蒸発効率を指標とした壁面緑化の蒸発特性

Evaluation of Transpiration Properties of Wall Greening Using Evaporation Efficiency Rate as an Index

鈴木 弘孝* 三坂 育正** 田代 順孝***

Hiroataka SUZUKI Ikusei MISAKA Yoritaka TASHIRO

Abstract : In this study, the evaporation efficiency, which is a heat balance parameter necessary for numerical simulation of greening effects, was derived in order to quantitatively evaluate the effects of wall greening panels on improving the thermal environment. The efficiency was determined by monitoring the amount of evapotranspiration from wall greening panels on which either *Hedera helix* or *Euonymus fortunei* was planted, calculating the sensible heat-flux from S A T measurements, and determining the convective heat transfer rate, material transfer rate and the difference between the measured and calculated amounts of evapotranspiration. The results showed that: 1) both the convection heat transfer rate and material transfer rate were highly correlated to wind speed, and the derived equations for calculating the rates were functions of wind speed, 2) the mean evaporation efficiency for the monitoring period was 0.25 for *Hedera helix* and 0.26 for *Euonymus fortunei*, and 3) the amounts of evaporation from the wall greening panels tested were 4 to 5 mm for both plant species and showed correlations to daily cumulative irradiation.

Keywords: wall greening, heat-island, thermal environment, heat balance, evaporation efficiency rate

キーワード: 壁面緑化, ヒートアイランド, 温熱環境, 熱収支, 蒸発効率

1. 研究の背景と目的

都市域がその周辺地域よりも高温となる, いわゆるヒートアイランド現象を緩和するための主要な対策として, 地表面被覆の改善が挙げられる。特に, 不透水化した都市においては, 緑地面積を増大することが有効であるとされているが, 高度に密集化した都市市街地に大規模な緑地を面的に確保することは難しく, 建築物の緑化等により緑地面積を拡大することが必要とされている¹⁾。

建築物の緑化に関して, 屋上緑化の技術についてはすでに多くの技術開発や普及が進んでいる段階にあり, そのヒートアイランド緩和効果に関して多くの研究例が見られ^{2), 3)}, 植物の蒸発散による表面温度の低下や顕熱の低減といった効果が実験や実測によって明らかにされている。しかしながら, 地上部の気温低減において効果が期待されている壁面緑化に関しては, 技術面においても開発途上の段階であるが, その温熱環境改善効果について, 日射遮蔽や放射環境に関する評価^{4), 5)}はあるものの, 特に蒸発散特性や熱収支特性などの定量的な評価についての研究蓄積は十分とは言えない。今後壁面緑化システムの開発と普及を促進する上では, 緑化対策による温熱環境改善効果を定量的に評価できることが必要であると考えられる。

壁面緑化による主要な温熱環境改善効果として, 植物の蒸散等により気化熱を潜熱として消費することに伴う顕熱の抑制効果を指摘できる。成田ら^{6), 7)}は, 新宿御苑の芝生地を対象として放射収支と渦相関法による顕熱フラックスの測定から熱収支パラメータとして蒸発効率を算出しているが, 渦相関法の場合, 風上側に十分なフェッチが必要であり, 現状の壁面緑化の形態や施工状況を考慮すると, 実験計測の際に十分なフェッチを確保することは困難と考えられ, より簡易な評価手法を検討する必要がある。

一方, 壁面緑化に使用されている植物を対象とした蒸散効果の評価では, 野島ら⁸⁾がスーパーポロメーターを用いて蒸散速度の計測による蒸散量推定の試みがあるが, この推定では実測値との間の整合についての検証が十分になされていない。また, 萩島

ら^{9), 10)}は, ブルーパシフィックを使用したユニット型の壁面緑化システムを対象としてS A T計を用いた表面熱収支の観測を行い, 蒸発特性を明らかにしたが, 使用植物は針葉樹に限定され, 植物からの蒸散量についての検証も十分とは言えない。したがって, 壁面緑化について蒸発散の実測データの蓄積は不十分であり, 壁面緑化による温熱環境改善効果についての解明と定量的な評価を行う上で, 実測データに基づく蒸発散の熱収支特性を明らかにしていく必要がある。蒸発散による熱収支については, 成田らが既報^{6), 11), 12)}にて算出した方法を参考として蒸発効率を指標とすることにより, 壁面緑化による温熱環境改善効果についてシミュレーション評価等を行う場合のパラメータとしての活用が期待でき, 実証性の高い定量評価が可能になると考えられる。

そこで, 本研究は, 壁面緑化による温熱環境改善効果を定量的に捕捉することを目的として, 壁面緑化に使用されている緑化パネルを試験体として, 重量法による蒸発散の実験・計測を行うとともに, S A T計法¹³⁾により対流熱伝達率と物質伝達率を求め, 壁面緑化の蒸発散特性を示す指標として蒸発効率の算出を試みた。

2. 研究の方法

(1) 実験装置

独立行政法人建築研究所(茨城県つくば市)の実験棟1階屋上部の南に面した壁に, 緑化パネル試験体を2基設置した。試験体は1ユニットが縦30cm×横30cm×厚さ8cmのビートモスを基盤材とした緑化パネルを縦, 横各6個の計36個のユニットで構成し, 縦1.8m×横1.8mの試験体を地表から約1mの地点に設置した。試験体の使用植物は, ヘデラヘリックス(*Hedera helix*)とアメリカツルマサキ(*Euonymus fortunei*)で, 埼玉県大里郡寄居町の苗圃内温室において同一の親木から採取して栽培された2年生のさし穂を使用した。さし穂はタテ40mm, ヨコ40mm, 深さ50mmの四角錐のセルトレイ中にビートモスとバーク堆肥, 赤土を1:1:8の比率で混合した培土で栽培されたもので, 2005年5

* (独)建築研究所住宅・都市研究グループ ** (株)竹中工務店技術研究所先端研究開発部 *** 千葉大学園芸学部緑地・環境学科

図-1 緑化試験体および計測機器設置状況

表-1 測定項目と計測機器

計測項目	計測機器名	型番	数量
気温・湿度	温湿度計	VAISALA 社製 (IMP35D)	1 基
風向・風速	風向・風速計	小笠原計器製作所 社製 (CW105)	1 基
日射量	日射計	ブリード社製 (PCR-02)	1 基
入射放射量	長短波放射計	英弘精機社製 (MR-50)	1 基
反射放射量			
入射日射量			
反射日射量			
蒸発散量	電子天秤	新光電子社製 (CGX-60K)	2 台
表面温度	T 型熱電対	福音特殊金属社製	8 点
SAT 近隣風速	超音波風速計	カイジョーソニック社製 (DA600-3TV)	1 基

写真-1 電子秤を使用した蒸発散量の計測状況

月にピートモスを素材とするパネルの基盤に1ユニット当たり13個の苗を定植した後、屋外圃場にて直射日射による生育傷害を防ぐため、炎天時に寒冷紗で覆う等調整された環境下で管理した。

植物の被覆厚はいずれも約8~12cmであった。試験体のユニットを構成するパネルでの植物の葉面積密度を計測するため、計測後に試験体ユニット30cm四方の葉を全て切除し、葉面積をスキャナーで読み取った。緑化パネル試験体に隣接した場所に、緑化パネルを構成しているユニットと同等のユニット2基を重量測定用として設置した。

緑化パネル試験体および計測機器の設置状況を図-1に、また電子天秤を用いた重量法による計測の状況を写真-1に示す。

(2) 測定機器と計測方法

測定項目と測定機器について表-1に示す。温度・湿度・風向・風速・日射量については、緑化パネル試験体から水平方向に約3m離れた地点において、温湿度計 (VAISALA 社製: HMP35D) は気象庁の地上気象計測方法⁽⁴⁾を参考として地表面から1.5mの地点に、風向風速計 (小笠原計器製作所社製: CW105) は緑化パネルの高さを考慮して地表面から2mの地点に、日射計 (ブリード社製: PCR-02) は、地表面からの日射反射量も同時計測するため地

図-2 SAT計の概要

図-3 SAT計の取付け位置

表面から1mの地点に設置した。データ出力は1分毎に自動計測を行った。

また、緑化パネル近傍における長波・短波の放射量を計測するため長短波放射計 (英弘精機社製: MR-50) を試験体の中央部 (地表から約2mの高さ) に約50cm程離して壁面と平行に設置し、データ出力は1分毎に自動計測した。なお、設置地点から魚眼レンズにて緑化パネル壁面が80%以上占有していることを確認した。

蒸発散量の計測に当たっては、重量法により試験体ユニットを電子天秤 (新光電子社製: CGX-60K) に載せて1分毎に自動計測し、減少した重量より蒸発散量を算出した。緑化試験体の環境条件に近づけるため、試験体ユニットの周囲を断熱性の良い発泡スチロールで囲い、試験体に隣接して設置した。測定は、終日行い、蒸発散量は0:00から24:00までの24時間の重量変化量から日蒸発散量を算出した。

さらに、緑化パネル表面の顕熱フラックスを算出するため、緑化パネルを模擬したSAT計を製作して計測を行った。SAT計を用いた計測方法については、建材試験センター規格 (JSTM)⁽¹³⁾で規定されており、主として建物外表面対流熱伝達率の測定を目的として使用されている⁽¹⁵⁾。ここで、「SAT」とは「Sol-Air Temperature (放射空気温度または相当外気温度)」の略称で、「建物の周壁近傍の空気温度に、その壁面に作用する放射の強さをこれと等価な空気温度に換算して加味した温度」と定義され⁽¹³⁾、日射と長波放射の授受を考慮して外気温度を補正したものである⁽¹⁵⁾。壁面緑化の実験計測においてSAT計を用いた先行研究として、萩島ら⁽⁹⁾は、濃灰色に塗装したスタイロフォームを基盤として、模造植物 (ブルーバシフィック) を固定したSAT計を作成し、対流熱伝達率の測定を行っている。萩島ら⁽⁹⁾によると、「SAT計の伝導及び潜熱フラックスをゼロと考えると顕熱フラク

気温・湿度

気温・湿度

図-6 蒸発散量の経時変化(アメリカツルマサキ)

風向・風速

風向・風速

図-7 蒸発散量の経時変化(ヘデラヘリックス)

図-4 測定期間中の気象条件
(ヘデラヘリックス)

図-5 測定期間中の気象条件
(アメリカツルマサキ)

スは正味放射量の実測値と等しいとみなせる」として、長波放射量の測定値から得られる放射温度と気温の測定値を用いて、S A T計の対流熱伝達率を算出している。本研究では、JSTM¹³⁾の規格と萩島ら⁹⁾の先行研究を参考に、図-2に示すとおりS A T計を緑化パネルのユニットと同じサイズとし、使用植物と類似した形状のプラスチック製の模擬植物(市販)を、緑化パネルとはほぼ同じ葉面積となるように断熱性の基盤材(スタイロフォーム)に固定して全体をつや消し黒色に着色して製作した。また、図-3に示すとおり、S A T計は緑化パネルの一部としてパネル試験体の中に組込んで測定を行った。表面温度を計測するため、パネル試験体の葉面に5点と基材表面に2点、S A T計の葉表面に1点の計8点にT型熱電対(福音特殊金属社製:φ0.2mm)を設置した。

S A T計近傍の風速を計測するため、S A T計から約30cm離して、地表面から約2mの地点に超音波風速計(カイジョーソニック社製社製:DA600-3TV)を設置し、1分毎に自動計測した。S A T計による計測は、ヘデラヘリックスでは2005年8月5日、6日に、アメリカツルマサキについては8月11日に行った。

(3) 測定期間と灌水条件

緑化パネル試験体の設置は、2005年7月下旬に行い、計測機器の設置を行った後、気象条件や放射量は8月1日より計測を開始した。灌水については、試験体設置後の降雨状況を考慮しながら、計測期間を通じて3~4日に1回、18時から10分間、450ml(降雨に換算して5mm)程度行った。

(4) 蒸発効率の算出

S A T計による計測値から顕熱フラックスを算出し、①式より対流熱伝達率を求め¹⁰⁾、S A T計周辺の風速と温度が緑化パネルと同じと見なして、緑化パネルの対流熱伝達率をS A T計と等しいと見なした。次に、緑化パネルの対流熱伝達と物質伝達のアナロジー(ルイス則)を仮定し、②式より物質伝達率を算出し、重量法により算出した蒸発散量と、物質伝達率と飽差との積によって求める蒸発量との比から、③式より蒸発効率を算出した^{11),12)}。

$$\alpha = \frac{H}{(T_{SAT} - T_a)} \quad (1)$$

ここで、 α :対流熱伝達率 [W/m²・K], H :顕熱フラックス [W/m²], T_{SAT} :S A T計の表面温度[°C], T_a :気温[°C]

$$kx = \frac{\alpha}{(C_p \times Le)} \quad (2)$$

ここで、 kx :物質伝達率 [kg/m²・s], C_p :空気の比熱[J/kg・K], Le :ルイス数(ここでは、0.83を用いた。)

$$\beta = \frac{E}{kx \times (es_{Ts} - ea)} \quad (3)$$

ここで、 β :蒸発効率, E :蒸発散量[kg/m²], es_{Ts} :表面温度に対する飽和絶対湿度[kg/kg], ea :空気の絶対湿度[kg/kg]

3. 結果と考察

本稿では、比較的天候に恵まれた計測日から、ヘデラヘリックスについては8月5日を中心とする前後7日間を、アメリカツルマサキについては8月21日を中心とする前後7日間を対象として解析を行った。以下に結果と考察を記す。

(1) 気象概況

図-4に、ヘデラヘリックスの蒸発散量の実験計測を行った8月1日から8月7日までの気象条件として、気温・相対湿度、風向・風速の経時変化を示す。この期間中における最高気温の平均は33.9°C、最低気温の平均は24.8°Cで、日平均気温は28.8°Cであった。また、相対湿度は8月5日が最高値93.5%を記録したが、概ね90%から50%の間で推移し、平均湿度は73.8%であった。風速は午前中に大きくなる傾向が見られ、最大風速は8月1日の3.1m/s、日平均は0.6m/sであった。

図-5に、アメリカツルマサキの蒸発散量の実験計測を行った8月16日から8月22日までの気温・相対湿度、風向・風速の経時変化を示す。この期間中における最高気温の平均は31.4°C、最低気温の平均は24.4°Cで、日平均気温は27.3°Cであった。また、相対湿度は8月16日が最高96.8%を記録したが、これは前日の降雨の影響によると考えられる。平均湿度は77.3%であった。風速は、いずれも午後に大きくなる傾向が見られ、8月21日と26日の風速が他の計測日に比べて高く、最大風速が1.8m/sを上回った。日平均では0.8m/sを示し、風向は南西から南南西が主流であった。なお、8月16日には1mmの降雨を記録している。

(2) 重量法による蒸散量の計測結果

蒸発散量は、使用した緑化パネルの1ユニットを電子天秤(新

表-2 蒸発散量の計測結果

区 分	項 目	8/19	8/20	8/21	平均
アメリカツルマサキ	日蒸発散量	4,308	4,015	3,833	4,052
	[g/m ² ・day]				
	ピーク時	576	457	487	507
	[g/m ² ・h]				
区 分	項 目	8/5	8/6	8/7	平均
ヘデラヘリックス	日蒸発散量	6,180	4,839	3,678	4,899
	[g/m ² ・day]				
	ピーク時	674	428	428	510
	[g/m ² ・h]				

表-3 対流熱伝達率と物質伝達率

区 分	アメリカツルマサキ	ヘデラヘリックス
対流熱伝達率 [W/m ² ・K]	$\alpha_2 = 21.18u^{0.44}$	$\alpha_1 = 23.712u^{0.6901}$
物質伝達率 [kg/m ² ・s]	$Kx_2 = 103.12u^{0.44}$	$Kx_1 = 115.49u^{0.6923}$

光電子社製：CGX-60K)に載せ、自動計測により重量変化を1分毎に計測したものを、ユニットからの蒸発散量として算出し、面積比から緑化パネル試験体1㎡あたりの蒸発散量として換算した。

灌水は、計測期間では8月1日,4日,17日,22日に行った。なお、重量の測定値については、風の影響による電子天秤の計測値のばらつきを平準化するため、30分の移動平均を行った。

計測期間中のアメリカツルマサキについては図-6に、ヘデラヘリックスについては図-7に示す。計測結果から得られた日蒸発散量は、表-2に示すとおりであり、アメリカツルマサキでは8月19日が最も多く4,308g/㎡となり、8月21日が3,833g/㎡と暫減している。3日間の日中蒸発散量は、3日間平均で4,052g/㎡(4.1mmに相当)であった。

一方、ヘデラヘリックスでは8月5日が最も多く6,180g/㎡となり、8月6日が4,839g/㎡、8月7日が3,678g/㎡と暫減している。8月5日の蒸発散量が大きくなったのは、前日8月4日の夕刻に十分な灌水を行っており、土壌含水率が高かったこと、終日晴れていて最高気温が34.2℃を記録し、他の計測日より日照時間も長かったこと等が要因と推察される。3日間の日中蒸発散量は、3日間平均で4,899g/㎡(4.9mmに相当)であった。蒸発散量が暫減しているのは、計測期間中に灌水を行わなかったため、土壌中の水分量の減少に伴い、基材からの蒸発量と植物からの蒸発量も減少したためと考えられる。

いずれの計測日も気温・日射量の最大ピークとなる12:00~13:00に最高値を示し、時間当たりアメリカツルマサキでは457~576g/㎡、ヘデラヘリックスでは428~674g/㎡を示した。なお、重量法の実験計測後に算出したヘデラヘリックスの葉面積指数は1.45、アメリカツルマサキの葉面積指数は1.18であった。

(3) 対流熱伝達率と物質伝達率の算出

緑化パネル表面における熱収支と放射収支については、萩島ら⁹⁾の壁面緑化における伝熱モデル式を参考として、熱収支式は④式で、放射収支式は⑤式で表すことができる。

$$\text{熱収支式: } Rn = H + LE + G \quad (4)$$

ここで、 Rn : 正味放射量[W/m²], H : 顕熱フラックス[W/m²], LE : 潜熱フラックス[W/m²], G : 伝導熱フラックス [W/m²]

$$\text{放射収支式: } Rn = (1-a) S_m + L_m - \sigma T_s^4 \quad (5)$$

ここで、 a : 日射反射率 (アルベド), S_m : 入射日射量(短波放射量) [W/m²], L_m : 入射放射量 [W/m²], σ : 放射率, σ : ステファン・ボルツマン定数 (=5.670×10⁻⁸W/m²・K⁴), T_s : パネル表面温度[K]

本研究では、対象とする緑化パネル壁面に対して、長短波放射

計を壁面に平行に設置して長波・短波の放射量を計測しており、同計測器で計測した入射日射量(短波)(S_m)には、太陽からの直達日射だけでなく、散乱日射、地表面で反射した日射量の一部も含まれる。また、入射放射量(長波)(L_m)には、天空からの放射と大気放射だけでなく、地表面からの放射量も含まれている。

緑化パネル壁面の最下部と最上部では、地表面と天空部などの形態係数が異なり、入射放射量が異なる可能性があるが、本計測では、長短波放射計を対象とする緑化パネル壁面のほぼ中央部に設置して緑化面への入射放射量も平均化されていると考え、形態係数による補正は行っていない。

一方、計測前に魚眼レンズにて対象とする緑化壁面を捕捉し、対象とする緑化パネル試験体が画面の8割以上を占め、かつ地表面からの影響がほとんど見られない設置地点として、地上から約2m,対象緑化壁面から0.5m離れた地点に長短波放射計を設置した。

また、計測前に赤外カメラにて、周辺のコンクリート壁面(白色塗装)と緑化パネル壁面との表面温度差がほぼ同じであったことを確認し、輻射放射量(L_{out})についても、形態係数による補正は行わなかった。

なお、地表面からは上向きの放射と顕熱フラックスが生じているが、赤外カメラで捕捉した緑化パネルの表面温度分布はほぼ均一で、高低差が見られなかったため、その影響については考慮していない。壁面への地表面からの顕熱フラックスの影響の程度や地表面からの温度勾配の正確な計測による熱収支メカニズムの解明については、今後の課題としたい。

SAT計では植物の葉は模擬植物であり、ユニット基材は断熱材(スタイロフォーム)で構成しているため、萩島らの先行研究⁹⁾を参考として、SAT計表面からの蒸発と断熱性基材への伝導は無いと仮定した。また、SAT計表面をつや消し黒色で着色していることから、⑤式においてアルベド(a)を0、放射率(ε)を1.0と仮定することで、正味放射量(Rn)は入射日射量(S_m)と入射放射量(L_m)およびSAT計の表面温度から算出される輻射量(L_{out})により得ることができる。ここで、SAT計の表面温度(T_{SAT})は、熱電対の計測値から算出した。これより、SAT計表面の顕熱フラックスは、⑥式から得ることができる。

$$H = Rn = S_m + L_m - \sigma T_{SAT}^4 \quad (6)$$

得られた顕熱フラックスとSAT計の表面温度と気温の関係から、①式により対流熱伝達率(α [W/m²・K])を算出した。ここで、対流熱伝達とは、壁体表面とその近傍空気との温度差があることに起因する伝熱現象であり、対流熱伝達率は、壁面(個体)と空気(流体)との間の単位時間当たりに壁面から空気へ伝達される熱の割合を示す。また、緑化パネル壁面での対流熱伝達率は、「試験体周辺の風速・温度境界層が、周囲と大差ないと見なせる場合¹⁵⁾」と判断して、SAT計より算出した対流熱伝達率と等しいと見なした。成田ら^{6),12)}は、熱伝達と物質伝達のアナロジー(ルイス則)を仮定し、顕熱フラックス(H)と対流熱伝達率(α)から物質伝達率(kx)を算出しており、本研究においてもこの方法に従って、対流熱伝達率(α [W/m²・K])から物質伝達率(kx [kg/m²・s])を算出した。ここで、物質伝達率は単位時間当たりの水分の移動量を表し、②式で与えられる。

表面温度と気温の温度差が小さくなる条件では対流熱伝達率の推定誤差が大きくなるため、今回の実験においてはSAT計の表面温度と気温の温度差が5℃以上となる条件において、対流熱伝達率の算出を行った。使用したデータは24時間を対象として1分毎に計測したデータについて10分間の移動平均を行い10分毎に整理した。得られた対流熱伝達率と風速との関係について、アメリカツルマサキについては8月11日の結果を図-8に、ヘデラヘリックスについては8月5,6日の2日間の結果を図-9に示す。

同じく、物質伝達率と風速との関係を、それぞれ図-10と図-

図-8 風速と対流熱伝達率の関係
(8月11日:アメリカツルマサキ)

図-9 風速と対流熱伝達率の関係
(8月5日:ヘデラヘリックス)

図-10 風速と物質伝達率の関係
(8月11日:アメリカツルマサキ)

図-11 風速と物質伝達率の関係
(8月5日:ヘデラヘリックス)

図-12 近傍風速と風速の関係
(8月5日)

図-13 潜熱フラックスと蒸発効率の経時変化
(8月21日:アメリカツルマサキ)

図-14 潜熱フラックスと蒸発効率の経時変化
(8月5日:ヘデラヘリックス)

図-15 日積算日射量と日蒸発散量、
蒸発効率(アメリカツルマサキ)

図-16 日積算日射量と日蒸発散量、
蒸発効率(ヘデラヘリックス)

11に示す。対流熱伝達率と物質伝達率は、風速と良好な対応関係が見られたことから、風速の測定値より測定期間中における緑化パネル面での対流熱伝達率および物質伝達率の算出式を導出した。

算出結果は、表-3に示すとおりである。なお、SAT計近傍(約30cm)の風速値と気象条件として壁面から約3m離れ、地表面から2mの高度で計測した風速値との相関を見たところ、図-12に示すとおり両者に高い相関が見られたことから、本研究では気象条件として計測した風速値を壁面近傍での風速と見なして、対流熱伝達率を算出した。

(4) 蒸発効率による評価

次に、緑化パネルの蒸発散特性を評価する指標としての「蒸発効率(β)」の算出を試みた。具体的には、②式により求めた緑化パネル試験体の物質伝達率(kx)にパネル表面の飽和絶対湿度(e_{sTs})と空気の絶対湿度(ea)との差である「飽差」を乗じることによって算出した蒸発散量と、重量法による計測値から得られた蒸発散量(E)の測定値との比から、③式により蒸発効率(β)の算出を試みた。蒸発効率(β)は、蒸発の起こりやすさを表す指標として用いられ、0から1までの数値を示す¹⁷⁾。葉表面の水蒸気が飽和状態では1を、乾燥状態で蒸散がない状態では0を示す。

蒸散活動が植物の気孔の開閉を通じて行われることから、蒸散が盛んとなり、気孔が開いている状態では、蒸発効率も高くなる

一方、気孔が閉じて蒸散活動が少なくなれば、蒸発効率も低い数値を示すこととなる。近藤¹⁷⁾によると、水田では0.5~0.8、牧草地では0.2~0.4の数値を報告している。

蒸散量による比較はそのときどきの気象要因の影響を受けて変化するが、蒸発効率を捕捉することにより、その都度蒸散量を計測せずに植物種や緑化タイプの違い等による蒸発散特性の把握が可能になるものと考えられる。

③式中の蒸発散量(E)には、重量法により計測した表-2に示す実測値を用いた。ここで、蒸発散量(E)は、植物からの蒸散量と基材表面からの蒸散量の合計値である。計測した蒸発散量から、⑦式を用いて潜熱フラックス(輸送量)を算出した。

$$LE = L \times E$$

$$L = 2.5 \times 10^6 - 2400 \times \theta_a \quad (7)$$

ここで、 LE : 潜熱輸送量 [W/m^2]、 L : 気化の潜熱 [J/kg]、 E : 蒸発速度 [$kg/m^2 \cdot h$]、 θ_a : 表面温度 [$^{\circ}C$]

アメリカツルマサキについては、表-2の計測日のうち8月21日における蒸発効率と潜熱フラックスの経時変化を図-13に、ヘデラヘリックスについては8月5日における算出した緑化パネルの蒸発効率と潜熱フラックスの経時変化を図-14に示す。アメリカツルマサキでは、夜間は0近傍で推移し、日の出とともに上昇して日中は安定し、15時頃から徐々に小さくなる傾向が見られる。一方、ヘデラヘリックスでは、日の出後から9時ごろまで

表－4 蒸発効率の算出結果

区 分	蒸発効率算出結果
アメリカツルマサキ	0.26
ヘデラヘリックス	0.25

値の変動が大きく不安定であるが、この時間帯は入射日射量、気温、湿度の気象条件が安定しなかったことが要因と推察される。その後次第に減少し、13時以降には安定した。

これより、数値の比較的安定していた9時から18時までについて、緑化パネルの蒸発効率を平均すると、アメリカツルマサキでは0.21、ヘデラヘリックスでは0.28であった。日積算日射量と蒸発効率および日蒸発散量の日変化を、アメリカツルマサキは図－15に、ヘデラヘリックスは同じく図－16に示した。日蒸発散量は緑化パネル面積を基準として1㎡あたりに換算した値である。

今回評価を行った緑化パネルのうち、アメリカツルマサキの日蒸発散量について、天候が良い日においては4mm程度であり、測定期間中の最大値は5.5mmであった。日積算蒸発量は、日積算日射量との間で良好な対応関係が見られたが、蒸発効率との間では顕著な対応関係は見られなかった。蒸発効率は、0.2～0.4の範囲で変化し、計測期間での蒸発効率の平均値は0.26であった。

一方、ヘデラヘリックスの日蒸発散量は、天候が良い日においては4～5mm程度であり、測定期間中の最大値は約5.5mmでアメリカツルマサキとほぼ同様の数値を示した。日積算蒸発散量についても、日積算日射量の変化と相似しており、日積算日射量が多い日ほど蒸発散量が多くなる傾向が見られた。蒸発効率は、0.2～0.4の範囲で変化し、計測期間での蒸発効率の平均値は0.25となった。

算出の結果を表－4に示す。上述した近藤¹⁷⁾の計測結果によると、牧草地0.2～0.4とほぼ同じ範囲の数値を示しており、成田ら⁶⁾が新宿御苑で行った計測結果による芝生での蒸発効率0.4と比較すると今回得た壁面緑化パネルでの数値はやや下回っていた。

これは、芝生面では牧草地よりも草丈が短いことから、土壌からの蒸発量が牧草地よりも大きいことが推察される。また、壁面緑化では本研究に使用した植物種の違いに加えて、芝生地が日射を水平面で受けるのに対して垂直面で受けるため、大気放射量、直達日射による放射環境が異なっていること、生育基盤となる土壌が薄層であり、土壌の含水状態が異なること等の違いが影響しているものと考えられる。

なお、萩島ら¹⁶⁾によるとS A T計法の短所として「試験体に黒色塗装を施すことで、試験体表面が実際の建物外表面に比べ高温となり、測定対象面の温度境界層を乱す可能性」を指摘している。

今回の実験計測では、S A T計を緑化パネル面の一部に設置したため、緑化パネルからの蒸発潜熱の影響により、S A T計単独で計測した場合よりも表面温度は過小に評価されている可能性がある。また、本研究では、S A T計と緑化パネルの境界層での気温が同じと見なして、各々の表面境界層における温度計測は行っていないため、境界層でのより詳細な計測によるデータの捕捉が必要と考えられる。さらに、今後、渦相関法等他の方法による顕熱フラックスの計測値との比較・検討を行う等により、S A T計法により得た顕熱フラックスの計測値の検証と計測精度の向上を図ることが課題である。

4. まとめ

壁面緑化による温熱環境改善効果を定量的に評価するために、アメリカツルマサキとヘデラヘリックスを植栽した緑化パネル試験体からの蒸発散に伴う熱収支特性に関する実験・計測を行った。

実験・計測により得られた主な結果は、以下のとおりである。

1) 対流熱伝達率および物質伝達率については、緑化壁面近傍での風速との強い相関が見られ、風速の関数として導出することがで

きた。

2) 蒸発効率は、計測期間での平均値からアメリカツルマサキでは0.26、ヘデラヘリックスでは0.25を示した。

3) 今回使用した壁面緑化パネルの日蒸発散量は、いずれの植物でも4～5mmであった。

S A T計により顕熱フラックスを算出するとともに、対流熱伝達率と物質伝達率を得て、壁面緑化の蒸発散特性を示す数値として蒸発散量の実測に基づく蒸発効率を算出することができた。壁面緑化による温熱環境改善効果として、植物の蒸発散に伴う潜熱消費による効果は大きく、実測値から得られた蒸発効率をパラメータとして使用することにより、壁面緑化の温熱環境改善効果をシミュレーション解析する場合等において実証性の高い数値評価が可能となると考えられる。今後、植物種や緑化タイプの違い等に応じた蒸発効率について、更なるデータの蓄積が望まれる。

謝辞

本論文のとりまとめに当たっては、千葉大学園芸学部本條毅教授よりご指導とご助言をいただいた。また、本研究の実験・計測に当たって、(独)建築研究所の瀬戸祐直主任研究員にご協力いただいた。ここに、記して謝意を表します。

引用文献

- 1) 関係府省連絡会議：ヒートアイランド対策大綱：環境省ホームページ<<http://www.env.go.jp/press>>2004.3.30 参照
- 2) 萩島理・成田健一・谷本潤・三坂育正・松嶋篤・尾之上真弓（2004）：大規模な階段状緑化屋根を有する建築物周辺の微気象に関する実測調査：日本建築学会環境系論文集 577, 47-54
- 3) 三坂育正・石井康一郎・横山仁・山口隆子・成田健一（2005）：軽量・薄層型屋上緑化技術のヒートアイランド緩和効果の定量評価に関する研究：日本建築学会技術報告集 21, 195-198
- 4) 山口隆子・横山仁・石井康一郎（2005）：軽量薄層型屋上緑化システムにおけるヒートアイランド緩和効果：ランドスケープ研究 68(5), 509-512
- 5) 鈴木弘孝・三坂育正・村野直康・田代順孝（2005）：壁面緑化による建物外部の温熱環境改善効果に関する研究：ランドスケープ研究 68(5), 503-508
- 6) 成田健一・三上岳彦・菅原広史・本條毅（2004）：新宿御苑における蒸発効率と温熱環境の実測：環境情報科学論文集 18, 253-258
- 7) 本條毅・菅原広史・三上岳彦・成田健一・桑田直也（2000）：新宿御苑のクールアイランド効果の実測：環境情報科学論文集 14, 273-278
- 8) 野島義照・長谷川秀三（1995）：夏季における各種造園植物の葉面からの蒸散量：ランドスケープ研究 58(5), 97-100
- 9) 萩島理・谷本潤・高尾京子（2005）：壁面緑化システムの熱収支構造に関する屋外観測：日本建築学会技術報告集 N022, 253-258
- 10) 高尾京子・谷本潤・萩島理（2004）：壁面緑化システムの熱収支構造に関する長期屋外観測：日本建築学会学術講演梗概集, 711-712
- 11) 成田健一・三坂育正・国島武史・中山康隆・若林伸介（2004）：蒸発効率を用いた保水性舗装の性能評価：日本建築学会技術報告集 No.20, 187-190
- 12) 成田健一・野々村善民・小笠頭（1997）：自然風下における窓面對流物質伝達率の実測 都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究(その1)：日本建築学会計画系論文集 No.491, 49-56
- 13) 建材試験センター規格（2003）：JSTM J 6110 S A T計による建築周壁の放射空気温度測定方法：<<http://www.jtccom.or.jp/hyojyun/jstm.htm>>参照
- 14) 気象庁：地域気象観測所一覧:<http://www.data.kishou.go.jp/meta/amedas/ame_master.pdf>参照
- 15) 萩島理・谷本潤・成田健一（2004）：都市表面の対流熱伝達率に関する既往研究のレビュー：水門・水資源学会誌 17(5), 536-554
- 16) 田中俊六・武田仁・足立哲夫・土屋喬雄（1985）：最新建築環境工学：井上書院, 317pp.
- 17) 近藤純正編著（1994）：水環境の気象学-地表面の水収支、熱収支：朝倉書店, 350pp