

緑化による都市の熱環境改善に関する研究（その2）

—数値シミュレーションによる屋上緑化システムの熱性能評価—

三小田 憲 司 小 宮 英 孝 塩 田 耕 三
杉 本 英 夫 喜 田 大 三

Study on Improvement of Urban Thermal Environment by Revegetation (Part 2)

—Thermal Estimation of Rooftop Revegetation Based on Simulation—

Kenji Mikoda Hidetaka Komiya Kouzou Shiota
Hideo Sugimoto Daizo Kita

Abstract

Rooftop revegetation differs from revegetation on the ground, for example, parks and grasslands, because thickness of soil is limited and it influences the heating load of the building directly. Numerical simulation analyses of the rooftop revegetation system carried out for the room on the highest floor of an office building and on the cooling load of the room are reported in this paper. Sensible heat fluxes from surface to atmosphere are described. The authors also estimated the relation between the spread of rooftop revegetation and outside air temperature in an urban area. Before calculations, comparisons were made between values of calculations and values of experimented results. The coefficient was also estimated and characteristics of evaporation at the green area were investigated in advance. When planning a garden on a roof, it usually will become the focal point to lighten weight of the soil. Therefore, the relation between lightening of the system and thermal insulation was made clear.

概 要

公園や草地のような地上の緑化と異なり、屋上の緑化は厚みが有限であり、建物の負荷と関係するなど、特殊な状況におかれているため、未解決の点が多い。本報では一般的な事務所ビル最上階を対象にシミュレーション解析により、屋上緑化システムを導入したときの冷房負荷や大気中へ放出される顕熱流を算定し、屋上緑化の普及による気温の遞減効果についても評価した。熱収支係数や緑地表面の蒸発特性は、実測結果および実測値と計算値との比較を通してあらかじめ求めておいた。また屋上緑化を導入する際には、積載荷重を減らすための軽量化が焦点となるため、緑化地盤の軽量化と断熱能力の関係についても明らかにした。

1. はじめに

土地の有効利用が優先される都市では、公園等、緑地面積を確保することが非常に難しい。そこで屋上が都市緑化に有効なスペースとして浮上してきた。しかし屋上空間の緑化開発は日が浅いこともあり未解明の部分が多く、熱環境評価の確立が急がれている。そこで本報では事務所ビルをモデルに、シミュレーション解析による熱環境評価を行った。

緑地表面の熱移動では蒸発による潜熱移動が大きな比重を占めるが、直接求める有効な手段がなく間接的な計測で補っているのが現状であり、これが定量化を難しくする原因でもある。熱・水分同時移動方程式を解くことにより求める手法もあるが、土中水分に関するパラメータの信頼度が低いのが難点である。そこで地表面近傍の比湿から表面の蒸発散量を推定する計算モデルで計算を行ったが、緑化地盤内部の温度・熱流の計測結果と照らして、信頼性の高いことが確認できた。

2. 熱収支計算モデル

2.1 地表面の熱収支

図-1 に計算対象室の断面と熱の流れを示す。緑地表面の熱収支は、

$$(1-\rho)SR+LR\downarrow-LR\uparrow=SH+LH+CD \quad \dots\dots(1)$$

で表わされる。ここで ρ は日射反射率、SR は水平面全天日射量、LR \uparrow は地表面放射量、LR \downarrow は天空放射量、SH は顕熱量、LH は潜熱量、CD は伝導熱量である。長波長放射、顕熱、潜熱、伝導熱流について書き直すと(2)式は以下ようになる。

$$(1-\rho)SR-\epsilon\sigma Ta^4(0.474-0.076\sqrt{h}) \\ -4\epsilon\sigma Ta^3(Ts-Ta)=\alpha_c(Ts-Ta) \\ +f\times L\frac{\alpha_c}{c}(x_s-x_a)+\frac{1}{\Delta z}(Ts-T_{s-\Delta z}) \quad \dots\dots(2)$$

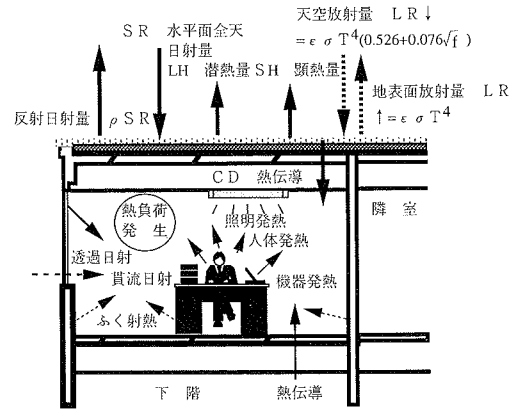
σ : ステファン・ボルツマン係数 h : 水蒸気分圧 (mmHg)
 T_s : 表面温度 (°C) T_a : 気温 (°C)
 L : 潜熱比熱 (kJ/kgK) c : 空気の比熱 (kJ/kgK)
 λ : 熱伝導率 (W/mK) x_a : 空気の絶対湿度 (kg/kg)
 x_s : 地表付近の飽和絶対湿度 (kg/kg)

表一 材料物性値

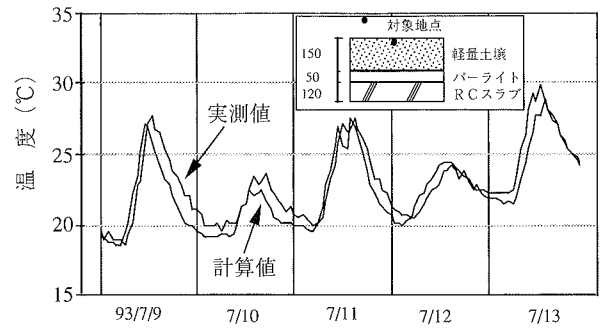
	比熱 c (kJ/kgK)	比重 ρ (kg/m³)	熱伝導率 λ (W/mK)
黒ぼく	2.51	1,450	0.64
普通コンクリート	0.88	2,200	1.64
EPS	1.26	28	0.03
パーライト	1.00	109	0.35
ALC	1.09	600	0.17

表二 計算条件

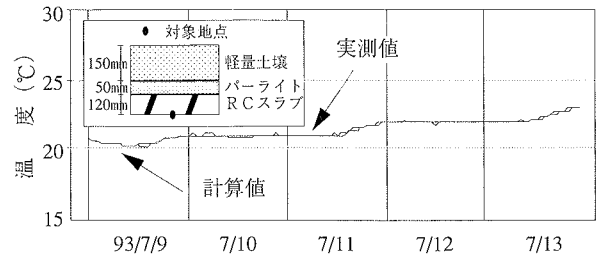
建物条件	場所 事務所ビル最上階 (東京) 方位 南向き (窓面) 床面積 180 m² (30 m×6 m) 天上高 3 m 窓面積 45 m² (30 m×1.5 m)
内部発熱	人員 在室員 0.2人/m² 顕熱 57 W/h・人 (26°C) 潜熱 62 W/h・人 (26°C) 照明 所要電力 30 W/m² 機器 出力 5 kW
設備仕様条件	温湿度設定 室温26°C 湿度 50% 空調時間 8~18時 (予冷1時間) 換気回数 0.3回/h 家具熱容量 12 kJ/m³K 冷却塔 出口水温 37°C 入口水温 32°C 流量 13 l/min・Rt 外気導入量 25 m³/人 空気熱源式ヒートポンプ (COP 3.0)



図一 計算対象室の断面と熱の流れ



図二 外表面温度の実測値と計算値との比較



図三 天井表面温度の実測値と計算値との比較

芝表面の日射反射率 ρ と放射率 ϵ は実測値から算定し¹⁾、それぞれ0.21, 0.88とし、対流熱伝達率 α_c は23.2 W/m²Kとした。潜熱量はルイスの関係式から可能蒸発散量を求め、蒸発比 f を乗じて算定した。芝表面の蒸発比は実測値と計算値の比較から、0.5とする。

2.2 屋上緑化地盤の熱収支

地盤内部の熱伝導では芝の熱容量は無視し、熱拡散率を定数で扱い表一1の材料物性値^{2),3)}から算定する。緑化地盤には一次元熱伝導の方程式を適用し、後退差分で計算する。対象となる緑化地盤は上から順に芝、軽量土、パーライト、防水シート、コンクリートとした。

2.3 外壁・内壁・床からの熱取得

壁体の内外両面の相当気温を境界条件として与えた。内壁の外側相当気温は外気温と室温の重み付き関数で表し、床の外側相当気温は室温とした。室内側相当気温は平均周壁温度を用いて算定する。窓ガラスからの熱取得は、透過日射、吸収日射、貫流日射による熱の流入を考慮し、すきま風による熱取得は換気回数法で計算する。

2.4 室内空気熱収支

熱負荷の計算は内部発熱を考慮して、顕熱量と潜熱量をそれぞれ熱平衡式⁴⁾をたてて計算する。計算条件は表二の通りで、顕熱負荷 HE_s (W/m²) は次式から求める。

$$(C_e a + C_e r) \frac{\partial Tr}{\partial t} = \sum_n A_{(n)} \alpha_{c(n)} (T_{s(n)} - Tr) + m C_e a (T_a - Tr) + HG_c - HE_s \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 C_e は熱容量 (kJ/K), t は時間 (h), m は換気回数 (回/h), Tr は室温 (°C), $A(n)$ は室内各面の表面積 (m²), V は室内容積 (m³), HG_c は室内発生顕熱の対流成分 (W/m²) である。潜熱負荷 HE_L (W/m²) は、次式から求めることができる。また添え字の $n(1 \sim k)$ は室内各面 (床・天井・側壁), f は家具類を表す。

$$\gamma_a V \frac{\partial X_r}{\partial t} = m \gamma_a V (x_a - x_r) + HG_L / L - HE_L / L \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 x_r は室内空気の絶対湿度 (kg/kg), HG_L は室内発生潜熱 (W/m²) である。

2.5 ヒートアイランドの計算式

冷房排熱を含む顕熱流が都市気温に及ぼす影響 ΔT_{u-r} (°C) (ヒートアイランド強度) を以下の簡易式で算定⁵⁾した。

$$\Delta T_{u-r} = \sqrt{\frac{2LcQ_s \Delta T_p}{3,600c_a \gamma_a w}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

計算条件は都市スケール L_c を6,000 m, 市内外の平均気温減率の差 T_p を0.005°C/m, 平均風速 w を5 m/s, 大気の容積比熱 $c_a \gamma_a$ を1.2 kJ/m³Kとする。

3. 屋上緑化地盤の断熱評価

3.1 計算モデルの精度の検討

居室を対象にした負荷計算を行う前に、2.2の屋上緑化地盤の熱収支計算モデルの精度を確認するために、夏季晴天日の実測気象データを気象条件とし、前報で示した緑化地盤試験体を対象に計算を行い実測値と比較した。

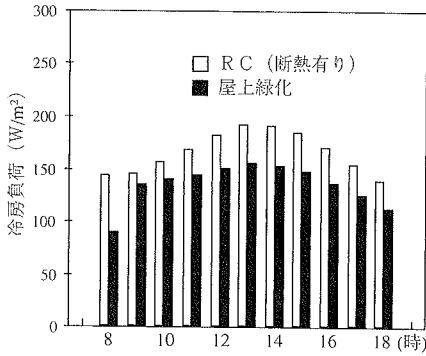


図-4 夏季ピーク日の冷房負荷

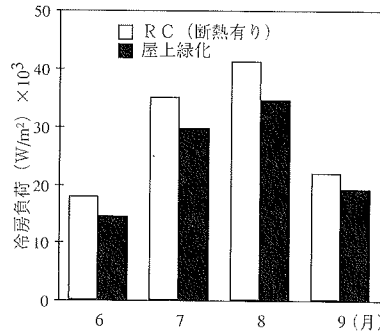


図-5 夏季期間冷房負荷

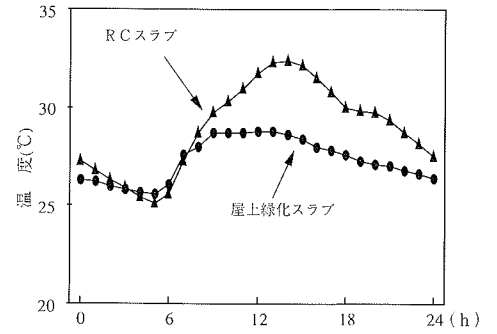


図-6 夏季ピーク日の天井表面温度

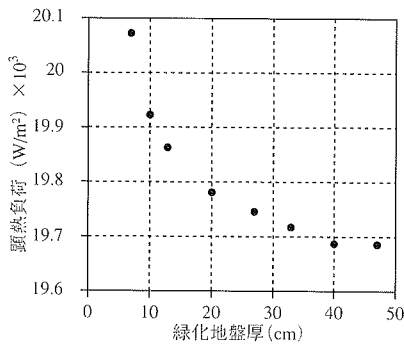


図-7 地盤厚と顕熱負荷との関係

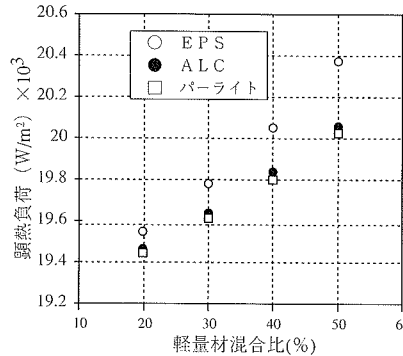


図-8 軽量材混合比と顕熱負荷との関係

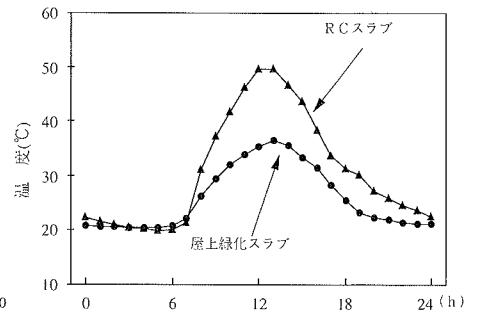


図-9 夏季ピーク日の外表面温度

図-2は土壌表面温度の計算値と実測値であるが、最大誤差でも1.5°C以内で比較的良好に一致した。図-3は天井表面温度の計算値と実測値との比較で、誤差は0.5°C以内であった。

3.2 省エネ効果

さきに述べた伝熱計算モデルを屋根スラブに適用し、事務所ビル最上階の南側一区画を対象に東京標準気象データを用いて熱負荷を計算した。屋根の仕様はRCスラブ(20mmの内断熱)と緑化スラブ(厚さ200mm)の2通りの仕様とした。図-4に夏季ピーク日(8/20)の最上階の冷房負荷を、図-5には最上階の夏季期間冷房負荷を示す。ピーク日および夏季通算でも屋上緑化の導入により、最上階の冷房負荷は15~20%軽減できることが分かる。省エネシステムとして個別に設備投資に対するコスト評価をした場合には多くを期待できないが、都市単位での夏季のピーク負荷のカットやエネルギーの節約には効果があるといえよう。

図-6は夏季ピーク日の天井表面温度の計算結果である。緑化した場合最高で5°C(14時)近く温度を下げる事ができ、冷房負荷の軽減だけではなく、室内ふく射熱の緩和効果も大きい。

3.3 緑化地盤の軽量化と断熱性との関係

3.3.1 盛り土の厚さと断熱性 黒ぼくにEPS(発泡スチロールの一種)を30%混合した軽量土を対象に8月の冷房負荷(顕熱)を試算した。図-7に緑化地盤の厚さを変えたときの結果を示す。ここでいう地盤厚は軽量土と排水層の厚さをさし、その比率は3:1とする。緑化地盤の厚さと冷房負荷は反比例の関係にある地盤の厚

さが40cm以上になると負荷の変化がほとんどなくなることが判明した。また地盤厚7cmと40cmのあいだの負荷減少は約2%(380W・月/m²)である。緑化による熱環境改善効果は表面蒸発特性が支配的で、過剰な地盤厚は負荷からみると不必要である。

3.3.2 軽量資材と断熱性 地盤軽量材のうち代表的なものについて8月の冷房負荷(顕熱)を試算した。なお地盤の仕様は軽量土(15cm)、排水層(5cm)とする。図-8は軽量材の黒ぼくへの混合比を変えたときの計算結果である。計算対象はALC(軽量気泡コンクリート)、EPS、パーライトとしたが、いずれの軽量材でも混合比を20%から50%に変えた時の負荷増加は3~4%であった。断熱能力はパーライト、ALC、EPSの順に小さくなるが、混合比が20%のときはパーライトとEPSの差は0.05%に過ぎないが、混合比が50%のときはパーライトとEPSの差は1.7%になる。なお図-8の計算は盛り土の水分保有能力に対する軽量材の影響を無視しており、検討の余地は残されている。

4. 屋外熱環境評価

4.1 表面熱特性

図-9はピーク日の地表面温度の計算結果である。夏季日中には芝表面とコンクリート表面の温度差は最高15°Cにもなる。これは実測結果とも一致し、地上の芝とコンクリートの表面温度差とほぼ等しい。

4.2 地表における熱収支

表面温度にこれだけ差が生じるのは、緑地表面の蒸発冷却に負うところが大きい。そこで蒸発による潜熱を含

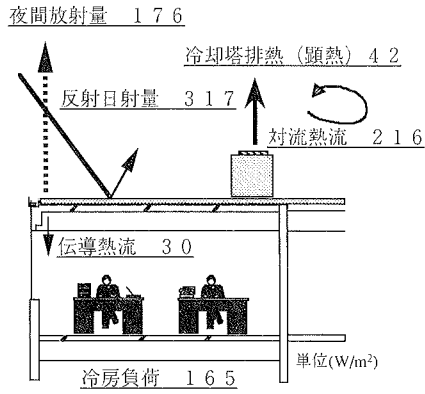


図-10 熱収支 (RCスラブ)

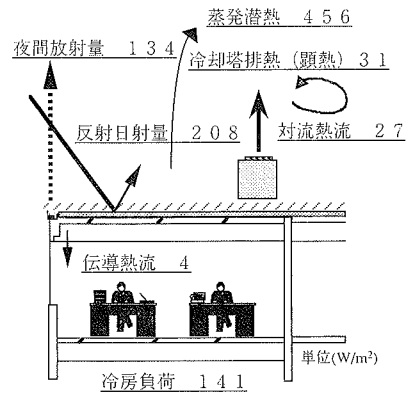


図-11 熱収支 (緑化スラブ)

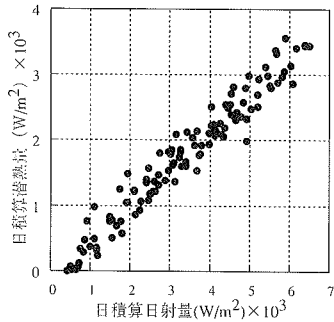


図-12 日射量と潜熱量の関係

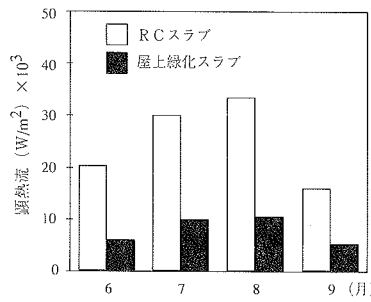


図-13 夏季期間顕熱流

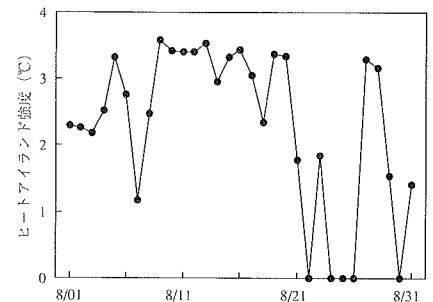


図-14 屋上緑化と気温の関係

む屋外の熱収支について、屋上を緑化しないケース(図-10)と屋上を緑化したケース(図-11)を示す。図中の数字は8/20の12時について計算した結果である。屋上を緑化した場合、潜熱量は日射量の約50%にあたる。表面温度の上昇は地表付近に対流熱を発生させると共に、冷房負荷の増加は冷却塔からの排熱増加の原因となる。そのため一般的な断熱RCスラブは屋上緑化スラブとの比較して約8倍の顕熱を生じ、都市気候を形成する要因となっている。

一方でコンクリートを芝生で覆うことにより、表面熱特性の違いから日射反射量や地表面放射量も減少する。そのため屋上を緑化することによって、放射熱量は約30%軽減する。

4.3 表面蒸発特性

蒸発散量と日射量の関係を図-12に示す。両者の相関関係は大きく、屋上を緑化したときの蒸発散量は日射量からおおよその値を推定できると考えられる。

5. ヒートアイランドと屋上緑化

図-13は夏季顕熱流の計算結果である。ここでいう顕熱流は冷却塔からの冷房排熱と地表付近の対流熱をさす。同図より屋上を緑化することにより顕熱流が約50%減少することが分かった。緑被率が0%から40%になったときのヒートアイランド強度を図-14に示す。夏季において2~3.5°Cの気温の低下が認められ、都市気候の暑熱緩和に有効であることが示された。

6. おわりに

屋上を緑化した場合、緑化をしない場合に比べて、次のような効果が得られる。

(1) 事務所ビル最上階の冷房負荷は15~20%の軽減が期待できる。また天井温度が4~5°C下がり、室内ふく射熱環境が改善される。

(2) 冷房負荷(顕熱)への効果について、

① 地盤厚を変えたとき(7cm~40cm)の冷房負荷の変化率は2%以内である。

② 軽量材混合比を20%から50%に増やすと、冷房負荷も3~4%増える。

(3) 芝表面の蒸発冷却による除去熱量は日射量の約50%に匹敵し、夏季日中の表面温度は、10~15°C下がる。

(4) 放射熱量は約30%軽減し、ビル屋上から放出される顕熱流は約70%軽減する。

参考文献

- 1) 三小田, 小宮, 他: 屋上芝生植栽の導入効果に関する実験的研究(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 1525~1526, (1993. 9)
- 2) 塩田, 杉本, 他: 軽量盛土による人工地盤上の緑化に関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 44, p. 95~100, (1992)
- 3) 日本建築学会: 建築学便覧 I, 丸善, p. 119, (1980)
- 4) 宇田川: パソコンによる空気調和計算法, オーム社, p. 134~191, (1986)
- 5) 岡: 都市規模熱拡散に関する研究(その15), 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 455~456, (1982. 10)