

# 超音波加湿器の室内温熱環境への影響を表現するための粒径分布を考慮した 水の相変化モデルの開発

## Development of the Water Phase Change Model Considering Droplet Size Distribution to Evaluate the Effect of Ultrasonic Humidifier on Indoor Thermal Environments.

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

Yusuke KITAURA\*1 Naoto OOYA\*1 Yuki ISHIHARA\*1

Tomohito MATSUO\*1 Hikari SHIMADERA\*1 Akira KONDO\*1

\*1 Osaka University

When an ultrasonic humidifier is used to control indoor humidity, the room temperature is decreased by the latent heat of vaporization of the droplets. Accurate estimation of the change of temperature and humidity considering the effect of vaporization is essential for controlling the indoor thermal environment. In this study, a CFD model incorporating a water phase change model with droplet size distribution was developed to estimate the temperature and humidity change due to the use of an ultrasonic humidifier, and wind tunnel experiments were conducted to validate the model. The CFD model reproduced the wind tunnel experiments approximately. Model parameters related to microdroplet evaporation were adjusted to estimate air temperature and humidity better. In addition, a lognormal droplet size distribution was selected to improve temperature estimation accuracy.

### はじめに

室内の相対湿度は居住者の衛生に影響を及ぼす。冬季には特に、相対湿度が低いことによりウイルス飛沫が長時間空気中に滞留するため、インフルエンザや COVID-19 などの感染症の拡大リスクが増加する。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増加し、気化熱により温度を低下させるため、加湿器を使用する室内の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推定が必要となる。しかし、現状では水の相変化が生じている室内について、温度や相対湿度といった温熱環境を評価した研究は見当たらない。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温熱環境解析向けに改良して CFD に導入した。モデル内の微小液滴の蒸発項は粒径分布に依存するため、粒径分布として一様分布と対数正規分布を用いた場合をそれぞれ検討し、検証のためモデルの計算値を風洞実験結果と比較した。

### 1. 相変化モデル

相変化モデルとして気象分野で用いられる Kessler<sup>1)</sup>のモデルを導入した。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相に分類して扱う。超音波加湿器の影響評価においては、不飽和空気中に液滴が供給されるという大気中では起こり得ない現象を取り扱うため、Kessler<sup>1)</sup>のモデルをそのまま室内環境への適用することは不適切である。そのため、室内用 CFD への導入にあたり微小液滴の蒸発式を修正した。蒸発式は粒径分布の仮定が異なる2つのモデルを検討した。すなわち微小液滴の粒径分布が一様であると仮定した UPSD (Uniform Particle Size Distribution model)、粒径分布が対数正規分布に従うと仮定した LND (Logarithmic Normal Distribution model) である。UPSD の微小液滴の蒸発式を式 (1) に、LND の蒸発式を式 (2) に示す。

$$\frac{dq_v}{dt} = b * (q_{vs} - q_v) * \left(\frac{q_c}{q_{co}}\right)^\alpha * f(T) \quad (1)$$

$$\frac{dq_v}{dt} = b * (q_{vs} - q_v) * \left(\frac{S_c}{S_{c0}}\right) * f(T) \quad (2)$$

$q_{vs}$ は飽和水蒸気混合比,  $q_v$ は水蒸気混合比,  $f(T)$ は温度 $T$ に関する関数,  $q_c$ は微小液滴混合比,  $q_{c0}$ は代表微小液滴混合比 ( $2.0 \times 10^{-3}$  kg/kg),  $\alpha$ は微小液滴蒸発時の粒径・粒子数変化に関する係数,  $b$ は微小液滴の蒸発時間に関する係数,  $S_c$ は微小液滴表面積,  $S_{c0}$ は微小液滴表面積の代表値 ( $0.25 \text{ m}^2$ ) である。 $\alpha$ と $b$ はパラメトリック解析を行うことで風洞実験をよく再現するパラメータを探索した。探索は $\alpha = 0.33, 0.67, 1$  (UPSD),  $b = 0.5, 1, 1.5$  (UPSD, LND 共通) の範囲について行った。

## 2. 風洞実験条件・CFD 計算条件

風洞実験には大阪大学工学研究科 研究用風洞を用いた。風洞の寸法は  $9.5 \text{ m}$ ,  $1.8 \text{ m}$ ,  $1.8 \text{ m}$  である。風洞入口から  $1.0 \text{ m}$  の位置に超音波加湿器を設置し、加湿器風下の気温と液滴の粒形分布を測定した。気温は Fig.1 に示す位置に設置した熱電対で測定した。粒径分布は超音波加湿器から  $0 \text{ m}$ ,  $0.5 \text{ m}$ ,  $1.0 \text{ m}$  の3点に感水紙を設置し、感水紙の顕微鏡画像を画像処理することで取得した。実験は加湿量と風洞風速を変更して4ケース行った (Table 1)。実験ケース名は加湿量の大小を  $h3, 1$  で、風洞風速の大小を  $w2.0, 0.5$  で表している。

モデルの検証のため、実験を模擬するCFDシミュレーションを行い、測定値と比較した。シミュレーションには OpenFOAM-4.0 を用い、非圧縮性定常流れを仮定した。浮力の考慮のためブシネスク近似を導入し、乱流モデルには標準  $k-\epsilon$  モデルを使用した。境界条件には風洞実験における測定値を用いた。

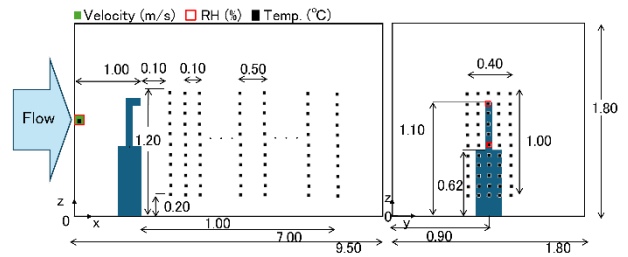


Fig. 1 Experiment layout

## 3. 測定結果・考察

実験ケースごとに風洞入口気温が異なるため、温度の測定結果は風洞入り口気温からの温度低下量として扱う。

各実験ケースについて、 $yz$  面内の9 (Fig.2) について、 $x$  座標ごとの温度低下分布を Fig.3 に示す。いずれのケースでも加湿器吹き出し口に近い  $y$  方向中央,  $z = 1.10 \text{ m}$  の点である8番の  $x = 1.00 \text{ m}$  前後で温度低下のピークが見られた。 $h1w0.5$  では加湿器から離れるにつれ測定点上部, 中部, 下部の順にピークが現れ,  $y$  方向外側の点である1番, 3番, 4番, 6番で温度低下が見られた。これは冷えた空気が浮力によって下降したこと, 液滴と空気が拡散したためと考えられる。 $h3w0.5$  では  $h1w0.5$  と同様の傾向が見られるが,  $h1w0.5$  と比べて全体的に温度低下量が大きくなった。これは空気中の液滴量が多くなったことで蒸発量が増加したためと考えられる。 $1w2.0$ ,  $h3w2.0$  では8番で  $-5^\circ\text{C}$  程度の温度低下が見られたが, その他の測定点では温度低下は見られなかった。これは風速が大きいため液滴や空気が拡散, 下降するより速く風下へ輸送されたためと考えられる。加湿量が増加すると温度低下量は大きくなった。これは空気中の液滴量が多くなり, 蒸発量が増加したため

Table 1 Experiment case

| Case name | Humidifier          |                        |                                 | Wind tunnel         |                      |                        |  |
|-----------|---------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|--|
|           | Wind velocity [m/s] | Water temperature [°C] | Amount of humidification [kg/s] | Wind velocity [m/s] | Air temperature [°C] | Humidity ratio [kg/kg] | Turbulent kinematic energy [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ] |
| h3w0.5    | 0.74                | 24.5                   | $2.50 \times 10^{-4}$           | 0.49                | 25.8                 | $1.34 \times 10^{-2}$  | $4.1 \times 10^{-3}$   |
| h1w0.5    | 0.74                | 23.2                   | $1.07 \times 10^{-4}$           | 0.50                | 24.9                 | $1.35 \times 10^{-2}$  | $0.84 \times 10^{-3}$  |
| h1w2.0    | 0.74                | 24.1                   | $1.22 \times 10^{-4}$           | 1.98                | 26.7                 | $1.36 \times 10^{-2}$  | $7.3 \times 10^{-3}$   |
| h3w2.0    | 0.74                | 24.3                   | $2.49 \times 10^{-4}$           | 2.01                | 27.3                 | $1.46 \times 10^{-2}$  | $6.2 \times 10^{-3}$   |

と考えられる。

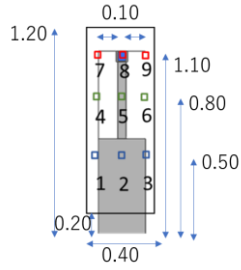


Fig. 2 9 measurement points in yz-plane

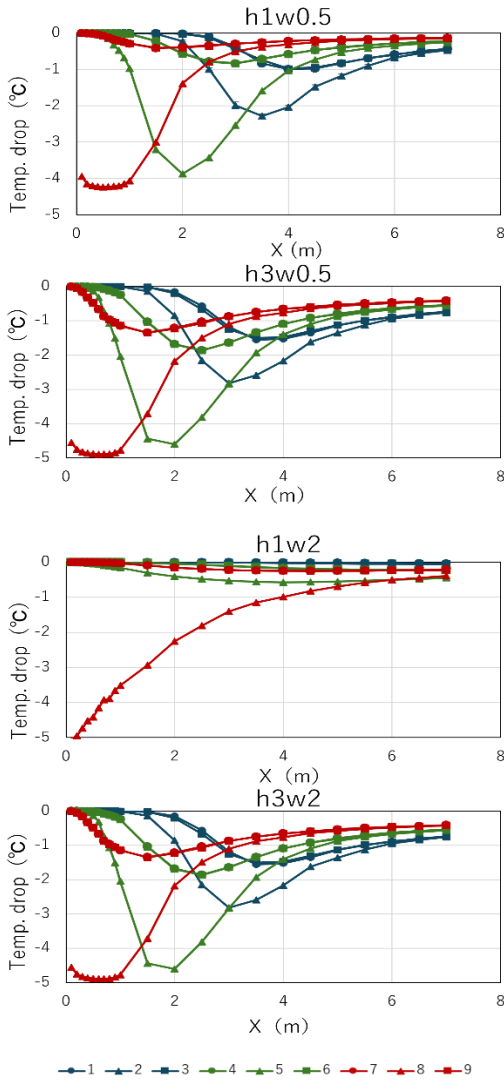


Fig. 3 Temperature drop for each measurement point in x direction

次に、粒径分布の測定結果について述べる。x = 0.00 m, 0.50 m, 1.00 m の 3 か所における液滴流れ中心について各実験ケースで測定した液滴半径のヒストグラムと、対数正規分布の近似曲線を Fig. 4 に、各距離、各実験ケースでの対数正規分布の近似曲線のパラメータ  $r_{med}$ ,  $\sigma$ , ヒストグラムと対数正規分布の

RMSE を Table 2 に、対数正規分布  $f(r)$  [1/m] の式を式 (3) に示す。加湿量が増えると粒径は大きくなった。これは液滴量が多くなると空气中で微小液滴の衝突・併合が起こりやすくなるためであると考えられる。また、風速にかかわらず、加湿器から離れるほど粒径分布の幅が小さくなった。これは粒径が小さい液滴ほど粒径に対する表面積が大きく蒸発速度が増加するため、加湿器遠方における粒径の小さい液滴の存在比が減少しているためだと考えられる。距離や実験ケースによっては測定値と対数正規分布近似に差が発生した点があるが、粒径分布はおおむね対数正規分布で表せた。

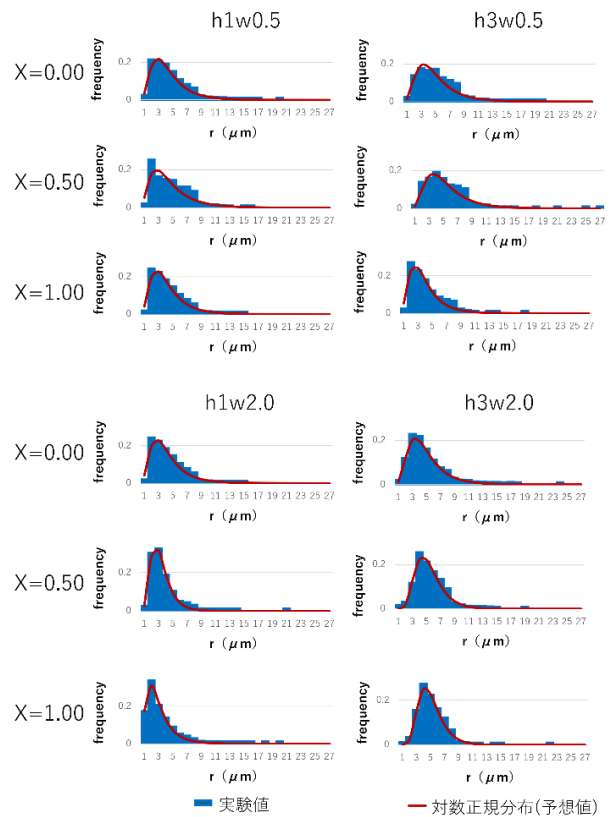


Fig. 4 Particle size distribution

Table 2  $r_{med}$ ,  $\sigma$ , and RMSE for each case

|        | x[m] | $r_{med}$ [μm] | $\sigma$ | RMSE  |
|--------|------|----------------|----------|-------|
| h1w0.5 | 0.00 | 3.9            | 0.55     | 0.009 |
|        | 0.50 | 3.9            | 0.61     | 0.020 |
|        | 1.00 | 3.7            | 0.54     | 0.011 |
| h3w0.5 | 0.00 | 4.4            | 0.52     | 0.009 |
|        | 0.50 | 4.7            | 0.54     | 0.012 |
|        | 1.00 | 3.4            | 0.53     | 0.013 |
| h1w2.0 | 0.00 | 3.6            | 0.52     | 0.008 |
|        | 0.50 | 3.1            | 0.42     | 0.005 |
|        | 1.00 | 2.6            | 0.58     | 0.007 |
| h3w2.0 | 0.00 | 4.3            | 0.50     | 0.004 |
|        | 0.50 | 5.1            | 0.36     | 0.008 |
|        | 1.00 | 4.8            | 0.36     | 0.007 |

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \frac{1}{r} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \left(\ln \frac{r}{r_{med}}\right)^2\right) \quad (3)$$

#### 4. CFD 計算結果・考察

測定値とパラメトリック解析結果の比較として風洞の中央断面 ( $y = 0.9 \text{ m}$ ) での各高さの温度低下を Fig. 5 に示す。各ケースともに、パラメータによって蒸発の動態が異なり、LND を用いて  $b = 1.0$  としたケースが最も実験値とよく合致した。

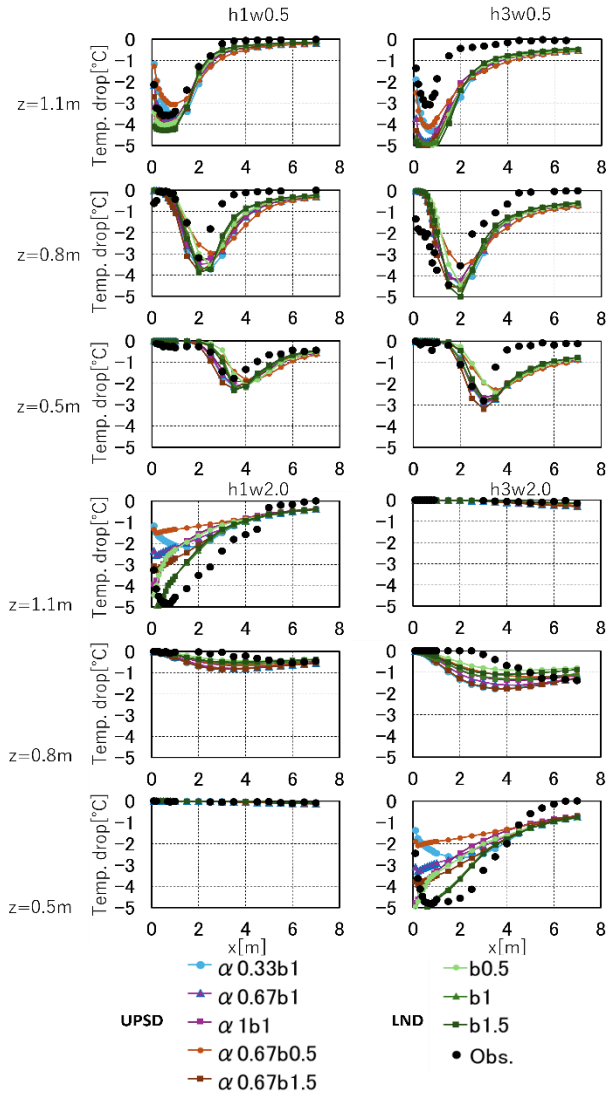


Fig. 5 Temperature drop in x direction

また温度変化の測定値とパラメトリック解析結果との RMSE を Table 3 に示す。この表から実験ケース全体として LNDb1 が最も測定値に近づいたといえる。また、加湿量と風速を変更した場合でも温度低下を良く再現した。LNDb1 での各ケースの風洞中央断面 ( $y = 0.9 \text{ m}$ ) における温度低

下分布,水蒸気混合比分布を Fig. 6 に示す。加湿量が多いほど広い範囲に微小液滴が広がり,それにより水蒸気, 温度低下が増加した。また風速が大きいと液滴が広がらず, 風下方向に細い液滴, 温度低下分布となった。

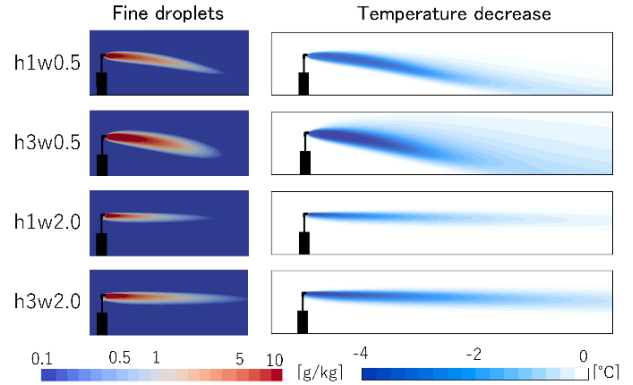


Fig. 6 Temperature drop and fine droplet distribution in the central cross section

Table 3 RMSE of temperature drop

|      |                   | h1w0.5 | h3w0.5 | h1w2.0 | h3w2.0 | Ave. |
|------|-------------------|--------|--------|--------|--------|------|
| UPSD | $\alpha$ 0.33b1   | 0.41   | 0.90   | 0.67   | 0.64   | 0.65 |
|      | $\alpha$ 0.67b1   | 0.36   | 0.92   | 0.57   | 0.49   | 0.59 |
|      | $\alpha$ 1b1      | 0.36   | 0.93   | 0.51   | 0.45   | 0.56 |
|      | $\alpha$ 0.67b0.5 | 0.43   | 0.89   | 0.79   | 0.70   | 0.70 |
|      | $\alpha$ 0.67b1.5 | 0.37   | 0.94   | 0.45   | 0.42   | 0.55 |
| LND  | b0.5              | 0.36   | 1.01   | 0.50   | 0.43   | 0.58 |
|      | b1                | 0.37   | 0.92   | 0.29   | 0.36   | 0.49 |
|      | b1.5              | 0.37   | 1.01   | 0.32   | 0.35   | 0.51 |

#### 5. 結論

本研究では、超音波加湿器使用時の温熱環境変化を表現するために相変化モデルを導入し、風洞実験結果を用いてモデルのパラメータを検討した。本研究の結論を、以下にまとめる。

- 相変化を導入した CFD は各実験ケースの温度低下をおおむね再現した。
- 微小液滴の粒径分布に LND を用いることでモデルの再現性が向上した。

#### 参考文献

- 1) Edwin Kessler, On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations, Meteorological Monographs, 10 (1969) 1-84