

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03851

研究課題名（和文）高シュミット数物質の乱流混合における微小スケール普遍性の実験的検証

研究課題名（英文）Experimental verification of small-scale universality in turbulent mixing of high Schmidt number scalar

研究代表者

岩野 耕治（Iwano, Koji）

岡山理科大学・工学部・准教授

研究者番号：20750285

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、極めて高い空間分解能と時間分解能で液相中の蛍光染料の濃度変動を測定可能な光ファイバ型濃度計測プローブを用いて、乱流噴流場および格子乱流場における高シュミット数（約3500）物質の濃度変動の微小スケール特性を調査した。その結果、いずれの流れ場においても、初期レイノルズ数が小さいと粘性対流領域における濃度揺らぎスペクトルの勾配が乱流統計理論で予測される値である-1から大きくずれることが明らかになった。一方、粘性拡散領域のスペクトル形状はレイノルズ数や流れ場にかかわらず、全ての実験においてほぼ一致し、普遍性が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流中で高シュミット数物質が混合されると、微小スケールには流れ場によらない普遍的な濃度揺らぎの構造が存在すると乱流統計理論により予測されている。しかし、その予測の正しさはまだ十分に確認されていない。本研究では、世界で初めて微小スケールの濃度揺らぎを実験的に測定し、乱流の状態が物質濃度場の混合状態にどのように影響を与えるかを明らかにした。この成果は、乱流統計理論の改良や、現実の化学反応装置の設計などに用いられるCFDモデルの精度向上に大きく寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the small-scale characteristics of concentration fluctuations of a high Schmidt number (approximately 3500) substance in turbulent jet and grid turbulence fields using a fiber-optic concentration measurement probe capable of measuring fluorescence dye concentration fluctuations in the liquid phase with extremely high spatial and temporal resolution. As a result, it was found that in both flow fields, when the initial Reynolds number is low, the gradient of the concentration fluctuation spectrum in the viscous-convective range deviates significantly from the value of -1 predicted by turbulent statistical theory. On the other hand, the spectral shape in the viscous-diffusive range was found to be nearly consistent across all experiments, regardless of Reynolds number or flow field, confirming its universality.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流物質混合 高シュミット数 LIF濃度計測 微小スケール普遍性 乱流モデル

1. 研究開始当初の背景

液相乱流中で物質が混合されるとき、液体の動粘性係数と物質の拡散係数の比であるシュミット数は数千の大きさとなる。この高シュミット数乱流中では、物質の濃度揺らぎ（濃度ムラ）の最小スケールは、速度揺らぎの最小スケール（最小渦）よりも数桁小さくなる。これら2つのスケールの間には、流れ場の巨視的な構造によらない粘性対流小領域と呼ばれる普遍領域が存在することが乱流統計理論により予想されており、そこでは濃度揺らぎのスペクトルは波数の-1乗の傾きを持つとされている。実際の化学プラント等の反応装置内に存在する高レイノルズ数乱流場では、物質の濃度揺らぎの最小スケールは数 μm まで小さくなり、そこで活発な化学反応が起こる。そのため、微小スケールでの混合状態の評価が生成物の収率予測において重要となるが、今日の CFD では計算格子サイズ以下の濃度揺らぎを、乱流場によらず-1乗のスペクトルを基に推定する乱流モデルが用いられている。しかしながら、-1乗のスペクトルがどんな乱流場に対しても普遍的に成立するのには実はわかっていない。この微小スケールの濃度変動を調べることは、長年、計算コストや計測精度の理由で非常に困難な課題とされてきた。この問題に対して研究代表者は光路長が極めて短い微細レンズを光ファイバの先端に接合し、 $3\mu\text{m}$ 以下という世界最高の空間分解能、数千 kHz の時間分解能で蛍光物質の濃度を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（図1. 岩野他, 可視化情報学会論文集, 2019）。現在、このプローブは乱流中で μm オーダーの微小スケール濃度変動を測定できる世界で唯一の計測装置となっている。

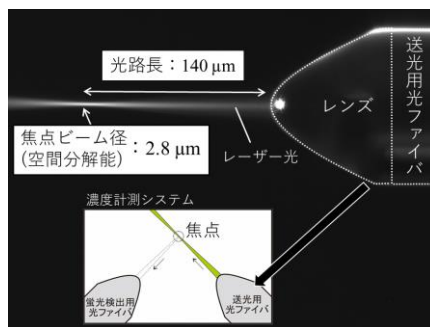


図1. 光ファイバ型濃度計測プローブの顕微鏡写真。焦点からの蛍光強度を同型の光ファイバで検出することにより $3\mu\text{m}$ 以下の空間分解能で濃度計測が可能。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高シュミット数物質の乱流混合において、微小スケールに存在すると予想されている粘性対流小領域の存在とその普遍性を実験的に検証し、乱流モデルを高精度化することである。研究代表者の開発した高性能な濃度計測プローブを用いて異なる巨視的流れ構造を有する乱流混合場で高シュミット数物質の濃度変動をこれまでにない精度で計測し、流れ場の種類が粘性対流小領域以下の微小スケールの濃度揺らぎに及ぼす影響を明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

異なる2種類の乱流場（乱流噴流（図2）、格子乱流（図3））に高シュミット数（約 3500）を持つ蛍光染料を注入し、その濃度変動を上述の光ファイバ型濃度計測プローブを用いて計測する実験を実施した。計測は複数のレイノルズ数、複数の位置で行った。計測により得られた濃度変動の時系列データを計測点における平均流速を用いて空間データに変換し、濃度揺らぎのスペクトルを算出した。

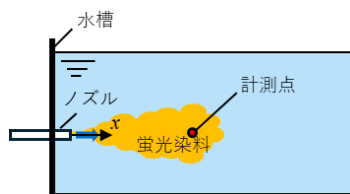


図2. 乱流噴流実験装置

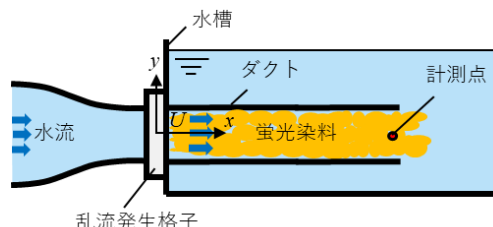


図3. 格子乱流実験装置

4. 研究成果

図4に乱流噴流中で測定された濃度揺らぎパワースペクトルを示す。横軸は流れ方向波数 k_x を濃度変動の最小スケールであるパチェラースケール η_B で無次元化してある。縦軸は揺らぎのパワー E_c であり、動粘性係数 ν 、エネルギー散逸率 ε 、スカラー散逸率

χ , およびバッチェラスケール η_B で無次元化してある. 図より異なるレイノルズ数で測定されたスペクトルが粘性拡散領域(高波数のパワーが曲線的に減少している領域)ではよく重なっていることが分かる. 一方, 粘性対流領域(直線で示されている領域)のスペクトルの勾配にはレイノルズ(Re_d)依存性が見られ, レイノルズ数が小さいほどスペクトルの傾きが -1 (=理論予測値)からずれることが明らかとなった.

図5に格子乱流場で測定された濃度揺らぎスペクトルを示す. 図より乱流発生格子から距離によらず, 測定されたスペクトルが粘性拡散領域ではよく重なっていることが分かる. また, これを軸対称噴流のスペクトルと比較しても良く一致していることが確認できた. 一方, 粘性対流領域では, 初期レイノルズ数(Re_M)が高い場合の方が -1 乗の勾配に比較的近い値を示した. 一方で, 格子から離れる(=局所的なレイノルズ数(Re_λ)が小さくなる)につれても -1 乗に近づくことが分かり, 初期レイノルズ数とは逆の依存性を持つことが明らかとなった. このことから, 濃度揺らぎのスペクトル形状は, 局所の流れ構造のみでなく, 過去にどのように混合が進んできたかという履歴を強く受ける可能性が示唆された. これは低シュミット数の場合(例えばスカラーとして熱を考えた場合等)では確認されていない現象であり, 高シュミット数特有の現象である.

研究期間全体を通して, 光ファイバ型濃度計測プローブが様々な流れ場における高シュミット数物質の濃度変動計測に非常に有効であることが示された. これまで, 実験的に計測することが困難と考えられていた高シュミット数物質混合の最小スケール程度までの濃度変動を世界で初めて正確に捉えることができた. 本研究で得られた実験データは乱流混合理論を実験的に検証する際に極めて重要なものであり, 今後は得られたデータをより詳細に解析することにより, 既往の乱流混合モデルの精度検証と高精度なモデルの開発につながることを期待される.

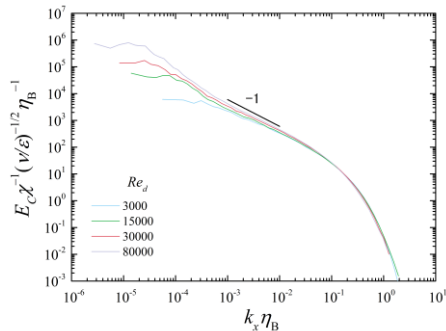


図4. 乱流噴流中の濃度揺らぎスペクトル

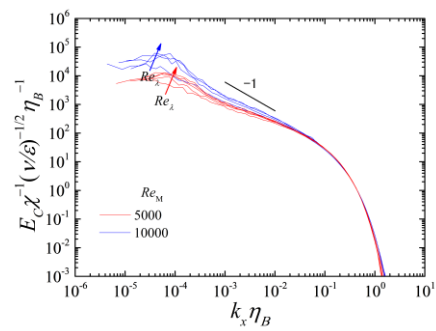


図5. 格子乱流中の濃度揺らぎスペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ito Yasumasa, Hayashi Yusuke, Iwano Koji, Katagiri Takahiro	4. 巻 218
2. 論文標題 Optimisation of initial velocity distribution of jets for entrainment and diffusion control using deep reinforcement learning	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 124788 ~ 124788
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124788	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Wang Muyang, Yurikusa Takuya, Iwano Koji, Sakai Yasuhiko, Ito Yasumasa, Zhou Yi, Hattori Yuji	4. 巻 35
2. 論文標題 Scale-by-scale analysis of interscale scalar transfer in grid turbulence with mean scalar gradient	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 045153 ~ 045153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0145314	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Wang Muyang, Yurikusa Takuya, Sakai Yasuhiko, Iwano Koji, Ito Yasumasa, Zhou Yi, Hattori Yuji	4. 巻 97
2. 論文標題 Interscale transfer of turbulent energy in grid-generated turbulence with low Reynolds numbers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Fluid Flow	6. 最初と最後の頁 109031 ~ 109031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatfluidflow.2022.109031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Iwano Koji, Hosoi Jumpei, Sakai Yasuhiko, Ito Yasumasa	4. 巻 62
2. 論文標題 Power spectrum of high Schmidt number scalar in a turbulent jet at a moderate Reynolds number	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00348-021-03216-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計19件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 岩野耕治
2. 発表標題 超高分解能で流体中の蛍光物質濃度を計測する手法
3. 学会等名 OUSフォーラム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤靖仁, 林祐介 岩野耕治
2. 発表標題 初期流速分布による噴流の混合拡散制御について
3. 学会等名 第37回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩野耕治, 伊藤靖仁
2. 発表標題 軸対称乱流噴流場における粘性対流領域に関する考察
3. 学会等名 日本流体力学学会年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Xingkun Huang, 岩野耕治, 伊藤靖仁
2. 発表標題 Effects of aspect ratio on entrainment of rectangular jet
3. 学会等名 日本流体力学学会年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩野耕治, 福岡大悟, 伊藤靖仁
2. 発表標題 DNSを用いた軸対称乱流噴流拡散場のスカラ濃度変動特性の調査
3. 学会等名 日本機械学会2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤靖仁, 林祐介, 岩野耕治
2. 発表標題 深層強化学習による噴流の混合拡散制御のための初期流速分布最適化
3. 学会等名 自動車技術会 2023年秋季大会講演
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Muyang Wang, Takuya Yurikusa, Koji Iwano, Yasuhiko Sakai, Yasumasa Ito
2. 発表標題 Inter-scale Transfer of Energy in Turbulent Mixing Layer
3. 学会等名 20th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Muyang Wang, Takuya Yurikusa, Koji Iwano, Yasuhiko Sakai, Yasumasa Ito
2. 発表標題 Transfer mechanism of a passive scalar in grid turbulence with mean scalar gradient
3. 学会等名 the 10th Interdisciplinary Turbulence Initiative, (IT12023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩野耕治, 鈴木 颯太
2. 発表標題 円柱格子乱流場における高シュミット数物質の混合
3. 学会等名 第31回 日本流体力学会 中四国・九州支部講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福岡大悟, 岩野耕治, 伊藤靖仁
2. 発表標題 DNSを用いた軸対称乱流噴流拡散場のシュミット数依存性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 東海支部 第72期講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林 裕介, 伊藤靖仁, 岩野耕治
2. 発表標題 噴流の混合拡散に対する深層強化学習を用いた初期流速分布最適化
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩野耕治, 酒井康彦, 伊藤靖仁
2. 発表標題 格子乱流場における高シュミット数物質の濃度統計量
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福岡 大悟, 岩野 耕治, 伊藤 靖仁
2. 発表標題 DNSを用いた乱流噴流拡散場におけるスカラ統計量のシュミット数依存性の研究
3. 学会等名 日本機械学会 2022年度 年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Muyang Wang, Takuya Yurikusa, Koji Iwano, Yasuhiko Sakai, Yasumasa Ito
2. 発表標題 Inter-scale transfer of passive scalar in grid turbulence
3. 学会等名 12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP12) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 迪博, 岩野 耕治, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁
2. 発表標題 格子乱流場における高シュミット数物質の微小スケール混合特性に関する実験的研究
3. 学会等名 日本機械学会2021年年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩野 耕治, 鬼頭 憲司, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁
2. 発表標題 平面噴流の乱流・非乱流界面近傍における混合・化学反応に及ぼすシュミット数の影響
3. 学会等名 日本機械学会 第99期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koji Iwano, Michihiro Suzuki, Yasuhiko Sakai, Yasumasa Ito
2. 発表標題 Measurement of High Schmidt Number Scalar Mixing in Grid Generated Turbulence
3. 学会等名 Eighteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koji Iwano, Soma Nagaya, Yasuhiko Sakai, Yasumasa Ito
2. 発表標題 Chemical reaction of high Schmidt number scalars in a turbulent planar wall-jet
3. 学会等名 The 7th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 迪博, 岩野 耕治, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁
2. 発表標題 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
3. 学会等名 機械学会東海支部 第71期講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	酒井 康彦 (Sakai Yasuhiko) (20162274)	公益財団法人名古屋産業科学研究所・研究部・上席研究員 (73905)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	伊藤 靖仁 (Ito Yasumasa) (40346078)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関