

校庭の部分的芝生化による暑熱緩和効果に関する研究

Heat Mitigation Effects of Schoolyard Partial Turf Planting

○岸本 健志 (大阪市立大学) 梅宮 典子 (大阪市立大学) 小林 知広 (大阪市立大学)

Takeshi KISHIMOTO\*1 Noriko UMEMIYA\*1 Tomohiro KOBAYASHI \*1

\*1 OSAKA CITY UNIVERSITY

This paper evaluates heat mitigation effects of partial turf and studies effective/less effective place of partial turf by Computer Fluid Dynamics (CFD) analysis. This paper confirmed by questionnaire and aerial photograph survey that 1) partial turf planting is major manner in an Osaka city elementary school. According to our CFD analysis, 2) the maximum temperature decrease is 0.79 K. Heat mitigation effects of turf are 3) more effective at windless locations or 4) only on turf, and 5) less effective if the partial turf is downwind to sandy ground. 6) The maximum Wet Bulb Globe Temperature decrease is 0.98 K, but no analysis case shows that Wet Bulb Globe Temperature decreases from over 31°C to less than 31°C.

1. 研究の背景と目的

芝生化には怪我の防止や児童の外遊びを促進する効果<sup>文1)</sup>、<sup>2)</sup>や暑熱緩和効果<sup>文1)</sup>、<sup>3)</sup>が期待され、国や自治体、企業、スポーツ団体等により推進されている。大阪市内では公立小学校の校庭芝生化推進事業が2004年から行われ2015年度までに292校中57校が芝生化されている(Fig.1)。しかし実施や維持管理の費用や労力、芝生の養生管理等の理由から校庭の部分的な芝生化が多い。本研究は校庭の部分的な芝生化の暑熱緩和効果について、大阪市内の小学校を対象に1)アンケート調査及び航空写真の分析により、芝生の位置・形状パターンや面積など部分的芝生化の実態を明らかにし、次いでこの実態調査と実測値<sup>文2)</sup>に基づいたCFD解析による気温分布のシミュレーションを行い、2)気温低下効果の大きさ、3)気温低下効果が大きい芝生の場所、4)気温低下効果の及ぶ範囲、5)気温低下効果が小さい芝生の場所を検討し、6)暑熱緩和効果をWBGTで評価する。

2. 校庭芝生の実態調査

2.1 小学校を対象としたアンケート調査

航空写真をもとに芝生があると判断した<sup>注1)</sup>66の大阪市内立小学校の施設整備担当者に平成27年7月に調査票を郵送付し、28校から回答を得た。うち16校が芝生化を実施していた。アンケートでは、芝生化の実施と位置、位置決定の理由、効果、問題点、維持管理の実態等について尋ねた。Fig.1に芝生の位置を示す。「全面」と「中心」が少なく「遊具周り」「周縁」「中庭」等が多い。Fig.3に芝生位置の決定理由を示す。維持管理や芝生利用の都合が多く、暑熱緩和効果を理由とした校はない。

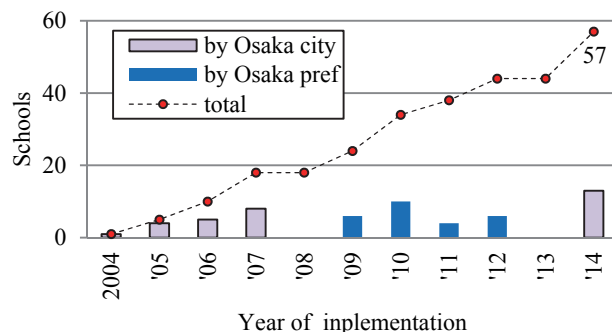


Figure1 Planted turf elementary schools in Osaka city

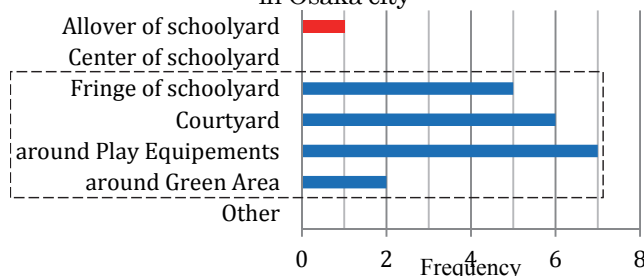


Figure2 Sites of turf (by questionnaire survey)

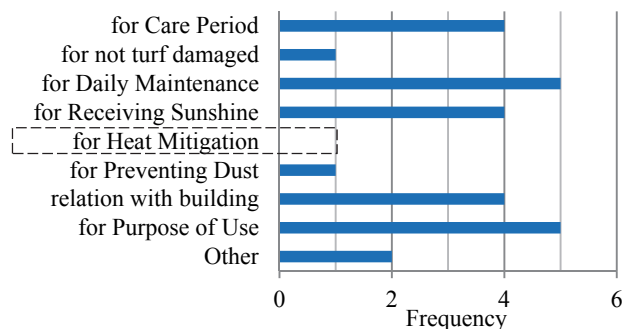


Figure3 Reasons of sites of turf planting (by questionnaire survey)

## 2.2 航空写真による分析

### (1) 芝生部分の面積

前節のアンケート、航空写真、現地目視、および大阪府や大阪市の情報を合わせて 49 校の芝生部分の面積を得た。100m<sup>2</sup>刻みの度数分布を Fig.4 に示す。1,000m<sup>2</sup>以下は 36 校あり、内 901-1,000m<sup>2</sup>が 10 校と最多である。

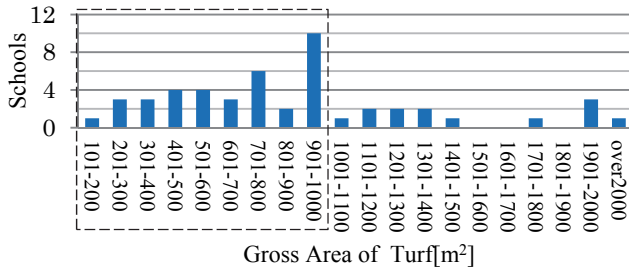


Figure4 Gross area of turf

### (2) 芝生の位置と形状

具体的な芝生の位置形状が分かった 49 校について、芝生の位置形状を「全面(AI)」「四角(Sq)」「オビ状(Ln)」「凸部(Cv)」「中庭(CY)」「第二グラウンド(SY)」の 6 つに分類し集計した。Fig.5 に各分類の代表例を示す。Fig.6 に分類ごとの出現頻度を示す。芝生面積 1,000m<sup>2</sup>以下ではオビ状と凸部が多く、1,000m<sup>2</sup>を超えると全面が多い。

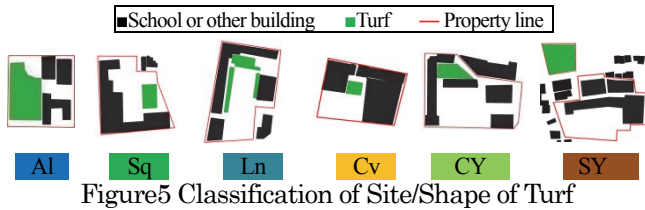


Figure5 Classification of Site/Shape of Turf

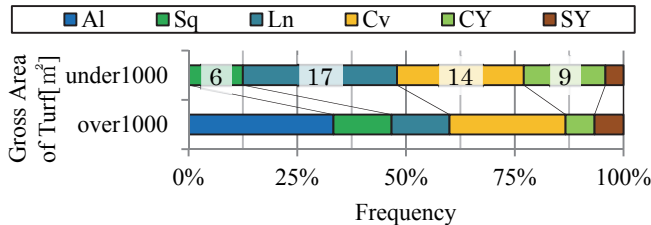


Figure6 Frequency of Classified Site/Shape of Turf

## 3. CFD 解析によるシミュレーション

### 3.1 解析対象校の選定

航空写真より大阪市内のすべての公立小学校 291 校を対象に、小学校を中心とする周辺 400m 角範囲 (以下、「街区」) について、航空写真から求めた「緑」の投影面積率の度数分布を Fig.7 に示す。芝生化していない 235 校の下位約 25% (64 校) から、方位ごとの建物有無、敷地の面積、プールと体育館の大きさを考慮し最も多い学校建物配置のパターンを検討した。北と西に校舎がありプールと体育館が低層の別棟、敷地面積は 6795~13128m<sup>2</sup> (平均値±標準偏差)、が最も多いパターンであることがわかった。これら全てを満たすものは 8 校あった。さらに街区の西側に建つ校舎より高い建物の数から高層化と建物密集度の状況を検討し、中高層建物が疎らに建つ MODEL\_K と、低層建物が密集する

MODEL\_H の 2 校を解析対象モデルの小学校として選定した (Fig8)。

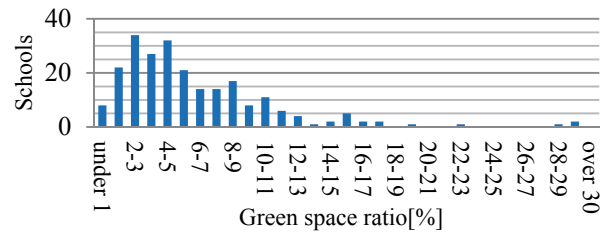
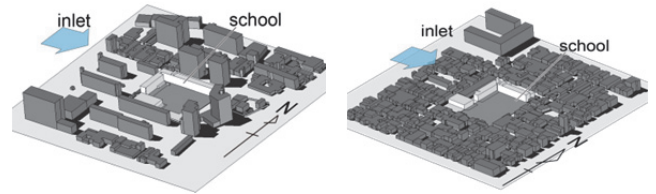


Figure7 Green space ratio around elementary schools in Osaka city



MODEL\_K School's lot Area:11,550 m<sup>2</sup> Schoolyard Area:6,520 m<sup>2</sup>  
MODEL\_H School's lot Area:11,865 m<sup>2</sup> Schoolyard Area:6,510 m<sup>2</sup>

Figure8 Selected 2 analysis MODELS

### 3.2 解析の概要

解析モデルを中心とする 400m 角範囲の街区を再現し、大阪市の盛夏期日中を想定したシミュレーションを行う。解析領域とメッシュ分割を Fig.9 に、計算概要を Table1 に示す。前述の実態調査より芝生面積 1,000m<sup>2</sup>以下でオビ状と校庭凸部の芝生が多いことを考慮し Fig.10 の 13 ケースを解析する。モデルの表面に実測<sup>2)</sup>より得た表面温度 (Table2) を与え、風向は最多風向の西とした。各ケースで変更した条件は芝生の位置のみである。

Table1. CFD Analysis Condition

Analysis Domain	1500m×600m×450m
Analysis Model	400m×400m(highest building 45m)
Turbulence model	Standard k-ε model
Discretization Scheme	first - order upwind differencing scheme
Boundary Condition	Inlet(West) 1/5 power law 3.13 m/s(Z=20m) 31.60°C(MODEL_K)/31.10°C(MODEL_H) from West to East
	Outlet(East) Gauge pressure: 0 pa
	other Ground/Walls: no-slip Sky/Northern/Southern Domain: free-slip
Thermal Boundary Condition	Coefficient of Heat-Transfer 23W/m <sup>2</sup> (fixed)
Number of Mesh	6,001,328(MODEL_K)/5,889,372(MODEL_H)

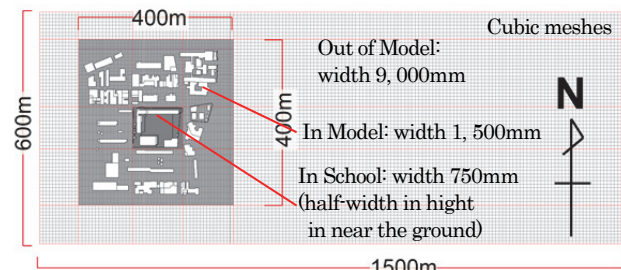


Figure9 Analysis domain and mesh layout

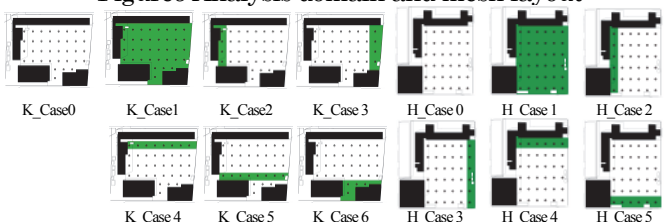
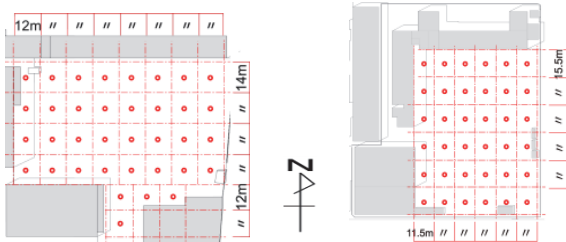


Figure10 Analysis cases

Table2 Surface temperature [°C]

Building Surface					Ground of City	
Northern	Southern	Western	Eastern	Roof	GND(light)	GND(shade)
35.84	35.79	39.95	38.48	51.80	51.80	37.60
Ground of Schoolyard						
Sand(light)		Sand(shade)		Turf(light)		Turf(shade)
51.20		37.94		46.73		34.64



MODEL\_K

MODEL\_H

Figure.11 Study points of 2 analysis MODELS

両モデルについて、校庭を 36 分割し児童の胸の高さとして地上 1m に 36 点の検討点を設定した(Fig.11)。以下で気温、気温差、風速、WBGT は地上 1m の値を扱う。

3.3 解析結果

(1) MODEL\_K

校庭の全面が土のケース (K\_Case0、以下全面土) と全面芝のケース (K\_Case1、以下全面芝) の気温コンター図を Fig.12 に示す。検討点での気温は全面土で 33.47~36.16°C、全面芝で 33.25~35.44°C とおおむね実測<sup>2)</sup> の範囲内にある。全面土と比べると全面芝では校庭の全体で気温が低く、検討点での両者の気温の差は 0.08~0.92K である。芝生のある各ケース (Case1~) について、全面土との気温の差を気温低下と定義する。気温低下のコンターを Fig.13 に、検討点の気温低下の最大と平均を Table3 に示す。全面芝では校庭全域で気温低下があり、体育館 (南西の建物) の後方や校舎の入隅部で気温低下が大きい。部分芝生 (K\_Case2~6) の気温低下は芝生の上でのみある。部分芝生で気温低下が最も大きいのは K\_Case6 で、芝生上検討点の平均で 0.56K 低下した。西側と南側の部分芝生 (K\_Case2,5,6) は芝生上において全面芝と同程度の気温低下があるが、Fig.14 左の流線図において風下にあたる北側と東側 (K\_Case3,4) では芝生上の効果が全面芝よりも小さく芝生上検討点で 0.10~0.38K 気温低下が劣る。北側と東側が風下にあたる。芝生が土に対して風下にあるとき土上を通過した暑い空気が芝生上に流れ込むため、気温低下が劣ると考えられる。

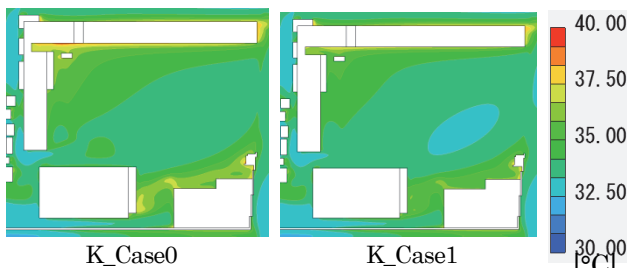


Figure12 Temperature in schoolyard (MODEL\_K)

(2) MODEL\_H

全面土 (H\_Case0) と全面芝 (H\_Case1) 検討点での気温はおおむね実測<sup>2)</sup> の範囲内にある。気温低下のコンターを Fig.15 示す。全面芝では体育館 (南西の建物) の後方と校舎入隅部で気温低下が大きい。部分芝生では H\_Case5 が最も気温低下し芝生上検討点の平均で 0.27K 低下した。部分芝生が土に対して風下のとき気温低下が劣る傾向は MODEL\_H でも見られた。風下にあたる北側と東側 (H\_Case3,4) は全面芝と比べて芝生上検討点で 0.20~0.41K 気温低下が小さい。

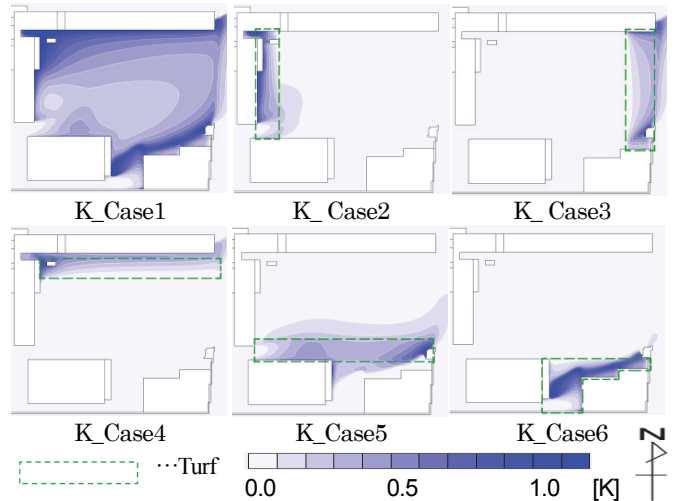


Figure13 Temperature decrease (MODEL\_K)

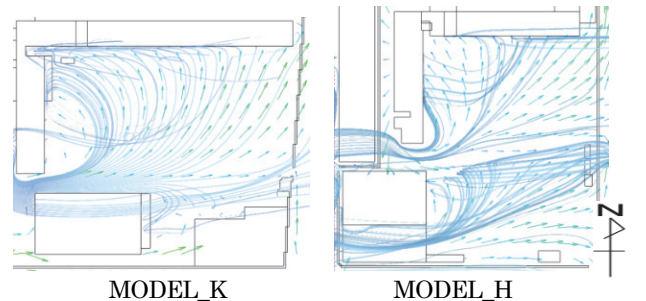


Figure14 Air flow vectors and flow lines

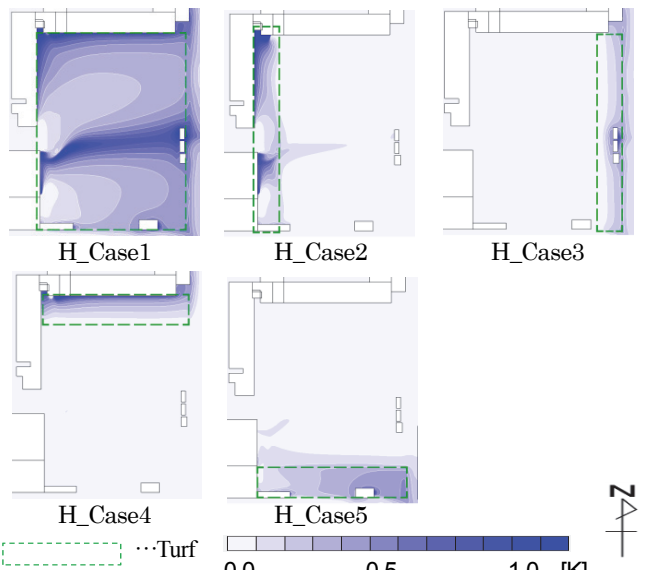


Figure15 Temperature decrease (MODEL\_H)

(3) 気温低下と風速の関係

K\_Case1 と H\_Case1 の検討点での気温低下と、同検討点での風速の関係を Fig.16 に示す。風速が小さいほど気温低下が大きい。また風速が小さい点は芝生化していない Case0 で気温が高い。地上 1m の気温に及ぼす地表温度の影響が、風速が大きいときに小さく、風速が小さいときに大きい<sup>文4)</sup>ためと推測できる。

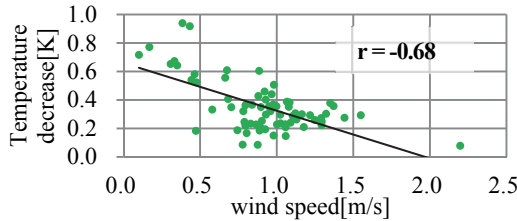


Figure16 Temperature decrease with wind speed at study points

4. WBGT による暑熱緩和効果の評価

各面の立体角投射率と全天日射量より(1)(2)式で長波長放射を考慮した OUT-MRT\_L<sup>文3)</sup>を求める。グローブ温度は(3)式で求め、湿球温度は実測した湿度から(4)(5)式で求める。算出した WBGT を、ケースごとの平均値で Table4 に示す。全面土と部分芝生の WBGT の差(「WBGT 低下」)は、各ケース平均で 0.33~0.79K であり、最大は 0.98K である。検討点の気温低下と WBGT 低下の関係を Fig.17 に示す。気温低下が大きい位置では WBGT 低下も大きく、同じ位置で WBGT 低下は気温低下より 0.2K 程度大きい。部分芝生上の WBGT の値は 29.22~34.77°C であり日影の検討点を含む Case2 を除いた全てのケースで日本体育協会が示す原則運動中止の基準ならびに日本生気象学会が提唱する危険基準である 31°C を超えている。本シミュレーションでは校舎近くに芝生があるケースを解析したが、建物近くでは長波長放射の影響により WBGT が高いと考えられる。

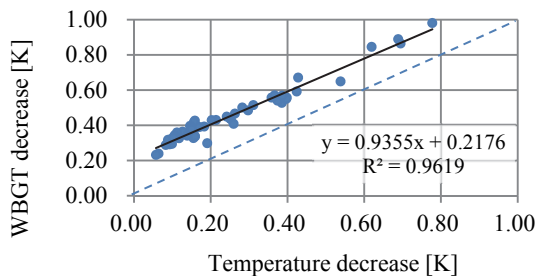


Figure17 WBGT decrease on partial turf with temperature decrease

Table3 Temperature decrease at study points on partial turf

	K Case2	K Case3	K Case4	K Case5	K Case6	H Case2	H Case3	H Case4	H Case5
Maximum[K]	0.40	0.43	0.54	0.70	0.78	0.42	0.20	0.16	0.40
Average[K]	0.24	0.18	0.18	0.32	0.56	0.21	0.11	0.15	0.27

Table4 Average of WBGT at study points on partial turf

	K Case2	K Case3	K Case4	K Case5	K Case6	H Case2	H Case3	H Case4	H Case5
Before Turf [°C]	29.68	32.07	32.14	32.12	35.55	29.56	31.92	31.72	31.99
After Turf [°C]	29.22	31.62	31.74	31.60	34.77	29.18	31.59	31.34	31.53
Decrease [K]	0.47	0.45	0.39	0.52	0.79	0.38	0.33	0.38	0.46

5. まとめ

大阪市の小学校を対象に校庭の部分的芝生化の実態を調査し、代表的な校舎配置の 2 校について校庭の部分的な芝生化の暑熱緩和効果を CFD により検討した結果、部分的な芝生では暑熱緩和効果を得られにくい芝生の位置があることがわかった。1)芝生は 1,000m<sup>2</sup>以下が多く、形状や位置はオビ状と校庭凸部が多い。2)盛夏期の実測値をもとにしたシミュレーションでは、全面土と部分芝生の気温の差(「気温低下」)は検討点の最大で 0.79K、ケースごとの平均値は 0.11~0.56K である。3)芝生の気温低下効果は、風速が小さい地点で大きい。4)部分芝生の気温低下効果は芝生の上のみにとどまる。5)土の部分に対して芝生の部分が風下側にあるような芝の配置の場合、気温低下効果は小さい。6)全面土と部分芝生の WBGT の差(「WBGT 低下」)は各ケース平均で 0.33~0.79K であり、最大は 0.98K である。芝生上の WBGT 低下は気温低下と相関が強く、気温低下より約 0.2K 大きい。芝生化により WBGT が 31°C 以上から 31°C 未満に低下したケースはない。

$$T_{MRT,L} = \sum F_{bi} \times T_{prt,i} = \sum F_{bi} \times (\sum F_{j,j} \times \epsilon_j T_{s,j}) \quad (1)$$

$$T_{MRT} = \left[ \frac{F_p(1-\alpha_{cl})S_l}{F_{eff}\sigma} + \frac{(1-\alpha_{cl})(D_l + (D_l + S_l)\alpha_{GND})}{\sigma} + T_{MRT,L}^4 \right]^{0.25} \quad (2)$$

$$T_{MRT} = \left[ (t_g + 273)^4 + \frac{1.10 \times 10^8 V_a^{0.6}}{\epsilon_b D^{0.4}} (t_g - t_a) \right]^{0.25} - 273 \quad (3)$$

$$h' = h + (x' - x)hc' \cong h + (x' - x)t_w \quad (4)$$

$$h = 0.240t + (0.431t + 597.3)x \quad (5)$$

$F_{b,i}$ :人体 i 面の投影面積率[-]  $F_{j,j}$ :面の立体角投射率[-]  $\epsilon_{j,j}$ :面の放射率[-]  $T_{s,j}$ :面の表面温度 [°C]  $\alpha_{cl}$ :衣服のアルベド [-]  $\alpha_{GND}$ :地表面アルベド[-]  $S_l$ :直達日射量[w/m<sup>2</sup>]  $D_l$ :拡散日射量[w/m<sup>2</sup>]  $F_{eff}$ :有効放射面積率[-]  $V_a$ :直達日射に対する人体の投影面積率[-]  $\sigma$ :ステファン・ボルツマン定数[W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]  $t_a$ :乾球温度[°C]  $t_g$ :グローブ温度[°C]  $t_w$ :湿球温度[°C]  $V_a$ :風速[m/s]  $\epsilon_b$ :グローブの放射率[-]  $D$ :グローブの直径[m]  $h$ :乾球周り空気比エンタルピー[kJ/kg]  $h'$ :湿球周り空気比エンタルピー  $x$ :乾球周りの絶対湿度[g/kgDA]  $x'$ :湿球周りの絶対湿度

謝辞

アンケート調査にご協力頂いた小学校ならびに担当者様のご厚意に深く感謝申し上げます。

注

注 1) 行政の補助以外で校庭芝生化を行った校もあると思われたので、大阪府市が公開している校に加え航空写真目視より芝生化していると思われる校に送付した。

参考文献

1) 森山正和編：ヒートアイランドの対策と技術、学芸出版社、69-76、2004年8月 田邊祐介：校庭の芝生が児童の校庭の利用に及ぼす影響に関する研究、日本造園学会全国大会論文集、943-946、2005年3月 3) 原田恭幸他：都市部の小学校における校庭芝生化の効果に及ぼす校舎配置の影響、空衛・近畿・論文集(平成23年)、235-238、2012年3月 4) 八木里英子他：地表面温度と風速が地表付近の気温形成に与える影響に関する研究、建・近畿・報告集、環境系(53)、317-320、2013年5月 5) 真嶋一博他：都市内街区における路地の熱的快適性評価、建・環境系論文集 第622号、41-48、2007年7月