

地表面の芝生化による夏季熱環境の緩和効果に関する検討

—数値シミュレーションによる土の校庭と芝生の校庭の比較—

梅田 和彦*1・屋柝下 亮*1・大黒 雅之*1・深尾 仁*1

Keywords : lawn planting in school playground, lawn, thermal environment, field measurement, experiment, numerical simulation

校庭緑化, 芝生, 温熱環境, 現地調査, 実験, 数値シミュレーション

1. はじめに

ヒートアイランド現象の緩和策として, 都市中心部に点在する小中学校の校庭を芝生にして (以下, 校庭緑化), 学校を「緑の拠点」にする動きが東京都や大阪市ででてきている。校庭緑化のねらいには, 情操教育, 砂埃の抑制, 怪我の予防, 景観の向上, 地域交流の活性化などの他に, 夏季の暑熱環境の緩和がある (例えば¹⁾ ²⁾)。校庭緑化を実施できれば, 緑化面積の大幅な増大が困難である大都市中心部に, 数百 m² から数千 m² の緑地が誕生し, そのスケールメリットを生かした夏季の暑熱環境の緩和を期待できる。

都市の緑地を対象にした熱環境緩和に関する既往の調査には, 例えば, 公園に関する神田ら³⁾ や尹ら⁴⁾ の報告, 都市に点在する樹林に関する森山ら⁵⁾ による報告の事例があるが, 校庭緑化を対象に調査した報告例は少ない。

本論文では, 現地調査と屋外実験の測定結果を用いて, 校庭が土の場合や芝生の場合の各状況における夏季の熱環境を数値シミュレーションで比較した結果について報告する。

2. 測定の概要

2.1 測定の方針

数値シミュレーションには, ①現地で測定する校庭の土と芝生の放射特性 (日射反射率, 長波長放射反射率), 校舎屋上の風向・風速と温湿度, 校庭の地中温度を, ②校庭の土と芝生の各試験体を屋外暴露して求める蒸発効率を用いる。

現地は, 第一種低層住居専用地域にあるA小学校 (東京都目黒区) で, 平成16年6月に校庭へ芝生を設置する工事を行っている。芝生面積は約1500m²である。なお, 芝

生の育成のため毎朝8時頃散水している。測定の方針を図-1に, 校舎と校庭の配置を図-2に, 測定機器を表-1に示す。

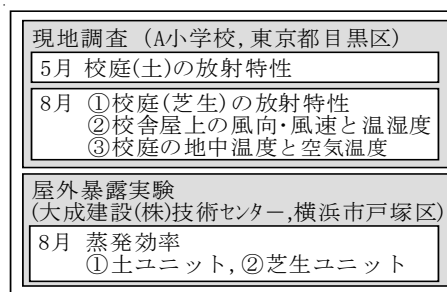


図-1 測定の方針
Measurement Plan

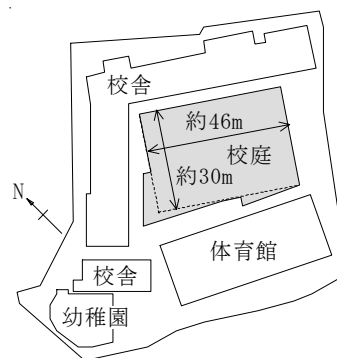


図-2 校舎と校庭の配置
Position between Schoolhouse and Playground

表-1 測定機器
Measuring Instrument

測定対象	測定項目	測定機器			
		名称	型番	メーカー	主な性能
校庭	表面温度	熱電対	T型	H社	測定範囲:-200~300℃
	温度	温湿度計	TR-72U	T社	測定範囲:0~50℃DB, 精度:±0.3℃DB
	放射量	長短波放射計	MR-50	E社	測定範囲:305~2800nm, 5~50μm 温度特性:6%(-10~40℃)
校舎屋上	温湿度	温湿度計	TR-72U	T社	測定範囲:0~50℃DB, 10~95%RH 精度:±0.3℃DB, ±5%RH
	風向・風速	風車型風向風速計	C-W105	O社	測定範囲:0~540°, 0.4~30m/s 気象庁検定品
試験体	重量	電子天秤	GP-100KSR	A社	測定範囲:0~101kg, 精度:101kg時±20g
	表面温度	熱電対	T型	H社	測定範囲:-200~300℃
	温湿度	温度・湿度計発信器	JS-154	O社	測定範囲:-20~60℃DB, 0~100%RH 精度:白金測温抵抗体JISA級(温度)0~90%RHで±2%RH(湿度)
	風速	熱式風速計	6542	N社	無指向性, 測定範囲:0.1~30m/s 精度:±(指示値の3%+0.1)m/s
	放射量	長短波放射計	MR-40	E社	測定範囲:305~2800nm, 3~50μm 温度特性:2%(50℃幅)

*1 技術センター建築技術研究所環境研究室

2.2 現地調査の概要

放射特性の測定は可照時間帯に降雨が無い晴天日に行い、校庭が土の場合は平成16年5月24日に、校庭が芝生の場合は平成16年8月12日以降3日間実施する。測定位置は、校庭中央である。なお、長波長放射反射率は、長波長放射量と表面温度を式(1)に代入して算出する。

$$\rho_i = 1 - \varepsilon_i = 1 - \frac{R_{i \uparrow}}{\sigma T_i^4} \quad (1)$$

ここで、

- ρ_i : 面要素 i の反射率 [-]
- ε_i : 面要素 i の放射率 [-]
- $R_{i \uparrow}$: 地表面の長波長放射量 [W/m²]
- σ : Stephan-Boltzman の定数 [W/(m²K⁴)]
- T_i : 面要素 i の表面温度 [K]

風向風速と温湿度は北校舎屋上のGL+15.8mで、校庭の地中温度はGL-1mで、校庭の空気温度はGL+0.6mで平成16年8月8日から1週間測定する。

2.3 屋外実験の概要

蒸発効率の測定は、試験体へ十分に散水した後、降雨が無く晴天が続いた平成16年8月8日以降1週間、大成建設(株)技術センター(横浜市戸塚区)の日射遮蔽が少ない建物屋上で実施する。試験体の材料構成を図-3に示す。試験体は平面寸法が45cm角で、上面以外を5cmの断熱材で囲まれている。芝生ユニットへの散水は、現地の校庭での散水時刻にあわせて毎朝散水する。蒸発効率は、測定結果から求めた試験体表面の水分放出量、湿気伝達率、飽和水蒸気圧、外気の水蒸気分圧を式(2)⁶⁾に代入して算出する。2種類の試験体の周囲に風避けスロープを設け、水分放出量を電子天秤で自動計測する。表面温度は平面5箇所の平均値である。風速は試験体表面+10cmで測定する。

$$\beta_i = \frac{E_i}{A_i a_w (f_s - f_a)} \quad (2)$$

ここで、

- β_i : 面要素 i の蒸発効率 [-]
- E_i : 面要素 i の水分放出量 [kg/s]
- A_i : 面要素 i の面積 [m²]
- a_w : 湿気伝達率 (=7 × 10⁻⁶) [kg/(m²・s・kPa)]
- α_c : 対流熱伝達率⁷⁾ [W/(m²K)]
- f_a : 外気の水蒸気分圧 [kPa]
- f_s : 試験体上面の飽和水蒸気圧⁸⁾ [kPa]

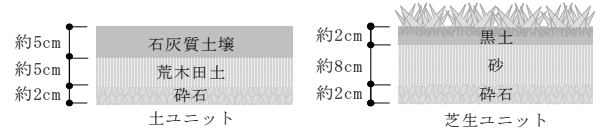


図-3 試験体の材料構成
Contents of the Examination Object

3. 測定の結果

3.1 現地調査の結果

現地調査の結果を表-2に示す。校舎屋上と校庭地中の測定値は、9時から17時における値である。なお、校庭の空気温度は図-6に示す。

表-2 現地測定結果
Results of Actual Survey

校庭	反射率 (%)	
	日射	長波長放射
土	17	12
芝生	24	3

校舎屋上 (GL+15.8m)				校庭地中
最多風向	平均風速 (m/s)	平均温度 (°C)	平均湿度 (%)	平均温度 (°C)
南東	3.0 [1.5]	32.6 [2.0]	48.5 [7.1]	27.8 [0.1]

※ [] 内の値は標準偏差

3.2 屋外実験の結果

十分に散水した翌日以降1週間における各試験体の水分放出量の日変化を図-4に示す。芝生ユニットでは日射量の日変化に水分放出量が連動する傾向があり、毎朝散水するため水分放出量は5kg/m²日を超える。一方、土ユニットでは散水しないため乾燥する傾向がある。土ユニットの水分放出が安定した8月12日以降3日間の10時から15時の蒸発効率の平均値は、土ユニットが0.07で芝生ユニットが0.74である。

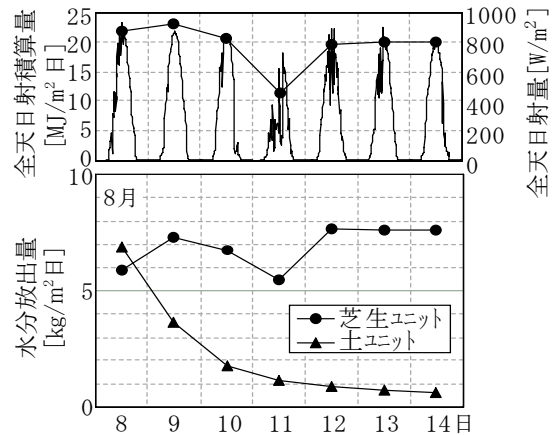


図-4 試験体の水分放出量
Amount of Water Release of the Examination

4. 数値シミュレーションによる検討

4.1 計算モデル・計算方法・計算条件

計算では対流・放射・湿気輸送連成によるCFD解析⁹⁾を定常状態を想定して行う。乱流モデルは標準k-εモデルである。計算方法を表-3に示す。計算領域は平面400m角で高さ100mの空間で非構造格子で分割し、敷地境界から南北185m東西140mの範囲にある建物の形状を再現する。

表-3 計算方法
Method of calculation

解析法	SIMPLE法	
差分スキーム	一次精度風上差分	
境界条件	流入面 ¹⁰⁾	$U(z) = U_s (z/z_s)^\alpha$ $U_s = 3\text{m/s}, z_s = 15.82\text{m}, \alpha = 0.25$ $I(z) = 0.1 (z/z_G)^{-\alpha-0.05}, z_G = 100\text{m}$ $k(z) = \{I(z)U(z)\}^2$ $\epsilon(z) = C_\mu^{1/2} k(z) (U_s/z_s)^\alpha (z/z_s)^{(\alpha-1)}$ $C_\mu = 0.09$
	流出面	自然流出条件
	表面	一般化対数則
	解析要素数	810, 872

校庭の計算条件を表-4に示す。校庭の材料構成では現地の状況を再現する。芝生の貫流率の計算では芝生葉群層の熱抵抗¹³⁾を考慮する。内部温度は現地測定に基づく類推値である。放射特性と蒸発効率の値には測定結果を用いる。

表-4 校庭の計算条件
Condition of Calculation on Ground

解析条件	校庭	
	土	芝生
材料 数値:厚さ[mm]	石灰質土壌50 +荒木田土50 +砕石層150	芝生葉群層 +黒土20+砂150 +砕石層100
貫流率 ⁷⁾¹¹⁾¹²⁾ [W/m ² K]	5.13	1.84
内部温度[°C]	28	28
反射率 [%]	日射	17
	長波長放射	24
蒸発効率[-]	12	3
	0.07	0.74

その他の計算条件を表-5に示す。校舎屋上の計算条件は表-2の値である。全天日射量には、晴天で日射が安定している平成16年8月14日の正午前後10分の平均値を用いる。校舎と体育館、隣接地域には表-5の値で仮定する。なお、水分放出は校庭のみ、教室と体育館の窓は全開で仮定する。

表-5 その他の計算条件
Condition of Calculation on the others

校舎屋上 (GL+15.8m)				全天日射量	
風向	風速 [m/s]	温度 [°C]	湿度 [%]	[W/m ²]	
南東	3.0	32.6	48.5	735	
場所	貫流率 †1 [W/m ² K]	内部 温度 [°C]	反射率[%]		
			日射	長波長放射	
校舎と体育館	3	26	10	10	
隣接地域	建物	2	26	10	10
	道路	5	28	10	10
	空地	7	28	10	10

†1: 文献(6)(8)(9)を参考にして仮定する。

4.2 数値シミュレーションの解析結果 (GL+0.6m)

風速の分布を図-5に示す。南東風が学校の南東側に隣接する建物の東側と南側から校庭へ流入し、校舎の校庭側外壁に沿って校舎の南西側と体育館の西側から隣接地域へ流出する。校庭の体育館側には風速が0.5m/s以下の領域がある。

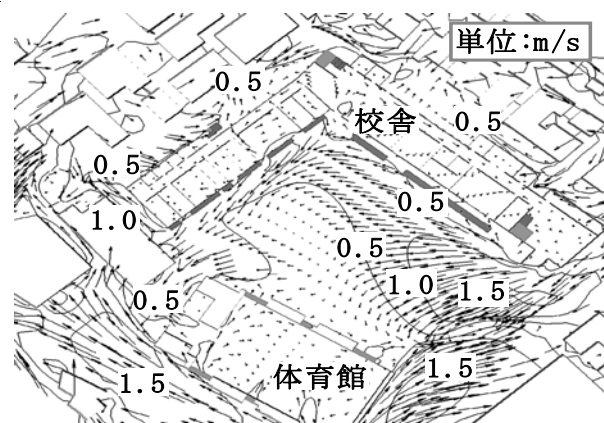
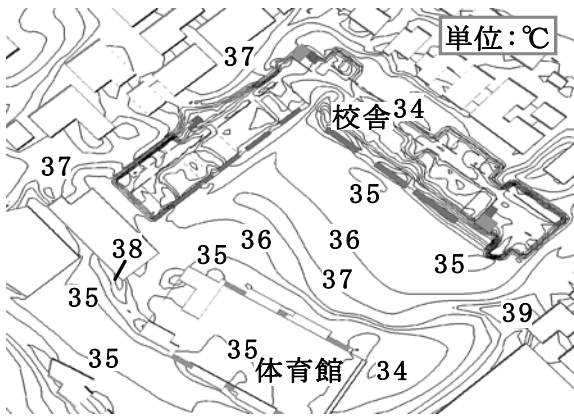


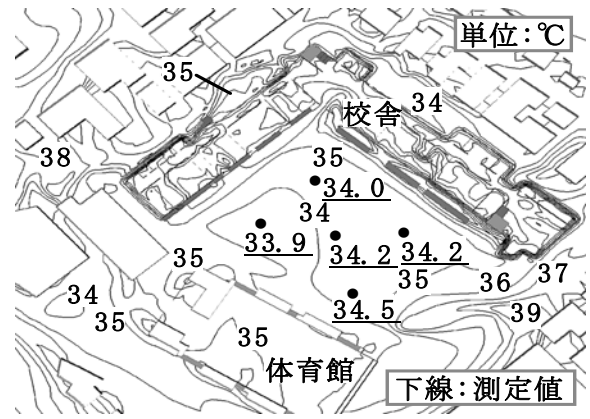
図-5 風速 (GL+0.6m)
Air Speed (GL+0.6m)

空気温度の分布を図-6に示す。校庭が土の場合、体育館側の校庭に温度が高い帯状の空気があり、風速が0.5m/s以下の領域とほぼ一致することから、校庭の地表付近の空気が土で暖められやすくなっていると考えられる。一方、校庭が芝生の場合、風速が0.5m/s以下の領域の空気温度が校庭が土の場合に比べて2°Cから3°Cほど低下する。また、風向が南東で校庭が芝生の場合、空気温度の測定値(平均)は計算値とほぼ同じ傾向がある。これは、芝生の蒸発散による熱緩和の効果が土の蒸発による場合より大きいことが原因である。

絶対湿度増加量の分布を図-7に示す。風速が0.5m/s以下の領域で絶対湿度が高くなり、校庭が芝生の場合は校庭が土の場合に比べて絶対湿度の増加量が大きくなる。これは、芝生の蒸発効率が土の場合より高いことが原因である。



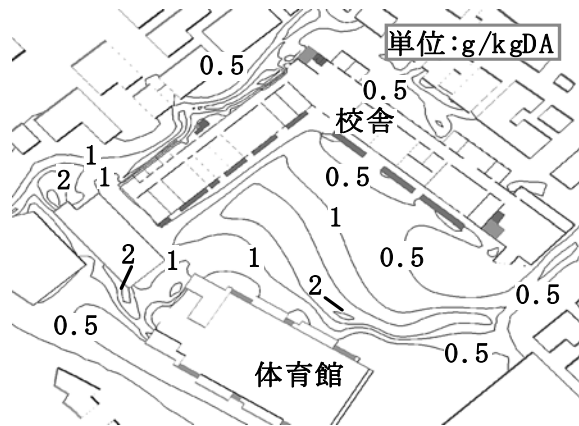
校庭が土の場合



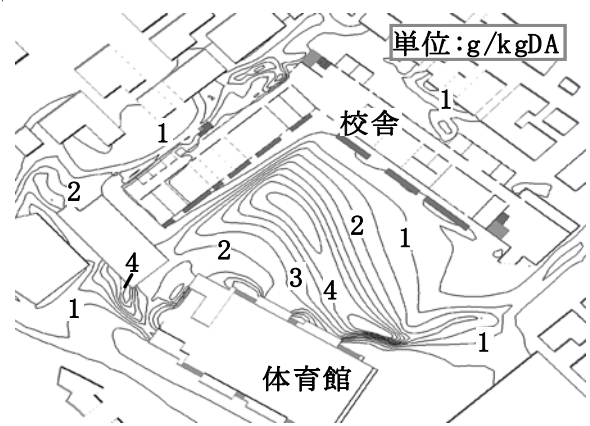
校庭が芝生の場合

図-6 芝生の有無による空気温度 (GL+0.6m)

Air Temperature under each Condition of Soil and Lawn (GL+0.6m)



校庭が土の場合



校庭が芝生の場合

図-7 芝生の有無による絶対湿度の増加量 (GL+0.6m)

An Increment of Absolute Humidity under each Condition of Soil and Lawn (GL+0.6m)

5. 結論

校庭の芝生が夏季の熱環境を緩和する効果について、測定結果に基づく数値シミュレーションで検討し、校庭の空気温度の低下と絶対湿度の増加を定量的に示した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、調査を実施した学校の関係者の方々には、多大なるご協力をいただきました。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1) 森山正和編：ヒートアイランドの対策と技術，(株)学芸出版社，2004年8月
- 2) 近藤三雄編：芝生の校庭-21世紀はスクールの時代-，(株)ソトサイエンス社，2003年5月
- 3) 神田学他：明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化機能の評価(1)1996年夏期集中観測，日本気象学会，”天気”，44.10，1997年10月

- 4) 尹龍漢他：都市における公園内外の気温分布特性について，ランドスケープ研究61(5)，pp.769-772，1998年
- 5) 森山正和他：都市における樹林のクールスポット効果に関する実測データ解析，日本建築学会計画系論文集第541号，pp.49-56，2001年3月
- 6) 村上周三：CFDによる建築・都市の環境設計工学，(財)東京大学出版会，pp.299，2000年
- 7) 田中俊六他：最新建築環境工学，(株)井上書院，1999年9月
- 8) JIS Z 8806-1995
- 9) 大黒雅之他：建築・設備から見たヒートアイランド対策技術とその評価，大成建設技術センター報第37号，2004年
- 10) 義江龍一郎：STREAMによる計算結果と実験結果の比較-角柱周りの流れ場について-，第十回ユザ-事例発表会講演集，2000年
- 11) 渡辺要編：建築計画原論Ⅱ，丸善(株)，1973年2月
- 12) (社)日本建築学会編：建築設計資料集成1環境，丸善(株)，1978年，6月
- 13) 梅干野晃他：薄い盛土層を持った屋上芝生植栽の木造建物における室内熱環境調整効果，日本建築学会計画系論文集第527号，pp.15-20，2000年1月