

研究成果報告書

所属機関	職名	氏名
名古屋大学	助教	岩野 耕治

研究テーマ

液相乱流拡散場における化学物質濃度の確率分布の特性解明

研究報告

1. 研究の背景と目的

現在、海洋乱流中の有害化学物質の拡散予測にはCFD(Computational Fluid Dynamics: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計算格子に分割し、離散化した支配方程式に基づき流速場と物質濃度場の発展を数値的に解く。海洋の流れをCFDで解く際には1つの格子のサイズは数mであり、それよりも小さなスケールの変化は再現できない(Kobayashi et al., 2017, J. Nucl. Sci. Technol.)。そのため、それより小さなスケールでは物質は完全混合し一定の濃度になっていると考える。しかしながら、実際は格子サイズ以下のスケールでの物質濃度は平均濃度の周りを確率的に揺らいでおり、平均濃度よりも格段に高濃度の物質塊も低確率ながら存在する。海洋乱流の小さなスケールでの物質濃度の変動がどのような確率分布に従うかは、環境アセスメントの観点から極めて重要な情報である。従来、乱流場における物質(スカラー)濃度変動の確率分布の研究は、風洞実験で温度変動を測定する手法が主に用いられてきた。多くの結果は気相乱流での温度変動の確率分布は指数関数に従うことを示している(Warhaft, 2000, Annu. Rev. Fluid Mech.)。しかしながら、水中での物質の分子拡散は空気中での温度の分子拡散よりも格段に起こりづらいため、高濃度領域が存在する確率が気相と比べて格段に高いことが予測される。それにも関わらず、今のところ液相乱流中の物質拡散の場合も確率分布は指数関数となることが信じられている。これは液相乱流中での物質濃度を高精度に測定できる計測装置がこれまで存在せず、信頼できる実験データが存在しないことが最も大きな理由である。液相乱流中では、物質の濃度変動の最小スケールは数 μm 程度と極めて小さくなる。そのため、濃度変動の正確な確率分布を得るためには、それと同程度の空間分解能で瞬時濃度をその場計測できる装置が必要となる。従来、そのような計測は困難であると考えられてきた。これに対し、近年、申請者は $3\mu\text{m}$ 以下という世界最高の空間分解能(従来手法の数十倍)で蛍光物質の濃度をその場測定できる画期的な光ファイバ型濃度計測プローブを開発した(Iwano et al., 2021, Exp. Fluids)。本研究は、この超高空間分解能の計測プローブを用いて、液相乱流中での拡散物質の濃度変動を計測し、その確率分布の特性を明らかにすることを目的とする。

2. 研究成果および考察

図1に実験で用いた水路の概略図を示す。水路の上流には乱流を発生させるための格子が設置してある。また、格子には蛍光染料注入用の穴が複数個所に空いており、蛍光染料はその穴を通して乱流に注入された。

図2に瞬時濃度 c の確率密度関数(PDF)の下流方向(=格子からの距離)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。ここで、 Re_M は格子幅と主流速度、及び同粘性係数で定義される格子レイノルズ数である。最も上流の位置では、

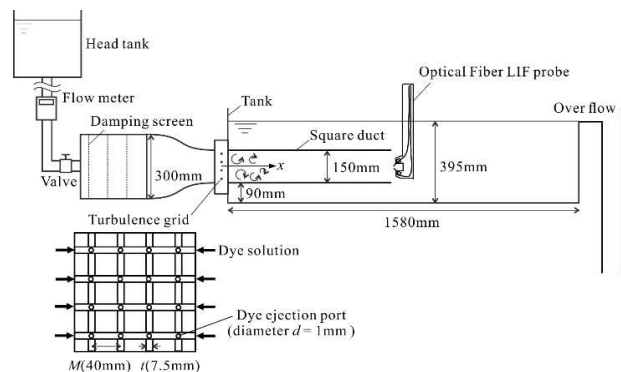


図1 水路実験の概略図

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。また、図 3 より rms 値は下流方向に対してべき乗的に減少していくことがわかる。

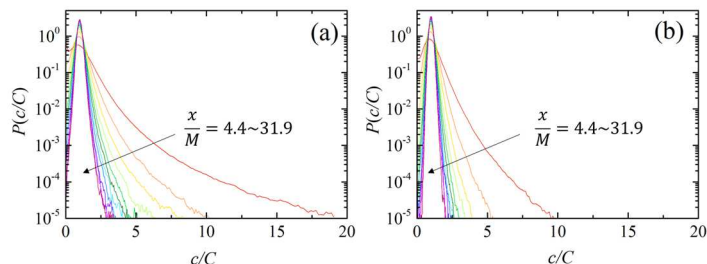


図 2. 変動濃度の確率密度関数 (片対数表示). (a) $Re_M = 5,000$, (b) $Re_M = 10,000$.

図 4 に、rms 値で無次元化された変動濃度 $c' (= c - C)$ の PDF を示す。点線はガウス分布である。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って減少していくことがわかる。また、レイノルズ数が小さ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に近づいていっているように見える。

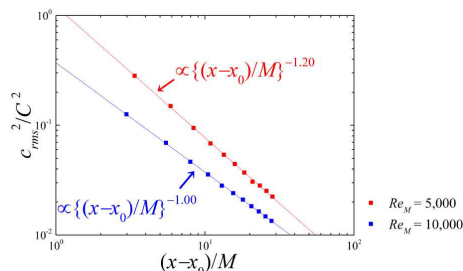


図 3. rms 値の下流方向変化. x_0 は仮想原点を表す。

以上のことから、液相乱流中の物質濃度変動の確率分布は混合が十分に進んでいない場合は、気相中の物質濃度変動とは異なり、非常に高濃度を示すことがあるものの、混合が十分進んだ後には気相の場合と同様に指数関数型に漸近していくものと考えられる。

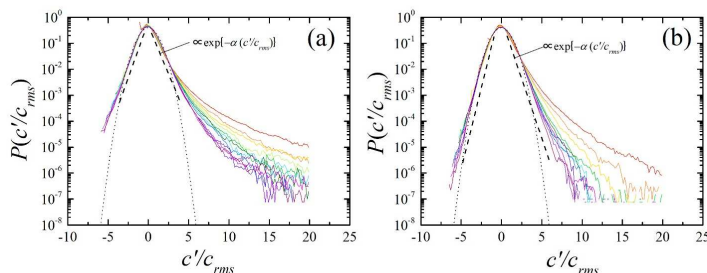


図 4. 変動濃度の確率密度関数 (片対数表示). (a) $Re_M = 5,000$, (b) $Re_M = 10,000$.

図 5 に PDF の変化を数値的に表現するために PDF の歪度と扁平度を示す。図より、歪度と扁平度も rms 値と同様に下流方向に対してべき乗的に減少していくことが明らかとなった。

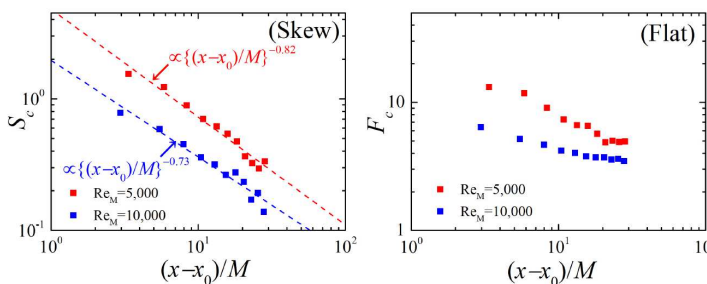


図 5. 下流方向変化に対する変動濃度の確率密度関数の歪度 (Skewness) および扁平度 (Flatness) の変化

3. 将来展望

本研究により、液相の一様等方性乱流中で濃度変動の確率密度関数の形状がどのように変化していくかが明らかとなった。今後は、より自然界の乱流場に近い非一様・非等方性の乱流中で同様の実験を実施することで、実海洋中での化学物質等の拡散予測の精度向上につなげていく予定である。最後に、本研究を行うにあたりご支援をいただいた公益財団法人 八洲環境技術振興財団に深く御礼申し上げます。

4. 研究発表

鈴木迪博, 岩野耕治, 酒井康彦, 伊藤靖仁, 格子乱流場における高シュミット数物質の混合特性に関する実験的研究, 日本機械学会 東海支部 第71期講演会 2022年3月4日