

# 金属箔のレーザーフォーミング

吉岡俊朗\*

## 1. はじめに

レーザーフォーミングは、変形加工に必要な高価な金型を使用せずに、板・線材を成形する加工技術であり、試作や多品種少量生産に迅速かつフレキシブルに対応できると期待されている。この加工法は、従来のプレス代わりに、レーザー照射によって局所的に発生した熱応力を<sup>1-2)</sup>利用するため、スプリングバックの影響がない。また、騒音の少ない、クリーンな環境での作業が可能である。

レーザーフォーミングはレーザー曲げ加工、レーザー変形加工などと呼ばれており、最近多くの研究報告がなされている<sup>3-12)</sup>。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<sup>5-9)</sup>。

ここではマイクロ部材のレーザー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、レーザーフォーミングを行った結果について述べる。

## 2. 金属箔の変形加工

レーザーはcw-Nd:YAGレーザーを用いた。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、レーザーを上方から照射する。繰り返し照射の場合には、このレーザー走査回数は往路を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。

レーザー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、試料表面にレーザー吸収剤は使用していない。

### 2.1 変形方向

箔はレーザー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。レーザーパワー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)はレーザー照射側、(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

照射するレーザーパワー(P)の変形角度に及ぼす影響を

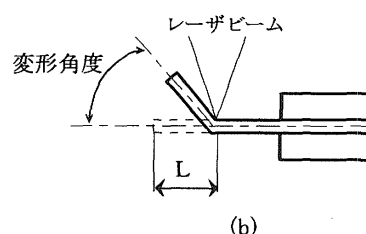
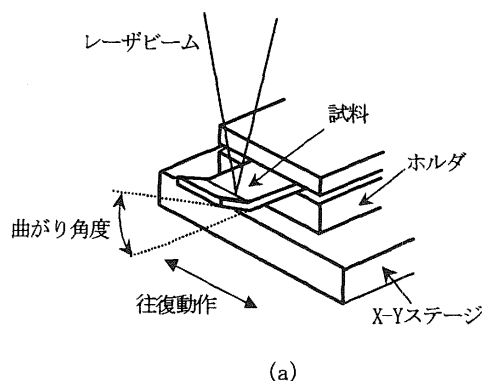
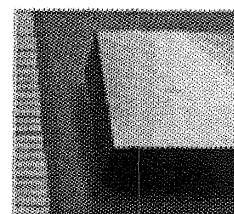
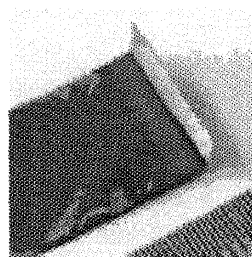


図1 実験方法



(a) 表

(b) 裏

図2 変形加工例

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 $50\mu\text{m}$ 、レーザーの走査速度(v): $10\text{mm/s}$ 、走査回数(N):10、 $L=0.6\text{mm}$ である。

実験結果を図3に示す。各材料ともレーザー照射パワーの増加と共に変形角度も増加する。SUS304材ではレーザーパワーが、0.35W以下では変形が生じず、約0.5W以上では表層部に熔融が発生しているのが断面部の光学顕微鏡観察から明らかにされた。したがって、熔融なしに変形を行なうためには、この範囲内のレーザーパワーを用いることが必要となる。コパールでも同じような様相を示し、0.2W以下では変形せず、また、0.4Wでは熔融が生じた。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  $P=0.4, 0.5W$ 、 $v=10\text{mm/s}$ 、 $N=10$  であり、レーザービームスポット径を  $\phi 50\sim 200\mu\text{m}$  と変化させた。実験結果を図4に示す。前述のようにレーザーパワーが  $0.5W$ 、スポット径  $50\mu\text{m}$  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。

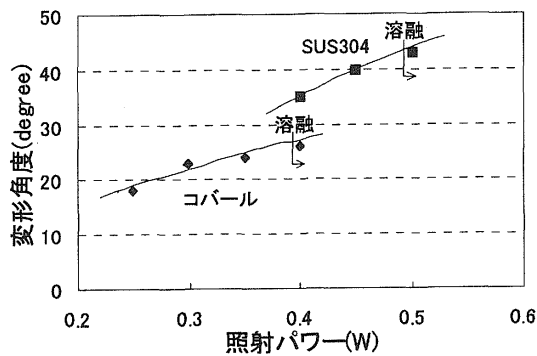


図3 レーザパワーの影響

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減少、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。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。

### 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。 $v=10\text{mm/s}$  の時、変形角度が最大を示している。これは、この速度より遅くなると、照射部に溶融が生じるため変形量が減少するためである。なお、 $v=5\text{mm/s}$  未満の速度では、溶断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  $P=0.4W$ 、 $v=10\text{mm/s}$

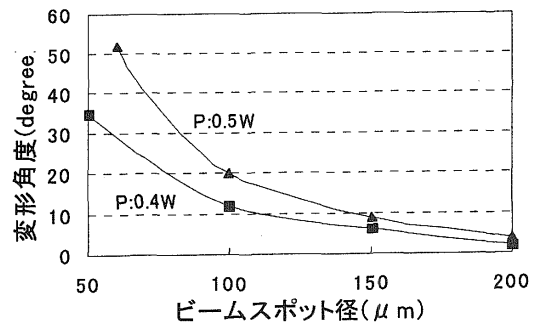


図4 レーザビームスポット径の影響

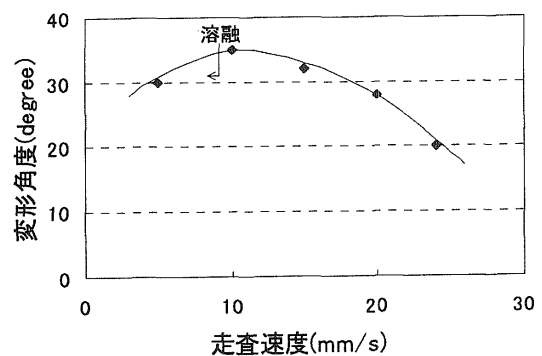


図5 レーザ走査速度の影響

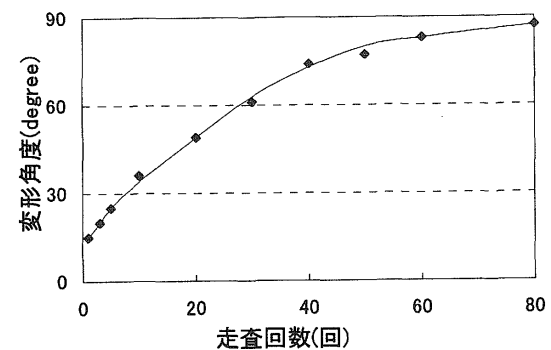


図6 レーザ走査回数の影響

である。一回目のレーザー照射による変形角度が一番大きい。

それ以降は徐々に小さくなり、それ以降では飽和の傾向を示す。これは、変形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。

### 2.6 照射位置と変形角度の関係

試料の端部からレーザー照射部までの距離 ( $L$ ) が変形角

度に及ぼす影響を調べた。条件は $P=0.4W$ 、 $v=10\text{mm/s}$ 、 $N=10$ 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 $0.5\text{mm}$ 以下では箔端部と照射部との間が短くなるために熱の拡散が端部側へ起こりにくくなり、レーザー照射部が熔融するため、変形角度が減少する。

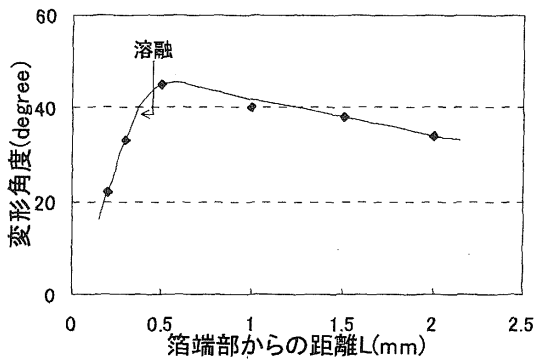


図7 レーザ照射位置の影響

### 2.7 箔を用いた微細部品の加工例

上記の結果を参考にして、寸法約 $0.3\text{mm}$ の風車の部品製作を試みた(図8)。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。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9(a,b)に示す。図9(a)の三角部はボールペンの先端(約 $0.5\text{mm}$ )であり、その上部にある×状の黒点が製作した風車である。これを拡大したものが図9(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た。

図10はサイコロ状部品の製造結果の写真である。

材料はSUS304、箔厚 $10\mu\text{m}$ であり、一辺が $0.5\text{mm}$ である。サイコロ物体の展開図部材を母材から切り離さずにレーザー切断で製作し、その展開図の折り曲げ部にレーザー変形加工を適用し、各変形場所を内側に変形させ、さらに曲げ加工した部分の凸側からの照射で凹側に曲げることができるという結果<sup>13)</sup>を利用し、1辺 $0.5\text{mm}$ のサイコロ状箱を製作したものである。

### 3. 金属細線の変形加工

一般的には、レーザー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、レーザー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

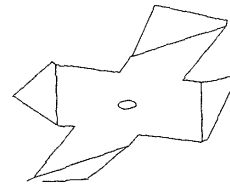
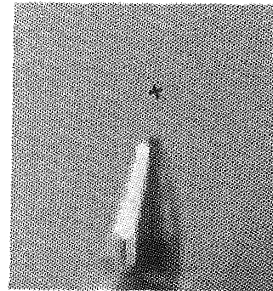
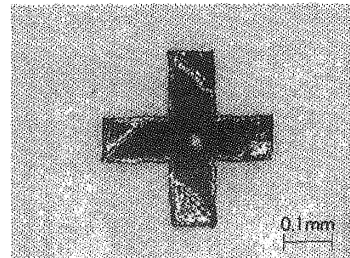


図8 微細風車概観



(a) ボールペンとの対比



(b) 風車部拡大  
図9 微細風車

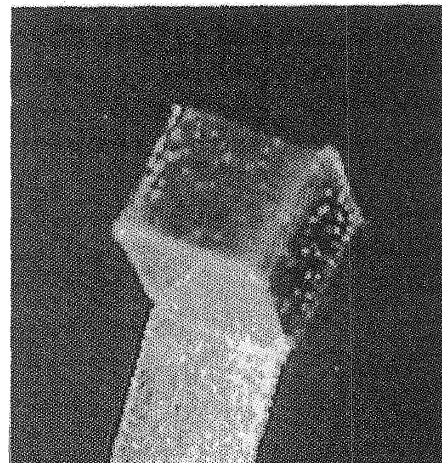


図10 1辺:  $0.5\text{mm}$ のサイコロ状部品の製作

無ければ、何ら問題ない場合もあることは当然である。ここでは、金属細線の曲げ加工時にレーザー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として、細線の曲げ加工についての検討結果について述べる。

図 11 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。

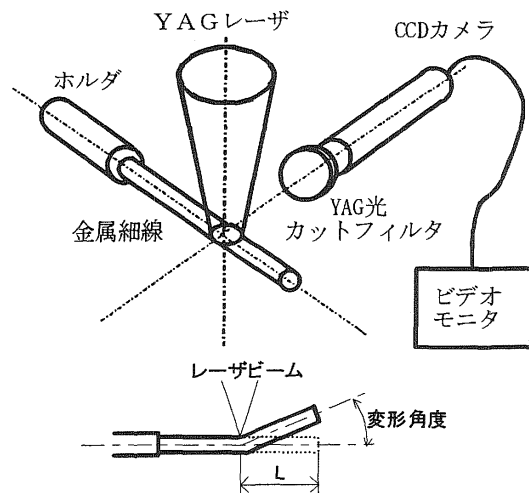


図 11 細線曲げ実験装置

### 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 12 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 12 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。

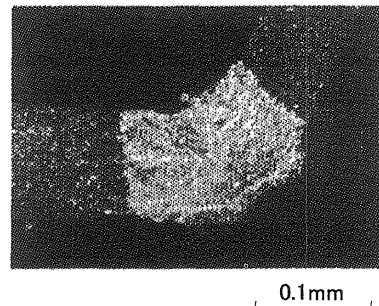


図 12 金属細線レーザ曲げ部断面 (SUS304)

### 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 13 に示す。図 13 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。

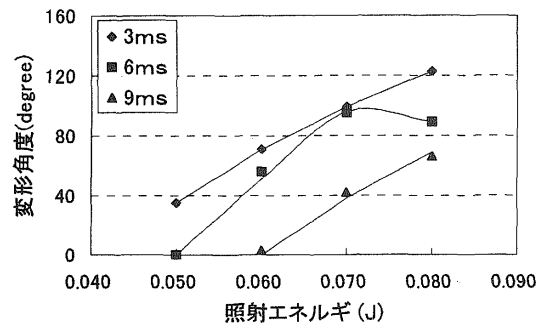


図 13 照射エネルギーと変形角度

図 13 での各試料の溶融体積  $V$  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。なお、今回の条件では、パルス幅が短い試料の溶融体積が大きい値であった。

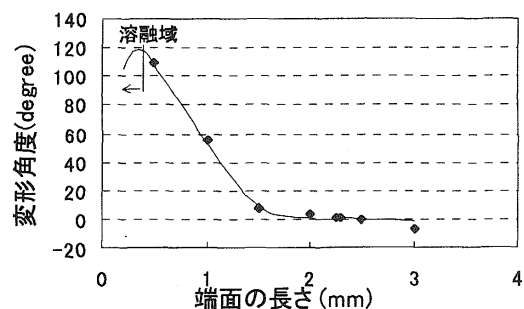


図 14 自由端部からの距離と変形角度

### 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 14 に示す。図 14 から、 $L$  が  $1.5\text{mm}$  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。

### 3.5 角度修正

一度変形した部分に、再度反対方向からレーザーを照射した場合、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 のレーザーで約 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ーを照射し、ほぼ直線状に修正した例が図 15 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、さらにレーザー変形-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、その後のレーザー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、同条件のレーザーであっても、一回のレーザー照射による変形角度が小さくなる。これは、一度目の加工での熔融による、試料表面状態の変化、熔融部分の直径が若干大きくなるためと考えられる。

### 3.6 高速度ビデオカメラによる観察

レーザー照射中の高速度ビデオカメラ撮影結果 (2000FPS) を図 16 に示す。レーザー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、レーザー照射開始からの経過時間： $t=0.5ms$  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、レーザー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、レーザー照射方向とは逆の下方に変形を始め、 $t=1.0ms$  で約 2~3 度変形している。細線上方のレーザー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。

$t=3.0ms$  では、その変形した自由端部はほぼ 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。

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

プルームの発光は  $t=0.5ms$  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。 $t=3.5ms$  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。

レーザー照射側に変形が開始してから ( $t=3.5ms$ ~) 終了

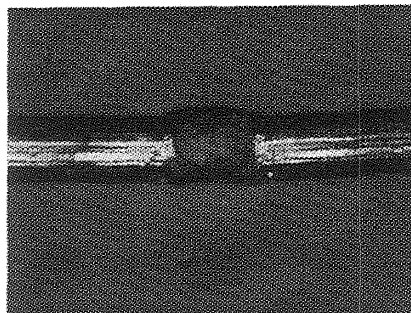


図 15 角度修正した SUS304 細線  
(30 度曲げた試料に裏面より 4 回照射)

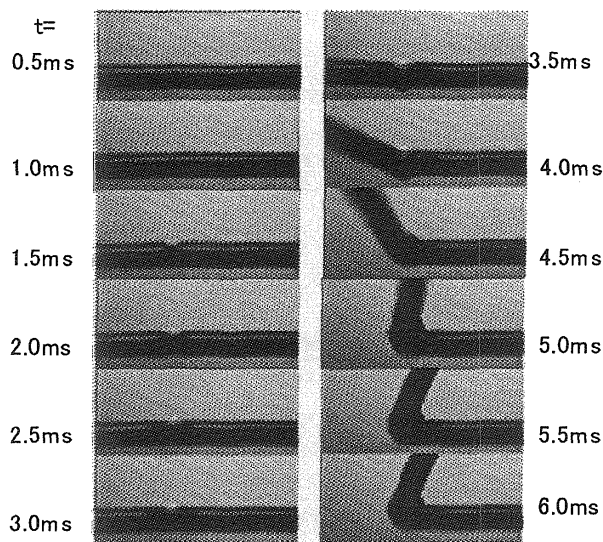


図 16 高速度ビデオカメラ撮影写真

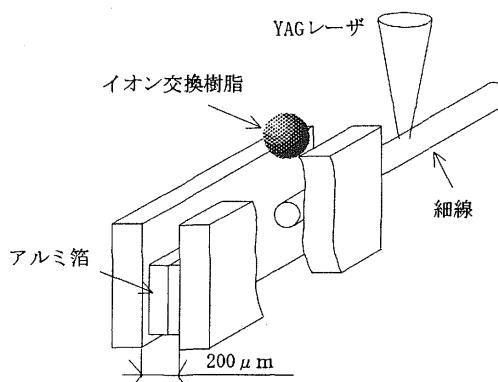


図 17 微細球跳ね飛ばし設置法

するまで ( $t=5.5ms$ ) 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。

### 3.7 微細球の跳ね飛ばし実験

上で示したように、細線の変形角速度は非常に大きい。これで微細物の跳ね飛ばしができるかどうかを調べた。

図 17 に示すように、二枚のライドガラスの間に、約  $200\ \mu\text{m}$  の隙間を構成した。そのガラス上に直径約  $0.3\text{mm}$  の微細球（イオン交換樹脂）をのせ、隙間に細線を配置した。この状態で、図に示すように細線にレーザを照射すると、細線が変形し、速い角速度で微細球を跳ね飛ばす。なお直径  $0.3\text{mm}$  の微細球の質量は、約  $5 \times 10^{-5}\text{g}$  である。

レーザ条件は、パルス幅  $6\text{ms}$ 、照射エネルギー  $0.075\text{J}$ 、 $L=0.5\text{mm}$  である。

図 18 は、微細球を飛ばした時の、高速度ビデオ画像である。微細球を上方に  $3.1\text{mm}$  程度飛ばすことができた。また、球と細線の接触位置を変えることにより、球を前方、上方、後方と種々の方向に飛ばすことが出来た。

高速度ビデオの画像から等加速度直線運動であることが分かる。また、その加速度は、 $2.2 \times 10^{-5}\text{m/s}^2$  であった。この細線の急速変形（移動）の利用法として、移動中の微細物選別時に適用できる可能性がある。

#### 4. まとめ

ここでは金属箔のレーザフォーミングに関する種々の知見を示した。その結果を要約すると以下ようになる。

- (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。  
これは微小角を必要とする時に利用できる。
- (3) 細線の変形を高速度ビデオで観察し、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.

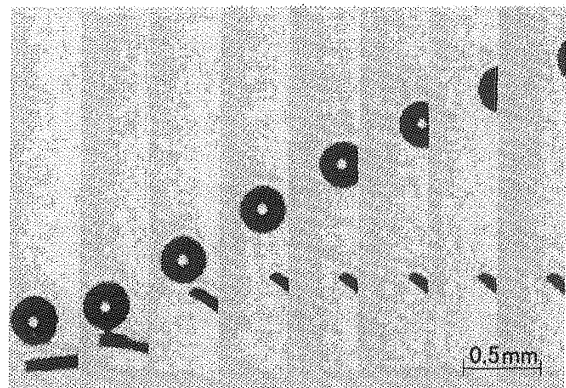


図 18 微細球の跳ね飛ばし

- 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 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) 杓名宗春, 久野良太郎他: 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) 杓名宗春, 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) 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.
- 11) 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
- 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) 斎藤昌利, 宮崎俊行, 三須直志, 吉岡俊朗: 半導体レーザによる金属薄板の曲げ加工の試み, 精密工学会東北支部講演会(2000 年秋田)講演論文集(2000)41-42.