

市街地空間における温熱環境の現況把握と適応策の試行による効果に関する研究

Observation of Thermal Environment in Urban Area and Estimation of Effect by Adaptation Method Trial

三坂 育正*・成田 健一*・石丸 泰**・大場 栄光**

Ikusei MISAKA, Ken-ichi NARITA, Yasushi ISHIMARU, Eiko OBA

要旨：ヒートアイランド対策としての効果的な適応策を検討する目的で、大阪府枚方市と高槻市を対象として、夏季における街路空間の温熱環境の実測を行った。実測結果より、調査対象エリアの温熱環境は、温熱快適性指標 SET*が 35°C以上と高く、熱中症発生リスクや人々の空間利用の観点から、適応策の導入による暑熱環境改善の必要性を確認できた。また、測定結果より暑熱要因の特定を試み、それぞれのエリアの要因に適した適応策についての検討を行った。試験的に導入した適応策の効果についても測定により検証し、適応策の導入により暑熱環境を改善できる可能性を示唆することができた。

キーワード：ヒートアイランド、適応策、温熱環境、街路空間

Abstract：In order to select the effective technique as adaptation for urban heat island, we had measured the thermal environment of street space of Hirakata-City and Takatsuki-City in summer. From the results of measurement, thermal comfort index SET* of street space of those areas was higher than 35°C, and it is necessary to promote adaptation method from a viewpoint of the risk of heat stroke and use of the space. Then, it was inquired effective techniques as adaptation method, by the factors to make thermal environment which were obtained by measurement. At the experimental application of adaptation techniques, it is suggested a possibility to improve thermal environment of the street spaces.

Key Words：heat island, heat stroke, adaptation method, thermal environment, street space

はじめに (INTRODUCTION)

近年、高層ビル群や建築物、道路舗装などが増えたことによる表面被覆の変化や、冷暖房・交通量の増加などに伴う人工排熱の増大により、都心部の気温が郊外に比べて 2~3°C以上高くなるヒートアイランド現象が発生している(環境省, 2012)。気温の上昇域は市街化の進行に伴い、都心部だけでなくその周辺にまで及んでいる。ヒートアイランド現象の影響によって、人々が感じる熱ストレスの増大が指摘されており(井原ら, 2006)、その影響は熱中症患者の増大として顕在化している。そのため、「ヒートアイランド対策マニュアル」(環境省, 2012)では、ヒートアイランド対策として、従来より実施されてきたヒートアイランド現象の発生要因を削減していく「緩和策」に加え、人の熱ストレスによる健康影響や大気汚染などの影響をできるだけ軽減していく「適応策」が取り上げられ、その推進が重要とされている。

建物や街路空間を対象として熱ストレスの軽減を評価した事例には、微細ミストにより暑熱環境の緩和を図ったり(三坂ら, 2011)、街路樹等の樹木で形成された日陰空間の温熱環境と利用状況との関係を調査した事例(安藤ら, 2012)があり、効果的な適応策を実施することで、人の熱ストレスの低減や屋外活用の更なる活用が

期待できることが示されている。

一方で、適応策では、対策を実施する場所・空間の状況に配慮した上で、適切な対策技術を適用しなければ、効果的な対策とはなり得ない可能性がある。人が生活する空間である街路空間の温熱環境に関する研究には、メソスケールから街区のスケールの数値気象モデルを用いたシミュレーションで熱中症リスクの評価を行った事例(大橋ら, 2011)や、街路空間の熱中症リスクをWBGTの実測から評価した事例(大橋, 2010)、さらに街区空間における気温の水平分布から街区や気象条件の特徴と熱中症リスクの関係を調査した事例(三坂ら, 2013)などがある。これらの研究から、実在街路空間では、街路の方向や周囲の建物・緑地といった特徴や、日射・風などの気象条件により、熱中症リスクに違いが生じることが示されている。適応策の推進では、街路空間や気象等の特徴を把握し、現状の温熱環境を理解した上で、効果的な適応策を検討・実施する必要があると考えられる。

そこで本研究では、環境省のヒートアイランド適応策モデル事業の対象である大阪府高槻市・枚方市内に調査地区を設定し、生活空間である街路空間の温熱環境を実測により把握する。その結果から、適切な適応策の検討を行い、対策を試験的に実施して、改善効果を実測で検証することを目的とする。

* 日本工業大学 工学部 建築学科, ** 環境情報科学センター

1. 研究の方法 (METHODS)

1. 1 調査対象地域の概要

調査は、大阪府枚方市と高槻市とし、いずれも駅に近く人通りが比較的多い、生活空間として利用されているエリアを対象とした。枚方市・高槻市は、大阪府の郊外に位置するが、春から夏にかけての気温が大阪市に比べて高い傾向があり、アメダス観測点では、枚方における5~7月の平均気温が、大阪に比べて1°C程度高くなっている。そのため、夏季における人の熱ストレスへの影響が懸念されることから、適応策導入の検討に向けた、温熱環境の現況把握を目的として測定を行った。

1. 2 枚方における測定

1) 測定点

枚方市における調査対象エリアは、京阪枚方市駅に近い商業施設に隣接する公園と商店街とし、日射の条件や天空率の異なる点を測定点とした。測定対象エリアと測定点を図1に、各測定点の特徴を表1に示す。

2) 測定項目と測定機器

街路空間における測定項目は、道路の表面温度と温熱環境とし、温熱環境は測定点の高さ1.5mに測定器を設置して行った。気象状況は商店街の2階建て店舗の屋上に機器を設置して測定した。各測定項目と測定機器は、表2に示す通りである。温熱環境の各測定項目は1分間隔で計測を行い、解析では10分平均値を用いた。

3) 測定期間

測定は、2013年7月12~17日、8月5~11日の2期間行った。各日とも測定時間は7時~22時とした。気象状況は、7月12日から8月11日まで連続で測定を行った。なお、本論文では、比較的天候に恵まれた8月7日を中心に解析を行った結果について述べる。

1. 3 高槻における測定

1) 測定点

高槻市における調査対象エリアは、JR高槻駅に近い高層の複合商業施設に面した、地域の店舗が立地する市道の街路空間とした。この街路空間は商店街となっており、駅利用者の動線でもあることから、1日を通して人通りが多くなっている。また、温熱環境を比較するための測定点として、人通りは比較的少ない公開空地の測定点⑤を参考測定点として設けた。測定対象エリアと測定点を図2に、各測定点の特徴を表3に示す。

2) 測定項目と測定機器

街路空間における測定項目は、道路の表面温度と温熱環境とし、温熱環境は測定点にある街路灯の高さ3.0mに測定器を設置して行った。気象状況は測定対象エリア近くの消防署で計測されている気象データを活用するこ



図1 測定対象エリアと測定点 (枚方)

表1 測定点の特徴 (枚方)

測定点	測定点の特徴
① 街路	街路南側で日陰になりやすい。路面が白に近い。
② 街路	街路北側で日向になりやすい。路面が白に近い。
③ 公園	西側の樹木以外は開けている。路面が少し黒い。
④ 公園	パーゴラの下のため日陰になりやすい。
⑤ 屋上	2階建て住宅の屋上(気象条件)

表2 測定項目と測定機器 (枚方)

測定項目		測定機器	
表面温度	表面温度	赤外線熱電対	EXERGEN IRT/c-10
	気温・湿度	温湿度計	T&D RTR-53
温熱環境	グローブ温度	グローブ温度計	柴田科学 ベルノン式
	風向・風速	2次元超音波風速計	PREDE PGWS-100
	日射量	日射計	EIKO MS-402
気象状況	気温・湿度	温湿度計	T&D RTR-53
	風向・風速	2次元超音波風速計	PREDE PGWS-100



図2 測定対象エリアと測定点 (高槻)

表3 測定点の特徴 (高槻)

測定点	測定点の特徴
① 商店街	西側。西日の影響を直に受けやすい。
② 商店街	北側。日射が当たりやすい。
③ 商店街	南側。建物の影で日中は日陰になる。
④ 商店街	東側。南側にロータリーがあり開けた空間である。
⑤ 参考	建物南側で、直接日射を受けやすい。比較用の地点。

表4 測定項目と測定機器 (高槻)

測定項目		測定機器	
表面温度	表面温度	赤外線熱電対	EXERGEN IRT/c-10
	気温・湿度	温湿度計	T&D RTR-53
温熱環境	グローブ温度	グローブ温度計	柴田科学 ベルノン式
	風向・風速	2次元超音波風速計	PREDE PGWS-100

ととした。各測定項目と測定機器は、表4に示す通りである。温熱環境の各測定項目は1分間隔で計測し、解析は10分平均値により行った。

3) 測定期間

温熱環境の測定は、2013年7月14日～8月9日まで連続で行った。高槻では、比較的天候に恵まれた8月9日を対象として解析を行った結果を中心に述べる。

2. 結果 (RESULTS)

2. 1 枚方の温熱環境

1) 気象状況

枚方の測定点⑤における測定日の気象状況として、日射量・気温と風向・風速の測定結果を図3に示す。日射量は、12～13時と14～15時30分に小さくなっているが、それ以外は大きな値で推移し、気温も14時には35℃を超えて猛暑日となっている。風については、14時以降は西からの風が卓越し、風速も大きく、大阪湾からの海風が入ってきたものと考えられる。

2) 温熱環境

図4～8に測定点①～④における温熱環境の測定結果を示す。気温は、公園内の③、④に比べて、街路空間の①、②がやや高い値となっている。公園内の測定点は、樹木やパーゴラによって日射が遮蔽されやすいことから、この差は日射の影響が考えられる。しかしながら、気温の各測定点間の気温差は、最大でも1℃以下で小さい値であった。風速は、周囲が開けている公園内③、④でやや大きく、周囲に建物がある街路空間の①、②がやや小さくなっている。

平均放射温度 MRT は、グローブ温度と気温・風速の測定値より、以下の式により算出した (ASHRAE, 2001)。

$$MRT = \left[(T_g + 273.15)^4 + \frac{1.10 \times 10^8 \times V^{0.6}}{\varepsilon \times D^{0.4}} \times (T_g - T_d) \right]^{0.25} - 273.15 \quad (1)$$

T_g: グローブ温度(℃), V: 風速(m/s), D: 黒球の直径(m), T_d: 気温(℃)

MRT の測定・計算結果より、日射量の大きくなる時間帯では①～③で MRT が高く、緑陰のある④との差が大きくなっている。各測定点の地表面温度の経時変化を図7に示す。直射日射を受けた地点・時間帯では、緑陰の④に比べて地表面温度が高く、その差は最大で約20℃にも達している。このことから、MRTが高い要因は、直射日射の影響と、それに伴い地表面温度が高くなることで、赤外放射が大きくなっているためと考えられる。

温熱快適性は、温熱快適性指標として新標準有効温度 SET*を用いた評価を行った。SET*は、2-Node MODELにより算出した。日中における SET*はすべての測定点で35℃を超えており、特に①～③では40℃を超えた時間

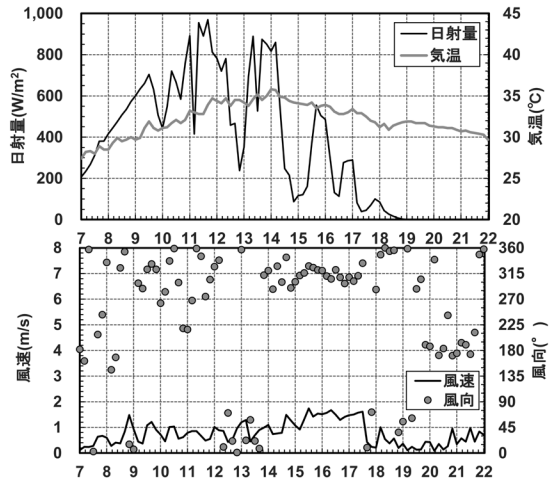


図3 気象状況 (枚方: 2013年8月7日)

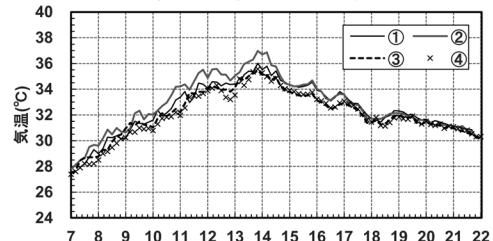


図4 気温の経時変化 (枚方: 2013年8月7日)

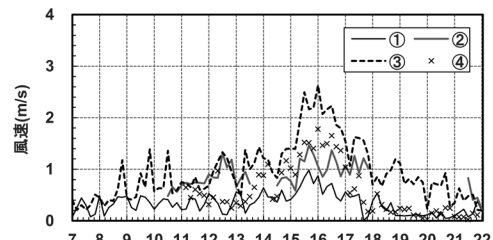


図5 風速の経時変化 (枚方: 2013年8月7日)

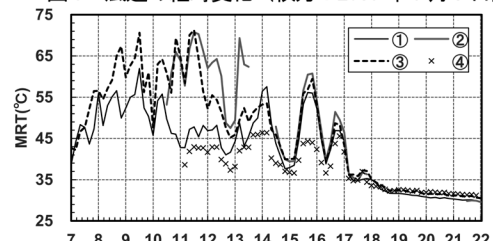


図6 MRTの経時変化 (枚方: 2013年8月7日)

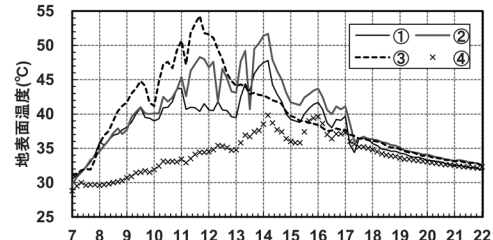


図7 地表面温度の経時変化 (枚方: 2013年8月7日)

帯もある。これらの測定点は、MRTが高い時間帯でSET*も高く、放射環境が温熱快適性に大きく影響していると推察される。SET*が35°C以上の屋外空間では、人の利用が少なくなることが報告されており（安藤ら，2012），熱ストレスも大きいことが考えられるため、温熱環境を改善する必要が高いと考えられる。

以上の測定結果より、枚方の調査対象エリアでは、放射環境の影響により、街路空間のSET*が高くなっており、暑熱環境の緩和のためには、直射日射や赤外放射を低減することが重要である。

2. 2 高槻の温熱環境

1) 気象状況

高槻における測定日の気象状況として、日射量・気温と風向・風速の測定結果を図9に示す。日射は、9～10時に曇ったため小さく、それ以外では安定して大きな値となっており、気温も12～18時で35°Cを超えており、暑い日であったことが確認できる。風は、朝から西風が卓越しているが、午後になると風速が大きく、大阪湾からの海風の影響と考えられる。

2) 温熱環境

図10～13に測定点①～⑤における温熱環境の測定結果を示す。気温は、商店街の中心部に近い②，③が他に比べてやや低く推移しているが、すべての測定点で35°C程度となっている。風速では、商店街の端部である①や④では大きくなっているものの、商店街中心部の②，③の風速は小さく、商店街の中心付近まで風が入っていないことが推察される。

平均放射温度MRTは、枚方と同様の方法で算出した。MRTは、①，④，⑤で55°Cを超えて高く、MRTが高くなる時間帯が各点で異なっており、直射日射を受けることでMRTが高くなっている。一方で、直射日射が入りにくい②や③では、MRTの上昇が抑制されている。

SET*は、すべての測定点で35°Cを超えており、人通りの多い商店街の中心部分②や③でも高い値となっており、温熱環境を改善する必要が高いものと考えられる。①，④，⑤は気温に加えてMRTも高い値となっているが、①や④は商店街の外側に位置するために風が強く、日中のSET*は②，③と同等か、比べて低い値となっている。⑤は、直射日射を受けることに加えて、風が弱いことでSET*が高い。商店街で、直射日射を受けない②，③のSET*が高くなる要因としては、気温が高く、さらに、風速が弱いことが挙げられる。その結果SET*が日中に35°Cを超えてしまったものと考えられる。

以上の測定結果より、高槻の調査対象エリアの中でも、人通りが多い商店街の中心付近でSET*が高くなっており、暑熱環境を緩和する必要がある。この地点において

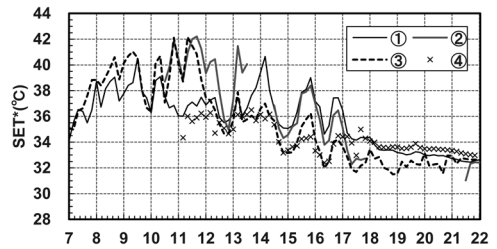


図8 SET*の経時変化（枚方：2013年8月7日）

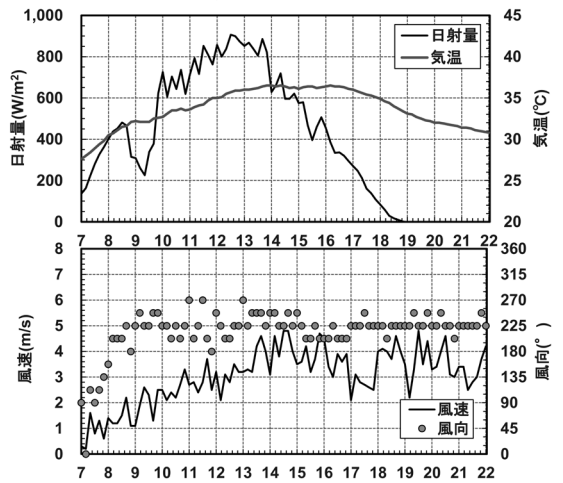


図9 気象状況（高槻：2013年8月9日）

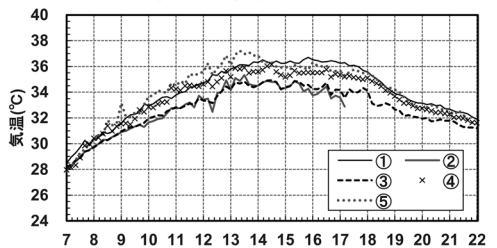


図10 気温の経時変化（高槻：2013年8月9日）

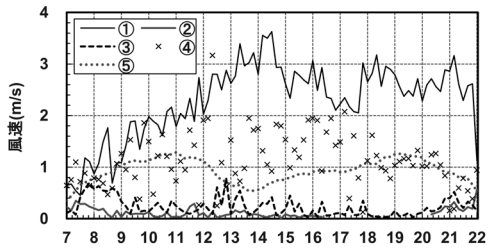


図11 風速の経時変化（高槻：2013年8月9日）

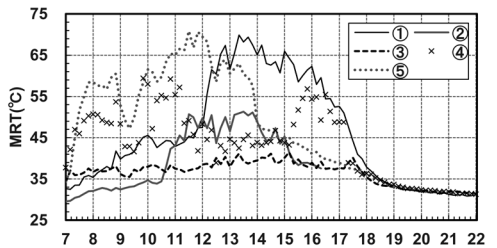


図12 MRTの経時変化（高槻：2013年8月9日）

は、MRT が他に比べて低いことから放射環境は劣悪とはなっておらず、気温が高く、風速が弱いことが SET* を高めている要因と考えられる。そのため、適応策としては、それらを改善する手法が望まれる。

3. 考察 (DISCUSSION)

3. 1 枚方における適応策の試行

枚方の調査対象エリアでは、放射環境の影響により SET* が高くなっており、放射環境の改善が必要とされる。屋外空間における放射環境の改善では、日陰を作ることが最も有効だが、現状の街路に日陰を作ることが容易ではないため、打ち水により表面温度を下げ、道路面からの赤外放射量を減らすことを適応策として検討し、その効果について評価を行った。

打ち水の効果を確認するため、8月7日に測定点に近い図14に示す範囲で打ち水を行い、温熱環境や表面温度を測定した。打ち水は、9時、13時、17時の3回行い、場所を変えて打ち水の量の違いによる効果を確認した。打ち水の範囲と量は、10m×3.5mの範囲に35l(降雨1mm相当)と70l(同2mm相当)とし、約10分かけて打ち水を行った。気温の経時変化を図14に示す。気温の変化から打ち水による差を明確には確認することはできない。図16には打ち水を行った際の路面の表面温度の変化を示す。打ち水実施後に表面温度の低下がみられ、効果を確認できる。9時や12時の打ち水では、1時間ほどで温度差が小さくなるのに対し、17時に行った場合には効果の持続が確認できる。また、打ち水の量による差は明確ではない。打ち水による表面温度の低下は最大で5℃程度となっており、この差を赤外線放射量に換算すると約30W/m²の減少となり、放射環境の改善が期待できる。しかしながら、SET*の変化(図17)では、打ち水による快適性の向上は確認できない。これは、打ち水を実施した面積が小さいため、測定点高さまで効果が及んでいないことが考えられ、温熱快適性の向上を体感できるためには、打ち水の面積を広くすることが必要であり、最適な打ち水の範囲や量の検討が課題として挙げられる。

3. 2 高槻における微細ミスト噴霧の効果

高槻では、人通りの多い商店街の中心付近で SET* が高く、その要因としては、気温が高く、建物に遮られ風が弱いことが挙げられる。暑熱環境の改善には、風通しを確保し、気温を下げる必要があるが、商店街内の風環境の改善は容易ではないため、気温を下げる方法を検討した。商店街内への微細ミスト噴霧により、気温を直接的に下げることが、温熱快適性の向上には効果的であると考えられる。そこで、図18に示すように、商店

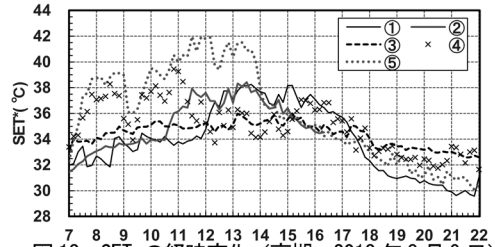


図13 SET*の経時変化(高槻:2013年8月9日)



図14 枚方における打ち水実施場所

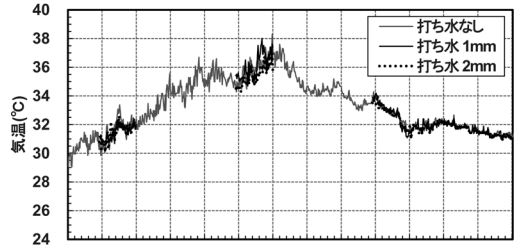


図15 打ち水実施時の気温の経時変化

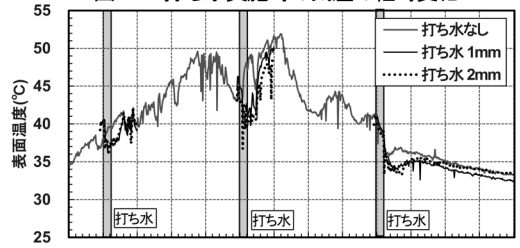


図16 打ち水実施時の路面表面温度の経時変化

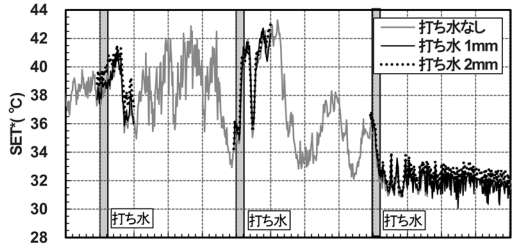


図17 打ち水実施時のSET*の経時変化

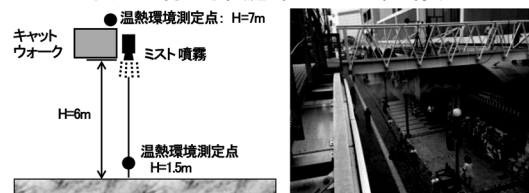


図18 高槻におけるミスト噴霧時の測定概要と噴霧状況

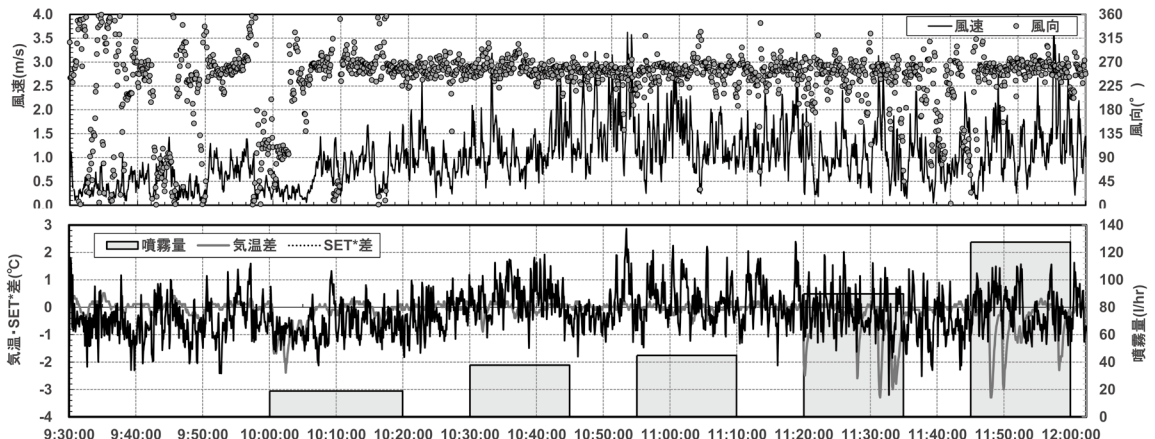


図 19 高槻における風向風速とミスト噴霧量・気温・SET*の経時変化

街上部のキャットウォークに微細ミスト噴霧機を仮設として設置し、噴霧高さ 6.0m で噴霧した。微細ミスト噴霧による効果を確認する測定は、噴霧装置の設置に準備期間を要したため、10月1～2日に行った。

微細ミスト噴霧機下の気温と SET*について、ミスト噴霧の影響を受けていないと考えられる高さ 7m における測定値との差を、微細ミスト噴霧量および風向・風速と併せて図 19 に示す。噴霧量が最大である 1.3l/分とした 11 時 45 分から 20 分では、気温は最大で約 3℃低下しており、SET*はミスト噴霧開始と同時に徐々に低下し、最大で約 3℃の低下がみられた。一方で、ミスト噴霧量が 0.2l/分の場合、風の弱い時間帯には気温と SET*の低下が見られたが、風が強くなると効果が確認できない。

以上の結果から、微細ミスト噴霧により、温熱快適性の向上が期待されるが、適切な噴霧量・噴霧位置などを設定することが重要である。また、今回はミスト噴霧による効果の検証を秋季に実施したため、今後、夏季における効果の検証が必要である。

おわりに (CONCLUSIONS)

都市の暑熱環境対策として、適切な適応策の検討を行う目的で、街路空間の温熱環境を実測による把握を行った。大阪府高槻と枚方の調査対象エリアの温熱環境は、ともに夏の日中には SET*が 35℃を超えており、快適に過ごすためには適応策の導入が必要な状況であった。現状把握により、温熱快適性が低下している要因を検討し、適応策として、枚方では放射環境の改善策としての打ち水を、高槻では気温低下に向けた微細ミスト噴霧を提案した。これらの適応策を試行し、測定を行った結果、温熱快適性向上の可能性を示唆することができた。

ヒートアイランド対策としての適応策を導入する場合、

適用対象空間の温熱環境や暑熱要因等の現況を理解し、適切な対策を検討することが重要である。

謝辞 (ACKNOWLEDGEMENTS)

本論文は環境省の「平成 25 年度ヒートアイランド現象に対する適応策及び震災後におけるヒートアイランド対策検討調査業務」の下で実施した調査結果の一部を取り纏めたものである。ここに記して深甚なる謝意を示します。

引用文献 (REFERENCES)

- 安藤邦明・西田恵・三坂育正・成田健一 (2012) 大丸有地区の屋外アメニティ空間における温熱環境と利用状況の調査。環アーバンインフラテクノロジー推進会議第 23 回技術研究発表会発表論文集(WEB)
- ASHRAE: ASHRAE Fundamentals Handbook, 2001
- 井原智彦・南拓郎・玄地裕 (2006) 被害算定型 LCIA 手法によるヒートアイランド現象の環境影響評価 (その 1) LCIA 手法を用いた環境影響評価の枠組みと人間の健康に与える影響評価。日本建築学会学術講演梗概集 D-1 (環境工学), pp.535-536.
- 環境省 (2012) ヒートアイランド対策マニュアル～最新状況と適応策等の対策普及に向けて～。
- 三坂育正・黒木友裕・野崎尚子・瀬川淳・井田寛・阿久津太一 (2011) 微細ミストによる暑熱環境緩和に関する研究 (第 2 報) 半屋外の実空間への適用と効果評価。空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.1063～1066.
- 三坂育正・成田健一 (2012) 熱中症リスクから見た街路空間気温特性に関する研究。環境情報科学論文集, 26
- 大橋唯太 (2010) 都市域における熱中症指標 WBGT の変動特性。環境情報科学論文集, 24, pp.417～422.
- 大橋唯太・亀掛川幸浩・井原智彦 (2011) 数値気象モデルを利用した屋外熱中症リスクの評価手法に関する研究。環境情報科学論文集, 25, pp.335～340.