Naturalistae 17: 1-8 (Feb. 2013) © 2013 by Okayama University of Science, PDF downloadable at http://www.ous.ac.jp/garden/

原著論文

屋外生活空間の違いに伴う熱中症指標と温熱感・快適感の変化

疋田浩之[1]・大橋唯太[2]・亀卦川幸浩[3]・井原智彦[4]

Heat disorder index and thermal sensation and comfort differing among various outdoor living spaces

Hiroyuki HIKITA[1], Yukitaka OHASHI[2], Yukihiro KIKEGAWA[3], and Tomohiko IHARA[4]

Abstract: The summertime heat-island increases the human heat disorder and sleep disturbance in urban regions in particular. Hence, we need to improve the outdoor thermal environment at human living and activity spaces. In this study, outdoor heat disorder indices and human physiological properties were measured at various urban spaces. Sunny spaces gave humans higher heat disorder hazard than shady spaces. In addition, the temporal variations in the human blood pressure and pulse rate were larger at sunny places than in shade. These results suggested that heat loads to the human body were higher in sunny places than in shade.

I. はじめに

1990年代以降，夏季日中の気温上昇が日本各地で顕著化しており，このことがヒートアイランド現象や地球温暖化の影響と結び付けられることが多い．日本では東日本大震災以降，原子力発電所の大多数が稼働を停止したため，夏季の電力不足が懸念され，夏季の高温時にいかに空調機器の利用を最小限に抑えて快適に過ごすかが重要な問題となっている．この解決には発電方法の見直しにとどまらず，熱中症や睡眠障害などの深刻な夏の気象病を増やさないような，快適に過ごせる都市屋外空間を広く形成する努力も必要である．

例えば成田ほか(2004)や関谷・垂水(2007)などで指摘されているように，市街地に緑地や水環境を形成することで気温上昇の抑制効果を検討する研究が多く存在する．しかし，人間が感じる暑さを評価する場合，気温だけでなく湿度や放射など複数の気象因子が複雑に影響することを考慮しなければならない．したがって緑地や水環境が豊富に存在する，気温が周辺環境よりも低い屋外空間であっても，実際には人体に温熱的不快感を生じさせる可能性も考えられる．そこで本研究では，都市の屋外空間が形成する温熱環境の実態を明らかにするため，土地利用形態が異なる複数の実在空間を対象とした気象観測と被験者の熱的主観申告のヒアリング調査を実施した．その結果から，都市屋外でどのような温熱空間が形成されると夏の屋外活動時の熱中症リスクを抑えられるのか，具体的に検討をおこなった．

II. 観測概要

観測対象地域は，岡山県岡山市北区南方周辺の

1．〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町1-1 岡山理科大学大学院総合情報研究科生物地球システム専攻，Graduate School of Informatics, Okayama University of Science, 1-1, Ridai-cho, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama-ken 700-0005, Japan.
2．〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町1-1 岡山理科大学生物地球学部生物地球学科，Faculty of Biosphere-Geosphere Science, Okayama University of Science, 1-1, Ridai-cho, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama-ken 700-0005, Japan.
3．〒191-8506 東京都日野市程久保2-1-1 明星大学理工学部総合理工学科，School of Science and Engineering, Meisei University, 2-1-1, Hodokubo, Hino-shi, Tokyo-to 191-8506, Japan.
4．〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5 東京大学大学院新領域創成科学研究科，Graduate School of Frontier Sciences, The Univercity of Tokyo, 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba-ken 277-8563, Japan.

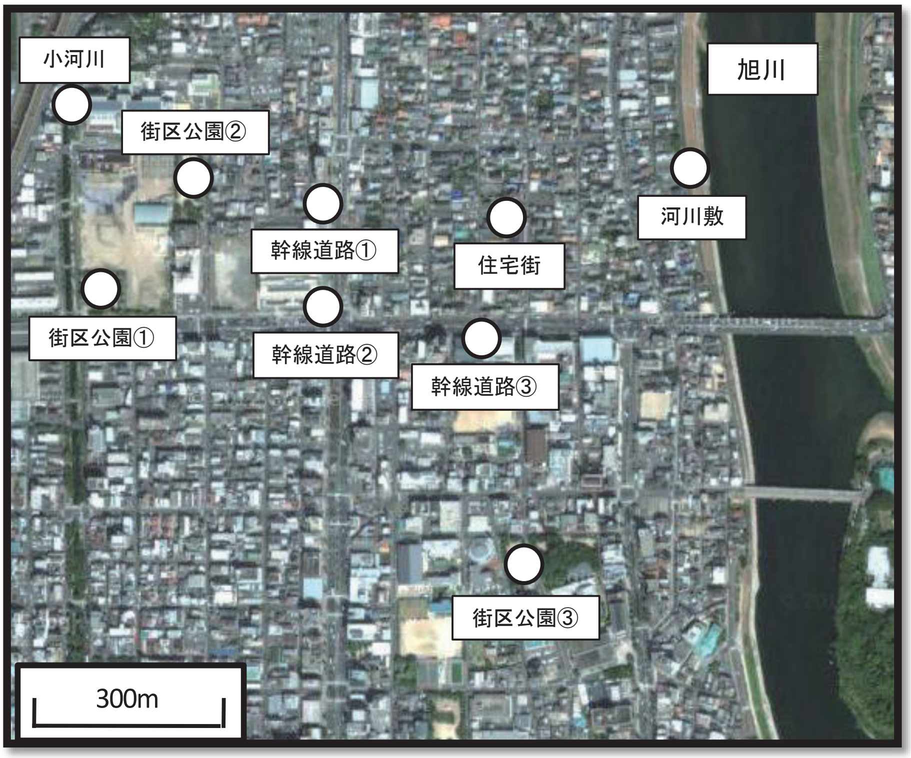

図１．観測対象地域（岡山県岡山市北区内）と観測屋外空間の位置（９地点）．

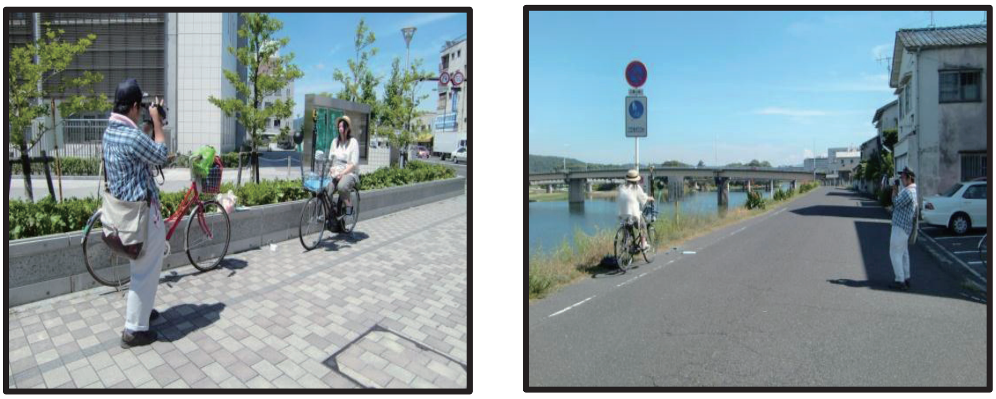

図２．観測風景の一例．（左）幹線道路②．（右）河川敷．

約１km^2範囲である．土地利用形態が異なる幹線道路沿いや河川敷，街区公園など計９地点を選定し，各空間における熱中症指標による評価と被験者の温熱感覚・生理量変化の違いを測定した．観測場所の位置関係を図１に，また観測時の風景を図２に示す．

観測期間は2011年７月下旬から８月上旬までのあいだ晴天日計９日間を選定し，観測時間帯は１日のうちで最も暑熱化する13時から15時までとした．複数名の観測者を３班に分け，１班につき３地点で順次それぞれ測定をおこなったが，３班同時刻に30分間の静止測定ができるよう工夫した．

気象観測から，Yaglou and Minard (1957) によるWBGT (Wet-Bulb Globe Temperature；湿球黒球温度）とGagge et al. (1972) によるSET* (Standard New Effective Temperature；標準新有効温度）を算出するため，気象要素として気温・相対湿度・黒球温度・風向風速・気圧を測定した．また，屋外空間における人体の熱負荷と生理的影響を調べるため，血圧・脈拍数・体表部温度・体深部温度・唾液中アミラーゼ量の測定をおこなった．さらに各観測場所での地表面や建築

表１．使用測器の詳細．

観測項目	測定機器	サンプリング間隔
気象要素		
気温	白金抵抗式温度計	2秒
相対湿度	静電容量式湿度計	
黒球温度	ベルノン式黒球温度計	
風向風速	ベーン式風向風速計	10秒
気圧		
生理要素		
血圧	上腕式血圧計	2分
脈拍数		
体表部温度	サーミスタ温度計	2秒
体深部温度		
ストレス値	アミラーゼモニター	10分

表２．WBGT（湿球黒球温度）の数値と危険ランク・予防指針の対応．

WBGT	運動（日本体育協会）		日常生活（日本生気象学会）	
	ランク	注意事項	ランク	注意事項
３１℃～	運動は原則中止	運動は中止	危険	すべての生活活動で発生する危険
２８～３１℃	厳重警戒	激しい運動は中止	厳重警戒	すべての生活活動で発生する危険
２５～２８℃	警戒	積極的に休養	警戒	中等度以上の生活活動で発生する危険
２１～２５℃	注意	積極的に水分補給	注意	強い生活活動で発生する危険
～２１℃	ほぼ安全	適宜水分補給		

表３．SET*（標準新有効温度）の数値と温冷感・快適感などの対応（Gagge et al.1972）．

SET*	温冷感	快適感	生理状態	健康状態
＞40.0	暑さ限界	許容できない	体温上昇、体温調節不良	血液循環不良
37.5–40.0	非常に暑い	不快	激しい発汗、血流によるストレス増加	熱中症の危険増加
35.0–37.5	暑い	やや不快		脈拍不安定
30.0–35.0	暖かい			
26.0–30.0	やや暖かい	快適	発汗・血流変化による通常の体温調節	正常
23.0–26.0	中立		中立	
20.0–23.0	快適		血流変化による体温調節	

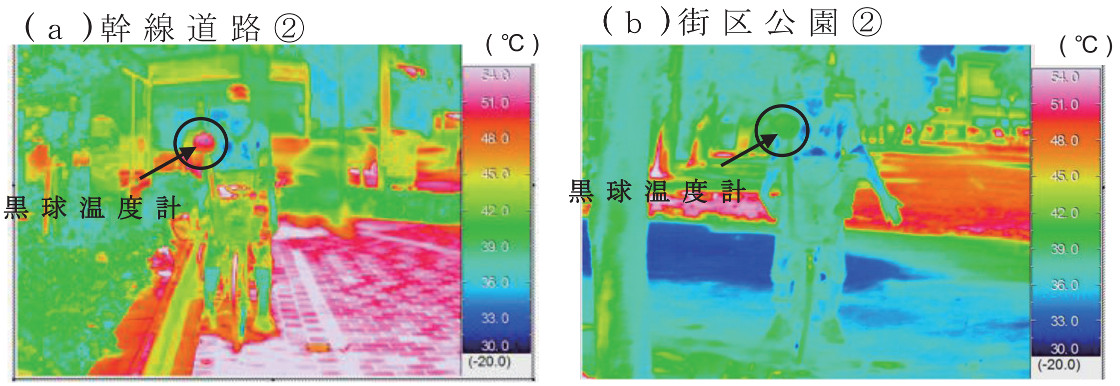

図３．熱赤外カメラによる人体表面温度撮影の一例．2011年8月10日13時30分頃における（a）幹線道路②（日向空間）と（b）街区公園②（日陰空間）での撮影結果．

物など周囲の表面温度，被験者衣服・露出皮膚部の表面温度を測定するため熱赤外カメラを用いた撮影もおこなった．表１に，測定で使用した測器およびサンプリング間隔を示す．

観測に参加する被験者が実際に感じる熱的主観申告についてもヒアリング調査を実施した．「暑さ・涼しさ」・「風の強さ」・「発汗量」・「人工物からの排熱」・「歩行者の量」・「総合的な快適感」の６項目について，それぞれ６段階で被験者にアンケート評価してもらった．このヒアリングは，気象測定終了後に各観測地点で実施した．本稿ではこのうち，温熱感を示す「暑さ・涼しさ」の結果について報告する．

III．観測結果

本観測では，熱中症指標WBGTとSET*を用いて屋外空間における温熱快適性について評価した．WBGTは日本では熱中症ハザードを評価するためによく用いられる指標であり，表２に示すような予防指針が日本体育協会「熱中症予防のための運動指針」や日本生気象学会「日常生活における熱中症予防指針」などで公表されている．一方のSET*はもともと屋内空間での温熱快適性を評価するために考案された指標であったが，Pickup and de Dear（1999）や木内（2001）などいくつかの先行研究のなかで，夏季屋外空間でのSET*が人間の温熱感覚とよく対応

し，屋外空間での利用も可能であることが報告されている．したがって本観測においても，屋外環境での温熱快適性評価としてSET*を使用した．ここではGagge et al.(1972)が提唱したSET*と温熱快適感の対応表(表３)を利用し，各空間における温熱快適性の評価を実施した．本研究では2011年夏季に計９日間測定をおこなっており，全観測日において晴天条件であった．本稿は特に，晴天条件であった６日間の結果について詳しく報告する．

観測中に熱赤外カメラを用いて撮影した被験者の体表面温度と空間の表面温度の一例を，図３に示す．日向空間と日陰空間の表面温度のあいだには明らかな差が認められ，地表面温度に関してはその差は10℃以上にも存在することが確認された．また，体表面温度に関しても，日向空間では頭部や下肢の温度が日陰空間に比べて高い様子が伺えた．画像から確認されるように，黒球温度計の表面温度が日向空間と日陰空間のあいだで顕著に違う様子も，注目すべき点に挙げられる．

気象観測によって得た各地点でのWBGT・SET*と風速，空間に入射する放射量(気温・黒球温度・風速を用いて算出した推定値)の結果を図４～図７にそれぞれ示す．WBGTでは日向空間(図４a)の全29地点(６日×５地点；ただし８月３日の１地点分は欠測)中20地点でWBGTが31℃以上の「運動は中止・危険」と評価され，残り９地点で28℃以上の「厳重警戒」と評価された．一方の日陰空間(図５b)では，22地点(６日×４地点；ただし８月３日の２地点分は欠測)中「運動は中止・危険」は０地点，「厳重警戒」が19地点，「警戒」が３地点と評価された．SET*についてもWBGTと同様に日向環境で高値をとることから，熱中症ハザードが高い結果となった(図６・７)．また，各空間で測定された風速を比較した結果，日射環境が同程度の空間では，風速が大きな空間ほど観測されるWBGTやSET*は低い傾向が認められた．これは特にSET*で顕著に表れており，日射環境に差のない空間で，風速が2.0m/s以上の屋外空間では１～２℃の値の低下が確認された．入力放射量とWBGT・SET*の対応性も良く，入力放射量の大きな空間ほど熱中症ハザードは高くなると言える．

IV．被験者ヒアリング

各測定地点における被験者の熱的主観申告の「暑さ・涼しさ」に関するヒアリングの結果を図８に示す．小河川と住宅街では「とても暑い」と「暑い」の回答が多数を占めていた．この２空間は日向環境であるが，WBGTとSET*の値が他の日向空間と比べても特に高いような特徴は認められなかった．一方，日陰環境で被験者は涼しく感じる傾向が確認されたが，このうち幹線道路①と街区公園①はWBGTとSET*の値が他の日陰空間に比べて同程度であったにもかかわらず，暑く感じたと答える被験者が認められた．このことから，熱中症指標によって評価されるハザードと被験者が実際に体感する温熱感覚のあいだには，屋外空間によってずれの生じる可能性が考えられる．その中でも特に顕著に現われていたのが日陰空間の街区公園②であった．この空間のWBGTとSET*は全観測日で日陰空間のなかでも高い値を示す傾向が確認された(図５b-２，図７b-２)．にもかかわらず，被験者の半数以上が「涼しい」や「やや涼しい」と感じている．

このような差異が生じた原因として，移流の影響が考えられる．街区公園②は，風が最も弱い空間であった．移流は人体が感じる温熱感を左右する重要な要素であるが，WBGTやSET*の熱中症指標は移流の影響を強く受けやすい可能性が示唆される．このため，風が極端に弱い(風速が0.5m/s未満)などの特異な屋外空間では，熱中症指標による評価と被験者が体感する温熱感覚のあいだに差異が生じる恐れがある．

V．生理量変化

次に，熱中症指標と実際の人体生理量変化の対応性を分析してみた．日陰空間のなかで熱中症ハザードが比較的高かった街区公園②は，先述のように熱的主観申告は「やや涼しい・涼しい」が半数以上を占める結果となった．実際に被験者の収縮期血圧と脈拍数(図９・10)は，他の日陰空間に比べて街区公

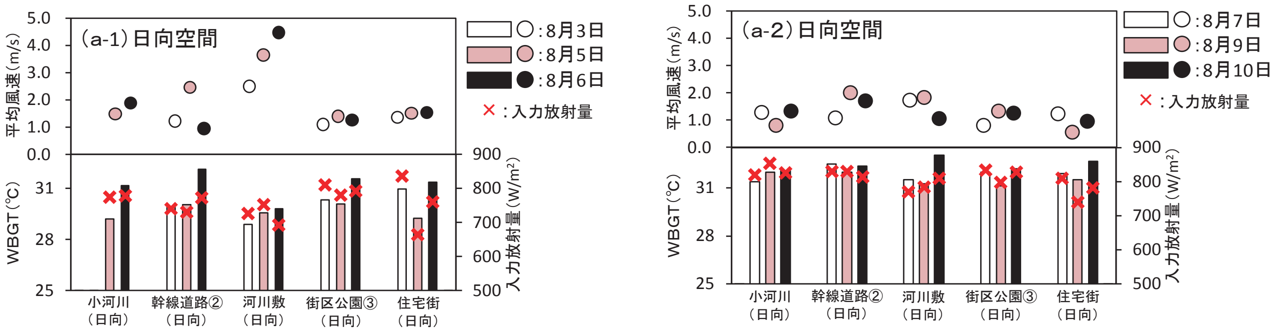

図４．日向空間で測定されたWBGT（下側の棒グラフ）・平均風速（上側の丸印）・入力放射量（下側の×印）の20分平均値．観測期間前半の結果を(a-1)，後半の結果を(a-2)に示す．

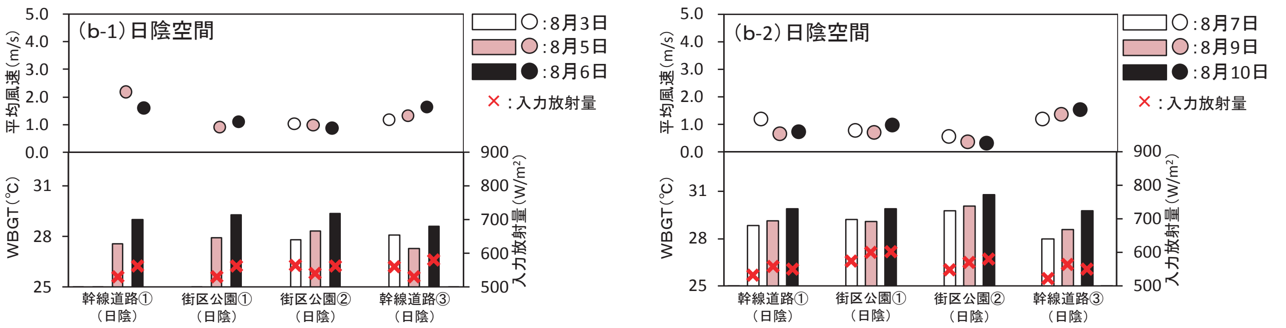

図５．日陰空間で測定されたWBGT（下側の棒グラフ）・平均風速（上側の丸印）・入力放射量（下側の×印）の20分平均値．観測期間前半の結果を(b-1)，後半の結果を(b-2)に示す．

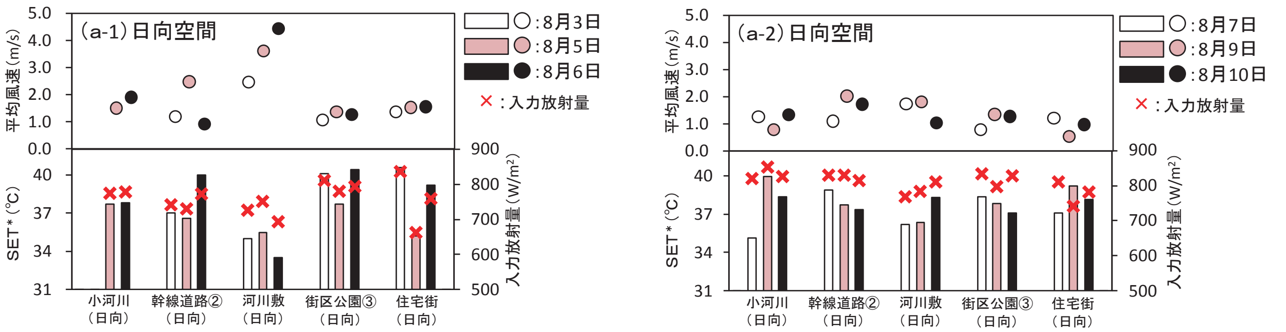

図６．日向空間で測定されたSET*（下側の棒グラフ）・平均風速（上側の丸印）・入力放射量（下側の×印）の20分平均値．観測期間前半の結果を(a-1)，後半の結果を(a-2)に示す．

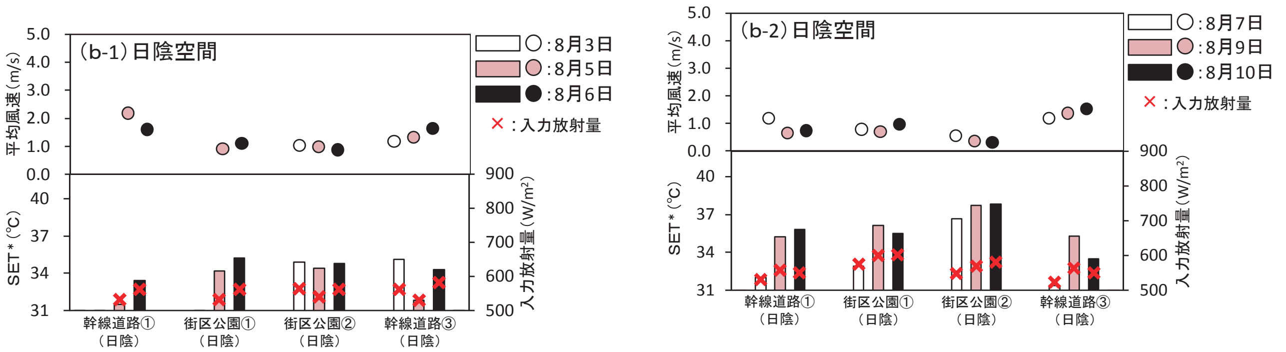

図７．日陰空間で測定されたSET*（下側の棒グラフ）・平均風速（上側の丸印）・入力放射量（下側の×印）の20分平均値．観測期間前半の結果を(b-1)，後半の結果を(b-2)に示す．

園②では全日を通して低い値を示していたことから，被験者の熱的申告には現実味があると言える．日陰空間を日向空間と比較しても，総じて収縮期血圧と脈拍数にそれぞれ５～10mmHg，５～10bpm程度の減少が認められ，血圧の時間的変動も小さく安定していた．

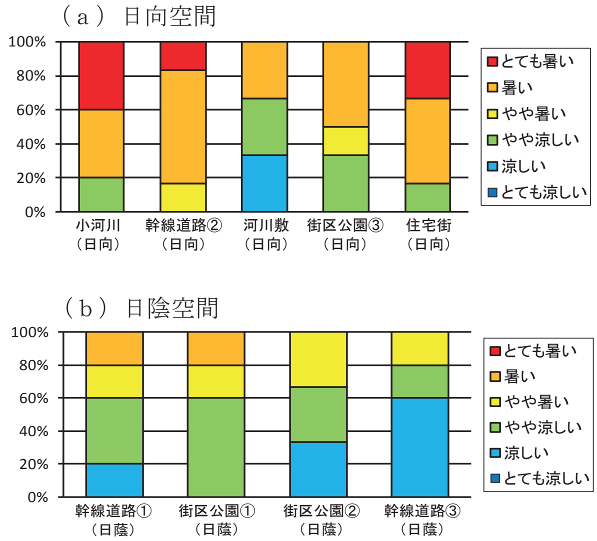

図８．(a)日向空間と(b)日陰空間における「暑さ・涼しさ」に関する被験者ヒアリングの集計結果．

Ⅵ．まとめ

2011年７月下旬から８月上旬までの夏期に，土地利用形態が異なるいくつかの都市屋外空間で熱中症指標・温熱生理量の観測と被験者ヒアリングを実施し，以下の点が明らかとなった．

１）熱中症指標WBGTやSET*による温熱快適性評価の結果，日陰空間では日向空間よりも温熱的不快感がある程度抑えられた屋外環境が全体的に形成されており，WBGTやSET*の熱中症ハザードがいずれも１ランク異なるほどの差異が明らかとなった．

２）日射環境にほとんど差のない空間のうち，風速が２m/s以上の屋外空間ではSET*が１～２℃低下する特徴がみられたが，WBGTにはそのような顕著な傾向は認められなかった．しかし，SET*が実際の人体熱収支・温熱生理変化モデルに従った熱中症指標であることを考慮すれば，日陰の形成に加え積極的に空間の通風を向上させることは温熱的に快適な空間環境を形成するための有効な手段といえる．

３）温熱快適性評価と被験者の熱的主観申告は多くの地点でおおむね一致していたが，風が極端に弱い空間(風速が0.5m/s未満)などでは一致しにくい傾向も認められた．

謝辞

本観測は，明星大学亀卦川研究室の田中愛氏と菅沼拓也氏，岡山理科大学山下研究室の江國真幸氏(現足立石灰工業株式会社生産部)，同大学大橋研究室の荒木和真氏，大下晃氏，杉山奈々美氏，戸川遼祐氏に協力していただきました．また，岡山大学の塚本修教授には観測に際し，サーモカメラをお借りしました．この場を借りて心より御礼申し上げます．

引用文献

Gagge, A. P., Fobelets, A. P., Berglund, L. G.(1972). A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHRAE: 709-731.

木内 豪(2001). 屋外空間における温冷感指標に関する研究. 天気. 48-9: 15-21.

成田健一・三上岳彦・菅原広史・本条　毅・木村圭司・桑田直也(2004). 新宿御苑におけるクールアイランドと冷気のにじみだし現象. 地理学評論. 77-6: 403-420.

日本生気象学会(2008). 日常生活における熱中症予防指針.

日本体育協会(1994). 熱中症予防のための運動指針.

Pickup, J. and R. de Dear(1999). An outdoor thermal comfort index (OUT_SET*). The model and its assumptions. Proc. 15th: 279-283.

関谷隼人・垂水弘夫(2007). 都市街路空間における緑・水環境が歩行者に及ぼす温冷感緩和効果に関する研究. 日本建築学会研究報告書:157-160.

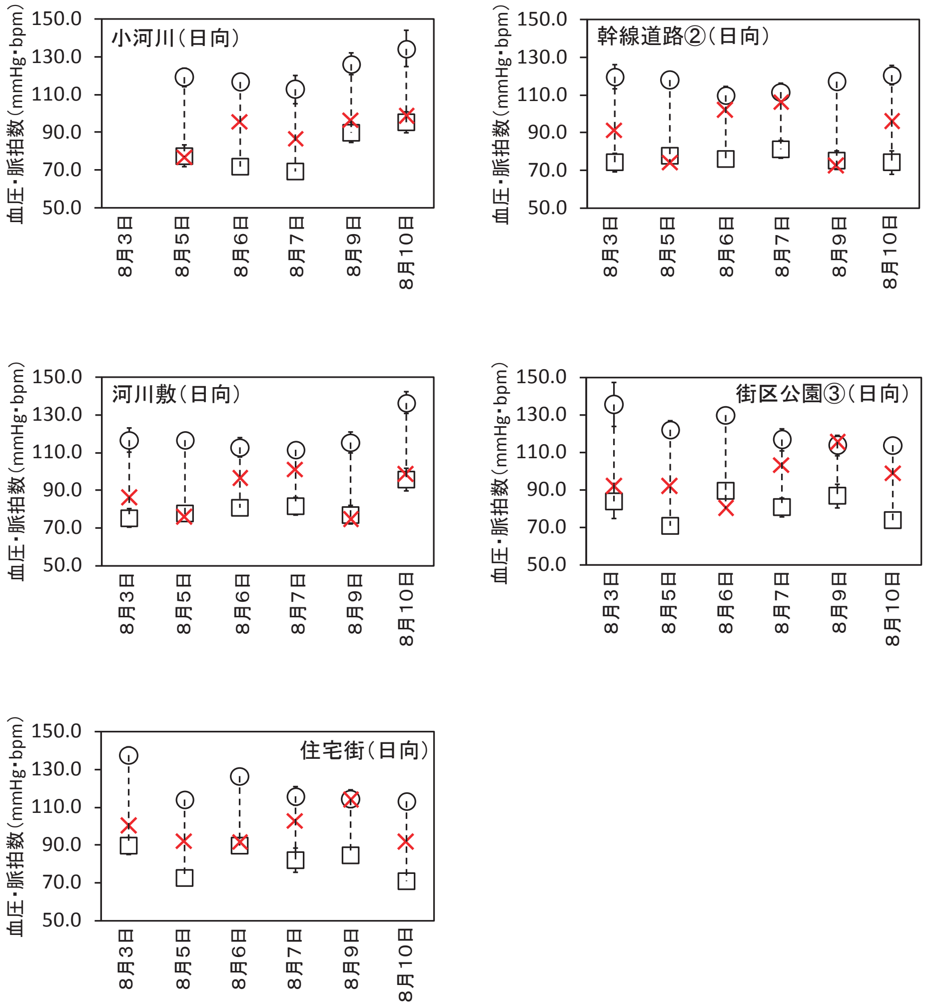

図９． 日向空間で測定された収縮期血圧(〇印)・拡張期血圧(□印)・脈拍数(×印)の20分平均値．
エラーバーは標準偏差を示す．

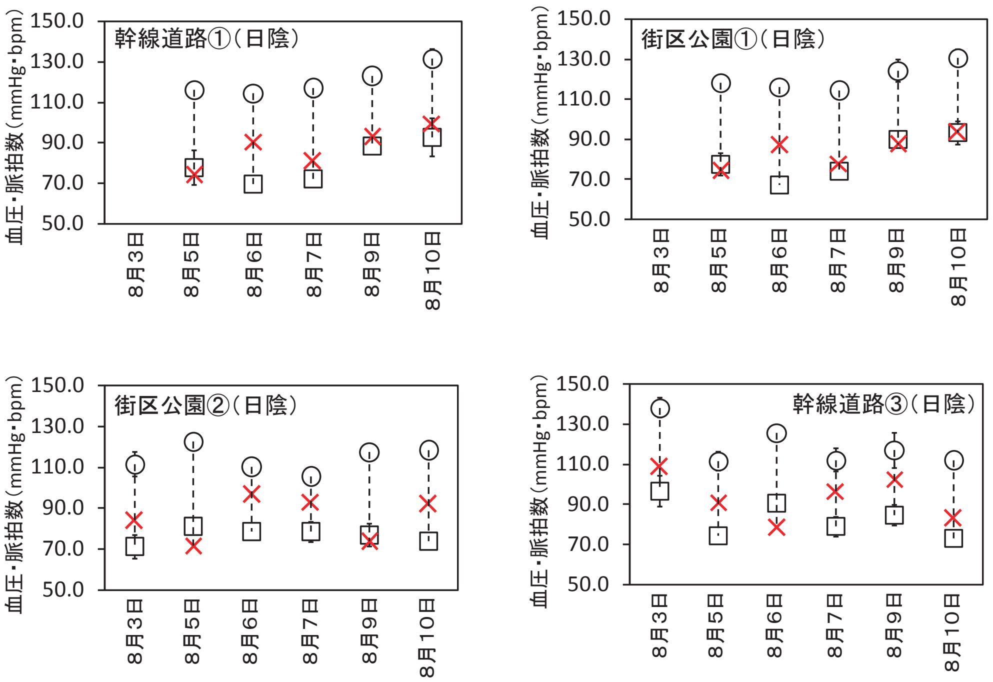

図10． 日陰環境で測定された収縮期血圧(〇印)・拡張期血圧(□印)・脈拍数(×印)の20分平均値． エラーバーは標準偏差を示す．

Yaglou, C. P., and Minard, D. (1957). Control of heat casualties at military training centers. American Medical Association Archives of Industrial Health. Vol. 16: 302-316.

要旨

夏季のヒートアイランド現象によって，熱中症や睡眠障害などの患者数が増加し，屋外暑熱環境の悪化が懸念されている．この改善策として，都市の緑地化が気温低下に有効であるとされているが，人間の快適感は気温のみでは評価できないことが一般的に知られている．そこで本研究では実在する複数の都市屋外空間を対象に，熱中症指標と生理量変化の測定，さらに被験者の熱的主観申告のヒアリング調査をおこなった．その結果，日向環境では日陰環境に比べて熱中症ハザードが１ランク高く，また収縮期血圧・脈拍数も上昇して時間的変動が大きくなっていたことから，日向空間では人体への熱負荷が大きな熱中症の危険性が示唆された．

(2012年12月25日受理)