

令和 6 年 9 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01248

研究課題名(和文) 流体力学的な密を回避して均一な気泡を生成する手法と力学モデルの提案

研究課題名(英文) Dynamics of monodispersed bubble generation skirting hydrodynamically crowded circumstance

研究代表者

渡村 友昭 (Watamura, Tomoaki)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・講師

研究者番号：40777736

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：粒子や気泡が懸濁した流体中では、多数の分散体が集団的な分布が模様を作る。模様の発生は流体力学的不安定と気泡間距離により決まる。しかし、この運動はギネスビールの様な小さな気泡を含む飲料にのみで見られるが、その理由は不明である。本研究は、流動不安定の発現を事前予測できる数理モデルを提案した。数値計算を行い、モデルの妥当性を検証した。分散体の直径と量、容器の傾斜角度を変化させ、不安定流動の発生を調査した。数値モデルにより流動不安定を良好に予測できることを世界で初めて示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分散体と連続相との間に生じる密度差対流は、化学反応装置や曝気槽内部に生じるため工学的に重要な現象であるが、密度差対流の不安定発生条件や分散体相変化の影響が不明であり、流動の制御が不可能であった。本研究では数値計算により流動不安定の発生条件を予測した。また、清澄分離のモデル化からも流動のスケーリング則を提案し、不安定の発生臨界を代数的に推定できることを世界で初めて示した。この結果は、Review of Modern Physicsにて紹介されたため、当該研究分野にインパクトを与えるものと言える。今後、本研究成果と、閉空間内における分散体の成長を考慮することで、現象理解が進むことが期待できる。

研究成果の概要(英文)：In a particle or bubble suspended fluids, a very large number of small dispersed bodies form a texture motion of a swarm. Such a texture motion is caused by a gravity-driven hydrodynamic instability and depends on the interbubble distance. However, it is unknown why the bubble cascade is observed only in stout beer with nitrogen, such as Guinness beer. To address this question via a priori estimation, here, we develop a mathematical continuum model of film flow in bubbly liquid, uncovering the essential dynamics among many physical processes occurring simultaneously in a glass. We perform a numerical simulation of the distribution of massless Lagrangian particles in an inclined container. We investigate the effects of particle concentration, inclination angle, particle diameter, and container size on the cascading film flow. The results reveal that the motion and waviness of clear-fluid film can be successfully estimated a priori to experiments or simulations.

研究分野：流体力学

キーワード：混相流 気泡 濃度

1. 研究開始当初の背景

創薬やナノ粒子などの新材料開発において、微小な分散体の取り扱いが急増し、これらを効率的かつ正確に分離や混合することが課題となっている[1-3]. 流体中に分散した無数の粒子や気泡など、密度差をもつ物体が重力に従って運動するとき、分散体が自己選択的に粗密分布構造を形成し、集団的な運動をすることにより大規模循環が生じる. 体積率が1%程度と小さく、粒子レイノルズ数も小さいため、粒子間の衝突も生じない系であるにも関わらず、分散体の粗密分布構造が出現する. 傾斜壁面近傍において、分散体の重力分離に伴う清澄層の形成は、密度差対流を誘起し、傾斜角度によってその流れが非定常となる. 多数の分散体を作り出す密度差対流の攪拌効果により、結晶や細胞の成長が阻害される. これらの多くは分散体と連続相の間にある密度差に起因した問題であり、分散体が連続体の様に振る舞う挙動を制御できないためである.

2. 研究の目的

本研究の目的は、分散体の集団的運動に誘起される非定常流れが生じる条件を明らかにし、流動モデルを構築するための知見を得ることである. 単一の分散体が無限流体中に存在する場合、十分に理解された運動方程式によりその運動が記述される. しかし、無数の分散体が存在する場合、分散体同士は周囲流体を介して相互作用力が作用し、集団的な運動が生じる. 研究対象とする系は、濃度の高い粒子懸濁液であり、一般的に不透明となるため、液体の運動や粒子の個別運動、濃度分布を観察すること自体が困難である. そこで、本研究は数値計算により流動を記述する. 個別の粒子運動と容器内流動を同時に記述することで、集団性が生じる条件を体積濃度率で説明し、流動モデルを構築する. 密な懸濁液中における気泡の運動状態を予測することで、気泡成長や結晶成長のモデル化に必要な流体力学的な知見を得ることを目的とする.

3. 研究の方法

本研究では、清澄層の流動不安定現象と粒子の集団性を捉えるため、数値計算により傾斜容器内の粒子運動を調査した. 個別粒子の運動を解像し、清澄層内部の流動不安定を捉えるため、Euler-Lagrange型の数値計算法[4]を用いた. 図1に示す様に、二次元矩形領域を対象とし、高さ方向を $x$ 、幅方向を $y$ と定義する. 容器の大きさ $L_x$ 、傾斜角度 $\beta$ 、粒子直径 $a$ 、粒子体積率 $\alpha$ を変化させる. 粒子間および粒子-壁間に働く衝突力は離散要素法[5]を用いて表現する. これにより、容器上部におけるフォームの形成を、粒子の集積として記述できる.

分散体の末端速度と密度流の流下速度、容器の幾何形状など変数とし、清澄層の発達を代数的に求めることを最終目標とし、対象とする系のレイノルズ数が低いことからストークス近似が成り立つという前提で、液体中の粒子運動をストークス動力学により算出した. オリジナルのストークス動力学法は無限遠の(壁が存在しない)流体中における微粒子運動を理論的に記述するものであるが、Nott and Brady (1994)に基づき、速度ゼロの動かない粒子を配置することで壁の存在を表現することにした[7].

過飽和液体中における気泡の成長を理解するため、赤外線レーザーによる気泡核生成を行い、溶存気体量に対する気泡成長の変化を調査する. 本研究ではまず、レーザーを集光した場合及び集光していない場合において比較実験を行い、気泡核生成に及ぼす集光の有無の影響を調査した. 波長1064 nm 最大出力450 mJのQスイッチレーザーから射出されるパルスレーザー光を、平凹、平凸レンズを組み合わせて並行光を作った. 焦点距離75 mmの平凸レンズを用い、集光の影響を調査する. さらに、種々の気体を溶解した過飽和水中においてレーザー誘起気泡を生成し、その崩壊後の気泡核生成に及ぼすレーザーエネルギー及び溶存気体濃度の影響を調査した.

過飽和液中における気泡成長に関し、複数気泡の成長干渉を記述するため、理論的な気泡成長モデルの構築を試みた. 本研究は無限静止流体中で非軸対称配置となる複数気泡の干渉を定式化し、気泡半径や遠方での溶存気体濃度などのパラメータを変化させることでマイクロバブル

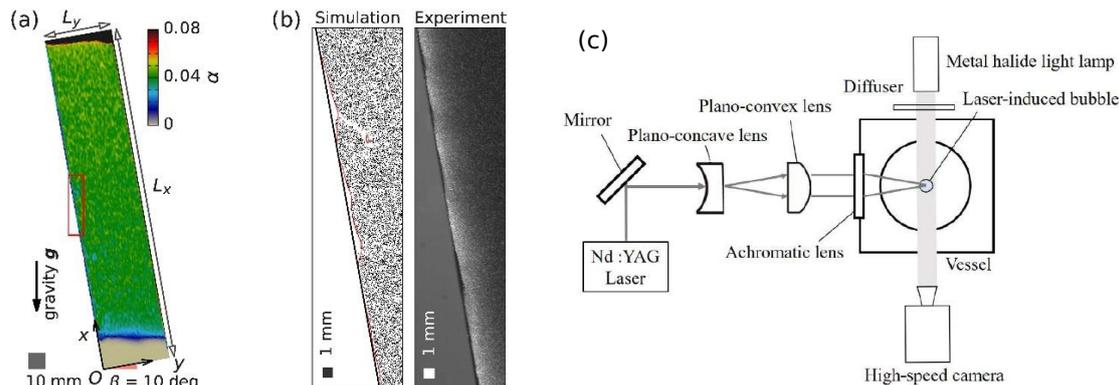


図1 (a) 数値計算の解析領域と (b) 計算結果の一例. (c) レーザー誘起気泡の実験系.

の挙動を調査した。流体は無限静止流体とし、初期に過飽和状態とする。気泡内部は周囲の動圧に比べて Laplace 圧が支配的であり、気泡は常に球形を保つ。濃度拡散は半径変化より速く、気泡界面の動きに流れは誘起されないことを仮定する。Legendre 多項式展開による気泡溶解の解析手法[8]を拡張し、周囲気泡の気体濃度分布による界面成長を記述した。

#### 4. 研究成果

傾斜容器内における微小気泡の分布を図 2 に示す。容器傾斜角度が小さい条件では、流動が不安定となり非定常流れとなる。粒子体積率が小さい、あるいは粒子が大きい場合には、粒子は個別運動をすることが分かる。申請者が事前に得た知見から、非定常流れは、重力流の不安定現象である「転波」により生じ[9]、その発生はフルード数  $Fr$  により決まることが分かっている。ただし、転波は清澄層厚さ  $h$  と閉金利融資間距離  $\ell$  により定義される「濃度界面の解像度」 $H (= \ell/h)$  (図 3 参照) が十分に小さい条件下で生じる[10]。流動状態を事前予測するために、流動モデルを以下に提案する。密度  $\rho_L$ 、厚さ  $h$  の液膜が重力  $g$  により傾斜角  $\beta$  の壁面を流下するとき、その流速分布は壁からの距離を  $y$  として、次のように表される。

$$u_x(y) = \bar{u}_x(y) = -\frac{\langle \alpha \rangle \rho_L g \cos \beta}{2\mu} (2h - y)y. \quad (1)$$

なお、 $y = h$  の時、流速は最大値を  $U_x$  を示し、これは以下の式で定義できる。

$$U_x = \frac{\langle \alpha \rangle \rho_L h^2 g \cos \beta}{2\mu}. \quad (2)$$

容器の大きさ  $L_x$  と気泡の浮上速度  $v_T$  から、Boycott 効果により生じる容器内対流の時間スケール  $\tau$  を用いると、清澄層厚さは次元解析的に以下の関係式で記述できる。

$$\tau \sim \frac{L_x}{U_x}, \quad h \sim \tau v_T \sin \beta, \quad v_T = \frac{\rho_L D^2 g}{18\mu}. \quad (3)$$

式 (2), (3) を用いると、清澄層厚さ  $h$  とその流下速度  $U_x$ 、フルード数  $Fr$  と、濃度界面の解像度  $H (= a/(h\langle \alpha \rangle^{1/3}))$  は次式のように記述できる。

$$U_x \sim \frac{\rho_L g}{2\mu} \left( \frac{\langle \alpha \rangle L_x^2 a^4 \sin \beta \cos \beta}{81} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad h \sim \left( \frac{L_x a^2 \tan \beta}{9\langle \alpha \rangle} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

$$Fr \sim \frac{\rho_L a}{9\mu} (L_x g \cos \beta)^{\frac{1}{2}}, \quad H \sim \left( \frac{9a}{L_x \tan \beta} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (5)$$

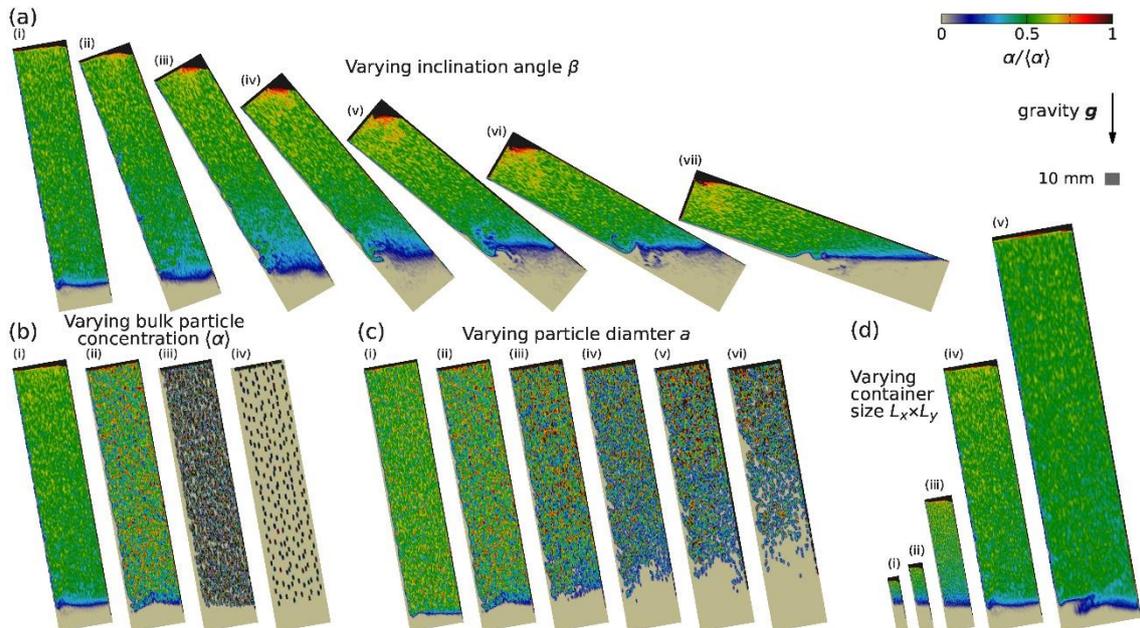


図 2 様々な条件下における粒子体積率分布。(a) 傾斜角度の影響。(b) 粒子体積率の影響。(c) 粒子直径の影響。(d) 容器寸法の影響。

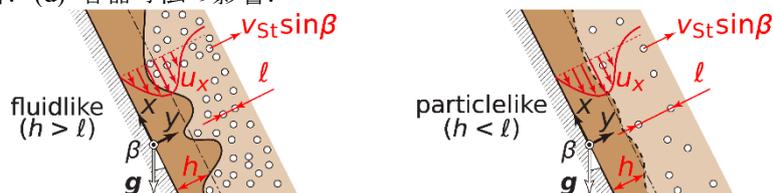


図 3 清澄層厚  $h$  と粒子間距離  $\ell$  の概略図

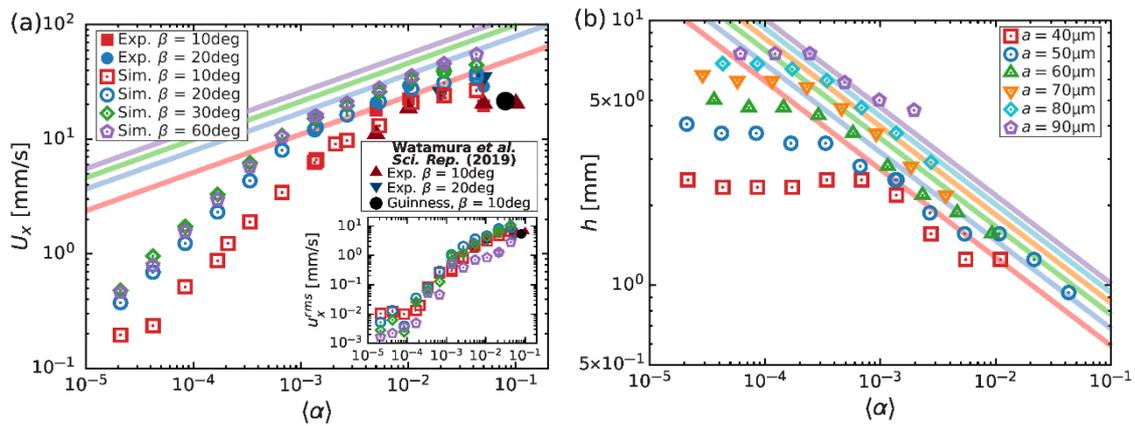


図4 粒子体積率 $\langle \alpha \rangle$ に対する清澄層の流下速度  $U_x$  と清澄層厚さ  $h$  の関係. 記号は数値計算また実験で得られた結果を表し, 線は式(4) で得られた関係を示す.

図4に清澄層の流下速度  $U_x$  と清澄層厚さ  $h$  の粒子体積率 $\langle \alpha \rangle$ 依存性を示す.  $\langle \alpha \rangle > O(10^{-3})$  において数値計算結果とモデル式は, 絶対値に僅かな差異が生じているが, 傾き  $1/3$  は良好に一致する. この領域は  $H < 1$  となり, 粒子濃度界面が鋭敏に取られられ, 粒子は集団的な運動をしている. 一方,  $\langle \alpha \rangle < O(10^{-3})$  において, 数値計算結果とモデルとの間には乖離が生じ, その傾きも明らかに変化する. このことから, 提案したモデルは, 密な懸濁液の連続的な流動を良好に捉えることができ, 流動を事前に評価可能な関係式であると結論付けた.

希薄領域の流動を記述するため, まずは簡単な2次元の系を設定し, 容器内に囲まれた流体領域内での粒子挙動, および粒子運動によって生じる周囲流体の速度が算出可能であることを確かめた. 密閉容器の壁面を粒子で置き換えた3次元のシミュレーションを行うためには, きわめて多くの粒子を含めた計算をする必要がある. 本研究期間内には十分な大規模計算には至らなかったが, 理論的には計算は可能であり, プログラミング上の工夫により3次元計算を実施予定である. 本研究では期間内に清澄層の発達を代数的に記述するまでは至らなかったが, そのためのシミュレーションの検討を行うことができた.

二酸化炭素過飽和水中に平行レーザ光を照射し, 気泡の発生を観察した. 図5はレーザ強度に対する気泡数と初生時間の関係を表す. レーザ強度の増加に従い, 気泡の数が増加し, 初生時間は僅かに短くなる. これはレーザのエネルギー投入に対して, 発泡が促進されると言える. なお, レーザ照射  $200 \text{ ms}$  後において, 気泡の直径はレーザ強度に依存せず, 全ての条件において, 気泡直径は  $200 \mu\text{m}$  程度であった. レーザを集光した場合, 気泡数は  $300$  を上回ったことから, エネルギーの局在化により, 発泡量を増加させることが可能と言える. なお, 集光時の気泡数はエネルギー依存性があるものの, ある閾値を超えると急激な発泡が生じ, その後, 気泡数が頭打ちとなる. これは, 隣接した気泡同士で溶解気体の奪い合いが生じるため, 初生した気泡の成長が抑制あるいは気泡の消滅が生じるためと推測できる. 今後は, 濃度場の時空間計測を行い, 気泡成長と周囲濃度場の関係性調査を検討する.

図6はレーザ誘起気泡の崩壊後の気泡核生成の様子を示し, 左から順に蒸留水, 二酸化炭素過飽和水中, マイクロバブル水中における結果である. 蒸留水中では, レーザ誘起気泡の崩壊後に気泡核の初生が見られるが, 生成された気泡数は二酸化炭素過飽和水中に比べて少ない. 一方, 二酸化炭素過飽和水中では溶存気体濃度の上昇に伴って気泡核の生成が促進されることがわかる. マイクロバブル水中でも蒸留水中と同様にレーザ誘起気泡の崩壊後に気泡核の初生が見られるが, 両者に生成された気泡数に大きな差は見られない. 蒸留水中においては気泡核が生成した初期の段階では気泡数が急速に減少していく傾向があった. 一方, マイクロバブル水中においては気泡数の減少の度合いは緩やかであった. ここで, マイクロバブル水の水質の計測結果の一例では, 電気伝導度が  $1.215 \mu\text{S/cm}$ , 溶存酸素量は  $10.01 \text{ mg/L}$  であった. このことから, マイクロバブル水の方が水溶液中の溶存ガスが多いために, 気泡内外の濃度勾配が緩やかになり, 気泡が残存しやすくなったものと考えられる. これらの実験結果から微細気泡の生成には, 水中溶存気体の種類と量が大きく影響することを示した.

ガス過飽和水中における複数気泡の成長を記述し, その時間変化を観察した. 図6は過飽和度4の液体中において, 気泡が成長する様子を表す. 時間進行に従い, 全ての気泡が生長するが, 外縁と中心の気泡では, 成長速度が異なる様子が分かる. 外縁気泡が溶存気体を奪うため, 中心の気体は溶存気体の少ない液体にしか接することができない. そのため, 中心の気泡成長が阻害される. さらにこの時, 外縁気泡の表面では濃度勾配の大きい位置で気泡の成長が早くなる. 気泡成長の空間依存性により, 外縁気泡は成長に伴いその中心位置が外側へ移動し, さらに溶存気体濃度の高い流体へ接することとなる. この一連の成長特性は, ガス過飽和水中における気泡初生位置の不均一性は, 気泡成長の不均一性を増加させることに繋がる. つまり, 均一な大きさの気泡を一度に作り出すためには, ガス過飽和水中において, 空間的に均一な気泡初生が必要と結論付けられる.

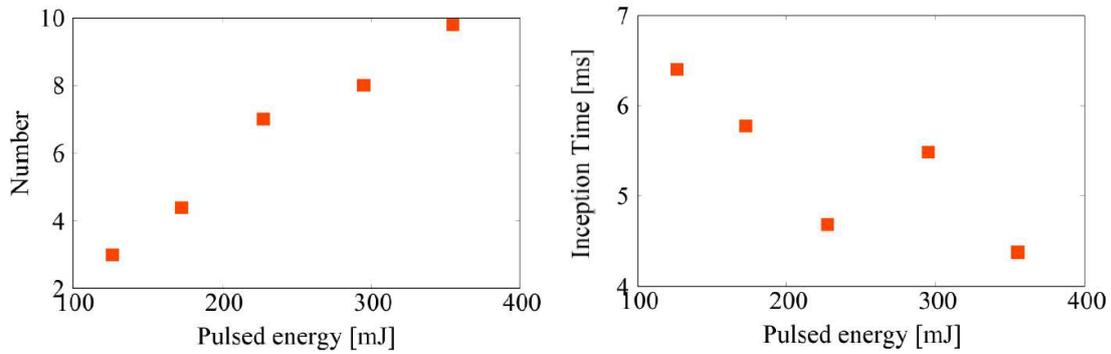


図5 レーザ強度に対する気泡数（左）と初生時間（右）の変化。

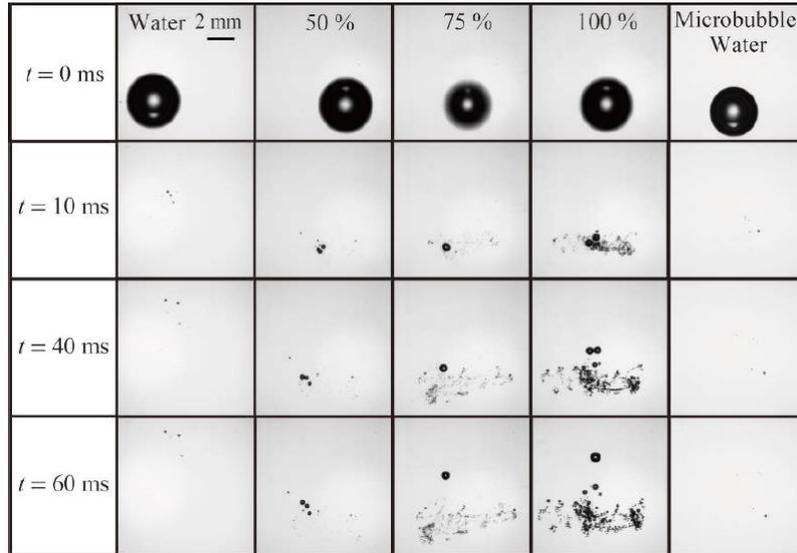


図6 レーザ誘起気泡の崩壊に伴う気泡核生成の様子

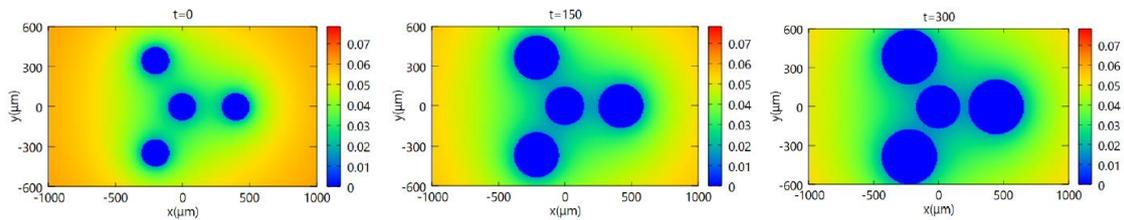


図6 レーザ誘起気泡の崩壊に伴う気泡核生成の様子

#### 参考文献

1. [http://iss.jaxa.jp/utiliz/field/utiliz\\_mg.html](http://iss.jaxa.jp/utiliz/field/utiliz_mg.html) (2024年05月01日閲覧)
2. [http://www.jaxa.jp/article/special/experiment/ishikawa01\\_j.html](http://www.jaxa.jp/article/special/experiment/ishikawa01_j.html) (2024年05月01日閲覧)
3. [https://humans-in-space.jaxa.jp/protein/public/about/structural\\_analysis.html](https://humans-in-space.jaxa.jp/protein/public/about/structural_analysis.html) (2024年05月01日閲覧)
4. Mazzitelli, I. M., Lohse, D., & Toschi, F., On the Relevance of the Lift Force in Bubbly Turbulence, *J. Fluid Mech.*, **488**, 283-313 (2003).
5. Cundall, P., & Strack, O. D., A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Geotech.*, **29**, 47-65 (1979)
6. Nott, P. R., & Brady, J. F., Pressure-driven flow of suspensions: simulation and theory, *J. Fluid Mech.*, **275**, 157-199 (1994).
7. Otomo, R., Nakano, Y., & Harada, S., Hydrodynamic diffusive behavior of fine particle assemblage passing through nonuniform granular porous media, *Part. Sci. Tech.*, **41**, 940-952 (2023).
8. Liu, Y., Sugiyama, K., & Takagi, S. On the interaction of two encapsulated bubbles in an ultrasound field. *J. Fluid Mech.*, **804**, 58-89 (2016).
9. Watamura, T., Iwatsubo, F., Sugiyama, K., Yamamoto, K., Yotsumoto, Y., & Shiono, T. Bubble cascade in Guinness beer is caused by gravity current instability. *Sci. Rep.*, **9**(1), 5718 (2019).
10. Koyama, M., Watamura, T., & Sugiyama, K. Simultaneous photobleaching molecular tagging velocimetry for density-stratified flows of suspensions. *Exp. Fluids*, **60**, 1-22 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Watanabe Tomoaki, Sugiyama Kazuyasu, Yotsumoto Yuko, Suzuki Mihoko, Wakabayashi Hideyuki	4. 巻 103
2. 論文標題 Bubble cascade may form not only in stout beers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 63103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.103.063103	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 渡村友昭, 杉山和靖, 四元裕子, 鈴木深保子, 若林英行
2. 発表標題 軽量粒子の移動に伴う充填と流動の数値的調査
3. 学会等名 混相流シンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清家浩介, 小笠原紀行, 渡村友昭, 高比良裕之
2. 発表標題 レーザー誘起気泡の成長・崩壊に伴う気泡核生成に及ぼす溶存気体濃度の影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡村友昭
2. 発表標題 ギネスビールの織りなす模様の数値と数理
3. 学会等名 第41回関西界面化学セミナー（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoaki Watanura, Kazuyasu Sugiyama, Yuko Yotsumoto, Mihoko Suzuki, Hideyuki Wakabayashi
2. 発表標題 Why does bubble cascade form only in Guinness beer
3. 学会等名 IUTAM Symposium on Dynamics and Interface Phenomena of Bubbles and Droplets at Multiple Scales (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡村友昭
2. 発表標題 ギネスビールの泡が模様を作る力学～炭酸水では、なぜ模様が生じない?～
3. 学会等名 第8回ファインバブル学会連合シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Watanura, K. Sugiyama, Y. Yotsumoto, M. Suzuki, H. Wakabayashi
2. 発表標題 Does bubble cascade form only in stout beer?
3. 学会等名 4th International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡村友昭, 杉山和靖, 四元祐子, 鈴木深保子, 若林英行
2. 発表標題 密な気泡懸濁液の希薄限界と連続体近似
3. 学会等名 混相流シンポジウム2022
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣畑 佑真, 渡村 友昭, 杉山 和靖
2. 発表標題 ギネスビール中における液膜流下現象のスケーリング
3. 学会等名 日本機械学会関西支部2021年度関西学生会学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔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	小笠原 紀行 (Ogasawara Toshiyuki)  (00552184)	大阪公立大学・大学院工学研究科 ・准教授  (24405)	
研究分担者	大友 涼子 (Otomo Ryoko)  (00726862)	関西大学・システム理工学部・准教授  (34416)	
研究分担者	杉山 和靖 (Kazuyasu Sugiyama)  (50466786)	大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授  (14401)	

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
---------	---------