

MA1 水の相変化を考慮した CFD モデルにおける液滴の蒸発速度及び落下速度が与える室内温熱環境への影響に対する感度解析

Sensitivity Analysis of the Effect of Evaporation Rate and Terminal Velocity of Droplets on Indoor Thermal Environment in CFD Model Considering Water Phase Change

指導教員 近藤明教授・共生環境評価領域
28H19028 河田憲 (Ken KAWADA)

Abstract: In order to improve indoor thermal environment, it is important to estimate and control the humidity distribution. However, conventional CFD models do not evaluate the water phase change in indoor environment. In this study, a CFD model with the water phase change was developed. In the model, water is divided into three phases; vapor, fine droplets and coarse droplets. I measured temperature and humidity changes by ultrasonic humidifier in a wind tunnel. And I compared the CFD simulation with the measurements, changed the equation for the evaporation rate of fine droplets and modified the model parameters for the evaporation rate. The results showed that CFD simulation improved by considering the evaporation time and droplets volume in the evaporation rate.

Keywords: CFD, humidity, water phase change, evaporation rate, mist

1. はじめに

衛生的かつ快適な室内環境の構築のために温湿度分布を適切に把握・制御する必要がある。しかし従来 CFD モデルは水の相変化を考慮していないため、温湿度分布を正確に推定できない。本研究では、気象モデルで用いられる水蒸気、微小/粗大液滴間の相変化を扱うモデルを CFD モデルに導入した。モデルを室内環境推定へ適用するために、超音波加湿器による加湿を行う風洞実験との比較により、微小液滴の蒸発速度に関するモデル式とパラメータの調整を行った。

2. 計算概要

2. 1 計算モデル

CFD シミュレーションには OpenFOAM-4.0 を使用した。OpenFOAM-4.0 に組み込む相変化モデルは数値気象予測に用いるために Kessler¹⁾ によって開発されたモデルを用いた。このモデルは、液滴を重量沈降しない粒径 100 μm 以下の微小液滴と、重力沈降する粒径 100 μm 以上の粗大液滴の 2 種類に分類し、これに水蒸気を加えた三相による相変化を扱う。しかし Kessler のモデルは格子解像度が粗く瞬時蒸発を仮定しており、室内環境推定へ直接適用するのは不適切であるため、蒸発速度式を変更したのちにパラメータ修正を行う。液滴の粒子数と粒形を一定と仮定し、新しい蒸発速度式では液滴の蒸発速度に関係する比例係数 q_{c0} を設定した。蒸発速度には液滴が蒸発するのにかかる時間、液滴濃度による蒸発速度変化を考慮している。式(1)に今回用いた微小液滴の蒸発速度式を示す。ここで、 dq_v は蒸発量、 q_v は水蒸気混合比、 q_{vs} は飽和水蒸気混合比、 $f(T)$ は温度 T に関する関数、 q_c は微小液滴の混合比、 q_{c0} は比例係数である。

$$\frac{dq_v}{dt} = (q_{vs} - q_v) * f(T) * \frac{q_c}{q_{c0}} \quad (1)$$

2. 2 計算条件

まず風洞実験の条件を示す。風洞は x, y, z 方向に 9.5m, 1.8m, 1.8m の大きさで x, y 方向に 0.4m, 0.9m の位置に、直径が 0.175 m, 高さ 0.3m の超音波加湿器を配置した。風洞の吹出温度は 15.3°C, 水蒸気混合比は 0.04×10^{-3} kg/kg で、吹き出し風速は 0.375m/s であった。超音波加湿器の加湿量は 273ml/h であり、全量が微小液滴として吹出される。また CFD シミュレーションではこれらを模擬している。計算領域を図 1 に示す。非圧縮性非定常流れを仮定し、乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデルを採用した。パラメータ修正後の計算ケースは 5 種類で、それぞれ q_{co} の値は 5.8×10^{-3} , 2.3×10^{-3} , 1.2×10^{-3} , 0.8×10^{-3} , 0.6×10^{-3} であり、値が大きくなるにつれて蒸発速度が小さくなる。

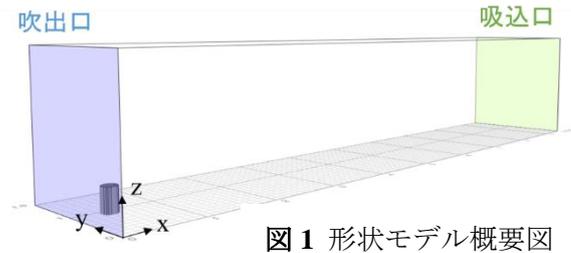


図 1 形状モデル概要図

3. 結果及び考察

パラメータ修正後の計算ケースごとの $y=0.9m$ での温度と水蒸気混合比分布を図 2 に示す。これにより、微小液滴の蒸発速度を変更することによって気温及び水蒸気分布が変動しており、微小液滴の蒸発速度を遅く設定することで気温及び水蒸気の変動が抑えられた。次いで、温度と相対湿度に関して測定結果と CFD 計算結果の比較を行うために、それぞれの x 方向の分布を図 3 に示す。計算結果によるとおおよそ $x=0.7m$ にて最も気温低下及び相対湿度上昇が起こり、それ以降は緩やかに変動が抑えられている。加湿器からの距離に応じた気温や相対湿度の変動の傾向は、測定結果と CFD 計算結果にておおよそ一致している。また、 q_{co} の値が 1.2×10^{-3} のケースにて特に測定値と計算値の差が小さくなった。以上より微小液滴の蒸発速度に関し、蒸発時間及び液滴濃度を考慮することで温熱環境推定の精度が向上し、適切な蒸発速度が推定された。

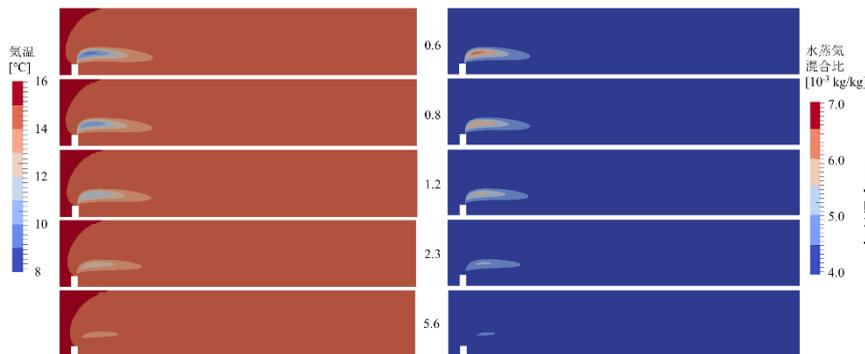


図 2 温度と水蒸気分布($y = 0.9m$)

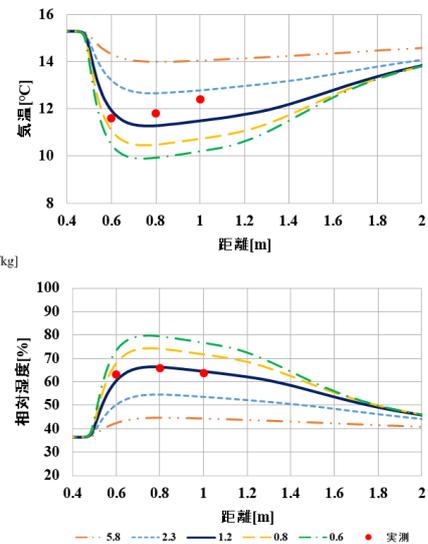


図 3 気温と相対湿度の水平分布
($x = 0.4 - 2.0m, y = 0.9m, z = 0.6m$)

4. 結論

本研究の結論を、以下にまとめる。

- 水分輸送モデルを従来の CFD モデルに導入し、液滴の蒸発速度に関する感度解析によってより適切なパラメータを推定した。
- 微小液滴の蒸発速度に関し、蒸発時間及び微小液滴量を考慮することで温熱環境推定の精度が向上することが知見として得られた。

参考文献

- 1) Edwin. Kessler, On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations, Meteorological Monographs, Vol.10, No.32, pp.1-84, 1969.