

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 4 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289033

研究課題名(和文)空間フィルタ流速計の高度化と気泡乱流の3次元・マルチスケール分析

研究課題名(英文)Application of Spatiotemporal Filter Velocimetry to Three-dimensional Multiscale Analysis of Turbulent Bubbly Flow

研究代表者

細川 茂雄 (Hosokawa, Shigeo)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10252793

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：気泡流における乱流モデルの高精度化は種々の機器等の設計・開発の効率化・低コスト化を図る上で喫緊の課題となっているが、そのためには気泡を含む流れ場における乱れの特性の詳細な理解が不可欠である。本研究では、著者らが開発した高精度流速計測手法である時空間フィルタ流速計を高度化・機能化し、複雑流動を高精度・高時間・高空間分解能で速度計測できる手法に発展させることにより、従来手法では分析困難であった気泡を含む流れ場内の乱流特性を詳細に調査し、気泡が液相乱れに及ぼす影響に関する知見を得るとともに既存の乱流モデルの気泡流への適用性を調べた。

研究成果の概要(英文)：Development of an accurate turbulence model for predicting bubbly flows are in demand for efficient design and development of equipment in which bubbly flow takes place. Understanding turbulence structure in bubbly flow is therefore necessary for the development. In this study, spatiotemporal filter velocimetry (SFV) is improved and coupled with photobleaching molecular tagging velocimetry for highly accurate velocity measurement with high spatial and temporal resolutions to capture turbulence structures in bubbly flows. The improved SFV is applied to measure turbulence properties and turbulence kinetic energy budgets in bubbly flows in a vertical square duct. Effects of presence of bubbles on turbulence properties and applicability of available turbulence models for single-phase flows to bubbly flows are discussed based on the measured data.

研究分野：混相流工学

キーワード：流体工学 混相流 流体計測 気泡 乱流

1. 研究開始当初の背景

発電プラント，ボイラ等の沸騰を伴うエネルギープラント，気泡塔などの化学プラント，マイクロバブルによる水環境改善など多くの工業機器・システムにおいて気液二相気泡流が見られ，その流動が詳細に理解できれば機器・システムの高効率化，高性能化，省エネルギー化，低環境負荷化，合理的設計，サステイナブル社会の実現に大きく貢献できる．特に，気泡流における乱流モデルの高精度化は機器等の設計・開発における数値予測手法の精度向上に必須であり，当該機器の設計・開発の高効率化・低コスト化を図るための喫緊の課題となっている．著者らは，レーザドップラ流速計や独自開発したフォトブリーチング分子タグ法を用いて気泡流の乱流特性や乱れエネルギー収支を調査するとともに数値計算も実施し，両者の比較から壁面近傍の乱れの生成領域に相対速度の大きい気泡が存在する場合に既存モデルの予測精度が低く，予測精度向上の鍵が壁面近傍のせん断誘起乱れの生成と気泡および気泡誘起擬似乱れの相互作用に伴う乱流構造の変化を精密に理解する点にあるとの見解に達した．したがって，より精度の高いモデル化のためには，相対速度が乱れ速度より大きい気泡流の壁面近傍における乱れの生成・拡散・消散過程および乱れの構造の詳細な分析が不可欠である．

上記のような乱れの構造を理解するためには速度を高時間・空間分解能かつ高精度で計測し，乱流統計量や乱れエネルギー収支を精密に捉える必要がある．乱流の速度計測手法は，熱線流速計から非接触計測法であるレーザドップラ流速計 (LDV)，粒子画像流速計測法 (PIV/PTV) へと発展してきた．流れ場の1点でのみ流速を測定できる LDV に比べ，PIV は瞬時流速の空間分布を測定できるため近年幅広く利用されている．しかし，計測精度，時間・空間分解能，ダイナミックレンジ，複雑乱流場への適用性の面では，未だに LDV の方が優れている．このため，LDV のように高時間分解能で流れ場の流速を高精度で測定でき，かつ PIV のように瞬時速度の空間分布を計測できる計測手法の開発が強く望まれている．著者らは，LDV 並みの精度，空間分解能を有し，速度の空間分布を測定できる計測手法として時空間フィルタ流速計 (Spatiotemporal Filter Velocimetry: SFV) を開発し，その基本性能を確認した．本手法を進展させることにより，気泡乱流場の詳細かつ精密な速度計測が期待出来る．

2. 研究の目的

気泡を含む流れ場における乱れの特性の詳細な理解が求められているが，既存計測手法のみでは，その把握が容易ではない．本研究では，著者らが開発した高精度流速計測手法である時空間フィルタ流速計 (SFV) を高度化・高機能化し，複雑流動を高精度，高時間・空間分解能で速度計測できる手法に発展させ

る．また，本手法を用いて気泡を含む流れ場内の乱流特性を詳細に調査し，気泡が液相乱れに及ぼす影響を理解するとともに気泡乱流モデルを検証することを目的とする．

3. 研究の方法

本研究では主に鉛直ダクト内気泡乱流を対象とし，その分析のために時空間フィルタ流速計を高度化した．まず，乱れのカスケード過程を調べるため，乱流スペクトルを幅広い波数範囲で測定する必要がある．このためには，SFV の更なる高解像度化および高データレート化が必須である．しかし，トレーサ粒子を対象とした計測では，トレーサ粒子が測定体積を通過する時刻を制御できないため，データが不等間隔になるとともに，データの欠落時間が生じ，乱流スペクトルの高波数領域で精密な測定が困難である．そこで，著者らが別途開発したフォトブリーチング反応を用いた分子タグ形成法と SFV を組み合わせ，高データレート・高解像度速度計測を実現した (図 1)．分子タグは任意時刻，任意位置に形成することが可能であり，測定領域に一定時間間隔でタグを形成できる．その結果，高データレートで等時間間隔の速度データが得られる．

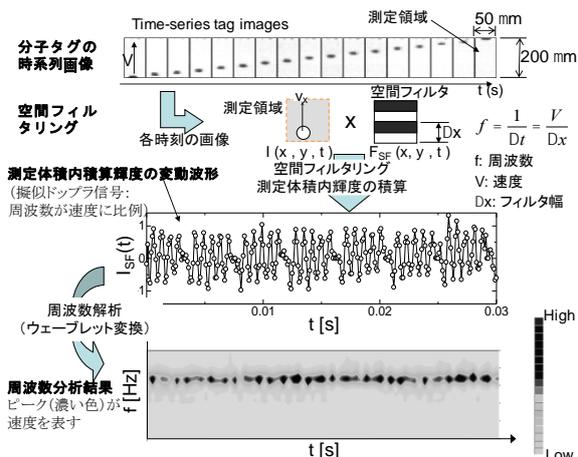


図 1 分子タグ時空間フィルタ流速計

次に，気泡流における乱れエネルギー収支計測を評価するため，上記で開発した分子タグ法と SFV の組み合わせを拡張し，速度および速度勾配の精密測定手法を開発した．本手法は，測定平面内に 2 x 2 配列で 4 つの分子タグ (直径 40 μm，ピッチ 100 μm) を形成し，高速度カメラで撮影した後，撮影画像から各分子タグの位置および速度を SFV で測定する (図 2)．なお，タグ生成位置を精密に調整するため，集光用レンズに対するレーザ光の入射角  $\theta_{in}$  を変化させて焦点面における光軸から集光点 (タグ生成点) の距離  $t$  を調整した (図 2 参照)．流体内において，その重心から  $dr$  離れた点の速度  $V$  は次式で表せる．

$$V = V_0 + A dr \tag{1}$$

ここで， $V_0$  は重心の速度， $A (= (\nabla V)^T)$  は速度勾

配テンソルである。4つの分子タグで囲まれた領域内において、流れが2次元かつAが一定と仮定すると、 $\mathbf{V}$ および $d\mathbf{r}$ を2点以上で測定すれば、式(1)から $\mathbf{V}_0$ およびAを算出できる。本研究では、4点において測定した $\mathbf{V}$ および $d\mathbf{r}$ から最小二乗法を用いて $\mathbf{V}_0$ およびAを算出した。本手法により、相関法により分子タグの変形からAを算出する従来手法に比べ、乱れエネルギー収支評価精度を+15%から+10%に向上でき、処理時間も50%低減できた。

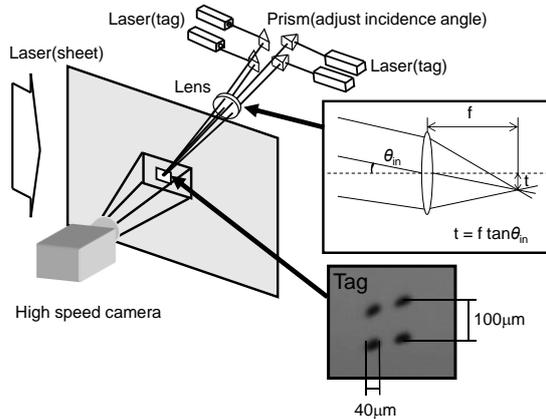


図2 乱れエネルギー収支計測法の光学系

SFVは矩形検査領域を用いるため、デカルト座標(x-y)に沿わない界面もしくは境界が存在した場合、界面/境界を内包する検査領域が生じ、測定精度・空間分解能向上が困難になる場合がある。また、界面に対して接線もしくは法線方向の速度分布や速度勾配は、計測した速度から補間して求めることが多く、不確かさが増加する場合が多い。そこで、界面近傍の速度および速度勾配を精密に測定するため、SFVを境界適合検査領域における速度計測手法に拡張した。本手法では、界面/境界に沿った任意の検査領域を作成し、座標変換を用いてデカルト座標系(ξ-η)に作成した時空間フィルタ $F_{SF}(\xi, \eta, t)$ を実空間の検査領域に投影し(図3参照)積分輝度 $I_{SF}$ を求める。この際、非矩形の検査領域に対する積分を容易にするため、検査領域内外を判別するフィルタ関数 $M(x, y, t)$ (検査領域内:1, 領域外:0)を用いると $I_{SF}$ は次式で計算できる。

$$I_{SF} = \iint I(x, y, t) M(x, y, t) F_{SF}(\xi(x, y, t), \eta(x, y, t), t) dx dy \quad (2)$$

ここで、積分領域は検査領域を包含する任意の領域である。また、界面/境界が時間的に移動する場合は、 $M$ および $F_{SF}$ を界面/境界に固定して移動することにより、界面/境界に固定した座標系における速度が求められる。

#### 4. 研究成果

前述のSFVを高度化した手法を気泡乱流に適用し、乱流特性を詳細に調査し、気泡が液相乱れに及ぼす影響を調べた。また、実験結果に基づき乱流モデルの気泡流への適用性を

調べた。主な成果を以下に示す。

図4は鉛直ダクト内気泡乱流において、フォトブリーチング反応を利用して流れ場中に周期的に形成した分子タグの速度をSFVで測定することにより取得した乱流スペクトルの一例である。分子タグ法とSFVを融合することにより、幅広いスケールで乱流スペクトルを取得できることが確認できる。本手法による乱流スペクトル分析を通じて、本研究で対象とした実験範囲内では、乱流スペクトルの高波数領域での勾配は-5/3乗則と大きく異なること、および単相流に比べて乱流の生成領域が壁面側に広がり粘性底層が薄くなる傾向があることがわかった。

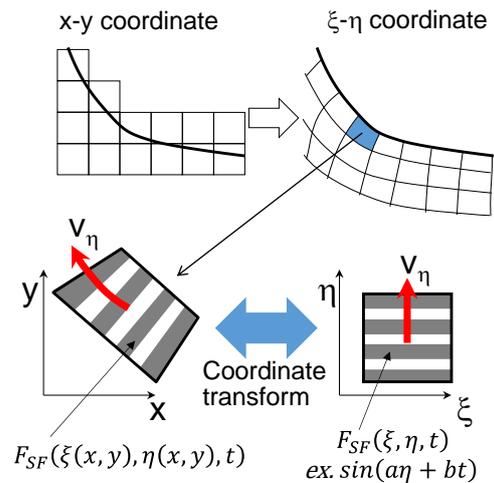


図3 時空間フィルタ流速計の境界適合測定領域への拡張

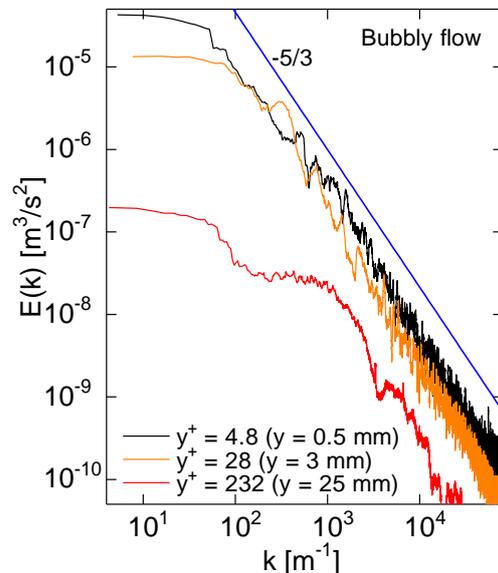


図4 鉛直ダクト内気泡流の乱流スペクトル

気泡誘起擬似乱れは、気泡が周囲液体との相対運動によりその周囲に誘起する流動に起因する。そこで、開発した境界適合検査領域に拡張したSFVを用いて、単一球形流体粒子を対象に流体粒子内外速度分布を詳細に測定した。図5は単一流体粒子まわりの流跡線と

SFVにより測定した速度ベクトルを示す。界面近傍では、界面に適合した検査領域を用いており、界面近傍まで詳細な速度分布が得られることがわかる。また、上図から下図に向かって流体粒子に混入した界面活性剤濃度が高くなっており、上図は界面活性剤が入っていない清浄系、中図は中程度の汚染系、下図は流体粒子内の流動がほぼ無くなる完全な汚染系である。図6は各条件における界面速度の周方向分布を示しており、 $\theta = 0 \text{ deg.}$ は流体粒子先端、 $\theta = 180 \text{ deg.}$ は流体粒子後端を示す。

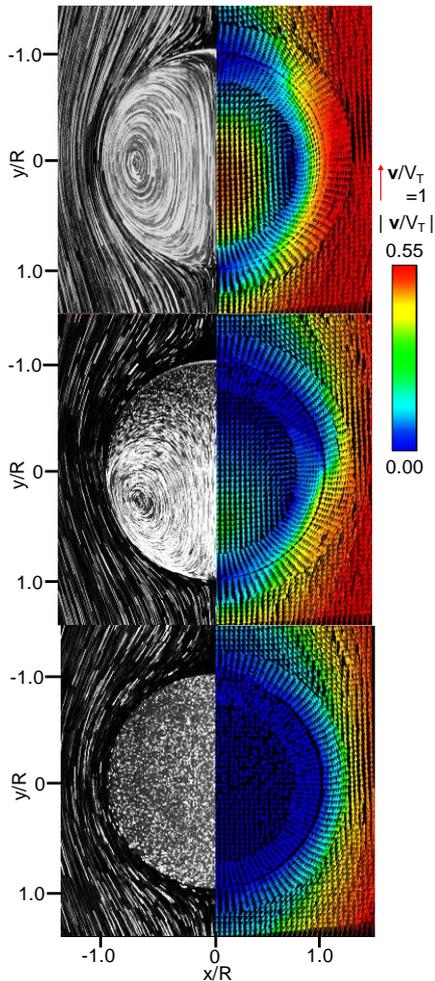


図5 流体粒子周りの流跡線と速度ベクトル

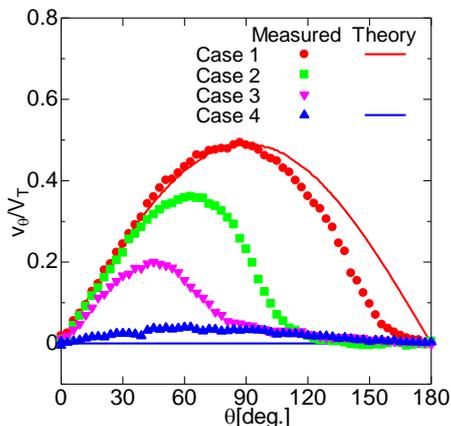


図6 単一液滴の界面速度(Case 1:清浄系, Case 2~4:汚染系, 2→4の順に汚染度合いが高)

また、図中の曲線は清浄系および固体粒子に対する理論解である。これらの結果から、境界適合検査領域に拡張したSFVにより曲率を有する界面近傍の速度を極めて高精度に測定できること、その結果、界面速度、界面における粘性応力などを良好に評価できること、ならびに汚染度合いにより流体粒子が誘起する速度分布が変化することがわかった。

鉛直ダクト内気泡流を対象として、種々の条件において開発した計測システムを用いて時間平均速度分布、乱流統計量、乱れエネルギー収支、ポイド率 $\alpha$ 、気泡径分布を測定した。表1に示す条件における乱れエネルギー収支の測定結果を図7に示す。Case 0は単相流であり、Case 1~3は平均気泡径 $d$ の異なる気泡流である。単相流における測定結果から、4つの分子タグの速度をSFVで評価することにより、乱れエネルギー収支を良好に評価できることが確認できた。また、気泡流における乱れエネルギー $k$ の生成率 $P$ 、消散率 $D$ 、拡散率 $\varepsilon$ は0.1%程度の低い平均ポイド率でさえ気泡の存在により変調すること、気泡流においてはせん断による乱れエネルギーの生成率と拡散率および消散率のみではバランスしないことがわかった。後者は、気泡誘起擬似乱れの生成率 $P_B$ が存在することを示している。すなわち、本手法により測定した乱れエネルギー収支の残差から気泡誘起擬似乱れの生成率を評価できる。

気泡乱流の数値予測においてしばしば用いられる渦粘性仮定の妥当性を検討するため、測定したレイノルズ応力から算出した渦粘性係数 $\nu_t$ と低レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ モデルで使用される $\nu_t$ のモデル式を比較した(図8)。ここで、モデル式中の $k$ と $\varepsilon$ には実験値を代入している。その結果、気泡流においても渦粘性仮定と $k-\varepsilon$ モデルのモデル式は概ね妥当であることが確認できた。ただし、単

表1 実験条件

	$J_L$ [m/s]	$J_G$ [m/s]	$d$ [mm]
Case 0	$6.0 \times 10^{-2}$	0.0	-
Case 1	$6.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-4}$	0.51
Case 2	$6.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-4}$	0.83
Case 3	$6.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-4}$	1.14

$J_L$ : 液相体積流速,  $J_G$ : 気相体積流速

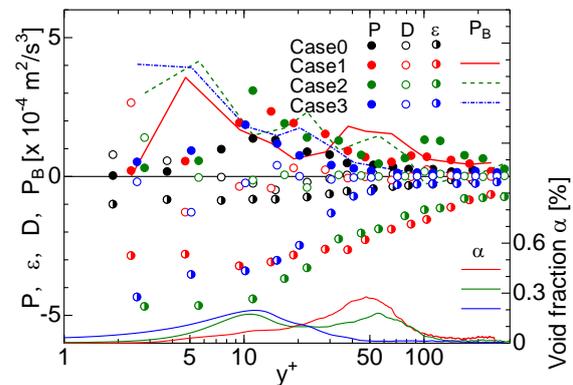


図7 乱れエネルギー収支の測定例

相流に適用した場合に比べて気泡流では $v_t$ を過少評価する傾向があり、さらなる精度には係数 $C_{\mu}$ の修正が有用と考えられる。

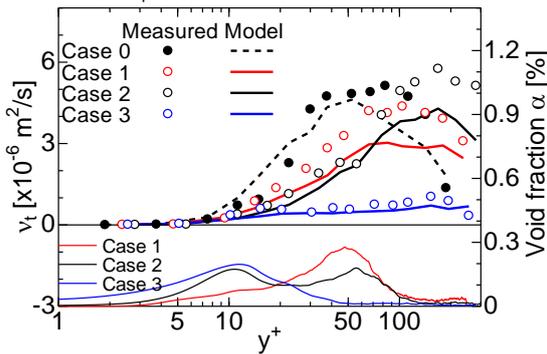


図8 渦粘性仮定の妥当性検証

同様に測定データを用いて気泡流における低レイノルズ数型  $k-\epsilon$ モデル各項のモデル式の妥当性を調べた。一例として、 $P$  と  $D$  に対する測定値とモデル式の比較をそれぞれ図9と図10に示す。比較の結果、いずれのモデル式も気泡流において各項の定性的傾向を良く捉えており、定量的にも悪くはない値を与えることがわかった。ただし、高精度予測には気泡の影響を加味したモデルの修正が望まれる。気泡誘起擬似乱れの生成率 $P_B$ に関して、既存のモデルで定性的傾向は捉えられるが、 $P_B$ を過大評価する傾向が強いため補正係数の導入が望まれること、およびその補正係数は気泡径とボイド率に依存することがわかった。

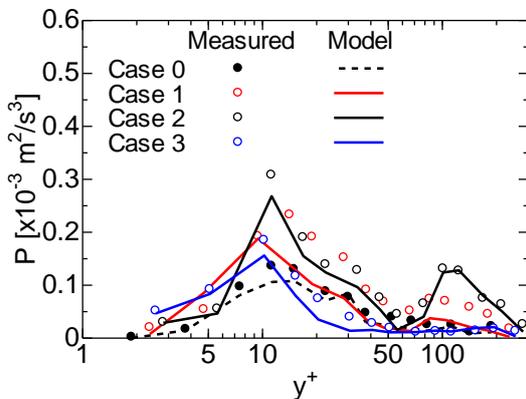


図9 乱れエネルギー生成率の比較

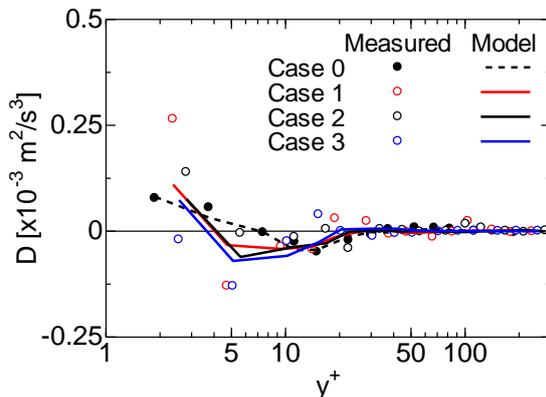


図10 乱れエネルギー拡散率の比較

さらに数値計算コードを作成し、既存乱流モデルに上記知見を反映することにより、気泡流の平均速度および乱れ分布を概ね良好に予測できる見込みが得られることを確認した。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計11件)

- ① 細川茂雄, 富山明男, 時空間フィルタ流速計を用いた混相流の速度分布計測, 化学工学, 査読無, 80巻8号, 2016, 印刷中
- ② Shigeo Hosokawa, Shudai Fujimoto, Akio Tomiyama, Gaslift Pump making use of Phase Change of Working Fluid, Applied Thermal Engineering, 査読有, 2016, In print
- ③ 北畑恭助, 細川茂雄, 富山明男, 時空間フィルタ流速計を用いた流路内速度分布及び流量の測定, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 81, No. 822, 2014, 14-00597  
DOI: 10.1299/transjsme.14-00597
- ④ Shigeo Hosokawa, Kosuke Hayashi, Akio Tomiyama, Void Distribution and Bubble Motion in Bubbly Flows in a 4 x 4 Rod Bundle, Part I: Experiments, Journal of Nuclear Science and Technology, 査読有, Vol. 51, Issue 2, 2014, 220-230  
DOI:10.1080/00223131.2013.862189
- ⑤ Shigeo Hosokawa, Satoru Ikeda, Akio Tomiyama, Measurement of Bubbly Flow using Spatiotemporal Filter Velocimetry coupled with Molecular Tagging, AIP Conference Proceedings, 査読有, Vol. 1592, 2014, 224 - 231  
DOI: 10.1063/1.4872108
- ⑥ 細川茂雄, 北畑恭助, 林公祐, 富山明男, 時空間フィルタ流速計による単一液滴に作用する界面剪断応力の評価, ながれ, 査読無, Vol. 33, No. 6, 2014, 509 - 512
- ⑦ Yasunari Maeda, Shigeo Hosokawa, Yuji Baba, Akio Tomiyama, Yoshiyasu Ito, Generation mechanism of micro-bubbles in a pressurized dissolution method, Experimental Thermal and Fluid Science, 査読有, Vol. 60, 2015, 201 - 207  
DOI:10.1016/j.expthermflusci.2014.09.010
- ⑧ Shigeo Hosokawa, Takaaki, Matsumoto, Akio Tomiyama, Tomographic Spatial Filter Velocimetry for Three-Dimensional Measurement of Fluid Velocity, Experiments in Fluids, 査読有, Vol. 54, 2013, 1597  
DOI: 10.1007/s00348-013-1597-0
- ⑨ Shigeo Hosokawa, Takaaki, Matsumoto, Akio Tomiyama, Measurement of Bubble Velocity using Spatial Filter Velocimetry, Experiments in Fluids, 査読有, Vol. 54, 2013, 1538  
DOI: 10.1007/s00348-013-1538-y
- ⑩ Shigeo Hosokawa, Ikumi Mikiyama, Akio Tomiyama, Development of a Submersible Small Fiber LDV Probe and Its Application to Flows in a 4x4 Rod Bundle, Nuclear Engineering and Design, 査読有, Vol. 263,

- 2013, 342 – 349  
DOI: 10.1016/j.nucengdes.2013.06.009
- ⑪ Shigeo Hosokawa, Akio Tomiyama, Bubble Induced Pseudo Turbulence in Laminar Pipe Flows, International Journal of Heat and Fluid Flow, 査読有, Vol. 40, 2013, 97 – 105  
DOI:10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.01.004  
〔学会発表〕 (計 20 件)
- ① Shigeo Hosokawa, Hiroki Karasawa, Ryosuke Iwai, Akio Tomiyama, Effect of Bubbles on Turbulence Kinetic Energy Budget in Vertical Duct flow, 18th Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon 2016, 2016.7.4-7., Lisbon (Portugal)
- ② Shigeo Hosokawa, Yuya Masukura, Akio Tomiyama, Experimental Evaluation of Surfactant Concentration at an Interface of Single Spherical Drop, The 9th International Conference on Multiphase Flow, ICMF2016, 2016.5.22-27., Firenze (Italy)
- ③ Shigeo Hosokawa, Yuya Masukura, Akio Tomiyama, Evaluation of interfacial shear stress of single drop using spatiotemporal filter velocimetry, 7<sup>th</sup> European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting, 2015.10.11-15., Zermatt (Switzerland)
- ④ 細川茂雄, 時空間フィルタ流速計の基礎と応用事例, 冷凍空調学会研究会 (招待講演), 2015.11.27., ダイキン工業本社 (東京都)
- ⑤ 細川茂雄, 津田光彦, 小川勇磨, 富山明男, 2x2 ロッドバンドル内気泡流における乱流特性, 第 93 期日本機械学会流体工学部門講演会, 2015.11.7 – 8., 東京理科大学 (東京都)
- ⑥ 細川茂雄, 林公祐, 富山明男, 境界適合型時空間フィルタ流速計と界面活性剤濃度評価の試み, 日本機械学会研究分科会 RC263 第 6 回分科会, 2015. 9.18., 信濃町煉瓦倉庫 (東京都)
- ⑦ 益倉侑治, 細川茂雄, 林公祐, 富山明男, 球形液滴界面への界面活性剤の吸着に関する研究, 日本流体力学会年会 2015, 2015.9.26 – 28., 東京工業大学 (東京都)
- ⑧ 細川茂雄, 富山明男, 時空間フィルタ流速計と応用事例, 日本機械学会 2015 年度年次大会 (招待講演), 2015.9.14 – 16., 北海道大学 (北海道)
- ⑨ 益倉侑治, 細川茂雄, 林公祐, 富山明男, 汚染系単一球形液滴に作用するマランゴニ応力の実験的評価, 混相流シンポジウム 2015, 2015.8.4 – 6., 高知工科大学 (高知県)
- ⑩ 津田光彦, 小川勇磨, 細川茂雄, 富山明男, 2x2 ロッドバンドル内気液二相流, 第 20 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 2015.6.17 – 19., 東北大学 (宮城県)
- ⑪ Shigeo Hosokawa, Akio Tomiyama, Liquid Velocity Distribution in Turbulent Bubbly Flow in a 2x2 Rod Bundle, 9th Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS 9), 2014.11.16-19., Buyeo (Korea).
- ⑫ Shigeo Hosokawa, Akio Tomiyama, Evaluation of Interfacial Shear Stress of Single Drop using Spatiotemporal Filter Velocimetry, 17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics (LISBON 2014), 2014.7.7-10., Lisbon (Portugal)
- ⑬ 唐澤弘毅, 細川茂雄, 富山明男, 鉛直ダクト内気泡流における乱れエネルギー収支計測, 第 92 期流体工学部門講演会, 2014. 10. 25 – 26., 富山大学 (富山県)
- ⑭ 細川茂雄, 北畑恭助, 林公祐, 富山明男, 時空間フィルタ流速計による界面近傍速度測定, 理論応用力学講演会, 2014.9.26 – 28., 東京工業大学 (東京都)
- ⑮ 細川茂雄, 北畑恭助, 林公祐, 富山明男, 時空間フィルタ流速計による単一液滴に作用する界面剪断応力の評価, 日本流体力学会年会 2014, 2014.9.15 – 17., 東北大学 (宮城県)
- ⑯ 小川勇磨, 細川茂雄, 富山明男, 2x2 ロッドバンドル内気液二相流の液相速度測定, 第 19 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 2014.6.26 – 27., アオッサ (福井県)
- ⑰ Shigeo Hosokawa, Satoru Ikeda, Akio Tomiyama, Photobleaching Molecular Tagging Velocimetry and Its Application to Bubbly Flows, International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, ISMTMF2013 (Keynote Lecture), 2013.12.15., Xi'an (China)
- ⑱ Shigeo Hosokawa, Akio Tomiyama, Photobleaching Measurement of Bubbly Flow Using Spatiotemporal Filter Velocimetry Coupled with Molecular Tagging, International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, ISMTMF2013, 2013.12.15., Xi'an (China)
- ⑲ 北畑恭助, 細川茂雄, 富山明男, 空間フィルタ流速計による単一液滴内外速度の測定, 日本流体力学会年会 2013, 2013.9.12 – 14, 東京 (東京都)
- ⑳ 細川茂雄, 富山明男, 流速測定における新しいアプローチ-Imaging Spatial Filter Velocimetry (iSFV)-, 第 13 回関西伝熱セミナー (招待講演), 2013.9.6 – 7., 神戸 (兵庫県)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

細川 茂雄 (HOSOKAWA, Shigeo)  
神戸大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：10252793

### (2) 研究分担者

富山 明男 (TOMIYAMA, Akio)  
神戸大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：30211402