

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560212

研究課題名(和文) 反応性液相多成分物質の乱流拡散・混合現象の解明と確率過程モデルに関する研究

研究課題名(英文) Study on turbulent diffusion and mixing phenomena and stochastic modelling of reactive scalars in liquid

研究代表者

久保 貴 (KUBO, Takashi)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：20372534

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高シュミット数が特徴である液相における反応性乱流拡散場の統計的特性を明らかにすることを目的として、吸光スペクトル法による多成分濃度同時測定システムの開発を行った。軸対称乱流噴流中の3成分濃度を同時測定し、その有効性を確かめた。

さらに確率モデルとして、確率密度関数(PDF)法による反応性拡散場のモデリングを行った。平均せん断のない格子乱流中におけるマルチルーム拡散場を対象とした数値計算を行い、その有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：The concentration measurement system of multiple species by the light absorption spectrometric method has been developed to clarify characteristics of turbulent reactive flows in liquid, which is characterized by a high Schmidt number. The validity of this system is confirmed by a simultaneous measurement of concentrations of three species in a turbulent jet. Furthermore, the modeling of turbulent reactive flows is conducted by the probability density function (PDF) method as a stochastic model. The numerical simulation of reactive diffusion field in liquid grid-turbulence is performed, and a validity of simulation is ascertained.

研究分野：工学

キーワード：乱流 拡散 混合 化学反応 確率過程モデル

1. 研究開始当初の背景

乱流中で物質が化学反応しながら拡散・混合する反応性乱流拡散現象は、反応容器や燃焼器などの各種工業装置内の流れや、大気・海洋での汚染物質の拡散など、我々の身のまわりのいたるところに見られ、その現象の解明は工学的に重要であるばかりでなく、気象学、海洋学などの幅広い分野でも緊急の研究課題として注目されている。

このような現象を実験的に明らかにするためには、反応性乱流拡散場の局所において、高空間・高時間分解能で多成分物質の瞬時濃度を同時測定しなければならない。しかしながら多成分物質の瞬時濃度同時測定自体が極めて困難なため、このような研究は非常に少ないのが現状である。また燃焼場と比べて、高シュミット数が特徴である液相における研究は数少ない。

たとえば、液相反応性乱流拡散場において多成分物質の濃度を測定した例は、申請者らの軸対称乱流噴流における3成分濃度の測定や格子乱流中における2成分濃度測定(研究業績欄参照)以外には、京都大学の小森らのグループの研究(Komori et al., *J. Chem. Eng. Japan*, 27, pp. 742-748 (1994) 他)があるのみで他には見られない。

また、化学反応は微小スケールの分子拡散を通して進行するため、現在よりもさらに高空間分解能の濃度測定が求められている。

2. 研究の目的

本研究では上記のようなこれまでの成果をふまえ、より高空間・高時間分解能の多成分濃度測定システムの開発を行い、反応性乱流の微細構造まで明らかにすることを目的とする。

さらに、本研究のような高シュミット数が特徴である液相では、濃度変動の最小スケールであるパチェラスケールが、速度変動の最小スケールでコルモゴロフスケールより小さくなるため、たとえ流れ場のレイノルズ数が小さくても直接数値計算(DNS)を行うことは困難である。

そこで本研究では、これまで得られている格子乱流中のマルチブルームのデータ、および本研究により得られたデータを用いて確率論的なモデルの構築を行う。確率モデルとしては、基礎方程式の化学反応項にモデル化を必要としない確率密度関数(Probability Density Function; PDF)法を用いる。ただし、分子拡散項に対するモデル化が必要となるため、最も基本的なIEM(Interaction by Exchange with the Mean)やLangevinモデルの液相に対する適用性を検討するとともに、新たなモデルの開発を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、上記のように反応性乱流拡散現象を明らかにするために、まず、光ファイバプローブを用いた吸光スペクトル法に

よる、高時間・高空間分解能の多成分濃度同時測定システムの開発を行った。

濃度測定分解能を向上させるために、検査体積を小型化すると光量も減少するため、従来のハロゲンランプでは、高精度な濃度測定は不可能である。

そこで、本研究では図1に示すように、光源としてレーザーダイオードモジュール(LDモジュール)を使用する。LDモジュールの波長として一般的な3つの波長488nm(青色)、532nm(緑色)および635nm(赤色)を選択することにより、市販されている汎用のLDモジュールを使用することができる。これらの3つのLDを用いることにより、3成分の濃度を同時測定することが可能である。

LDモジュールを出た光は光合系により光ファイバに導入され、さらに光ファイバを通して、濃度測定プローブの先端に導かれる。プローブ先端の受感部で多成分物質の濃度に応じて光が減衰する。減衰された光は、反対側の光ファイバを通り、分光系へ導かれる。分光系で、光はそれぞれの波長に分光され、さらに光電子増倍管(PMT)で電圧信号に変換される。最終的にはPCでデータ収集および処理を行う。

さらに、確率モデルとしてPDF法による反応性拡散場のモデリングを行う。まず、平均せん断のない格子乱流中におけるマルチブルーム拡散場(図2)を対象とした数値計算を行う。この拡散場は断面方向に近似的に一樣と見なすことが可能であり、モデル化が必要となる分子拡散モデルの評価に最適である。

本研究ではまず、現在提案されているIEMモデルやCurlのモデルなどを液相反応性乱流に適用し、上記実験と比較することにより、その有効性を検証する。さらに、新たなモデルの開発を検討する。

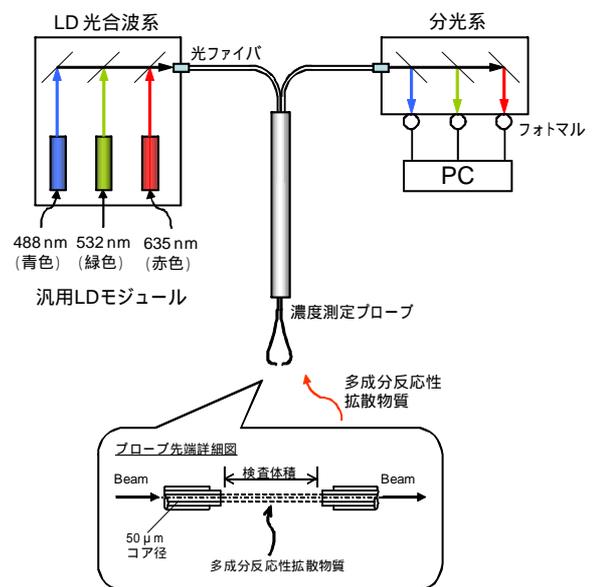


図1. 高空間・高時間分解能多成分濃度測定システム

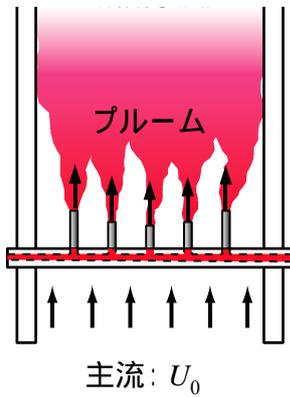


図 2 . 格子乱流中のマルチブルーーム拡散場

4 . 研究成果

本研究で開発した 3 成分濃度同時測定システムの有効性を確かめるために、軸対称乱流噴流拡散場における、濃度同時測定を行った。

用いた噴流の出口径 d は 4.0 mm であり、出口流速 U_0 を約 3.5 m/s と設定して行った。このときの噴流レイノルズ数 $Re = U_0 d/\nu$ は 13 000 である。座標系はノズル出口を原点として、流れ方向に x 軸、流れ方向に対して水平方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とした。本研究では染料の出口濃度をそれぞれ、Acid Blue 9 は 0.3 g/L , Acid Red 27 と Sunset Yellow FCF は 0.6 g/L と設定し、それらを混ぜ合わせ 3 成分混合溶液を作成し、3 成分濃度同時測定を行った。

図 3 に各成分の瞬時濃度波形の例を示す。これらは中心線上 $x/d = 20$ で得られた濃度波形である。縦軸は測定した瞬時濃度を噴流出口濃度で無次元化したもの、横軸は時間 t を表している。図中の青色の線は Acid Blue 9 の結果、赤色の線は Acid Red 27 の結果、黄色の線は Sunset Yellow FCF の結果を表している。この図から、測定された各成分の瞬時濃度波形が一致しており、本研究で開発した 3 成分濃度測定システムにより、3 成分の瞬時濃度を測定できていることが確かめられ

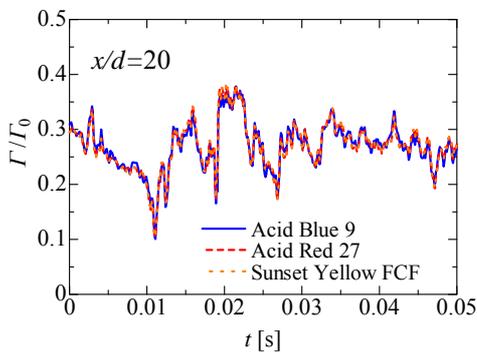


図 3 . 中心軸場における各成分の瞬時濃度波形

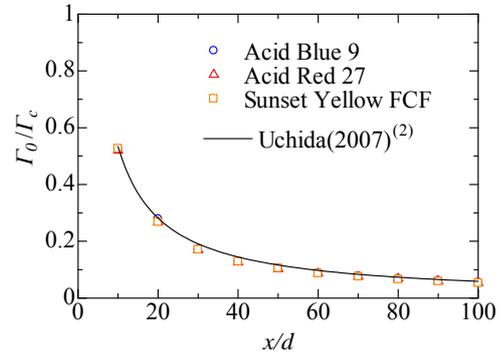


図 4 . 中心軸上における平均濃度の下流方向変化

た。

中心軸上の測定は、10 x/d 100 で行った。図 4 に 3 成分混合溶液に対する Acid Blue 9 と Acid Red 27 , Sunset Yellow FCF の平均濃度の中心軸上の下流方向変化を示す。縦軸は噴流出口濃度 Γ_0 を平均濃度 Γ_c で無次元化したものを表し、横軸はノズル径 d で無次元化したものを表す。図から平均濃度は流れ方向の距離 x/d に反比例していることがわかる。

このように、本研究で開発した 3 成分濃度同時測定システムの有効性が確認された。

次に、基本的な流れ場である液相格子乱流中における近似的に一樣な反応性スカラーの乱流拡散場 (図 2) を対象として、PDF 法により数値計算を行った結果を示す。

対象とした反応性拡散場では、物質 A を含む主流に、格子間隔 M の乱流格子に取り付けられたノズルからマルチブルーーム状に、拡散物質 B が注入され、格子下流に反応物質 A と B および連続競争反応 ($A+B \rightarrow R$, $B+R \rightarrow S$) による生成物 R および S からなる、近似的に一樣な反応性拡散場が形成される。

図 5 に反応濃度場における各物質の平均濃度の下流方向変化を示す。縦軸は各物質の平均濃度を初期濃度 Γ_{A0} および Γ_{B0} で無次元化してある。また、横軸は格子間隔 M で無次元化してある。図中の○印および●印は、それぞれの物質に対する実験値の無反応および反応場の結果を示している。実線および破線は、それぞれ反応場の Curl のモデルおよび修正 Curl モデルの計算結果を表している。図より反応物質である A および B については、実験値と数値計算共に下流に行くにしたがって平均濃度が徐々に減少することがわかる。これは化学反応により反応物質 A と B が消費されるためである。また生成物質 R, S は下流に行くにしたがって第一反応により、R の平均濃度が増加し、その後の第二反応により S が徐々に生成されていることがわかる。

このように、反応濃度場において各物質の平均濃度の下流方向変化より、物質 A と B が消費され、物質 R と S が生成される様子が明らかにされた。

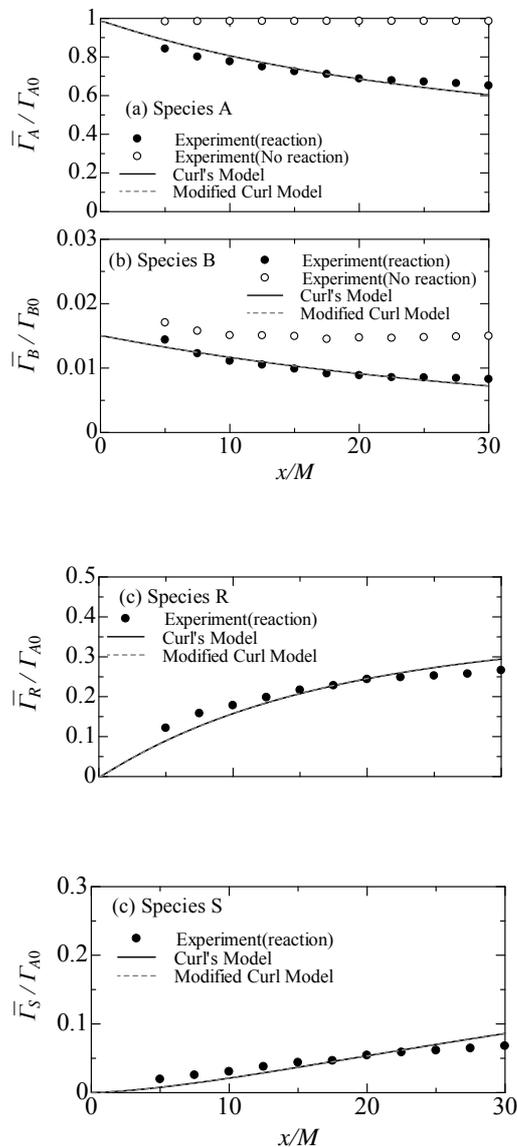


図5．平均濃度の下流方向変化

5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima, T. Kubo, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol. 83, 2015, pp. 768-780.

DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.12.008

渡邊智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 寺島修, 久保貴, 反応性液相二次元噴流中のスカラ散逸率(Conditional Moment Closure 方程式の実験的評価), 日本機械学会論文集(B編), 査読有, 79巻, 2013, pp. 2066-2076.
渡邊智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 寺島修, 久保貴, 化学反応を伴う液相噴流中の条件付統計量, 日本機械学会論文集(B編),

査読有, 79巻, 2013, pp. 2053-2065.

T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima, T. Kubo, Simultaneous measurements of reactive scalar and velocity in a planar liquid jet with a second-order chemical reaction, Experiments in Fluids, 査読有, Vol. 53, 2012, pp. 1369-1383.

DOI: 10.1007/s00348-012-1365-6

[学会発表](計9件)

北山隼平, 久保貴, Couette 流れと干渉する衝突噴流の熱伝達に関する数値的研究(噴流の流入角度が熱伝達へ与える影響), 日本機械学会東海支部第64期総会・講演会, 2015年3月14日, 中部大学(春日井市)

青山雄登, 久保貴, 同軸噴流拡散場の基本特性に関する研究, 日本機械学会2014年度年次大会, 2014年9月8日, 東京電機大学(東京都)

田中大崇, 北山隼平, 久保貴, 感温塗料(TSP)を用いた表面温度分布測定システムの開発, 日本機械学会2014年度年次大会, 2014年9月8日, 東京電機大学(東京都)

北山隼平, 久保貴, Couette 流れと干渉する衝突噴流熱伝達の数値的研究, 日本機械学会2014年度年次大会, 2014年9月8日, 東京電機大学(東京都)

北山隼平, 久保貴, Couette 流れと干渉する衝突噴流熱伝達の数値計算, 日本機械学会東海支部第63期総会講演会, 2014年3月18日, 大同大学(名古屋市)

渡邊智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 寺島修, 久保貴, 化学反応を伴う液相噴流における濃度の条件付統計量に関する研究, 日本機械学会2013年度年次大会, 2013年9月11日, 岡山大学(岡山市)

幸村俊介, 武村盛博, 久保貴, 酒井康彦, 吸光度法による軸対称乱流噴流中での三成分瞬時濃度測定, 日本機械学会2013年度年次大会, 2013年9月11日, 岡山大学(岡山市)

久保田徹, 北山隼平, 久保貴, 寺島修, 感温塗料(TSP)を用いた表面温度測定システムの開発, 日本機械学会2012年度年次大会, 2012年9月10日, 金沢大学(金沢市)

武村盛博, 浅野貴弘, 久保貴, 酒井康彦, 吸光度法による軸対称乱流噴流中での二成分瞬時濃度測定, 日本機械学会2012年度年次大会, 2012年9月10日, 金沢大学(金沢市)

6．研究組織

(1)研究代表者

久保 貴 (KUBO, Takashi)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号: 20372534

(2)連携研究者

酒井 康彦 (SAKAI, Yasuhiko)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：20162274