

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 10 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13868

研究課題名(和文) レーザー吸光光度法による微小スケール多成分変動濃度計の開発と非平衡反応過程の解明

研究課題名(英文) Development of microscale multicomponent concentration measurement device by a laser light absorption spectrometric method and clarification of non-equilibrium chemical reaction process

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、乱流中でコルモゴロフスケール以下の微小スケールの濃度変動を測定するために、対向型光ファイバプローブを用いた多成分変動濃度計の開発を行った。開発された計測プローブの検査領域の大きさは100 μm 以下であり、吸光型濃度計として世界最高レベルの空間分解能を実現した。軸対称噴流における高シュミット数物質拡散場の計測を行った結果、速度変動の最小スケールより小さなスケール(粘性対流小領域)で濃度変動スペクトルの波数に対する減衰指数が-1乗に近づく領域が確認できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new type of optical fiber probe was developed to measure small scale fluctuation of multiple diffusive matters simultaneously in turbulent liquid flows. The size of measurement volume of the probe is 100 μm or less, which is the highest spatial resolution as an absorption type concentration measurement device in the world. Concentration fluctuations of the high Schmidt number diffusing dyes were measured in a liquid axisymmetric jet with the new probe. As a result, in the smaller range than the Kolmogorov micro-scale (i.e., in the viscous-convective subrange), we could observe the trending that the power exponent of the concentration fluctuation spectrum with respect to the wave number approaches -1.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 光ファイバ 濃度計測 乱流 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) 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 は次式で定義される。 $Pe = (vD) \times Re$ 、ここで、 v 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 は乱流レイノルズ数 $Re = u' \lambda / \nu$ (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、 vD は対象としている拡散場が物質濃度場の場合に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場の時に実現され、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数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、理論的に乱流速度場の最小スケールであるコルモゴロフスケールよりも小さな空間で、粘性対流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) の構築や確率密度関数 (Probability Density Function: PDF) 法における分子混合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特性は実験的に全く明らかにされていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究の第一の目的は、コルモゴロフスケール以下の微小空間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システムの開発を行うことである。次に、開発した濃度計を用いて噴流反応拡散場 (二次の反応場) に関わる全成分の測定を行うことにより、その測定精度を検証するとともに、特に、これまで全く不明であった微小スケール非平衡多成分物質拡散・化学反応過程の統計的特性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) レンズ付光ファイバプローブの設計/製作: 光ファイバの先端にレンズ加工された GI (Graded Index) ファイバを融着することで、直径が $20 \mu\text{m}$ と非常に小さいレーザービームを射出することができる光ファイバプローブを製作する。

(2) 対向型光ファイバプローブの製作: 対

向型光ファイバ式濃度計では送光側光ファイバから射出された光が受光側光ファイバに正確に入射することが極めて重要である。そこで、 $1 \mu\text{m}$ 以下の精度を有する超精密微細金属加工技術を用いて、二つの光ファイバを正確な位置に固定するための専用治具を製作する。

(3) 多成分変動濃度測定システムの構築: 波長の異なる 2 種類の汎用の LD (Laser Diode) モジュールから出た光を 1 つの光ファイバへ入射させる LD 合波系、および受光した光を波長ごとに分離し電圧に変換するための分光器とフォトマルを用いて多成分変動濃度を計測するためのシステムを構築する。システムの概略を図 1 に示す。

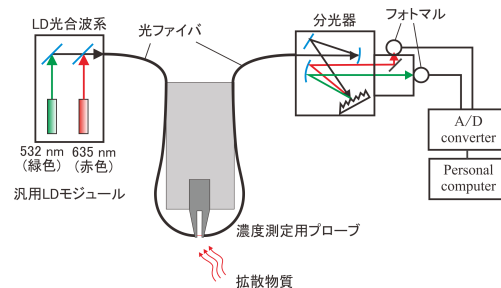


図 1. 超高分解能多成分変動濃度測定システム全体図

(4) 大型水槽および新規開発濃度計による軸対称噴流拡散場における濃度計測: 軸対称噴流拡散場を対象として変動濃度計測を行う。図 2 に測定系の全体図を示す。開発した濃度計を用いて、この水槽中に生成された軸対称噴流中の中心軸上で濃度変動の測定を行う。

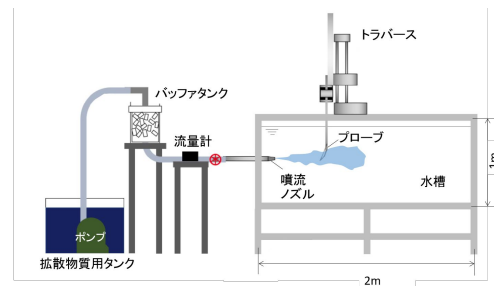


図 2. 軸対称噴流中濃度変動計測システムの全体図

4. 研究成果

「3. 研究の方法」(1)(2)(3)に基づいて、対向型光ファイバプローブを製作した。製作したプローブの概略を図 3 に示す。本プローブは片側の光ファイバから射出されたレーザー光がどの程度溶液中の物質に吸収されたかをもう片方のプローブで検出することにより、液中の拡散物質の濃度を算出する仕組みである (吸光式濃度計)。レンズ加

工された GI ファイバを通常の光ファイバに融着することによりプローブ先端から直径 20 μm でレーザーを射出し約 100 μm 離れた位置に直径約 3 μm で集光することが可能となった。測定体積はバンドル型光ファイバプローブの約 1/700 を達成した。これは、吸光式濃度計としては世界最高レベルの空間分解能である。

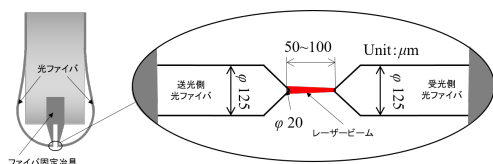


図 3. 対向型光ファイバプローブの概略図

「3. 研究の方法」(4)に基づいて、軸対称乱流噴流中での無反応染料の濃度を開発した光ファイバプローブで計測し、スペクトルや確率密度関数等の統計量の調査を行った。

図 4 にフォトマルからの出力電圧 E と溶液中の吸光物質の濃度を示す。ここで E_0 は物質が解けていない純水中での出力電圧である。図より、出力電圧と濃度の間には指数関係、すなわち Lambert-Beer の関係が成り立つことが分かる。これより、本研究で開発したプローブにより定量的に乱流中の拡散物質の濃度計測が行えることが分かる。

図 5 に噴流中心の各下流位置における変動濃度の確率密度関数 $P(c)$ を示す。ここで c_{RMS} は濃度変動の r.m.s 値である。また、 x はノズル出口からの主流方向距離、 d はノズル出口直径である。図より、確率密度関数は位置に寄らず正規分布から外れた分布を示すことが分かる。

図 6 に噴流中心における濃度濃度のパワースペクトルを示す。図中には速度変動の最小スケールであるコルモゴロフスケールと濃度変動の最小スケールであるバチェラスケール、さらに本研究で開発したプローブの空間分解能を示してある。図より、開発したプローブはコルモゴロフスケールからバチェラスケールの間に存在する粘性対流小領域に達する空間分解能を有していることが分かる。図より、コルモゴロフスケールより低波数の慣性小領域ではスペクトルが波数の $-5/3$ に比例する領域が確認できる。また、粘性対流小領域に差し掛かるにつれ、 $-5/3$ 乗の傾きはわずかに緩やかになり、 -1 乗の傾きに近づく傾向がうかがえる。このことにより、開発した吸光型濃度計測プローブのコルモゴロフスケール以下の微小領域における濃度計測に対する有効性が確認できた。

本研究では、上述の対向型光ファイバプローブを用いて、化学反応を伴う二次元乱流噴

流中で反応性物質の多成分変動濃度の同時計測を行う予定であったが、レンズ付光ファイバの製作、および対向型光ファイバ用保治具の設計・製作に多くの時間を費やしたため、化学反応を伴う二次元噴流中での計測を行うことはできなかった。しかしながら、開発したプローブはすでに多成分計測を行うことができる状態にあるため、今後化学反応を伴う乱流中での多成分濃度計測に応用していく予定である。

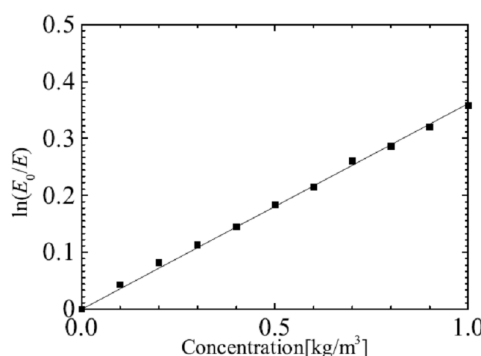


図 4. 濃度計測校正試験結果

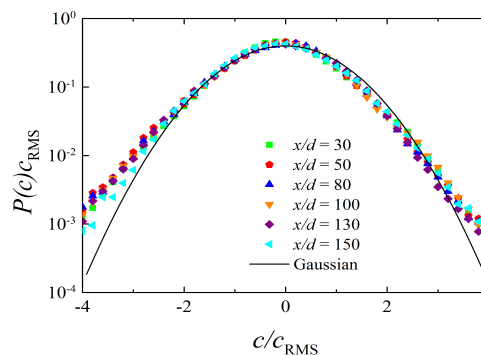


図 5. 変動濃度の確率密度関数

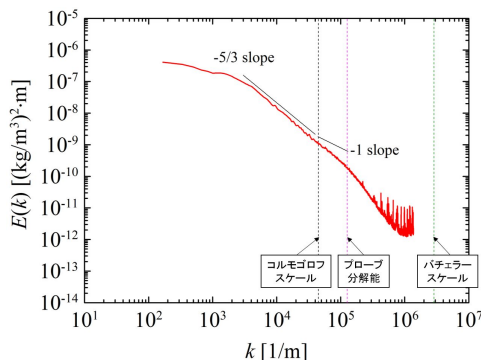


図 6. 変動濃度のパワースペクトル

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)

久保 貴, 豊田 祐希, 古川 裕之, パルス発光レーザーダイオードを用いた吸光スペクトル法による二成分変動濃度同時測定, 査読有, 日本機械学会論文集, 2016, 16-00203.

DOI:10.1299/transjsme.16-00203

久保 貴, 武村 盛博, 古川 裕之, 吸光スペクトル法による多成分変動濃度同時測定システムの開発(レーザーダイオードを用いた 3 成分濃度測定), 査読有, 実験力学, 2016, pp.71-76.

DOI: 10.11395/jjsem.16.71

T.Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima, T. Kubo, Conditional Statistics in a Planar Liquid Jet with a Second-Order Chemical Reaction, 査読有, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, pp.768-780.

DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.12.008

[学会発表](計 3 件)

中川 公太, 渡邊 智昭, 岩野 耕治, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁, 二次元液相噴流中の乱流・非乱流界面近傍における化学反応場に及ぼす量論混合比の影響, 日本機械学会東海支部 第 66 期総会・講演会, 2017 年 03 月 15 日, 静岡大学(浜松市).

中川 公太, 渡邊 智昭, 酒井 康彦, 岩野 耕治, 伊藤 靖仁, 長田 孝二, 二次元液相噴流における乱流・非乱流界面近傍での化学反応場に関する研究, 流体力学会年会 2016, 2016 年 09 月 26 日, 名古屋工業大学(名古屋市).

豊田 祐希, 久保 貴, パルス発光レーザーダイオードを用いた多成分瞬時濃度測定システムの開発, 日本機械学会 2016 年度年次大会 2016, 2016 年 09 月 12 日, 九州大学(福岡市)

[その他]

ホームページ

<http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/sfe/index.html>

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・教授
研究者番号: 50274501

伊藤 靖仁 (ITOU, Yasumasa)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 40346078

岩野 耕治 (IWANO, Koji)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 20750285