

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23656134

研究課題名（和文）

離散スペクトル吸光光度法による光ファイバ型超高分解能多成分変動濃度プローブの開発
 研究課題名（英文） Development of ultra-high-resolution optical-fiber probe for the measurement of fluctuation concentration of multiple species by the discrete light-absorption spectrometric method

研究代表者

酒井 康彦 (SAKAI YASUHIKO)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：20162274

研究成果の概要（和文）：本研究では、離散スペクトル吸光光度法を応用して、高シュミット数が特徴である液相での物質混合・反応場をマイクロスケールのオーダーで解像できる光ファイバ型超高分解能多成分変動濃度プローブの開発を行った。また、二次元噴流での二次の化学反応場での反応物質濃度の測定を行い、反応濃度場の基本的統計量の特性を確認するとともに、確率密度関数法における分子拡散モデルの検証に有効なデータを取得した。さらに、乱流・非乱流界面を検出して、乱流中での反応物質の各種統計量の測定も行い、乱流・非乱流界面近傍で物質混合のメカニズムを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, to investigate the mixing/reactive fields of high-Schmidt number multiple species which are typically observed in the liquid phase, the ultra-high-resolution optical-fiber probe with the resolution of micro-scale order has been developed by the discrete light-absorption spectrometric method. By using this new developed probe, in a turbulent planar liquid jet with a second-order chemical reaction, the concentrations of all chemical species are measured, and the fundamental characteristics of reactive concentration statistics are investigated and the useful data for the examination of the molecular mixing model in the PDF (Probability Density Function) method are provided. Further the interface between the turbulent and non-turbulent region is detected and the various conditional statistics in the turbulent region are measured. From these results, the mechanism of mixing of chemical species near the turbulent/non-turbulent interface is clarified.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,300,000	990,000	4,290,000

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：流体工学，乱流，変動濃度，化学反応，吸光光度法

1. 研究開始当初の背景

乱流拡散場はいわゆる乱流ペクレ数 (Pe_λ) によって、その統計的特性が異なることが知られている。乱流ペクレ数 Pe_λ は次式で定義される。 $Pe_\lambda = (\nu/D) \times Re_\lambda$ 、ここで、 ν は動粘性係数、 D は物質拡散係数あるいは温度拡散係数、 Re_λ は乱流レイノルズ数 $Re_\lambda = u'\lambda/\nu$ (u' : 速度変動 r.m.s. 値、 λ : テイラーマイクロスケール) である。また、 ν/D は対象としている拡散場が物質濃度場の場合は通常シュミット数 Sc と表記される。し

たがって、高ペクレ数流動拡散場は高レイノルズ数乱流で高シュミット数物質拡散の時に実現され、通常、液相乱流中の物質拡散・化学反応場がこれに相当する。このような高ペクレ数流動拡散場すなわち、液相の高レイノルズで高シュミット数拡散場に対しては、その顕著な統計的特性として、理論的に乱流速場場の最小スケールであるコルモゴロフスケール η よりも小さな空間で、粘性対流小領域および粘性拡散小領域と呼ばれる普遍平衡領域が存在することが予想されているこ

とがあげられる。微小領域での濃度の拡散現象を明らかにすることは、工業装置内での乱流拡散場の数値予測法として今後ますます重要となるラージエディシミュレーション (LES) のためのサブグリッドスケールモデル (SGS モデル) の構築や、PDF 法における分子拡散モデルの構築とも関連して極めて重要である。ところが、これまでコルモゴロフスケール η よりも小さな空間での多成分物質濃度変動を検知できる濃度測定技術が確立されていなかったため、微小スケール濃度場の実験的解明は全く行われていないのが現状である。

2. 研究の目的

前章で示された研究背景をもとに、本研究では、離散スペクトル吸光度法を応用して、高レイノルズ数乱流場において微小スケールでの多成分高シュミット数物質拡散場を高精度で測定できる超高分解能多成分変動濃度計測技術の確立を、第一の目的とした。そして、新規に開発した多成分濃度計測システムと高分解能プローブを用いて噴流反応拡散場 (二次の反応場) で反応に関わる全成分の測定を行い、その有効性を、従来の計測システム及びプローブを用いた計測結果と比較することにより確認するとともに、反応拡散場に有効とされている確率密度関数法における分子拡散モデルの検証に有用な各種統計量を取得することを第二の目的とした。さらに、乱流・非乱流界面を検出して、乱流中での反応物質の各種統計量の測定も行い、乱流・非乱流界面での高シュミット数物質混合のメカニズムの解明を目指した。

3. 研究の方法

初年度 (2011年度) は、以下の研究を行った。
 (1) まず、第一段階として、二つの高輝度 LED (波長 520nm にピークを持つ緑色 LED と波長 628nm にピークを持つ赤色 LED) により二成分の濃度測定システムを設計した。今回のシステムでは、集光系を精密に設計することにより、コア径が $10 \mu\text{m}$ のファイバに光を集光できるように設計した。また、光ファイバプローブの検査部の直径を従来の 0.8mm から 0.1mm に小さくすることにより、検査体積を $1/64$ にするように設計した。
 (2) 従来の連続光光源を使用した吸光スペクトル法による濃度計測システムおよびプローブを使用して、二次元乱流噴流での二次の化学反応場実験と濃度場の統計量解析を行った。具体的には単一の二次の化学反応 $A + B \rightarrow R$ を対象とした実験を行った。ここで、A は 1-ナフトール (無色)、B はジアゾベンゼンスルホン酸 (無色)、R はモノアゾ染料 (赤色) であり、物質 B を含む主流中に物質 A を含む水溶液を噴出し

た。さらに、化学反応に無関係な物質である染料 C (青色) を噴流溶液中に加えた。このようにすれば、物質 C の濃度は化学反応の影響を受けない保存スカラーとして扱うことが可能となる。本研究では、染料である物質 R と物質 C を同時測定し、その測定結果と保存スカラー理論より、直接測定できない物質 A、B の瞬時濃度を決定した。測定データより、統計量として、各成分に対する平均濃度場、変動 r. m. s. 値、スペクトル、自己相関などの基本的な量の性質を明らかにした。

二年目 (2012年度) は以下の手順で研究を行った。

(3) 前年度の設計に基づき、二つの高輝度 LED (波長 520nm にピークを持つ緑色 LED と波長 628nm にピークを持つ赤色 LED) を使用して、二成分の濃度同時測定システム (離散吸光スペクトル法による計測システム) を構築した。また、光ファイバプローブについても、前年度の設計に基づき、コア径が $10 \mu\text{m}$ の光ファイバを使用し、またプローブの検査部の直径が 0.1mm ($100 \mu\text{m}$) のものを新規に製作した。

図 1 に、今回製作した濃度計測システムの全体図を示す。

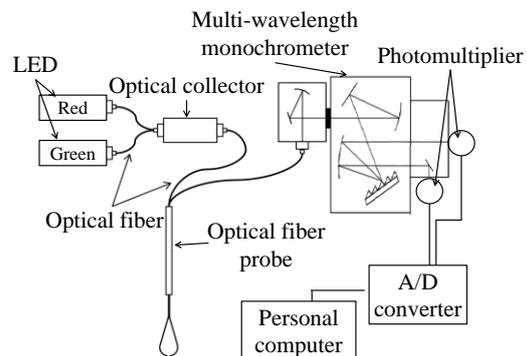


図 1. 新型多成分濃度計測システム全体図

(4) 新システムを使用して、二次元乱流噴流での二次の化学反応場実験を行った。具体的には前年度と同様に、単一の二次の化学反応 $A + B \rightarrow R$ を対象とした実験を行った。物質 B を含む主流中に物質 A を含む水溶液を噴出した。実験は、前年度と同様の手法で行われた。すなわち、化学反応とは無関係な物質 C を噴流に加え、物質 C を保存スカラーとして扱い、物質 R と物質 C を同時測定し、その測定結果と保存スカラー理論より、直接測定できない物質 A、B の瞬時濃度を決定した。今回は、特に物質 C の濃度から得られる混合分率によって条件つけた条件付統計量の分布を詳細に調べた。さらに、従来のプローブと新型プローブを並べ、物質 C の濃

度から得られる混合分率の信号をもとに、乱流・非乱流界面を検出して、乱流中での反応物質の各種統計量の測定も行った。これらのデータは確率密度関数法における分子混合モデルの検証に有用であると考えられる。

4. 研究成果

「3. 研究の方法」(2)については、従来の濃度計測システムおよびプローブを使用して二次元乱流噴流での二次の化学反応場実験を行い、平均濃度場、変動 r. m. s. 値、スペクトルなどの基本的な統計量や保存スカラーにより条件つけた条件付統計量の性質を明らかにした(雑誌論文②, ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩および学会発表③, ④, ⑤, ⑦, ⑧参照)。

次に、「3. 研究の方法」(2)で実験を行った二次元乱流噴流での二次の化学反応場において、「3. 研究の方法」(1), (3)に従い新規に開発した濃度計測システムおよびプローブによる濃度計測を行った。図2に化学反応による生成物質 R の平均濃度 $\langle \Gamma_R \rangle$ および無反応物質の平均濃度 $\langle \Gamma_C \rangle$ の $x/d=20$ (x : 噴流出口を原点とした下流方向位置, d : 噴流ノズル幅)における噴流の広がり方向の分布を示す。ここで, y は噴流中心からの噴流広がり方向距離である。 $\langle \Gamma_R \rangle$ は混合状態が化学量論となるときにの最大濃度 Γ_{R0} で, $\langle \Gamma_C \rangle$ は初期濃度 Γ_{C0} でそれぞれ無次元化されている。

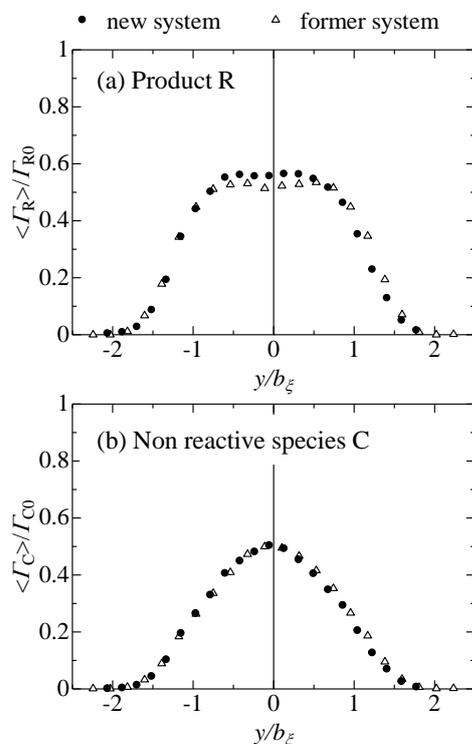


図2. 平均濃度分布の計測結果

る。また、横軸は無反応物質 C の平均濃度の半値幅 b_ξ で無次元化されている。図2より新規に開発した濃度計測システムおよびプローブにより、「3. 研究の方法」(2)で行った実験と同様の平均濃度分布が得られることがわかる。

図3に $x/d=20$, $y/b_\xi=1$ で計測された化学反応による生成物質の濃度変動のパワースペクトル(変動 r. m. s. 値で無次元化)を示す。図3では新規に開発した濃度計測システムにより得られた結果と従来の濃度計測システムによる計測結果が比較されている。それぞれの濃度計測システムにより計測したパワースペクトルの高周波成分($f=1,000$ Hz 付近)を比較すると、新規に開発した濃度計測システムおよびプローブにより得られたスペクトルは従来の濃度計測システムによる計測結果よりも大きい値となっていることがわかる。これは、新規に開発した濃度計測システムおよびプローブの空間分解能が従来のものより向上したことによる結果であり、開発した濃度計測システムおよびプローブにより化学反応場における微小スケール濃度場の計測が可能となったことを表している。

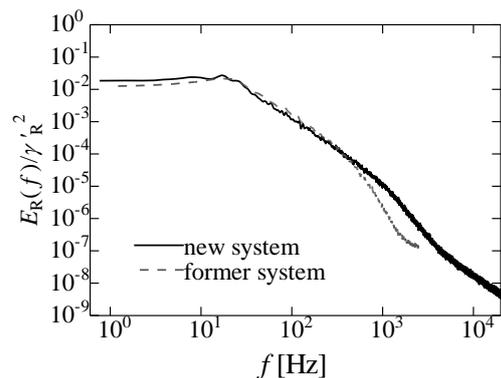


図3. 生成物質濃度変動のパワースペクトル

さらに、従来のプローブと新型プローブを並べ、物質 C の濃度から得られる混合分率の信号をもとに、乱流・非乱流界面を検出して、乱流中での反応物質の各種統計量の測定も行った。乱流・非乱流界面近傍の濃度場の解析には新型プローブにより得られた結果を用いた。乱流・非乱流界面近傍の濃度場の調査には微小スケール濃度場の計測が必要となる。新規に開発した濃度計測システムおよびプローブを用いることで、従来は困難であった乱流・非乱流界面近傍の反応性物質濃度場の計測が可能となった(学会発表②参照)。

こうした計測結果をもとに、確率密度関数法を用いた反応拡散場の数値計算手法の検証も行った(雑誌論文⑩および学会発表①参照)。

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 11 件)

- ① T. Naito, T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima and Y. Ito, Improvement of a Spatial Resolution of Concentration Measurement System Based on the Light Absorption Spectrometric Method, 査読有, Proceedings of the 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 2013, in press.
- ② T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata and O. Terashima, Joint Statistics between Velocity and Reactive Scalar in a Turbulent Liquid Jet with a Chemical Reaction, 査読有, Physica Scripta, 2013, in press.
- ③ T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima, H. Suzuki, T. Hayase and Y. Ito, Visualization of Turbulent Reactive Jet by Using Direct Numerical Simulation, 査読有, International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, 2013, in press.
- ④ T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima, and Y. Ito, Experimental Investigation of Eddy Diffusivity in a Reactive Liquid Jet, 査読有, Proc. of the 14th European Turbulence Conference, 2013, in press.
- ⑤ T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima and Y. Ito, Conditional Statistics of Reactive Concentrations in a Planar Liquid Jet, 査読有, Proc. of the 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 2013, in press.
- ⑥ T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima and 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. 1149-1164.
- ⑦ 渡邊智昭, 酒井康彦, 安原大樹, 長田孝二, 寺島修, 久保貴, 二次反応を伴う液相二次元噴流における速度と反応性スカラー量の同時計測, 日本機械学会論文集 (B 編), 査読有, 2012, 78 巻 788 号, 769-782.
- ⑧ 渡邊智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 寺島修, 反応性乱流拡散場における速度と濃度の結合統計量, 日本機械学会論文集 (B 編),

査読有, 2012, 78 巻 788 号, 783-793.

- ⑨ T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima and Y. Ito, 査読有, Investigation of Eddy Diffusivity in a Reactive Plane Jet by Using Direct Numerical Simulation, 査読有, Proc of the Asia Simulation Conference 2012, 2012, USB.
- ⑩ T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, H. Suzuki, Y. Ito, O. Terashima and T. Hayase, 査読無, Numerical Simulation of a Reactive Liquid Jet by Combination of DNS and PDF method, Proc. of the 9th International Conference on Flow Dynamics, 2012, 102-103.
- ⑪ T. Watanabe, T. Kubo, H. Yasuhara, Y. Sakai, K. Nagata and O. Terashima, Study on Conditional Statistics in Two-Dimensional Liquid Jet with the Reaction, 査読有, Proc. of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, 2011, USB.

[学会発表] (計 8 件)

- ① 渡邊智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 寺島修, 伊藤靖仁, 早瀬敏幸, DNS と PDF 法による反応性二次元噴流の数値計算, 日本機械学会東海支部 第 62 期総会・講演会, 2013 年 03 月 18-19 日, 三重大学 (津市)
- ② T. Naito, T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito and O. Terashima, Study on a High-Schmidt-Number Scalar Diffusion Field in a Reactive Planar Jet, The 4th JUACEP Student Workshop on Engineering and Science at the University of Michigan, 2013 年 02 月 20-23 日, University of Michigan (USA).
- ③ 渡邊智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 寺島修, 伊藤靖仁, 化学反応を伴う液相二次元噴流中の乱流拡散係数と乱流シュミット数, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012 年 09 月 9-12 日, 金沢大学 (金沢市)
- ④ T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima and Y. Ito, Turbulent Mixing in a Planar Liquid Jet with a Second-Order Chemical Reaction, The 1st Nagoya U - U Michigan JUACEP and The 1st Nagoya University - UCLA Student Workshop on Mechanical Engineering and Science, 2012 年 03 月 8-12 日, Michigan University and UCLA (USA).
- ⑤ 渡邊智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 寺島修, 反応性液相二次元噴流における速度と反応性スカラー量の同時測定, 第 9 回日本流体力学会中部支部講演会, 2011 年 11 月 19 日, 豊橋技術科学大学 (豊橋市)

- ⑥ 浅野貴弘, 久保貴, 酒井康彦, 吸光度法を用いた二成分濃度測定システムの開発, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011 年 09 月 11-14 日, 東京工業大学(東京都目黒区)
- ⑦ 渡邊智昭, 酒井康彦, 久保貴, 長田孝二, 寺島修, 二次反応を伴う液相二次元噴流中の条件付統計量に関する研究, 日本流体力学会年会 2011, 2011 年 09 月 7-9 日, 首都大学東京 (八王子市)
- ⑧ T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata and O. Terashima, Turbulent Mixing in the Plane Liquid Jet with the Second-Order Chemical Reaction, International Conference "Turbulent Mixing and Beyond", 2011 年 8 月 21-28 日, Trieste, Italy.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (0 件)
- 取得状況 (0 件)

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 康彦 (SAKAI YASUHIKO)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 20162274

(2) 研究分担者

久保 貴 (KUBO TAKASHI)
名城大学・理工学部・准教授
研究者番号: 20372534

(3) 連携研究者

長田 孝二 (NAGATA KOUJI)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 50274501

寺島 修 (TERAHIMA OSAMU)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 50570751