

鉛直管における飽和蒸気と空気の混合気体からの凝縮伝熱の数値解析

Numerical Analysis of Condensation Heat Transfer from Saturated Steam-Air Mixture in a Vertical Pipe

*村瀬 道雄¹, 歌野原 陽一^{1,2}¹原子力安全システム研究所 (²現: 公立小松大学)

鉛直管における飽和蒸気と空気の混合気体からの凝縮伝熱に関する実験の数値解析を行い、乱流境界層での蒸気質量分率 X_s 分布の計算値は温度測定値と飽和条件から求めた X_s 分布とよく一致することを確認した。

キーワード: 格納容器, 事故条件, 壁面凝縮, CFD, 壁関数

1. 緒言 本研究では、CFD コード FLUENT を用いて事故条件での格納容器 (CV) 内の熱流体挙動を詳細評価することを目標としている。CV 解析では、計算体系が大きいため壁面に接する計算セルを大きくして壁関数を使用する必要があるが、凝縮系における壁関数に関する知見は少ない。そこで、直径 49.5 mm の鉛直管における飽和蒸気と空気の混合気体の温度分布を測定し[1]、乱流境界層での無次元温度 T^+ と蒸気質量分率 Y_s^+ の分布を評価して対数式を求めた[2]。本報告では、FLUENT を用いて実験に対する数値解析を行い、無次元速度 u^+ および T^+ と Y_s^+ を評価し、CFD への適用性について検討した。

2. 評価方法 計算条件の多くは、Utanohara and Murase [3]による計算条件と同じである。壁に接する計算セルの幅は 0.02 mm、総セル数は約 2.1 百万である。CFD コード FLUENT と標準 $k-\epsilon$ 乱流モデルを使用した。蒸気流量 5.9 g/s、空気流量は 9.0 g/s で、入口温度は 87.4 °C である。冷却壁内面に Dehbi et al. [4]による凝縮熱流束 q_c の相関式で計算した入力値を与え、冷却部の外面境界に測定温度を与えた。

無次元速度 u^+ の分布は対数則分布とよく一致し、蒸気凝縮による速度分布への影響は見られなかった。乱流境界層での混合気体温度の計算値は測定値より若干高くなり、無次元温度 T^+ の計算値は測定値より約 20% 大きくなり、単相流での対数式より約 20% 小さくなった。

蒸気質量分率 Y_s^+ の計算値を相似則に基づく従来式(1) [5]および村瀬ら[2]による実験式(2)と比較して図 1 に示す。

$$Y_s^+ = (X_s - X_{s,w})/X_s^* = \min\{Sc y^+, \alpha \ln(y^+) + \beta(Sc)\} \quad (1)$$

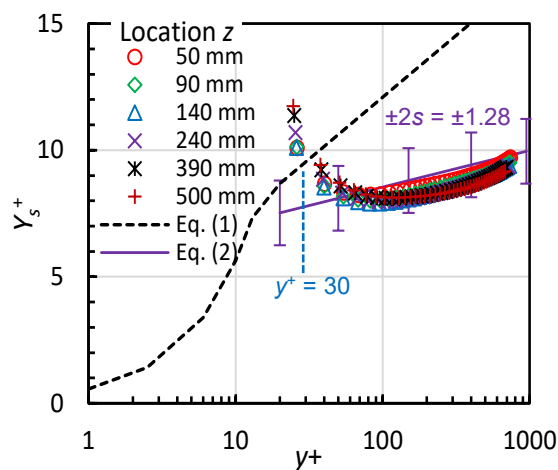
$$Y_s^+ = (X_s - X_{s,w})/\{(1 - X_s)X_s^*\} = 0.63 \ln(y^+) + 5.64 \quad (2)$$

Sc はシュミット数、 X_s は蒸気質量分率、 y^+ は無次元距離である。式(2)は乱流域に対する対数式を対象とし、 Y_s^+ の定義式を $1/(1 - X_s)$ で補正している。 X_s の計算値による Y_s^+ の値は、乱流域 ($y^+ > 30$) で測定値に基づく式(2)と不確かさ $\pm 2s = \pm 1.28$ (s は標準偏差) の範囲内で一致している。

3. 結論 鉛直管での凝縮伝熱実験解析を行い、蒸気質量分率分布の計算値は測定値とよく一致することを確認した。

参考文献

[1] M. Murase, et al., 混相流, 33(4), 405-416, 2019. [2] 村瀬道雄ほか, 混相流, 36(2), 255-265, 2022. [3] Y. Utanohara and M. Murase, NURETH-19, No. 35854, March 6-11, 2022. [4] A. Dehbi, et al., Nucl. Eng. Des., 258, 199-210, 2013. [5] S. Kelm, et al., Nucl. Eng. Des., 353, 110239 (12 pages), 2019.

*Michio Murase¹, Yoichi Utanohara^{1,2}¹Institute of Nuclear Safety System, Inc. (²Present affiliation: Komatsu University)図 1 蒸気質量分率 Y_s^+ の分布