

# PLIC-VOF法を用いた沸騰の数値シミュレーション

Numerical simulation of boiling using a PLIC-VOF method

長崎孝夫<sup>1)</sup>, 青木尊之<sup>2)</sup>, 杉原健太<sup>3)</sup>, 内田遙己<sup>4)</sup>

Takao Nagasaki, Takayuki Aoki, Kenta Sugihara and Haruki Uchida

- 1) 工博 東京工業大学 学術国際情報センター 研究員 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1,  
E-mail: tnagasaki@sim.gsic.titech.ac.jp)  
2) 博(理) 東京工業大学 学術国際情報センター 教授 (E-mail: taoki@gsic.titech.ac.jp)  
3) 博(工) 日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター (〒277-0871 千葉県柏市若柴178-4  
柏の葉キャンパス148街区4, E-mail: sugihara.kenta@jaea.go.jp)  
4) 東京工業大学 工学院機械系 大学院生 (E-mail: uchida@sim.gsic.titech.ac.jp)

Numerical simulations of nucleate pool boiling were carried out using a PLIC-VOF method. A micro-layer model was taken into account for the evaporation in the bubble growing on the heated wall. It was shown that, with the increase of wall superheat, larger bubbles are formed by the coalescence of primary bubbles, and finally the heated wall is covered by a cloud-like large vapor mass. Such a boiling behavior agrees well with an available experimental observation.

**Key Words :** Boiling, Numerical simulation, PLIC-VOF

## 1. はじめに

沸騰は気液相変化の代表的な現象の一つであり、火力・原子力発電における蒸気生成など実用上の重要性から、これまで多くの研究が行われてきた。図1は大気圧下の水のプール飽和沸騰における壁面熱流束 $q_w$ と壁面過熱度 $\Delta T_{sat}$ の関係を示したものであり、沸騰形態の観察結果[1]も記載されている。沸騰開始直後は孤立気泡状態であるが、熱流束の増加とともに気泡の合体が進行し、ついには加熱面が茸状の大きな蒸気塊で覆われるようになる。この蒸気塊の底部の壁面上にはマクロ液膜と呼ばれる薄い液が部分的に存在し、壁面過熱度のさらなる増加に伴い、このマクロ液膜が次第に消失し（図中の第2遷移領域），あるところでバーンアウト、すなわち限界熱流束点に至ると考えられている。このような沸騰過程の数値シミュレーションにつき、単一気泡の核沸騰については精緻な解析が多く行われているが、多数発泡点の実際的な沸騰のシミュレーションは限られている[2]。そこで本研究では上述のような高熱流束における沸騰挙動の再現を目指し、多数発泡点の沸騰の数値シミュレーションを行う。

## 2. 計算手法

界面追跡法として、高熱流束における壁面近くの気液の微細構造を捉えるため、sharp interface手法である PLIC VOF法を用いる。気液界面における熱的条件の適用においても格子点間の界面位置を厳密に考慮する[3]。圧力場の計算には、弱圧縮性流体モデルを用いる。壁面上で成長する蒸気泡の底部ではミクロ液膜による蒸発を考慮する

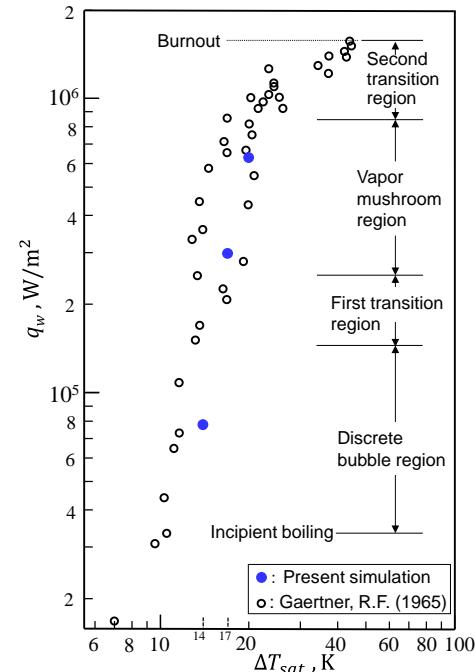


図-1 壁面熱流束と壁面過熱度の関係

[2]. あるいは接触線近傍の急速蒸発を考慮する[4]。計算領域サイズは 20mm×20mm×20mm であり、底面中央部の10mm×10mm、または5mm×5mm の領域を等温加熱面とした。底面と側面はノースリップ壁であり、上面は流出境界である。初期の液深は12mm ( $\Delta T_{sat}=14\text{K}, 17\text{K}$ ) または 6mm ( $\Delta T_{sat}=20\text{K}$ ) とした。発泡点密度を実験式[1]により与え、発泡点を加熱領域内に乱数により配置した。格子点数は主に128×128×128 であるが、一部 256×256×



(a) 接触線蒸発モデル



(b) ミクロ液膜蒸発モデル

図-2 サブグリッドスケール蒸発モデルによる計算結果の相違（壁面過熱度 17K）

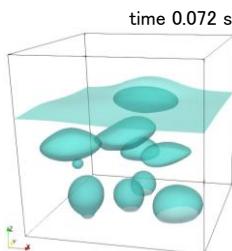
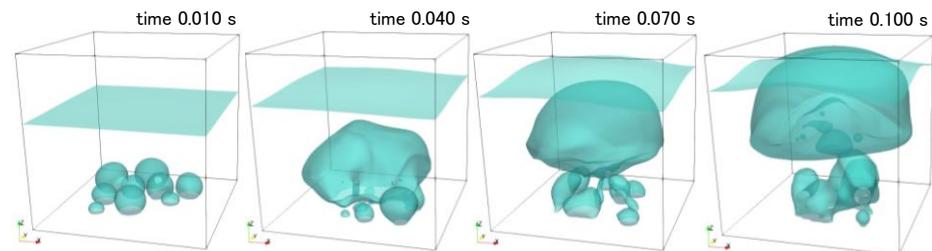
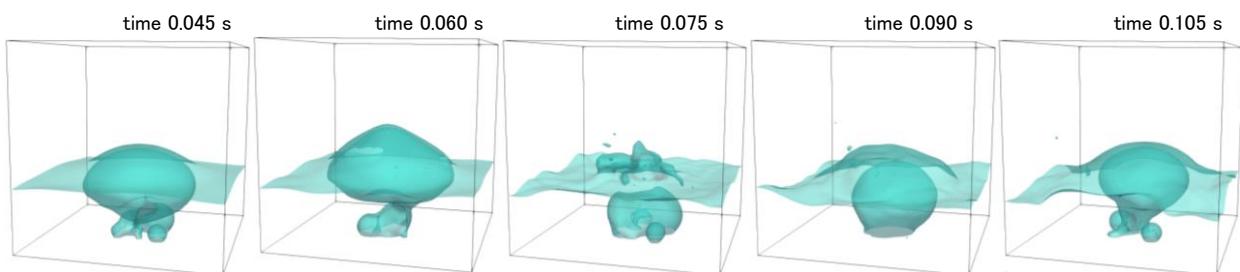
256の計算も行った。

### 3. 計算結果

加熱壁面上で蒸気泡が成長する際、気泡が壁と接触する固気液三相界線（以下、接触線と呼ぶ）の近傍では気液界面と加熱壁面の間の距離が0に近づくため、蒸発速度が非常に大きくなる。このような接触線近傍の急速蒸発を計算格子で扱うのは困難なため、サブグリッドスケール（SGS）蒸発現象としてモデル化して考慮する。ここでは不完全濡れの場合に適用できるHuberら[4]のモデルを用いる。SGS蒸発現象として扱われるもう一つの過程としてミクロ液膜蒸発がある。これは加熱壁面上で気泡が急速成長する際、気泡底部には粘性のために取り残された液の薄い層が存在するというもので、これをミクロ液膜と呼ぶ。このミクロ液膜蒸発はSatoら[2]のモデルを用いて考慮する。これらの2つのモデルを用いた計算結果を図2に示す。図2(a)の接触線蒸発モデルに比べ図2(b)のミ

クロ液膜蒸発モデルを用いた場合の方が大きな気泡が生成され、蒸発が盛んなことが分かる。計算された壁面熱流束は図2(a)の場合は $131 \text{ kW/m}^2$ 、図2(b)の場合は $295 \text{ kW/m}^2$ であり、図1の実験値との比較から、ミクロ液膜モデルの方が妥当と考えられる。そこで以下ではミクロ液膜モデルを用いた場合の計算結果を示す。

壁面過熱度を変化させたときの沸騰の様子を図3から図5に示す。過熱度が小さい $\Delta T_{sat}=14\text{K}$ の場合には図3のように孤立気泡状態であるが、 $\Delta T_{sat}=17\text{K}$ の場合には図4のように1次気泡が合体して大気泡が形成される。さらに $\Delta T_{sat}=20\text{K}$ の場合には図5のように、加熱部壁面が大きな蒸気塊で覆われている期間が長くなる。このような沸騰形態の変化は図1中に記載された観察結果とよく対応している。これらの計算により求めた壁面熱流束が図1中に青丸印で示されている。白丸印で示す実験値[1]のばらつきは大きいが、本計算結果は概ね実験値と一致している。

図-3 壁面過熱度 14K  
(加熱領域サイズ  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ )図-4 壁面過熱度 17K  
(加熱領域サイズ  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ )図-5 壁面過熱度 20K (加熱領域サイズ  $5 \times 5 \text{ mm}^2$ )

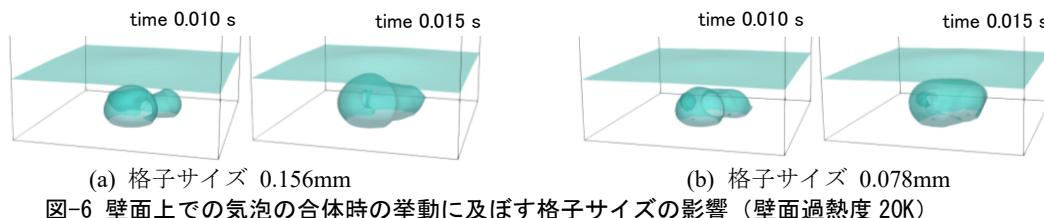


図-6 壁面上での気泡の合体時の挙動に及ぼす格子サイズの影響（壁面過熱度 20K）

ただし実験研究で報告されているような蒸気塊底部のマクロ液膜は見られない。そこで格子点数を $128 \times 128 \times 128$ から $256 \times 256 \times 256$ に増やし、格子サイズ 0.156mm から 0.078mm に減らした計算も行った。壁面上での気泡の合体時の挙動に及ぼす格子サイズの影響を図6に示す。格子サイズが小さい図6(b)の場合には、わずかではあるが合体後の気泡の底部に小さな島状の液体部分が見られる。マクロ液膜はこのように壁面上での気泡の合体時に形成されるとと言われており、今後さらに格子解像度を向上させることにより、高熱流束の沸騰における壁面近くの微細構造が再現できると考えられる。

#### 4. おわりに

PLIC VOF法を用いた沸騰の数値シミュレーションを行い、壁面過熱度の増加に伴う沸騰形態および壁面熱流束の変化について実験結果と対応する結果が得られた。また格子解像度の増加によりマクロ液膜形成の兆しが見られた。

**謝辞:** 本研究は、科学研究費補助金・基盤研究(S)課題番号 19H05613「自由界面を含む混相流の革新的数値流体シミュレーション」ならびに令和6年度「富岳」を中核とす

る HPCI システム利用研究課題 hp240161 「高熱流束における微細構造を解像する核沸騰シミュレーション」から支援をいただき、計算には名古屋大学・情報基盤センターの「不老」Type-II サブシステムを利用して頂いた。記して謝意を表す。

#### 参考文献

- [1] Gaertner, R. F.: Photographic study of nucleate pool boiling on a horizontal surface, *J. of Heat Transfer, Trans. ASME*, Vol.87, pp.17-27, 1965.
- [2] Sato, Y., Niceno, B.: Pool boiling simulation using an interface tracking method: From nucleate boiling to film boiling regime through critical heat flux, *Int. J. of Heat and Mass Transfer.*, Vol.125, pp.876-890, 2018.
- [3] Zhao, S. et al.: Boiling and evaporation model for liquid-gas flows: A sharp and conservative method based on the geometrical VOF approach, *J. of Computational Physics*, Vol.452, 110908, 2022.
- [4] Huber, G. et al.: Direct numerical simulation of nucleate pool boiling at large microscopic contact angle and moderate Jakob number, *Int. J. of Heat and Mass Transfer.*, Vol.113, pp.662-682, 2017.