

固体の伝熱を考慮した加熱平面に衝突する液滴の数値シミュレーション

Numerical Simulation of Droplet Impinging on Heated Surface including Solid Heat Conduction

- 杉本 康嘉, 三重大院, 三重県津市栗真町屋町 1577, sugi-ya@ees.mach.mie-u.ac.jp
- 辻本 公一, 三重大院, 三重県津市栗真町屋町 1577, tujimoto@mach.mie-u.ac.jp
- 社河内 敏彦, 三重大院, 三重県津市栗真町屋町 1577, shako@mach.mie-u.ac.jp
- 安藤 俊剛, 三重大院, 三重県津市栗真町屋町 1577, ando@ees.mach.mie-u.ac.jp

Yasuhiro Sugimoto, Graduate School of Engineering Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu, Mie
Koichi Tsujimoto, Graduate School of Engineering Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu, Mie
Toshihiko Syakouchi, Graduate School of Engineering Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu, Mie
Toshitake Ando, Graduate School of Engineering Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu, Mie

Improvement of computational methods for predicting the flow of droplets impingement in various industrial applications are hoped. In particular, in order to deal with industrial problems, a numerical scheme should be capable of easily deal with complicated interface topology change such as coalescence, breakup and so on. In the present paper, we investigate the possibility of DIM (diffuse interface model) as an interface tracking method to well respond to the topological change of interface. A problem of a single droplet impingement has already been examined to validate the performance of the DIM in the previous work. In this paper the results of heat transfer at droplet-surface interface during single droplet impact is reported.

1. 緒 論

液滴が平面に衝突する現象は、インクジェットプリンタによる印刷やスプレーによる塗装・冷却、3D プリンタによる造形など、様々な工業製品のプロセスにおいて重要な役割を担っており、液滴挙動の詳細な予測とそれに基づいた制御がそれらの性能及び効率の向上において重要となる。3D プリンタのプロセスはノズルから射出された液滴が壁面に衝突し、その液滴が周囲から伝熱を受け、凝固するというものである。実験を行う際には様々な困難な点がある。例えば、液滴衝突時にはごく短時間で起こる微小液滴の挙動を明瞭に撮影すること、そして伝熱および凝固時には液滴内部および周辺の温度分布の測定が困難なことである。そこで現在では液滴衝突現象を正確に再現できる数値シミュレーション技術の開発が求められている。伝熱を伴う液滴衝突の数値シミュレーションにおいて、温度境界条件は通常等温条件または等熱流束条件が使用される。しかし実用上はどちらの条件も当てはまらず、固体、流体間の伝熱はより複雑で、正確にこれを予測するには固体壁面を考慮し、固体側と流体側の両方を同時に計算する (conjugate heat transfer: CHT) 必要がある。しかしながらこういった計算手法を取り扱った論文は少なくいまだ十分な精度で温度場が予測された例はない。[5],[6] そこで本研究では計算領域下部に下面が加熱された固体を設置し、その固体に液滴を衝突させる CHT の計算を行い、CHT が液滴内部および周辺の温度分布に与える影響および CHT の必要性について報告する。

2. 計算方法

2.1 基礎式及び離散化

非圧縮場を仮定すると、支配方程式である連続式、ナビエ-ストークス式及び Cahn-Hilliard の非線形拡散方程式 [1] は次式となる。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{1}{\rho}\nabla\tau + \mathbf{g} + \frac{\sigma}{\rho}\kappa\delta(\mathbf{x})\mathbf{n} \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot k\nabla T \quad (3)$$

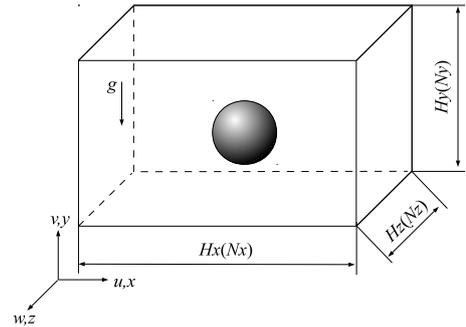


Fig. 1: Computational Domain

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\phi) = \frac{1}{Pe} \nabla^2 \mu_c \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{u} は速度、 t は時間、 ρ は密度、 p は圧力、 τ は粘性応力ベクトル、 \mathbf{g} は重力加速度、 σ は表面張力係数、 κ は表面曲率、 $\delta(\mathbf{x})$ は δ 関数、 \mathbf{n} は界面法線方向単位ベクトル、 c_p は比熱、 T は温度、 k は熱伝導率、 ϕ は秩序関数、 Pe はペクレ数、 μ_c は化学ポテンシャルを示す。空間の離散化はスタaggerド格子上で2次精度の内挿、微分を行った。対流項の離散化は Adaptive QUICKEST 法 [3] を、時間進行は2次精度の Adams-Bashforth 法を用いた。

2.2 Diffuse Interface Model [2]

Diffuse Interface Model は、二相流の界面は有限な厚さを持ち、物性値はその界面の中で連続的に変化することを想定する。流体の質量密度または成分濃度に相当する秩序変数 ϕ を用いると、自由エネルギー $F(\phi)$ は式 (5) で与えられる。この自由エネルギーを最小化する化学ポテンシャル式 (6) から、界面近傍での二相の拡散に関する Cahn-Hilliard 方程式である式 (4) が導出され、有限厚さを持つ界面が表現される。

$$F[\phi] = \int_{\Omega} \left(f(\phi(x)) - \frac{1}{2}k|\nabla\phi(x)|^2 \right) dx \quad (5)$$

Tab. 1: Physical properties

	$\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$	$c_p[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	$k[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$
air	1.000	1010	0.0299
water	1000	4180	0.6971
stainless	7980	500	13.8

$$\mu_c(\phi) = \frac{\delta F[\phi]}{\delta \phi(x)} = f'(\phi(x)) - \xi^2 \nabla^2 \phi(x) \quad (6)$$

2.3 めれ性境界条件

固体壁近傍での Cahn-Hilliard 方程式である式 (4) を解く際の境界条件は、秩序変数 ϕ ならびに化学ポテンシャル μ_c の法線方向微分を規定する必要がある。壁上での接触角は幾何学的関係から次式となる。

$$\cos\theta = \frac{\nabla\phi}{|\nabla\phi|} \cdot \mathbf{n} \quad (7)$$

三次元で y 方向を法線方向とした場合の境界条件は次式となる

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_{\text{wall}} = \frac{-\cos\theta}{\sqrt{1-\cos^2\theta}} \sqrt{\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)^2} \quad (8)$$

ここで、 θ は液滴の接触角である。さらに、壁を通過して物質の流入がないことに対応する法線方向境界条件として次式が成り立つ。

$$\frac{\partial\mu_c}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

3. Conjugate Heat Transfer

一般的に温度境界条件は等温条件または等熱流束条件が使用される。しかし、実用上はどちらの条件にも当てはまらず、より複雑である。そのため、固体と流体の間の伝熱を考慮する必要がある。本計算では固体側と流体側の熱伝導を考慮して壁面温度を推定する。それを用いて固体側から流体側に伝わる熱流束の計算を行った。

以下に壁面温度および熱流束の式を示す。壁面上で固体側と流体側での熱流束と温度が一致しなければならないことから

$$q_w = -k_f \frac{T_f - T_w}{\delta y} = -k_s \frac{T_w - T_s}{\delta y} \quad (10)$$

より

$$T_w = \frac{k_s T_s + k_f T_f}{k_s + k_f} \quad (11)$$

$$q_w = -k_f \frac{T_f - T_w}{\delta y/2} = -\frac{k_f}{\delta y} \left(\frac{2k_s}{k_s + k_f} \right) (T_f - T_s) \quad (12)$$

となる。

ここで q_w は壁面上の熱流束、 δy は格子間隔、 T_f 、 T_s は流体、固体それぞれの壁面に最も近いセル中心温度であり、 T_w は壁面上の温度である。添え字の s は固体側、 f は流体側を表す。

4. 計算条件

Fig. 1 に計算領域を示す。座標系を壁面に平行な方向、壁面垂直方向と壁面奥行き方向をそれぞれ x 、 y 、 z とし、各方向の速度成分を u 、 v 、 w とする。領域下部には厚さ $54.6 \mu\text{m}$ ステンレスの固体壁が設置され、上部には流体が存在する。領域中央部の壁の直上にある直径 D_0 の液滴が初速 u_0 で熱流束 q で加熱された初期温度 T_0 の壁面に衝突する。領域長さは $H_x \times H_y \times H_z$ は $2.688D_0 \times 2.1D_0 \times 2.688D_0$ 、格子数を $N_x \times N_y \times N_z$ は $128 \times 100 \times 128$ 。 D_0 を $2.6 \times 10^{-3} \text{ m}$ 、 u_0 は 0.8 m/s とした。境界条件は x 、 z 方向および y 方向の上面を対流流出条件、 y 方向の下面を壁面条件とした。初期の気相ならびに液滴温度を $T_g = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T_l = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ とし、水、空気、およびステンレスの物性値は表 1 に記す。また液滴の表面張力係数は、水は 0.07288 N/m 、とした。熱流束 $q = 130 \text{ W/m}^2$ 、液滴の接触角 θ を 81.7° に設定した。

5. 計算結果

5.1 精度の検証

本計算プログラムの伝熱の計算の妥当性を検証するため、本計算では Fig. 2 のような計算領域を設定し、解析解と比較する。Fig. 3 に反無限固体、等熱流束条件下の解析解の式 (13) を用いて本計算プログラムと比較したものを示す。式中の q_s は壁面からの熱流束、 α は温度拡散率、 t は時間、 $erfc$ は余誤差関数、 x は壁面からの距離である。

本計算では流体として水と空気を使用しているため、両物性値で検証を行った。両グラフにおけるデータは時刻 $t^* (= tu_0/D_0) = 0.1$ のものであり、壁面に垂直な方向に沿って温度分布を測定したものである。横軸は壁面からの距離、縦軸は温度である。両グラフの黒色の実線が解析解を示している。それ以外のは本計算の結果を示しており、それぞれメッシュの細かさが異なっている。概ね調べた格子解像度において解析解とよく一致しており $dy/D_0 = 0.021$ を本計算では用いる。

$$\frac{k(T - T_i)}{q_s \sqrt{\alpha t}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{x}{\sqrt{\alpha t}} erfc\left(-\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (13)$$

Fig. 4 に固体側の温度計算の妥当性を検証するため、固体側の格子点数を 1 点から 10 点まで変化させて得られた固体表面の温度分布の結果を示す。Fig. 4 は液滴が衝突してから無次元時間 $t^* = 1.0$ 後の固体表面の温度をグラフ化したものである。横軸は液滴中心からの距離、縦軸は温度である。図からわかるとおり、どの格子点数においても分布は変わらないため本計算では格子点数を 1 とした。

5.2 CHT の検証

Fig. 5 に液滴が衝突する際の挙動を示す。各図中には $\phi = 0$ で定義される液滴表面が表示されている。 $t^* = 0.5$ において、実験結果でも確認されている壁面付近での段差が再現されている。^[3]

Fig. 6 に各時刻における $x - y$ 断面での瞬時の温度分布を示す。左図が CHT を考慮しない場合、右図が考慮する場合の結果である。どの時刻においても両者に違いは見られない。

固体表面部分の温度分布を Fig. 7 に示す。先ほどとは違い、固体表面といった局所的な部分においては CHT を考慮した場合としない場合では温度分布に大きな違いがみられる。

固体表面部分の熱流束分布を Fig. 8 に示す。CHT を考慮しない場合 (case 1) の熱流束分布は境界条件が等熱流束条件のため一様な分布になっている。一方で CHT を考慮する場合 (case 2) は熱流束が固体側と流体側の温度差によって生じるため、図のような非一様な分布が生じ、特に液滴衝突中心部では高い熱流束が見られる。そのた

め両者を比較すると液滴衝突部では case 2 の方がより高い温度分布を示している。

6. 結論

単独液滴を衝突させた場合の液滴挙動および衝突面の伝熱特性について DIM によるシミュレーションを行った。そこで得られた液滴界面および温度分布について考察を行った結果を以下に示す。

- 実験で確認されている液滴の段差が本計算でも正確に再現されていることが確認された。
- CHT を考慮した場合、固体壁面から流体側への熱流束の分布において非一様性が生じ、それによって固体表面の温度分布においても CHT を考慮しない場合と比べて大きな違いが生じ、CHT を考慮する必要性が確認された。

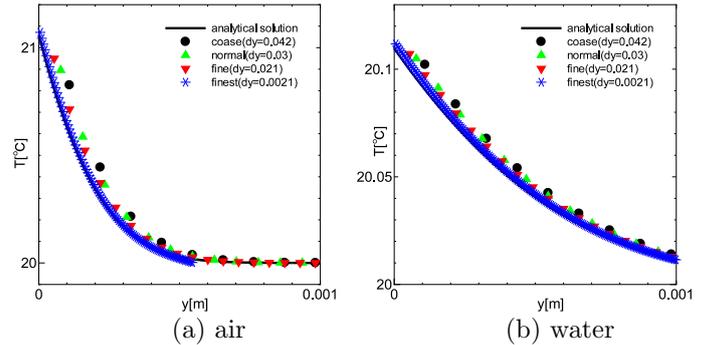


Fig. 3: Comparison of thermal distributions between the present and analytical results at $t^*=0.1$

参考文献

- (1) J.W.Cahn, J.E.Hilliard, Free energy of a nonuniform system I, *J.Chem. Phys.*, vol.28, (1958), pp.258-267
- (2) V. E. Badalassi, H. D. Ceniceros, S. Banerjee, Computation of multiphase systems with phase field models, *J. Comp. Physics* Vol. 190, 371-397, 2003.
- (3) V.G.Ferreira, C.M.Oishi, F.A.Kurokawa, M.K.Kaibara, J.A.Cuminato, A.Castelo, N.Mangiavacchi, M.F.Tome, and S.Mckee, A combination of implicit and adaptive upwind tools for the numerical solution of incompressible free surface flows, *Commun.Numer.Meth.Eng.*, 23(2007), 419-445.
- (4) E. Teodori, P. Pontes, A.S. Moita., A.L.N. Moreira, "Thermographic analysis of interfacial heat transfer mechanisms on droplet/ wall interactions with high temporal and spatial resolution" *Experimental Thermal and Fluid Science* 96 (2018), pp. 284-294
- (5) Stefan Herbert, Sebastian Fischer, Tatiana Gambaryan-Roisman, Peter Stephan, "Local heat transfer and phase change phenomena during single drop impingement on a hot surface" *International Journal of Heat and Mass Transfer* 61 (2013), pp. 605-614
- (6) Edin Berberović, Ilia V. Roisman, Suad Jakirlić, Cameron Tropea, "Inertia dominated flow and heat transfer in liquid drop spreading on a hot substrate" *International Journal of Heat and Fluid Flow* 32 (2011), pp. 785-795

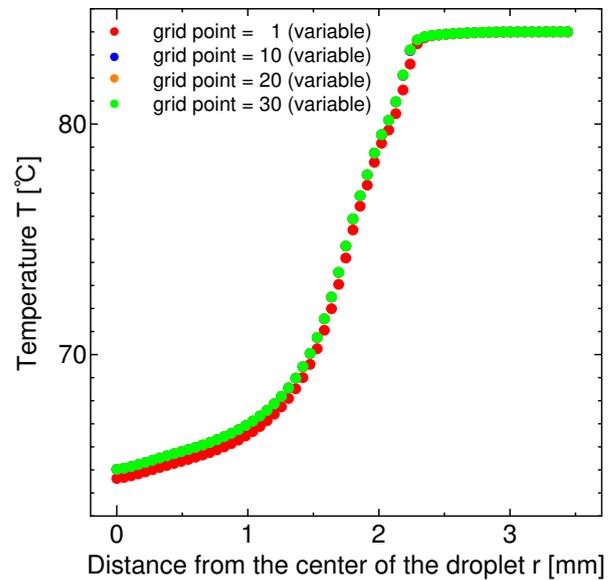


Fig. 4: Validity of heat calculation on the solid side

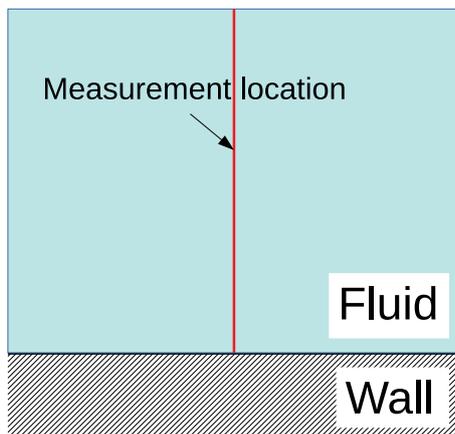


Fig. 2: Measurement location of temperature

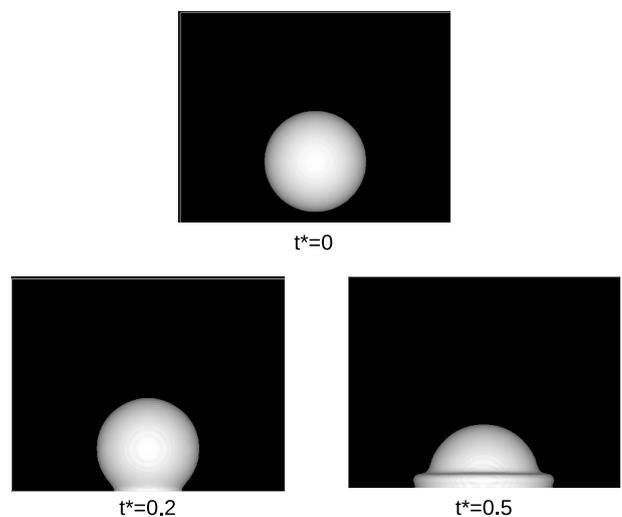


Fig. 5: Droplet morphology evolutions

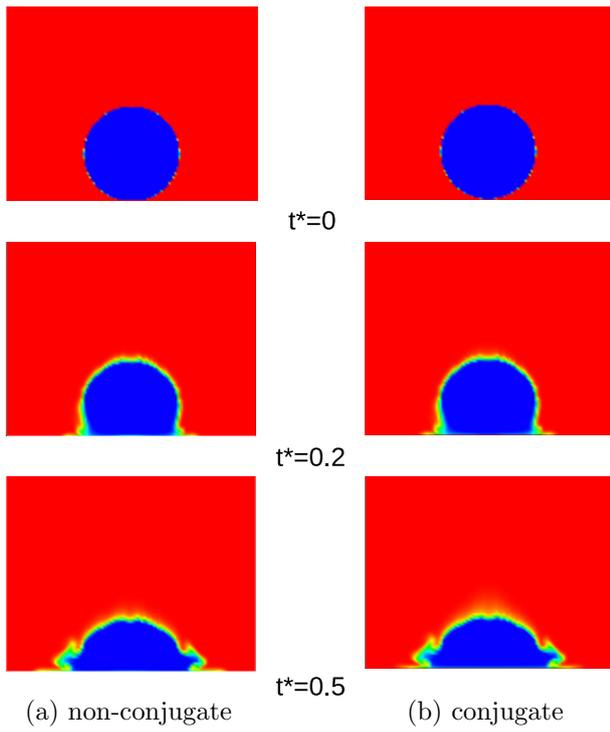


Fig. 6: Temperature distribution in the heating wall at $t^*=0.5$

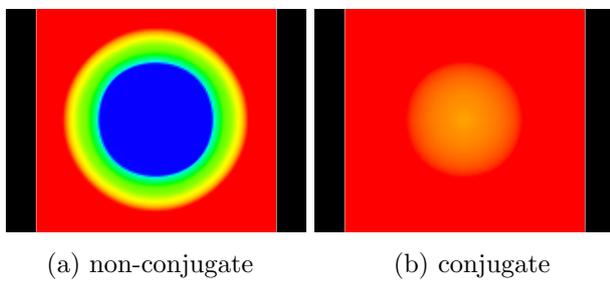


Fig. 7: Temperature distribution in the heating wall at $t^*=0.5$

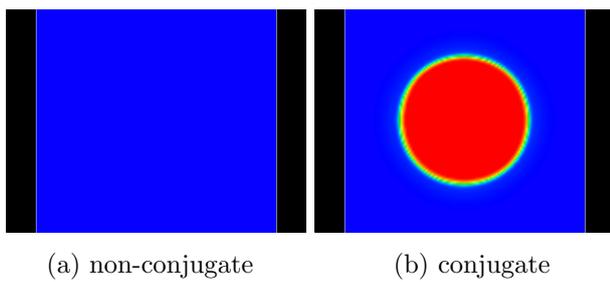


Fig. 8: Heat flux distribution in the heating wall at $t^*=0.5$