

## 超音波照射および浮力対流を伴う乱流混合反応機構の解明

## Turbulent Reacting Flows Under Ultrasonic Irradiation and Unstable Stratification

○伊藤靖仁, 長田孝二, 小森 悟 (京大工)

Yasumasa ITO\*, Kouji NAGATA\* and Satoru KOMORI\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, Kyoto University, Kyoto 606-8501, Japan

The effects of high-frequency ultrasound, mean fluid shear, and unstable stratification on turbulent mixing with a rapid chemical reaction were experimentally investigated in liquid mixing-layer flow downstream of a turbulence-generating grid. The results show that although turbulent mixing is promoted by ultrasonic irradiation, mean fluid shear, and buoyancy convection under unstably stratification, the amount of chemical product in grid-generated turbulence with ultrasonic irradiation or under unstable stratification is much larger than that in the sheared case. It is also found that turbulent mixing under ultrasonic irradiation and unstable stratification can promote turbulent mixing at the smaller scales and under more weakly sheared conditions, compared with the sheared case.

## 1. 緒言

乱流場で乱流混合の影響を受けながら化学反応が進行する現象は、反応装置内の流れの中に数多く見られる。したがって、乱流混合反応を大幅に促進させる手段を提案することは工学的に非常に重要である。我々のこれまでの研究から、反応促進手段として、高周波の超音波を用いる方法が、従来用いられてきた流体間の速度差に基づくシアーを用いる方法よりはるかに有効であることがわかった<sup>1)</sup>。そこで今回は、それらの方法に加えて、不安定温度成層に基づく浮力対流を利用した場合<sup>2)</sup>に対しても実験を行い、いずれの場合が混合反応促進により有効であるかを比較検討した。また、PIVシステムを用いて流動場についても考察を行った。

## 2. 実験装置および測定システム

実験装置の概略を図1に示す。アクリル (PMMA) 製テストセクション (長さ 1.5m, 断面 0.1m × 0.1m) の入口部に乱流格子 (格子間隔  $M = 2.0 \times 10^{-2}$ m, 格子径  $d = 3.0 \times 10^{-3}$ m) を取り付け、テストセクションに主流方向断面平均流速  $\bar{U}_a = 0.125$ m/s で流体を供給することにより、等方性に近い格子乱流場を形成させた。超音波を用いる場合には、無次元化された主流方向距離  $x/M$  が 3.3 ~ 11.5 の領域の上面部および底面部から、周波数 950kHz の超音波を鉛直上下方向に照射した。このとき超音波発振器への電気入力値は 100W に設定した。また、シアーをかけた場合には、上下層の速度差を 0.04m/s に、不安定温度成層をつけた場合には、上下層の温度差を 10°C に設定した。これらの条件下で実験を行うことにより、 $x/M = 14$  での反応を伴わない場合における A (下層流) 成分の鉛直方向の濃度こう配 (濃度分布)、つまり  $0 \leq x/M < 14$  の領域での鉛直方向の乱流拡散量が、超音波を照射した場合、シアーをかけた場合、および不安定温度成層をつけた場合の間で同程度に設定した。

反応を伴わない場合には、上層に蛍光物質であるウラニンを混入させた水を、下層に水道水を流入させた。また反応を伴う場合には、下層に酢酸 (成分 A) の水溶液を、上層に水酸化アンモニウム (成分 B) の水溶液を流入させ、二次の不可逆瞬間反応である中和反応を起こさせた。ただし、この場合にもウラニンの蛍光の PH 依存性を利用してレーザ蛍光法<sup>1,2)</sup>による濃度測定を可能とするために、上下層流中に等量のウラニンを混入させた。流体の主流方向および鉛直方向の瞬間速度  $U, V$  および A 成分の瞬間濃度  $C_A$  の測定には、それぞれレーザドップラ流速計 (LDV) およびレーザ蛍光法<sup>1,2)</sup>を用い、非接触で同時測定した。一方、PIV (Particle Image Velocimetry) システムを用いた流速測定では、レーザ光源として Nd: Yag レーザを用い、CCD カメラ (34 万画素) で 4.5cm × 3.5cm の領域を撮像した。

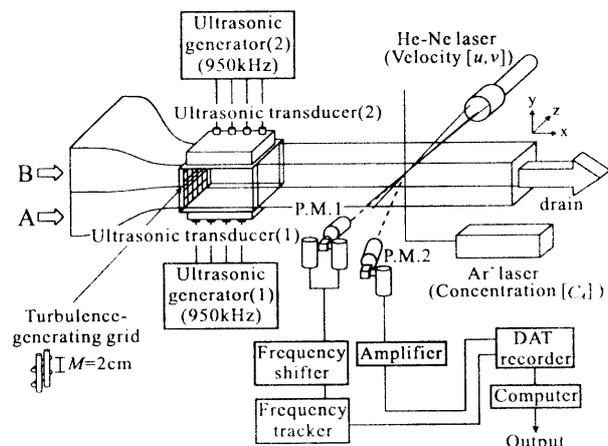


Fig. 1. Schematic of the experimental apparatus.

## 3. 実験結果および考察

$x/M = 14$  における反応を伴わない場合および反応を伴う場合におけるの A 成分の時間平均濃度  $\bar{C}_A^*$  (●),  $\bar{C}_A$  (○), および反応生成物 P の時間平均濃度  $\bar{C}_P$  (—) の鉛直方向分布を図2に示す。図2より、超音波を照射した場合、シアーをかけた場合、および不安定温度成層をつけた場合には、反応を伴わない場合の A 成分の濃度こう配が格子乱流のみの場合に比べて緩やかであることから、乱流混合が促進されていること、また、それらの濃度こう配 (濃度分布) がほぼ等しいことがわかる。しかし、それにもかかわらず、各場合における断面全体での反応生成量には明らかな違いがある。そこで、超音波、シアーおよび不安定温度成層が乱流混合反応に及ぼす影響をより定量的に評価するために、反応生成物濃度を鉛直方向に積分することにより、断面全体での反応生成量  $P_T$  を計算した<sup>1,2)</sup>。 $x/M = 14$  での反応生成量  $P_T(x/M=14)$  を格子乱流のみの場合の反応生成量  $P_{T0}$  で無次元化した結果を図3に示す。図3から、超音波を照射した場合には、格子乱流のみの場合に比べて反応生成量が 1.9 倍になることがわかる。一方、シアーをかけた場合および不安定温度成層をつけた場合には、それぞれ 1.4 倍、1.6 倍となった。

$x/M = 18$  における反応生成物量  $P_T(x/M=18)$  と  $x/M = 14$  における反応生成物量  $P_T(x/M=14)$  の差を取ることで、 $14 \leq x/M < 18$  における反応生成量  $\Delta P_T$  を算出した。その結果を図4に示す。ここで、 $\Delta P_T$  は、前述の  $P_{T0}$  で無次元化されている。図4より、超音波を照射した場合およびシアーをかけた場合における反応生成物量は、格子乱流のみの場合と同程度であるのに対して、不安定温度成層をつけた場合には、

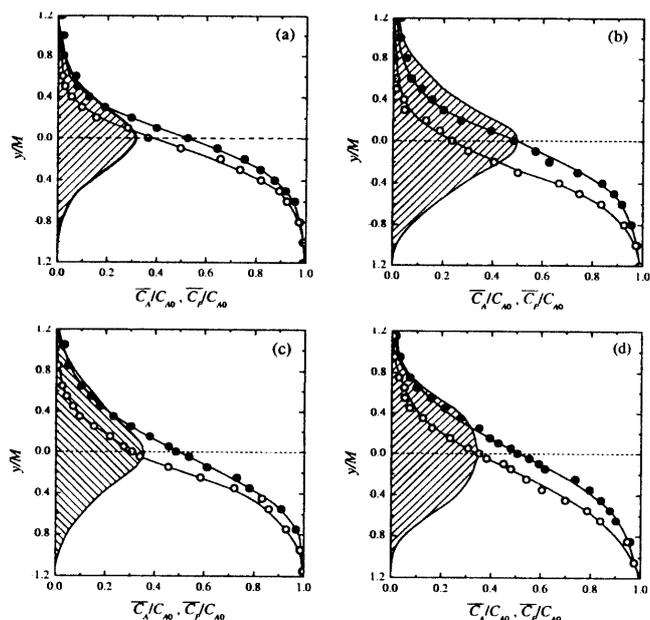


Fig. 2. Vertical distributions of the mean concentrations of species A and product P at  $x/M=14$  in (a) the grid turbulence (GT), (b) the GT with ultrasound, (c) the GT with mean shear, (d) the GT under unstable stratification: ●,  $\bar{C}_A^*/C_{A0}$  in the non-reacting case; ○,  $\bar{C}_A/C_{A0}$  in the reacting case; —,  $\bar{C}_P/C_{A0}$ .

約 2.0 倍の反応生成量が得られる。このことから、不安定温度成層をつけた場合には、 $x/M > 14$  の領域でも乱流混合反応の促進効果が持続するのに対して、超音波を照射した場合には主に照射領域だけで混合反応が促進されること、また、シアーをかけた場合も、 $x/M > 14$  の領域で急激に混合反応の促進効果が弱まるのがわかる。しかし、図を省略するが、 $x/M = 18$  においても、超音波を照射した場合に最も多くの反応生成物量を得た。

図 5 に、 $13.5 \leq x/M \leq 15.5$ ,  $-0.85 \leq y/M \leq 0.85$  の領域におけるスパン ( $z$ ) 方向に対する渦度の分布を示す。シアーをかけた場合には、 $y/M = 0$  付近において大きな速度こう配が存在するため、渦度の絶対値が大きい。それに対して、超音波を照射した場合および不安定温度成層をつけた場合には、渦度の絶対値が小さい。このことから、この領域においては、超音波および不安定温度成層により、低せん断場での乱流混合反応促進が実現されていることがわかる。

4. 結言

格子乱流場に、超音波を照射した場合、速度差に基づくシアーをかけた場合、および不安定温度成層をつけた場合における瞬間速度と瞬間濃度を非接触で同時測定した。その結果、乱流混合反応を促進させる方法として超音波を用いる手段が最も有効であること、不安定温度成層の影響は下流に進むに従って顕著に現れること、また、超音波を照射した場合および不安定温度成層をつけた場合には、低せん断場での乱流混合反応促進を実現できる可能性があることが明らかになった。

5. 参考文献

- 1) 伊藤・長田・小森: 機論 (B). 68 (2002) 79.
- 2) Nagata, K. & Komori, S.: *J. Fluid Mech.* 408(2000) 39.

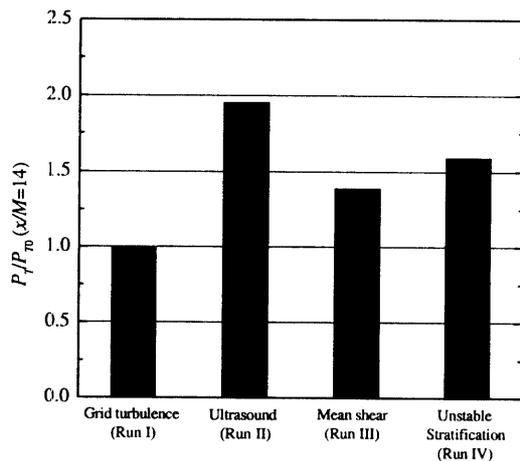


Fig. 3. Comparison of the amount of chemical product at  $x/M=14$ .

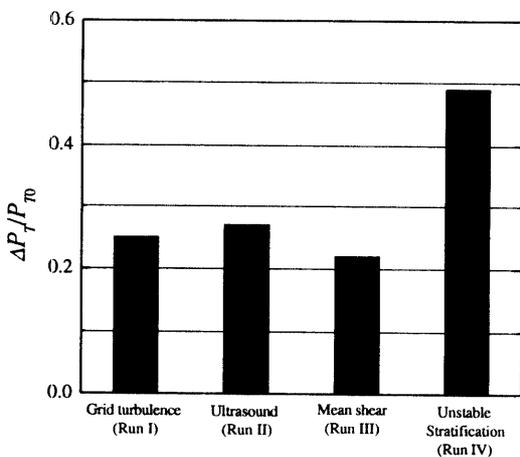


Fig. 4. Comparison of the amount of chemical product produced in the region between  $x/M=14$  and 18.

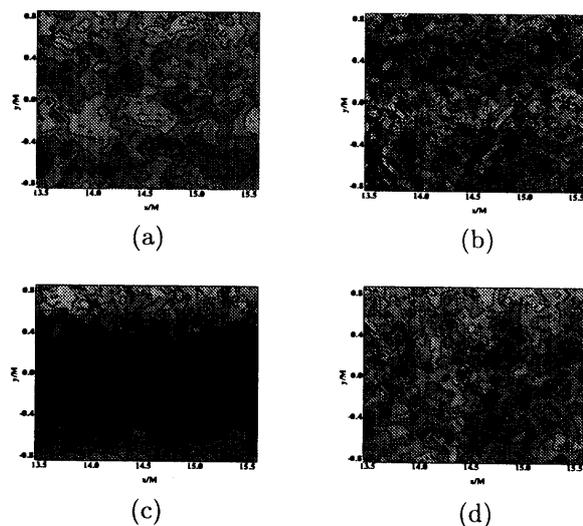


Fig. 5. Spanwise vorticity in the region of  $x/M = 13.5 \sim 15.5$  and  $y/M = -0.85 \sim +0.85$  in (a) the grid turbulence (GT), (b) the GT with ultrasound, (c) the GT with mean shear, (d) the GT under unstable stratification.