

# レーザー微細加工技術を駆使したマイクロマシン製作システムの開発

千葉大学大学院 人工システム科学専攻

助教 松坂壮太

(平成 20 年度一般研究開発助成 AF-2008205)

キーワード： マイクロマシン，ファイバーレーザー，レーザーフォーミング，マイクロピンセット，ギアボックス

## 1. 研究の背景と目的

近年、マイクロマシン製作に関する研究が活発に行われており、その要素製作技術も、リソグラフィ/エッチング法をはじめとして、機械加工法、レーザー加工法等、多岐に亘っている<sup>1)</sup>。しかしながら、それらの微小要素を集積・統合する手法については、十分に検討が進められているとは言えない。レーザー加工法<sup>2),3)</sup>は、他の微細加工法と比較して、加工対象材料に制約がなく、また除去加工のみならず曲げ加工、接合加工も実施できるという利点を有しており、マイクロマシンの一貫製作システム構築に好適な加工法と考えられる。そこで本研究では、ファイバーレーザー微細加工システムを用いたマイクロ機能要素の製作とそれらの把持・組立手法の開発の2点を研究目的とした。本稿では、これらの手法を用いた、1辺1.4 mmの微小ギアボックスの製作例について報告する。

## 2. 実験方法

### 2・1 加工システムの構成

実験に使用したレーザー発振器はYb添加ファイバーレーザー(フジクラ, FL-01, 波長: 1064 nm, パルス幅: 80~100 ns, 繰返し周波数: 10~100 kHz)である。加工用サンプルは、自動5軸ステージ(駿河精機, KS201-20HD(x-y軸), KS3232-8N(z軸), KS401-60( $\theta$ ,  $\omega$ 軸)上に設置され、可動ミラーにより鉛直上方または水平方向よりレーザー光が照射される。自動5軸ステージは、ステージコントローラを介してPCに接続され、VisualBasic (Microsoft)プログラムにより制御可能である。Fig. 1(a)に加工装置の概略を、Fig. 1(b)に今回の実験で用いたステージ配置を示す。サンプル上方( $\theta$ 軸上)および側方( $\omega$ 軸上)には CCD カメラを設置し、ステージの回転軸とレーザー照射位置の整合ならびに加工中のサンプル観察に使用した。

### 2・2 供試材料

加工対象は、ステンレス鋼板(SUS304, 板厚: 50, 100  $\mu\text{m}$ )および、ステンレス鋼管(SUS304, 外径: 1.34 mm, 内径: 1.25 mm)であり、板状試料は機能要素および格納用筐体の製作に、また管状試料は要素把持用マイクロピンセットの製作に使用した。

### 2・3 目的とする製作物の形状

#### 2・3・1 マイクロギア, ストッパーおよびギアボックス

マイクロギアは、Table 1に示す大小2枚の歯車形状を、板状試料(板厚: 100  $\mu\text{m}$ )から切り出すことで製作した。また、ギア固定用のストッパーおよびギアボックスは、板状試料(板厚: 50  $\mu\text{m}$ )から展開図を切り抜いた後、レーザーフォーミング法により曲げ加工を行うことで製作した。切り抜きの際には、実寸法と設計寸法との誤差を低減するため、ビーム径(約30  $\mu\text{m}$ )を考慮してステージを駆動した。目標とするマイクロギア, ストッパーおよびギアボックスの概略をFig. 2(a)に示す。

#### 2・3・2 マイクロピンセット

本研究で製作するマイクロピンセットの概略をFig. 2(b)に示す。本ピンセットは、2ないし3本の曲がり爪を有する内側管とスライド可能な外側管から構成され、スライドした外側管が曲がり爪を押すことにより、爪先端部で各種要素を把持可能となる。曲がり爪部分は、管状試料から爪形状を切り抜いた後、レーザーフォーミング法により、爪中央部を管内側へ曲げ、さらに爪根元部を管外側へ曲げることによって製作した。

### 2・4 レーザ照射条件

板状試料の切断・曲げ、管状試料の切断・曲げに用いたレーザー照射条件をTable 2に示す。各試料の切断に関しては、予備実験の結果から、切断面のテーパ化が抑制可能で、かつ熱影響部の少ない条件を選定した。一方、レーザーフォーミング法による曲げ加工に関しては、被加工材の板厚とビーム径の比によって、一般的に次の3種類のメカニズムが知られている。

(a) Temperature Gradient Mechanism (TGM): ビーム径が板厚に比べて十分に小さい場合。曲げはレーザー照射方向。

(b) Upsetting Mechanism (UM): ビーム径が板厚と同程度から数倍程度の場合。曲げはレーザー照射方向。

(c) Buckling Mechanism (BM): ビーム径が板厚に比べて十分に大きい場合。曲げ方向は不定。

このうち、TGMでは、鋭角に曲げることが可能であるが、レーザー照射により加工部分の材料が除去される可能性を有することから、本研究では、UMおよびBMにより曲げ加工を行うことにした。なお、BMでは曲げ方向を予測することが困難であるが、UMにより初期曲げを行っておくことで、任意の曲げ方向を得ることができる。

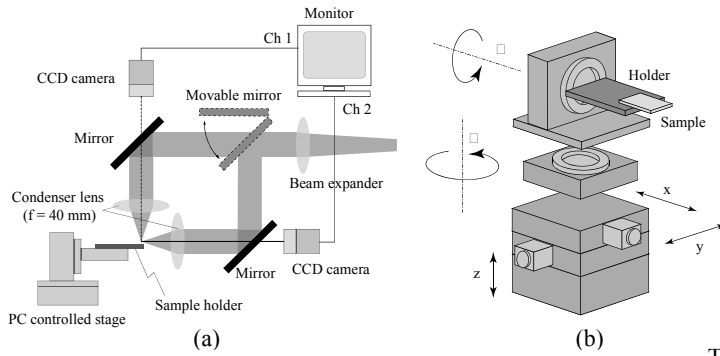


Fig. 1 Schematic illustrations of experimental set-up. (a) Overview and (b) stage alignment.

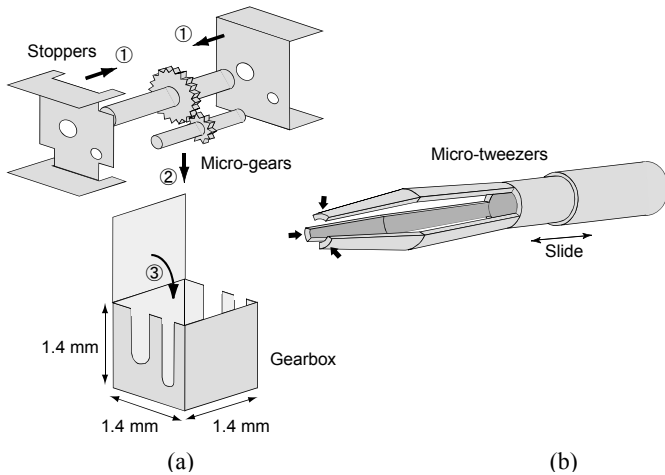


Fig. 2 Design of (a) micro-gearbox, and (b) micro-tweezers.

### 3. 実験結果

#### 3・1 マイクロギア

切断により製作した2枚のマイクロギアのSEM写真をFig. 3に示す。ギアには直径約200および400 μmの丸穴をあけ、それぞれ電解エッチングにより若干のテーパを施したステンレス鋼線を通して固定している。Fig. 3から、特に小径のギアにおいて切断面の荒れが見られるものの、概ね設計通りのギアが加工できていることが確認された。

#### 3・2 ギアボックス

立方体状のギアボックス製作にあたり、高精度な加工を実現するため、まず基本となる展開図の選定を行った。Fig. 4に一般的に知られている正六面体の11種の展開図を示す。同図左の2~4の数字は、1列に並んだ面の最大数を示している。これらの展開図に対し、次の3点に留意して、ボックス製作に最適な展開図および加工手順を選定した。

- (a) レーザを照射可能な方向がθおよびω軸の2軸に限定されること
- (b) ボックス作製中の試料の落下を防止するため、少なくとも1辺を切断せずに残す必要があること
- (c) レーザ照射点の位置ズレを抑制するため、レーザ照射軸の変更を多用しないこと。また、可能な限り同一平面上で加工を行うこと。

	Small gear	Large gear
Number of teeth	10	20
Module	0.04	
Pressure angle [degree]	20	
Pitch circle diameter [μm]	400	800
Addendum circle diameter [μm]	480	880
Root circle diameter [μm]	300	700

Table 2 Experimental conditions for laser cutting and forming of SUS304 steel sheets and pipe.

Specimen	Sheet [Thickness: 100 μm]		Sheet [Thickness: 50 μm]		Pipe [Thickness: 90 μm]		
	Cut	Cut	Bend	Bend	Cut	Bend	
Bending mechanism	---	---	UM	BM	---	UM	BM
Frequency [kHz]	52						
Power [W]	1.3	1.1	1.3	2.5	1.3	2.4	2.8
Beam diameter [μm]	30	30	46	192	30	208	265
Scan speed [μm/s]	100	700	8000	8000	120	8000	8000

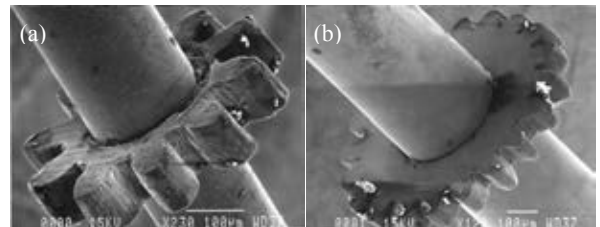


Fig. 3 SEM photographs of processed micro-gears. (a) Small and (b) large gear.

Fig. 4中で、④⑩⑪は2方向からのレーザ照射のみでは加工が困難であり、①②③⑤⑥は1列に4つの面が並んでおり、レーザ照射時の熱歪みにより加工面からの位置ズレが大きくなるため除外した。残りの⑦⑧⑨の中で、2方向からボックスを支持可能なものは⑧のみであるため、以下では⑧の展開図から、曲げ加工によりボックス形状の製作を試みた。

Fig. 5 (a) に製作するギアボックスの展開図を、Fig. 5 (b) に曲げ加工の手順を示す。この展開図を使用することによって、曲げ加工中のボックスはFig. 5 (a) 中の太い点線で示される2辺で支持され、またFig. 5 (b) から分かるように、最終工程を除く①~④の曲げ加工を同一平面上で行うことができる。製作したギアボックスの外観をFig. 6に示す。Fig. 6から各面間の隙間の小さいボックス形状が製作できていることが分かる。

一方、マイクロボックスと同様に、切断と曲げ加工により、2種類のギアストッパーを製作した。結果をFig. 7に示す。これらの要素も、概ね設計通りの加工が可能となっていた。

#### 3・3 マイクロピンセット

管状試料の切断および曲げ加工により製作した曲がり爪形状をFig. 8 (a) および(c) に示す。いずれの曲がり爪に

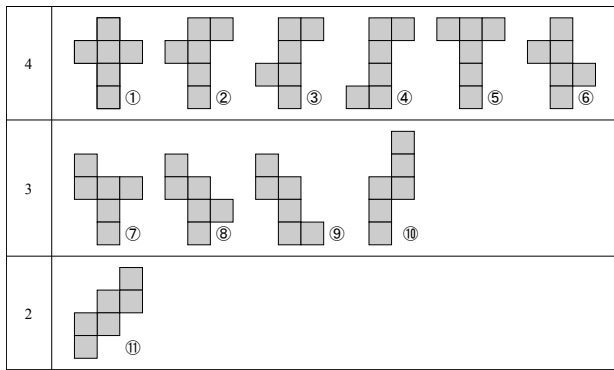


Fig. 4 Eleven distinct nets of a cube.

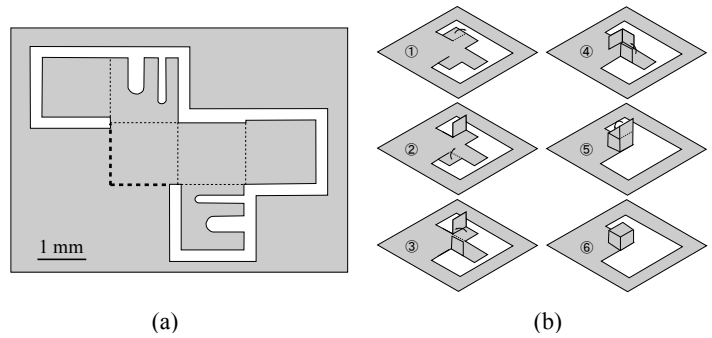


Fig. 5 Laser forming procedure for the fabrication of micro-gearbox.

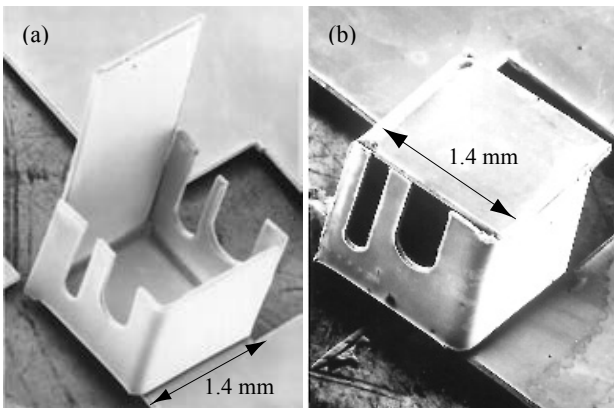


Fig. 6 SEM photographs of fabricated micro-gearboxes. (a) Before and (b) after covering.

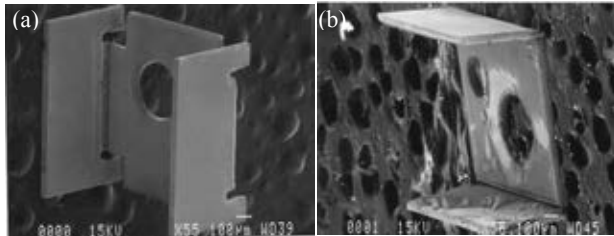


Fig. 7 SEM photographs of two types of gear-stoppers.

おいても、中央部、根元部ともに十分な曲がり角が得られており、外側管のスライド動作によりマイクロ機能要素の把持が可能になるものと考えられる。そこで、超音波リニアアクチュエータ（テクノハンズ、TULA）に内側・外側管を設置し、スライド動作を試みた。要素の把持結果を Fig. 8 (b) および(d) に示す。各種要素の把持を行った結果、3指の場合には丸棒等の3次元形状物が、2指の場合には、ギアやギアストッパー等の2次元形状物の把持に適していることが分かった。

### 3・4 各種部品の組立

上述の軸付マイクロギア、ギアストッパーを、マイクロピンセットにより把持、組み立てた後、ギアボックス中に格納した。結果を Fig. 9 に示す。同図より、全ての要素が設計通りに配置されていることが確認された。また一方の軸の回転により、他方の軸が回転することも確認された。

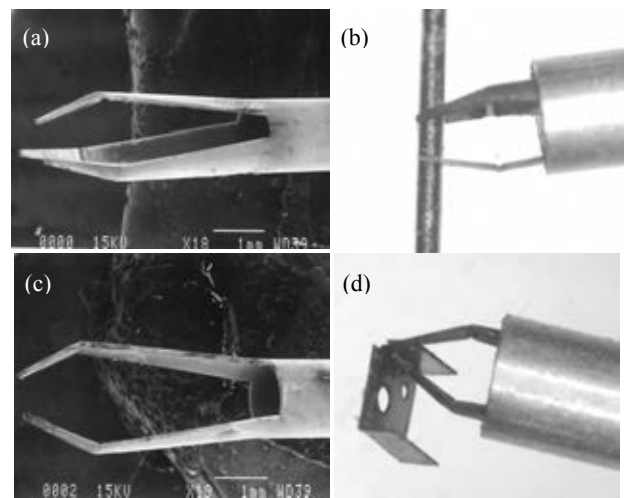


Fig. 8 Fabricated micro-tweezers. (a) and (b) three fingers, (c) and (d) two fingers.

本研究ではこのほか、ボックスとカバーを別個に製作し、組み立てることも行った。その一例を Fig. 10 に示す。特に Fig. 10 のボックスについては、はめ合い部に対してレーザー隅肉溶接を試みたが、レーザー照射位置の制御が困難であること、また2つの要素に若干のギャップがあること等の理由により、十分な接合強度を有するボックスの製作には至っていない。今後は、より精密な曲げ加工を行い、要素間のギャップを低減する必要がある。

また、本研究で製作したマイクロピンセットは、20 回程度の開閉動作については支障がないものの、それ以上の開閉を繰り返した場合、曲がり爪部が塑性変形し、十分な把持を行うことができなかった。今回の実験では管状試料の入手の容易さから、ステンレス鋼管を使用した。繰り返し可能回数を増加させるためには、ばね特性に優れた材料の使用が必要となる。

### 4. 結言

本研究では、ファイバーレーザー微細加工システムを用いて、1辺1.4 mmの微小ギアボックスの製作を試みた。同時に製作されたマイクロピンセットを用いることにより、ギアボックス中には、2枚のマイクロギアおよび、2種類のギアストッパーが格納され、動力伝達も可能であること

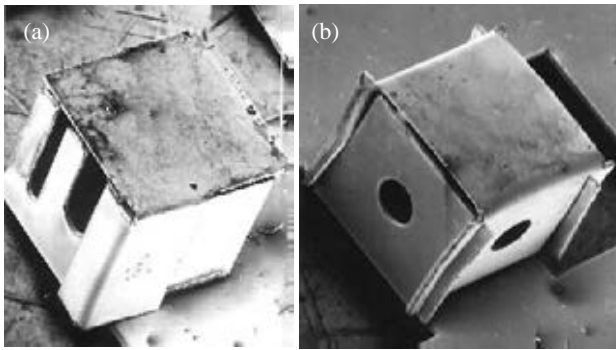


Fig. 9 Two types of covered micro-boxes.

が確認された。今後は、切断・曲げ精度のさらなる向上を図り、各面間の溶接によるボックスの封止までを行いたいと考えている。

#### 謝辞

本研究の実施に際し、天田金属加工機械技術振興財団より研究助成(AF-2008205)を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。また、ファイバーレーザ発振器をご貸与頂いたフジクラ(株)および、実験にご協力頂いた、千葉大学大学院 伊東聡氏、緒方豪氏、毛塚翔吾氏に感謝致します。

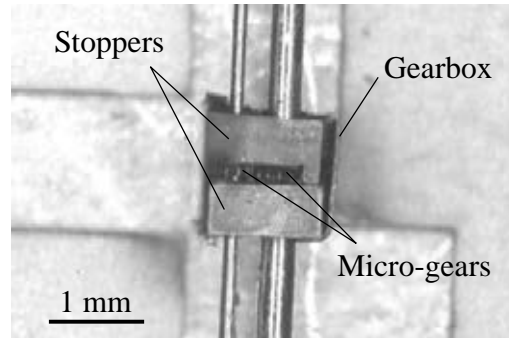


Fig. 10 Assembled micro-gearbox.

#### 参考文献

- [1] 藤田博之, 「マイクロ・ナノマシン技術入門」, 工業調査会, (2003).
- [2] A. Kai, and Y. Kawamura, 'Laser Micro Machining of Ultraviolet and Infrared Simultaneous Irradiation', Proceedings of SPIE, **5662**, 538-542 (2004).
- [3] 松坂壮太, 飯島賢介, 渡部武弘, 「5軸レーザ加工法によるマイクロ機能要素の製作」, レーザ加工学会誌, **14**, 255-259 (2007).