

[共同研究成果]

回転霧化塗装機を用いた

蒸発を伴う噴霧塗装の Large Eddy Simulation

松下洋介：東北大学大学院工学研究科

乳井草太：東北大学大学院工学研究科

中沢 仁：東北大学大学院工学研究科

齋藤泰洋：東北大学大学院工学研究科

青木秀之：東北大学大学院工学研究科

本研究では、回転霧化塗装機を対象に噴霧液滴の蒸発を考慮した噴霧流の Large Eddy Simulation を実施した。液滴の蒸発を考慮しない場合と考慮する場合の解析結果を比較することで、液滴の蒸発が噴霧流に及ぼす影響を検討した。その結果、液滴の蒸発が噴霧流の気相の流れ場と液滴の運動に及ぼす影響は小さいことが示された。また、蒸発は回転霧化塗装機近傍で最も進行し、蒸発量は供給した塗料の約 18%であった。その後、蒸発量は回転霧化塗装機から被塗装物に向かって線形に増加し、最終的に 28%に達した。

1. 緒言

自動車の上塗り塗装は製品に美観を与える重要な工程であり、現在、上塗り塗装には回転霧化塗装機が広く用いられている。回転霧化塗装機では、数万 rpm で高速回転するベルカップの中央付近に塗料を供給し、塗料が液膜となって遠心力によりベルカップの縁まで移動し、最終的には液膜が液糸となって射出する。その後、液糸はベルカップ後方より供給される Shaping Air (SA) と呼ばれる高速の気流によって微粒化され、生成する液滴は被塗装物に向かって運動する[1]。Im et al.は回転霧化塗装機により塗料を微粒化するとともに電圧を内部印加することにより形成される噴霧の形状を観察し、電圧の内部印加により噴霧角が小さくなることを報告した[2]。しかしながら、ベルカップが数万 rpm で高速回転することにより誘起される旋回流れ、SA が 100 m/s 以上で供給されることで形成される高速ジェット、微粒化を伴う液滴の運動を含むこの複雑な塗装プロセスにおいて、興味ある情報を実験的に求めるのは非常に困難であり、数値解析を用いた検討が行われている。

Ellwood and Braslaw は回転霧化塗装機の周りに電極を配置した静電塗装を対象に静電場を含む噴霧流のシミュレーションを実施し、電圧の外部印加により噴霧の広がりや抑制されることを示した[3]。Domnick et al.は ANSYS Fluent 6.0 を用いて回転霧化塗装機により塗料を微粒化するとともに電圧を内部印加した噴霧流の数値解析を実施し、粒径が小さい液滴は内側を、粒径が大きい液滴は外側を運動することを示した[4]。Colbert and Cairncross は Dominick et al. [4]と同様に FEMLAB を用いて電圧を内部印加した噴流塗装のシミュレーションを実施し、塗着する液滴と塗着しない液滴の粒径分布を調査し、平均粒径近傍の液滴が最も塗着し、粒径が小さい液滴と大きい液滴が塗着しづらいことを示した[5]。Toljic et al.は ANSYS Fluent を用いて回転霧化塗装機による車体の塗装を模し、移動する被塗装物上に形成される塗料の膜厚と塗着効率を妥当に予測した[6]。我々の研究グループでも、回転霧化塗装機において塗着効率が低下する原因を調査するなど種々の検討を行っている[7-9]。しかしながら、これらの研究[3-9]では気相の流れ場の計算に RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)を用いているため、流れ場の予測精度に疑問が残る。著者らの知る限り、回転霧化塗装機を対象に Large Eddy Simulation (LES)を実施したのは Im et al. [10]のみである。

また、回転霧化塗装機を用いた塗装プロセスでは微粒化された液滴の蒸発が進行すると考えられるものの、液滴の蒸発について検討した研究はほとんどない。Bini and Jones は Chen et al.が実施した解放空間にアセトンを噴霧する実験[11]を対象に蒸発を伴う噴霧流の Large Eddy

Simulation を実施し、下流において液滴の質量流量をほぼ完全に予測している[12]. また, Apte et al. は Sommerfeld and Qui が行った同軸二重管に水を噴霧する実験[13]を対象に蒸発を伴う噴霧流の Large Eddy Simulation を実施し、下流において気相の速度とその RMS, 液滴の粒径分布と質量流束を良好に再現している[14]. そのため、回転霧化塗装機における噴霧流を精度良く再現するためには、蒸発を伴う噴霧流の Large Eddy Simulation が最も適していると考えられる。

そこで本研究では、回転霧化塗装機を対象に噴霧液滴の蒸発を考慮した噴霧流の Large Eddy Simulation を実施する。液滴の蒸発を考慮しない場合とする場合の解析結果を比較することで、液滴の蒸発が噴霧流に及ぼす影響を検討する。具体的には、液滴の蒸発が気相の流れ場や液滴の運動に及ぼす影響を把握する。さらに、液滴からの全蒸発量を定量化するとともに粒径ごとの蒸発量についても調査する。

2. 蒸発を伴う噴霧流の Large Eddy Simulation

2.1 解析対象と解析条件

図 1 に回転霧化塗装機、被塗装物およびこれら周囲の空間からなる解析対象を示す。ベルカップの外径を 70 mm, 被塗装物である円板を径 500 mm としてベルカップ前方 250 mm に配置した。塗料を温度 293 K, 供給流量 150 ml/min でベルカップ中心付近から供給するとともにベルカップを回転数 25,000 rpm で回転させることで、塗料は遠心力によりベルカップの縁から径方向外側に液糸となって射出する。また、ベルカップ後方に設置した環状のスリットから Shaping Air (SA) と呼ばれる温度 293 K, 湿度 0%の空気を流量 200 NL/min で供給することで、液糸は細かい液滴に分裂するとともに蒸発を伴いながら被塗装物に向かって運動する。なお、塗料と SA 供給前の空間は温度 293 K, 湿度 0%の空気が静止しているとした。

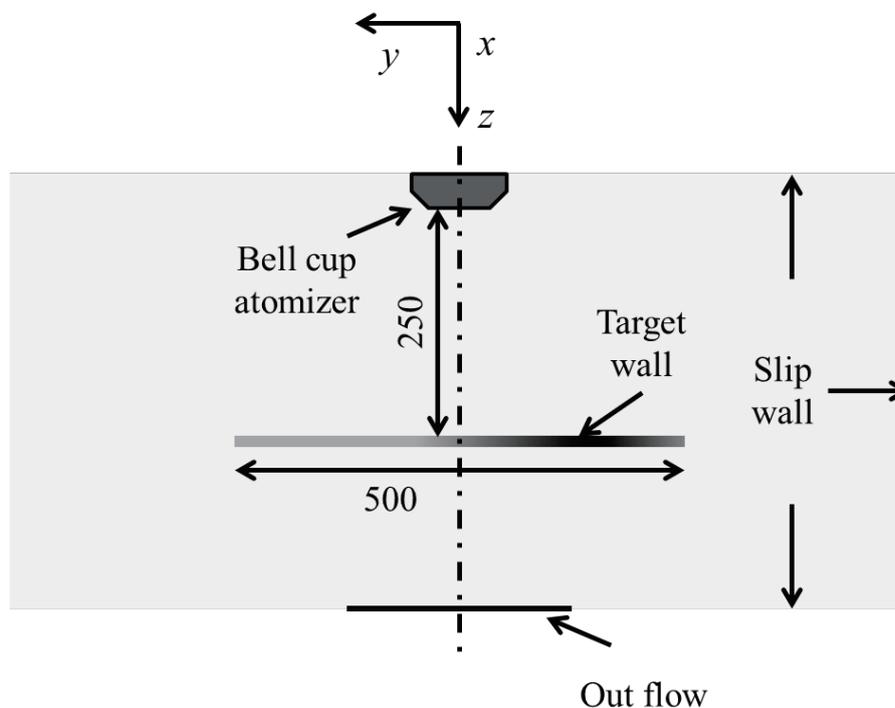


図 1 回転霧化塗装機、被塗装物およびこれら周囲の空間からなる解析対象の概念図

2.2 解析方法

蒸発を伴う噴霧塗装は気液二相流であるため、気相を連続体として、液相を分散相として取り

扱う Euler-Lagrange 法を採用した。また、我々の研究グループで修正した Particle-Source-In Cell (PSI-CELL)モデル[15,16]を用いて液相が気相に及ぼす影響も考慮した。

2.2.1 気相の解析方法

蒸発を伴う噴霧塗装では気相の組成と温度によって密度が変化するため、考えるべき気相の基礎式は低マッハ数近似を施した連続の式、運動量保存式、化学種の保存式、エンタルピーの保存式と理想気体の状態方程式である。ただし、気相では強い乱流場が形成されるため、基礎式をそのまま解くことは困難である。そこで、これらの基礎式に密度荷重空間フィルタを施し、大きな渦を直接解き、小さな渦のみをモデル化する Large Eddy Simulation (LES)を実施した。LESにおける連続の式は式(1)である。

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) = \overline{S_{p,m}} \quad (1)$$

ここで、右辺第一項は分散相からの質量の生成であり、液滴の蒸発を考慮する場合にのみ考慮する。また、LESにおける運動量保存式は式(2)に示すとおりである。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \tau_{ij} \right] + \overline{S_{p,u_i}} \quad (2)$$

右辺第三項は分散相との運動量の交換である。また、 τ_{ij} は Sub-grid scale (SGS)の応力であり、SGSモデルを用いて評価した。

$$\tau_{ij} = \bar{\rho} (\tilde{u}_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\mu_{SGS} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k_{SGS} \delta_{ij} \quad (3)$$

SGSモデルには Smagorinsky モデル[17]を採用し、Smagorinsky 定数を 0.1 で一定とした。

$$\mu_{SGS} = \bar{\rho} (C_s \Delta)^2 |\mathbf{S}| \quad (4)$$

LESにおけるエンタルピーの保存式は式(5)である。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{h}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{h} \tilde{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} - q_j \right) + \overline{S_{p,h}} \quad (5)$$

ここで、右辺第二項は分散相との熱量の交換である。また、 q_j は SGS の熱流束であり、式(6)に示す勾配拡散近似を用いて評価した。

$$q_j = \bar{\rho} (\tilde{h} \tilde{u}_j - \tilde{h} \tilde{u}_j) = -\frac{\mu_{SGS}}{Pr_{SGS}} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} \quad (6)$$

Pr_{SGS} は SGS のプラントル数であり、0.7 で一定とした。LESにおける化学種の保存式は式(7)に示すとおりである。右辺第二項は分散相からの化学種 k の質量の生成であり、液滴の蒸発を考慮する場合にのみ考慮した。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{Y}_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{Y}_k \tilde{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Sc} \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_j} - J_{k,j} \right) + \overline{S_{p,Y_k}} \quad (7)$$

$$k = \text{N}_2, \text{O}_2, \text{ and } \text{H}_2\text{O}$$

また、 $J_{k,j}$ は化学種 k の SGS の質量流束であり、やはり勾配拡散近似を用いて評価した。

$$J_{k,j} = \bar{\rho} (\tilde{Y}_k \tilde{u}_j - \tilde{Y}_k \tilde{u}_j) = -\frac{\mu_{SGS}}{Sc_{SGS}} \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_j} \quad (8)$$

Sc_{SGS} は SGS のシュミット数であり、0.7 で一定とした。

これらの基礎式を非構造格子の有限体積法に基づき離散化した。運動量保存式の対流項は流束制限関数に min-mod 関数を適用した TVD [18]を、拡散項は二次中心差分法を用いてそれぞれ離散化し、時間進行法に二次の Adams-Bashforth 法を用いた。圧力と速度の結合解法には Simplified Marker and Cell (SMAC)法[19]を用い、圧力補正值に関する連立方程式の解法には AMGS [20]を採

用した．その他の保存式の対流項と拡散項はべき乗法[21]を用いて離散化し，時間進行法には一次のオイラー陰解法を用い，解くべき変数の連立方程式の解法には多項式前処理付き安定化双共役勾配法(Bi-Conjugate Gradient Stabilized) [22]を用いた．なお，Metis-5.1.0 [23]を用いて解析領域を分割し，Message Passing Interface (MPI)を用いて領域分割に基づく並列計算を実施した．

2.2.2 液相の解析方法

噴霧液滴を剛体球と仮定し，微粒化が完了した後の液滴の運動と蒸発を考える．なお，液滴の二次分裂，衝突や衝突による合一は起こらないものとした．液滴に働く力として抗力を考慮する場合の液滴の運動方程式と速度の定義式は式(9-10)である．

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = C_D \frac{1}{2} \rho_f (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p) |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p| A_{p,proj} \quad (9)$$

$$\frac{d\mathbf{x}_p}{dt} = \mathbf{u}_p \quad (10)$$

ここで， C_D は抗力係数であり，粒子レイノルズ数 Re_p の関数である Clift et al.の式[24]を用いて推算した．この常微分方程式を2次のRunge-Kutta法を用いて解くことで各時刻における液滴の速度と位置をそれぞれ求めた．なお，時間刻みは計算負荷を低減するため，1つのセルを20ステップで通過するように動的に決定した．さらに，液滴の蒸発を考慮する場合，液滴のエネルギーと質量の保存式も同様に解いた．

$$m_p C_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = Q_{conv} + L \dot{m}_p \quad (10)$$

$$\frac{dm_p}{dt} = \dot{m}_p \quad (11)$$

なお，液滴の蒸発速度は Abramson and Sirignano のモデルに基づき推算した[25]．

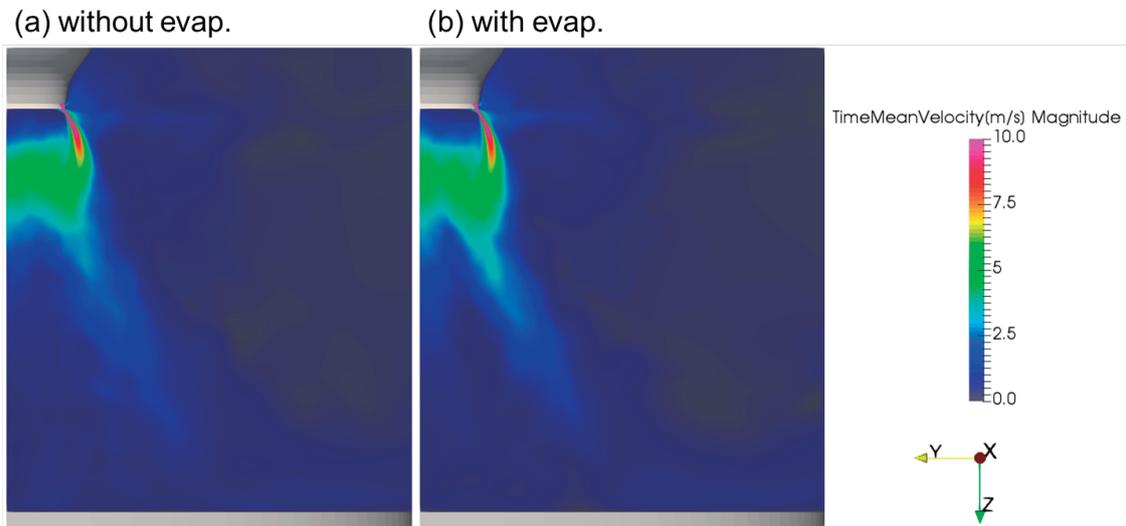


図2 蒸発を考慮しない場合と考慮する場合の気相の速度の大きさの時間平均値の分布

3. 結果と考察

3.1 回転霧化と被塗装物の間に形成される流れ場

回転霧化塗装機において噴霧液滴の蒸発が形成される気相の流れ場に及ぼす影響を検討する．

図2に(a)液滴の蒸発を考慮しない場合と(b)考慮する場合における時間平均を施した速度の大きさを示す。いずれの場合においても、環状のスリットから供給される Shaping Air (SA)の速度は噴出直後に大きさが最も大きく、被塗装物に向かって減衰している。その後、SAは被塗装物の中心からやや外側に衝突し、被塗装物表面を外側に向かう流れ場を形成している。また、ベルカップが高速で回転するため、ベルカップ中心付近の下流部が負圧となることで内部再循環領域が形成され、SAの一部が引き込まれている。液滴の蒸発を考慮しない場合とする場合と比較すると、速度の大きさに大きな違いは確認されない。そのため、液滴の蒸発が流れ場に及ぼす影響は小さい。これはSA、回転ベルカップと被塗装物によって形成される流れ場において液滴の蒸発量がさほど大きくないためであると考えられる。

3.2 噴霧液滴の運動

次に回転霧化塗装機において噴霧液滴の蒸発が液滴の運動に及ぼす影響を検討する。図3に(a)液滴の蒸発を考慮しない場合と(b)考慮する場合の液滴の飛跡を示す。なお、飛跡の色は液滴の粒子径を表す。いずれの場合においても、粒子径が概ね $100\ \mu\text{m}$ 以上の大きな液滴はSAに同伴することなくベルカップ外側に飛散している。これはSAの速度に対して液糸から微粒化した液滴の慣性力が大きいためであると考えられる。一方、粒子径が概ね $100\ \mu\text{m}$ 以下の小さな液滴はSAに同伴し、被塗装物に向かって運動している。これはSAの速度に対して液糸から微粒化した液滴の慣性力が小さいためであると考えられる。さらに、SAに同伴する液滴には被塗装物に塗着する液滴と塗着することなく被塗装面上流を外側に向かって運動する液滴が存在する。また、このSAに同伴する小さい液滴はランダムな運動をしており、乱流変動の影響を受けていることも示されている。さらに、SAに同伴した粒子径の小さい噴霧液滴の粒子径に着目し、液滴の蒸発を考慮しない場合と考慮する場合を比較すると、液滴の蒸発を考慮する場合の液滴の粒子径が小さい。これは、SAに同伴する小さい液滴の蒸発が進行しているためであると考えられる。

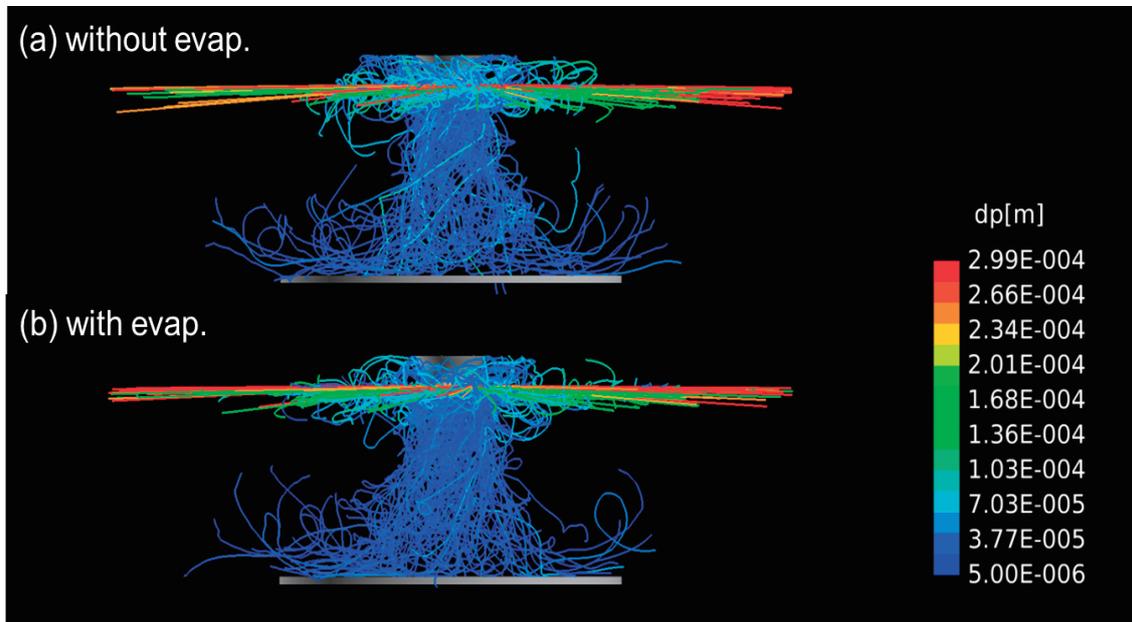


図3 液滴の蒸発を考慮しない場合とする場合の液滴の飛跡

3.3 噴霧液滴からの蒸発量

前節において噴霧液滴からの蒸発が示唆されたため、液滴からの蒸発量を定量的に検討する。図4に液滴の蒸発を考慮しない場合と考慮する場合において、全計算時間中に回転霧化塗装機から被塗装物までの軸方向距離 $z = 100, 150, 200$ および $250\ \text{mm}$ における x - y 断面を通過した液滴の

質量の和を示す．ここで，上流から下流に向かって各断面を通過する液滴の質量の和が減少するのは，滞在時間が短いか被塗装物に向かって運動することなく飛散したため液滴が各断面まで運動しないためか液滴の蒸発が進行したためである．前節において液滴の蒸発を考慮する場合としない場合において液滴の飛跡はほぼ同じである．そのため，液滴の蒸発を考慮する場合と考慮しない場合の差は液滴の蒸発によるものが支配的であると考えられる．図 4 より，液滴の蒸発を考慮する場合，液滴の蒸発を考慮しない場合と比較して各断面を通過する液滴の質量の和は小さいため，液滴の蒸発が進行していると考えられる．さらに，各断面を通過する液滴の質量の和の差は小さいため，最も上流である $z = 100$ mm の断面を通過するまでの液滴の蒸発量が大きいと考えられる．

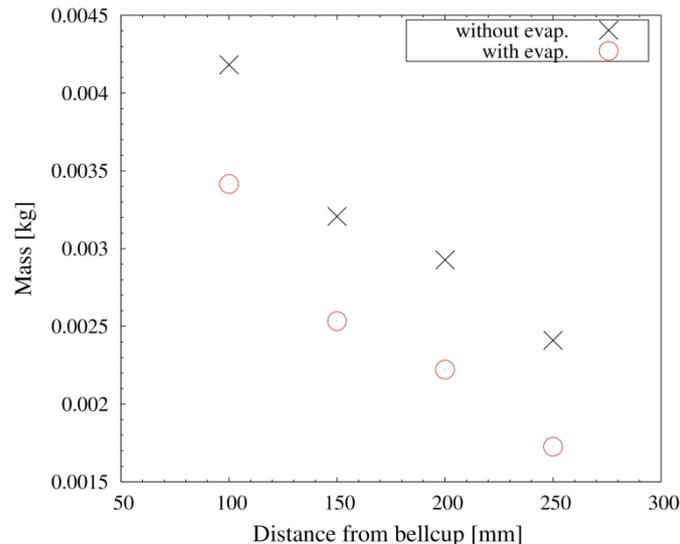


図 4 各断面を通過する液滴の質量の合計値

さらに，回転霧化塗装機から被塗装物までの軸方向距離 $z = 100, 150, 200$ および 250 mm における x - y 断面を通過するまでの液滴の蒸発量について検討する．図 5 に各断面を通過するまでの液滴の蒸発量を示す．回転霧化塗装機から被塗装物に向かって液滴の蒸発量は増加している．特に，液滴からの蒸発量は最も上流である $z = 100$ mm の断面においてすでに 18% を示し，下流に向かってほぼ線形に増加し，最も下流の断面である $z = 250$ mm において 28% に達している．この結果は Ray et al. の報告[26]とほぼ一致しており，蒸発量を妥当に見積もることができたと考える．以上より，回転霧化塗装機において室温かつ湿度 0% の Shaping Air (SA) を供給する場合，液滴からの蒸発量は無視できないことがわかる．

最後に，液滴の蒸発を考慮しない場合と考慮する場合において，回転霧化塗装機から被塗装物までの軸方向距離 $z = 100, 150, 200$ および 250 mm における x - y 断面を通過する液滴の質量基準の粒径分布を比較することで，各断面を通過するまでの液滴の粒子径ごとの蒸発量を検討する．図 6 に各断面を通過する液滴の質量基準の粒径分布を示す．最も存在割合の多い粒径 $50\text{--}60 \mu\text{m}$ の液滴の減少の割合が大きい．そのため，蒸発量の多くは最も存在割合の多い粒径 $50\text{--}60 \mu\text{m}$ の液滴によるものである．また，いずれの断面においても粒子径 $100 \mu\text{m}$ 以上の液滴は存在しない．これは節 3.2 で示したとおり，微粒化した液滴が SA に同伴することなく，飛散するためである．

4. 結言

本研究では，回転霧化塗装機を対象に噴霧液滴の蒸発を考慮した噴霧流の Large Eddy Simulation を実施した．液滴の蒸発を考慮しない場合とする場合の解析結果を比較することで，液滴の蒸発が噴霧流に及ぼす影響を検討した．その結果，液滴の蒸発が噴霧流の気相の流れ場と液滴の運動

に及ぼす影響は小さいことが示された。また、蒸発は回転霧化塗装機近傍で最も進行し、蒸発量は供給した塗料の約 18%であった。その後、蒸発量は回転霧化塗装機から被塗装物に向かって線形に増加し、最終的に 28%に達した。これら一連の解析結果は Shaping Air (SA)と雰囲気湿度を 0%とした場合であり、最も蒸発が進行する条件である。今後、SA と雰囲気湿度の影響を検討する必要があるだろう。

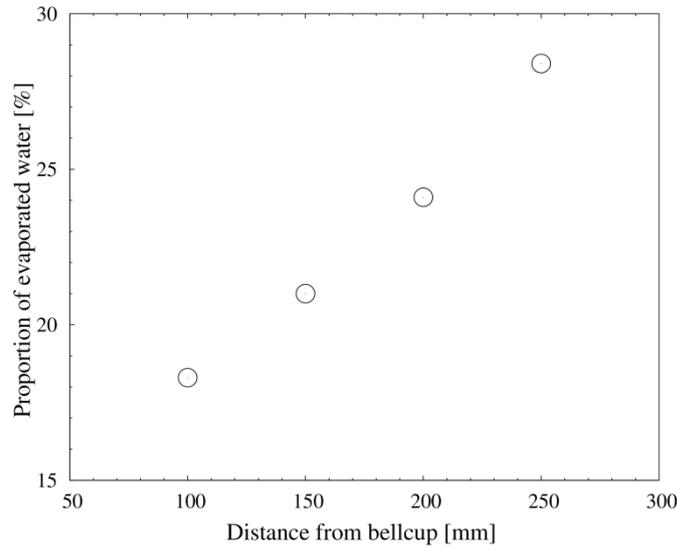


図 5 液滴が各断面に達するまでの蒸発量

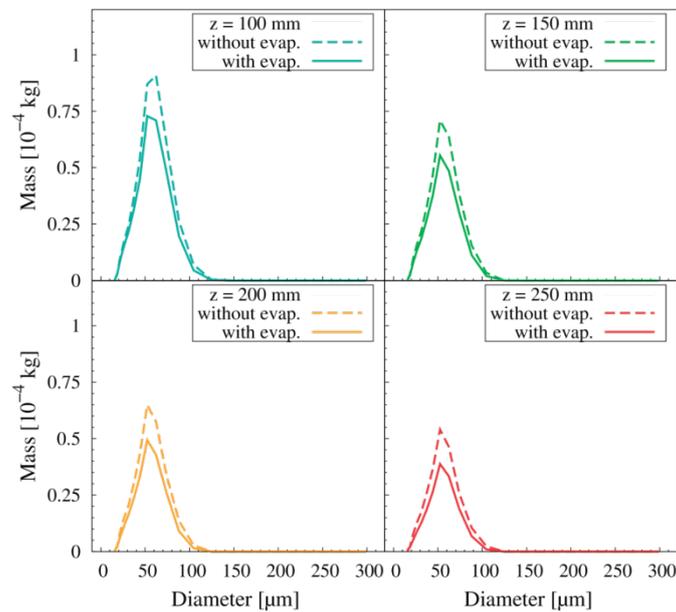


図 6 蒸発を考慮しない場合と考慮する場合の各断面を通過する粒径に対する液滴の質量

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができた。

参考文献

- [1] 相馬ら, 塗装工学, 49(11), 379–389 (2014)

- [2] Im et al., *J. Fluids Eng.*, 123, 237–245 (2001)
- [3] Ellwood and Braslaw, *J. Electrostat.*, 45, 1–23 (1998)
- [4] Domnick et al., *Part. Part. Syst. Charact.*, 22, 141–150 (2005)
- [5] Colbert and Cairncross, *J. Electrostat.* 64, 234–246 (2006)
- [6] Toljic et al., *J. Electrostat.*, 70, 499–504 (2012)
- [7] 安村ら, *化学工学論文集*, 37(3), 251–260 (2011)
- [8] 安村ら, *化学工学論文集*, 37(4), 296–304 (2011)
- [9] Soma et al., *J. Chem. Eng. Jpn.*, 50(4) 254–261 (2017)
- [10] Im et al., *J. Fluids Eng.*, 126(3), 449–456 (2004)
- [11] Y.-C. Chen et al., *Int. J. Multiph. Flow*, 32, 389–412 (2006)
- [12] M. Bini and W. P. Jones, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 30, 471–480 (2009)
- [13] H. Sommerfeld and H. H. Qui, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 19, 10–22 (1998)
- [14] S. V. Apte et al., *Proc. Combust. Inst.* 32, 2247–2256 (2009)
- [15] C. T. Crowe et al., *J. Fluids Eng.*, 99, 325–332 (1978)
- [16] 松下ら, *第23回日本エネルギー学会大会講演論文集*, 26–27 (2014)
- [17] J. Smagorinsky, *Mon. Weather Rev.*, 91, 99–164 (1963)
- [18] P. L. Roe, *J. Comput. Phys.*, 43, 357–372 (1981)
- [19] F. H. Amsden and A. A. Harlow, *Los Alamos Scientific Laboratory report*, LA-4370 (1970)
- [20] A. Fujii, <http://hpcl.info.kogakuin.ac.jp/lab/software/amgs> (2016)
- [21] S. V. Patankar, *Numerical Heat and Fluid flow*, CRC Press (1980)
- [22] H. A. Van der Vorst, *SIAM J. Sci. and Stat. Comput.*, 13(2), 631–644 (1992)
- [23] G. Karypis and V. Kumar, <http://www.cs.umn.edu/~metis> (2009)
- [24] R. Clift et al, *Drops, and Particles*, Dover Publications (2005)
- [25] B. Abramzon and W. A. Sirignano, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 32, 1605–1618 (1989)
- [26] R. Ray et al., *Atomization and Sprays*, 25 (7), 539–551 (2015)