光熱効果によるマイクロディスクの駆動（第2報）*

— 進行波の方向制御と振幅制御 —

伊 藤 来** 辻 裕 一***

Driving the Micro-disk by Photothermal-Effect(2nd Report)

— Direction and Amplitude Control of Traveling Wave of Micro-disk —

Rai ITOH and Hirokazu TSUJI

By using modulated laser diode, standing wave is excited on the micro-disk, and guide line of the selection of material for photothermal effect is shown from the properties of the disk material. Amplitude increases with decreasing the thickness of micro-disk. Amplitude increases with ratio of the coefficient of thermal expansion and the thermal conductivity. Moreover, amplitude increases with laser output. It is obtained that stainless steel is most suitable material for photothermal-effect from the properties of the disk material.

Traveling wave of mode shape No.3 is excited on a micro-disk by using two modulated laser diodes. Amplitude and direction of the traveling wave are controlled by changing duty ratio of a laser and phase difference. By controlling the phase of the modulated laser diode, traveling wave generated on the micro-disk is controlled to the direction of clockwise or counter-clockwise. By controlling the duty ratio of the modulated laser diode similar to the PWM control, amplitude of standing wave and traveling wave are controlled. The highest peak-to-peak amplitude of standing wave is generated at the duty ratio of 75% and highest peak-to-peak amplitude of traveling wave is generated at the duty ratio of 70%.

Key words: micromachine, photothermal-effect, standing wave, traveling wave, pulse width modulation

1. 結 言

マイクロマシンは微小機械製作を行うマイクロファクトリ¹⁾および医療用のマイクロカテーテル²⁾, カプセル内視鏡, プラント用メンテナンスマシン³⁾などに代表されるアクチュエータと, 加速度計および圧力計⁴⁾, 流量計⁵⁾, マイクロミラー⁶⁾などに代表されるセンサに大別される。これらマイクロマシンは両分野において様々な技術を築いている⁷⁾。

マイクロマシンは様々な物理現象を利用し駆動される。その中に駆動エネルギーに光を利用する光マイクロマシンがある。光を駆動エネルギーにする場合, 非接触でエネルギーの供給が可能であり, マイクロマシンの遠隔操作も容易になる。光マイクロマシンの中でも様々な種類の研究が行われている⁸⁾。中でも光熱効果を利用するマイクロマシンは光を電流, 電圧の様な電気エネルギーに変換せず直接駆動力が得られる利点がある。

本研究は, 光マイクロマシンの中で, 光熱効果を利用し, さらに超音波モータと同様の駆動原理を持つ光マイクロアクチュエータの開発を目指している。第1報⁹⁾において, マイクロディスク(以下ディスク)について強度変調させた半導体レーザによる駆動を試み, 発生するディスクの振幅の測定, および振動モードの解析を行い, ディスクへの定在波の発生に成功している。さらに応用として複数のレーザを使用してディスクへの進行波励起を検討し, 2本の半導体レーザ(波長 685 nm, 出力 10 mW)を使用し, 位相の異なる定在波を重ね合わせディスクへの進行波励起に成功している。

第2報では, ディスクを光アクチュエータとして利用するた

め, 光熱効果に適した材料の選定を行い, 振幅の増加について最適条件を求める。次に超音波モータと同様の駆動原理を持つ光アクチュエータとしての利用に必要な制御として, ディスクへ励起させる進行波の方向制御を試みる。さらにディスクへ照射するレーザのデューティ比を変化させることで Pulse Width Modulation 制御¹⁰⁾(以下, PWM)と類似した制御法による振幅の制御を試み, 光マイクロアクチュエータとしての応用を検討する。

2. 光熱駆動における振幅増加のための最適条件

2.1 材料と駆動エネルギーの最適条件

図1にマイクロディスクの光熱駆動の原理を示す。ディスクの表面に光を照射すると光が吸収され表面に熱が発生する。周期的な光強度の変動を与えると, ディスクの表面温度も変化しディスク内部に伝導する。そして温度分布が厚さ方向に不均一になり熱ひずみが発生しディスクに曲げが発生する。熱ひずみはディスク表面付近のみに発生するので, 厚さ方向や円周方向, 半径方向の伸びに比較し曲げによる変形が顕著になる。発生した振動はディスク全体に伝播する。照射する光の周期とディスクの共振周波数が一致すればディスクが共振状態となり定在波が発生する。ディスクの振動モードによって発生する定在波が決定される。

光熱効果によりディスクに発生する振幅は小さく, 進行波による微小物体の搬送やマイクロモータへの応用を行うためには振幅の増加が課題である。そこで, ディスク材質, 寸法効果, およびレーザ出力から, 発生する振幅の増加について最適条件を求める。

図2に光熱効果によりディスクに発生するたわみを求めるためのモデルを示す。光熱効果によりディスクへ生じる振幅 δ

* 原稿受付 平成 19 年 6 月 25 日

** 正 会 員 東京電機大学大学院 (埼玉県比企郡鳩山町石坂)

*** 正 会 員 東京電機大学 (埼玉県比企郡鳩山町石坂)

がディスクに曲げモーメント M を与えたときに発生するたわみ量 δ と等しいと仮定する。内周 b が固定され、任意の半径上 r に曲げモーメント M が働くディスクのたわみ δ は以下で与えられる¹⁰⁾。

$$\delta = \frac{M}{2D} \cdot \frac{r^2 - b^2 - 2b^2 \log r/b}{(1+\nu) + (1-\nu)b^2/a^2} \quad (1)$$

ここで、 a はディスク半径、 b は中心固定距離、 ν はポアソン比である。曲げ剛性 D はディスクの厚さを h 、縦弾性係数を E とすると次式で与えられる。

$$D = \frac{ah^3}{12} E \quad (2)$$

ディスクの中心を点で固定する場合のたわみは式(1)において $r=0.7a$ 、 $b \approx 0$ として

$$\delta = \frac{3Ma}{h^3 E(1+\nu)} \quad (3)$$

となり、ディスクに生じるたわみは曲げモーメントに比例する。ディスクに光が照射されると光熱効果により熱ひずみが生じ、曲げモーメントが発生する。したがって、曲げモーメントは熱応力に比例すると仮定できる。ディスクの線膨張率を α 、レーザ照射後のディスク表面の温度を t_ϕ 、裏面温度を t とすると、ディスクへ生じる曲げモーメントは熱応力 σ により

$$M \propto \sigma = \alpha E(t - t_0) \quad (4)$$

で与えられる。また、ディスクの厚さ方向の温度勾配が大きいほど熱応力は大きくなるので、ディスクの熱伝導率を κ 、照射するレーザパワーを P_L とすると式(4)は

$$M \propto \frac{\alpha E P_L h}{\kappa} \quad (5)$$

と書き換えられ、直径 a で無次元化したたわみ δ/a は

$$\frac{\delta}{a} \propto \frac{3\alpha P_L}{h^2 \kappa (1+\nu)} \quad (6)$$

と与えられる。光熱効果は材料の種類に依存せず駆動力を得られるのが特徴であるが、式(6)から、光熱効果によりディスクへ生じる振幅を増加させるためには、ディスクの厚さを薄くし、線膨張率と熱伝導率の比 α/κ が大きい材料を選定すれば良く、さらにレーザパワーを大きくすれば良いという最適条件が得られる。

2.2 材料と駆動エネルギーの最適条件の確認

光熱効果によりディスクへ定在波を発生させる実験装置を構成した。図3に実験装置を示す。ディスクの駆動には半導体レーザ（波長 685 nm、最大出力 16 mW）を用いる。半導体レーザをディスクの3次の共振周波数に変調させディスクへ照射する。レーザはディスクの中心から半径の70%だけ離れた円周上を12等分した点のうち1点に照射し、熱平衡状態まで照射を続ける。駆動用レーザが照射される点は光の反射を防ぐため黒く塗られている。

光熱駆動によりディスクへ発生する振幅の測定は光てこ法により行う。ディスクの先端付近に He-Ne レーザ光を照射し、反射光の変位量を二分割フォトダイオードで検出する。ディスクへ発生した変位量は光てこにより拡大され検出される。拡大された変位量と幾何学的な拡大率により実際の振幅を求める。

Fig.1 Photothermal driving of micro-disk

Fig.2 Circular plate subjected to force at outer diameter

Fig.3 Schematic diagram of the experimental apparatus for photothermal driving of micro-disk

Fig.4 Calibration of optical displacement sensor

測定の前に変位センサのキャリブレーションを行う。検出部である二分割フォトダイオードはXZステージに取り付けられている。ディスクから反射されたレーザ光のスポットを検出部中心に照射する。XZステージにより検出部を上下に移動させ（20 μm 毎、最大移動量 260 μm ）、スポット移動量と出力の関係を求める。最終的に振幅は、拡大率とセンサ上のスポット移動量の関係より計算される。図4に変位センサのキャリブレーション結果を示す。測定範囲内（スポット移動量 $\pm 30 \mu\text{m}$ ）における直線性を確認した。ディスクのたわみに対する光でこの幾何学的拡大率は100倍である。半導体レーザを直接変位センサに照射し、照射時間を変調させることで0~500kHzの周波数応答性を持つことを確認した。

ディスクに発生する振幅の測定はディスクの中心から半径の90%離れた点とする。駆動用レーザの照射位置を振幅の測定点を基点に 30° づつ変え、それぞれの点で発生する振幅と位相を測定する。

試験片として、直径 10mm のディスクを中心固定したものを使用し、ステンレス鋼（SUS304 製）、黄銅、および銅箔製ディスクを用い、材質物性に対する振幅への影響を検討する。照射するレーザの変調周波数はディスクの3次の共振周波数とする。中心が固定されたディスクの共振周波数は次式で表される¹²⁾。

$$f = \frac{\alpha_{dc} t}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (7)$$

ここで、 α_{dc} は振動モードによる固有値、 t は厚さ、 R は半径、 E は縦弾性係数、 ρ は密度を示す。

図5に各ディスクに発生した最大振幅と最小振幅の差である振幅の範囲（以下、振幅範囲）を示す。また、図中の右上に示す円はディスクが共振時に生じている振動の位相分布を示している。位相分布はSUS304製ディスクの実験結果を代表として示す。位相は変位計測点から時計方向に 30° なす角度で駆動レーザを照射した時に測定される駆動波形を基準波形とし、他点で測定される駆動波形を比較し示している。図5よりディスクは 60° 毎に位相が 180° 反転し、 30° 毎に腹と節を持つことが確認される。これは測定した全てのディスクで確認される。表1に各ディスクに発生した定在波の実験結果を示す。ディスクに共振現象が発生した周波数は式(1)から得られるディスクの3次の共振周波数とほぼ一致することから、光熱効果により各ディスクに3次の共振状態の定在波が励起されることが確認できる。

表1よりディスクの厚さが薄い方が振幅範囲は増大し、線膨張率と熱伝導率の比 α/κ が大きい材料の振幅範囲が増大する。また、レーザ出力が大きい方が振幅範囲は増大する。これらは式(6)が示す結果と一致する。比較した材質の中ではSUS304が最も光熱駆動に適しており、以後の実験はSUS304、直径 10mm、厚さ 24 μm 、中心支持のディスクを使用する。

3. マイクロディスクへの進行波励起

3.1 進行波発生原理と方向制御

ディスクの複数点上に適当な位相差を与えたレーザを照射すると光熱効果により発生した位相の異なる定在波が重なり合い、進行波を励起することが可能である。Iwatsukiらは、光熱効果により厚さ 120 μm のガラス薄膜のプレートとディスクに対し表面弾性波として50nmの振幅範囲の進行波を発生させている¹³⁾。進行波は超音波モータなどに利用されている実績があり、ディスクへ進行波を励起できれば超音波モータと同様の駆動原理を持つ

Fig.5 Amplitude of standing wave and phase contrast map for mode shape No.3

Table 1 Experimental result of standing wave

	Stainless steel		Brass		Copper
Diameter d_0 (mm)	10				
Thickness t (μ m)	24	50			
Coefficient of thermal expansion $\alpha \times 10^{-6}$ (1/K)	17.3		19.0	16.8	
Thermal conductivity κ (W/m $\cdot$ K)	16.3		106	403	
Properties of material $K = \alpha/\kappa$	1.06		0.18	0.042	
Resonance frequency f (kHz)	Eq (7)	2.84	6.5	4.04	4.51
	Experimental result	2.82	6.38	4.28	6.32
Laser power I_0 (mW)	8		16		
Peak-to-peak amplitude A_{p-p} (nm)	184	81.8	508	50.4	49

Fig.6 Excitation of traveling wave on micro-disk

Fig.7 Laser irradiation point on the disk

アクチュエータに発展させられる¹⁴⁾。

図6に光熱効果によるディスクへの進行波励起の原理を示す。ディスクへ共振周波数と一致した周波数のレーザを照射するとその周波数に応じた定在波が発生する。次に第2のレーザを第1のレーザの照射点から円周上に一定の角度をもたせた位置に対して位相を $\pi/2$ 遅らせて照射する。2つのレーザの照射位置は重ね合わせる定在波の隣り合う腹と節であり、腹と節は振動モードにより決まる。2つの位相の異なる定在波が重なり合うことで進行波が発生する。位相の異なる2つの定在波 P_1 及び P_2 により発生する進行波は重ね合わせの原理で次の式で表される。

$$\begin{aligned} P_1 + P_2 &= A \cos(\omega t) \cos n\theta \\ &\quad + A \cos(\omega t - \pi/2) \cos(n\theta - \pi/2) \\ &= A \cos(\omega t - n\theta) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 A は片振幅、 ω は固有振動数、 t は時間、 θ は円周上の角度差、 n は振動モードの次数を表す。

Iwatsuki らの発生させた進行波の方向は1方向のみである。そこで本研究では照射するレーザの位相を制御することで進行波の方向制御を試みる。図7にディスクに照射するビームの位相を示す。ディスクにレーザを照射させるが、(a)とは異なり、第2の半導体レーザの位相を $\pi/2$ 進める。2つの位相の異なる定在波 P_1 及び P_2' により発生する進行波は重ね合わせの原理で次の式で表される。

$$\begin{aligned} P_1 + P_2' &= A \cos(\omega t) \cos n\theta \\ &\quad + A \cos(\omega t + \pi/2) \cos(n\theta - \pi/2) \\ &= A \cos(\omega t + n\theta) \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)より、重ね合わせる定在波の位相を制御することで発生する進行波の進行方向は式(8)と逆方向となり、進行波の方向制御が可能となる。

3.2 進行波の測定

図8に光熱効果によりディスクへ進行波を励起するための実験装置を示す。実験装置の構成および使用する試験片は定在波の発生と同様である。ただし、進行波の励起には2本の半導体レーザ（波長685 nm、最大出力8mW）を使用し、照射するレーザに位相差を与えるために位相差コントローラを設置し、2本のレーザに $\pi/2$ の位相差を与えている。

第1の駆動用レーザをディスクの3次の共振周波数に変調させディスクへ照射する。次に第2の駆動用レーザを第1のレーザに対して時計方向に 30° ずらした円周上に位相を $\pi/2$ だけ遅らせて照射し、熱平衡状態で照射を続ける。駆動用レーザが照射される点は光の反射を防ぐため黒く塗られている。

照射する駆動用レーザの位置をそれぞれ時計方向に 30° づつ変え、計測点に発生する振幅と位相を測定する。変位の計測点はディスクの中心から半径の90%離れた点とする。

次に進行方向を制御するために照射するレーザの位相を逆、すなわち、第2のレーザを第1のレーザに対して時計方向に 30° ずらした円周上に位相を $\pi/2$ だけ進ませて照射し同様の測定を行う。

3.3 進行波の励起と方向制御

図9にディスクに発生する進行波の角度位置に対する位相と振幅範囲の関係を示す。角度位置は変位計測点と第1の駆動レーザのなす角度である。位相差は角度位置 30° において測定された進行波を基準とし、各角度位置において測定される進行波との位相を比べたものである。照射したレーザの変調周波数は

Fig.8 Schematic diagram of the experimental apparatus for excitation of traveling wave on micro-disk

Fig.9 Distribution of amplitude and phase of traveling wave as a function of angular position

Fig.10 Traveling waves in clockwise direction and counter-clockwise direction

ディスクの3次の共振周波数である2.82kHzである。進行波の振幅値は定在波とは異なりほぼ一定の値を示す。発生する進行波の位相は反時計回り方向(CCW)ではレーザの円周方向30°づつの移動に対して90°づつ遅れ、時計回り方向(CW)では90°づつ進む。これよりディスクの円周方向に3次の共振状態の進行波が励起されていることを確認した。この時の進行波の平均振幅範囲はそれぞれ0.19 μm 、0.17 μm である。

図10a)に第2のレーザを第1のレーザに対して位相を時間的に $\pi/2$ だけ遅らせ照射した場合の各計測点における波形、図10b)に第2のレーザを第1のレーザに対して位相を時間的に $\pi/2$ だけ進ませ照射した波形を示す。各波形の正弦波形状の波形がディスクの駆動波形、矩形波がレーザのON-OFF波形である。図中 θ は計測点を基準とする半導体レーザ照射の角度位置である。図よりb)に発生する進行波の向きがa)に対して逆向きであることが確認できる。また、式9)において $m=3$ とすると θ が30°づつ進むと位相は $\pi/2$ 遅れる。同様に式10)において $m=3$ とすると θ が30°づつ進むと位相は $\pi/2$ 進む。進行波の進行方向は、a)の場合、角度位置の30°づつの増加に従い位相が $\pi/2$ づつ遅れる反時計回り方向(CCW)であり、b)の場合、角度位置の30°づつの増加に従い位相が $\pi/2$ づつ進む時計方向回り(CW)であることが確認できる。以上より、照射するレーザの位相を制御することで進行波の方向制御が可能であることを示した。

4. デューティ比による進行波の振幅制御

4.1 デューティ比の制御による定在波の振幅制御

ディスクの振幅を増加させるため、照射するレーザ光のデューティ比を制御し、ディスクへ生じるエネルギー量を変化させるPWMによる進行波の振幅制御を検討する。

図3に示す定在波発生のための実験装置を用い、駆動用レーザのデューティ比を5~95%の間で5%づつ変化させ周期的な照射を行い、振幅範囲の変化を測定する。ディスクの駆動は半導体レーザ(波長685nm, 最大出力8mW)を用いる。図11にデューティ比と振幅範囲の関係を示す。デューティ比5%から75%までは振幅範囲がデューティ比の増加に伴い増加し、デューティ比75%で最大振幅範囲を生じる。デューティ比75%を超えて増加すると振幅範囲が減少するのはディスクに発生する熱が完全に放熱されないためである。デューティ比5~75%においてPWMによる振幅制御が可能であることを確認した。

4.2 デューティ比の最適化による進行波の振幅制御

図12にPWMによる進行波励起のための実験装置を示す。変位計測は光てこ法による。ディスクの駆動はHe-Neレーザ(波長632.8nm, 最大出力8mW)をビームスプリッタにより1:1の強度で分割し、音響光学変調器(AOM)にてデューティ比の制御、および位相差を持たせて強度変調をかけ、光ファイバ入射装置を介してディスクへ照射する。その他の条件は3.2節の進行波の測定と同様である。

レーザのデューティ比を5~95%の間で変化させたとき、デューティ比70%で最大振幅の進行波を得た。進行波では定在波と比較し照射されるレーザのデューティは短くなっている。進行波の発生では、ディスクへ照射されるレーザの数は倍になり、定在波の発生において最大振幅範囲を得たデューティ比75%では、ディスクへ発生する熱が完全に放熱されないため、デューティが短くなったと考えられる。図13にデューティ比50%と70%におけるディスクに発生する進行波の角度位置に対する位相と振幅範囲の関係を示す。角度位置は変位計測点と第1の駆動レーザの

Fig.11 Relation between vibration amplitude and duty ratio

Fig.12 Schematic diagram of the experimental apertures for excitation of traveling wave on micro-disk

Fig.13 Vibration amplitude and phase of traveling wave as a function of angular position

なす角度である。デューティ比50%において振幅範囲は全周にわたりほぼ一定である。デューティ比70%では角度位置180°以外で振幅範囲は全周にわたりほぼ一定である。両デューティ比において位相は円周方向の移動に対して直線的に増加している。これよりディスクの円周方向に共振状態の進行波が反時計回り方向に発生していることが確認できる。デューティ比70%では発生する進行波にゆがみがあるが、これは重ね合わせる定在波にゆがみがあるためである。進行波の平均振幅範囲はデュー

ーティ比 50%で $0.19\mu\text{m}$, 70%で $0.27\mu\text{m}$ となり, 重ね合わせる定在波の振幅範囲が大きいほど大きな進行波の振幅が得られる。以上より, デューティ比を変化させる PWM による振幅制御を可能とした。

5. 結 言

本研究では, 光熱効果によりディスクへ生じる進行波の振幅の増加と方向制御を目的とし以下の結果を得た。

- (1) 光熱効果は材料の種類に依存せず駆動力を得られる特徴があるが, ディスクをモデル化することで, 光熱効果によりディスクへ生じる駆動力を増加させる材料選定の指針を示した。ディスクの厚さを薄くすることおよび, 線膨張率と熱伝導率の比 α/κ が大きい材料を選択することが光熱駆動に最適である。
- (2) 光熱効果によりディスクに定在波を励起させ, 光熱駆動に最適な材料選定の指針の検証を行った。本実験では材料が SUS304 のとき最も良い結果を得た。
- (3) ディスクに位相差を有する 2 本のレーザ照射することで 2 つの定在波を重ね合わせた 3 次の共振状態の進行波を励起させた。また, 照射する 2 本のレーザの位相を制御し励起する進行波の方向を制御した。
- (4) 照射するレーザ光のデューティ比を制御することで PWM による振幅制御を可能とした。定在波はデューティ比が 75%において最大振幅範囲となる。進行波はデューティ比 70%において最大振幅範囲となる。

光熱効果によりディスクへ励起する進行波の方向制御を可能としたことで, 超音波モータと同様の駆動原理を持つ光アクチュエータとして応用する場合の基本的特性を備えていることを示した。

謝 辞

本研究を行うにあたり, 東京電機大学の大学院生 (現: ㈱ニチアス) 林真司氏の助力があったことを付記し, 感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 芦田: 小型化生産システム, 精密工学会誌, **69**, 12, (2003), 1709.
- 2) 芳賀, 江刺: 形状記憶合金コイルを用いた細径能動カテーテル, 電気学会論文誌 E, **120**, 11, (2000), 509.
- 3) 太田: 機器内部作業試作システムの研究, 日本ロボット学会誌, **19**, 3, (2001), 302.
- 4) 高橋, 佐々木: アドバンスドセンサハンドブック, 培風館, (1994), 391.
- 5) 松本, K.Andreas, 前田: 液体粘度の温度依存性を利用する双方向マイクロポンプ, 機械技術研究所報, **53**, 6, (1999).
- 6) 高橋, 竹内, 藤田: 光応用計測用 MEMS 光スキャナ, 電気学会論文誌 E, **123**, 10, (2003), 403.
- 7) 五十嵐, 江刺, 藤田: マイクロオプトメカトロニクスハンドブック, 朝倉書店, (1997), 181.
- 8) 澤田, 羽根, 日暮: 光マイクロマシン, オーム社, (2002), 58.
- 9) 伊藤, 辻: 光熱効果によるマイクロディスクの駆動 (第1報), 精密工学会誌, **73**, 2, (2007), 218.
- 10) PWM インバーター制御法とその評価法調査専門委員会: PWM インバーター制御方式の最新技術動向, 電気学会技術報告, 635, (1997), 13.
- 11) 中原: 材料力学下巻, 養賢堂, (1966), 149.
- 12) 小堀: 振動計算法, 工学図書, (1978), 326.
- 13) T.Iwatsuki, et.al: Excitation of progressive plate wave by the photothermal-effect, Sensors and Actuators, A35, (1992), 81.
- 14) 高橋, 黒澤, 樋口, 弾性表面波モータ, 信学技報, US94, **74**, (1994)31.