

10. スカイグリーン工法の熱的効果に関する研究 (その2 風洞実験と解析)

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効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1)では、屋外測定実験の結果から芝の熱抵抗値と湿気抵抗値の推定を行い、それらの物性値の妥当性の確認と熱収支計算に必要なその他の諸定数を得るために行った風洞実験の結果について報告したが、本報告は、その風洞実験によって得られたデータを用いて定常計算を行った解析結果について述べるものである。

解析の結果、前報で推定した芝生の熱抵抗値 ($0.30 \sim 0.40 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}$)、湿気抵抗値 ($0.15 \sim 0.2 \text{ kg}/\text{kg}'\text{m}^2\text{h}/\text{kg}$) は、十分妥当な値であることが確認できた。また、芝面での熱伝達率の推定値が得られた。

キーワード

熱的効果／風洞実験／定常計算／芝生の熱抵抗／芝生の湿気抵抗／芝面の熱伝達率

目 次

1. はじめに
2. 風洞実験
3. 数値解析
4. まとめ
5. あとがき

10. RESEARCH ON THE HEAT EFFECTS OF THE SKY GREEN METHOD (Part 2 Analysis of Wind-Tunnel Tests)

Sadayuki Onmura

Abstract

This paper continues a previous paper concerning the heat effects of 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 (Part1), the specific thermal resistance and specific water vapor resistance of the lawn were determined from the results of outdoor monitoring tests. In addition, the results from wind tunnel tests carried out in order to confirm the appropriateness of the physical values, and to obtain the various other constants necessary for calculation of the heat transfer, were detailed. This paper reports on the results of the steady state analysis, calculated using the data obtained from these wind tunnel tests.

The specific thermal resistance ($0.30 \sim 0.40 \text{ m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}$), and specific water vapour resistance ($0.15 \sim 0.2 \text{ kg}/\text{kg}'\text{m}^2\text{h}/\text{kg}$) were determined in the previous paper and these were confirmed to be appropriate enough. In addition, the heat-transfer coefficient for the lawn surface was determined.

1. はじめに

スカイグリーン工法は、構成部材である不織布の高い断熱性能と不織布からの水分蒸発による冷却効果によって、建物に対してかなりの熱的效果が期待できる。その熱的效果を数値計算によってシミュレーションするには、種々の物性値、諸定数が必要であるが、これまで植栽に関する研究は少なく、これらの数値を記載した文献はほとんど見られない。そこで、芝生の熱抵抗値、湿気抵抗値といった物性値を知るため、平成3年に屋外測定実験を行い解析した結果、熱抵抗値 $0.3 \sim 0.4 \text{ m}^2 \text{ h}^\circ \text{C} / \text{kcal}$ 湿気抵抗値 $0.15 \sim 0.2 \text{ kg} / \text{kg} \cdot \text{m}^2 \text{ h} / \text{kg}$ が得られた。また、この時の測定結果から、夏季においては、本工法の蒸発冷却効果によって室内環境が良好になることの確認も行っている。さらに、これらの物性値の妥当性の確認と、その他計算に必要な日射吸収率、熱伝達率等の諸定数を知るために平成4年に風洞実験を行った。

前報（その1）では上記の詳細、風洞実験の概要と結果、そして日射量と反射量の測定結果から日射吸収率として0.8という値が得られたことを述べた。

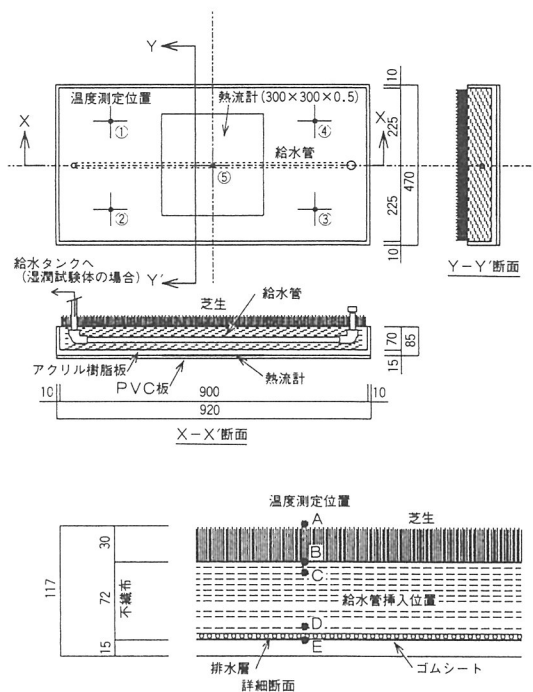


図-1 試験体

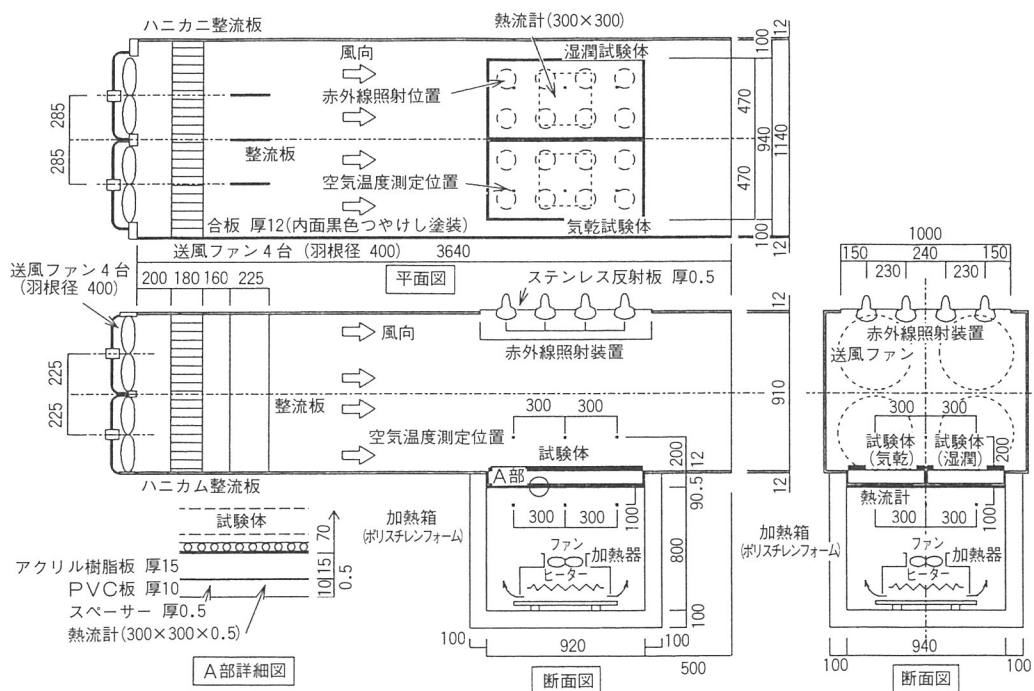


図-2 試験装置

本報では、風洞実験によって得られたデータを用いて定常計算を行った結果について述べる。

なお、本研究については、昨年の日本建築学会大会（北陸）と平成5年度の日本建築学会大会（関東）、日本建築学会近畿支部研究発表会（平成5年度）およびGBRC誌上（1992年10月）においてその概要の発表を行っている。

2. 風洞実験

2.1 実験概要

詳細については前報で報告したので、ここでは概要だけを述べる。

(1) 試験体

試験体を図-1に示す。芝長さは3cmで、試験中、常に水分を補給する湿润試験体と水分の補給を行わない気乾試験体との2体について実験を行った。

(2) 試験装置

恒温、恒湿（20℃、RH50%）に制御された室内に図-2に示すような簡易風洞を設置した。

(3) 実験方法

風洞内に湿润試験体と気乾試験体を風向きと平行に並べ、日射を与えた状態で風速1.0m/sの風を送り、試験体各部の温度および熱流が定常に達するまで、1時間ピッチで温度と熱流の測定を行った。その後、風速を2.0m/sに変化させて上記と同様に温度と熱流の測定を行った。日射を与えない状態では、熱箱内のヒーターを熱供給源として、風速1.0m/s、2.0m/s、4.5m/sについて同要領で測定を行った。

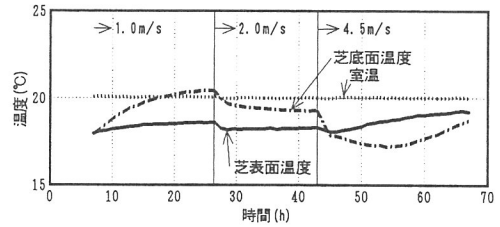
2.2 実験結果

芝の表面温度と底面温度の測定結果を図-3（1）～（4）に、蒸発量の測定値と図-3から得られた定常値を表-1に示す。

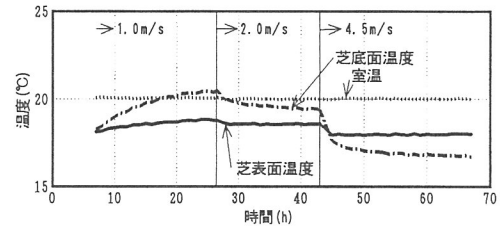
3. 数値解析

3.1 解析モデルと計算方法

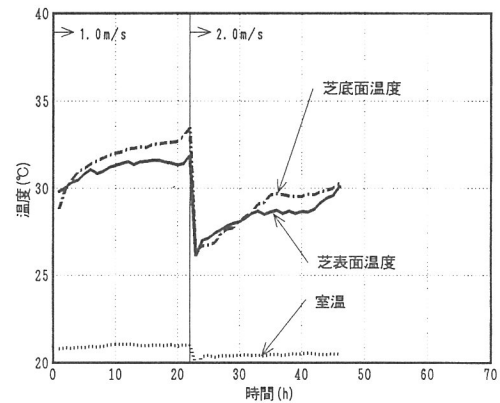
定常の解析モデルを図-4に示す。すなわち、芝を2分割し、各層の境界面で日射吸収や蒸発が起こるものとして熱・水分の同時移動を考えた。解析に用いた収支式を次に示す。



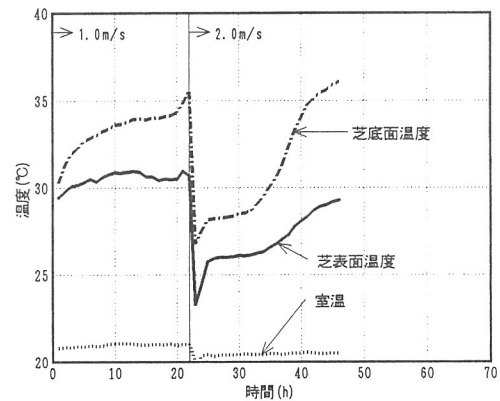
(1) 日射なし・気乾試験体



(2) 日射なし・湿润試験体



(3) 日射有り・気乾試験体



(4) 日射有り・湿润試験体

図-3 測定結果

$$-Hq + xA_sJ_s + \alpha_o(T_o - T_1) - RHm_1 = \lambda \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (z=0)$$

$$x'A_sJ_s + \lambda \frac{T_1 - T_2}{L} - RHm_2 = \lambda \frac{T_2 - T_3}{L} \quad (z=L)$$

$$x''A_sJ_s + \lambda \frac{T_2 - T_3}{L} - RHm_3 = Hq' \quad (z=2L)$$

$$Hm_1 + Hm_2 + Hm_3 = \alpha'_o(X_{s1} - X_o)$$

$$Hm_2 + Hm_3 = \lambda' \frac{X_{s2} - X_{s1}}{L}$$

$$Hm_3 = \lambda' \frac{X_{s3} - X_{s2}}{L}$$

$$x + x' + x'' = 1$$

ここで、

T_o : 室温 (°C)

T_1 : 芝表面温度 (°C)

T_2 : 芝中間温度 (°C)

T_3 : 芝底面温度 (°C)

X_o : 空気の大気湿度 (kg/kg')

X_{s1} : 芝表面の大気湿度 (kg/kg')

X_{s2} : 芝中間の大気湿度 (kg/kg')

X_{s3} : 芝底面の大気湿度 (kg/kg')

A_s : 日射吸収率

J_s : 日射量 (kcal/m²h)

α : 熱伝達率 (kcal/m²h °C)

α' : 湿気伝達率 (kg/m²h kg/kg')

λ : 芝の熱伝導率 (kcal/mh °C)

λ' : 芝の湿気伝導率 (kg/mh kg/kg')

Hq : 長波輻射熱 (kcal/m²h)

Hq' : 不織布への流入熱流 (kcal/m²h)

R : 蒸発の潜熱 (kcal/kg)

Hm : 蒸発量 (kg/m²h)

x, x', x'' は日射吸収の割合

の差が小さくなる値を推定し、また芝内の絶対湿度は、芝内部は飽和であるとして温度の1次関数に近似して求めた値を用いた。

用いた諸定数を次に示す。

$$J_s = 312.2 \quad A_s = 0.79 \quad X_o = 0.00734$$

$$\lambda = 0.1 \quad \lambda' = 0.15$$

総合熱伝達率

$$\alpha_o(v=1.0) = 10.4$$

$$\alpha_o(v=2.0) = 14.0$$

$$\alpha_o(v=4.5) = 23.0$$

対流熱伝達率

$$\alpha_c(v=1.0) = 6.4$$

$$\alpha_c(v=2.0) = 10.0$$

$$\alpha_c(v=4.5) = 19.0$$

湿気伝達率

$$\alpha'_o(v=1.0) = 25.6$$

$$\alpha'_o(v=2.0) = 40.0$$

$$\alpha'_o(v=4.5) = 76.0$$

$$\alpha_r = 4 \quad R = 580$$

芝内の絶対湿度

$$X_s = AT + B \quad A = 6.57 \times 10^{-4} \quad B = -0.00278$$

芝内の日射吸収の割合

$$x = 0.7 \quad x' = 0.2 \quad x'' = 0.1$$

上式に室温、湿度、芝底面温度を与えて芝表面温度を定常計算で解き、測定値と比較する。その場合、日射量、日射吸収率、室温、空気の大気湿度、芝底面温度には測定値を用い、芝の熱伝導率、湿気伝導率は、前報で得られた値を用いた。伝達率については、蒸発量の測定値から湿気伝達率を求め、湿気伝達率とルイスの関係によって求められる対流熱伝達率と総合熱伝達率を計算に用いた。ただし、輻射熱伝達率は4kcal/m²h°Cとした。日射吸収の割合には計算値と測定値

3.2 結果と考察

計算結果を図-5と表-1に示す。芝表面温度の計算値と測定値の差は、ほとんど1°C以内に納まっており、表面温度の測定の難しさを考えるとまずまずの一致といえる。蒸発量についても各風速ごとの測定値ではなく、各実験ごとの測定値から計算して求めていることを考えると良好な一致といえよう。計算値と測定値が大きく異なるのは3ケースであるが、図-3からこれらの3ケースの測定はいずれも定常になっていないことがわかる。したがって、図-5ではそれらの解析結果を省略している。前報で推定した芝の熱抵抗値、湿気抵抗値を用いて得られた計算値と測定値が良好な一致を示すことから前報で推定した値は妥当であるといえる。

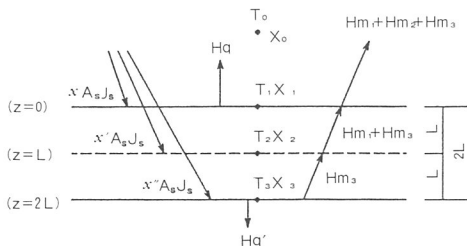
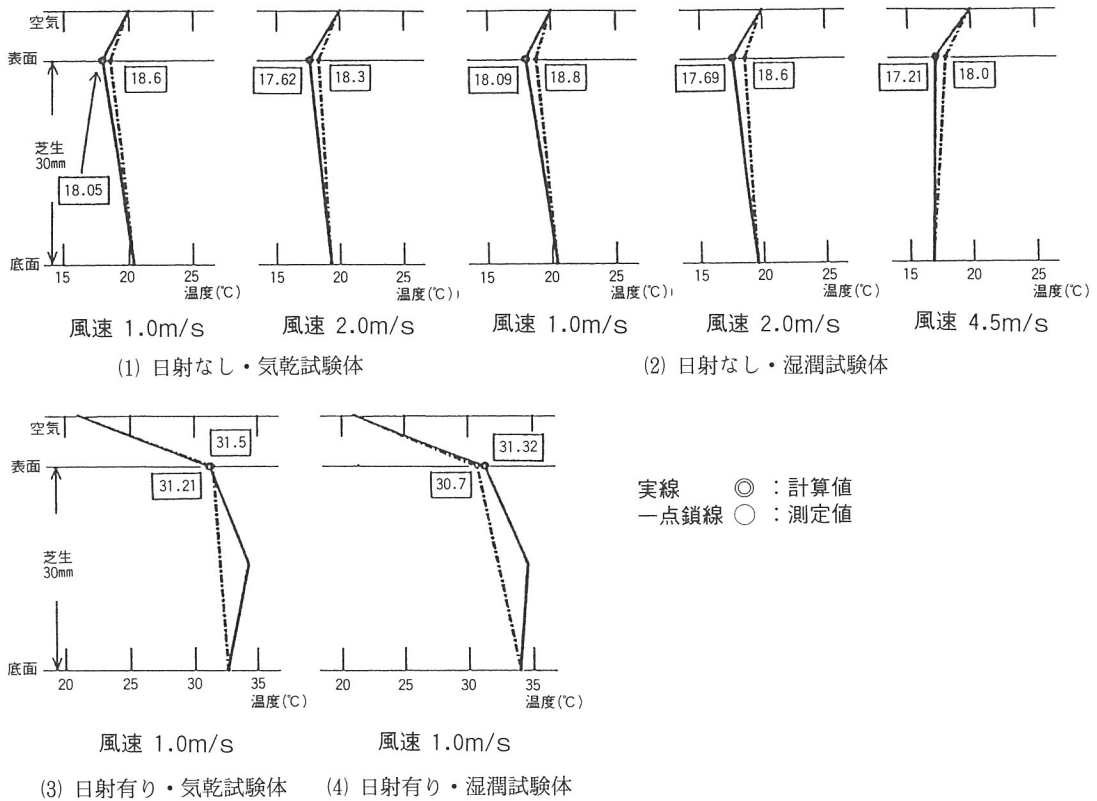


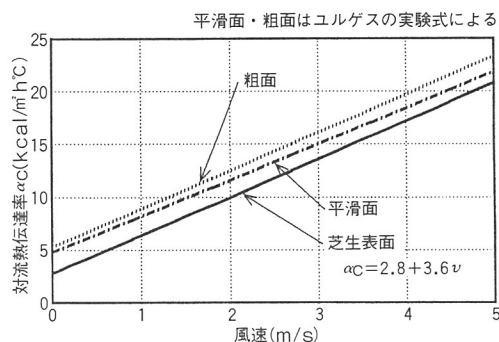
図-4 解析モデル

表－１ 測定結果と解析結果

試験状況		風 速 (m/s)	温度測定値 (℃)			芝表面温度 計算値 (℃)	誤 差 (℃)	試験体重量(kg)		給水量 (kg)	蒸発量 測定値 (kg)	測定 時間 (h)	蒸発速度 測定値 (g/m²h)	蒸発速度 計算値 (g/m²h)	誤 差 (g/m²h)	
			室 温	芝表面温度	芝底面温度			試験前	試験後							
(1)	日射 なし	気乾試験体	1.0	20.0	18.6	20.4	18.05	-0.552	17.245	14.372	—	2.873	67	106	106	0
		2.0	20.0	18.3	19.3	17.62	-0.678									
		4.5	20.0	19.1	18.7	17.48	-1.623									
(2)	湿潤試験体	1.0	20.0	18.8	20.4	18.09	-0.714	21.980	19.720	0.996	3.256	67	120	90	30	
		2.0	20.0	18.6	19.5	17.69	-0.906									
		4.5	20.0	18.0	16.8	17.21	-0.790									
(3)	日射 有り	気乾試験体	1.0	21.0	31.5	32.6	31.21	-0.291	17.376	12.092	—	5.284	46	284	309	25
		2.0	20.5	28.5	29.6	26.57	-1.932									
(4)	湿潤試験体	1.0	21.0	30.7	34.0	31.32	0.625	22.111	17.645	1.365	5.831	46	313	314	1	
		2.0	20.5	29.3	36.0	37.67	-1.635									



図－５ 解析結果－温度分布－



図－6 熱伝達率

4. まとめ

風速、日射量設定が可能な風洞において測定実験を行い、定常熱水分移動モデルによる解析結果と測定値を比較することで、前報で推定した芝の熱抵抗値(0.3～0.4m²h°C/kcal)、湿気抵抗値(0.15～0.2kg/kg' m²h/kg)が妥当であることを示し、芝生内での日射吸収の割合($x = 0.7, x' = 0.2, x'' = 0.1$)と芝面での熱伝達率の値を推定した。

$$\alpha_o(v = 1.0) = 10.4$$

$$\alpha_o(v = 2.0) = 14.0$$

$$\alpha_o(v = 4.5) = 23.0$$

そして、これらの値を用いることで、計算値と測定値の良好な一致を得ることができた。また、推定した芝面の熱伝達率(対流)は、図－6に示すように通常計算に用いられるユルゲスの実験式で算出される熱伝達率に比べてやや低いことがわかった。

5. 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、および京都大学鉾井修一助教授に深く感謝いたします。

なお、本報では、芝生を2分割したモデルでの定常計算によって物性値の妥当性の確認と熱伝達率の推定を行っているが、次報では、n分層についての日射吸収および、水分移動の経時変化を考慮した式による非定常計算を行った結果について述べる予定である。

参考文献

- 1) 鉾井修一：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)
- 2) 恩村定幸 松本衛 鉾井修一：

屋上芝生植栽による冷却効果に関する研究－その1
日本建築学会大会学術講演梗概集

(1992, pp767-pp768 D環境)

屋上芝生植栽による冷却効果に関する研究－その2
日本建築学会大会学術講演梗概集

(1993, pp1531-pp 1532 D環境)

3) 恩村定幸 松本衛 鉾井修一：

屋上芝生植栽による冷却効果に関する研究－その2
日本建築学会近畿支部研究報告集

(1993, pp77-pp80 第33号 計画系)

4) 恩村定幸：スカイグリーン工法の熱的効果に関する研究－その1 浅沼組技術研究所報

(No.4 1992, pp96-pp109)