

Experimental Study on the Diffusion Field with Second-Order Reaction  
in the Grid-Turbulence of Liquid Phase

酒井康彦 (名大工), 奥山正樹 (中菱エンジニアリング), 本田聡 (名大工)

Yasuhiko SAKAI\*, Masaki OKUYAMA\*\* and Satoshi HONDA\*

\*Dept. of Mech. Eng., Nagoya University, Nagoya, 464-8603, Japan

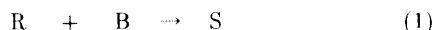
\*\* Churyo Engineering Co., Ltd., Nagoya, 453-0862, Japan

The second-order reactive diffusion field ( $R+B \rightarrow S$ ) in the liquid grid-turbulence has been investigated experimentally. For the three cases of the mesh Reynolds number  $Re_M = 700, 800$  and  $900$ , the concentrations of all the species ( $R, B$  and  $S$ ) have been measured simultaneously by the combined technique of the light absorption spectrometric method and the conserved scalar theory. To make the effect of turbulence clearer, the new nondimensional convection time is suggested, and then the downstream variations of concentration statistics have been considered on the basis of this new convective time. It is found that as  $Re_M$  becomes smaller (as the Damkohler number approaches to 1 more quickly) the effect of turbulence on the chemical reaction becomes larger. The relaxation processes of the concentration p.d.f. (probability density function) for species  $R, B$  and  $S$  have been also examined, and it is shown that the p.d.f. profiles of all the species approach to the Gaussian distribution in the downstream direction.

## 1. 結論

乱流中で物質が拡散、混合し化学反応が起こる現象の解明は工業上重要な課題となっている<sup>1)</sup>。著者ら<sup>2,3)</sup>は先に、基本的問題として液相格子乱流中における二次の反応拡散場をとりあげ、2種類の格子レイノルズ数の反応拡散場に対して、吸光スペクトル法<sup>4)</sup>による濃度測定システムと保存スカラー理論<sup>5)</sup>を利用して反応に関わる全成分の変動瞬時濃度の同時測定を試みた。しかしながら、反応場に関する各種統計量の変化に一貫性が見られず、流動状態と化学反応の関係は依然として不明確であった。

そこで、本研究では、新たに3種類の格子レイノルズ数に対して反応濃度場の測定を行ったので、その結果について報告する。本研究で対象とした化学反応は前報<sup>2,3)</sup>と同様に、その基本性質が Bourne ら<sup>6)</sup>によって良く調べられている次のような連続競争反応である。



ここで、物質  $R$  はモノアゾ染料 (赤色)、物質  $B$  はジアゾベンゼンスルホン酸 (黄色)、物質  $S$  はジアゾ染料 (赤紫色) である。

## 2. 実験装置と実験条件

図1に実験装置と座標系を示す。測定部の断面は6 cm 四方で高さは60 cm となっている。座標は、ノズル出口位置における正方形断面の重心を原点とし、流れ方向を  $x$ 、それと垂直に  $y, z$  軸をとった。

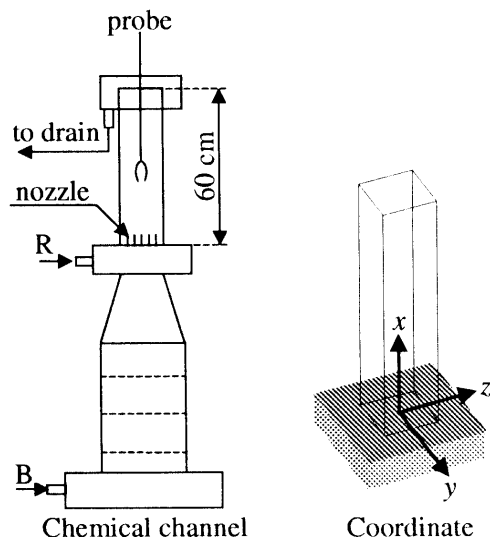


Fig.1: Experimental apparatus and Coordinate system.

実験はメッシュレイノルズ数  $Re_M = UM/\nu$  を  $700, 800, 900$  の3種類とし、主流に物質  $B$  を含ませ、物質  $R$  をノズルから噴出させた。メッシュ幅  $M$  は  $10 \text{ mm}$  である。主流物質の初期濃度  $\Gamma_{B0}$  は  $0.2 \text{ mol/m}^3$ 、ブルーム物質の初期濃度  $\Gamma_{R0}$  は

$10 \text{ mol/m}^3$  とした。ブルーム噴出速度は主流の1.5倍で、流量は主流の1/60倍である。測定位置は  $y = 0, z = 0$  上の流れ方向で水温は約  $13^\circ\text{C}$  で行った。Bourne らによると  $\text{pH}=10$  のとき反応速度は最大となるため、ブルーム物質には  $\text{pH}$  を10に保つよう  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  と  $\text{NaHCO}_3$  のアルカリ緩衝塩 (各  $180 \text{ mol/m}^3$ ) を含ませた。

## 3. 実験結果

## 3.1 乱流強度の減衰

図2に流れ方向に対する乱流相対強度  $u'/U$  ( $u'$ : 主流方向変動速度 r.m.s. 値,  $U$ : 主流方向平均速度) の減衰特性を示す。図より、 $Re_M$  の小さい方が測定部全体に渡って大きな値をとることがわかる。

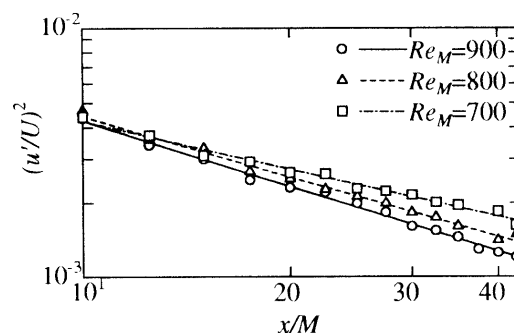


Fig.2: Downstream variations of intensity of turbulence.

## 3.2 無次元対流時間の導入

乱れによる化学反応の影響を明らかにするため、ここでは次式で定義される無次元対流時間  $\xi$  を導入する。

$$\xi = \int_{x_0}^x \frac{dx/U}{k/\varepsilon} = \int_{x_0}^x \frac{\varepsilon}{Uk} dx \quad (2)$$

ここで、

$$k = \frac{3}{2} u'^2, \quad (3)$$

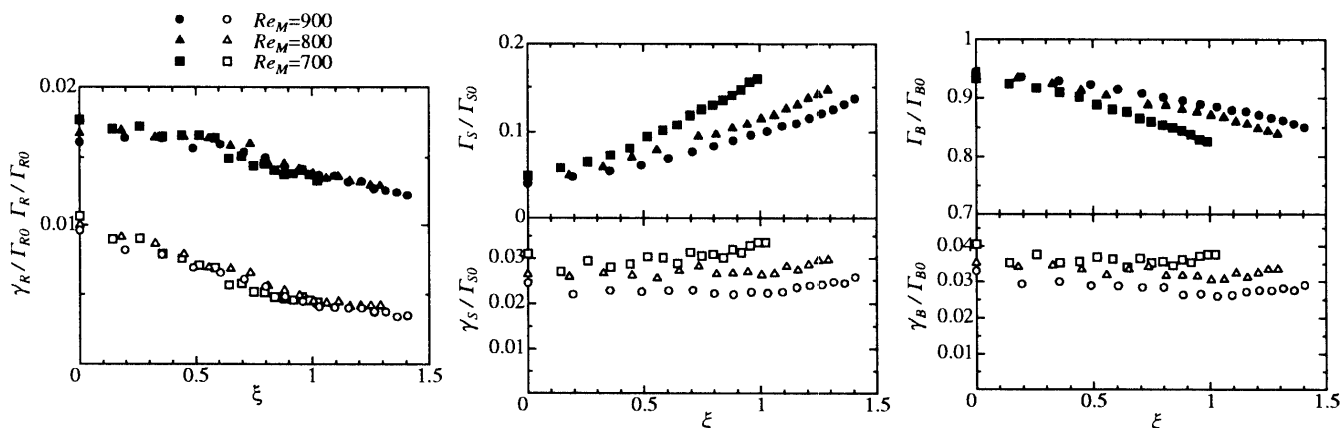
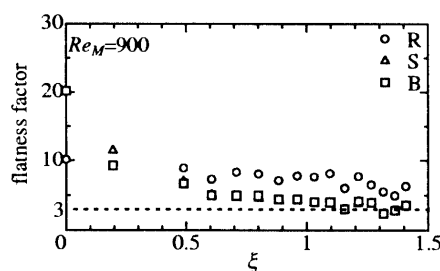
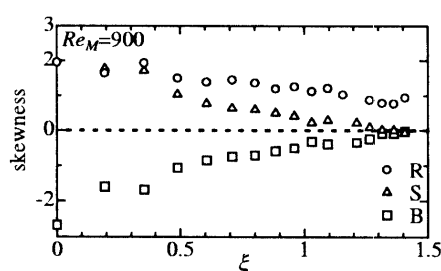
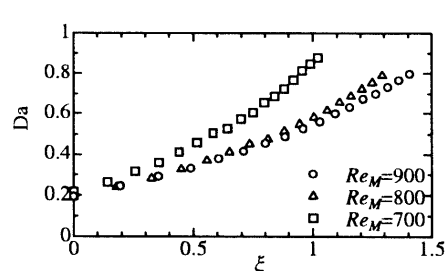
$$\varepsilon = -U \frac{dk}{dx}. \quad (4)$$

各  $Re_M$  に対する  $\xi$  の表現は以下の通りである。

$$Re_M = 900 \quad \xi = 0.874 \left( \ln \frac{x}{M} - \ln 10 \right) \quad (5)$$

$$Re_M = 800 \quad \xi = 0.802 \left( \ln \frac{x}{M} - \ln 10 \right) \quad (6)$$

$$Re_M = 700 \quad \xi = 0.635 \left( \ln \frac{x}{M} - \ln 10 \right) \quad (7)$$

Fig.3: The mean concentration and r.m.s. fluctuation of species R, S and B vs. the nondimensional convection time  $\xi$ .Fig.4: Flatness factor vs.  $\xi$ .Fig.5: Skewness vs.  $\xi$ .Fig.6: Damköhler number vs.  $\xi$ .

### 3.3 平均濃度と変動濃度 r.m.s. 値の変化

図3に無次元対流時間に対する物質 R, 物質 S, 物質 B の平均濃度及び変動濃度 r.m.s. 値の変化を示す。生成物質 S の平均濃度は  $Re_M$  の小さい方が無次元対流時間に対する増加率が大きく、変動濃度 r.m.s. 値も大きい値をとった。これは図2に示すように、 $Re_M$  の小さい方が乱流相対強度が流れ場全体に渡って大きな値をとることが一因である。これに対応して、反応物質 B の平均濃度は  $Re_M$  の小さい方が無次元対流時間に対する減少率は大きく、変動濃度 r.m.s. 値も大きい値をとった。また、物質 R の平均濃度は無次元化する際、 $\Gamma_{R0}$  の値が大きいため物質 S, 物質 B のような各  $Re_M$  ごとの明らかな変化は見られないが、注意深く観察すると  $Re_M$  の小さい方が無次元対流時間に対する減少率は大きくなっていることがわかる。一方、変動濃度 r.m.s. 値については、 $Re_M$  による違いは明確でなく、どの  $Re_M$  に対しても無次元対流時間に対し同様に減少していく。

以上のことから、今回の場合、 $Re_M$  の小さい方が乱れによる化学反応の影響をより強く受けていることがわかった。

### 3.4 平坦度と歪み度の変化

物質 R, 物質 S, 物質 B の濃度確率密度関数 (p.d.f.) の性質を調べるため、図4、図5に  $Re_M=900$  における無次元対流時間に対する平坦度 (flatness factor) と歪み度 (skewness) の値を示す。平坦度とは、p.d.f. の4次のモーメントを2次のモーメントで正規化したものとして表され、p.d.f. の広がりに関する情報を与える。また、歪み度とは、p.d.f. の3次のモーメントを2次のモーメントで正規化したものとして表され、p.d.f. の対称性に関する情報を与える。図より平坦度はどの物質についても、無次元対流時間に対し一定値3へ近づき、歪み度は物質 R, 物質 S に対して正の値から0へ、物質 B については負の値から0へ近づいていく様子がわかる。以上のことと p.d.f. 分布の実際の形 (紙面の制約のため、ここでは、図に示されてない) から判断して、物質3成分の濃度 p.d.f. は無次元対流時間に対しガウス分布へ近づいていくと言える。

### 3.5 ダムケラー数の変化

化学反応と乱流混合の相互関係を示すためのパラメータとして、ダムケラー数 (Damköhler) がある。ダムケラー数は、流体運動の特性時間スケールと化学反応の特性時間スケールの比を表し、特性時間スケールの選び方により、その表現が異なったものとなる<sup>1)</sup>。本研究では、次式で定義される局所的なダムケラー数を採用した。

$$Da = \frac{k/\varepsilon}{1/\kappa\sqrt{\Gamma_R\Gamma_B}} = \frac{k}{\varepsilon}\kappa\sqrt{\Gamma_R\Gamma_B} \quad (8)$$

ここで、 $\kappa$  は反応速度定数である。ダムケラー数の値が1に近くなると、乱流混合の化学反応に及ぼす影響が最も興味深いものとなると考えられる。図6に無次元対流時間に対する各  $Re_M$  のダムケラー数の値の変化を示す。図より、ダムケラー数はどの  $Re_M$  も無次元対流時間に対し1に近づいていき、 $Re_M$  の小さい方がその増加率は大きいことがわかる。以上のダムケラー数の結果からも、 $Re_M$  の小さい方が乱れによる化学反応の影響を強く受けていると考えられる。

## 4. 結論

- 3種類の  $Re_M = 700, 800, 900$  の格子乱流中に対して、無次元化対流時間による濃度の評価を行った結果、 $Re_M$  の小さい方が乱れによる化学反応の影響をより強く受けていることがわかった。
- 反応に関与する全成分の濃度 p.d.f. は下流にいくに従い、ガウス分布に近づいていく。
- 各  $Re_M$  のダムケラー数は、無次元対流時間に対し1に近づいていき、 $Re_M$  の小さい方がその増加率は大きいことがわかった。

## 引用文献

- 小森悟:「流体力学の世界」第6章, 日本流体力学会編, 朝倉書店 (1990), 140-168.
- Sakai, Y., Okuyama, M., Nunami, K. & Kushida, T.: *Proc. of the First International Symp. on Adv. Fluid Inf. (AFI-2001)*, 663-668.
- 酒井康彦, 奥山正樹, 櫛田武広: 第51回理論応用力学講演会講演論文集 NCTAM2002 (2002), 287-288.
- 酒井康彦, 中村育雄, 角田博之, 櫛田武広: 日本機械学会論文集中 (B編), 56巻, 522号 (1990), 260-264.
- Bilger, R.W., Saretan, L.R. & Krishnamoorthy, L.V.: *J. Fluid Mech.*, **233** (1991), 211-242.
- Bourne, J.R., Hilber, C. & Tovstira, G.: *Chem. Eng. Commun.* **37** (1985), 293-314.