

令和 4 年 9 月 15 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02067

研究課題名（和文）変形・変動を伴う流動界面への界面活性剤吸脱着現象の探求とモデル化

研究課題名（英文）Investigation and modeling of adsorption-desorption kinetics of surfactants at interface with deformation and oscillation

研究代表者

細川 茂雄（Hosokawa, Shigeo）

関西大学・社会安全学部・教授

研究者番号：10252793

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：多くの工業分野、自然界において気泡や液滴を含む流れが見られ、界面活性剤などの汚染物質の界面への吸着により気泡/液滴と周囲流体間の運動量/熱/物質移動が清浄系と異なることが知られている。静止した界面への界面活性剤の吸着脱離特性に比べ、流動を伴う界面への吸着脱離に関する知見は少なく、数値予測精度向上などを阻んでいる。本研究では、高精度速度分布計測に基づく界面上界面活性剤濃度評価手法を発展させ、液滴表面に作用する局所粘性応力、圧力を評価し、界面活性剤の吸着と流体力の関係を明らかにした。また、当該手法を一般座標系測定領域に拡張することにより、変形液滴界面の流体力学的特性と界面活性剤吸着状態を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、変形を伴う界面における界面活性剤濃度および界面に作用する粘性応力と圧力を評価できる計測手法を提供するとともに、実験データがほとんどなかった流動界面への界面活性剤の吸着・脱着特性に関する定量的データを提供するものであり、汚染系気泡・液滴の数値計算・モデルの検証および流動界面への吸着・脱離現象の解明に有益である。また、流動界面に対する吸着・脱離特性は従来の静的モデルではなく一般化Frumkin-Levichモデルにより概ね表現できる結果は数値予測精度向上に重要な知見である。さらに、本研究で開発した界面近傍速度分布および局所流体力測定法は、物体周囲流動の分析にも貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：Bubbles and drops in a contaminated system can be found in many industrial applications and natural phenomena. The contaminants such as surface-active agents (surfactant) adsorb on the interface of bubbles or drops and change mass, momentum, and heat transfer characteristics. Although there are lots of knowledge and models of the adsorption-desorption kinetics for quiescent systems, those have rarely been validated for a moving interface due to the lack of experimental data. Hence, we experimentally investigated local viscous stress, pressure, and surfactant concentration at the moving interface of drops falling in a stagnant liquid containing surfactant based on the velocity distribution measured by spatiotemporal filter velocimetry (SFV). The SFV was extended to generalized coordinate systems to evaluate adsorption characteristics of deformed drops. We discussed the adsorption-desorption kinetics and the influence of the adsorption on the fluid force acting on the drop.

研究分野：混相流工学、流体工学、伝熱工学

キーワード：流体工学 混相流 界面 界面活性剤 吸着・脱離 流体計測 流体力

1. 研究開始当初の背景

化学プロセスやエネルギーシステムなど多くの分野で気泡や液滴を含む流れが見られるが、その多くの液体は完全に清浄ではなく、汚染物質が含まれることが多い。界面活性剤などの汚染物質を含む系では、気泡や液滴と周囲流体間の運動量/熱/物質移動が清浄系と異なることが知られている。したがって、汚染系気泡・液滴を含む機器・システムの高効率化、高性能化の実現には、界面の汚染物質の吸着・脱離特性および気泡/液滴の汚染度合いと運動量/熱/物質移動の関係を明らかにする必要がある。このような社会的・工業的ニーズに対して、流動系における界面上汚染物質濃度の測定手法や汚染物質の吸着・脱離特性の定量的評価手法は少なく、気泡/液滴の汚染度合いすら定量評価できないのが現状である。このため、界面への界面活性剤の吸着/脱離に関する知見は、そのほとんどが静的な界面に対するものである。近年、汚染系気泡・液滴の数値予測も行われているが、これらの数値計算においても静的な吸着・脱離モデルが利用されており、その妥当性は全く検証されていない。

一方、研究代表者らは高時間・空間分解能で流速を精度良く測定し得る時系列粒子画像に基づく多点同時流速計速法（時空間フィルタ流速計：Spatiotemporal Filter Velocimetry (SFV)) を提案するとともに、単相乱流を精密に計測できることを示した。また、本手法により球形液滴境界面近傍の速度分布を精密に測定し、界面内外における速度勾配から粘性応力を算出し、その差から界面に作用するマランゴニ応力を評価できることを示した。また、マランゴニ応力は、界面への界面活性剤の吸着に伴う界面張力の勾配に起因することから、SFV 計測に基づく液滴界面の界面活性剤濃度分布の定量評価を実現した。これらの成果・知見を発展させ、産業界にフィードバックするためには、(1) 流動界面における吸脱着現象を解明・モデル化し、数値予測手法を発展させるとともに、(2) 吸脱着現象に起因する流体粒子に作用する流体力の変化を調べる。また、(3) 産業界で多く見られる変形流体粒子における界面活性界面濃度分布を評価できる計測手法に発展させ、変形流体粒子に対する知見を得ることが望まれる。

2. 研究の目的

本研究では、時空間フィルタ流速計 (SFV) で測定した高精度速度分布に基づく界面上界面活性剤濃度評価手法を用いて、流動界面における吸脱着現象とそれに起因する流体力の変化を調査する。また、当該手法を変形する流動界面を対象として計測手法へと発展させ、変形を伴う流動界面への界面活性剤の界面濃度分布を明らかにする。また、流動界面を有する液滴に対して数値計算を行い、吸脱着モデルの妥当性を評価し、当該物理現象を内包する工業機器の数値予測精度向上を目指す。

3. 研究の方法

SFV の原理を図 1 に示す。まず、PTV や PIV と同様にトレーサ粒子を添加した流れ場をレーザシートなどで照射し、測定平面上の粒子像を高速カメラで撮影し、粒子の時系列画像を取得する。各フレームの検査領域内の輝度分布 $I(x, y, t)$ に時空間フィルタ $F_{SF}(x, y, t)$ を乗じたのち、測定領域内の輝度を積分し、積分輝度の時系列波形 $I_{SF}(x_c, y_c, t)$ を得る。すなわち、

$$I_{SF}(x_c, y_c, t) = \int_{y_c - \Delta y/2}^{y_c + \Delta y/2} \int_{x_c - \Delta x/2}^{x_c + \Delta x/2} I(x, y, t) F_{SF}(x, y, t) dx dy \quad (1)$$

ここで、 (x_c, y_c) は測定領域中心の座標、 Δx 、 Δy はそれぞれ測定領域の x 方向および y 方向長さである。粒子の x 方向速度成分を v_x とし、 x 方向にのみ幅 δx で周期変化する関数（たとえば、 $\cos(2\pi x/\delta x)$ ）を $F_{SF}(x, y, t)$ として用いると、 $I_{SF}(x_c, y_c, t)$ は周期 $\Delta t = \delta x/v_x$ で変動する。したがって、ウェーブレット変換や FFT など $I_{SF}(x_c, y_c, t)$ の変動周波数 $f_D = 1/\Delta t$ を評価すれば $v_x (= \delta x f_D)$ が測定できる。粒子の y 方向速度成分 v_y も同様に y 方向にのみ周期変化する時空間フィルタを用いることにより測定できる。さらに、時空間フィルタを時間に対して移動させることにより、よどみ領域や逆流領域を含む流れも測定できる。なお、式(1)の空間積分および周波数分析時の時間平均により画像上のランダムノイズは平滑化されるため、SFV はノイズに強い。SFV の詳細については既報⁽¹⁾を参照されたい。

本研究では球形液滴境界面近傍の速度分布を精密に測定するため、SFV を界面に沿った任意形状の測定領域に拡張した。すなわち、一般曲線座標系の ξ - η 空間に作成した時空間フィルタ $F_{SF}(\xi, \eta, t)$ を座標変換により実空間上の界面に適合した測定領域に投影し積分輝度 I_{SF} を求める (図 2)。この際、境界適合測定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 $M(x, y, t)$ (測定領域内：1, 外：0) を用いると I_{SF} は次式で計算できる。

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

ここで、積分領域は測定領域を包含する任意の領域である。また、界面が時間的に移動する場合

は、 M および F_{SF} を界面に固定して移動することにより、界面に固定した座標系における速度が求まる。なお、デジタル画像を座標変換する他の手法に比べて、本手法は連続関数で表される時空間フィルタを座標変換するため、座標変換に伴う情報の劣化は無く、精度の低下も生じない。SFV を用いて流体粒子内外の速度を測定し、その分布からマランゴニ応力、界面活性剤の界面濃度 Γ および圧力を評価した。また、2 時刻で測定した Γ の測定値を用いて Γ の輸送方程式の各項を評価した。

実験は幅 170 mm、奥行き 170 mm、高さ 500 mm のアクリル容器中にシリコンオイル(信越シリコン, KF-96-300cs)を満し、容器中心の液面直下に設置した内径 2.5 mm ノズルからグリセリン水溶液(53.5 wt%)の液滴を落下させて実施した(図 3)。グリセリン水溶液の濃度はシリコンオイルの屈折率と一致するように決定しており、液滴内外の粒子位置を歪みなく可視化できる。トレーサ粒子として SiC 粒子(比重 1.69、平均粒子径 3 μ m)を両相に添加した。液滴領域を判別するため、グリセリン水溶液に蛍光色素(ローダミン B, 濃度 1.0×10^{-5} mol/l)を添加した。レーザシート(光源: 波長 $\lambda = 532$ nm、出力 2 W、幅: 15 mm、厚さ: 0.2 mm)を容器底面から液滴の中心断面を通るように照射し、液滴および周囲流動を高速度カメラ(Photron FASTCAM SA-X2、フレームレート: 12,500 fps、解像度: 20 μ m/pixel) で撮影した。撮影画像に SFV を適用し、液滴内外速度を測定した。

界面における界面活性剤濃度評価手順を図 4 に示す。横軸の θ は液滴の中心軸からの角度であり、 $\theta = 0$ deg. が液滴先端、 $\theta = 180$ deg. が液滴後端を示す。まず、界面における接線方向速度 $v_{\theta int}$ および界面における内外速度勾配 $\partial v_{\theta} / \partial r$ から粘性により界面内外に作用するせん断応力 $\tau_{r\theta}$ を算出し、その差から界面に作用する $\tau_{r\theta}$ 以外の応力 $\Delta \tau_{r\theta}$ を求める。すなわち、

$$\Delta \tau_{r\theta} = \tau_{r\theta, out} - \tau_{r\theta, in} \quad (3)$$

$\tau_{r\theta}$ とマランゴニ応力以外の応力が無視できるとすれば、 $\Delta \tau_{r\theta}$ はマランゴニ応力とみなせ、次式を積分すれば界面張力 σ の周方向分布も評価できる。

$$\Delta \tau_{r\theta} = \nabla_s \sigma = e_{\theta} \frac{1}{R} \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} \quad (4)$$

ここで、 e_{θ} は界面接線方向単位ベクトルである。界面上界面活性剤濃度 Γ は以下の Frumkin の吸着式を用いて σ から評価できる。

$$\sigma(\Gamma) = \sigma_0 + R_G T \Gamma_{max} \ln \left(1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_{max}} \right) \quad (5)$$

ここで、 R_G は一般ガス定数、 T は温度、 Γ_{max} ($= 1.69 \times 10^{-6}$ mol/m²) は界面における飽和界面活性剤濃度である。2 時刻において Γ の時間変化を測定し、測定して界面速度 v_s および Γ を以下の Γ 輸送方程式の時間変化項、対流項、拡散項に代入して各項を求め、その残差として吸脱着量 \dot{S} を求めた。

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} + \nabla_s \cdot v_s \Gamma = D \nabla_s^2 \Gamma + \dot{S} \quad (6)$$

ここで、 D は拡散係数である。

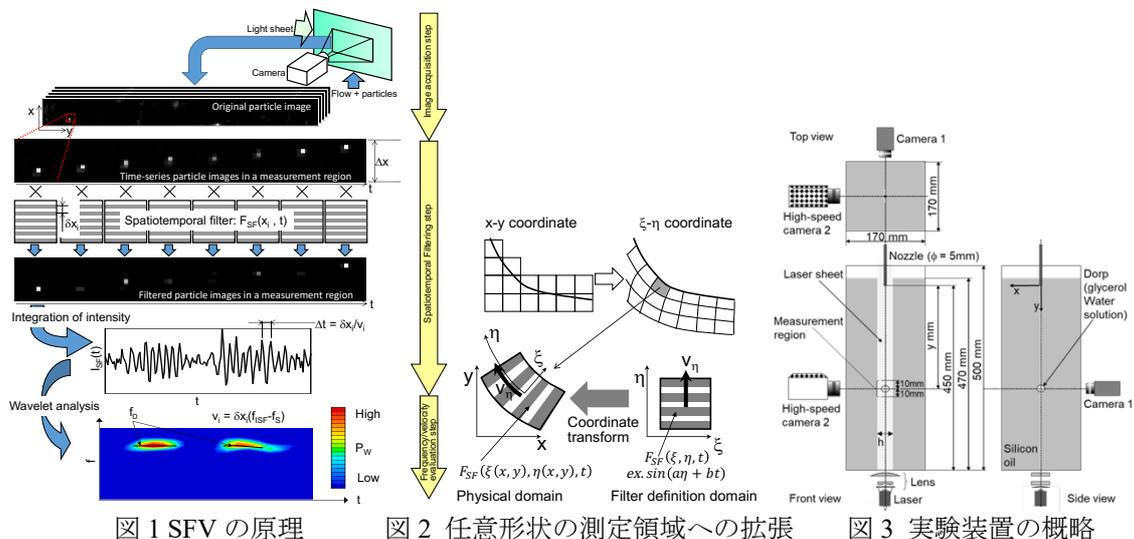


図 1 SFV の原理

図 2 任意形状の測定領域への拡張

図 3 実験装置の概略

4. 研究成果

液滴が終端状態に達したノズルから 250mm 下方において測定した清浄系と汚染系の液滴内外速度分布と粒子画像を重ねて作成した流跡線、速度から算出した流線を図 4 に示す。液滴中心か

らの距離 x, y および速度ベクトル \mathbf{v} はそれぞれ液滴の半径 R および終端速度 V_T で無次元化している。清浄系 (Case 1: $C = 0.0 \text{ mol/m}^3$) では液滴内部に前後対称な循環が生じているが、中程度の汚れ系 (Case 2~4: $C = 0.2 \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{ mol/m}^3$) では界面活性剤の界面への吸着により液滴後端によどみ領域 (stagnant cap) が形成され内部循環流が液滴前方のみに生じている。さらに界面活性剤濃度が高い完全な汚れ系 (Case 5: $C = 0.1 \text{ mol/m}^3$) では、界面活性剤の吸着により生じるマランゴニ応力により内部流動が抑制され、ほぼ静止状態となる。なお、清浄系の速度分布が Hadamard–Rybczynski の解に、完全汚染系の速度分布が Stokes の解によく一致することを確認している。

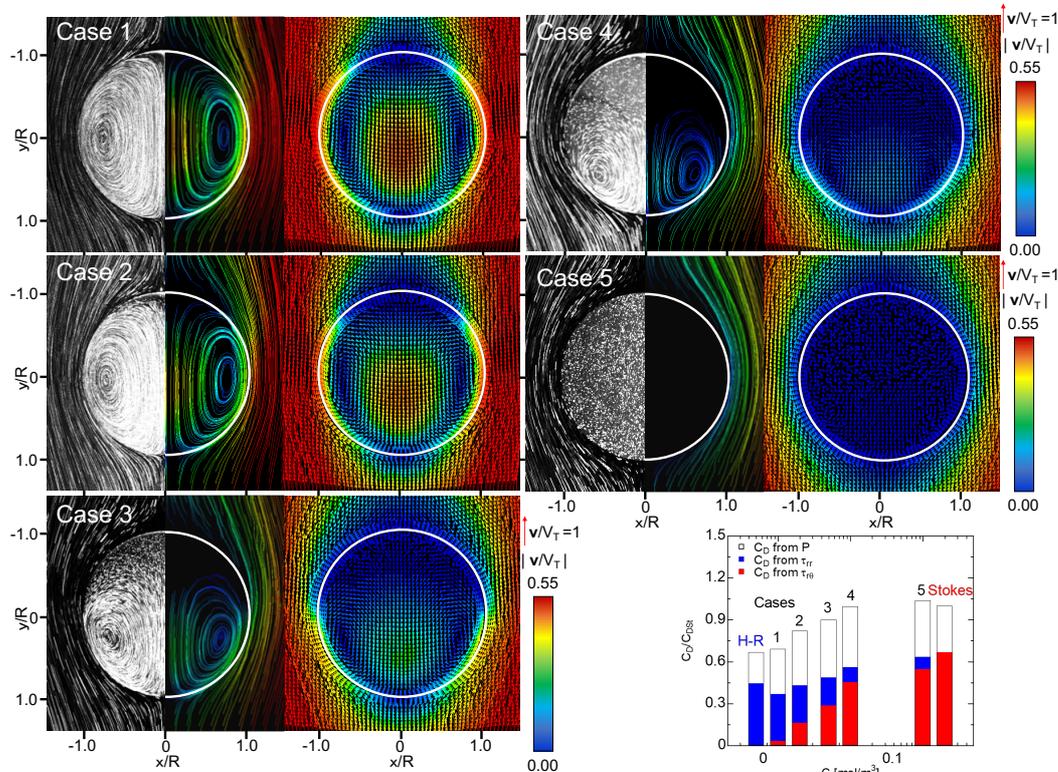


図4 液滴内外の流跡線、流線、速度ベクトル

図5 抗力の各成分

まず、界面活性剤の吸着に伴う流体力の変化を調べるため、図4に示した各条件において界面における速度勾配から接線方向粘性応力 $\tau_{t\theta}$ 、法線方向粘性応力 τ_{rn} および速度分布から算出した圧力Pの表面積分として求めた抗力係数 C_D と界面活性剤濃度Cの関係を図5に示す。図よりCの増加に伴って C_D が増加し、清浄な流体粒子に対する解であるHadamard–Rybczynskiの C_D から、固体粒子に対するStokesの C_D に漸近することがわかる。この増加は主に $\tau_{r\theta}$ の増加により、PはCが増加しても大きく変化せず、 τ_{rn} は減少することもわかる。なお、Case1でHadamard–Rybczynskiの解に、Case5でStokesの解とほぼ同じ C_D となっていることから、本手法の精度が高いことも確認できる。各条件における抗力成分の液滴表面での分布状況と界面活性剤界面濃度 Γ の関係を調べるために、界面に沿った Γ 、圧力による力 F_P の θ 方向微分 $dF_P/d\theta$ 、接線方向粘性応力 $F_{\tau_{t\theta}}$ の θ 方向微分 $dF_{\tau_{t\theta}}/d\theta$ 、法線方向粘性応力 $F_{\tau_{rn}}$ の θ 方向微分 $dF_{\tau_{rn}}/d\theta$ および抗力 F_D の θ 方向微分 $dF_D/d\theta$ を図6に示す。抗力はこれらの成分の θ 積分であり、図6の分布の面積として表せることから、これらの分布は各 θ における局所抗力の大きさを表す。なお、図中の青線は清浄液滴に対するHadamard–Rybczynskiの解、赤線は固体粒子に対するStokesの解を示す。Cの増加につれて (Case 1 から 5 に向けて) 後端 ($\theta=180^\circ$) から Γ が上昇し、 Γ の高い領域が前方へ (θ が小さい方向) 拡大する。これに伴い、抗力の各成分は後端からHadamard–Rybczynskiの解に従う分布からStokesの解に従う分布へと漸近していく。その結果、 $dF_P/d\theta$ と $dF_{\tau_{r\theta}}/d\theta$ は増加、 $dF_{\tau_{rn}}/d\theta$ は減少する。Cが少し増加すると、まず $dF_P/d\theta$ と $dF_{\tau_{rn}}/d\theta$ の後半部分 ($\theta=90 \sim 180^\circ$) がStokesの解に近づくが $dF_P/d\theta$ の増加と $dF_{\tau_{rn}}/d\theta$ の減少が相殺する。一方、 $dF_{\tau_{r\theta}}/d\theta$ の増加は、 Γ が $\theta=90^\circ$ 付近で θ 方向勾配が急増するCase3前後で急増しており、汚染界面が液滴の赤道に達することにより抗力が急増していることがわかる。以上のようにSFVによる精密な速度分布から界面における粘性応力と界面における圧力を評価することにより、物体に作用する局所流体力分布をその成分別に評価することが可能となり、物体に作用する流体力の詳細分析に寄与できる。

次に液滴に対する吸脱着特性を調べるため、図7に界面における局所吸脱着量 \dot{S} と界面活性剤の界面濃度 Γ の関係を示す。図中の直線は汚染系気泡・液滴の数値予測において吸着・脱離量の評価にしばしば用いられるFrumkin–Levichモデルを示している。図より、 Γ の高い領域 (液滴後端部) では界面活性剤の吸着による界面流動が抑制されており、Frumkin–Levichモデルと実験結果がよく一致することがわかる。一方、 Γ の低い領域 (液滴前方) では界面が流動してお

り、この領域では Frumkin – Levich モデルが適用できない。これらの傾向は、分子量の異なる Triton X-100 および 141 で同じであり、一定の一般性を有すると判断できる。また、この領域では赤線で示す Generalized Frumkin – Levich モデルでその傾向を概ね捉えられることがわかる。Frumkin – Levich モデルと Generalized Frumkin – Levich モデルの切り替え点の条件は、行った実験の結果から界面速度が液滴の周囲液体に対する相対速度の5%程度になる位置であると想定される。これらの知見を生かして数値計算を行い、汚染系液滴速度分布や汚染状態が概ね良好に予測できることを確認している。

変形液滴に対する界面活性剤の吸着特性を調べるために、本研究では SFV を一般座標系に拡張した。図8に本研究で開発した一般座標系 SFV を用いて測定した球形、楕円形、冠球形液滴の速度分布の例を撮影画像を重ね合わせて作成した流跡線、および測定した速度ベクトルから算出した流線とともに示す。いずれの形状でも界面近傍まで良好に速度が計測できることがわかる。また、測定した速度ベクトルから算出した流線が画像を重ねて作成した流跡線とよく一致しており、速度ベクトルの測定精度が高いことが確認できる。楕円形液滴を対象に界面活性剤濃度 C を変化させて一般座標系 SFV を用いて測定した界面速度 v_0 、界面速度勾配 dv_0/dr 、マランゴニ応力 $\Delta\tau_{r\theta}$ 、界面活性剤界面濃度 Γ を図9に示す。楕円形液滴の場合も v_0 、 dv_0/dr 、 $\Delta\tau_{r\theta}$ 、 Γ のいずれも滑らかかつ、球形液滴と対応する分布系となっており、一般座標系 SFV によって、界面活性剤の界面への吸着状態を良好に評価できることがわかる。楕円形液滴の場合も、球形液滴同様に後端から界面活性剤の界面濃度 Γ が上昇し、 C の増加とともに Γ の高い領域が液滴前方へ拡大することがわかる。また、 Γ の高い領域では v_0 がゼロになり流動がなくなることがわかる。球形液滴の違いは、液滴後端付近に淀み領域が形成されるため、この淀み領域では Γ の勾配がほとんどなく、マランゴニ応力がゼロになる領域が発生する点である。

以上の成果は、新しい流動を伴う界面における界面活性剤濃度計測手法を関連分野に提供するものであるとともに、従来、実験データがほとんどない流動系における液滴への界面活性剤の吸着・脱離特性に関する定量的データを提供するものであり、汚染系気泡・液滴の数値計算手法検証、モデル開発および界面活性剤の吸着・脱離現象の解明に有益である。さらに、本研究で開発した界面/境界近傍の速度分布を精密に測定できる SFV は、物体周囲流動の分析にも適用可能であり、流体関連分野の計測手法高度化にも貢献するものである。

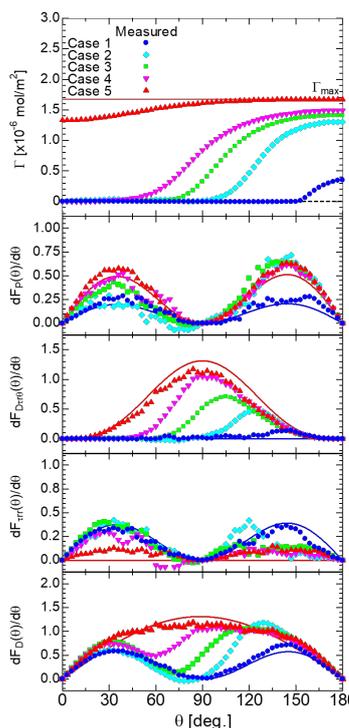


図6 液滴の汚染と抗力成分

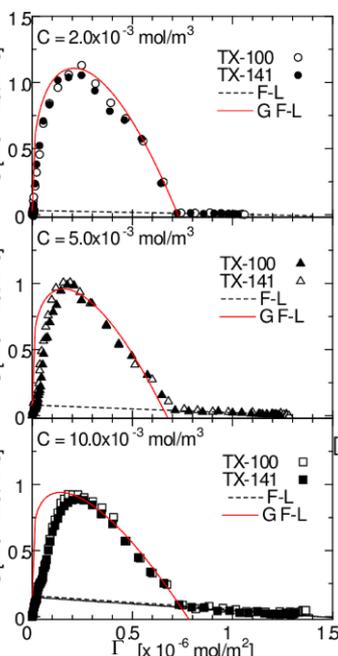


図7 吸脱着量 \dot{S} と Γ の関係

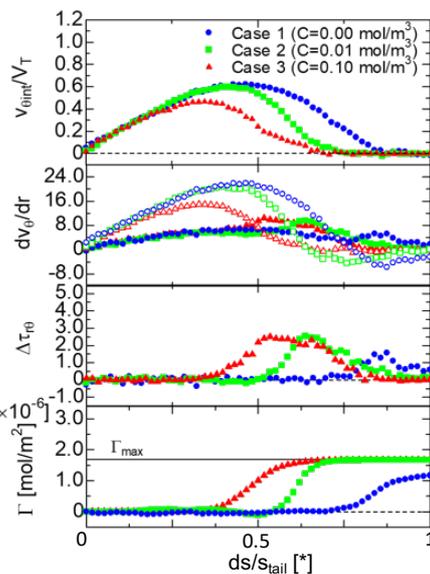


図9 楕円形液滴の界面諸量

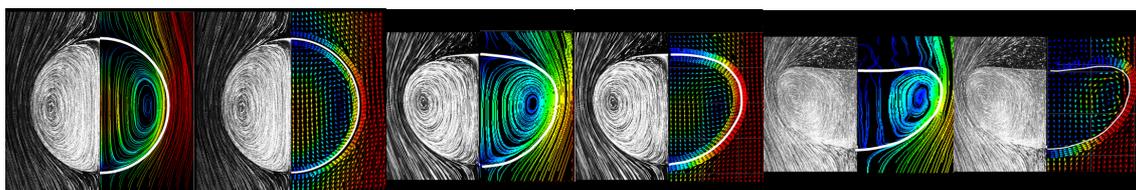


図8 液滴周りの流跡線、流線、速度ベクトル (左から、球形、楕円形、冠球形液滴)

<引用文献>

(1) Hosokawa, S. and Tomiyama, A., Experiments in Fluids, Vol. 52, 2012, pp. 1361 - 1372.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shigeo Hosokawa, Hideaki Shakutsui, Akio Tomiyama	4. 巻 31
2. 論文標題 Turbulence Modification of Gas-Liquid-Solid Dispersed Three-Phase Flow in a Vertical Pipe	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Multiphase Science and Technology	6. 最初と最後の頁 175-197
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1615/MultScienTechn.2019030437	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Douglas Martins Rocha, Fabio Toshio Kanizawa, Kosuke Hayashi, Shigeo Hosokawa, Akio Tomiyama, Gherhardt Ribatski	4. 巻 42
2. 論文標題 Pressure and Shear Stress Analysis in a Triangular Tube Bundle Based on Experimental Flow Velocity Field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering	6. 最初と最後の頁 Article 201
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s40430-020-02293-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Douglas Martins Rocha, Fabio Toshio Kanizawa, Kosuke Hayashi, Shigeo Hosokawa, Akio Tomiyama, Gherhardt Ribatski	4. 巻 105
2. 論文標題 Characterization of the velocity field external to a tube bundle using spatial filter velocimetry based on variable meshing scheme	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Flow, Turbulence and Combustion	6. 最初と最後の頁 1277 - 1301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10494-020-00143-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kosuke Hayashi, Yuya Motoki, Matheus J. A. van der Linden, Niels G. Deen, Shigeo Hosokawa and Akio Tomiyama	4. 巻 7
2. 論文標題 Single Contaminated Drops Falling through Stagnant Liquid at Low Reynolds Numbers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fluids	6. 最初と最後の頁 55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/fluids7020055	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Shigeo Hosokawa
2. 発表標題 Spatiotemporal Filter Velocimetry, Fundamentals and Applications
3. 学会等名 5th Multiphase Flow Journeys (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigeo Hosokawa
2. 発表標題 Optical Measurements for Validation of Numerical Simulation of Two-Phase Flow
3. 学会等名 4th Workshop on Advances in CFD, LB and MD Modeling of Capillary Two-Phase Flows and Experimental Validation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigeo Hosokawa, Gaku Shigekane, Kosuke Hayashi, Akio Tomiyama
2. 発表標題 Viscous Stress and Pressure Acting on Interface of Contaminated Drop
3. 学会等名 10th International Conference on Multiphase Flow (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Gaku Shigekane, Shigeo Hosokawa, Kosuke Hayashi, Akio Tomiyama
2. 発表標題 Evaluation of Drag Force Acting on a Contaminated Single Drop Based on Velocity Distribution
3. 学会等名 ASME - JSME - KSME Joint Fluids Engineering Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Gaku Shigekane, Shigeo Hosokawa, Kosuke Hayashi, Akio Tomiyama
2. 発表標題 Application of Spatiotemporal Filter Velocimetry to Evaluation of Drag Force Acting on Single Drop
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flow (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細川茂雄, 重兼楽, 林公祐, 富山明男
2. 発表標題 速度分布計測に基づく液滴に作用する抗力の評価
3. 学会等名 理論応用力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細川茂雄
2. 発表標題 時空間フィルタ流速計による抗力評価の試み
3. 学会等名 日本機械学会RC277研究分科会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 重兼楽, 細川茂雄, 林公祐, 富山明男
2. 発表標題 境界適合型時空間フィルタ流速計の変形液滴への適用
3. 学会等名 可視化シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 元木佑哉, 林公祐, 細川茂雄, 富山明男
2. 発表標題 汚染系単一球形液滴の数値計算に関する研究
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 細川茂雄
2. 発表標題 光学的流速計測と計測結果からの流体情報抽出
3. 学会等名 日本機械学会RC286研究分科会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 細川茂雄
2. 発表標題 物質移動によるマイクロバブルの気泡径変化
3. 学会等名 京都大学微細気泡研究会ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 細川茂雄	4. 発行年 2022年
2. 出版社 丸善	5. 総ページ数 6
3. 書名 技術資料 流体計測法 (分担執筆: 応用編第1章 1.7.2)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	富山 明男 (Tomiya Akio) (30211402)	神戸大学・工学研究科・教授 (14501)	
研究分担者	林 公祐 (Hayashi Kosuke) (60455152)	神戸大学・工学研究科・准教授 (14501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関