

9. 正逆回転可能な光ミキサー

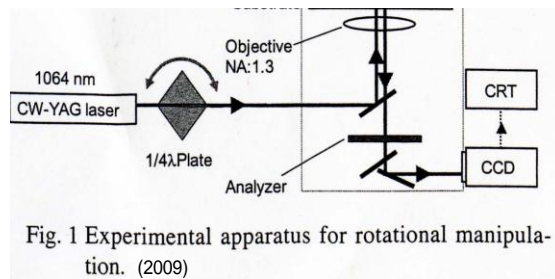
浮田 宏生

9.1 光による回転方法

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。しかし、いずれの場合も回転方向が固定されており、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、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。

・運動量利用（形状異方性）

・角運動量利用（偏光面回転）



9.2 形状異方性による正逆回転予備検討

(a) アイデア

(b) 光トルクの焦点位置依存性

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。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。ここでは、これらすべての光路を追跡し正確な光トルクを解析する。

ミュレーション条件は、レーザーパワー 200mW, NA=1.4, 3枚羽根光圧回転体直径 20μm, 厚み 10μm, 比重 1.6 である。

光トルクのトラップ位置（焦点）依存性を 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大きな値を保持していることがわかる。

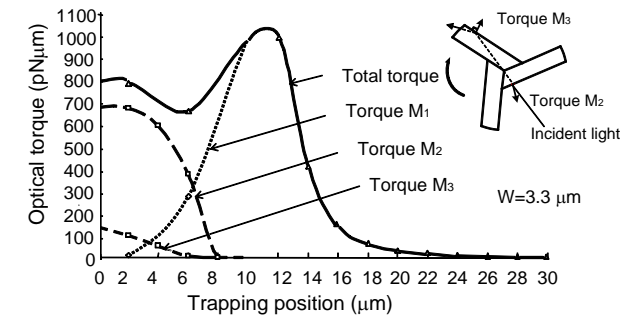


Fig. 2. Optical torque dependence on trapping position for M_1, M_2, M_3 and $M_{total} = M_1 + M_2 + M_3$.

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。

9.3 連結光ミキサーによる正逆回転体の光トルク特性

Fig. 3 に示す連結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。

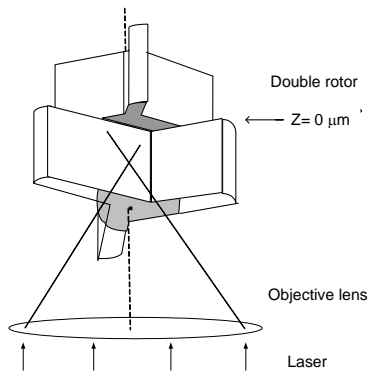


Fig. 3. Optical torque analysis for a double rotor; both lower surfaces are illuminated upwards by a focused laser beam.

このとき、光トラップの安定性や光トルクの大さを考察するため、Fig. 4に示すように、両回転体の羽根の交差角を(a) 0° 、(b) 60° とし、結果を比較した。

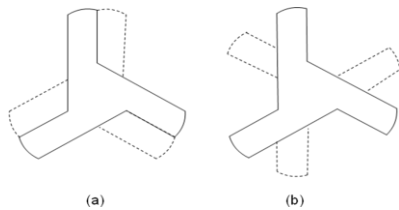


Fig. 4. Bottom view of a 3-wing double rotor with. The solid line shows the lower rotor and the dotted line shows the upper rotor with wing angle of (a) 0° and (b) 60° .

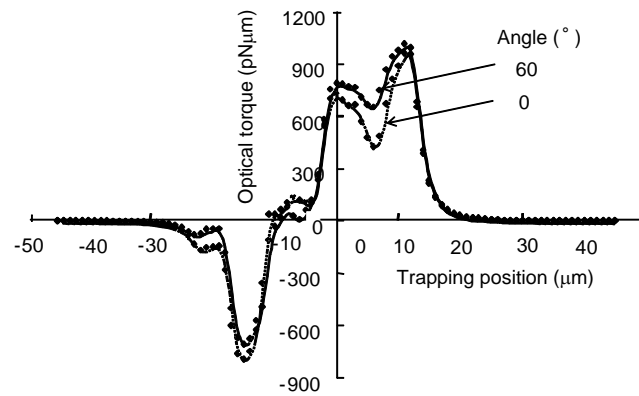


Fig. 5. Total optical torque dependence on trapping position of a double rotor for different wing angles as a parameter.

Fig. 5から、交差角 60° と交差角 0° で光トルクの大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。

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. 6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、羽根厚みにほぼ比例して増加するが、厚み $10 \mu\text{m}$ 以上で飽和傾向にあることがわかる。詳細を Fig. 7に示す。

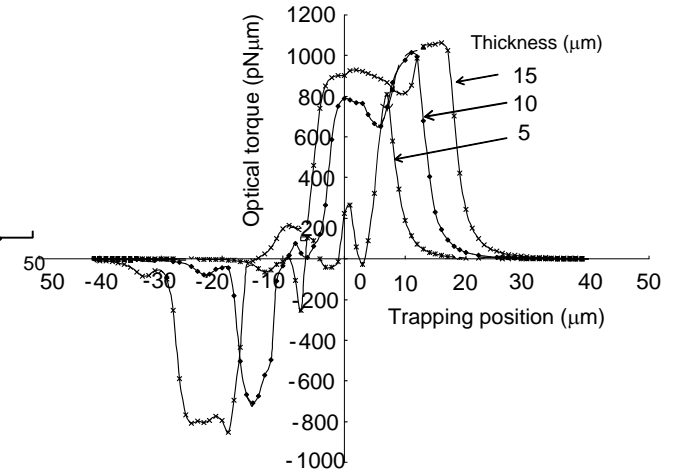


Fig. 6. Optical torque dependence on trapping position for a double rotor with rotor thickness t as a parameter.

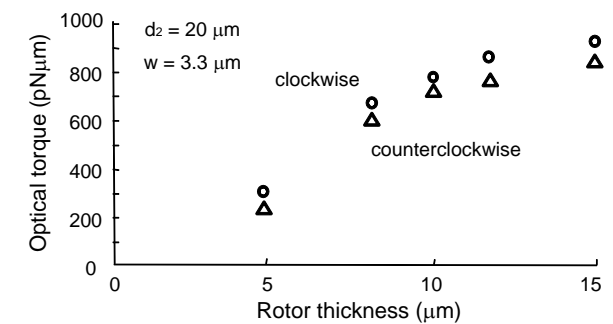


Fig. 7. Effect of rotor thickness on optical torque for double rotors.

9.4 正逆回転体の連結光ミキサーの光トラップ位置

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 $(\rho - 1)Vg$ 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

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

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. 8 は上記4種の光圧、 F_{total} と $(\rho - 1)Vg$ の光トラップ位置依存性である。同図の、 F_{total} と $(\rho - 1)Vg$ 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の上 $1 \mu\text{m}$) であることがわかる。

なお、Table 1 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。

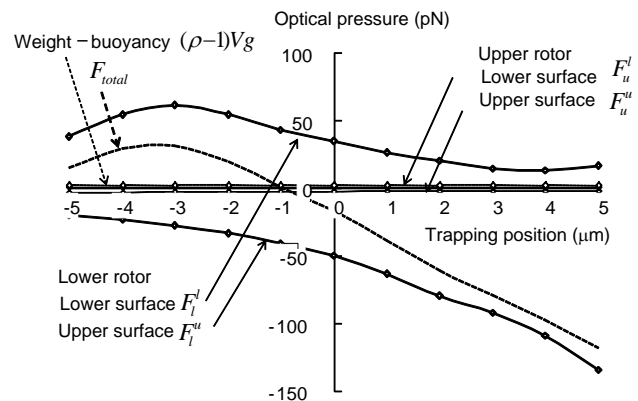


Fig. 8. Relationship between trapping position and optical pressure force and gravity minus the buoyancy for an SU-8 double rotor: density $\rho = 1.2$, diameter $d = 20 \mu\text{m}$, thickness $t = 10 \mu\text{m}$ and rotor angle = 60° .

Table 1. 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)

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. 5 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。

9.5 サイズ効果とまとめ

- ① 焦点位置が内部のとき、側面入射光が光トルクに大きく影響する。
- ② 二つの羽根を表裏逆に連結して配置すれば、焦点位置を移動することによって、正逆ほぼ同程度の回転速度が可能。
- ③ 光トルクはサイズに比例し、回転抗力はサイズのほぼ 3 乗に比例するので、回転速度はサイズの 2 乗に反比例して増加。
- ④ 従来の光圧回転体は回転方向が固定されていたので応用上の制限があったが、本提案の連結光圧回転体は正逆回転が可能のため、ミクロやナノの微小領域で、極微の巻取り機構などにも利用できる可能性がある。

文献

- (1) H. Ukita T. Ohnishi and Y. Nonohara: Rotation Rate of a Three-Wing Rotor Illuminated by Upward-Directed Focused Beam in Optical Tweezers, *Optical Review*, **15**, 2, pp.97-104, 2008.