

実測による福井駅前広場空間の夏季温熱快適性評価に関する研究

吉田 伸治*

Study on Evaluation of Outdoor Thermal Comfort within Fukui Station Square in Summer Season Using a Field Observation

Shinji YOSHIDA*

(Received February 8, 2013)

This paper describes to investigate effects of the present condition on the thermal comfort in the space around Fukui railway station using the field observation. The meteorological condition and the thermal environment on both of the rest places in east and west sides in the station were measured during the summer season in 2010. From the observational results, it is attempted to evaluate effects of the countermeasure techniques against the severe hot environment in the station square.

Key Words : Station Square, Outdoor Thermal Comfort, SET*

1. はじめに

現在、福井駅前広場では北陸新幹線延伸・西口広場整備などの事業が進められている。駅前広場は鉄道と道路の結節空間であり、「街の顔」としての機能を有する大事な空間でもある。そのため、駅前空間の現状把握、ならびに整備を通じて変わりつつある駅前広場の将来像を多様な視点から評価・分析することは、中心市街地活性化、学術的な駅前空間の環境設計の双方の視点において有効な知見が得られるものと考えられる。本研究では福井駅前周辺の熱環境を実測し、その結果から抽出された課題を解決するための対策案の効果を評価し、今後の駅前整備の議論に資することを目的とする。

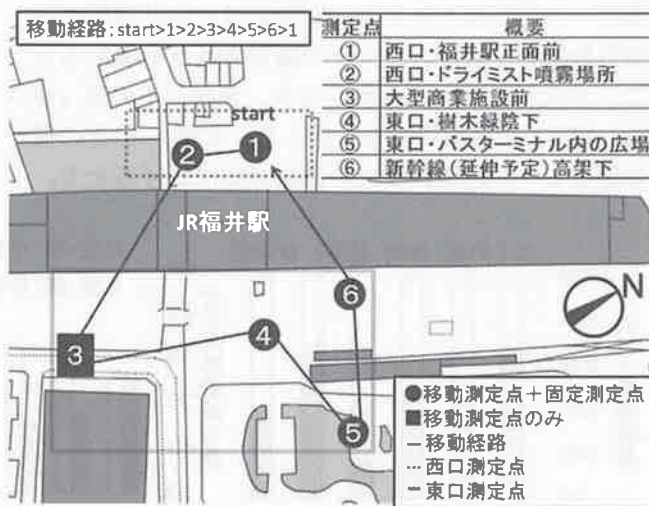


図 1 実測対象および測定項目

2. 実測概要

2.1 実測対象

福井駅前の西口・東口双方の広場を対象とする。
 図 1 に実測対象の平面図ならびに計測点の配置を

表 1 実測項目

| 測定方法 | 測定項目 | 備考(測定機器) |
|------|--------------|--------------------|
| 定点測定 | 温湿度 | 温度とり(SK-SATO) |
| | グローブ温度 | グローブ温度計+熱電対 |
| 移動測定 | 温湿度 | 温度とり(SK-SATO) |
| | 表面温度分布(熱画像) | 赤外線放射温度計 |
| | 風向・風速 | 移動設置型風向・風速計 |
| | 街区内放射測定 | 長短波収支計 |
| 屋上測定 | 上空温湿度 | 百葉箱, 温度とり(SK-SATO) |
| | 風向・風速 | 小型超音波風向計 |
| | 全天日射量, 長波放射量 | 全天日射計・赤外放射計 |

* 建築建設工学専攻

* Architecture and Civil Engineering Course, Graduate School of Engineering

示す。本実測では西口 2 点，東口 4 点の 6 つの測定点を設定した。実測期間は 2010 年 8 月 4 日(水)～8 月 6 日(金)である。

2.2 実測条件

表 1 に実測項目を示す。定点測定では各測定点の通日にわたる熱環境の推移の把握を目的に 10 分毎に温湿度を計測した。また，東西各広場の中心に位置する測定点①，④では，放射熱環境を把握するため，グローブ温度も計測した。移動測定では特に暑さの厳しい日中において各測定点の熱環境の差異を詳しく分析することを目的に筆者らが開発した計測カート²⁾を順廻して移動計測を行った。特に日射量・長波長放射量については，人体周囲 6 方向 (上，下，右，左，前，後) からの入射量を計測した。上空の気象条件については，福井大学工学部 1 号館 3 号棟屋上において温湿度，全天日射量，長波長放射量，風向，風速，乱れの計測を行うとともに，計測対象に近い福井地方気象台 (温湿度，風向・風速) の観測データを参照することにより，結果を分析した。

2.3 測定点周辺の街区形状の測定

歩行者が受ける日射・長波長放射量の 3 次元的方向別不均一性と街区形状の関係を分析するため，計測カートに設置された方向別放射量の各計測方向を望み魚眼レンズ付きカメラで撮影された画像をもとに，方向別視野内に占める天空，地面，その他 (建物，緑等) の形態係数を算出した。写真 1 にその撮影例として，駅西口中央の測定点②における北方，

上方を望み撮影された画像を示す。各測定点における天空とその他 (建物・緑) の形態係数を図 2 に示す。測定点③では東側の大型商業施設，測定点④では休憩場所の高木の樹冠，測定点⑥では JR 福井駅駅舎が影響し，空の形態係数 (天空率) が相対的に小さくなる。また図 3 に午前，午後の時間帯における太陽方位を臨む場合の空の形態係数の測定点毎の比較を示す。ここでは午前の太陽方位を東・南，午後のそれを南・西と考え，各方向を望み撮影された魚眼レンズ画像における天空の形態係数の平均値を用いた。測定点②は駅舎，測定点③は大型商業施設の影響により午前の値が小さい。また，東口にある測定点④⑤⑥の値の方が西口に比べて大きい。

3. 実測結果

3.1 気象条件

本稿では日照条件が安定し高温となった 8 月 4 日

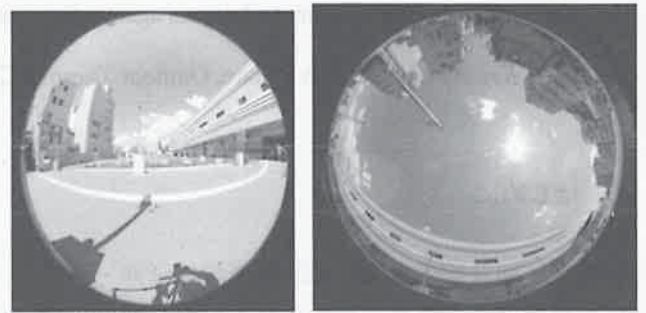


写真 1 魚眼レンズカメラによる周辺障害物の撮影例 (測定点②)

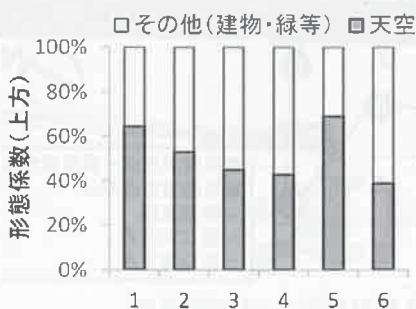


図 2 測定点毎の上方の形態係数

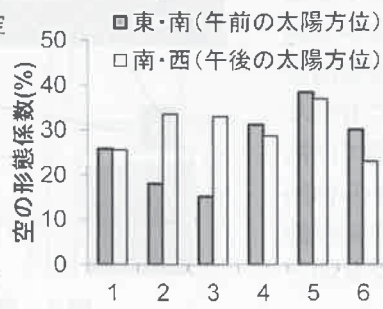


図 3 測定点毎の日射方向に対する空の形態係数

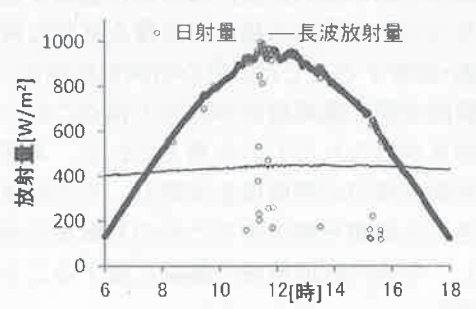


図 4 日射・長波長放射の時間変化 (屋上測定，8 月 4 日)

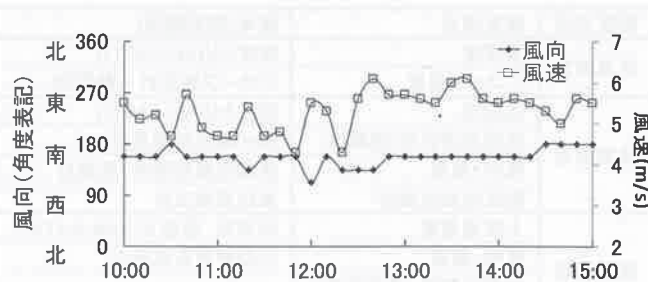


図 5 風向・風速の時間変化 (気象台観測値，8 月 4 日)

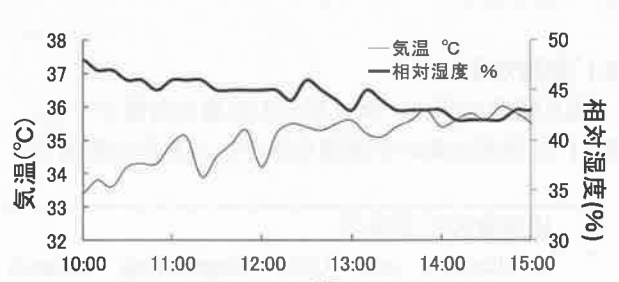


図 6 気温・相対湿度の時間変化 (気象台観測値，8 月 4 日)

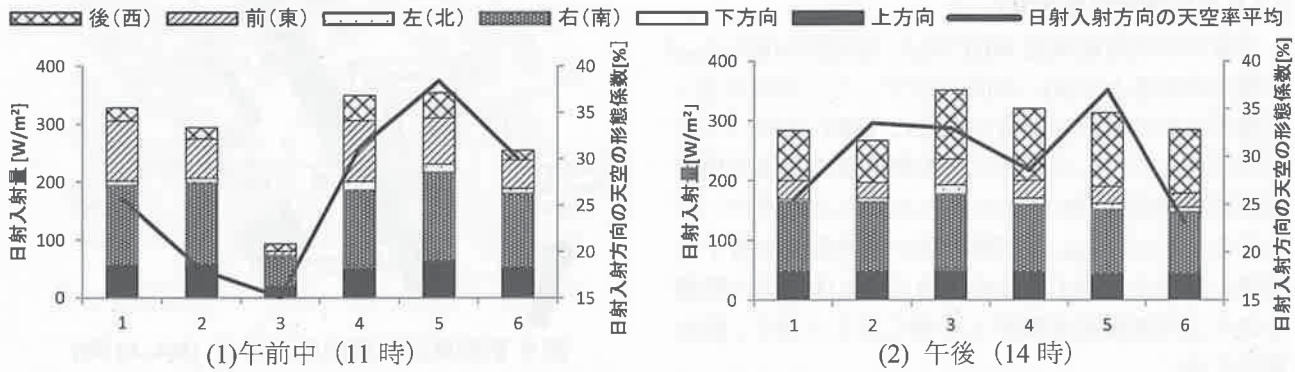


図7 方位別日射入射量・天空の形態係数（日射入射方向）の測定点毎の比較（8月4日）

を対象日として結果を評価する。

3.1.1 日射量・長波長放射量

図4に福井大学屋上で計測された全天日射量，下向き長波長放射量（大気放射量）の時間変化を示す。対象日は快晴であるため，日射量は最高約 1000W/m²を示し，長波長放射量は通日約 400W/m²を示した。

3.1.2 風向・風速

図5に福井地方気象台で計測された風向・風速（計測高さ 26.1m）の時間変化を示す。風速は約 5~7m/s の範囲で推移する。また風向は一日を通して概ね南を示した。夏季の福井市では，午前南からの陸風が，午後北の日本海からの海風が流入する海陸風循環²⁾が見られるのが一般的であるが，本実測期間中は例年稀にみる猛暑であったため，太平洋に勢力を伸ばす小笠原高気圧の影響による南風が卓越したためと推察される。

3.1.3 気温・相対湿度

図6に同気象台で計測された気温・相対湿度の時間変化を示す。気温は午前中から 33℃以上の値を示し，当日の猛暑がよく表れている。

3.2 測定点毎の熱環境

本稿では図1に示す測定点①~⑤を巡回して計測された5分間（計測間隔1分）の結果の平均値を各地点の代表値として評価に用いる。

3.2.1 日射量・長波長放射量

本研究では温熱快適性の評価対象となる歩行者の姿勢を立位と想定し，放射環境を詳しく評価する。歩行者に対する各方向からの日射・長波長放射量は式(1)~(3)により定義される。

$$S'_i = A_i a_i S_i / A \quad (1)$$

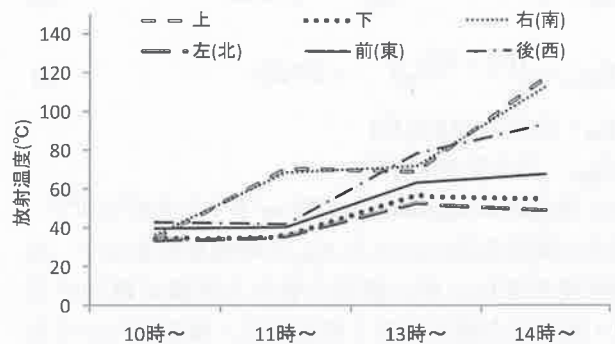


図8 方向別平均放射温度 $T_{SR(i)}$ の時間変化（測定点③）

$$R'_i = A_i R_i / A \quad (2)$$

$$A = \sum_{i=1}^6 A_i \quad (3)$$

S'_i : 各方位からの日射量(人体形状を考慮) [W/m²]

R'_i : 各方位からの長波長放射量 (人体形状を考慮) [W/m²]

S_i : 各方位からの平均日射量 [W/m²]

R_i : 各方位からの平均長波長放射量 [W/m²]

A_i : 人体周囲の各方位からの投影面積率³⁾ [-]

(上・下: 0.08, 左・右: 0.23, 前・後: 0.35)

a_i : 各方位から日射に対する吸収率 [-]

本実測では，全天日射計，赤外放射計で計測された3次元各方位（前，後，右，左，上，下）の R_i , S_i に人体形状を考慮した各方位からの投影面積率³⁾ A_i を乗じることにより，歩行者の放射環境を3次元的に分析した。図7に各測定点の日射入射量 ($a_i = 1$ (完全吸収) の場合) の比較を示す。図中には，太陽方位を望む空の形態係数（図3）の測定点毎の比較を実線により併せて示す。午前中の値は測定点③を除き 250W/m²~400 W/m²程度，午後は全測定点で 250 W/m²~350 W/m²程度の値を示し，測定点③の午前，午後での値の変化が大きい。これは太陽方位を望む空の形態係数の推移からも明らかのように，午前中の時間帯では測定点③近傍の大型商業施設の影に入るためである。

3.2.2 平均放射温度 MRT

全身の平均放射温度 MRT (T_{SR}), 方向別 MRT ($T_{SR(i)}$) の算出式を各々式(4), 式(5)に示す. ここでは日射・長波長放射の双方の影響を併せた MRT を用いて結果を評価する. T_{SR} は後述する温熱快適性評価指標の新標準有効温度 SET*算出のための入力条件の一つとなる. また, $T_{SR(i)}$ は周囲の高い放射温度を有する要素の存在を把握するため, 敢えて人体形状の影響を表す方向別投影面積率 A_i を乗じること無く, 値を算出する.

$$T_{SR} = \left(\sum_{i=1}^6 (R'_i + S'_i) / \sigma \right)^{0.25} - 273.15 \quad (4)$$

$$T_{SR(i)} = \left((R_i + S_i) / \sigma \right)^{0.25} - 273.15 \quad (5)$$

T_{SR} : 全身の MRT [°C]

$T_{SR(i)}$: 方向別 MRT [°C]

σ : Stefan-Boltzmann 定数 [W/m²K⁴] (=5.67×10⁻⁸)

図8に測定点③における $T_{SR(i)}$ の時間変化を示す. 太陽位置の変化に伴い直達日射の入射量が増加する南・西・上の値が大きく昇温する. 東側についても増加傾向が見られるが, これは大型商業施設の白色の壁からの照り返しの影響である.

3.2.3 風向・風速

図9に13時の駅前周辺の風速ベクトル分布を示す. 図中のベクトルは移動計測により計測された各測定点の風向・風速の5分間平均値を基に推定されたものであり, 上空風向は南南東である. 西口では上空風に対応した南, 南南東の風向を, 東口では駅舎の長辺(南南西-北北東)に沿った南西からの気流が流入する結果となった.

3.2.4 気温

各点の熱環境を簡易に予測する上で近傍の公共の気象観測データとの関連を分析することには大きな意味がある. 図10に本実測各測定点の定点測定による10時, 14時の気温(高さ1.2m)の平均値と福井地方気象台での観測結果との差の比較を示す. ただし, 測定点③については定点測定が行われていないため, 移動計測の結果を用いる. 駅西口の測定点①②, 東口の⑥の値は気象台と比較的近い値を示すが, それ以外の測定点ではやや高い値を示す傾向がみられる. 特に測定点③では, 大型商業施設の影響の有無が強く表れた局所性の強い結果となった.

3.2.5 新標準有効温度 SET*

図11に各測定点の時間帯ごとの SET* の比較を示す. 全ての測定点において 30°C 以上の「暑くて不



図9 駅前周辺の風向風速分布 (8/4, 13時)

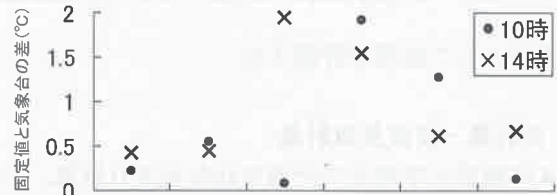


図10 気象台と各測定点の気温比較 (8/4, 10・14時)

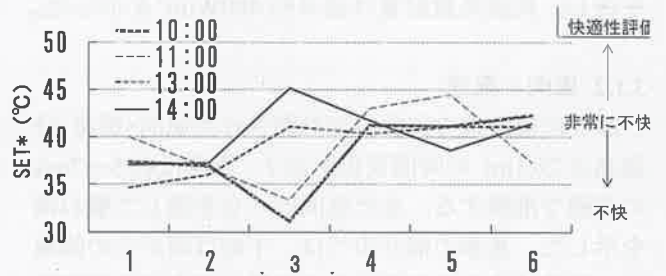


図11 移動測定による SET* の変動 (8月4日)

快」な状態を示す結果となり, 現状の駅前空間は快適性評価の上で極めて劣悪であることが分かる. また, 変化の傾向に着目すると, 特に測定点③では日影となり MRT が低い午前中から日向と変わり MRT が上昇する午後にかけて, その値が大きく上昇する結果となった. また, 本実測では東口に位置する測定点③~⑥の方が, 西口に位置する測定点①, ②より高い SET* の値を示す結果となった. これは, 今回の移動計測時間帯が 14 時までであり西日の影響の強まる夕方の時間帯の計測結果を含まないためと考えられ, これについては今後, 数値解析により検討する必要があると考えられる.

4. 放射環境の緩和による暑熱対策の簡易評価

前章で示された計測結果より, 福井駅前広場の夏季温熱環境が極めて劣悪であることが明らかとなった. 本章ではこの現状を緩和するための対策の効果を簡易に評価することを試みる.

4.1 評価手法の基本的な考え方

図12に本章で行う暑熱対策効果の評価手法の基本的考え方を示す. 本分析では, カートで計測され

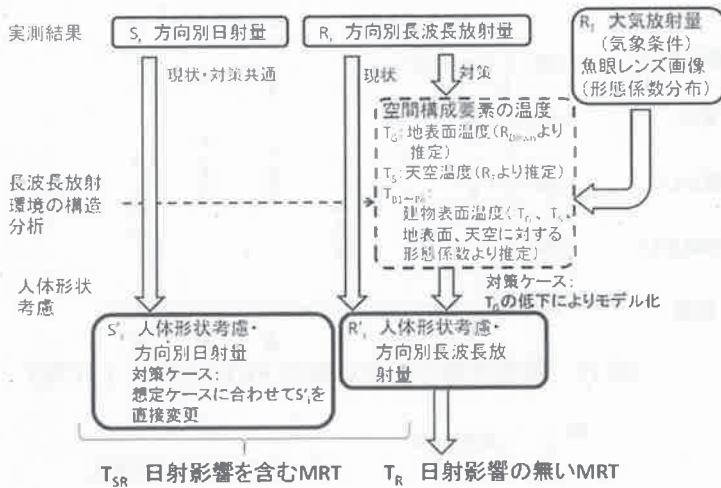


図 12 暑熱対策効果の分析手法の考え方

る各方位別の日射量 S_i 、長波長放射量 R_i 、気象条件として福井大学工学部 1 号館 3 号棟屋上で計測される長波長放射量 R_T 、魚眼レンズを用いて撮影される人体表面の各方位から周囲を望む場合に存在する物体・天空等の各要素の形態係数分布を用いる。日射については、人体形状を考慮した方向別日射量 S'_i を算出した後、対策ケースで想定する日射環境に応じた値に変更する。一方、長波長放射については、まず放射熱環境形成に寄与する要素の表面温度を推定し、放射熱環境の形成構造を分析する。次に対策ケースとして想定される効果（例えば、地表の芝生化に伴う地表温度の低下）の内、対策の影響を受ける要素の表面温度を増減させる。新たに得られた表面温度を用いて方向別長波長放射量 R'_i を算出する。最後に、修正された S'_i 、 R'_i を用いて全身の平均放射温度 T_{SR} を算出し、これを SET*算出の入力条件に用いる。

図 13 に本分析で放射（特に長波長放射）熱環境形成に寄与すると考えられる構成要素のかかわりを示す。本分析では、実測により得られる各方位別長波長放射量が、天空面（添え字 S ）、地表面（添え字 G ）、建物表面等（添え字 B ）の 3 要素のみに影響されるものと仮定する。実際の街路空間は上記以外の要素（例えば樹木植栽等）も存在するため、この取り扱いはやや乱暴なものとも考えられるが、今回の各計測点周囲には街路樹等の配置が少なく、それらの影響は小さいと判断したためである。そのため、これら取り扱わない要素の影響は「建物表面等」の温度 T_B に含まれるものとする。

4.2 対策ケースの検討・方法

4.2.1 ケース①：着衣の色の変更

人体が周囲から受ける日射量の計算式(5)式において、各方位に対する日射吸収率 a_i を変更すること

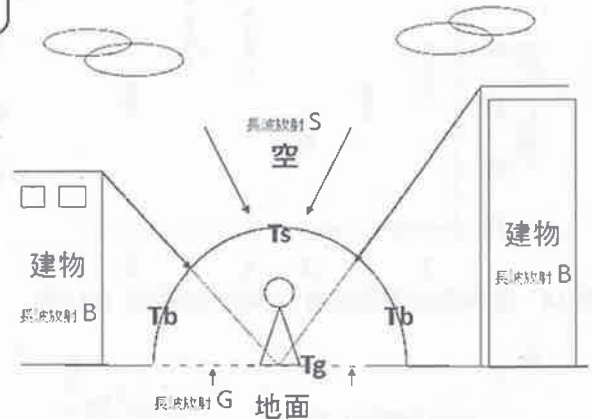


図 13 放射環境形成に寄与する周辺要素の区分

によりモデル化する。本ケースでは a_i は全ての方向で一様と仮定する。基本ケースは $a_i=0.5$ (白色を想定) とする。

$$AS = \sum_{i=1}^6 A_i a_i S_i \tag{5}$$

4.2.2 ケース②：日傘の活用

各方位からの入射日射量の吸収率 a_i を変更することによりモデル化する。ただし、②では方向別に a_i の低減効果を定めることで日傘の効果をモデル化する。具体的には、上方からの日射受熱無し、側面(side)からの日射半減、下方からの日射受熱は基本ケースと同様と設定する。

$$a_{up} = 0, a_{side} = 0.5 \times 0.5 = 0.25, a_{down} = 0.5$$

4.2.3 ケース③：地表被覆改変による表面温度低下

本分析では、まず実測より得られる各方位別長波長放射量 R_G が、天空面 S 、地表面 G 、その他（建物表面、緑等） B の 3 要素にのみ影響されると仮定し、各要素からの長波長放射量を次式に基づき推定する。

$$R_i = F_{iG}R_G + F_{iS}R_S + F_{iB}R_B \tag{6}$$

F_{iG}, F_{iS}, F_{iB} : 人体の i 方向から地表面 G 、天空面 S 、建物表面 B を望む場合の形態係数[-]
 R_G, R_S, R_B : 地表面 G 、天空面 S 、建物表面 B からの長波長放射量[W/m²]

ここで、 F_{iG}, F_{iS}, F_{iB} は魚眼レンズ付きカメラによる画像より推定される（写真 1）。 R_S は気象条件として福井大学工学部 1 号館屋上での計測値、また R_G は各測定点における下方からの長波長放射量そのものとする事により値が定まる。 R_B は(6)式の残差として推定される。

(6)式の各項が得られた上で具体的な地表被覆の改変の効果をモデル化する。具体的には、改変に伴い表面温度 T_G が T'_G に増減（ここでは 20℃低下）し、結果として地表からの長波長放射量 R_G も R'_G に変化

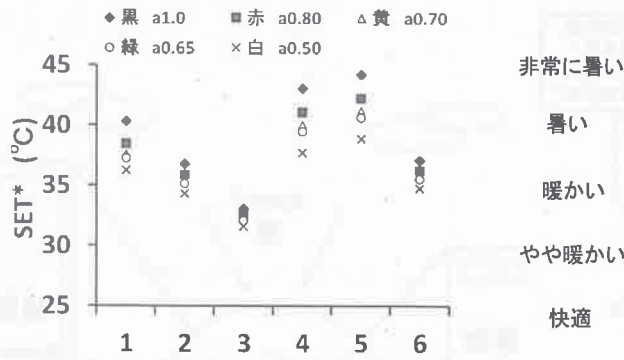


図 14 着衣色と測定点毎の SET* の関係 (11 時)

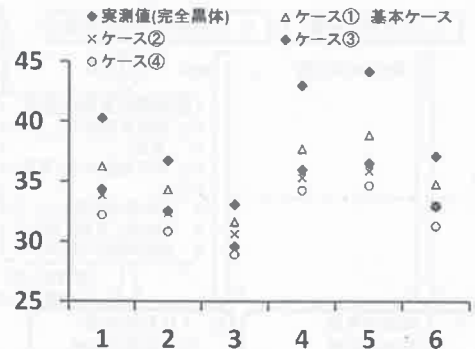
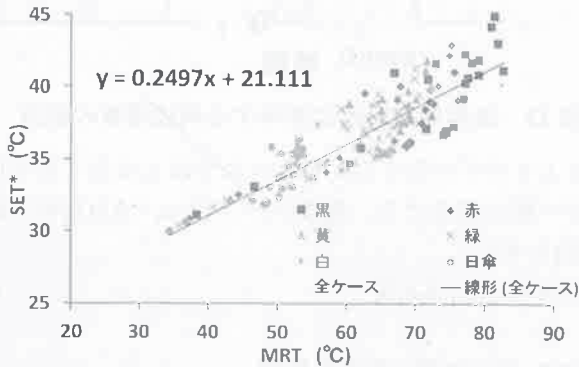
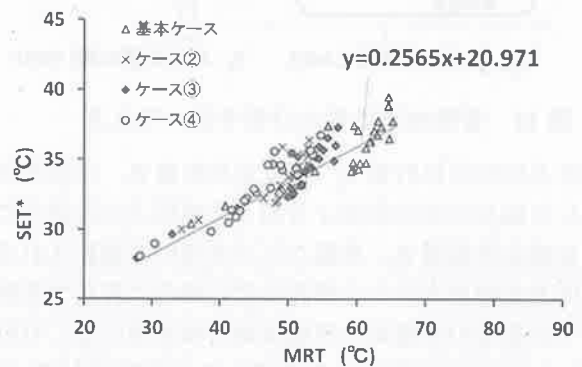


図 15 暑熱対策と測定点毎の SET* の関係 (11 時)



(1) 着衣の色の変更の影響



(2) 全ケース

図 16 暑熱対策に伴う MRT の増減に伴う SET* の増減の関係 (11 時の計測結果に基づく)

すると考えることによりモデル化する(式(7), (8)).

$$R''_G = \sigma T_G^4 \quad (7)$$

$$R''_i = F_{iG}R''_G + F_{iS}R''_S + F_{iB}R''_B \quad (8)$$

4.2.4 ケース④：樹木の植栽

上記ケース②, ③の複合(上方からの日射量減少+地表面温度の低下)を樹木の植栽の効果と考える。

4.3 対策ケースの評価結果

4.3.1 着衣の色の変更(ケース①)の効果

図 14 に対策ケース①により得られる SET* の差異を測定点毎に示す。着衣の色の変化に伴う日射吸収量の増加に従い SET* が最大 5°C 程度昇温することが分かる。

4.3.2 各対策ケースの SET* の比較

図 15 に各対策ケースにより得られる SET* の比較を示す。当然ながら、最も大きな対策となるケース④が最も高い効果が得られ、基本ケース(ケース①)に対して約 3°C の SET* の低下がみられる。

4.3.3 SET* と MRT の関係

図 16 は対策ケース毎の MRT (T_{SR}) と SET* の関係を散布図にまとめたものである。今回の対策は全て MRT の増減に反映されるものであるため、この分析

結果より、本実測対象における放射熱環境の改善が空間の温熱快適性に与える効果を包括的に推定することが可能と考えられる。回帰式より、本実測対象では MRT 1°C の増減に寄与する対策により SET* が約 0.25°C 増減することが分かる。これは本対象における SET* 1°C の低下を実現させる際の放射環境の寄与度が 25% 程度であることを示しており、放射以外の環境要素、特に気流に着目した対策を併用する重要性が示唆される結果となった。

5. まとめ

- (1) 福井駅前広場空間での夏季の温熱快適性に与える影響を実測評価し、現状は暑くて不快な温熱環境という結果を示した。
- (2) 実測結果から考えられる暑熱対策として植樹により放射環境を改善することが最も効果の高い対策であり、適切な高木等の配置が望まれる。
- (3) CFD 連成数値解析による詳細な熱環境評価が今後の課題である。

参考文献

[1] 岸, 吉田, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 51 号, 217-220, 2008.7.
 [2] 竹内, 吉田他, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 52 号, 259-262, 2009.7.
 [3] Thermal Comfort, ASHRAE Fundamentals Handbook, 2001.