芝生の校庭による校内の暑熱環境の緩和に関する CFD 解析による検討

CFD ANALYSIS ON MITIGATION EFFECTS TO THE THERMAL ENVIRONMENT OF A SCHOOL SITE IN SUMMER BY LAWN PLANTING TO THE PLAYGROUND

梅田和彦*, 深尾 仁**, 大黒雅之**

Kazuhiko UMEDA, Hitoshi FUKAO and Masayuki OGURO

Lawn planting in school playground scattered in urban areas is expected to mitigate the heat-island phenomenon. If lawn planting in school playground is realized, a new green area of about several thousands square meters will be created in the central block of city, where the wide expansion of planting areas has been considered to be difficult.

This paper compares the summer thermal environment in a school when its playground is covered with lawn and when it is not covered with, namely of soil ground. The comparison is conducted by using computational fluid dynamics (CFD) analysis based on the measurement results on a primary school located in one of the wards in Tokyo. Our major finding through this study is introduced as below:

- 1) In a region of school playground where airflow stagnates, the thermal index of standard new effective temperature (SET*) in the playground covered with lawn is tended to be lower by approximately 1 °C compared to that when it is with soil ground.
- 2) Under the condition when the air above the school playground enters into the classroom where the airflow velocity of approximately 0.5m/s is observed, the temperature of the room with the playground covered with lawn is tended to be lower by approximately 1 °C compared to that when it is with soil ground.

Keywords : school playground, lawn, classroom, thermal environment, field measurement, numerical simulation

校庭, 芝生, 教室, 温熱環境, 実測調査, 数値シミュレーション

1. 序論

昼間人口が増加する都市中心部では、道路の整備や建物の建設に伴う人工被覆面の増大と自動車や空調機器の増加に伴う人工排熱の増大等によって、夏季において郊外より気温が上昇するヒートアイランド現象が問題になっている。この問題の緩和策として、植物の蒸散作用における気化熱で地上付近の気温の上昇を抑制する方法があり、筆者ら¹⁾は熱緩和効果の基礎的な検討として、夏季における樹木の蒸散量や芝生の蒸発散量の実測調査を実施している。

代表的な植栽には、街路樹、公園の樹木や芝生、屋上緑化等があるが、過密化した都市空間では植栽面積の大幅な増大は困難である。このような状況で、都市に点在する学校の校庭を芝生化できれば、都市中心部で数千㎡程度の纏まった緑地面積の確保が可能になる。また、校庭の芝生化には、情操教育、砂塵の飛散防止、怪我の予防、降雨による泥濘の防止という特長があり(例えば2)3)、維持管理体制の整備が伴えば実施校が増加すると期待されている。

校庭の芝生化に関する既往の調査については、芝生育成の観点から主に農学分野で報告例(例えば4)があるが、暑熱環境の緩和効果については、定性的に効果があると予想されてはいるものの、定量的な効果を報告する文献は少なく(例えば5)、十分な調査がなされているとは言い難い。また、生徒や職員の生活環境改善の観点から、芝生の校庭の空気が窓を開けた校舎内へ流入する場合の室内温熱環境についても十分に調査されていない。以上のとおり、校庭の芝生化による校内への熱的な影響については不明な点が残されている。

参考文献として、都市の大規模な緑地を対象にした暑熱環境の緩和に関する既往の調査には、例えば、神田ら⁶⁾は明治神宮の森内

部の気温低下量を、尹ら⁷⁾は緑地規模と緑地内外の気温低下との関連を、森山ら⁸⁾は街路と樹木の熱環境の比較結果を報告しており、1haを超える大規模な植栽による暑熱環境の緩和効果の実態を把握するうえで意義深い。また、植栽による建物周囲の微気象緩和に関する既往の調査には、例えば、山田ら⁹⁾は住宅団地の気温分布の経時変化を、佐藤ら¹⁰⁾は住宅団地の植栽による住棟間の気象変化を報告しており、植栽の微気象調節の実態を把握するうえで参考になる。しかしながら、以上の文献をはじめ既往の実態調査は、植栽が既にある状況での気候緩和を対象とするものが多く、同じ場所での植栽前後の熱環境の変化に言及する実態調査は少ない。植栽は地表被覆面の水分放出を改善して暑熱環境を緩和する対策なので、植栽前後の気象変化を評価の観点にした議論も必要である。

校庭の芝生化による暑熱環境の緩和効果の評価には、同じ校庭で土の場合と芝生の場合の熱環境を現地測定で比較する方法が考えられるが、筆者らが調査する学校は、調査年の6月に校庭を土から芝生にする工事を行うため、夏季における土の校庭の現地測定が不可能である。本研究では、土の校庭や芝生の校庭の放射特性や蒸発効率等の物理量の測定値をCFD(Computational Fluid Dynamics:計算流体力学)による数値シミュレーション(以下、CFD解析)の与条件にして、土の校庭や芝生の校庭による校内の熱環境を比較する。

本論文では、既報¹¹⁾を修正し、SET*(Standard New Effective Temperature:標準新有効温度)¹²⁾による評価と、校庭の空気が窓を開けた校舎内へ流入した場合の室内温熱環境について検討した結果を加筆して、校庭の芝生化による校内の暑熱環境の緩和効果を報告する。

* 大成建設㈱技術センター 工修
** 大成建設㈱技術センター 博士(工学)

Taisei Technology Center, Taisei Corporation, M. Eng.
Taisei Technology Center, Taisei Corporation, Dr. Eng.

3. 測定の結果

3.1 現地調査の結果

校庭(芝生)での放射量, 気温, 表面温度, 地中温度を図4に示す。測定期間の天候は8月10日と8月11日に一次的に曇りになる他はよく晴れて, 全天日射量が8月12日からの3日間で気象庁の観測値(東京都港区)とほぼ同様に推移する。測定期間の校庭中央(GL+0.6m)での最高気温は連日35℃を越え, 表面温度の最高は8月13日に40℃を越える他は良く晴れると40℃近くまで上昇し, 地中温度(GL-1m)は約28℃でほぼ一定である。なお, 5月24日に測定した校庭(土)中央での気温と表面温度の11時から16時までの平均は各々24.2℃と29.7℃(全天日射積算量20.9MJ/(m²・日))である。

図4 校庭(芝生)での放射量・気温・表面温度・地中温度

校庭の日射反射率を図5に示す。全天日射量が500W/m²以上の日射反射率の平均値は土の校庭は約17%で, 芝生の校庭は約24%であり, 芝生の校庭は土の校庭よりも約7%多く日射を反射する。

教室棟屋上の風向頻度を図6に, 風速と温湿度を図7に各々示す。測定期間の9時から17時における主風向は南東である。風速は昼間が夜間より大きく最大風速は連日3m/sを超える。気温は欠測を除き毎日35℃前後まで上昇し, 相対湿度は昼間で40%から60%程度で推移する。現地調査の結果を総括すると表2のとおりである。

図5 校庭の日射反射率

図6 教室棟屋上の風向頻度

図7 教室棟屋上の風速・温湿度

表2 現地調査の結果(まとめ)

表面	日射	反射率	校庭			教室棟屋上 ^{†2}	教室棟屋上 ^{†2}		
			平均値	標準偏差	平均値	平均値	標準偏差	標準偏差	標準偏差
土	17	12	24.2 (0.9)	29.7 (2.2)	-	南東	3.0 (1.5)	32.6 (2.0)	48.5 (7.1)
芝生	24	3	34.2 (1.9)	34.4 (2.9)	27.7 (0.1)				

※ 土の校庭の測定は平成16年5月24日に, 芝生の反射率の測定は平成16年の8月12日から8月14日に, その他の測定は平成16年の8月8日から8月14日に実施。
()内は標準偏差。

†1 11時から16時までの平均。気温はGL+0.6m, 地中温度はGL-1m。

†2 9時から17時までの平均。

3.2 屋外実験の結果

十分に散水した翌日から降雨が無く晴天日が連続した1週間の気象状況と, 試験体の表面温度, 水分放出量, 蒸発効率を図8に示す。天候は現地調査(東京都目黒区)と同様の傾向で, 全天日射量は8月11日を除き20MJ/(m²・日)前後で良く晴れている。最高気温は連日30℃以上で, 相対湿度は昼間で40%から60%程度で推移している。風速は昼間が夜間より大きく, 試験体上部2mの高さでは最大4m/s程度で, 3cmの高さでは最大2m/s程度である。表面温度の日最大値は, 一次的に曇った8月11日を除いて芝生ユニットで約38℃とほぼ同じ値であるのに対して, 土ユニットは水分放出量の減少に伴って晴天日1日目(8月8日)以降3日間で約35℃から約55℃まで約20℃上昇し, 水分放出量が減少して安定する晴天日5日目(8月12日)以降3日間では55℃前後で安定する。蒸発効率は式(2)に示すとおり水分放出量の関数である。図8では蒸発量が多くなる昼間(10時から15時)における蒸発効率を示す。毎朝散水するため, 晴天日が連続しても水分放出量が5mm/日以上を確保して減少しない芝生ユニットでは, 蒸発効率の日最大値は1前後^{注3)}と蒸発が活発である。一方, 散水しない土ユニットでは晴天日1日目から晴天日7日目にかけて水分放出量が約7mm/日から約1mm/日と約6mm/日減少するに伴い, 蒸発効率の日最大値は1強^{注4)}からほぼゼロまで減少し表面が乾燥する。なお, 土ユニットの水分放出が安定した8月12日以降3日間で欠測がない10時から15時(図8の蒸発効率のグラフで色塗りの部分)における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8 屋外実験での気象状況と試験体の表面温度・水分放出量・蒸発効率

4. CFD 解析による検討

4.1 計算の概要

計算では対流・放射・湿気輸送連成によるCFD解析¹⁶⁾を定常状態を想定して行う。乱流モデルは標準 $k-\epsilon$ 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4 計算ケース

計算ケース	校庭	大気力	計算日時	全日計算 日計算 [W/m ²]	流入風条件 (GL+15.8m)	風速 [m/s]	風向 [°]	風速 [m/s]
CASE1	土	コンクリート	8月中旬 14時	735	南東	3.0	32.6	48.5
CASE2	芝生							
CASE3	土							
CASE4	芝生							
CASE5	土							
CASE6	芝生							
CASE7	土							
CASE8	芝生							
CASE9	芝生							

†1 1/4乗則の風速プロファイル †2 図2のX-X'断面に平行(校舎外壁に垂直)に校庭側から流入
†3 CASE1のX-X'断面における計算結果 †4 CASE2のX-X'断面における計算結果
†5 コンクリートの蒸発効率を0.0から0.3に変更した材料

表3 計算方法

解析法	SIMPLE法
差分形式	一次風上差分
境界条件	$U(z) = U_s(z/z_s)^\alpha$, $U_s = 3\text{m/s}$, $z_s = 15.82\text{m}$, $\alpha = 0.25$ $I(z) = 0.1(z/z_0)^{-\alpha-0.05}$, $z_0 = 100\text{m}$ $k(z) = (I(z)U(z))^2$ $\epsilon(z) = C_\mu^{1/2} k(z) (U_s/z_s)^\alpha (z/z_s)^{-(\alpha-1)}$, $C_\mu = 0.09$
解析要素数	自然流出条件 一般化対数則 810,872

表5 その他の計算条件

場所	材料構成 敷地・高さ(mm)	風速 [m/s]	温度 [°C]	湿度 [g/kgDA]	放射 [W/m ²]	反射率	熱容量 [J/kgK]
校庭	芝生	2	28	24	-	3	-
	土	5	28	17	-	12	-
	屋上	3	26	10	60	10	0.00
	天井	2	26	-	60	-	10.00
	床	2	26	-	45	-	4.00
	壁	3	26	40	60	10	0.00
	窓	5	-	20	20	10	0.00
	大走り	7	28	10	-	10	-
	建物	1	26	40	-	10	-
隣接地域	道路	5	28	10	-	10	-
	空地	7	28	40	-	10	-

校庭が土の場合 (CASE1)

校庭が芝生の場合 (CASE2)

a) 風速

校庭が土の場合 (CASE1)

校庭が芝生の場合 (CASE2)

b) 気温

校庭が土の場合 (CASE1)

校庭が芝生の場合 (CASE2)

c) 絶対湿度の増加量

注) 平成16年の8月8日から8月14日の11時から16時の時間帯での風向頻度。

注) 平成16年の8月8日から8月14日の11時から16時の時間帯で、教室棟屋上の風向が南東の場合における温度差。() : 標準偏差

注) 平成16年の8月8日から8月14日の11時から16時の時間帯で、教室棟屋上の風向が南東の場合における絶対湿度差。() : 標準偏差

図9 校庭 (GL+0.6m) の環境物理量の比較 南東風 (GL + 15.8m) の場合

計算ケースを表4に示す。計算対象時刻は気温が最も高くなる14時で8月中旬の太陽位置を設定し、全天日射量には晴天で日射の変動が小さい平成16年8月14日の正午前後10分の平均値(現地調査の測定結果)を用いる。流入風条件には、GL+15.8mの高さの風速に表2に示す風速の値を用いた1/4乗則の風速プロファイルで、また、温湿度についても表2に示す値を与える。

校庭や校舎と隣接地域の建物や地表面に関する計算条件を表5に示す。校庭や校舎の材料構成では現地状況を再現する。芝生の熱貫流率の計算では芝生葉群層の熱抵抗¹⁸⁾を考慮する。内部温度は現地調査に基づく類推値である。校庭の反射率には表2に示す測定値を用いる。また、校庭の蒸発効率には、図8に示す8月12日以降3日間の10時から15時の平均値を用いる。なお、水分放出は校庭のみ、教室棟と体育館の窓は全開の状態を設定する。

4.2 CFD解析の結果

(1) 校庭の風速・気温・絶対湿度増加量の分布

児童の人体中心の高さに近いGL+0.6mの平面において、校庭の風速、気温、絶対湿度の増加量の各分布を、現地調査の昼間の測定結果と併せて図9に示す。流入風条件で設定する風向は、現地調査の測定結果である主風向の南東で設定高さはGL+15.8mである。

校庭の風速分布(図9のa)については、校庭が土の場合と芝生の場合での差は小さい。学校敷地の南東側に隣接する地上4階建ての共同住宅の北東側と南西側から校庭へ風が流入し、教室棟の校庭側外壁に沿って教室棟の南西側と体育館の北西側から隣接地域へ流出する風の大きな流れができるため、校庭の体育館側に風速が0.5m/s以下の気流が停滞する領域ができる。また、現地調査の昼間の風向頻度(GL+0.6m)は校庭西側(測定位置A)と校庭南側(測定位置C)でCFD解析結果と同じ傾向がある。

校庭の気温分布(図9のb)については、校庭が土の場合、校庭の体育館側に温度が高い36℃の帯状の空気があり、風速が0.5m/s以下の領域とほぼ一致することから、校庭の地表面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以下の領域の気温が校庭が土の場合に比べ2℃から3℃ほど低下して、34℃以下の領域(色塗り部分)が校庭中央付近まで広がる。これは、芝生の蒸発散による熱緩和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。また、

現地調査の昼間(11時から16時)で教室棟屋上の風向が南東の場合における校庭(GL+0.6m)の気温分布には、校庭中央(測定位置E)に対して校庭南東側(測定位置C)が平均で約0.2℃高く、校庭西側(測定位置A)が平均で約0.4℃低く、CFD解析の結果が示す校庭の風下側で気温が低下する傾向と同様な傾向がある。

校庭の絶対湿度の増加量の分布(図9のc)については、校庭が芝生の場合、風速が0.5m/s以下の領域で絶対湿度の増加量が多くなり、校庭が土の場合に比べて絶対湿度の増加量が2g/kgDAから3g/kgDAほど多くなる。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。また、現地調査の昼間(11時から16時)で教室棟屋上の風向が南東の場合における校庭(GL+0.6m)の絶対湿度の分布は、校庭中央(測定位置E)に対して校庭西側(測定位置A)が平均で約0.3g/kgDA高く、校庭の地表面付近での湿気の移流現象を微量ではあるが確認できる。

(2) 風向による校庭のSET*の分布

流入風条件で設定するGL+15.8mの高さにおける風向を南東、南

西、南の3種類にした場合のGL+0.6mの平面における各SET*を図10に示す。なお、SET*の算出にはGaggeら¹²⁾が提案したTwo Node Modelによる計算方法を用いる。南東風の場合(図10のa)は、校庭の教室棟側における37℃以下の領域(色塗り部分)が、芝生の場合が土の場合より広がる。南西風の場合(図10のb)も、37℃以下の領域が芝生の場合が土の場合より広くなり、校庭の体育館側から教室棟側にかけて37℃以下の領域が芝生の場合にできる。南風の場合(図10のc)は、37℃以下の領域が土の場合も芝生の場合もほぼ同一であるものの、35℃以下の領域が芝生の場合が土の場合より広がる。従って、南寄りの風が吹く場合、現地のような校舎の配置であれば、芝生の校庭のほうが土の校庭よりSET*が局所的に1℃程度低くなる傾向がある。これらの結果は、芝生の校庭が土の校庭より校庭の温熱環境を改善することを示している。

(3) 教室棟内部における風速と温度の分布

図10で比較した南寄りの3風向において教室棟内部での通風があると予想していたが、現地のような校舎配置は、例えば図9のaに示すように、教室棟の外壁に付着する気流や外壁付近で旋回する気流が発生し、室内への気流の流入が少ないことが解析結果から判明したため、教室棟の外壁に垂直な方向から校庭の空気を教室棟内部へ強制的に流入させた場合を想定して2次元断面で教室棟内部の室温分布の比較を行う。図2の教室棟x-x'断面における風速と空気温度の分布を図11に示す。なお、流入風条件には、風速はGL+15.8mの高さで3m/sとなる1/4乗則の風速プロファイルで、温度は図9の気温分布で図2のx-x'断面における温度分布で与える。その他の計算条件は表5に示すとおりで、教室には机は無く、教室と廊下の間仕切り壁にある窓や扉は全開の状態を設定する。

風速分布は図9のaで示すように芝生の校庭と土の校庭の風速分布の差が小さいので、校庭が芝生の場合の風速分布のみを図11のaに示す。教室棟内部へ流入した気流は、教室で下半分が旋回流となって廊下へ流入し屋外へ流出する流れになる。また、各階の教室での風速は0.5m/s程度である。

1階の室温については、土の校庭の場合(図11のb)では、地表面付近の34℃から35℃の外気が教室内へ流入して室温が約34℃になる。一方、芝生の校庭の場合(図11のc)では、33℃から34℃の外気の流入で室温が約33℃になる。この結果は、芝生の校庭の空気が校舎内に流入することによって、室温が1℃程度は低下する可能性があることを示唆している。なお、教室棟内部の室温が流入空気より低くなるのは、教室棟の躯体温度を26℃に設定(表5)したためである。

校庭側の犬走りの日射受熱で窓下部の屋外側の空気が暖められていることに着目して、犬走りをコンクリートから保水材料(蒸発効率が0.3の材料)に置き換える(図11のd)と、1階の教室の室温がさらに低くなる傾向を示す。なお、図12に示す現地調査の昼間で、図11と同じX-X'断面での1階教室の室温に対する校庭中央(GL+0.6m)や犬走り(GL+0.6m)での気温の差においても、犬走りでの気温が上昇する傾向がある。

2階以上の室温については、2階では、土の校庭の場合(図11のb)では33℃から34℃の外気が室内へ流入して31℃から33℃程度の室温になるが、芝生の校庭の場合(図11のc)では32℃から33℃の外気が室内へ流入して31℃から32℃程度の室温になる。3階で

図11 教室棟断面の風速と空気温度の分布

図12 校庭中央や犬走りでの気温と1階教室の室温との差

注) 平成16年の8月8日から8月14日の11時から16時の時間帯で、校庭からX-X'断面における教室へ風が流入した際の温度差(測定値で計算)。

は、芝生の校庭による影響は2階よりも小さくなる。犬走りを保水材料に置き換えた場合における2階や3階の室温への影響についてはほとんど無い。なお、現地のA小学校の屋上は表5に示すとおり断熱材がないので、屋上緑化を行うなどの屋上の断熱対策が3階の室内温熱環境の改善には効果があると思われる。

5. 結論

本研究では、土の校庭や芝生の校庭の放射特性や蒸発効率等の物理量の測定値をCFDによる数値シミュレーションの与条件に用いて、校舎や近隣建物の形状や配置を再現した計算モデルで計算し、土の校庭や芝生の校庭による校内の夏季における熱環境を比較した。風向・風速や温湿度が定常状態を想定して計算した結果、校庭の芝生化による校庭や校舎内の暑熱環境の緩和効果について得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 校庭の南東側以外は校舎で囲まれた計算モデルでは、GL+15.8mの高さで南東風の場合、GL+0.6mの高さにおいて、気流が停滞する領域(風速が0.5m/s以下)が校庭内で発生し、その領域で芝生の校庭が土の校庭より気温が2℃から3℃ほど低下し、絶対湿度が2g/kgDAから3 g/kgDAほど上昇する結果、温熱指標のSET*は芝生の校庭が土の校庭より局所的に1℃程度低くなる。また、風向が南西や南の場合でもSET*については同様な傾向を示す。
- (2) 校舎内へ校庭の空気が流入し室内風速が0.5m/s程度になる状況における教室の室温は、校庭が芝生の場合が校庭が土の場合より1階では1℃程度低下するが、上階へいくほど低下傾向は弱まる。犬走りをコンクリートから蒸発効率0.3の材料に変えると1階の室温はさらに低くなるが、上階への影響は無い。

謝辞

本研究を進めるにあたり、東京都目黒区教育委員会や現地調査をさせて頂きました学校の関係者の方々には多大なるご協力を頂きました。また、大成建設㈱技術センターの屋下亮氏には現地調査に関してご指導を頂きました。ここに記して深謝いたします。

注

- 注1) 5月の測定は、学校や地域交流による制約があったので、測定期間が短くなっている。
- 注2) 試験体の製作で配慮した内容は次のとおりである。
 - 1) 土ユニット: 6月に実施した芝張り工事で土の校庭を掘削した際に取り出した土壌の層状固形物なるべく破壊しないようにして屋外実験場所に持ち帰り、表層の地表面を上面にし、各層の厚さと材料構成について、現地での状況を出来る限り再現して製作している。
 - 2) 芝生ユニット: 芝張り工事で使用した同じ芝生(土壌は黒土)と砂を使って、黒土と砂の層の厚さの合計を土ユニットの石灰質土壌と荒木田土の層の厚さの合計と同じにして、校庭の芝張り時期と同じ時期に製作している。屋外実験が終了するまで現地での散水時刻と散水量にあわせて芝生を育成している。
- 注3) 図8で示す芝生ユニットの蒸発効率が1を超えているのは、8月12日の最大値1.08のみ(8月10日の最大値は0.99)である。式(2)で計算した蒸発効率が1を超えた理由は、芝生の表面温度の測定値(任意の5箇所の平均値)が芝生ユニットの

表面温度を正確に代表していないことが考えられる。しかしながら、既往の調査として、例えば三坂ら¹⁴⁾の調査結果では、早朝に降雨があった日の芝生の蒸発効率が0.7から0.8程度であることから、図8で示す毎朝散水した芝生ユニットの蒸発効率(8月8日から8月14日までの平均値0.70)はほぼ妥当な値を示していると考えられる。なお、蒸発効率1.08の値を除いた8月12日以降3日間の10時から15時までの蒸発効率の平均値が0.72で変化が小さいことから、CFD解析における計算結果においても影響は小さいと考えられる。

- 注4) 図8で示す土ユニットの蒸発効率が晴天初日(8月8日)で1を超えている部分(1.1から1.2程度)があるが、原因としては、散水翌日で土ユニットの表面が十分に濡れている状態に対して、表面温度の正確な測定ができていないことが考えられる。しかしながら、近藤¹⁵⁾によれば、地表面が十分に濡れている状態での蒸発効率は限りなく1に近い値を示すことから、図8の晴天初日の土ユニットの蒸発効率は多少高めではあるが、表面が十分に濡れている状態を示しており、目視でも確認している。なお、晴天初日の蒸発効率はCFD解析の計算条件ではないので、計算結果に影響はない。

参考文献

- 1) 梅田和彦, 深尾仁, 田村明弘: 熱環境の評価における樹木の夏季蒸散量に関する基礎的検討, 日本建築学会環境系論文集 第601号, pp. 15-20, 2006. 3
- 2) 森山正和編: ヒートアイランドの対策と技術, ㈱学芸出版社, pp. 70, 2004. 8
- 3) 近藤三雄編: 芝生の校庭-21世紀はスクールテフの時代-, ㈱ゾクサイエンス社, pp. 13-16, 2003. 5
- 4) 浅野義人: 校庭の芝生化-技術面における課題と展望, 芝草研究 第32巻 第2号, pp. 117-121, 2004. 3
- 5) 大阪府: 大阪府ヒートアイランド対策推進計画資料編(芝生地と裸地における熱環境比較結果), pp. 13-24, 2004. 6
- 6) 神田学, 森脇亮, 高柳百合子, 横山仁, 浜田崇: 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, pp. 31-40, 1997. 10
- 7) 尹龍漢, 丸田頼一, 本條毅, 柳井重人: 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
- 8) 森山正和, 河野仁, 吉田篤正, 宮崎ひろ志, 竹林英樹: 都市における樹木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. 3
- 9) 山田宏之, 佐藤忠継, 澤田正樹, 岩崎哲也, 角田里美, 養父志乃夫: 環境共生住宅団地の緑化による微気象緩和効果について, ランドスケープ研究 62(5), pp. 635-638, 1999
- 10) 佐藤愛, 吉田治典, 伊藤麻美子, 村上大輔: 集合住宅の住棟間における樹木の気候緩和効果に関する研究, 日本建築学会環境系論文集 第587号, pp. 79-85, 2005. 1
- 11) 梅田和彦, 深尾仁, 大黒雅之: 校庭の芝生化による夏季熱環境の緩和効果に関する研究-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-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学 I, pp. 673-674, 2005. 9
- 12) A. P. Gagge, A. P. Fobelets, L. G. Berglund: A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment, ASHRAE Transactions, Vol. 92, Part 2, pp. 709-731, 1986
- 13) 村上周三著: 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. 9
- 14) 三坂育正, 石井康一郎, 横山仁, 山口隆子, 成田健一: 軽量・薄層型屋上緑化技術のヒートアイランド緩和効果の定量評価に関する研究, 日本建築学会技術報告集第21号, pp. 195-198, 2005. 6
- 15) 近藤純正編著: 水環境の気象学, ㈱朝倉書店, pp. 129, 1994. 4
- 16) 大黒雅之, 森川泰成, 梅田和彦, 屋下亮, 深尾仁: 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
- 17) 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-, 第十回ユーザー事例発表会講演集, 2000
- 18) 梅干野晃, 白井一義, 大塚修弘, 岩村和夫: 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. 1

(2006年3月10日原稿受理, 2006年7月14日採用決定)