

BB2 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.

共生環境評価領域

08E20026 北浦 雄介 (Yusuke KITAUURA)

Abstract: When an ultrasonic humidifier is used to control indoor humidity, the room temperature is reduced by the latent heat of vaporization of the droplets. Accurate estimation of air temperature and humidity 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 better estimate air temperature and humidity. In addition, a lognormal droplet size distribution was selected to improve the accuracy of temperature estimation.

Keywords: CFD, Evaporation, Fine droplets, droplet size distribution, Wind tunnel experiment

1. 背景と目的

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、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用に改良して CFD モデルに導入し、粒径分布を一様または粒径分布が対数正規分布に従うと仮定したモデルを開発し、検証のためモデルの計算値を風洞実験結果と比較した。

2. 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 Kessler¹⁾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。大気中では大気が飽和状態であるときに液滴が発生しその液滴は拡散し混合しても蒸発することはないが、乾燥した室内で行う本研究では不飽和状態の空気に液滴を供給し混合すると蒸発してしまう。このことから Kessler¹⁾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ため、室内用 CFD モデルへの導入にあたり Kessler¹⁾のモデルにおける微小液滴の存在量、もしくは微小液滴の表面積によって蒸発速度が変化するように変更した。微小液滴の粒径分布が一様であると仮定したモデルを UPSD (Uniform Particle Size Distribution) モデル、粒径分布が対数正規分布に従うと仮定したモデルを LND (Logarithmic Normal Distribution) モデルとした。UPSD モデルの微小液滴の蒸発式を式(1)に、LND モデルの蒸発式を式(2)に示す。 q_v は蒸発量、 q_{vsw} 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 ($2.0 \times 10^{-3} \text{kg/kg}$)、 S_c は微小液滴表面積、 S_{c0} は微小液滴表

面積の代表値 (0.25m²) である。パラメトリック解析は $\alpha = 0.33, 0.67, 1$ (UPSD モデル), $b = 0.5, 1, 0.1, 1.5$ (UPSD モデル, LND モデル共通) について行った。

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

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

3. 風洞実験条件・CFD 計算条件

風洞内に超音波加湿器を設置し、加湿量と風洞風速を変更して風洞内の温度と粒形を取得した。風洞の寸法は 9.5m, 1.8m, 1.8m である。加湿器は風洞入口から 1.0m の位置に設置した。また図 1 に示す位置に熱電対を設置し、温度分布を測定した。実験は加湿量と風洞風速を変更して 4 ケース行った (表 1)。また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った。シミュレーションには OpenFOAM-4.0 を使い、境界条件には風洞実験における測定値を用いた。

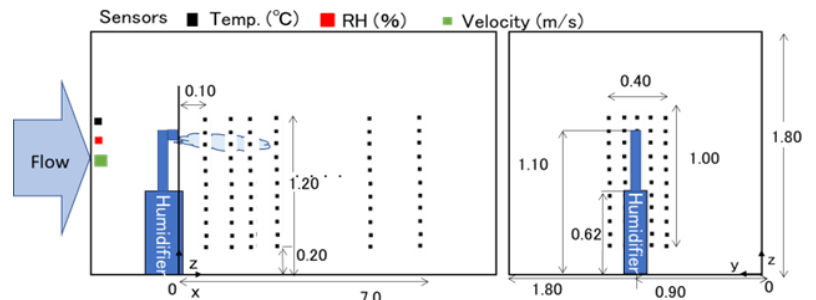


図 1 測定実験レイアウト

4. 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図 2 に示す。 α が大きいと温度低下のピークは大きく、加湿器から近くなった。これは α が大きいほど微小液滴が多い場所で蒸発速度が増加するためである(式(1))。 k が大きいと蒸発速度が増加するため加湿器に近い側で大きな温度低下となった。温度変化の測定値とパラメトリック解析結果との RMSE を表 2 に示す。この表から実験ケース全体として LND モデルの $b = 1.0$ 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。

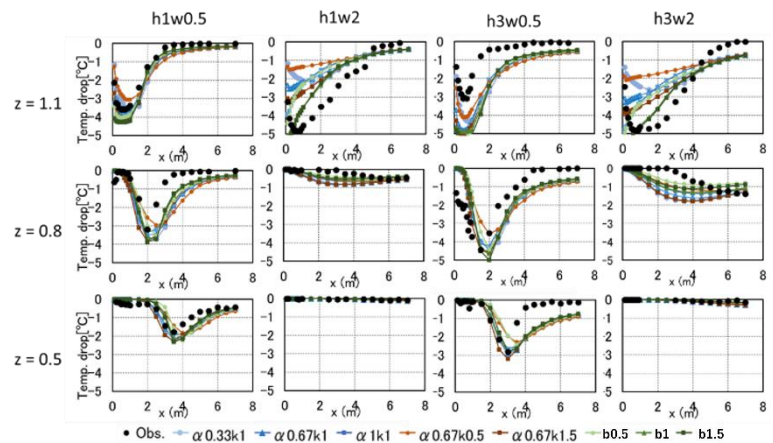


図 2 x 方向の各パラメータの温度低下

表 2 各パラメータの RMSE

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

5. 結論

本研究の結論を、以下にまとめる。

- 相変化モデルを導入した CFD モデル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 モデルを用いることで実験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