

冷却流水面を有する屋内公開空地のCFD解析に関する研究

正会員 ○会田悟史*1
同 羽山広文*3

同 絵内正道*2
同 森 太郎*4

冷却流水面, CFD, 蒸発, 凝縮

1. はじめに

屋内公開空地に設けられた滝や池などの水を低温制御した場合、発湿源となっていた流水面は、凝縮による除湿と水面からの輻射により、水辺周辺に対する涼房装置へと変化する。本報では、屋内公開空地を想定した、冷却流水面に対するCFD解析を行い、流水の温度制御による周辺の温度場、気流場の影響を詳細に把握することを目的とする。

2. 解析の概要

2.1 流水面の蒸発・凝縮性状

流水面からの蒸発量・凝縮量の算出には、既往の研究¹⁾²⁾における実験から実験式を導き、これを用いた。実験時の流水表面温度は以下のように類推した。流水面の法線に沿って限りなく流水面に近づくと、空気の状態は空気線図における等エンタルピー線に沿って変化し、温度 t_{sa} 、相対湿度100%の状態になる。水表面温度 t_s は相対湿度100%の線上かつ、 t_{sa} と t_w の間にあると考えられ、その位置は、内分比 β を用いて、以下のように定義した。

$$t_s = (1 - \beta)t_w + \beta t_{sa} \quad (1)$$

気流速毎に β を変化させて直線近似を行った結果、 β の最適値(平均値)は水平流水面で0.479、流下水面では0.374となった。この値を用いて、実験結果を整理した結果を図2に示す。さらに直線の傾きを風速の一次関数として近似し、以下の実験式を得た(図3)。

水平流水面:

$$Z = (0.2189V + 0.0954)(f_s - f_a) \quad [g/m^2h] \quad (2)$$

流下水面:

$$Z = (0.0991V + 0.1411)(f_s - f_a) \quad [g/m^2h] \quad (3)$$

本解析では湿度境界条件にこの式を用いた。

2.2 基礎方程式³⁾

本解析では、乱流モデルに $k-\epsilon$ 2方程式モデルを用い、蒸発・凝縮による影響を正確に見るために、湿度差による浮力効果を組み込んだ。表2に本解析で用いた基礎方程式を示す。

離散化は有限体積法を用いて行い、解法にはSIMPLE法を使用した。また、差分スキームは中心差分と風上差分のハイブリッド法を採用した。

2.3 解析モデル

解析対象モデルを図6に示す。これは、既報の実験⁴⁾に用いられた実験室をモデル化したものである。実験室のZ方向中心部分に対称面を設定して、水面に向かって右半分を計算領域とした。

2.4 解析条件

表3に既往の研究で行われた実験の設定条件と結果(の一部)を示す。本解析では、この実験条件を想定した条件(CASE-

表1 記号

t_w : 流水層温度 [°C]	ρ : 密度 [kg/m ³]
t_a : 空気温度 [°C]	μ : 粘性係数 [Pa·s]
t_s : 水表面温度 [°C]	C_p : 定圧比熱 [J/kg·K]
t_{sa} : 空気のスaturated温度 [°C]	λ : 熱伝導率 [W/m]
f_s : 温度 t_s における飽和水蒸気圧 [Pa]	D_x : 水蒸気の拡散係数 [m ² /s]
f_a : 空気の水蒸気分圧 [Pa]	k : 乱れエネルギー [(m/s) ²]
Z : 蒸発量(凝縮量) [g/m ² h]	ϵ : エネルギー散逸率 [-]
U_i : 各方向速度 [m/s]	σ_T : 乱流プラントル数 [-]
P : 圧力 [Pa]	σ_X : 乱流シュミット数 [-]
T : 温度 [°C]	β_T, β_X : 体膨張率 [1/°C], [(kg/kg) ⁻¹]
X : 絶対湿度 [kg/kg]	

表2 支配方程式

連続の式	$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$
運動方程式	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) - \rho g_i (\beta_T (T - T_0) + \beta_X (X - X_0)) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$
熱輸送方程式	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i C_p T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_T \quad (6)$
湿気輸送方程式	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i X) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_x \frac{\partial X}{\partial x_i} \right) + S_X \quad (7)$
k輸送方程式	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu \sigma_k}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k + G_k - \rho \epsilon \quad (8)$ $P_k = \mu \left[2 \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)^2 \right] \quad (10)$
ϵ 輸送方程式	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu \sigma_\epsilon}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_1 P_k - C_2 \rho \epsilon + C_3 G_k) \quad (9)$ $G_k = -g_i \left[\beta_T \frac{\mu}{\sigma_T} \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \beta_X \frac{\mu}{\sigma_X} \left(\frac{\partial X}{\partial x_i} \right) \right] \quad (11)$
$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon \quad (12)$	$\mu_\sigma = \mu + \mu_t \quad (13)$
$\lambda_\sigma = \lambda + \frac{C_\lambda \mu_t}{\rho \sigma_X} \quad (14)$	$D_\sigma = D_x + \frac{\mu_t}{\rho \sigma_X} \quad (15)$
$C_\mu = 0.09 \quad C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92 \quad C_3 = 1.44 (G_k < 0; C_3 = 0)$	
$\sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad g_i: (g_1 = g_2 = 0, g_3 = -9.8) \quad (16)$	

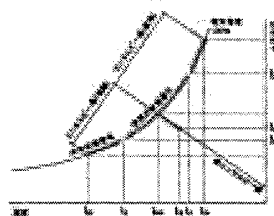
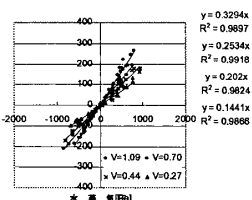
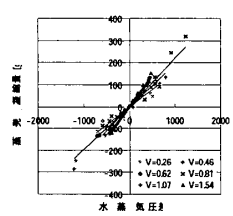


図1 断熱飽和温度と水表面温



水平流水面



垂直流下水面

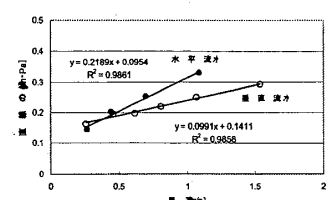


図3

A Study on CFD Analysis of Indoor Open Space Adopted with Cool Falls or Ponds

AIDA Satoshi et al.

2. CASE-3) に、水温をさらに低くしたCASE-1の、計3条件を解析条件として設定した。(表4)

3. 解析結果

解析の結果と既往の研究⁴⁾で行われた実験の結果を図5-図7に示す。切断位置は流水面中央部(対称面位置)である。温度・湿度のグラフは、流水面(池)から高さ100mmと450mmにおける値を示している。グラフのX軸には流下水面(滝)からの距離[m]をとった。

3.1 実験との比較

気流を比較すると、流水面に接する空気は解析と実験でほぼ同様の流れが見られるが、池の上部の流れが、実験では右下方向であるのに対し、解析では左下方向となっている。これは、池の直上に冷気の積層が形成されており、滝によって下に巻き込まれた空気はこの冷気積層の上を流れていくためだと考えられる。本解析では、流水面での速度境界条件を移動する壁面と同様に速度を一定値で与え、対数則を適用した。しかし実際の流れにおける流下水面下部では、NonSlipからFreeSlipに近くなると考えられるため、そのモデルの差異によって流れの差が生じたのではないかと推測される。

温度分布を比較すると、実験結果、解析結果ともに、滝に接する部分と池の上部に温度の低下が見られる。実験では、滝壺の温度が最も低い値となっているが、解析では池中央部の温度に比べ高くなっている。これは前述のように、本解析では流下水面下部において、流速が気流速度に寄与する割合が大きいため、滝壺における冷気の層が流れ方向に拡散し薄くなってしまったためと考えられる。

湿度分布は、解析と実験でほぼ同様の傾向が見られる。

3.2 気流分布

気流分布の解析結果を見ると、水温が低くなるにつれ、流水面近傍の風速が大きくなること確認できる。特に下向きの成分に関して顕著に表れており、これは設定水温が低くなるにつれ、流水面近傍の温度の低下と凝縮による湿度の低下により、下向きの体積力が大きくなるためと推測される。

3.3 温度分布

温度分布を見ると、水温の差は、水面近傍の空気温に対してのみ顕著に表れており、滝壺周辺に向かって急勾配の温度勾配を形成していることがわかる。水温を低くするにつれ、温度低下の範囲は広がっていることが確認できる。

3.4 湿度分布

湿度分布を見ると、いずれのケースにおいても流水面近傍の相対湿度は高くなっているが、CASE-1, 2に比べ、CASE-3の空

間の湿度は著しく高い値を示している。これは、CASE-1, 2では凝縮が起きているのに対し、CASE-3では蒸発が起った結果と考えられる。

4. まとめ

本論文では、冷却流水面の実験結果を再整理し、蒸発・凝縮量を求める実験式を作成すると共に、その式を用いて、屋内公開空地を想定した冷却流水面のCFD解析を行った。その結果、以下に示す知見を得た。

- (1)流水面の蒸発・凝縮量を、水表面と空気の水蒸気圧差のみを説明変数として表すことができた。(2)CFD解析を行い、水温変化が与える影響が確認できた。(3)実験と比較した結果、流水面近傍流れを正確に再現するには、流下水面下部の表面せん断応力のモデルについて検討を加える必要があることがわかった。

【参考文献】

- 1)冷却流水面による大規模吹き抜け空間の調湿・除湿 第1報 絵内ほか 空気調和衛生工学会論文集 No.72 (1999)
- 2)冷却流水面による大規模吹き抜け空間の調湿・除湿 第2報 絵内ほか 空気調和衛生工学会論文集 No.89 (2003)
- 3)数値流体工学 荒川忠一 1994 東京大学出版会
- 4)屋内公開空地に付設した冷却流水面によるクールスポット形成に関する研究 山本英輔 2002年度 修士論文

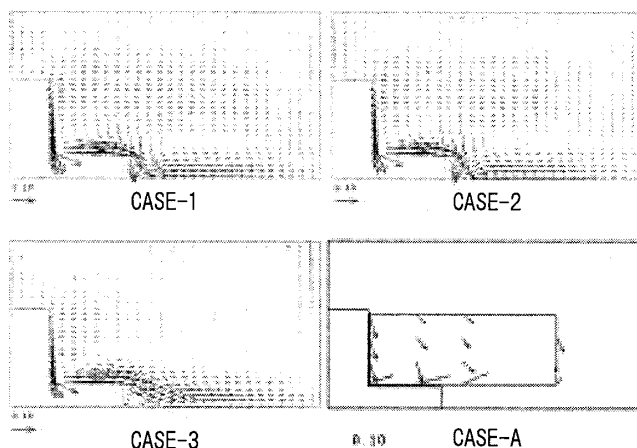


図5 気流分布

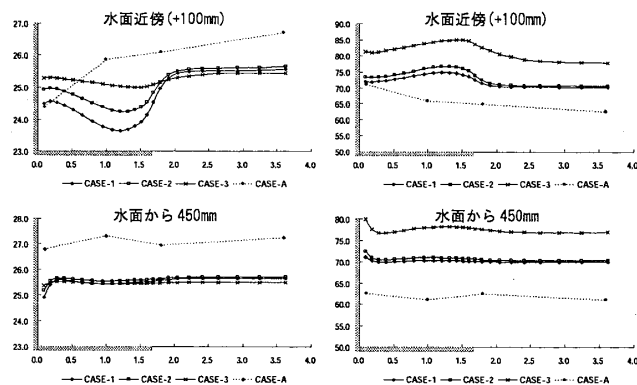


図6 温度分布

図7 湿度分布

表3 実験条件⁴⁾

	CASE-A	CASE-B
冷水	ON	-
空調	26°C	26°C
加湿	ON	ON
流量	[kg/s]	0.171
出口水	19.1	24.4
滝壺水	19.7	24
出口水	19.6	24.2
水表面温	18.7	23.8
露点温	19.2	18.5

表4 解析条件

	CASE-1	CASE-2	CASE-3
吹出し空	26°C	26°C	26°C
流速	流下水面 0.46	70%	
	流下水面 9.4[m/s]		
流水温	15.0	18.7	23.8

*1 北海道大学大学院工学研究科修士課程
 *2 北海道大学大学院工学研究科教授・工博
 *3 北海道大学大学院工学研究科助教授・工博
 *4 北海道大学大学院工学研究科助手・工博

*1 Graduate School of Eng., Hokkaido Univ.
 *2 Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng
 *3 Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng
 *4 Instructor, Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng