

## 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：23656133

研究課題名（和文）

走査型ステレオPIVとLIFによる速度三成分と反応物濃度のボリューム計測法の開発

研究課題名（英文）Development of scanning PIV-LIF technique for measuring three-component velocities and concentration of a reactive scalar in a 3D domain

研究代表者

長田 孝二（NAGATA KOUJI）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50274501

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、走査型時系列ステレオ PIV システムに反応場にも適用可能な走査型レーザ誘起蛍光法（LIF）を組み合わせることにより、三次元空間内での速度三成分と反応物質濃度を瞬間同時計測する技術を開発することである。本研究により、流速三成分と濃度のボリューム計測システムを完成させた。このシステムを用いることにより、三次元空間内での速度三成分と反応物質濃度を同時計測することが可能となった。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a simultaneous measurement system for measuring instantaneous three-component velocities and concentration of a reactive scalar in a three-dimensional domain fixed in a turbulent flow by combining a scanning time-resolved particle image velocimetry (PIV) with scanning laser-induced fluorescence technique (LIF). This developed system makes it possible to measure three-component velocities and concentration of a reactive scalar in a three-dimensional domain.

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	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：流体工学

科研費の分科・細目：流体工学

キーワード：流体工学，乱流，物質拡散，化学反応，レーザ計測

## 1. 研究開始当初の背景

液相乱流中での反応性物質の混合反応現象を明らかにすることは、流体力学に関する学術的興味はもちろんのこと、混合・反応過程を含む工業装置の最適設計の問題や、河川や海洋に放出された汚染物質の拡散予測問題と関連して重要である。

測定技術の進歩に伴い、乱流場での変動濃度計測は、電極プローブ等による点計測から、レーザ誘起蛍光（Laser induced fluorescence: LIF）法によるライン計測、シート光源を用いた LIF による面計測へと発展してきた。また、無反応場ではあるが、最近では走査型レーザ誘起蛍光法（LIF）による濃度場のボリ

ューム（三次元）計測も行われている。一方、変動速度場の計測についても、以前は熱膜流速計やレーザドップラ流速計（LDV）による点計測が主流だったが、粒子画像流速計（Particle image velocimetry: PIV）の登場により面計測が可能となった。初期の PIV は計測周波数が数 Hz だったが、最近では数 kHz～数 10 kHz の時系列 PIV が主流となってきた。さらに、近年では走査型ステレオ PIV による速度三成分のボリューム計測も行われるようになってきた。このように、乱流場での変動濃度、変動速度の計測技術は年々発展してきている。

このような背景のもと、本研究では、走査



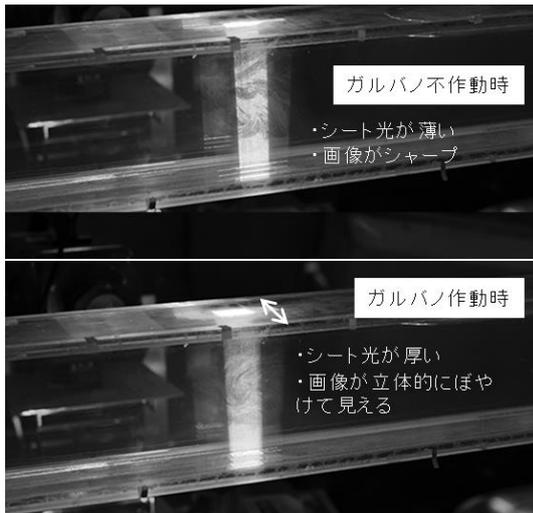


図3 ガルバノスキャナ動作の有無による蛍光画像の変化

光学フィルタによって分離された粒子画像および蛍光画像を図4に示す。これらの図より、それぞれの信号のみが光学フィルタによって適切に分離されていることがわかる。

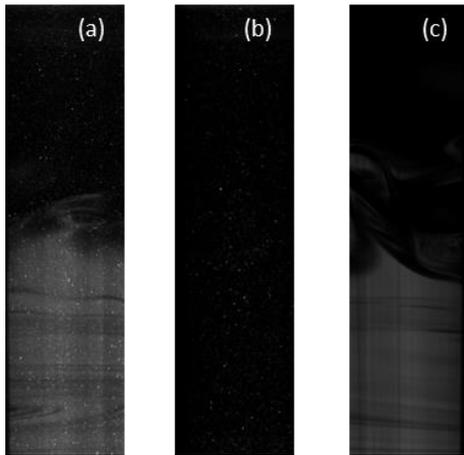
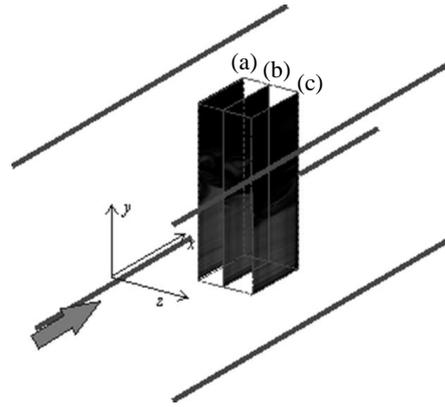


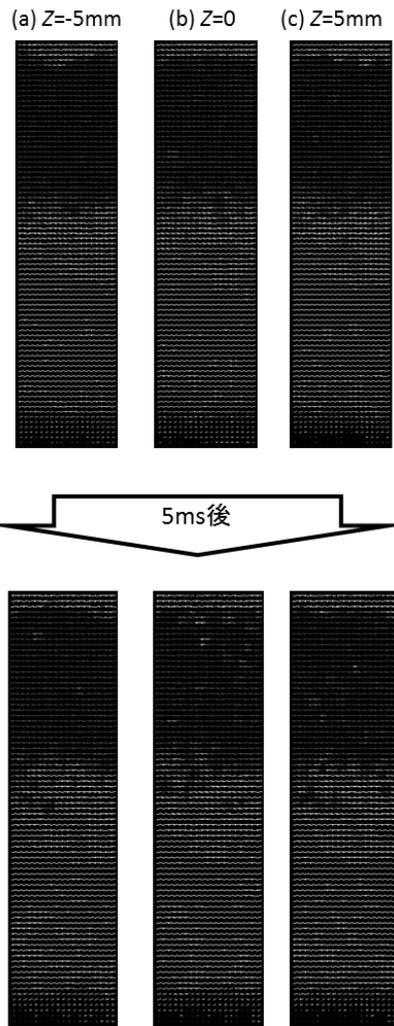
図4 取得画像：(a)元画像（フィルタなし）(b)バンドパスフィルタ（532 nm）使用（PIV計測用）(c)ハイパスフィルタ（600 nm）使用（LIF計測用）

図5に異なる3断面で計測された速度場（瞬間速度ベクトル）および濃度場の計測結果を示す。この設定では、5 ms後にレーザーシートが同一面に戻ってくる。図5(c)より、現象に対してレーザーの走査が十分早く、スキャンの1周期後においても同じシート位置（同じガルバノミラーの角度）ではほぼ同じ蛍光画像が得られていることが確認できる。

それぞれの粒子画像および蛍光画像を本研究室で開発されたオリジナルのPIVおよびPLIF解析プログラム（雑誌論文②，⑤，⑨，⑫，⑯および学会発表②，⑤，⑦，⑧，⑪参

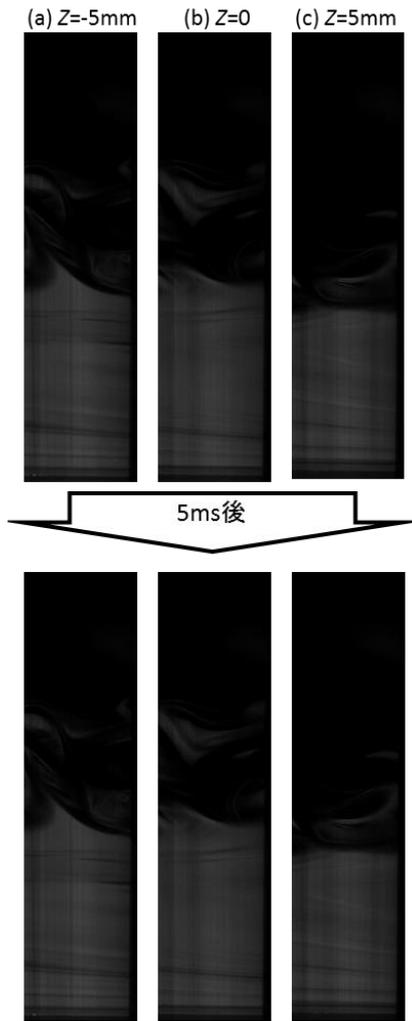


(a) 計測位置の概略



(b) 速度場  
図5 計測結果例

照)で処理することにより、三次元空間内での速度三成分と反応物質濃度を同時計測することが可能である。



(c) 濃度場  
図5 計測結果例 (前ページからの続き)

今後の課題としては、高速度ビデオカメラのフレームレートの向上があげられる。当研究室で所有する高速度ビデオカメラ (DANTEC DYNAMICS, 84C160×3 台) の場合、フルフレームレートでの撮影は 2,000 Hz である。ガルバノミラーを用いて 1 ボリューム当たり 20 断面で計測しようとする場合、1 スキャン当たりの計測時間は 0.01 秒、計測の周波数は 100 Hz となる。厳密には 1 スキャン当たりの計測時間 0.01 秒の間に流体は移動するので、テイラー仮説を用いてデータを補正する必要がある。撮影断面数の増加、1 スキャン当たりの計測時間の短縮、計測周波数の向上を実現するには、いずれもより高速なビデオカメラが必要であり、仮に 1 ボリューム当たり 100 断面を 1,000Hz で計測した場合には 100,000 Hz (0.1 MHz) のフレームレートが必要となる。今後の高速度ビデオカメラの技術開発と低価格化に期待したい。

## 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 17 件)

- ① 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.
- ② H. Suzuki, K. Nagata and Y. Sakai, PLIF Analysis on the Fractal Dimension of High-Schmidt Number Scalar Mixing in Fractal-Generated Turbulence, 査読有, Physica Scripta, 2013, in press.
- ③ T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima, 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, K. Hoshino, Y. Ito, K. Nagata, Y. Sakai and O. Terashima, Stereo PIV Measurement of Regular and Fractal Grid Turbulence in Liquid, 査読有, Proc. of the 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 2013, in press.
- ⑤ H. Suzuki, T. Ushijima, Y. Hasegawa, K. Nagata and Y. Sakai, An Attempt to Improve Accuracy of PIV Using an Interpolation Method, 査読有, Proc. of the 12th Asian Symposium on Visualization, 2013, in press.
- ⑥ 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.
- ⑦ 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.
- ⑧ 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.
- ⑨ 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 輝度分

- 布補間による PIV 計測精度向上 (擬似粒子画像によるフーリエ補間の導入効果の解析), 日本機械学会論文集 (B 編), 査読有, 2012, 78 巻 790 号, 1248-1259.
- ⑩ 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.
- ⑪ 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.
- ⑫ H. Suzuki, K. Nagata and Y. Sakai, Quantitative Visualization of High-Schmidt-Number Turbulent Mixing in Grid Turbulence by means of PLIF, 査読有, Journal of Visualization, Vol.15, 2012, pp.109-117.
- ⑬ 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.
- ⑭ T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, H. Suzuki, Y. Ito, O. Terashima and T. Hayase, 査読無, Proc. of the 9th International Conference on Flow Dynamics, 2012, 102-103.
- ⑮ H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai and T. Hayase, DNS on a Spatially Developing Grid Turbulence, 査読有, Journal of Physics: Conference Series, Vol.318, 2011, Doi: 10.1088/1742-6596/318/3/032043
- ⑯ H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai and R. Ukai, An Experimental Study on Turbulent Mixing of High-Schmidt-Number Scalar in grid turbulence by means of PIV and PLIF, 査読有, Proc. of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, 2011, USB.
- ⑰ 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 11 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, 三重大大学 (津市)
- ② 星野晃一, 長田孝二, 伊藤靖仁, 酒井康彦, 鈴木博貴, 寺島修, PIV-PLIF 計測による正方格子およびフラクタル格子乱流中のスカラー混合に関する研究, 日本機械学会東海支部 第 62 期総会・講演会, 2013 年 03 月, 三重大大学 (津市)
- ③ T. Watanabe, K. Hoshino, K. Nagata, Y. Ito, Y. Sakai and O. Terashima, Stereo PIV Measurement of Grid Turbulence in Liquid Phase, The 4th JUACEP Student Workshop on Engineering and Science at the University of Michigan, 2013 年 02 月, University of Michigan (USA).
- ④ 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, University of Michigan (USA).
- ⑤ 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 長谷川豊, 牛島達夫, 輝度分布補間による PIV 解析精度向上の試み, 第 90 期日本機械学会流体工学部門講演会, 2012 年 11 月, 同志社大学 (京都市)
- ⑥ 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, 金沢大学 (金沢市)
- ⑦ 星野晃一, 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 格子乱流による高 Sc 数スカラー混合の PLIF 計測, 可視化情報学会全国講演会 2011, 2011 年 9 月, 富山国際会議場 (富山市)
- ⑧ H. Suzuki, Y. Sakai and K. Nagata, PLIF Analysis on the Fractal Dimension of High-Schmidt Number Scalar Mixing in Fractal-Generated Turbulence, International Conference "Turbulent Mixing and Beyond", 2011 年 8 月, Trieste, Italy.
- ⑨ 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, Trieste, Italy.
- ⑩ 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 高 Sc 数スカラー乱流混合実験における補正処理手法の開発と格子乱流中のスカラー拡散場の解析, 第 48 回日本伝熱シンポジウム, 2011 年 6 月, 岡山大学 (岡山市)

⑪ H. Suzuki, K. Nagata and Y. Sakai,  
Quantitative Visualization of High-  
Schmidt-Number Scalar Mixing in Grid  
Turbulence, 11th Asian Symposium on  
Visualization, 2011年6月, 朱鷺メッ  
セ(新潟市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

寺島修 (TERASHIMA Osamu)  
名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 50570751  
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