

GOTHIC コードによる平板への壁面凝縮実験の数値計算

Numerical Simulation with the GOTHIC Code for a Wall Condensation Experiment Using a Flat Plate

鈴木 智教 (Tomonori Suzuki) ^{*1}, 村瀬 道雄 (Michio Murase) ^{*2}, 高木 俊弥 (Toshiya Takaki) ^{*2}

要約 原子炉格納容器 (CV) 内の事故時熱流動に影響する主要物理現象の一つに壁面での凝縮がある。本研究では、事故時 CV 解析の専用コードである GOTHIC コードを用いて平板への凝縮熱伝達実験を対象として数値計算を実施し、凝縮熱伝達計算を適切に行うためのセル寸法について検討した。GOTHIC コードでは集中定数 (LP) モデルを用いる LP コードと数値流体力学 (CFD) コードの中間的な解像度のサブボリュームモデルが実装されており、ノードをグリッド分割して物理量の分布や流動を CFD のように計算できる。実験解析の結果、GOTHIC では、壁面に隣接するセルを乱流層に配置するのが適切であり、粘性底層などの極端に小さいセル寸法を設定しなければ安定した伝熱計算が可能であり、大規模設備である CV の解析に適していることを確認した。凝縮熱流束の計算値は従来相関式による計算値に比べて若干過小評価となった。このことから GOTHIC の凝縮熱伝達モデルはバルクでの使用を想定したモデルになっている可能性がある。

キーワード 格納容器, 事故条件, 凝縮熱伝達, 非凝縮性気体, 平板, GOTHIC

Abstract Wall condensation is one of the important physical phenomena that affect thermal hydraulics in a containment vessel (CV) of nuclear power plants during accident conditions. In this study, we carried out numerical simulation with the GOTHIC code for a heat transfer experiment on wall condensation using a flat plate, and we evaluated appropriate cell sizes for computation of condensation heat transfer. The sub-volume model, which is coarser than computational fluid dynamics (CFD) code and more detailed than the lumped parameter (LP) code with LP models, is implemented in the GOTHIC code, and distributions of physical quantities and flows can be computed like in CFD codes. From the simulation, we judged the sizes of computation cells within the turbulent layer were suitable in the GOTHIC code, and we carried out stable computations. We confirmed that the GOTHIC code was suitable for the analysis of thermal hydraulics in the CV with a huge volume. The computed condensation heat fluxes were a little smaller than those obtained with existing correlations. This suggested that the heat transfer model in the GOTHIC code may be used in the bulk.

Keywords containment vessel, accident condition, condensation heat transfer, non-condensable gas, flat plate, GOTHIC

1. はじめに

原子炉格納容器 (CV) 内の事故時熱流動に影響する主要物理現象の一つに壁面での凝縮がある。原子力産業界では、Lumped Parameter (LP) コードを用いたノードジャンクションモデルでの CV 内熱流動評価が主流であり、大空間のバルクと壁面の間で定義された凝縮熱伝達相関式⁽¹⁾⁻⁽³⁾が使用される。最近では、数値流体力学 (CFD) コードを使った、より詳細な解像度の数値計算が行われており、実験解析には粘性底層での水蒸気濃度や気相密度の勾配に基づく凝縮熱伝達相関式⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾が広く使用されている。この相関式を用いるには壁面に接する計算セルの幅を 0.1 mm オーダーにする必要があり、数十 m 規模の CV 解析に適用するの

は現実的でない。実機 CV への CFD 解析の適用例⁽³⁾が報告されているが、壁面凝縮の取扱いに関する記述はなく、LP モデルに基づく凝縮熱伝達相関式⁽¹⁾⁻⁽²⁾が使用されていると推定され、その妥当性は確認されていない。そこで、原子力安全システム研究所 (INSS) では、粗い計算セルを用いた CFD 解析に適用できる凝縮熱伝達相関式の整備を目的として、強制対流凝縮を対象に LP モデルに基づく従来相関式を修正した凝縮熱流束の相関式⁽⁶⁾と壁関数に用いる蒸気濃度の対数則分布に対する相関式⁽⁷⁾を提案した。

一方、GOTHIC コード⁽⁸⁾⁻⁽⁹⁾の分布定数モデルは、LP コードと CFD コードの中間的な解像度の解析向けに米国の電力研究所 (EPRI) で開発された。GOTHIC コードでは、LP コードより詳細な解像度の解析を CFD

* 1 元 (株) 原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現 MHI NS エンジニアリング (株)

* 2 (株) 原子力安全システム研究所 技術システム研究所

コードより低負荷で計算する。実機CVの解析を対象としており、壁面近傍での水蒸気濃度や気相密度の勾配など詳細な評価には適していないが、LPコードで使用されている各種の凝縮熱伝達相関式を選択使用できるようになっている。しかし、技術マニュアル⁹⁾には温度や蒸気濃度に関する壁面処理に関する記述はなく、壁面に接する計算セルの寸法が計算結果に及ぼす影響は明確でない。

本研究の目的は GOTHIC 分定数モデルを壁面凝縮計算に適用する際の適切な計算セル寸法を確認することである。本報告では、蒸気と空気の混合気体から水平平板に凝縮する際の温度分布測定実験¹⁰⁾を対象として、GOTHIC 分布定数モデルによる実験解析を行い、壁面に接するセル寸法が計算結果に及ぼす影響について検討した。

2. 実験と解析モデル

2.1 実験

壁面に接する計算セル寸法の妥当性を検証するには、凝縮面から主流（バルク）に至る境界層内での温度分布が必要になる。しかし、凝縮熱伝達実験では主流（バルク）での流れ方向の温度分布が測定され、境界層内温度分布の測定例は少ない。

本研究では、Legay-Desesquelles and Prunet-Foch¹⁰⁾による平板を用いた凝縮実験での温度分布を参照した。実験では、高温（100℃未満）の空気と飽和蒸気の混合気体を矩形流路へ流入させ、流入気体より低温にした床の平板で凝縮させた。実験装置は、幅0.4 m、高さ0.2 mの矩形断面流路であり、左右と天井の壁面は断熱されている。測定点は、流れ方向位置 $x=2.8$ mである。流入させる混合気体は層流から乱流まで流速と温度条件を変更して測定が行われており、流速は6 m/s未満、凝縮面と混合気体の温度差はおおよそ20℃未満の範囲で設定されている。原子炉格納容器内の事故時には、破断流や崩壊熱起因の上昇流により、ある程度大きな流速になると想定されるため、本研究では、乱流条件である混合気体温度85℃、流速5.35 m/s、凝縮面との温度差20.9℃の実験ケースを計算対象にした。

図1に乱流境界層での温度分布の測定値¹⁰⁾を示す。無次元温度を $(T-T_w)/(T_b-T_w)$ で表している（ T_b と T_w はバルクと壁面での温度）。バルクでの物理量は流速が $u_b=5.35$ m/s、温度が $T_b=85$ ℃であり、流れ方向位置は $x=2.8$ mである。バルクと凝縮面との温度差は、 ΔT

$= (T_b - T_w) = 20.9$ ℃である。凝縮熱流束 q_c や熱伝達率 h_c は、測定の不確かさが大きいと測定されておらず、二次元解析で求められた（ $q_c = 13.3$ kW/m²）。

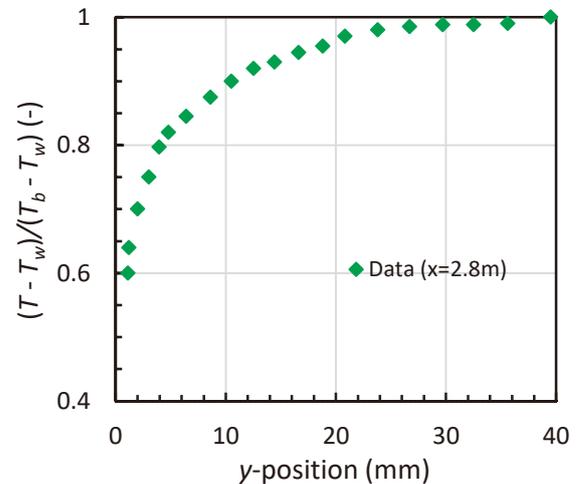


図1 乱流境界層での温度分布¹⁰⁾

2.2 解析モデル

GOTHICでの解析モデルの概要を図2に示す。Inlet flow boundaryで水蒸気と空気の混合気体を流入させ、微小体積であるVolume 1を通して拡散させた後、実験装置の矩形流路を模擬したVolume 2へ均一に混合気体を流入させた。なお、Volume 2は、表1に示すように、流れ方向 x と凝縮面に鉛直な方向 y に対して二次元分割しており、壁面に接する計算セルの寸法を変更した4ケースで計算を実施した。無次元距離は $y^+ = 0.6, 5.8, 29, 58$ であり、それぞれ粘性底層、粘性底層～遷移層、遷移層～乱流層、乱流層に対応する。Volume 2の床面には、温度64.1℃で一定にした熱構造材を配置して流体と伝熱させた。凝縮熱伝達モデルはGOTHICコードの標準的なモデルであるDLM (diffusion layer model)とした。Volume 2の x 方向長さは、測定位置 $x=2.8$ mよりも十分に長い5.0 mに設定した。流出側は測定部での流動に影響を与えないよう、比較的大きな体積のVolume 3で混合気体を均質化させた後、Outlet pressure boundaryに大気圧条件で流出させた。

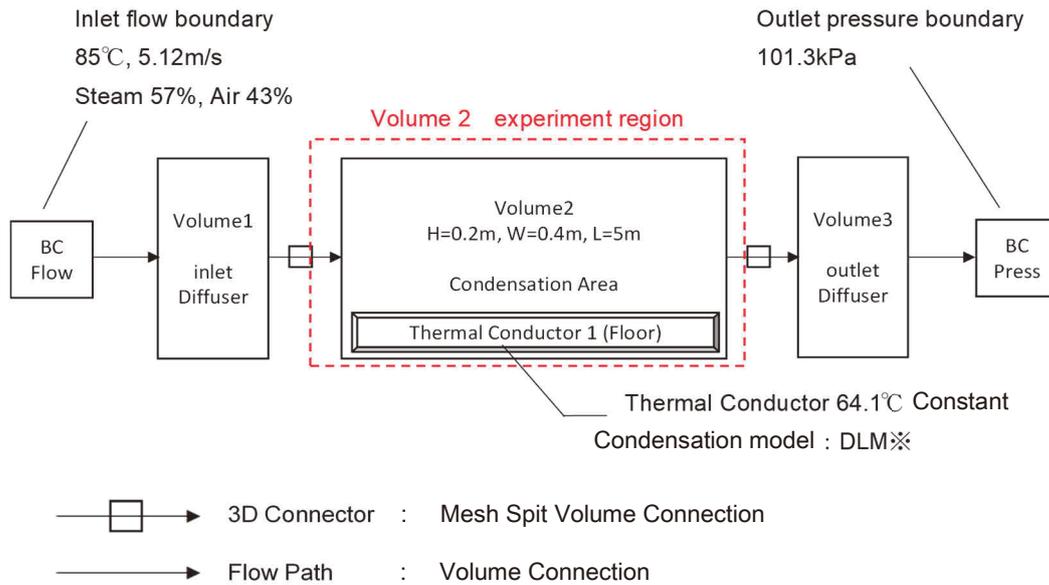


図2 GOTHICでの解析モデルの概要 (※DLM: diffusion layer model)

表1 Volume 2のセル寸法

ケース	Δx	Δy^*	Dimensionless distance of cell adjacent to wall y^+
Case 1	20 mm	0.1~20 mm	0.6 (Viscous sublayer)
Case 2	20 mm	1~20 mm	5.8 (Viscous sublayer ~ Transition sublayer)
Case 3	20 mm	5~20 mm	29 (Transition sublayer ~ Log-row region)
Case 4	20 mm	10~20 mm	58 (Log-row region)

※ 壁面に近づくほど小さくなるよう設定。

3. GOTHICコードによる計算結果

3.1 速度分布

速度境界層の厚さ δ_y を図3および図4に示す。 δ_y は速度がバルク速度の99%の位置で定義した。Correlationの線は、次の相関式(1)から計算した。

$$\delta_y = 0.37x(Re_x)^{1/5} \tag{1}$$

すべての解析ケースで $x = 3.0$ m付近から境界層の発達が見られ、約80 mmで収束傾向を示した。これは、流路の高さが200 mm (中央100 mm) であることによる。床側の速度境界層厚さは、壁近傍のセル幅が大きいケースほど、相関式よりも厚くなる傾向を示した。境界層が厚くなる要因として、凝縮による水蒸気減少に伴う速度低下が考えられるが、セル幅が大きいほど壁面から離れたセルの速度に影響している可能性がある。一方、天井側の速度境界層厚さについては、凝縮が生じる床面とは異なり、Case 1以外は相関式と良好一致を示した。Case 1については、床側よりも天井側の方が速度境界層が厚くなっている。

図5と図6に床面側と天井面側の x 方向の無次元速度分布を示す。比較として載せた壁関数 (図中のWall func) は次式(2)により計算した。

$$u^+ = \min\left(y^+, \frac{1}{k} \ln(y^+) + C\right) \tag{2}$$

$$k = 0.41, C = 5.5$$

床側では $y^+ > 15$ での速度分布は壁関数と比較的よく一致したが、粘性底層や遷移層では速度を過大評価する結果となった。Case 1では y^+ が小さくても壁面処理が行われているように推定される。天井側でもCase 1以外では、 $y^+ > 15$ での速度分布は壁関数と比較的よく一致したが、粘性底層や遷移層では速度を過大評価した。乱流層での速度分布は壁関数とよく一致するが、

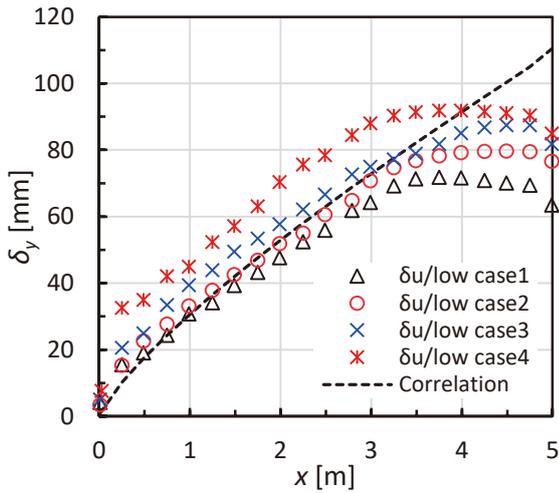


図3 速度境界層厚さ (床側)

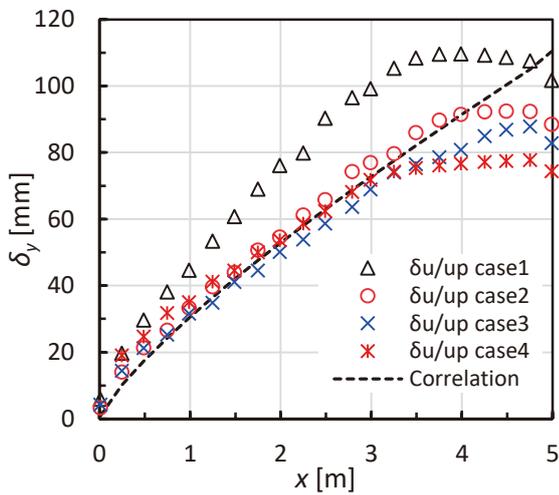


図4 速度境界層厚さ (天井側)

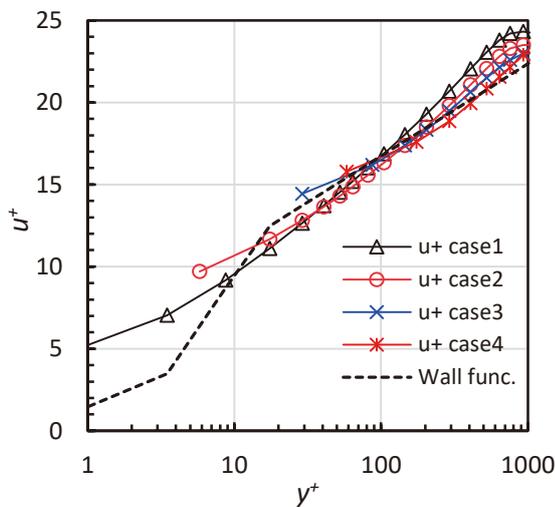


図5 無次元速度分布 (x = 2.8 m、床側)

粘性底層や遷移層では速度を過大評価することから壁面隣接セルは乱流層に配置するのが適切である。

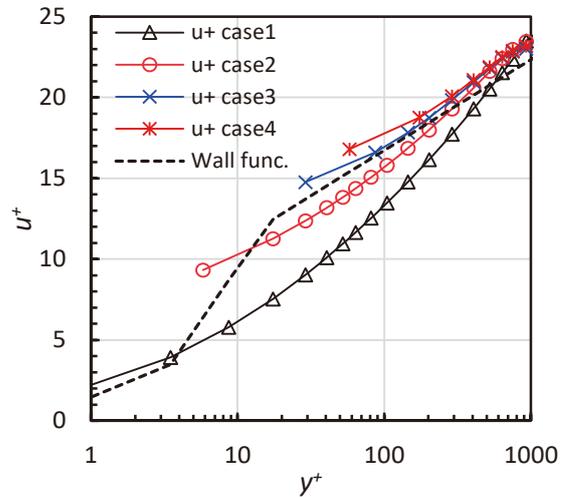


図6 無次元速度分布 (x = 2.8 m、天井側)

3.2 温度分布

図7に温度境界層の厚さ δ_T を示す。 δ_T は、温度差 $\Delta T = T - T_w$ がバルクと壁面の温度差 $\Delta T_{bw} = T_b - T_w = 20.9 \text{ }^\circ\text{C}$ の99%の位置で定義した。つまり、バルク温度と δ_T での温度との差は $0.21 \text{ }^\circ\text{C}$ である。比較として示した Correlation の線は、式(1)により計算した。Case 3 と Case 4 については、 $x = 5.0 \text{ m}$ までの全領域で相関式と比較的よく一致しており、境界層の発達も継続している。これは、速度境界層は天井側からも発達することに対し、温度境界層は床側からのみ発達することによる。Case 3 については、 $x = 3.0 \text{ m}$ までは、相関式とよい一致を示したが、それ以降は境界層の発達が緩やかになるが境界層の発達も継続する傾向を示した。Case 1 については、 $x = 2.5 \text{ m}$ 付近で平衡に達しており、速度境界層よりも収束が早まる傾向となった。実験での δ_T は、計算値の約 1/2 である。これは、バルクと δ_T での温度差が小さく測定の不確かさが大きいことによると推定される。

図8と図9に $x = 2.8 \text{ m}$ と 1.0 m での混合気体の温度分布を示す。 $x = 1.0 \text{ m}$ は、図7で δ_T の測定値が計算値と一致する位置である。比較として載せた Cal の線は Legay-Desesquelle and Prunet-Foch⁽¹⁰⁾による二次元解析で計算された温度である。計算値と測定値では温度の変化率 dT/dy が大きく異なり、計算では壁面近くの温度を過大に評価している。

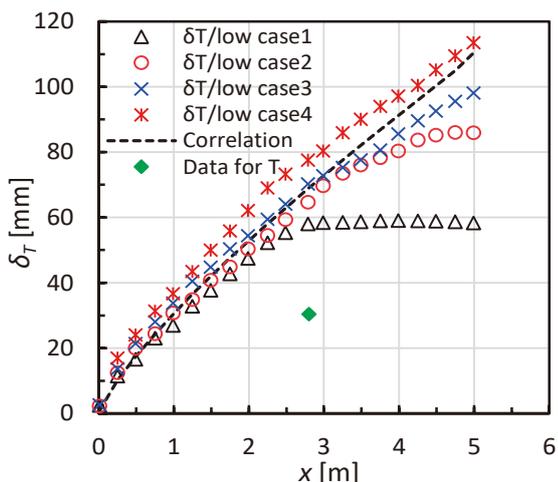


図7 温度境界層厚さ (床側)

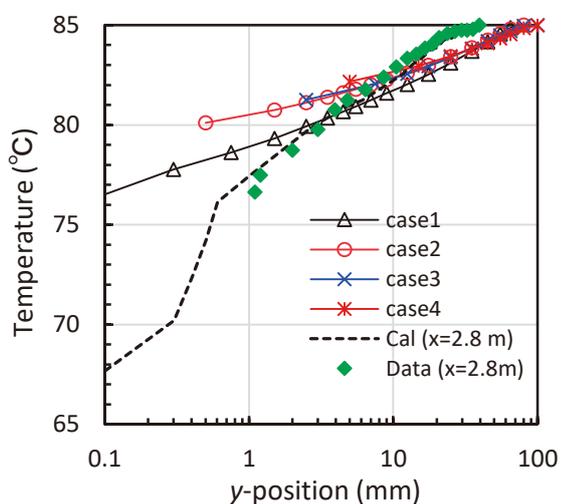


図8 混合気体の温度分布 (x = 2.8 m)

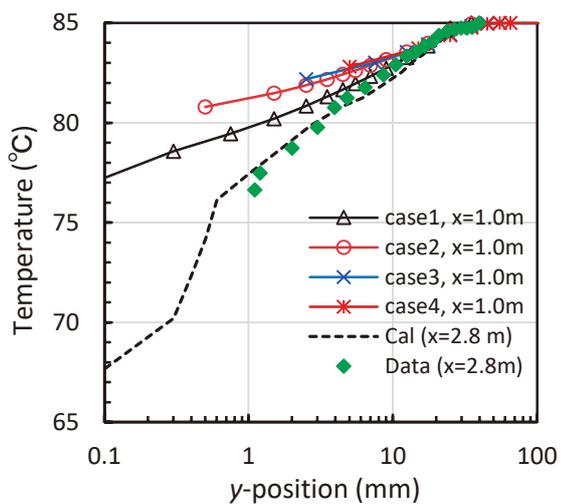


図9 混合気体の温度分布 (x = 1.0 m)

図8と図9に示す結果から、GOTHICは壁面近くの温度分布評価には適していないと判断される。

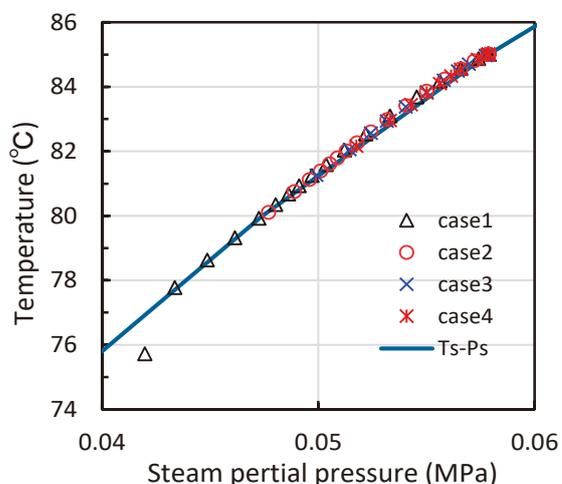


図10 気体温度と蒸気分圧の関係 (x = 2.8 m)

気体温度と蒸気分圧の関係を図10に示す。温度は計算値であり、蒸気分圧は蒸気質量分率の計算値から求めた。実線 T_s-P_s は飽和状態を示す。Case 1の壁面に接するセルでは飽和曲線より蒸気分圧が高く過飽和状態にあるが、その他は飽和状態である。

3.3 蒸気濃度の分布

図11と図12に $x = 2.8\text{ m}$ と 1.0 m での蒸気質量分率 X_s の分布を示す。

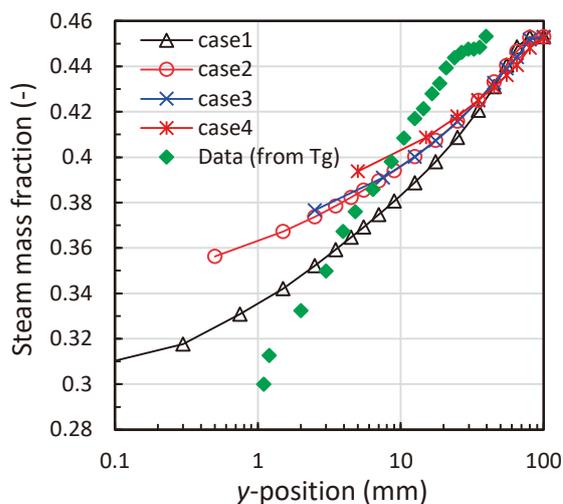


図11 蒸気質量分率の分布 (x = 2.8 m)

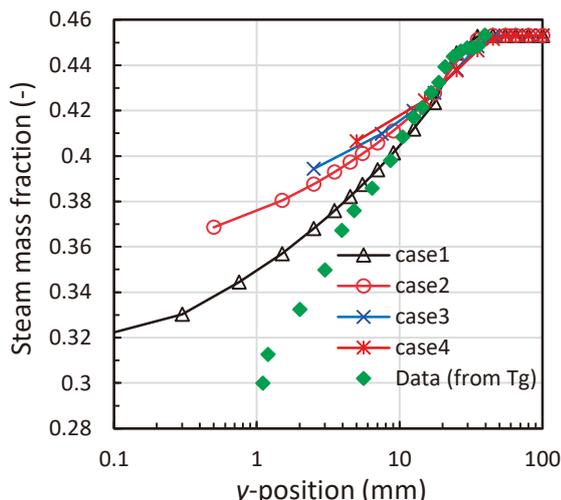


図 12 蒸気質量分率の分布 ($x = 1.0$ m)

$x = 1.0$ m は、図 7 で δ_T の測定値が計算値と一致する位置である。Data は飽和状態を仮定して温度測定値から求めた。計算値と測定値では変化率 dX_s/dy が大きく異なり、図 8 および図 9 と同様に、計算では壁面近くの X_s を過大に評価している。

図 11 と図 12 に示す結果から、GOTHIC は壁面近くの蒸気濃度分布の評価には適していないと判断される。

3.4 凝縮熱流束

図 13 に GOTHIC コードで計算された、壁面での熱流束 (対流熱流束を含む) を示す。Case 1 以外のケースは、熱流束の計算値に有意な差は生じなかった。Case 1 については、他のケースより熱流束が大きくなっており、壁面に接する計算セルの幅を過小にした影響と考えられる。粘性底層などの極端に小さいセル寸法を設定しなければ、安定した伝熱計算が可能であることを確認できた。熱流束の定量比較に Araki ら⁽¹¹⁾ による以下の相関式(3)および(4)を使用した。

$$q_c = D \frac{P M_s}{R T} \frac{Sh_x}{x} h_{fg} \ln \left(\frac{1 - W_{s,w}}{1 - W_{s,b}} \right) \quad (3)$$

$$Sh_x = 0.0926 Re_x^{4/5} Sc_x^{1/3} \quad (4)$$

D は拡散係数、 h_{fg} は凝縮潜熱、 M_s は蒸気の分子量、 P は圧力、 q_c は凝縮熱流束、 R は一般ガス定数、 Re はレイノルズ数、 Sc はシュミット数、 Sh はシャーウッド数、 T は温度、 W はモル分率である。相関式(3)は、熱

輸送と物質輸送の相似則に基づき、バルク (添字 b) と壁面 (添字 w) の間で定義されている。図 13 では式(3)の計算に Case 3 での計算値を使用した。式(3)による q_c は、Case 2~Case 3 での熱流束計算値 q より大きい。

q と $q_{c,Araki}$ の比を図 14 に示す。凝縮開始点 ($x = 0$) の近傍では計算が不安定で不確かさが大きい。 $x > 0.5$ m では $q/q_{c,Araki} = 0.7 \sim 0.9$ であり、GOTHIC による q は従来相関式による $q_{c,Araki}$ より小さい。これは、GOTHIC ではバルクと壁面の間で定義された q の相関式が使用されており、本解析ではバルクより速度と蒸気濃度が低い乱流層に適用したことによると判断される。

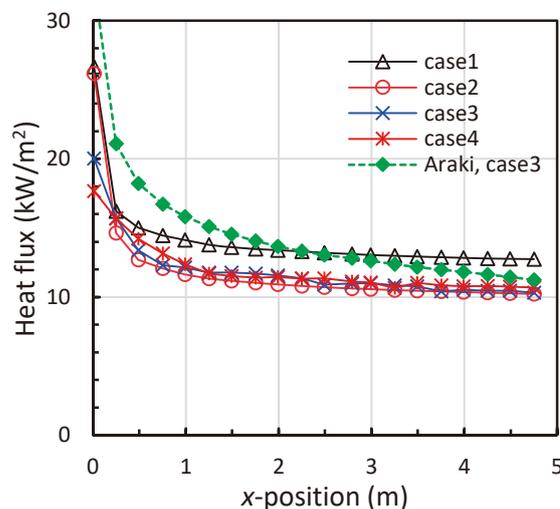


図 13 壁面での熱流束 (流れ方向の分布)

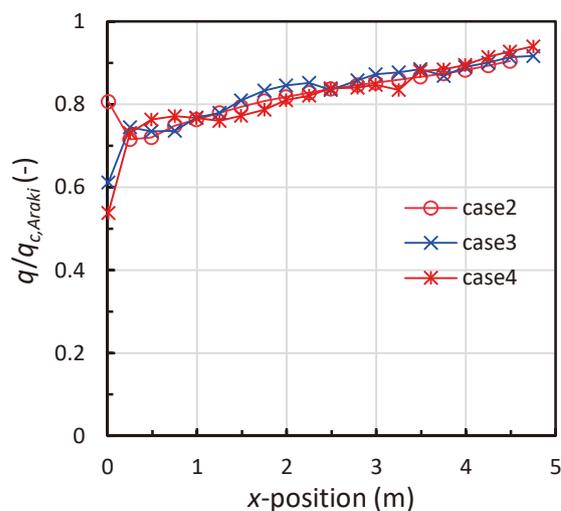


図 14 熱流束 q の計算値の比

GOTHICでは、壁面に接する計算セルをバルクに設定することを想定していると思われる。隣接セルをバルクに設定するには表1に示した本解析での Δy より大きなセル幅になり、流路高さが0.2 mの本解析対象ではセル数が過少になり計算が困難になる。

3.5 考察

GOTHICでは、図5と図6に示すように乱流領域の速度分布については、壁面に接する計算セルの幅が過小なCase 1を除いて対数則分布に近い結果が得られた。図8と図9および図11と図12に示す通り、壁面近傍の温度および蒸気質量分率は測定値よりも大きい結果となった。これらの結果より、壁面に隣接する計算セルは乱流層へ配置するのが適切であると考えられる。壁面に隣接する計算セルを粘性底層などの極端に小さいセル寸法に設定しなければ、安定した伝熱計算が可能であることを確認できた。しかし、図14に示す通り熱流束は過小評価となっていることから、GOTHICの凝縮熱伝達モデルはバルクへの適用を想定している可能性があると考えられる。

参考に、バルクで定義された相関式(3)と(4)を局所位置 y に適用した場合の熱流束評価値 $q_{c,y}$ を図15に示す。

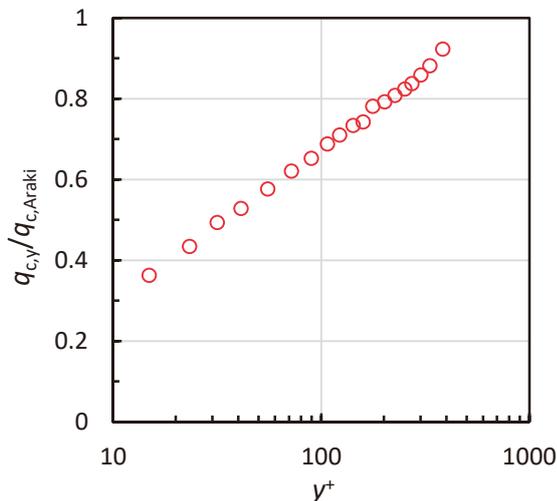


図15 バルク定義の相関式を局所に適用した場合の熱流束 $q_{c,y}$

$q_{c,y}$ の計算には、図5と図6に示した対数則相関式を用いて計算した速度、図8と図9に示した温度の測定値、および図11と図12に示した飽和温度を仮定して温度測定値から求めた蒸気濃度を使用した。このように、バ

ルクで定義された相関式を乱流層に適用すると、速度、温度、蒸気濃度が低下するため、 $q_{c,y}$ の評価値が大幅に低下することが分かる。このため、バルク定義の相関式を使用して凝縮熱伝達を適切に評価するためには、セル寸法を乱流層よりも大きくする必要がある。しかし、図14に示したようにGOTHICでは、計算セルを乱流層($y^+=5.8\sim 58$)に設定しても $q_{c,y}$ の評価値の低下が抑制されていることから、壁面処理により、 $q_{c,y}$ の低下をある程度抑制していると判断される。

4. まとめ

平板凝縮熱伝達試験を対象に、GOTHICによる熱流動解析を行い、速度分布、温度分布、蒸気濃度分布および凝縮熱流束への計算セル寸法の影響を評価した。

GOTHICでは、乱流領域の速度分布については、セル寸法が過小な場合を除いて対数則分布に近い結果が得られた。粘性底層から遷移層では速度、温度、蒸気質量分率を過大に計算した。GOTHICでは、壁面に隣接するセルを乱流層に配置するのが適切であると考えられる。

壁面での熱流束については、極端に小さいセル寸法を設定しなければ、安定した伝熱計算が可能であることを確認した。熱流束は従来の凝縮熱流束相関式に比べて過小評価となったことから、GOTHICの凝縮熱伝達モデルはバルクでの使用を想定したモデルとなっている可能性がある。したがって、凝縮熱伝達を適切に評価するには、セル寸法をさらに大きくする必要があると考えられる。

記号

D	拡散係数 (m^2/s)
h_{fg}	凝縮潜熱 (kJ/kg)
M	分子量 (kg/mol)
P	圧力 (Pa)
q	熱流束 (kW/m^2)
q_c	凝縮熱流束 (kW/m^2)
R	一般ガス定数 ($\text{kJ}/\text{mol K}$)
Re	レイノルズ数 (-)
Sc	シュミット数 (-)
Sh	シャーウッド数 (-)
T	温度 ($^{\circ}\text{C}$)

u^+	無次元速度 (-)
W	質量分率 (-)
X	モル分率 (-)
x	流れ方向座標 (m)
y	壁面に垂直方向の座標 (m)
y^+	無次元距離 (-)

ギリシャ記号

Δx	x 方向の幅 (m)
Δy	y 方向の幅 (m)
δ_v	速度境界層の厚さ(m)
δ_T	温度境界層の厚さ(m)

添字

a	空気
b	バルク
s	蒸気
w	壁面

引用文献

- (1) J. C. de la Rosa, A. Escrivá, L. E. Herranz, T. Cicero and J. L. Muñoz-Cobo, Review on Condensation on the Containment Structure, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 51, pp. 32-66, 2009.
- (2) M. K. Yadav, S. Khandekar and P. K. Sharma, An Integrated Approach to Steam Condensation Studies Inside Reactor Containments: A Review, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 300, pp. 181-209, 2016.
- (3) F. Liu, Z. Sun, M. Ding and H. Bian, Research Progress of Hydrogen Behaviors in Nuclear Power Plant Containment under Severe Accident Conditions, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, pp. 36477-36502, 2021.
- (4) A. Dehbi, F. Janasz and B. Bell, Prediction of Steam Condensation in the Presence of Noncondensable Gases using a CFD-based Approach, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 258, pp. 199-210, 2013.
- (5) M. Punetha and S. Khandekar, A CFD based modelling approach for predicting steam condensation in the presence of non-condensable gases, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 324, pp. 280-296, 2017.
- (6) M. Murase, Y. Utanohara and A. Tomiyama, Prediction Method for Condensation Heat Transfer in the Presence of Non-condensable Gas for Computational Fluid Dynamics Applications, *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, Vol. 8(3), 031404 (6 pages), 2022.
- (7) M. Murase, T. Suzuki, Y. Utanohara and T. Takaki, Dimensionless Profiles of Temperature and Steam Mass Fraction in Flows of Steam-Air Mixture on a Flat Plate, *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, Vol. 9(1), 011401 (8 pages), 2023.
- (8) GOTHIC Thermal Hydraulic Analysis Package: Qualification Report Version 8.1(QA), Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA, USA, 2014.
- (9) GOTHIC Thermal Hydraulic Analysis Package: Technical Manual Version 8.1(QA), Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA, USA, 2014.
- (10) F. Legay-Desesquelles and B. Prunet-Foch, *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 29(1), pp. 95-105, 1986.
- (11) H. Araki, Y. Kataoka and M. Murase, Measurement of Condensation Heat Transfer Coefficient inside a Vertical Tube in the Presence of Noncondensable Gas, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 32(6), pp. 517-526 (1995).