

# Three-Wing Optical Mixer Design, Fabrication and Application to a $\mu$ -TAS

Hiroo Ukita Member (Ritsumeikan University, ukita@se.ritsumei.ac.jp)

Kosaku Takada Non-member (Matsushita Electric Works Ltd.)

Daisuke Akagi Non-member (Ritsumeikan University)

Takakazu Ohnishi Non-member (Ritsumeikan University)

Yasunari Nonohara Non-member (Matsushita Electric Works Ltd.)

**Keywords** : Optical mixer, optical tweezers, photolithography, chaotic flow, mixing,  $\mu$ -TAS

Optically driven 3-wing mixers are designed, fabricated and applied to the two-liquid mixing in a microchannel. Three-wing mixers are easily fabricated correct shapes and are stable in trapping & rotation. Two-liquid mixing are visualized and velocity vectors are obtained through the stable and fast rotation of 500 rpm even in a high-speed flow.

## 1. Design

Rotation rate was obtained by balancing the optical torque to the drag force. To calculate the optical torque, a laser beam was divided into  $100 \times 100$  elements on an objective lens aperture, the torque was estimated for each ray at the point on the side surface, and all the torques were summed. The mixer diameter is  $d = 20 \mu\text{m}$ , and the thickness is  $t = 10 \mu\text{m}$ , and the wing width is  $w = 3.3 \mu\text{m}$ . The refractive indexes are 1.6 for the mixer and 1.33 for the medium (water).

The drag force was calculated as the sum of the torque components of both the pressure (normal component) and the shearing stress (tangential component) on all surfaces of the mixer. The simulation was performed with a commercial computational fluid dynamics (CFD) tool (CFX-4, AEA Corp.) to satisfy the continuity equation and Navier-Stokes equation.

Figure 1 shows the rotation rate dependence on the trapping position of the mixer, leading to about 500-600 rpm in water for the laser power of 200 mW.

## 2. Fabrication

Optical mixers were fabricated by a photolithography method. Not only exposure and development conditions but also baking method (hotplate to prevent resist deformation) and conditions ( $140^\circ\text{C}$  to polymerize the resist firmly) were important, particularly for achieving the correct mixer shape and avoiding adhesion between mixers. An example of the fabricated 3-wing mixers are shown in Fig. 2 for different wing width. We released

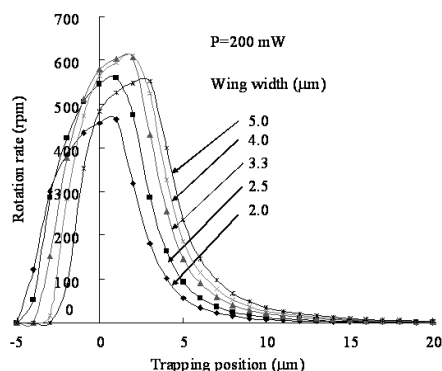


Fig. 1. Rotation rate dependence on the trapping position of 3-wing optical mixers

the mixer into the laser trap environment by etching away the aluminum under the resist.

## 3. Application to the Liquid Mixing in a Microchannel

In order to promote convective mixing, a 3-wing optical mixer, which rotates in fluids and is capable of stirring the fluid around it, is demonstrated in the Y-shaped microchannel which will be used for a  $\mu$ -TAS.

Figure 3 shows the merging of flows of NaOH solution (4 mmol/L) and BTB solution (BromoThymol Blue, 4 mmol/L), both having the inlet fluid velocity of  $67 \mu\text{m/s}$ , actuated by syringe pumps. To visualize the mixing of two liquids through medium density variation, 20% milk fat colloid is included only in the NaOH solution. Velocity vectors appear only in the NaOH solution without mixer (a), but they appear in both liquids due to the stirring by the optical mixer (b). The mixer ( $d = 20 \mu\text{m}$ ) has the rotation rate of 500 rpm at the laser power of 200 mW. The mixer is held stable using optical tweezers even in a flow. The wing top (circumferential) speed corresponds to  $530 \mu\text{m/s}$ .

In conclusion, the following basic technologies were confirmed.

1. Optical mixer shape design by analyzing both the optical torque by a ray optics model and the drag force by CFD.
2. Mixer fabrication by photolithography using a SU-8 resist.
3. Micro flow visualization using milk fat colloid.
4. Velocity vector analyses around the mixer.
5. Two-liquid mixing performance in a microchannel using the optically trapped mixer.

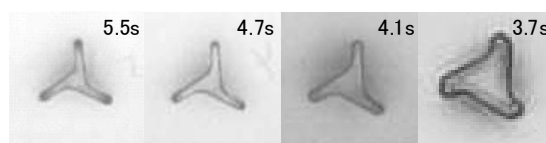


Fig. 2. Fabricated 3-wing mixers for different wing widths ( $d = 20, t = 10, w = 2.0 - 5.5 \mu\text{m}$ )

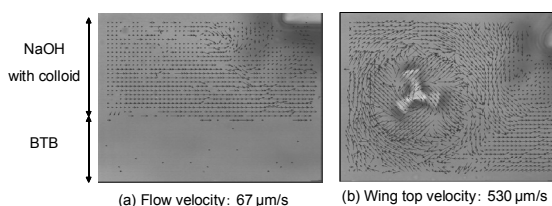


Fig. 3. Two-liquid mixing. Velocity vectors appear only in NaOH solution without mixer (a), but they appear in both liquids upon mixing using the optical mixer (b). 20% milk fat colloid for visualization is included only in the NaOH solution

3 枚羽根光ミキサーの設計・作製と $\mu$ -TAS における混合応用

正員 浮田 宏生\*      非会員 高田 康作\*\*  
 非会員 赤木 太輔\*      非会員 大西 貴和\*  
 非会員 野々原靖也\*

Three-Wing Optical Mixer Design, Fabrication and Application to a  $\mu$ -TAS

Hiroo Ukita\*, Member, Kosaku Takada\*\*, Non-member, Daisuke Akagi\*, Non-member, Takakazu Ohnishi\*, Non-member, Yasunari Nonohara\*, Non-member

Optically driven 3-wing mixers are designed, fabricated and applied to liquid mixing in a microchannel. Three-wing mixers are easily fabricated into the desired shape by photolithography based on a large wing angle, and they are stable against trapping and rotation. Two-liquid mixing is visualized by the variation in milk fat colloid density, and velocity vectors are obtained through a stable and fast rotation rate of 500 rpm, even in a flow of 67  $\mu$ m/s.

キーワード：光ミキサー，光ピンセット，フォトリソグラフィ，カオティック流，混合， $\mu$ -TAS

Keywords：Optical mixer, optical tweezers, photolithography, chaotic flow, mixing,  $\mu$ -TAS

## 1. まえがき

最近提案／作製された光圧回転体には，従来の羽根型<sup>(1)</sup>のほか，マイクロモーター<sup>(2)</sup>，マイクロギア<sup>(3)</sup>，マイクロマシンエレメント<sup>(4)</sup>，斜面型<sup>(5)</sup>などがある。いずれもよく知られたフォトリソグラフィ法や光造形法で作製されている。中でも羽根型回転体は構造がシンプルで，少ない羽根数では羽根のなす角度が大きくなり正確な形状を作製しやがしい。このため，3枚羽根は光トラップや光圧回転に対して安定で，回転速度も速い（Fig. 1）などの特徴がある<sup>(6)</sup>。

このような光圧回転体は，遠隔操作が可能（配線が不要）なだけでなく，光ピンセット作用により軸受けが不要なので応用範囲が広がっている。たとえば Fig. 2 のような $\mu$ -TAS<sup>(7)(8)</sup>の微小流路の混合部で，光ミキサーとして試液と試薬の混合促進に利用できる<sup>(9)</sup>。

よく知られているように，微小流路ではレイノルズ数が小さい（ $10^{-3}$ 程度）ので流れが層流となり，混合は2液が接する界面での拡散によっている。このため混合効率が悪い（反応が遅い）ので，カオティックな流れを発生できるマイクロ混合システムが複数提案されている<sup>(10)~(12)</sup>。しかし，混

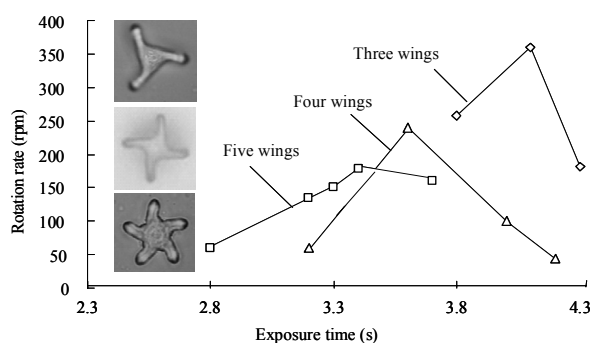


Fig. 1. Measured rotation rates for optical mixers fabricated by photolithography with different wing numbers.

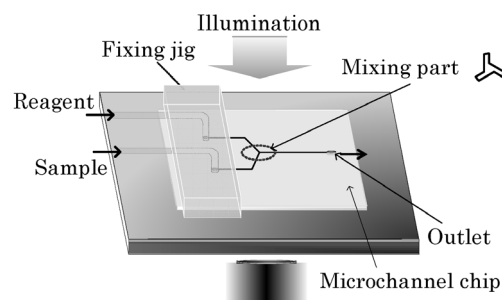


Fig. 2. Concept of optical mixer for use in future  $\mu$ -TAS. The chip will have components such as inlets, fluidic microchannels with a mixing part, a detector (not shown), and outlets.

\* 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 松下電工株式会社電器事業本部  
 〒522-8520 滋賀県彦根市岡町 33 番地  
 Matsushita Electric Works, Ltd.  
 33, Okacho, Hikone, Shiga 522-8520

合効率がさらに向上するには、より能動的な混合システムが望まれている。

一方、光ミキサーによる混合は、2液が接する界面に直接攪拌を誘起するので、従来の受動的な方法に比べより効率的な混合が期待できる<sup>(13)~(15)</sup>。本稿では、このようなマイクロ混合に用いる3枚羽根光ミキサーの設計、作製、微小流路中での混合特性について述べる。

## 2. 3枚羽根光ミキサーの設計

**〈2・1〉 光トルク** Fig. 3は3枚羽根光ミキサー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 $(r_L, \alpha)$ に入射する一本の光線を考えると、光線は回転体上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 $F$ とする。なお、焦点が光ミキサー内部深くなった場合に現れる側面からの入射光については今回考慮していない。

出射点の回転中心からの距離を $r$ とすると光トルクは $Fr \sin \alpha$ である。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

$$T_{opt} = 3 \int_{r_{L,min}}^{r_{L,max}} \int_{\alpha=0}^{\alpha=\cos^{-1} \frac{2W}{d}} Fr^2 \sin \alpha d\alpha dr \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表される<sup>(13)</sup>。但し、 $d$ は直径、 $r_{min}$ 、 $r_{max}$ はそれぞれ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。

シミュレーション条件をTable 1に、光トルクのトラップ(焦点)位置依存性をFig. 4に示す。羽根は直径20  $\mu\text{m}$ 、厚み10  $\mu\text{m}$ 、幅2.0, 2.5, 3.3, 4.0, 5.0  $\mu\text{m}$ 、レーザーパワー200 mWである。なお、同図の横軸0が回転体の上面、負が回転体内部、正が回転体外部を表わしている。

**〈2・2〉 回転抗力** 汎用流体解析ソフトウェア CFX-4 (AEA ハイプロテック社) を使用して得られた光ミキサー表面の圧力 $P_T$  (面に垂直)、剪断応力 $S_T$  (面に平行) と距離 $r$ の積から(2)式により回転抗力を算出する<sup>(13)</sup>。

$$T_{drag} = \iint (P_T + S_T) \cdot r \, dS \quad \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 5に羽根幅3.3  $\mu\text{m}$ 、回転速度500rpmの場合の(a)圧力、(b)剪断応力、(c)回転抗力分布を示す。回転抗力は羽根先端部で大きく、根元で小さく一部は負になっている(c)。回転抗力が負になるのは、図(b)の前面(Front)の根元の剪断応力が回転体の中心方向に向くためである。

Fig. 6は羽根1枚に対する各面の回転抗力の羽根幅依存性である。図中に光ミキサー各部の名称を示す。同図より羽根幅が狭いときは前面と背面の回転抗力が大きいのにに対し、羽根幅が広くなると側面の回転抗力が大きくなることわかる。これは羽根幅による各面の表面積の増減による。なお、全回転抗力はFig. 7に示すように羽根幅5  $\mu\text{m}$ 以下ではほぼ一定(500 rpmの場合800 pN $\mu\text{m}$ )、5  $\mu\text{m}$ 以上で増加する。

**〈2・3〉 回転速度** 回転速度は上記の光トルク $T_{opt}$ と回転抗力 $T_{drag}$ の釣り合いから算出できる。Fig. 8は羽根直径

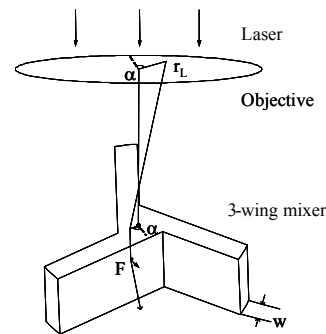


Fig. 3. Torque analysis for 3-wing optical mixer.

Table 1. Conditions for optical torque simulation.

Laser power (mW)	100
Objective NA	1.4
Refractive index of the immersion oil	1.516
Refractive index of the medium	1.33
Refractive index of the mixer	1.6
Mixer diameter ( $\mu\text{m}$ )	20
Mixer thickness ( $\mu\text{m}$ )	10
Speed of light in vacuum (m/s)	$3.0 \times 10^8$

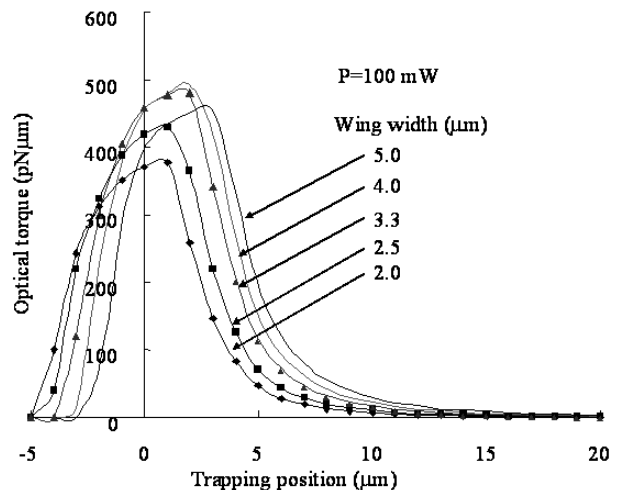


Fig. 4. Optical torque dependence on trapping position.

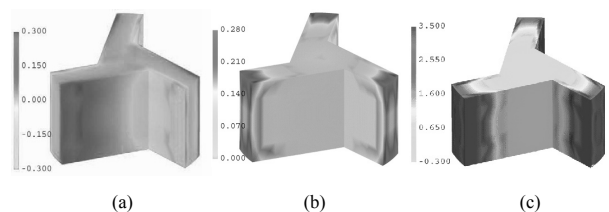


Fig. 5. 3-D images of distribution on (a) pressure, (b) shearing stress, and (c) viscous drag force at the rotation rate of 500 rpm.

20  $\mu\text{m}$ 、厚み10  $\mu\text{m}$ 、幅2.0, 2.5, 3.3, 4.0, 5.0  $\mu\text{m}$ の回転速度と焦点位置の関係である(レーザーパワー200 mW)。

焦点位置が外部にある場合、最高回転速度は焦点位置+2  $\mu\text{m}$ のとき約610 rpmで、幅3.3, 4.0  $\mu\text{m}$ の回転速度の最

大値はほとんど変わらない。焦点位置が内部にある場合 (-2 μm : 実験結果) は幅の細い 2.0, 2.5, 3.3 μm が幅の広い 4.0, 5.0 μm より高速回転することがわかる。

(2・4) 攪拌効率 回転抗力が大きいと媒質をより攪拌できると考えられるが、回転抗力の増加は回転速度を遅くし媒質の流量を減少させる。回転速度は光トルクと回転抗力に依存し、媒質の流量は回転速度のほか光ミキサーの

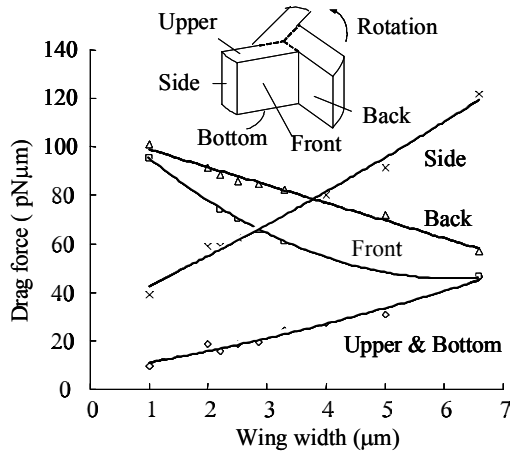


Fig. 6. Viscous drag force dependence on the wing width, with mixer side part as a parameter.

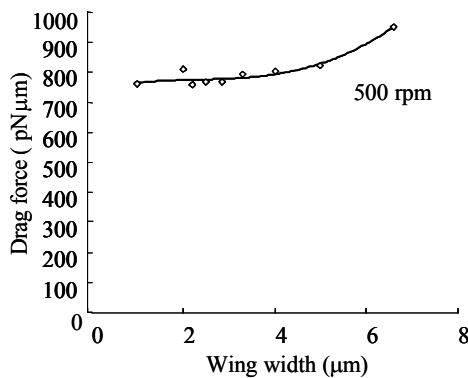


Fig. 7. Total drag force dependence on the wing width of an optical mixer.

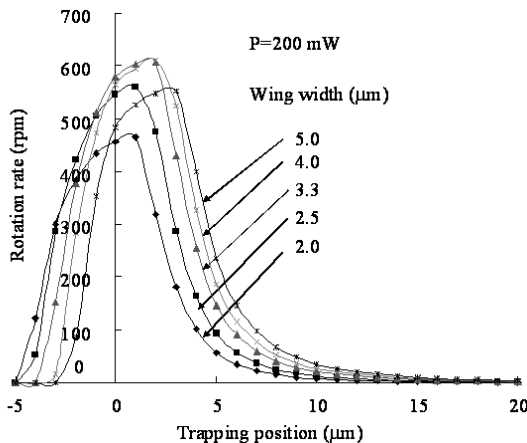


Fig. 8. Theoretical rotation rate dependence on the trapping position of a 3-wing optical mixer.

形状にも依存する。今後は両者のトレードオフを検討する。

### 3. 3枚羽根光ミキサーの作製と評価

直径 20 μm, 厚み 10 μm, 羽根幅 3.3 μm の 3 枚羽根光ミキサーを、レジスト SU8-25 を用いてフォトリソグラフィ法<sup>(16)</sup>により作製した。Fig. 9 が作製工程で、(a) Si 基板上に犠牲層として Al を真空蒸着、(b) フォトレジストをスピコート、(c) 溶媒を蒸発させるため加熱(プリベーク)、(d) 光ミキサーの形状が描かれたマスクを通して紫外線で一括露光、(e) 加熱(ポストベーク)による重合、(f) 現像により非露光部のレジストを溶解除去(光ミキサー部分のみを残す)である。その後、犠牲層 Al を溶解し光ミキサーを基板から剥離した。

Fig. 10 は従来工程で作製した光ミキサーで、(a) 形状不良、(b) 回転体同士の付着、(c) 不要レジストの残留(粘着)などの問題点があった。そこで、本稿ではこれらの問題が、作製のどの工程に起因するかを分析し検討した。具体的には、従来の露光時間の最適化のほか、(1) ポストベーク温度の適正化(重合を完全に行う)、(2) 剥離時に液の乾燥がないようにする等により、正しい形状の光ミキサーを作製するとともに、回転体同士や流路壁面との付着、残留レジストをなくした<sup>(6)</sup>。

Fig. 11 は最適露光時間(図中の数値)で作製した羽根数の異なる光ミキサーである。羽根数の増加にともない隣り合う羽根の角度が鋭くなるので正しい形状の作製が困難になり、最適露光時間は減少している。また、2枚羽根は転倒した。このため、ここでは羽根数の少ない(羽根角が大きい)3枚羽根を作製した。

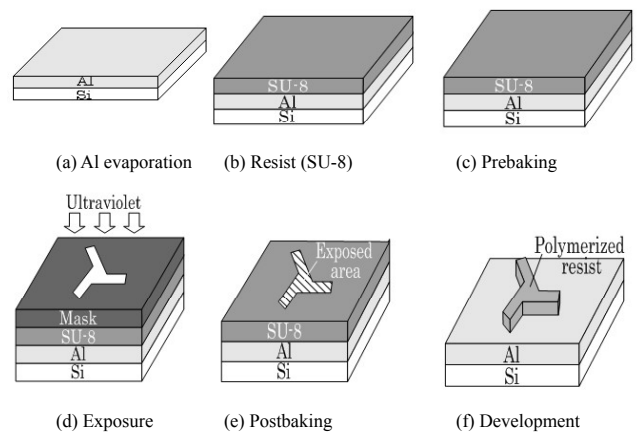


Fig. 9. Optical rotor fabrication by photolithography.

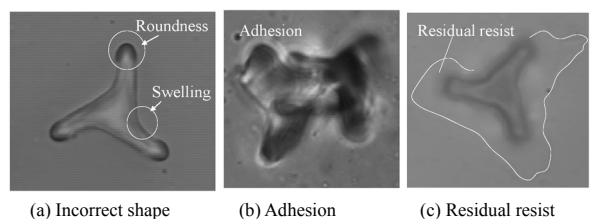


Fig. 10. Fabricated 3-wing mixers and related problems.

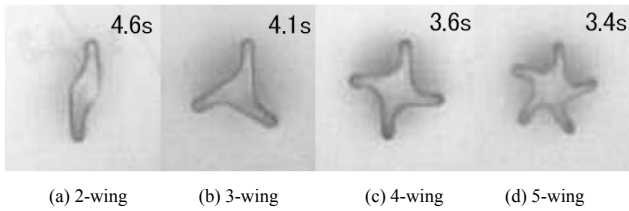


Fig. 11. Fabricated optical mixers for different wing numbers.

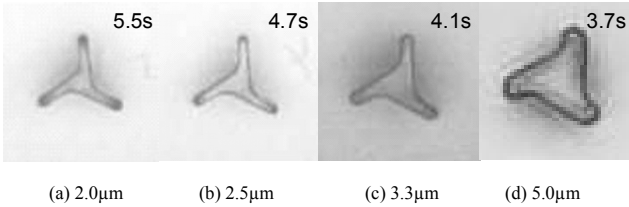


Fig. 12. Fabricated 3-wing mixers for different wing widths.

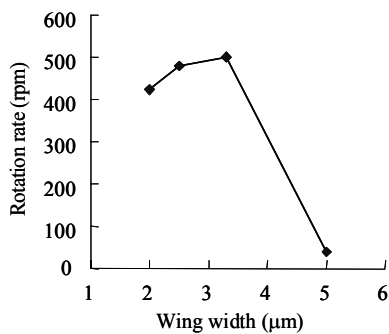


Fig. 13. Experimental rotation rate dependence on wing width for a 3-wing optical mixer at a laser power of 200 mW.

羽根幅を変えた場合の作製結果を Fig. 12 に示す。同図から羽根幅が増加するにつれ最適露光時間は減少している。また、羽根幅が細いほど現像時に光ミキサーが転倒しやすくなった。しかし、3枚羽根光ミキサーはどの羽根幅も比較的マスクに近い形状で作製出来ており、安定に高速回転した。

回転速度の羽根幅依存性を Fig. 13 に示す（レーザーパワー200 mW）。焦点位置が回転体内部にある場合（ $-2\ \mu\text{m}$ ）、Fig. 8 の理論結果とも一致するが、羽根幅が狭いほど回転速度が速い傾向にあることがわかる。

#### 4. $\mu$ -TAS における 2 液混合応用

**〈4・1〉 実験装置** 2液混合の観測には Fig. 14 の試作評価装置を用いた<sup>(17)</sup>。まず、光トラップ用光源の YAG レーザー（波長 1064 nm）をビームエキスパンダーで拡大（直径 8.2 mm）し光学ボックスへ導く。これを NA=1.4 の油浸対物レンズで集光し、下方から、サンプル液層に導入した光ミキサーに照射し、捕捉・回転する。次に、サンプルを上方から照明し、レーザー焦点付近を高速度カメラにより観測する。高速度カメラは、レーザー焦点に捕捉された光ミキサーを中心に、約  $56\ \mu\text{m} \times 42\ \mu\text{m}$  の範囲の媒質の流れを可視化する。記録画素は  $640 \times 240$  ドット、フレーム速度は 30 fps

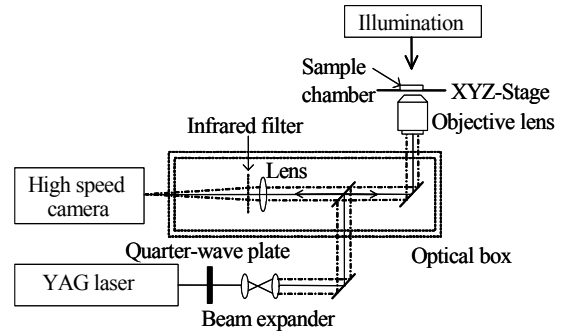


Fig. 14. Experimental setup to visualize microflow around a mixer. Generated microflows are visualized by variation in milk fat colloid density with oblique angle illumination. Fabricated sample chamber is sealed with cover glass.

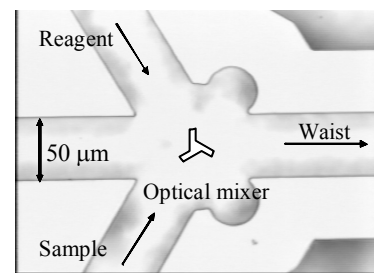


Fig. 15. Main part of a microchannel in which an optical mixer is used to mix sample and reagent liquids.

および 60 fps とした。

**〈4・2〉 2 液混合実験**  $\mu$ -TAS を想定した微小流路内での光圧回転とそれに基づく 2 液混合実験の中心部を Fig. 15 に示す。

まず、シリンジポンプを用いて試液と試薬を微小流路内に送液する。微小流路内が媒質で満たされたら、送液を停止し、抽出口に光ミキサーが懸濁された純水を滴下する。次に、集光レーザーで抽出口付近の光ミキサーをトラップし、混合部まで移動して回転させる（レーザーパワー 200mW）。なお、流路の幅は  $50\ \mu\text{m}$  である。試液には水酸化ナトリウム(NaOH)水溶液、試薬には Bromo Thymol Blue (BTB)溶液を用い、混合による着色（青色）を検出しようとしたが、色変化は不明瞭だった。このため、NaOH 溶液にのみ 20%の乳脂肪を混ぜ、乳脂肪のない BTB 溶液とそれぞれの流入口から微小流路へ送液した。

**〈4・3〉 微小流路内 2 液混合の可視化** 2 液を流速  $0.01\ \mu\text{l/s}$  で送液したときの混合部を Fig. 16(a)に示す。微小流路では 2 液は層流（流速  $67\ \mu\text{m/s}$ ）となり、混合は 2 液が接する界面での拡散でしか起こらない。Fig. 16(b)は 3 枚羽根光ミキサーを混合部において回転させた様子である。光ミキサーは流れの中でも安定に保持され、微小流路の混合部において 500 rpm で高速回転した。

混合状態を可視化するため、光ミキサーの回転による乳脂肪コロイドの攪拌濃度を追跡し、画像内  $0.5\ \mu\text{m}$  ごとの計

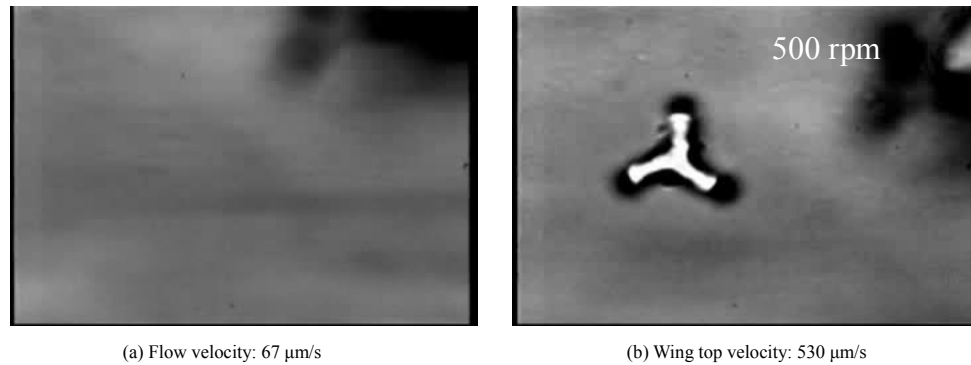


Fig. 16. Two-liquid mixing in a microchannel. (a) Without mixer, (b) with mixer.

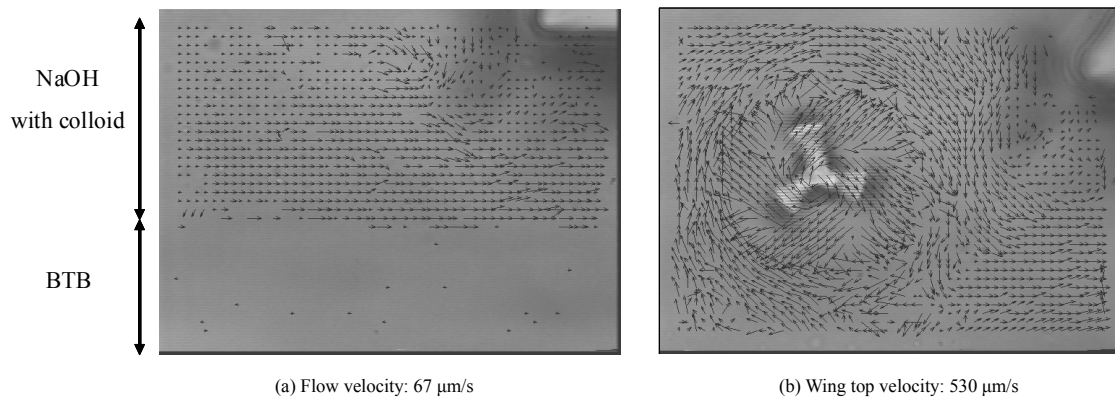


Fig. 17. Visualization of two-liquid mixing. (a) Velocity vectors appear only in NaOH solution without mixer, but (b) they appear in both liquids during mixing with optical mixer; 20% milk fat colloid for visualization was included only in NaOH solution.

測点で速度ベクトルを算出・表示した<sup>(14)</sup>。Fig. 17(a) は光ミキサーのない場合で、NaOH 溶液と BTB 溶液は混じり合わない（層流）が、両液が接する部分で光ミキサーを回転させると(b), NaOH 溶液中の乳脂肪が BTB 溶液にも導入（混合）されるので、どちらの溶液中でも速度ベクトルのが観測されることがわかる。

## 5. 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 枚羽根光ミキサーの回転特性を理論解析した。具体的には、幾何光学による光トルク解析、流体力学による回転抗力解析、そして両者の釣り合いから回転速度を解析した。その結果、直径 20  $\mu\text{m}$ 、厚さ 10  $\mu\text{m}$  の光ミキサーは、水中で 500~600 rpm の速度で回転することがわかった（レーザーパワー 200 mW）。

次に、フォトリソグラフィ法による作製方法を検討した。具体的には、従来の形状不良、回転体同士の付着、残留レジストなどの問題点を、露光時間、ベーク条件の最適化、ウェット剥離法の導入により改善した。

最後に、作製した 3 枚羽根光ミキサーを微小流路の混合部に導入したが、光ミキサーは流れの中にあっても光ピンセット力により安定に保持され、高速回転する(500 rpm)ことを確認した。また、2 液混合状態を可視化し、本手法が将来の  $\mu\text{-TAS}$  における反応促進（検査時間の短縮）に有効で

あることを実証した。今後は、微小流路中での混合の定量化とさらなる効率化を図る。

## 謝 辞

本研究では、立命館大学大上芳文先生には日頃から流体解析でご指導いただき、京都大学田畑修先生、立命館大学白石晴樹先生、小西聡先生には微小流路の作製と化学実験に関しご教授いただいています。ここに深謝致します。

（平成 18 年 5 月 11 日受付，平成 18 年 8 月 21 日再受付）

## 文 献

- (1) E. Higurashi, H. Ukita, H. Tanaka, and O. Ohguchi : "Optically induced rotation of micro-objects fabricated by surface micromachining", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.64, pp.2209-2210 (1994)
- (2) Z. P. Luo, Y. L. Sun, and K. N. Ann : "An optical spin micromotor", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.76, No.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.*, Vol.40, No.6, pp.930-937 (2001)
- (4) M. E. J. Friese and H. R. Dunlop : "Optically driven micromachine elements", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.78, No.4, pp.547-549 (2001)
- (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.*, Vol.42, No.15, pp.2708-2715 (2003)
- (6) D. Akagi, K. Takada, and H. Ukita : "Fabrication of three-wing mixers and their application to liquid mixing in a microchannel", *Trans Institute of*

Electrical Engineering of Japan MSS-05-30, pp.51-56 (In Japanese)

赤木太輔・高田康作・浮田宏生：「3枚羽根光ミキサーの作製と微小流路への応用」, 電学 マイクロマシン・センサシステム研資 MSS-05-30, pp.51-56 (2005)

- (7) S. Balslev, B. Bilenbergh, O. Geschk, A. M. Jorgensen, A. Kristensen, J. P. Kutter, K. B. Mogensen, and D. Snakenborg : "Fully integrated optical system for Lab-on-a-Chip applications", *Technical Digest of the MEMS*, pp.89-92 (2004)
- (8) 平塚洋二郎・丸尾昭二：「光制御マイクロマニピュレーションシステムの開発」, 電学論 E, **125**, 12, pp.473-478 (2005)
- (9) H. Ukita and M. Kanehira : "A shuttlecock optical rotator - Its design, fabrication and evaluation for a micro-fluidic mixer -", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics on Optical MEMS*, Vol.8, No.1, pp.111-117 (2002)
- (10) Y. K. Lee, J. Deval, P. Tabeling, and C. M. Ho : "Chaotic mixing in electrokinetically and pressure driven micro flows", *Technical Digest of the MEMS*, pp.483-486, Interlaken, Switzerland (2001)
- (11) A. D. Stroock, S. K. W. Dertinger, A. Ajdari, I. Mezic, H. A. Stone, and G. M. Whitesides GM : "Chaotic mixer for Microchannels", *Science*, Vol.295, pp.647-651 (2002)
- (12) A. Dodge, M. C. Jullien, Y. K. Lee, X. Niu, F. Okkels, and P. Tabeling : "An example of a chaotic micromixer: the cross-channel mixer", *C. R. Physique*, Vol.5, pp.557-563 (2004)
- (13) H. Ukita : *Micromechanical photonics*, Springer (2006)
- (14) H. Ukita, K. Takada, and Y. Itoh : "Experimental and theoretical analyses of three-dimensional microflows generated by an optical mixer", *Proc SPIE*, Vol.5514, pp.704-711 (2004)
- (15) Y. Ogami, K. Nishikawa, and H. Ukita : "Study on the mixing performance of micro optical rotor by CFD", *JSME International Journal*, Vol.B-49, No.3, pp.645-652 (2006)
- (16) 加沢エリト・上野武司・篠田 勉：「マイクロ部品作製のための高アスペクト比リソグラフィ」, 東京都立産業技術研究所研究報告, 第5号, pp.37-40 (2002)
- (17) 内山敏介・浮田宏生：「羽根型光圧回転体によるマイクロ流の立体観測」, 電学論 C, **123**, 11, pp.1921-1924 (2003)

**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。



**高田 康作** (非会員) 1980年6月17日生。2002年3月立命館大学電子光情報工学科卒業, 2004年3月立命館大学大学院理工学研究科修了。在学中は光ミキサーによる微小流体混合法の研究に従事。現在, 松下電工(株)。



**赤木 太輔** (非会員) 1982年10月15日生。2004年3月立命館大学電子光情報工学科卒業, 同年4月立命館大学大学院理工学研究科入学。現在, 同課程に在学中。光ミキサーの作製法の研究に従事。



**大西 貴和** (非会員) 1982年5月15日生。2004年3月立命館大学電子光情報工学科卒業, 同年4月立命館大学大学院理工学研究科入学。現在, 同課程に在学中。光ミキサーの光トルク増大法の研究に従事。



**野々原 靖也** (非会員) 1983年1月23日生。2004年3月立命館大学電子光情報工学科卒業, 同年4月立命館大学大学院理工学研究科入学。現在, 同課程に在学中。光ミキサーの攪拌性能向上法の研究に従事。

