

8. スカイグリーン工法の熱的效果に関する研究 (その3 熱水分同時移動モデルによる非定常解析)

恩村 定幸

要 旨

本報告は、都市緑化推進のために開発したスカイグリーン工法が、建物にどのような熱的效果をもたらすかについて研究した結果を、前報に続いて報告するものである。前報(その2)では、風洞実験の結果とその測定値を用いた定常解析の結果から、前々報(その1)で推定した芝生の物性値の妥当性の検討と芝生内部の熱水分移動現象の性状の把握を行ったことについて報告したが、本報告は、この芝生内部の熱水分移動現象をより正確に把握するために行った熱水分同時移動モデルによる非定常計算の解析結果について述べるものである。

解析の結果、本モデルが芝生内部の熱水分移動性状をとらえるのに有効であることがわかった。

キーワード

熱的效果／風洞実験／非定常計算／熱水分同時移動モデル

目 次

1. はじめに
2. 風洞実験の概要
3. 数値解析
4. ま と め
5. あとがき

8. RESEARCH ON THE HEAT EFFECTS OF THE SKY GREEN METHOD (Part 3 Unsteady Analysis by Simultaneous Transport Model of Heat and Moisture)

Sadayuki Onmura

Abstract

This paper continues a previous paper concerning the heat effects the Sky Green construction method on buildings. The method was developed as a means of increasing the amount of vegetation within cities. In the previous paper (Part 2), the appropriateness of the physical values of the lawn predicted in Part 1, were examined by the results of a wind tunnel experiment and the steady analysis. In addition, the importance of the transport of heat and moisture in the lawn was confirmed. This paper reports on the results of the unsteady analysis by simultaneous transport model of heat and moisture carried out in order to gain an understanding of the phenomenon.

It was seen from the numerical results that the transport of heat and moisture in the lawn can be analyzed by this model.

1. はじめに

近年、建物に対する省エネ効果を期待して、屋上芝生植栽に関する研究・開発が各研究機関で活発に進められている。しかし、その研究のほとんどは、屋上芝生植栽の水分蒸発冷却が夏季における省エネ効果に有効であることを屋外測定実験によって示したものであり、芝生内部の熱水分移動性状を詳しく解析した例は少ない¹⁾。建物への省エネ効果を予測し、そのシミュレーションを行うためには、この性状を把握し、計算に係わる物性パラメータの同定と定量的に解析できる計算方法および解析モデルを確立することが必要である。

当社においても平成3年、屋上芝生植栽工法としてスカイグリーン工法を開発し、これまで、その蒸発冷却効果について検討を行い内外に発表してきた²⁾。

平成4年には、屋外測定実験から屋上芝生植栽による蒸発冷却効果を確認し、非定常解析の結果から計算に係わる諸物性値の推定を行った。平成5年には、風洞実験の結果とその測定値を用いた定常解析の結果から、推定した各物性値の妥当性の検討と芝生内部の熱水分移動現象のおおよその性状の把握を行った。

本報では、この熱水分移動現象をより正確に把握するために行った熱水分同時移動モデルによる非定常解析の結果について報告する。

なお、本報の内容については、本年度の日本建築学会大会（東海）と日本建築学会近畿支部研究発表会および European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings（リヨン）において発表を行っている。

2. 風洞実験の概要

詳細については既報で報告しているので、ここでは概要だけを述べる。

試験体には、本工法（スカイグリーン工法）を450×900mmの大きさに切断したものを用いた。芝生長さは30mmで、試験中常に水分を供給する湿潤試験体と水分を補給しない気乾試験体の2種について実験を行った。

恒温・恒湿（20℃、RH50％）に制御された室内に風洞を設置し、さきの2種の試験体を風向きと平行になるよう風洞内に並べ、日射を与えた状態で風速1.0 m/sの風を送り、試験体各部の温度と熱流の測定を定常に達するまで1時間ピッチで行った。

その後、風速を2.0 m/sに変化させて上記と同様の測定を行い、さらに日射を与えない状態で、風速1.0 m/s、2.0 m/s、4.5 m/s について同じ要領で測定を行った。

以後、日射を与えない状態で行った気乾試験体の実験を試験No.1、湿潤試験体の実験を試験No.2、日射を与えた状態で行った気乾試験体の実験を試験No.3、湿潤試験体の実験を試験No.4と称す。

3. 数値解析

3.1 解析モデル、計算式、境界条件

解析に用いた熱水分同時移動モデルを図-1に、熱と水分の収支式と境界条件を図-2に示す。

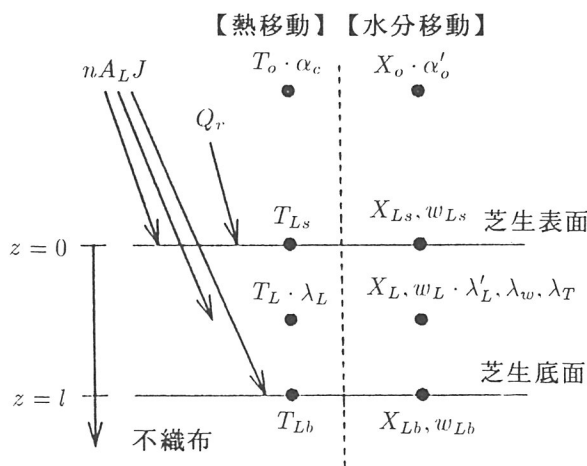


図-1 熱水分同時移動モデル

$$\begin{aligned}
& \text{熱収支式} \quad cd \frac{\partial T_L}{\partial t} = \lambda_L \frac{\partial^2 T_L}{\partial z^2} + R \lambda'_L \frac{\partial^2 X_L}{\partial z^2} + n A_L J \\
& \quad \quad \quad cd = c_L d_L + c_w d_w w_L \\
& \text{水分収支式} \quad d_w \frac{\partial w_L}{\partial t} = \lambda'_L \frac{\partial^2 X_L}{\partial z^2} + \lambda_w \frac{\partial^2 w_L}{\partial z^2} + \lambda_T \frac{\partial^2 T_L}{\partial z^2} \\
& \text{境界条件} \\
& \quad z = 0 \\
& \quad \text{[熱]} \quad Q_r + \alpha_c (T_o - T_{Ls}) + R \alpha'_o (X_o - X_{Ls}) = -\lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial z} \\
& \quad \quad \quad Q_r = c_L c_h \sigma (K_o^4 - K_{Ls}^4) \\
& \quad \text{[水分]} \quad \alpha'_o (X_o - X_{Ls}) = -\lambda'_L \frac{\partial X_L}{\partial z} - \lambda_w \frac{\partial w_L}{\partial z} - \lambda_T \frac{\partial T_L}{\partial z} \\
& \quad z = l \\
& \quad \text{[熱]} \quad T_L = T_{Lb}(\text{measurement}) \\
& \quad \text{[水分]} \quad w_L = w_{Lb}(\text{fix})
\end{aligned}$$

T_o : 風洞内空気温 ($^{\circ}\text{C}$) T_L : 芝生の温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{Ls} : 芝生の表面温度 ($^{\circ}\text{C}$) T_{Lb} : 芝生の底面温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 K_o : 風洞内空気の絶対温度 (K) K_{Ls} : 芝生表面の絶対温度 (K)
 X_o : 風洞内空気の絶対湿度 (kg/kg') X_L : 芝生の絶対湿度 (kg/kg')
 X_{Ls} : 芝生表面の絶対湿度 (kg/kg') X_{Lb} : 芝生底面の絶対湿度 (kg/kg')
 w_L : 芝生の体積含水率 (m^3/m^3) w_{Ls} : 芝生表面の体積含水率 (m^3/m^3)
 w_{Lb} : 芝生底面の体積含水率 (m^3/m^3)
 α_c : 対流熱伝達率 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$) α'_o : 湿気伝達率 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{h}(\text{kg}/\text{kg}')$)
 λ_L : 芝生の熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{mnh}^{\circ}\text{C}$) λ'_L : 芝生の湿気伝達率 ($\text{kg}/\text{mnh}(\text{kg}/\text{kg}')$)
 λ_w : 芝生の含水率勾配による湿気伝達率 ($\text{kg}/\text{mnh}(\text{m}^3/\text{m}^3)$)
 λ_T : 芝生の温度勾配による湿気伝達率 ($\text{kg}/\text{mnh}(\text{kg}/\text{kg}')$)
 c_L : 芝生の比熱 ($\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$) d_L : 芝生の比重量 (kg/m^3)
 c_w : 水の比熱 ($\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$) d_w : 水の比重量 (kg/m^3)
 e_L : 芝生表面の輻射係数 e_b : 黒塗りベニヤの輻射係数
 σ : ステファン・ボルツマン定数 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{hK}^4$) Q_r : 輻射熱 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$)
 n : 芝生内での日射吸収の分配率 A_L : 芝生表面の日射吸収率
 J : 日射量 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$) R : 蒸発による潜熱 (kcal/kg)
 l : 芝生の厚さ (m) z : 位置刻み (m) t : 時刻刻み (h)

図-2 熱・水分収支式と境界条件

表-1 定めた含水率

	芝 生 表 面		芝 生 底 面	
	体積含水率 (vol.%)	相対湿度 (%)	体積含水率 (vol.%)	相対湿度 (%)
試験No.1	0.180	60.00	0.200	66.67
試験No.2	0.190	63.33	0.210	70.00
試験No.3	0.140	46.67	0.220	73.33
試験No.4	0.245	81.67	0.295	98.33

表-2 計算に用いた数値

日 射 量	312.2	水 の 比 熱	1.0
日 射 吸 収 率	0.79	水 の 比 重 量	1000.0
芝生の熱伝導率	0.1	蒸 発 の 潜 熱	580
芝生の湿気伝導率	0.4	芝生の輻射係数	0.9
風洞内の絶対温度	7.34×10^{-3}	ベニヤ(黒)の輻射係数	1.0
芝 生 の 比 熱	0.1	ステファン・ボルツマン定数	4.88×10^{-4}
芝 生 の 比 重 量	15.0		
対 流 熱 伝 達 率	v=1.0 α c = 6.4 α o' =25.6		
と	v=2.0 α c =10.0 α o' =40.0		
湿 気 伝 達 率	v=4.5 α c =19.0 α o' =76.0		
風洞内の気温、芝生の表面および底面温度は測定値を用いる。			

3.2 初期条件と計算に用いた数値

温度の初期値には芝生表面と底面の初期測定値の直線内挿によって求まる値を用いた。含水率に関しては、計算値と測定値が蒸発過程の初期の段階で一致するような適値を芝生表面と底面に与え、それらの数値の直線内挿によって求まる値を初期値とした。表-1に適値として与えた芝生表面と底面の含水率を示す。

計算に用いた各緒元の数値を表-2に示す。これらの値は測定値または既報で発表した値であるが、芝生の湿気伝導率だけは既報とは異なる値を用いた。(既報の解析を本報の値を使って行っても、結果に与える影響が非常に小さいことは確認している。)

芝生内部での日射吸収の分配率は前報で求められた係数を用いて算出した。その係数を図-3に示す。

3.3 計算方法

前述した数値を用い、非定常計算を行って芝生表面温度を算出し、測定値と比較する。計算は前進差分で行い、時間刻みと位置刻みはそれぞれ1/240h、0.005mとした。

前報で行った定常解析では、5点の測定値の平均を代表値としたが、計算結果の信頼性をより高めるために、給水パイプやランプの位置から1次元性が最も保たれると考えられる試験体中央における測定値を代表値として使用した。

水分移動の計算については、計算を簡素化するために不確定な物性値を含む液水の移動は無視し、蒸気の移動のみで水分移動が行われるものとした。また、芝生底面での含水率の変動は微小なものとして、芝生底面の含水率を一定として計算を行った。

絶対湿度は、図-4に示す温度と含水率と絶対湿度の関係から温度の1次式と含水率の1次式の積に近似した。

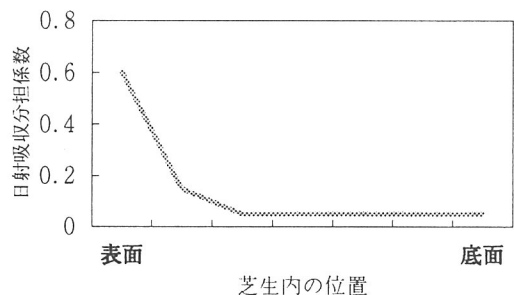
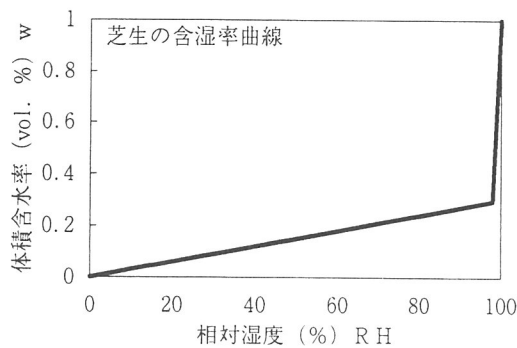
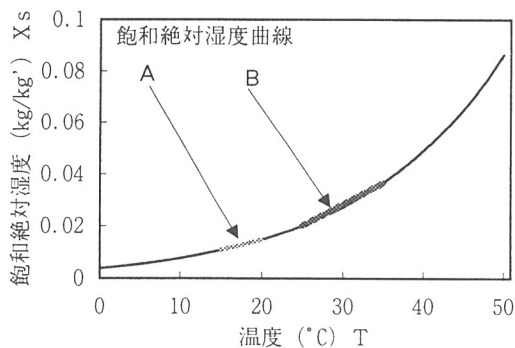


図-3 日射吸収分配係数



$$RH < 99\% \quad RH = 10/3w$$



$$A: X_s = 8.08 \times 10^{-4} T - 1.48 \times 10^{-3}$$

$$B: X_s = 1.648 \times 10^{-3} T - 0.02113$$

$$X = RH \cdot X_s$$

$$\rightarrow X = 10/3w \times A(\text{or } B)$$

図-4 温度・含水率・絶対湿度の関係

3.4 結果と考察

計算結果を図-5 (1)~(4) に示す。試験No.3 の風速 2.0m/s以降と試験No.4 のケースで、計算値と測定値の間に2~3℃程度の差がみられた。

ここで、下記のことがいえる。

- ・芝生底面と表面との温度差が大きい、つまり温度勾配が大きい。
- ・芝生底面の方が温度、含水率とも高いので熱、水分は芝生表面へ流れる。

従って、温度勾配による液水移動を考慮することで水分は芝生表面へ流れやすくなり、その芝生表面近傍の水分の蒸発によって温度が下げられるので、計算値がより測定値に近くなると考えられる。

その他のケースでの計算結果では、いずれも測定値

との差は1℃以内に収まっており、表面温度の測定の困難さを考えると良好な一致といえる。経時変化の傾向も全般的にはほぼ一致の結果が得られた。以上から、本モデルは芝生内部の熱水分の移動性状をとらえるのに有効と考えられる。

3. まとめ

熱水分同時移動モデルによる非定常解析結果と測定値を比較し、良好な一致が得られたことから、本モデルが芝生内部の熱水分移動の性状解析に有効なモデルであることを示した。また、より正確な性状解析を行うには、温度勾配による液水移動の考慮が必要であることを確認した。

4. あとがき

本研究を進めていくにあたって、ご教授いただいた神戸大学松本衛教授および京都大学銚井修一助教授に深く感謝いたします。今後は、液水移動と3次元の影響を考慮したうえで、物性パラメータの同定と解析モデルの妥当性について検討を行い、本工法の熱的效果を定量的にシミュレーションできる解析方法を固めていきたいと考えている。

注釈

- 1) 例えば梅干野氏（東工大教授）の「屋上芝生植栽の熱的特性に関する実験研究 その10」では簡単な伝熱モデルによる解析がなされている。
- 2) 恩村定幸 松本衛 銚井修一：「屋上芝生植栽による冷却効果に関する研究 その1~3」（日本建築学会大会学術講演梗概集／日本建築学会近畿支部研究報告集）および 恩村定幸：「スカイグリーン工法の熱的效果に関する研究 その1~2」（浅沼組技術研究所報）など、

〔参考文献〕

- 銚井修一：「湿った建築壁体の熱的特性に関する基礎的研究」（博士論文 1986）
 松本 衛、他：「建築環境工学」オーム社
 および前記注釈の2）

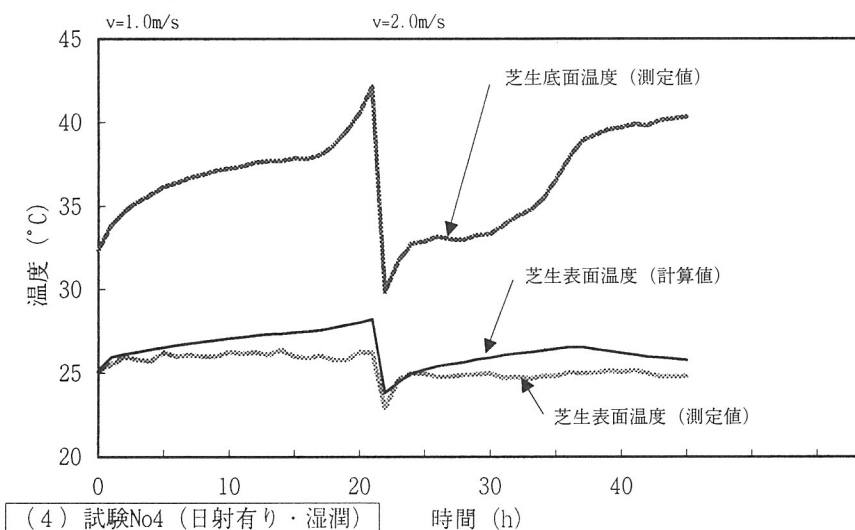
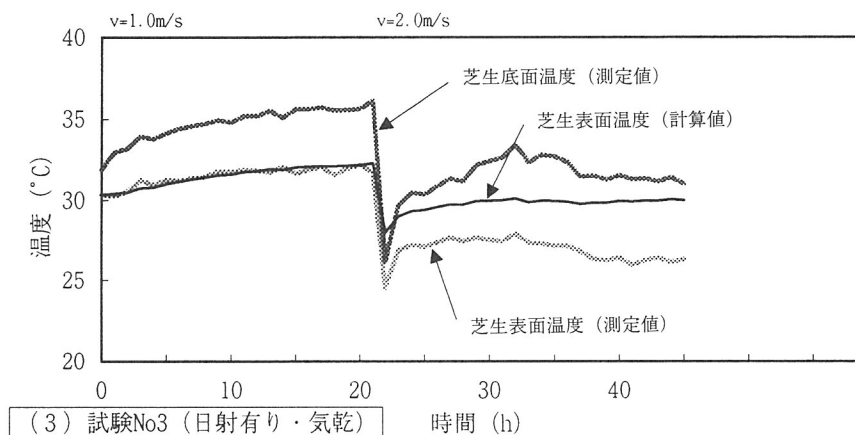
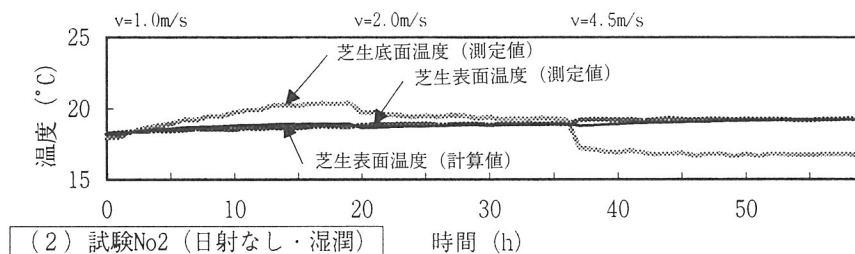
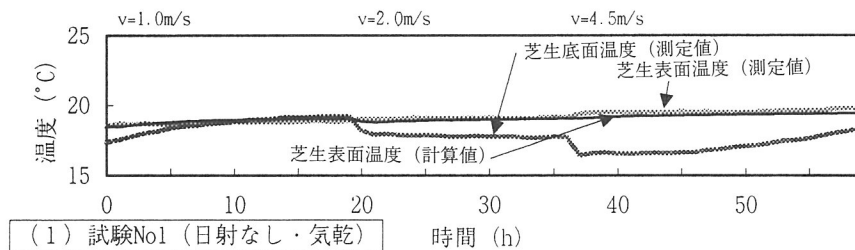


図-5 計算値と測定値の比較 (芝生の表面温度)