

平成 30 年 5 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18274

研究課題名(和文) 噴霧塗装における塗膜形成シミュレーションの提案

研究課題名(英文) Proposal of numerical simulation for film formation in spray painting

研究代表者

齋藤 泰洋 (Saito, Yasuhiro)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：50621033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：自動車の噴霧塗装における被塗装物近傍の塗料液滴の付着現象を検討するため、Volume of Fluid法を用いた数値解析を行った。既存の解析手法を高度化し、simple-CLSVOF法を導入するとともに、VOF法の解析における粘度の補間法の最適化を図った。単一の液滴を固体壁に衝突させ、既往の実験値と良好な一致が見られた。複数の液滴として2つの液滴を固体壁に衝突させると、液滴間の距離によって浮き上がり高さが異なることを示した。電場を考慮した解析を行い、電場の影響によって形状が変化しうることを示した。

研究成果の概要(英文)：To investigate behaviors of attachment phenomenon of paint droplets around a target for automotive spray painting, numerical simulations with Volume of Fluid method were conducted. We developed our existing simulation code, and simple-CLSVOF method was introduced. Furthermore, an interpolation of viscosity in VOF simulation was optimized. In the numerical simulations, a single droplet was impacted at a fixed wall, and the numerical results correspond to previous experimental ones. When two droplets were impacted at a wall, the liquid was floated at the impacted point of liquid films, and the height of the floated liquid was varied depending on the distance between the droplets. Moreover, we developed our code to take account of the effect of electric field, and the numerical results showed that the shape of a falling droplet was changed by the effect of electric field.

研究分野：化学工学

キーワード：噴霧塗装 自由表面解析 VOF法 液滴 衝突

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非常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(中塗り塗装・上塗り塗装・クリア塗装) [Honda ホームページ]は美観に最も大きく関わるため、購買意欲を刺激するうえでも重要度は非常に高い。本塗装は、高速回転ベルカップ噴霧塗装機が用いられ、図1に示されるように供給された液体塗料が回転や乱流、空気流、電場の影響を受けて移動する非常に複雑な現象である。そのため、Im et al. [Journal of Fluids Engineering, 2004]は本塗装プロセスをベルカップ近傍の Near field, 微粒化した液滴が輸送される Transport field, 液滴が被塗装物(ターゲット)に付着(塗着)する Target field の3つに分けて考えた。これまでの研究は 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に着目した実験および数値解析が行われ、Target field における液滴の塗着プロセスに関する移動現象の解明はほとんど行われていない。

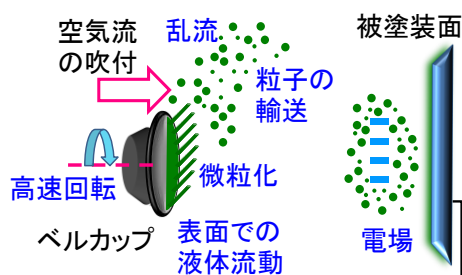


図1 回転ベルカップ噴霧塗装機周りの現象

2. 研究の目的

自動車用工業塗装システムにおいて塗着効率に直接関係する塗着プロセスに着目し、液滴が固体壁に付着する現象を対象とした数値解析を実施し、プロセスの現象解明を実施する。液滴がターゲットに付着する挙動を再現するため、これまでの研究で培ってきたVOF法解析手法をさらに高度化することで、気液の界面となる自由表面が大きく変形する系を対象とした場合にも解析可能な手法を得る。また、液滴のターゲットに付着する現象を想定し、単一液滴もしくは複数液滴を対象とした塗着プロセスを解析し、大きな運動量を持った液滴が固体壁へ衝突した際に、液滴が持つ初期条件が及ぼす影響を検討する。また、電場の影響を考慮した解析を実施し、電場が液滴の衝突に及ぼす影響を検討する。

3. 研究の方法

(1) 既存シミュレーション手法の高度化

従来行ってきた Volume of Fluid 法を用いた解析において、自由表面の曲率を算出する際には smoothed VOF function を用いた解析を行ってきた。この手法は、比較的自由表面が大きく変化しない場合には有効であるが、液滴

の衝突など大きく自由表面が変化する系には解析精度に不安が残る。そこで本研究では、Level-Set 法とのカップリングを行う CLSVOF 法に着目し、さらに Level-Set 法を活用するうえで問題となる界面の再構築処理を行わない simple-CLSVOF 法の導入を検討する。

(2) 単一液滴の固体壁への衝突

Target field における液滴付着を想定した解析として、単一液滴を固体壁に衝突させた。固体壁上に単一の液滴を配置し、衝突角度を変化させた。なお、垂直に衝突させる際には、既往の研究[Šikalo et al., Exp. Therm. Fluid Sci. (2002)]を参考に液滴の大きさや物性値などを決定した。液滴が壁面に衝突する際、形成される液膜は等方的に広がると考えられるため、対称境界条件を用い、衝突角度を垂直とした場合には 1/4 領域を解析領域とし、約 200 万個の等間隔格子により解析領域を分割した。衝突角度を変化させた場合には、1/2 領域を約 600 万個の等間隔格子により分割した。液滴の直径 D を 2.45 mm とし、液体の物性にはグリセリンと水の混合物を想定した物性値を与え、気体の物性には気体を想定した物性値を与えた。固体壁は乾燥させたガラス平板を想定し、接触角を 90 度一定とした。衝突角度を変化させる際には、壁面に垂直な方向と水平な方向の合成速度を 4.1 m/s で一定として 30, 60 あるいは 90 度に設定した。

(3) 2つの液滴の固体壁への衝突

実際の塗装プロセスでは、複数の液滴が固体壁に付着する。複数の液滴を固体壁へ衝突させた場合には、液膜の形成過程は単一液滴の場合とは異なることが予想される。そこで、複数の液滴として2つの液滴を固体壁へ衝突させた際に形成される液膜の形状を評価した。対称境界条件を用いることで 1/2 領域を解析領域とし、約 700 万個の等間隔格子により分割した。液滴の大きさを上述の解析と同じ 2.45 mm とし、2つの液滴の間の距離 L を 1.2D, 1.6D あるいは 2.0D とした。2つの液滴はともに固体壁に垂直に 4.1 m/s で衝突させた。

(4) 電場の影響を考慮した液滴衝突

電場の影響を考慮した解析を行うため、連続の式および Navier-Stokes 方程式に電荷の保存式を解き、生成項として NS 式に組み込む。電場によって電荷を持つ流体に働く力は

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

で表され、電場 \mathbf{E} は以下に示す静電ポテンシャル V の式を解くことにより計算した。

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}) = q$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V$$

電荷 q は電荷の輸送方程式として次式から求めた。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D\nabla c + \mathbf{u}c - z\mathbf{u}_m Fc\nabla V) = 0$$

直径 2.75 mm の液滴一つを液滴の上辺の高さ

が 10 mm となるように設置し、垂直方向に 1 m/s で落下させ、電場を考慮した場合と考慮しない場合の解析を比較した。対称境界条件を用いることで 1/4 領域を解析領域とし、約 1600 万個の等間隔格子により分割した。なお、電場を考慮しない場合において液滴の高さによって解析結果が異なることを確認している。

4. 研究成果

(1) 既存シミュレーション手法の高度化

従来行ってきた Volume of Fluid 法を用いた解析において、自由表面の曲率を算出する際には smoothed VOF function を用いた手法を用いてきた。しかしながら、分裂を伴う場合にはより高精度に曲率を算出する必要がある。そこで本研究では、simple-CLSVOF 法を導入し、従来法との比較を行った。無重力下で浮遊する単一気泡を対象に解析を行った際に、s-CLSVOF に基づき level set 関数を導入することによって界面形状を高精度に評価可能であることを示した。

また、当初は想定していなかったが、VOF 法解析では、VOF 関数を介して一流体モデルの物性値を推算する際に算術平均などの平均化方法によって解析結果が異なることが示唆された。一般に、物性値の推算に関する密度を推算する際には算術平均が用いられているが、粘度に関してはその計算方法は統一されていない。そこで本研究では、二流体の粘度の算術平均、二流体の動粘度が調和平均となるよう粘度を計算する方法、算術平均と調和平均をブレンドする方法および本研究で提案する動粘度の算術平均と動粘度の調和平均をブレンドする方法により得られた解析結果(図 2)を比較し、本研究で提案した手法が現象をより適切に表現可能であることを示した。

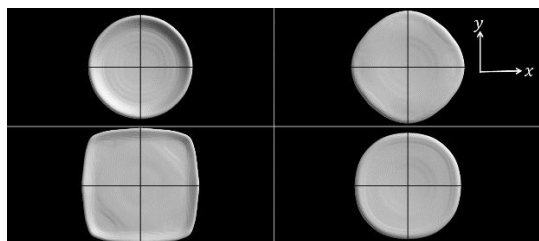


図 2 粘度の物性推算方法が解析結果に及ぼす影響: (左上) 粘度の算術平均; (右上) 動粘度の調和平均; (左下) 粘度の算術平均と調和平均; (右下) 新規手法。

(2) 単一液滴の固体壁への衝突

単一液滴を垂直方向に衝突させた際の液膜の高さの最大値の経時変化を図 3 に示す。時間の経過とともに液膜の拡大に伴って液膜の高さが減少し、液膜が最大まで拡大した後に収縮し、高さが増加した。数値解は実験値を良好に表現しており、本解析が妥当であることを示した。

さらに、液滴の合成速度を一定として衝突角度を変化させた場合、衝突角度が小さくなると、つまり、垂直方向の速度成分の大き

が小さく、水平方向の速度成分が大きい場合、液膜が水平方向に向かって広がった。また、衝突による液膜の等方的な広がりに加えて、衝突時の水平方向の速度により液膜が広がったことが示された。そのため、液膜の広がりに対して、衝突初期では衝突時の水平方向の速度の影響が小さく、一定時間経過後では衝突時の水平方向の速度の影響が大きいことが示唆された。

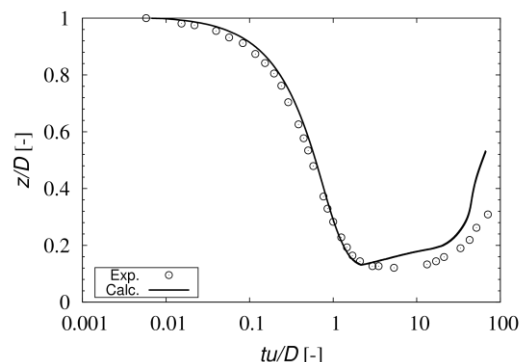


図 3 実験結果と解析結果の比較

(3) 2つの液滴の固体壁への衝突

図 4 に 2 つの液滴の壁面への衝突により形成された液膜を示す。壁面への衝突後に液膜が広がり、液膜同士が衝突することにより液が隆起した。液滴間の距離を増加させると、一つの液滴が形成した液膜が広がった状態でそれぞれの液膜に衝突するためことになり、衝突地点における液の運動量が小さいことが原因で隆起した液の量が少なくなる。液滴間の距離が短い場合には、ほかの条件と比較して、隆起した液が y 方向に伸びている。これは、液膜が持つ運動量が大きいためであり、衝突によって運動の方向が変化させられたと考える。これらのことから、液滴間の距離によって挙動が異なることを示した。



図 4 2 つ液滴の衝突時の挙動. (左) $L = 1.2D$, (中央) $1.6D$, (右) $2.2D$.

(4) 電場の影響を考慮した液滴衝突

液滴を解析領域の上部から垂直方向に 1 m/s で落下させ、電場を考慮しない場合と考慮した場合の解析結果を図 5 に示す。電場を考慮しない場合の解析結果に着目すると、時間が進行するのに伴って液滴の形状が変形していることがわかる。これは、液滴が空気層を通過しているためであり、液滴自身の重量により加速することにより液滴の下部に集中するように変形したと考えられる。電場を考慮した場合には、考慮しない場合の外観と大

きな変化は生じていないものの、液滴の移動中の形状がわずかながら異なる。そのため、電場を考慮することにより、液滴の形状が変化する。本解析では、過去の研究 [安村ら, 化学工学論文集, 2011] を参考に境界条件を定めており、液滴の直径が 2.75 mm である。そのため、液滴の大きさが小さい場合には、電場を考慮することで形状が変化し、本解析よりも顕著な変化が現れることが予想される。以上のことから、電場を考慮することで、塗着プロセスにおける液滴の流動に変化することが示唆された。

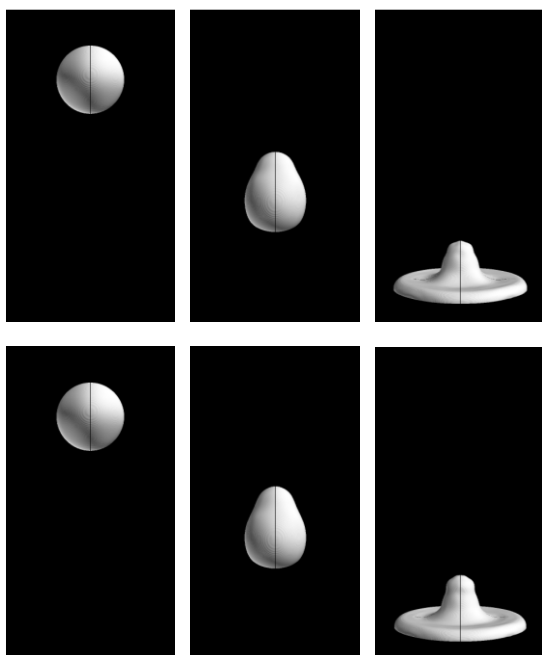


図 5 電場を考慮した液滴の衝突 (上) 電場なし, (下) 電場あり。

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)

- (1) Tatsuya Soma, Shun Amemiya, Tomoyuki Katayama, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Takao Inamura, Masatoshi Daikoku and Junichi Fukuno, Numerical Simulations of Particle-Laden Turbulent Flows to Characterize the Two Different Types of Paint Spray, Journal of Chemical Engineering of Japan, 50, 254-261 (2017) <http://dx.doi.org/10.1252/jcej.16we251> (査読あり)

〔学会発表〕 (計 10 件)

- (1) 齋藤泰洋, 相馬達哉, 黛英伯, 松下洋介, 青木秀之, 大黒正敏, 岡部孝裕, 城田農, 稲村隆夫, 福野純一, 自動車用噴霧塗装における自由表面流れ解析, 化学工学会第 83 年会 (2018) 招待講演
- (2) 黛英伯, 相馬達哉, 齋藤泰洋, 松下洋介,

青木秀之, 2つの液滴の壁面衝突による液膜の形成に関する数値解析的検討, 化学工学会第 83 年会 (2018)

- (3) 齋藤泰洋, 側方からの気流を受ける液柱の挙動解析, 化学工学会第 83 年会(化学工学会粒子・流体プロセス部会セミナー) (2018) 招待講演
- (4) 黛英伯, 相馬達哉, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, VOF 法における粘度の計算方法の検討, 化学工学会第 49 回秋季大会 (2017)
- (5) 齋藤泰洋, 相馬達哉, 黛英伯, 松下洋介, 青木秀之, 大黒正敏, 岡部孝裕, 稲村隆夫, 福野純一, 側方からの気流を受ける液柱の挙動解析, 化学工学会第 49 回秋季大会 (2017)
- (6) 黛英伯, 相馬達哉, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 液滴の衝突角度が液膜の形成過程に及ぼす影響の数値解析的検討, 第 19 回先端研究発表会 (2017)
- (7) 齋藤泰洋, 自動車用噴霧塗装シミュレーション, 第 2 回コークス部会若手集中討論会 (2016) 招待講演
- (8) Tatsuya Soma, Yasuhiro Saito, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Takao Inamura, Masatoshi Daikoku, Junichi Fukuno, NUMERICAL INVESTIGATION OF FORMATION AND BREAK UP OF ROUND LIQUID COLUMNS WITH A ROTARY ATOMIZER, The 27th International Symposium on Transport Phenomena (2016)
- (9) 齋藤泰洋, 高速回転ベルカップ噴霧塗装におけるプロセス解析, 色材セミナー (2016) 招待講演
- (10) 乳井草太, 相馬達哉, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 稲村隆夫, 大黒正敏, 福野純一, ベルカップ塗装機における吹き付け距離が塗着効率に及ぼす影響の数値解析的検討, 第 16 回日本伝熱学会東北支部学生発表会, 仙台 (2016)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

- (1) 東北大学大学院工学研究科化学工学専攻青木研究室 <http://www.che.tohoku.ac.jp/~tranpo/>
- (2) 東北大学研究者紹介 <http://db.tohoku.ac.jp/whois/detail/96f62f49bef17a4ba246e05dedaa6f16.html>

受賞歴

- (1) 化学工学会粒子・流体プロセス部会, シンポジウム賞(奨励賞), 3月13日 (2018)
- (2) 自動車技術会, 大学院研究奨励賞, 3月7日 (2017)

6. 研究組織

(1)研究代表者

齋藤 泰洋 (Yasuhiro Saito)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 50621033

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし

(4)研究協力者

相馬 達哉 (Tatsuya Soma)
東北大学・大学院工学研究科・大学院生

乳井 草太 (Souta Nyui)
東北大学・大学院工学研究科・大学院生

黛 英伯 (Hidenori Mayusumi)
東北大学・大学院工学研究科・大学院生