気流中に置かれた三次元台状物体の表面上を移動する 液滴群の数値シミュレーション*

土井 克 則^{*1}, 川 鍋 健^{*2}
濱 本 直 樹^{*3}, 中 村 佳 朗^{*1}

Numerical Simulation of Droplets Moving on Surface of Three-Dimensional Trapezoidal Object in Air Flow

Katsunori DOI^{*4}, Takeshi KAWANABE,
Naoki HAMAMOTO and Yoshiaki NAKAMURA

^{*4} Department of Aerospace Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

In this study, we numerically simulated behavior of droplets moving on a surface of a solid three-dimensional trapezoidal object exposed to air flow. This condition can be related to a case that an automobile runs in the rain. The Lagrangian model was applied to the droplets, where motion of each droplet was tracked in the simulation. Aerodynamic drag force, adhesion force, viscous friction, and gravity on the droplet were considered, and parameters in their model were identified by results of some elemental experiments. And, size distribution and coalescence of droplets were also considered. In the results, larger droplets grown by their coalescences climbed up on the front face of the object, and some droplets were collected on a region of the side face where there was a vortex generated by flow separation from the edge of the front face. These phenomena were similar to those observed in experiments.

Key Words: Droplets, Wetting, Gas-Liquid Two-Phase Flow, Numerical Simulation, Automobile, Rain

1. 緒 言

固体表面に付着した液滴群が、重力や空気力によって、その表面上を移動する現象は、我々の身近に数多く存在する。しかし、その力学的機構の詳細は非常に複雑である。液滴が接触する固体表面および周囲の気体との界面にはたらく相互作用によって、各液滴はその内部を流動させながら、運動、変形、合体、分裂し、時には液膜や小川のような様相を示す。

このような現象の一例として、雨天走行時の自動車に付着する雨水が挙げられる。フロントウインドに付着した雨水は、運転者の前方視界を妨げると共に、その一部はサイドウインドに移動して、側方視界およびサイドミラーを介した間接後方視界を妨げる。従って、運転者の周囲視認性を確保するためには、表面の形状や濡れ性の調整、あるいはワイパ等の除去装置によって、雨水を制御する必要がある。例えば、中川ら⁽¹⁾は、サイドウインド上の雨水を実験で観察し、车速の違いやサイドミラーの有無によって、その状態が

大きく異なることを示した。この結果は、車体形状に依る気流を調整することで雨水の状態を制御できる可能性を示唆する。

また、自動車に付着する雨水は車体の汚れの原因となる。例えば、知名ら⁽²⁾は、車体周り流れ場の数値シミュレーションによって得られた気流の速度場を用いて、水滴を含む汚れ粒子の運動を予測した。具体的には、個々の粒子の運動を追跡する方法（汚れ粒子追跡法）や粒子群の運動を模擬する移流拡散方程式を解く方法（汚れ濃度法）によって数値的に予測し、その結果は実験結果を良く再現した。しかし、これらの方法は車体に付着するまでの予測に限られる。

このように、自動車に付着する雨水に関して、その必要性から多くの解析やその手法の提案がなされている。しかし、実際の自動車開発においては、空力性能や騒音特性、あるいは意匠性などを含めた総合的な検討を迅速に行う必要があり、その要求を満たすような高精度で簡易な予測手段の確立には至っていない。

自動車に付着する雨水の他にも、固体表面に付着した液滴の運動に関して、様々な現象が解析されている。例えば、Nakajima et al.⁽³⁾は、表面の動的撥水性の評価として、撥水処理を施した斜面上に置かれた液滴の転落現象を高速度カメラによって詳細に計測し、その運

* 原稿受付 2009年12月28日。

^{*1} 正員、名古屋大学工学部(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。

^{*2} 名古屋大学大学院工学研究科。

^{*3} 三菱自動車工業(株)(〒444-8501 岡崎市橋目町字中親切1)。

E-mail: doi@nuae.nagoya-u.ac.jp

動の特性を示した。また、Zhang et al.⁽⁴⁾は、燃料電池の発電に伴って発生する水滴が流路内で滞留して発電効率を低減させる現象を観察し、液滴が気流によって排除される条件を明らかにした。しかし、これらの現象を支配する基本的な力学的構造については、依然として未解明な点が多い。

一方、液滴群の状態を予測する手段としては、DDM (Discrete Droplet Model) 法⁽⁵⁾が知られており、主に液体燃料噴霧の解析に適用されている。この手法では一般的に、ある一群の液滴をパーセルと呼ばれる単位で扱い、その代表液滴の運動をラグランジュ的に追跡する。これにより、計算量を低減できるが、各パーセル内における液滴の状態のばらつきや相対運動および液滴の合体を直接扱うことは出来ず、統計学的なサブモデルで扱う必要がある。また、液滴が壁面上を移動するような現象の適切なモデルは確立されていない。

本稿では、固体表面に付着した液滴群が空気力によって移動する現象を予測する数値シミュレーションの方法を提案する。具体的には、全ての液滴について、その個々を追跡するラグランジュ的手法を用いる。液滴に作用する力として、空気力、付着力、粘性摩擦力、重力を考慮する。また、単一液滴の幾何形状や力学的特性を計測する実験（基本実験）の結果によって、各作用を評価するモデルを同定する。さらに、液滴の大きさのばらつきや液滴の合体も考慮する。

そして、提案した方法を用いて、気流にさらされた物体表面に付着した液滴群の運動を解析する。図1に解析対象の概要を示す。物体は、直方体をその側面に垂直な平面で斜めに切断した形状とし、その切断面である斜面に気流によって運ばれた液滴群が付着する。そして、空気力によって液滴群は物体上面あるいは側面を伝わりながら下流側へ運ばれる。この解析対象は、雨天走行中の自動車に雨滴群が付着する状態を想定している。このような基本的な現象の解析により、物体表面に付着した液滴群の運動に関する基本的な知見を得る。また、同様の条件における液滴群の様子を観測する実験（検証実験）の結果を計算結果と比較することで、本シミュレーション方法の妥当性を検証する。

2. 計算モデル

2.1 液滴の支配方程式 本研究では、液滴群を構成する各液滴について、並進運動の方程式を個々に解くことによって運動を計算する。

質量 m_p の液滴について、その代表点の位置 $\vec{r}_p$ および速度 $\vec{v}_p$ は、次式から求められる。

$$\frac{d\vec{r}_p}{dt} = \vec{v}_p \quad (1)$$

Fig. 1 Droplets on the three-dimensional trapezoidal object in air flow

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \vec{f}_n + \vec{f}_t \quad (2)$$

ここで、 $\vec{f}_n$, $\vec{f}_t$ は液滴に作用する力であり、液滴が付着した物体表面に垂直な方向成分、平行な方向成分をそれぞれ表す。液滴の回転運動や変形、液滴内の流動、および、蒸発や浸透による質量の変化は考慮しない。

垂直方向成分 $\vec{f}_n$ は、液滴を物体表面に留める拘束力として作用し、その結果として液滴は常に物体表面に付着した状態にあると仮定する。また、平行方向成分 $\vec{f}_t$ は、液滴を物体表面上で移動させる面内力として作用し、次式で与えられると仮定する。

$$\vec{f}_t = \vec{f}_G + \vec{f}_S + \vec{f}_V + \vec{f}_A \quad (3)$$

ここで、 $\vec{f}_G$, $\vec{f}_S$, $\vec{f}_V$, $\vec{f}_A$ は、重力、付着力、粘性摩擦力、空気力の平行方向成分をそれぞれ表す。

重力の平行方向成分 $\vec{f}_G$ は、次式で与えられる。

$$\vec{f}_G = m_p \{ \vec{g} - (\vec{g} \cdot \vec{n}_w) \vec{n}_w \} \quad (4)$$

ここで、 $\vec{g}$ は重力加速度ベクトル、 $\vec{n}_w$ は物体表面の外向き法線単位ベクトルをそれぞれ表す。面内力の残りの要素 $\vec{f}_S$, $\vec{f}_V$, $\vec{f}_A$ についても、推定される力学的構造に基づくモデル（後述）によって与えられる。

2.2 液滴の形状 はじめに、各面内力要素に大きく影響を及ぼす液滴の形状を検討する。

図2に液滴の形状モデルを示す。液滴の形状は capped sphere（球を物体表面で切断した形状）であると仮定する。これは、静止した液滴に一樣な表面張力のみが作用する場合の平衡状態に等しく、概して液滴が小さいほど本形状に近づく。なお、物体表面の曲率は考慮せず、液滴の大きさに対して局所的に平面であると仮定している。

以上の仮定から、質量 m_p の液滴と物体表面の接触面の直径 D_p を計算すると、次式が得られる。

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{2 \sin^3 \theta}{2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta} \frac{12 m_p}{\pi \rho_L}} \quad (5)$$

Fig. 2 Shape of a droplet

ここで、 ρ_L は液滴を組成する液体の密度を表す。また、 θ は液滴表面と物体表面が成す角である接触角を表し、この値は液滴の組成や物体表面の性状に依る。本研究では、基本実験の結果に基づき、式(5)の仮定の下で接触角 θ の値を同定する。

また、液滴の形状に関して、物体表面に垂直な方向の投影面積 S_{np} 、平行な方向の投影面積 S_{ip} 、およびその図心の高さ h_p は、それぞれ以下の式で与えられる。

$$S_{np} = \frac{\pi}{4} D_p^2 \quad (6)$$

$$S_{ip} = \frac{2\theta - \sin 2\theta}{\pi \sin^2 \theta} \frac{\pi}{8} D_p^2 \quad (7)$$

$$h_p = \frac{\pi \sin^2 \theta}{2\theta - \sin 2\theta} \frac{2}{3\pi} D_p \quad (8)$$

2.3 付着力 水平に保持した平面上に液滴を置いた状態から平面を傾けていくと、その傾斜角が転落角と呼ばれる所定の値に達するまで、液滴は静止状態を保持する。この現象は、固体表面間に作用する静止摩擦力と同様に、液滴を動かそうとする力を打ち消す逆方向の力が接触面に作用し、かつ、その大きさに上限値があることを意味する。本研究では、この力を付着力と呼ぶ。

Wolfram et al.⁽⁶⁾は、撥水性表面に置かれた様々な大きさの液滴の転落角を計測し、付着力が接触面の直径に比例することを示した。これは、三重線と呼ばれる液滴表面と物体表面の接触線における表面張力が付着力に関与していることを示唆する。また、Furmidge⁽⁷⁾は、斜面上の液滴が変形することで、液滴の斜面上方側と下方側で接触角に差が生じ、これによる表面張力の差が付着力として作用するモデルを提案した。

これらの結果に基づき、付着力の最大値 $f_{S,max}$ を次式で与える。

$$f_{S,max} = \gamma \pi D_p \quad (9)$$

ここで、 γ は比例係数であり、液滴の組成や物体表面の性状に依る。本研究では、基本実験の結果に基づき、式(9)の仮定の下で係数 γ を同定する。

式(9)で与えられる付着力の最大値に対して、実際の付着力 $\vec{f}_S$ は以下の様に作用すると仮定する。液滴が静止しているとき、他の面内力の総和が最大値未満である場合には、それを打ち消すように付着力が作用し、総和が最大値以上である場合には、それと逆方向に最大値と等しい大きさの付着力が作用する。また、液滴が移動しているときは、その速度と逆方向に、上限値と等しい大きさの付着力が作用する。すなわち、動摩擦力は静止摩擦力に等しいと仮定する。

2.4 粘性摩擦力 転落角以上に傾いた平面上に置かれた液滴は、斜面を下りながら加速し、やがて所定の速度に達する。これは、液滴の移動速度の増加と共に大きくなる力が移動速度と逆方向に作用することを意味する。本研究では、この力を粘性摩擦力と呼ぶ。

Sakai et al.⁽⁸⁾は、斜面を下る液滴の運動とその内部流動を観察し、内部流動を伴い比較的速度の低い“回転モード”と内部流動が無く比較的速度の高い“滑りモード”の二種類のモードが存在することを示した。本研究の対象とする現象は液滴の移動速度が比較的高い場合に相当するため、“滑りモード”で運動する場合を想定し、液滴内部の物体表面上に形成されたせん断層の速度勾配による粘性応力が粘性摩擦力として液滴に作用すると仮定する。

そして、粘性摩擦力 $\vec{f}_V$ を次式で与える。

$$\vec{f}_V = -\mu_L S_{np} \frac{\vec{v}_p}{\lambda} \quad (10)$$

ここで、 μ_L は液滴を組成する液体の粘性係数を表す。また、 λ はせん断層の厚さに相当する係数である。本研究では、基本実験の結果に基づき、式(10)の仮定の下で係数 λ を同定する。

2.5 空気力 気流にさらされた液滴の表面には、非一様な圧力およびせん断応力が作用する。本研究では、この合力を空気力と呼ぶ。そして、流体力学の通例に従い、空気力を次式で与える。

$$\vec{f}_A = C_D S_{np} \frac{1}{2} \rho_A |\vec{v}_r| \vec{v}_r \quad (11)$$

ここで、 ρ_A は気体の密度を表す。また、 $\vec{v}_r$ は相対速度ベクトルであり、次式で与えられる。

$$\vec{v}_r = \vec{v}_A(\vec{r}_{pc}) - \vec{v}_p \quad (12)$$

ここで、 $\vec{v}_A(\vec{r}_{pc})$ は気体の代表速度である。本研究が対象とする問題では、固体表面上に形成される境界層の厚さと液滴の高さは同程度であり、液滴周囲の気体速度分布は一様ではない。そこで、図2に示すように、液滴の代表位置 $\vec{r}_p$ の直上で図心高さ h_p と等しい高さの位置を参照位置 $\vec{r}_{pc}$ とし、液滴が存在しない場合の参照位置における気体速度を代表速度とする。

式(11)の抗力係数 C_D は、液滴レイノルズ数 Re_p の関数として、以下の関係を仮定する。

$$C_D = C_{D0} Re_p^{-m} \quad (13)$$

ここで、液滴レイノルズ数 Re_p は次式で与えられる。

$$Re_p = \frac{\rho_A |\vec{v}_r| D_p}{\mu_A} \quad (14)$$

式中の μ_A は気体の粘性係数を表す。

抗力係数のパラメータ C_{D0} , m の値は液滴の形状により変化する。すなわち、これらの値は液滴の形状に影響を及ぼす液滴の組成や物体表面の性状に依る。本研究では、基本実験の結果に基づき、式(11)および式(13)の仮定の下でパラメータ C_{D0} , m を同定する。

2.6 液滴の合体 二つ以上の液滴が接触すると、表面張力によって変形して、平衡状態である一つの液滴を形成する。本研究では、この現象を合体と呼ぶ。

本研究では、計算モデルを簡単化するために、合体に要する時間が液滴の運動の時間スケールに比べてはるかに短く、所定の接触条件を満たした瞬間に変形を終えると仮定する。また、変形後の形状は変形前と相似であり、変形前後で重心の位置が変化せず、かつ、質量および運動量が保存されると仮定する。

接触条件として、質量 m_{p1} , 直径 D_{p1} , 位置 $\vec{r}_{p1}$, 速度 $\vec{v}_{p1}$ の液滴1と、質量 m_{p2} , 直径 D_{p2} , 位置 $\vec{r}_{p2}$, 速度 $\vec{v}_{p2}$ の液滴2が次式を満たすとき、両液滴は合体する。

$$|\vec{r}_{p1} - \vec{r}_{p2}| \leq \frac{D_{p1} + D_{p2}}{2} \quad (15)$$

このとき、合体後の液滴の質量 m_p , 位置 $\vec{r}_p$, 速度 $\vec{v}_p$ はそれぞれ以下の式で与えられる。

$$m_p = m_{p1} + m_{p2} \quad (16)$$

$$\vec{r}_p = \frac{m_{p1} \vec{r}_{p1} + m_{p2} \vec{r}_{p2}}{m_{p1} + m_{p2}} \quad (17)$$

$$\vec{v}_p = \frac{m_{p1} \vec{v}_{p1} + m_{p2} \vec{v}_{p2}}{m_{p1} + m_{p2}} \quad (18)$$

三つ以上の液滴の合体についても同様に扱う。

2.7 液滴の付着 気流によって運ばれた液滴群は、次々と物体表面に付着する。本研究では、特定の物体表面領域で液滴を適切に追加して、この現象を模擬する。具体的には、液滴の全質量流量および粒径分布の時間平均が所定の条件値に等しく、かつ、所定の物体表面領域内で質量流量の時間平均が一様になるように、ランダムな数および質量の液滴をランダムな位置に適時追加する。

液滴に作用する力やその運動は液滴の質量や大きさの違いによって大きく異なるため、付着する液滴の粒

径分布を考慮する必要がある。本研究では、流入する液滴の粒径分布がロジック・ラムラー分布⁽⁹⁾に従うと仮定する。この分布は、様々な噴霧液滴の粒径分布を比較的良く再現することが知られている。このとき、液滴径 D の質量密度分布関数 $f_M(D)$ は次式で表される。

$$f_M(D) = \frac{n}{D_0} \left(\frac{D}{D_0} \right)^{n-1} \exp \left\{ - \left(\frac{D}{D_0} \right)^n \right\} \quad (19)$$

ここで、 D_0 および n は分布のパラメータである。

また、質量密度分布関数 $f_M(D)$ は、次式で表す累積数分布関数 $F_N(D)$ に変換される。

$$F_N(D) = \frac{\int_{D_{min}}^D f_M(D) D^{-3} dD}{\int_{D_{min}}^{D_{max}} f_M(D) D^{-3} dD} \quad (20)$$

ここで、 D_{max} , D_{min} は設定した液滴径の最大値、最小値をそれぞれ表す。そして、累積数分布関数 $F_N(D)$ が確率変数を D とする確率累積分布関数に等しく、これに従ってランダムな径の液滴が付着すると仮定する。

2.8 気流の支配方程式 気流は非圧縮粘性流体とし、その流れ場はナビエ・ストークス方程式に従う。

本研究では、液滴の存在による体積排除効果および空気力の反力は考慮しない。また、気流は定常であると仮定する。これにより、空気力の評価精度が若干低減する代わりに、計算方法の大幅な簡素化と計算コストの大幅な低減を実現できる。

3. 計 算 方 法

シミュレーション計算の流れを図3に示す。

液滴の計算を実行する前に、あらかじめ気流の速度場を計算しておく。本研究では、疑似圧縮性法に基づき、陰解法であるLU-SGS法によって定常解を求める。また、非粘性項の計算にMUSCL法、粘性項に二次中心差分をそれぞれ用いる。そして、得られた速度場 $\vec{v}_A(\vec{r})$ を以降の液滴の計算に用いる。

液滴については、各時間ステップで以下の手順を実行して各液滴の時間履歴を算出する。

初めに、式(1)と式(2)において、面内力 $\vec{f}_i$ のみが時刻 t だけ作用した後の位置 $\vec{r}_p^*$ と速度 $\vec{v}_p^*$ を計算する。ここで、面内力の要素である空気力 $\vec{f}_A$ の計算に、あらかじめ求めた気流の速度場 $\vec{v}_A(\vec{r})$ を用いる。

次に、拘束力 $\vec{f}_n$ を考慮する。本研究では、拘束力を直接計算せず、その結果である位置と速度の面内拘束条件を満たすように、位置 $\vec{r}_p^*$ と速度 $\vec{v}_p^*$ を以下の式によって補正する。

$$\vec{r}_p = \vec{r}_p^* - \{(\vec{r}_p^* - \vec{r}_w) \cdot \vec{n}_w\} \vec{n}_w \quad (21)$$

$$\vec{v}_p = \vec{v}_p^* - (\vec{v}_p^* \cdot \vec{n}_w) \vec{n}_w \quad (22)$$

Fig. 3 Flow chart of computation

ここで、 $\bar{r}_w$ は液滴近傍の物体表面の代表位置を表す。

続いて、液滴の流入条件に応じて物体表面上に液滴を追加する。本研究では、追加する液滴の質量 m_p を次式で決定する。

$$m_p = \frac{\pi}{6} \rho_p \{F_N^{-1}(X)\}^3 \quad (23)$$

ここで、 X には $0 \leq X \leq 1$ の範囲で等確率な乱数を与える。そして、流量の条件に応じた時間刻み当たりの質量に達するまで、ランダムな質量の液滴を所定の領域内のランダムな位置に追加することを繰り返す。

最後に、液滴の合体を考慮する。二つの液滴の組について、条件式 (15) を満たす場合には、一方の液滴を合体後の状態に変更し、他方の液滴を消滅させる。

4. 実験方法

本研究では、計算モデルを同定するために単一液滴の幾何形状や力学的特性を計測する基本実験と、計算結果の妥当性を検証するために計算と同様の条件における液滴群の様子を観測する検証実験を行う。なお、基本実験における空気力の計測および検証実験には、三菱自動車工業株式会社の三次元煙風洞を使用した。

基本実験では、注射器で撥水性表面上に所定の質量の液滴を形成し、その液滴を物体表面に移して各実験を行う。また、ビデオカメラで撮影した連続画像を用いて、液滴の幾何形状や運動を計測する。

検証実験では、風洞に平板及び物体を設置すると共に、その上流に設置した噴霧器から液体を噴霧した状態で風洞を動作させて、液滴群を含む気体を物体に向かって流す。そして、物体表面の液滴群をビデオカメラで撮影し、その状態を観察する。

5. 実験条件

両実験で使用する物体の材質は米松の集成材であり、この表面を磨いた後にアクリルウレタン樹脂塗料を塗布する。また、液滴をつくる液体には水道水を用いる。

Fig. 4 Computational Grid

検証実験において、物体の形状は、図 1 に示すように、底辺 680mm、高さ 250mm、底辺と斜辺の成す角が前側 30deg、後側 90deg の台形を側面とし、幅 250mm の柱状体とする。また、前側斜面と側面または上面が成す角部は、半径 10mm の円弧によって滑らかに結合される。物体は水平な平板上に置かれ、その平板の前縁は、物体の前縁に平行で 500mm 離れた位置にある。

気流は物体前縁に垂直で水平な方向から 20m/s で流入する。気体は 1atm、25℃である。また、検証実験において、気流と共に流入する液滴が物体前面に付着する量の計測値は、前面中央付近で約 4ℓ/min・m² である。

6. 計算条件

気体流れ場の計算に用いた計算格子を図 4 に示す。格子数は 90×90×90=729,000 である。また、物体の形状は実験と同じである。ただし、問題の対称性を仮定して、物体中央を通る対称面から向かって左半分のみを計算対象とし、対称面には鏡面条件を与える。上流側の境界には、実験と同じ流入条件を与える。また、側方および下流側の境界には流出条件を与える。

物体の材質や表面性状および液体の物性の条件はパラメータ同定の結果として考慮される。液体の密度は 1.0g/cm³ とする。

物体前面に追加する液滴の条件について、検証実験時における観察結果を参考として、対称面からの距離が 100mm 以下で高さが 225mm 以下の範囲に、平均付着量 4ℓ/min・m² でランダムに液滴が付着すると仮定する。また、液滴の粒径分布である式 (19) のパラメータは、実験で用いた噴霧器の仕様を参考として、 $D_0 = 1.0\text{mm}$ 、 $n = 2.0$ とする。なお、液滴径の最大値、最小値をそれぞれ $D_{\max} = 3.0\text{mm}$ 、 $D_{\min} = 0.5\text{mm}$ に設定する。最大値は、計算の利便性を目的とした値であり、元の累積質量分布で 99.99% に相当する。一方、最小値は、計算領域に存在する液滴の総数を減らすための値であり、元の累積質量分布で 20% に相当する。この妥当性については 8.1 節で述べる。

Fig. 5 Diameter of contact surface

Fig. 6 Minimum sliding angle

Fig. 7 Maximum adhesion force

7. モデル同定

本章では、単一液滴の幾何形状や力学的特性を計測した基本実験の結果、および、その結果を用いて各計算モデルのパラメータを同定した結果を示す。

7.1 液滴の形状 水平な物体表面上に所定の質量の液滴を置き、その接触面の平均径を計測した。その結果を図5に点で示す。

この実験結果に対して、式(5)の仮定の下で最小二乗法によって接触角 θ の値を求めると、 $\theta = 64\text{deg}$ が得られる。この値を用いた式(5)の関係を図5に曲線で示す。図を見ると、実験結果と計算モデルの傾向が一致していることが分かる。

Fig. 8 Terminal sliding velocity

Fig. 9 Viscous friction

7.2 付着力 所定の質量の液滴が置かれた物体表面を徐々に傾けていき、液滴が転落を開始する表面の傾斜角である転落角 α を計測した。その結果を図6に点で示す。図中で転落角が90degよりも大きい点は、表面を垂直にしても液滴が転落しないことを表す。

液滴の転落開始時、次の力学的関係が成り立つ。

$$f_{S,\max} = m_p g \sin \alpha \quad (24)$$

この関係式および式(5)によって、図6の実験結果を接触面直径 D_p と最大付着力 $f_{S,\max}$ の関係に換算した結果を図7に点で示す。

この結果に対して、式(9)の仮定の下で最小二乗法によって比例係数 γ の値を求めると、 $\gamma = 1.5 \times 10^{-2} \text{N/m}$ が得られる。この値を用いた式(9)の関係を図7に曲線で示す。また、これを質量 m_p と転落角 α の関係に換算した結果を図6に曲線で示す。図を見ると、実験結果と計算モデルの傾向が一致していることが分かる。

7.3 粘性摩擦 転落角よりも大きい所定の傾斜角 α で保持された物体表面上に所定の質量の液滴を置き、最終的に一定となる液滴の転落速度である終速度 V_p を計測した。その結果を図8に点で示す。

液滴の定速転落時、次の力学的関係が成り立つ。

$$f_v + f_{S,\max} = m_p g \sin \alpha \quad (25)$$

Fig. 10 Minimum removable velocity of uniform flow

Fig. 11 Drag coefficient

この関係式と式 (6) および式 (9) によって、図 8 の実験結果を積 $\mu_L V_p S_{np}$ と粘性摩擦力 f_v の関係に換算した結果を図 9 に点で示す。

この結果に対して、式 (10) の仮定の下で最小二乗法によって係数 λ を求めると、 $\lambda = 9.4 \times 10^{-5} \text{ m}$ が得られる。この値を用いた式 (10) の関係を図 9 に曲線で示す。また、これを各傾斜角 α における質量 m_p と終速度 V_p の関係に換算した結果を図 8 に曲線で示す。図を見ると、実験結果と計算モデルの傾向が一致していることが分かる。

7.4 空気力 風洞内で一樣流に平行になるように保持された物体表面上に所定の質量の液滴を置き、一樣流の速度を徐々に増加させたときに液滴が移動を開始する一樣流速度である最小除去一樣流速 V_A を計測した。その結果を図 10 に点で示す。なお、液滴は平板前縁から 30cm の位置に置かれる。

液滴の移動開始時、次の力学的関係が成り立つ。

$$f_A = f_{S, \max} \quad (26)$$

この関係式と式 (9)、式 (11)、式 (13)、および、気流の境界層の速度分布を与えるブラジウスの解によって、図 10 の実験結果を液滴レイノルズ数 Re_p と抗力係数 C_D の関係に換算した結果を図 11 に点で示す。

この結果に対して、式 (13) の仮定の下で最小二乗法によってパラメータ C_{D0} 、 m を求めると、 $C_{D0} = 67$ 、

Fig. 12 Distribution of droplets on the object surface

$m = 0.63$ が得られる。この値を用いた式 (13) の関係を図 11 に曲線で示す。また、これを質量 m_p と最小除去一樣流速 V_A の関係に換算した結果を図 10 に曲線で示す。図を見ると、実験結果と計算モデルの傾向が一致していることが分かる。

8. 計算結果

前節で求めた各パラメータを用いて計算した結果として、液滴の付着を開始してから 5 秒後における液滴群の様子を図 12 に示す。物体の前方斜面に付着した液滴は、気流によって、物体表面を伝わりながらその側方や上方へ移動する。

8.1 前方斜面上の液滴群の運動 前方斜面近傍における気流の流線を図 13(a) に示す。流線は、物体前縁から 10mm および表面から 1mm 離れた位置を起点とする。図を見ると、物体の対称面から離れた位置では、物体側面に対して垂直外向きの気流速度成分が大きくなることが分かる。この気流による空気力が一部の液滴を側面へ運ぶ。なお、速度の大きさは、斜面の境界近傍を除いてほぼ一樣である。また、気流の境界層厚さは、斜面の中央部で約 2mm である。

前方斜面上の液滴群の分布について、液滴群の付着を開始してから 0.30 秒後、0.55 秒後、0.80 秒後の分布を図 13(b), (c), (d) にそれぞれ示す。

図 13(b) に示すように、液滴群の付着開始直後から一定時間、液滴群は一樣にランダムな分布を示す。この時点では、斜面境界近傍の一部の液滴を除いて、液滴は静止状態を維持する。これは、付着する液滴が小さいためであり、具体的には以下の二つの要因による。

第一に、液滴の径が小さくなると、液滴を拘束する付着力が液滴を駆動する空気力に比べて相対的に大きくなる。これは、付着力が液滴径に比例するのに対し、

Fig. 13 Air streamlines over the front surface and droplet distributions on the front surface

液滴を駆動する空気力が液滴径の二乗に比例するためである。第二に、液滴の径が小さくなると、液滴が境界層厚さに対して相対的に低くなった結果、液滴に向かう気流速度が実質的に低下するため、十分な空気力が得られない。例えば、液滴径分布の基準径 $D_0 = 1\text{mm}$ の液滴について、付着状態での高さは 0.5mm であり、気流の境界層に埋もれる。以上の結果は、図 10 に示す空気力を同定する基本実験の結果でも明らかであり、液滴が小さいほど、それを動かすのに必要な気流速度は高くなる。ただし、前方斜面上では重力も作用するため、液滴が大きすぎる場合にも液滴は移動しない、もしくは、気流に逆らって転落する。

液滴の付着を続けると、図 13(c) に示すように、大きな液滴が発生する。静止した液滴は、自身の存在する位置に新たに付着する液滴と合体し、徐々に大きくなる。そして、その大きさがある閾値を超えると、液滴は斜面を登り始める。そのとき、液滴は自身の進行方向上にある他の液滴と合体するため、液滴は移動しながら成長を続け、加速しながら移動する。また、その液滴が通過した跡では、新たな液滴が付着するまでの一定時間、液滴が消滅する。この結果として、図 13(c) に示すような分布が現れる。

なお、液滴径分布において非常に小さな液滴が気流によって物体表面に付着する可能性は低く、また仮に付着しても静止状態で大きな液滴の糧になる。したがって、計算コスト低減のために大きく設定する必要のある最小粒径について、計算結果への影響は小さい。

さらに所定時間経過すると、図 13(d) に示すように、大きな液滴が通過した跡が新たに付着した液滴によって消されるのと共に、別の箇所で成長した液滴が上方

(a) Velocity and contact surface diameter

(b) Tangential forces

Fig. 14 Time history of velocity, diameter of contact surface, and tangential forces of a droplet

に向かって加速する。その後は、このような大きな液滴の上昇運動が、ランダムな位置で間欠的に繰り返される。そして、上昇する液滴の一部は気流によって側方に流される。

以上に述べた液滴の成長および運動のメカニズムを

Fig. 15 Droplets distribution on the front surface in experiment

示す例として、ある液滴の速度と付着面直径の時間履歴を図 14(a) に、面内力の各成分の時間履歴を図 14(b) に、それぞれ示す。この液滴は、液滴群の付着が開始されてから 0.85 秒後に前方斜面に付着する。この時点では液滴が小さく、重力と付着力が空気力を打ち消す結果、液滴は静止状態にある。その後、1.13 秒後と 1.20 秒後に飛来した二つの液滴との合体によって、液滴が所定の大きさに達すると、空気力が重力と付着力に勝り、液滴は上昇運動を開始する。そして、液滴は合体を繰り返して成長しながら加速し、物体上面に達する。なお、上昇運動時における複数回の速度の微減は、合体相手の液滴が静止していることによる。

検証実験の結果について、前方斜面に分布する液滴群の様子を図 15(a) に示す。また、別の時刻における前方斜面の一部を拡大したものを図 15(b) に示す。図 15(a) を見ると、比較的大きな液滴が上方および側方に向かって移動することが分かる。また、図 15(b) を見ると、表面上に分布した多数の小さな液滴を大きな液滴が取り込みながら移動し、その跡には液滴が存在しない様子が分かる。これらの観測結果は、計算結果と定性的に一致する。一方、計算モデルでは考慮していない液滴の変形が実際には顕著に現れる。大きな液滴が高速で表面上を移動するとき、液滴は進行方向に大きく伸長し、場合によっては分裂する。このような現象を捉えて計算精度をより高めるためには、液滴の変形や分裂を考慮するモデルを追加する必要がある。

8.2 側面上の液滴群の運動 側面近傍における気流の速度ベクトル分布を図 16(a) に示す。図を見ると、前方斜面から少し下方の部分で、斜面に沿って速度が非常に遅い部分があることが分かる。以降、この領域を死水域と呼ぶ。そして、死水域の下方では、その死水域に沿うような速度場が形成され、大きな鉛直

Fig. 16 Air velocity vectors over the side surface and droplet distributions on the side surface

Fig. 17 Droplet paths on the side surface

上向きの速度成分が存在する。これは、前方斜面から側方に流れる気流が、前方斜面と側面をつなぐ角の部分で剥離し、それによって発生する渦の負圧が流れを上方に引き上げることで発生する。

側面上の液滴群の分布について、前面への液滴群の付着が開始してから 0.30 秒後、0.60 秒後の分布を図 16(b), (c) にそれぞれ示す。図 16(b) に示すように、早い時間に前方斜面から側面に移動する比較的小さな液滴は、死水域に滞留する。これは、付着する液滴が小さく、かつ、気流速度の主流方向成分が小さいためであり、空気力と重力を打ち消すような付着力が液滴に作用している。その後、前方斜面では次第に大きな液滴が発生するようになり、図 16(c) に示すように、その一部が前方斜面から側面に流れ込む。

Fig. 18 Droplets distribution on the side surface in experiment

側面上における代表的な液滴の軌跡を図 17 に示す。図 17 の実線で示されるように、流れ込んだ液滴が比較的小さい場合、初期に流入した液滴と同様に死水域に滞留する。また、図 17 の破線で示されるように、流れ込んだ液滴が中程度の大きさである場合、死水域に滞留した液滴を合体によって取り込みながら、下流側へ移動する。このとき、死水域の下に存在する上昇気流による空気力が重力よりも大きいため、液滴は上昇し、その一部は物体の上面へ移動する。一方、図 17 の点線で示されるように、流れ込んだ液滴が比較的大きい場合、液滴径の三乗に比例する重力が液滴径の二乗に比例する空気力よりも支配的になり、液滴は下降しながら後方へ流れ去る。

検証実験の結果について、側面に分布する液滴群の様子を図 18 に示す。図を見ると、前方斜面から少し下方の部分で、複数の液滴が滞留している様子が分かる。また、これらの液滴の一部が合体によって成長した後に上昇して上面へ移動する様子や、上面から遠い液滴の一部がほぼ水平な角度で後方へ流れる様子が観測された。この観測結果は、計算結果と定性的に一致する。一方、計算モデルでは考慮していない液滴の変形が側面でも現れる場合がある。具体的には、死水域に滞留した液滴は一列に連なるように合体し、線状に上面へ流れ込む現象が間欠的に発生する。このような現象を捉えて計算精度をより高めるためには、液滴の変形や分裂を考慮するモデルを追加する必要がある。

9. 結 言

固体表面に付着した液滴群が空気力によって移動する現象を予測する数値シミュレーションの方法を提案した。具体的には、個々の液滴を追跡するラグランジュ的手法を用い、液滴に作用する力の評価や液滴の粒径分布および合体の考慮を簡単に実行できる方法を示した。また、簡単な基本実験によってモデルのパラメータを同定する方法を示した。本提案方法は、物理的な

解釈が容易であり、かつ、比較的低コストで計算できる実用性の高いシミュレーション方法である。

そして、提案した方法を用いて、気流にさらされた三次元台状物体の表面に付着した液滴群のシミュレーションを行った。物体前面に付着した液滴は、後に付着する液滴と合体を繰り返して所定の大きさまで成長すると、上方への移動を開始する。移動した液滴の一部は前面から側面に移動する。このとき、比較的小さい液滴は気流の剥離により生じる気流速度の低い領域に滞留する一方、中程度の液滴は上昇しながら、比較的大きい液滴は下降しながら、それぞれ下流側へ移動する。これらの結果は、実験による観測結果と定性的に一致した。これにより、提案したシミュレーション方法の基本的な妥当性が確認された。

文 献

- (1) Nakagawa, K., Kohri, I. and Yanagimoto, K., Aerodynamic Research of Door Mirror, *Automotive Technology* (in Japanese), Vol.39, No.3 (1985), pp.252-259.
- (2) China, H. and Yoshida, M., Application of Flow Visualization Technique to Car Development, *Automotive Technology* (in Japanese), Vol.51, No.4 (1997), pp.32-36.
- (3) Nakajima, A., Suzuki, S., Kameshima, Y., Yoshida, N., Watanabe, T. and Okada, K., Sliding Mode Transition of Water Droplet on the Silicon Surface Coated with Octadecyltrichlorosilane, *Chemistry Letters*, Vol.32, No.12 (2003), pp.1148-1149.
- (4) Zhang, F. Y., Yang, X. G. and Wang, C. Y., Liquid Water Removal from a Polymer Electrolyte Fuel Cell, *Journal of Electrochemical Society*, Vol.153, No.2 (2006), pp.225-232.
- (5) Dukowicz, J. K., A Particle-Fluid Numerical Model for Liquid Sprays, *Journal of Computational Physics*, Vol.35 (1980), pp.229-253.
- (6) Wolfram, E. and Faust, R., Liquid Drops on a Tilted Plate, Contact Angle Hysteresis and the Young Contact Angle, *Wetting, Spreading and Adhesion*, (1978), pp. 213-222.
- (7) Furnidge, C. G. L., Studies at Phase Interfaces I. The Sliding of Liquid Drops on Solid Surfaces and a Theory for Spray Retention, *Journal of Colloid Science*, Vol.17 (1962), pp.309-324.
- (8) Sakai, M., Song, J. H., Yoshida, N., Suzuki, S., Kameshima, Y. and Nakajima, A., Direct Observation of Internal Fluidity in a Water Droplet during Sliding on Hydrophobic Surfaces, *Langmuir*, Vol.22 (2006), pp.4906-4909.
- (9) Mugele, R. A. and Evans, H. D., Droplet Size Distribution in Sprays, *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.43 (1951), pp.1317-1324.