

水の相変化を考慮した CFD モデルの粗大液滴の感度分析

Sensitivity analysis of coarse droplets in CFD Model Considering Water Phase Change

学生会員 ○河田 憲 (大阪大学) 正会員 松尾 智仁 (大阪大学)

正会員 嶋寺 光 (大阪大学) 正会員 近藤 明 (大阪大学)

Ken KAWADA*¹ Tomohito MATSUO*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

In order to improve indoor thermal environment, it is important to estimate and control the humidity distribution. However, existing CFD models generally do not evaluate the phase change of water in indoor environment. In this study, a CFD model with the phase change was developed, and a parametric sensitivity analysis about of terminal drop velocity and evaporation velocity of coarse droplets was conducted to understand the effect of coarse droplets on indoor thermal environment. The results indicated that the coarse droplets had almost no effect on the indoor thermal environment.

はじめに

衛生的かつ快適な室内温熱環境の構築のために湿度分布の把握は重要である。低湿度環境では風邪やインフルエンザなどの感染リスクが高まり、高湿度環境ではダニやカビ起因のハウスダストが発生し、ぜんそくなどのリスクが高まる。したがって室内湿度を適切に制御する必要がある。しかし、既往の CFD モデルは水の相変化を考慮していないため、水の相変化による室内の温湿度の変化を考慮することができない。本研究では、CFD モデルに水の相変化を考慮した水分輸送モデルを導入したものを利用し、粗大液滴に関して液滴の落下速度や蒸発速度の感度分析を行い、粗大液滴が室内環境に与える影響の大きさや、パラメータ変化に伴う温熱環境変化を分析する。

1. 計算モデル

1.1 水分輸送モデル

CFD シミュレーションには OpenFOAM-4.0 を使用した。OpenFOAM-4.0 に組み込む水分輸送モデルに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、液体の水を空气中に滞留し続ける粒径の大きさが $100\mu\text{m}$ 以下の微小液滴と、降水となって空气中から落下する粒径の大きさが $100\mu\text{m}$ 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考慮している。モデル式を式(1)~(4)に示す。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla M - \frac{\partial VM}{\partial z} + K_{eff} \nabla^2 M + AC + CC - EP_M \quad (1)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla m + wG + K_{eff} \nabla^2 m - AC - CC - EP_m \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla q - wG + K_{eff} \nabla^2 q + EP_M + EP_m \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla T + \alpha_{eff} \nabla^2 T + \frac{1}{C_p \rho} (Q_p + Q_o) \quad (4)$$

t は時間、 M は粗大液滴量、 m は微小液滴量、 q は水蒸気量である。 \mathbf{v} は風速ベクトル、 V は粗大液滴の落下速度、 K_{eff} は実効拡散係数、 w は鉛直方向の風速、 G は生成関数、 AC は微小液滴から粗大液滴へのオートコンバージョン、 CC は粗大液滴が微小液滴を捕集する効果、 EP_M と EP_m は粗大液滴と微小液滴の蒸発である。また、 ρ は空気の密度、 T は温度、 α_{eff} は実効温度拡散率、 C_p は定圧比熱、 Q_p は相変化による潜熱、 Q_o は外部からの加熱量である。

1.2 その他のモデル式

温度 T における飽和混合比を算出するために、飽和状態での水蒸気密度を式(5)によって求める²⁾。

$$e_s = 6.122 \times \exp\left(17.67 \times \frac{T - 273.15}{T - 29.65}\right) \quad (5)$$

ここで e_s は飽和状態での水蒸気密度である。また、本研究で着目する粗大液滴の終端落下速度を式(6)に、粗大液滴の蒸発式を式(7), (8)に示す³⁾。

$$U_r = 36.34(\rho M)^{0.1346} \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right) \quad (5)$$

$$EP_M = \frac{1}{\rho} \frac{(1 - q/e_s)C(M)^{0.525}}{5.4 \times 10^5 + 2.55 \times 10^6/(pe_s)} \quad (6)$$

$$C = 1.6 + 124.9(\rho M)^{0.2046} \quad (7)$$

ここで、 ρ_0 は地表面での空気密度、 C は Ventilation factor として与えられる。本研究ではこの粗大液滴の終端落下速度や蒸発量を変化させる。なお、微小液滴は不飽和空気に対し瞬時に蒸発すると仮定する。

2. 計算概要

2.1 計算領域

モデル検証用の領域として Fig 1 に示す計算領域を用いた。計算領域は、x, y, z, 方向に 1.8 m, 9.5 m, 1.8 m で、総要素数は約 14 万である。本研究では x = 0.9 m の断面での温度、相対湿度、風速、微小液滴混合比、粗大液滴混合比分布図による結果にて比較を行う。

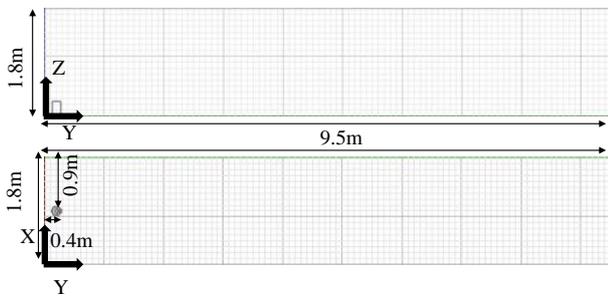


Fig 1 Calculation domain

また、Fig 2 にそれぞれ領域の y = 0 m の面にある吹出口及び y = 9.5 m の面にある吸込口の概要を示す。

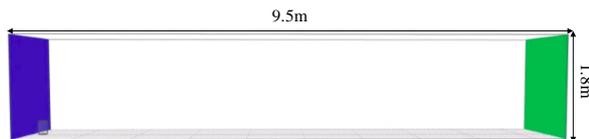


Fig 2 Calculation area(3D view)

Fig 3 に x = 0.9 m, y = 0.4 m に配置した、全体の直径が 175 mm, 上部に 35 mm × 7 mm の吹出口及び下部に直径 40 mm の吸込口を持つ円筒形の超音波加湿器を模したモデルの概要を示す。

超音波加湿器は、水を微細な水滴である微小液滴として空気中に放出することで加湿する。

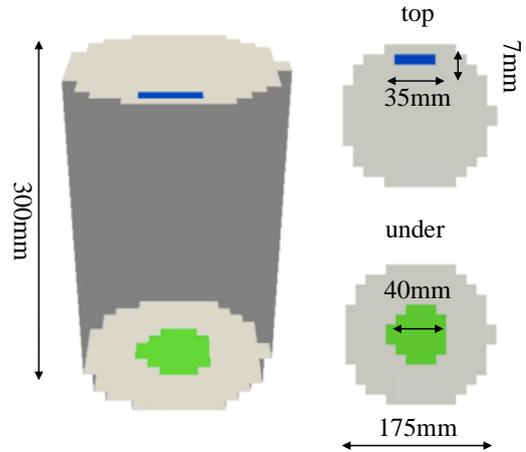


Fig 3 Humidifier model

2.2 境界条件

領域吹出口、加湿器の吹出口の境界条件を Table 1 に示す。それぞれの吸込口では、温度勾配なし、圧力はゲージ圧なしとした。

Table 1 Boundary conditions

| | | |
|------------|-----------------|---------------------------|
| | Temperature | 15.3 °C |
| Inlet | Wind velocity | 0.375 m/s |
| | Flow rate | 1.215 m ³ /s |
| | Air supply from | Wind velocity 1 m/s |
| Humidifier | Flow rate | 0.00245 m ³ /s |

本研究で採用した超音波加湿器の詳細を Table 2 に記す。

Table 2 Overview of humidifier type

| | |
|--------------------------|--------------------|
| Humidifier type | ultrasonic |
| Water condition | fine water droplet |
| Amount of humidification | 0.0000642 kg/s |

それぞれの計算 Case でのパラメータの設定概要を Table 3 に示す。本研究では粗大液滴の終端落下速度を 0%, 50% にしたもの、及び粗大液滴の蒸発速度を 25%, 50% にしたものを採用し、合計 5 Case での風速、室内気温、室内相対湿度、微小液滴混合比、粗大液滴混合比による比較を行う。

| CaseName | Ur | EP _M |
|--------------------------|--------|----------------------|
| Case_base | - | - |
| Case_Ur_50 | 0.5 Ur | - |
| Case_Ur_0 | 0 Ur | - |
| Case_EP _M _25 | - | 0.25 EP _M |
| Case_EP _M _50 | - | 0.5 EP _M |

3 モデル検証結果

Fig 4~Fig 6 に $x = 0.9$ m での風速, 室内気温, 室内相対湿度, 微小液滴混合比, 粗大液滴混合比の断面図を示す。

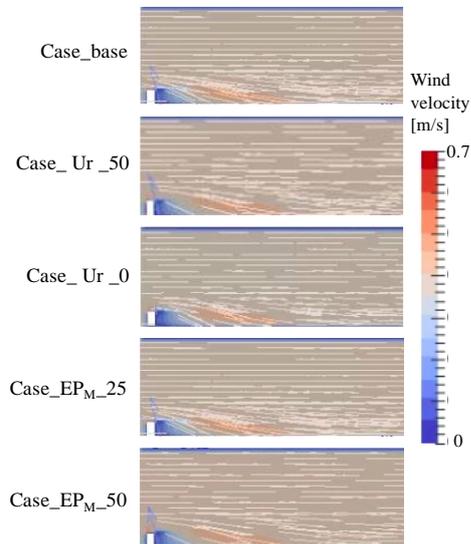


Fig 4 wind velocity ($x = 0.9$ m)

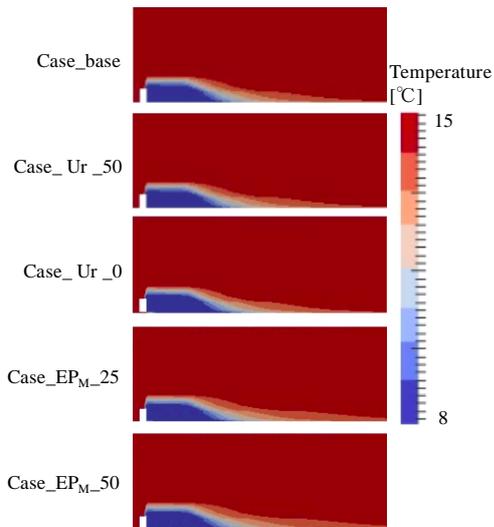


Fig 5 temperature ($x = 0.9$ m)

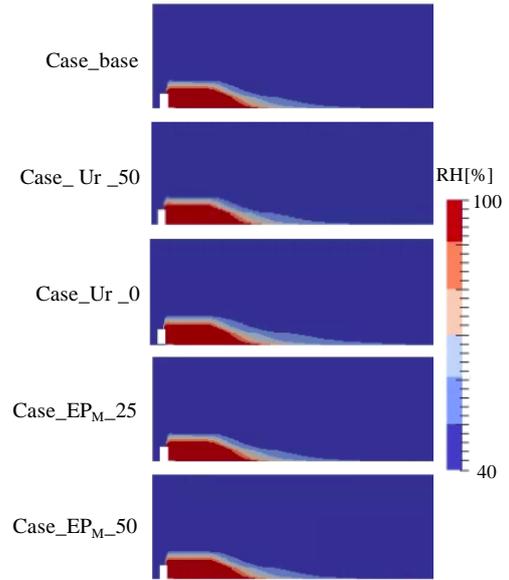


Fig 6 Relative Humidity ($x = 0.9$ m)

Fig 4~Fig 6 によれば, Case 毎での大きな違いは見られない。どの Case でも加湿器より風下側で下降気流が生じ, 7°C程度の温度低下, そして相対湿度が100%になる範囲を確認することができた。Fig 4 に関して, 下降気流が発生していることがわかる。ここで, 加湿器を稼働させない場合を Case_qc_0 とし, Case_base と温度及び気流の比較を行う。Fig 7 に温度分布, Fig 8 に鉛直方向の風速分布を示す。

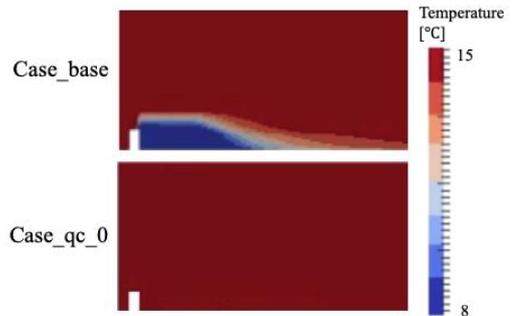


Fig 7 temperature in Case_base and Case_qc_0 ($x = 0.9$ m)

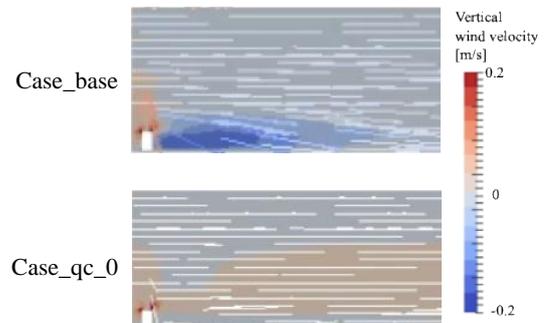


Fig 8 vertical wind velocity in Case_base and Case_qc_0 ($x = 0.9$

Fig 7, Fig 8 によると、加湿器を稼働させる Case では気温低下及び下降気流が発生していることがわかる。以上の結果より、下降気流の発生理由は加湿器が障害物となって流れを堰き止めているわけではなく、周辺空気の気温低下によるものであると考えられる。

次に、Fig 9, Fig 10 に $x = 0.9 \text{ m}$ での微小液滴混合比、粗大液滴混合比の断面図を示す。微小液滴混合比に関しては計算 Case 毎の差異が見られなかったため、Case_base の結果をまとめて記載する。

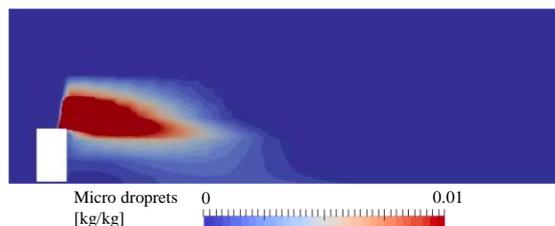


Fig 9 Micro droplets mixing ratio ($x = 0.9 \text{ m}$)

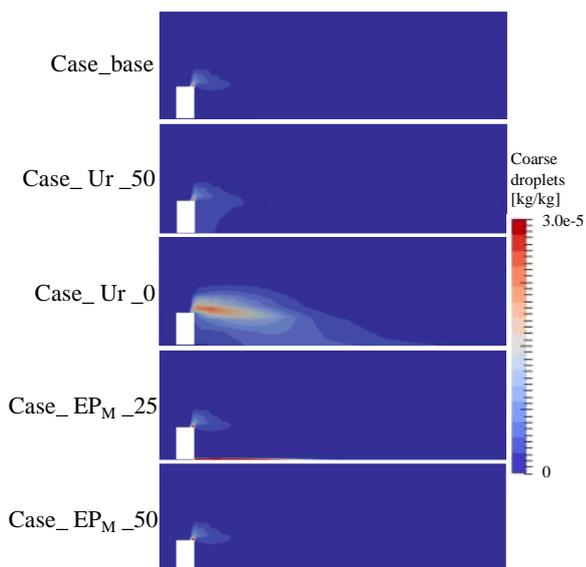


Fig 10 Coarse droplets mixing ratio ($x = 0.9 \text{ m}$)

Fig 9, Fig 10 を参照にすると、微小液滴混合比の方が粗大液滴混合比よりはるかに大きいことが確認できた。この結果と Fig 4 ~ Fig 6 にて結果に変化が見られなかったことを考慮すると、粗大液滴の終端落下速度や蒸発速度が室内空気を与える影響は限りなく小さいことを意味する。

Fig 10 を参照にすると、すべての Case にて加湿器吹出口より風下側にて粗大液滴の発生を確認できた。この結果と Fig 4 を参照にすると、粗大液滴が空気中に浮遊し、気流に流されて次第に蒸発していることがわかる。Case_base では粗大液滴が確認できる範囲が

小さかった。この理由として、Case_Ur_50 や Case_Ur_0 の結果と比較すると、発生した微量の粗大液滴は瞬時に地面に落下したことが考えられる。また、Case_EP_M_50 や Case_EP_M_25 の結果と比較すると、粗大液滴混合比に大きな違いは見られなかったことから、粗大液滴はほとんど蒸発していないと考えられる。Case_Ur_50 や Case_Ur_0 では、加湿器より風下側かつ吹出口より下部にて粗大液滴が確認され、特に Case_Ur_0 では粗大液滴混合比が多量に見られた。これは落下速度を減少させたことから粗大液滴がより空気中に浮遊しているためだと考えられる。また、Case_EP_M_50 や Case_EP_M_25 の2つの Case 間で地面に存在する粗大液滴混合比量に違いは見られず、どちらも $1.0 \times 10^{-4} [\text{kg}/\text{kg}]$ のオーダーで確認できた。これは空気中で発生した粗大液滴がほとんど蒸発せず地面に溜まったものだと考えられる。

4. 結論

本研究の結論を以下にまとめる。

- 超音波加湿器として微小液滴を放出する環境下において、粗大液滴が室内温熱環境に与える影響は、微小液滴が与える影響よりはるかに小さい。
- 加湿器より風下の範囲で下降気流が発生した。これは周辺空気の気温低下の影響によるものであると考えられる。
- 粗大液滴の終端落下速度及び蒸発速度を変化させることで、粗大液滴に関する各種挙動の変化が見られた。

参考文献

- 1) E. Kessler, On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations, Meteorological Monographs, Vol.10(32), pp.1-84, 1969
- 2) D.Bolton, The Computation of Equivalent Potential Temperature, Monthly Weather Review, Vol.108(7), pp.1046-1053, 1980
- 3) Su-Tzai Soong and Yoshimitsu Ogura, A Comparison Between Axisymmetric and Slab-Symmetric Cumulus Cloud Models, Journal of the Atmospheric Sciences, Volume 30 No. 5, pp.879-893, 1973