

7. 光圧回転体の理論—光トルク解析—

浮田 宏生

7.1 光圧回転体

基本形状は羽根型と斜面型の2種で、前者は側部が鏡面非対称（水平面）、上部および底部は平面である。この回転体に集光ビームを照射した場合、入射面（上面）の光圧は物体を持上げ、出射面（側面）の光圧は光トルクを発生して回転を与える。一方、後者は上部が斜面、側部が円柱面、底部が平面であり、入射面（斜面）で光トルクを発生する。このため平行ビームによる回転が可能である。以下では羽根型について詳述する。

7.2 光トルクの解析方法と解析結果

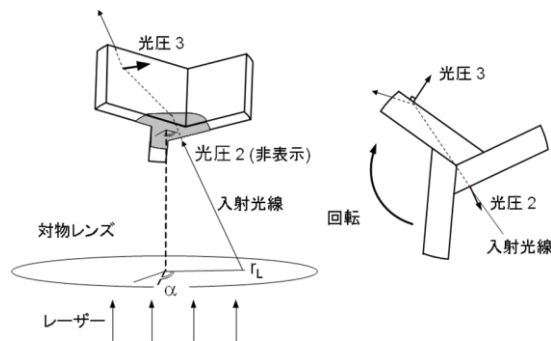


図 7.1 羽根型光圧回転体の光トルク解析

図 7.1 は下方より光ピンセットした3枚羽根回転体に対する光路および光圧の関係である。焦点位置（焦点）は回転体の内部にあるので、集光ビームの光線のひとつが下面に入射し、側面から出射する際に発生する光圧1（表示せず）による光トルク1、側面に入射するときの光圧2による光トルク2、その光線が他の羽根の側面から出射するときの光圧3による光トルク3を幾何光学により算出する⁽¹⁾。

シミュレーション条件は、レーザーパワー

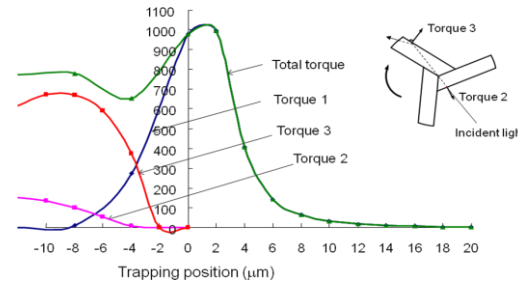


図 7.2 光トルクの焦点位置依存性

200mW, 対物レンズの NA 1.4, 油浸オイルの屈折率 1.52, 媒質の屈折率 1.33, 回転体の屈折率 1.6,

回転体直径 20 μm , 回転体厚み 10 μm である。

図 7.2 は光トルクの焦点位置依存性である。図の原点が回転体の下面、負が回転体内部、正が回転体外部を表わしている。トータルの光トルク（緑色）は内部ではあまり変化がない。また同様な解析から焦点位置が外部の場合は羽根幅が、内部の場合は幅狭の回転体の光トルクが大きいことがわかる。

7.3 サイズ効果による高速化

3枚羽根回転体の回転速度を向上するため、羽根の(1)厚み, (2)半径, (3)サイズ(相似縮小)に対し速度を解析したところ、サイズを変化させたときに最も高速回転を得られることが判明した。以下では、(3)のサイズの縮小効果について詳述する。

図 7.3 はミキサーのサイズをパラメータとした光トルクの焦点位置依存性である。光ミキサーの基準寸法は半径 $r=10 \mu\text{m}$, 羽根厚 $t=10 \mu\text{m}$, 羽根幅 $2.5 \mu\text{m}$ である。

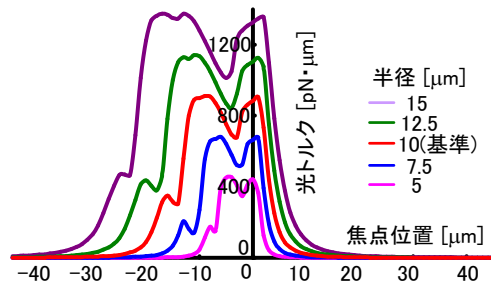


図 7.3 光トルクのサイズ効果

光ミキサーの下面からレーザーを照射した際、光ミキサーの焦点位置は上下方向の光圧と光ミキサーの水中での重さとのつりあいから算出できる。表 1 は相似サイズ光ミキサーの重さと光焦点位置である。どの半径においても焦点位置は光ミキサーの内部に一つある。

表 1. 相似サイズ光ミキサーの重さと焦点位置

半径 [μm]	重さ [pN]	焦点位置 [μm]
5.00	0.195	-3.90
7.50	0.660	-5.90
10.0	1.56	-7.80
12.5	3.05	-9.80
15.0	5.27	-11.8

図 7.4 は各サイズにおける焦点位置での光トルク、回転抗力である。光トルクはサイズに比例し、回転抗力はほぼ 3 乗に比例して増大している。

光トルクと回転抗力のつりあいから回転速度

を算出する。図 7.5 は、各サイズにおける焦点位置での回転速度の半径依存性である。サイズを半分にすると、約 5 倍速い回転速度が得られることがわかる。

図 7.6 は、焦点位置での光トルクと回転抗力の比に対する厚み、羽根半径、サイズの効果である。同図よりサイズ効果により最も高速回転が望めることがわかる。

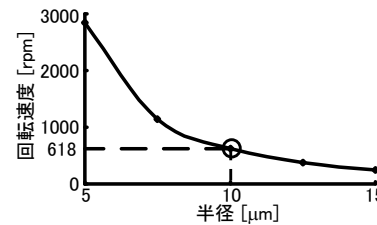


図 7.5 回転速度と相似サイズの関係

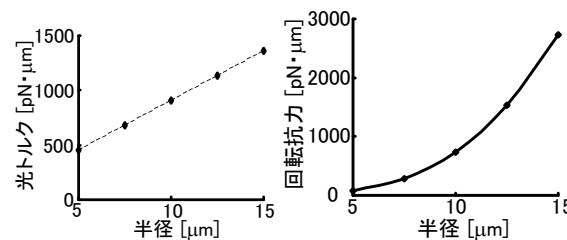


図 7.4 サイズの光トルク、回転抗力への影響

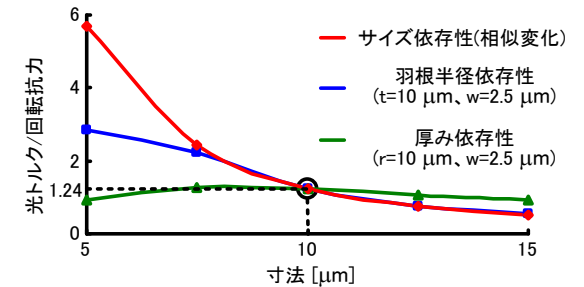


図 7.6 光トルク/回転抗力とミキサー形状

7.4 斜面型光圧回転体

- (a) 平行照明→式(4.5)～(4.10)
- (b) 集光照明→式(4.12)～(4.16)

7.5 羽根型と斜面型

- (a) 特長比較
- (b) 統合型

- (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.