蒸発冷却機能を持つ孔あきレンガ壁体により形成される 微気候の予測に関する研究

STUDY ON PREDICTION OF MICRO-CLIMATE FORMED BY A PASSIVE COOLING WALL MADE OF VENTILABLE BRICKS WITH EVAPORATIVE COOLING EFFECT

小栗 健*, 梅干野 晃**, 白井一義***, 奥田知康****

*Ken OGURI, Akira HOYANO, Kazuyoshi SHIRAI
and Tomoyasu OKUDA*

A product of "passive cooling wall (PCW)" system has been developed and evaluated its cooling effect. The system consists of water-permeable ventilable bricks with evaporative cooling effect to offer a comfortable spot at the outdoor and semi-outdoor space. Knowing the micro-climate around the setting area of the system, the predicable method of cooling effect at the planning is necessary to make the system practical. A analytical model based on the ($k-\epsilon$) turbulence model is used to verify the availability of this predicable method. A correlation between the date of calculation and experiment was examined in comparison with the data of average of temperature, humidity and velocity. The tendency of distribution of temperature and humidity was good corresponded on the whole, except for velocity.

Keywords: *passive cooling, evaporative cooling, ventilable brick, outdoor and semi-outdoor, ventilation, numerical simulation*

パッシブクーリング、蒸発冷却、孔あきレンガ、屋外・半屋外空間、通風、数値計算

1. はじめに

近年、都市部を中心とした夏季熱環境の悪化が様々な形で報じられており、屋外・半屋外空間で快適に過ごすことが困難な状況になりつつあると考えられる。このような状況から、著者らは屋外・半屋外空間に自然エネルギーを利用して快適環境を形成するために透水性孔あきレンガを用いた蒸発冷却壁体（以下PCW）を開発し、屋外・半屋外空間における冷却効果の評価を行ってきた^{1)・2)}。PCWの冷却効果は周辺の微気候、とりわけ外部風の風向風速、気温、湿度等に影響されることが明らかになっており、実際に建築空間へ適用する場合には設計段階で外部の微気候を十分に把握し、PCWの配置構成による冷却効果の現れ方を予測できる手法の開発が望まれる。

PCWのような熱・水分エネルギー収支を組み込んだ乱流モデルについては多くの研究事例があり、例えば、吉田、村上らの「対流・放射・湿気連成解析手法」が、 $k-\epsilon$ モデルベースの精緻なものとして確立されている³⁾。しかし、これらの手法が、PCWのような蒸発冷却を伴った孔あき壁体によって形成される流れ場を対象に検討されたことはなく、その適用に関しては興味深い。

このような状況から、本研究では既往の主要な解析モデル及び計算手法を用いて、どの程度PCWにより形成される微気候が再現で

きるのか検討することとした。

ただし、既往の予測手法そのものの精度を発展させることに目的をおいているわけではなく、環境設計のレベルで有効となり得る程度の情報、すなわち、PCWにより形成される気候分布を、現存する手法を活用して予測できるか否かを検討するものである。その際、解析モデルについては、抵抗物体としてのPCWの扱いを工夫してモデル化する。

一方、PCWによって形成される微気候については既報⁴⁾にて詳細に解析しており、ある一定条件の風が吹くような定常的な状況以外の非定常条件下で大変興味深い知見が得られており、気温や風速などの「ゆらぎ」が「涼しさ」を感じさせる一要因になっていることを確認している。しかし、設計支援を目的とした予測をするのであれば、まずは認知されている予測手法を利用し、かつ定常状態を扱うことが妥当であり、また、一定方位の風向に対して形成される微気候を予測できることも有用になるという考えに達した。

本報では、そのような背景から、既往のモデルとして、1)樹木廻りの気流解析である程度認知されている平岡ら⁵⁾のモデルによる予測手法を採用し、2)PCWに特有の抵抗係数（圧力損失）、対流熱伝達等については風洞実験で求めた値を利用してシミュレーションを行った。3)一方で、実測によりPCW廻りの微気候の把握を

* INAX 技術統括部空間デザイン研究所
** 東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授・工博
*** 太平洋セメント 博士(工学)
**** 山下設計

Space Design R&D Center, INAX Corporation
Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Taiheiyo Cement Corporation, Dr. Eng.
Yamashita Sekkei

行くと共に一定方位の風向で風速も安定した状況でのデータを整理し、4)予測結果と実測結果とを比較してそれらの特徴の差異について考察した。

2. 解析モデル

2.1 モデル選定の考え方

前章で述べたように、PCWによって形成される微気候の特徴には「ゆらぎ」が挙げられるが、この「ゆらぎ」のような変動周期の短い非定常的な現象を扱う予測手法としては、乱流モデルとしてLESなどの適用が考えられる。LESは一般に計算格子を十分に小さく取ることにより高精度で信頼の高い予測が期待できるが、細かい差分格子間隔を必要とすることから膨大な記憶容量と長い計算時間が必要となり、経済性の面ではかなり劣ると考えられる。

一方、設計支援のレベルでは、現状認知されている解析モデルを利用して定常状態における予測を行うことが妥当であると考え、一定方位の風向に対して形成される気候分布を予測できることが環境設計の初期段階で有用な情報になると考えた。

このような定常状態を扱う乱流モデルとして広く利用されているものに2方程式モデルの1つであるk-εモデルがあり、適用性の広さ、経済性、信頼性などの点でバランスが良いと考えられる。k-εモデルについては本研究が対象としているようなスケールでの精緻な熱環境把握には、乱流エネルギーk、浮力項、潜熱エネルギー、あるいは壁面近傍での精緻な物理現象の扱いから、吉田、村上らのモデル³⁾、村上、加藤らのモデル⁶⁾、平岡らのモデル⁵⁾、⁷⁾など様々な研究事例があるが、モデル選定にあたっては、PCWの組み合わせなど設計への効率的な反映に適した手法であることやPCWと類似した流れ場を対象に開発されたものであることなどを考慮した。

ここで、PCWの流れ場が、①外部空気はレンガの孔を通過する際に水の蒸発による熱伝達、すなわち熱・水分同時移動が行われ冷却される、②外部空気はレンガの有するスリット状の孔を通過する、ことにより形成されるため、植物群落内の気流性状と比較的近いものと考えられる。このような植物群落内の気流性状を予測する手法として主なもの、葉を抵抗物体として圧力損失項を各種方程式に組み込んだ平岡らの手法^{5), 7)}であり、既に樹木廻りの気流解析である程度の実績を上げていることから、今回は本モデルを採用することとした。

2.2 採用モデルの特徴

設計資料としてPCWが形成する微気候を捉える場合、各レンガの孔の形状までを再現するように差分格子を分解し、境界条件をたてて解くことは膨大な計算負荷を必要とするため現実的な手法としては適切でなく、孔あきレンガをセル体積内にある抵抗物体と見なす方が賢明であると考えられる。この様な抵抗物体のモデル化としては、植物群落内及び都市キャノピー内に乱流モデルとしてk-ε 2 方程式モデルを用いた平岡らの方法^{5), 7)}があり、運動方程式に抵抗物体による抵抗力項を付加し、乱流エネルギー及び乱流散逸の輸送方程式に抵抗物体による生成項を付加することでモデル化が行われている。いずれのモデルも運動方程式に抵抗物体による抵抗力項を付加し、乱流エネルギー及び乱流散逸の輸送方程式に抵抗物体による生成項を付加することでモデル化が行われている。しか

し、乱流散逸の生成項が文献⁵⁾では風速の3乗に比例する形であるが、文献⁷⁾では物体によって作りだされる渦の特徴長さにより与えられていることや、文献⁵⁾では定式化の際、有効体積率がみられないが、文献⁷⁾では現れているなどの違いがある。この有効体積率は抵抗物体内部もしくはそのごく近傍の流速に影響すると考えられるものである。

本研究では、初期段階での環境設計資料として、熱的観点から重要になると考えられる、空間全体の風速分布（平均風速）、温度分布、湿度分布を把握することを優先し、PCWのごく近傍に形成される微気候を把握することは対象外とする。従って、本研究では文献⁵⁾で平岡らにより提案されているk-ε 2 方程式モデルをもとに、PCWによる抵抗、冷却及び蒸発という機能を組み込んだ解析モデルを作成し、SIMPLE 解法と呼ばれる定常流れを効率的に解く方法を導入して予測を試みた。

2.3 解析モデルの作成

用いる基礎方程式を表-1に示す。SIMPLE 解法では、定常解を求めるため時間幅を無限大にとって非定常項を省略し、その無限大の時刻において陰的解法で未知数を求めるように定式化されている。よって、各輸送方程式は非定常項の省略された形となる。各方程式の下線を引いた項をPCW部分のセルで計算する。

表-1 基礎方程式

質量保存式	
$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$	(2.1)
運動方程式	
$\frac{\partial u_i u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \delta_{i3} g \beta (T - T_0) - F_{ri}$	(2.2)
乱流エネルギーkの輸送方程式	
$\frac{\partial k u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_1} \left(\frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right) + P_k + G_k - \epsilon + F_k$	(2.3)
乱流散逸εの輸送方程式	
$\frac{\partial \epsilon u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_2} \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) \right) + \frac{\epsilon}{k} \left(C_1 P_k + C_3 G_k - C_2 \epsilon + c_{pe} F_k \right)$	(2.4)
熱の輸送方程式	
$\frac{\partial \rho C_p T u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_e \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \right) + \alpha \cdot A \left(T_{pcw} - T \right)$	(2.5)
水蒸気量の輸送方程式	
$\frac{\partial H u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \right) + k_x \cdot A \left(x_{pcw} - x \right)$	(2.6)
渦粘性係数	
$\nu_t = C_D \frac{k^2}{\epsilon}$	(2.7)
ただし	
$C_D = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_1 = 1.0, \sigma_2 = 1.3, \sigma_t = 1.0, c_{pe} = 1.0$ $C_3 = 1.44 (G_k > 0),$ $C_3 = 1.44 (G_k \leq 0)$	
$F_{ri} = R_i \cdot u_i \cdot u_i $	ρ : 流体密度 (kg/m ³)
$P_k = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$	g : 重力加速度 (m/s ²)
$G_k = g \beta \cdot \frac{\nu_t}{\sigma_t} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$	β : 体積膨張率 (°C ⁻¹)
$F_k = u_i \cdot F_{ri}$	T_0 : 代表温度 (°C)
	C_p : 定圧比熱 (J/kg·K)
	σ : 熱伝達係数 (W/m ²)
	k_x : 水蒸気伝達係数 (kg/m ² ·s·(kg/kg))
	A : 単位体積あたりの孔内表面積 (m ² /m ³)
	T_{pcw} : レンガ表面温度 (°C)
	x_{pcw} : レンガ表面絶対湿度 (kg/kg)

下線部分はPCW部分のセルにて計算を行う

(1)運動方程式

運動方程式は(2.2)式のように、PCW部分のセルで風速の2乗に比例する抵抗力項が付加される。抵抗力の設定にあたっては、本来PCWにあたった風は孔あき流通方向以外にも流れていくためその影響を考慮すべきであるが、完全な無孔の壁にあたった場合に比べ、PCWの場合は風が孔あき流通方向に流れていくため比較的その影響は小さいものとする。従って、ここでは孔あき流通方向のみの抵抗力を考慮するものとした。抵抗力 R_i については、次節の通気実験により決定する。

(2)乱流エネルギー k の輸送方程式

乱流エネルギー k の輸送方程式は(2.3)式のようになる。PCW部分のセルで風速の3乗に比例する生成項が付加される。

(3)乱流散逸 ϵ の輸送方程式

乱流散逸 ϵ の輸送方程式(2.4)式は、乱流エネルギー k と同様にPCW部分のセルで風速の3乗に比例する生成項が付加される。

(4)熱の輸送方程式

熱の輸送方程式(2.5)式は、PCW部分でレンガ表面温度 T_{pcw} と流体温度 T との温度差と熱伝達係数 α 及び単位体積あたりの孔内表面積 A により算出される。単位体積あたりの孔表面積 A は、スリット型では $66.0\text{m}^2/\text{m}^3$ 、開口型では $30.2\text{m}^2/\text{m}^3$ である。レンガ表面からの熱伝達係数 α は次節の通気実験により風速の関数として与える。

また、熱に関しては、運動方程式、 k 、 ϵ の輸送方程式に温度差による浮力の扱いとしてViollet型モデルを組み込んでいる。

(5)水蒸気の輸送方程式

水蒸気の輸送方程式(2.6)式は、PCW部分でレンガ表面絶対湿度 X_{pcw} と流体絶対湿度との差と水蒸気伝達係数 k_x 及び単位体積あたりの孔内表面積 A により算出される。

レンガ表面からの水蒸気伝達係数 k_x は、ルイスのアナロジーを用いて次式により熱伝達係数 α より算出する。

$$k_x = \frac{\alpha}{C_{pm}} \quad (2.8)$$

$$C_{pm} = C_{pa} + C_{pv} \cdot x \text{ [J/kg} \cdot \text{K]} \quad (2.9)$$

ただし、 C_{pa} ：乾燥空気の定圧比熱 = $1004.6 \text{ (J/kg} \cdot \text{K)}$

C_{pv} ：水蒸気の定圧比熱 = $1846.0 \text{ (J/kg} \cdot \text{K)}$

2.4 通気実験による孔あきレンガの抵抗係数及び熱伝達係数

2.4.1 通気実験の概要

抵抗係数 R_i 及びレンガ表面からの熱伝達係数 α は簡易風洞を用いた通気実験により求めた。ここで、PCWを利用する一般的な空間形態として、主風向側にPCW、その両端には断熱に優れた壁が存在し、日射遮蔽のための屋根および床により構成されていることを想定した。従って、PCWに導入される気流は、孔あきレンガの流通方向が主に解析の対象となる。また、PCW部分での圧損による平均流の減衰はあるものの、PCW端部での風速の変化は無穴の壁面に比べ小さくなるものと考え、実験装置を便宜的に与えた。

実験装置を図-1に示す。風洞壁面の影響を小さくするためにレンガを3段に重ね、中段レンガの中央通気孔を通る中心軸線上でレンガ前後の圧力損失及び各点の温度、風速を測定した。温度はT熱電対を用いて測定し、圧力損失は隔膜式差圧計を用い、風洞にチュ

ーブを垂直に挿入して測定した。また、風速の測定は通気孔出口と風下においてサーミスタ風速計を用いて行った。

図-1 通気実験の概要

2.4.2 抵抗係数の決定

抵抗係数 R_i はレンガ前後での圧力損失により決定される。實在空間では前後の気流性状による通気孔内への影響も考えられるが、ここでは単純化して通気孔内の気流は一意に定まるものとし、孔内風速に相応する通気抵抗の結果として圧力損失を考えるものとする。圧力損失の測定は乾燥レンガを用い、通気風速を逐次変えて行った。図-2にレンガ孔内平均風速と圧力損失の関係を示す。圧力損失は孔内風速の2乗に比例する関数として与えられ、その比例定数が抵抗係数 R_i となる。よって、実験結果から圧力損失を孔内風速の2乗に比例する関数として近似し、スリット型の抵抗係数1.01、開口型の抵抗係数0.74を得た。

2.4.3 熱伝達係数の決定

温度測定は、気温 32°C 、湿度60%の環境制御室内において、レンガを気温に等しい水中で飽和させた後、風洞に設置して一定通気のもとで行った。風下気温は孔内風速による違いはあるが、通気開始後数分から1時間で定常に達した。通気孔入口温度を T_i 、通気孔出口温度を T_{pcw} 、通気孔内平均対流熱伝達率を α 、通気孔内平均風速を u として次式のような関係が成り立つ²⁾。

$$\frac{T_i - T_o}{T_i - T_{pcw}} = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha \cdot 2(a+b)L}{C_p \rho_a u}\right) \quad (2.10)$$

ただし

a, b ：通気孔断面の各辺の長さ (m)

L ：通気孔長さ (m)

C_p ：空気の比熱 (J/kg·K)

ρ ：空気の密度 (kg/m³)

ここで、レンガ表面が完全飽和である場合は、熱伝達と物質伝達のアナロジーにより T_{pcw} は外気湿球温度と等しいと見なすことができ、(2.10)式の左辺は外気乾湿球温度差に対する冷却効率となる。(2.10)式を α について解くと次式が導かれる。

$$\alpha = -\frac{C_p \rho_a u}{2(a+b)L} \cdot \ln\left(1 - \frac{T_i - T_o}{T_i - T_{pcw}}\right) \quad (2.11)$$

風上気温と通気孔出口気温及び通気孔出口風速の測定値から、(2.11)式により通気孔内平均対流熱伝達率 α を算出した。

図-3に孔内風速と熱伝達係数の関係を示す。この実験結果から熱伝達係数 α を孔内風速の一次関数で与えることとし、次式により算出する。

スリット型： $\alpha = 6.17 u + 8.40$

開口型： $\alpha = 7.44 u + 5.31$

図一 2 孔内風速と差圧の関係

図一 3 孔内風速と熱伝達係数の関係

図一 4 孔内風速と風下風速の関係

2.4.4 風速の補正

解析モデルは研究の目的から有効体積率を含めていないが、この有効体積率は抵抗物体部分の風速に影響するもので、外部風がセル内のPCWを通過する際にレンガ孔内の風速の上昇を再現するものであるため、本モデルではレンガ孔内の風速上昇が再現されないことになる。一方、(2.2)式におけるPCW部分の抵抗力項 F_{ri} と熱伝達係数 α の算出式は、レンガ孔内平均風速の関数となっているため、計算を行う際にはセル体積内のPCW部分の風速を孔内風速に補正して算出する必要がある。

従って、風洞実験により孔内風速と風下風速との関係を求め、解析モデルに適用可能なPCW部分の風速補正式を決定する。図一4に孔内風速と風下風速の関係を示す。この関係から、PCW部分の抵抗力項 F_{ri} と熱伝達係数 α を算出する際の孔内風速は、次式により補正したものをを用いる。

スリット型： 孔内風速 $=3.07 u$

開口型： 孔内風速 $=1.54 u$

2.5 計算方法の概要

2.5.1 差分化の方法

本研究では、予測計算にあたりSIMPLE解法を用いた定常計算を行う。各方程式はスタッガード格子に定義される。各輸送方程式の空間差分にはハイブリッド法を用いる。

2.5.2 計算の流れ

予測計算の流れを図一5に示す。まず、(2.1)式～(2.4)式により風速・乱流エネルギー・乱流散逸の計算を行う。結果が収束後、収束した解を初期値として(2.1)式～(2.5)式により温度と気流の連成計算を行うことで、風速と気温の解を求める。その後、水蒸気量による気流への影響は無いと仮定して、気流の計算結果を用いて水蒸気の輸送方程式(2.6)式のみを別に解く。

なお、各方程式の収束判定は、前ステップとの誤差の解析空間全体での平均値で行い、その値が全物理量で 10^{-6} 以下となった時を収束とした。

3. PCWにより形成される微気候の空間的性状の把握

PCWの組み合わせによって形成される微気候の空間的な性状を把握するため、屋外実験により温度、湿度、風速の実測を行った。ここで、PCWにより形成される微気候は時間的に変動するもので

あるが、このような非定常な現象については2.1で述べたように本研究の対象とせず、まずは実験空間内の微気候の空間的性状を把握・分析し、その結果から空間全体の特徴を把握するための代表的な測定点を選定し、これらの点について温度、湿度、風向の定点測定を行った。

また、実測結果の内、風向・風速が比較的安定していた期間を抽出し、温度、湿度および風速を平均化した値を用いて解析モデルの計算結果との比較を行い、本解析モデルがPCWの微気候を予測する手法として適用できる可能性のあるかを検討することとした。

3.1 実験空間の概要

実験は十分な屋外風速が得られる開放空間として、東京工業大学長津田キャンパス内にある2階建てRC造の建物屋上で行い、実験空間を図一6に示すように配置した。実験場はおよそ南北10m、東西25mの長方形の広場で、周囲には高さ約1.2mのRC造の手摺りがある。実験空間は、PCWに囲まれ温度が低下する部分と、外気が抜けて温度が高くなる部分を形成するように考慮し、高さ約1.8mの6体のPCWユニット（開口型4体、スリット型2体）及び2面の壁面（木造・ポリスチレンボード貼り）を用いて約3m×3mの空間を形成した。また、実験空間には日射遮蔽用の白色ウレタンシートの屋根をPCWの上端にはば合わせてかけた。実験空間

の外観を図一7に示す。なお、以降、本論文では、図一6に示したように実験空間内のスリット型PCWをs1～2、開口型をo1～4と呼ぶことにする。

図一 5 計算の流れ図

図一 6 実験空間の概要

図一七 実験空間の外観

3.2 微気候の空間分布

著者らにより開発された3次元位置測定装置^{注1)}を用いて、実験空間内の微気候を計測し、空間分布の把握・分析を行った。測定は実験空間の全体を捉えるよう高さ1.0mの位置で網羅的に行い、空間内の任意の点について温度、湿度、風速を2秒間隔で10分間測定した。ここで、外部気候の変化が大きい場合、空間内の微気候の分布を正しく把握することはできないため、外部条件が比較的安定していることが重要である。従って、外部気候条件が安定していた1997.9.7のデータについて分析を行った。測定中の外気平均温度は30.1℃、湿度は71.4%、外部風向はほぼ南西であった。

(1) 水平面気温分布

空間内の水平面温度分布を図一8(a)に示す。南西及び北東の開口部で高温部分が分布している。s2, o2に囲まれた部分及び南側のs1, o1の近傍では低温部分が見られ、特にs2, o2近傍では気温の低下がよく現れている。

(2) 水平面湿度分布

水平面湿度分布を図一8(b)に示す。気温の低下した部分は湿度も上昇しており、PCWから蒸発した冷氣塊が微気候を形成していることが示されている。

(3) 水平面風速分布

空間内水平面風速分布を図一8(c)に示す。南西の開口部および北側の壁面近傍での風速増加が顕著である。南西の開口部からの外気の流入および北側壁面の張り出し効果によるo4を通しての通風が得られていると考えられる。

3.3 実験空間内の定点測定の概要

3.2の結果を参考にして空間内を網羅的に把握するよう図一9に示すような定点測定の位置を設定した。ここで、空間内の各壁面近傍の分布を細かく把握するため、次の4種類の測定条件を設定して行った。(a)測定1は空間全体の分布を測定、(b)測定2は南西側開口部の高温部分からs2, o2に囲まれた気温の低下する部分を測定、(c)測定3はs2, o2に囲まれた気温の低下する部分から北東の開口部分を測定、(d)測定4は各PCWの近傍10cmを測定するものである。

気温はT熱電対(0.1mm線)を用いて高さ1.0mと0.3mの2点で測定し、鉛直方向の測定も含め計18点の測定とした。また、湿度、風速は各測定毎に測定点を選定して行った。外部気候については、乾湿球温度は通風式白金抵抗乾湿計により測定し、風向・風速は超音波風速計により測定した(表一2)。

測定は夏季の晴天日の4日間で行い、気温が高く比較的風速が強い時間帯である正午から午後4時の間で各測定を1時間～2時間毎に行った。なお、測定間隔は、温度および風速については2秒間隔、湿度については5秒間隔である。

3.4 比較用データの抽出

今回用いた解析モデルがPCWの微気候を予測するモデルとして適用可能かどうかを検討するため、3.3で得られた定点測定の実験データの中で、外部の風向が南から西の間で安定しており、風速も比較的強い期間を抽出し、その期間の測定データを平均化することで比較検討のためのデータを作成した。抽出したデータケースの外気象条件を表一3に示す。各測定毎に風速が強い場合と弱い場合の2種類抽出した8ケースであり、平均化にあたって温度および風速については2秒間隔、湿度については5秒間隔で測定したデータ(以降、単に実験値と称す)を各期間で平均化した。

例として、図一10にケース1-2の実験値を示す。s2, o2にL字に囲まれた部分の気温の低下、湿度の上昇というPCWの蒸発冷却効果による微気候の形成状況が確認できる。また、南西側開口部で気温が高く、外気の流入の影響が現れていることが分かる。北東側の開口部では若干風速が強くなっている様子も確認できる。

図一八 移動測定結果 (1997.9.7)

表一 実験空間内測定項目

測定項目	測定装置
外部乾湿球温度	通風式白金抵抗乾湿計
外部風向・風速	超音波風速計
空間内気温分布	0.1mm φ T熱電対
空間内湿度分布	抵抗値変化型乾湿ヒューム
空間内風速分布	熱式微風速計

表四 境界条件

流入面	$u/u_1=(z/z_1)^{1/6}$ $\sigma\sqrt{u}=0.15, L=0.4z$
流出面	自由流出
上空面	free slip
地上面	log-law
構造物	$\partial T/\partial x_i=0, \partial H/\partial x_i=0$

表三 比較ケース

ケース	測定	時間 s	風速 m/s	風向 °	乾球温度 ℃	湿球温度 ℃
1-1	1	120	1.1	24	30.5	23.5
1-2	1	158	2.4	23	29.7	24.2
2-1	2	92	1.2	22	30.0	23.7
2-2	2	60	2.2	25	30.3	23.6
3-1	3	82	1.7	35	29.3	23.8
3-2	3	68	3.2	36	29.7	24.1
4-1	4	150	1.6	35	29.7	23.8
4-2	4	60	2.3	27	30.1	24.3

図一 空間内測定点

図一〇 ケース 1-2 の実験値

4. 計算結果と実験結果との比較

4.1 建物モデル

計算領域と差分格子を図一11に示す。計算領域は、東西方向を21.6 m、南北方向を22 m、垂直方向を7.6mとした。格子点数は57×59×25である。格子間隔は0.2~1.0 mに変化する不均等メッシュである。実際には、実験空間北側に、高さ3.3 mのペントハウスがあるが、ペントハウスを含めて解析を行うと解析領域が膨大になり計算負荷も大きくなるため、ここではペントハウスを省略した建物モデルで解析を行うことにし、実験結果との対応に関する考察の際にはここで行った簡略化を考慮する。

4.2 境界条件

流入境界条件は、実験時の外部風速測定点の値から決定する。建物屋上の風速に影響を与える要因として 屋上周囲の手摺りや南西側の山などが考えられるが、ここではそのような影響を受けた外部風速測定点での風向・風速が、実験空間へ流入する風向・風速であると考えられる。よって、境界条件として解析領域の風上側流入風速を実験時の屋外風向・風速測定点での測定点をもとに決定する。

(1) 風速の流入境界条件

流入境界の風速は鉛直方向にべき分布を与えた。その際のべき指数は、もっとも平坦なところでは1/10~1/8で、粗度が増すにつれて大きくなり、大都市中心では1/3~1/2で与えられる。ここでは、建物屋上である程度開けた場所であるが、周囲の森林などの状況を考慮して1/6を与え、次式より流入境界風速を算出した。

$$\frac{u}{u_1} = \left(\frac{z}{z_1} \right)^{1/6} \quad (5.1)$$

ここで、 u_1 は基準高 z_1 における風速である。基準高は外部風向・風速測定点の高さ1.0mとし、風速の測定値を u_1 とした。

(2) 乱流エネルギー k の流入境界条件

風速の変動成分の標準偏差 $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ と平均風速 u, v, w との比を乱れの強さとし、乱流エネルギー k は、この乱れの強さとべき乗則の平均風速から等方性を仮定して次式より算出する。

図一一 格子分割

単位: m

$$\sigma_u^2 = \sigma_v^2 = \sigma_w^2 \quad (5.2)$$

$$k = \frac{1}{2} (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) = \frac{3}{2} \sigma_u^2 \quad (5.3)$$

(3) 乱流散逸 ε の流入境界条件

流入境界においては渦動粘性係数 ν_t を次のように与える⁸⁾。

$$\nu_t = k^{1/2} \cdot L \quad (5.4)$$

ここで、 L は乱れの長さのスケールである。乱れの長さのスケールは接地気層内では地上面からの高さ z に比例するとして次式により与えられる。

$$L = 0.4 z \quad (5.5)$$

乱流散逸 ε は (5.4) 式と (5.5) 式と基礎方程式中の (2.7) 式から次式により算出する。

$$\varepsilon = C_D \frac{k^{3/2}}{L} \quad (5.6)$$

流入境界の温度は流入境界で乾球温度の値を一定値で与え、流入境界の容積絶対湿度は乾湿球温度より算出した値を一定値で与えた。

(4) 流出境界条件

上空境界においては Free slip 条件を、流出境界においては自由流出条件を適用した。

(5) 固体表面の境界条件

床表面及びウインドキャッチャー表面などの固体表面境界では次式による対数則を適用し、風速、乱流エネルギー k 及び乱流散逸 ε を計算する。

$$\frac{u}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{u_\tau y}{\nu} \right) + B \quad (5.7)$$

ここで、 u_τ は摩擦速度、 y は壁面との距離である。また、カルマン定数 κ は 0.41 とし B は 5 とした。温度と水蒸気量については、各物理量の固体表面の法線方向の勾配を 0 とする条件とした。

(6) PCW の境界条件

PCW 部分については、レンガ表面を完全飽和であると仮定するとレンガ全体を外気湿球温度に等しいと見なされる²⁾。よって、基礎方程式中の (2.5) 式におけるレンガ表面温度 T_{pcw} は外気湿球温度とした。(2.6) 式中のレンガ表面湿度 X_{pcw} もレンガ表面を完全飽和であると仮定して算出した。また、レンガを通過した風速はレンガの放線方向以外の成分が 0 となると仮定して境界条件を設定した。

4.3 解析モデルによる計算結果

結果の一部としてケース 1-2 の例を図-12 に示す。

(1) 気温分布

s 2、o 2 に囲まれた部分の温度が低くなっており、南西側の開口部の温度は高くなっていることが分かる。高さ 0.3m では、PCW 近傍で低温空気の下降がみられるものの、低温領域の広がりが高さ 1.0m の方が大きいことが分かる。

(2) 湿度分布

気温が低下する部分で湿度が上昇するといった、いわゆる蒸発冷却による微気候の特徴が良く現れている。また、外気の流入により南西側開口部付近で湿度の低い部分が形成されている。

(3) 風速分布

s 2、o 2 に囲まれた部分で風速が弱く、PCW による風速の減衰がみられる。また、南西側開口部と北東側開口部では風速が強く

なっており、外気の流入部と流出部で風速が上昇する様子が現れている。

図-12 計算結果 (ケース 1-2)

4.4 計算値と実験値との比較検討

計算値が実験値とどの程度、対応がとれているのかを検討するため、全ケースの計算値と実験値を温度 (高さ 0.3 及び 1.0m)、湿度及び風速のそれぞれについて比較した。図-13 に計算値と実験値の散布図を示す。

(1) 気温

高さ 1.0m の気温では、計算値が全体的に 1.0°C 程度高くなっているが、これは解析モデルが PCW の孔の扱いとして抵抗係数、熱伝達係数を 1 次元で扱ったことによる影響、SIMPLE 化による計算の影響などが原因として考えられる。しかし、空間全体の分布としては概ね傾向が一致しているものと思われる。高さ 0.3m では、計算値が 1.0m と比較して全体的に低く計算されており、Viollet 型のモデルの特徴が示されている。しかし、上記のような解析モデルの孔の扱いによる誤差が同様に認められる。さらに、実験時の o 1 と s 2 の下部が乾燥しており表面温度が若干高くなっていた影響で点 2、10、11、16、17 (線で囲まれた部分) では実験値の方が高くなっている。

(2) 湿度

全体的な空間の性状として、気温の低い部分は湿度が高く、気温の高い部分は湿度が低く計算されており、PCW の特徴が示されている。気温と同様に計算値が SIMPLE 化による影響などから完全に一致するものではないが、分布の傾向は概ね対応している。

(3) 風速

全体としてあまり対応がみられない。北東開口部付近の風速が大きく、点 18、24、25 の計算値が高くなっているが、これは実験空間北側のペントハウスを無視して計算したためだと考えられる。ま

た、解析モデルでは有効体積率を考慮しておらず、孔内の風速上昇が再現されていないため、PCW近傍の点19で計算値の方が実験値より小さくなっている。さらに、PCWの扱いを1次元で行ったことや計算の簡易化による影響がこのような結果として現れたものと考えられる。

図一13 計算値と実験値の比較結果

5. まとめ

本研究では、PCWにより形成される気候分布を簡易に予測できる手法を開発することが設計の際の有効なツールになると考え、微気候の空間的性状を屋外実験によって把握するとともに既往のモデルを応用した解析モデルを作成し、風向風速が一定条件のもとでの計算結果と実験結果を比較して、本予測手法の有効性について検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 蒸発冷却機能を有する孔あきレンガ壁体により形成される気候分布を簡易に予測するため、平岡らの $k-\epsilon$ 2方程式モデルにPCW特有の抵抗、蒸発、冷却機能を付加した解析モデルを作成した。
- (2) 屋外実験により、PCWにより形成される微気候の空間的性状を把握するとともに、解析モデルの計算結果との対応について比較検討を行うために風向・風速が安定していた期間を抽出して、定常的なデータとして取り扱えるように考慮した比較用実験データを整理した。
- (3) 計算結果を実験結果と比較した結果、気温、湿度の分布に関してはモデル化の際のPCWの孔の扱いや計算方法の簡易化の影響が見られるものの概ねその傾向には対応が見られた。風速に関しては上記理由に加え、有効体積率をモデルに導入しなかったことが原因と思われる不一致がみられた。

6. おわりに

本研究では、PCWを用いた屋外空間デザインの設計支援手法として、樹木廻りの気流解析で検討された圧力損失項の組み込み方法を適用した場合、本研究で扱ったような限られた条件下ではあるが、実験結果と概ね同様の傾向を予測することができ、実際の設計の際の有効な手法として適用できる可能性を示唆したものと考えている。しかしながら、微気候の把握という点では、平均流を扱う $k-\epsilon$ モデル自体の問題をはじめ、PCWの抵抗係数、熱伝達係数の孔あき流通方向以外の扱い、有効体積率の問題など更なる検証が必要であり、今後の課題とする。

謝辞

本研究を実施するにあたり、解析モデルの作成においては東京工業大学教授田村哲郎先生より貴重なご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

注

- 1) 3次元位置測定装置とは、ある空間内の任意の場所における温度、湿度、風速測定を行い、同時にその測定位置を電磁波による信号で把握するものである。これにより、ある範囲内での移動観測が可能となる。
- 2) 本論文は、1998年度日本建築学会大会(九州)にて発表した内容(D-2環境工学II, pp.709-711)を加筆・再編集したものである。

参考文献

- 1) 白井一義、梅干野晃、堀口剛：透水性孔あきレンガを用いた蒸発冷却壁体の開発、日本建築学会計画系論文集、第487号、PP61-68、1996.9
- 2) 白井一義、梅干野晃、永田達也、小栗健：透水性孔あきレンガの通気孔形状と通気・冷却性能の関係 透水性の孔あき壁体を利用した蒸発冷却による屋外・半屋外快適空間の形成その1、日本建築学会計画系論文集、第509号、pp9-14、1998.7
- 3) 吉田伸治、村上周三、大岡龍三ほか：対流・放射・湿気連成解析による屋外環境共生空間の研究(その2)改良型 $k-\epsilon$ モデルの導入効果の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、pp937-938、1998.9
- 4) 白井一義、梅干野晃、永田達也、小栗健：パッシブクーリングウォールの半屋外空間における微気候形成効果 透水性の孔あき壁体を利用した蒸発冷却による屋外・半屋外快適空間の形成その2、日本建築学会計画系論文集(採用決定)、2000.1
- 5) 平岡久司ほか：植物群落内および都市キャノピー内での乱流モデルの考察、第3回生研NRTシンポジウム講演御文集、東京大学生産技術研究所NST研究グループ、pp87-93
- 6) 村上周三、加藤信介ほか：グレーチング圧力損失の k, ϵ への影響を考慮した改良型2方程式モデル、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp717-720、1988.9
- 7) 平岡久司ほか：植物群落内および都市キャノピー内での乱流モデルに関する研究(その1)乱流モデルの作成、日本建築学会計画系論文集、第406号、1989.12
- 8) 数値流体力学編集委員会編：乱流解析 数値流体力学シリーズ3、東京大学出版会、1995.7

(1999年7月10日原稿受理、2000年1月11日採用決定)