

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289031

研究課題名(和文) 液相乱流/非乱流界面におけるラグランジュ的物質混合・反応機構の解明とモデリング

研究課題名(英文) Study on mechanism of Lagrangian mixing and chemical reaction near the turbulent/non-turbulent interface and its modeling

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) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、液相中での乱流/非乱流界面近傍での物質混合および二次の化学反応(A+B→P)について、実験と数値シミュレーションの両面から調査を行った。その結果、乱流領域(物質Aを含む)から非乱流領域(物質Bを含む)へ向かう法線が主流と同じ向きを持つ界面であるLeading edgeと、その逆向きの界面であるTrailing edgeでは物質生成速度が異なることを明らかにした。また、その差はダムケラー数の増加に伴い大きくなることが明らかになった。さらに、DNSやLESとPDF法を組み合わせた化学反応場の計算手法を提案し、実験によりその有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, scalar mixing and second-order chemical reaction (A+B→P) near the turbulent/non-turbulent interface in liquid were investigated experimentally and numerically. Here, in particular are examined characteristics near the two kinds of interface which are perpendicular to the streamwise direction: leading edge, across which the turbulent region (including A) turns into the non-turbulent region (including B) toward streamwise direction, and trailing edge, across which the non-turbulent region turns into the turbulent region toward streamwise direction. The result shows that chemical reaction rate near the leading edge is larger than that near the trailing edge. The difference becomes large as Damköhler number increases. In addition, we proposed a new numerical method for turbulent reactive flows which combine Direct Numerical Simulation, Large Eddy Simulation and Probability Density Method. The validity of the method was confirmed by the experiment.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 乱流 物質混合 界面 化学反応

## 1. 研究開始当初の背景

液相乱流中の物質拡散場は通常高乱流ペクレ数( $Pe$ )拡散場として特徴づけられる。乱流ペクレ数  $Pe$  とは  $Pe = (LD) \times Re$  で定義される無次元数である。ここで、 $\nu$  は動粘性係数、 $D$  は物質拡散係数、 $Re$  は乱流レイノルズ数  $Re = u' / \nu$  ( $u'$ : 速度変動 r.m.s. 値、 $\nu$ : テイラーマイクロスケール) である。また、 $LD$  はシュミット数と呼ばれる無次元数であり、通常  $Sc$  と表記される。なお、液相中での物質拡散の場合、この値は 1,000 のオーダーの非常に大きな値をとるのが普通である。流体力学分野では、このような高シュミット数乱流拡散場やそれに化学反応を伴う流動場の微細構造の統計的普遍性の検証が未だ成されておらず、物理的な未解決問題となっている。また、現象自体が、実際の工業プラント中での物質混合過程で頻繁に見られるのみならず、海洋中、河川や湖沼の汚染物質の拡散など、環境中にも数多く見られ、その研究は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、近年乱流と非乱流の界面のダイナミクスが注目されている。従来乱流/非乱流界面は粘性スーパーレイヤーと呼ばれるコロモゴロフスケール程度の非常に薄い層により構成され、それ自体の乱流の空間的発展への寄与は小さいとされてきた。しかし、実際には乱流/非乱流界面にはテイラースケール程度の厚みの渦度の集中層(界面層: interfacial layer と呼ばれている)が存在し、それらの Nibbling 効果(齧り効果)が乱流発展の支配的な役割を果たすことが明らかとなってきた。この結果より、この界面層は高ペクレ数(あるいは高シュミット数)乱流物質拡散場の空間発展を決定づけるものと考えられるが、その詳細は全く明らかにされていない。

## 2. 研究の目的

本研究は、液相中での乱流/非乱流界面における高シュミット数物質のラグランジュ的混合・化学反応機構を実験と数値シミュレーションにより解明し、その結果に基づき、乱流/非乱流の界面を含む間欠的複雑乱流場に対応できる簡易で汎用性のある確率密度関数法(PDF法: Probability Density Function Method)用の数値モデルを発展させることを目的とする。具体的には、以下の2項目に絞り、集中的に研究を遂行する。

(1) 広いダイナミックレンジを有する高分解能ラグランジュ的速度・濃度計測システムの開発と乱流/非乱流界面拡散場におけるラグランジュ的統計量特性の実験的解明

(2) 乱流/非乱流界面拡散・反応場のDNS(Direct Numerical Simulation)および、DNS、LES(Large Eddy Simulation)と反応スカラ量に対するPDF数値シミュレーションの

ハイブリッド計算による分子混合モデルの検証。

## 3. 研究の方法

### 研究目的(1)について

液相中で乱流/非乱流界面を含む高シュミット数物質拡散場のラグランジュ的統計量を明らかにするための速度・濃度同時計測システムの構築した。まず2次元PIV・LIF同時計測システムを開発し、無反応蛍光物質(ローダミンB)を使用して、格子乱流について、2次元平面内での速度2成分・濃度同時計測を行った。

一方、反応濃度場については、熱膜プローブと吸光スペクトル法による吸光ファイバプローブにより、2次元噴流について、2次の化学反応場(A+B → P: 物質Aを物質Bを含む主流中に放出して反応場を作成する)における速度と各物質濃度の瞬間同時計測を行った。

### 研究目的(2)について

DNSによる乱流/非乱流界面近傍の化学反応の計算対象は、上述の実験と同じ2次の化学反応を伴う2次元噴流とした。連続の式、Navier-Stokes方程式および保存スカラ量である混合分率の輸送方程式を解いた。また、化学反応項に対するモデル化は行わず反応項の直接計算を行った。

DNSとPDF法のハイブリッド計算においては、連続の式、Navier-Stokes方程式および保存スカラ量である混合分率の輸送方程式を解くことで速度場と混合分率を計算し、反応性スカラ量の結合確率密度関数に対する輸送方程式を多数の計算粒子を用いたMonte Carlo法により解いた。本研究では、分子混合モデルであるCurlモデルの混合時間スケールを化学反応の影響を受けない保存スカラ量から、モデルパラメータを用いることなく直接算出する手法を提案し、その手法の有効性を検討した。計算対象は上記と同じ2次の化学反応を伴う2次元噴流場である。

LESとPDF法のハイブリッド計算においては、ADM法(Adaptive Deconvolution Model Method)を基にした陰的LESにおいて、反応項をモデル化するためにPDF法を用いた。なお、本計算においては2種類の分子混合モデル、すなわちCurlモデルおよびIEMモデルを使用し、それらの混合時間スケールをLESにより直接計算される保存スカラ量からモデルパラメータを用いることなく直接算出する手法を用いた。計算対象は上記と同じ2次の化学反応を伴う2次元噴流場である。

## 4. 研究成果

「3. 研究の方法」に関して

PIVとLIFの同時計測に関して図1に示すような水路に対して、2台の高速度カメラを

用いた計測システムを構築し、速度場と濃度場のどちらも精度良く計測できることを確認した。図2に、格子間隔  $M$  や格子棒の主流に対する垂直方向の厚み  $t$  の異なる数種類の格子乱流後流の無反応蛍光物質の濃度混合層厚さの主流方向 ( $x$ ) 変化を PIV と LIF の同時計測から算出した結果を示す。図より、主流方向距離を  $M$  で、混合層厚さを  $t$  で無次元化することにより、各正方格子乱流による濃度拡散のスケージングが可能であることが明らかとなった。このことは、正方格子乱流による濃度拡散においては、格子幅  $t$  が支配的なパラメータであり、 $t$  が増加すると乱流混合層も増加することを示している。

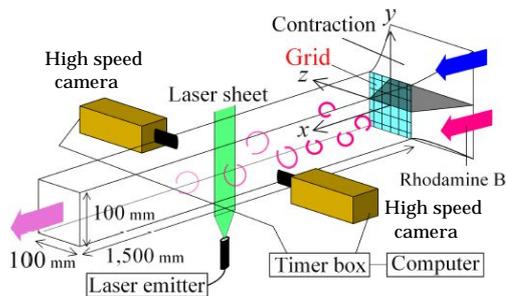


図1. PIV-LIF 同時計測システムの概略図

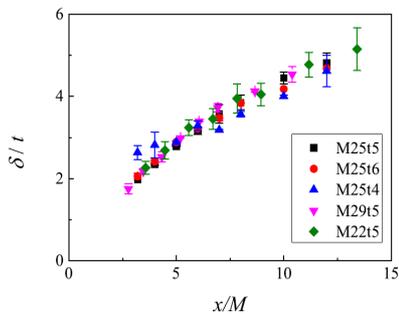


図2. 格子乱流後流の濃度混合層厚さ

### 「3. 研究の方法」 に関して

実験には吸光ファイバプローブと熱膜プローブを組み合わせた複合プローブを用いた。本実験では図3に示すように噴流の進行方向と周囲流体との相対位置により乱流/非乱流界面を Leading edge と Trailing edge に分類し、それらの edge の抽出によって条件付した各種統計量を算出した。図4に、Leading edge と Trailing edge 近傍における条件付反応速度  $\langle w \rangle = Da \langle \frac{A_B}{A_0 B_0} \rangle$  を示す。ここで、 $A, B$  は物質 A, B の瞬時濃度を示し、添え字 0 は初期濃度を表す。また、 $Da$  はダムケラー数であり、 $Da = k (A_0 + B_0) d / (U_j - U_a)$  で定義される。ここで、 $k$  は反応速度係数、 $d$  は噴流出口幅、 $U_j$  は噴流出口速度、 $U_a$  は周囲流体の速度であり、本研究では  $Da = 11.7$  である。なお、図中  $U$  は主流方向速度、 $t$  は時間、 $\lambda$  は Taylor のマイクロスケールを表しており、 $\lambda$  は各  $x$  位置での中心軸上で評価されている。図より、条件付反応速度  $\langle w \rangle$  は Leading edge 近傍の方が Trailing edge 近傍

より大きくなることが明らかとなった。これは界面近傍では反応物質 A が不足する傾向にあるため、反応物質 A をより多く含む leading edge 近傍において生成物質 P の生成速度が大きくなり、生成物質濃度が大きくなるからであると考えられる。また、図には掲載していないが、条件付平均濃度分布の Leading edge と Trailing edge 近傍の差は無反応極限 ( $Da = 0$ ) より反応がある場合の方が大きく、 $Da = 11.7$  の場合より瞬間反応極限 ( $Da \rightarrow \infty$ ) の場合の方が Leading edge と Trailing edge の間の違いが大きいことが明らかとなった。つまり、 $Da$  の増加とともに界面の向きの違いによる条件付平均濃度分布の差が大きくなる。したがって、 $Da$  が大きいほど (反応が速いほど)、乱流・非乱流界面の特性が界面近傍の反応場に及ぼす影響が大きくなると考えられる。これは、反応流のモデリングにおいて、反応速度が大きい場合には乱流/非乱流界面の特性を適切に考慮することが重要になることを示唆する結果である。

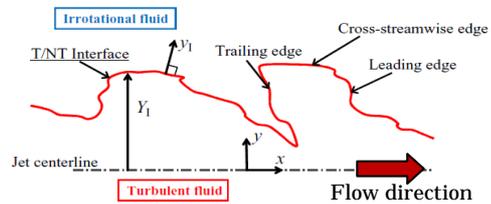


図3. 乱流 / 非乱流界面近傍の分類

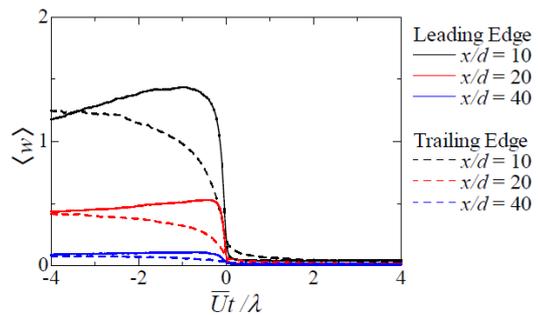


図4. 乱流 / 非乱流界面近傍の条件付平均反応速度

### 「3. 研究の方法」 に関して

DNS により得られた生成物濃度  $p$  と乱流/非乱流界面の関係を図5に示す。ここで、生成物濃度  $p$  は量論濃度、すなわち生成物の最大濃度  $p_0$  で無次元化してあり、乱流/非乱流界面は白色の実線で示してある。また、図中の  $d$  は噴流出口幅を示している。図より、生成物はほぼ乱流領域内部に存在することが分かる。また、図6に乱流/非乱流界面近傍で条件付けされた生成物質の平均生成率  $\langle S_p \rangle = Da \langle \frac{A_B}{A_0 B_0} \rangle$  を示す。ただし、図中では、ハット記号は初期濃度  $A_0, B_0$  による無次元化を表し、 $y_1$  は乱流/非乱流界面からの距離を表す。図より、条件付平均生成率は Trailing edge において最も小さいことがわかる。また、

$Da$ が大きくなるにつれ、その差も大きくなる  
ことが明らかとなった。これは、上記で示  
した実験と整合する結果である。このことか  
ら、速い化学反応を計算する際には界面の状  
態が重要になることが数値計算によっても  
示唆された。

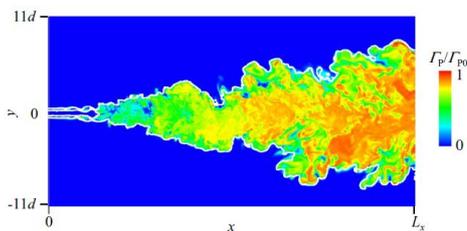


図 5. 生成物濃度および乱流 / 非乱流界面  
の瞬時場

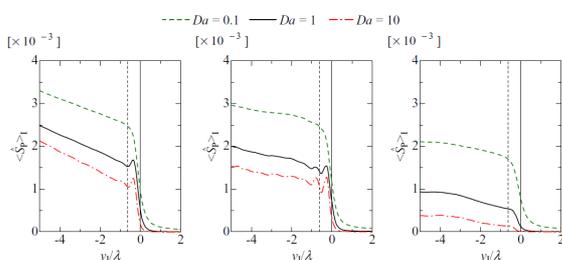


図 6. 乱流 / 非乱流界面近傍の  
条件付平均生成率

### 「3. 研究の方法」 に関して

図 7 に計算領域中の計算粒子に、生成物質  
P の瞬時濃度  $\rho_p$  を表す色をつけて表示す  
ることで濃度場を可視化したものを示す。図よ  
り、噴流出口近傍では噴流流体と周囲流体の  
境界付近にのみ生成物質が存在することが  
分かる。そして、下流に向かうにつれて噴流  
が発達し、生成物質が噴流内部全体に広く分  
布するようになる。図 8 に粒子数を 38,880  
個とした PDF 法により得られた反応性物質 A,  
B の無次元化された平均濃度の  $x/d = 10, 25$   
における  $y$  方向分布をそれぞれ示す。ただし、  
分子混合モデルとして Curl モデルを使用し、  
モデルに必要な混合時間スケール  $\tau_m$  を保存  
スカラである混合分率  $\phi$  を用いて以下のよ  
うに与えた。

$$\tau_m^{(n)} = \frac{\langle \phi^2 \rangle_{(n,m)} / \langle \phi \rangle_{(n,m)}^2}{\langle \phi \rangle_{(n,m)} - \langle \phi \rangle_{(n,m)}^2}$$

ここで、 $N^* = D(\phi / x_j)^2$  はスカラ散逸率で  
あり、 $n, m$  は粒子を区別する番号であり、今  
回は物理空間で最短距離にいる二つの粒子  
で計算された。なお、図 8 中の横軸  $y$  は平均  
混合分率の  $y$  方向分布の半値幅  $b$  で無次元  
化されている。また、図中には DNS による計  
算結果を併せて示してある。図より  $x/d = 25$   
の断面では PDF 法により得られた反応性物質  
の平均濃度分布が  $Da$  によらず DNS の結果と  
非常に良く一致しており、噴流下流では平均

濃度分布を正確に計算できていることが分  
かる。 $x/d = 10$  の断面では  $Da$  が高い場合  
にはわずかに PDF 方の結果と DNS の結果に差違  
が生じている。これは  $Da$  が大きい場合には  
反応が噴流上流で活発に進行するため、PDF  
法と DNS での分子混合の違いが反応の進行の  
程度に大きく影響を与え、平均濃度分布の違  
いとなって現れたものだと考えられる。以上  
のように、PDF 法により計算された平均濃度  
は  $Da$  が大きくなるにつれ DNS との違いが目  
立つようになるものの、化学反応が生じるこ  
とによる平均濃度分布の変化を PDF 法により  
捉えることができていることがわかる。この  
ことより本研究で提案した、分子混合モデル  
の混合時間スケール  $\tau_m$  を保存スカラ場から  
直接算出する手法の有効性が確認された。

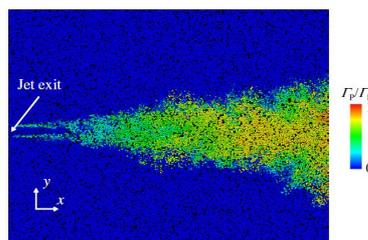


図 7. PDF 法により計算された生成物の  
瞬間濃度場

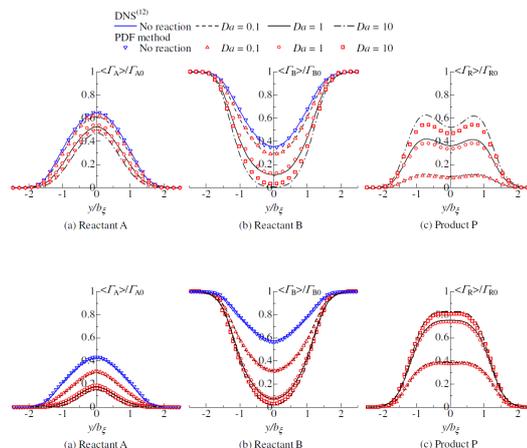


図 8. 乱流 / 非乱流界面近傍の  
条件付平均反応率

### 「3. 研究の方法」 に関して

ADM 法に基づいた LES と PDF 法を組み合わせ  
た本計算手法においても、前述の DNS と PDF  
法を組み合わせた方法と同様に速度場とス  
カラ場を精度良く計算でき、統計量が DNS に  
よる計算値と良く一致することが示された。  
また、これらの結果は Curl モデルでも IEM  
モデルでも同様であり、混合モデルに依存し  
ないことも確認された。図 9 に、Curl モデル  
を使用し、粒子数を 30,000 個とした PDF 法  
により得られた  $x/d = 25$  の噴流中心におけ  
る反応物 A と生成物 P の確率密度関数を示す。  
また、図には DNS による計算結果も併せて示  
してある。図より、LES と PDF 法のハイブリ  
ッド型の計算手法である本計算は、DNS の結

果と良く一致することが分かり，LES と PDF 法を組み合わせた本計算手法の有効性が確認された。

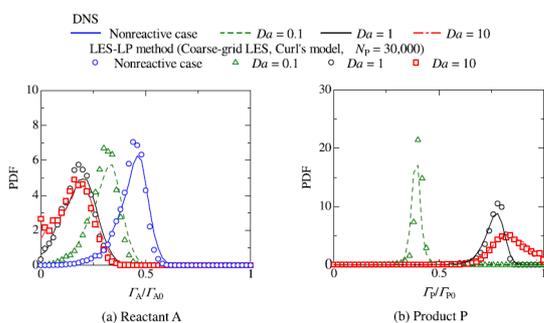


図9. 噴流中心における反応物質 A と生成物質 P の確率密度関数

## 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 37 件)

Tomoaki. Watanabe, Yasuhiko. Sakai, Koji. Nagata, Yasumasa. Ito, Large eddy simulation study of turbulent kinetic energy and scalar variance budgets and turbulent/non-turbulent interface in planar jets, 査読有, Fluid Dynamics Research, 2015, Vol. 48, 21407.

DOI: 10.1088/0169-5983/48/2/021407

Tomoaki Watanabe, Yasuhiko Sakai, Kouji Nagata, Yasumasa Ito, Toshiyuki Hayase, Turbulent mixing of passive scalar near turbulent and non-turbulent interface in mixing layers, 査読有, Physics of Fluids, 2015, Vol. 27, 85109.

DOI: 10.1063/1.4928199

Tomoaki Watanabe, Yasuhiko Sakai, Kouji Nagata, Yasumasa Ito, Toshiyuki Hayase, LES-Lagrangian particle method for turbulent reactive flows based on the approximate deconvolution model and mixing model, 査読有, Journal of Computational Physics, 2015, Vol. 294, pp. 127-148.

DOI: 10.1016/j.jcp.2015.03.038

Tomoaki Watanabe, Yasuhiko Sakai, Kouji Nagata, Osamu Terashima, Takashi 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, Vol. 83, pp. 768-780.

DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.12.008

Tomoaki Watanabe, Yasuhiko Sakai,

Kouji Nagata, Yasumasa Ito and Toshiyuki Hayase, Reactive scalar field near the turbulent/non-turbulent interface in a planar jet with a second-order chemical reaction, 査読有, Physics of Fluids, 2014, Vol. 26, 105111.

DOI: 10.1063/1.4900403

Takahiro Naito, Tomoaki Watanabe, Yasuhiko Sakai, Kouji Nagata and Yasumasa Ito, Concentration measurement in a planar liquid jet with a chemical reaction by using the improved concentration measurement system based on the light absorption, 査読有, Journal of Fluid Science and Technology, 2014, Vol. 9, 14-00191.

DOI: 10.1299/jfst.2014jfst004

鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 長谷川豊, 牛島達夫, PLIF 法計測による統計分布に及ぼす時間変化/変動ノイズの影響予測 (量子収率の時間変化およびレーザ・カメラゲイン変動の影響予測式と実験的検証), 査読有, 日本機械学会論文集, 2014, Vol. 80, 14-00053.

DOI: 10.1299/transjsme.2014fe0114

内藤亮啓, 渡邊智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 伊藤靖仁, 反応を伴う液相二次元噴流における乱流・非乱流界面近傍の条件付統計量, 査読有, 日本機械学会論文集, 2014, Vol. 80, FE0228

DOI: 10.1299/transjsme.2014fe0228

渡邊智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 寺島修, 久保貴, 化学反応を伴う液相噴流中の条件付統計量, 査読有, 日本機械学会論文集(B編), 2013, Vol. 79, pp. 2053-2065.

DOI: 10.1299/kikaib.79.2053

渡邊智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 寺島修, 伊藤靖仁, 早瀬敏幸, 直接数値計算法と確率密度関数法による反応性二次元噴流の数値計算, 査読有, 日本機械学会論文集(B編), 2013, Vol. 79, pp. 2434-2445.

DOI: 10.1299/kikaib.79.2434

[学会発表](計 36 件)

Yasuhiko Sakai, Koji Nagata, Yasumasa Ito, Koji Iwano, Toshiyuki Hayase, Tomoaki Watanabe, Yi Zhou, Investigation of Non-equilibrium Turbulence and Its Application to Flow Control, 15th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2015), 2015 年 10 月 28 日, Sendai (Japan).

Yi Zhou, Koji Nagata, Yasuhiko Sakai, Yasumasa Ito, On the Evolution of Turbulence Characteristics in Single-square-grid-generated turbulence, Turbulence Seminars Autumn Term 2015, 2015 年 10 月 22 日, 口

ンドン(イギリス).

Yasumasa Ito, Tomoyuki Watanabe, Kouji Nagata, Yasuhiko Sakai, Kouji Iwano, Scalar diffusion in the near field of grid-generated turbulence, 5th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows(ICJWSF2015), 2015年06月15日, スtockホルム(スウェーデン).

鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 長谷川豊, 牛島達夫, 物質拡散PIV計測における時間変化ノイズの影響の予測と因子間比較, 日本機械学会東海支部 第64期総会・講演会, 2015年03月14日, 中部大学(愛知).

Tomoaki Watanabe, Yasuhiko Sakai, Kouji Nagata, Osamu Terashima, Yasumasa Ito and Toshiyuki Hayase, Effect of Free Stream Turbulence on the Entrainment Characteristics of Jets, 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, 2014年11月23日, サンフランシスコ(アメリカ)

内藤亮啓, 渡邊智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 伊藤靖仁, 反応を伴う液相二次元噴流の乱流・非乱流界面近傍での速度・濃度統計量に関する研究, 日本流体力学会年会2014, 2014年09月16日, 東北大学川内北キャンパス(宮城).

Tomoyuki Watanabe, Yasumasa Ito, Kouji Nagata and Yasuhiko Sakai, Scalar mixing near turbulence-generating grids, The 16th International Symposium on flow Visualization, 2014年06月25日, Okinawa(Japan).

Tomoaki Watanabe, Yasuhiko Sakai, Kouji Nagata, Osamu Terashima, Yasumasa Ito and T. Hayase, Characteristics of Turbulent/Non-Turbulent Interface in a Turbulent Planar Jet with a Chemical Reaction, American Physical Society 66th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, 2013年11月24日, ピッツバーグ(アメリカ).

内藤亮啓, 渡邊智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 伊藤靖仁, 寺島修, 反応を伴う液相二次元噴流の乱流・非乱流界面近傍の濃度統計量に関する研究, 日本機械学会第91期流体工学部門講演会, 2013年11月09日, 九州大学(福岡).

Tomoaki Watanabe, Yasuhiko Sakai, Kouji Nagata, Yasumasa Ito, Osamu Terashima and Toshiyuki Hayase, DNS-PDF Simulation of Turbulent Mixing in a Reactive Planar Jet, 13th International Conference on Systems Simulation, 2013年11月8日, シンガポール(シンガポール).

〔図書〕(計 1 件)

鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 長谷川豊, 森北出版, PIV ハンドブック(第二版)「第9章」, 2014, 出版予定

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

なし

取得状況(計 0 件)

なし

〔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・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号: 20162274

### (2) 研究分担者

角田 博之 (TSUNODA HIROYUKI)

山梨大学・総合研究部・准教授

研究者番号: 10207433

久保 貴 (KUBO TAKASHI)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号: 20372534

鈴木 博貴 (SUZUKI HIROKI)

山口大学・理工学研究科・助教

研究者番号: 10626873

### (3) 連携研究者

寺島 修 (TERAHIMA OSAMU)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号: 50570751

長田 孝二 (NAGATA KOUJI)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号: 50274501

伊藤 靖仁 (ITOU YASUMASA)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号: 40346078