

超音波加湿器の室内温熱環境への影響を表現する CFD モデルの風洞実験による検証 Validation of a CFD model simulating evaporation effects of droplets generated from an ultrasonic humidifier on indoor thermal environment using wind tunnel experiments

学生会員 ○大屋 那央 (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)
Naoto OOYA*¹ Tomohito MATSUO*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

Accurate estimates of air temperature and humidity are essential for controlling indoor thermal environment. However, conventional CFD models cannot evaluate the phase change of water in a room. This study used a CFD model incorporating a phase change model originally developed for meteorological models. The CFD simulations were compared to wind tunnel experiments with an ultrasonic humidifier for calibration and validation of the phase change model. For better estimates of air temperature and humidity, the model parameters on the evaporation were focused on. The accuracy of the model was found to be highly sensitive to the parameters on the evaporation characteristics of fine droplets.

はじめに

冬場は暖房使用により室内の空気が乾燥する傾向がある。低湿度下ではウイルスの不活性率が低くなるほか、咳などの飛沫が速やかに蒸発しウイルスが長時間空气中に滞留することで COVID-19 などの感染症の拡大リスクが増加する。そこで室内の調湿のために超音波加湿器が用いられることがある。超音波加湿器を使用すると気化熱が発生し気温が低下する。加湿器使用時の室内温熱環境の制御には温湿度分布の推定が重要であるが、従来の数値流体力学 (CFD) モデルでは水の相変化を考慮した室内の温湿度推定が難しい。本研究では CFD モデルに気象分野で用いられる水蒸気、微小/粗大液滴の相変化モデルを導入し、CFD モデルの検証を行った。検証には風洞実験の結果を用い、精度向上のため微小液滴の蒸発速度式のパラメトリック解析を行った。

風洞風速と加湿量を変更しつつ **Table 1** に示す 4 ケースについて超音波加湿器の加湿量の計測、超音波加湿器の風上の温度及び相対湿度、風下の温度の測定を行った。測定は大阪大学工学研究科研究用風洞で行った。加湿器の風下の温度測定の様子を **Fig. 1** に、測定中の超音波加湿器の噴霧の様子を **Fig. 2** に、超音波加湿器の仕様を **Table 2** に示す。本実験で用いた加湿器は家庭用のものと比べて 2 倍から 3 倍程度の加湿量となっている。**Fig. 3** に測定実験のレイアウト図を示す。風洞の大きさは x, y, z 方向に 9.50 m, 1.80 m, 1.80 m である。温度の測定点は x 方向に 0.50 m から 7.00 m まで 18 点、y 方向は加湿器を中心に 0.40 m 幅で、z 方向に 0.50 m から 1.30 m までの幅とし、y, z 方向は 0.05 m 格子で測定した。

Table 2 Ultrasonic humidifier manual

Size	width:290, length:190, height:510 mm			
Mode	1	2	3	4
Amount of humidification (ml/h)	380	550	740	850

1. 風洞実験

CFD モデルの再現性の検証を行うことを目的として、

Table 1 Experiment case

	Wind tunnel			Humidifier		
	Wind velocity (m/s)	Air temperature (°C)	Humidity ratio (g/kg)	Wind velocity (m/s)	Water temperature (°C)	Amount of humidification (g/h)
w0.5h1	0.62	20.9	7.6	0.33	20.9	337.1
w0.5h3	0.50	21.1	8.0	0.34	21.1	937.2
w2h1	2.00	18.7	5.1	0.33	18.7	369.9
w2h3	1.99	18.1	5.4	0.34	18.1	753.1

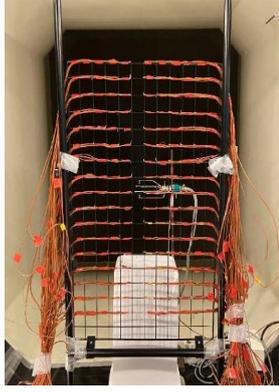


Fig. 1 Temperature sensor

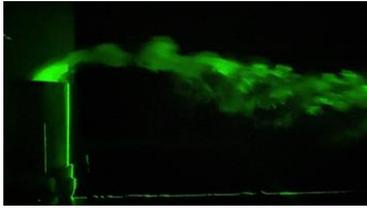


Fig. 2 Ultrasonic humidifier

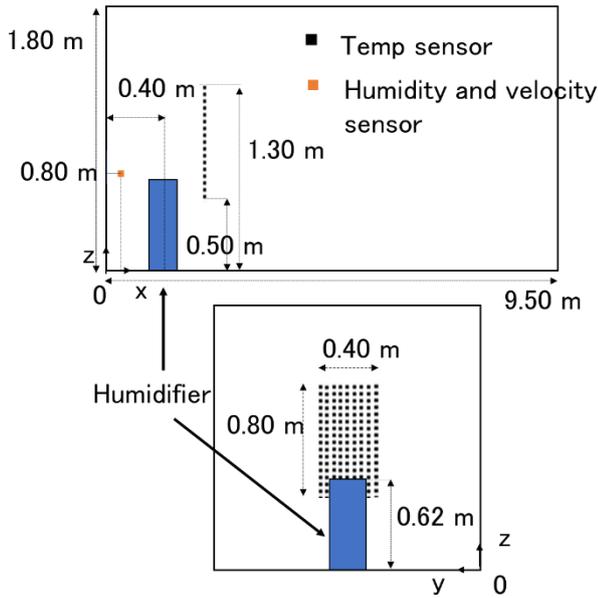


Fig. 3 Wind Tunnel experiment layout

2. CFD モデル

2.1 相変化モデル

CFD 計算には OpenFOAM-4.0 を使用した。非圧縮性流体を仮定し、温度変化による浮力を考慮するため Boussinesq 近似を導入し、乱流モデルに標準 k-ε モデルを用いた。水の相変化モデルとして、数値気象予測に用いられる Kessler²⁾ のモデルを導入した。このモデルでは、水を水蒸気、重力沈降せず空気中に滞留する微小液滴、重力沈降する粗大液滴の 3 相に分類して扱う。モデル式を式(1)～(5)に示す。

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

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

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

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

$$EP_m = (q_{vs} - q) * \left(\frac{m}{m_0}\right)^\alpha * f(T) * k \quad (5)$$

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。 v は風速ベクトル、 U_r は粗大液滴の終端速度、 D_{eff} は実効拡散係数、 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、 q_{vs} は飽和水蒸気量、 m_0 は初期微小液滴量、 α は係数、 $f(T)$ は温度に関する補正である。なお、Kessler のモデルでは微小液滴の瞬時蒸発を仮定しており、室内環境推定への直接の適用は不適切であるため、蒸発時間に関する係数 k を加えた。

2.2 計算条件

モデル検証のため、実験を行った風洞を再現した。格子数は約 61 万である。Fig. 4 に超音波加湿器のモデル図を示す。高さ 620 mm、横幅 290 mm、吹き出し口が 70 mm × 70 mm の正方形とした。入口空気の温度、相対湿度、風速と加湿器の加湿量、水温、風速の境界条件は実験時に測定した値を用いた。

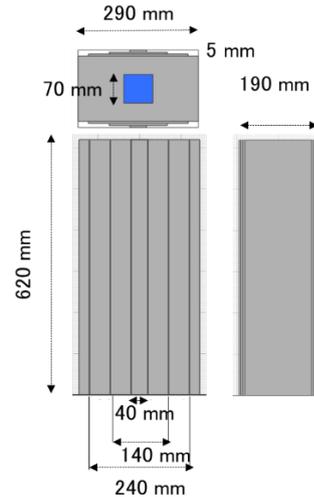


Fig. 4 Humidifier model

パラメトリック解析は式(5)の α と k について行った。

α の値を0.67, 0.33, 0とし, k の値を0.12, 0.58, 2.88とした。 α は微小液滴の蒸発時の振る舞いに関する係数であり、 $\alpha=0.67$ の時は粒径が減少し粒子数は変化しないことを、 $\alpha=0.33$ の時は粒径, 粒子数ともに減少することを仮定している。なお, α についてのパラメトリック解析は $k=0.58$ で, k についてのパラメトリック解析は $\alpha=0.33$ で行った。

3. 計算結果

まず, Fig. 5, Fig. 6に各計算ケースの比較として $y=0.90$ mでの温度低下分布と微小液滴混合比分布を示す。風速が大きいほど加湿器近傍での温度低下が小さくなり, 微小液滴は加湿器近傍で減少し, 遠くまで流されていることが分かる。また加湿量が多いほど加湿器近傍の温度低下が大きいことが分かる。これは, 風速が大きいと供給空気量当たりの蒸発量が減少するため温度低下が小さくなり, 加湿量が多いと空気中の液滴が増え, 単位時間当たりの蒸発量が増えたためと考えられる。

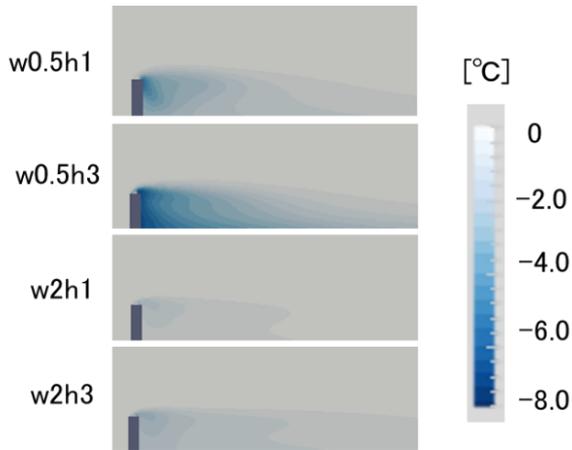


Fig. 5 Temperature decrease ($\alpha=0.33$) ($y=0.90$ m)

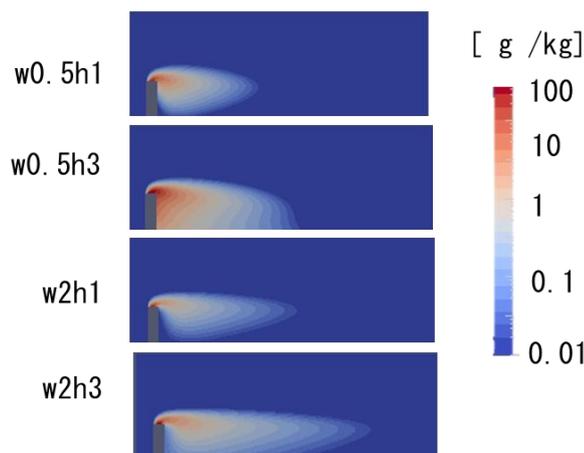


Fig. 6 Fine droplets mixing ratio ($\alpha=0.33$) ($y=0.90$ m)

次に, 各ケースの計算値と測定値の比較とパラメトリック解析の結果を示す。Fig. 7に α の値を変えた時の計算値と実験値の比較を, Fig. 8に k の値を変えた時の計算値と実験値の比較を, Table 3にRMSEの値を示す。温度低下は実験時の測定面の下半分である z 方向に0.50 mから

0.90 mで平均した値である。w0.5h1, w0.5h3では温度低下を過大評価しており, 特に加湿器近傍で温度低下が大きすぎていた。逆にw2h3では温度低下を過小評価した。また, 風速が大きいほど計算値と測定値の差が小さくなっていることが分かる。また, α の値が小さいと加湿器近傍で温度低下を過大評価していたw0.5h1とw0.5h3で温度低下が小さくなり, 温度低下を過小評価していたw2h3では温度低下が大きくなりそれぞれ測定値に近づいた。また, α の値を小さくすると温度低下が緩やかになる傾向がみられた。そのためw0.5h1, w0.5h3では加湿器近傍以外では実験値との差が大きくなった。加えて加湿器近傍では温度低下に変化がみられたがそれ以外の地点では変化が見られなかったため全体としてのRMSE変化は小さかった。 k の値を変えると加湿器近傍で大きく温度低下に変化が生じた。 k を小さくすると微小液滴の蒸発量が減少するため温度低下が小さくなり, k を大きくすると逆に温度低下が大きくなった。これにより, 温度低下を過大評価したw0.5h1, w0.5h3では k が小さい時に実験値と近づき, 温度低下を過小評価したw2h3では k が大きい時に実験値に近づいた。

風速が小さいケースは空気中の液滴量が増えるため温度低下の過大評価が顕著であったため, CFD計算の精度向上のためには蒸発モデルや物質拡散について更なる改善が必要である。

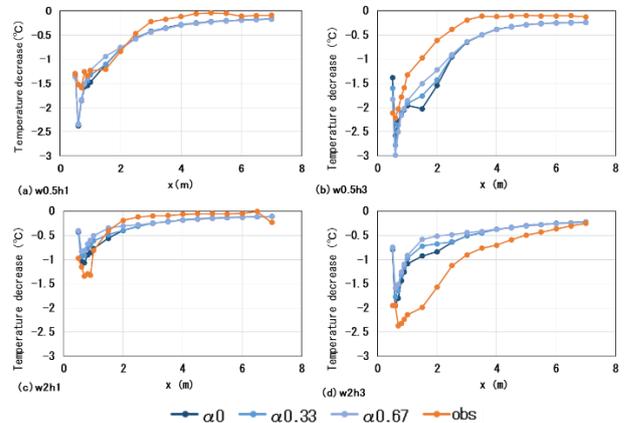


Fig. 7 Comparison between calculation and observation (α)

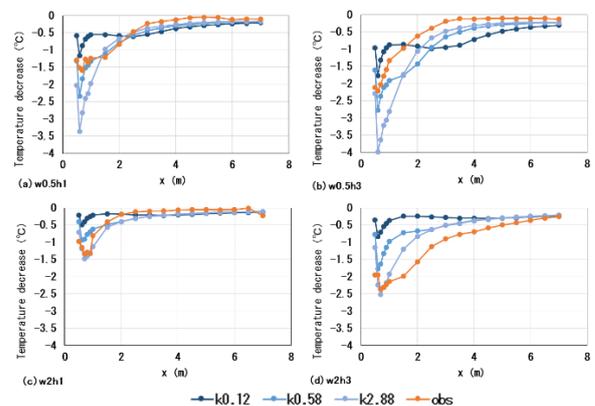


Fig. 8 Comparison between calculation and observation (k)

Table 3 RMSE (°C) for each case

	$\alpha 0.67$	$\alpha 0.33$	$\alpha 0$	$k 0.12$	$k 0.58$	$k 2.88$
w0.5h1	0.25	0.24	0.26	0.44	0.24	0.68
w0.5h3	0.41	0.44	0.49	0.57	0.44	0.86
w2h1	0.32	0.28	0.23	0.51	0.28	0.15
w2h3	0.76	0.69	0.62	1.12	0.69	0.39
Average	0.44	0.42	0.40	0.66	0.42	0.52

次に、パラメトリック解析で温度低下に大きく差が発生した w2h3 について α と k の値を変更した場合の $y=0.90$ m での温度低下分布と微小液滴混合比分布を Fig. 9, Fig. 10 に示す。温度低下分布について、 α を小さくすると加湿器近傍での温度低下が小さくなり、より遠くまで温度低下が見られた。 k が大きい時は加湿器近傍の温度低下が大きくなっていることが分かる。微小液滴混合比分布について、 α が小さいほど、そして k が大きいほどすぐに微小液滴が消滅していることが分かる。これは、式(5)より α を小さくすると微小液滴量が多い時は蒸発量が減少し、微小液滴量が多い時は蒸発量が上昇するためである。また、 k を大きくすると蒸発量が多くなり、微小液滴の減少が速くなる。

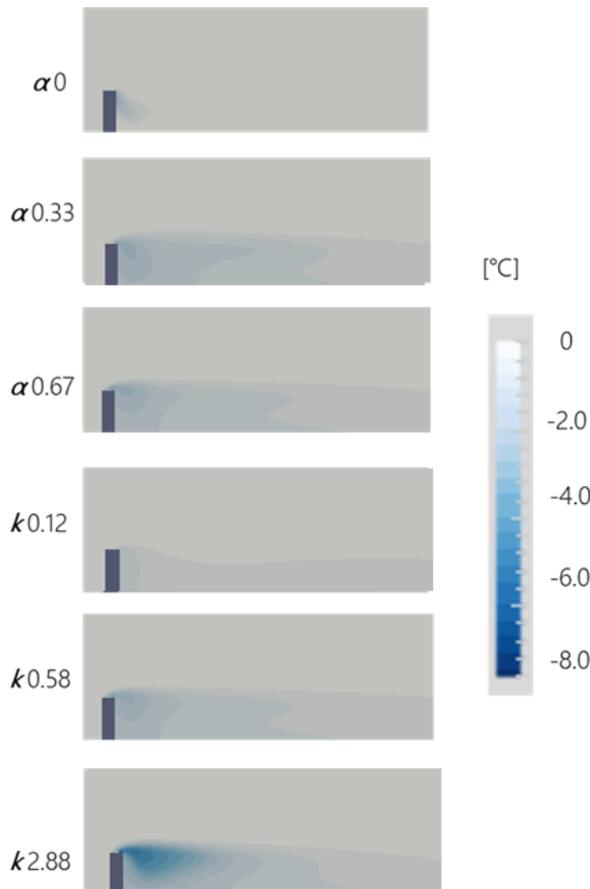


Fig. 9 Temperature decrease (w2h3) ($y=0.90$ m)

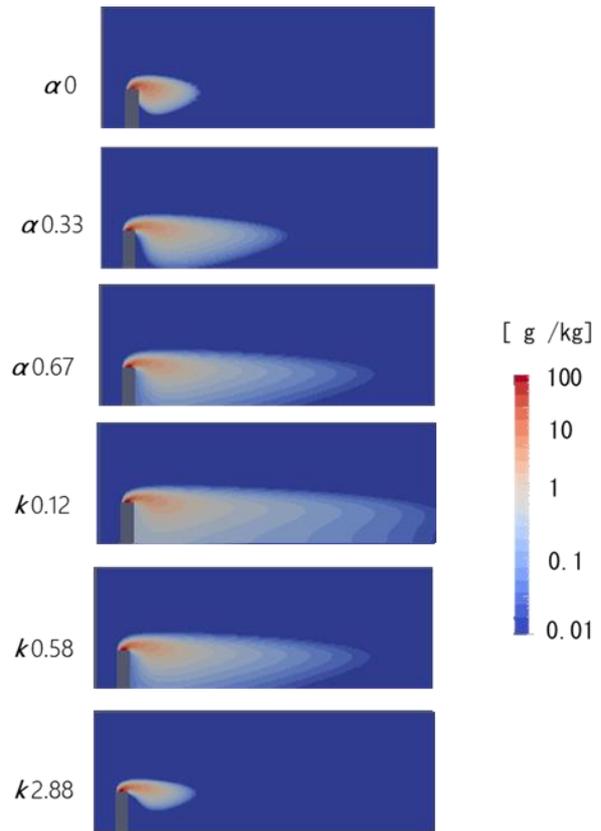


Fig. 10 Fine droplets mixing ratio (w2h3) ($y=0.90$ m)

4. 結論

本研究の結論を以下にまとめる。

- 1) 水の相変化モデルを導入した CFD モデルを風洞実験との比較によって精度検証を行い、精度向上のためパラメトリック解析を行った。
- 2) 微小液滴の蒸発速度に関し、粒径と粒子数を加味するため微小液滴混合比の係数に着目することで温度低下が変化するという結果が得られた。
- 3) 風速が小さく空气中に微小液滴量が多い状態で特に温度低下を過大評価した。
- 4) CFD 計算精度の向上のため、蒸発モデルや物質拡散について更なる改善が必要である。

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 21K14303 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Takashi Kurabuchi, U.Yanagi, Masayuki Ogata, Masayuki Otsuka, Naoki Kagi, Yoshihide Yamamoto, Motoya Hayashi and Shinichi Tanabe, Operation of air-conditioning and sanitary equipment for SARS-CoV-2 infections disease control, Japan Architectural Review, October 2021, vol.4, no.4, 608–620
- 2) Kessler, On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations, Meteorological Monographs, Vol.10(32), pp.1-84,1969