

CFDによる開放水面付設空間の温湿度分布・気流分布の数値シミュレーション

その2 湿度の境界条件に関する考察

CFD 水面 境界条件

正会員 〇森太郎⁴¹

正会員 西澤繁毅⁴²

正会員 絵内正道⁴³

正会員 羽山広文⁴⁴

I 研究の目的

最近、アトリウムなどの空間に水辺や植栽などが空間演出の装置として導入されることが多い。これらの空間演出装置の多くは加湿源になり、ガラス空間内では潜熱負荷や結露の原因となる場合がある。特に積雪寒冷地域ではガラス壁面における結露の問題があるため、シミュレーションによって空間の湿度分布における水温や流れ場の影響や結露の可能性の高い場所の情報などを得ることができ、設計の際に有用なツールになると考えられる。本報告の目的は、開放水面付設空間の温湿度分布、気流分布の数値シミュレーションを行うためのCFDのコード開発である。

II CFD解析の概要

1. 基礎方程式¹⁾

基礎方程式を表1に示す。対流場の計算には、一般的な非等温の標準k-ε 2方程式乱流モデルを用いた。離散化手法として有限体積法を、解法にはSIMPLE法を使用した。また、移流項の差分スキームには1次精度風上差分を用いている。境界条件は一般化対数法則に基づき壁関数を使用して

いる。解析コードは文献¹⁾に掲載されている計算コードを参照し、境界条件や湿度の輸送方程式などを加えた。

2. 密度変化と体膨張率²⁾³⁾⁴⁾

本報告のシミュレーションでは、水蒸気の含有量が変化したときに生じる湿潤空気全体の密度変化の流れ場への影響を考慮した。その方法としては式(5)の水蒸気の混合比の輸送方程式を連成させ、その結果として得られる絶対湿度分布による浮力効果を式(3)の重力の作用方向のNavier-Stokesの式のボディフォースに組み込んだ。また式(9)にもこの影響を組み込んだ。組み込み方法としては、近藤⁵⁾も用いている二種類(β₀: 温度とβ₁: 絶対湿度)の体膨張率を使用する方法を適用した。それぞれの値を以下に示す。

$$\beta_0 = 3.7 \times 10^{-3} \quad (11)$$

$$\beta_1 = -1.4671X_{w, sat} + 0.6079 \quad (12)$$

3. 境界条件

湿潤空気は、その境界面(水面や壁面)で物質伝達(結露・蒸発)を生じさせ、それに伴って潜熱が発現する。物質伝達は、いくつかの現象が結合して生じていることが多いが、現実的な方法として、式(13)のように壁面と第一セルのポテンシャル差と物質伝達率から伝達量を決定する方法を採用した。物質伝達率は式(14)に示すように、Modified Lewis Relationにより熱伝達率から算出した。

$$q_{X_w} = k_c (X_{w, sat} - X) \quad (13)$$

$$\frac{c}{k_c} = \gamma C_p \left(\frac{a}{D_{[H_2O]}} \right)^{2/3}, \quad \left(\frac{a}{D_{[H_2O]}} \right)^{2/3} \approx 0.82 \quad (14)$$

物質伝達が生じる条件を以下に示す。

- ①水温から決定される飽和絶対湿度 $x_{w, sat}$ と絶対湿度差が生じている空気が水面上を移動する場合: 基本的には、上記の式(13), (14)を使用して水面における水蒸気の伝達量を求めるが、但し、温度の低い飽和状態の空気が温度の高い水面に接触した場合、飽和している空気に対してさらに水蒸気を与えてしまうことになり、相対湿度の値は100%を超えてしまう。従って、今回のシミュレーションでは飽和している空気にはそれ以上の水蒸気の伝達が起こらないように制限を設けた。この条件に関しては一時避難的な措置であり、輸送方程式も含めた今後の検討が必要と考えられる。
- ②壁面に隣接するセルの絶対湿度が飽和絶対湿度を越える場

表1 基礎方程式

$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0$	(1)
$\rho \frac{\partial}{\partial x} (U \cdot U) + \rho \frac{\partial}{\partial y} (V \cdot U)$ $= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu_{eff} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu_{eff} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} - \frac{\partial}{\partial x} \left(P + \frac{2}{3} \rho k \right)$	(2)
$\rho \frac{\partial}{\partial x} (U \cdot V) + \rho \frac{\partial}{\partial y} (V \cdot V)$ $= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu_{eff} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu_{eff} \left(\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right\} - \frac{\partial}{\partial y} \left(P + \frac{2}{3} \rho k \right)$ $+ \rho \beta_0 (T - T_w) + \rho \beta_1 (X_{w, sat} - X_{w, w})$	(3)
$\rho C \frac{\partial}{\partial x} (U \cdot T) + \rho C \frac{\partial}{\partial y} (V \cdot T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right)$	(4)
$\frac{\partial}{\partial t} (X_{w, w}) + \frac{\partial}{\partial x} (U \cdot X_{w, w}) + \frac{\partial}{\partial y} (V \cdot X_{w, w})$ $= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_{[H_2O]}}{\rho} \frac{\partial X_{w, w}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{D_{[H_2O]}}{\rho} \frac{\partial X_{w, w}}{\partial y} \right)$	(5)
$\rho \frac{\partial}{\partial x} (U \cdot k) + \rho \frac{\partial}{\partial y} (V \cdot k) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + P_k + G_k - \rho \epsilon$	(6)
$\rho \frac{\partial}{\partial x} (U \cdot \epsilon) + \rho \frac{\partial}{\partial y} (V \cdot \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_1 P_k - C_2 \rho \epsilon + C_3 G_k)$	(7)
$P_k = \mu_t \left\{ 2 \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} \right)^2 \right\}$	(8)
$G_k = \epsilon \beta_0 \frac{\mu_t}{\rho \sigma_\epsilon} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \epsilon \beta_1 \frac{\mu_t}{\rho \sigma_\epsilon} \left(\frac{\partial X_{w, w}}{\partial y} \right)$	(9)
$\mu_{eff} = \mu + \mu_t = \mu + C_\mu \rho k^2 / \epsilon \quad \lambda_{eff} = \lambda + \lambda_t = \lambda + \mu_t / Pr_t$	(10)
$C_\mu = 0.09, \quad C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92 \quad C_3 = \begin{cases} 1.44 & (G_k > 0) \\ 0 & (G_k < 0) \end{cases} \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$	

Numerical simulation of distribution of air temperature, humidity and velocity in the large space with the pond by using CFD analysis

Part2 An Examination of boundary condition of moist transfer

MORI Taro et. al.

合：壁面に対して凝縮が生じるように設定した。物質伝達率の条件は①と同じである。また結露が生じると、凝縮した水分は結露水として壁面に保持され、その壁面は計算上は薄い水面（温度は断熱条件により空気温と同値である）として仮定した。したがって接する空気の状態により、蒸発も凝縮も生じるようになる。

潜熱の移動については、熱伝達率の違いから、一般的には境界面に隣接する壁面が熱の発生と吸収の場所となるが、次節に示すように、本報告の解析モデルは、一定温度の水面を除いて断熱壁によって構成されている。そのため水面では温度一定を仮定しているので、特に潜熱の移動は考えていない。また壁面では壁面に隣接するセルの空気が熱の発生、吸収場所となるようにした。

4. 解析モデル計算ケース

図1に解析モデルを示す。高さ20[m]、幅20[m]の水面が付設された空間を想定した。メッシュの分割数は重力の作用方向、左右方向ともに100+2である。床面には左側の壁面から1.9m～5.7mの位置[水面1]と、11.5m～15.3mの位置[水面2]に付設水面を設けた。設定水温を図1内に示してある。計算開始時は空間全体を15°C、80%の空気が満たすように初期値を設定したので、計算開始時は温度の高い方の水面は蒸発面、低い方の水面が凝縮面となっている。また水面上には熱伝達率、物質伝達率を促進させるために右向きに0.05m/sの風速を与えた。

III 計算結果と考察

図2に速度ベクトル図を示す。Case1では右側に温度の高い水面（蒸発面）があるため、そこからの上昇流により、空間内には時計回りの流れが形成される。またCase2の場合はその逆の流れが形成された。

図3にCase1の場合の絶対湿度分布、相対湿度の分布を示す。床面の右側に蒸発面があり、その付近の絶対湿度の値の高くなっている様子がわかる。今回のように蒸発面と凝

縮面が空間内に並存する場合でも、蒸発は上向きの現象となるため、周辺の流れ場の影響でポテンシャルの低い空気が供給されやすく、相対湿度による水分移動の制限をつけない場合空間の相対湿度はほとんどの個所で100%を越えてしまう。⁶⁾しかし今回の様に飽和している空気に対してはポテンシャル差がある場合でも移動を生じないようにした結果、空間内の相対湿度の平均値が100%を下回るようになった。

図4はCase2計算終了時の結露水量と壁面に隣接するセルに発生した潜熱の量を示す。床面では水面近傍で結露水量が多く、またCase2の場合、図2からも分かるように水面1で蒸発した空気が左側の壁面に沿って上昇するためその近辺で結露水量が多くなっている。またこの結露水に伴って潜熱の発現が起こっているのが分かる。

【参考文献】

- 1) 荒川, 1994, 数値流体力学
- 2) 森・絵内・荒谷: 大規模吹き抜け空間を対象とした温湿度・気流の数値解析手法の提案, その2 各層浮力の温度場・湿度場・流れ場への影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1997年9月 PP.399-34
- 3) 長澤・近藤・藤村・入交, CFDにおける湿度による浮力効果及びブレイスの関係, 1997年度日本建築学会関東支部研究報告集, PP.297-300
- 4) 藤村・近藤・村上・加藤・長澤: 気流と物質拡散（湿気輸送）の連成解析による室内温度・湿度分布に関する研究（その1）（その2）, 1998.9, 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP.688-690
- 5) 森・絵内・羽山: CFDによる開放水面付設空間の温湿度分布・気流分布の数値シミュレーションその1, 1999.3, 空気調和衛生工学会北海道支部学術講演梗概集, PP.

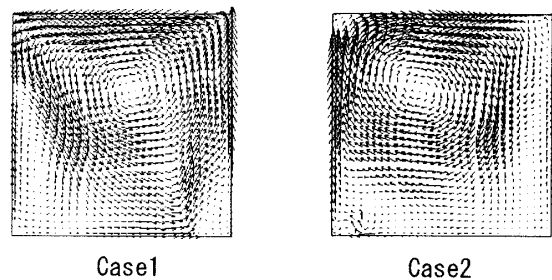


図2 速度ベクトル図

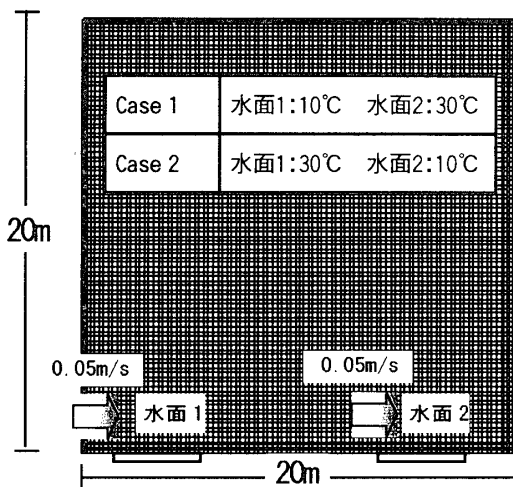


図1 解析モデル

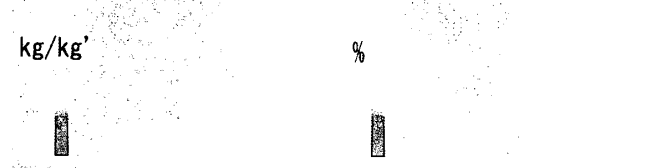


図3 Case1の絶対湿度分布と相対湿度分布

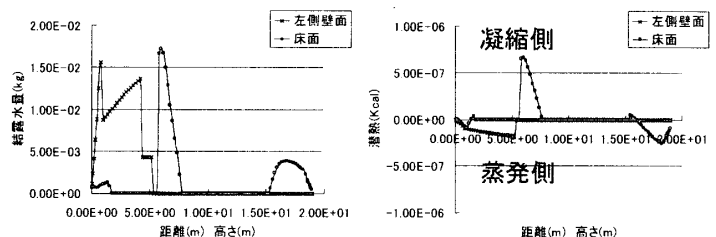


図4 Case2の場合の壁面の状態

*1 北海道大学大学院工学研究科 助手・工博
 *2 北海道大学大学院工学研究科 大学院生・工修
 *3 北海道大学大学院工学研究科 教授・工博
 *4 北海道大学大学院工学研究科 助教授・工博

Instructor, Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.
 Graduate Student, Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Ma. Eng.
 Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.
 Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.