

正逆回転が可能なダブル羽根光圧回転体の提案と基本特性

正員 浮田 宏生* 非会員 伊部 勇作**
 非会員 大西 貴和***

A Proposal of a Linked Optical Rotor and its Fundamental Characteristics

Hiroo Ukita*, Member, Yusaku Ibe**, Non-member, Takakazu Ohnishi***, Non-member

A clockwise rotor and a counterclockwise rotor are linked on the optical axis to control the rotation direction by displacing the trapping position. The optical torque of the linked rotor is analyzed for upward-directed focused laser illumination using a ray optics model, under the condition that laser light is incident to not only the lower surfaces but also the side surfaces of both rotors. The trapping position is estimated to be 1.1 μm up the center plane of an SU-8 double rotor (20 μm diameter, 10 μm thick, 3.3 μm wing width) with a laser power at 200 mW via an objective lens with a numerical aperture of 1.4.

キーワード：正逆回転，ダブル羽根，光トラップ位置，光圧回転体，光ミキサー，光ピンセット

Keywords：clockwise and counterclockwise, double rotor, trapping position, optical rotor, optical mixer, optical tweezers

1. まえがき

光圧回転体は遠隔操作可能，軸受け不要などの特徴があり，種々の応用が検討されている⁽¹⁾。しかし，いずれの場合も回転方向が固定されており^{(2)~(5)}，応用上の制限のひとつになっていた。たとえば，DNAの細紐をひき伸ばす，あるいは巻取るなどの応用を想定した場合^{(6)~(8)}，従来の磁気テープのリールのように正逆両方向に回転するのが望ましい。

一方，われわれは構造がシンプルで高速回転可能な3枚羽根光圧回転体の設計，作製，応用を検討してきた⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。また，その解析や実験を通して光トラップ位置が回転体内部にあることが判明した。光トラップ位置が内部にある場合には，対物レンズで集光されたレーザー光線は，羽根の底面からだけでなく側面からも入射する。また，同光線は回転体の側面だけでなく上面からも出射する。本稿では，これらすべての光路を追跡し正確な光トルクを解析した。

また，光圧回転体は人間の左右の手のひらの形状のように鏡像体を有し（キラルあるいは不整と呼ばれる），裏返すと反対方向に回転する。したがって，右回りに回転する羽

根を裏返し，元の羽根の上に連結すれば，光トラップ位置を移動することによって右回り，左回りを選択できると思われる。

以下では，まず単独の羽根型光圧回転体の光トルクのトラップ位置依存性を詳細に解析する。次に裏・表の羽根型光圧回転体を円柱で連結した場合の光トルクのトラップ位置依存性，最後に円柱がない場合の上（裏）および下（表）の羽根の交差角の影響や羽根厚みの影響を解析し，正逆回転可能なダブル羽根光圧回転体の望ましい形状を明らかにする。

2. 単独光圧回転体の光トルク

〈2・1〉 解析法 Fig. 1は3枚羽根光圧回転体の光トルクを解析するための光路および光圧の関係である。対物レンズの任意位置 (r_L, α) に入射した一本の光線は，光トラップ位置が回転体の外にある場合，回転体下面から入射し側面から出射する。側面から出射するときに作用する光圧を F_1 ，光トルクを M_1 とする（図示せず。Fig. 4(a)で詳述する）。次に，焦点が光圧回転体内部にある場合は，同図からわかるように，光線は羽根側面から入射し（入射時の光圧を F_2 ，光トルクを M_2 とする），別の羽根の側面から出射する（出射時の光圧を F_3 ，光トルクを M_3 とする）。なお，光圧 F は次式で与えられる⁽¹⁾。

$$F = \frac{n_1}{c_0} P \left\{ (1+R) \cos \theta_1 - \frac{n_2}{n_1} T \cos \theta_2 \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで， n_1 は媒質の屈折率， n_2 は回転体の屈折率， θ_1 は入

* 立命館大学理工学部
 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1
 Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University
 1-1-1, Nojihigashi, Kusatsu, Shiga 525-8577
 ** 現在 関西テレビ放送 (株)
 〒530-8408 大阪府大阪市北区扇町 2-1-7
 Kansai TV Corporation
 Oogicho, Osaka 530-8408
 *** 現在 関西電力 (株) 奈良電力所
 〒638-0821 奈良県吉野郡大淀町下淵 8-1
 Kansai Electric Power Corporation
 Ooyodo, Nara 638-0821

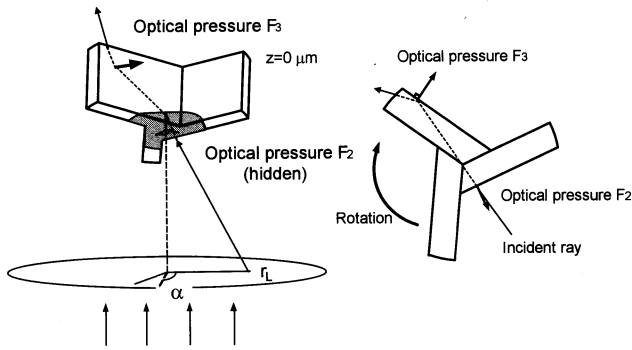


Fig. 1. Optical torque analysis for 3-wing solitary optical rotor illuminated upwards by a focused beam. The optical torque M_1 exerted on a rotor when incident light enters the lower surface and is transmitted from the side surface is not shown. On the other hand, the optical torque M_2 exerted when incident light enters the side surface and the optical torque M_3 exerted when the light is transmitted from another wing side surface are shown in the figure.

Table 1. Conditions for optical torque simulation.

Laser power P (mW)	200
Objective lens NA	1.4
Refractive index of the medium n_1	1.33
Refractive index of the rotor n_2	1.6
Rotor diameter d (μm)	20
Rotor thickness t (μm)	10
Wing width w (μm)	3.3

射角, θ_2 は屈折角, R は反射率, T は透過率, c_0 は真空中の光速, P はレーザーパワーである。

入射点, 出射点の回転中心からの距離を r とすると光トルクは $Frsin\alpha$ になる。本回転体には羽根が3枚あるため, 全トルクは光圧を側面全域にわたって積分して

$$M_{opt} = 3 \int_{r_{Lmin}}^{r_{Lmax}} \int_{\alpha=0}^{\alpha=\cos^{-1} \frac{2w}{d}} Fr^2 \sin\alpha d\alpha dr \dots\dots\dots (2)$$

で表される。ただし, d は羽根直径, w は羽根幅, $r_{Lmin} = 0$, $r_{Lmax} = \tan \arcsin(NA/n_1)$ は出射面での光軸からの距離に対応するレンズ面上での最小および最大半径である。

解析では, 対物レンズに入射する光束を半径方向100, 周方向400の要素に分割し, 要素ごとに一本の光線の光路を追跡し, 回転体表面での入射角 θ_1 , 屈折角 θ_2 を求め, フレネルの公式から反射率 R , 透過率 T を求め, (1)式により各点の光トルクを, (2)式により総光トルクを算出した。本分割の場合の総光トルクの精度は約1%である。

〈2・2〉 光トラップ位置依存性 シミュレーション条件を Table1 に, 光トルクのトラップ位置 (焦点) 依存性を

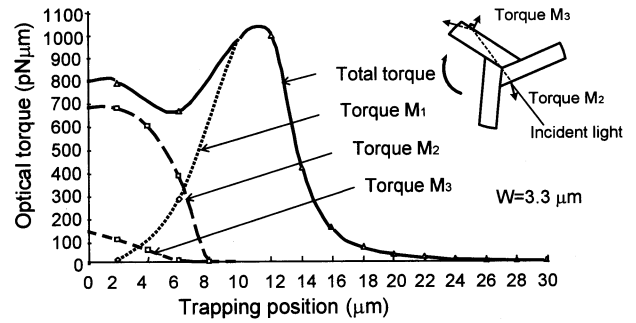


Fig. 2. Optical torque dependence on trapping position for M_1 , M_2 , M_3 and $M_{total} = M_1 + M_2 + M_3$ simulated for an SU-8 rotor under the conditions listed in Table 1.

Fig. 2に示す。同図の横軸0が回転体の上面, 下向きが正方向を表わしている。同図から回転体外部 (横軸目盛り10以上) では, 光トルクは急速に減衰するが, 内部 (横軸目盛り0~10) では変動はあるが総光トルクはほぼ一定になることがわかる。これは同図からもわかるように, 回転体内部では底面入射・側面出射光によるトルク M_1 が急激に減衰するが, 側面入射・側面出射光によるトルク M_3 が急激に増加することによる。

3. 連結光圧回転体の光トルク (円柱有)

〈3・1〉 解析法 回転体内部では光トルクがほぼ一定になることがわかったので, Fig. 3に示すように, 正トルクの回転体を裏返し (負トルク), トルクを発生しない円柱で連結すれば, 正負のトルクが相殺されることもないので, 光トラップ位置により回転方向を制御できると考えられる。

以下では, 羽根直径 d_1 , 羽根厚 t_1 , 円柱直径 d_2 , 円柱厚 t_2 , より構成された, 連結光圧回転体の光トルクを解析する。Fig. 4は光トラップ位置による回転体内部での光路 (破線), 光圧 F , 回転方向を示す水平図である。同図(a)は光トラップ位置 (焦点) が下回転体の外部にある場合で, 焦点を通過した光線は側面A, 側面Bから出射し, 側面Cからは出射しない。これは側面Cは半径面で回転中心を通るので, 中心 (対物レンズ焦点) から放射状に射出される光は側面Cからは出射できないことによる。したがって, 側面Cには光圧も光トルクも発生しない。また, 側面Bは円周面であり, 光圧は発生するが光トルクは零である。この結果, 側面Aに垂直に発生した光圧 F_1 が光トルク M_1 を発生する。(b)は光トラップ位置が下回転体の内部にある場合, Fig. 1で説明したように, 光線は羽根側面から入射し光圧 F_2 が光トルク M_2 を発生する。また, この光は別の羽根の側面から出射し, 光圧 F_3 が光トルク M_3 を発生する。(c)は光トラップ位置が上回転体の内部にある場合で, 光線は羽根側面から入射し光圧 F_2 が光トルク M_2 , 別羽根側面から出射し光圧 F_3 が光トルク M_3 を発生する。しかし, 上羽根は下羽根の裏返しになっているので, トルクの向きは(b)と逆になる。

〈3・2〉 羽根厚みの影響 Fig. 5は $t_1=5 \mu\text{m}$, $d_1=20 \mu\text{m}$, $t_2=10 \mu\text{m}$, $d_2=5 \mu\text{m}$ の場合の, 連結光圧回転体の光トルクの

たが、光トルクが正から負へ移行するための光トラップ位置の移動距離が長い（ピークからピークまで約 30 μm ）。この移動距離を短縮するため、光トルクの羽根間隔（円柱長さ）の影響を解析し結果を Fig. 7 に示す。

同図から明らかなように連結部の円柱を除去する ($t_2=0 \mu\text{m}$) ことにより、正負トルク大きさを保持しつつ、正トルクから負トルクへの移行間隔を約 15 μm に短縮できることがわかる。

4. 連結光圧回転体の光トルク（円柱無）

〈4.1〉 解析法 連結部の円柱が不要であることがわかったので、Fig. 8 に示すダブル羽根光圧回転体の光トルクを解析する。レーザーは下方向から対物レンズにより集光照射する。ここで上・下回転体の境界面を光トラップ位置の原点とし、下方向を正とする。上述と同様の方法で光トルクの光トラップ位置依存性を解析する。このとき、光トラップの安定性や光トルクの大きさを考察するため、Fig. 9 に示すように、両回転体の羽根の交差角を(a) 0° 、(b) 60°

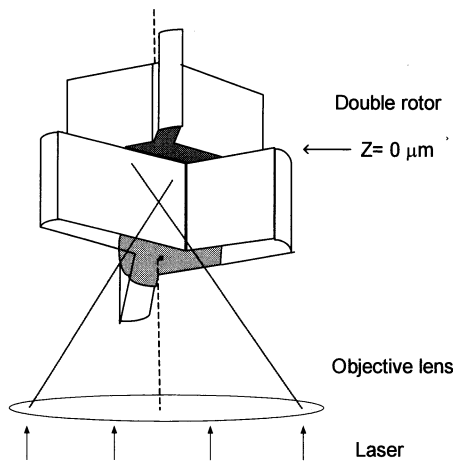


Fig. 8. Optical torque analysis for a double rotor with no link cylinder; both lower surfaces are illuminated upwards by a focused laser beam.

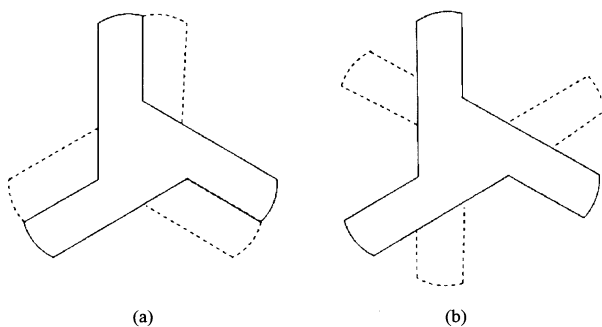


Fig. 9. Bottom view of a 3-wing double rotor with no link cylinder. The solid line shows the lower rotor and the dotted line shows the upper rotor with wing angle of (a) 0° and (b) 60° .

とし、結果を比較した。

〈4.2〉 羽根交差角の影響 Fig. 10 から、交差角 60° と交差角 0° で光トルクの大きさに大差はないことがわかる。交差角 60° の場合の方が安定性に優れる予想されるの

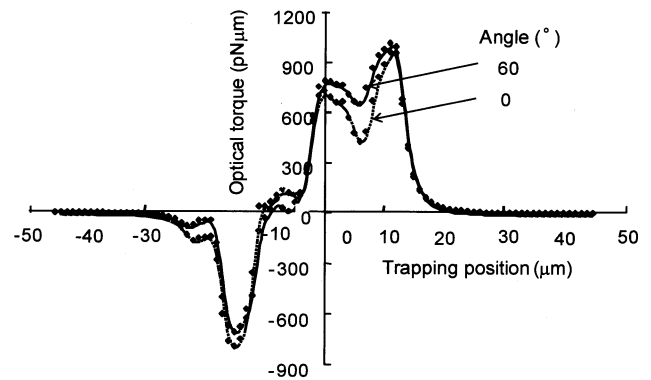


Fig. 10. Total optical torque dependence on trapping position of a double rotor for different wing angles as a parameter.

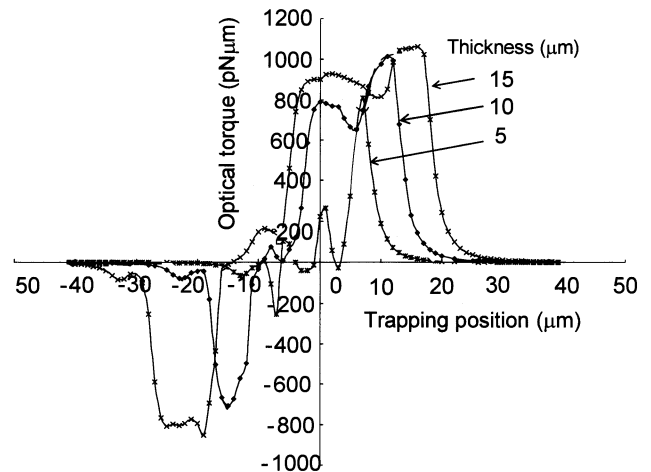


Fig. 11. Optical torque dependence on trapping position for a double rotor with rotor thickness t as a parameter.

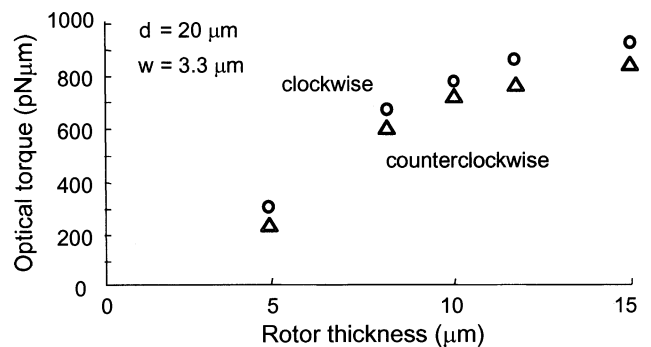


Fig. 12. Effect of rotor thickness on optical torque for double rotors.

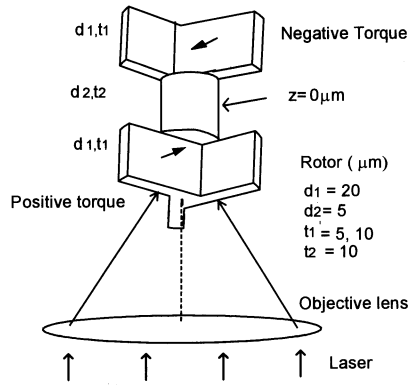


Fig. 3. Three-wing linked rotor that rotates clockwise and counterclockwise by displacing its trapping position. The upper rotor is an upside-down version of the lower rotor and they are linked by a cylinder.

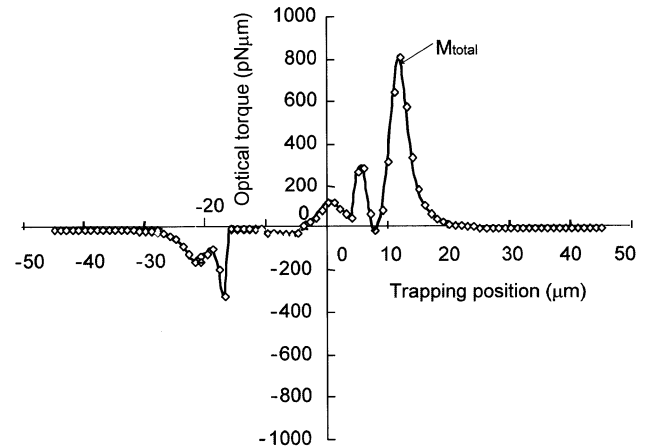


Fig. 5. Optical torque dependence on trapping position for M_1 , M_2 , M_3 and $M_{total} = M_1 + M_2 + M_3$ simulated for a 3-wing double rotor under the following conditions: rotor thickness $t_1 = 5 \mu\text{m}$, rotor diameter $d_1 = 20 \mu\text{m}$, cylinder height $t_2 = 10 \mu\text{m}$, and cylinder diameter $d_2 = 5 \mu\text{m}$.

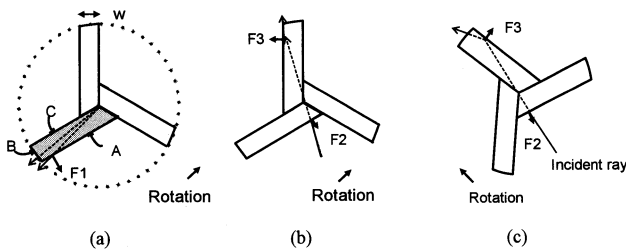


Fig. 4. Optical torque is analyzed for a double rotor in the following cases: (a) Trapping position is outside the lower rotor; incident light enters the lower surface and is transmitted from the side surface. The optical torque M_1 exerted on the side surface leads to a clockwise rotation. (b) The trapping position is in the lower rotor; the optical torque M_2 exerted when incident light enters the side surface of the lower rotor and the optical torque M_3 exerted when incident light is transmitted from another wing side surface lead to clockwise rotation. (c) The trapping position is in the upper rotor; the optical torques M_2 and M_3 exerted as in (b) result in a counterclockwise rotation owing to the upside-down form of the rotor.

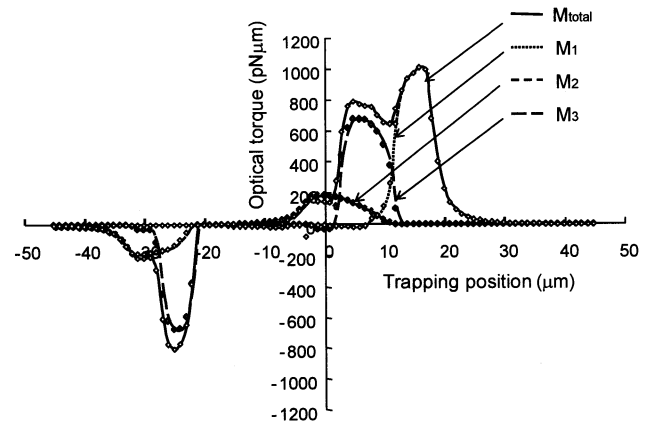


Fig. 6. Optical torque dependence on trapping position for M_1 , M_2 , M_3 and $M_{total} = M_1 + M_2 + M_3$ simulated for a double rotor under the following conditions: $t_1 = 10 \mu\text{m}$, $d_1 = 20 \mu\text{m}$, $t_2 = 10 \mu\text{m}$ and $d_2 = 5 \mu\text{m}$.

トラップ位置依存性である。回転体の厚みが薄い ($t_1 = 5 \mu\text{m}$) ので、側面の光圧によるトルクに依存している本回転体の総正トルク、総負トルクともに小さい。また、上に配置された回転体の総負トルクが著しく小さい。これは、側面入射・側面出射光によるトルク M_3 が回転体の厚みが薄いため十分に増加できないことによる。

一方、Fig. 6 は $t_1 = 10 \mu\text{m}$, $d_1 = 20 \mu\text{m}$, $t_2 = 10 \mu\text{m}$, $d_2 = 5 \mu\text{m}$ の場合の、連結光圧回転体の光トルクのトラップ位置依存性である。回転体の厚みの増加で正負とも総光トルクが増加していることがわかる。特にトルク M_3 の増加が顕著である。

〈3・3〉 羽根間隔の影響 Fig. 6 では、正負トルクとも単独の光圧回転体の光トルクと同程度の大きさを実現でき

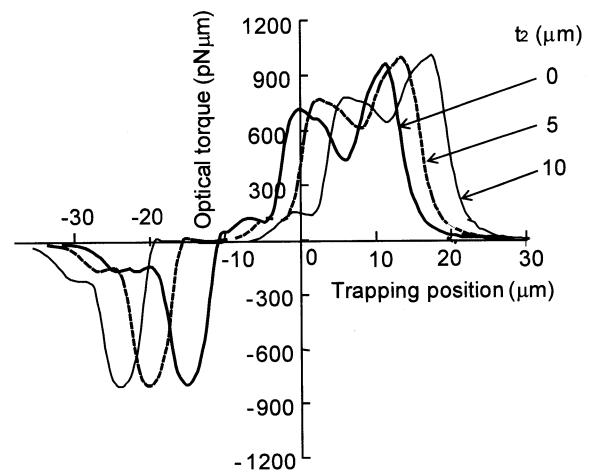


Fig. 7. Total optical torque M_{total} dependence on trapping position for a double rotor with rotor distance t_2 as a parameter.

で以下ではこの場合について羽根厚み依存性を解析する。

(4・3) 羽根厚みの影響 光トルクに及ぼす羽根厚みの影響の解析結果の一部を Fig. 11 に示す。同図から光トルクの隣接する正の極大値、負の極小値は、ともに羽根厚みにほぼ比例して増加するが、厚み10 μm 以上で飽和傾向にあることがわかる。詳細を Fig. 12 に示す。

5. 光トラップ位置の解析

最後にダブル羽根のトラップ位置を解析する。レーザーパワーは200 mW で解析条件は Table 1 と同じである。トラップ位置は回転体上・下面に作用する総光圧 F_{total} と媒質(水)中の回転体重量 $(\rho - I)Vg$ の釣り合いから求められる。ここで、 ρ は回転体の比重、 V は体積、 g は重力の加速度である。また、総光圧 F_{total} は

$$F_{total} = \iint (F_l^l + F_l^u + F_u^l + F_u^u) dS \dots\dots\dots (3)$$

と表される。ここで、 F_l^l は下回転体の底面の光圧、 F_l^u は下回転体の上面の光圧、 F_u^l は上回転体の底面の光圧、 F_u^u は上回転体の上面の光圧である。これらの光圧には回転体底面からの入射光だけでなく、側面から入射し上面から出射する分も含まれている。

Fig. 13 は上記4種の光圧、 F_{total} と $(\rho - I)Vg$ の光トラップ位置依存性である。同図の、 F_{total} と $(\rho - I)Vg$ の釣り合いから求めた光トラップ位置は $-1 \mu\text{m}$ (上下の回転体の境界面上 $1 \mu\text{m}$) であることがわかる。

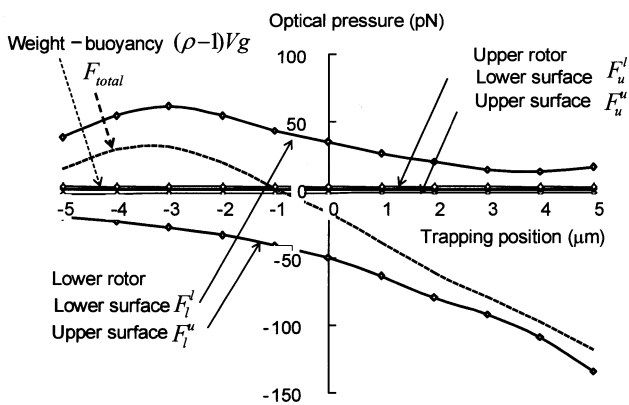


Fig. 13. Relationship between trapping position and optical pressure force and gravity minus the buoyancy for an SU-8 double rotor; density $\rho = 1.2$, diameter $d = 20 \mu\text{m}$, thickness $t = 10 \mu\text{m}$ and rotor angle $= 60^\circ$.

Table 2. Optical pressures at surfaces of upper and lower rotors when trapping position is $z = 0 \mu\text{m}$.

Rotor	Lower	Upper
Lower surface (pN)	$-50.4 (F_l^l)$	$-2.27 (F_l^u)$
Upper surface (pN)	$34.4 (F_u^l)$	$0.79 (F_u^u)$

なお、Table 2 はダブル羽根のトラップ位置が $Z = 0 \mu\text{m}$ の場合の下回転体、上回転体の下面および上面の光圧である。上回転体の光圧は下回転体の光圧の数%である。

以上、本提案のダブル羽根光圧回転体は、光ピンセットでトラップした状態 (Fig. 10 の横軸 $-1 \mu\text{m}$) では正回転している。逆回転させるには、対物レンズを上昇させて焦点(トラップ位置)を上(負)方向に移動する。このとき水中では回転体も一緒に移動し、回転体がサンプルチャンバーの上面に接した状態で焦点位置が変化し、逆回転することになる。

6. むすび

本稿では、まず高速かつ安定した回転が得られる3枚羽根光圧回転体の光トルクのトラップ位置依存性を詳細に分析した。その結果、光トラップ位置が回転体内部にある場合は総光トルクがほぼ一定、回転体から離れると急速に減少することがわかった。この光トルクの特性を有効利用するため、正トルクの回転体を裏返し(負トルク)両者を連結した。その結果、単独の回転体の光トルクの値を保持しながら、光トラップ位置(焦点)により回転方向を正負に制御できることが判明した。

これまでの光圧回転体はその回転方向が固定されていたので応用上の制限があった。しかし、本提案の連結光圧回転体は正逆回転が可能のため、マイクロヤノの微小領域で、極微の巻取り機構などにも利用できる道が開かれると思われる。今後は光造形法などを利用して上記回転体を作製し正逆回転制御を実証する予定である。

(平成20年9月19日受付, 平成20年12月9日再受付)

文 献

- (1) H. Ukita : Micromechanical photonics, Springer (2006)
- (2) Z. P. Luo, Y. L. Sun, and K. N. Ann : "An optical spin micromotor", Appl. Phys. Lett., **76**, 13, pp.1779-1781 (2000)
- (3) R. C. Gauthier, R. N. Tait, H. Mende, and C. Pawlowicz : "Optical selection, manipulation, trapping, and activation of a microgear structure for application in micro-optical-electromechanical systems", Appl. Opt. **40**, 6, pp.930-937 (2001)
- (4) S. Maruo and H. Inoue : "Optically driven viscous micropump using a rotating microdisk", Appl. Phys. Lett., **91**, 084101 (2007)
- (5) H. Ukita and K. Nagatomi : "Optical tweezers and fluid characteristics of an optical rotator with slopes on the surface upon which light is incident and a cylindrical body", Appl. Opt. **42**, 15, pp.2708-2715 (2003)
- (6) H. R. Jiang and M. Sano : "Stretching single molecular DNA by temperature gradient", Appl. Phys. Lett., **91**, 154104 (2007)
- (7) N. Douville, D. Huh, and S. Takayama : "DNA linearization through confinement in nanofluidic channels", Anal Bioanal Chem. **391**, pp.2395-2409 (2008)
- (8) 庄子習一:「MEMS・ナノテクノロジーのバイオ・医療分野への応用」, 精密工学会誌, **74**, 1, pp.28-32 (2008)
- (9) 浮田宏生・高田康作・赤木太輔・大西貴和・野々原靖也:「3枚羽根光圧回転体の設計・作製とμ-TASにおける混合応用」, 電気学会論文誌E, **127**, 1, pp.25-30 (2007)
- (10) Y. Ogami, K. Nishikawa, and H. Ukita : "Study on the mixing performance of micro optical rotor by CFD", JSME International Journal, **B-49**, 3, pp.645-652 (2006)

付 録

Fig. 2 の光トルクによりどの程度の回転速度が期待できるか解析する。Fig. 2 の光トルクと文献(9)の回転抗力 $800 \text{ pN}\mu\text{m}/500 \text{ rpm}$ の釣り合いから算出した回転速度を Fig. A.1 に示す。羽根幅 $3.3 \mu\text{m}$ の場合、光トラップ位置が回転体内部（光トラップ位置が $0 \sim 10 \mu\text{m}$ ）にある時の回転速度は $610 \sim 420 \text{ rpm}$ であることがわかる。

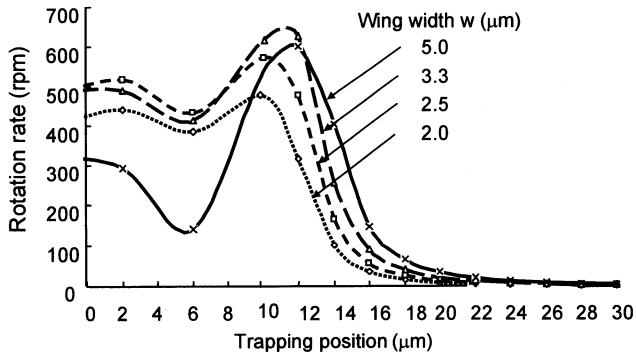


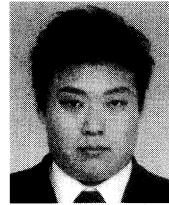
Fig. A.1. Rotation rate dependence on trapping position for a solitary rotor in water at a laser power of 200 mW with wing width as a parameter.

浮 田 宏 生



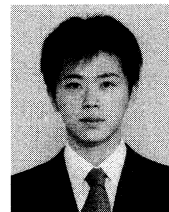
(正員) 1945年8月28日生。1973年3月東北大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。同年4月NTT武蔵野電気通信研究所入所。1995年立命館大学理工学部教授，現在に至る。光ディスク，光マイクロマシン，光ピンセットなど，主に光システム工学の研究に従事

伊 部 勇 作



(非会員) 1982年9月21日生。2008年3月立命館大学大学院理工学研究科修了。在学中は正逆回転光圧回転体の光トルク解析の研究に従事。同年4月関西テレビ入社。

大 西 貴 和



(非会員) 1982年5月15日生。2007年3立命館大学大学院理工学研究科修了。在学中は光圧回転体の光トルク増大法の研究に従事。同年4月関西電力入社。