

空間評価 WG 成果報告

1. はじめに

本稿では、大阪 HITEC 内に設けられた空間評価 WG の活動内容を紹介する。空間評価 WG は、夏季の街路空間に形成される暑熱環境の種々の評価指標の関連性を分析するとともに、新たな空間評価手法を検討することを目的に活動を進めてきた。表 1 に空間評価 WG の主な構成員をまとめる。なお、本 WG はモデル街区 WG（主査 竹林英樹氏）と合同開催されてきた。竹林氏、橘高氏はモデル街区 WG の主査、幹事としての参加者である。森山氏、吉田篤正氏、榎元氏は、二つの WG のアドバイザーとして参画いただいた。

表 1 空間評価 WG の主な構成員

<主査> 吉田伸治
<モデル街区 WG からの参加者> 竹林英樹、橘高康介
<アドバイザー> 森山正和、吉田篤正、榎元慶子

2. 空間評価 WG における取り組み内容

空間評価 WG では活動期間内に二つの課題に取り組んだ。具体的には、①屋外暑熱環境に対する種々の評価指標の関係分析、②群集内外の温熱環境への影響を考慮した評価手法の提案、に取り組んだ。次章以降では、各々の取り組みの概要を紹介する。

3. 取り組み①：屋外暑熱環境に対する種々の評価指標の関係分析^{※1)}

3.1 取り組みの目的

この取り組みでは、夏季における屋外街路空間の温熱環境評価に用いられる種々の指標の相関を詳しく分析した。ヒートアイランド現象の顕在化に伴い、都市を構成する屋外街路空間の夏季の温熱環境は悪化の一途を辿っている。この劣悪な夏季屋外温熱環境に適応するための多様な原理を持つ技術が提案されている。例えば、最も広く実装される街路樹植栽は、街路樹の葉群が構成する樹冠の日射遮蔽に伴う日影の形成、並びに地表面温度、周囲の気温低下を期待するものである。これに対して、建物外表面の高反射化は、太陽からの入射日射を表面でより多く反射することにより外表面の日射の吸収、並びに正味放射量の減少を意図するものである。従って、提案される種々の手法が屋外温熱環境形成に作用する機構は異なる。そのため、これらの技術を適材適所に実装するためには、空間内の温熱環境温熱環境に対する安全性、快適性を適切に評価し、対策を導入すべきホットスポットを明確にする必要がある。この適材適所な評価に供すると予想される種々の指標が提案されているものの、各々の関係性を詳しく分析した研究例は少ない。そこで、この取り組みでは、数値流体力学 CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析技術を用いて、夏季における屋外街路空間の種々の温熱環境評価指標の分布を算出し、指標毎の相関を分析した内容を報告する。

3.2 解析概要

解析対象を図 1 に示す。本解析では一辺 30m 立方の立方体型の建物モデルが東西、南北に 8 列ずつ並ぶ均等街区モデルを対象とする。本解析では、記録的猛暑となった 2010 年夏季における晴天日 (7/23) の大阪の気象条件を対象とする。夏季晴天日の大阪では西側の大阪湾から流入する海風が卓越しやすい。この海風が流入する 14 時における温熱環境評価指標の空間分布を算出する。

本解析で取り上げた評価指標は、SET* (New Standard Effective

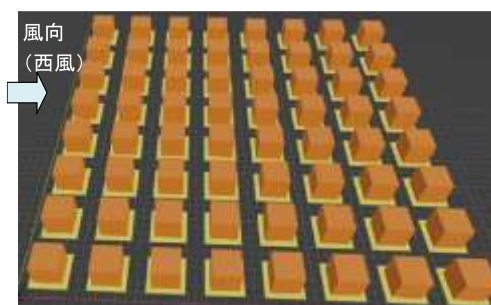


図 1 解析対象

Temperature)^{文2)}、WBGT^{文3)}、暑熱環境曝露時間^{文4)}の3種類である。SET*算出のための人体側の条件として、着衣量を0.5clo、代謝量を1.2Metと各々設定した。WBGTについては、算出に用いる湿球温度、グローブ温度の値を、自然湿球、直径15cmのグローブ球に対する熱収支式^{文5)}を解いて得られる値を用いた。近年多くのCFD解析に基づくWBGTの評価では、湿球温度については強制通風を想定した乾湿計公式^{文6)}を、またグローブ温度についてはBetfordの式^{文7)}により得られる値を用いることが多い。この方法については、WBGTの本来の定義と異なる点を指摘される場合が多い。そこで、本解析ではこのWBGT算出に用いる湿球温度、グローブ温度の算出方法の違いがWBGTの値の算出結果に対する影響も評価した。暑熱環境曝露時間については、体温調節モデル(本解析ではTwo-nodeモデル^{文2)})に対象の温熱環境条件を課した解析で得られる人体温熱生理反応の推移より熱中症発症と判断される状況に到達するまでの経過時間とした。本解析における熱中症発症の条件は、①平均心部体温が38℃以上、②分泌発汗量の累積値が体重の3%を超過のどちらかを満たした場合とした。なお、Two-nodeモデルに設定する人体側の条件はSET*算出時と同じとした。

3.3 解析結果

3.3.1 流れ場・温度場の分布

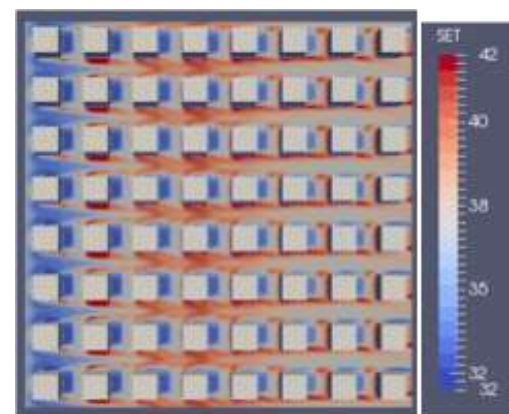
図2に評価の対象日時(2010年7月23日14時)の大阪における風速ベクトル、並びに気温の鉛直(東西方向)、水平(高さ1.2m)断面内の分布を示す。鉛直断面は、北から4列目の建物列を東西方向に切断し、北を臨むものである。建物間では、水平、鉛直双方の断面に循環流が形成される。これらの循環流が建物外表面、地表面から発した熱の滞留に強く作用する。



図2 流れ場、温度場の傾向
(解析領域中央を東西方向に切断、北を臨む)

3.3.2 温熱環境評価指標の分布

図3に本解析で比較する温熱環境評価指標の一例としてSET*、WBGT(熱収支法)の高さ1.2mにおける水平断面内の分布を示す。図の左側が西側であり、風が流入する風上側である。そのため、流入風が直接衝突する先頭の建物付近では強い気流により熱が後方に輸送されるため、SET*、WBGTの値は風下側より温度が低い。また、評価日時の14時は太陽位置が西であるため、日差しも図左から入射する。そのため、建物東側(図の右側)に日影が形成されるため、これらの領域のSET*は34℃程度、WBGTは約30℃程度の値を示し、相対的に低温となる。一方、東西街路は日差しを遮るものが無い日照部となるため、SET*、WBGTは高温となる。



(1) SET*



(2) WBGT(熱収支法)

図3 温熱環境評価指標の水平分布

3.3.3 温熱環境評価指標間の関係

前項に示した図3より、全ての評価指標において、日照部、日影部の間での値の差が大きい傾向が見られた。そこで、結果を日照部と日影部の値の2群に分けて相関を評価する方が適切と考えた。図4はSET*の評価に用いる人体モデルへの日射入射量の頻度分布である。本解析では、人体への日射入射量の値は約50~350W/m²程度の範囲に分布し、約50W/m²程度、約280W/m²程度の

2つの値で頻度のピークが見られる。日影部、日照部はこれらのピークを中心に分布しており、これらの中間 (200 W/m²) に区分を設けて各々の傾向を分析する。

図5はWBGTの算出方法の違いが評価結果に与える影響を分析したものである。図の横軸(WBGT0)に従来の手法(湿球温度に強制通風型乾湿計に基づく公式を、グローブ温度をBetfordの式を使用)の値を、縦軸(WBGTN)に佐藤らの方法(自然湿球、黒球の熱収支に基づく方法)の結果を配置したものである。当然ながら、日照部(○)の結果は日影部(×)よりも高温の値を示す領域に集中することが分かる。日影部における算出方法の差異の影響は小さいが、入射日射の多い日照部では、熱収支に基づくWBGTNの方が従来法のWBGT0よりも高温となる。例えばWBGT0の値が34℃となる時のWBGTNの値は37℃程度の値を示す。一般に、WBGT、すなわち「暑さ指数」のランクは3℃刻みで変化する。この関係に基づくと、WBGTの評価変数の算出方法の違いにより、酷暑となる日照部においては評価結果が1ランク程度異なることが分かる。

次に、評価指標間の比較の一例として、図6にSET*とWBGT(熱収支法)の値の関係を日照部、日影部毎に分けて示す。ここでは図の縦軸にWBGT(熱収支法)を横軸にSET*の値を配置する。日照部、日影部ともにSET*とWBGTには高い相関が見られることが分かる。SET*が38℃の時、WBGTの値は日照部で約33℃、日影部で約31℃程度の値を示す。従って、SET*の値が同じであっても、WBGTについては日照部の方が日影部より約1~2℃程度高いことが分かる。同じSET*となる日照部においては、日射入射に伴いMRTが高温な空間が形成されると考えられる。一方、日影部では弱風、または湿度の高い空間が形成されると考えられる。本解析で生じた日照部と日影部のWBGTの差は、日照部の高温なグローブ温度の熱中症危険性に対する影響が、日影部の弱風または高湿度の影響よりも強く現れたためと考えられる。

以上の様に、CFD解析により得られる温熱環境要素の空間分布データは、温熱環境指標の関係性を詳しく分析する有用な情報となることが明らかとなった。

4. 取り組み②：群集内外の温熱環境への影響を考慮した評価手法の提案

4.1 取り組みの目的

近年の夏季屋外空間の温熱環境悪化の顕在化に伴い、温熱快適性、熱中症の発症危険性の評価、暑熱環境への適応策が注目されている。夏季の屋外空間では、野外コンサート、花火大会、大規模テーマパークの入退場など、多くの人が集うイベントが数多く開催される。このような機会においては大きな群衆が形成され、長時間留まることも珍しくない。群衆内では、図7に示すように、人の重なりによる風通しの悪化、日射遮蔽、群衆構成員各々からの熱・湿気

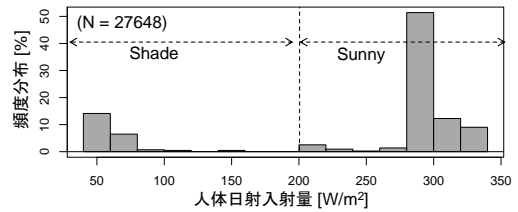


図4 人体日射入射量の頻度分布

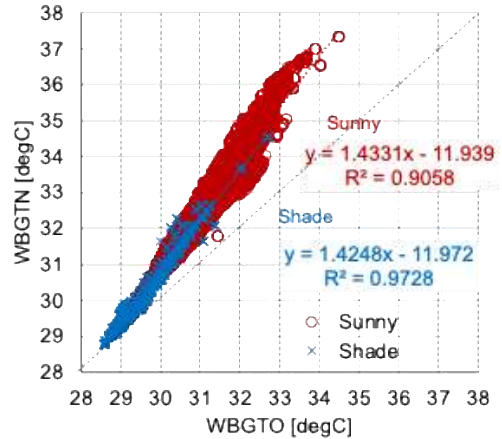


図5 WBGTの算出方法の違いが評価に与える影響

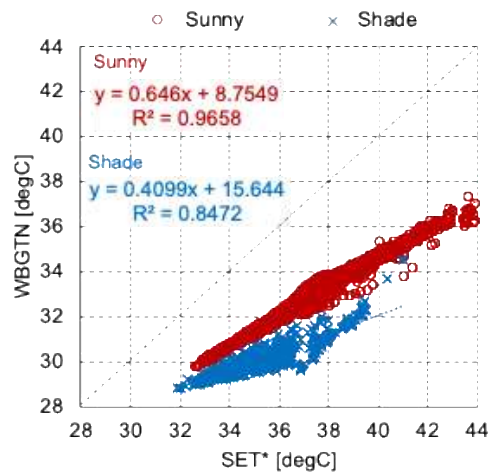


図6 WBGTとSET*の値の関係

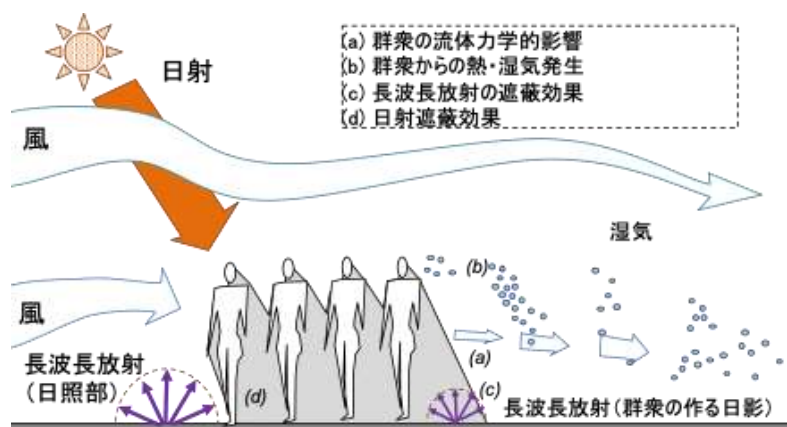


図7 群衆が群衆内外の微気候に与える複合的影響

発生などにより、その周囲とは異なる微気候が形成されると考えられる。従って、このようなイベント時には、その周囲の空間に比べて、温熱快適性の悪化、熱中症の発症危険性の増加が懸念される。そのため、人の集密に伴う群衆の形成がその周辺微気候、滞在者の熱中症の発症危険性、などの評価技術の開発が期待される。群衆がその内外の温熱環境形成に与える影響のモデル化については、流れ場（流体力学的）に対する影響のモデル化についての取り組みが見られる^{文8)~10)}ものの、温熱快適性も含めた総合的な評価は行われていない。そこで、本取り組みでは、群衆による温熱環境形成を総合的に評価するための数値サブモデルを開発することを目的とする。この取り組みでは、数値サブモデルに組み込むべき機能の一つである群衆の日射遮蔽、流れ場に対する影響のモデル化の方法を提案するとともに、その適用例を紹介する。

4.2 群集モデル

本取り組みで提案する群衆モデルにおいて、群衆はその内部に滞在する複数の人体と空気層により構成されるものとみなす。群衆の形状は3次元ポリゴンでモデル化される。このモデルでは、群衆を構成する人体個々の詳細な形状を再現しない。しかし、群衆の存在により生ずる①日射・長波長放射の減衰、②流体力学的影響（風速低下、乱れの増加）、③群衆構成員個々の温熱生理反応に基づく熱・湿気発生をモデル化する。本稿では、これらのうち、①、②のモデル化の概要を説明する。

4.2.1 日射・長波長放射の減衰^{文11)}

本稿では、特に群衆内に入射した際の日射減衰に着目し、そのモデル化の考え方を説明する。日射が群衆内に入射した際の日射減衰（日射透過率 τ_{crowd} ）は、吉田らの街路樹植栽のサブモデル^{文11)}を参考とした次式によりモデル化される。

$$\tau_{crowd} = \exp(-a_{crowd} \cdot l_p) \quad [1]$$

$$a_{crowd} = A_{crowd} / V_{fluid} \quad [2]$$

$$A_{crowd} = A_p \cdot \eta_{crowd} \cdot A_{area} \quad [3]$$

$$A_p = A_D \cdot f_p \quad [4]$$

$$A_D = 0.202m^{0.425}l_{tall}^{0.725} \quad [5]$$

ここで、 a_{crowd} は日射の入射方向に対する群衆の投影面積密度 $[\text{m}^2/\text{m}^3]$ 、 l_p は日射の群衆内の通過距離 $[\text{m}]$ 、 A_{crowd} は入射方向に対する群衆全体の投影面積 $[\text{m}^2]$ 、 V_{fluid} が群衆を含むセルの体積 $[\text{m}^3]$ 、 A_p は入射方向に対する群衆構成員一人あたりの投影面積 $[\text{m}^2/\text{人}]$ 、 η_{crowd} は群衆内構成員の配置密度 $[\text{人}/\text{m}^2]$ 、 A_{area} は群衆の水平方向の広がり $[\text{m}^2]$ 、 A_D はDuBoisの表面積^{文12)} $[\text{m}^2]$ 、 f_p が人体全身の投影面積率^{文13)} $[-]$ 、 m が群衆構成員の平均体重 $[\text{kg}]$ 、 l_{tall} が群衆構成員の平均身長 $[\text{m}]$ である。上式において、 a_{crowd} は、前述の街路樹植栽モデルにおける葉面積密度 a と放射の消散係数 k

の積 (ak) に相当する。人体形状に基づく日射減衰効果は、[4]式の f_p 、[5]式の A_D の2つのパラメータの作用を受けて再現される。

4.2.2 流体力学的影響（風速低下、乱れの増加）^{文14)}

群衆の流体力学的影響は、流れ場の輸送方程式、具体的には風速の各成分 u_i の方程式、乱流エネルギー k 、粘性消散率 ε の方程式の右辺に発生項の形で影響を付加することで再現される。表2にこれに関わる基礎方程式を纏める。群衆の影響を表す付加項は、 F_i 、 F_k 、 F_ε の様にモデル化される

(表2[10]~[12]式)。これらの項の中で、群衆の形状、疎密の影響は、日射減衰のモデル化において示した群衆の投影面積 [4] 式を群衆の気流方向に対する投影面積率 f_p を用いて得られる値により再現される。従って、この流れ場に与える影響のモデル化においても、日射減衰の効果に作用する DuBois の式、投影面積率 f_p は、重要なパラメータとなる。なお、表2の方程式群は、既往研究^{文9), 10)}を参考にしたものである。流れ場に対する影響を再現する上で重要なパラメータとなる群衆の抗力係数 C_f 、並びに ε 方程式における付加項 F_ε 内のモデル係数 C_ε は、Okaze ら^{文10)}の研究を参考に、各々、0.7、1.5 と設定された。

表2 Phase1 群衆の流体力学的影響の基礎方程式

$$G \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + G \frac{\partial \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \frac{G \langle p \rangle}{\rho} + \frac{2}{3} G \bar{k} \right\} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial G \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial G \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \right\} - G F_i \quad [6]$$

$$G \frac{\partial \bar{k}}{\partial t} + G \frac{\partial \bar{k} \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t \frac{\partial G \bar{k}}{\sigma \partial x_j} \right) + G (P_k - \bar{\varepsilon} + F_k) \quad [7]$$

$$G \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial t} + G \frac{\partial \bar{\varepsilon} \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t \frac{\partial G \bar{\varepsilon}}{\sigma \partial x_j} \right) + G \frac{\bar{\varepsilon}}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \bar{\varepsilon}) + G F_\varepsilon \quad [8]$$

$$P_k = \nu_t \frac{1}{G} \left(\frac{\partial G \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial G \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \frac{\partial G \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \quad [9]$$

$$F_i = \frac{1}{2} C_f \frac{A_{crowd}}{V_{fluid}} (\langle u_i \rangle - \langle u_{crowd} \rangle) \sqrt{(\langle u_i \rangle - \langle u_{crowd} \rangle)^2} \quad [10]$$

$$F_k = (\langle u_i \rangle - \langle u_{crowd} \rangle) F_i \quad [11] \quad F_\varepsilon = \frac{\bar{\varepsilon}}{k} \frac{k^{1/2}}{L_{crowd}} C_\varepsilon \quad [12]$$

$$L_{crowd} = \frac{A_{crowd}}{l_{tall}} \quad [13]$$

u_i : 気流速度 [m/s], u_{crowd} : 群衆の速度 [m/s],
 k : 乱流エネルギー [m^2/s^2], ε : 粘性消散率 [m^2/s^3],
 C_f : 群衆の抗力係数, C_ε : モデル定数, V_{fluid} : メッシュ内の容積 [m^3],
 L_{crowd} : 群衆の拡がりを表す代表長さスケール [m],
 A_{crowd} : 群衆の気流方向に対する投影面積 [m^2]

4.3 群衆モデルの影響評価のケーススタディ

4.3.1 群衆規模が日射透過に与える影響分析^{文11)}

本項では、4.2.1項で説明した日射遮蔽の評価モデルを用いて群衆の規模がその内部の日射遮蔽(吸収)に与える影響の分析例を紹介する。表3に解析ケースを示す。本解析では、群衆内の構成員密度 η_{crowd} を 1人/ m^2 に固定し、群衆の規模(空間スケール)を 1m (Case 1)、2m (Case 2)、5m (Case 3)、10m (Case 4)、20m (Case 5) と拡大した解析ケースを設定した。これに伴い群衆内の構成員数は、ケース毎に 1人 (Case 1)、4人 (Case 2)、25人 (Case 3)、100人 (Case 4)、400人 (Case 5) へと増加する。群衆構成員の平均身長を 1.7m、体重を 70kg に設定

表3 解析ケース

Case	水平方向の規模	滞在者数 [人]
1	1m×1m	1
2	2m×2m	4
3	5m×5m	25
4	10m×10m	100
5	20m×20m	400

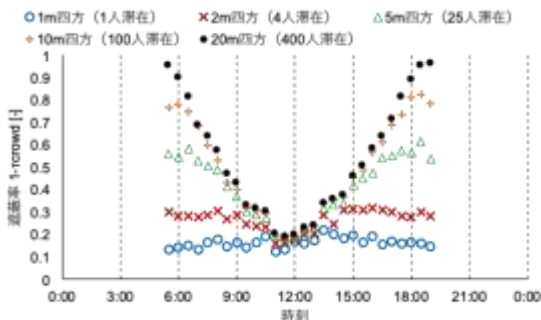


図8 群衆規模と日射遮蔽率の関係 (7/23、西向き)

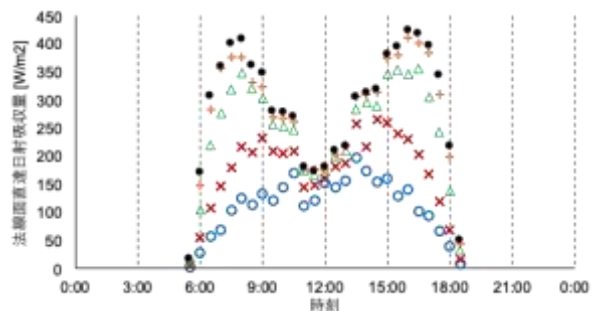


図9 群衆規模と直達日射吸収量の関係 (7/23、西向き)

した^{文15)}。群衆の臨む方位については、基本的には西に設定したものの、Case 1 においては西向き以外の方位（8 方位）を臨む場合の解析も併せて行った。解析対象日時は大暑（7/23、大阪）とし、終日に渡る太陽位置の変化と日射遮蔽率の推移の関係を 30 分毎に算出した。日射遮蔽率は、群衆モデルの底面を構成する面要素上において、モンテカルロ法に基づきランダムに設定された点から太陽方向に射出された放射粒子の群衆内通過時の軌跡を追跡することにより算出された。

図 8 に群衆全体の日射遮蔽率（ $1-\tau_{\text{crowd}}$ ）の時間変化を示す。群衆が 1 人で構成される Case 1 では終日に渡り約 0.1～約 0.2 程度の範囲の値を取る。これに対し、群衆規模が最大（400 人）の Case 5 では、約 0.2～約 1.0 程度の幅広い分布を示し、特に朝夕の値が大きい。そのため、群衆の規模の大小の影響は朝夕に生じやすく、逆に昼間の影響は小さいことが分かる。これは、太陽高度が高い時間帯に生じる人間の影は人体足元付近に小さく形成され、隣り合う人の影と干渉し合う確率が小さく、群衆の規模に関わらないためと考えられる。また、図 8 の値に 7/23 の大阪・快晴時（大気透過率 0.7 と仮定）の法線面直達日射量を乗じることにより群衆の日射吸収量を試算したものを図 9 に示す。入射日射量の強度を考慮した結果、日の出、日没頃の小さな日射量の時間帯のケース間の差異が小さくなったものの、図 8 同様に午前中の早い時間帯、並びに夕方 15 時以降の時間帯において、大きな群衆が小さな群衆に比べ、多くの日射を吸収する傾向が見られる。以上より、①群衆規模の大小が群衆内の日射遮蔽に影響を与えるのは、朝夕の時間帯であること、②太陽高度の高い時間帯においては、群衆の規模によらず構成員個々の日傘使用の様な対策を講じることが望ましいこと、が明らかとなった。

4.3.2 群衆が内外の流れ場形成に与える影響のケーススタディ^{文14)}

解析対象を図 10 に示す。周囲に障害物の無い領域中央に高さ 1.8m の直方体形状の群衆モデルを配置した。なお、群衆の水平方向の広がりも正方形とした。これは、この取り組みで得られる知見の普遍性に配慮し、群衆に対する流入風向の影響を抑えることを意図したためである。群衆の規模（空間スケール）は 150m（ $=D$ ）とした。この群衆モデルを東西、南北方向に 450m（ $=3D$ ）の平坦な解析領域中央に配置した場合を想定した。

解析ケースを表 4 に示す。この解析では、群衆内構成員の配置密度 η_{crowd} が群衆内外の風通しに与える影響を分析した。具体的には、群衆サブモデルの規模 D を 150m に固定し、 η_{crowd} を独立変数とした 5 つの解析ケースを設定した。Case 1 の η_{crowd} は、群衆が存在しない場合に相当する 0.0 人/ m^2 に設定された。これに対し、Case 2～Case5 では、 η_{crowd} を 4 段階に渡り変更したケースを設定した。

本稿では、群衆モデル中央を主流方向に切断した断面上の結果に着目し、ケース間の比較を行う。特に図 10 中に示す、①風上側辺縁、②中央、③風下側辺縁の 3 点において出力した風速の主流方向成分 u 、乱流エネルギー k の鉛直分布に注目する。 u については得られた解析値を上空風速 U_0 で無次元化したものを、また、 k については、 U_0 の 2 乗で無次元化したものを用いて、結果を評価する。この無次元化した諸量については、これらに上空の気象条件に相当する風速 U_0 の観測値を乗じることにより、実際の群衆内の風速、乱れの状況を推定することが可能となる。

図 11 (1) に風速の鉛直分布の比較を示す。群衆の無い場合を想定した Case 1 では、地上から徐々に風速が大き

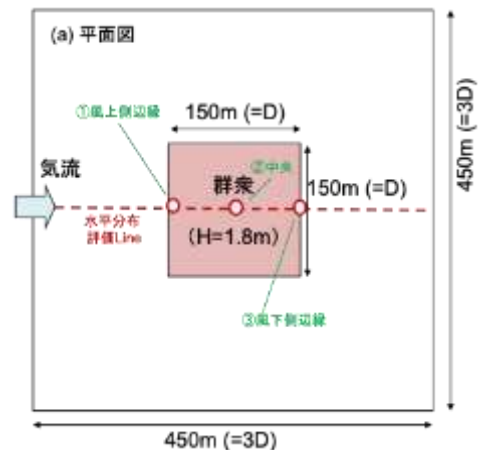


図 10 解析対象（平面図）

表 4 解析ケース

Case	群衆密度[人/ m^2]	想定イメージ
1	0.00	人が居ない
2	0.50	人が疎
3	1.33	中程度
4	2.50	やや混む
5	5.00	大変混雑（ライブ会場等）

（群衆規模：150m）

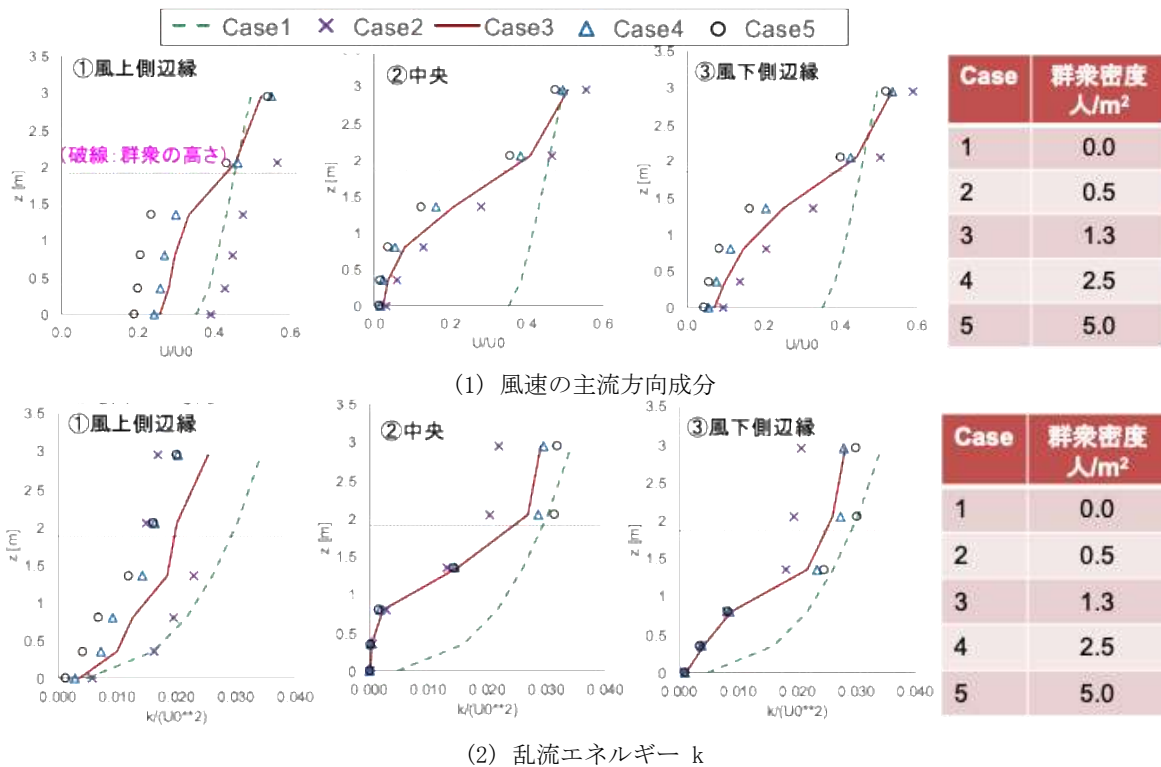


図 11 群衆の疎密が気流、気流の乱れの鉛直分布に与える影響の比較

くなる指数関数的な分布が領域全体に広く分布する。高さ 1m における値は約 0.4 程度である。これに対し、群衆の存在を考慮した Case 2~Case 5 においては、高さ 2m 以下の領域の風速が極端に小さい。この弱風域は、街路樹植栽、自動車等の障害要素に対するキャノピーモデルの解析でも見られる典型的な分布である。群衆中央の高さ約 1m における各ケースの風速は、Case 2、3、4、5 の順に、各々 0.15、0.10、0.06、0.05 程度の値を示し、群衆密度の増加が風速の減少を招く傾向が分かる。図 12 は群衆中央を主流方向に切断する断面上の高さ 0.8m における u の分布である。風上から群衆規模 (150m) の 1/6 程度 (約 25m) に至るまでに風速は大きく減少し、この弱風域が群衆風下まで分布する。従って、群衆内の多くは一様に弱風となることが分かる。

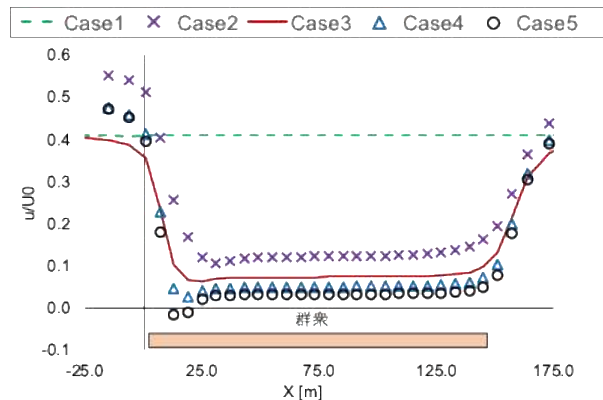


図 12 群衆中央の風速 u の分布 (高さ 0.8m)

図 11(2) に乱流エネルギー k の鉛直分布を示す。群衆内部に至るに従い、群衆内の k の値が徐々に減少する。群衆中央の値に着目すると、Case1 以外のケースでは、高さ 1m より下方の k の値はほぼ 0 に近い。従って、群衆内の k の値は群衆が無い場合に比べて、顕著に小さいことが分かる。

以上の解析結果より、①提案するサブモデルでは、群衆構成員の体型、群衆内の混雑度 (配置密度)、気流方向が、風速低減、乱れの増加に作用すること、②群衆内部の風速は大幅に減衰すること、が明らかとなった。

5. まとめ

本報告では、空間評価 WG の活動内容の概要を整理した。空間評価 WG では、街路空間の夏季温熱環境評価に関する評価指標、並びに群衆に着目した新たな環境モデリングの考え方に関して検討を進めてきた。各々の内容共に、まだ

研究としては未発展な点も多い。この一連の取り組みで得た知見を更に深めるために努力したい。本WGにおいて活発なご意見をいただいた関係各位に厚く御礼申し上げたい。

参考文献

- [1] 吉田伸治, CFD連成数値解析による夏季屋外暑熱環境の評価指標の比較 –暑熱環境可能曝露時間とSET*, WBGTの比較–, 第47回 人間–生活環境系シンポジウム報告集, 19-22, (2023).
- [2] Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., and Nishi, Y. (1986): A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHARE Transactions, Vol.92, part 1, pp 709-731.
- [3] C. P. Yagulou and D. Minard: Control of heat casualties at military training centers, American Medical Association, Arch. Industrial Health, 16-4, 99. 302-316, 1957.
- [4] Ooka R, Minami Y, Sakoi S, Tsuzuki K, Rijal HB (2004). Improvement of sweating model in 2-node model and its application to thermal safety for hot environments. Building and Environment, 45: 1565-1573.
- [5] 佐藤大樹, 大黒 雅之, 新井 舞子 (2021): 数値解析結果を用いたWBGTの算出方法, 空気調和・衛生工学会論文集 46巻 286号, p. 47~53.
- [6] 小林壽太郎, アスマン通風乾湿計の乾湿計公式について, 天気, 47-10, 747-752, 2000.
- [7] 空気調和・衛生工学会: 空気調和・衛生工学便覧, 第14版, 基礎編, 221, 2000.
- [8] 持田灯, 歩行者群の影響を記述するCFDモデルの開発と高密度市街地の熱空気環境解析, 科学研究費補助金研究成果報告書, 課題番号 18206061, (2009)
- [9] 今野尚子, 小野 梓, 持田 灯, 丸山 敬, 萩島 理, 谷本 潤, 一様物体群のアスペクト比と密度が異なる場合に対するCanopyモデル係数設定法の提案, 日本建築学会環境系論文集, 79(702), (2014), 699-707.
- [10] T. Okaze, A. Ono, A. Mochida, Y. Kannuki, S. Watanabe, Evaluation of turbulent length scale within urban canopy layer based on LES data, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 144, 79-83, (2015)
- [11] 吉田伸治, 群衆内外の温熱環境への影響を考慮した数値サブモデルの提案に関する研究 (その1) 群衆の日射遮蔽効果のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D, 1985-1986, (2024)
- [12] D. Du Bois, E. F. Du Bois: Clinical Calorimetry: Tenth Paper. A Formula to Estimate the Approximate Surface Area if Height and Weight Be Known, Archives of Internal Medicine, 17, 6, 863-871, 1916.
- [13] 吉田伸治, 佐藤大樹, 大黒雅之, 多分割人体体温調節モデルと連成したCFD解析に基づく不均一屋外温熱環境評価に関する研究 (その1) 人体を覆う仮想球を覆う屋外空間の不均一放射環境の分析, 日本建築学会環境系論文集, 79巻, 705号, (PP. 967-977)
- [14] 吉田伸治, 群衆内外の温熱環境への影響を考慮した数値サブモデルの提案に関する研究 第2報 群衆の規模・疎密が内外の風環境に与える影響, 第48回 人間–生活環境系シンポジウム報告集, 177-180, (2024)
- [15] J. A. J. Stolwijk: A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man, NASA, CR-1855, 1971.