

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 5月27日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560167

研究課題名（和文） フォトブリーチング分子タグ法による気泡乱れエネルギー収支計測と乱流モデルの高度化

研究課題名（英文） Measurements of Turbulence Kinetic Energy Budget in Turbulent Bubbly Flows using Photobleaching Molecular Tagging Method

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

研究成果の概要（和文）：気泡を含む流れの数値予測の精度・信頼性向上には気泡乱れにおける乱れエネルギー収支に関する知見が必要であるが、測定の高難しさのため研究例は少ない。本研究では、瞬時局所速度と速度勾配を同時計測できるフォトブリーチング分子タグ法を改良し、従来手法では困難な気泡乱流場における乱れエネルギー収支を測定し、乱れエネルギー輸送方程式の各項に及ぼす気泡の影響を調べるとともに、予測精度向上に寄与できる知見を獲得した。

研究成果の概要（英文）：Understanding turbulence kinetic energy (TKE) budget in gas-liquid two-phase bubbly flows is indispensable to develop and improve turbulence models for the bubbly flows. Simultaneous measurement of velocity and velocity gradients with a spatial resolution smaller than the Kolmogorov scale is required to evaluate the TKE budget experimentally. We therefore improved a molecular tagging velocimetry based on photobleaching reaction (PB-MTV) to accurately evaluate TKE budget. We measured TKE budget in a turbulent water flow and bubbly flows in a square duct by using the PB-MTV to examine effects of bubbles on TKE budget. The experimental results will contribute to improve a numerical simulation method for turbulent bubbly flows.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：流体工学，混相流工学，流体計測

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流，分子タグ法，気泡流

1. 研究開始当初の背景

原子炉，ボイラ等の沸騰を伴うエネルギープラントや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，機器の設計・開発を支援できる数値予測手法の開発・高精度化・信頼性向上が望まれている。このためには，気泡流における乱

流モデルの高精度化・信頼性向上が必須であり，当該機器の設計・開発の効率化・低コスト化を図るための喫緊の課題となっている。これまでの研究から，円管内気泡流のような単純な体系においてさえ，既存の気泡乱流モデルでは，気泡誘起乱れを過小評価する場合がある，壁面近傍で予測精度が低下するなど，精度および信頼性に問題があることがわか

っている。

気泡流における乱流モデルの高精度化、信頼性向上のためには、乱れエネルギー輸送方程式中の各項に及ぼす気泡の影響に関する理解を深め、モデルの改良につながる知見の獲得が不可欠である。乱れエネルギー輸送方程式中の全ての項を実験的に評価するためには、瞬時局所速度勾配の計測が必須であるが、速度および速度勾配を乱れの最小スケールであるコルモゴロフスケール以下の空間分解能で同時計測することは困難である。このため、実験的に気泡流における乱れエネルギー収支を精密に評価した例は殆どない。直接数値計算などの詳細計算による流れ場理解というアプローチも考えられるが、(1)気泡流では気泡のスケールと乱流渦のスケールを包含するように計算格子を設定する必要があり、単相流に比べて計算規模が膨大になること、および(2)気液界面の取り扱いには近似が含まれており、厳密な意味での直接数値計算は極めて困難であることから単相流の直接数値計算に比べて、効率および信頼性が低いと考えられる。

以上のように、気泡乱流における乱れエネルギー輸送方程式中の各項に及ぼす気泡の影響を実験的に明らかにし、気泡乱流モデルの改良に必要な知見を充実させ、数値予測の高精度化、信頼性向上に繋げることが渴望されている。

2. 研究の目的

本研究では、瞬時局所速度と速度勾配を同時計測できるフォトブリーチング分子タグ法 (PB-MTV) を改良し、乱れエネルギー収支の評価を可能とするとともに、従来手法では困難な気泡乱流場の乱れエネルギー輸送方程式中の各項に及ぼす気泡の影響を調べ、気泡乱流場の数値予測精度向上に寄与できる知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

前述の目的を達成するため、本研究では鉛直管路内上昇気泡流を対象とし、下記の項目を実施した。

- (1) PB-MTV の計測精度向上と乱れエネルギー収支評価精度の検証
- (2) 乱れエネルギー収支に及ぼす気泡の存在の影響調査
- (3) 乱れエネルギー輸送方程式中の各項に及ぼす気泡の存在の影響把握
- (4) 気泡誘起擬似乱れの特性把握

研究代表者は主に実験装置、計測手法構築および実験データの取得と気泡乱流の現象解明に当たった。共同研究者は、主に数値計

算・モデリングの観点からの実験データの分析・現象解明を担当した。

4. 研究成果

(1) PB-MTV の計測精度向上と乱れエネルギー収支評価精度の検証

フォトブリーチング反応は、強いレーザービームにより蛍光色素が蛍光能を失う反応である。図 1 に示すように流体中の蛍光色素をレーザーシートにより発光させ、発光領域中の 1 点に強いレーザービームを短時間照射しフォトブリーチング反応を誘起すると、反応領域が黒い領域 (分子タグ) として可視化できる。このタグを CCD カメラ等で 2 時刻において撮影し、その重心位置および形状の時間変化から、速度および速度勾配が計測できる。フォトブリーチング反応励起光の照射時間は 1 ミリ秒以下、タグの最小サイズは $40 \cdot \mu\text{m}$ であり、本研究で対象とした流れ場のコルモゴロフスケール (概ね数 $100 \cdot \mu\text{m}$ 程度) より小さい。なお、分子タグは任意時刻、任意場所に任意形状で生成できるため、気泡乱流場の可視化にも非常に有益なツールである。

従来は速度勾配を計測した速度と測定位置から差分として求めることが多かったため、速度の計測誤差のみならず測定位置設定精度の悪さに起因する速度勾配の誤差が生じていた。しかし、本手法では速度勾配を直接計測するため、その測定精度が高ければ、乱れエネルギー収支を精度良く評価できると期待できる。既存の PB-MTV では、二値化したタグ形状から速度勾配を算出していたが、乱れエネルギー収支評価のためには更なる精度向上が必要である。そこで、本研究では速度勾配評価時の二値化により喪失していたグレースケール情報を利用して速度勾配を評価することにより測定精度を向上した。また、撮影レンズ系、レーザーシート光学系、タグ生成光学系も改良した。改良した PB-MTV を擬 2 次元層流吸込み流れに適用し、測定結果と数値計算結果の比較を通してその測定精度を確認した。

改良した PB-MTV を矩形ダクト内乱流に適用し、平均速度、乱流統計量、乱れエネルギー収支を測定した。その結果、単相流のみならず気泡流においても局所平均速度および乱れ強さが LDV の測定結果と良好に一致し、PB-MTV の信頼性が高いことが確認できた。また、単相流における乱れエネルギー収支を Horiuchi⁽¹⁾による平行平板間乱流の DNS の結果と比較し、PB-MTV の計測精度を検討した。この際、統計的に優位な平均値を得るために十分なデータ数を確保するため、PB-MTV の画像処理に GPGPU を導入し、計算時間を短縮した。その結果、単相流において PB-MTV を用いて測定した乱れエネルギー収支は DNS による計算結果と良好に一致し、PB-MTV が乱流の乱れエネルギー収支評価手法として有用である

ことが確認できた。

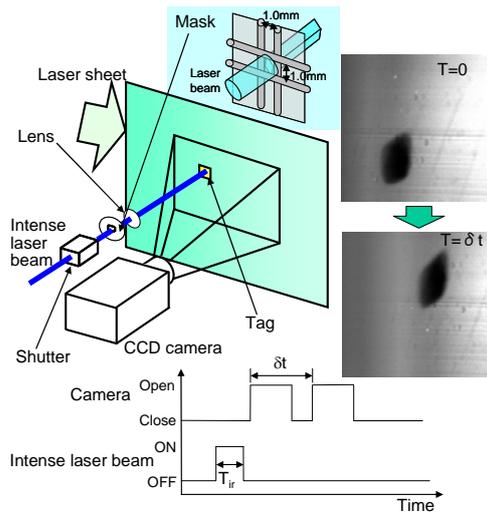


図1 フォトブリーチング分子タグ法の概略

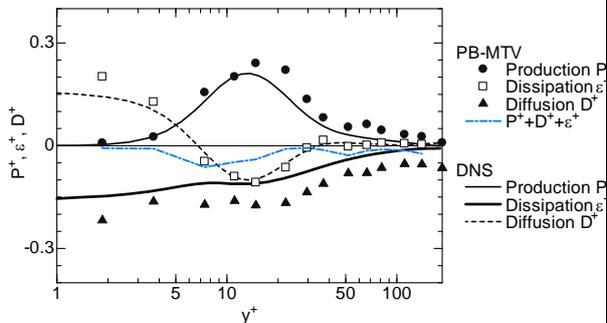


図2 正方ダクト内単層乱流の乱れエネルギー収支(PB-MTV測定値とHoriuchi⁽¹⁾のDNS結果の比較)

スケーリングした場合、壁面近傍での生成率および拡散率は気泡により変調するが、気泡が乱れエネルギーの消散率に及ぼす影響は小さい。

③ 気泡の存在による乱れエネルギー生成率の増加量は Troshko と Hassan のモデルにより定性的に評価でき、せん断誘起乱れの生成率と気泡誘起疑似乱れの生成率、拡散率、消散率の和は零になると推定できる。このことは、気泡による乱れエネルギー生成率の増加は気液間の運動量輸送に起因すること、およびせん断流および気泡により生成された乱れエネルギーはカスケード過程を経て単相流と同様に消散することを示唆している。

④ 壁面近傍を流動する気泡により乱れの発生領域が壁面近傍に拡大する。また、壁面近傍で気泡により誘起される乱れが乱れエネルギーの消散率増加に寄与する可能性がある。

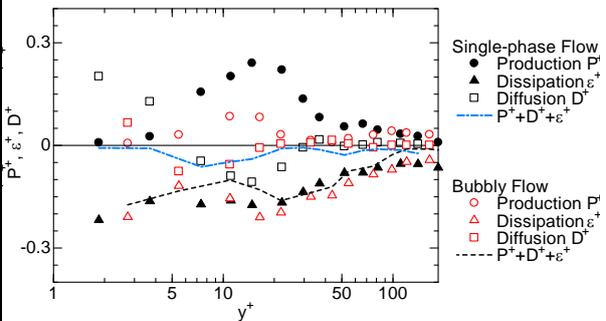


図3 気泡流と単相流における乱れエネルギー収支の比較

(2) 乱れエネルギー収支に及ぼす気泡の存在の影響調査

気泡が乱れエネルギー収支に及ぼす影響および乱流モデルの改良に有用な知見を獲得するため、鉛直正方ダクト内において発達した気泡流を実現できる実験装置を製作し、気泡が誘起した乱れとせん断流誘起乱れが共存する流れ場を対象に平均速度、乱れ強さ、乱れエネルギーおよびその収支を計測した。この際、単相流における乱れエネルギー収支も測定し、気泡が乱れエネルギー収支に及ぼす影響を検討した。なお、気泡径は 0.3 ~ 1.5 mm 程度である。得られた結果を以下に示す。

- ① PB-MTV によりバッファ領域のみならず直線底層における速度、乱れエネルギー収支を測定できることを確認した。
- ② 気泡流では気泡の存在により壁面近傍の速度勾配(摩擦速度)が増加するため乱れエネルギーの生成率、消散率がともに増加する。摩擦速度で生成率、拡散率、消散率を

(3) 乱れエネルギー輸送方程式中の各項に及ぼす気泡の存在の影響把握

気泡径がコルモゴロフスケールと同程度で気液間相対速度が断面平均体積流束程度の流れを対象として、気泡の乱れエネルギー収支に及ぼす影響を検討するとともに、標準 k -モデルおよび低レイノルズ数型 k -モデルの a priori テストを行った。その結果、以下の知見を得た。

- ① PB-MTV は乱流モデルの検証に有益である。
- ② 気泡は壁面近傍での液相速度勾配を増加させ乱れエネルギーの生成率を高める。その結果、気泡流では乱れエネルギーの消散率も壁面近傍で低下する。
- ③ k -モデル気泡誘起疑似乱れが弱い場合は、気泡流における乱れエネルギーの生成率を概ね評価できる。低レイノルズ数型 k -モデルは、気泡流においても標準 k -モデルよりも壁面近傍で乱れエネルギーを良好に予測できる。

- ④ 乱れエネルギーの拡散率は気泡の存在により影響を受ける。この原因として、気泡による乱流渦の崩壊と気泡による上昇流れが挙げられる。これらの気泡による拡散の変調は乱流渦による乱れエネルギーの拡散と異なる性質を有するため、 $k-\epsilon$ モデルは気泡流における高ボイド率領域で拡散を正しく評価できない。
- ⑤ 更なる実験が必要ではあるが、 $k-\epsilon$ モデルは気泡流における乱れエネルギー消散率輸送方程式の生成、拡散、消散率の分布を定性的に概ね評価できる。

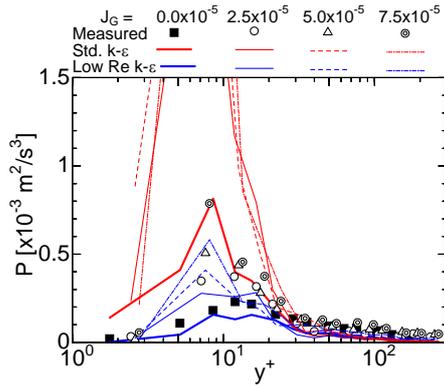


図4 乱れエネルギーの生成率 P (実験結果と $k-\epsilon$ モデルの比較)

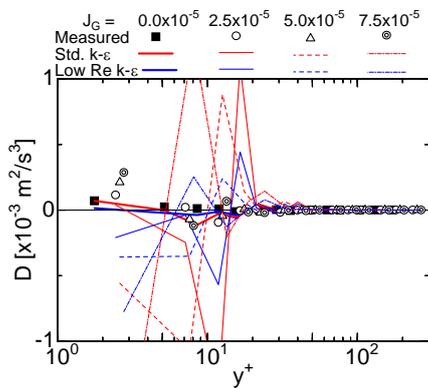


図5 乱れエネルギーの拡散率 D (実験結果と $k-\epsilon$ モデルの比較)

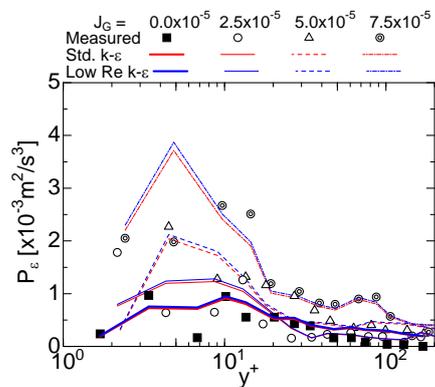


図6 乱れエネルギー消散率の生成率 P_ϵ (実験

結果と $k-\epsilon$ モデルの比較)

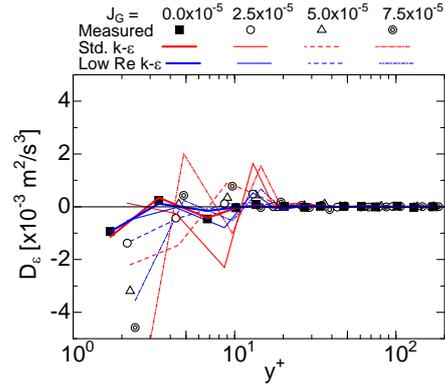


図7 乱れエネルギー消散率の拡散率 D_ϵ (実験結果と $k-\epsilon$ モデルの比較)

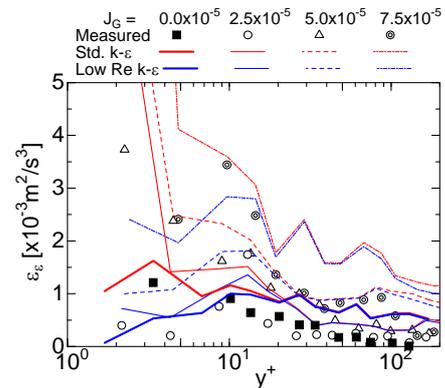


図8 乱れエネルギー消散率の消散率 ϵ_\bullet (実験結果と $k-\epsilon$ モデルの比較)

(4) 気泡誘起擬似乱れの特性把握

気泡誘起擬似乱れのみが存在する流れとして、円管内層流中に気泡を加えた気泡流を対象として乱れ強さとレイノルズ応力を測定した。円管内水-空気系気泡流の光学計測を可能とするため、試験部円管には水とほぼ同じ屈折率を有するFEP管を用いた。実験結果から以下の知見を得た。

- ① 気泡誘起擬似乱れの乱れエネルギーは局所ボイド率に比例する。ただし、気泡による乱れの拡散効果によりボイド率がゼロに近い位置でも乱れエネルギーがゼロとならない。
- ② 気泡誘起擬似乱れの軸方向、半径方向、円周方向成分の比は2:1:1である。
- ③ Satoの渦粘性モデルは気泡誘起擬似乱れのレイノルズせん断応力を過小評価する。
- ④ 気泡誘起擬似乱れのレイノルズせん断応力は液相速度勾配のみならずボイド率勾配にも依存する。また、実験データに基づき気泡誘起擬似乱れの乱流せん断応力モデルを提案した。
- ⑤ 気泡誘起擬似乱れの消散過程はせん断誘起乱れの消散過程と類似している。

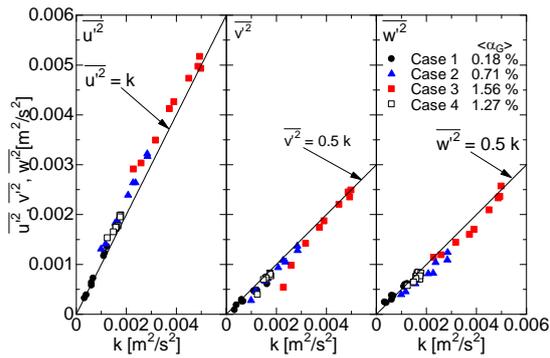


図9 気泡誘起疑似乱流の各軸方向乱れ強さと乱れエネルギー k の関係

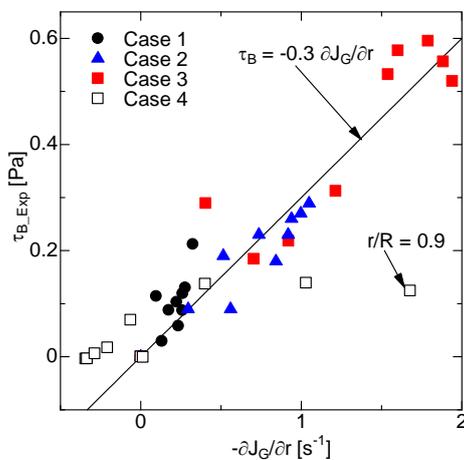


図10 局所気相体積流速 J_G の勾配とレイノルズせん断応力 τ_B の関係

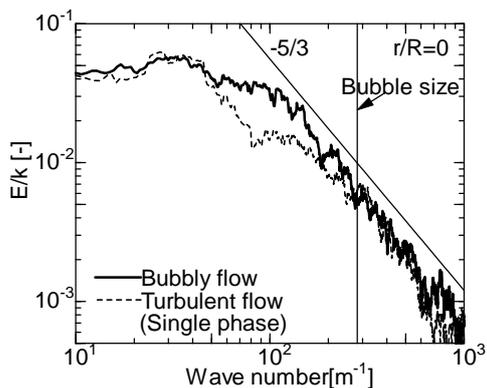


図11 気泡誘起疑似乱れと単相乱流における軸方向変動速度のパワースペクトル (管中心)

今後、以上で得られた知見および知見に基づくモデルを数値計算に適用することにより、気泡流の予測精度および信頼性が向上されると期待できる。

【参考文献】

- (1) Horiuchi, K., "DNS Database of Turbulence and Heat Transfer. Code number: CH12_PG.WL3", http://www.thtlab.t.u-tokyo.ac.jp/DNS/dns_database.html.
- (2) Troshko, A.A. and Hassan, Y.A. "A Two-Equation Turbulence Model of Turbulent Bubbly Flows", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 27 (2001), pp. 1965-2000.

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6件)

- ① 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.
- ② Shigeo Hosokawa, Takashi Suzuki, Akio Tomiyama, Turbulence Kinetic Energy Budget in Bubbly Flows in a Vertical Duct, Experiments in Fluids, 査読有, Vol. 52, No. 3, 2012, 719 - 728.
- ③ Shigeo Hosokawa, Hiroki Mizumoto, Akio Tomiyama, Evaluation of Turbulence Kinetic Energy Budget in Turbulent Flows by using Photobleaching Molecular Tagging Velocimetry, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, Vol. 7, No. 1, 2012, 168 - 180.
- ④ Hiroki Mizumoto, Shigeo Hosokawa, Akio Tomiyama, Evaluation of Turbulence Kinetic Energy Budget in Turbulent Flows by using a Photobleaching Molecular Tagging Velocimetry, AIP Conference Proceedings, 査読有, Vol. 1428, 2012, 295 - 302.
- ⑤ 水本博貴, 細川茂雄, 富山明男, フォトブリーチング分子タグ法による乱れエネルギー収支の評価, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 77 巻 784 号, 2011, 2263 - 2272.
- ⑥ Shigeo Hosokawa, Takashi Suzuki, Akio Tomiyama, Effects of Bubbles on Turbulence Properties in a Duct Flow, Multiphase Science and Technology, 査読有, Vol. 22, 2010, 211 - 232.

[学会発表] (計15件)

- ① 細川茂雄, 池田聡, 富山明男, 分子タグ法と空間フィルタ流速計の融合による気泡流の速度計測, 第62回理論応用力学

- 講演会, 2013. 3. 6, 東京都.
- ② 細川茂雄, 空間フィルタ流速計による気泡流の両相速度同時計測(招待講演), 第90期日本機械学会流体工学部門講演会, 2012. 11. 17, 京都市
 - ③ Shigeo Hosokawa, Takaaki Matsumoto, Akio Tomiyama, Application of Spatial Filter velocimetry to Bubbly Flows, The 6th Japanese-European Two-phase Flow Group Meeting, USB memory, 2012. 9. 27, Kumamoto.
 - ④ 細川茂雄, 池田聡, 富山明男, ダクト内乱流に及ぼす気泡の影響, 日本流体力学会年会 2012, 2012. 9. 18, 高知市.
 - ⑤ 池田聡, 細川茂雄, 富山明男, 鉛直ダクト内気泡流における乱流特性, 日本混相流学会年会講演会 2012, 2012. 8. 11, 柏市.
 - ⑥ Takaaki Matsumoto, Shigeo Hosokawa, Akio Tomiyama, Measurements of Bubble Velocity using Spatial Filter Velocimetry, The 16th Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, On-line CD, 2012. 7. 10, Lisbon, Portugal.
 - ⑦ Shigeo Hosokawa, Takaaki Matsumoto, Akio Tomiyama, Tomographic Spatial Filter Velocimetry for Three-dimensional Measurement of Fluid Velocity, The 16th Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, On-line CD, 2012. 7. 9, Lisbon, Portugal.
 - ⑧ Hiroki Mizumoto, Shigeo Hosokawa, Akio Tomiyama, Evaluation of Turbulence Kinetic Energy Budget in Turbulent Flows by using a Photobleaching Molecular Tagging Velocimetry, The 7th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, 2011. 12. 19, Tianjin, China.
 - ⑨ 細川茂雄, 分子タグ法と空間フィルタ流速計による速度場の詳細測定, 第7回学際領域における分子イメージングフォーラム(招待講演), 2011. 11. 3, 東京都.
 - ⑩ 細川茂雄, 池田聡, 富山明男, 鉛直矩形ダクト内気泡乱流における乱れエネルギー収支, 日本流体力学会年会 2011, 2011. 9. 7, 東京都.
 - ⑪ 細川茂雄, 乱流における速度の詳細計測, 日本混相流学会混相流フォーラム関西講演会(招待講演), 2011. 6. 14, 大阪市
 - ⑫ 細川茂雄, 富山明男, 分子タグ法の混相流への適用, 日本機械学会第88期流体工学部門講演会講演会(招待講演), 2010. 10. 30, 山形市.
 - ⑬ 細川茂雄, 鈴木孝, 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, 日本流体力学会年会 2010, 2010. 9. 10, 札幌市.

- ⑭ 細川茂雄, 富山明男, フォトブリーチング分子タグ法による気泡乱流の計測, 日本機械学会年次大会講演会 ワークショップ流体計測への光技術の応用(招待講演), 2010. 9. 8, 名古屋.
- ⑮ Shigeo Hosokawa, Takashi Suzuki, Akio Tomiyama, Turbulence Kinetic Energy Budget in Bubbly Flows in a Vertical Duct, The 15th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, USB memory, 2010. 7. 7, Lisbon.

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