

高温物体のスプレー冷却に関する研究 (第1報：非加熱面に衝突する単一液滴挙動 の数値シミュレーション)

津田 和則*・茂地 徹**・桃木 悟*・大田 慎一郎*

Study on spray cooling of hot solid objects (Part I : Numerical simulation on hydrodynamic behaviors of a single droplet impacting on an unheated surface)

by

Kazunori TSUDA*, Toru SHIGECHI**, Satoru MOMOKI* and Shinichiro OTA*

Spray cooling of a hot solid surface is a very effective method to cool hot objects in many industrial areas. In this report, as a first step, is presented the numerical simulation by a volume of fluid (VOF) method on hydrodynamic behavior of a single liquid droplet impacting on an unheated surface. The numerical results were compared with the photographs obtained by a high-speed video camera. The comparison of both was in qualitatively good agreement.

Key words : spray cooling, hydrodynamic behavior, numerical simulation

1. まえがき

高温物体の表面に液体を噴射して物体を急速に冷却する方法（以下、液体噴射冷却）は、鉄鋼業を始めとして広い分野で利用されているが、高温物体表面上で液体の相変化、つまり沸騰（膜沸騰、遷移沸騰、核沸騰）が生じるために流体力学のおよび熱的に複雑な現象を呈する。液体噴射冷却に関しては、実機的设计に関連してこれまでに数多くの研究が行われているが、それらはほとんど実験あるいは実機を用いた経験的なものであり、理論的な解明は十分ではなく、伝熱特性を精度良く予測することは現状では困難である。

液体噴射冷却は、加圧ノズルから噴射される分散液滴群（スプレーあるいはミスト）を高温面に衝突させる噴霧冷却とラミナー（層流）ジェットやタービュレント（乱流）ジェットを高温面上に衝突させて連続液膜流を形成する噴流冷却に大別される⁽¹⁾。両者の伝熱は、衝突する液滴あるいは液滴群と加熱面間で生じ

る膜沸騰、遷移沸騰あるいは核沸騰に支配される。しかし、後者では遷移沸騰領域が高温域まで及ぶ場合があり、このため両者の伝熱特性はかなり異なっている。本研究は、多くの分野で幅広く利用されている前者のスプレー冷却を対象として、衝突する液滴群と加熱面間の伝熱過程を理論的に解明することを目的としている。

本報告では、衝突液滴群が加熱面を直接冷却するスプレー冷却を流体力学のおよび伝熱学的に解析するための基礎研究として、加熱されていない固体の表面に単一液滴が衝突する場合の液滴挙動を数値解析により再現することを試みた結果および数値シミュレーション結果を高速度ビデオカメラで撮影された画像と比較した結果について報告する。

2. 数値計算

2.1 数値計算モデル

平成17年6月24日受理

*大学院生産科学研究科 (Graduate school of Science and Technology)

**機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

自由空間において高さ h から、液滴を自由落下させ水平面に衝突させる解析を実施するため、解析領域は半径 r 、高さ H の円筒空間とする。計算空間は、周期対称性を考慮し周方向に1度 (1 メッシュ) の範囲のモデルとする。液滴の初期直径は2.4mmとし、衝突速度は実際の落下距離から計算して与える。境界条件を図1に示す。

(1) 解析モデル

$$r = 10 \text{ mm}, H = 7.2 \text{ mm}$$

$$h = 1 \text{ mm}, \text{メッシュサイズ} : \Delta r = \Delta z = 0.1 \text{ mm}$$

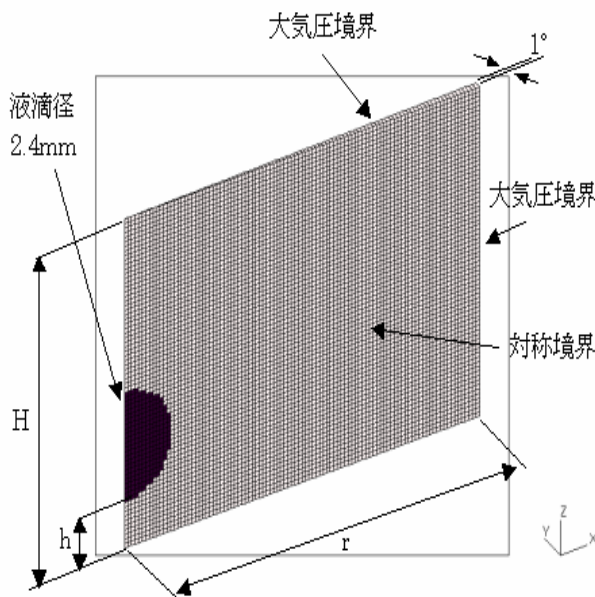


図1 解析モデル

(2) 液滴の物性 (H₂O at 20°C)

$$\text{密度} : 982 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{粘性係数} : 1002 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$\text{表面張力} : 0.0727 \text{ N/m}$$

2. 2 数値計算の手法

基礎方程式は、以下のように定式化される⁽²⁾。

(a) 連続の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j) = s_m$$

(b) 運動量の輸送方程式 (Navier Stokes 式)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i$$

ここで、

t : 時間

x_i : 直交座標 ($i = 1, 2, 3$)

u_i : 流体の x_i 方向絶対速度成分

\tilde{u}_j : 速度 u_{c_j} で移動する局所 (移動) 座標系に対す

る流体の相対速度 $= u_j - u_{c_j}$

p : ピエゾ圧力 $= p_s - \rho_0 g_k x_k$

ここで p_s は静圧、 ρ_0 は参照密度、 g_k は重力

加速度成分、 x_k は ρ_0 が定義される基準座標

ρ : 密度

s_m : 質量ソース

s_i : 運動量ソース成分

τ_{ij} : 応力テンソル成分

$$\text{層流} : \tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

$$\text{乱流} : \tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u'_i u'_j}$$

ここで、 s_{ij} : 速度勾配テンソル

$$\left[= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

δ_{ij} : クロネッカーのデルタ関数

$$(i = j \text{ の場合 } \delta_{ij} = 1, i \neq j \text{ の場合 } \delta_{ij} = 0)$$

μ : 分子粘性係数

(c) 離散化 : 有限体積法

(d) 解析アルゴリズム : PISO 法

(e) 対流項差分スキーム：風上差分

(f) マトリクス解法：CG法

(g) 自由表面流の解法

液滴の自由表面を取り扱うために、流体体積 (VOF) 法を使用して解析する。この方法では、液体およびガスの界面は連続する時間ステップで捕捉され、 α_l というパッシブスカラーの分布によって表される。 α_l は、計算セル内の流体総体積に対する液体体積の比率として定義される。非圧縮性流体で両流体の密度は一定であると仮定する。 α_l は、次の輸送方程式から決定される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_l + \nabla \cdot (\alpha_l \mathbf{u}) = 0$$

流れの界面の精度を保持するために、上式はより高次の圧縮性解法である Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes (CICSAM)⁽³⁾ を使って解かれる。この方法は界面の精度を保持するため、流れのクーラン数が特定の制限値 (デフォルト値 0.3) を超過しないことが必要である。

混合物の物性値は相の特性の関数として α_l を用いて、次のように表される。

$$\text{密度: } \rho = \rho_g (1 - \alpha_l) + \rho_l \alpha_l$$

$$\text{熱伝導率: } k = k_g (1 - \alpha_l) + k_l \alpha_l$$

$$\text{層流粘性: } \mu = \mu_g (1 - \alpha_l) + \mu_l \alpha_l$$

$$\text{平均比熱: } C_p = [\rho_g c_{p_g} (1 - \alpha_l) + \rho_l c_{p_l} \alpha_l] \rho^{-1}$$

表面張力は、Brackbill⁽⁴⁾らが提案した CSF (連続表面力) モデルを使用している。表面張力は、圧力の非連続性 Δp を 2 つの流体の界面で引き起こす。圧力は次式で表される。

$$\Delta p = \sigma \kappa$$

σ : 表面張力

$$\kappa : \text{平均表面曲率、} \kappa = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \alpha_l}{|\nabla \alpha_l|} \right)$$

表面張力の効果は、表面張力により誘起された圧力差を表す項を運動量方程式に追加することにより反映される。 α_l の勾配方向は、2 つの流体間の界面の法

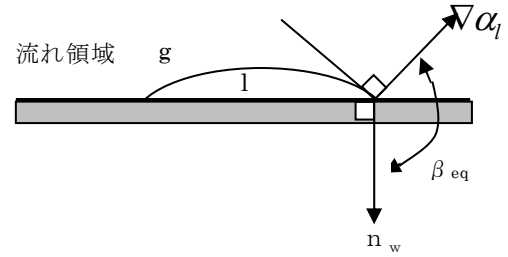


図2 α_l の勾配の定義

線である。固体壁面では、これを調整して界面の法線が角度 β_{eq} に壁面法線を伴って形成するようにする。この壁面法線を図2のように接触角で指定する。 n_w が外向きの単位ベクトルの場合、界面の法線は2つの成分、すなわち、壁に対する垂直及び接線成分に分解される。

$$(\nabla \alpha_l)_n = (\nabla \alpha_l \cdot n_w) n_w$$

$$(\nabla \alpha_l)_l = \nabla \alpha_l - (\nabla \alpha_l)_n$$

壁面の体積分率勾配に関する方向ベクトル \mathbf{d} は、境界条件を適用することによって計算する。界面の法線は β_{eq} の角度を壁面法線に伴って形成する。

$$\mathbf{d} = \frac{|\nabla \alpha_l|_l}{\tan \beta_{eq}} n_w + (\nabla \alpha_l)_l$$

この式は界面方向であるので次のようになる。

$$\left(\frac{\nabla \alpha_l}{|\nabla \alpha_l|} \right)_w = \frac{\mathbf{d}}{|\mathbf{d}|}$$

界面法線の方法はガス側に向き、壁面法線は流れ領域からの向きである。

2.3 数値シミュレーション結果

(1) 計算条件：解析は 3 次元非定常で実施した。非構造格子を採用し、時間刻み $\Delta t = 0.00001$ 秒で実施した。壁面境界条件は滑らかな壁面で水平方向を滑り無し条件とした。液滴径 2.4mm, 落下高さ 2cm, 5cm, 11cm を選定し、解析を実施した。初期落下高さから衝突速度 v と We 数は次のように計算される。

$$h = 0.5 v^2 / g \quad (v: \text{衝突速度、} g: \text{重力加速度}(9.8\text{m/s}^2))$$

$$v = \sqrt{2gh}$$

$$We = \frac{\rho d v^2}{\sigma}$$

ここに、 d :液滴直径、 ρ :密度、 σ :表面張力。

(2)計算例：下記 3 ケースで実施した。

CASE1 : $v = -0.626$ m/s , $We = 12.9$

CASE2 : $v = -0.990$ m/s , $We = 32.3$

CASE3 : $v = -1.468$ m/s , $We = 71.0$

なお、接触角は 90 度と仮定した。

(3)計算結果：落下後の液面拡大の様子を各ケース毎に図 3 に示す。図中の t は衝突後の時間(秒)を示す。

2. 4 高速ビデオカメラ画像との比較

高速ビデオカメラはフォトン社の FASTCAM-ultima-3(320Mbyte)を使用して撮影した。撮影方向は水平(0度)と33度上方からの2方向である。図 4 に衝突後液滴が最大に広がった時点の形状の比較を示す。(t は衝突後の時間(秒)を表示。)

3. 考察

市販の汎用熱流動解析プログラム(STAR-CD)に組み込まれた機能である VOF 法を用いて解析する有用性を確認するため、液滴の落下衝突解析を実施した。

解析ケースは落下高さを変えて We 数の違いによる壁面におけるぬれ広さの確認を行った。

計算結果から、衝突後の液滴の挙動は、概ね類似の傾向を示していることがわかる。液滴は、最大広さのところでは、外輪山的な形をしており外側にドーナツ状の液体が集まり内側が凹んだ形を形成している。 We 数が大きくなるにつれてその形状が顕著になる。

定量的にみると CASE1 では最大の広がり径も時間も概ね計算と実験(高速ビデオ画像)の値は一致しているが、CASE2 および CASE3 と We 数が大きくなるにつれて時間、広がり径共に一致しなくなっている。ただし、実測の場合はビデオから目測で図っているため多少の誤差はある。当然のことながら、 We が大きいと広がり径が大きく、時間も速いが戻る時間が長くなっていることがわかる。

4. むすび

液体噴射による高温物体の冷却に関する研究の第 1 報として、非加熱面に衝突する単一液滴挙動の数値シミュレーションを実施し、高速ビデオカメラ画像との

比較をした。両者は定性的にはよく一致していることがわかり、VOF 法による液滴シミュレーションの有用性を確認できた。

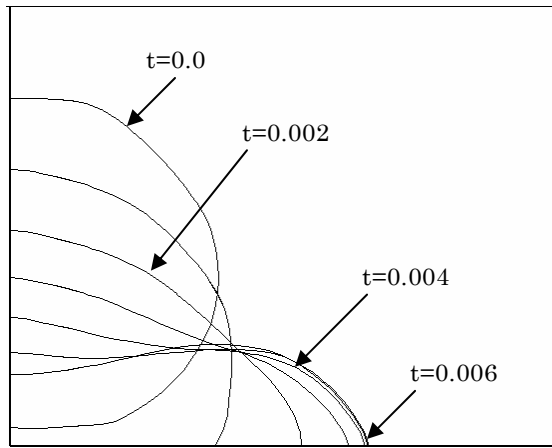
今後、高速ビデオ画像について定量的な比較を行い、さらに加熱面に衝突する液滴挙動の実験と数値シミュレーションを実施し、伝熱特性の把握を行っていく予定である。

謝辞

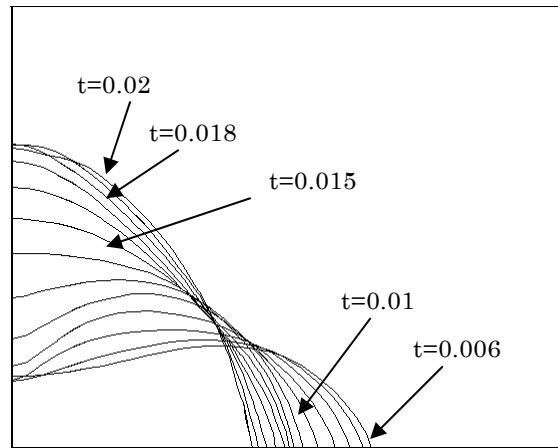
本研究の推進と本論文の作成において、第 1 著者の津田和則(社会人学生として博士後期課程在籍)が所属している(株)リョーセンエンジニアズの多大な支援を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本機械学会編：沸騰熱伝達と冷却，第3章，(1989)，212.
- 2) (株)シーディー・アダプコ・ジャパン：STAR-CD V.3.2 理論マニュアル，(2005).
- 3) Ubbik, O: Numerical Prediction of Two Fluid system with Sharp Interfaces, Ph.D. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, (1996).
- 4) Brackbill, Y.U., Kothe, D.B., Zemach, C.: A Continuum Method for Modeling Surface Tension, *J. Comput. Phys.*, (100), 335-354.

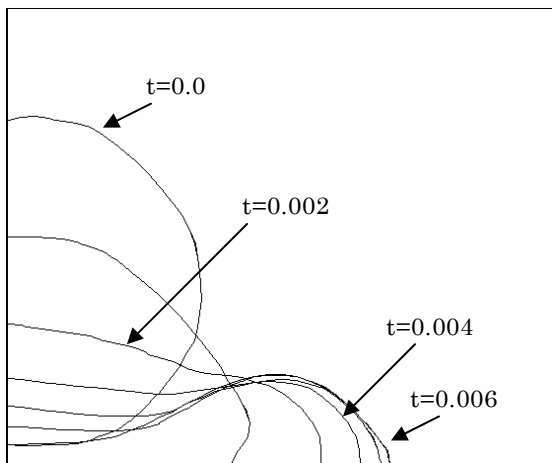


壁面衝突→液面拡大

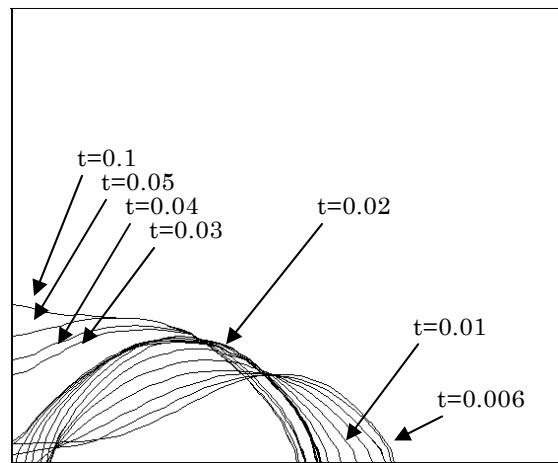


液面縮小←液面最大

CASE1

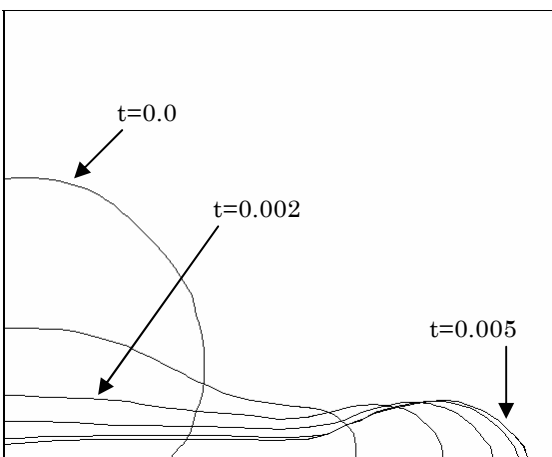


壁面衝突→液面拡大

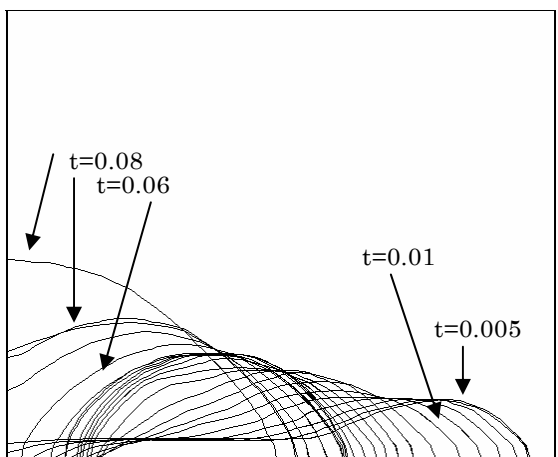


液面縮小←液面最大

CASE2



壁面衝突→液面拡大



液面縮小←液面最大

CASE3

図3 数値シミュレーション結果

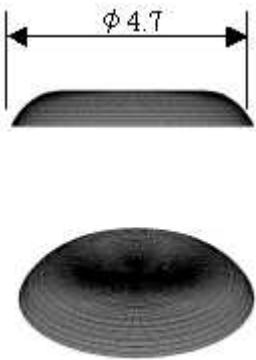
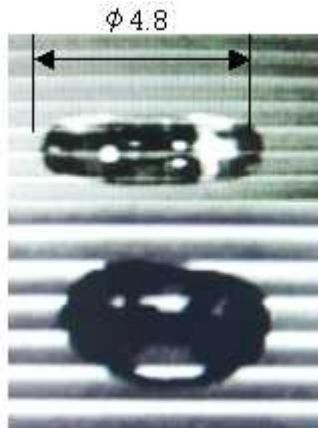
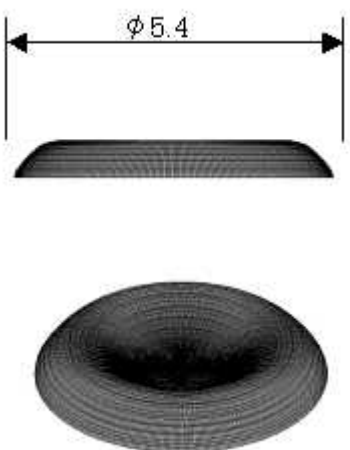
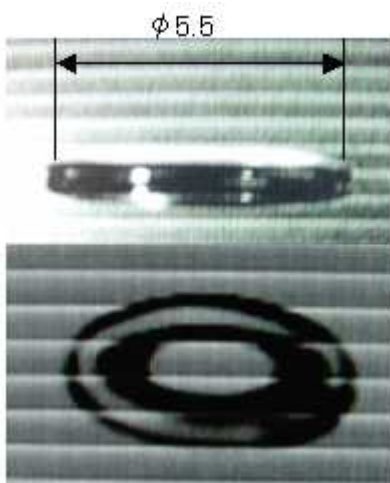
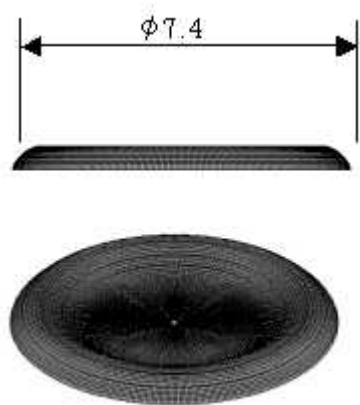
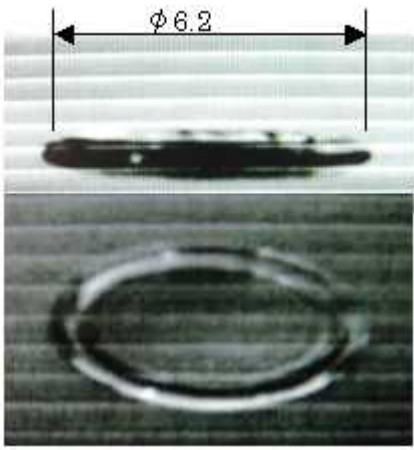
計算結果	高速ビデオカメラ画像
 <p>Figure 4.1: Calculation results for a diameter of $\phi 4.7$. The top image shows a cross-section of a thin, curved object with a diameter dimension line labeled $\phi 4.7$. The bottom image shows a 3D perspective view of the object, which is a shallow, circular dish-like shape.</p>	 <p>Figure 4.2: High-speed video camera image for a diameter of $\phi 4.8$. The top image shows a cross-section of the object with a diameter dimension line labeled $\phi 4.8$. The bottom image shows a high-speed video frame of the object, which is a shallow, circular dish-like shape, appearing slightly blurred due to motion.</p>
 <p>Figure 4.3: Calculation results for a diameter of $\phi 5.4$. The top image shows a cross-section of a thin, curved object with a diameter dimension line labeled $\phi 5.4$. The bottom image shows a 3D perspective view of the object, which is a shallow, circular dish-like shape.</p>	 <p>Figure 4.4: High-speed video camera image for a diameter of $\phi 5.5$. The top image shows a cross-section of the object with a diameter dimension line labeled $\phi 5.5$. The bottom image shows a high-speed video frame of the object, which is a shallow, circular dish-like shape, appearing slightly blurred due to motion.</p>
 <p>Figure 4.5: Calculation results for a diameter of $\phi 7.4$. The top image shows a cross-section of a thin, curved object with a diameter dimension line labeled $\phi 7.4$. The bottom image shows a 3D perspective view of the object, which is a shallow, circular dish-like shape.</p>	 <p>Figure 4.6: High-speed video camera image for a diameter of $\phi 6.2$. The top image shows a cross-section of the object with a diameter dimension line labeled $\phi 6.2$. The bottom image shows a high-speed video frame of the object, which is a shallow, circular dish-like shape, appearing slightly blurred due to motion.</p>

図4 高速ビデオカメラ画像との比較