

液相せん断混合層流の乱流遷移と混合反応機構

伊藤 靖仁 (名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻)

小森 悟 (京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻)

長田 孝二 (名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻)

酒井 康彦 (名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻)

Yasumasa Ito (Dept. of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University)

Satoru Komori (Dept. of Mechanical Engineering and Science, Kyoto University)

Kouji Nagata (Dept. of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University)

Yasuhiko Sakai (Dept. of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University)

1 緒言

せん断混合層流や噴流に代表されるような、速度勾配に基づく自由せん断流中でせん断力の影響を強く受けながら流体混合や化学反応が進行する現象は、自然界、流体機械を問わず様々な場面で見られる。特に高効率な化学反応装置やミキサーなどの開発のためには、そのメカニズムを明らかにするとともに、いかにして化学反応を促進させるかが重要となる。これらの点を踏まえて、2013年1月に京都大学・数理解析研究所において行われた研究集会「多重物理・多重スケール乱流現象の数理」では、液相混合層流に関する実験研究から明らかにされた1. 混合層流の発達遷移と物質輸送機構の関係、2. 物体後流流れを利用した流体混合反応の促進効果、および3. 2の物体の最適設置位置について発表を行った。本講究録では、このうち3について記述することとする。

従来混合層流に関する実験研究[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]においては、多くの場合、混合層の発達を促進させるために、壁面にトリップワイヤを取り付ける手法が用いられてきた[1, 2, 3, 4, 8, 9]。それに対して著者ら[1]は、流体流入部(テストセクション入口部)に設置された格子[10]の後流流れを利用して流体を乱す手法を提案し、実験研究を行った。その結果、格子の使用により混合層の乱流化や流体混合反応が促進されることを明らかにした。しかしながら、混合層の発達や混合を促進させると、混合層流の速度こう配に起因する乱流生成が減少させられる、また強制的に小スケールの乱れが作られるためエネルギー消散が促進されるという負の効果も見られた。つまり、格子を混合反応を促進させる手法として考える場合、格子を流体流入部に設置することが必ずしも最適ではない可能性があることが示唆するものであった。

そこで本研究では、せん断混合層流の異なる遷移段階に格子を設置した場合に、格子が混合層の流動状態や混合反応に及ぼす影響を解明すること、および流体混合反応の促進手段としての格子の効果および最適設置位置を明らかにすることを目的とした実験を行った。

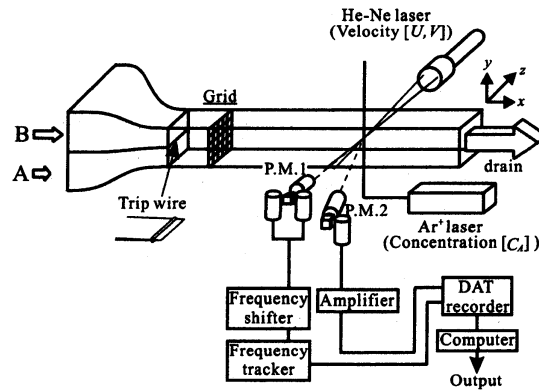


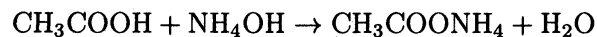
Fig 1: Schematic of experimental apparatus.

2 実験

図1に、実験装置および測定システムの概略を示す。実験装置の概要は著者らのこれまでの研究[1, 4]で使用したものと同一である。テストセクションはアクリル(PMMA)製で、断面が $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ 、主流方向長さが 1.5m の矩形流路である。異なる流体をスプリッタプレートで上下層に完全分離した状態で供給した。ただし、スプリッタプレート上には、スプリッタプレートによるフリップ効果の影響を低減するためにステンレス製のトリップワイヤ(直径 $d_w = 2.0 \times 10^{-3}\text{m}$)を主流方向位置 $x = -2.0 \times 10^{-2}\text{m}$ に取り付けた。上層初期流速 $\bar{U}_1$ を $16.5 \times 10^{-2}\text{m/s}$ に、下層初期流速 $\bar{U}_2$ を $8.5 \times 10^{-2}\text{m/s}$ (主流方向断面平均流速 $\bar{U}_a$ を $12.5 \times 10^{-2}\text{m/s}$ 、上下層流速差 $\Delta\bar{U}$ を $8.0 \times 10^{-2}\text{m/s}$)に設定した。

本研究では、以下の4種類の流れに対して実験を行った。すなわち、テストセクション内に格子を設置しない場合(Run I)および格子を設置する場合(Runs II ~ IV)である。格子を設置する場合には、乱流格子(格子径 $d_g = 1.0 \times 10^{-3}\text{m}$ 、格子間隔 $M = 2.0 \times 10^{-2}\text{m}$)を主流方向距離 $x = 0, 1.0 \times 10^{-1}\text{m}, 2.0 \times 10^{-1}\text{m}$ (格子間隔 M で無次元化された主流方向位置 $x/M = 0, 5, 10$)のいずれかの位置に設置した。なお座標系は、スプリッタプレート先端のテストセクション中心軸上を原点として、主流、鉛直、スパン方向をそれぞれ x, y, z とする。

化学反応を伴わない場合の実験では、上層流体であるB成分に蛍光物質であるウラニン($\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{Na}_2\text{O}_5$)を均一に混入させた水を、下層流体であるA成分にフィルタを通した水を用いた。一方、化学反応を伴う場合の実験では、A成分として酢酸(CH_3COOH)を、B成分として水酸化アンモニウム(NH_4OH)水溶液(ただし $C_{A0} = C_{B0} = 0.01\text{N}$)を用い、化学反応としてこれらの中和反応



を利用した。ただし、ウラニンの蛍光のpH依存性を利用したレーザ蛍光法[?, ?, 1]による濃度測定を行うために、上下層流中に等量($C_{A0} = 5.0 \times 10^{-5}\text{mol/m}^3$)のウラニンを均一に混入した。主流方向および鉛直方向の瞬間速度 U, V の測定を前方散乱型二成分流速測定用レーザドップラ流速計LDV(DANTEC 55X modular system)を用いて、A成分の瞬間濃度 C_A をレー

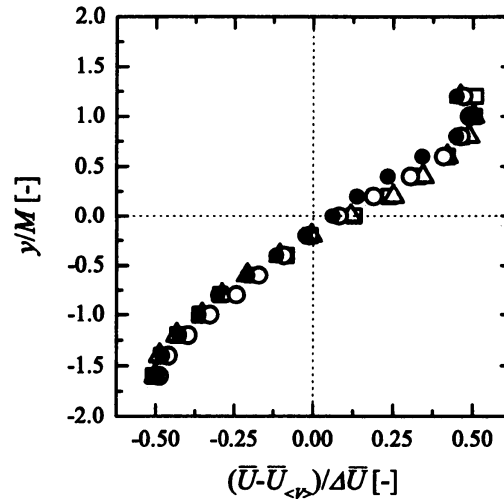


Fig 2: Vertical distributions of the mean streamwise velocity at $x/M = 16$: $\square$, Run I; $\triangle$, Run II; $\circ$, Run III; $\bullet$, Run IV.

ザ蛍光法を用いて、非接触で同時測定した [1]。測定をサンプリング周波数 4kHz で 60 秒間行い、得られた信号を統計的に処理した。また、全ての測定をテストセクションのスパン方向の中心断面 ($z = 0$) において行った。

3 結果および考察

3.1 速度場

図 2 に、 $x/M = 16$ における主流方向平均流速 $\bar{U}$ の鉛直方向分布を示す。ただし、

$$\bar{U}_{(V)} = (\bar{U}_H + \bar{U}_L)/2 \quad (1)$$

であり、 $\bar{U}_H$ および $\bar{U}_L$ はそれぞれ上層および下層の主流方向一様流速である。図 2 より、全ての場合において上下層の一様流速がほぼ等しいことを確認できる。

図 3 に各場合における鉛直方向速度変動強度の最大値 $\bar{v}^2_{(\max)}$ の主流方向分布を示す。ただし、 $\bar{v}^2$ は上下層の速度差 $\Delta\bar{U}$ の 2 乗で無次元化されている。図 3 より、格子を設置しなかった場合 (Run I) には、鉛直方向速度変動強度が $x/M \leq 8$ の領域では急速に減衰するのに対して $x/M \geq 8$ の領域では緩やかに減衰することがわかる。よって、本実験で形成された混合層流は、 $x/M \leq 8$ の領域では遷移 (発達) 中であるのに対して、 $x/M \geq 8$ の領域では発達していると考えられる。一方、格子を設置した場合には、格子の直後では格子により生成された乱れにより速度変動が大きく増大するものの、ある程度下流域では、格子を設置した場合の方が格子を設置しなかった場合より速度変動が小さく、運動エネルギーが減衰している。これらは、格子の直後では運動エネルギーが増大するもののその効果はすぐに消えるのに対して、速度こう配に

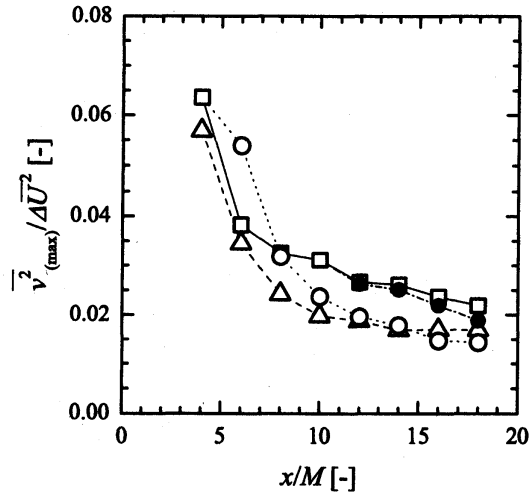


Fig 3: Streamwise distributions of the maximum vertical velocity fluctuation. Symbols as in Fig. 2.

基づいて生成される乱流エネルギーの格子による減少効果は格子の下流域全体にわたることを示している。特に、格子をテストセクション入口部に設置した場合 (Run II) には、測定した全領域で格子を設置しなかった場合 (Run I) より $\overline{v^2}$ が小さい。

3.2 濃度場

図4に、反応を伴わない場合における $x/M = 16$ における A 成分時間平均濃度 $\overline{C}_A$ の鉛直方向分布を示す。ただし、 $\overline{C}_A$ は初期 A 成分濃度 C_{A0} で無次元化されている。図4より、格子を設置しなかった場合 (Run I) には、他の場合に比べて混合層内における平均濃度の鉛直方向こう配が一定でないことがわかる。これは混合層が未発達な場合において見られる現象 [1] であり、流体混合が他の場合に比べて弱いことを示唆している。

図5に反応を伴わない場合の A 成分鉛直方向乱流物質フラックスの最大値 $\overline{vC}_{(max)}$ の主流方向分布を示す。ただし、図5中の縦軸は上下層の速度差 $\Delta \bar{U}$ と初期 A 成分濃度 C_{A0} で無次元化されている。図5より、Run II および Run III では、速度変動と同様に格子の直後では鉛直方向への物質輸送が促進されるものの、下流に進むに従い物質輸送量が急激に低下し、 $x/M = 16$ では Run I を下回ることがわかる。これに対して、 $x/M = 10$ に格子を設置した Run IV の場合の格子の下流における鉛直方向への物質輸送は、他の場合に比べて渦スケールを問わず大きく、またその減衰率は最も低い。これらのことから、格子により速度こう配が緩やかになったことに起因する物質輸送量の減少を抑えるためには、混合層流が発達中で物質輸送量が大きな混合層流の遷移段階ではなく、混合層の発達した下流域に設置する方が良いといえる。

図6に、反応生成物 P の時間平均濃度の最大値 $\overline{C}_{P(max)}$ の主流方向分布を示す。ただし、 $\overline{C}_P$ は初期 A 成分濃度 C_{A0} で無次元化されている。ここで、 $\overline{C}_P$ は、化学反応を伴わない場合の A

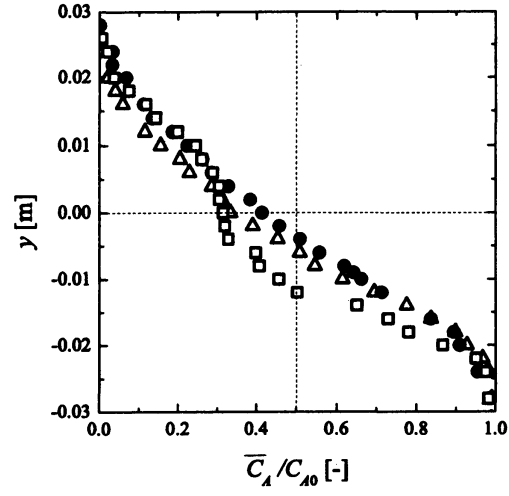


Fig 4: Vertical distributions of the mean concentration of non-reacting species A at $x/M = 16$.
 $\square$, Run I; $\triangle$, Run II; $\circ$, Run III; $\bullet$, Run IV.

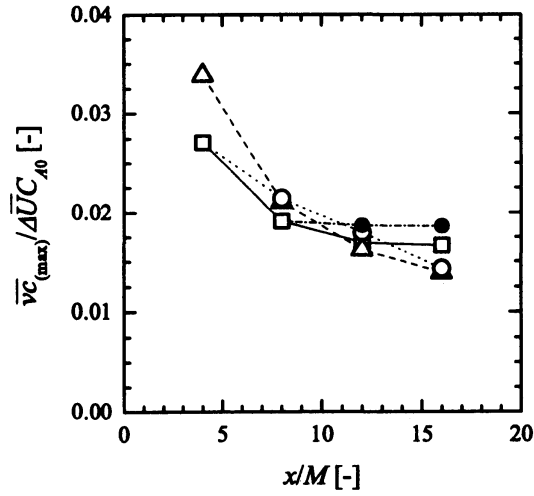


Fig 5: Streamwise distributions of the maximum vertical mass flux of non-reacting species A.
 Symbols as in Fig. 4.

成分時間平均濃度 $\bar{C}_A$ と化学反応を伴う場合の A 成分時間平均濃度 $\bar{C}_A^*$ の差から求められた。

$$\bar{C}_P / C_{A0} = 2 (\bar{C}_A - \bar{C}_A^*) / C_{A0} \quad (2)$$

図 6 より、速度場の結果と同様に、格子を設置した場合 (Runs II, III, IV) の方が格子を設置

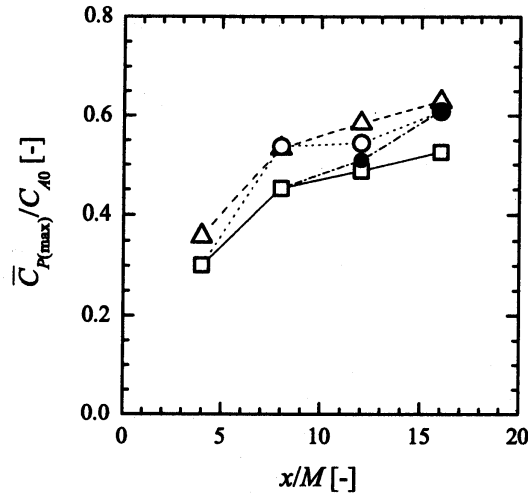


Fig 6: Streamwise distributions of the maximum mean concentration of chemical product P. $\square$, Run I; $\triangle$, Run II; $\circ$, Run III; $\bullet$, Run IV.

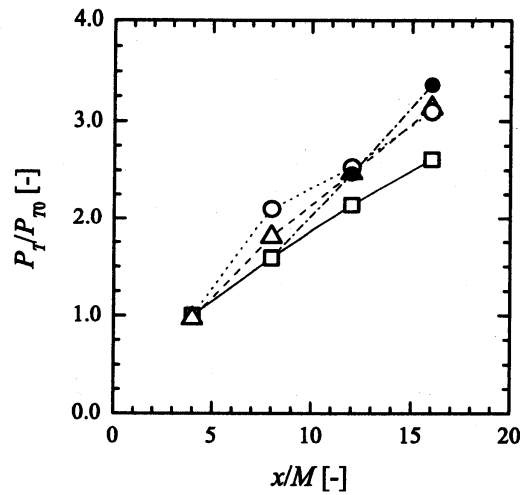


Fig 7: Streamwise distributions of the chemical product flux. $\square$, Run I; $\triangle$, Run II; $\circ$, Run III; $\bullet$, Run IV.

しなかった場合 (Run I) より化学反応が促進されていること、また特に格子の直後において化学反応が大きく促進されることがわかる。

生成された反応生成物を定量的に評価するために、断面反応生成物フラックス P_T

$$P_T = \int \bar{U} \cdot \bar{C}_P dy \quad (3)$$

を算出した。その結果を図7に示す。ただし、 P_T は Run I の場合における $x/M = 4$ での断面反応生成物フラックス P_{T0} で無次元化されている。 $x/M = 4$ における反応生成量は、格子を設置しなかった Run I と格子を $x/M = 0$ に設置した Run II でほぼ等しい。これは、Run II

では格子によって小スケールの乱れが生成されたものの組織渦に起因する運動エネルギーが小さくなったため、結果として反応生成量が Run I と同程度となったと考えられる。一方格子を $x/M = 5$ に設置した Run III では、格子の直後 ($x/M = 8$) では反応生成量が大きく増加するが、下流である $x/M = 16$ では Run II とほぼ等しい。これらに対して、格子を $x/M = 10$ に設置した Run IV では格子の下流で反応生成量が大きく増大し、 $x/M = 16$ における反応生成量は全ての場合の中で最大となる。これは上述したように、Run IV では格子により小スケールの乱れが生成されるだけでなく、せん断応力に起因する組織渦のエネルギーの減衰が小さく物質輸送量が減少しにくいためである。

3.3 結言

液相せん断混合層流中に設置する格子の主流方向位置を変化させて実験を行った結果、以下の知見を得た。

せん断混合層流中に設置した格子は、乱れを生成し混合反応を促進させるが、速度こう配に基づくせん断力に誘起される組織的な渦の運動エネルギーを減少させる。前者の影響は格子の近傍で消滅するが、後者の影響は格子の下流域全体に及ぶ。したがって、混合層流における流体混合反応を格子を用いて促進させる場合には、混合層の遷移段階ではなく、混合層流がある程度発達した段階に格子を設置するのが有効であるといえる。

参考文献

- [1] Ito, Y. and Komori, S., *Trans. JSME. B*, **70**-692 (2004), 921-928.
- [2] Karasso, P. S. and Mungal, M., *J. Fluid Mech.*, **323** (1996), 23-63.
- [3] Slessor, M. D., Bond, C. L., and Dimotakis, P., *J. Fluid Mech.*, **376** (1998), 115-138.
- [4] Ito, Y. and Komori, S., *Trans. JSME. B*, **71**-701 (2005), 15-22.
- [5] Hussain, A. K. M. F., *J. Fluid Mech.*, **173** (1986), 303-356.
- [6] Bernal, L. P. and Roshko, A., *J. Fluid Mech.*, **170** (1986), 499-525.
- [7] Westerweel, J., Fukushima, C., Pedersen, J. M. and Hunt, J. C. R., *Phys. Rev. Lett.*, **95** (2005), 174501.
- [8] Bell, J. and Mehta, R. D., *AIAA J.*, **28**-12 (1990), 2034-2041.
- [9] Bradshaw, P., *J. Fluid Mech.*, **26**-2 (1966), 225-236.
- [10] Rose, W. G., *J. Fluid Mech.*, **44**-4 (1970), 767-779.
- [11] Williamson, C. H. K., *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **28** (1996), 477-539.