軽量盛土を用いた屋上芝生 植栽の熱環境緩和効果に関 する研究

三小田憲司 ———*1

*1

STUDY ON THE THERMAL PERFORMANCE OF ROOFTOP LANDSCAPING WITH LIGHTWEIGHT SOIL

Kenji MIKODA

In this paper, the effects of rooftop landscaping with lightweight soil on the thermal performance are described through the results of two outdoor experiments. One was carried out with six kinds of miniature units for the purpose of making clear the thermal characteristics of building external surfaces with rooftop landscaping. The comparison between lightweight soil and non-lightweight soil was also made. The other was carried out with lawn-covered ground for the purpose of making clear the characteristics of ground moisture with lawn-covered ground. It was proved that the lawn-covered ground has almost the same degree of evaporative cooling effect as crop field.

キーワード：
屋上、芝生、軽量材、熱環境、表面温度、含水率

Keywords：
Rooftop, Lawn, Lightweight material, Thermal environment, Surface temperature, Water content

1 はじめに

人工軽量土壌を用いた中高層建築物屋上への芝生植栽は、都市緑化の有力な手段として認識されつつある。屋上への芝生植栽の導入は、視覚的・心理的な効果だけではなく、蒸発冷却・日射照り返し防止による屋外熱環境の緩和効果や、断熱性能の向上による省エネルギー効果も期待されている。これまでに、堀口・梅干野・王・何は、屋上芝生植栽の熱的特性に関する報告¹⁾を行っている。省エネルギーについては、石原・張らのシミュレーションによる冷房負荷に関する研究²⁾がある。また、恩村・松本・鉾井は、不織布に植栽した屋上芝生を対象に蒸発冷却効果に関する研究³⁾を行い、片山・林・塩月らは芝生の熱水分特性に関する研究⁴⁾を行っている。しかし、屋上へ芝生を植栽する場合には、荷重負担の関係で盛土の軽量化が必ず検討されるのに対して、盛土を利用した軽量化手法に着目して熱環境緩和効果を定量的に検討した例は少ない。

本研究では6種類、試験面積各4m²の試験体(下からの水の補給がないタイプ)および建物屋上に設置した200m²(下からの水の補給があるタイプ)のコンテナ型緑化地盤で測定した結果をもとに、夏季の屋外熱環境の緩和効果に関連して、表面熱特性や水分特性について検討を行う。試験体の測定では、軽量材としてEPS(粒状発泡スチロール)を用いた芝生試験体と他との比較により、表面熱特性を検討した。コンテナ型緑化地盤の測定では、地盤の底に設置したパレットから水を補給する地盤について水分特性を検討した。

2 試験体の実験概要

培土に植栽する一般的な屋上緑化工法を対象にした場合について表面熱特性を明らかにし、軽量化に伴う熱的影響について検討する

ために、写真1に示す試験体を造成した。厚さ150mmのコンクリート製で試験面積4m²の箱型試験体を用いた。コンクリートスラブおよび関東ローム(黒ぼく土)各1体、芝生(高麗芝)4体の計6体の地盤を造成し、試験体No.1~No.6とした。コンクリートと関東ロームは、芝生との熱的性能の違いを明らかにするのが目的である。No.5, No.6は芝生の成育調査用とする。したがって測定は以下に示す試験体No.1~No.4で行った。

試験体 No.1 コンクリート 150 mm

試験体 No.2 関東ローム 150 mm+排水材 50 mm+コンクリート 150 mm

試験体 No.3 芝生+関東ローム 150 mm+排水材 50 mm+コンクリート 150 mm

試験体 No.4 芝生+EPS混合土 150 mm+排水材 50 mm+コンクリート 150 mm

図1に芝生試験体No.4の断面を示す。試験体の側壁内面と底面

写真1 模擬試験体の外観

*1 (株)大林組技術研究所 研究員・工修

*1 Research Engineer, T. R. I. of Obayashi Co., M. Eng.

は 50 mm の発泡スチロールで断熱している。EPS の混合比率は関東ローム 70% に対し、EPS (粒状発泡ポリスチレン) を 30% とする。測定項目は日射量、反射日射量、純放射量、温度 (表面、地中、空気層)、熱流 (表面、地中)、外気温湿度で、データロガーと直結したパソコンに 5 分間隔で記録した。

3 試験体の実験結果

3.1 日射反射率の測定

図 2 に夏季晴天日の水平面全日射量と各試験体の反射日射量の関係を示す。標本データは夏季晴天日で太陽高度の高い 10:00~15:00 の積算値データを使用した。測定期間はコンクリートと芝生は 1992 年 9 月 18 日~9 月 25 日、関東ロームは 1992 年 8 月 25 日~8 月 31 日である。直線回帰で日射反射率を算定したところ、コンクリートが 0.32、関東ロームが 0.12、芝生が 0.21 となり、相関係数は 0.92~0.99 と高いものであった。

3.2 表面温度の測定

緑化による熱環境の緩和効果は表面の蒸発冷却能力によるところが大きい。降雨を考慮して、晴天日が続き十分に乾燥した状態 (1992 年 8 月 25 日~27 日) と、降雨直後の湿った状態 (1992 年 9 月 19 日~23 日) について、各試験体の表面温度を検討した。表面温度の測定は熱電対による定点観測値 (3 点) の平均によるものであるが、芝生表面は茎の部分の測定値を用いた⁵⁾。

(1) 乾燥した状態 (1992 年 8 月 25 日~27 日)

図 3 に乾燥時の各試験体表面温度を示す。20 日に降った 20 mm が最後の降雨である。コンクリート表面と他の試験体表面の温度差は、いずれも日射量の多い 12~14 時前後で最大となり、関東ロームとのあいだで 8~10°C、芝生とは 10~15°C になる。また芝生は関東ロームよりも 2~6°C 低く、毛管力による保水機能が働いていることをうかがわせる。同じ芝を用いた地盤でも、関東ロームの方が EPS 混合土より日中の表面温度は 1~2°C 低い。日較差はコンクリート表面が 20°C 以上になるのに対し、芝生表面の日較差は約 1/2 の 10°C 前後である。

(2) 降雨直後 (1992 年 9 月 19 日~23 日)

図 4 に降雨直後の各試験体の表面温度を示す。降雨は 19 日未明に 35 mm 記録された。コンクリートは降雨直後でも日射量の大きな日中に表面温度が上昇する。初日には、関東ロームと芝生の表面温度差は最高 3°C 前後であるが、5 日後の 23 日には 6°C 前後になる。ここで、21 日の表面温度が全体に低いのは日射量が少ないためである。

3.3 地盤の軽量化に関する考察

芝の生育が可能な盛土厚さの限界を調査するため、150 mm 厚と 300 mm 厚の培土を用いたが、150 mm の仕様でも夏季渇水期にも芝の育成は順調であった。また EPS 混合土を用いた場合、夏季日中の表面温度抑制効果は関東ロームだけを培土とした場合に比べわずかに劣るが、コンクリートスラブと比べればその効果は非常に大きく、EPS 混合による表面熱特性への影響は小さい。また軽量材混合による芝の生育への悪影響も見られなかった。

4 コンテナ型緑化地盤の実験概要

コンテナ型緑化地盤は、下から水を補給して保水能力を強化し、

図 1 芝試験体断面図

図 2 夏季晴天日の水平面全日射量と反射日射量の関係

図 3 夏季晴天日 (干天連続時) の各試験体表面温度

図 4 夏季晴天日 (降雨直後) の各試験体表面熱流

地盤の軽量化をさらに進めるものである。規模の大きなコンテナ型緑化地盤を対象に水分特性を明らかにし、屋外への熱環境緩和効果を検討する。写真2に計測対象となる緑化地盤と計測装置の概要を示す。設置場所は東京都清瀬市の4階建て建物の屋上で、供試土壌は、針葉樹樹皮、砂、EPS混合土、関東ローム、人工培養土の5種類、各40m²である。図5にコンテナ型緑化地盤の断面を示す。コンテナは土層とパレットの2層で構成され、培土の厚さはわずか110mmである。パレットの水は毛管フィルターを通じて保水帯に吸収される。下からの水の補給は、渇水期でも散水を不用とするための工夫でもあるが、土壌の含水率変化に大きな影響を及ぼすと考えられる。測定対象地盤は、EPS混合土および関東ロームとする。測定項目は水ポテンシャル、パレットの水消費量、表面温度である。水ポテンシャルの測定は、センサー部分を深さ80mmに埋設したテンシオメーター(データロガー式)で行い、測定間隔は30分である。パレットの水消費量は目視による水深測定で、1回/日実施する。測定期間は1994年8月～10月である。赤外線カメラによる表面温度の測定は、夏季晴天日(1994年8月25, 26, 29日)に行った。測定間隔は5分で、それぞれ24時間連続して記録した。

5 コンテナ型緑化地盤の実験結果

5.1 培土の水分特性曲線

図6に培土の土壌水分特性曲線を示す。土壌水分特性曲線は、各地盤から採取した不攪散資料をサンプルにしたpF試験、最大容水試験をもとに作成した。pF試験は、10～30cmH₂Oは土柱法、30～100cmH₂Oは吸引法、100～1000cmH₂Oは加圧板法で行った⁽¹⁾。EPS混合土は粒状のEPSが混入した影響で、関東ロームより保水性でやや劣っており、試験体での測定結果を裏付けるものであった。

5.2 土壌の保水機能

図7に1994年8月23日～9月8日の培土の体積含水率と雨量を示す。体積含水率はテンシオメーターの吸引圧測定値を水分特性曲線を用いて変換して求めた。EPS混合土では26日にパレットの水が無くなり、関東ロームでは28日に無くなった。下からの水分の補給がある期間では培土は乾燥せず、次の降水まで乾燥が進むことが確認できる。毛管補助フィルターを利用した土層構造が蒸発散に必要な水分を供給していることが分かる。

5.3 赤外線カメラによる表面温度測定

図8に赤外線カメラに記録した表面温度を示す。カメラの観測波長域は8～13μm、温度分解能は0.05℃で、放射率は0.95とした。芝生(EPS混合土)は約20000画素の平均値で、コンクリートは約12000画素の平均値である。8～10時には、コンクリートの部分だけ塔屋の影になっているために、芝生の方が温度が高くなっている。日中芝生の温度は最高40.3℃、コンクリートの温度は最高45.5℃である。夜間の放射冷却による温度降下は、芝生の2℃に対しコンクリートは9℃で、コンクリート表面からの夜間発熱量は大きい。

5.4 蒸発散量の推定

200mm程度の土層は有効土層域内にあるとみなせ、降水時を除けばフラックスは下から上に向かう。土壌水分減少量をテンシオメーターの測定値と水分特性曲線から求め、下部パレットの水減少量を上向き補給水量とすれば、蒸発散量は(1)式⁽⁶⁾となる、

写真2 屋上緑化地盤の外観

図5 緑化地盤と計測装置の概要

図6 土壌水分特性曲線

図7 雨量と培土の体積含水率

芝生の蒸発散量 = 土壌水分減少量 + 上向き補給水分

.....(1)

上向き補給水量の測定が1日1回のため、蒸発散量を日積算値で(1)式から算定した。同日の上向き補給水量は 3.59 kg/m^2 、芝生の蒸発散量は 4.06 kg/m^2 であった。ルイスの関係を利用して芝生の蒸発散量の推定し、(2)式に示す。

$E = k \cdot (x_s - x_a)$ (2)

ここで、 E は蒸発散量 ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$)、 k は物質移動係数 ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h} \cdot (\text{kg/kg}')$)、 x_s は芝生表面の飽和絶対湿度 ($\text{kg/kg}'$)、 x_a は空気絶対湿度 ($\text{kg/kg}'$) である。赤外線カメラで算定した芝生の表面温度から飽和絶対湿度を求め、気温と相対湿度の測定値²⁾から空気の絶対湿度を求めた。そして(1)式で算定した蒸発散量との関係から物質移動係数を求めたところ、 $17.62 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ となった。図9に(2)式から求めた時刻別蒸発散量を示す。日中の蒸散量は $500 \sim 600 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ 、夜間の蒸発散量は $100 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ 未満であった。蒸発散量がすべて潜熱変化したものとすると、蒸発潜熱量は日中 $300 \sim 350 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ で、水平面全日射量の $55 \sim 60\%$ である。今回テンシオメーターの測定は深さ 80 mm の値で代表したが、その測定法については検討の余地がある。

5.5 下から水の補給と軽量材に関する考察

8月中旬～9月初めのパレットの水深の変動は平均 5 mm/日 程度で、畑などの蒸発散とほぼ一致していた。これより、下から水を補給する培土厚さが 110 mm の薄型地盤でも一般の緑地とほぼ同じ蒸発散能力を維持していることが分かる。5種類の地盤の芝の生育調査の結果、人工培土は関東ロームに優り、針葉樹樹皮と砂は関東ロームより劣っていた。EPS混合土と関東ロームはほぼ同等であった。軽量材の選別と熱水分特性の関係については今後の課題である。

6 結 論

試験体とコンテナ型緑化地盤の測定結果を解析して、表面熱特性や水分特性について得られた知見を、以下に要約する。

- 1) 夏季晴天日の日射反射率は直線回帰により、コンクリートスラブが 32% 、関東ロームが 12% 、芝生が 21% 前後と算定された。
- 2) 夏季日中の関東ロームや芝のコンクリートスラブに対する温度抑制効果を定量的に算定した。芝の培土に軽量材を混合すると、日中の表面温度はわずかに上昇する傾向にある。
- 3) 降雨後には、関東ロームと芝生の表面温度差は日毎に大きくなり、芝は毛管作用のため関東ロームより保水機能が優れている。
- 4) テンシオメーターの水ポテンシャル測定と水分特性曲線を用いて、培土の土壌含水率を明らかにした。パレットの補給水は芝の生育に必要な水分を供給していることが分かった。
- 5) 下から水の補給を受ける緑化地盤の蒸発散量を算定したところ、一般の緑地とほぼ同等の蒸発散能力があることが分かった。

一連の実験を通して芝の育成と表面熱特性機能について検討した結果、EPS混合土を用いた軽量化手法では、培土厚さがわずかに 150 mm でも実用に供えることが判明した。また下部パレットから水分を補給するコンテナ型緑化地盤では、培土厚さが 110 mm でも、軽量材として人工培土、EPSを用いた場合には実用に供えることが分かった。

図8 赤外線カメラによる表面温度の測定

図9 水平面全日射量と蒸発潜熱量の関係

注1) 杉本英夫、塩田耕三、他2名が行った土壌水分動態の調査結果による。

注2) 気象庁『1994年SDP地上気象観測データ(東京)』による。

注3) 本論文は試験体の観測結果について報告した参考文献⁷⁾に修正を加え、緑化地盤の観測結果を加筆したものである。

参考文献

- 1) 例えば、梅干野晃、何江、堀口剛、王革：芝生葉群層の熱収支特性に関する実験研究(第1報)、日本建築学会計画系論文集、No. 462, pp 31～39, 1994.8
- 2) 石原修、張晴原、都地康介：屋上盛土と芝生植栽の環境緩和効果に関する実験的研究(その3)、日本建築学会中国・九州支部研究報告、第9号, pp 317～320, 1993.3
- 3) 恩村定幸、松本衛、鉾井修一：屋上芝生植栽による蒸発冷却効果に関する研究(その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp 767～768, 1992.8
- 4) 吉原誠、片山忠久、林徹夫、崔棟皓、塩月義隆、香川治美：屋上植栽の熱水分特性に関する調査研究(その1)、日本建築学会九州支部研究報告、第35号, pp 217～220, 1995.3
- 5) 原田寛史、片山忠久、林徹夫、塩月義隆、堤純一郎、張晴原、津々見伸広：地表面熱収支の長期観測(その2)、日本建築学会九州支部研究報告、第31号, pp 225～228, 1989.3
- 6) 駒村正治、狩俣貴清、水田明、米安晟：施設利用型畑地灌漑における消費水量の決定法に関する基礎的研究、東京農業大学農学集報, Vol. 39, No. 1, pp 1～9, 1994.1
- 7) 三小田憲司、小宮英孝、塩田耕三、杉本英夫：屋上芝生植栽の導入効果に関する実験的研究(その1)、日本建築学会学術講演梗概集, pp 1525～1526, 1993.9

[1995年6月30日原稿受理 1995年8月25日採用決定]