

モデル街区 WG 成果報告

1. はじめに

大阪ヒートアイランド対策技術コンソーシアム（大阪HITEC）のモデル街区 WG では、適材適所の暑さ対策技術の導入に向けて、導入効果の予測方法に注目して検討を進めてきた。その一環として、WG 主査の Takebayashi ら⁽¹⁾は大阪の4月～10月の日中の時刻別気象データを用いて日射遮蔽、ミスト噴霧、被覆改善による暑さ対策効果を予測し、日時に応じてどの程度の暑さ回避が期待できるか評価した。日射遮蔽効果は、主に直達日射量の遮蔽特性に支配されるため、日時が特定され、気象条件が設定されれば、遮蔽材料の形状と日射透過率、日射反射率に応じてその効果を予測することが可能である⁽²⁾。被覆改善効果は、主に日射反射あるいは蒸発冷却の特性に支配されるため、気象条件が設定されれば、日射反射率、蒸発効率に応じてその効果を予測することが可能である⁽³⁾。ミスト噴霧効果は、主に蒸発量に支配されるため、気象条件が設定されれば、噴霧量に応じて蒸発量が算出され、その効果を予測することは可能である⁽⁴⁾が、気象条件として支配的な影響を及ぼす風速は、射遮蔽効果や被覆改善効果に支配的な影響を及ぼす日射量と比較して時間変動が大きいため、ミスト噴霧効果の評価には風速の時間変動の影響を考慮する必要がある。本研究では、風速の時間変動に応じて変化するミスト噴霧効果を、暑さ対策技術の適材適所の観点から評価するシミュレーション方法について検討を行った。

2. ミスト噴霧効果のシミュレーション方法

LES モデルを用いた非定常計算の1秒ごとの風速計算結果を用いて、温度輸送方程式(1)により、ミスト噴霧による温度低下量を計算した。非定常の風速計算結果をデータベースとして保持すれば、任意のミスト噴霧位置、噴霧量を設定したシミュレーションを簡易に実施することが出来る。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = (\alpha + \nu_{sgs}) \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i^2} + S_H \quad (1)$$

ここで、 θ は温度 (K)、 t は時間 (s)、 u_i は瞬時速度の3成分 (m/s)、 x_i は空間座標の3成分 (m)、 α は空気熱拡散係数 (m^2/s)、 ν_{sgs} は SGS 渦粘性係数 (m^2/s)、 S_H はソース項 (K/s) である。

乱流モデルにスマゴリンスキーモデルを用い、流入、流出境界は自然流入流出条件、上空及び側面境界は free-slip 条件、地表面及び建物壁面境界は一般対数則条件を設定した⁽⁵⁾。ドライバー領域を用いた流入変動風は、地上100mの風速を4.1m/sとしたべき乗則に従い片岡ら⁽⁶⁾の方法により与え、風向は南西とした。水平方向50m四方の解析領域を格子サイズ0.5m×0.5m×0.5mで分割した。計算終了時間は150秒で、うち最初の30秒は助走期間とし残りの120秒間を分析対象とした。事前に実施した600秒間の風速の計算結果を用いて自己相関関数を算出し、フー

リエ変換して得られたパワースペクトル密度から周期128秒以内の地点が多いことが確認された。そこで、600秒間と120秒間の平均風速比、乱れの強さを比較したところ、両者はほぼ一致したため、120秒間の計算結果で代表させることが可能であると判断した。

ミストによる気温低下量 Δq (°C)、湿度上昇量 ΔX_a (g/kg') は式(2)、(3)より算出される。

$$\Delta \theta = \frac{lQ}{C_p \gamma v A}, \quad \Delta X_a = \frac{C_p}{l} \Delta \theta \quad (2), (3)$$

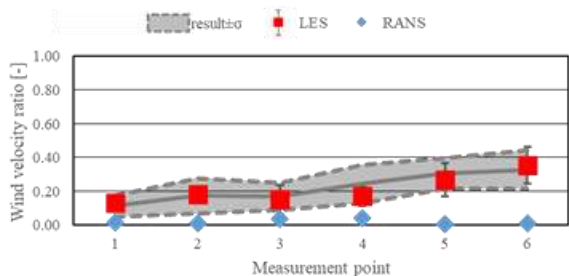
ここで、 l は水の蒸発潜熱 (J/g)、 Q は噴霧量 (g/s)、 c_p は空気の比熱 (J/(gK))、 ρ は空気の密度 (g/m^3)、 v は風速 (m/s)、 A はミストが蒸発する範囲の外部風が通過する断面積 (m^2) である。式(2)よりミスト噴霧口近傍において式(1)の S_H を与えた。

3. 風速と温度低下量の計算結果

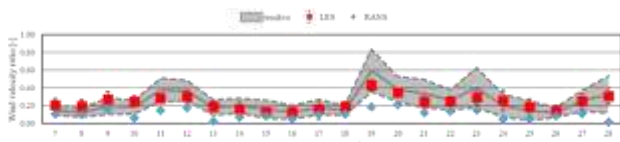
3.1 風速の計算結果の精度検証

高層建築物、幅員の広い道路が多い京町筋交差点周辺の6地点、低層建築物、幅員の狭い道路が多い北野坂周辺の22地点、建物が少なく海に近い新港町周辺の12地点で、地表面からの高さ1.5mにおける風速を測定した。測定に使用した熱線風速計の応答性は約4秒であるが、サンプリング間隔1秒で60秒間のデータを測定、記録した。風向は吹き流しの目視による最頻値を記録した。

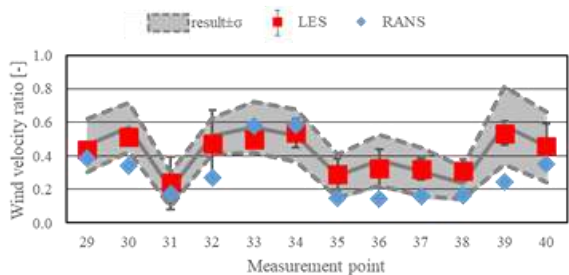
各測定点における風速の測定結果と計算結果の比較を図1に示す。同じ境界条件を与えて RANS モデルにより計算した結果を合わせて示す。風速比は、各測定点での風速を上空風速で除して算出した。LES の計算結果の幅は標準偏差を表す。LES の計算結果の平均値は、測定値のばらつきの範囲にほぼ収まった。ただし LES の標準偏差は、測定値のばらつきの範囲より小さい。LES では流入風の風向を南西方向に固定しているため、計算結果の変動は小さいと考察される。RANS の計算結果は、障害物の少ない新港町周辺では測定値と比較的一致したが、多くの測定点において測定値のばらつきの下限値程度となった。特に高層建築物、幅員の広い道路が多い京町筋交差点周辺では測定値より小さくなった。RANS は流れ場の時間変動や小さな渦を捉えられず、建物の風上コーナー部付近における剥離や逆流の再現性が悪いことから、高層建築物が並ぶ街区では、解析対象領域内の流れが平均化され、風速比が過小評価されたと考察される。従って、駅周辺地域などの風速の変動が大きい高層建築物周辺でミスト噴霧効果を評価する場合には、RANS モデルより LES モデルが適しているが、流入風の変動特性の再現方法によっては、瞬間的に発生する高風速が再現されず、ミストが十分に拡散されないために、ミスト噴霧口周辺における気温低下効果が若干大きく評価される可能性がある。



(高層建築物、幅員の広い道路が多い京町筋交差点周辺)



(低層建築物、幅員の狭い道路が多い北野坂周辺)



(建物が少なく海に近い新港町周辺)

図1 各測定点における風速の測定結果と計算結果の比較

3.2 ミストによる温度低下量の計算結果

LESによる風速比分布(地上1.5m高さ)とミスト噴霧装置の設置個所を図2に示す。神戸市は、暑い中でも利用が想定される駅前広場(①サンキタ広場)、駅前交差点(②マルイ前)、バス停(③三宮センター街東口バス停)、公園(④花時計)、交差点周辺広場(⑤三宮プラッツ)などに暑さ対策としてのミスト噴霧装置の設置を進めている。ミスト噴霧装置の設置高さを図3に示す。人体が直接濡れることを回避するため、広場(①、⑤)では人体(1.25mと仮定)から1.0m、交差点とバス停(②、③)では1.5mの高さより噴霧されたが、人が噴霧装置に近づくことも想定される公園(④)では地上0.75mから噴霧された。

ミスト噴霧装置設置個所周辺の代表点における平均温度低下量と平均風速を表1に示す。ミスト噴霧位置から人体までの距離は、利用実態を踏まえて設定した。駅前広場や交差点(①サンキタ広場、②マルイ前)では120秒間を通して風速が1.0m/sを超える時間が多く、平均温度低下量は0.0°Cになった。比較的風速が小さいバス停(③三宮センター街東口バス停)では、温度低下量は大きい。公園(④花時計の3地点)はミスト噴霧位置と代表点の距離が小さいため、風速は大きい温度低下量も大きい。交差点周辺広場(⑤三宮プラッツ)では周辺事物により風が遮蔽され、温度低下量も大きい。

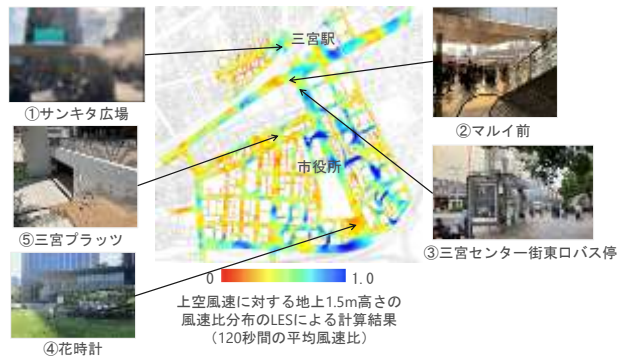


図2 ミスト噴霧装置設置個所とLESによる風速比分布

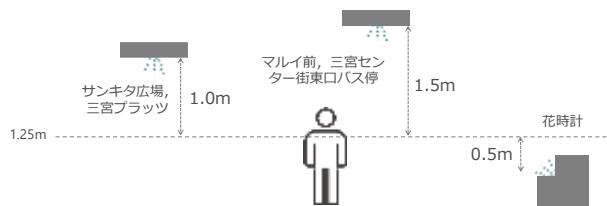


図3 ミスト噴霧装置の設置高さ

表1 ミスト噴霧装置設置個所周辺の代表点における平均温度低下量と平均風速

	ミスト噴霧位置から人体までの距離 (m)	平均風速 (m/s)	平均温度低下量 (°C)
①サンキタ広場	1.5	1.2	0.0
②マルイ前	2.0	1.5	0.0
③バス停(南)	2.0	0.6	1.1
③バス停(北)	2.0	1.0	0.1
④花時計(西)	0.5	2.1	0.5
④花時計(東)	0.5	1.0	0.9
④花時計(南)	0.5	1.1	2.3
⑤三宮プラッツ	0.75	0.5	0.4

4. ミスト噴霧条件とミスト噴霧効果の関係

4.1 風速とミスト噴霧効果の関係

図4にバス停(南、北)の風速と気温低下量の出現割合を示す。バス停(南)は0.5m/s以下の割合が40%程度、1.0m/s下が80%程度で、バス停(北)は0.5m/s以下が15%程度、1.0m/s以下が55%程度となり、バス停(南)が比較的弱風である。

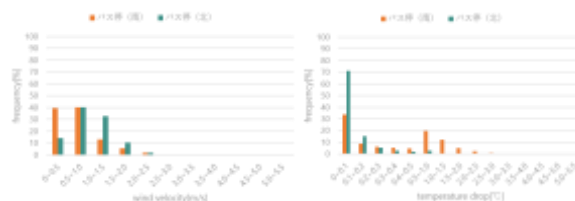


図4 バス停(南、北)の風速(左)と気温低下量(右)の出現割合

バス停(南)は気温低下量1.0°C以上の割合が20%程度、

1.0°C以下が80%程度で、バス停(北)は1.0°C以下がほぼ100%程度となっている。

4.2 風向とミスト噴霧効果の関係

図5に花時計(東、南)の風速と気温低下量の出現割合を示す。1.0m/s以下は、花時計(東)で50%程度、花時計(南)で40%程度であり、花時計(東)が若干弱風である。気温低下量1.0°C以上の割合は花時計(東)で10%程度、花時計(南)で40%程度である。若干弱風の花時計(東)の気温低下量が小さい理由は、ミストが人体方向に流れない主風向のためであり、花時計(南)では風速は若干大きい、ミストが人体方向に流れる様子が確認された。

バス停はミストの噴霧位置が若干高いため、弱風条件でないと効果が届かず、花時計はミストの噴霧位置が比較的人体に近い、その影響を受けやすいと考えられる。

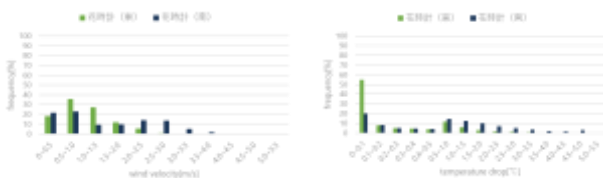


図5 花時計(東、南)の風速(左)と気温低下量(右)の出現割合

5. まとめ

風速の時間変動に応じて変化するミスト噴霧効果を、暑さ対策技術の適材適所の観点から評価するシミュレーション方法について検討を行った。LESモデルを用いた非定常の風速計算結果をデータベースとして保持することで、任意のミスト噴霧位置、噴霧量を設定したシミュレーションを簡易に実施することが出来る。神戸市内のミスト噴霧装置設置箇所を対象として、ミスト噴霧による温度低下量を計算した。風を遮蔽する事物等が少なく、高層建築物による高風速も生じやすい駅前広場や交差点では風速が1.0m/sを超える時間が多く、平均温度低下量は小さい。周辺事物により風が遮蔽され、比較的風速が小さいバス停や交差点周辺広場では、温度低下量は大きい。ミスト噴霧位置と代表点の距離が小さい公園では、風速は大きい温度低下量は大きい。風速が大きく、ミストノズルからの距離が大きいと温度低下量は小さくなる傾向が確認された。ただし、ミストノズル位置と風速、風向の関係により温度低下量の分布は非定常的に変化した。そのため、ミスト噴霧条件と噴霧効果の関係は単純な相関関係で表すことは難しいが、ミスト噴霧による冷却効果は、風速、ミストノズルからの距離、風向を指標として説明できる可能性はある。

謝辞

LESモデルを用いた風速分布、気温分布の計算は神戸大学の山腰和希さんの修士論文、水田百香さんの卒業論文の一部である。神戸市建設局との共同研究の一環として実施

した。協力頂いた皆様に謝意を表します。JSPS 科研費JP23K22921、大成学術財団の助成を受けた。

参考文献

- (1) H. Takebayashi and N. Maeda, Effects of adaptation measures to extreme heat throughout medium and high temperature periods, case study at the Osaka expo site, Scientific Report, 14-1 (2024), 5914.
- (2) H. Takebayashi, A simple method to evaluate adaptation measures for urban heat island, Environments, 5-6 (2018), 13.
- (3) H. Takebayashi and M. Moriyama, Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island, Building and Environment, 42-8 (2007), pp.2971-2979.
- (4) S. Kyogoku and H. Takebayashi, Experimental verification of mist cooling effect in front of air-conditioning condenser unit, open space, and bus stop, Atmosphere, 14-1 (2023), 15.
- (5) 日本風工学会編, 都市の風環境ガイドブック—調査・予測から評価・対策まで—(2022), 森北出版.
- (6) 片岡浩人・水野稔, 流入変動風を用いた三次元角柱周りの気流解析, 日本建築学会計画系論文集, 423(1999), pp.23-31.