

液相乱流中の化学物質拡散における物質濃度確率分布に関する実験的研究

Experimental study on the probability distribution of chemical concentrations in liquid-phase turbulent flows

名古屋大学 助教 岩野耕治

(研究計画ないし研究手法の概略)

はじめに

現在、海洋乱流中の有害化学物質の拡散予測には CFD (数値流体力学) が広く用いられている。CFD では空間を有限個の格子に分割し、流速場と物質濃度場を数値的に解く。その際、格子より小さなスケールの濃度は均一であると考えられる。しかしながら、液相では物質の分子拡散係数が小さいため、実際は格子サイズ以下の小スケールに局所的に非常に高い濃度の化学物質の塊が存在する。この高濃度領域がどのような確率分布で存在するかは、環境アセスメントの観点から極めて重要な情報であるが、未だによくわかっていない。そこで、本研究は水路実験により液相乱流中での物質拡散の変動濃度の確率分布の特性を明らかにすることを旨とする。

研究手法の概略

実験装置の概略図を図 1 に示す。実験では、水槽の中に正方ダクトを設置し、ダクト内に水を流すことにより格子乱流を生成した。格子によって生成される乱流は、統計的に一様かつ等方となることが知られており、乱流の持つ本質的な特徴以外を排除することができるため、乱流の理論的な研究と比較するためにしばしば用いられる。水槽は、長さ 1,580 mm、高さ 450 mm、幅 425 mm であり上部は大気に解放されている。正方ダクトの断面積は 150 mm×150 mm である。水はヘッドタンクを利用し一定流量でダクト内に供給した。正方ダクトの最上流部には biplane 型の乱流格子が設置されており、格子棒の間隔 M は 40 mm、格子棒 (中空角柱) の 1 辺の長さ t は 7.5 mm である。蛍光染料 ($Sc \approx 3,300$) を溶かした溶液を、格子棒に空けられた 16 個の穴 (直径 $d = 1$ mm) から主流に注入した。溶液注入量は注入穴での断面平均流速が主流速度 U_0 の 1.5 倍となるように設定した。ダクトの出口断面中心における染料濃度変動を光ファイバ型 LIF プロブにより連

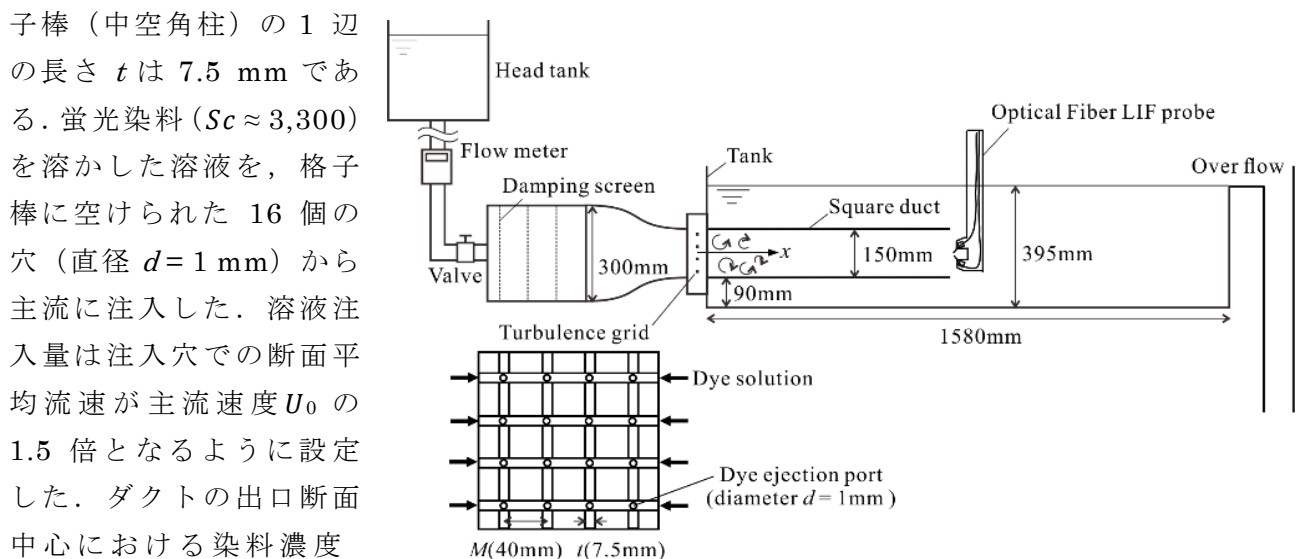


図 1. 実験装置の概略図

続して測定する。

続的に測定した。このプローブの空間分解能は $3 \mu\text{m}$ であり、従来手法の数十倍の高分解能を有するものである。格子からの距離が異なる複数点で測定することで、拡散にともない変動濃度の確率分布がどのように変化していくかを調査した。さらに、レイノルズ数 (= 乱流の強さ) の影響も調べるために、主流流速の大きさが 2 通りの場合で実験を行った。

(実験調査によって得られた新しい知見)

1. 変動濃度の確率密度関数

図 2 に瞬時濃度 c の確率密度関数の下流方向に対する変化を示す。図の横軸は瞬時濃度 c を平均濃度 C で無次元化したもの c/C 、縦軸は確率密度関数 $P(c/C)$ である。 $Re_M=5,000$ と $Re_M=10,000$ のどちらの場合も、下流に行くに従い混合が進むため PDF の幅が狭まり、 $c/C=1$ となる確率が高くなっていることがわかる。これは、染料が下流に流されていく間に混合が進んでいき、空間的に均一な濃度場に近づいて行っていることを意味する。最も上流の位置では、平均濃度の 10 倍以上の非常に高い濃度が検出されていることがわかる。その後、高濃度が検出される確率は急速に低下し、下流では確率密度関数の形状の変化は小さくなっていることがわかる。また、 $Re_M=10,000$ の方が $Re_M=5,000$ と比べて混合が進行するスピードが速く、高濃度の検出される確率が小さくなっている。これは、乱流の強度が強い方が、小スケールの渦を多く含むため、その効果が混合速度を高めたものと考えられる。

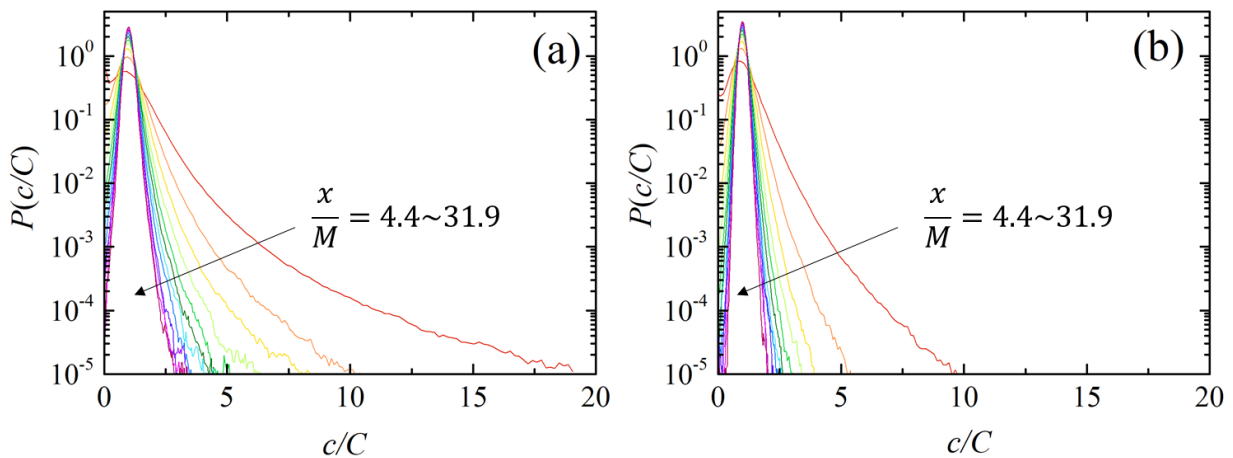


図 2. 瞬時濃度の確率密度関数 (片対数表示). (a) $Re_M=5,000$, (b) $Re_M=10,000$.

図 3 に、rms 値で無次元化された変動濃度 c' ($=c-C$) の確率密度関数 (PDF) を方対数表示で示す。図には、ガウス分布を点線で示してある。図より、いずれの測定位置においても、PDF はガウス分布から大きく外れていることがわかる。特に $c' > 0$ の領域に重いテール (裾) を持っており、濃度変動 rms 値 (= 平均的な変動幅) の 20 倍の変動濃度も一定の確率で検出されていることがわかる。テールは下流に行くに従い減少していくことがわかる。また、レイノルズ数が低い場合の方がテールの減少が早いことも見て取れる。さらに、いずれの格子レイノルズ数においても、下流に行くほど、テールは指数関数型の分布 (= 方対数グラフで直線となる分布) に近づいていっているように見える。格子乱流場で温度変動 ($Pr \sim 0.7$)

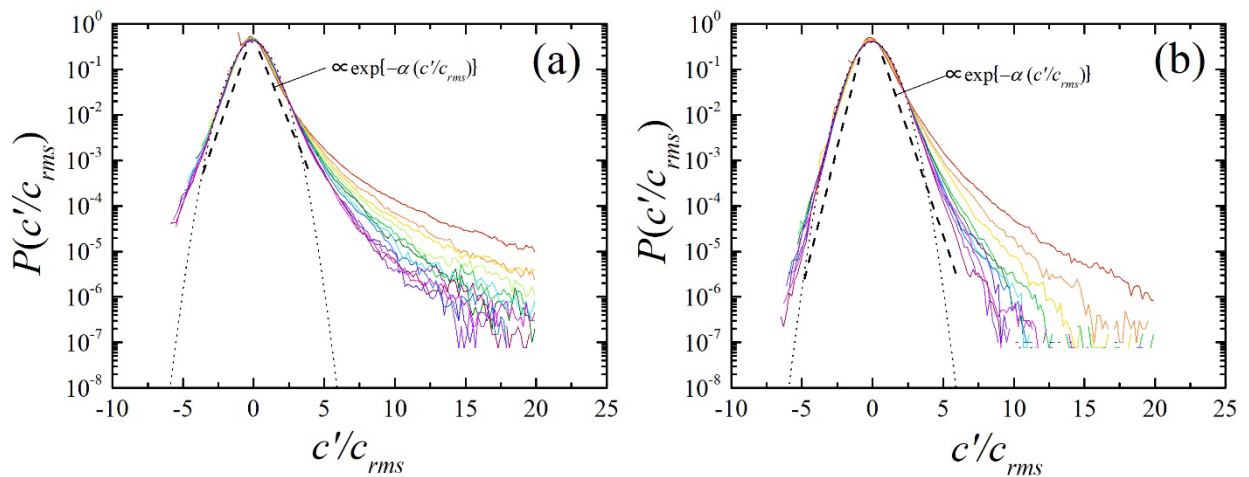


図 3. 変動濃度の確率密度関数（片対数表示）. (a) $Re_M=5000$, (b) $Re_M=10000$.

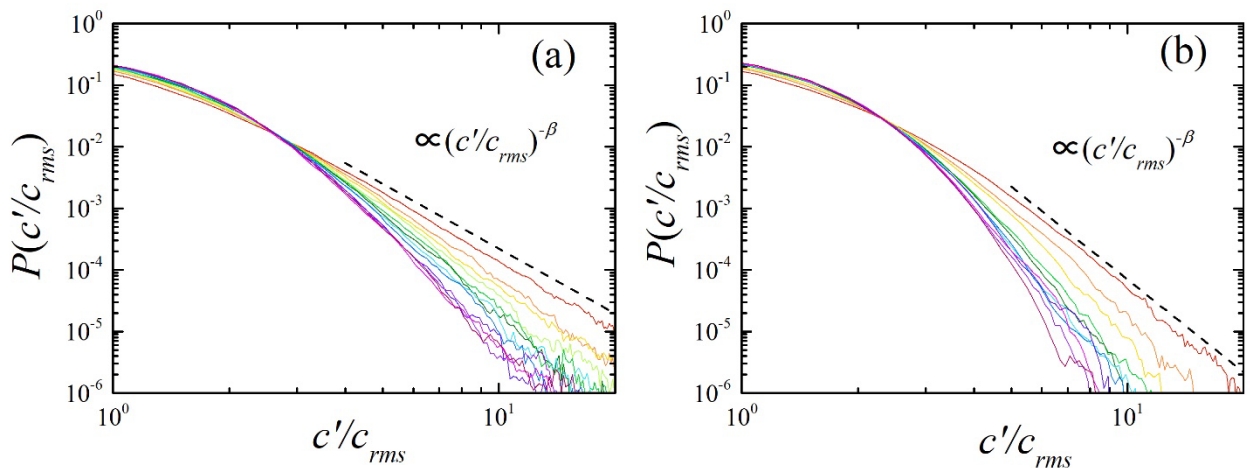


図 4. 変動濃度の確率密度関数（両対数表示）. (a) $Re_M=5000$, (b) $Re_M=10000$.

を調べた風洞実験では、ガウス分布や⁽¹⁾、ガウス分布よりも急峻な減衰⁽²⁾が確認されている。これに対し、Duplat & Villiermaux (2008)⁽³⁾は液相の円管内流れにおける蛍光染料の混合において、PDF が指数関数型なテールを持つガンマ分布になることを観察している。これらのことから、指数関数型なテールは高シュミット数の場合に特徴的に現れるものと推測される。

一方、Fereday & Haynes (2004)⁽⁴⁾は、大スケールの速度変動と大スケールのスカラ変動を含まないカオス混合では、スカラ変動の PDF はべき乗型（両対数グラフで直線となる分布）のテールを持つと予想した。図 4 は、図 3 を両対数グラフで再表示したものであるが、いずれの格子レイノルズ数においても上流での PDF にはべき乗で減衰する正のテールが確認できる。格子近くではコルモゴロフスケール程度に濃度変動のパワーが集中するため、大スケールの濃度変動が PDF に及ぼす影響は小さい。このため、カオス混合理論に対する予測が本実験結果とも整合したものと考えられる。

2. 変動濃度勾配の確率密度関数

図 5 に rms 値で無次元化された瞬時濃度の主流方向勾配 $\xi = \partial c / \partial x$ の確率密度関数 (PDF) を示す。図は ξ の rms 値 ξ_{rms} で無次元化してある。なお、空間勾配の計算には Taylor の凍結乱流仮説を用いた。図より、濃度勾配は濃度そのものの PDF と比較してレイノルズ数の影響が小さいことがわかる。濃度勾配は、微小スケールの構造を表現する物理量であることから、濃度場の微小スケールの構造はレイノルズ数の影響を受けづらいことが示唆された。

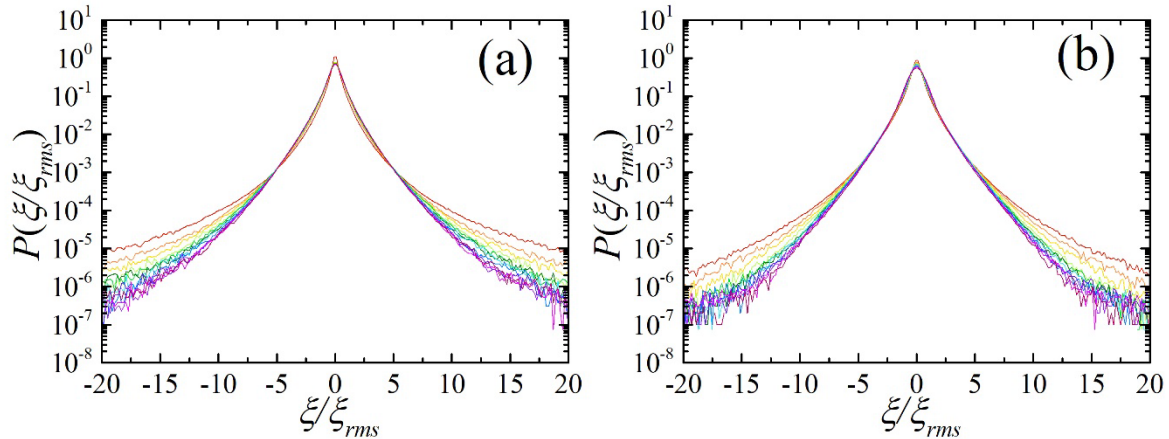


図 5. 変動濃度勾配の確率密度関数. (a) $Re_M=5000$, (b) $Re_M=10000$.

参考文献

- (1) Jayesh and Warhaft, Z, "Probability distribution of a passive scalar in grid-generated turbulence," Phys. Fluids, 67 (1991), pp. 3503-3506.
- (2) Lee, S. K., Benaissa, A., Djenidi, L., Laboie, P. and Antonia, R. A., "Decay of passive-scalar fluctuations in slightly stretched grid turbulence" Exp. Fluids, 53(2012), 909-923.
- (3) Duplat, J. and Villermaux, H., "Mixing by random stirring in confined mixtures," J. Fluid Mech., 617 (2008), pp. 51-86.
- (4) Fereday, D. R. and Haynes, P. H., "Scalar decay in two-dimensional chaotic advection and Batchelor-regime turbulence," Phys. Fluids, 16 (2004), pp. 4359-4370.

(発表論文)

投稿準備中