

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630052

研究課題名(和文) 液相乱流濃度場に対するin-situ射光/受光併用超高分解能LIFプローブの開発

研究課題名(英文) Development of the in-situ ultra-high-resolution LIF probe having both functions of the light emission and collection for the measurement of turbulent fluctuation concentration in the liquid phase

研究代表者

酒井 康彦 (Sakai, Yasuhiko)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20162274

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、( ) 低侵襲性、( ) 高空間分解能、( ) 高精度な簡易計測の三点を実現する光ファイバLIFプローブの開発を行った。開発された新型プローブのビーム焦点径は約60 $\mu\text{m}$ 、光ファイバ端面から焦点までの距離は400 $\mu\text{m}$ となり、従来の対向式吸光濃度測定プローブと同程度の空間分解能を実現できた。また、拡散物質からの蛍光をビーム照射ファイバと同一のファイバで受光することにより、焦点の調整が不要となり簡易計測の点で大きく改善された。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、平均濃度および変動濃度のどちらも既往研究の値と良く一致し、精度のよい測定が行えることが確認された。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new optical fiber LIF probe was developed. The characteristics of the probe are (1) low invasion, (2) high spatial resolution and (3) simple operability of measurement with high accuracy. The beam spot diameter was 60 $\mu\text{m}$  and the distance between fiber's edge and focal point was 400 $\mu\text{m}$  which are comparable to the spatial resolution of the conventional optical fiber probe based on the light absorption method. The simple operability was realized by using one (the same) optical fiber by which the laser beam was emitted and the fluorescence was collected, so that the adjustment of focal point became unnecessary. Concentration fluctuations of the high Schmidt number diffusing dyes were measured in a liquid axisymmetric jet with the new probe, and the results showed good agreements with the previous measurement results in average and fluctuating concentration.

研究分野：工学

キーワード：流体工学 光ファイバ LIF 濃度計測 高シュミット数 乱流拡散

## 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。 $Pe = (v/D) \times Re$ 、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  $Re = u'\lambda/v$  ( $u'$ : 速度変動 r.m.s. 値、 $\lambda$ : テイラーマイクロスケール) である。また、 $v/D$  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。しかし、現状の計測技術では数  $10 \mu\text{m}$  オーダのスケールの濃度計測が限界で、未だ普遍平衡領域の存在が実験的に明らかにされていない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、液中拡散物質の濃度計測用光ファイバ LIF プロープの開発である。プロープの特徴は、( )プロープの低侵襲性、( )高空間分解能、( )高精度な簡易計測の実現、の三点である。( )と( )は細径光ファイバと射出光を微小化するためのシリカグリーンレンズ融着することで実現する。( )は光カプラとレンズチューブで射光と受光を同一の光ファイバで行い、焦点調整を不要とすることで実現する。図1に新型光ファイバ LIF 濃度計測システム全体図を示す。

## 3. 研究の方法

初年度(2013年度)は以下の研究を行った。  
 (1) プロープ射出光の大きさと集光点距離の検討：光ファイバ先端にシリカグリーンレンズを用いることで、プロープ先端から離れた位置に集光するように設計を行った。これにより、プロープから射出される光のビーム径の微小化を図った。また、プロープから離れた位置に集光することで、計測点とプロープ先端に間隔を設け、プロープ挿入による計測結果への影響を小さくする仕組みとした。  
 (2) レンズチューブの設計/製作とレンズ

チューブ伝送光の伝送精度の検証：新型光ファイバプロープでは、集光レンズとバンドパスフィルタを用いてレンズチューブに入射した蛍光とレーザ光のうち蛍光のみを分離してフォトマルへ伝送する方式をとるが、この伝送における光量の損失やフィルタのカットオフ特性を評価した。

(3) 光ファイバ/レンズチューブ/光カプラのカップリング、液中物質濃度の計測と精度検証：実際に新型光ファイバプロープを製作し、その焦点距離の評価など、プロープの分解能の検証を行った。また、実際の濃度場計測における計測精度を検証するために、参照データとして、既存の実験設備を使用して、従来の計測技術(対向型光ファイバプロープ)により液中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。さらに、新型光ファイバプロープによる濃度計測の実験準備を行った。とくに、相対的空間分解能の向上を目指し、大型水槽の設計製作を行った。

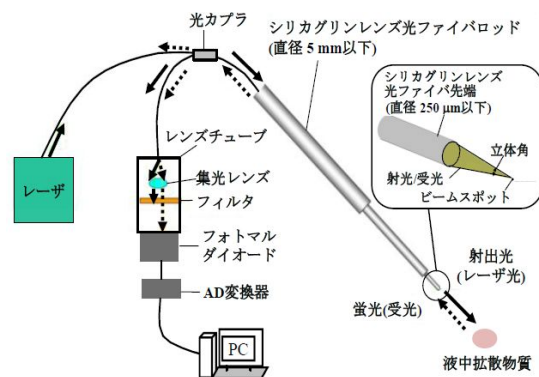


図1. 新型光ファイバ LIF 濃度計測システム全体図

二年目(2014年度)は以下の研究を行った。  
 (4) 大型水槽および新規開発プロープによる軸対称噴流拡散場における濃度計測：2013年度に製作した大型水槽を用いて、軸対称噴流拡散場を対象として、従来の計測技術(対向型光ファイバプロープ)と新型光ファイバ LIF プロープにて計測し、それによって得た計測結果を比較した。

## 4. 研究成果

「3. 研究の方法」(1)に基づいて、光ファイバ LIF プロープを製作した。製作したプロープの概略を図2に示す。図に示すとおり、研究計画通りの構造を持つプロープを製作することができた。計測の結果、製作した新型光ファイバ LIF プロープのビームスポット直径は  $60 \mu\text{m}$ 、ファイバプロープ先端からビームスポットまでの距離は約  $400 \mu\text{m}$  であった。これは、焦点調整の必要の無い光学的濃度計測センサとしては世界最高レベルの分解能である。

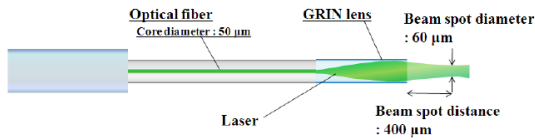


図2．新型光ファイバLIFプローブの概略図

「3. 研究の方法」(2)~(4)について、まずは静止溶液中で蛍光物質(Rhodamine 6G, シュミット数  $Sc=1000$ ) の濃度の測定を行った。その結果、光カプラのファイバカップリング効率は十分に高く、また蛍光以外の光はバンドパスフィルタを通過することでほぼ完全にカットされることが分かった。以上より本プローブで十分に高いS/N比で測定が行えることが確認された。図3に従来の対向型光ファイバプローブで測定した吸光物質(C.I. Direct Blue 86, シュミット数  $Sc=3800$ ) と新型光ファイバLIFプローブで測定した蛍光物質(Rhodamine 6G) の噴流半径方向の無次元濃度分布を示す( $C$ : 平均濃度,  $C_c$ : 噴流中心軸上の平均濃度,  $r$ : 半径方向距離,  $b_c$ : 噴流の半値幅,  $x$ : 噴流出口を原点とした下流方向位置,  $d$ : 噴流ノズル出口直径)。図より異なる下流方向位置における測定結果は2つの異なる測定プローブを用いた場合でよく一致していることが分かる。このことから開発した光ファイバLIFプローブは実際の計測場においても精度良く平均濃度の測定が可能であることが確認された。

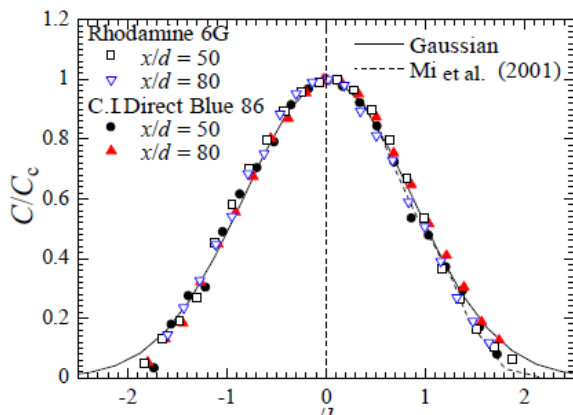


図3．半径方向無次元濃度分布

図4に、新型LIFファイバプローブにより測定された変動濃度パワースペクトル  $E_c(f)$  の噴流中心軸上の変化を示す。ただし、パワースペクトルは濃度変動 r.m.s. 値  $c'$  と積分時間スケール  $t_{cl}$  で正規化されている。図より、いずれの下流方向位置においても-5/3乗に従う慣性対流小領域をはっきりと確認することができる。この-5/3乗に従う慣性対流小領域が現れる波数帯域は従来の対向型プローブで測定した場合と概ね一致した。以上のことから、新型LIFファイバプローブは平均濃度だけでなく変動濃度も精度良く測定できることが確認された。したがって、研究

の目的で示した( ), ( ), ( )のすべての特性はほぼ実現されている。以上より、当初の目的に沿う新型光ファイバ型LIFプローブの開発にはほぼ成功したと判断される。

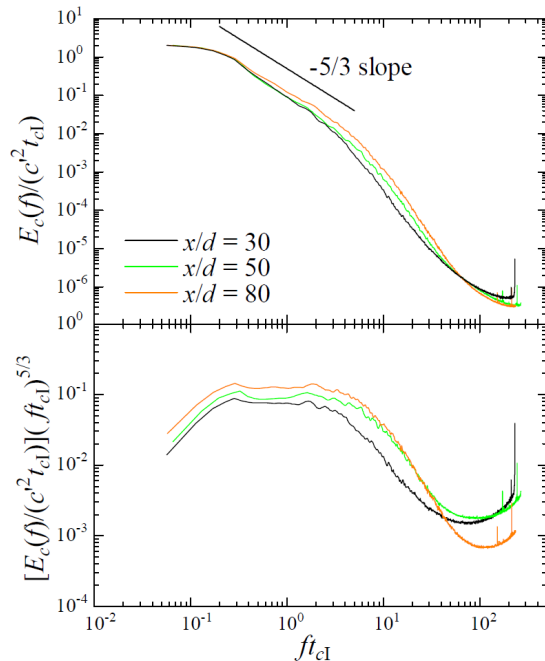


図4．変動濃度のパワースペクトル

しかしながら、今回開発された光ファイバプローブの空間分解能は、テイラーマイクロスケールの1/4程度であり、コルモゴロフスケール(10 μm程度)には達しなかった。そのため、高シュミット数物質拡散場について慣性対流小領域よりも高波数帯域に存在すると予測されている粘性対流小領域における濃度変動を計測するには至らなかった。今後、光ファイバ径自身をさらに細くし、かつ先端形状を工夫すること、かつより強力な光源を使用することなど、従来よりも先進的な改良を行うことにより、飛躍的な分解能向上を行うことが可能であると考えられる。

#### 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 2 件)

T. Takeichi, Y. Sakai, O. Terashima, K. Nagata, Y. Ito, Study on the Concentration Measurement in a Liquid Jet by the Optical Fiber LIF Method, 査読有, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, 2014, Vol. 14, pp.s30-s35

DOI:10.11395/jjsem.14.s30

T. Takeichi, Y. Sakai, O. Terashima, K. Nagata, Y. Ito, M. Yokoi, Experimental Study on the Schmidt Number Dependence of the Scalar Derivative Statistics in a Liquid Axisymmetric Jet, 査読有, Journal of Fluid Science and Technology, 2014, Vol.9, 14-00145  
DOI: 10.1299/jfst.2014jfst0030

〔学会発表〕(計 6 件)

M. Yokoi, T. Takeichi, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima, Y. Ito, Scale-up of the test apparatus for precise measurement of axisymmetric jet, The 8th JUACEP Student Workshop on Engineering, 2014 年 03 月 10 日, University of Michigan (USA).  
竹市智貴, 酒井康彦, 寺島修, 長田孝二, 伊藤靖仁, 液相軸対称噴流拡散場における速度・スカラー結合統計量に対するシュミット数(プラントル数)依存性に関する研究, 日本機械学会東海支部 第 63 期総会・講演会, 2014 年 03 月 19 日, 大同大学(名古屋市).

T. Takeichi, Y. Sakai, O. Terashima, K. Nagata, Y. Ito and T. Watanabe, Study on the Concentration Measurement in the Fine Scale Region in a Liquid Jet by the Optical Fiber LIF Method, 8th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 2013 年 11 月 6 日, Sendai City War Reconstruction Memorial Hall, Sendai.

竹市智貴, 酒井康彦, 寺島修, 長田孝二, 伊藤靖仁, 渡邊智昭, 拡散物質濃度の高次統計量のシュミット数依存性に関する研究, 日本機械学会第 91 期流体工学部門講演会, 2013 年 11 月 10 日, 九州大学(福岡市).

T. Takeichi, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima and Y. Ito, Experimental Study on the Schmidt Number Dependence of the Scalar Derivative Statistics in a Liquid Axisymmetric Jet, 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 2013 年 09 月 18 日, 名古屋大学(名古屋市).

竹市智貴, 酒井康彦, 寺島修, 長田孝二, 伊藤靖仁, 光ファイバ LIF 法による液相噴流中の微小スケール領域濃度計測に関する研究, 日本実験力学学会 2013 年度年次講演会, 2013 年 08 月 21 日, 由利本荘市文化交流館(由利本荘市).

〔その他〕

<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・准教授  
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・特任講師  
研究者番号: 40346078