

コケを用いた軽量緑化パネルの開発

萩島, 理
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー環境共生工学部門

谷本, 潤
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー環境共生工学部門

高尾, 京子
九州大学大学院総合理工学研究科環境エネルギー工学専攻

<https://doi.org/10.15017/16670>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 24 (3), pp.297-303, 2002-12. 九州大学大学院総合理工学
府
バージョン :
権利関係 :

コケを用いた軽量緑化パネルの開発

萩島 理^{*1†}・谷本 潤^{*1}・高尾 京子^{*2}

(平成14年 10月 31日 受理)

Development of Wall Unit System covered with Moss Plant

Aya HAGISHIMA, Jun TANIMOTO, and Kyoko TAKAO

†E-mail of corresponding author: aya@cm.kyushu-u.ac.jp

First, the authors reported the outline of development of the wall unit system covered with moss plant. Since the adopted species of moss requires not the soil but the perforated materials for fixing with rhizoid, it may be possible to decrease the weight of wall green system. The five types of moss panel, which have different basal materials, were exposed under the natural condition for more than six months in order to confirm the growing process. Second, to grasp the features of evaporation, thermal conductance and solar reflectivity of moss panel, they conducted the several experiments. At last, numerical simulation based on the urban canopy model, which contains the sub model for estimating the thermal effect of moss panel based on the experiment, were performed. The calculation results implied that the maximum temperature of the wall surface and urban air in hot summer decrease by about 7 degree and 0.3 degree respectively.

Key words: *Green Building, Wall unit System covered with Plants, Moss plant, Observation of vegetative process, Evaporative ratio, Thermal Conductance, solar reflectivity, Urban Canopy Model*

1 緒言

近年、ヒートアイランド緩和や環境共生の視点から、建築物の緑化が大きな関心を集めている。特に、屋上緑化については東京都の屋上緑化条例をきっかけとして、建設会社や屋根材、防水材メーカーにより様々なシステムが開発されており、植栽による空調負荷低減効果や熱特性に関する実験的研究も多数行われている。一方、建築外表面の中でも屋根に比べ広い面積を占める壁面の緑化工法については、まだ多くの制約、問題が残されており、殆ど普及していないのが現状である。

従来からよく知られている壁面緑化の手法としては、ツタやヘデラなどのつる植物により壁面をスクリーン状に覆う方法が挙げられる。梅干野ら¹⁾は、ツタスクリーンの熱特性に関する実測を行い、日射遮蔽による空調負荷低減効果を明らかにしている。この手法は、壁面の下部または屋上に植物用プランタを配置し、つる植物を誘引するための金網やワイヤーを壁面に張ると

いった、比較的軽微な工事で済むが、オフィスビルなどの大規模壁面での適用には困難な点も多い。これに対して、人工軽量土壌を充填したプランタやボックスを壁面に固定する事で新たな人工地盤を壁面に構築する手法も提案されている。土壌を充填するプランタやボックスに散水及び排水のシステムを一体化したユニットの開発も行われており、建物や構造物への施工実績も増えつつある。しかし、人工軽量土壌を用いているとはいえ、緑化ユニットの重量は大きく価格も高いため、一般化は難しいのが現状である。

以上の背景から、壁面緑化手法としては、軽量、安価で、施工やメンテナンスの容易なシステムが望まれていると言えよう。そこで、筆者らは、通常の種子植物とは異なり、土壌を必要とせず仮根により多孔質体に付着する性質を持つコケに着目し、軽量緑化パネルの開発を行った。本稿では、緑化パネルの作成概要及び緑化パネルの熱特性に関する実験結果についての報告を行う。また、実験結果に基づき都市キャノピーモデル中に壁面緑化の効果を組み込んだ数値計算を行い、緑化パネルの表面温度特性、都市気温や建物空調負荷への影響の把握を行う。

*1 エネルギー環境共生工学部門

*2 環境エネルギー工学専攻

2 緑化パネルの作成概要

2.1 試験体概要

作成した緑化パネル試験体の模式図をFig.1に示す。コケの中でも特に乾燥に強く、直射日光に対する耐性が高いギボウシゴケ科のスナゴケを取り上げ、2通りの方法で試験体を作成している。第1は、稲藁を基盤材としてコケをシート状に成形した既製品（以下、[S]とする）をプラスチック板に接着したものである。第2は、蒔きゴケと呼ばれる手法で種コケを基盤材に育成定着させた試験体である。後者の試験体の基盤材は、鉛直設置時でもコケ生育に必要な水分を保持できる保湿性、コケが仮根により定着するための多孔質性、という2つの条件を満たす必要がある。そこで、高分子吸収体（以下、[MA]とする）、カーペット（以下、[P]とする）、コナツヤシ成形シート（以下、[C]とする）、園芸用保湿材（以下、[HK]とする）の4種類を基盤材とする試験体を作成した。いずれの試験体もコケが基盤材から剥れないようにコケ上部をプラスチック網で覆っている。

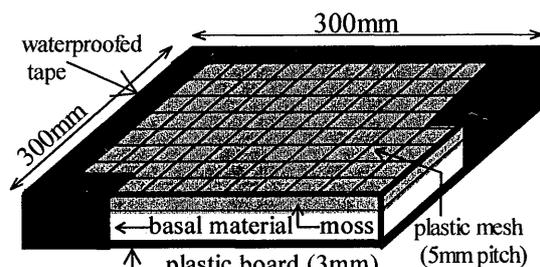


Fig.1 Schematic diagram of sample of Moss-covered panel

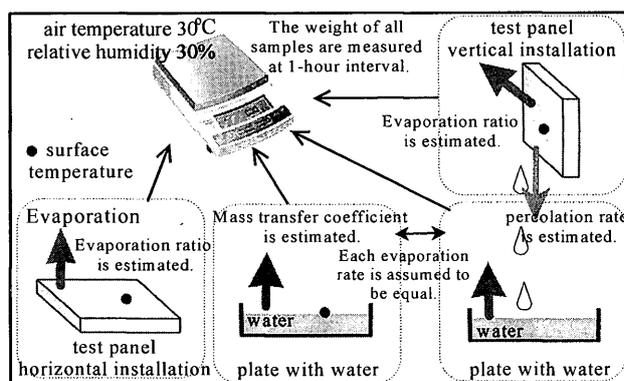


Fig. 2 Apparatus of experiment on evaporation from samples

2.2 各試験体のコケの生育状況

高分子吸収体を基盤材とする[MA]は、作成後夏季7月から6ヶ月間屋外に設置したが、降雨による水分が常に保持された環境がスナゴケの生育に不相当であったためか、コケの多くが腐敗してしまった。

一方、コナツヤシ成形シートを基盤材とする[C]は、作成した試験体の中で最もコケの定着、成長が早く、基盤材に種ゴケを蒔いて屋外に1ヶ月間設置した後に緑化パネルとして使用可能な状態となった。

カーペットを基盤材とする[P]、園芸用保湿材を基盤材とする[HK]は、作成後数ヶ月屋外に設置したが、コケの定着及び成長の状況は良好であった。尚、[P]は、作成後2ヶ月間の屋外曝露の後、約2ヶ月間人工気候室にて蒸発特性に関する実験を行ったため、室内実験終了時点では太陽光不足と乾燥によりコケは黄変していたが、その後再び屋外に設置したところ3ヶ月を経て徐々にコケは緑色に回復した。

3 緑化パネルの熱特性に関する実験

3.1 蒸発特性に関する実験の概要

測定概要をFig.2に、測定項目をTable 1にそれぞれ示す。

空気温度30°C、相対湿度30%に設定した人工気候室に、作成した緑化パネルを湿潤状態にして静置し、乾燥過程における蒸発量の時変動を測定する。また、試験体とほぼ同じ大きさのトレーに水を張り（以下、「水

Table 1 Measurement item

Item	Object
weight	[P] (horizontal installation:3, vertical installation:3), [S] (horizontal installation:3, vertical installation:2)
	[N] (horizontal installation:1, vertical installation:1)
	Plate filled with water, Plate for receiving percolation water
surface temperature	Surface of sample panels, water surface of plate
air temperature, humidity	

[P] means sample carpet panel revealed by moss.

[S] means sample panel made by the ready-made moss sheet.

[N] means sample carpet panel with no covering of moss.

張りトレー」とする)、同様に蒸発量の時変動を測定する。尚、測定対象とした試験体は、カーペットを基盤材とする[P]と稲藁を基盤材とする[S]の2種類で、水平及び垂直にそれぞれ設置している。また、参照用としてコケの無いカーペットだけの試験体（以下、[N]とする）を併せて測定している。

水張りトレーからの蒸発量は(1)式、試験体からの蒸発量は蒸発比を用いて(2)式で表される。

$$EV_{water} = k_x (X_{sat}(T_{s,water}) - X_{air}) \dots (1)$$

$$EV_{sample} = A \cdot re \cdot k_x (X_{sat}(T_{s,sample}) - X_{air}) \dots (2)$$

A:コケの表面積[m²/m²], EV:蒸発量[kg/m²S], k_x:物質移動係数[kg/(m²S(kg/kg³))], re:蒸発比[-], X_{air}:空気絶対湿度[kg/kg³], X_{sat}(T_s):表面温度基準飽和絶対湿度[kg/kg³], 添え字-water:水張りトレー, 添え字-sample:試験体

試験体の蒸発特性を表すパラメータである、コケの表面積比 A 及び蒸発比 re は、次の手順で求められる。まず、水張りトレーの水表面温度、空気絶対湿度の実測値と水張りトレーの1時間毎の重量測定値から得られる蒸発量を(1)式に代入する事で、物質移動係数 k_x を求める。次に、試験体と水面の物質移動係数は等しいと見なし、試験体表面温度、試験体蒸発量の実測値と前述の物質移動係数を(2)式に代入する事で、コケ表面積比と蒸発比の積 $A \cdot re$ を推定する。最後に、実験開始時点の湿潤状態の試験体を飽和面と見なして蒸発比が1であると仮定する事で、コケ表面積比 A 及び蒸発比の経時変化を得る。

尚、垂直に設置した試験体の下部には、透水受けのトレーを設置し、試験体と同様1時間毎に重量を測定している。この際、透水受けトレーには予め水を張っている。水張りトレーと透水受けトレーの重量変化の差から、垂直設置試験体からの透水量を推定する事が可能となる。

Table 2 Saturated water content and area factor

Type of sample	installation	Dry weight [kg/m ²]	Saturated water content [-]	Area factor [-]	Sample number
[N]	H	2.912	0.655		1
	V	3.802	0.391		1
[P]	H	6.160	1.228	1.25	3
	V		0.846	1.24	3
[S]	H	7.920	1.520	1.19	3
	V		0.599	1.43	2

'H' and 'V' mean the horizontal and vertical installation, respectively.

3.2 蒸発特性に関する実験の結果

実験開始及び終了時点の試験体重量の測定値から得られた試験体の乾燥重量及び飽和含水比をTable 2に示す。尚、試験体が湿潤から乾燥への過程で、蒸発量が 10^{-8} kg/m²sのオーダーになった段階を乾燥状態とみなしている。

カーペットを基盤材としてコケを育成した試験体[P]は、基盤材のみでコケ無しの試験体[N]に比べ、水平設置、垂直設置のいずれも飽和含水比が大きな値を示しており、コケによる保水効果が確認できる。また、試験体[P]及び[S]を水平に設置した場合の飽和含水比は、いずれも1以上の大きな値となっている。

各試験体の表面温度及び蒸発量の経時変化をFig.3、Fig.4にそれぞれ示す。いずれの試験体も実験開始直後の湿潤状態では $2.5 \sim 3 \times 10^{-5}$ kg/m²sの蒸発量を示し、その後徐々に減少している。また、蒸発量の減少と同期して、試験体表面温度が上昇している事が確認できる。

コケ無し試験体[N]は、水平設置と垂直設置のいずれも20~30時間後に蒸発量は急激に減少している。カーペットにコケを育成した試験体[P]は、水平設置の場合90時間後、垂直設置の場合80時間後に、蒸発量はゼロに近い値となっている。一方、稲藁を基盤材とする試験体[S]の蒸発量がゼロ近くなるのは、水平設置の場合150~200時間後、垂直設置の場合75~

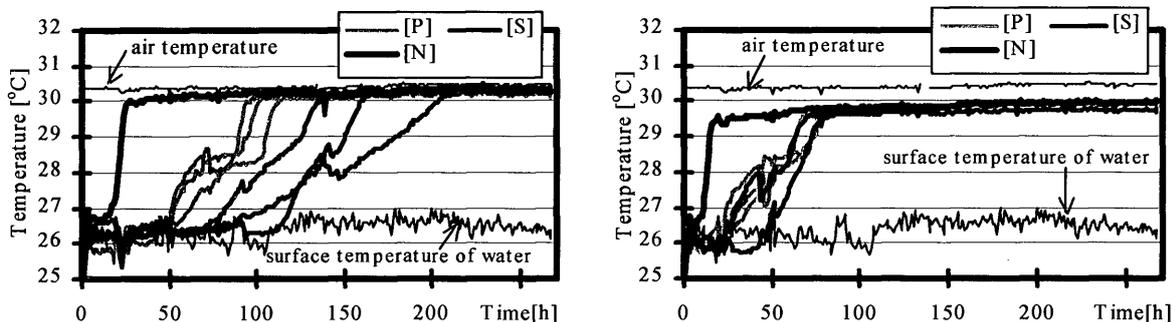


Fig.3 Variation of the surface temperature of the samples

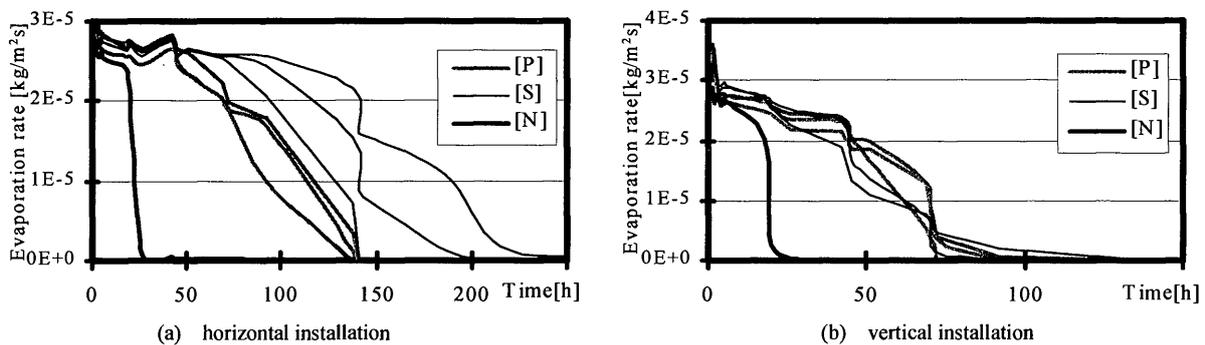


Fig.4 Variation of the evaporation rate of the samples

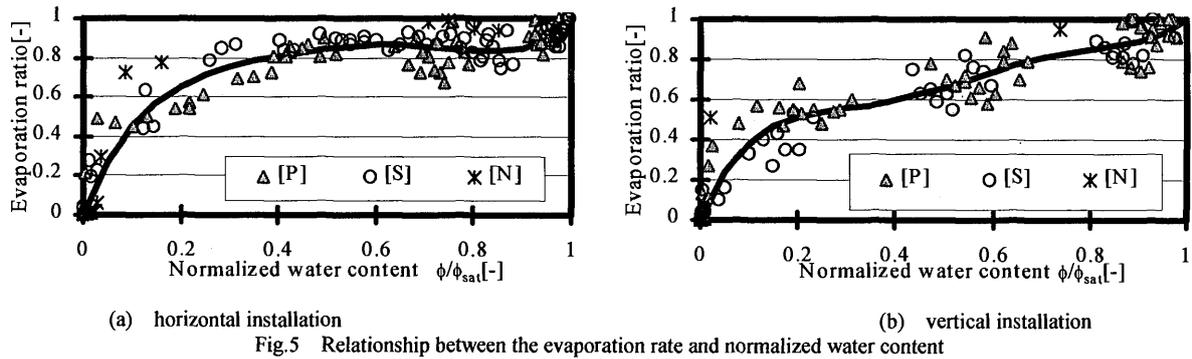


Fig.5 Relationship between the evaporation rate and normalized water content

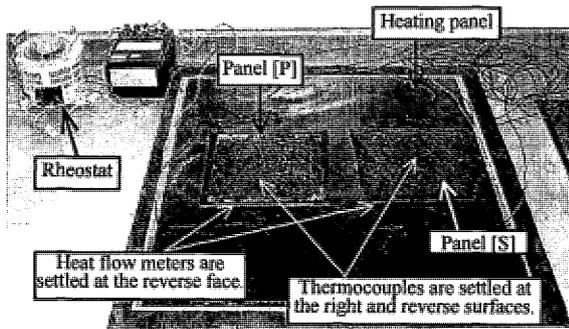


Fig.6 Photograph of the measurement of thermal conductance

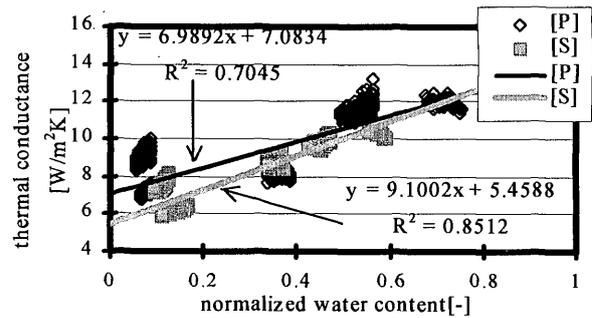


Fig.7 Relation between the water content and thermal conductance

100時間後である。

次に、各試験体の蒸発比と正規化含水比の関係をFig.5に示す。水平設置と垂直設置のいずれも、プロットは上に凸の曲線上に集まっている。土壌やコンクリートでは蒸発比-正規化含水率特性が下に凸の曲線となるのに比べると、本実験の試験体はいずれも乾燥しやすいと言えよう。尚、蒸発比-正規化含水比にはコケの有無による特性差が見られない事に鑑みると、Fig.4において試験体[P]及び[S]の蒸発量がコケ無し試験体[N]に比べ大きくなっている原因は、Table 2で示したコケの有無による飽和含水量の違いにあると言える。

ここで、試験体[P]と試験体[S]のプロット群から、最小二乗法により次の多項近似式を得た。

水平設置

$$y=17.003x^5-44.048x^4+44.139x^3-22.4018x^2+6.307x \quad (3)$$

垂直設置

$$y=19.847x^5-54.974x^4+56.318x^3-26.138x^2+5.948x \quad (4)$$

y:蒸発比[-], x:正規化含水比[-]

3.3 熱コンダクタンスの測定

面状発熱体の上に試験体[P]及び試験体[S]を静置し、熱コンダクタンスの測定を行う。測定状況をFig.6に示す。試験体の底面に貼付した熱流センサーから得られる試験体の通過熱流を、試験体の底面とコケ表面の温

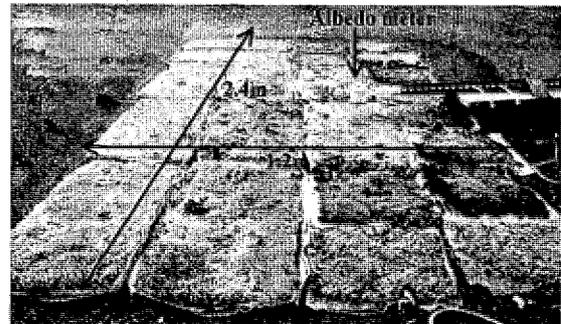


Fig.8 Photograph of the measurement of solar reflectance

度差で除して、熱コンダクタンスを推定している。尚、測定は、試験体の含水比の異なる条件で5回行っている。

実験より得られた熱コンダクタンスと正規化含水比の関係をFig.7に示す。試験体[P]と[S]のいずれも、正規化含水比の増加に伴い熱コンダクタンスが上昇している。また、稲藁を基盤材とする試験体[S]の熱コンダクタンスは、試験体[P]に比べ概ね小さな値となっている。

3.4 コケの日射反射率の測定

Fig.8に示すように、育生状態の良いコケを1.2m×2.4mの範囲に敷き詰め、コケの上部6cmの高さにアルベドメーターを設置し、3日間連続で入射日射量、反射日射量を測定し、日射反射率の推定を行った。測定の結果得られたコケの平均日射反射率は0.198である。

4 コケ緑化壁面に関する数値計算

4.1 数値モデルの概要

コケ緑化パネルを建築壁面に適用した場合の都市熱環境の緩和効果を明らかにする事を目的として、都市気温の形成要因解析のために筆者らが構築してきた改良 建築-都市-土壌連成系モデル²⁾(以下、Revised-AUSSSMとする)を用いた数値計算を行う。

Revised-AUSSSMの模式図をFig.9に示す。Revised-AUSSSMでは、同一形状の直方体建物が等間隔に無限に並ぶ理想的な都市を想定しており、大気、土壌、建物の各1次元サブモデルを完全連成系として取り扱っている。限られた計算機資源の制約下で、都市計画、建築計画、設備計画の様々な因子を網羅的にモデルに組み込むために、各サブモデルの精粗のバランスに留意した構成となっており、自然地被面の蒸発効率の土壌含水比依存性、人工被覆面における散水後の蒸発、空調システムによる排熱特性の違い等に関するいくつ

かの簡易モデルを内包している点を特徴としている。Revised-AUSSSM中の建物サブモデルに含まれる壁体表面熱収支は、コケ緑化パネルの影響を考慮した場合(5)~(7)式で表される。

$$(1-\rho)SR + \varepsilon \cdot LR - \varepsilon \sigma T_{moss,surf}^4 = CD + l \cdot EV \quad (5)$$

$$CD = k(\phi/\phi_{max}) \cdot (T_{moss,surf} - T_{moss,bottom}) \quad (6)$$

$$EV = A \cdot re(\phi/\phi_{max}) \cdot k_x (X_{sat}(T_{moss,surf}) - X_{air}) \quad (7)$$

CD:伝導熱量[W/m²], k:緑化パネルの熱コンダクタンス[W/m²K], l:相変熱[J/kg], LR:入射長波放射量[W/m²], SR:入射日射量[W/m²], T_{moss,bottom}:緑化パネル底部温度[K], T_{moss,surf}:緑化パネル表面温度[K], ε:放射率[-], φ:含水比[kg/kg], φ_{max}:飽和含水比[kg/kg], ρ:日射反射率[-], σ:ステファンボルツマン係数[W/m²K⁴]

また、コケの水分収支式は(8)式で表現される。

$$\gamma_{dry} \frac{\partial \phi}{\partial t} = P - EV \quad (8) \quad \text{但し、} \phi < \phi_{max}$$

P:散水量[kg/m²], γ_{dry}:緑化パネルの乾燥重量[kg/m²]

本稿では、(5)~(7)式を代入した壁体の熱伝導方程式と(8)式を連成することにより、コケ緑化パネルの熱的

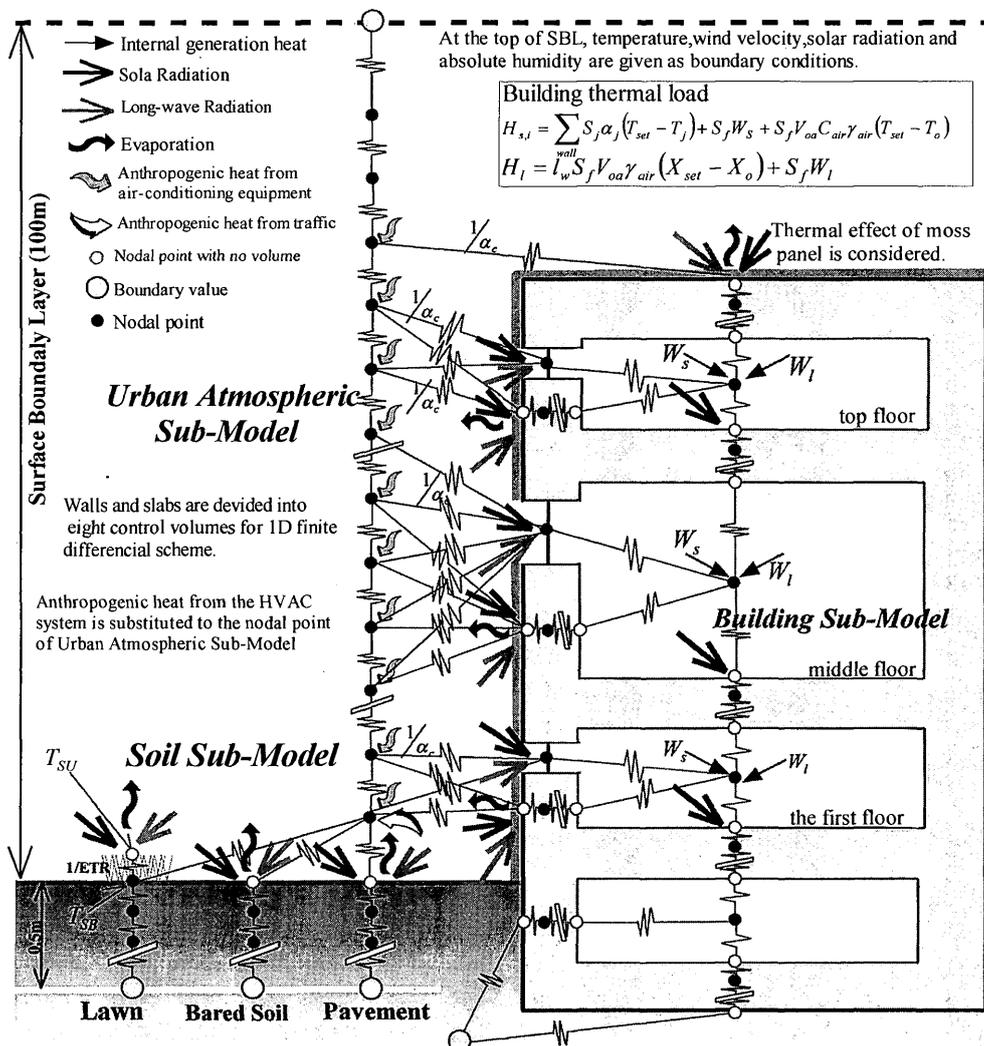


Fig.9 Frame of revised Architecture - Urban - Soil simultaneous Simulation Model (AUSSSM)

Table 3 Basic assumptions used in the Standard Solution

Street configuration	building width 32 m, road width 16.88 m, building height 23.8 m, floor area ratio: 700%, gross ratio of building volume to lot 300%, Staggered array
Solar radiation reflectivity	Building wall 0.6, asphalt pavement 0.1, soil 0.3, lawn 0.25
Wall	plaster board (9 mm)+insulation (20 mm)+concrete (200 mm)+tile
Glazing	Transparent glass of 6 mm thickness, ratio of glazing 35%
Roof	Insulation(20mm)+Concrete (180mm)
Covering ratio	asphalt pavement : soil : lawn = 1 : 1 : 1
Anthropogenic heat from traffic	9.7 W per square meter of the area of the block at the peak
Internal heat generation of building	sensible heat: 56 W per square meter of the area of the room at the peak latent heat: 13 W per square meter of the area of the room at the peak
HVAC System	Air Source Heat Pump 30%, Turbo Refrigerator 31%, Gas-Fueled Absorption Refrigerator 39%
Setting of air-conditioning	26°C, RH60% constant (8:00 - 21:00), ventilation 2.7 m ³ h ⁻¹
CASE 1	The wall is covered with tile.
CASE 2	The wall is covered with moss panel. The assumption of amount of precipitation is 10 kg/m ² that occurs once per 2 days at 6 to 7 o'clock. Total amount of precipitation is presumed to be absorbed in the moss panel entirely.
CASE 3	The roof is covered with the lawn.

効果を考慮する。尚、蒸発比-正規化含水比関係は(4)式、熱コンダクタンス-正規化含水率関係はFig.4の試験体[S]の回帰式、コケの日射反射率は3.4節の測定結果をそれぞれ用いる。

4.2 計算条件

Table 3に計算条件を示す。壁面緑化を行わず外壁をタイル張りとしたcase 1、コケパネルによる壁面緑化を行ったcase 2、屋上に土壌厚さ10cmの芝生植栽を行ったcase 3の3ケースについて計算を行う。

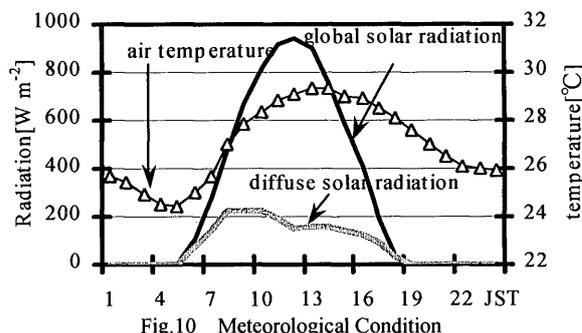
街路形状については、東京23区の都市形状に関する調査結果に基づき決定している³⁾。交通排熱については、ピーク値及び時変動特性は東京都23区の平均的な値⁴⁾としている。建物内部発熱量はオフィスビルの標準的な値とし、時変動を考慮している。空調システムの割合については大阪府の値を、空調排熱の放出高さについては筆者らの調査結果を参考にしてそれぞれ決定している。

接地層上端100mを境界条件として、温度は東京・大手町上空100mの超過危険率10%適用夏季設計用データ、日射量は同じく超過危険率10%の夏季設計用日射量(東京)データを用いる。また、接地層上端における比湿0.0189kg/kg、風速5m/s一定としている。Fig.10に接地層上端における気温及び日射量の境界条件を示す。太陽位置算出にあたっては8月1日、東京を仮定する。

計算周期は7日を1周期とし、各周期の最終日深夜に20mmの降雨を与えている。19日間の助走計算後、20,21日目の結果を以下の考察に用いる。

4.3 計算結果

case 2におけるコケ緑化パネルの含水比の経時変化を、壁面方位別に地面付近(以下、下部とする)と建物屋根付近(以下、上部とする)についてFig.11に示



す。いずれの方位及び高さについても、20日目の8時の散水で飽和状態となったのち、約2日間の蒸発により含水比は0.2以下の小さな値となっている。特に、風速が強く日当たりの良い東面上部は、21日目の午前中に含水比がほぼゼロの乾燥状態となっている。このことから、開発したコケ緑化パネルを高層階の壁面に設置する際には、散水間隔を更に短くする必要があると考えられる。次に、case 1及びcase 2における建物壁面の表面温度の経時変化をFig.12にそれぞれ示す。いずれの方位、高さも、コケ緑化パネルによる蒸発冷却により、case 2はcase 1に比べピークで約7~9°C低い値を示している。

20日目の13時における気温の鉛直分布をFig.13に示す。case 1とcase 3はほぼ同じ値を示しているのに対して、コケによる壁面緑化パネルを考慮したcase 2はキャノピー空間内の気温が他の2ケースに比べ低くなっている。case 2とcase 1及びcase 2の地上2.5mにおける日最高気温差は、約0.3°Cである。次に、建物の全熱空調負荷の経時変化をFig.14に示す。壁面緑化を行ったcase 2はcase 1に比べピーク時で約20W/[建築面積m²]小さな値となっている。また、屋上芝生植栽を行ったcase 3はcase 1に比べピーク時で約30W/[建築面積m²]小さい。

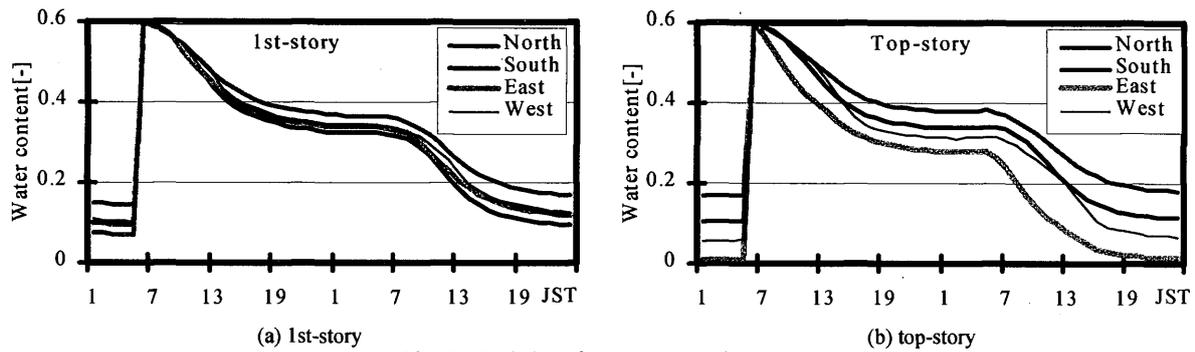


Fig.11 Variation of water content of moss panel

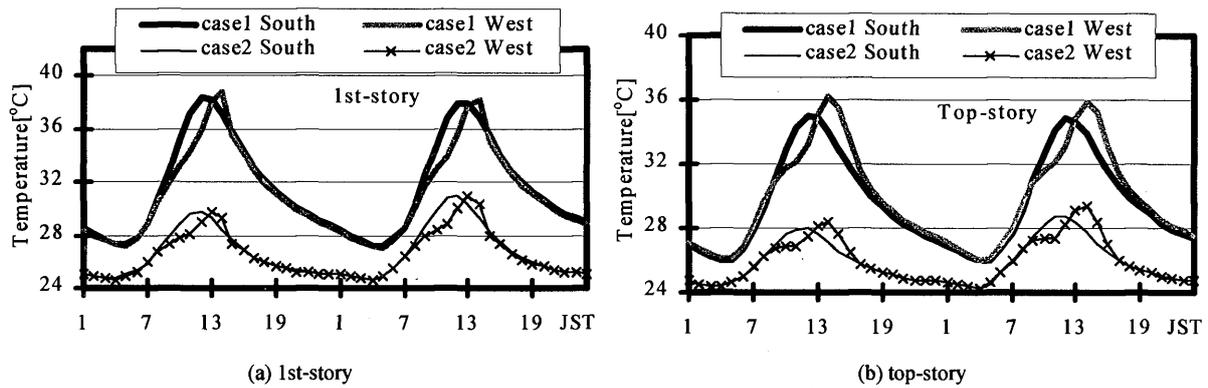


Fig.12 Variation of surface temperature of wall

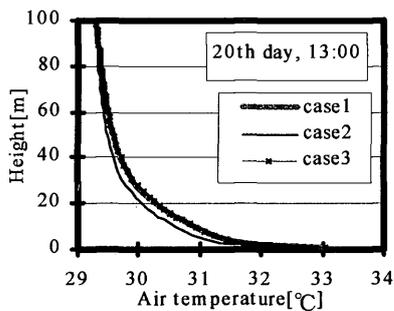


Fig.13 Vertical distribution of air temperature



Fig.14 Variation of building thermal requirement of HVAC system

5 結語

本稿では、スナゴケを用いた軽量壁面緑化パネルの開発概要について報告した。次に、実験に基づき開発した緑化パネルの蒸発比-正規化含水比特性、熱コンダクタンス-正規化含水比特性及び日射反射率を明らかにした。最後に、実験結果に基づき壁面緑化の熱的効果をモデル化し、都市キャノピーモデル中に組み込んだ場合の数値計算を行い、壁面緑化の表面温度特性及び都市気温への影響を明らかにした。今後は、実大スケール試験体の屋外長期曝露など、実用化のための諸検討を行う予定である。

謝辞

本研究は平成12年度総理工奨励研究の助成を受けた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 梅干野晃, 茶谷正洋, 八木幸二, ツタの西日遮蔽効果に関する実験研究, 日本建築学会計画系論文集, No.351, pp.11-19 1985.5
- 2) 萩島理, 谷本潤他 2 名, 改良・建築-都市-土壌連成系モデル (AUSSSM) による都市高温化の構造解析第 1 報 モデルの理論構成及び標準解, 日本建築学会計画系論文集, No.550, 2001.12
- 3) 中村修, 宮下康一他 2 名, 東京都 23 区の土地利用数値情報に基づく地表粗度要素としての街並の実状分析, 日本風工学会誌 No.84, pp.59-69, 2000.7
- 4) 末次忠司, 河原能久他 2 名, 都市空間におけるヒートアイランド現象の軽減に関する研究(その 1) 土木研究所資料第 3722 号 2000.3