

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01764

研究課題名(和文)非ニュートン流体の微粒化現象および付着現象に関するプロセス解析

研究課題名(英文)Process analysis of atomization and adhesion phenomena of non-Newtonian fluid

研究代表者

齋藤 泰洋(Saito, Yasuhiro)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50621033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：自動車の噴霧塗装における微粒化現象および付着現象を実験および数値解析により検討した。既存の解析手法を高度化し、非ニュートン性粘度モデルを導入した。単一の液滴を固体壁に衝突させた際、衝突直後は流体の種類によらずいずれの流体の挙動は同様であったが、液滴が広がった後の収縮の段階では非ニュートン流体の挙動はニュートン流体の場合とは異なった。液体と気体のクロスフロー現象の実験において、液体の粘度が液柱の分裂に影響を及ぼすことを示した。数値解析により液体の非ニュートン性が液柱の微粒化の促進、先端到達距離を増加させることおよび液体のスパン方向への広がりを増加させることに影響を及ぼすことを示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車の塗装プロセスを想定し、液体と気体のクロスフロー現象および液滴の固体壁への衝突を対象とした実験および数値シミュレーションを実施し、非ニュートン性流体およびニュートン流体との違いを検討した。これにより、比較的粘度が高い塗料の流動特性を明らかにし、より高度なプロセス開発への貢献が可能となった。

研究成果の概要(英文)：The atomization and adhesion phenomena in automobile spray coating were investigated by using experiments and numerical analyses. The existing analysis method was advanced, and a non-Newtonian viscosity model was introduced. When a single droplet impacted with a solid wall, the behavior of each fluid was almost the same immediately after the collision, regardless of the type of fluid. However, at the stage of contraction after the droplet spread, the behavior of the non-Newtonian fluid was different from that of the Newtonian fluid. In experiments on the cross-flow phenomenon of liquid and gas, it was shown that the viscosity of liquid affects the breakup of liquid columns. Numerical analyses suggest that the non-Newtonian nature of the liquid affects the promotion of atomization of the liquid column, the increase in the penetration of liquid, and the increase in the spread of the liquid in the span direction.

研究分野：化学工学

キーワード：微粒化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動車の塗装は防さびや美観などの機能を付加するために多岐にわたる塗装を行っており、そのなかでも発色や光沢を出すための本塗装[[Honda ホームページ](#)]は美観に大きく関わるため、重要度は非常に高い。本塗装では、高速回転ベルカップ噴霧塗装機が利用され、図1に示すように供給された液体塗料が高速回転や空気流、電場の影響を受けて移動する。このシステムを現象ごとに分けると、ベルカップ近傍で塗料が液膜、液柱および液滴へ微粒化する Near field、微粒化した液滴が輸送される Transport field、液滴が被塗装物に付着する Target field の3つに大別される[Im et al., J. Fluids Eng., 2004]。そのなかでも Near field や Target field における液体の微粒化現象および付着現象は塗装の品質を決定づける重要な現象であるが、工学的な解明が難しい分野である。液体の微粒化現象は、液体の塊が液膜あるいは液柱を形成し、さらに細い液系に変形させ、界面の不安定性などを利用して液滴へ分裂する現象であり、非常に複雑で、非定常性が高い。また、液体の付着現象は、液滴が気流の影響を受け、液滴の形状が変形したり、再分裂が生じる。さらに壁面に衝突して液滴が広がるだけでなく、スプラッシュなどの微小な液滴が生成されうる複雑な現象である。そのため、これまでの研究の多くは Transport field から Target field までを対象とした数値解析が多く行われ、Target field を対象とした場合には塗装欠陥を対象とした実験・数値解析が行われ、Near field や Target field における移動現象を対象としたプロセス解析はほとんど行われていない。

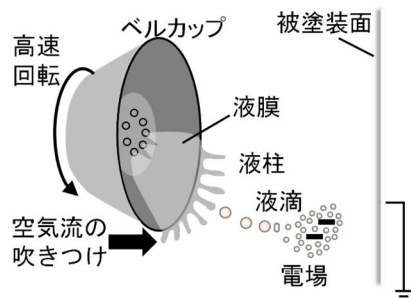


図1 回転ベルカップ噴霧塗装機周りの現象

2. 研究の目的

本研究では、工業プロセスとして自動車用塗装を想定した液体の微粒化現象および付着現象を対象に実験および数値解析を行い、それぞれの現象を支配する因子を特定し、それぞれの現象のメカニズムの解明を目指す。一般に塗料はビンガム流体あるいは擬塑性流体である。しかしながら、これまでの研究の多くはニュートン流体を仮定して実験や数値解析が行われており、塗料において非ニュートン性流体を対象とした研究は僅少である。そこで本研究では、非ニュートン性を考慮した研究を実施し、より現実に即した塗装システムのプロセス解析を行う。

3. 研究の方法

(1) 既存シミュレーション手法の高度化

これまでの研究において、気液界面である自由表面を捕捉する Volume of Fluid 法をプログラミングし、in-house コードによる数値解析を実施してきた。これまでの研究では、液体および気体ともにニュートン流体を仮定し、解析を実施してきたが、本研究では、ニュートン流体の気体中を非ニュートン性流体の液体が流動する系を対象とした解析を実施する。そこで本項目では、気体および液体ともにニュートン流体を対象としたコードから、気体側はニュートン流体のまま、液体側を非ニュートン流体に対応する。始めに、非ニュートン性粘度モデルを1次元単相流流れに適用し、モデルの妥当性を検討した。次に、非ニュートン性粘度モデルを in-house コードに反映するとともに単純な粘度モデルおよび汎用性が高い粘度モデルを導入し、本研究に適した解析手法を構築する。

(2) 非ニュートン流体の液滴衝突における経時変化観察

これまでにニュートン流体を対象に液滴の付着現象を実験的に観察した例[Š. Šikalo et al., Exp. Therm. Fluid Sci., 2002]があるものの、非ニュートン流体を対象とした場合には僅少である。これまで行ってきた加熱固体表面への液滴衝突に関する実験を拡張し、実験流体としてニュートン流体および非ニュートン流体を用いて固体壁面に液滴を衝突させ、そのときの液体の形状変化を観察する。本項目では、液体の粘度が液滴変形に及ぼす影響を検討するため、粘度が異なるニュートンおよび非ニュートン流体の液滴をステンレス表面に衝突させた際の挙動を評価した。ニュートン流体には水(WTR)、70wt%グリセロール水溶液(70GLY)および75wt%グリセロール水溶液(75GLY)を用い、非ニュートン性流体として0.1wt%CMC水溶液(CMC)を用いた。なお、70GLYはCMCの粘度の測定値の下限值に近く、75GLYは上限値に近い。

(3) 液柱分裂時の不安定構造の可視化

液柱が気流に接触する場合に不安定な三次元構造が形成されることから、本項目では、その不安定な構造が何に起因するものか実験的に確かめる。図1-5に示すような風洞装置および測定装

置を組み上げ、気流と液柱をクロスフローで接触させることにより液柱の分裂時の不安定な構造を観察する。本実験では、レーザードップラー流速計をトラバースすることで、流体内の速度分布を非接触で計測する。また、現有の高速度カメラを用いて観察を行い、液柱の構造観察を試みる。

(4) 数値解析による液体と気体のクロスフロー中における流体特性の把握

上記の項目を達成することにより非ニュートン性を考慮した気液二相流解析手法が確立され、液体の微粒化現象に関する非ニュートン流体を対象とした実験結果が得られる。さらに得られた実験結果を基に数値解析により非ニュートン流体の流動現象に着目し、理論化を目指す。本項目では、液体と気体のクロスフロー中における流動特性に着目し、非ニュートン流体の特性を検討した

4. 研究成果

(1) 既存シミュレーション手法の高度化

流体解析の多くはニュートン流体を対象として発展してきたが、本研究では液体側の粘度を非ニュートン性モデルにより表現する。始めに、1次元計算としてハーゲン・ポアズイユ流れを対象に非ニュートン粘度モデルとして最も単純なモデルであるべき乗則モデルを用いた解析を実施し、ニュートン流体の場合と比較した。非ニュートン性を考慮することにより円管内の速度分布が異なることを確認した。1次元計算において導入したべき乗則モデルを in-house コードに適用し、3次元のハーゲン・ポアズイユ流れを解析し、その有用性を評価した。コード開発にあたっては解析上の参照点を変更し、最も解析解を再現する方法を検討した。その結果、十分な解析精度を有する in-house コードを実現した。また、非ニュートン性粘度モデルとして汎用性が高い Carreau-Yasuda モデルを導入し、in-house コードの高度化を実施した。高度化にあたっては、使用する行列ソルバーの比較を実施した。本コードでは、代数的マルチグリッド法として、AMGS [http://hpcl.info.kogakuin.ac.jp/docs/amgs/]および AGMG [http://www.agmg.eu/]を導入しており、研究室 WS を利用するのにあたって AGMG が有効であることを確認した。また、九州大学情報基盤研究開発センターと共同研究を実施し、解析プログラムの高速化を実施した。

(2) 非ニュートン流体の液滴衝突における経時変化観察

液滴の衝突実験は、当初は弘前大学で実施してきたが、技術移転を実施し、九州工業大学に液滴衝突実験装置を作製した。本装置は液滴を風防中において高さ 1.5 m の位置から落下させることが可能であり、ハイスピードカメラにより撮影することで衝突時前後の液体の挙動を観察可能である。また、デュヌイ式表面張力計および回転粘度計を導入し、液体物性を計測した。

液体の無次元広がり径(D^*)の時間経過を図3に示す。非ニュートン流体である CMC に着目すると、 D^* が増加し、最大値に達した後、一旦減少し、一定値を示した後に減少し、また増加した。衝突した直後の CMC の D^* の変化は他の液体と類似している。そのため、衝突した直後の挙動は液体の慣性力によって支配されていることが示唆された。 $t^* = 0.4$ から $t^* = 0.7$ までの段階においては、CMC の D^* の変化は 70GLY とほぼ等しい。これは、最大広がり径に達する直前の D^* の変化は粘性力支配によるものであり、CMC の粘度が低下したことが原因であり、CMC がニュートン流体である 70GLY と同等の粘度になったためであると考えられる。これらのことから、液体の非ニュートン性が液滴衝突後の液体の収縮時に及ぼす影響が示された。

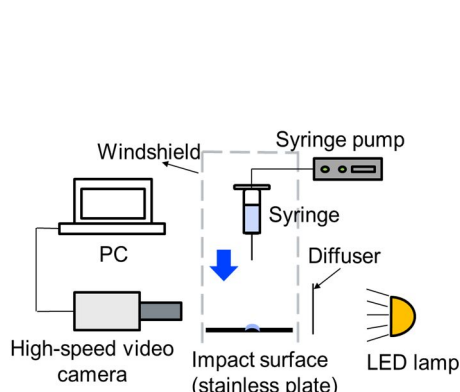


図2 液滴衝突の実験装置

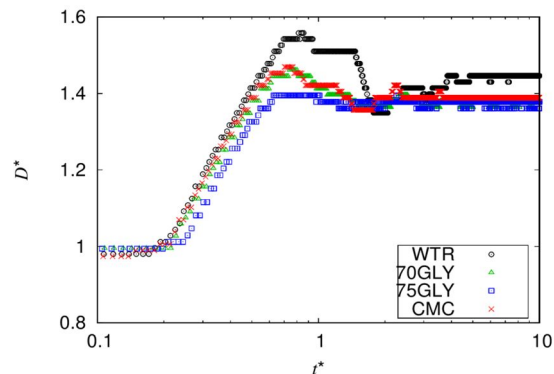


図3 液滴衝突時における無次元広がり径 D^* の経時変化

(3) 液柱分裂時の不安定構造の可視化

図4に本研究で作製した実験装置を示す。本装置の作製にあたっては既往の研究[Leask et al, At. Sprays. 28 (2018) 599–620]を参考にした。テストセクションの上部から空気を導入した。テストセクションの側面の $z = 0$ mm の位置に穴を設け、穴からシリンジ(内径 0.61 mm)を用いて液体を導入した。空気はブローアにより供給され、整流板を通過し、テストセクション内に流入させた。空気の平均流速は 8.29 m/s である。液体にはニュートン流体として水(粘度 1.09 mPa·s, 表面張力 72.5 mN/m, 密度 0.970 g/cm³)および非ニュートン流体として 0.1 wt% CMC(カルボキシメチル

セルロース)水溶液(粘度 19.3-35.0 mPa·s, 表面張力 71.1 mN/m, 密度 0.947 g/cm³)(以下, CMC)を用いた. レーザードップラー流速計により, 空気の流れを測定した. また, 液柱の変形の様子をハイスピードカメラにより撮影した(撮影条件 7500 fps).

図5に $z=0$ mmにおける液体と気体のクロスフローにおける z 方向の気体の速度分布を示す. CMCを用いた場合より水を用いた場合のほうが気体速度はより不安定であることがわかる. これについて, 図6に示す液体と気体のクロスフローにおける瞬間写真から考察する. 水の場合, 空気流に対して垂直に噴射された液体噴流は, 気流によりダクト下流方向に曲げられ, 液体の表面において発生した波の波長が大きくなるとともに分裂した. 一方, CMCの場合, 液体噴流は伸長しながら分裂した. 分裂位置に着目すると, 水の場合には気流の有無にかかわらず途中で分裂しているのに対し, CMCの場合には水よりも下流側で分裂することがわかる. これは, CMCの粘度が水より大きいため, 表面波の伝播が起こりにくいためであると考えられる.

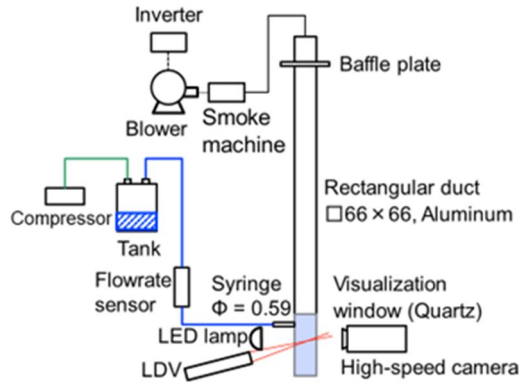


図4 液体と気体のクロスフロー風洞装置

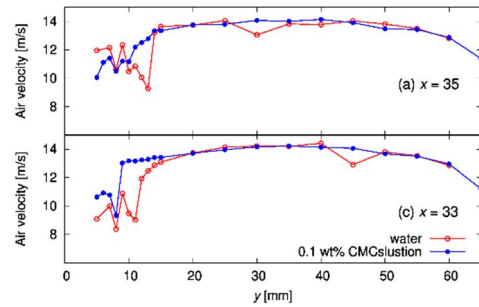


図5 液体と気体のクロスフロー中における速度分布

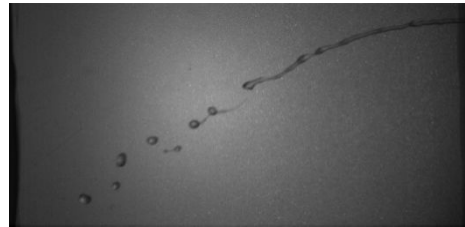


図6 液体と気体のクロスフロー中における液体の瞬間写真: (左) 水; (右) CMC

(4) 数値解析による液体と気体のクロスフロー中における流体特性の把握

図7に解析対象を示す. 解析領域を $10D \times 10D \times 8D$ とし, $131 \times 138 \times 115$ 分割した. 解析領域の左部から一定の速度 13.44 m/s で空気を供給し, 下部から直径 D (0.1 mm) の液体を速度 4.75 m/s で流入させた. 気体の物性として空気を想定した物性値(密度 $\rho_g = 1.2 \text{ kg/m}^3$ および粘度 $\mu_g = 0.018 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)を与えた. また, 液体の物性としては表面張力係数 σ を 73 mN/m, 密度 ρ_l を 1000 kg/m^3 , みかけ粘度 k を $5.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}^n$ とした. 液体の非ニュートン性を考慮する際には, べき乗則モデルの式($\eta = k|\dot{\gamma}|^{n-1}$)を用い, 粘度指数 n を 0.6 (非ニュートン流体の一種である擬塑性流体)および 1.0 (ニュートン流体)とした.

図8に時刻 $t = 0.5 \text{ ms}$ で, z 方向中心の断面における液柱の挙動を示す. いずれの液体においても, 一様気流中に垂直に噴出された液柱は, 気流の影響を受け湾曲しつつ伸長した. ニュートン流体の場合と非ニュートン流体の場合を比較すると, ニュートン流体の場合よりも非ニュートン流体の場合のほうが細かく液体が分裂した. これは, 非ニュートン流体の場合に気流とのせん断によってせん断速度が増加し, 粘度が低下したことが原因である. 粘度の低下は, 液体内の速度を平均化しようとする粘性の影響の低下を招くため, 液体内の相対速度差が大きくなって, 分裂しやすくなったと考えられる.

図9に時刻 $t = 0.4 \sim 0.6 \text{ ms}$, z 方向中心の断面における液柱の軌跡(液柱の左界面の位置)に関する時間平均および標準偏差に示す. 液

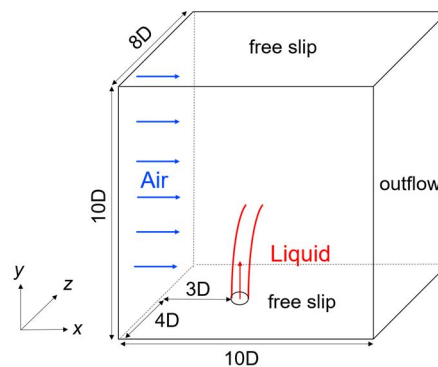


図7 解析対象

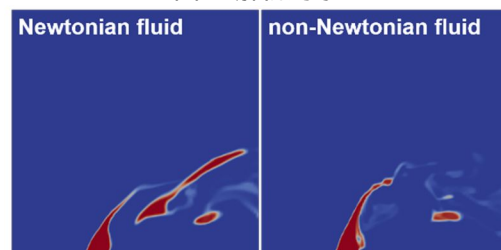


図8 時刻 $t = 0.5 \text{ s}$ でかつ x - y 平面中心部における液噴流の様子(赤は液体を表す)

柱の軌跡を比較すると、ニュートン流体の場合よりも非ニュートン流体の場合のほうが大きい値を示した。つまり、ニュートン流体の場合よりも非ニュートン流体の場合のほうが液柱の y 方向への先端到達距離は長い。これは、非ニュートン流体の場合に気流とのせん断によって粘度の低下が液体のレイノルズ数 ($Re = \rho_1 u_1 D / \eta$) の増加を招き、液体噴流の慣性力が支配的になったことで、直進する力が大きかったためであると考えられる。標準偏差に着目しても、ニュートン流体の場合よりも非ニュートン流体の場合のほうが大きい値を示した。このことから、ニュートン流体の場合よりも非ニュートン流体の場合のほうが液柱の軌跡のばらつきは大きい。これも非ニュートン流体の液体の粘度が低下したことが原因であると考えられる。

図 10 に時刻 $t = 0.5$ ms における y 断面の液柱の挙動および速度ベクトルを示す。いずれの液体においても、液体噴流のノズル付近 ($y/D = 0.5$) では液柱の形状を保つ。 y 方向に進行するに伴い、液体は中央部からスパン方向 (z 方向) に分岐し、液柱から液膜の形状に変化した後、液膜の両端から分裂に至った。これは、気流とのせん断によって、液柱よりも風下側の圧力が低下し、液体の風下に気体が流入することで、気体が液体を両端に引き延ばしたためと考えられる。ニュートン流体の場合と非ニュートン流体の場合を比較すると、 $y/D = 1.5$ において、ニュートン流体の場合よりも非ニュートン流体の場合のほうが液膜はスパン方向へ広範囲に広がった。これは、上記と同様で、非ニュートン流体の液柱の不安定性が増加したためであると考えられる。以上のことから、非ニュートン性を考慮した液体と空気のクロスフローを対象とした数値解析において、液体の非ニュートン性が液柱の微粒化の促進、先端到達距離の増加および液体のスパン方向への広がり増加に影響を及ぼすことが示唆された。

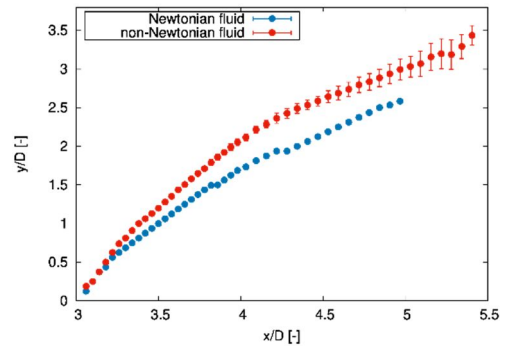


図 9 中心部における液柱の軌跡

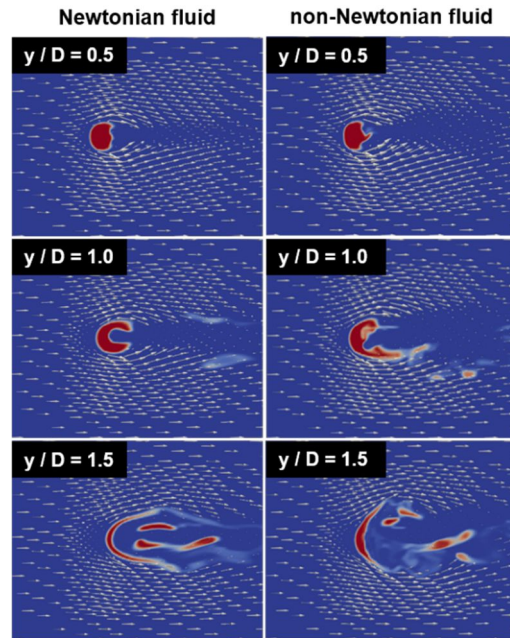


図 10 液柱周りの流動状態

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 秋山由佳, 川崎智弘, 城田農, 齋藤泰洋
2. 発表標題 粘性境界層厚さを考慮した衝突液滴の最大径に対するスケーリング則
3. 学会等名 日本混相流学会混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮本真希, 齋藤泰洋, 城田農, 松下洋介, 青木秀之, 馬渡佳秀, 山村方人
2. 発表標題 液体と気体のクロスフロー現象における流体速度に関する実験的検討
3. 学会等名 化学工学会第51回秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 向井健人, 齋藤泰洋, 城田農, 松下洋介, 青木秀之, 馬渡佳秀, 山村方人
2. 発表標題 非ニュートン流体モデルを考慮した液体と気体のクロスフロー現象に関する数値解析的検討
3. 学会等名 化学工学会第51回秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 程志欣, 齋藤泰洋, 城田農, 松下洋介, 青木秀之, 馬渡佳秀, 山村方人
2. 発表標題 液滴の固体表面への衝突時における液体物性が液滴変形に及ぼす影響
3. 学会等名 化学工学会九州支部オンライン学生発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤泰洋
2. 発表標題 自動車用噴霧塗装における数値シミュレーションの利用
3. 学会等名 日本粉体工業技術会粒子積層技術分科会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋藤泰洋
2. 発表標題 工業プロセスにおけるCFDあるいは DEMシミュレーションを用いた検討
3. 学会等名 岡山地区化学工学懇話会講演会第66回化学工学コロキウム（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤泰洋
2. 発表標題 自動車用塗装における液膜形成と液滴衝突に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 第42回石油学会九州・沖縄支部講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮本真希, 齋藤泰洋, 城田農, 松下洋介, 青木秀之, 馬渡佳秀, 山村方人
2. 発表標題 液体と気体のクロスフロー現象における流体速度に関する実験的検討
3. 学会等名 化学工学会第51回秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 向井健人, 齋藤泰洋, 城田農, 松下洋介, 青木秀之, 馬渡佳秀, 山村方人
2. 発表標題 非ニュートン流体モデルを考慮した液体と気体のクロスフロー現象に関する数値解析的検討
3. 学会等名 化学工学会第51回秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 程志欣, 齋藤泰洋, 城田農, 松下洋介, 青木秀之, 馬渡佳秀, 山村方人
2. 発表標題 液滴の固体表面への衝突時における液体物性が液滴変形に及ぼす影響
3. 学会等名 化学工学会九州支部オンライン学生発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋山由佳, 川崎智弘, 城田農, 齋藤泰洋
2. 発表標題 粘性境界層厚さを考慮した衝突液滴の最大径に対するスケーリング則
3. 学会等名 日本混相流学会混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤泰洋
2. 発表標題 界面捕捉法を用いた回転霧化塗装シミュレーション
3. 学会等名 化学工学会材料界面部会・塗布技術研究会（第62回関西定例会）（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤泰洋
2. 発表標題 自由表面流れ解析による液体微粒化現象の検討
3. 学会等名 液体噴霧に関するワークショップ”Discovery in Fragmentation” (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤泰洋
2. 発表標題 ベル型静電塗装機における気液二相流解析
3. 学会等名 日本塗装技術協会第3回講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Mayusumi, Y. Saito, Y. Matsushita, H. Aoki
2. 発表標題 Effect of Electric Field on Breakup of a Liquid Ligament
3. 学会等名 15th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究室ホームページ http://www.che.kyutech.ac.jp/chem30/</p> <p>研究者詳細 齋藤泰洋 https://research02.jimu.kyutech.ac.jp/html/100001155_ja.html</p>
--

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	城田 農 (Shirota Minori) (40423537)	弘前大学・理工学研究科・准教授 (11101)	
研究分担者	松下 洋介 (Matsushita Yohsuke) (80431534)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	青木 秀之 (Aoki Hideyuki) (40241533)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	

	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
研究協力者	黛 英伯 (Mayusumi Hidenori)	東北大学・大学院工学研究科・大学院生 (11301)	
研究協力者	秋山 由佳 (Akiyama Yuka)	弘前大学・大学院理工学研究科・大学院生 (11101)	
研究協力者	宮本 真希 (Miyamoto Maki)	九州工業大学・大学院工学研究院・大学院生 (17104)	
研究協力者	向井 健人 (Mukai Kento)	九州工業大学・大学院工学研究院・大学院生 (17104)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	程 志欣 (Cheng Zhixin)	九州工業大学・工学部・学部生 (17104)	

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