

室内温湿度場推定のための超音波式加湿器のモデル化と風洞実験による検証 Modeling of an ultrasonic humidifier for the estimation of indoor temperature and humidity fields, and validation using wind tunnel experiments.

○石原 裕貴 (大阪大学) 大屋 那央 (大阪大学)
松尾 智仁 (大阪大学) 嶋寺 光 (衛生大学)
近藤 明 (大阪大学)

Yuki ISHIIHARA*1 Naoto OOYA*1 Tomohito MATSUO*1 Hikari SHIMADERA*1 Akira KONDO*1
*1 Osaka University

In order to control the indoor thermal environment when using a humidifier, it is essential to accurately estimate the effects of the humidifier on ambient temperature and humidity. In this study, a phase change model originally developed for a meteorological model was modified and incorporated into a CFD model. The CFD model was validated by comparing it with wind tunnel experiments, in which the thermal environment with an ultrasonic humidifier was measured. The CFD model reproduced the tendency of temperature change associated with humidification though the temperature decrease was overestimated in some cases.

はじめに

冬季にヒートポンプ暖房を使用すると室内の相対湿度が低下する。低湿度の環境下では COVID-19 などのウイルスの不活化率が低下するほか、呼吸器官の防御機構に悪影響が及ぶため、感染症の拡大リスクが高まる¹⁾。そこで室内の乾燥を防ぐため超音波加湿器が用いられることがある。超音波加湿器から放出される微小な液滴は蒸発により湿度を上昇、温度を低下させるため、温熱環境を制御するためには加湿器が温湿度分布に与える影響の考慮が必要となる。そこで本研究では、気象分野で用いられる相変化モデルを室内用に修正してCFDモデルに導入するとともに、検証のためモデルの計算値を風洞実験結果と比較した。

から3倍程度となっている。超音波加湿器の寸法を Fig. 1 に示す。吹出口は直径 60 mm の円である。風洞実験のレイアウト図を Fig. 2 に示す。風洞の寸法は x, y, z 方向に 9.5 m, 1.8 m, 1.8 m である。風洞入口に風速計と温湿度計を設置し、流入空気の状態を測定した。加湿器は風洞入口から 1.0 m の位置に設置した。温度の測定点は、x 方向について加湿器吹出口との距離が 0.10 m から 1.00 m までは 0.10 m 間隔で、1.00 m から 7.00 m までは 0.50 m 間隔で 22 点、y 方向について加湿器を中心として 0.40 m 幅、z 方向について高さ 0.20 m から 1.20 m の 1.00 m 幅とし、y, z 方向は 0.10 m 格子で測定した。実験は加湿量と風洞風速を変更して 4 ケース行った。実験時の条件を Table 2 に、実験の様子を Fig. 3 に示す。

1. 風洞実験

風洞内に超音波加湿器を設置し、加湿器の風下内の温度変化を測定した。実験は大阪大学工学研究科研究用風洞で行った。本実験で用いた超音波加湿器の仕様は Table 1 に示す通りであり、加湿量は家庭用のものと比べて 2 倍

Table 1 Properties of the ultrasonic humidifier

Size	width:290 mm, length:190 mm, heith:1120 mm			
Mode	1	2	3	4
Amount of humidification [mL/h]	380	550	740	850

Table 2 Experiment case

Caes name	Humidifier			Wind tunnel		
	Wind velocity [m/s]	Water temperature [°C]	Amount of humidification [g/h]	Wind velocity [m/s]	Air temperature [°C]	Humidity ratio [g/kg]
h1w0.5	0.74	23.2	389.3	0.49	24.9	13.5
h1w2	0.74	24.1	443.4	1.98	26.7	13.6
h3w0.5	0.74	24.5	897.7	0.49	25.8	13.4
h3w2	0.74	24.3	888.1	2.01	27.3	14.6

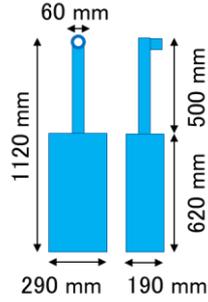


Fig. 1 Humidifier dimensions

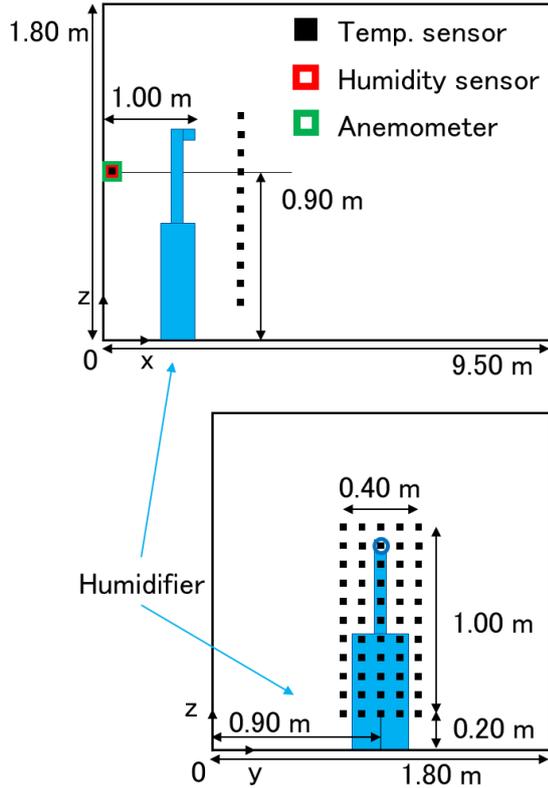


Fig. 2 Wind tunnel experimental layout

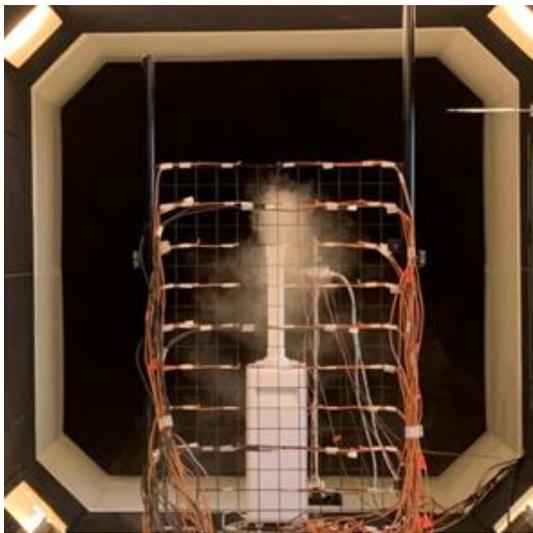


Fig. 3 Experimental scene

2. CFD モデル

2.1 相変化モデル

相変化モデルとして Kessler²⁾によって気象モデル向けに開発された相変化モデルを CFD モデルに組み込んだ。このモデルは空気中の水分を水蒸気、重力沈降しない微小液滴、重力沈降する粗大液滴の3相に分類し、3相間の相変化を扱う。気象モデル向けの相変化モデルを室内温熱環境のモデルに移植するに当たり、原モデルにおける微小液滴の瞬時蒸発仮定を破棄し、微小液滴の存在量によって蒸発速度が変化するように変更した。モデル式を式(1)~(5)に示す。

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

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

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

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

$$EP_m = (q_{vs} - q) * \left(\frac{m}{m_0}\right)^{\frac{1}{3}} * f(T) * k \quad (5)$$

t は時間、 M は粗大液滴混合比、 m は微小液滴混合比、 q は水蒸気混合比である。 v は風速、 U_{rf} は粗大液滴の終端落下速度、 K_{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を表す項、 CC は粗大液滴が微小液滴を捕集する効果、 EP_M は粗大液滴の蒸発項、 EP_m は微小液滴の蒸発項である。また、 a_{eff} は実効温度拡散率、 C_p は定圧比熱、 ρ は空気密度、 Q_p は相変化による潜熱発生量、 Q_o は外部からの加熱量、 q_{vs} は飽和水蒸気混合比、 m_0 は微小液滴混合比の初期値、 $f(T)$ は温度に関する補正項、 k は蒸発時間に関する係数である。

2.2 計算条件

モデルの検証のため、風洞実験を模擬する CFD シミュレーションを行った。シミュレーションには OpenFOAM-4.0 を適宜修正して用いた。非圧縮性定常流れを仮定し、温度変化による浮力の影響を考慮するためにブジネスク近似を導入した。乱流モデルには標準 k-ε モデルを用いた。計算領域は風洞を再現し、格子数は約 66 万である。超音波加湿器の吹き出し風速、水温、加湿量、及び風洞入口の風速、気温、乱流諸量、水蒸気混合比の境界条件には、風洞実験における測定値を用いた。風洞入り口の微小・粗大液滴混合比は 0 とした。

3. 結果

各ケースにおける温度分布の測定値と計算値を、加湿器からの距離が 1 m、2 m、3 m、4 m の 4 地点について Fig. 4 に、また測定面内の平均温度分布を Fig. 5 に示す。

なお、温度分布は風洞入り口からの温度低下量で表した。また加湿器の吹き出し口高さ周辺の熱電対では、熱電対の端子に液滴が付着したことで空気温度が正しく測定されていないと疑われる箇所が見られた。そのため、それらの位置については、Fig. 5 の平均温度低下量の算出からは除外した。

測定面での温度変化分布によると、計算値と測定値の双方において、風洞風速が小さいケースの方が、温度低下が見られる部分の幅はより広がり、その中心位置の高さは低下した。これは、液滴の密度が上昇することにより蒸発による温度低下が激しくなること、また冷やされた空気の滞留時間が長くなるため、相対的に沈降及び拡散の寄与が増大することが原因だと考えられる。一方、風洞風速が大きいケースでは、冷気が沈む前に遠くまで運ばれる。風洞風速が小さいケース (Fig. 4(a,c)) での加湿器からの距離が 3 m, 4 m の地点に着目すると、計算値の方が拡散の影響が比較的弱い。

平均温度変化分布によると、風洞風速が大きいケースでは、平均の算出時に除外した部分に冷気がとどまっているため (Fig. 4(b,d)), 平均温度変化は小さくなった (Fig. 5(b,d))。しかし、拡散により冷気が広がることで、風下ほど温度が低下する傾向が見られる。風洞風速が小さいケースでは、冷気の沈降及び拡散が大きい (Fig. 4(a,c)), 平均温度変化は大きくなった (Fig. 5(a,c))。なお、温度低下のピークは加湿器から 3.0 m 離れた地点となっているが、これは液滴が 3.0 m 輸送されるまでの間に蒸発が完了し、以降は拡散により冷気が測定範囲の外に広がるためだと考えられる。

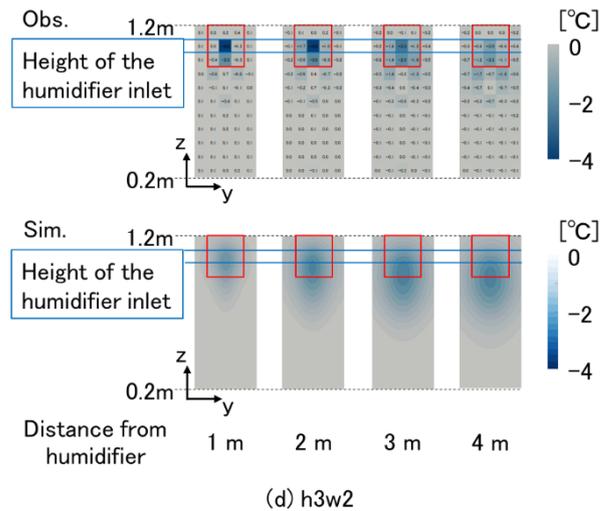
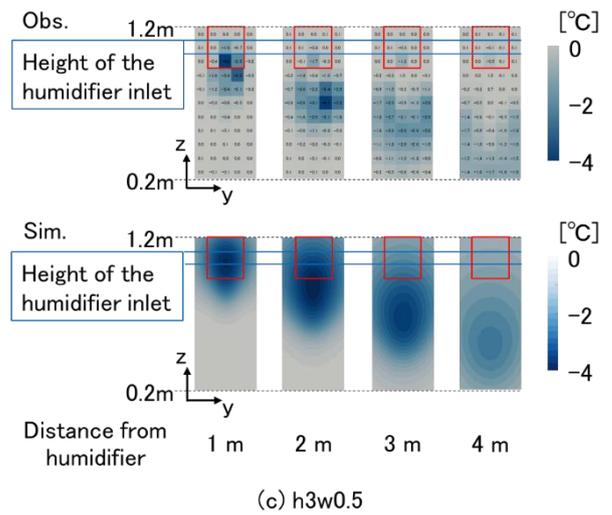
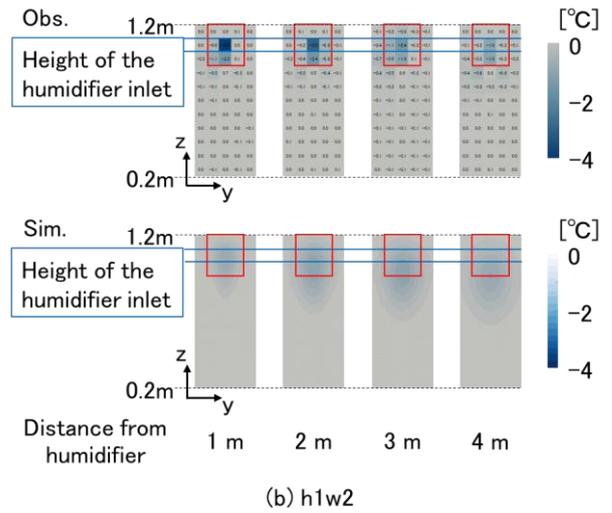
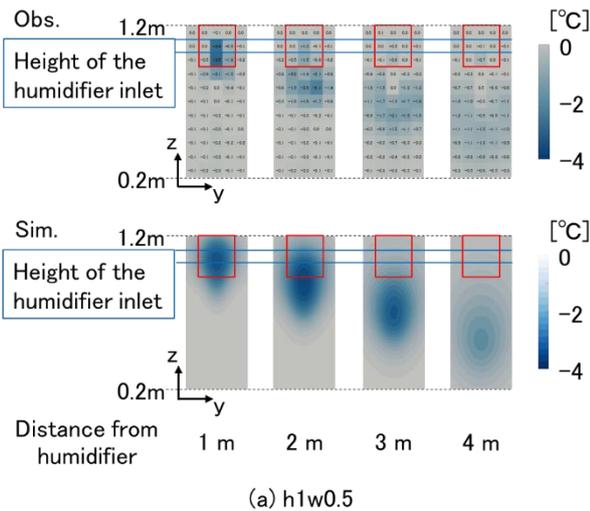


Fig. 4 Comparison of air temperature decrease in the experiment (upper) and the simulation (lower) of (a) h1w0.5, (b) h1w2, (c) h3w0.5, and (d) h3w2. (Red square shows the area in which the temperature might not measure correctly due to the adhesion of water droplets.)

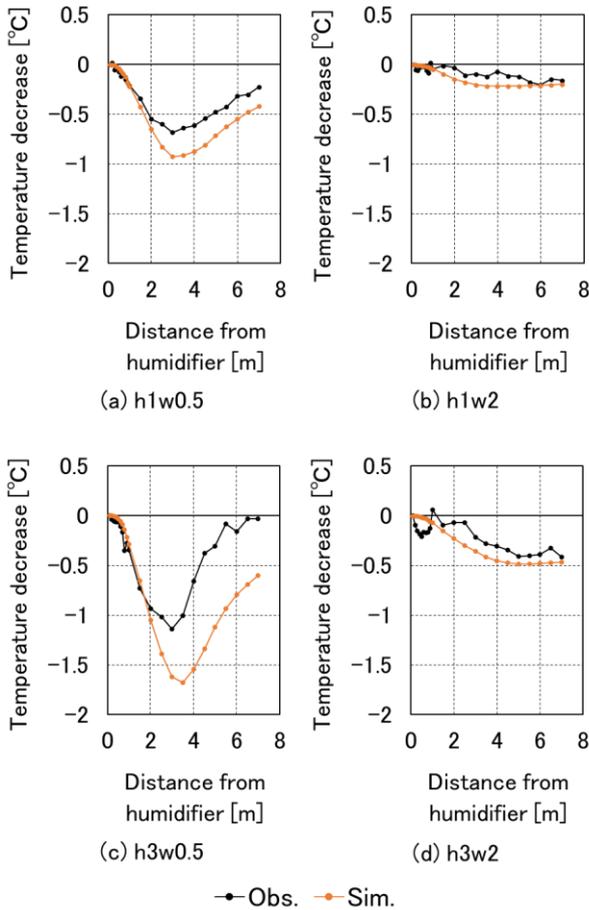


Fig. 5 Comparison of air temperature decrease averaged in observation slice in the experiment and the simulation of (a) h1w0.5, (b) h1w2, (c) h3w0.5, and (d) h3w2.

いずれのケースでも CFD モデルは平均温度変化の傾向を概ね再現したが、特に風洞風速が小さいケース (Fig. 5(a,c)) の、加湿器からの距離が 2m 以降の部分において、温度低下の過大評価が顕著に見られる。これは、拡散の影響を過小評価したことで、冷気が測定面にとどまったためだと考えられる。この原因としては、超音波加湿器の吹出口における乱流エネルギーを過小評価した可能性や、プラントル数、微小液滴のシュミット数を過大評価した可能性が考えられる。

蒸発過程について検討するために、CFD 計算の結果について、風洞の中央断面における温度変化分布と微小液滴混合比分布を Fig. 6, Fig. 7 に示す。なお、粗大液滴混合比分布については計算領域全域でほぼ 0 だったため割愛する。加湿量が多いケースの方が、単位体積空気あたりに供給される液滴量が多くなるため、温度低下は大きくなる。風洞風速が大きいケースでは、液滴の蒸発によって冷やされた空気の沈降があまり見られず、流れに沿って帯状の温度変化が見られた。また、微小液滴が蒸発する前に運ばれる距離は風洞風速が大きい方が長くなるが、風

速の違いによる到達距離の差は加湿量が多い方が大きくなった。これは、加湿量が多いほど超音波加湿器から放出される微小液滴が多くなるためだと考えられる。

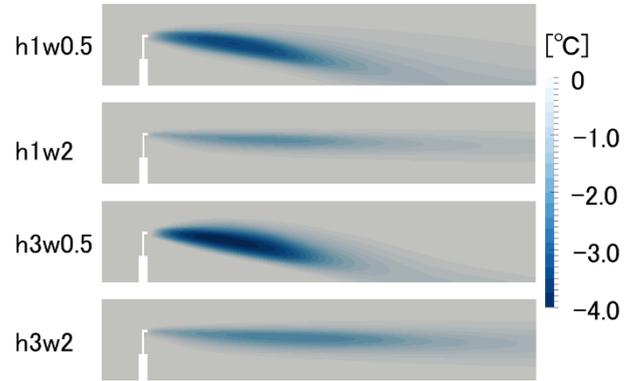


Fig. 6 Temperature decrease at the center of the wind tunnel

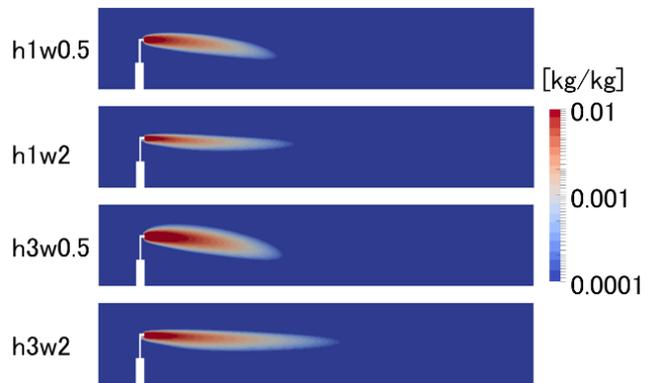


Fig. 7 Fine droplets mixing ratio at the center of the wind tunnel

4. 結論

本研究の結論を以下にまとめる。

- 1) 風洞実験にて液滴の蒸発による温度変化を測定し、加湿量や風洞風速が与える影響を分析した。
- 2) 水の相変化モデルを導入した CFD モデルは、風洞実験で測定した温度変化の傾向を概ね再現したが、特に風洞風速が小さいケースで、測定面の平均温度低下を過大評価した。
- 3) CFD 計算の精度向上のためには、拡散過程の改善が必要となると考えられる。

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, Shinichi Tanabe, Operation of air-conditioning and sanitary equipment for SARS-CoV-2 infectious disease control, Japan Architectural Review, vol.4, pp.608-620, 2021.
- 2) Edwin Kessler, On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations, Meteorological Monographs, Vol.10, pp.1-84, 1969.