

## 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 24 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21246033

研究課題名（和文） 界面物理現象の詳細解析による流れのマルチスケール性の解明

研究課題名（英文） Investigation of multiscale characteristics of fluid flows through the detail analysis of interfacial physical phenomena

研究代表者

松本 洋一郎（MATSUMOTO YOICHIRO）

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：60111473

研究成果の概要（和文）：

以下の4つの項目について成果が得られた。

(1) 分子動力学シミュレーションの結果を直接利用して、粗視化粒子による散逸粒子動力学シミュレーションのための数理モデルを新たに構築した。(2) 表面活性剤が気泡の3次元運動に与える影響に関して、詳細な実験を通して気泡運動のモデリングを行った。(3) 気泡の合体・反発に対する表面活性剤の影響を評価するため、境界適合格子を利用した詳細な数値計算を実施し、気泡が反発するには活性剤吸着によるマランゴニ効果と界面変形の影響が重要であることを示した。(4) マイクロバブル生成用に特化した形状のマイクロチャンネルを設計し、直径6 $\mu\text{m}$ のマイクロバブルの生成に成功した。さらに、高速マイクロPIV新たな計測システムを構築し、気泡生成に重要となる知見を得た。また、将来のDDS利用に向けて、有機相をコーティングするための新しいチャンネルを開発し、気泡表面に有機相をコーティングすることに成功した。

研究成果の概要（英文）：

The following 4 points are achieved in this study.

(1) Using the results of Molecular Dynamics simulation, a novel mathematical model for Dissipative Particle Dynamics simulation with coarse-grained particles was developed. (2) Drag and lift force acting on a bubble moving in 3-dimensional paths in surfactant aqueous solutions was modeled through the detail experiment. (3) Numerical simulation was conducted to investigate the surfactant effect on the bouncing back of two bubbles. It was shown that both Marangoni effect and surface deformation are important for a bubble to bounce back. (4) A novel shape micro channel was designed as a microbubble generation device and bubbles of 6  $\mu\text{m}$  diameter were successfully generated. Through the development of a high-speed micro PIV system, we obtained the knowledge of generating smaller microbubbles. Furthermore, a channel for the surface coating bubbles with organic phase are newly designed and microbubbles with the surface coating are successfully generated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	19,700,000	5,910,000	25,610,000
2010年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2011年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
総計	35,800,000	10,740,000	46,540,000

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，混相流，表面・界面活性，気泡，マイクロ流体

## 1. 研究開始当初の背景

流体工学において界面物理現象が重要となるのは、主に流体運動の境界条件においてである。例えば、液体中の気泡運動において超純水あるいは無極性液体中における気液界面は接線方向せん断応力が0となるが、界面活性剤が添加された水中では気泡界面の接線方向に形成される界面活性剤の濃度分布によって表面応力に分布が生じ(マランゴニ効果)、結果的に固体表面と同様(界面での流体分子のすべりが抑制された状態)となることが古くから知られている(V. G. Levich, *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, 1962)。他にも界面状態を撥水面にすると液体と固体の接触角が大きく変化し、層流域でも壁面抵抗を低減できる(J. Ou et al., *Phys. Fluids* 16, 4635, 2004)。また、分子スケールで接近した2つの界面(e.g. 気-液-気)にはさまれた狭い領域では、バルク内とは異なる液体分子の構造化に支配された流れ現象が存在する。このように界面物理現象は流体運動に決定的な役割を果たすことがある。しかし、そのメカニズムが明らかにされてきたのは最近のことであり、それには計算機の発達、精度の高い計測法が開発されたことが大きい。したがって、今後も新たな界面物理現象が解明され、それを応用することにより流体制御の高度化が図られ、結果として表面化学反応の効率化や熱伝達の促進、摩擦の制御など工学的に大きく貢献する技術となる可能性がある。

界面現象は分子の吸着・脱着、表面での移流・拡散など分子レベルのミクロな考察が重要であり、一方バルクの流れはマクロ(メゾ)スケールであることから、境界として界面を適切に取り込むためにはミクロからマクロ(メゾ)へのスケールアップを適切に行う必要がある。そのためにはミクロ現象を詳細に解析し、統計的な手法を用いてマクロな境界条件を導き出すことが不可欠となっている。松本らのグループはこれまで水中の気泡運動に対する界面活性剤の影響を明らかにするための実験的および理論的解析(M. Fukuta et al., *Phys. Fluids* 20, 040704, 2008)、気液界面における界面活性剤の吸着挙動の解析(G. Kikugawa et al., *Comp. Fluids* 36, 69, 2007)など、ミクロからマクロへつなげるいわゆるマルチスケール解析において成果を挙げてきた。

## 2. 研究の目的

本研究では、ミクロな界面物理現象を分子スケールから詳細に解析し、マクロな流体運動における境界条件を、メゾスケールにおける非平衡性を考慮に入れて導出するためのマルチスケール解析手法を確立し、解析により得られた知見を基にして、ナ

ノ・マイクロ流体に関連した新たな技術を創出することである。本研究の具体的な研究対象として以下の4つを挙げる。

(1)分子スケールにおける固相・気相・液相間の様々な界面近傍の物理現象の解明およびメゾスケールにおける非平衡性を記述できる構成方程式に繋がる詳細なモデリング手法の確立。

(2)気液界面における微量な界面活性剤の吸着・脱離・拡散により大きな影響を受ける水溶液中における気泡の3次元挙動

(3)近接界面間の相互作用の詳細解析およびモデリング。

(4)固気液三相界面の物理現象の詳細な解明とそれを応用した微小流路内における安定な気液界面修飾法の確立。

## 3. 研究の方法

上記の4つの項目に対して、以下の方法で研究を進めた。

(1)分子スケールにおける界面近傍の流れ現象の解明およびモデリング

気液界面の挙動解析のために、分子動力学シミュレーションの結果を直接利用して、粗視化粒子による散逸粒子動力学シミュレーションに必要なパラメータをボトムアップ的に決定した。DPD法における運動方程式には、粒子間ポテンシャルで記述される保存力、散逸粒子間に作用する力の平均からのゆらぎを表すランダム力、散逸粒子間の摩擦を表す散逸力が存在し、これら3つの力は散逸粒子間を結ぶ軸方向に作用する。本研究では、拘束力付きのMD法を用いてミクロスコピックな解析を行い、力をサンプリングし、それらをDPD法に組み込むことで、これら3つの力を決定した。

(2)気液界面に吸着した活性剤の可視化方法の開発と、界面活性剤水溶液中における気泡の3次元挙動の解析

界面活性剤の気液界面への吸着挙動を明らかにするため、時系列界面極近傍マイクロスケール蛍光観察手法を開発した。まず、超純水中に蛍光性界面活性剤を異なる濃度で溶解させ、界面に吸着した濃度と蛍光発光量の校正曲線を予め取得した。この校正曲線を利用して、気泡の界面極近傍の蛍光発光分布から界面活性剤の濃度分布を実測した。また界面活性剤溶液中の上昇気泡に関する実験を行い、活性剤溶液の濃度を変化させた際の、気泡周囲の軌跡・形状に関する詳細なデータを取得した。

(3)近接界面間の相互作用の詳細解析およびモデリング

表面活性剤の吸着・脱離モデル、および、マランゴニ応力モデルとの連成を連続体レ

ベルで実現するための解析手法を開発した。気泡・気泡間、弾性壁・気泡間における潤滑問題を対象として、非定常な界面活性剤の分布、それによって誘起される流動構造、界面近傍における主要な流体力を理論的、数値的に評価した。

(4) 三相界面近傍の流動の詳細解析とそれを用いた安定な界面修飾法の確立

T字型マイクロチャンネルにおいて10 $\mu\text{m}$ 以下の微小気泡が生成される際のメカニズムを明らかにするために、超高速カメラによる界面運動及び液相流体の速度場を計測するシステムを構築した。さらに、計測されたデータを基により小さなマイクロバブル生成のためのマイクロチャンネルの形状に関して検討を行い、実際に試作して実験を行った。

4. 研究成果

上記4項目に関して、以下の具体的成果を得た。

(1) 分子スケールにおける界面近傍の流れ現象の解明およびモデリング

複雑流路内における気液界面の挙動解析のための散逸粒子動力学(DPD)シミュレーションに向けて、液体状態の Lennard-Jones (LJ) 流体を MD シミュレーションの段階で粗視化して力をサンプリングし、その結果を DPD 法のモデリングに取り組む方法を構築した。

図1にモデリングに用いた手法の概念図を説明する。図の点線で囲まれた円が LJ-粒子のクラスタとして粗視化された DPD 粒子に相当する。クラスタ内の粒子が拡散してクラスタが定義できなくなってしまうように拘束力をかけながら MD 計算を行い、LJ 粒子の挙動を調べ、その結果を基に、それぞれのクラスタ粒子としての振る舞いを記述する。

モデリングに用いられた散逸粒子動力学法の式を以下に示す。

$$\frac{d\mathbf{P}_\mu}{dt} = \sum_{\nu \neq \mu} \langle f(r_{\mu\nu}) \rangle \mathbf{e}_{\mu\nu} - \sum_{\nu \neq \mu} \gamma_{\parallel}(r_{\mu\nu}) (\mathbf{e}_{\mu\nu} \cdot \mathbf{V}_{\mu\nu}) \mathbf{e}_{\mu\nu} - \sum_{\nu \neq \mu} \gamma_{\perp}(r_{\mu\nu}) [\mathbf{V}_{\mu\nu} - (\mathbf{e}_{\mu\nu} \cdot \mathbf{V}_{\mu\nu}) \mathbf{e}_{\mu\nu}] + \sum_{\nu \neq \mu} \delta \mathbf{f}_{\mu\nu}^0$$

ここで、ランダム力と散逸力はクラスタの重心間を結ぶ方向及びそれに垂直な方向に働くとしている。式中、クラスタの重心間を結ぶ方向の摩擦係数  $\gamma_{\parallel}(r_{\mu\nu})$  及びそれに垂直な方向の摩擦係数  $\gamma_{\perp}(r_{\mu\nu})$  は、MD 計算において以下の式に従い各方向のランダム力の相関を積分することで求められる。

$$\gamma_{\parallel}(r_{\mu\nu}) = \beta \int_0^{\infty} dt \langle \delta \mathbf{f}_{\mu\nu,\parallel}^0(t) \cdot \delta \mathbf{f}_{\mu\nu,\parallel}^0(0) \rangle,$$

$$\gamma_{\perp}(r_{\mu\nu}) = \frac{\beta}{2} \int_0^{\infty} dt \langle \delta \mathbf{f}_{\mu\nu,\perp}^0(t) \cdot \delta \mathbf{f}_{\mu\nu,\perp}^0(0) \rangle.$$

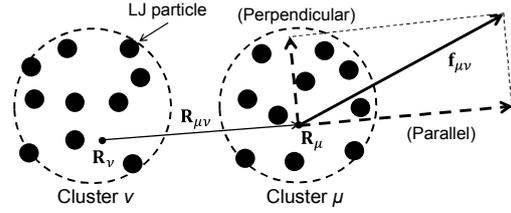


図1 拘束力つき MD と DPD 粒子の関係

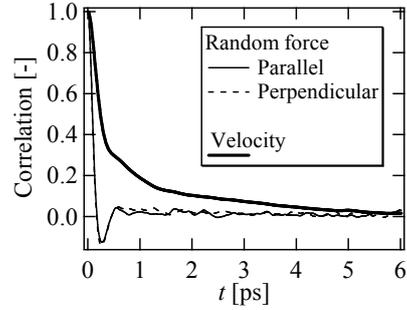


図2 MD 計算を基に見積もられた DPD 法の摩擦係数 (Parallel:  $\gamma_{\parallel}(r_{\mu\nu})$ , Perpendicular:  $\gamma_{\perp}(r_{\mu\nu})$ )

この式に従い、MD の結果から  $\gamma_{\parallel}(r_{\mu\nu})$ ,  $\gamma_{\perp}(r_{\mu\nu})$  を計算した結果を図2に示す。これらのパラメータを用いて、DPD シミュレーションを実施した結果、動径分布関数に関しては MD と DPD でよい一致を示したのに対して、平均二乗変位に関しては差異が見られた。この点については今後の検討が必要である。

(2) 気液界面に吸着した活性剤の可視化方法の開発と、表面活性剤水溶液中における気泡の3次元挙動の解析

ここでは、表面活性剤の気液界面への吸着挙動を可視化するために、図3(a)に示すような界面極近傍マイクロスケール蛍光観察手法を開発した。全反射を利用して得られた画像を図3(b)に示す。表面活性剤の吸着により界面が蛍光発光しているのが確認できる。

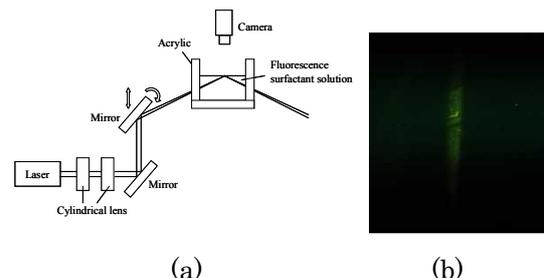


図3 気液界面で蛍光発光する活性剤分子の可視化 (a) 実験装置概念図 (b) 可視化結果

次に、静止流体中をらせん・ジグザグ運動する気泡の軌跡を3次元的に計測するシステムを構築した。その実験装置を用いて、界面活性剤として1-ペンタノールを含んだ水溶液中において、界面活性剤が気泡の3次元運動に与える影響に関して、モデリングを行った。取得された実験データを整理した結果を図4に示す。

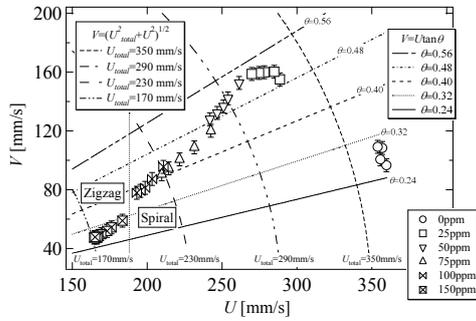


図4 界面活性剤濃度と気泡の速度の関係

(3) 近接界面間の相互作用の詳細解析およびモデリング

界面活性剤の存在下で2つの気泡が合体せず反発する過程を調べるため、界面での活性剤の吸着・脱離現象とそれに伴うマランゴニ効果が、界面同士の反発力にどのように寄与するか数値計算により調べた。計算は、図5(b)に示すような気泡-気泡間の薄膜液層に対して行った。

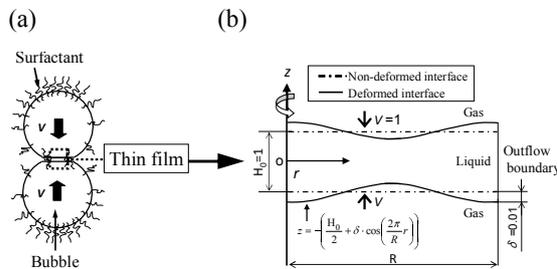


図5 計算系の概念図

- (a) 2つの気泡の反発過程のモデル
- (b) 活性剤吸着を考慮した薄膜層の計算モデル

計算に用いた基礎方程式を以下に示す。

- ・連続の式： $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$
- ・運動量保存式 (N·S方程式)： $\partial_t \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + (1/Re) \nabla \cdot (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)$
- ・活性剤のバルク濃度の輸送方程式： $\partial_t C + \nabla \cdot (\mathbf{u}C) = (1/Pe) \nabla^2 C$
- ・活性剤の表面濃度の輸送方程式： $\partial_t \Gamma + \nabla_s \cdot (\mathbf{u}\Gamma) = (1/Pe_s) \nabla_s^2 \Gamma - (1/PeK) (\nabla_s C_s) \cdot \mathbf{n}$

境界条件については、

$$\text{せん断応力 } \tau = \nabla_s \sigma = -Ma \cdot \mathbf{t} \cdot \nabla_s \Gamma / (1 - \Gamma)$$

ここで、表面張力 $\sigma$ は活性剤濃度 $\Gamma$ により、

$$\sigma = 1 + (Ma \cdot We / Re) \cdot \ln(1 - \Gamma)$$

と与えられる。

界面におけるバルク濃度 $C$ と表面濃度 $\Gamma$ の関係式： $-\nabla C_s \cdot \mathbf{n} = Ha \cdot K \cdot Pe \{ C_s (1 - \Gamma) - \Gamma / La \}$

また、無次元は以下のように与えられる。

$$Re = (2\mu V H_0) / \rho, Pe = (2V H_0) / D, Ha = (H_0 k_a C_0) / (2V), La = C_0 / \beta, Ma = (R_G T \Gamma_{max}) / (2V \mu), K = \Gamma_{max} / (H_0 C_0)$$

これらの式すべてを、直交曲線座標系のもとで有限差分近似で離散化し、SIMPLER法に準じた方法で連成計算する。その結果、界面の変形が小さく、接近する界面がほぼ並行なときは、マランゴニ効果を考慮に入れた計算においてもマランゴニ応力が十分維持できず、潤滑理論に基づく反発力が十分働かないことがわかった。すなわち、気泡同士の反発をもたらすには界面の変形が重要であることが示唆された。この知見に基づき、界面形状を変化させて計算を行った。計算結果を図6、図7に示す。図6は、界面濃度の時間発展を示し、界面が変形することにより、界面濃度の分布が維持されているのがわかる。また、図7は無次元界面変形量 $\delta$ と気泡間に働く反発力の関係を示した結果である。グラフより、界面変形量の増加とともに反発力が増加しているのがわかる。

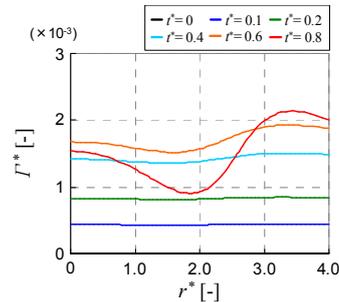


図7 界面濃度の空間分布 (無次元変形量  $\delta = 0.1$  の場合)

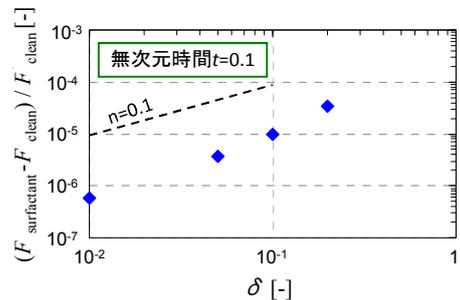


図8 無次元変形量と反発力の関係

(4) 三相界面近傍の流動の詳細解析とそれを用いた安定な界面修飾法の確立

本研究では、将来的にマイクロバブルDDSへの応用などを旨とし、機能性マイクロバブルの開発を進めた。ここでは、特に静脈への

注入が可能となる直径  $5 \mu\text{m}$  程度の気泡を、制御良く生成し、さらに表面修飾するシステムを構築するためにマイクロチャネルを用いた。

実験に用いたマイクロ流路形状の模式図を図9に示す。液相と気相が中央のT字部で合流し、気泡が生成される仕組みである。液相の圧力損失を抑えるために、合流部前後では液相流路幅が広く設計されている。本研究ではT字合流部での流路幅  $W$  が  $20 \sim 100 \mu\text{m}$ 、深さ  $H$  が  $2 \sim 20 \mu\text{m}$  である流路を用意し、また、合流部形状が図9 (b)に示すように変形した流路も設計した。従来のT字型の流路に対して、それぞれ便宜的に段差型、オリフィス型と名付ける。

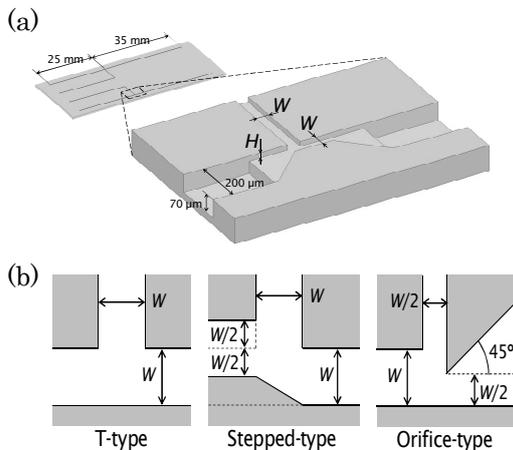


図9 作成されたマイクロチャネルの形状  
(a) 全体図, (b) 気泡生成部拡大図

実験は液相をシリンジポンプによる流量制御で、気相を圧力コントローラによる圧力制御で駆動して行った。マイクロ流路内で気泡が生成する様子を顕微鏡に取り付けた高速度カメラ (株式会社島津製作所, HPV-1,  $312 \times 260 \text{ pix}^2$ ) を用いて撮影した。

粒子画像計測にあたり、トレーサ粒子として径  $1 \mu\text{m}$  の蛍光粒子 (Invitrogen Corp., FluoSpheres F8823.) を体積比率  $0.04 \%$  にて純水に混入して使用した。明視野観察によって粒子を観察し、倍率  $40$  倍のもと最高  $1 \text{ Mfps}$  で観察することに成功した。なお、 $\mu\text{-PIV}$  を実現する粒子濃度 (体積比率  $0.1 \%$  程度) では流路が詰まるといった問題が生じたため、本研究では  $\mu\text{-PTV}$  (Particle Tracking Velocimetry) によって流れ場を計測した。流速ベクトルの少なさと偏在を防ぐために、気泡生成が周期的であることを利用して、 $\mu\text{-PTV}$  により得られたベクトル場を同位相で重ね合わせる繰り返し計測も併用した。

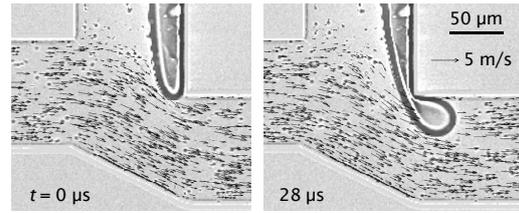


図10 気泡が生成される様子  
( $W = 100 \mu\text{m}$ ,  $H = 20 \mu\text{m}$ )

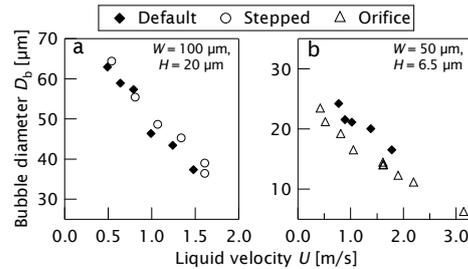


図11 液相流入速度と生成される気泡径の関係

図10に階段型流路の系でマイクロバブルが生成される様子を示す。図中には、本研究で開発された高速マイクロPIVにより取得された速度ベクトルも示してある。マイクロPIVによる計測結果の詳細な解析より、気泡サイズを小さくするためには気泡ののど部に向かう流れが重要であることが示唆された。また、図11には液相流速と生成できる最小サイズの気泡径の関係について得られた結果を示す。液相流速の増加とともに生成できる気泡径は小さくなり、オリフィス型の流路を用いた場合には、最小で  $6 \mu\text{m}$  の気泡の生成に成功した。

さらに本研究では、Arakawaら (*Sens. Actuators, A*, **143**, 58–63, 2008) の研究に倣い、有機相をコーティングするためのマイクロチャネルを作成した。このチャネルを用いて、気泡表面に酢酸ブチルの有機相をコーティングすることに成功した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計7件)

- ① 田川義之, 舟久保亜美, 高木周, 松本洋一郎, 界面活性剤溶液中を3次元運動する単一気泡の挙動 (第2報: 準定常運動する気泡に働く力とスリップ条件), 日本機械学会論文集B編, 査読有, 78巻788号, 2012, 723–733
- ② 大山峻幸, 伊井仁志, 杉山和靖, 竹内伸太郎, 高木周, 松本洋一郎, フロント・トラッキング法を用いた自由界面と剛体壁における単一気泡の反発現象の解析, 混相流, 査読有, 26巻1号, 2012, 60–67
- ③ Yunqiao Liu, Kazuyasu Sugiyama, Shu

Takagi, Yoichiro Matsumoto, Surface instability of an encapsulated bubble induced by an ultrasonic pressure wave, *Journal of Fluid Mechanics*, 査読有, Vol.691, 2011, 315-340

- ④ Yunqiao Liu, Kazuyasu Sugiyama, Shu Takagi, Yoichiro Matsumoto, Numerical Study on the Shape Oscillation of an Encapsulated Microbubble in Ultrasound, *Physics of Fluids*, 査読有, Vol.23, No.4, 2011, 041904
- ⑤ 川口暢, 菊川豪太, 杵淵郁也, 八束真一, 小原拓, 松本洋一郎, 非平衡分子動力学法を用いた親水性末端基を有する自己組織化膜と水の界面熱抵抗の解析, *日本機械学会論文集C編*, 査読有, 76巻768号, 2010, 1936-1938
- ⑥ 田川義之, 舟久保亜美, 高木周, 松本洋一郎, 界面活性剤溶液中を3次元運動する単一気泡の挙動, *日本機械学会論文集B編*, 査読有, 76巻771号, 2010年, 1785-1792
- ⑦ Huaxiong Huang, Kazuyasu Sugiyama, Shu Takagi, An immersed boundary method for restricted diffusion with permeable interfaces, *Journal of Computational Physics*, 査読有, Vol.228, 2009, 5317-5322

[学会発表] (計7件)

- ① Ryoji Miyazaki, Toshiyuki Ogasawara, Mitsuhsa Ichiyanagi, Shu Takagi, Yoichiro Matsumoto, High-speed  $\mu$ -PTV study of microbubble generation in microfluidic T-junction, The 63<sup>rd</sup> Annual Meeting of the Division of Fluid Mechanics, 2010年11月22日, Long Beach, California, USA
- ② Taiga Komatsu, Shinchi Tsuda, Shu Takagi, Yoichiro Matsumoto, An investigation of nucleation-growth of bubbles using molecular dynamics simulation, The 63<sup>rd</sup> Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, 2010年11月21日, Long Beach, California, USA
- ③ Yoshiyuki Tagawa, Ami Funakubo, Shu Takagi, Yoichiro Matsumoto, Change of Redependency of single bubble 3D motion by slip condition in surfactant solution, APS/Division of Fluid Dynamics 62<sup>nd</sup> Annual Meeting, 2009年11月23日, Minneapolis, USA
- ④ Yoichiro Matsumoto, Yoshiyuki Tagawa, Toshiyuki Ogasawara, Shu Takagi,

Influence of surfactant on single bubble motion and bubbly flow structure, 5<sup>th</sup> European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting, 2009年9月21日, Spoleto, Italy

- ⑤ 田川義之, 舟久保亜美, 高木周, 松本洋一郎, 静止水中を上昇する気泡の3次元挙動に対する界面活性剤の影響, 日本混相流学会年会講演会 2009, 2009年8月9日, 熊本大学, 熊本
- ⑥ 小松大河, 橋口和弘, 高木周, 松本洋一郎, ベンチュリ管におけるマイクロバブル生成機構の解明, 混相流学会年会講演会 2009, 2009年8月9日, 熊本大学, 熊本
- ⑦ 田川義之, 舟久保亜美, 高木周, 松本洋一郎, 界面活性剤水溶液中における単一気泡の3次元挙動解析, 第58回理論応用力学講演会, 2009年6月11日, 日本学術会議, 東京

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松本 洋一郎 (MATSUMOTO YOICHIRO)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号: 60111473

### (2) 研究分担者

高木 周 (TAKAGI SHU)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号: 30272371  
杉山 和靖 (SUGIYAMA KAZUYASU)  
東京大学・大学院工学系研究科・特任准教授  
研究者番号: 50466786  
杵淵 郁也 (KINEFUCHI IKUYA)  
東京大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号: 30456165  
小笠原 紀行 (OGASAWARA TOSHIYUKI)  
大阪府立大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 00552184  
一柳 満久 (ICHIYANAGI MITSUHISA)  
上智大学・理工学部・助教  
研究者番号: 00584252  
竹内 伸太郎 (TAKEUCHI SHINTARO)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 50372628  
葭仲 潔 (YOSHINAKA KIYOSHI)  
独立行政法人産業技術研究所・ヒューマン  
ライフテクノロジー研究部門・研究員  
研究者番号: 90358341

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: