

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）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：基盤研究(B)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22360077

研究課題名（和文）

高ペクレ数乱流拡散・反応場のラグランジュ的マルチスケール混合機構の解明とモデル化

研究課題名（英文）

Clarification of the Lagrangian multi-scale mixing mechanism of High-Peclet number turbulent diffusion/reactive fields and its modeling

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）：本研究は、高ペクレ数乱流拡散・化学反応場のラグランジュ的マルチスケール混合機構を実験と数値シミュレーションにより解明し、確率密度関数法(PDF法)用の数値モデルを検証・発展させることを目的として行われた。本研究により、速度三成分と濃度のボリューム同時計測システムを完成するとともに、従来の吸光スペクトル法により基本的な反応拡散場の実験を行った。また、ランダムフーリエモード法やDNSにより反応濃度場の数値シミュレーションを実施した。これらの実験・数値計算により、基本的濃度統計量の特性を確認するとともに、PDF法用の数値モデル(分子混合モデル)の検証に有効なデータを取得することができた。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to elucidate the Lagrangian multi-scale mixing mechanism of the high-Peclet number turbulent diffusion/reactive fields by the experiments and the simulations, and to make the verification and development of the numerical models for the probability density function (PDF) method. For this purpose, we develop the simultaneous measurement system of three components of velocity and concentration in a three-dimensional domain, and also perform the experiments for the fundamental reactive diffusion field by the conventional light absorption spectrometric method. Further, the simulations of reactive concentration field by the random Fourier modes method and DNS are performed. From these results of experiments and simulations, the fundamental characteristics of concentration statistics have been confirmed and the useful data for the verification of the effectiveness of the numerical model (molecular mixing model) for the PDF method have been obtained.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2011年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

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, 乱流拡散, 混合, ラグランジュ特性, マルチスケール構造

1. 研究開始当初の背景

乱流拡散場は乱流ペクレ数 (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 は以下のように定義される。

$$Pe_\lambda = (\nu/D) \times Re_\lambda$$

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 は対象としている場が物質濃度場の場合は通常シュミット数 Sc , 温度場の場合は

プラントル数 Pr と表記される。したがって、高ペクレ数乱流拡散場は高シュミット数（あるいはプラントル数）で且つ高レイノルズ数の時に実現される。このような高ペクレ数乱流拡散場やそれに化学反応を伴う流動場は、例えば大気中の汚染物質の拡散や光化学スモッグ現象、海洋中や河川や湖沼の汚染物質の拡散、火山の噴煙場など、環境中に数多く見られ近年の環境問題への意識の向上とともに世界的に注目を浴びている。一方、同様の乱流混合・反応場は攪拌機や各種プラント中での物質混合過程、空調装置、熱交換器など、各種工業装置で頻繁に見られ、それらの効率向上は工学的に非常に重要である。

本研究はこのような社会的・工業的な背景に鑑み、高ペクレ数乱流拡散場、特に高シュミット数が特徴である液相での乱流物質拡散・化学反応場に注目し、そのラグランジュ的マルチスケール構造を実験と数値シミュレーションにより解明し、それに基づき、高ペクレ数乱流場における拡散・反応現象の予測に対応できる効率的な確率的計算ツールを発展させようとするものである。

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、具体的には、以下に示されるように、実験（研究目的 (A)）とシミュレーション（研究目的 (B)）に分けて、研究を遂行した。

(1) 研究目的 (A) : 走査型 PIV と走査型 PLIF システムを組み合わせることにより高シュミット数物質の瞬時濃度場を流体粒子に沿って速度場とともに精度よく測定できるラグランジュ的マルチスケール速度・濃度同時計測システムを

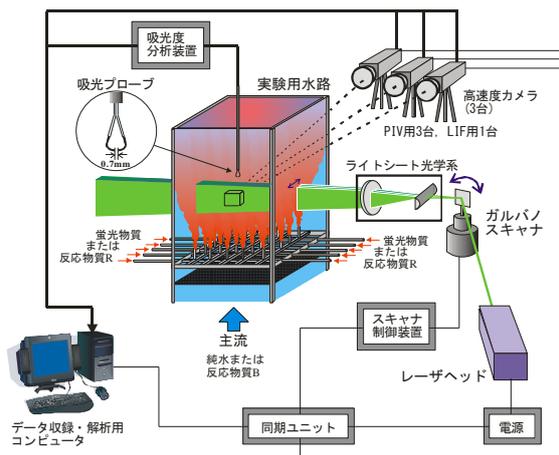


図1 計測システム全体図

開発する。また、反応場については、従来の吸光スペクトル法による計測システムと光ファイバプローブにより濃度場の測定を行い、基礎的データを収

集する。図1に本研究で計画した測定システム全体図を示す。

(2) 研究目的 (B) : 確率微分方程式やランダムフリーモード法を利用したラグランジュ的確率密度関数法 (PDF 法) により変動物質拡散場や化学反応場の計算を行い、実験データと比較する。また、DNS や LES によるシミュレーションも行い、分子混合モデルの検証を行う。

3. 研究の方法

初年度(2010年度)は、以下の研究を行った。

(1) 研究目的 (A) について :

まず、通常の PIV 法と PLIF 法とを組み合わせ、二次元平面内の二成分ラグランジュ速度・濃度結合統計量の測定システムの構築の準備を行った。一方、反応濃度場については、吸光スペクトル法による光ファイバ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 $A + B \rightarrow R$ 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。

(2) 研究目的 (B) について :

①二次元噴流について、DNS による速度場の計算とラグランジュ的 PDF 法を組み合わせた拡散・反応場の数値計算コードの開発に着手した。

②ランダムフリーモード法を利用した拡散・反応場の数値計算コードの開発に着手した。

③DNSによる格子乱流中のパッシブスカラー場を計算するコードを開発した。

二年目(2011年度)は以下の手順で研究を行った。

(3) 研究目的 (A) :

走査型 PIV と操作型 PLIF システムを組み合わせることにより、速度三成分・濃度場のボリューム計測の準備を進め、計測に必要な機器を購入した。一方、反応濃度場については、前年度に引き続き、吸光ファイバプローブにより、二次元噴流の二次の化学反応場の計測を行った。

(4) 研究目的 (B) :

①二次元噴流について、DNS による速度場

の計算とラグランジュ的 PDF 法を組み合わせ合わせた拡散・反応場の数値計算コードを開発した。そして開発した計算コードを用いて、二次元乱流噴流での単成分・多成分変動スカラー場と二次の化学反応場 ($A+B \rightarrow R$) の計算を試みた。

- ② ランダムフーリエモード法と PDF 法を組み合わせ合わせた格子乱流中の化学反応場の計算コードを開発した。
- ③ DNS による正方格子乱流やフラクタル格子乱流中のパッシブスカラー場を計算した。また、二次元噴流での反応拡散場を計算するコードを開発した。

三年目 (2012 年度) は以下の手順で行った。

(5) 研究目的 (A) :

既存の格子乱流水路を使用して、ガルバノスキャナを用いた走査型時系列ステレオ PIV と走査型 PLIF システムを構築し、速度三成分・濃度一成分のボリューム計測 (3D4C 計測) を試みた。また、前年度に引き続き二次元噴流の反応場の計測も行った。特に、二次元噴流の乱流・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を行った。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。

(6) 研究目的 (B) :

- ① 前年度に引き続き、二次元噴流について、DNS による速度場の計算とラグランジュ的 PDF 法を組み合わせ合わせた拡散・反応場の数値計算コードを用いて、二次元乱流噴流での単成分・多成分変動スカラー場と二次の化学反応場 ($A+B \rightarrow R$) の詳細な計算を行った。
- ② 前年度までに開発したランダムフーリエモード法と PDF 法を組み合わせ合わせたモデルにより反応性乱流混合層の数値シミュレーションを実行した。
- ③ 前年度に開発した DNS コードを利用して、二次元乱流噴流拡散場や反応場の特性を詳細に調べた。特に、拡散・混合場の可視化、初期条件の速度・拡散場への影響、渦粘性係数への化学反応の影響などを調べた。

これらの計算結果は研究目的 (A) での実験データとともに、確率密度関数法における分子混合モデルの有効性の検証に有用であると考えられる。

4. 研究成果

本研究は三年間にわたるプロジェクトであったので、ここでは最終年度の成果を主に報告する。

「3. 研究の方法 (5) 研究目的 (A)」で示された計測システムの構築に関して、実

際の実験の様子 (計測システムのセットアップの様子) を図 2 に示す。図 2 はテストセクション入口部に設置された乱流格子 (格子間隔 10 mm, 格子棒幅 2 mm) によって生成される格子乱流中の物質 (ウラン) の乱流拡散を計測している写真であり、ガルバノスキャナによるレーザシート光はテストセクション下部より鉛直上方に向けて走査されている。手前の高速度ビデオカメラは PIV 計測用、奥の高速度ビデオカメラは LIF 計測用である (写真では示されていないが、ステレオ計測の際には速度用に 2 台の高速度ビデオカメラ (合計 3 台: 現有) を用いる)。なお、同様の光学系で図 1 に示した格子乱流に対しても計測が可能である。

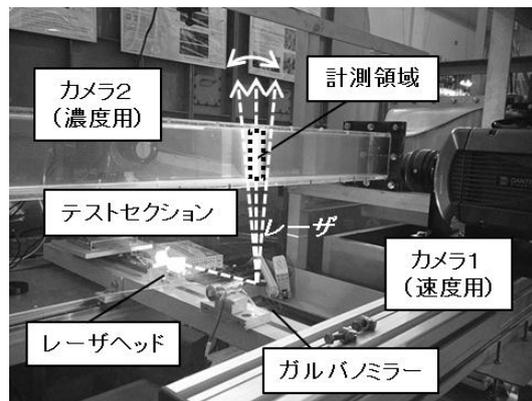


図 2 実験の様子
(計測システムのセットアップ)

図には示さないが、この計測システムを使用して、速度二成分・濃度一成分のボリューム計測 (3D3C 計測) が可能であることが確認された。なお、PIV 画像および PLIF 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, ⑧, ⑩, ⑳ および学会発表②, ⑤ 参照) 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。

「3. 研究の方法 (6) 研究目的 (B)」については、ここでは項目①に絞って報告する。

DNS による速度場の計算とラグランジュ的 PDF 法を組み合わせ、二次の化学反応 ($A+B \rightarrow R$) を伴う二次元乱流噴流の数値計算を行った。ここで、物質 A は噴流流体中に、物質 B は周囲流体に含まれている反応物質である。PDF 法の分子混合モデルとして Curl のモデルを用いた。数値計算条件として、化学反応の時間スケールと流れ場の時間スケールの比であるダムケラー数 Da を $Da = 0.1, 1, 10$ として行った。ここで Da の違いは化学反応速度定数の違いを表し、 Da が大きいほど化学反応の化学反応速度が大きいことを意味する。PDF 法により得られた数値計算結果を、流れ場および化学反応場とともに DNS を用い

て計算した「3. 研究の方法 (6) 研究目的 (B) ③」の結果 (雑誌論文③, ⑮参照) と比較した.

図3に $Da = 1$ の化学反応による生成物質 R の瞬時濃度を可視化した結果を示す. 図3 (a)には「3. 研究の方法 (6) 研究目的 (B) ③」の DNS により得られた結果を, 図3 (b)には PDF 法により得られた結果が示されている. 図中の白色は低濃度を, 黒色は高濃度を表している. PDF 法では多数の計算粒子を用いて反応場の計算を行う. 図3 (b)では PDF 法の数値計算に用いた計算粒子に濃度を表す色をつけて可視化した. 図3より, 噴流下流域に行くにつれて反応が進行し生成物質 R の濃度が増加することがわかる. また, 噴流ノズル近傍では, 噴流流体と周囲流体の境界部分にのみ生成物質 R が存在するが, 噴流下流域では噴流内部全体に生成物質 R が分布している. こうした傾向は図3 (b)の PDF 法による結果においても見られ, DNS による速度場の計算と PDF 法を組み合わせることで, 反応性物質の瞬時濃度分布を適切に計算できていることがわかる.

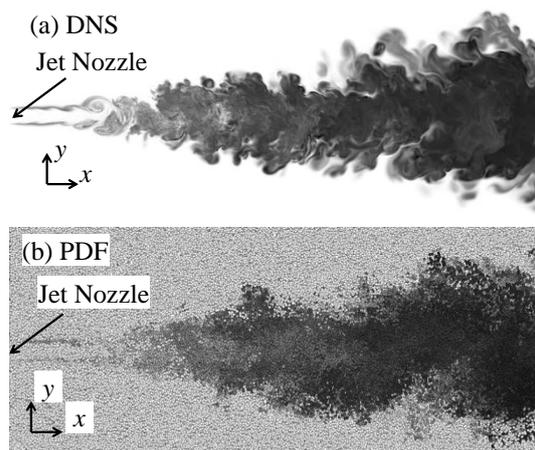


図3 化学反応による生成物質 R の瞬時濃度の可視化結果 (a)DNS (b) PDF 法

図4に PDF 法により得られた化学反応による生成物質 R の平均濃度 $\langle \Gamma_R \rangle$ の $x/d = 10, 20$ における y 方向分布を示す. ここで, x は噴流ノズル位置を基準とした下流方向距離, y は噴流中心を基準とした噴流広がり方向距離を表す. また, d は噴流ノズル幅であり, 図中の横軸は無反応物質の平均濃度の半値幅 b_{ξ} で, 縦軸は化学量論での生成物質の最大濃度 Γ_{R0} で無次元化されている. また, 図中には「3. 研究の方法 (6) 研究目的 (B) ③」の DNS により得られた結果が比較のため示されている. 図4より反応による生成物質の平均濃度 $\langle \Gamma_R \rangle$ は, Da が大きくなるにつれて (反応が速くなるにつれて) 大きくなることがよりわかる. また, 噴流下流に向かうにつれて反応

が進行するため, $x/d = 10$ での平均濃度 $\langle \Gamma_R \rangle$ より, $x/d = 20$ での平均濃度 $\langle \Gamma_R \rangle$ のほうが大きい値となる. 図4より PDF 法により得られた生成物質の平均濃度分布が「3. 研究の方法 (6) 研究目的 (B) ③」の DNS により得られた結果とよく一致していることが確認できる. このように, DNS による速度場の計算と PDF 法を組み合わせることで, 反応性物質の平均濃度分布を正確に計算できることがわかる.

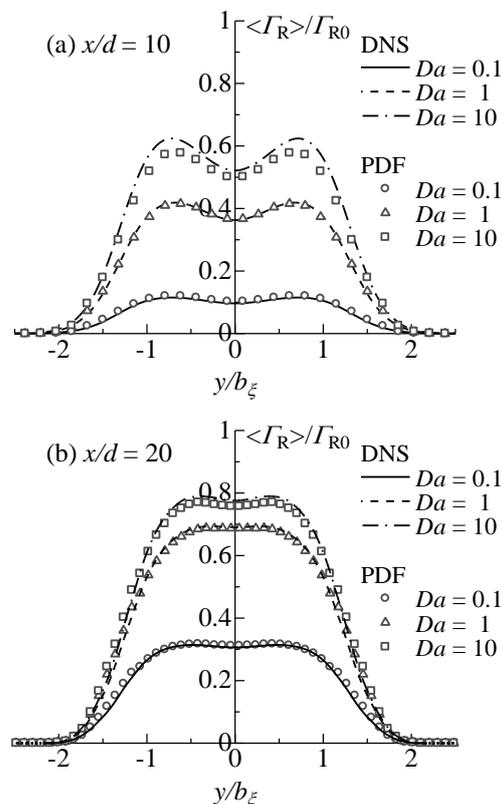


図4 化学反応による生成物質 R の平均濃度

以上のように, 本研究で開発した DNS による速度場の計算とラグランジュ的 PDF 法を組み合わせた計算手法により, 二次の化学反応 ($A+B \rightarrow R$) を伴う二次元乱流噴流中の物質拡散場を正確に計算できることが確認された (雑誌論文⑮参照および学会発表①参照). また, 分子混合モデルに対する Cur1 のモデルが化学反応を伴う二次元乱流噴流中の物質拡散場に対して有効であることも確かめられた. 本研究で開発した数値計算手法をもとに, PDF 法において過去に提案されてきた分子混合モデルの評価を行うことが可能である.

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 20 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, 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, 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.
- ⑥ 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.
- ⑦ N. Wu, Y. Sakai, K. Nagata, H. Suzuki, O. Terashima and T. Hayase, Effects of Initial Condition on Coherent Structure and Evolution of Turbulent Plane Jets, 査読有, Proc. of the 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 2013, in press.
- ⑧ 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.
- ⑨ 鈴木健, 酒井康彦, ランダムフリーエモード法と Lagrange 的分子混合モデルによる反応性乱流混合層の数値シミュレーション, 査読有, 日本機械学会論文集 (B編), 79 巻, 798 号, 2013, pp. 104-114.
- ⑩ 星野晃一, 長田孝二, 酒井康彦, 鈴木博貴, 鶴飼涼太, 寺島修, 伊藤靖仁, 正方格子およびフラクタル格子乱流場における高シュミット数スカラー混合に関する実験的研究, 査読有, 日本機械学会論文集 (B編), 79 巻, 799 号, 2013, pp. 304-316.
- ⑪ 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.
- 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, No. 2, 2012, pp. 109-117.
- ⑬ H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai and T. Hayase, Direct Numerical Simulation of Regular and Fractal-Grid Turbulence Using the Immersed Boundary Method and Fully Conservative Higher-Order Finite-Difference Schemes, 査読有, International Review of Physics (I. R. E. PHY), Vol. 4, 2012, pp. 83-90.
- ⑭ T. Kubo, Y. Fukumura, Y. Sakai, and K. Nagata, Study on Turbulent Plane Jet with Chemical Reaction in Liquid, 査読有, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 7, No. 1, 2012, pp. 25-38.
- ⑮ T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima and Y. Ito, 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.
- ⑯ T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, H. Suzuki, Y. Ito, O. Terashima and T. Hayase, Numerical Simulation of a Reactive Liquid Jet by Combination of DNS and PDF Method, 査読無, Proc. of the 9th International Conference on Flow Dynamics, 2012, pp. 102-103.
- ⑰ N. Wu, Y. Sakai, K. Nagata, H. Suzuki, O. Terashima and T. Hayase, Analysis of Flow Characteristics of Turbulent Plane Jets Based on Velocity and Scalar Fields Using DNS, 査読無, Proc. of the 9th International Conference on Flow Dynamics, 2012, pp. 98-99.
- ⑱ 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.

- ⑱ 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.
- ⑲ 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.

[学会発表] (計 10 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 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18-19日, 三重大学(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20-23日, 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20-23日, 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17-18日, 同志社大学(京都市)
- ⑥ Y. Sakai, K. Nagata, H. Suzuki, K. Hoshino, O. Terashima and Y. Ito, Experimental Study on Scalar Mixing Layer in Regular/fractal Grid Turbulence, 9th China-Japan Workshop on Turbulent Flows (招待講演), 2012年10月15-18日, 西安市(中国)
- ⑦ 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)
- ⑧ Y. Sakai, K. Nagata, H. Suzuki, K. Hoshino, O. Terashima and Y. Ito,

Development of Scalar Mixing Layer in Regular/Fractal Grid Turbulence, 2nd UK-Japan Bilateral Workshop and 1st ERCOFTAC Workshop on Turbulent Flows Generated/designed in Multiscale/fractal Ways: Fundamentals and Application (招待講演), 2012年3月26-27日, Imperial College (ロンドン, 英国)

- ⑨ 川口達也, 酒井康彦, 長田孝二, 寺島修, 乱流噴流スカラー統計量のシュミット数(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61期総会・講演会, 2012年3月15-16日, 名古屋工業大学(名古屋市)
- ⑩ 呉 楠楠, 酒井康彦, 長田孝二, 鈴木博貴, 杉本大輔, 寺島修, DNSによる二次元噴流の速度とスカラー場の空間発展の特性に関する研究, 日本機械学会東海支部 第61期総会・講演会, 2012年3月15-16日, 名古屋工業大学(名古屋市)

[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

- ・角田 博之 (TSUNODA HIROYUKI)
山梨大学・医学工学総合研究部・准教授
研究者番号: 10207433
- ・吉田 尚史 (YOSHIDA TAKASHI)
信州大学・工学部・准教授
研究者番号: 90262857
- ・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