

土壌含水率計を用いた屋上緑化面からの蒸発量の 簡易現場測定方法に関する研究

Study on a simple on-site estimation method of the evaporative flux from the green roof using the water content ratio sensor of the soil

竹林 英樹*¹ 森山 正和*¹ 古橋 省吾*²
Hideki Takebayashi Masakazu Moriyama Syogo Furuhashi

*¹ 神戸大学大学院工学研究科 Graduate school of Engineering, Kobe University

*² 株式会社 INAX, INAX Corporation

Corresponding author: Hideki TAKEBAYASHI, thideki@koube-u.ac.jp

ABSTRACT

The on-site estimation method for the evaporative flux from the green roof using the TDR water content sensor of the soil is examined in comparison with the method of the weight change observation of grass and soil. Evaporative flux estimated by the method of the weight change observation is a little large, because of the insufficient shield around the test weight and the wind velocity variation of the test weight surface. The evaporative efficiency calculated by the estimation method using the TDR sensor is around 0.2 - 0.3, which is almost agree with the values in the conventional study. Two methods using the TDR water content sensor are compared. In the one method a TDR sensor is set vertically in the soil, and in the other method several TDR sensors are set horizontally in the soil. In the method setting a TDR sensor vertically, the observation result is influenced by the cavity nearby surface. And in the method setting several TDR sensors horizontally, the observation result cannot follow the water content ratio change of the surface neighborhood. If the installation of the TDR sensor is carried out more carefully in consideration for the cavities of the surface neighborhood etc., the on-site estimation of the evaporative flux from the green roof is possible.

キーワード：土壌含水率計，屋上緑化，蒸発量，現場測定法

Key Words : Water content ratio sensor of the soil, Green roof, Evaporative flux, On-site observation method

1. はじめに

近年，ヒートアイランド対策技術の一つとして，屋上緑化や高反射率塗料などのクールルーフに関する多くの研究成果が報告されている⁽¹⁾。また，ヒートアイランド対策の施策としてこれらの技術の普及を促進している自治体もある。このような状況のなか，より良い技術の更なる普及を促進するためには，これらの技術が導入された後の性能確認や経年劣化を評価する手法の確立が必要である。

高反射率塗料面における性能確認のためには，施工面における日射反射率を測定することが必要である。村田らは標準板を用いた現場測定法を提案しており，施工面の反射率を十分な精度を確保して測定できることを示している⁽²⁾。

屋上緑化や保水性建材などの蒸発を利用するヒートアイランド対策技術の現場測定法に関しては，日射反射率と

もに蒸発量の測定が必要となる。蒸発量の測定法は，蒸発に伴う重量変化の測定（秤量法など），水蒸気の放出・輸送量の測定（チェンバー法など），吸水量の測定（ヒートパルス法など），潜熱輸送量の測定（ペンマン法など），土壌水分変化量の測定（水収支法など），などに分類される⁽³⁾。ただし，屋上緑化などのヒートアイランド対策技術の現場での測定を想定すると，限られた面積において葉と土の両方からの蒸発（散）量を測定する必要があるため，適用可能な測定法としては重量変化の測定か土壌水分変化量の測定に限定される。

重量変化及び土壌水分変化量の測定ではライシメータなどが用いられるが，専用の容器などを事前に埋め込むか別途測定システムを構築する必要がある⁽⁴⁾，日射反射率の測定のように施工後に現場に測定器を持ち込んで測定することは困難である。この問題に対し，近年土壌水分量の測定

に TDR (Time Domain Reflectometry) 法が用いられることが増えてきている。TDR 法は水と土壌及び空気との比誘電率の違いを利用して土壌中の体積含水率を推定する方法で、金属プローブを土壌に挿入することにより周辺土壌の含水率が測定される。この方法であれば、施工後にプローブを埋め込むことも可能であり、現場での蒸発量を簡易に測定することができると考えられる。そこで本研究では、現場での蒸発量の簡易測定を目的として、TDR 法を用いた測定法について検討を行う。

2. 測定方法の概要

神戸大学の研究棟屋上に設置されている屋上実験施設の平面図を図 1 に示す。測定は図のユニット 1~3 および 13~15 (U1~U3, U13~U15) において実施した。各測定面の概要を表 1 に示す。TDR 土壌含水率計の埋設深さを併せて示している。一般に屋上緑化等によく用いられている改良土壌 (絶乾状態のかさ密度 1.58g/cm^3)、軽量土壌 (0.59g/cm^3)、超軽量土壌 (0.25g/cm^3) の 3 種類の土を対象とし、芝は同じ種類とした。測定対象土壌の断面図を図 2 に示す。測定対象期間は 2006 年 8 月 3 日~5 日の 3 日間で、前日の 18 時に 5mm 相当の散水を行った。なお、各ユニットの排水状況をユニット毎に設置した排水口において転倒ます雨量計により測定したところ、散水直後に排水量が確認されたが、重量測定を開始した 8 時以降には全てのユニットにおいて排水量は確認されなかった。従って、測定期間中は土中に保水された水分が蒸発に使用されたと考えられる。重量測定用の試験体は各ユニットと同様の排水状況となるように、下面の材料等にはユニットに使用したものと同じ材料を用いて作成した。しかし、実際の排水量が各ユニットと同程度であったかという点については確認出来ていない。

気象条件として、実験施設北東端において気温・相対湿度 (通風式温湿度計, 白金抵抗体, 高分子フィルム, 高さは植栽面から約 1m), 風向・風速 (プロペラ式風向風速計, 高さは植栽面から約 1.5m), 実験施設東端の植栽面から約 0.7m の水平面上において水平面全天日射量 (精密全天日射計), 赤外放射量 (精密赤外放射計) を測定した。また、各測定対象面の表面温度は赤外線熱電対により直径約 30cm 程度の植栽面の平均値を測定した。なお測定間隔は TDR 土壌含水率計の測定に合わせて 10 分である。

2.1 重量変化の測定

TDR 法による測定と比較することを目的に試験体を用いた重量変化の測定を行った。各ユニットの北と南の 2 箇所に測定用の試験体 (内法寸法 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 200\text{mm}$, 木枠厚み 12mm) を埋設した。測定期間中の 8:00~18:00 まで 1 時間ごとに電子天秤により重量を測定した。

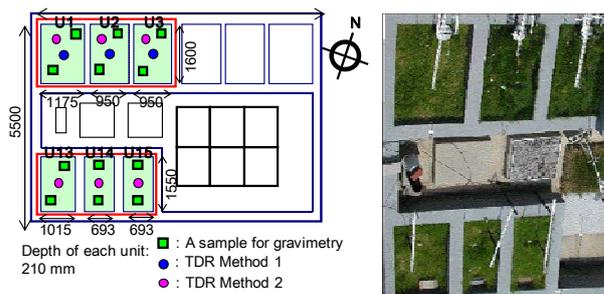


図 1 屋上実験施設の平面図 (左) と写真 (右)

表 1 測定面の概要

Unit	Components	Size(m)	Undergrounding depth of TDR
1	Grass + Improvement soil	1.175 × 1.6	2, 6, 16 cm and Vertical
2	Grass + Lightweighted soil	0.95 × 1.6	2, 4, 6, 11, 16, 21 cm and Vertical
3	Grass + More lightweighted soil	0.95 × 1.6	2, 6, 16 cm and Vertical
4	Grass + Improvement soil	1.015 × 1.55	Vertical
5	Grass + Lightweighted soil	0.69 × 1.55	Vertical
6	Grass + More lightweighted soil	0.69 × 1.55	Vertical

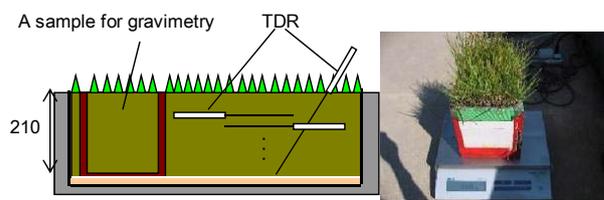


図 2 測定対象土壌の断面図 (左) と重量測定用の試験体及び電子天秤 (右)

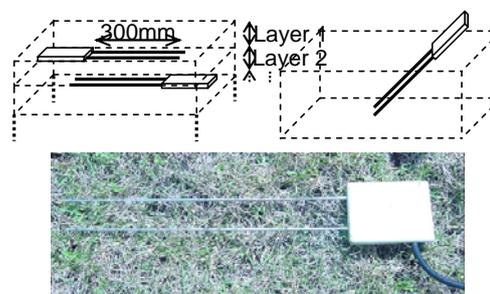


図 3 TDR 土壌含水率計設置の様子 (上) (左: 測定法 1, 右: 測定法 2) と TDR 土壌含水率計 (下)

2.2 TDR 土壌含水率計による測定

TDR 土壌含水率計 (Campbell 社製 CS616 を使用) は 2 本のプローブにより構成される。ステンレス製のプローブの長さは 30cm である。土壌に挿入しデータロガーと接続しておけば長期間の連続測定が可能である。ただし、土壌との間に空隙ができると誤差の原因となるため、プローブと土壌をよく密着させる必要がある。測定値は含水率に対応する周波数の変化をパルス応答時間 (s) に変換した値で得られる。土壌によってこの値が異なるため、土壌毎にパルス応答時間と含水率の関係を特定しておく必要がある。

TDR 土壌含水率計による測定法は図 3 に示す 2 種類を検討した。測定法 1 は TDR 土壌含水率計を水平方向に埋設

し土壌内の特定の層の含水率を測定する方法、測定法2はTDR 土壌含水率計を垂直方向に埋設し土壌全体の平均的な含水率を測定する方法である。なお測定は10分間隔で連続的に行った。

2.3 TDR 土壌含水率計の較正実験

TDR 土壌含水率計は土壌、空気、水の誘電率の違い（土壌 2.5～5、空気 1、水 80）を利用しており、センサーのパルス応答時間から含水率を計測する。この原理には土壌の誘電率が影響する為、土壌の種類ごとに体積含水率とパルス応答時間との関係を較正する必要がある。本研究に使用した改良土壌、軽量土壌、超軽量土壌及び一般的な自然土壌（まさ土）を対象として実施した炉乾法（JIS規格 A1203に基づく）による較正実験の結果を図4に示す。実験は、改良土壌、軽量土壌、超軽量土壌は各5回、自然土壌は4回実施した。図4よりTDR 土壌含水率計のデフォルトの較正式は自然土壌に対して適用可能であり、人工土壌の場合には応答時間に対する含水率変動量が大きくなる傾向にある。以降の解析においては、この較正実験の結果に基づく較正式を各土壌に対して適用する。

2.4 蒸発量の推定方法

灌水、排水のない状態では、時間 $dT[s]$ 当たりの蒸発量 $Q[g/m^2s]$ は以下の式より算出される。

$$Q = dW / dT \quad (1)$$

単位面積あたりの重量変化量 $dW[g/m^2]$ は、重量変化の測定では試験体の測定結果より得られ、TDR 土壌含水率計を用いた測定結果からは以下の式より算出される。

$$dW = dr \times \gamma \times L \quad (2)$$

$dr[m^3/m^3]$ は TDR 土壌含水率計により測定される含水率の変化量、 $\gamma[g/m^3]$ は水の密度、 $L[m]$ は土壌の厚さである。測定法1では埋設した土壌の層に応じて、含水率と層の厚さを対応させて全層に渡って積算される。測定法2では土壌全体を一層として算出される。

3. 蒸発量の推定結果

3.1 推定結果

測定対象期間の気象条件を図5に示す。日射量の安定した典型的な夏期晴天日（降水量0）であった。TDR 土壌含水率及び重量変化の測定から推定した蒸発量を図6に示す。どのユニットにおいても TDR 土壌含水率計による測定から推定した蒸発量が、重量変化の測定から推定した蒸発量より小さい。標準板⁽²⁾を用いて測定した芝の日射反射率はいずれのユニットにおいても約20%であり、この間の正味放射量の最大値は約 $600W/m^2$ と計算された。なお、長波長放射量の算出には、赤外放射計及び赤外線熱電対の測定結果を用いた。本研究で用いた標準板の日射反射率は分光光度計の照射ランプを用いて測定した分光反射率に基づき算出された値であり、実際の太陽光の分光特性（重係数）

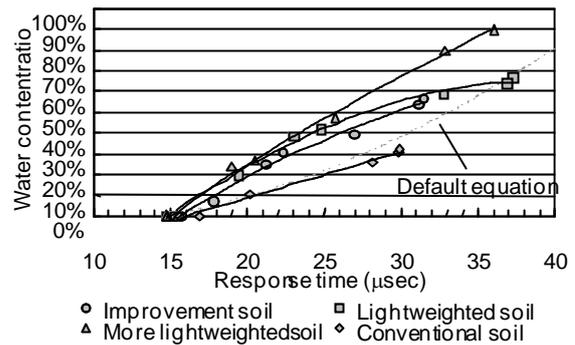
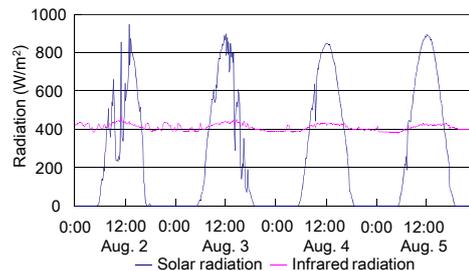
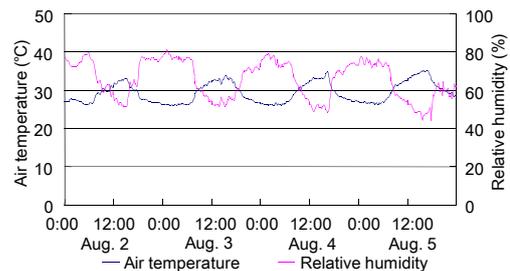


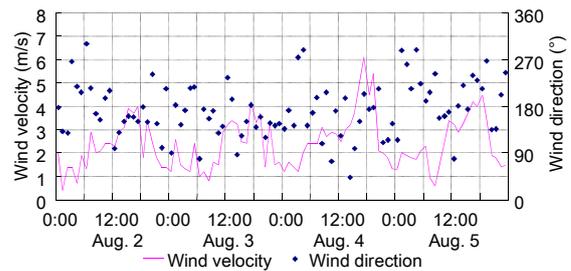
図4 炉乾法による TDR 土壌含水率計の較正実験の結果



a. 日射量と赤外放射量



b. 気温と相対湿度（植栽面より高さ約1m）

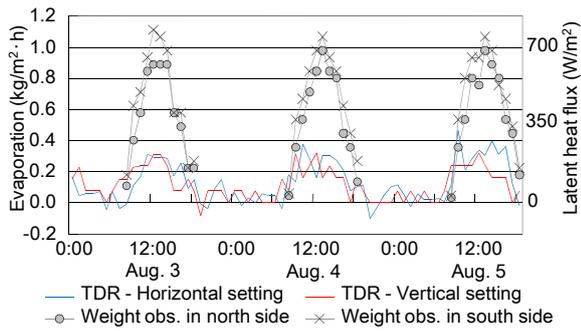


c. 風速と風向（植栽面より高さ1.5m）

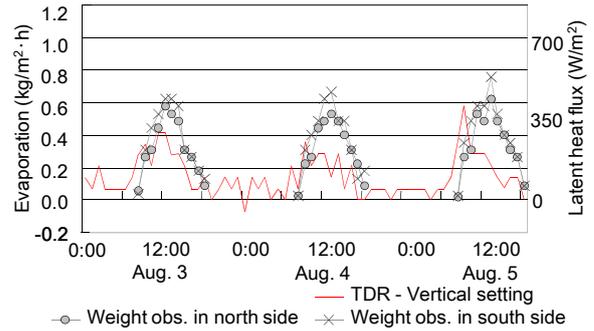
図5 測定期間の気象条件

（2006年8月2日～5日、実験施設近傍で測定）

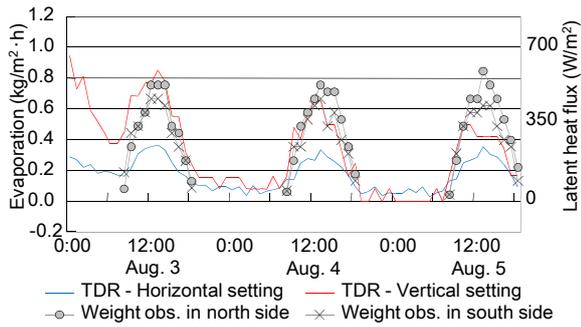
と一致していない。従って、日射反射率に若干の誤差が含まれるが正味放射量のオーダーとしては上述の値が想定される。図6の右側縦軸には蒸発量に対応した蒸発潜熱を示している。重量変化の測定から推定した蒸発による蒸発潜熱の最大値は $600W/m^2$ を超えており、芝生面への入力となる放射収支量より大きな値となっている。従って、測定方法の違いにより蒸発量に差が生じた原因は重量変化の測定からの推定値が大きく算定されたためであると考えられる。



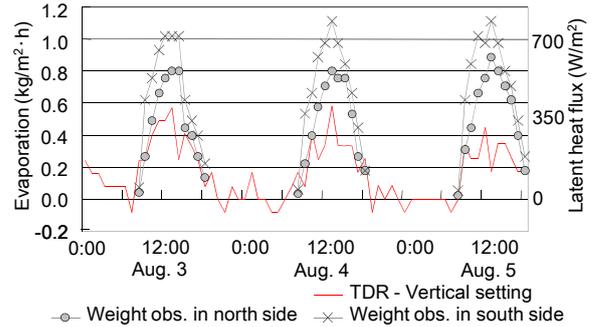
a. ユニット 1 (改良土壌)



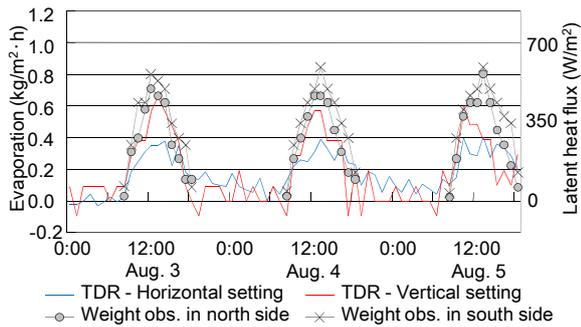
d. ユニット 13 (改良土壌)



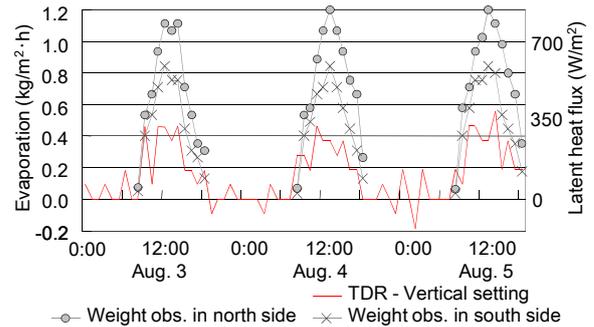
b. ユニット 2 (軽量土壌)



e. ユニット 14 (軽量土壌)



c. ユニット 3 (超軽量土壌)



f. ユニット 15 (超軽量土壌)

図 6 蒸発量の推定結果 (2006年8月3日~5日)

なおこの理由としては、重量測定用の試験体がユニット全体よりも蒸発が促進されやすい状況にあったのではないかと考えられる。具体的には、試験体の周辺の僅かな隙間に空気が供給される可能性が確認され、風による芝と空気との水蒸気交換速度にも空間分布が生じていた可能性がある。木枠で作成された試験体は周囲の土壌と断熱されている状況にあり、乾燥が進行する過程においては図7に示すように試験体の芝は周辺の芝より先に葉面が細くなる傾向が確認されており、土壌内の水分が周辺より失われやすいことを反映している。試験体周辺のシールドと伝達率に影響する風の問題は、図2に示すような試験体を現場で施工して実験する際の課題であると考えられる。

なおこの他にも、対象面積が小さいことによるオアシス効果や対象面周辺のパラペットの影響による伝達率のバラツキなども要因として考えられるが、これらの要因はTDR土壌含水率計による測定結果に対しても同様の影響を与えられ、重量測定にのみに大きな影響が生じている今回の結果の主な原因であるとは想定していない。



図 7 試験体とその周辺の芝の様子 (乾燥過程)

3.2 蒸発効率の算定

蒸発量の測定と併せて、表面温度や気温等の気象データが測定されており、測定結果を用いると蒸発効率 $\beta[-]$ が決まれば以下の式より蒸発量 $E[\text{g}/\text{m}^2\text{s}]$ が算出される。

$$E = \alpha_w \beta (X_s - X_a) \quad (3)$$

湿気伝達率 $\alpha_w[\text{g}/\text{m}^2\text{s}]$ は、風速を用いてユルゲス式とロイ

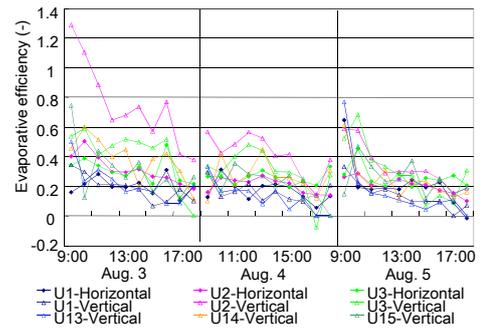
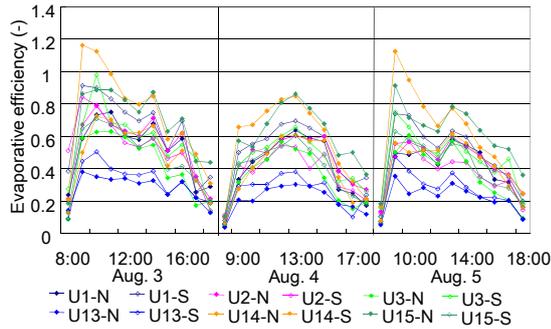


図8 蒸発効率の算出結果 (左：重量変化の測定より，右：TDR 土壌含水率計の測定より)

式により算定される。表面の飽和絶対湿度 $X_s[g/g]$ と外気の絶対湿度 $X_a[g/g]$ は測定値より与えられる。湿気伝達率に関しては，熱収支の残差より顕熱流を算定して同定する方法が考えられるが，その場合には各ユニット（場合によっては各試験体）で個別の熱収支の検討が必要となる。本研究では蒸発量の推定方法の検討に主眼を置いているとともに，ヒートアイランド対策として屋上緑化を評価する場合には，この程度の大きさの対象面ではほぼ同じ伝達率を設定することが現実的であるとの立場に立っている。そこで，湿気伝達率には対象面近傍の風速を考慮したバルクの輸送係数が適当であると考え，この分野において一般的に用いられているユルゲス式を用いた。

上式の E と蒸発量の推定結果が一致するように蒸発効率 β を逆算すると図 8 となる。併せて，8 月 3 日～5 日の 1 日毎の日積算蒸発量と 3 日間の平均蒸発効率を図 9 に示す。一部の測定結果を除いて，日積算蒸発量の日による差はそれほど大きくないため，蒸発効率は 3 日間の平均値を示している。5mm 相当の散水量は 5kg 程度に相当するため，散水方法，土や植物の保水，排水による影響を考慮しても，重量変化の測定から算出された蒸発量は若干大きいと考えられる。重量変化の測定より算出された蒸発効率は日中には 0.6～0.8 程度となり時間帯によっては 1 を超える場合もある。TDR 土壌含水率計の測定より算出された蒸発効率は 0.2～0.3 程度でばらつきも少ない。従来の研究⁽⁶⁾における芝生等の植生面における蒸発効率は 0.3 程度と算定される場合が多いことから，上述のとおり重量変化の測定から推定された蒸発量が大きいために，蒸発効率も大きく算定されたと考えられる。但し，本研究ではユニット内での湿気伝達率，絶対湿度差の分布については考慮しておらず，重量変化の測定結果に対しても，周辺ユニットと同じ値を用いている。

TDR 土壌含水率計の測定より算出された蒸発量のユニット（土壌の違い）による差はあまり大きくないが，U1 の蒸発量が若干小さく算定された。U1 では芝生面の成長があまり良くなかった事（図 1 右図の左上のユニットが若干黄色くなっている）が原因ではないかと考えられる。同じ種類の 2 つのユニット（U1 と U13，U2 と U14，U3 と U15）を比較すると，TDR 土壌含水率計の測定より算出された蒸発量は，U2 と U14，U3 と U15，U1 と U13 の順に土の保

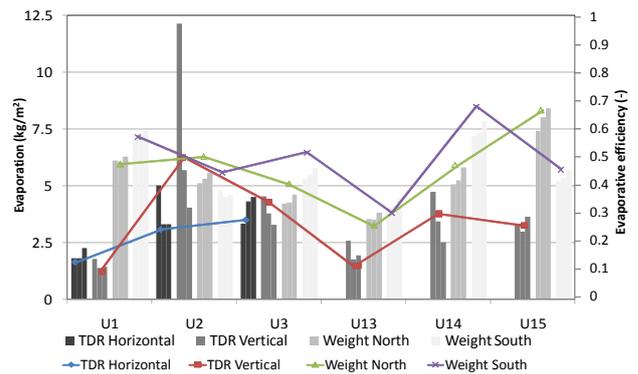


図9 8 月 3 日～5 日の 1 日毎の日積算蒸発量（縦棒）と 3 日間の平均蒸発効率（折れ線）

水力の差を反映した結果に並んでいるが，重量変化の測定から推定された蒸発量は明確な傾向が確認されない。

TDR 土壌含水率計を用いる測定法 1 及び測定法 2 により算出された蒸発量を比較すると，測定法 2 により算出された蒸発量が若干大きくなっている。この理由としては，測定法 1 では深さ 2cm までの表面近傍の含水率を 2cm における測定値で代表しているため，表面近傍における含水率の変化を十分な精度で捕らえられていないためであると考えられる。この点から判断すると，測定法 2 の方が現実に近い蒸発量を算出していると考えられるが，8 月 3 日における U2 のように散水翌日の蒸発量が非常に大きく算出されており，測定条件を確認したところ，土壌表面と芝生層との間の空隙内に存在した水分の影響を TDR 土壌含水率計が受けていた可能性が確認された。

4. まとめ

本研究では，蒸発を利用するヒートアイランド対策技術が施工された面における蒸発量の簡易測定を目的として，TDR 法を用いた測定法について，重量変化の測定と比較して検討を行った。本研究の測定条件では，重量変化の測定結果より算定された蒸発量は大きく見積もられる傾向にあり，その原因としては試験体周辺のシールド及び伝達率に関係する風の影響などが考えられる。

TDR 土壌含水率計の測定より算出された蒸発効率は 0.2

～0.3 程度でばらつきも小さく、従来の研究における植生面における蒸発効率とも整合していた。TDR 土壤含水率計を土壤内に水平方向に数本埋設する測定法 1 と鉛直方向に 1 本埋設する測定法 2 を比較したところ、測定法 1 では表面近傍の含水率の変化の追隨に課題が確認され、測定法 2 では表面近傍の含水率変化には追隨するが埋設方法により地表面近傍の空隙の影響を受ける様子が確認された。以上より、土壤に応じて較正実験を行えば、TDR 土壤含水率計により蒸発量の推定は可能であるが、設置の際に測定器に対する地表面近傍の空隙などの影響に対する配慮が必要である。

謝辞 本研究の遂行に当たり三木コーティング・デザイン事務所の三木勝夫氏及び東邦レオ株式会社より様々な協力を頂いた。また、大阪府立大学の北宅善昭教授より貴重な助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 森山正和, ヒートアイランドの対策と技術, 学芸出版社, 2004
- (2) 村田泰孝, 酒井孝司, 金森博, 竹林英樹, 松尾陽, 森山正和, 吉田篤正, 西岡真稔, 矢野直達, 清水亮作, 三木勝夫, 村瀬俊和, ハシエムアクバリ, 高反射率塗料施工面の日射反射率現場測定法に関する研究—標準板二点校正法の提案および水平面における精度確認—, 日本建築学会環境系論文集, 第 632 号, pp.1209-1215, 2008
- (3) 堀江武, 桜谷哲夫, 蒸発散の測定法 (I), 農業気象, 38(2), pp.193-195, 1982
- (4) 香川治美, 林哲夫, 谷本潤, 片山忠久, 芝生植栽が都市熱環境に及ぼす影響に関する研究, 第 1 報土壤の含水状態を考慮した蒸発散特性の定量的特定, 日本建築学会計画系論文集, 第 507 号, pp.7-12, 1998
- (5) 近藤純正, 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店, p.137, 1994

(Received December 22, 2008, Accepted March 9, 2009)