

CFD 解析結果の重ね合わせによる 風向変化を考慮した冷気の空間分布予測 —蒸発冷却壁体を用いた半囲み空間への適用—

Prediction of Cool Air Distribution with the Consideration of Wind Direction Change
by Superimposing CFD Analysis Results
—Application to a Semi-enclosed Space Consisting of Evaporative Cooling Walls —

平山 由佳理*¹ 浅輪 貴史*² 梅干野 晁*³
Yukari Hirayama Takashi Asawa Akira Hoyano

*1 株式会社ミサワホーム総合研究所 Misawa Homes Institute of Research and Development Co., Ltd.

*2 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

*3 放送大学 The Open University of Japan

Corresponding author: Yukari HIRAYAMA, Yukari_Kezuka@home.misawa.co.jp

ABSTRACT

This paper proposes a method for the prediction of cool air temperature distribution and the appearance frequency of cool air under breezy conditions, considering the changes in the wind direction. It is seen from the measurement results in a semi-enclosed space consisting of evaporative cooling walls, that the appearance frequency of cool air is an important factor in the prediction of air temperature distribution during a breeze. In order to predict the air temperature distribution of cool air, CFD simulation results of mean flows in 8 wind directions were superimposed, considering the appearance frequency of upper wind in these directions. The results of the prediction of cool air appearance frequency showed good agreement with the measurement results, and from the superimposed image, the characteristics of the air temperature distribution could be visualized well.

キーワード: パッシブクーリング, 冷気, 出現頻度, 平均流, RANS モデル,

Key Words : Passive Cooling, Cool Air, Appearance Frequency, Mean Flow, RANS model

1. はじめに

夏季屋外の熱環境の悪化に伴い、緑化や蒸発冷却手法によって表面温度や気温が周囲に比べ低く保たれた空間は「クールスポット」と呼ばれ注目されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。クールスポットの形成にあたっては、いつ、どこに、どれくらい低温な冷放射面および冷気が生成されるのかを予測した上で設計を行うことが望ましく、近年では建築ならびにランドスケープ設計において数値解析が用いられ、表面温度や熱放射、気温、熱的快適性の指標である SET*等の空間分布予測が導入される例が見られるようになってきている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

蒸発冷却手法の主要な効果の1つである表面温度の低減効果については、非定常性も考慮した様々な予測手法が提案されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。しかし気温の低減効果については、最も低温な空気塊が形成される弱風時には風向変化も見られるなど、冷気の空間分布が風環境によって変わる現象が指

摘されているものの⁽⁹⁾、予測手法に関しては風向・風速が安定している状態を対象としたものがほとんどである⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾。これまで筆者らが蒸発冷却壁体 (Passive Cooling Wall, 以下 PCW) を用いた半囲み空間を対象に行ってきた実測においても、風向の変化に伴い多方向から移流する冷気が半囲み空間内の気温の低下に寄与している可能性が示唆されているが⁽¹¹⁾、その予測には至っていない。

流れ場の数値解析 (Computational Fluid Dynamics Simulation, 以下 CFD 解析) において非定常性を扱う場合には LES (Large Eddy Simulation) モデルを用いる方法があるが、流入変動風の作成および解析において計算負荷が大きい点や、非定常に風向が変化する流入条件を設定できない等の課題がある。一方、風向が変化する過程は連続量だが、安定した時にその時間を切り出してみれば平均流と見なすことができることから、既往の予測手法で多く用いられている RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation) モデルによ

る平均流を扱いながらも、解析結果の出力においてそれぞれの出現頻度を考慮して統計的な処理を施すことによって、風向変化を考慮した冷気の分布予測を行うことができるのではないかと考えられる。また設計支援としての予測手法であることを考えると、ある特定の流入変動風を対象とした詳細な解析結果よりも、アンサンブル平均化した代表流を対象とした解析結果の方が扱い易い場合もある。

以上から、本研究では、主風向の卓越性が弱く、様々な風向が出現する風環境を対象として、平均流の解析結果を用いた冷気分布の予測手法を提案することを目的とする。はじめに PCW の半囲み空間における平均気温と冷気の出現頻度との関係を整理した上で、各風向時の気温分布の予測結果を風向の出現頻度を考慮して重ね合わせる手法を提案し、実測結果との比較により、当手法の精度検証を行う。

なお本研究で扱う PCW は、冷却性能が確認されており、かつ CFD 解析における諸熱物性値が整理されている高揚水性セラミックパイプによる PCW⁽¹²⁾を用いることとする。

2. 既往の屋外風環境の予測手法

風向変化を考慮した屋外風環境の予測手法として、既往研究では突風率予測、大気中に拡散する汚染物質の濃度予測⁽¹³⁾、風雪シミュレーションによる積雪深分布予測⁽¹⁴⁾等がある。汚染物質の濃度分布については、排出源である煙流の濃度をブルームモデルで表し、また風向の出現頻度を正規分布と仮定して風向の出現頻度で汚染物質の濃度を畳み込み積分する手法が取られる場合がある⁽¹³⁾。風雪シミュレーションでは、1 時間毎の平均風向・風速により求めた積雪量を重ね合わせることで、降雪期間を通した平均風向・風速を用いた解析に比べ、積雪深分布の予測精度が向上されることを示した報告がある⁽¹⁴⁾。

風向変化を伴う弱風時の冷気の空間分布予測においても各風向の出現頻度を統計的に扱う方法が考えられ、本研究でもその導入を検討する。ここで、熱輸送においては表面温度上昇が大きい場合には自然対流の影響も考慮する必要があるが、クールスポットの形成においては日射を遮蔽した空間を対象とすることが前提である。また屋外で完全な無風状態はほとんどなく、本研究においても 0.5~1 m/s 程度の、風向の判別が可能な風速域を対象としていることから、CFD 解析における流入風向・風速条件の統計的な扱いにおいては水平成分のみを扱うこととする。

3. 上空風と蒸発冷却壁体から移流する冷気の特徴

3.1 対象とする蒸発冷却壁体および半囲み空間の構成

PCW に用いた高揚水性セラミックパイプは、一方向に貫通孔を有するため自身の毛細管引力により下部から水を揚水することによって表面が湿潤となる特徴を持つ。またその濡れ面は蒸発冷却によって低温となり、パイプ群として構成された PCW では、有風時には内部のパイプ表面温度

が湿球温度相当となることが確認されている⁽¹²⁾。

実測場所は、周辺地物による風の乱れの影響が少ない場所として、神奈川県横浜市内に位置する東京工業大学すずかけ台キャンパス構内における 2 階建て建物の屋上 (GL+6m) とした。対象とする半囲み空間は図 1(d)に示す点線部分であり、北・南・西の 3 面に PCW を配置し、天面は発泡ウレタンボードによる日除けを設置した。東側の出入口まわりには、半囲み空間への外部風の流入を軽減するため孔空きレンガ (乾燥状態) と塩ビ管群を配置した。

3.2 測定方法

測定項目を表 1 に、測定位置を図 1 に示す。上空風向・風速は屋上床面+4.5m (GL+10.5m) の高さ、また半囲み空間内外の気温分布は屋上床面+1.1m の高さで測定した^(注1)。気温の測定位置は図 1(d)に示す通り、半囲み空間内部を中心としつつも、半囲み空間外部を代表気温として、それぞ

表 1 測定項目

項目	測定位置	測定機器	仕様	測定間隔
風向 風速	上空 FL+4.5m	プロベラ式 風向風速計	測定範囲:0.4~70m/s 測定範囲:0~540°	2秒
気温	半囲み空間 内外FL+1.1m	T型熱電対	線径:0.1mm	2秒
表面 温度	FL+1.5mより 撮影	赤外線放射 カメラ	波長域 8~14μm	各測定時

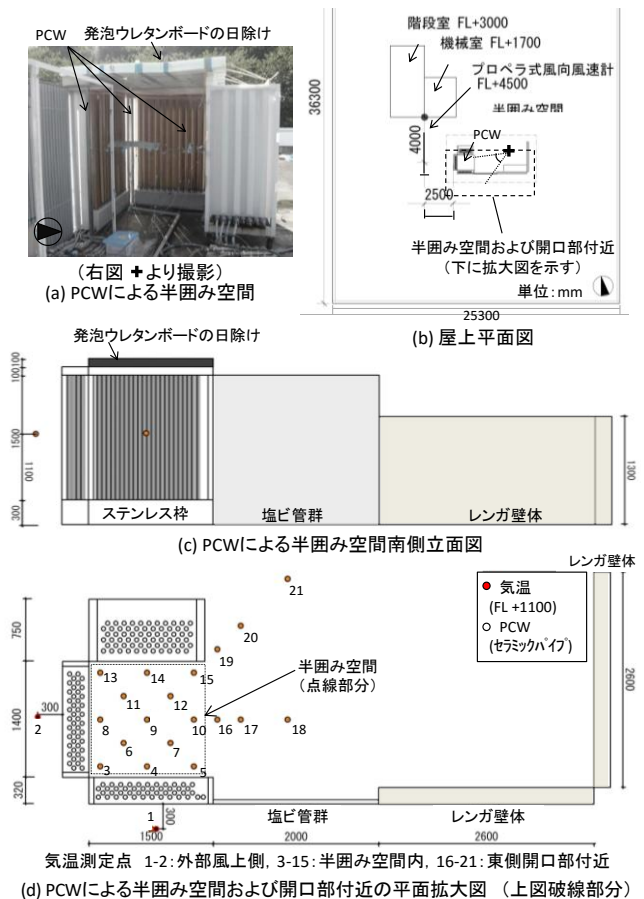


図 1 PCW を用いた半囲み空間の構成および測定位置

れ内部 13 点 (No.3~15), 外部南側・西側 2 点 (No.1,2) とした. さらに東側開口部付近において冷気の流出を把握するため外部 6 点 (No.16~21) 設置した. 測定は 2010/8/31, 9/2, 9/7, 9/22 の 4 日間実施し, 朝, 昼, 夕の 30 分間ずつ, 2 秒間隔で記録した (注2). また各回 PCW および周辺部材, 床面等の表面温度を赤外線放射カメラにより測定した.

3.3 測定結果

(1) 上空風の風速の乱れの強さと風向変動の標準偏差

実測期間中に見られた上空風の特徴として, 10 分間の平均風速 \bar{u} に対する風速の乱れの強さ ($\sqrt{u^2}/\bar{u}$) および風向変動の標準偏差 ($\sqrt{(\bar{\theta} - \theta)^2}$) (15) を計算した結果を図 2, 図 3 に示す. 風速の乱れの強さは \bar{u} に関わらず 0.3~0.6 の間で分布した. 一方, 風向変動の標準偏差は \bar{u} が 1.5m/s 以上では 22.5° 程度 (8 方位相当) に収束する傾向が見られたのに対し, \bar{u} が 1m/s 前後の場合には 25~50° 程度の間でばらついていた. そこで, 風速と風向変動の標準偏差の大きさによる各風向の出現頻度の特徴を見るため, 風速が大きく風向変動の標準偏差が小さい時間帯 (①), 風速が小さく風向変動の標準偏差が大きい時間帯 (③), その中間的な性質をもつ時間帯 (②) の 3 つ時間帯に着目した. ③>②>①と風向変動の標準偏差が小さくなるに従い, 対象地の主風向 (ここでは S) 寄りの風向の出現頻度が高くなる傾向が見られた (図 4). また最も風向変動の標準偏差が大きかった③の時間帯では N と S の出現頻度が相対的に高いものの卓越性は弱く, 全風向が出現する風環境となっていた. したがって本研究では主に③の時間帯を対象に解析を行ってゆく.

なお①の時間帯は主風向の卓越性が顕著であることから, 従来の RANS モデルの適用条件である風向・風速安定条件とみなして本研究の計算モデルの検証に用いる.

(2) 風向ごとの気温分布の特徴

各風向時の平均的な気温分布の特徴を把握するため, 上記③の時間帯における 2 秒間隔の瞬時値データを風向別に整理し, 代表気温 (図 1(d) の測定点 1,2 の平均) と各測定点 (図 1(d) の測定点 1~21) の気温差 (以下, 代表気温との差 ΔT [K]) を算出した. そのうち, 代表気温との差が最も顕著であった SW 風と, 代表気温との差が小さかった SE 風の 2 風向について, 各測定点の ΔT の平均値, 標準偏差, 最大/最小値を図 5 に示す.

図 5(a) SW 風の時には, 青枠で囲んだ部分のように半囲み空間内のほとんどの測定点の平均 ΔT が -2K 以下となっている. また半囲み空間内では代表気温以上の温度の出現は見られず, 平均 ΔT が -3~-1.5 K の範囲で全体的に低温な状態となっている.

図 5(b) SE 風の時には, 半囲み空間内の測定点 8, 13, 14 で平均 ΔT が -2K 以下と低温となるものの, その温度は SW 風の時よりやや高い. それ以外の測定点においても全体的に SW 風に比べ SE 風の方が高く, 特に半囲み空間内の東側 (測定点 5, 10, 12) の平均 ΔT が高い. これらの点では最大値が代表気温と同程度またはそれ以上となっていることか

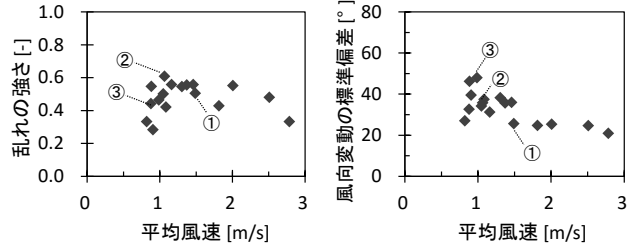


図 2 風速の乱れの強さ 図 3 風向変動の標準偏差

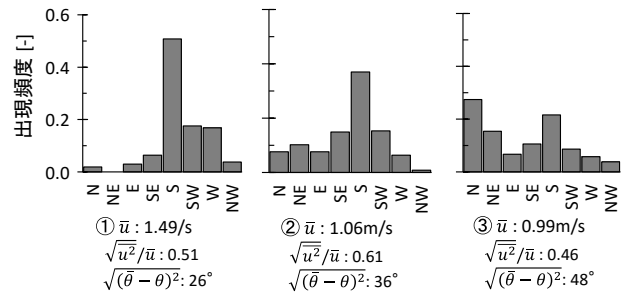


図 4 各時間帯の風向出現頻度

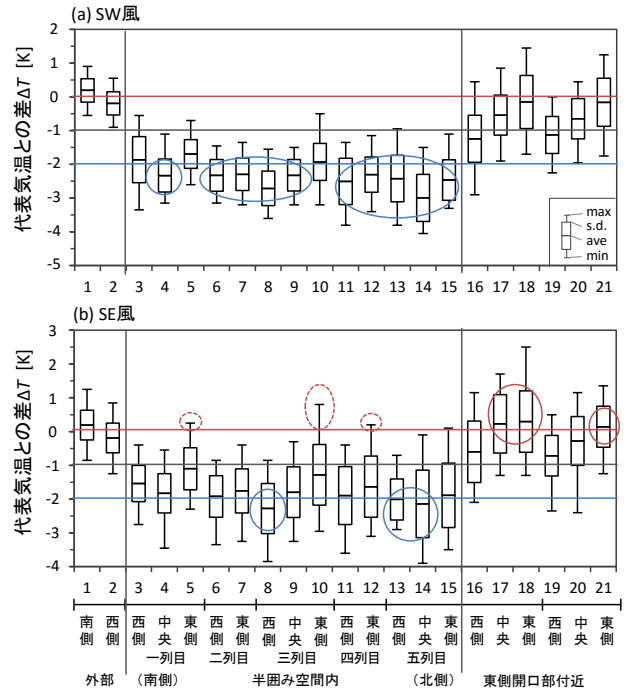


図 5 代表気温と各測定点の気温差

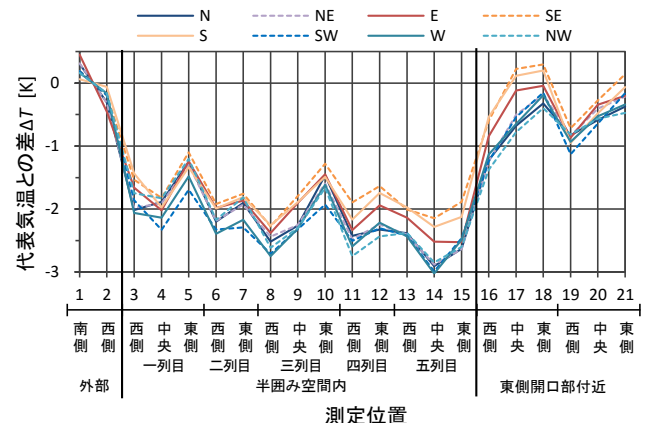


図 6 代表気温と各測定点の平均気温差

ら、外部風の流入に因る混合の結果、平均 ΔT が上昇したものと考えられる。また SE 風では半囲み空間の東側開口部付近の平均 ΔT が代表気温以上となる測定点が見られるが、冷気の到達距離の影響と、塩ビ管などにより温められた空気の移流に因るものと考えられた。

以上 SW 風, SE 風の違いを踏まえ、全風向を対象に風向ごとの平均 ΔT を求めた結果を図 6 に示す。いずれの風向でも低温となりやすい測定点 4,6,8 では風向間の差が小さいが、北寄りの測定点 11,12,14,15, また東側開口部付近では風向による平均 ΔT の違いが 1°C 程度現れている。各測定点において、風向間の ΔT の分散分析を行った結果、いずれの測定点においても有意差が認められ (自由度 7/293, $P < 0.05$, F 境界値:2.04, 各測定点の P 値, F 値は表 2 に記載), ΔT は風向間で異なる分布であることが確認された。

よって風向の卓越性が弱い風環境下において、各風向時の時間平均的な気温分布は風向ごとに特徴付けることができる (注 3)。

(3) 半囲み空間内の冷気温度と冷気の出現頻度 多方向から移流する冷気を評価する手法の検討として、各測定点において時間平均化した ΔT と、 ΔT ごとの出現頻度との関係を図 7 に示す。図 7 はケース③の時間帯における ΔT について、横軸に各測定点の 10 分間平均値をとり、縦軸に各測定点の 1K 単位の ΔT ごとに出現した頻度をとっている。これにより、10 分間平均化した ΔT について、各温度の出現頻度の内訳を縦軸で見られるようになっている。

図 7 より、10 分間平均化した ΔT は $-2.7 \sim -1.3^{\circ}\text{C}$ の範囲であるが、より低温な空気が高い頻度で流入する測定点ほど平均気温が低下する傾向が見られる。すなわち、流入風の変動の影響を受ける半囲み空間内外では、流入する空気の温度に加え、低温な空気が流入する頻度が重要であることが示された。

4. 冷気温度と冷気の出現頻度の予測手法

4.1 冷気の出現頻度 $A_{\Delta T}$ の算出方法

冷気温度は 3 章と同様に代表気温との差として ΔT で表し、1K 単位で扱う。また上空風向 i ($i: N \sim NW$) の出現頻度は a_i , ΔT 以下の冷気の出現が見られた地点の冷気の出現頻度は $a_{i\Delta T}$ と表すこととする。上空風向 i に対し、 ΔT 以下となる冷気の出現が見られなかった地点の $a_{i\Delta T} = 0$ となる。

各風向に代表される気温分布予測には、次節に示す CFD 解析を用いる。そして、ある地点 P における冷気の出現頻度 ($A_{\Delta T}$) は、各風向の気温分布の予測結果から、地点 P の $a_{i\Delta T}$ を積算することによって、式 (1) の通り求める。

$$A_{\Delta T} = \sum_{i=1}^8 a_{i\Delta T} \quad \dots \text{式(1)}$$

4.2 解析条件

CFD 解析には三次元熱流体解析システム (STREAM V10)

を用いた。流体は非圧縮性流体と仮定し、乱流モデルは標準 $k-\epsilon$ 2 方程式モデルを使用した。PCW および周辺部材、階段室や床面等の温度境界条件は赤外線放射カメラより取得した熱画像から読み取った温度を与え、鉛直方向の運動

表 2 各測定点における風向間の分散分析結果

測定点	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P 値	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F 値	6.18	2.32	2.90	2.66	2.67	2.50	4.44	2.28	4.79	8.35	3.55	7.74	7.23

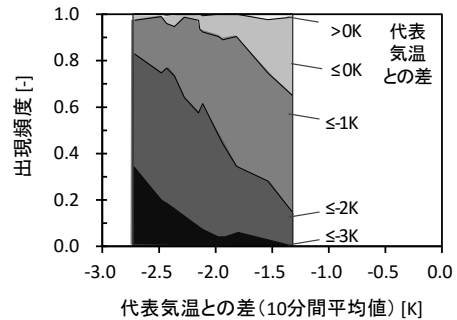


図 7 代表気温と各測定点との差 (10 分間平均値とその内訳)

表 3 CFD 解析の計算条件

計算領域	66m(x)×66m(y)×12m(z)
分割メッシュ数	313(x)×313(y)×86(z)=8,425,334
メッシュサイズ	建築物を含む6m×6m×6mまでは0.1m等間隔 その他は1.06拡大率非等間隔
乱流モデル	標準 k-εモデル
計算アルゴリズム	SIMPLE法
差分スキーム	QUICK (2次精度風上差分)
流入境界条件	流速規定(上空風実測データより) 乱流エネルギー $k=(SV)^2$ 乱流消失率 $\epsilon=\sqrt{C_u} S^2 V^3 / n(Z-Z_0)$
流出境界条件	自然流出境界
壁面境界条件	Z_{max} :フリースリップ, Z_{min} :ノースリップ
表面温度	熱画像より判読
熱境界条件(流体・固体間)	温度対数則を適用

S:乱れの強さ, V:風速[m/s], C_u :モデル定数(0.09)

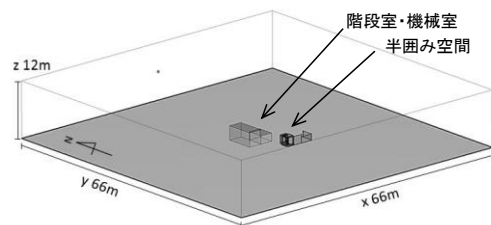


図 8 解析領域

表 4 抵抗物体の諸係数

	抵抗係数	平均対流熱伝達率
PCW	$C_{fx}=4NC_D, C_{fy}=4(N-1)C_D$	$\alpha_{ch} = 36.7Vi + 4.5$
塩ビ管群	$C_{fx}=4NC_D, C_{fy}=4NC_D$	$\alpha_{ch} = Nu/\lambda$
レンガ壁体	$\Delta P=1.01V_s^2$ (開口率0.31)	$Nu = 0.27Re_{max}^{0.63} Pr^{0.36} (Pr/Pr_w)^{0.25} * 0.64$ $\alpha_{ch} = 6.1V_s + 8.4$

C_f :圧力損失係数, x, y :方向, N :円管群の列数, C_D :抗力係数, σ_{ch} :平均対流熱伝達率[W/($m^2 \cdot K$)], V_i :流入風速[m/s], Nu :ヌセルト数, λ :熱伝導率[W/($m \cdot K$)], Re_{max} :最小流路断面でのレイノルズ数, Pr :プラントル数, w :壁面, V_s :レンガ孔内風速[m/s]

方程式には重力項に対してブシネスク近似を用い、非等温解析を行った。その他の計算条件を表3に示す。解析モデルは図1(b)に示す半囲み空間と階段室・機械室を再現した(図8)。

PCWの計算においては、セラミックパイプ群をまとめて通風性を有する直方体として扱い、PCWを通過する空気流れに対して機械工学分野で用いられる円管群の抗力係数⁽¹⁶⁾を与えた(表4)。またセラミックパイプ群を通過する空気に対する熱輸送においても直方体として等価的に扱い、平均対流熱伝達率を与えた。平均対流熱伝達率は同実測場所で風向・風速安定時を対象に導出した安藤らの実験式を用いた⁽¹²⁾⁽¹⁷⁾。

塩ビ管群と孔あきレンガについても通風性を有する直方体として扱った。塩ビ管群の空気流れに対する抵抗と平均対流熱伝達率は、機械工学分野で用いられている円管群の抗力係数⁽¹⁶⁾およびZukauskasの実験式⁽¹⁸⁾をそれぞれ用いた。孔あきレンガ壁体は小栗らの実験式⁽¹⁹⁾を用いた。

解析は、まず主風向の卓越性が顕著な①の時間帯を対象に、卓越風向であるS風を流入条件とした場合について精度検証を行った<ケース①>。風向によって平均風速が異なる傾向が見られたことから、流入風速はS風時の平均風速として1.80 m/sとした。流入風温度は10分間の平均代表気温である32.9℃とした。

続いて風向変化を伴う弱風条件である③の時間帯を対象に全8風向について解析を行った<ケース③>。流入風速は表5の通り風向ごとの平均風速を与えた。流入風温度はケース①同様、10分間の平均代表気温である33.6℃とした^(注4)。

4.3 CFD解析結果の重ね合わせによる全風向合成画像の作成

全8風向のCFD解析結果をもとに、冷気温度とその出現頻度を考慮した「全風向合成画像」を作成した。冷気の出現頻度に対する考え方は前述した $A_{\Delta T}$ と同じであり、 $A_{\Delta T}$ の空間分布を可視化したものである。

まず各風向の気温分布図を任意の ΔT で2値化し、 ΔT より低温な領域が白色となるよう白黒コンター図を作成した。続いて白色部分を切り取り、表5に示す風向の出現頻度に応じて明度を与え、重なった部分の明度が加算されるよう全風向の画像を重ね合わせた^(注5,6)。

5. 結果・考察

5.1 卓越風条件下における計算モデルの精度検証

ケース①の気温分布図を図9に示す。半囲み空間内では代表気温に比べ全体的に1.5℃程度低下している。実測結果とCFD解析結果を比較すると(図10)、半囲み空間内および開口部付近とも1℃以内の誤差で一致しており、1℃単位の気温分布予測において十分な精度であることが確認された。

ただし図9では主流後方に冷気が引き伸ばされている。これは一つに、 $k-\epsilon$ モデルでは鉛直断面内の横方向への運動

量拡散が相対的に小さく評価される問題に因るものと⁽²⁰⁾、

表5 風向の出現頻度と各風向の平均風速

風向	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	全風向平均
出現頻度 [%]	0.27	0.15	0.07	0.10	0.22	0.09	0.06	0.04	-
平均風速 [m/s]	1.08	0.92	0.87	1.22	1.07	0.80	0.57	0.69	0.96

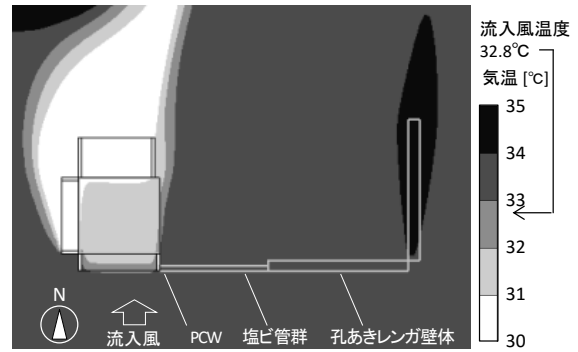


図9 <ケース①>主風向(S風)条件時の気温分布図

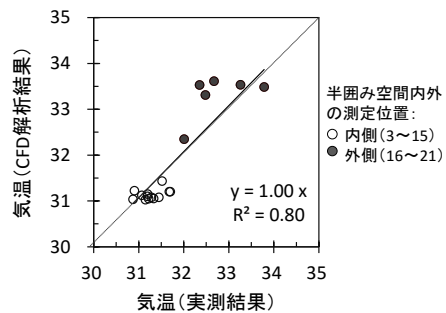


図10 <ケース①>実測結果とCFD解析結果の比較

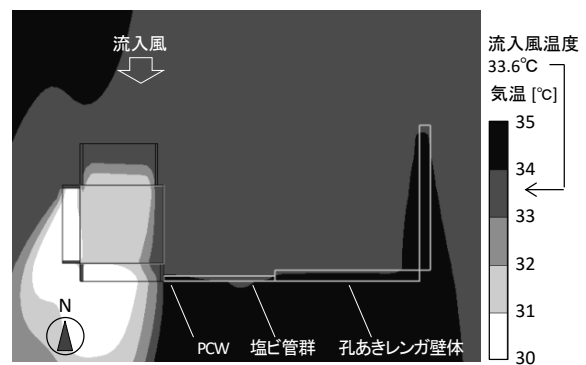


図11 <ケース③>主風向(N風)条件時の気温分布図

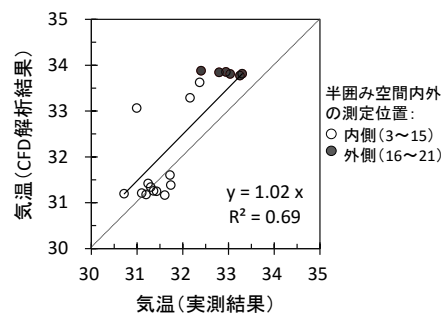


図 1 2 <ケース③>実測結果と CFD 解析結果の比較

もう一つは相対的に風向が安定している時であっても、実際には他の風向の出現による風向の乱れの影響を受けている現象が再現されていないためである。

5.2 風向の卓越性が弱い条件下における最多出現風向時の気温分布図

ケース③を対象に行った解析結果のうち、対象時間内の最多出現風向である N 風時の気温分布図を図 11 に示す。N 風条件下では、半囲み空間内部の気温が代表気温に比べ最大 2.4℃低下した一方で、半囲み空間内部東側には代表気温相当の空気の流入が見られた。

実測結果と CFD 解析結果とを比較すると、全体の傾向として一定の対応が見られるが、CFD 解析結果では PCW を通過した空気が移流する空間としない空間とにおいて気温の差が 2℃程度となっているのに対し、実測結果では 1℃程度と小さくなっていった。実測結果の方が温度差が小さいのは、実環境下では風向の変化による乱れの影響を受けているためと考えられる。したがって風向変化を伴う弱風条件下における最多出現風向による気温分布予測では、温度差を過大に評価してしまうことが課題点として挙げられる。

5.3 全風向合成画像による冷気温度とその出現頻度予測

ケース③のような風向の卓越性が弱い条件下において、最多出現風向のみを対象とした予測手法では、温度差を過大に評価してしまうことが指摘された。そこで、任意の ΔT ごとに 2 値化した気温分布図を重ね合わせた「全風向合成画像」を作成すると、 $\Delta T \leq 1[K]$ の図 13(a)、 $\Delta T \leq 2[K]$ の図 13(b) いずれにおいても、半囲み空間内部の方が外部に比べて明度が高く表示され、半囲み空間内に冷気が滞留しやすいことが読み取れる。さらに PCW 近傍で最も明度が高く、PCW によって生成された冷気が周囲に移流する現象が表れている。また $\Delta T \leq 1[K]$ より $\Delta T \leq 2[K]$ の方が明度が高い部分が小さいことから、より低温な空気が高い頻度で出現する範囲は PCW 近傍に限定される現象も表れている。

全風向合成画像より判読された ΔT ごとの出現頻度を実測結果と比較すると、全体の傾向としてよく一致している (図 14)。特に $\Delta T \leq 2[K]$ ではほとんどの測定位置において出現頻度が 0.1 の誤差範囲に納まっている。外れ値として測定点 No.3 があるが、これはセラミックパイプとフレームとの隙間から流入する外部風の影響により、実測結果では冷気の出現頻度が低く出ているものと考えられる。これはより高解像度で解析を行うことで改善可能な問題である。以上より、風向変化を伴う弱風条件下において、各風向時の平均流を対象とした解析結果をもとに、任意の ΔT 以下となる範囲について該当する風向の出現頻度を積算することによって、冷気の出現頻度を予測できることを示した。なお風速に強弱の変動が見られる場合や、風速は大きい風向が変動する場合などについては今後検証を重ねていく必要がある。

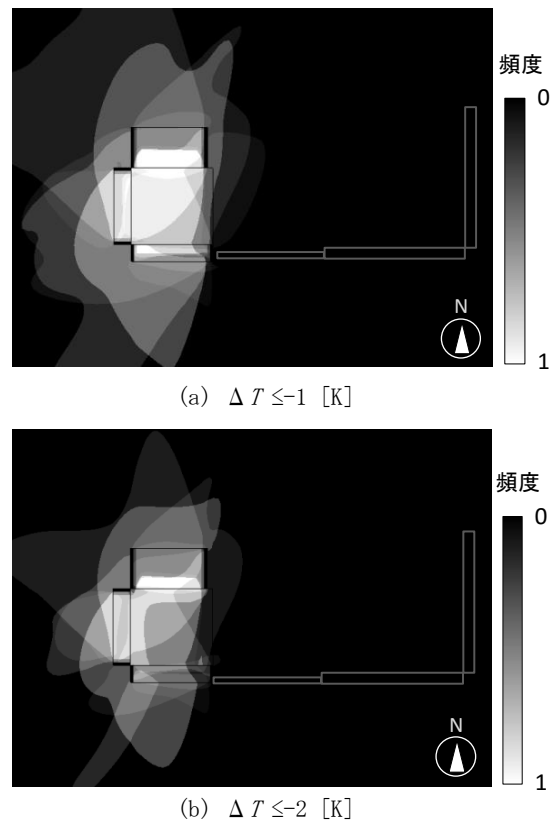


図 1 3 全風向合成画像

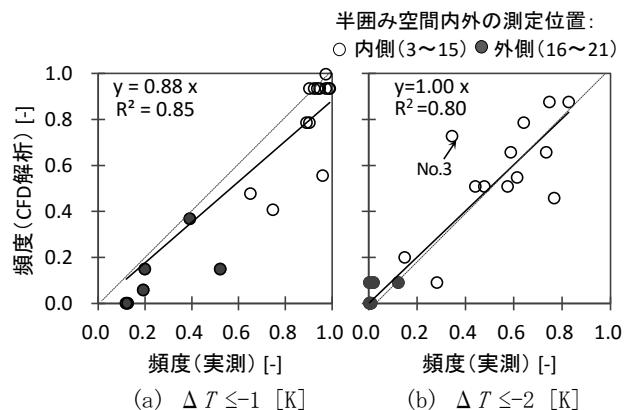


図 1 4 冷気の出現頻度の実測結果と CFD 解析結果の比較

6. まとめ

クールスポットの形成を目的とした設計支援において、気温低下として高い効果が期待される、風向の卓越性が弱く全風向の出現が見られる風環境を対象に、冷気の温度と出現頻度という観点から冷気の分布を予測する方法を検討した。得られた成果は以下の通りである。

1. 流入風の変動の影響を受ける PCW による半囲み空間においては、低温な空気が高い頻度で出現する地点ほど平均気温も低くなることから、冷気の空間分布を示す指標の一つとして、温度の情報に加えて出現頻度が重要であることを指摘した。

2. 各風向の平均流を扱う CFD 解析結果をもとに、ある地点において任意の基準温度以下となる場合には、該当する上空風の風向出現頻度を積算することにより、冷気の出現頻度 $A_{\Delta T}$ を算出する方法を提案した。
3. CFD 解析結果について任意の基準温度で 2 値化した気温分布図を全風向重ね合わせた「全風向合成画像」を作成することにより、対象温度の冷気の出現頻度を空間的に示した。
4. 実測結果との比較検証により、「全風向合成画像」から高い精度で冷気の出現頻度 $A_{\Delta T}$ を予測できることを示した。

今後は、風速に強弱の変動が見られる場合や、風速が大きくかつ風向変動が大きい場合、またより広域を対象とした空間等について検証を重ねてゆく。

注

- (1) 気温の測定にあたっては、日射および周辺地物からの反射と再放射が気温測定値に与える影響を抑えるため、感温部の直径が 0.1mm の T 型熱電対 (時定数 1.1 秒) を使用した。さらに半囲み空間外部 (図 1(d)の測定点 1,2) および開口部側 (図 1(d)の測定点 16~21) は、既往研究⁽²⁾を踏まえアルミ箔で包装した遮蔽板を上下に設置した。遮蔽板の間は自然通風状態とした。
- (2) 本研究において対象とした半囲み空間の規模および風速 (0.5~1m/s 程度) では、2 秒間の測定間隔でも対象空間内の気温変動の傾向を把握できていることを、既報⁽¹⁾で確認している。
- (3) 本実測場所では、SW,W,NW は SW に近い傾向を、E,SE,S は SE に近い傾向を、N,NE はその中間的な特徴を示しており、各風向の気温分布の特徴を表す上で、8 方位分割の風向で十分であると判断した。
- (4) 流入風温度は風向ごとの平均気温の差が 0.4℃以下であり、かつ流入風温度が異なると全風向合成画像を作成する際に気温差の絶対値と相対値に差が生じてしまい判読する情報が複雑となることから、10 分間の平均気温である 33.6℃を全風向条件に対して与えた。
- (5) 風向変化を考慮した解析結果の重ね合わせでは、温度の異なる空気のぶつかり合い等による流れの変化は表現できていない。全風向合成画像で示されているのは、各々の風向の平均流の分布である。
- (6) 本研究では画像編集ソフト (Photoshop CS5, Adobe) の「覆い焼きリニア加算」を用いて画像を合成した。

参考文献

- (1) 例えば、認定特定非営利活動法人環境ネットワーク埼玉 (埼玉県地球温暖化防止活動推進センター)「彩の国クールスポット 100 選」<http://www.kannet-sai.org/coolspot/spot/index.html> (最終閲覧日:2015/7/26)
- (2) 例えば、特集「都市におけるクールスポット」空気調和・衛生工学 83-8(2009), pp.11-86.
- (3) 森山正和・河野仁・吉田篤正・宮崎ひろ志・竹林英樹, 都市

- における樹林のクールスポット効果に関する実測データ解析, 日本建築学会計画系論文集, 541(2001-3), pp.49-56.
- (4) 何江・梅干野晃・高橋晃一朗, 蒸発冷却孔空きレンガ壁体を利用した都市・建築空間における微気候の予測・評価手法の開発に関する研究, 日本建築学会技術報告書, 15-31(2009-10), pp.839-842.
 - (5) 吉田伸治・大岡龍三・持田灯・富永禎秀・村上周三, 樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討, 日本建築学会計画系論文集, 536(2000-10), pp.87-94.
 - (6) 原山和也・吉田伸治・大岡龍三・持田灯・村上周三, 非定常放射・伝導解析による数値解析と精度検証 非定常な対流・放射・伝導を考慮した 3 次元の屋外温熱環境予測評価手法の開発 第 1 報, 日本建築学会計画系論文集, 556(2002-6), pp.99-106.
 - (7) 円井基史・梅干野晃・浅輪貴史, 毛管吸水性能を有する保水性舗装の含水状態と表面濡れ状態を考慮した熱・水収支モデルの開発 都市熱環境改善に向けた蒸発冷却舗装システムとその予測評価手法の開発 その 3, 日本建築学会環境系論文集, 653(2010-7), pp.577-584.
 - (8) Jiang He, Akira Hoyano, A 3D CAD-based simulation tool for prediction and evaluation of the thermal improvement effect of passive cooling walls in the developed urban locations, Solar energy 83 (2009), pp.1064-1075.
 - (9) 白井一義・梅干野晃・小栗健・永田達也, 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, 527(2000-1), pp.21-27.
 - (10) 何江・梅干野晃・高橋晃一朗, 蒸発冷却孔空きレンガ壁体を利用した都市・建築空間における微気候の予測・評価手法の開発に関する研究, 日本建築学会技術報告書, 15-31(2009-10), pp.839-842.
 - (11) 平山由佳理・梅干野晃・太田勇, 蒸発冷却壁体で構成された半囲み空間内に形成されるクールスポットに関する研究 一夏季屋外実測による冷気分布の実態把握一, 環境の管理, 78(2014-10), pp.17-24
 - (12) 梅干野晃・何江・小川俊輔・安藤純一・山村真司・赤川宏幸・中島古史郎・岡田清・倉田泰輔, 高揚水性セラミック材を用いた蒸発冷却壁体システムの開発 制作したセラミック材の基本性能と試験壁体の冷却効果等の把握実験, 日本建築学会環境系論文集, 641(2009-7), pp.775-782.
 - (13) 大場正昭・小林信行, 風向の出現頻度を考慮した重ね合わせ法による建物近傍濃度の予測方法に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 368(1986-10), pp.10-20.
 - (14) 加藤淳佳・大風翼・持田灯・富永禎秀, 非平衡流れ場に適用可能な飛雪現象のモデリング (その 12) 平均風向・風速の変化を考慮した積雪深分布の予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2014-9), pp.677-678.
 - (15) 千葉修・足立隆史, 風が弱い時の拡散の気象パラメータの研究 (I) (風が弱い時の風向風速の変動量の観測), 大気汚染研究, 11-5(1976), pp.388-399

- (16) Knudsen, J.G. and Katz, D.L., Fluid Dynamics and Heat Transfer, (1958), McGraw-Hill, New York.
- (17) 梅干野晁・安藤純一・何江, 蒸発冷却壁体システムによるクールスポット形成のための予測・評価ツールの開発 その1・2, 日本建築学会大会学術講演梗概集,, (2010), pp.139-141.
- (18) 機械工学便覧 基礎編 α 5 熱工学, 日本機械学会, pp.95-96, 2006.
- (19) 小栗健・梅干野晁・白井一義・奥田知康: 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, 日本建築学会計画系論文集, 532(2000-6), pp.101-108.
- (20) 例えば, 持田灯・村上周三・林吉彦, 立方体モデル周辺の非等方乱流場に関する $k-\epsilon$ モデルと LES の比較, 日本建築学会計画系論文集, 423(1991-5), pp.23-31.
- (21) 龍谷光三・清家清・梅干野晁, 輻射環境下における気温測定装置の試作とその検討(照り返しに関する基礎的研究・その1), 日本建築学会論文報告集, 245(1976-7), pp.91-100.

(Received August 2, 2015, Accepted November 30, 2015)