

都市における屋上被土・緑化によるパッシブクーリング効果の簡易定量化手法に関する基礎的研究

谷本, 潤
九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

林, 徹夫
九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

片山, 忠久
九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

<https://doi.org/10.15017/17400>

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 18 (1), pp.19-24, 1996-06-01. 九州大学大学院総合理工学研究科
バージョン：
権利関係：

都市における屋上被土・緑化によるパッシブクーリング 効果の簡易定量化手法に関する基礎的研究

谷本 潤*・林 徹夫*・片山 忠久*

(平成8年2月29日 受理)

A Fundamental Study on Simplified Quantification Method for the Passive Cooling Effect of Soil Covered Construction in an Urban Area

Jun TANIMOTO, Tetsuo HAYASHI and Tadahisa KATAYAMA

A simplified numerical calculation procedure of water evaporation from a soil was proposed combined with simultaneous solution of heat transfer equation at its surface for a quantitative prediction of passive cooling effect of soil covered constructions with a certain accuracy. If the evaporation ratio or saturation ratio of the soil was defined as a function of water content of the soil in advance, the proposed method was able to describe the wet condition of the covering soil and to reduce calculation load exceedingly compared with the conventional procedure based on the simultaneous hygrothermal transfer equation. The functions of the evaporation ratio and saturation ratio were identified respectively determined by a least square method using Richards Equation as its exact solution. Discrepancies in phenomenon can be found between the exact solution and the simplified one which assumes a constant evaporation ratio. However, good agreements of calculation results were confirmed between the proposed method and the exact solution.

1. 緒 言

被土建築、屋上芝生緑化建築は屋根貫流熱取得の軽減によるパッシブクーリング手法として有効である。

さらに、事務所ビルの屋上等、有効に利用されていない膨大な面積の陸屋根を考えると、室内熱負荷を縮減する効果もさることながら、熱負荷軽減によりクーリングタワー等からの廃熱量（一般に、空調機負荷の $\{1 + 1 / (\text{空調システムの COP})\}$ 倍に増幅されて排出される）が少なくなること、地表面改変によりコンクリート、アスファルト被覆にはない蒸発冷却が生じること等、高温化しつつある都市熱環境に及ぼす効果も小さくないものと考えられる。

被土、屋上芝生植栽の熱的效果の定量的評価、予測のための現時点での問題点としては、

(1)被土部分の熱水分同時移動解析の問題、水分移動を表す物性値が詳細に把握されていない点、室系モデルとの連成を考えると出来得る限り簡易な取り扱いが望ましいこと

(2)芝生植栽の熱水分特性のモデル化の問題（精粗いろいろあり得る¹⁾²⁾）

などが考えられる。以上のような背景から本論文では、(1)に関連して、被土からの蒸発による熱的效果を簡易

的に取り扱う手法について提案する。

2. 地表面からの蒸発量と従来の簡易計算手法

一般ぬれ面からの蒸発量 V [kg/m²h] は絶対湿度基準物質移動係数 k_x [kg/m²h (kg/kg)] (ただし、 $k_x = \alpha_c / C_{pm}$ ここで α_c : 対流熱伝達率 [kcal/m²h°C], C_{pm} : 湿り比熱 [kcal/kg°C]) を用いて、

$$V = k_x \cdot (X_{surf} - X_0) \quad (1)$$

と表される。ここで、 X_{surf} : 一般ぬれ面における表面絶対湿度 [kg/kg], X_0 : 空気絶対湿度 [kg/kg] である。特に、水面等の完全ぬれ面（飽和面）では、

$$X_{surf} = X_s(T_s) \quad (2)$$

なる関係が成立する。ここで、 $X_s(T_s)$: 土壌表面温度 T_s [°C] に対する飽和絶対湿度 [kg/kg] である。一般ぬれ面である土壌に対しては、後述する土壌の熱水分同時移動方程式を解いて地表面の水分化学ポテンシャル μ_{surf} [J/kg] を求め、

$$\mu_{surf} = R_v \cdot T_s \cdot \ln(P_s / P_{ss}) \quad (3)$$

の関係を用いて X_{surf} を計算する必要がある。ここで R_v : 水蒸気のガス定数 [Pa · m³/kgK], P_s : 土壌表面の水蒸気分圧 [Pa], P_{ss} : T_s における飽和水蒸気圧 [Pa]

*熱エネルギーシステム工学専攻

辺に何らかの形で表層の離散化要素以深の土壤からの水分伝導を表す項が必要となる。

次に、飽和重量含水率と重量含水率との比（以下、 φ/φ_{sat} とする）に対する飽和度（以下、 r_s とする）、蒸発比（以下、 r_e とする）との関係を考える。絶乾時および飽和時における体積含水率と水分化学ポテンシャルの関係および(3)式から、 $r_s=0$ （絶乾時）、 $r_s=1$ （飽和時）は明らかである。 r_e については、 $r_e=1$ （飽和時）は成り立つが、絶乾時にも $r_e=0$ が成り立つものとする。このことから、 r_s (φ/φ_{sat})、 r_e (φ/φ_{sat}) は $\varphi/\varphi_{sat}=0$ で0、 $\varphi/\varphi_{sat}=1$ で1を通る区間 $[0, 1]$ で定義された関数（それぞれ別の関係形をもつ）であると考えられる。高含水率ほど飽和蒸発に近くなるので、大略 r_s (φ/φ_{sat})、 r_e (φ/φ_{sat}) は増加関数であると推量される。

一般に r_s (φ/φ_{sat})、 r_e (φ/φ_{sat}) は被土厚、被土種類によりその関数形は異なるものと考えられるが、変数として土壤の重量含水率 φ そのものではなく飽和重量含水率で無次元化した φ/φ_{sat} を用いているため、逆にかなり類似の傾向を示すものとも考えられる。ここで、あらかじめ r_s (φ/φ_{sat})、 r_e (φ/φ_{sat}) の関数形が与えられていれば、(6)、(7)式と非定常熱伝導方程式を連立させて、被土全体の重量含水率、蒸発量、温度を求めることができることになる。その際、熱伝導方程式の地表面における蒸発量を表す境界条件として、飽和度を用いる場合は(4)式、蒸発比を用いる場合は(5)式を考慮すればよい。

4. 数値実験による関数形の同定

本論では r_s (φ/φ_{sat})、 r_e (φ/φ_{sat}) の関数形を Fig. 2 に示すように6つの内分点を通る折線により表現し、精算法と比較することで、誤差最小となる関数形を同

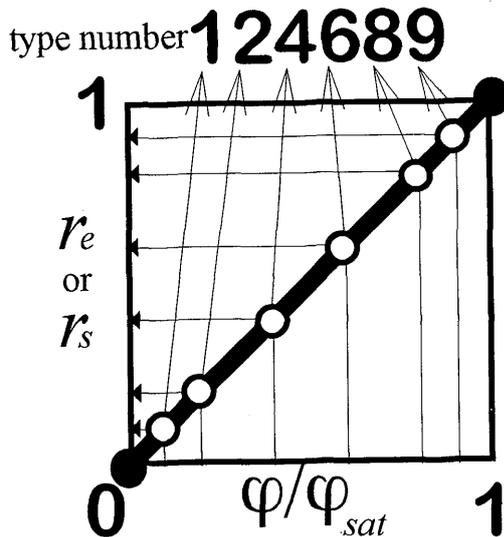


Fig. 2 r_s (φ/φ_{sat}) and r_e (φ/φ_{sat})

定した。単純な dynamic programming の問題と異なるので、全ての折線のケースについて数値計算を行い精算法との比較を行わなければならないが、その場合 $6^6=46656$ 通りについて計算する必要がある。勿論、内分点数を減らせば計算ケースは減るが、それでは求める関数形の精度が悪化する。そこで、求める関数形は増加関数であると仮定して、検討ケースを462通りに集約した。Fig. 2 中の type number は折線の経由点により表される数値実験の検討ケースを示し (type number の各数字の1/10倍が6内分点の縦軸値を示す)、関数形は飽和度、蒸発比ごとに被土厚 100mm, 200mm, 300mm について求めた。

比較対象とする精算法には、液水移動のみを考慮した Richards による熱水分同時移動方程式⁹⁾

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (8)$$

$$C_s \gamma_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (9)$$

を用いた。ここで、 θ : 体積含水率 [m^3/m^3]、 D : 水分拡散係数 [m^2/h]、 k : 不飽和透水係数 [m/h] である。地表面の水分移動に関する境界条件としては、蒸発によるフラックスに加えて、散水浸潤時には降水によるフラックスを与える第2種境界条件、湛水浸潤時には表面を飽和体積含水率とする ($\theta_{surf}=\theta_s$) 第1種境界条件を与えた。土壤は水分物性値が既知の砂質土壌¹⁰⁾とした。実際の計算は、降水量データを付加した東京の標準気象データ⁸⁾を用いて、助走期間の5月から9月までの夏期について行った。誤差の評価対象は6～9月の被土表面からの蒸発による潜熱移動量とした。

Table 1～Table 3 に被土厚、略算の方法ごとに、462 ケースのうち蒸発潜熱移動量の精算との誤差の絶対値平均の小さい順に3ケースについて、表面温度、重量含水率の各比較対象ごとに誤差絶対値の平均、誤差の標準偏差、精算結果との相関係数をまとめて示した

(type number が示す関数形については Fig. 2 参照のこと)。また Fig. 3 には、飽和度、蒸発比を用いた略算と精算による8月の被土表面温度、蒸発潜熱量、被土平均重量含水率の経時変化を被土厚 100mm の場合について示した。表面温度、蒸発潜熱量については比較のために蒸発比を常時0.6一定とする略算の結果も併せて示した。

本提案手法により飽和度、蒸発比を変動させる場合、いずれの被土厚でも、蒸発比を一定とする方法より精度が高くなっている。しかし、一般的に飽和度よりも蒸発比を変動させる方法の方がより精算との誤差が小さいことがわかる。8月の初頭の降水後数日間の被土が飽和に近い状態では、精算に対して、蒸発比一定の手法を含めていずれの方法も良い一致を示しているが、

Table 1 Coefficients of correlation, mean values of absolute error and standard deviations of error (soil depth; 100mm)

using saturation ratio

type number	latent heat flux of evaporation			surface temperature			water content		
	coefficient of correlation	mean value of absolute error [kcal/m ² h]	Standard deviation of error [kcal/m ² h]	coefficient of correlation	mean value of absolute error [°C]	Standard deviation of error [°C]	coefficient of correlation	mean value of absolute error [kg/kg]	Standard deviation of error [kg/kg]
199999	0.8990	37.55	63.75	0.9362	1.59	2.54	0.9791	0.0396	0.0205
999999	0.8922	37.95	64.72	0.9332	1.60	2.58	0.9653	0.0278	0.0309
299999	0.8963	38.45	64.86	0.9344	1.63	2.58	0.9783	0.0387	0.0211

using evaporation ratio

type number	latent heat flux of evaporation			surface temperature			water content		
	coefficient of correlation	mean value of absolute error [kcal/m ² h]	Standard deviation of error [kcal/m ² h]	coefficient of correlation	mean value of absolute error [°C]	Standard deviation of error [°C]	coefficient of correlation	mean value of absolute error [kg/kg]	Standard deviation of error [kg/kg]
144899	0.9342	24.29	40.87	0.9772	0.91	1.52	0.9695	0.0264	0.0284
144999	0.9347	24.31	41.06	0.9770	0.91	1.53	0.9713	0.0254	0.0278
166999	0.9302	24.44	43.99	0.9726	0.91	1.63	0.9734	0.0242	0.0282
*	0.6916	58.35	93.99	0.8904	2.29	3.42			

*evaporation ratio 0.6 constant

Table 2 Coefficients of correlation, mean values of absolute error and standard deviations of error (soil depth; 200mm)

using saturation ratio

type number	latent heat flux of evaporation			surface temperature			water content		
	coefficient of correlation	mean value of absolute error [kcal/m ² h]	Standard deviation of error [kcal/m ² h]	coefficient of correlation	mean value of absolute error [°C]	Standard deviation of error [°C]	coefficient of correlation	mean value of absolute error [kg/kg]	Standard deviation of error [kg/kg]
199999	0.8754	40.71	71.86	0.9031	1.67	2.76	0.9327	0.0385	0.0343
189999	0.8770	40.78	71.18	0.9057	1.68	2.74	0.9364	0.0397	0.0326
999999	0.8702	40.94	72.86	0.9023	1.67	2.78	0.9110	0.0429	0.0442

using evaporation ratio

type number	latent heat flux of evaporation			surface temperature			water content		
	coefficient of correlation	mean value of absolute error [kcal/m ² h]	Standard deviation of error [kcal/m ² h]	coefficient of correlation	mean value of absolute error [°C]	Standard deviation of error [°C]	coefficient of correlation	mean value of absolute error [kg/kg]	Standard deviation of error [kg/kg]
111189	0.9483	20.97	34.79	0.9756	0.90	1.38	0.9495	0.0835	0.0353
111188	0.9474	21.25	34.91	0.9755	0.92	1.39	0.9504	0.0839	0.0352
111169	0.9485	21.54	34.11	0.9769	0.93	1.35	0.9512	0.0869	0.0362
*	0.7994	41.96	76.30	0.9134	0.63	5.73			

*evaporation ratio 0.6 constant

Table 3 Coefficients of correlation, mean values of absolute error and standard deviations of error (soil depth; 300mm)

using saturation ratio

type number	latent heat flux of evaporation			surface temperature			water content		
	coefficient of correlation	mean value of absolute error [kcal/m ² h]	Standard deviation of error [kcal/m ² h]	coefficient of correlation	mean value of absolute error [°C]	Standard deviation of error [°C]	coefficient of correlation	mean value of absolute error [kg/kg]	Standard deviation of error [kg/kg]
111999	0.8959	39.63	67.05	0.9077	1.65	2.61	0.9310	0.0654	0.0213
112999	0.8950	39.74	67.21	0.9083	1.65	2.61	0.9288	0.0643	0.0216
122999	0.8952	39.76	67.14	0.9084	1.65	2.61	0.9285	0.0642	0.0217

using evaporation ratio

type number	latent heat flux of evaporation			surface temperature			water content		
	coefficient of correlation	mean value of absolute error [kcal/m ² h]	Standard deviation of error [kcal/m ² h]	coefficient of correlation	mean value of absolute error [°C]	Standard deviation of error [°C]	coefficient of correlation	mean value of absolute error [kg/kg]	Standard deviation of error [kg/kg]
111169	0.9454	21.23	36.65	0.9682	0.92	1.54	0.9353	0.0713	0.0219
111149	0.9454	21.45	35.76	0.9699	0.95	1.49	0.9318	0.0762	0.0234
111168	0.9442	21.55	36.77	0.9681	0.94	1.54	0.9346	0.0718	0.0220
*	0.8212	38.88	72.29	0.9129	1.54	2.62			

*evaporation ratio 0.6 constant

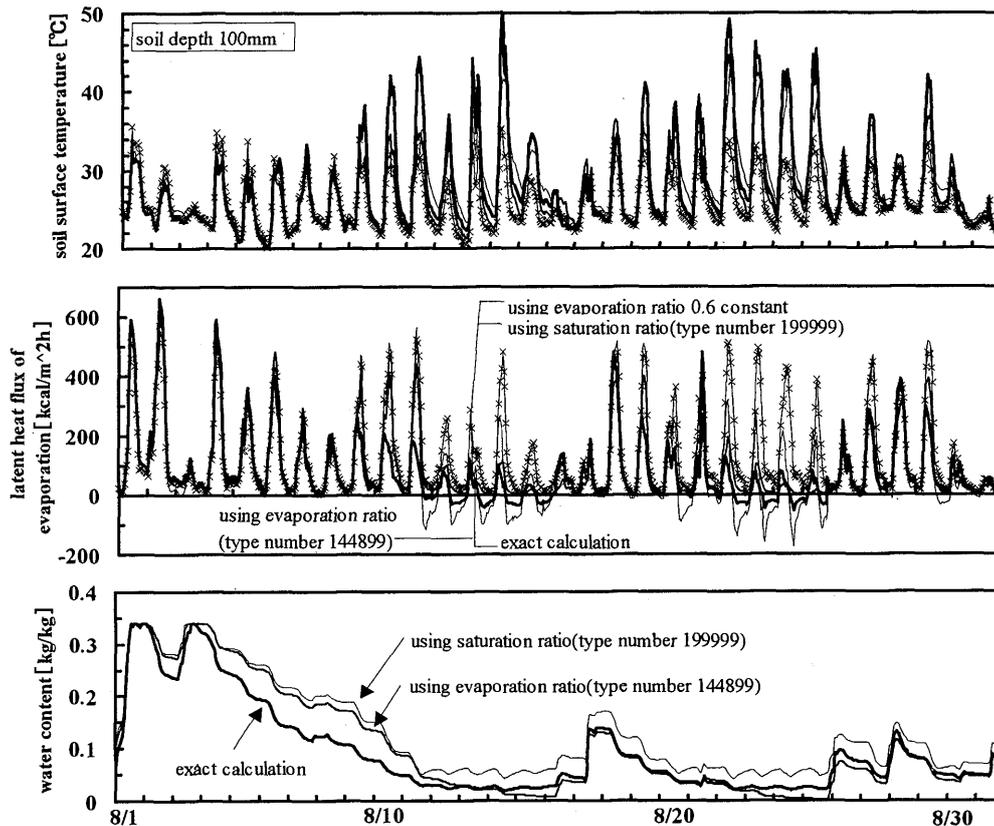


Fig. 3 Calculation results in the case of soil depth 100mm

乾燥時に蒸発比一定の手法では大きな誤差を生じることが特徴的である。また、飽和度を変動させる手法では、乾燥時夜間に凝縮側の結果を示しているが、フラ

ックスの向きとしては精算と同様であるものの、やや過大な値を示すため、昼間の蒸発を丁度補う形で凝縮が生じ、被土の重量含水率がなかなか低下しないこと

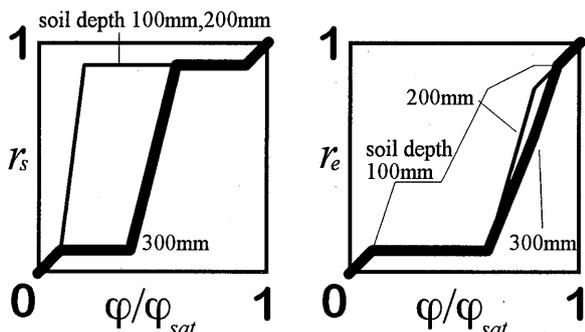


Fig. 4 Identified $r_s(\varphi/\varphi_{sat})$ and $r_e(\varphi/\varphi_{sat})$

から、結果的に蒸発比を変動させる方法よりも誤差が大きくなっている。被土厚 100mm の場合の 8 月 9 ~ 11 日は、蒸発比を変動させる方法でも精算との一致の程度が悪く、被土が湿潤から乾燥に向かう過程で日射が強い条件では、斯様に精度が悪化する場合がある。飽和度を変動させる方法では、被土厚 100mm が誤差最小であるが、蒸発比を変動させる方法では、被土厚 200mm の方が誤差が小さい結果となった。しかし、全般的には、想定した被土厚の範囲では、顕著な精度悪化は認められなかった。

蒸発潜熱量を誤差の評価対象とする場合は、本数値実験の条件では蒸発比を変動させる方が良好な結果となった。飽和度を変動させる手法の方が精度が良くない理由としては、水分収支式のモデル化の粗さ、関数同定の際の折線近似の粗さに対して、飽和度を変動させて蒸発量を求める考え方が詳細に過ぎ、モデル化全体の精度のバランスに欠け、結果的にむしろ大胆なモデル化といえる蒸発比を変動させる手法の精度の方が高くなったことが一因として考えられる。

各被土厚に対して誤差最小となった関数形を Fig. 4 に示す。被土厚が増すに従い、 φ/φ_{sat} の値に対する飽和度、蒸発比の値の立ち上がりが鈍くなる同様の傾向を示していることが特徴的といえる。

5. 結 論

屋上被土、芝生緑化建築における蒸発量推定に適用するための飽和度、蒸発比を変動させる略算手法を提案した。本計算手法の特徴は、水分拡散係数等の水分移動物性値を必要とせず、基本的には非定常熱伝導方程式と一点集中定数化した水分収支式を連立させて解く簡易手法でありながら、これまでの方法と異なって被土の乾湿状態に応じた蒸発量を考慮し得る点にある。

本論文では、特に十分薄い有限厚の屋上被土への適用について述べた。半無限土壌については、有限厚に対する(6)式は厳密には成立しなくなるが、土壌中の水分伝導速度を勘案すると(6)式を適切な厚さの表層部分について考えることで、適用の可能性があり得るものと思われる。また、本研究では蒸発比、飽和度の関数形を数値実験により同定したが、種々の土壌種、厚について実験的把握を行うことも重要である。

謝 辞

本研究の一部は、平成 7 年度総合理工学研究科奨励研究費の援助を受けた。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 例えば、石原修・張晴原・下山和美、屋上被土と芝生植栽の環境緩和効果に関する実験的研究(その 5)、日本建築学会九州支部研究報告, pp. 213~216, 1995年.
- 2) 例えば、恩村定幸・松本衛・銚井修一・森口五郎、屋上芝生植栽による蒸発冷却効果に関する研究(その 4)、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 359~360, 1995年.
- 3) 木村建一・長沢和善・杉浦正二・大場孝一、被土建築の屋根の伝熱性状と室内熱環境に関する実測調査、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 875~876, 1987年.
- 4) 木村建一・長沢和善・杉浦正二・大場孝一、土表面の蒸発冷却特性に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 893~894, 1987年.
- 5) 林徹夫・片山忠久・塩月義隆・張晴原、地盤冷熱と自然換気を利用した住宅のパッシブクーリング手法の検討、九州大学総合理工学研究科報告 第 9 巻第 1 号, pp. 73~78, 1987年.
- 6) 例えば、深井一夫、標準新有効温度 (SET*) における放射、湿度、気流、着衣の影響の温度換算、日本建築学会計画系論文集第 465 号, pp. 19~26, 1994. 11.
- 7) 例えば、石野久彌・森山正和・水出喜太郎・中山哲士、1 次元熱収支モデルによる数値計算と地表近傍環境の観測による都市熱環境解析に関する研究、日本建築学会計画系論文集第 469 号, pp. 45~51, 1995. 3.
- 8) 鈴木剛史・木村建一・谷本潤、屋上被土住宅における蒸発冷却効果に関する研究その 2 シミュレーションによる検討、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 499~500, 1994年.
- 9) 中野政詩、土の物質移動学、東京大学出版会、1991年.
- 10) P. J. Camillo・R. J. Gurney, Discrimination of Soil Physical Parameters, Thermal Inertia and Soil Moisture from Diurnal Surface Fluctuations, Water Resource Research Vol. 21 No. 7, pp. 997~1009, 1985.
- 11) 入部真武・浦野良美・渡邊俊行・林徹夫・龍有二・上大迫一、疑似太陽実験装置による二重外皮・外断熱壁体の蒸発冷却性能試験(第 2 報)、日本建築学会九州支部研究報告, pp. 237~240, 1986年.
- 12) 尾崎明仁、降水の影響を考慮した建築の熱負荷に関する研究、学位論文(九州大学)、1990年.