

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05809

研究課題名(和文) 円管内流れにおける粒子を含有する液滴の合体運動の理解と制御

研究課題名(英文) Understanding and control of coalescence of droplets with suspended particles in flow through a tube

研究代表者

村岡 正宏 (Muraoka, Masahiro)

東京理科大学・理工学部機械工学科・講師

研究者番号：70219880

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：円管内流れにおける粒子を含有する液滴の合体運動において、液滴に含有させる金コーティングアクリル粒子の直径を $5\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ と変化させた。その場合の粒子体積濃度は 0.08% ～ 0.4% である。其々の粒子に対して円管内流れのRe数を 0.01 ～ 0.08 の範囲で変化させ、合体時間を求め粒子を含有する場合の合体時間に関する半理論式と比較した。いずれの条件下でも粒子を含有している液滴の合体時間が、粒子を含まない液滴の合体時間と比較して、大きく減少することを実験で明らかにした。円管内流れのReが 0.01 では、粒子を含有している場合の半理論式は、ある程度実験結果を記述していることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Coalescence of droplets with suspended particles in creeping flow through a tube were examined. Three types of the gold-coated acrylic particles were employed, $5\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$ and $30\mu\text{m}$ in diameter, respectively. Volume concentration of particles ranged from 0.08% to 0.4% . Reynolds number of the tube flow ranged from 0.01 to 0.08 . Coalescence time of droplets was measured and compared with the predictions of semi-theoretical formulas. Coalescence time with particle in all cases of particle size was obviously shorter than that without particle. The experimentally measured coalescence times with particle agreed roughly with the values predicted by semi-theoretical formulas for the case of $Re=0.01$. The values predicted by semi-theoretical formulas deviate from the experimentally measured coalescence times with increasing Re . It is considered that the effect of the rotation of the following droplet is not taken into account in the semi-theoretical formulas.

研究分野：流体力学

キーワード：液滴 粒子 合体運動 円管内の遅い流れ

1. 研究開始当初の背景

(1) 周囲流体とは混じり合わない2個の液滴の合体運動は、液液抽出やポリマーブレンド等の多くの工業プロセスや、化学反応、エマルジョンの安定性の問題等に関連している基礎的問題である。

(2) 円管内流れにおける2個の液滴の合体運動は、流体ハンドリング技術や化学反応の制御、ドラッグデリバリーシステムへの応用が期待され、更に多孔質体を通過する混相流の解析の基礎に位置づけられる。多孔質体を通過する混相流の例として、原油の強制回収法、石油化学プラント等からの排水中の微細油滴のコアレッサーによる除去等が挙げられる。液滴の合体運動は主として化学工学の分野で研究対象とされて来ている研究テーマであるが、円管内流れにおいて液滴の合体運動を取り上げた例は極めて少ない。

2. 研究の目的

本研究は、流体ハンドリング技術や化学反応の制御、ドラッグデリバリーシステムへの応用が期待される、低速で円管内を通過する流れにおける周囲流体とは混じり合わない粒子を含有する2個の液滴の合体運動のメカニズムの解明と制御を目的としている。

具体的な研究項目は、

(1) 液滴の合体運動に対する液滴に含有させる粒子径及び粒子の体積濃度の影響の解明、(2) 粒子を含有する液滴の合体運動の際の合体時間に関する半理論式の構築と実験値との比較、(3) 粒子を含有する液滴の合体運動の際の液滴内部流動の解明、(4) 合体運動に及ぼす Re 数の影響の解明の4点である。

3. 研究の方法

(1) 円管内流れ(水平円管、内径 2mm)における2個の液滴の合体運動を調べる。その際液滴に含有させる粒子の体積濃度及び粒子径、及び円管内流れの Re を変化させる。液滴の速度変化、合体時間、2液滴間の隙間直径、液滴の管軸からのずれ等を測定する。ここで円管内流れの中の2個の液滴の合体時間とは、後続する液滴が先行する液滴に追いつき2液滴の相対速度が0になった時から液滴間に存在している周囲流体で形成されている薄膜の排出過程を経て、液滴の合体運動が始まるまでに要する時間のことである。

(2) 粒子を含有する液滴の合体運動に関して、合体時間についての半理論式を構築する。2個の液滴が合体運動に至るには2個の液滴間に存在する薄膜状の周囲流体が排出されなければならない。粒子を含有しない液滴の合体運動の場合、液滴間の周囲流体で形成されている薄膜に作用する力として流体力

学的な力の他に、液滴間に作用するファンデルワールス力がある。粒子を含む液滴同士の場合、薄膜に作用する力には、前述の粒子を含有しない場合に加えて更に、薄膜付近に存在する先行液滴の界面近傍の粒子と後続液滴の界面近傍の粒子間に作用するファンデルワールス力、先行液滴の薄膜付近の粒子と後続液滴間のファンデルワールス力及び後続液滴の薄膜付近の粒子と先行液滴間のファンデルワールス力を見積もる必要がある。以上のように求められた粒子を含有する場合についての合体時間の半理論式が実験で得られた合体時間を記述しているかを検証する。

4. 研究成果

(1) 平成27年度

粒子(金コーティングアクリル粒子、直径 5 μm)を含有している液滴の合体時間が、粒子を含まない液滴の合体時間と比較して、大きく減少することを予備実験で見出している。その場合の粒子の液滴に対する体積濃度が 0.08%であることを踏まえて、予備実験で使用した粒子と同じ粒子を液滴に含有させ、その際液滴に対する粒子の体積濃度の変化に対する合体時間の変化を求めた。その際先行液滴径は一定とし、後続液滴径を変化させた。体積濃度を増加させ、濃度が 0.3~0.4% 付近になると、更なる合体時間の減少は見られないことを明らかにした。次いで円管内流れの Re 数を変化させ、合体運動に対する Re 数の影響を調べた。初めに粒子を含有しない場合について Re 数を 0.01~0.8 の範囲で変化させた。2個の液滴が合体運動に至るには、2個の液滴間に存在する薄膜状の周囲流体が排出されなければならない。粒子を含有しない液滴の合体運動の場合、液滴間の周囲流体で形成されている薄膜に作用する力として流体力学的な力の他に、液滴間に作用するファンデルワールス力がある。粒子を含有しない場合についての合体時間の半理論式と比較すると、Re 数が 0.01 では、半理論式が比較的良好に実験結果を記述しているのに対し、Re 数が 0.8 では、半理論式は実験結果を記述していないことが分かった。粒子を含む液滴同士の合体運動の場合、薄膜に作用する力には、前述の粒子を含有しない場合に加えて更に、薄膜付近に存在する先行液滴の界面近傍の粒子と後続液滴の界面近傍の粒子間に作用するファンデルワールス力、先行液滴の薄膜付近の粒子と後続液滴間のファンデルワールス力及び後続液滴の薄膜付近の粒子と先行液滴間のファンデルワールス力があり、それらを考慮した粒子を含有する場合についての合体時間についての半理論式を提案した。

(2) 平成28年度

液滴に含有させる金コーティングアクリル粒子の直径を 5 μm から 15 μm に変化させた。

初めに体積濃度は $5\ \mu\text{m}$ の場合と同様に 0.08% で予備実験を行ったところ $5\ \mu\text{m}$ の粒子で顕著に確認できた合体時間の減少が殆ど見られなかった。 $15\ \mu\text{m}$ の場合、粒子の数密度が $5\ \mu\text{m}$ (体積濃度 0.08%) の粒子の場合と比較して約 3.7% と非常に小さくなっていることによるものと考えられたので、体積濃度を 0.24% に増加させて実験を行った。その場合の粒子の数密度は $5\ \mu\text{m}$ (体積濃度 0.08%) の粒子の場合の約 11% であった。円管内流れの Re 数も $0.01\sim 0.08$ の範囲で変化させ、それぞれの条件について合体時間を求め粒子を含有する場合の合体時間に関する半理論式と比較した。粒子を含有する場合の合体時間の半理論式では、粒子を含有しない場合の半理論式と比較して、薄膜付近に存在する先行液滴の界面近傍の粒子と後続液滴の界面近傍の粒子間に作用するファンデルワールス力、先行液滴の薄膜付近の粒子と後続液滴間のファンデルワールス力及び後続液滴の薄膜付近 μm の粒子と先行液滴間のファンデルワールス力が考慮されている。いずれの Re 数でも今回の $15\ \mu\text{m}$ の粒子の場合、 $5\ \mu\text{m}$ の粒子の場合と同様に合体時間の減少が見られた。 $15\ \mu\text{m}$ の粒子の場合、粒子の数密度が $5\ \mu\text{m}$ の粒子の約 11% と小さいにも関わらず、 $5\ \mu\text{m}$ の粒子の結果と比較して、合体時間はやや短くなった。合体時間に対する粒子サイズの影響が数密度の影響よりも大きいことが確認できた。 Re が 0.01 では、粒子を含有している場合の半理論式は、ある程度実験結果を記述していることを確認した。 Re の増大とともに半理論式は、粒子を含有しない液滴の場合及び $5\ \mu\text{m}$ の粒子を含有する液滴の場合と同様に実験結果から逸脱していく結果が得られた。

(3)平成29年度

液滴に含有させる金コーティングアクリル粒子の直径を $15\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ と変化させた。その場合体積濃度はそれぞれ、 $15\ \mu\text{m}$ (0.4%)、 $30\ \mu\text{m}$ (0.4%) であり、 $15\ \mu\text{m}$ (0.4%) 粒子の数密度は $5\ \mu\text{m}$ (体積濃度 0.08%) の場合の約 19% で、 $30\ \mu\text{m}$ (0.4%) 粒子の数密度は $15\ \mu\text{m}$ (体積濃度 0.4%) の約 12% 、 $5\ \mu\text{m}$ (体積濃度 0.08%) の約 2% であった。其々の粒子に対して円管内流れの Re 数を $0.01\sim 0.08$ の範囲で変化させ、それぞれの条件について合体時間を求め粒子を含有する場合の合体時間に関する半理論式と比較した。実験に関しては、いずれの条件下でも粒子を含有している液滴の合体時間が、粒子を含まない液滴の合体時間と比較して、大きく減少することを明らかにした。円管内流れの Re が 0.01 では、粒子を含有している場合の半理論式は、ある程度実験結果を記述していることを確認した。 Re の増大とともに半理論式は、粒子を含有しない液滴の場合と同様に実験結果から逸脱していく結果が得られた。後続液滴が小さい場合先行液滴の存在による二次流れの

影響を受け、後続液滴が管軸からずれを生じ、回転する。円管内流れの Re 数の増大とともに回転速度が増大し、回転により周囲流体が2液滴の隙間に輸送される。提案した半理論式では後続液滴の回転の影響を考慮していないため、 Re 数が増大すると半理論式と実験値とのずれが増大する理由の主たる原因と考えられ、半理論式の適用可能な Re 数の範囲があることがわかった。

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1件)

Aro Toyama, Masakazu Gotoda, Toshihiro Kaneko and Ichiro Ueno, Existence conditions and formation process of second type of spiral loop particle accumulation structure (SL-2 PAS) in half-zone liquid bridge, Microgravity Science and Technology 29 (4), 263-274, 2017. (doi:10.1007/s12217-017-9544-y) (査読有り)

[学会発表](計14件)

Masahiro Muraoka, Haruhito Sakurai, Film Drainage and Coalescence of Droplets in Flow through a Tube at Low Reynolds Number, The International conference on Engineering and Applied Sciences, 2018.

Masahiro Muraoka, Yusuke Omori and Nobuhiro Kuroda, Influence of Particle Size on Coalescence of Droplets with Particle in Flow through a Tube at Low Reynolds Number, ICEAS International Conference on Engineering and Applied Science, 2017.

Masahiro Muraoka, Yusuke Omori and Nobuhiro Kuroda, EFFECT OF PARTICLE SIZE ON COALESCENCE OF DROPLETS WITH PARTICLE IN CREEPING FLOW THROUGH A TUBE, 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 2017.

Masahiro Muraoka, Yuki Kumagai & Yuta Yatagawa, Influence of Reynolds number on coalescence of droplets with particle in flow through a tube at low Reynolds number, International Conference on Engineering and Information Technology, 2017.

Shuya Kawaguchi, Hiroshi Mizoguchi, Ryohei Egusa, Yoshiaki Takeda, Etsuji Yamaguchi, Shigenori Inagaki, Fusako

Kusunoki, Hideo Funaoui, and Masanori Sugimoto, "Accuracy Evaluation of Hand Motion Measurement using 3D Range Image Sensor", 2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST2017),2017.

Natsuki Sako, Hiroshi Takemura and Hiroshi Mizoguchi, "Novel Application of 3D Range Image Sensor for Personal Identification based on Skeletal Information", 2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST2017),2017.

Mikihiro Tokuoka, Hiroshi Mizoguchi, Ryohei Egusa, Shigenori Inagaki, Fusako Kusunoki, and Masanori Sugimoto, "Novel Application of 3D Range Image Sensor for Estimation of Interests based on Fixation Time of Face Orientation", 2017 11th International Conference on Sensing Technology (ICST2017), 2017.

Mikihiro Tokuoka, Haruya Tamaki, Tsugunosuke Sakai, Hiroshi Mizoguchi, Ryohei Egusa, Shigenori Inagaki, Mirei Kawabata, Fusako Kusunoki and Masanori Sugimoto, "Development of Gesture Recognition Sub-system for BELONG --Increasing the Sense of Immersion for Dinosaurian Environment Learning Support System--", 9th International Conference on Computer Supported Education (CSEDU2017), 2017.

Masahiro Muraoka, Yuki Kumagai and Yuta Yatagawa, Effect of Reynolds number on coalescence of droplets with particle in creeping flow through a tube, IMA8 8th Conference of the International Marangoni Association,2016.

Hironobu Matsumoto, Yusuke Koiwa, Toshihiro Kaneko & Ichiro Ueno, Condensation and collapse of vapor bubble in Hele-Shaw cell, 11th Asian Microgravity Symp.,2016.

Daichi Kondo, Lizhong Mu, Motochika Inoue, Farzam Zoueshtiagh & Ichiro Ueno, Acceleration of macroscopic contact line of droplet spreading on a smooth substrate induced by interaction with a spherical particle, 11th Asian Microgravity Symp.,2016.

Masahiro Muraoka, Yuki Kumagai, Yuta Yatagawa, Ichiro Ueno, EFFECT OF REYNOLDS NUMBER ON COALESCENCE OF DROPLETS IN

CREEPING FLOW THROUGH A TUBE, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015,2015.

Masahiro Muraoka, Yuki Kumagai, Yuta Yatagawa, Ichiro Ueno, INFLUENCE OF REYNOLDS NUMBER OF TUBE FLOW ON COALESCENCE OF DROPLETS IN A TUBE CREEPING FLOW, ASME2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems and ASME 2015 12th International Conference on Nanochannels InterPACKICNMM2015,2015.

Aro TOYAMA, Masakazu GOTODA, Toshihiro KANEKO, Ichiro UENO, Occurring condition and formation process of particle accumulation structure (PAS) under higher Marangoni numbers in half-zone liquid bridge, 6th Int. Symp. Physical Science in Space (ISPS-6),2015.

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 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 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

6. 研究組織

(1)研究代表者

村岡 正宏 (MURAOKA Masahiro)

東京理科大学・理工学部機械工学科・講師
研究者番号：70219880

(2)研究分担者

溝口 博 (MIZOGUCHI Hiroshi)

東京理科大学・理工学部機械工学科・教授
研究者番号：00262113

上野 一郎 (UENO Ichiro)
東京理科大学・理工学部機械工学科・教授
研究者番号：40318209

(3) 連携研究者
()

研究者番号：

(4) 研究協力者
()