する。

なお、ビームパワー、試料のエネルギー吸収率は曲げ性能に大きく影響した。それゆえ、吸収剤 (Aero504) を塗布して、吸収率を一定 (74%) とした。

3. 実験結果および考察

3.1 試料処理

図 4 に試料の熱処理の影響を示す。焼鈍しても、しなくとも

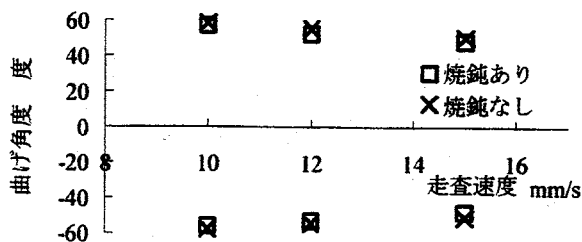


図 4 試料の熱処理の効果
パワー 10W, ビーム直径 1mm, 20 回走査,
(10 回実験の平均値)

まったく同じ角度で曲がるのが確認できた。すなわち、素材圧延時、あるいは試料作製時に発生すると考えられる残留応力、歪は本成形には影響していないことは明らかである。

なお、データが正負 (+, -) に分布するのは、同じ条件(この場合は同じ走査速度)でも、ある試料については上に、ある試料については下にそれぞれ逆方向に曲がるためである。それゆえ、本実験の条件範囲内では同一条件であっても、曲がる方向を確定できないことは明らかである。

以上のように、焼鈍処理は本実験に無関係であることが明らかとなったので、以後の実験はすべて焼鈍しない試料を用いた。

3.2 ビーム径

ビーム直径を 1~3 mm で変化させたときの結果を図 5 に示す。試料は 10 枚ないし 50 枚を用いた結果である。括弧内の数字はそれぞれその方向に曲がった試料数を示している。たとえば、径 1 mm では正方向(凹)に 7 枚、負方向(凸)に 3 枚の試料が曲がったことを示している。なお、ビーム径 2 mm については、50 枚の試料を用いた。これは最初 10 枚の試料を用いたがすべて負方向(凸)に変形したため、確認のためにさらに 40 枚試料を追加した結果である。

ビーム径 2.5, 3 mm については、10 枚の試料について図のような結果 (負: 9, 正: 1) を得たが、さらに試料数を増加させれば、径 2 mm と同様に負方向が増加する可能性もある。

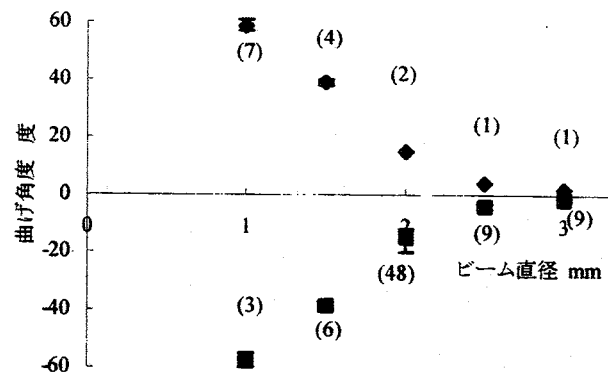


図 5 ビーム直径と曲げ角度
パワー 10W, 走査速度 10mm/s, 20 回走査,
(10 or 50 回実験の平均値)

本条件(板厚 0.1 mm, ビームパワー 10 W, 走査速度 10 mm/s, 20 回走査)における曲げでは、ビーム径が大きくなると負方向(ビーム照射面の反対方向、すなわち凸)に曲がる可能性が大きくなっている。

このように負方向、すなわち、ビームを下方向に照射したとき下方向に曲がる回数が多いのは、自重の効果による可能性もある。それゆえ、図 3 と同様に試料を保持し、ビームを下から上方向に向けて照射・走査した。同じ試料を 50 枚準備し、ビーム径 2 mm で実験した。その結果、47 枚の試料は上方向(ビー

ム照射面に対しては負)に曲がった。この結果から、自重の影響はないものと結論できる。

このように、50回中2,3回のみ方向が異なる理由は明らかではない。すべて同じ実験条件を採用しているが、1回1回の実験については、試料のわずかな差(そりなど)、パワーの変動、試料台の振動など、それぞれの実験について、わずかな条件の変動が存在する可能性は否定できない。この差が曲がる方向を決定しているものとも考えられる。それゆえ、これらの条件の変動を完全に排除できれば、ビーム直径を大きくすると完全に負方向に曲がる条件が存在する可能性もあると考えられる。

なお、図4, 5からも明らかなように、正負両方に曲がるが、その角度はほぼ等しい。

3.3 試料の初期形状

図6に示すように試料を変形し、初期変形量の効果を調べた。幅10mmの試料(長さ20mm)の長辺の端面に力を加え、図のように弾性変形させた。この試料にレーザービームを上から照射する場合は試料形状を(a)は凹と定義し、その時の初期変形量を2本の長辺のなす面から曲面の最高点までの距離とし、符号は負とした。凸の場合はこの逆である。図は一例を示してある。

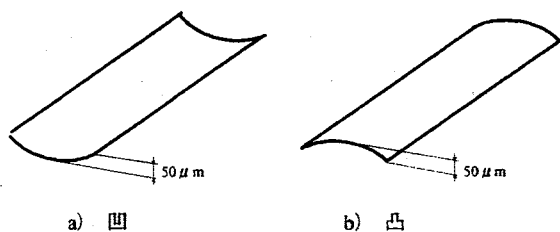


図6 初期形状

ビームパワー10W, ビーム直径0.9mm, 走査速度10mm/sの場合の結果を図7に示す。試料は10枚で、括弧内の数字はその方向に曲がった試料枚数である。数字を記入してない場合は、10枚全部がその方向に曲がった。横軸は初期変形量を μm で示してある。平板(初期変形量=0)に近い試料では上下両方向(正負)に曲がる領域が存在する。しかし、初期変形の程度が大きくなると、すなわち、凹試料(負の初期変形試料)は正(上方向)

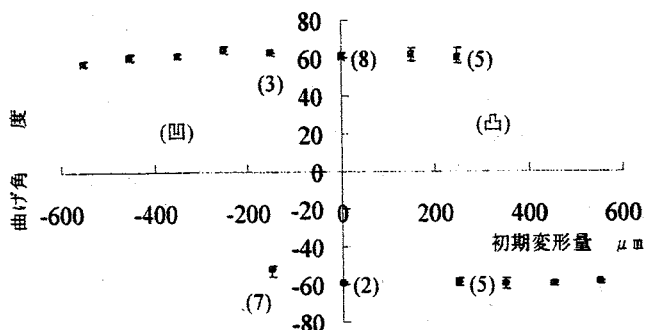


図7 初期変形量の効果

に、凸試料(正の初期変形試料)は負(下方向)曲がる。すなわち、ある程度以上の変形を与えると曲がる方向は決まってくる。しかし、この傾向はビーム走査条件によっても変化する。たとえば、図7の条件で、走査速度を20mm/sと速くすると、上下両方向に曲がる領域は右へ移動(初期変形量0~150 μm)した。

また、図7に示すように、曲げ角度はこの範囲内では上下(正・負)ともほぼ等しい。これは、図4, 5と同じ傾向である。

3.4 試料寸法

試料の長さ20mm, 厚さ0.1mmを一定とし、幅を変化させたときの曲げ特性を求めた。レーザーパワー10W, ビーム直径0.9mm, 走査速度15mm/sの時の結果を図8, 9に示す。括弧内の数字は前と同様に10枚の試料のうちその方向に曲がった枚数で

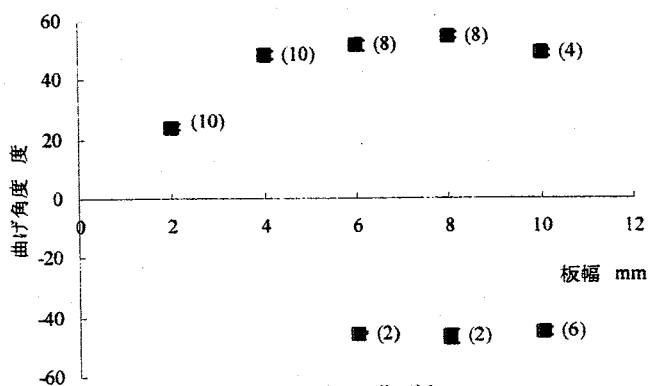


図8 板幅と曲げ角
(レーザーパワー10W, ビーム直径0.9mm, 板厚さ0.1mm, 走査速度15mm/s)

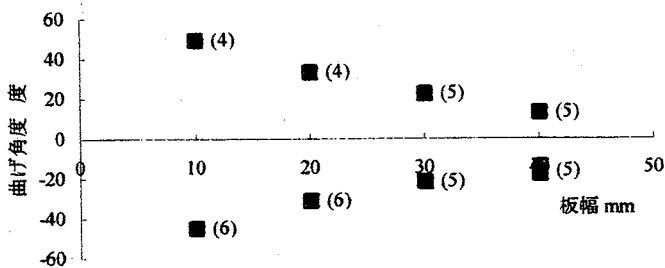


図9 板幅と曲げ角
(レーザーパワー10W, ビーム直径0.9mm, 板厚さ0.1mm, 走査速度15mm/s)

ある。幅2, 4mmではすべて上方向(ビーム照射側, 凹)に曲がったが、5mm以上の幅になると上下両方向に曲がり、かつ、幅と共に角度は減少した。これは、ビーム径と板幅の関係によって曲がる方向が変化する可能性を示唆している。

なお、本成形における応力分布は熱伝導による上昇温度分布によって決定される。それゆえ、熱伝導における相似則を示す無次元数 Fourier 数を用いて各種条件におけるデータを整理したが、一定の法則性は認められなかった。これらの点については、

シミュレーションも含めて今後解析を進めていく必要がある。

4. 曲線上のビーム走査による形状創製

以上述べた結果は、レーザ走査を直線に行って得た曲げ特性である。曲がる方向が2つあり、その方向を決定する要因については明らかにできていない。それゆえ、引き続きこれらの基礎データを集積することが重要ではあるが、実用的な観点から1,2の別の実験を試みた。曲線上のビーム走査である。

4.1 円板試料

直径70 mmのSUS304(厚さ0.3 mm)の円周から3 mm内側の円上を140 W(ビーム直径1 mm)で走査した。試料回転速度50 rpm(走査速度167 mm/s)、照射時間60 sである。結果を図10に示す。直径は68 mmとなり、高さ約3 mmの鏡板状の形状を創製できた。直径の変化率を(試料直径-変形後の直径)/試料直径で定義すると、約3%である。

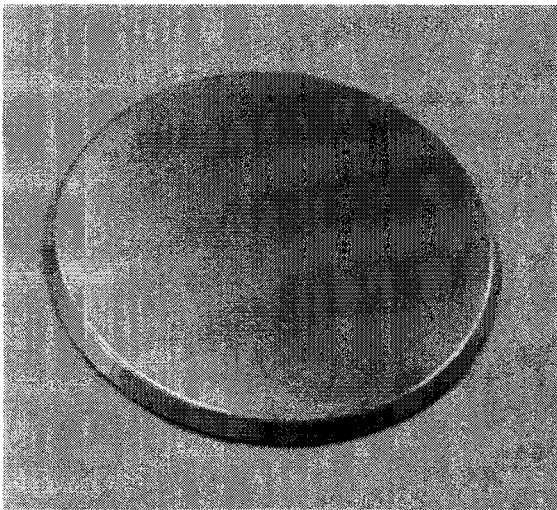


図10 板厚0.3 mmの成形加工例
(直径70 mm, ビームパワー140 W)

4.2 角型試料の曲線上走査

長さ20 mm, 幅10 mm, 厚さ0.1 mmの試料上を用い、曲率半径7 mmの円周上を1 mmの間隔をおいて8 Wのビームを5回走査した。すなわち、5本の線上を走査する。これを10回繰り返すことにより図11に示すよう曲がった部分が円状で、かつ、約90度の曲げ加工を行うことができた。

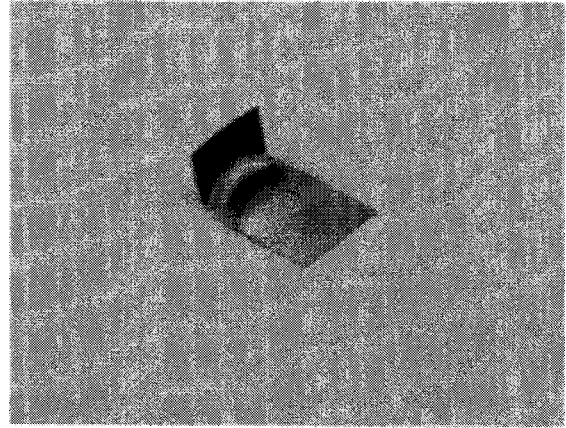


図11 90度の曲げ加工例
(長さ20 mm, 幅10 mm, 板厚0.1 mm,
ビームパワー8 W)

5. 結言

1にも述べたように、本研究は半導体レーザによる薄板成形システム構築のためのデータ蓄積を目的とするものである。本成形を定量的に表現する理論式、あるいは実験式はまだ明らかではないが、定性的な傾向を明確にすることはできた。今後、これらのデータをもとに、定量化を進める予定である。さらに、複雑形状の創製も試みる予定である。

最後に、本実験を遂行するに当たりご援助頂いた天田金属加工技術振興財団に心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Y.Namba:Proc.LAMP'87(May,1987),601.
- 2) F.Vollertsen:Proc.LANE'94,Vol.1(1994),345.
- 3) S.Silve, W.M.Steen and B.Podschies:Pro.ICALEO1998, Sec.E(1998),151.
- 4) 天田重康, 白井直樹:日本機械学会論文集(A), 62-604(1996), 2764.
- 5) J. Bao and Y. L. Yao: J. Manufacturing Science and Engineering, Vol.123(2001)53.
- 6) 岡本康寛, 宇野義幸, 太田健一郎他:精密工学会誌, 66,6(2000),891.
- 7) 船見浩司, 岡田俊治, 側友宏:1997年精密工学会秋季大会学術講演論文集, 338.
- 8) 大津雅亮, 小坂田宏造:2002年精密工学会秋季大会学術講演論文集, 422.