

流体抗力を考慮した円柱型光圧回転体の回転特性

永富 謙司*・浮田 宏生**,**・南雲 健司*・大上 芳文**

*立命館大学大学院理工学研究科 〒525-8577 草津市野路東 1-1-1

**立命館大学工学部 〒525-8577 草津市野路東 1-1-1

Characteristics of the Optical Rotation for a Cylindrical Optical Rotator Considering the Viscous Drag Force

Kenji NAGATOMI*, Hiroo UKITA**,**, Kenji NAGUMO* and Yoshifumi OGAMI**

*Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 1-1-1, Nojihigashi, Kusatsu-shi, Shiga 525-8577

**Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 1-1-1, Nojihigashi, Kusatsu-shi, Shiga 525-8577

A cylindrical type optical rotator is expected to rotate at a high speed due to its small viscous drag force. The optical torque for the rotator has been analyzed using a ray optics model. On the other hand, the drag force was analyzed using computational fluid dynamics (CFD). The drag force components of both the pressure and the shearing stress on all the surfaces are summed. The characteristics of the optical rotation is analyzed by balancing of the optical torque with the drag force.

The parameters used for the analysis are the slope angle and the cylinder length of the rotator with $3\ \mu\text{m}$ in diameter. As a result, the slope effect on the drag force becomes clear for lengths smaller than $10\ \mu\text{m}$, or the slope angle larger than 30 degree. The rotation rates by the CFD for a rotator with a $3\ \mu\text{m}$ diameter and $3\ \mu\text{m}$ length are 0.67 (slope angle 45°) and 0.56 (60°) times the approximation value.

1. はじめに

光エネルギーを直接駆動源とする光圧回転体は、非接触・遠隔駆動が可能である。このため、電気エネルギーを駆動源とするマイクロモーターやマイクロアクチュエーターの配線や摩擦の問題を解決するものとして注目されている。

光圧回転体は、鏡面非対称な形状に生じる光圧がトルク成分を有するため回転する。従来、羽根型回転体が提案されていたが¹⁾、側面が羽根型のため周辺媒質から受ける粘性抵抗が大きかった。そこで筆者らは、高速回転に適した円柱型の光圧回転体を提案し、ビームウェストを考慮した幾何光学を用いて高速回転メカニズムを明らかにした^{2,3)}。この回転体は光入射面が斜面なので、平行ビームおよび集光ビームのいずれでも光圧トルクを生じ、また側面が円柱型で抗力が小さいので高速回転する。これまで光圧トルク増強法として、照射光ビームの強度分布、回転体

の斜面形状、屈折率、寸法の依存性を検討してきた^{4,5)}。

本報では、流体媒質から受ける回転抗力を精密に解析する手法を示し、回転体に生じる光圧トルクとの釣り合いから、回転特性を明らかにする。回転抗力の解析には、数値流体解析を用いた。これまでに、円柱型回転体まわりの流れが解析されていたが⁶⁾、本報ではさらに回転体各部位に加わる圧力、せん断応力から回転抗力を算出した。これにより、円柱側面だけの粘性抵抗で近似していた従来法に対し、より正確な回転抗力および光圧回転数評価が可能になった。

2. 幾何光学による光圧トルク解析

Fig. 1 に円柱型光圧回転体の形状と座標系 (x, y, z) を示す。回転体は先端面に2つの斜面と側壁面を有し、側面が円柱で、底部は平坦面である。今回は直径を $(2r=3\ \mu\text{m})$ とし、斜面の傾き角 $(\alpha=0\sim 60^\circ)$ 、長さ $(h=2\sim 10\ \mu\text{m})$ をパラメーターとして解析した。なお、周辺媒質を水 (屈折率 $n_1=1.33$)、回転体をガラス ($n_2=1.53$) と

*** E-mail: ukita@se.ritsumei.ac.jp

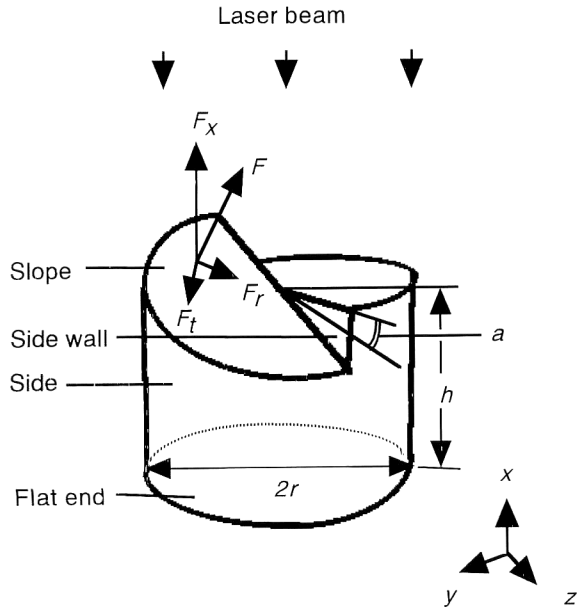


Fig. 1. A 3D image of a cylindrical optical rotator. The rotation is induced by the optical pressure exerted on its slopes.

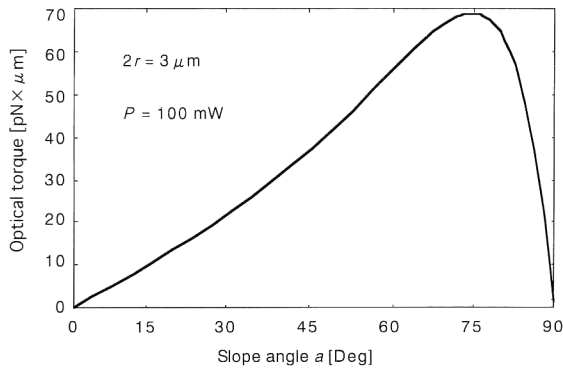


Fig. 2. Dependence of optical torque on slope angle, where the incident power $P=100$ mW, rotator length $h=10$ μm , diameter $2r=3$ μm .

し、光源は $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ レーザー（波長 $\lambda=1.064$ μm , TEM₀₀ モード, 光パワー $P=100$ mW）とした。

光圧 F は光入射面に垂直に生じるので、斜面では Fig. 1 に示すような回転方向成分 F_t をもち、左回りに回転する。

光圧トルク T は $F_t r$ （光圧の回転方向成分 \times 半径）を全斜面にわたって面積分し式（1）により求まる^{2,3)}。

$$T = \int_r \int_\theta r^2 F_t dr d\theta \quad (1)$$

Fig. 2 に、回転体上方から平行ビームを照射した場合の光圧トルク T を示す（直径 $2r=3$ μm ）。光圧トルク T は斜面角 $a=75^\circ$ 付近で最大になり、その後減少する。なお、光圧トルク T は斜面で生じるので長さ h には依存しない。

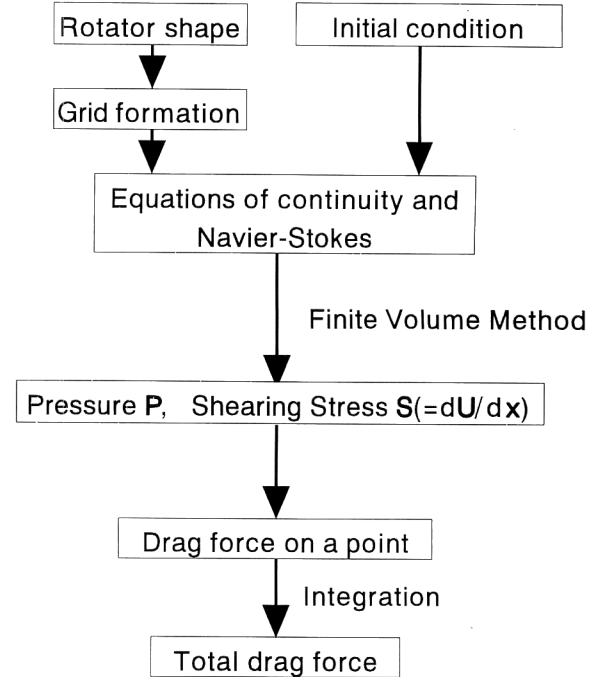


Fig. 3. Flow chart of a drag force analysis using finite volume method.

3. 数値流体解析による回転抗力

3.1 数値流体解析法^{7,8)}

回転体の寸法、パラメーターは Fig. 1 と同じで周辺媒質は水（283 K, 粘性非圧縮性, 粘性係数 $\mu=1.328 \times 10^{-3}$ Pa \cdot s）とする。なお、3000 rpm 時での回転体側面の表面速度を代表速度、直径を代表長さとした場合のレイノルズ数は、 $Re=1.1 \times 10^{-3}$ で、流れは層流となる。

Fig. 3 に本解析のおもな流れを示す。まず、格子形状入力と計算条件の設定を行い、解析には有限体積法 (finite volume method) を用いる。物体が回転するため、本解析では対流項に格子の移動速度 ($\partial x / \partial t$) を考慮した移動格子系の連続の式 (2) と Navier-Stokes の方程式 (3) を解く。

$$\nabla \cdot \left(U - \frac{\partial x}{\partial t} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\left(U - \frac{\partial x}{\partial t} \right) \otimes U \right) = -\nabla P + \frac{1}{\mu} \nabla^2 U \quad (3)$$

次に、得られた流体解析結果（圧力 P , 流速 U ）から回転体表面の圧力、せん断応力 $S(=\partial U / \partial x)$ を数値化する。

3.2 圧力、せん断応力

Fig. 4(a) は無限遠の圧力をゼロとした場合の回転体表面の圧力分布である。移動速度が大きい斜面の縁付近 A で大きな圧力 (1.24 pN/ μm^2) が生じている。また側壁

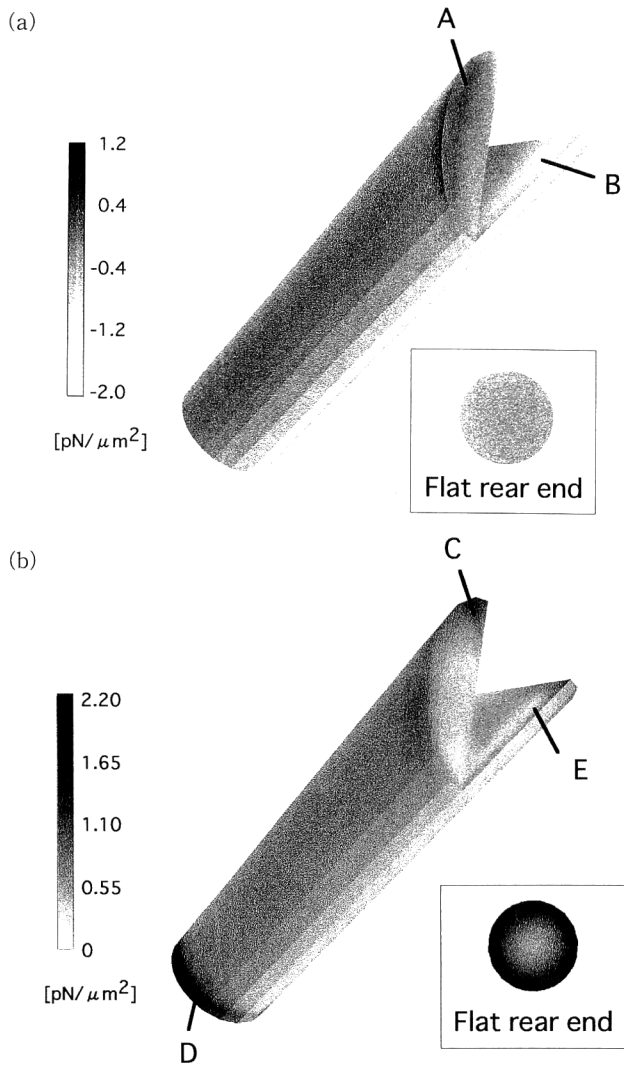


Fig. 4. 3D images of (a) the pressure distribution, and (b) the shearing stress distribution.

面 B では負圧により流れ込みを生じる。平坦面は面が回転方向に対し接線方向であるため、圧力分布にほとんど変化がみられない。

次に Fig. 4(b) にせん断応力分布を示す。せん断応力は鋭い形状の斜面先端 C および平坦面の縁 D でそれぞれ $2.24 \text{ pN}/\mu\text{m}^2$, $2.12 \text{ pN}/\mu\text{m}^2$ と大きくなる。側壁面 E 付近ではせん断応力がほぼゼロのため、面の接線方向に対する流れはほとんど生じないことがわかる。

3.3 回転抗力

回転抗力 M は、流体解析による圧力 P 、せん断応力 S の回転方向成分 P_t , S_t に半径 r を乗じて各部の全表面にわたり積分したものの和で表される。そこで、

$$M = \int_r \int_\theta r^2 (P_t + S_t) dr d\theta + \int_h \int_\theta r^2 (P_t + S_t) dh d\theta \quad (4)$$

Table 1. Drag force comparison of the 3000 rpm optical rotators, for $a=45^\circ$, $2r=3 \mu\text{m}$, $h=3 \mu\text{m}$.

Method	CFD*	Approximation**
Surfaces	Rotation drag force ($\text{pN} \times \mu\text{m}$)	
Slopes	6.37	0
Side walls	4.99	
Side	39.3	35.4
Flat end	3.56	0
Total	54.2	35.4

*CFD: computer fluid dynamics, **Approximation: $4\pi\mu r^2 h\omega$.

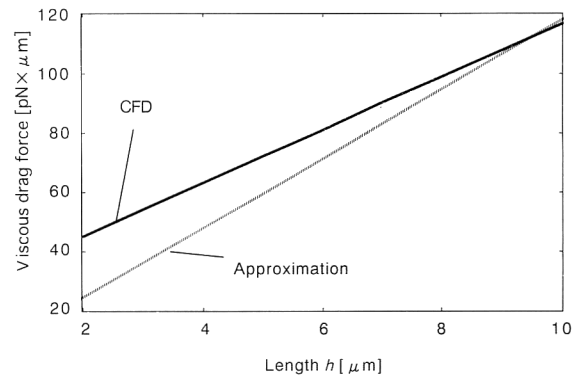


Fig. 5. Drag force comparison between the computational fluid dynamics (CFD) and approximation method with rotator length as a parameter.

と半径 r 方向成分の積分と高さ h 方向成分の和となる。

Table 1 は、 $h=3 \mu\text{m}$ の場合の流体解析法 (CFD)、粘性近似式による回転抗力の比較である。粘性近似とは、円柱の側面のみを考慮した粘性式 $M=4\pi\mu r^2 h\omega$ (ω : 回転角速度) である。

まず流体解析結果についてみると、斜面のある上端面での回転抗力は斜面 ($6.37 \text{ pN} \times \mu\text{m}$) と側壁面 ($4.99 \text{ pN} \times \mu\text{m}$) の合力であり、平坦面 ($3.56 \text{ pN} \times \mu\text{m}$) に比べ約 3 倍となる。また、回転抗力は回転体が長くなると側面の影響が大きく、斜面の影響は相対的に小さくなる。

最後に、全回転抗力の回転体長さ依存性を Fig. 5 に示す。回転体が短くなるにつれて今回の数値解析と従来の粘性近似の回転抗力の差が広がることがわかる。

4. 光圧回転特性

4.1 長さ依存性

ここでは、光圧トルク T と回転抗力の釣り合いから回転数を求める。入射光は平行ビームで、回転体に照射される光パワーは $P=100 \text{ mW}$ である。なお、光圧トルク T は長さ h に依存せず、Fig. 2 より $37.5 \text{ pN} \times \mu\text{m}$ である ($a=45^\circ$, $2r=3 \mu\text{m}$, $P=100 \text{ mW}$)。Fig. 6 に回転体長さ

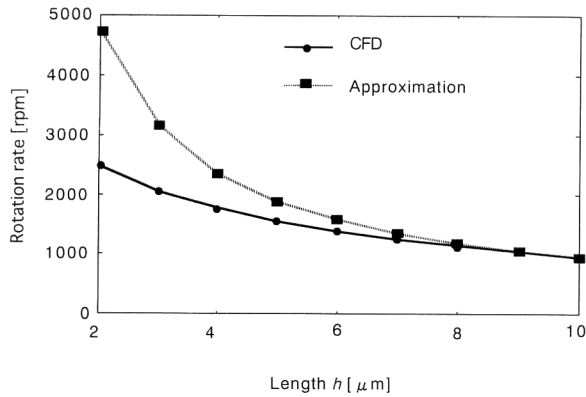


Fig. 6. Rotation rate comparison between the CFD and approximation with rotator length as a parameter.

Table 2. Drag forces of the 3000 rpm optical rotators simulated by CFD, for $2r=3\ \mu\text{m}$, $h=3\ \mu\text{m}$.

Surface	Rotation drag force ($\text{pN}\times\mu\text{m}$)		
	Slope angle 0°	30°	60°
Slopes	3.60	5.07	8.10
Side walls	0	3.066	9.27
Side	43.7	38.2	41.5
Flat end	3.60	3.56	3.61
Total	48.1	49.9	62.48

h と回転数の関係を示す。長さ $h=10\ \mu\text{m}$ 以上では、流体解析と粘性近似はほぼ等しいが、短くなるに従い流体解析のほうが小さくなり、 $h=3\ \mu\text{m}$ では近似値の約3分の2となった。このように、長さが長い場合は、斜面の影響が相対的に小さくなるので、従来の粘性式で近似可能であるが、長さが短い場合には流体解析を行う必要がある。

4.2 斜面角依存性

Table 2 は長さ $3\ \mu\text{m}$ 、直径 $3\ \mu\text{m}$ における各部位の回転抗力の斜面角依存性である。斜面と側壁面における回転抗力は、斜面角とともに増加している。一方、全回転抗力は斜面角 $a=30^\circ$ で増加しはじめ、 60° 以上で急増している。

また、回転数の斜面角依存性を、Fig. 7 に示す。長さ $3\ \mu\text{m}$ の場合、斜面角の増加に従って解析値と近似値の差が大きくなる。その差は $a=60^\circ$ で約1.8倍である。

5. おわりに

本研究では、幾何光学による光圧トルクと数値流体解析による回転抗力から、円柱型回転体の光圧回転特性を精密に解析した。

まず幾何光学を用いた光圧トルク解析では、回転体の斜面に生じる光圧トルク成分を面積分することにより、回転

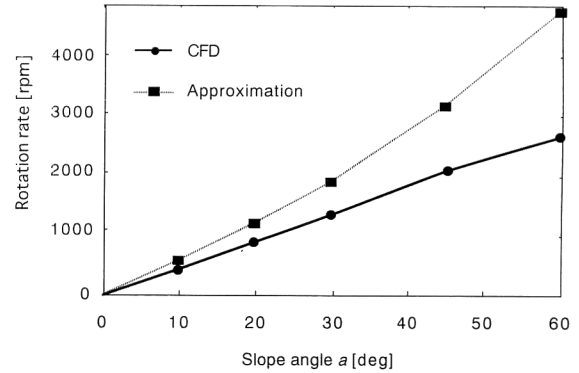


Fig. 7. Rotation rate comparison between the CFD and approximation with slope angle as a parameter.

体斜面角、直径、長さなどに対する全トルクをシミュレーションした。

次に回転体各部位に生じる圧力、せん断応力を有限体積法により数値流体解析した。さらに圧力、せん断応力の回転方向成分に回転半径を乗じ、各部位で面積分した合計から全回転抗力を求めた。

最後に、光圧トルクと回転抗力の釣り合いから、直径 $3\ \mu\text{m}$ の回転体に対し解析を進め、次の諸点を明らかにした。

まず、斜面角 45° の場合、(1) 斜面の抗力は平坦面に比べ約3倍、(2) 抗力は長さ $10\ \mu\text{m}$ では近似値とほぼ等しいが、長さ $3\ \mu\text{m}$ で1.53倍、(3) 回転数は長さ $10\ \mu\text{m}$ で近似値とほぼ等しいが、長さ $3\ \mu\text{m}$ で0.67倍、になった。

次に、斜面角依存性については、光圧トルクは 60° 付近までほぼリニアに増加するが、抗力は 30° から増加しはじめ 60° になると急増した。斜面角 60° の場合、解析値の回転数は近似式に比べて約0.56倍となることがわかった。

本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の最先端分野研究開発提案公募プロジェクト (97S22-002) によった。

文 献

- 1) E. Higurashi, H. Ukita, H. Tanaka and O. Ohguchi: "Rotational control of anisotropic micro-objects by optical pressure," *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems '94* (IEEE, Oiso, 1994) pp. 291-296.
- 2) 永富謙司, 浮田宏生: "光入射面の光トルクを利用したマイクロ回転体", *レーザー研究*, **24** (1996) 1186-1192.
- 3) H. Ukita and K. Nagatomi: "Theoretical demonstration of a newly designed micro-rotators driven by optical pressure on a light incident surface," *Opt. Rev.*, **4** (1997) 447-449.
- 4) K. Nagatomi and H. Ukita: "Improvement in optical rotation rate of a cylindrical micro-object by incident beam profiles," *Technical Digest International Conference on*

Optical MEMS and Their Applications (IEEE, Nara, 1997)
pp. 190-194.

- 5) 永富謙司, 山本崇雄, 浮田宏生: “円柱状光圧回転体の光圧トルク増強に関する考察”, 平成10年電気関係学会支部連合大会講演論文集 (1998) p. G231.
- 6) 南雲健司, 大上芳文, 浮田宏生, 永富謙司: “光圧マイクロ

回転体の流れの解析”, 日本流体力学会年会 '98 (1998) pp. 89-90.

- 7) 数値流体力学編集委員会編: 移動境界流れ解析 (東京大学出版会, 1995).
- 8) 荒川忠一: 数値流体工学 (東京大学出版会, 1994).