

平成 30 年 4 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06936

研究課題名(和文)分散体群の自発的組織化とそれを用いた流れの制御

研究課題名(英文)self-induced collective motion of dispersed multiphase flow and its control

研究代表者

渡村 友昭(WATAMURA, Tomoaki)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：40777736

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、分散体が集団運動する際の非定常流動場を計測する手法の開発、および分散体の運動と流動場に与える影響を評価した。蛍光の退光反応を利用して高濃度粒子流の分離プロセスを定量的に計測した。また、分散体のトポロジ変化が乱流場におけるエネルギー輸送に与える影響の評価を行った。その結果として、分散体の非一様な分布が流動場の変形をもたらすことを指摘した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we conducted the development of the measurement technique for measuring the unsteady flow field around the collective motions of dispersed phase, and evaluate the effect of the dispersed phase motion on flow fields. We quantitatively measured velocity profile of the particle separation process in highly-concentrated dispersed multiphase flow. We also evaluated the effect of topological change of dispersed phase on the energy transport in a turbulent channel flow. As a result, we pointed out the non-uniform distribution of dispersed phase induce the modification of flow field.

研究分野：流体力学

キーワード：混相流 分散体 蛍光

1. 研究開始当初の背景

気泡の産業利用は水質浄化設備の曝気装置や化学反応器である気泡塔、大型船の抵抗低減技術など、様々な工業分野において活用されている。直径が1 mm以上の気泡を用いた実験結果の多くは、気泡体積率により整理された実験相関式を用いることで気泡混入の影響が評価されている。しかし、直径100マイクロメートル程度の極めて微小な気泡が混入した場合に限ると、気泡体積率に比例しない極めて大きな気泡混入の効果を得られることが分かっている。その要因として気泡群同士の相互作用や気泡群と流れ場の相互作用が示唆されている。しかし、流れ場の中における気泡群の生成条件と、気泡群との流れ場の相互作用について力学的な説明が未達成であり、速報的な観察結果の報告に留まっている。気泡や粒子などの分散体を含む流れを包括的に調査し、分散体が及ぼす乱流変動と流れの制御についてその力学を解明することが望まれている。

2. 研究の目的

微細な気泡や粒子などの分散体が無数に存在するとき、分散体が流動場の中で自己選択的に粗密分布を形成し、その粗密分布が流動場に変形をもたらす。分散体のバルク体積率が1%以下でありその大きさも流れのスケールよりも小さい場合、個々の分散体が流れ場に与える影響は十分に小さいはずである。しかしながら、分散体が群をなす場合や壁面近傍で運動に拘束が生じる場合など、分散体が存在する影響が顕在化して流動場に変形が生じる。本研究課題では流懸濁液塊の分散運動、流懸濁液の分離に起因した重力対流、チャネル乱流中における分散体のトポロジ変化を対象として分散体の運動を調査することを目的に設定した。

3. 研究の方法

I. 重力沈降する粒子懸濁液塊の挙動観察

分散体の粗密構造群をモデル化し、合体・分裂など群同士が動的相互干渉メカニズムを解明するため、人工的に生成した分散体の群構造同士の相互作用について実験的な観察を行う。図1は懸濁液を滴下する装置の概要、および懸濁液の沈降挙動を表す。平均直径500 μm、比重1.2の樹脂製粒子を懸濁させ

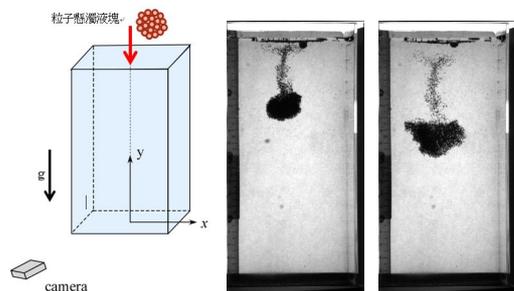


図1 粒子懸濁液塊の沈降挙動を観察する実験装置概略図。

た液体を粒子が懸濁しない液体中に滴下した。透明の容器の背後から白色光を照射し、容器正面に設置したカメラを用い粒子の画像を撮影した。画像処理により粒子懸濁液塊の形状および位置座標を取得し、粒子沈降速度および拡散の様子を評価した。

II. 濃度界面に生じる不安定波動の定量計測

分散体の粗密分布構造が発現する系において、分散体の運動および周囲流体の運動、分散体群の粗密分布情報の伝播を調査した。傾斜壁面を有する台形容器において、粒子が重力により浮上・沈降することに伴う濃度分布を形成し、重力流が形成される。分散体の密度境界層に出現する分散体の粗密分布構造の伝播速度を時空間展開画像からフーリエ変換ならびに主成分分析を用いて取得した。分散体の運動は位置座標はテンプレートマッチングにより検出した粒子位置座標に対して粒子追跡法を用いて取得した。液相の速度は本申請課題で開発したフォトブリーチング分子タグ速度計測法 (PB-MTV) を用いて取得した。PB-MTVとは、蛍光染料に強力なレーザー光を照射することにより生じる化学的退光現象を利用し分子タグを形成し、タグ位置の時間変化から速度を取得する手法である。

図2は分子タグ法を用いる実験系の概略図である。傾斜壁面の正面および側面において計測を実施した。可視化用レーザーシート光と退光用レーザービームを2本用いた。図3は退光用レーザーとタグの形状を表す。(d)はタグ検出用のテンプレートの形状を表す。

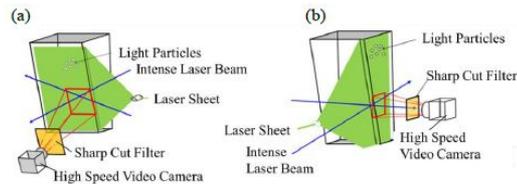


図2 フォトブリーチング分子タグ法を適用する実験系の概略図。

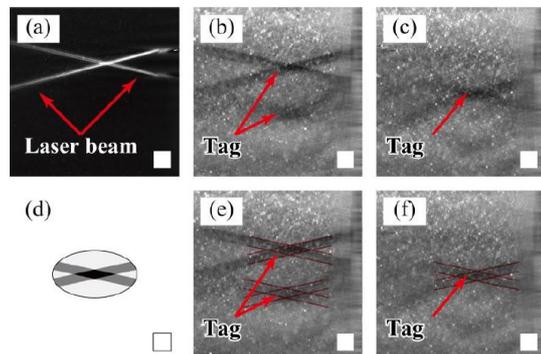


図3 (a) 退光用レーザー。(b) 時刻 $t = t_1$ および (c) $t = t_1 + \Delta t$ における分子タグ。(d) タグ検出用テンプレート。(e) 時刻 $t = t_1$ および (f) $t = t_1 + \Delta t$ にいて検出されたタグの座標。図中右下の四角形は1mm x 1mmである。

III. 分散体の形状変化と乱流変動の定量化

乱流中において分散体の形状が乱流構造および運動量交換に与える変化を定量評価するため、気泡を含む乱流場においてエネルギー輸送を担う流動成分を定式化する恒等式を導いた。分散体の初期形状は球状、円柱状、膜状とした。また、問題設定を単純化するため、分散相の粘度、密度は連続相のものと一致させ、表面張力のみを与えることにより、分散相の変形が流れ場に与える影響を評価する。基礎方程式は連続の式、および運動量保存式でありそれぞれ以下に示される。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \frac{1}{Re_\tau} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{e}_x - \frac{1}{We_\tau} \left\{ \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \right\} \nabla \phi.$$

三次元矩形直行座標系においてオイラー的に分散体の分布を記述するために、VOF法を用いる。分散体の輸送を記述する輸送方程式は以下に示す。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = 0.$$

運動量保存式を以下の様に変形し、乱流場における運動量輸送を担う流動要素の定式化を行う。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{e}_x + \mathbf{f}_d,$$

ここで、右辺第三項は表面張力項であり $\boldsymbol{\sigma}$ は応力テンソルである。ここでクリーブ流れとなる速度場 $\tilde{\mathbf{u}}$ およびその応力分布を $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$ と定義すると、それぞれは以下の様な関係式で記述することが出来る。

$$\nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}} = 0,$$

$$\nabla \cdot \tilde{\boldsymbol{\sigma}} + \mathbf{e}_x = 0,$$

$$\tilde{\mathbf{u}} = \frac{Re_\tau}{2} (1 - y^2) \mathbf{e}_x.$$

また、速度場と応力場の間には以下の相反式が成り立つ。

$$(\nabla \mathbf{u}) : \tilde{\boldsymbol{\sigma}} = (\nabla \tilde{\mathbf{u}}) : \boldsymbol{\sigma}.$$

これらの関係式を用い、運動量輸送式に速度 \mathbf{u} の内積をとり、流体層全体において体積平均することで以下の関係式を得る。左辺第一項は平均流量、左辺第二項は流体の加減速、左辺第三項はレイノルズせん断応力、左辺第四項は表面張力のエネルギー輸送への寄与を表しており、これらの総和が壁面レイノルズ数すなわち系の流動状態を示す指数の 1/3 倍と等しくなる。この恒等式から、乱流場における気泡の混入が流動場全域において流れ場をどのように変形させたか、統計的に評価することが可能となる。

$$\begin{aligned} \langle u_x \rangle + \frac{\partial}{\partial t} \left\langle \frac{Re_\tau}{2} (1 - y^2) u_x \right\rangle \\ + \langle Re_\tau y u_x u_y \rangle - \left\langle \frac{Re_\tau}{2} (1 - y^2) f_b \right\rangle = \frac{Re_\tau}{3}. \end{aligned}$$

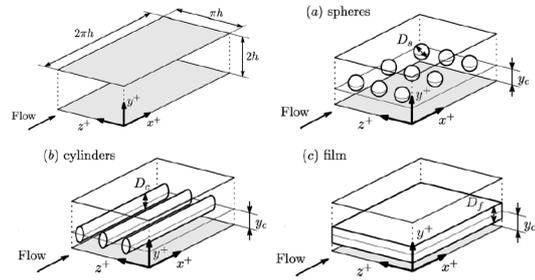


図4 計算領域の大きさ、および分散体の初期配置と幾何学形状。

4. 研究成果

I. 重力沈降する粒子懸濁液塊の挙動観察

重力落下により沈降する粒子塊の落下速度を図5に示す。落下位置から見積もられる懸濁液塊の初期速度の理論値 $U_{initial}$ および単一粒子の沈降速度の理論値 U_{Stokes} を図中において矢印で示す。実験結果から粒子の初期速度および、時間経過後の挙動は理論値に一致し、塊の速度計測が良好に行われていることが分かる。図より、懸濁液の粒子体積率45%の条件において、粒子懸濁液塊の沈降速度が他の条件よりも2倍程度大きいことが分かる。このとき、粒子体積率45%以下では粒子は拡散しながら落下することが分かった。一方で粒子体積率が45%以上では粒子懸濁液塊は渦輪を形成して沈降することが分かった。

粒子の個別運動と集団運動の差異は、粒子の存在による懸濁液塊の駆動力が空間的に分散する際に、駆動力や粒子間距離が影響すると考えられる。すなわち、過去の研究(Bosset et al. 2005, Harada et al. 2014)では粒子レイノルズ数およびストークス数が十分小さ領域が扱われている。本研究課題ではそれぞれが10程度であり、過去の研究における近似が必ずしも適用できない。すなわち様々な分野で活用される粒子沈降などは、粒子の大きさなどからその分散沈降挙動が大きく変化することを示唆している。粒子個々の運動と周囲流体の運動との差異を精緻に調査するため、レーザ誘起蛍光法やPB-MTV法を用いた二相流用の多次元計測の実装を行っている。両者の違いを定量化することにより、個別あるいは集団的な運動の流動状態を決める物理量の抽出が可能となる。

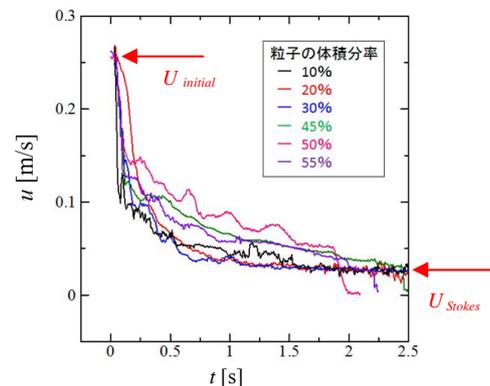


図5 粒子懸濁液塊の沈降速度の時間変化。

II. 濃度界面に生じる不安定波動の定量計測

粒子懸濁液が傾斜壁面近傍に形成する清澄部の流動を図 6 (a) に示す。 $y=0$ の位置に壁があり、図中左側より退光用レーザービームを間欠的に入射している。図中黒い線は分子タグのタイムラインであり、壁面で速度ゼロ、 $0 \text{ mm} < y < 2 \text{ mm}$ において下降流、 $y > 2 \text{ mm}$ において上昇流が存在することが分かる。図 6 (b)(c) は $y=1 \text{ mm}$ および $y=3 \text{ mm}$ における時間展開画像を表す。図中時間方向に現れる白色の帯は退光用レーザを照射中の時間を表す。図流斜めの黒い帯は分子タグの移動を表しており、その傾きから液相の速度が (b) では -4 mm/s 、(c) では 2 mm/s であることが分かる。

分子タグの移動速度すなわち液相の速度を定量計測するため、得られた時間展開画像を二次元フーリエにより周波数-空間波数座標系に変換し、そのスペクトル分布から速度を取得した。本来スペクトル分布において最大のパワーを示す成分の周波数-空間波数から速度 = 周波数/空間波数を得るが、計測ノイズや分散体の存在によるスペクトルの変形が生じる。これを低減するために主成分分析を用いることで、低ノイズの時空間速度計測を実現した。図 7 は PB-MTV およびレーザ蛍光誘起法と粒子追跡法 (LIF-PTV) から得られた速度の時間変化を表す。 x 方向速度の

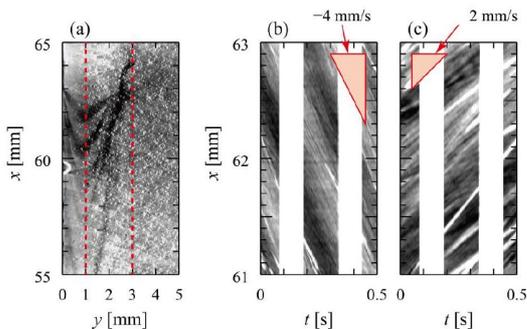


図 6 (a) タグのタイムライン画像。(b) $y=1.0 \text{ mm}$ および (c) $y=3.0 \text{ mm}$ における時空間展開画像。

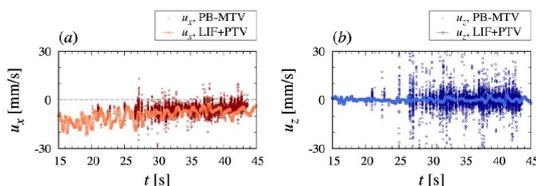


図 7 PB-MTV および LIF により得られた (a) 流れ方向と (b) スパン方向速度の時間変化。

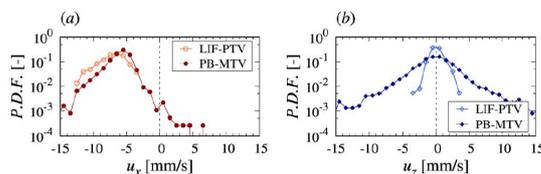


図 8 PB-MTV および LIF により得られた (a) 流れ方向と (b) スパン方向速度の頻度分布。

絶対値が時間経過と共に減少する様子が分かる。これは分散体の沈降に伴う駆動力の減少に起因する。 z 方向 (スパン方向) 速度は時間平均するとゼロとなる。 PB-MTV と LIF-PTV の結果を比較すると PB-MTV の方が速度の変動が大きい。これは LIF-PTV に比べてタグの大きさが大きいため、タグ位置推定誤差が速度計測に影響したためである。図 8 は速度の頻度分布を表している。この結果からも PB-MTV の速度計測結果はデータのばらつきが大きいことを読み取ることができる。しかし、平均値や分布の形状は類似しており、流動場の特徴を捉えている。タグの大きさ、形状の最適化から速度計測の精度向上に余地があると言える。

III. 分散体の形状変化と乱流変調の定量化

異なる分散体を混入させた場合における矩形チャンネルの壁面に働くせん断応力の変化を図 9 に示す。分散体の初期位置を $y^+=40$ および $y^+=80$ とした際の結果をそれぞれ (a) (b) に示す。図より、壁面せん断応力の変化は分散体の形状および初期位置により異なることが分かった。層状分散体を配置した場合には抵抗低減効果が得られ、その効果は $y^+=80$ の際に最大で 10% 程度、 $y^+=40$ の際に最大で 5% 程度であった。他の形状を配置した場合には、分散体は主に抵抗増大の効果をもたらすことが分かった。ただし、層状の分散体を配置した場合も時間経過と共に、壁面せん断の力は増加することが分かった。これは初期に層状の形状を与えたものの、時間経過と共に分散体が断裂するために、円柱や球状の分散体を混入した場合と同様の結果となるとを意味している。これはすなわち、分散体のトポロジ形状に応じて壁面せん断応力の変化が左右されるため、混相流の流れの制御には分散する媒体の形状制御が重要な役割を果たすと結論できる。

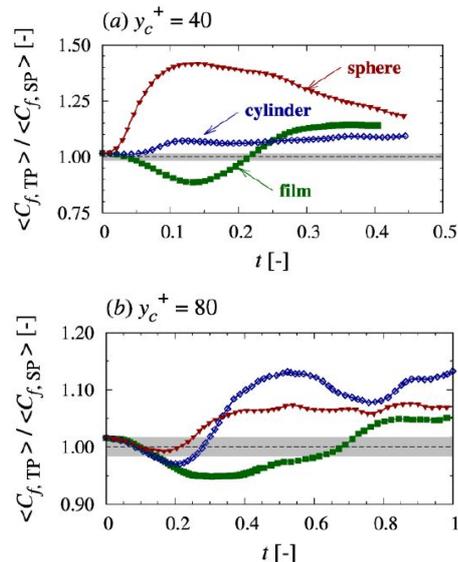


図 9 壁面せん断応力の時間変化。ハッチングの幅は単層流における時間変動 RMS 値を表す。

図 10 はエネルギー輸送にする流動成分の寄与率の時間変化を表す．図 9 と比較すると壁面せん断応力の減少が生じる際には，レイノルズせん断応力項の低下ならびに非定常項の増加が目立つ．これは層状の分散体が乱流場において壁鉛直方向の運動量交換を阻害するためにレイノルズせん断応力が減少し，これに起因した渦粘性の現象により流路中央部分において流体が加速したと考えられる．これらの結果は流動場においてエネルギー輸送を担う流動要素の寄与を恒等的に表す式により定量化されている．流動場に現れる局所的な流動構造の変化について自己相関係数から乱流の組織構造を調査した．その結果，乱流渦の断裂を示唆する結果が得られている．この結果も分散体の存在による組織渦の変形が運動量輸送の様子を変化させたことを示している．本手法により流動場の変化を定量的に評価できたと結論できる．

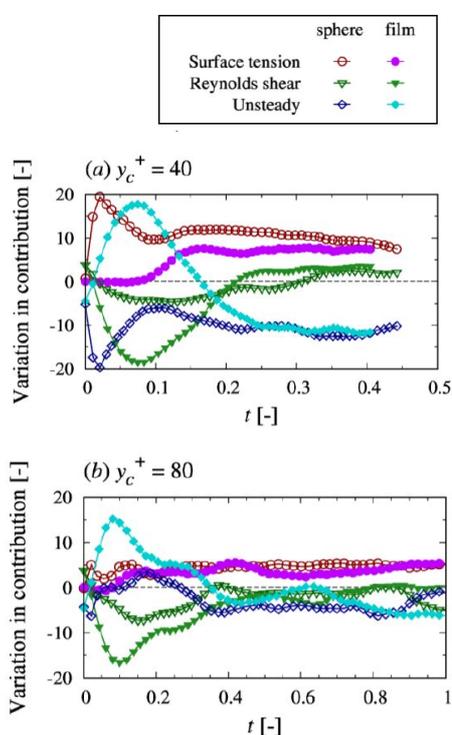


図 10 恒等式より得られたエネルギー寄与率の時間変化．

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 0 件)

[学会発表](計 12 件)

渡村友昭，“浮上する気泡群の数密度構造と液相の速度場構造の相互作用について”，日本機械学会 関西支部 第 178 研究会(招待講演)，2016 年 08 月 29 日，大

阪市立大学サテライトキャンパス(大阪府大阪市)

渡村友昭，岩坪史弥，杉山和靖，“壁面近傍で出現する微細気泡濃度波の下降について”，日本流体力学会 年会 2016，2016 年 09 月 27 日，名古屋工業大学(愛知県名古屋市)

渡村友昭，“散体対流の作り出す時空間数密度分布について”，日本機械学会 北海道支部 特別講演会(招待講演)，2016 年 12 月 09 日，北海道大学(北海道札幌市)

Tomoaki WATAMURA, Fumiya IWATSUBO, Kazuyasu SUGIYAMA, Kenichiro YAMAMOTO, Yuko YOTSUMOTO, Takashi SHIONO, “DESCENDING TEXTURE OF BUBBLE DISTRIBUTION IN A PINT GLASS”, 2017 Japan-U.S. seminar on Two-Phase flow Dynamics (国際学会)，2017 年 06 月 23 日，北海道大学(北海道札幌市)

Tomoaki WATAMURA, Fumiya IWATSUBO, Kazuyasu SUGIYAMA, Kenichiro YAMAMOTO, Yuko YOTSUMOTO, Takashi SHIONO, “Number density distribution of microbubbles in a buoyant driven convection”, Workshop 'Transition, Control and Turbulence in Bubbly Flows', 2017 年 07 月 04 日，IMFT (フランス，トゥールーズ)

渡村友昭，“ギネスビールの泡と模様：そもそも何を見ているのか？”，東京大学地震研究所 共同利用研究集会 キッチン地球科学：動手頭脳刺激実験の模索(招待講演)，2017 年 08 月 01 日，東京大学(東京都文京区)

渡村友昭，小山幹，岩坪史弥，杉山和靖，“浮上する軽量粒子群が作る容器内対流の非定常な下降流”，日本混相流学会 混相流シンポジウム 2017，2017 年 08 月 20 日，電気通信大学(東京都調布市)

渡村友昭，小山幹，岩坪史弥，杉山和靖，“粒子濃度境界層の非定常流動構造”，日本流体力学会年会 2017，2017 年 09 月 27 日，東京理科大学(東京都葛飾区)

Tomoaki WATAMURA¹, Kazuyasu SUGIYAMA, Yutaka HIRAYAMA, “On the topological effect of dispersed phase interface on the modification of skin frictional drag”, the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (国際学会)，2017 年 10 月 30 日，沖縄コンベンションセンター(宜野湾市)

Motoki Koyama, Tomoaki Watamura, Fumiya Iwatsubo, Kazuyasu Sugiyama, "Application of Photobleaching Molecular Tagging Velocimetry to highly concentrated particle flow", 10th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flow (国際学会), 2017年12月03日, 香港科学術大学(中国, 香港)

Tomoaki Watamura, Atsuhide Kitagawa, Yuichi Murai, "Experimental investigation of three-dimensional bubble cloud motion using UVP and recursive PIV", 10th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flow (国際学会), 2017年12月04日, 香港科学術大学(中国, 香港)

渡村友昭, "コップの中に現れる飲料の対流について", 化学工学会 粒子・流体プロセス部会 気液固分散工学サロン(招待講演)2018年03月15日, 関西大学(大阪府吹田市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
<http://flow.me.es.osaka-u.ac.jp/watamura/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡村友昭 (Tomoaki WATAMURA)
大阪大学 大学院基礎工学研究科 助教

研究者番号：40777736

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

杉山和靖 (Kazuyasu SUGIYAMA)
大阪大学 大学院基礎工学研究科 助教

研究者番号：50466786