

マイクロ部材のレーザフォーミングに関する研究

千葉工業大学 精密機械工学科

教授 吉岡俊朗

(平成10年度研究開発助成 AF-98008)

1. はじめに

レーザビームは局所的な加熱が可能であることから、材料に比較的大きな温度勾配を発生させることが出来る。この温度勾配により生じた熱応力で、塑性変形を生じさせ¹⁻²⁾、三次元形状物を作成出来る可能性がある³⁻⁴⁾。

これらは、レーザフォーミング、レーザ曲げ加工などと呼ばれ、最近多くの研究報告がなされている³⁻¹⁴⁾。しかし、それらの研究は、ほとんどが大きな板材(板厚1mm以上)が対象であり、板厚0.1mm以下はほとんど見られない⁵⁻⁹⁾。

ここではマイクロ部材のレーザによる変形加工を行うための基礎研究として、厚さ数 $10\mu\text{m}$ の金属箔(SUS304、コパール)、また、直径 $100\mu\text{m}$ の金属細線(SUS304)を対象として、レーザ変形加工を行った結果について報告する。

2. 金属箔の変形加工

レーザはcw-Nd:YAGレーザを用いた。図1(a)に示すように金属箔をホルダで挟み、これをX-Yステージに固定し、往復直線運動させる。試料が往復運動している間、レーザを上方から照射する。繰り返し照射の場合には、このレーザ走査回数は往路を1回、復路を1回と数える。なお、往路で試料を横切ってから、復路で再度試料に照射されるまでの時間は約3sである。

レーザの照射位置は端部よりLの位置である(図1(b))。また、試料の変形角度は側面写真から求めた。

実験に使用した試料は主にSUS304、厚さ(t): $10\mu\text{m}$ 、幅(W): 3mm である。なお、試料表面にレーザ吸収剤は使用していない。

2.1 変形方向

箔はレーザ照射方向に曲がりを生じる。上記の方法で加工を行った例を図2に示す。この例は $20\mu\text{m}$ 厚さで幅約 13mm である。レーザパワー 1.5W 、繰り返し照射数50回、 $L=3\text{mm}$ の条件で行ったものである。(a)はレーザ照射側、(b)はそれを裏返したものである。変形部は非常にシャープな形状をしていることがわかる。またこの部分には熔融は見られない。 $10\mu\text{m}$ 厚さの場合も同様な形状のものが得られている。

2.2 レーザパワーと変形角度の関係

照射するレーザパワー(P)の変形角度に及ぼす影響

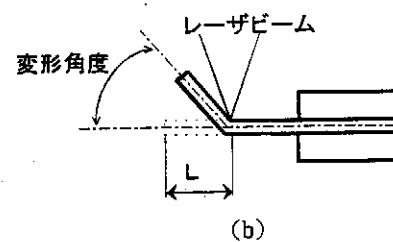
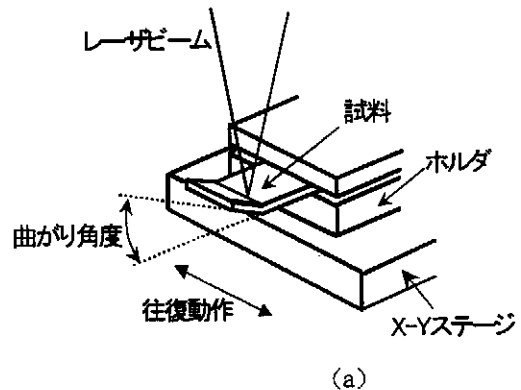
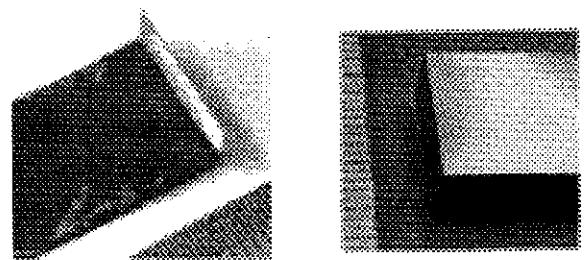


図1 実験方法



(a) 表 (b) 裏

図2 変形加工例

を調べた。試料板厚はSUS304、コパール共に各 $10\mu\text{m}$ 、ビームスポット径 $50\mu\text{m}$ 、レーザの走査速度(v): 10mm/s 、走査回数(N):10、 $L=0.6\text{mm}$ である。

実験結果を図3に示す。各材料ともレーザ照射パワーの増加と共に変形角度も増加する。SUS304材ではレーザパワーが、 0.35W 以下では曲がりが起こらず、約 0.5W 以上では表層部に熔融が発生するのが断面の光学顕微鏡観察から示された。したがって、熔融なしに変形を行うためには、この範囲内のレーザパワーを用いることが必要になる。コパールでも同じような様相を示し、 0.2W 以下

では曲らず、0.4Wでは溶融が生じた。すなわち、変形可能なパワーの上下限が存在し、材質によって、そのパワー域に差があることになる。

2.3 スポット径と変形角度の関係

ビームスポット径の変形角度に及ぼす影響を調べた。実験条件は $P=0.4, 0.5W$ 、 $v=10mm/s$ 、 $N=10$ であり、レーザービームスポット径を $\phi 50\sim 200\mu m$ と変化させた。

実験結果を図3に示す。前述のようにレーザーパワーが0.5W、スポット径 $50\mu m$ の時、溶融が生じるが、それ以外の条件では、溶融は全く見られなかった。

ビームスポット径の増加に従って、箔の変形角度は減少する。これはビームスポット径の増加によって、パワー密度が減少し、ビーム照射部近傍での急峻な温度勾配の緩和のための塑性変形量の現象、また照射部の温度が低くなり、結果として温度上昇による降伏応力の低下が小さくなるためだと考える。

なお、板厚を変えた場合には、板厚毎に、レーザー変形が可能なビーム径の上下限が存在する。これについては現在検討中である。そのため、現状では、試料の厚さによって、レーザービームスポット径を決め、それに応じた適切なレーザーパワーを選択する必要がある。

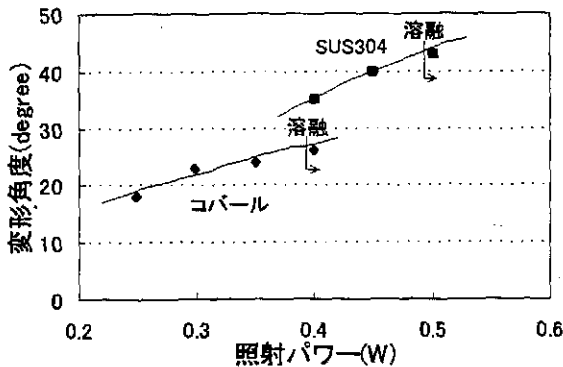


図3 レーザパワーの影響

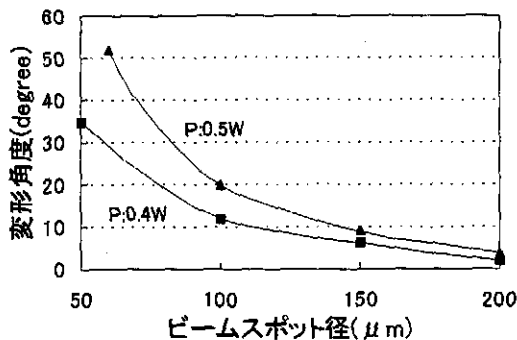


図4 レーザビームスポット径の影響

2.4 走査速度と変形角度の関係

レーザー走査速度($v=1\sim 24\text{ mm/s}$)の変形角度に及ぼす

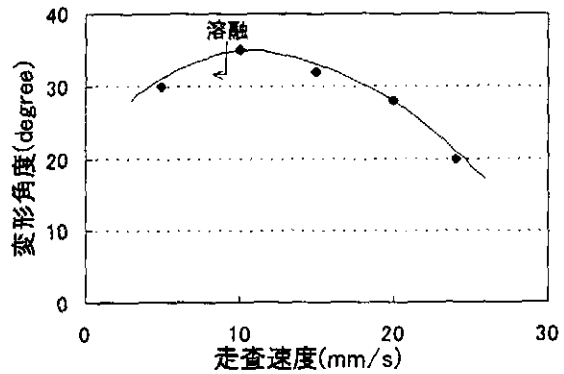


図5 レーザ走査速度の影響

影響を調べた結果を図5に示す。レーザー照射条件は $P=0.4W$ 、 $N=10$ である。 $v=10mm/s$ の時、変形角度が最大を示している。これは、これより速度が遅くなると、照射部に溶融が生じることにより変形量が減少するためである。なお、 $v=5mm/s$ 未満の速度では、溶融が生じることもあった。

v が増加するに従い、箔の変形角度は減少していく。この原因として、レーザー走査速度の増加により単位長さあたりのエネルギーが減少する為、試料の温度が低下し、降伏応力の低下が小さくなるためであろう。

2.5 走査回数と変形角度の関係

レーザー走査回数(N)の変形角度に及ぼす影響を調べた結果を図6に示す。レーザー照射条件は $P=0.4W$ 、 $v=10mm/s$ である。始めのレーザー照射による変形角度が一番大きい。それ以降は徐々に飽和の傾向を示す。曲り角度が大きくなると上方に曲った箔とレーザービームが干渉し、照射部でのビーム形状が変化するためだと考えられる。これによりレーザー照射面積が大きくなり、その結果パワー密度が減少するためと考える。

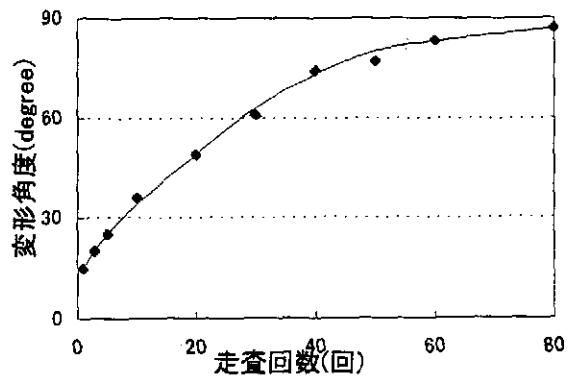


図6 レーザ走査回数の影響

2.6 照射位置と変形角度の関係

端部からレーザー照射部の距離(L)の変形角度に及ぼす影響を調べた。条件は $P=0.4W$ 、 $v=10mm/s$ 、 $N=10$ である。結果を図7に示す。 L が増加していくにつれ、箔の変形

角度は減少する。これは、箔の自重が影響していると考えられる。しかし、 L が約 0.5mm 以下では箔端部と照射部との間が短くなるために熱エネルギーの拡散が起こりにくくなりレーザー照射部が熔融してしまい、変形角度が減少する。

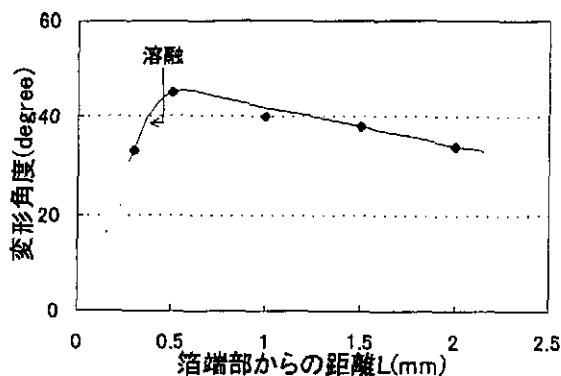


図7 レーザ照射位置の影響

2.7 箔を用いた微細部品の加工例

以上のデータを用いて、複数回曲げ加工を行なった。図8に示すように、試料の5箇所をレーザー走査させることにより曲げ加工を行い、コイル状構造物を作成した。

試料は SUS304、厚さ $10\mu\text{m}$ 、走査ライン間隔は 0.5mm である。走査ラインが箔端部から離れていくに従って、変形角度は減少している。しかし、各走査ラインの変形角度を同一にしたい時には、レーザーの照射条件を変えることにより容易に行うことができる。

また、風車の製作を試みた(図9)。まず材料を十字状にレーザー切断し(全長約 $300\mu\text{m}$)、その後に各羽(幅約 $75\mu\text{m}$)の端部をレーザー変形加工により斜めに曲げて製作する。試料は SUS304、箔厚 $10\mu\text{m}$ である。

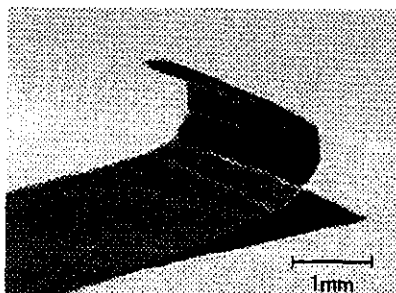


図8 5箇所走査による曲げ加工

曲げる部分が非常に小さいので($L=10\sim 70\mu\text{m}$)、照射部に熔融を伴う可能性がある。そのため照射パワーを下げ、さらにパルスレーザーを用いて曲げ加工を行った($N=6$)。製作された風車の外観を図10(a,b)に示す。図10(a)の下部はボールペンの先端(約 0.5mm)であり、その上部にある×状の黒点が製作した風車である。これを拡大したも

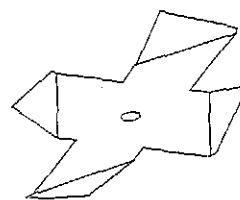
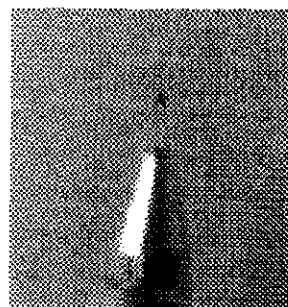
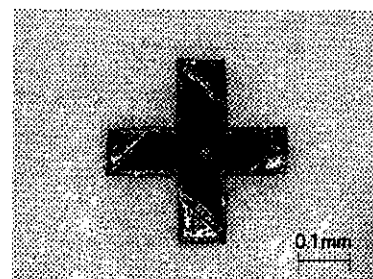


図9 微細風車概観



(a) ボールペンとの対比



(b) 風車部拡大
図10 微細風車



図11 サイコロ状部品の製作

のが図10(b)である。この写真からは曲げは明瞭に見ることはできないが、工具顕微鏡でのz方向観察から推定した結果、それぞれの羽に約 10 度の曲げが形成されているものと考えられた。

図11はサイコロ状部品の製造途中の写真である。材料は SUS304、箔厚 $10\mu\text{m}$ であり、一辺が 0.5mm である。図10(b)のような十字形を母材から切り離さずにレーザー切断で製作し、その各羽の根元部にレーザー曲げ加工で内側に変形加工しているところである。

3. 金属細線の変形加工

一般的には、レーザ変形加工は熔融現象を生じない状態で行なわれる。しかし、レーザ照射中に熔融が生じたとしても、加工の再現性があり、形状・強度的に支障が無ければ、何ら問題ない場合もあることは当然である。本研究にて、金属細線の曲げ加工時にレーザ照射部に熔融が生じるものの、任意の変形角度を得ることのできる曲げ加工法を考案した。ここでは、この方法での曲げ加工の検討結果について述べる。

図 12 の様に、細線を片持ちで水平に保持し、レーザを上方から照射した。また、その様子を試料の横方向より高速度ビデオカメラで撮影した。

使用した装置はレーザパルス波形制御式の Nd:YAG レーザであり、その実験条件は矩形型レーザ波形のパルス幅 3、6、9ms、照射エネルギー 0.05~0.08J、ビームスポット径 0.2mm、照射

回数は 1 回である。試料材質は SUS304、Ni、Fe、Al、Cu、細線直径は 0.1mm を用いた。

レーザ照射位置は、細線自由端部からの距離： $L=0.5\text{mm}$ である。使用した高速度ビデオカメラのフレーム速度は 600、2000 駒/秒(FPS)、シャッタースピードは $1/10000\text{s}$ である。

3.1 レーザ照射部の観察

金属細線のレーザ変形加工例を図 13 に示す。加工部の断面をエッチング処理してある。加工部は熔融凝固していることがわかる。なお、レーザ照射部は図 13 の角部である。また、レーザ照射方向は紙面に水平で、かつ上方からである。

3.2 レーザ照射方向及び試料保持方向

レーザの照射方向及び細線の保持方向と変形方向への関係を調べた。細線を水平に片持ち保持した状態で、レーザを上方および、側面より照射した。また、細線を上方より吊り下げ、その細線軸に、垂直方向からレーザを照射した。どの場合も変形方向は、レーザ照射側であった。

3.3 パルス幅、照射エネルギーと変形角度

照射エネルギーと変形角度の関係を図 14 に示す。図 14 から、各パルス幅において、変形角度は照射エネルギーが増大するにつれ比例的に増加することが分かる。しかし、パルス幅 6ms、照射エネルギー 0.08J においては、0.07J よりも小さい値となっている。これは、レーザ照射中に約 100 度以上の変形が生じ、その曲げ部（照射初期時の裏側近傍）に、まだ持続しているレーザが照射され、逆方向に再度変形が起ったためである。

図 14 での各試料の熔融体積 V を測定すると、 V は照射エネルギーの増加とともに増大している。同じ照射エネルギーの場合、パルス幅が短い細線の変形角度が大きい。

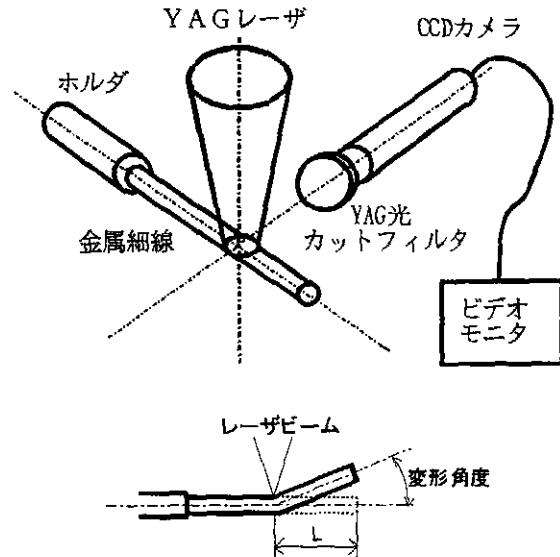


図 12 細線曲げ実験装置

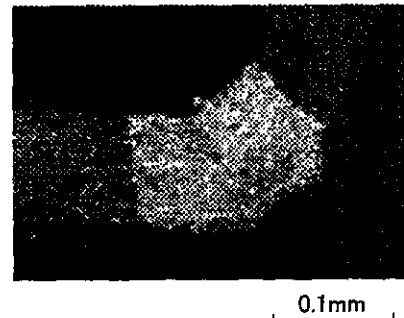


図 13 金属細線レーザ曲げ部断面 (SUS304)

なお、今回の条件では、パルス幅が短い試料の熔融体積が大きい値であった。

3.4 端部長さと変形角度

細線自由端部からの距離 (L) と変形角度の関係を図 15 に示す。図 15 から、 L が 1.5mm より短い時、 L が小さくなるにつれ、変形角度は大きくなる。しかし、 L が 0.3mm 以下になると、細線の先端部分まで熔融し球状となるため、細線の曲げとはいえなくなる。

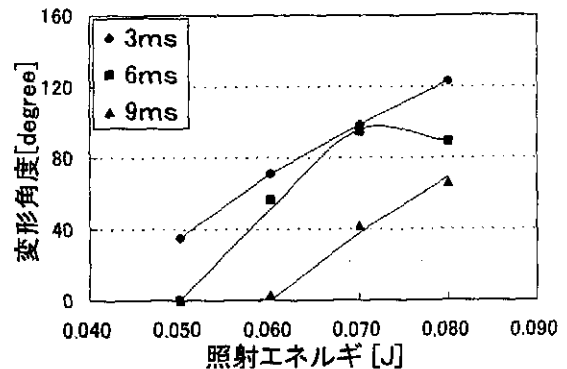


図 14 照射エネルギーと変形角度

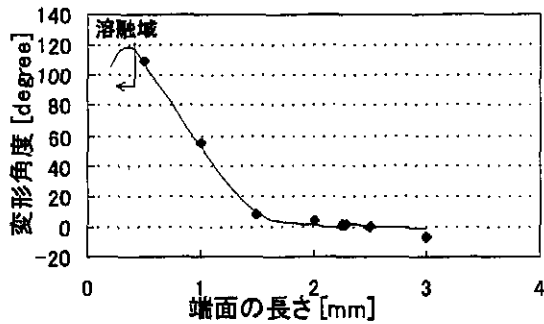


図 15 自由端部からの距離と変形角度

3.5 高速度ビデオカメラによる観察

レーザ照射中の高速度ビデオカメラ撮影結果 (2000FPS) を図 16 に示す。レーザ条件は照射エネルギー 0.08J、パルス幅 6ms である。同図では明瞭ではないが、ビデオ観察からは、レーザ照射開始からの経過時間: $t=0.5\text{ms}$ において細線上部に微小な発光 (プルーム) が確認できる。このことは、レーザ照射により加熱され、熔融したことを示すものである。

この時点で細線の自由端部 (写真左側) は、レーザ照射方向とは逆の下方に変形を始め、 $t=1.0\text{ms}$ で約 2~3 度変形している。細線上方のレーザ加熱部と下方部の熱膨張差により下方へ変形したものと考えられる。

$t=3.0\text{ms}$ では、その変形した自由端側はほぼ 0 度に戻っている。このことより、照射下部側の温度も上昇し、上下の温度差が小さくなったことが分かる。

$t=3.5\text{ms}$ からレーザ照射側へ急速な変形が生じており、 $t=5.5\text{ms}$ で変形はほぼ終了している。

プルームの発光は $t=0.5\text{ms}$ から 4.0ms まで見られる。従ってこの間では、照射部に熔融が生じていることになる。 $t=3.5\text{ms}$ では下方に膨みが見られる。これから、試料下面まで熔融したと考えられる。

バックライトを強くし、上記と同様の方法で観察した結果から、プルームが発生していると思われる時間帯で、熔融部に U 字状の溝が見られる。このことから、その部分にはクレーターが生じているものと考えられる。また、変形終了直前には、この U 字状の溝が観察できないことから、クレーターは消滅したと推定できる。

レーザ照射側に変形が開始してから ($t=3.5\text{ms}$ ~) 終了するまで ($t=5.5\text{ms}$) の時間: 約 2ms と変形角度からその間の変形角速度を求めたところ約 90000 度/s (17000rpm に相当) となり、非常に高速な現象であることがわかる。

3.6 SUS304 材以外の変形加工

図 17 に Fe、Ni 細線の照射エネルギーと変形角度の関係を示す。なお、パルス幅は 6ms であり、SUS304 は参考の為、図 14 の結果を記入してある。

いずれの材料も変形角度は照射エネルギーに比例して増加することがわかる。

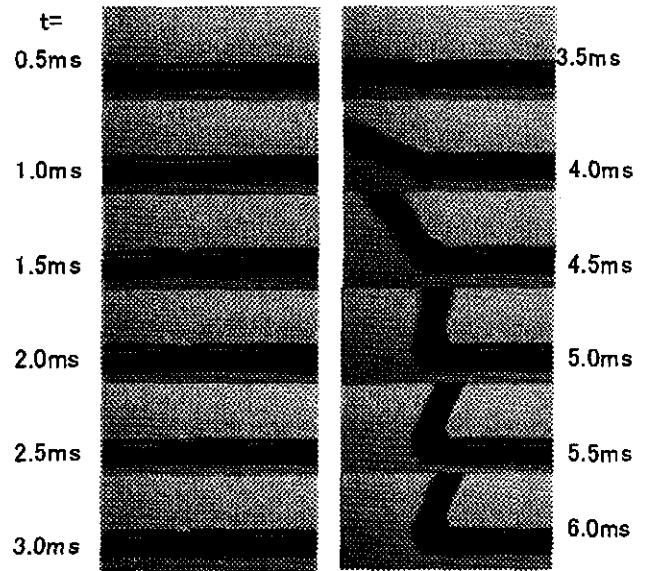


図 16 高速度ビデオカメラ撮影写真

しかし、変形が起こる最低の照射エネルギーの値が大きく違う。SUS304 細線が約 0.05J から変形が起こるのに対し、Fe 細線で 0.08J、Ni 細線では 0.16J である。Ni の場合、SUS304 の約 3 倍近くの照射エネルギーを必要とすることになる。この原因として、試料の YAG レーザ吸収率や融点温度の差異などが考えられる。

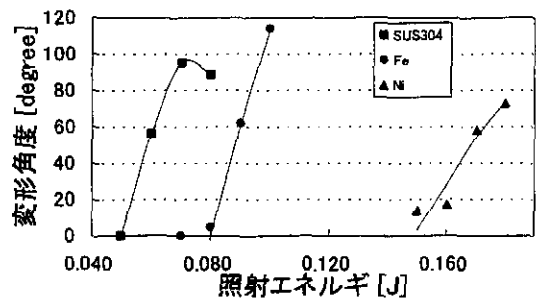


図 17 照射エネルギーと変形角度

3.7 角度修正

前に述べたように、一度変形した SUS304 細線熔融部に、再度反対方向からレーザが照射された場合、反対方向に曲がる。これを変形角度の修正に利用できるかどうかを調べた。

パルス幅 3ms、照射エネルギー 0.05J のレーザで約 30 度の変形加工をした後、試料を裏返して同条件のレーザを照射し、ほぼ直線状に修正した例が図 18 である。これに要した照射回数は 4 回である。

この同一部分で、さらにレーザ変形-修正という操作を 5 回繰り返したが、同様に変形-修正を行うことができた。

このことは、変形した角度が要求される値でなかった場合でも、その後のレーザ照射により修正できるということである。しかし、再加工の際には、同条件のレーザであっても、一回のレーザ照射による変形角度が小さく

なる。これは、一度目の加工での溶融による、試料表面状態の変化、溶融部分の直径が若干大きくなるためと考えられる。

3.8 細線構造物製作の試み

これまでの細線レーザ変形の実験結果を元に、細線構造物の作成を試みた。

図19に示すのは、直径0.1mmのSUS304細線に3箇所変形を加えた例である。約0.3mmおきにレーザ照射し、ジグザグに変形させた。この様に、細線を変形させることにより微小なワイヤフレーム構造物を容易に作成することが出来る。

4. まとめ

本研究で微細部材のレーザフォーミングに関する種々の知見を得ることができた。得られた結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 金属箔および細線とも、レーザ条件の制御により、変形角度を制御する事が出来る。
レーザパワーの増加と共に曲がり角度も増加する。
なお、変形方向は、いずれもレーザ照射方向である。
- (2) 箔の場合、レーザの走査回数の増加と共に変形角度は増加する。走査回数が増加すると飽和の傾向を示す。
また、レーザビームスポット径が大きく、レーザの走査速度が速く、箔端部とレーザ照射部との距離が増加していくにつれ、箔の変形角度は減少する。
- (3) 細線の変形を高速ビデオで観察し、曲げ加工の知見を得た。
- (4) 細線変形の場合、Cu、AlのようなYAGレーザの吸収率が低い材料でも、レーザ吸収剤を塗布することにより、変形可能である。
- (5) 箔では微細風車やサイコロ状部品をレーザフォーミング法で製作できた。

謝辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究助成を受けて行われたものであることを記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 難波義治, 川口憲治, 大峰恩: レーザフォーミング, 昭和61年精密工学会春季大会学術講演会論文集 (1986) 677-678.
- 2) F.Vollertsen: Mechanisms and models for laser forming, Proceedings of the LANE'94, Vol.1 (1994) 345.
- 3) S.Silve, W.M.Steen, B.Podschies: Laser Forming Tubes: A Discussion of Principles, ICALEO'98, Sec-E (1998) 151.
- 4) S.Silve, B.Podschies, W.M.Steen, K.G.Watkins: Laser Forming-A New Vocabulary for Objects, ICALEO'99, Sec-F (1999) 87.
- 5) C.L.Yau, K.C.Chan, W.B.Lee: Laser Bending of

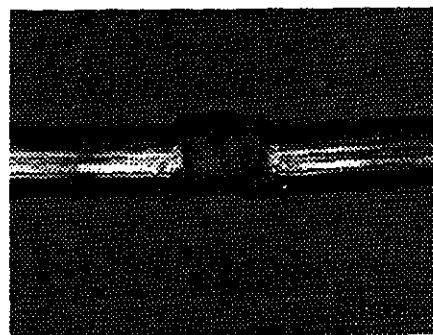


図18 角度修正したSUS304細線
(30度曲げた試料に裏面より4回照射)

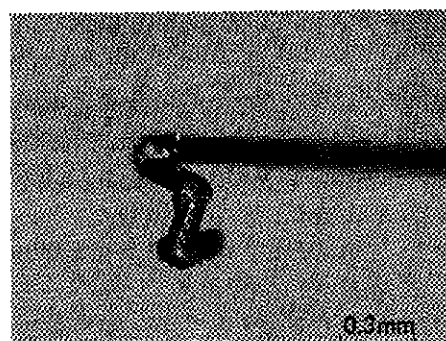


図19 細線構造作成例

- leadframe materials, Journal of Materials Processing Technology, 82, (1998) 117-212.
- 6) Guofei Chen, Xianfan Xu: Microscale Bending with CW and Pulsed Laser, ICALEO'99, Vol.88 (1999) 167.
 - 7) 杵名宗春, 久野良太郎: レーザによるステンレス鋼の板曲げ加工, 溶接学会講演概要, 第60集 (1997) 98-99.
 - 8) 杵名宗春, 伊藤一豊他: ステンレス鋼のレーザ曲げ加工に及ぼす板厚の影響, 溶接学会講演概要 第65集 (1999) 258.
 - 9) Guofei Chen, Xianfan Xu, Chie C.Poon and Andrew C.Tam: Laser-assisted micro scale deformation of stainless steels and ceramics, Optical Engineering, Vol.37, No.10 (1998) 2837-2842.
 - 10) 今井誠, 吉岡俊朗, 宮崎俊行, 白井靖幸, 三須直志, 森川克彦: 細線及び箔のYAGレーザフォーミング, 1998年度精密工学会秋季大会学術講演会 (1998) 117.
 - 11) 新井祐介, 吉岡俊朗, 宮崎俊行, 白井靖幸, 三須直志: YAGレーザによる金属細線の曲げ加工, 1999年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集 (1999) 474.
 - 12) 森川克彦, 吉岡俊朗他: YAGレーザを用いた金属箔の変形加工, 溶接学会講演概要 第65集 (1999) 260-261.
 - 13) S.Yoshioka, T.Miyazaki, M.Imai, Y.Shirai, and N.Misu: Bending of fine metal wire and foil with YAG laser beam: ICALEO'98, Vol.85, Sec.E (1998) 161-169.
 - 14) S.Yoshioka, T.Miyazaki, Y.Arai, N.Misu: Dynamic Observation of Fine Metal Wire with YAG Laser Beam, ICALEO'99, Vol.88, LASER MICRO FABRICATION, (1999) 29-38