

機関番号：33919

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760125

研究課題名（和文）液相乱流中の物質拡散・反応過程の解明と確率モデルの構築に関する研究

研究課題名（英文）Study on diffusive-reactive process and stochastic modeling of turbulent reactive flows in liquid

研究代表者

久保 貴（TAKASHI KUBO）

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：20372534

研究成果の概要（和文）：本研究では、液相における反応性乱流拡散場の状態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。さらに、反応性乱流拡散場の確率モデルを構築するために、確率密度関数（PDF）法により格子乱流中におけるマルチブ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. Furthermore, a numerical simulation of reactive diffusion field in liquid grid-turbulence is conducted by the probability density function (PDF) method to construct a stochastic modeling of turbulent reactive flows, and validity of simulation is ascertained.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流，拡散，化学反応，確率モデル

## 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。また燃焼場に比べて、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。

これまで、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、著者らの

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。

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分解能の濃度測定が求められている。本研究はこれまでの成果をふまえ、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しようとするものである。また、このような基礎データをもとに、これまで液相には適用されていない確率モデルの構築を行うものである。

## 2. 研究の目的

本研究では、著者らがこれまで開発してきた吸光スペクトル法による2成分および3成分濃度同時測定を行い、液相における反応性乱流拡散場の状態を明らかにすることを目的として、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う。

さらにこれまで得られている格子乱流中のマルチブルーム拡散場のデータ、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。PDF法では化学反応項が閉じた形で現れ、モデル化の必要がなくなる。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、反応性乱流拡散現象を明らかにするために、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う。さらに、反応性乱流拡散場に有効な確率モデルとして、PDF法によるモデル化を行う。

濃度測定の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 445nm (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。

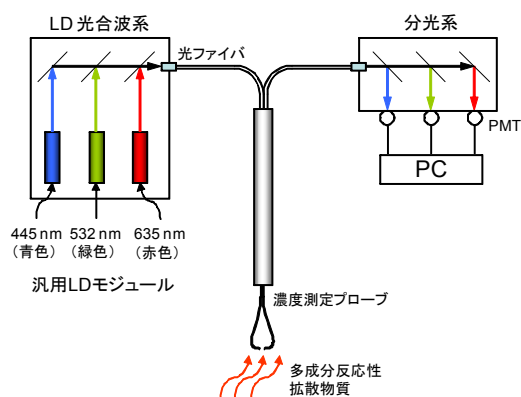


図1. 高空間・高時間分解能多成分濃度測定システム

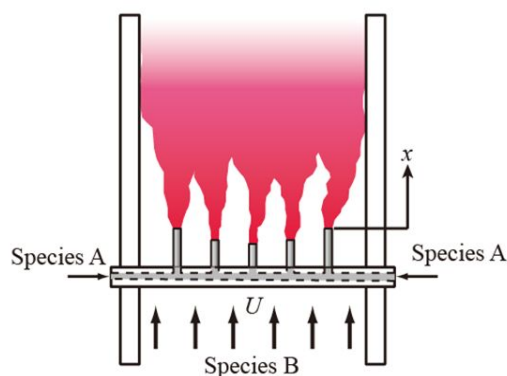


図2. 格子乱流中のマルチブルーム拡散場

LDモジュールを出た光は光合波系により光ファイバーに導入され、さらに光ファイバーを通して、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ーを通り、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。図では3成分までの測定が可能のように、3つの LD が用いられているが、本研究はまず、緑と赤の2つの LD により2成分の濃度測定システムを開発する。

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。

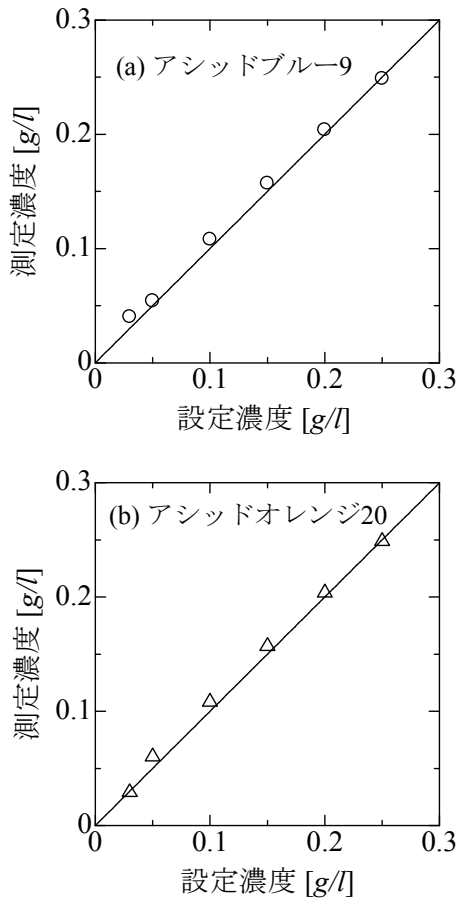


図 3. 濃度測定結果

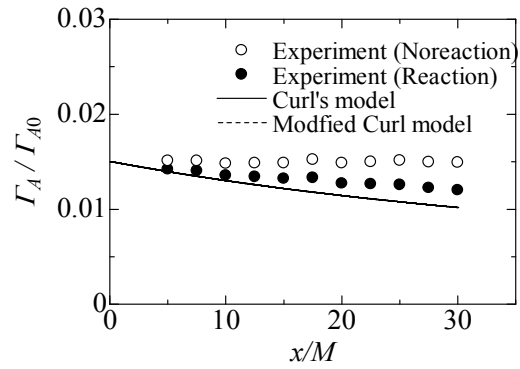
#### 4. 研究成果

本研では、測定対象の染料として、青色のアシッドブルー9 (C. I. Acid Blue 9, C. I. 42090) および赤色のアシッドオレンジ 20 (C. I. Acid Orange 20, C. I. 14600) を選定した。これは、LD の波長付近で吸光度が大きくなるような染料を選んだためである。

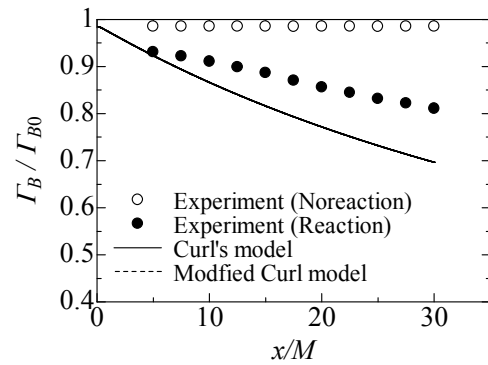
ビーカーにアシッドブルー9 とアシッドオレンジ 20 を等量ずつ (0.03, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 g/l) 溶かし、その濃度を本研究で開発した濃度測定システムで同時測定した。測定結果を図 3 に示す。上の図(a)がアシッドブルー9、下の図(b)がアシッドオレンジ 20 の測定結果を示している。また、図の縦軸は本濃度測定システムで測定した値、横軸は上で設定した濃度であり、図中の実線が真値を表している。図から、アシッドブルー9 とアシッドオレンジ 20 とともに、測定濃度が設定した濃度と一致していることがわかる。なお、測定誤差は平均で約 3%であった。

このように、本研究で開発した 2 成分濃度測定システムの有効性が確認された。今後、実際の流れ場における本濃度測定システムの使用が期待される。

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



(a) 物質 A



(b) 物質 B

図 4. 平均濃度の下流方向変化

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 B 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ルーム状に、拡散物質 A が注入され、格子下流に拡散物質 A と B および二次反応 ( $A + B \rightarrow P$ ) による生成物 P からなる、近似的に一樣な反応性拡散場が形成される。

図 4 に物質 A と B の平均濃度の下流方向変化を示す。縦軸は各物質の初期濃度で、横軸は格子間隔  $M$  で無次元化されている。図中の●印が実験結果を表し、参考のため無反応の場合の実験結果を○印で示した。計算結果は、分子拡散モデルに Curl のモデルを使用した結果を実線で、修正 Curl モデルを破線で示してある。図から、物質 A と B とともに、下流に行くにしたがって化学反応により消費されるため、平均濃度が小さくなることがわかる。計算結果を実験結果と比較すると、計算結果の方が実験よりも平均濃度が小さくなっていることがわかる。この原因の一つとして、使用した反応速度定数の誤差が考えられる。また、格子乱流の発達領域を本計算では上手くモデル化できていないことが考えられる。また、実線の Curl のモデルと破線の修正 Curl モデルの計算結果は重なっており、

平均濃度に関してはモデルによる違いは見られなかった。

今後、反応速度定数の見直しや、発達領域を考慮することにより、計算精度の向上を図りたい。

## 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3件)

- ①酒井康彦, 長田孝二, 久保貴, 市野修平, 堀内健二, 熱線を用いたCO<sub>2</sub>軸対称噴流拡散場の二成分瞬間速度・瞬間濃度の同時計測, 日本機械学会論文集 (B編), 査読有, 77巻, 2011, pp. 486-495.
- ②寺島修, 酒井康彦, 庄司裕一, 小島悠揮, 長田孝二, 久保貴, 日本機械学会論文集 (B編), 査読有, 76巻, 2010, pp. 1831-1840.
- ③久保貴, 福村佳紀, 酒井康彦, 長田孝二, 液相化学反応を伴う二次元噴流に関する研究, 日本機械学会論文集 (B編), 査読有, 76巻, 2010, pp. 57-65.

[学会発表] (計5件)

- ①安原大樹, 酒井康彦, 長田孝二, 寺島修, 久保貴, 二次元噴流中の反応性スカラー拡散の実験的研究, 日本機械学会東海支部第60期総会講演会, 2011年3月14日, 豊橋技術科学大学 (豊橋市)
- ②大塚將訓, 久保貴, 確率密度関数法による液相格子乱流中の反応性スカラー拡散の数値計算, 日本機械学会東海支部第60期総会講演会, 2011年3月14日, 豊橋技術科学大学 (豊橋市)
- ③浅野貴弘, 久保貴, レーザーダイオードを用いた2成分濃度測定システムの開発, 日本機械学会東海支部第60期総会講演会, 2011年3月14日, 豊橋技術科学大学 (豊橋市)
- ④北山隼平, 久保貴, 寺島修, 感温塗料 (TSP) を用いた温度測定システムの開発 (デジタルカメラを用いた表面温度測定) 日本機械学会東海支部第60期総会講演会, 2011年3月14日, 豊橋技術科学大学 (豊橋市)
- ⑤安原大樹, 久保貴, 福村佳紀, 酒井康彦, 長田孝二, 化学反応を伴う二次元液相噴流拡散の実験的研究, 第7回日本流体力学会中部支部講演会, 2009年10月16日, 名古屋工業大学 (名古屋市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

久保 貴 (TAKASHI KUBO)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号: 20372534