

8. 光圧回転体の理論—流体解析—

浮田 宏生

8.1 流体解析

光圧回転体が周辺媒質に誘起する流れや 2 液混合を評価するため、対流項に格子の移動速度ベクトル \mathbf{u} を考慮した移動格子系の連続の式(1), Navier-Stokes の方程式(2) を流体解析ソフトウェア Fluent により解析した(図 9.1).

$$\nabla \cdot (\mathbf{U} - \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + ((\mathbf{U} - \mathbf{u}) \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{U} \quad (2)$$

\mathbf{U} は流速ベクトル, P は圧力, ν は動粘性係数, 作動流体は水(283K, 粘性非圧縮性)である.

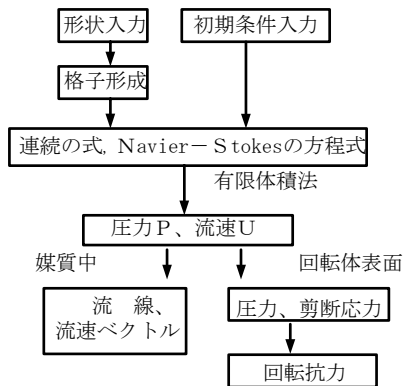


図 1 解析フロー

図 2 は羽根型回転体の流線の解析結果で、矢印は流線の始点(羽根の上面), 回転数 50 rpm, 2 秒後の状態を表している. 羽根上部の面では, 上向き半径方向に遠ざかる渦状の流れが見られる. これを水平方向から見たのが右図で, 流れが上下方向に発生している.

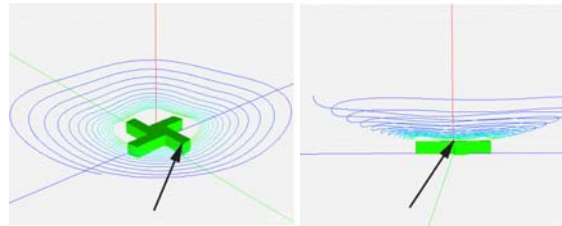


図 2 光ミキサー周辺の流線

8.2 回転抗力と攪拌量

解析結果を元に回転抗力(3)式, 攪拌量(4)式, 攪拌効率(5)式を算出する. なお P_T , S_T はそれぞれ光ミキサー表面にかかる圧力と剪断応力の回転抗力成分であり, $\mathbf{v}(x,y,z)$ は流速ベクトルである.

$$T_{drag} = 3 \iint (P_T + S_T) \cdot r dS \quad (3)$$

$$\delta = \int \sum_{面内} |v(x,y,z)| dz \quad (4)$$

$$\delta_{eff} = \delta / T_{drag} \quad (5)$$

解析条件は純水, 温度 293K, 密度 $9.978 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$, 粘度係数 $1.024 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ とした.

図 3 に 3 枚羽根光ミキサーの回転抗力の羽根幅依存性, 図 4 に攪拌量の羽根幅依存性, 図 5 に攪拌効率の羽根幅依存性を示す. 図 3 より回転抗力は羽根幅 $5 \mu\text{m}$ 以下で一定で, $5 \mu\text{m}$ 以上で増大する. 図 4 より攪拌量は羽根幅とともに増加する. 図 5 より攪拌効率は羽根幅 $3.3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 付近で最も高く, それ以外では緩やかに減少している.

攪拌量は回転速度にも比例するので, 総合的な攪拌性能の比較には光トルクとの兼ね合いを考える必要がある. 理論, 実験¹ともに羽根幅 $2.5 \mu\text{m} \sim 3.3 \mu\text{m}$ の 3 枚はねが最も高速回転し羽根幅 $5 \mu\text{m}$ 以上で回転速度が急低下するので, 従来型光ミキサーの最適攪拌形状は 3 枚羽根, 羽根幅 $3.3 \mu\text{m}$ 付近であると考えられる.

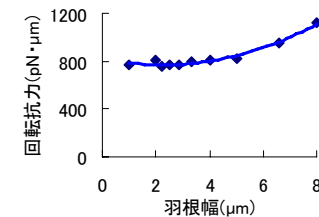


図 3 回転抗力の羽根幅依存性(3 枚羽根, 500rpm)

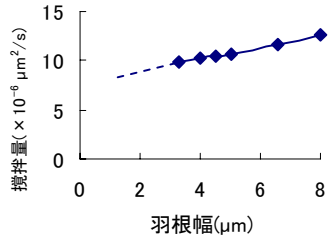


図4 攪拌量と羽根幅の関係(3枚羽根, 500rpm)

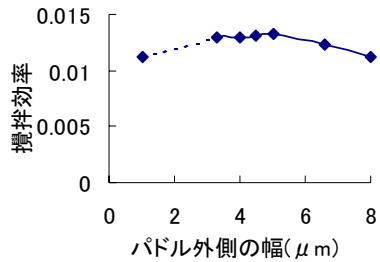


図5 攪拌効率と羽根幅の関係(3枚羽根, 500rpm)

8.3 微小流路における2液混合

将来のマイクロ化学分析システムにおける高速混合の一手段として光ミキサーが提案されている。図6の流路モデルに対し、作動流体に室温の水、流入速度 $5 \mu\text{m/s}$ 、光ミキサーの回転速度 500rpm、拡散係数 $1.0 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$

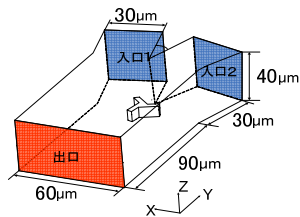


図6 流路モデル

とし、連続の式(1)、Navier-Stokes の方程式(2)、濃度の輸送方程式(6)を解き、混合度を式(7)で定義する。ここで、 C は各格子点の体積分率、 \bar{C} はその平均値である^[1]。

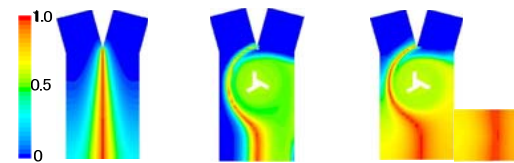
$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla)C = \frac{D}{UL} \nabla^2 C \quad (6)$$

$$M = 1 - \frac{1}{C} \sqrt{(C_i - \bar{C})^2} \quad (7)$$

混合度比較は流路出口断面で行う。

8.4 対流効果と拡散効果

図7(a)は液体の拡散効果のみによる2液混合、(b)は光ミキサーの対流効果による2液混合、(c)は相乗効果による2液混合の様子である。(a)の拡散効果に、(b)の光ミキサーの対流効果を加えることで、(c)のように大幅に混合が促進される。混合度は(a)0.51、(c)0.83であり、上昇率は1.63倍である。

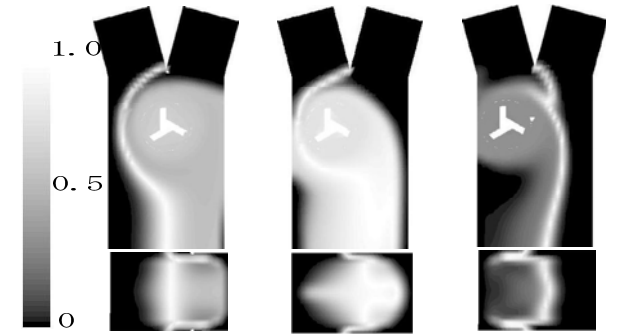


(a) 拡散効果 (b) 対流効果 (c) 相乗効果

図7 Y字型微小流路内での2液混合効果

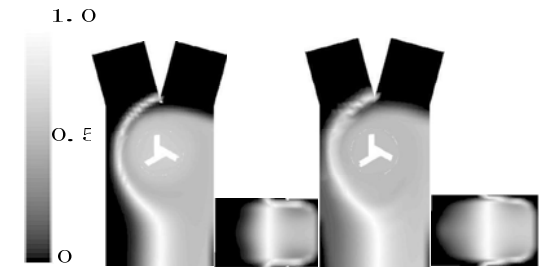
8.5 混合度の向上

(a) 光ミキサーの配置位置と交互流入



(a) 基準位置 (b) 左 $10 \mu\text{m}$ (c) 左 $15 \mu\text{m}$

図8 配置位置が混合に及ぼす影響



(a) 定常流入 (b) 交互流入

図9 交互流入が2液混合に及ぼす効果

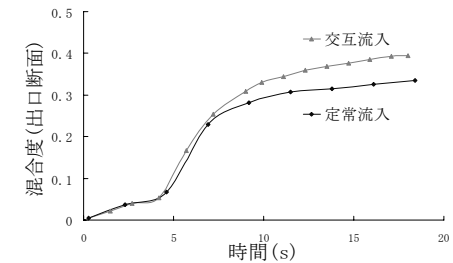


図10 2液混合度の改善

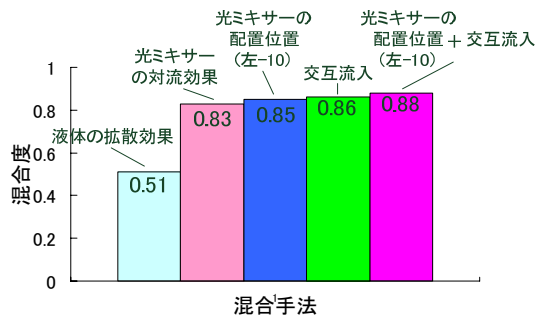


図 11 2液混合手法と混合度(拡散係数 $1.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$)

(b) 光ミキサーの数

・ 1 ミキサーと 2 ミキサー

解析条件は媒質に水を使用し、室温、密度 997.8 kg/m^3 、粘性係数 $1024 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、流入速度 $5 \mu\text{m/s}$ 、光ミキサー回転速度 500 rpm である。また、流路中心での水平断面と出口の垂直断面の混合度分布を図 12 に示し、出口面における解析時間と混合度を図 13 に示す。

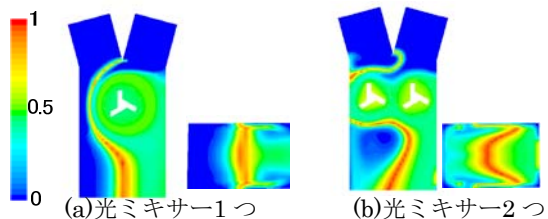


図 12 混合分布の解析結果

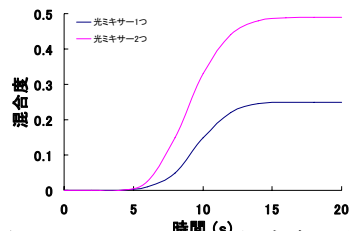
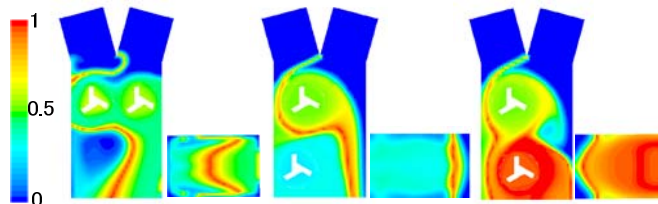


図 13 出口面における混合度の時間経過

・ 2 ミキサーの配置位置 (対流効果)

一方の光ミキサーを最も混合度の高い流路中心から左側へ $10 \mu\text{m}$ の位置で固定し^[2]、もう一方を移動させた。

また、解析条件は 3.1 と同様であり、移動位置 1 の中で最も出口面全体を混合していた左-下 45 を基準の 0 とし、図 14 に基準位置、0(左-下 45)、最適位置の混合状態と混合度を示す。



(a)基準位置 0.5 (b) 0(左-下 45)0.32 (c)最適位置 0.83

図 14 配置位置と混合分布の関係

同図より、(a)は流路右側の壁に液体をあてることによりその跳ね返りを利用した混合となっており、(b)は移動させた光ミキサーが左に寄りすぎ、境界線を攪拌していないため混合度が低く、(c)は固定した光ミキサーの攪拌と 2 液の境界線を巻きこむ混合が合わさり、混合度が上昇した。

・ 2 ミキサーの配置位置(対流・拡散相乗効果)

水の拡散係数 1.0×10^{-11} の解析条件を与えた場合の基準位置と最適位置の混合状態と混合度を図 15 に示す。図(b)は出口面全域がほぼ赤色でよく攪拌混合されており、配置位置による混合度の上昇率は 1.07 倍である。また、図 16 の拡散係数と混合度の関係より、最適位置は拡散係数 $1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合、より効果を発揮し混合度の上昇率は 1.33 倍である。この結果、拡散係数の低い実際の $\mu\text{-TAS}$ の液体に対して、光ミキサーにより大きな効果が得られる。

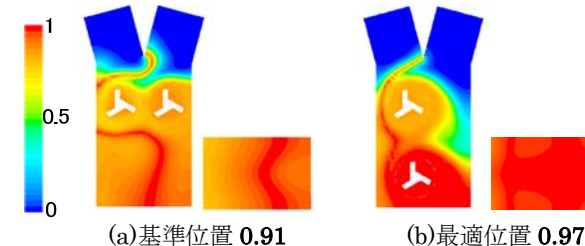


図 15 拡散効果を考慮した基準位置と最適位置

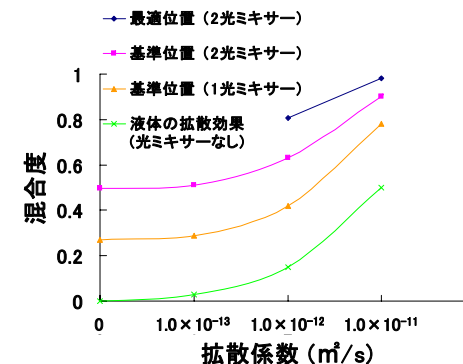
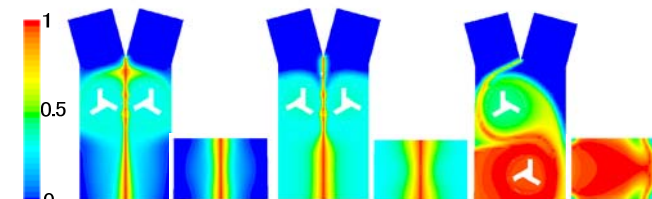


図 16 同方向回転の場合の拡散係数と混合度の関係

・ 正逆回転 (対流効果)



(a)基準位置 1 0.16 (b) 基準位置 2 0.33 (c)最適位 0.87

図 17 配置位置と混合分布の関係

図 17 より (a),(b)は 2 液の境界線中心に混合が集中し、境界線から左右対称に混合が広がり、境界線自体を攪

拌混合できていないが、(c)は図15(c)と同様に、固定した光ミキサーの攪拌と境界線を巻きこむ混合が合わさり、出口面を非常に高い割合で混合し、飛躍的に混合度が上昇している。

・正逆回転（対流・拡散相乗効果）

同様に拡散係数 1.0×10^{-11} の解析条件を与えた場合の基準位置と最適位置の混合状態と混合度を図18に示す。図(c)はほぼ完全混合状態となり、(a),(b)に対し混合度の上昇率は1.52倍、1.21倍である。また、図19の拡散係数と混合度の関係より、拡散係数 $1.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ の場合、混合度の上昇率は2.51倍、1.66倍である。3.3節と同様、拡散係数の低下により対流効果の占める割合は大きい。

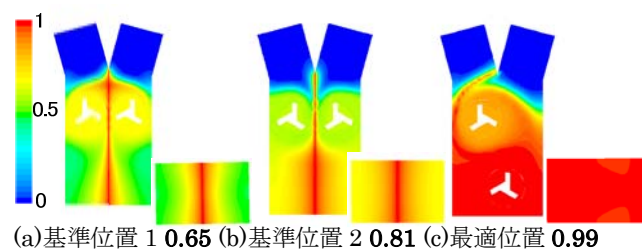


図18 配置位置と混合分布の関係

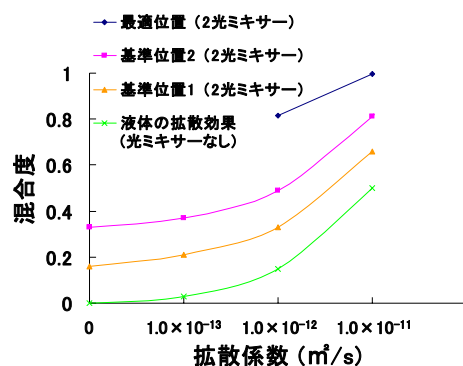


図19 正逆回転の場合の拡散係数と混合度の関係

・2液混合に及ぼす回転速度・流入速度の影響

図17(c)の最適位置において2光ミキサーの回転速度、流入速度が混合度に与える影響を検討した。解析結果を図20(a)回転速度、(b)流入速度依存性として示す。

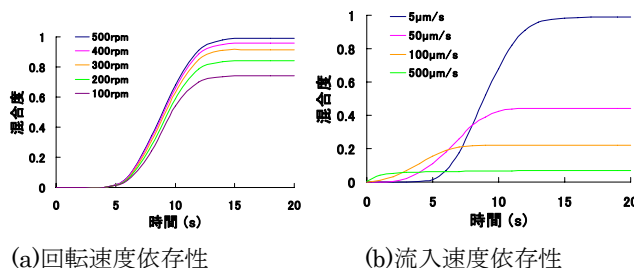


図20 混合度の時間変化

図20より光ミキサー回転速度の増加に伴い、混合度も上昇している。また、流入速度 $5 \mu\text{m}/\text{s}$ でほぼ完全混合状態であっても流入速度を10倍、20倍、100倍と増加させると、混合度が急激に減少しているが、流入速度が速くなればなるほど、より早い時間で混合が起きることがわかる。

以上、複数の光ミキサーによる混合促進では次の知見を得た。

- ① 光ミキサーを1つから2つにした場合、対流効果の混合度は2倍、拡散効果の混合度の1.78倍になった。
- ② 同一方向に回転する2光ミキサーの流路内配置位置・間隔は、一方の光ミキサーの攪拌による2液境界線を巻きこむ位置に他方の光ミキサーを配置した図6(b)が最適で混合度は0.97になった。
- ③ 正逆方向に回転する2光ミキサーの流路内配置位置・間隔は、②と同様の図10(c)が最適で混合度は0.99になり、ほぼ完全混合状態を達成した。
- ④ 実際の $\mu\text{-TAS}$ の液体は水より拡散係数が低く、光ミキサーの対流効果の占める割合がさらに大きい。
- ⑤ 回転速度の増加に伴い混合度は上昇する。また、流入速度が増加するごとに混合度は減少するが、より短い時間で混合が進むことがわかった。

参考文献

- (1) 大上芳文, 西川健, 浮田宏生: 光圧マイクロ回転体の攪拌混合性能の数値流体力学的研究, 日本機械学会論文誌, **71**, 710-B pp.2434-2441, 2005
- (2) 丸川英也, 涌井明人, 浮田宏生: “微小流路における光ミキサーの2液混合効率の向上”, 電気関係学会関西支部連合大会, G2-24, G50, 京都, (2008年11月9日)