沸騰熱伝達評価に向けた数値解析モデル開発*

Development of Numerical Analysis Model for Evaluating of Boiling Heat Transfer

福 多 将 人**
FUKUTA Masato山 本 泰**
YAMAMOTO Yasushi

Abstract In this study, a numerical analysis method applicable to estimation of the boiling heat transfer has been developed. Currently, the experimental correlations or the empirical laws have been applied to evaluate the boiling heat transfer. Therefore, it is difficult to predict the effects of the change of the heated surface geometry, thermal-hydraulic conditions, the surface activation or modification, because out of the application range of these correlations. The purpose of this work is to construct the boiling two-phase analysis method for thermo-fluid phenomena, and to realize “Design-by-Analysis” independent on the experiments and empirical laws. For this purpose, it is important to predict steam-water interface structure characteristics of the two-phase flow directly. Until now, for evaluating the boiling phenomena, Diffusive Interface Model for the bubble interface tracking was applied. In this model, the steam-water interface is diffuse with a finite width, and values of the thermodynamic properties change between water and steam smoothly within the interface region. For evaluating the wettability of heated surface, the surface energy is estimated by using the phase-field model. The wetting phenomena during boiling are able to be analyzed directly with this model. We present the numerical results of nucleate pool boiling phenomenon by using the developed analysis method. We succeeded in simulating the boiling process, vapor bubbles nucleation, growth, and departure behavior on a heated surface. By present analysis method, it was confirmed that the boiling heat transfer coefficient could be evaluated quantitatively without the experimental correlations.

Keywords: CFD, Boiling heat transfer, Diffusive interface model, Wettability

1. 緒 言

沸騰現象による高い除熱性能を応用した冷却システムやBWR（Boiling Water Reactor、沸騰水型原子炉）燃料、蒸気発生器等の沸騰を伴う流体機器の設計・開発においては、機器内部で現れる沸騰現象の評価が重要である。現状の解析技術では、沸騰を伴った流れの、激しい変動を伴う熱流動現象を再現することが困難であるため、機器・システムの性能評価においては、試験や経験則が適用される。そのため、機器・システムを最適化

するためには、試行錯誤的な要素が多くなるという課題がある。ここでの試験を代替し、経験則への依存度を低減するため、沸騰解析モデルを開発して解析ベースの合理的な設計手法（DBA：Design by analysis）構築を最終目標として研究を進めている。

DBA 実現のためには、沸騰時に発生する気泡の界面挙動を扱う解析モデルの開発が重要となる（Fig. 1）。これを実現する手法として、拡散界面モデルを適用した沸騰解析手法が Seta et al. [1]、

* 2014.5.17 受付

** 株式会社東芝 電力システム社 〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町 8
TEL: (045)770-2353 FAX: (045)770-2211 E-mail: masato.fukuta@toshiba.co.jp

高田ら [2] により提案されている。この手法を臨界点近傍におけるプール沸騰現象に適用すると、沸騰気泡の成長挙動が再現され、相変化を伴う界面挙動評価に対する本解析モデルの有効性が報告されている。

著者らは、上述の拡散界面モデルをベースとして、实在冷却水の沸騰現象を評価するための解析モデル開発を進めている [3-5]。以下では、冷却性能に係る重要な指標である沸騰熱伝達率の定量評価を目的として開発した沸騰解析モデル、及び開発モデルをプール沸騰現象に適用して解析評価を実施した結果について述べる。

Fig. 1 Schematic image of “Design by analysis” with boiling simulation.

2. 沸騰解析モデルの開発

2.1 基礎式

沸騰熱伝達評価への適用を目的として開発した解析モデルの基礎式を示す。沸騰伝熱を詳細に評価するためには、伝熱面上における沸騰気泡挙動の扱いが重要となる。本研究では、このときの相変化を伴いながら変形する沸騰気泡界面を解析するために、前章でも述べた拡散界面モデルを適用する。本モデルにおいて、界面は、空間内で有限な幅を有する領域として扱われる。この界面領域内では、流体は液相と気相の間で連続的に遷移し、相が分離した一流体モデルとして扱われる。本解析モデルでは、以下の質量保存式(1)、運動量保存式(2)、およびエネルギー保存式(3)を用いる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla \cdot \mathbf{P} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (E \mathbf{u}) &= \nabla \cdot [(-\mathbf{P} + \boldsymbol{\tau}) \cdot \mathbf{u}] \\ &+ \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot [-\kappa_s \rho (\nabla \cdot \mathbf{u}) \nabla \rho] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 ρ 、 $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{g}$ 、 k 、 κ_s はそれぞれ、流体の密度、流速ベクトル、重力加速度ベクトル、熱伝導率、勾配エネルギー係数である。式(2)、(3)中の圧力テンソル $\mathbf{P}$ 、式(2)の粘性応力テンソル $\boldsymbol{\tau}$ 、式(3)の全エネルギー E は次式を用いて求められる。

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \left(p_0 - \kappa_s \rho \nabla^2 \rho - \frac{\kappa_s}{2} |\nabla \rho|^2 \right) \mathbf{I} \\ &+ \kappa_s \nabla \rho \otimes \nabla \rho \end{aligned} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \quad (5)$$

$$E = \frac{1}{2} \rho |\mathbf{u}|^2 + e + \frac{\kappa_s}{2} |\nabla \rho|^2 \quad (6)$$

式(4)、(5)中の p_0 、 μ はそれぞれ、均質な系における圧力、粘性係数である。式(6)右辺の各項はそれぞれ、運動エネルギー、内部エネルギー、および界面エネルギーを表す。以上の基礎式に対して、本研究では、有限体積法を適用して離散式を導出し数値解を求めた。

2.2 界面モデル

本手法では、気相と液相の間に存在する界面領域は、空間的に有限な幅を持つ遷移領域として扱われるため、界面内での中間物性を与える手段が必要となる。これに対して、前節の基礎式から得られたエンタルピーと、気相と液相に対する飽和エンタルピーを基にクオリティを算出し、界面内における物性評価に用いる。なお、本研究では、冷却水の物性評価に日本機械学会 (JSME) 蒸気表プログラム IAPWS-IF97[6]を用いている。クオリティ算出式を以下に示す。

$$x = \frac{h - h_l}{h_g - h_l} \quad (7)$$

また、ボイド率 α は、クオリティ x とスリップ比 S (気相と液相の流速比)、各相の密度から次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{x \rho_l}{(1-x) S \rho_g + x \rho_l} \quad (8)$$

ここで、 ρ_l 、 ρ_g はそれぞれ、局所の圧力から IAPWS-IF97 より得られる飽和水、および飽和蒸気密度である。このボイド率の式(8)を用いると、界面領域内で遷移する中間密度 ρ は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned}\rho &= \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l \\ &= \frac{x + (1 - x)S}{x\rho_l + (1 - x)S\rho_g} \rho_g \rho_l\end{aligned}\quad (9)$$

ここで、界面内での気液速度差の影響を小さいとみなしてスリップ比 S を 1 と仮定すると、密度は次式(10)で与えられる。

$$\rho = \frac{\rho_g \rho_l}{x\rho_l + (1 - x)\rho_g}\quad (10)$$

本モデルによる沸騰気泡周りの密度分布、およびエンタルピー分布を Fig. 2 に示す。ただし、ここでは沸騰水型原子炉 (BWR: Boiling Water Reactor) 内を想定した 7MPa での分布をプロットしている。本モデルでは、界面で密度が飽和水と飽和蒸気の間で滑らかに遷移しており、この密度の空間勾配に応じた表面張力が界面領域に発生する。

Fig. 2 Density & enthalpy distribution in surface region for Diffusive Interface Model.

3. プール沸騰熱伝達の解析評価

3.1 解析条件

前章で述べた解析モデルを適用してプール沸騰解析を行い、本モデルによる沸騰熱伝達の解析能力を評価した[3]。解析領域と境界条件を Fig. 3 に示す。ここでは、BWR 炉内条件を想定した圧力 7.0MPa、温度 554K (サブクール度 5.0K) の静止状態にある水 (单相) で満たされた状態を初期条件とした。また、解析領域下部の壁面中央部に一定熱流束 200kW/m^2 の発熱部 (Fig. 3 赤色の領域) を設置し、この上で発生する沸騰気泡の挙動を解析評価する。

Fig. 3 Computational domain and boundary conditions.

3.2 解析結果および考察

本解析結果により得られた瞬時の沸騰気泡界面、密度分布、および温度分布をそれぞれ Fig. 4、5、6 に示す。界面は、飽和水と飽和蒸気の中間密度の等値面によりプロットしている。発熱部の上で水が加熱されることにより蒸気が生成し、気泡が成長して、浮力により離脱する様子が解析により模擬されている。このときの温度分布 (Fig. 6) をみると、離脱気泡内部においては飽和温度 (約 559K) となっているのに対し、発熱部の直上領域では、飽和温度以上に非常に高温となっており、伝熱面は過熱蒸気で覆われる結果となっている。伝熱面温度の時間履歴をプロットした Fig. 7 では、沸騰気泡の成長、離脱に応じて周期的な変動が見られ、沸騰気泡挙動による温度変化を解析により評価できることが確認できる。その値は、飽和温度より数十 K 以上高温となっており、今回の条件での沸騰熱伝達率より予測される過熱度が数 K であることに比べて、解析結果は一桁程度大きな値を示していることが分かった。すなわち、本解析は熱伝達率を過小評価する結果となり、予測精度の向上が課題であると考えられる。

この要因として、伝熱面上が過熱蒸気で覆われてしまい、本モデルでは濡れ性を評価できておらず、核沸騰状態が模擬できないことが考えられる。そこで、次章にて伝熱面の濡れ性を評価するための解析モデル高度化を検討した。

Fig. 4 Boiling bubble interface behavior.

Fig. 5 Density distributions.

Fig. 6 Temperature distributions.

Fig. 7 Temperature profile of heating surface.

4. 濡れ性を考慮した沸騰解析モデル開発

4.1 濡れ性モデル

沸騰伝熱の評価では、固体伝熱面における濡れ性の影響が重要である。濡れ性は固気液3相界面での表面エネルギー（表面張力）のバランスより決定される。気液界面に対しては、これまでに述べた方法により表面エネルギーを評価できる。本章では、固体相に対する表面エネルギーについて、フェーズフィールド法を適用して解析評価を試みる[4,5]。

ここでは、材質の異なる固体と冷却水（気・液）の相を区別するために、フェーズフィールド変数 ϕ を導入した。これには任意の値を設定可能であり、例えば、 $\phi=1$ は固体相、 $\phi=0$ は冷却水の相を表すと設定する。固体相に対しても、気液界面と同様、表面において有限な幅を有するとして、相を表す変数 ϕ が 0~1 の間で滑らかに遷移するとして評価される。界面において密度等の物性値は、 ϕ を用いて式(11)で算出する。

$$\rho' = \phi\rho_s + (1-\phi)\rho \quad (11)$$

ここで、 ρ_s は固体密度である。固体表面における ϕ の勾配情報を基に表面エネルギーを算出し、Fig. 8に図示するように界面に作用する表面張力分布を考慮した解析を実現することで、伝熱面上での冷却水の濡れ性評価を可能とする。図では、一例として、固体表面で大きな表面張力が発生し、濡れ性が促進される様子を示している。

Fig. 8 Schematic image of surface energy around boiling bubble.

4.2 沸騰熱伝達に対する濡れ性の影響評価

開発した濡れ性モデルを、前章と同様、プール沸騰現象評価に適用して、沸騰熱伝達率の予測精度に対する効果を評価する。解析体系は、単相の水で満たされた流体領域 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ の下部に幅 1mm の固体相領域を設定した 2 次元とし、圧力条件は 7.0MPa (飽和温度 559K) である。固体相の下端には一定一様の熱流束条件を課した。解析結果より得られた密度分布、および温度分布を Fig. 9、10 に示す。各図の上段は濡れ性を考慮しない場合、下段は濡れ性を考慮した場合の結果である。

濡れ性モデルを用いない場合では、Fig. 9 より、伝熱面上に低密度領域、即ち、蒸気膜が形成されていることが分かる。このケースでは、潜熱による除熱効果がほとんど得られず、熱伝達率が低下して伝熱面は高温化する結果となった。

これに対し、開発した濡れ性モデルによる結果では、伝熱面上で間欠的に沸騰気泡が形成される様子が見られた。このとき、伝熱面の一部では濡れが維持されて、液膜から供給される潜熱により大きな除熱効果が得られたため、過熱度は数 K 程度に抑制される結果となった。このときの熱伝達率を、実験相関式 (Kutateladze の式[7]) と比較した結果を Fig. 11 に示す。この結果から、伝熱面の濡れ性を考慮することによって、沸騰熱伝達率の予測精度向上を確認できた。

5. 結 言

沸騰現象を伴う流体機器の Design by Analysis 実現を目的として、沸騰気泡の界面挙動と伝熱面の濡れ性を評価可能な沸騰解析モデルを開発した。開発モデルをプール沸騰評価に適用した結果、伝熱面の濡れ性が改善し、沸騰熱伝達率を解析により定量評価可能であることを示した。

今後、解析の実機評価適用を目指して、更なる予測精度の向上、および沸騰解析モデルの高度化を進める。

Fig. 9 Density distribution for pool boiling with and without wettability model.

Fig. 10 Temperature distribution for pool boiling with and without wettability model.

Fig. 11 Comparison of heat transfer coefficient between simulation and experimental correlation.

Nomenclature

e	: internal energy	[J/m ³]
E	: total energy	[J/m ³]
$\mathbf{g}$	: gravity acceleration	[m/s ²]
h	: enthalpy	[J/kg]
h_g	: enthalpy of saturated vapor	[J/kg]
h_l	: enthalpy of saturated water	[J/kg]
k	: thermal conductivity	[W/m·K]
k_l	: thermal conductivity of water	[W/m·K]
p_0	: pressure in homogeneous system	[Pa]
$\mathbf{P}$	: pressure tensor	[Pa]
q	: heat flux	[W/m ²]
S	: slip ratio of gas and liquid velocity	[-]
$\mathbf{u}$	: velocity vector	[m/s]
x	: quality	[-]

Greek letters

α	: void fraction	[-]
----------	-----------------	-----

κ_s	: surface tension parameter	[N·m ⁶ /kg ²]
μ	: viscosity	[Pa·s]
ν_l	: kinetic viscosity of water	[m ² ·s]
ρ	: density	[kg/m ³]
ρ_l	: density of water	[kg/m ³]
ρ_v	: density of vapor	[kg/m ³]
$\boldsymbol{\tau}$	: viscous stress tensor	[Pa]
ϕ	: phase-field parameter	[-]

参考文献

- [1] Seta, T. and Okui, K., The Single Component Thermal Lattice Boltzmann Simulation of Pool Boiling in Two Dimensions, Journal of Thermal Science and Technology, Vol. 1(2), 125-137 (2006).
- [2] Takada, N., Misawa, M. and Tomiyama, A., A Phase-Field Method for Interface-Tracking Simulation of Two-Phase Flows, Proc. of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition, Paper No. FEDSM2005-77367 (2005).
- [3] Fukuta, M. and Yamamoto, Y., Development of Direct Steam-Water Phase Change Analysis Method Applying to BWR Operating Condition, Proc. of the International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics, Paper No. NURETH14-436 (2011).
- [4] Fukuta, M. and Yamamoto, Y., Development of Boiling Heat Transfer Analysis Method, Proc. of the ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting, Paper No. FEDSM2014-21679 (2014) (accepted).
- [5] Fukuta, M. and Yamamoto, Y., Numerical Estimation of Pool Boiling Heat Transfer, Proc. of the 51th National Heat Transfer Symposium of Japan, (2014).
- [6] The Japan Society of Mechanical Engineering JSME Steam Tables (1999).
- [7] The Japan Society of Mechanical Engineering, JSME Data Book: Heat Transfer 4th Edition (1986).