

壁面緑化による温熱環境改善効果

鈴木 弘 孝

【要旨】

本研究は、都市のヒートアイランド対策として着目されている壁面緑化について、温熱環境改善効果を定量的に評価することを目的として、緑化パネルとコンクリート壁(白色塗装)を試験体として実験計測を行い、表面温度と MRT を用いて比較・検討を行った。表面温度では、ピーク時以外では 2~4℃緑化パネルの方が低減していた。MRT については、ピーク時に緑化パネルの方が約 11℃低減した。次に、パネル緑化材からの蒸発散量を重量法により計測し、計測値から潜熱フラックスを算出して、壁面緑化による顕熱フラックスの低減効果について検討を行った。緑化パネル材からの蒸発散量は一日当たり約 4.1kg/m² (4.1mm) で、緑化パネル材からの蒸発散量による潜熱フラックスは正味放射量の約 60%を占め、緑化による顕熱フラックスの低減効果を定量的に確認することができた。

キーワード：ヒートアイランド、壁面緑化、温熱環境、MRT、蒸発散

1. 研究の背景と目的

都市部においてコンクリートやアスファルトによる地表面被覆の増加と緑地や水面の減少、都市活動に伴う自動車や空調機器などによる人工廃熱の増加等により、ヒートアイランド現象が顕在化しており、2004 年 3 月には「ヒートアイランド対策大綱¹⁾」が関係府省連絡会議において決定され、2013 年 7 月には一部改訂が行われる²⁾等、その対策の強力な推進が必要かつ急務となっている。

ヒートアイランド現象の緩和を図るための地表面被覆改善策として、都市の中の緑地面積を増大させることが有効とされている¹⁾が、高度に土地利用が集積した都市市街地においては、都市公園等の公的な緑地の確保に限界があり、市街地面積の大半を占める民有地において建築物の緑化として屋上や壁面の緑化の総合的な推進を図る必要がある。屋上緑化については、技術的にも開発普及が進んでいるのに対して、壁面緑化の技術は屋上緑化に比べると未だ開発途上にある³⁾。

今後、壁面緑化を開発普及させる上での技術的な課題として、下村⁴⁾は、種・品種名の整

理、表面構造への付着力の測定方法の開発と均一な苗の生産の必要性等壁面緑化に使用する植物材料の安定供給と生育特性の把握を指摘している。また、武藤⁵⁾らは、視覚的・心理的な側面から、評価グリッド法を用いたヒアリング調査に基づき、建物の用途、デザイン、植物の形状や間隔等の壁面緑化の計画・デザイン上の課題を指摘している。日本政策投資銀行⁶⁾は、パネル式壁面緑化と登攀・下垂型の壁面緑化の課題として、一様な灌水の困難性、剪定等維持管理の方法を指摘し、普及上の課題として壁面緑化による定量的効果、施工時における維持管理の内容・費用等の情報の欠如を指摘している。

建物緑化による具体的な温熱環境改善効果として、植物や培土からの蒸発散に伴う潜熱フラックスによる顕熱フラックスの低減が期待される。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⁷⁾の蒸散速度の計測による蒸散量推定の試みがあるが、この推定については実測値との間の整合について検証が十分になされてはいない。萩島ら⁸⁾の行った SAT 計を用いた実験により壁面緑化における蒸散量の推定が提案されているが、データの蓄積や実証的な検証が十分であるとはいえない。

そこで、本研究は、壁面緑化による建物外部側での温熱環境改善効果について定量的評価を行うことを目的として、アメリカツルマサキとヘデラヘリックスの二種類のつる植物を使用した壁面緑化パネルとコンクリート壁面（白色塗装）を対象に、表面温度と MRT について比較・検討を行うとともに、壁面緑化パネル材について重量法により計測した蒸発散量から潜熱フラックスを算出して、壁面緑化による顕熱フラックスの抑制効果について検証を行った。

2. 研究の方法

2.1 実験装置の設置

国立研究開発法人建築研究所（茨城県つくば市）の実験棟 1 階屋上部の南向き建築壁面を使用して緑化パネル試験体 2 基を設置した。緑化パネル試験体は屋上表面から 1~3m に設置し、建築壁面とは 0.5m の間隔を置いた。また、緑化壁面との比較を行うための無被覆のコンクリート壁面は、実験棟のコンクリート外壁面（白色塗装）をそのまま使用することとした。1 ユニットが縦 30cm×横 30cm×厚さ 8cm のピートモスを基盤材とした緑化パネルを縦、横各 6 枚の計 36 枚並べて、1 基 1.8m×1.8m の試験体を設置した。

植物の被覆厚は約 8~12cm であった。パネルを構成する各ユニットでの植物の繁茂状態は、ユニット間に大きな個体差のないことを目視確認した。本試験体は、2004 年 7 月 25 日に実験施設内に搬入した。試験体植物への灌水については、基材が乾燥しないように緑化パネルにドリップ式の灌水装置を設置し、降雨日を除いて 3 日に 1 度の頻度で 18 時に 10 分間行った。

各試験体と計測機器の配置は図 1 に示すとおりであり、各試験体の設置状況は、写真 1 に示すとおり。

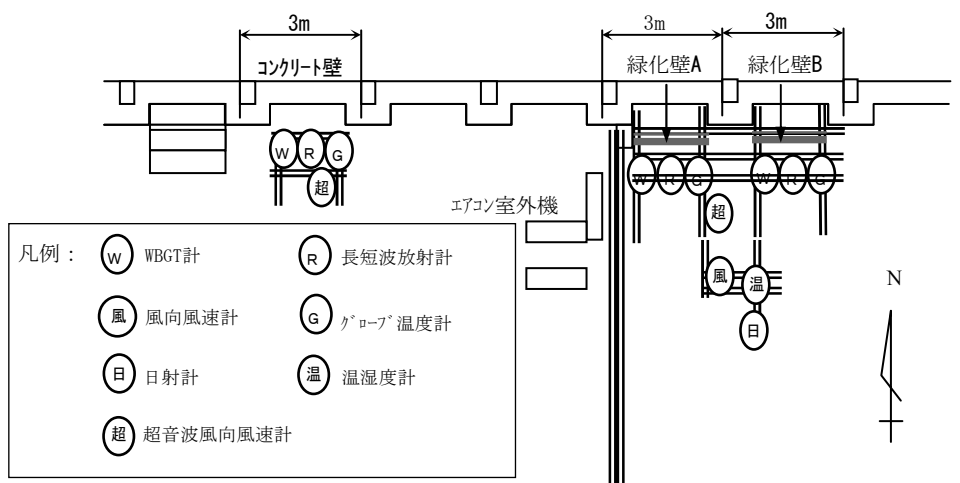
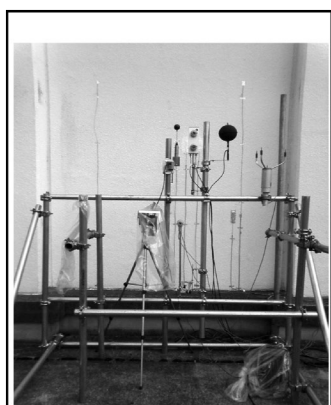
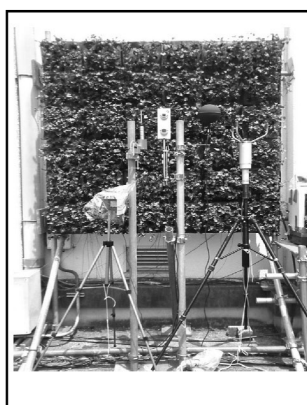


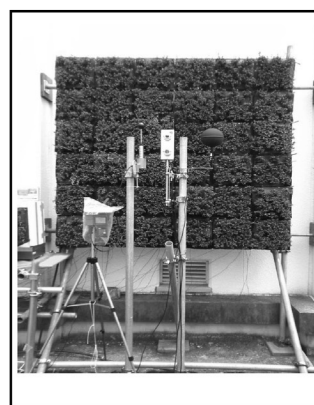
図 1 計測機器配置図



左：コンクリート壁面
(白色塗装)



中：ヘデラヘリックス



右：アメリカツルマサキ

写真 1 試験体の設置状況

2.2 計測の方法

具体的な計測方法は、以下のとおりである。

- ① 試験体の壁面から 0.5m 離して、試験体のほぼ中央部で屋上面から約 2m の高さに、長短波放射計、グローブ温度計を設置した。
- ② 試験体の表面温度とコンクリート壁面の表面温度を計測するため、各試験体とコンクリート壁面の四隅と中央部の 5 地点に T 型熱電対 (φ0.2mm) を設置した。なお、設置部分への直射日射の影響を除くため、コンクリート壁面の設置面にはアルミテープの上からコンクリートと同じ白色の弾性塗料で塗装した。



写真2 電子秤を使用した蒸発散量の計測状況

表1 計測機器一覧

計測項目	計測機器名	メーカー名（型番）	数量
気温 湿度	温湿度計	Vaisala 社製（HMP45D）	1 基
風向・風速	風向風速計	小笠原計器製作所製（CW105）	1 基
	超音波風向風速計	英弘精機社製 （MR-130）	2 基
日射量	日射計	ブリード社製 （PCR-02）	1 基
長波放射量 輻射量 入射日射量 反射日射量	長短波放射計	英弘精機社製 （MR-50）	3 基
黒球温度	グローブ温度計	ブリード社製（BST131）	3 基
蒸発散量	電子天秤	新光電子社製（CGX-60K）	2 台

- ③ 緑化試験体の設置位置から約 3m 離れた場所に、温湿度計、風向風速計、日射計を設置した。
- ④ 計測機器は 2004 年 7 月 25 日に設置し、7 月 28 日から 8 月 28 日までの期間を自動計測により行った。計測間隔は 1 分間隔で記録した。

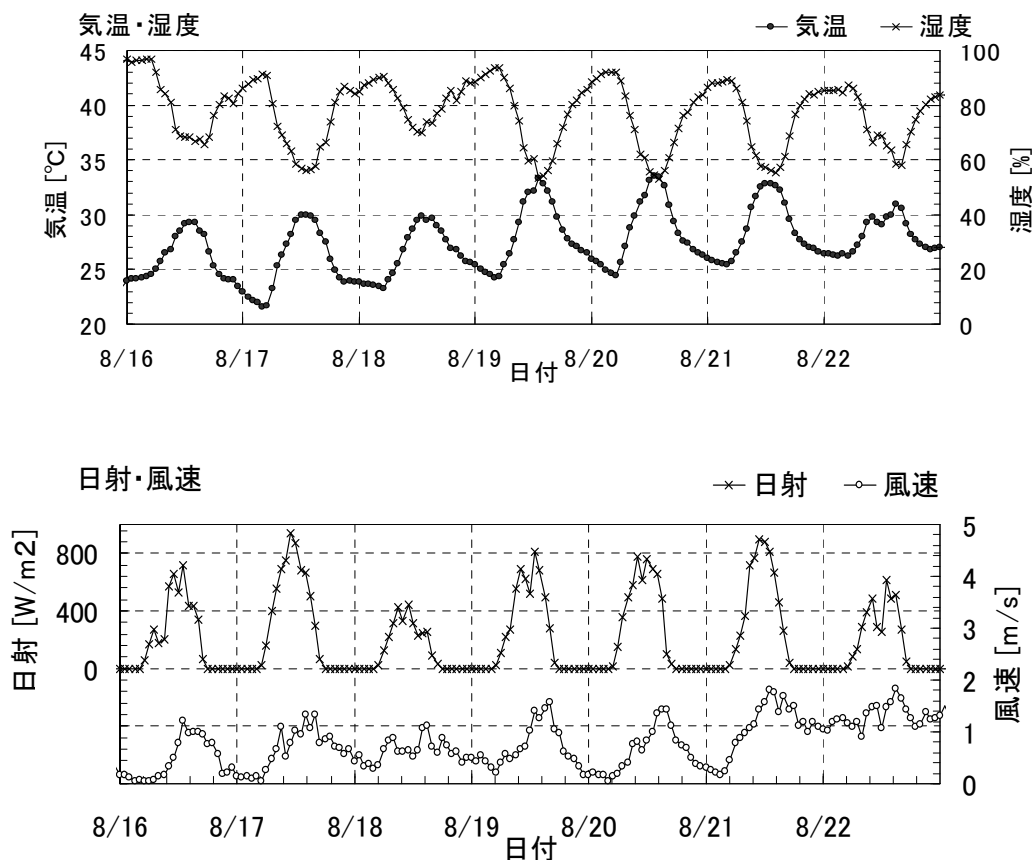


図2 測定期間中の気象概況（日射量・風速、気温・湿度）

- ⑤ 緑化パネル試験体を構成するユニットでの植物の繁茂状態を把握するため、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。
- ⑥ この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を重量測定用として設置した。（写真2参照）測定に使用した計測機器を表1に示す。

3. 結 果

3.1 気象概況

図2は、2004年8月16日から8月22日までの7日間の気象条件として、気温、湿度、日射量、風速の推移をまとめたものである。8月16日のみ、前夜から1:00まで降雨があったものの、8月19日から22日にかけての4日間は最高気温が30℃を超える真夏日となった。この期間の最高気温は、8月20日の33.6℃、最低気温は8月17日の21.6℃、期間中の平均気温は27.3℃であった。また、風速は0~1.8m/secであり、風向は南西の風が主であった。8

月 22 日は終日 1.0m/sec の南西の風を記録した。湿度は、56～97%であり、降雨のあった 8 月 16 日を除いた 6 日間の平均湿度は 76.6%であった。

以下に、計測期間のうち快晴に近く、終日天候の安定していた 8 月 21 日を取り上げて、MRT 値、WBGT 値の計測結果、SET*の算出結果を示す。

3.2 表面温度

図 3 は、8 月 21 日におけるコンクリート壁面と緑化パネルの表面温度の経時変化を示したものである。各壁面の表面温度 T_{sr} (°C) は、計測した長波放射量 $L\uparrow$ (W/m^2) を放射率 ε により補正して、以下の式により算出した⁹⁾。

$$T_{sr} = \sqrt[4]{\frac{L\uparrow}{\varepsilon \cdot \sigma}} - 273.15 \quad \dots (1)$$

ここで、 $L\uparrow$ ：上向き長波放射量 (W/m^2)、 ε ：放射率、 σ ：ステファンーボルツマン定数

これより、9時から12時までにヘデラヘリックスの表面温度がコンクリート壁面の表面温度とほぼ同じ温度となったが、それ以外の時間帯では緑化パネルがコンクリートよりも 2～4°C低減した。緑化パネル材の日射反射率を計測した結果では、緑化パネルが 0.25 から 0.27 の値を示したのに対して、コンクリート壁では 0.70 と高い数値を記録した。これより、緑化パネルの表面温度がピーク時においてコンクリート壁面と比較して温度差が小さくなるのは、葉面温度そのものの上昇とともにコンクリートの外壁表面が白色に塗装されているために日射を反射し、コンクリート壁面の表面温度の上昇が抑制されたことによるものと考えられる。

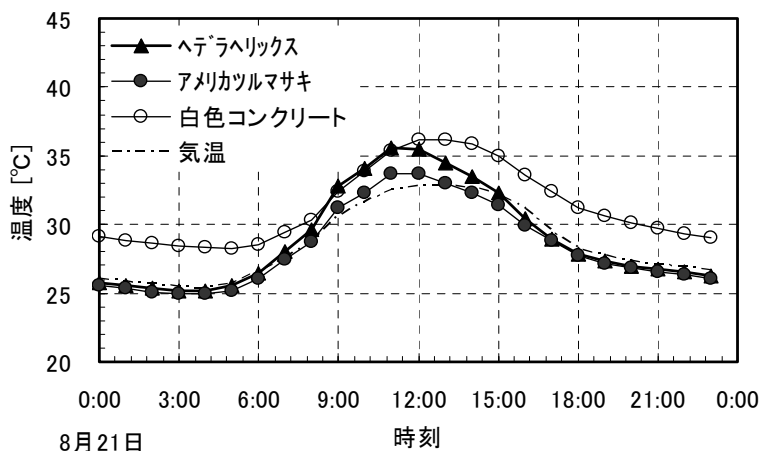


図 3 表面温度の経時変化⁹⁾

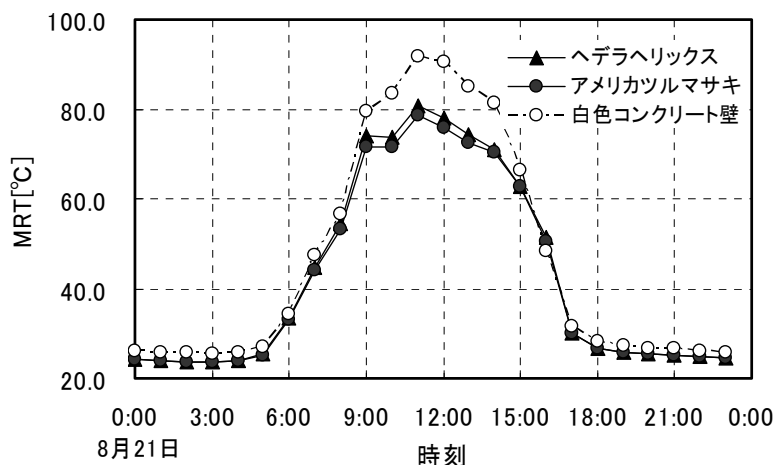


図4 MRTの経時変化¹¹⁾

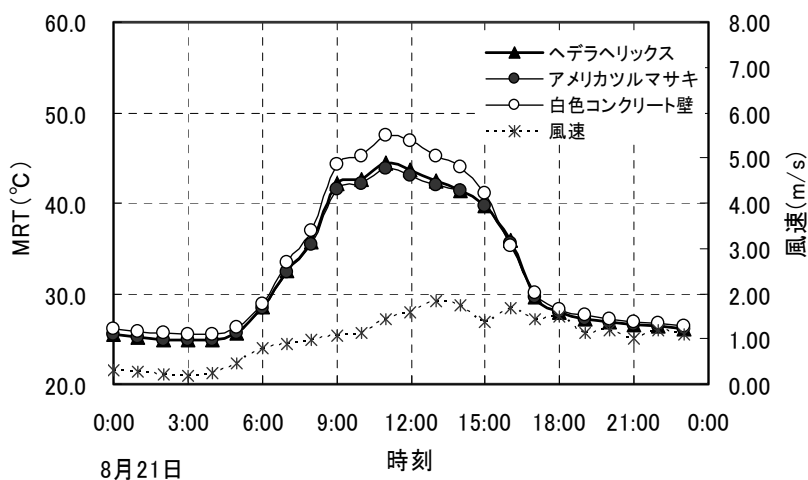


図5 グローブ温度計の経時変化¹¹⁾

緑化パネルでは、ピーク時にアメリカツルマサキの方がヘデラヘリックスよりも 1.8°C 低くなっており、使用植物の違いによる表面温度に違いが見られた⁹⁾。これは、ヘデラヘリックスに比べて、アメリカツルマサキは葉が小さく緻密で、肉厚であること等の植物特性の違いが作用したと考えられる。

3.3 MRT（平均放射温度）による温熱環境改善効果の評価

放射環境に注目して、人の生活空間に比較的近い位置でのMRT値による壁面緑化による温熱環境改善効果を検討した。MRT (Mean Radiant Temperature)は、暑さ感を示す体感指標

の一つで、周囲の全方向から受ける熱放射を平均化して温度表示したものである¹⁰⁾。

具体的には、グローブ温度計の黒球グローブ温度 (T_g)、乾球温度 (T_d) と長音波風向風速計の計測値 (V) を用いて、(2) 式により MRT を算出した¹¹⁾。

$$MRT = T_g + 2.37\sqrt{V} \times (T_g - T_d) \quad \dots (2)$$

ここで、 T_g : 黒球グローブ温度 [$^{\circ}\text{C}$]、 T_d : 乾球温度 [$^{\circ}\text{C}$]、 V : 風速 [m/s]

8月21日について、算出結果を経時変化で表すと、図4に示すとおりである。

これより、日中は緑化パネルの方がコンクリート壁よりも絶えず低温で推移し、温度が上昇するにつれ、両者の温度差が拡大している。最大ピークの11:00の時点では、コンクリート壁が 91.8°C であるのに対して緑化パネルのヘデラヘリックスが 80.9°C 、アメリカツルマサキが 78.5°C であり、コンクリート壁に比べ約 $11\sim 13^{\circ}\text{C}$ 緑化パネルの方が低い値を示した。

植物の違いによる温度差はほとんど見られなかった。また、夜間は、試験体による差はほとんど見られない。図5は、緑化パネルとコンクリート壁のグローブ温度の経時変化を示したものである。

これより、MRTが最大ピーク時の11:00の時点で 91.8°C という高い数値を示したのは、グローブ温度計が、 47.6°C と高い数値を示し、気温との差も 15.1°C に達したことによるものである。コンクリート壁に比べると緑化パネルの方が低い温度で推移し、温度の上昇につれてその差は拡大し、ピーク時で約 11°C の低減効果が見られた¹¹⁾。

このような温度差の生じる理由として、コンクリート壁が白色塗装されていることにより、緑化パネルと比較すると日射反射率（アルベド）の差が大きく影響していると考えられる。MRTという指標により、緑化による屋外の温熱環境改善効果を定量的に評価することができた。

3.4 重量法による蒸散量の計測結果

(1) 日蒸発散量

蒸発散量は、アメリカツルマサキを使用した緑化パネルの1ユニットを電子天秤に載せ、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、面積比からユニット 1 m^2 あたりの蒸発散量として換算した。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分の移動平均をとった。計測期間中の日積算蒸発散量は0時から24時までの24時間の重量変化量から算出した。ユニット（培土+植物） 1 m^2 当たりの日中での蒸発散量の経時変化を図6に示す。

計測結果から得られた日積算蒸発散量は、表2に示すとおりであり、8月19日が最も多く $4,308\text{g/m}^2$ となり、8月20日が $4,015\text{g/m}^2$ となり、8月21日が $3,833\text{g/m}^2$ と漸減している。蒸発散量の減少傾向は、土壌体積含水率の減少傾向に概ね符合している。これより、灌水

から中 1 日おいた 3 日間の日蒸発散量は、平均で $4,052\text{g}/\text{m}^2$ であった。図 6 より、いずれの計測日もほぼ同様の日変化を示し、気温・日射量が増大するにつれて蒸発散量も増大する傾向を示し、気温・日射量が最大ピークとなる 12:00 に蒸発散量の最高値として時間当たり $457\sim 576\text{g}/\text{m}^2$ を示した。

(2) 植物からの日蒸散量

アメリカツルマサキからの蒸散量を計測するため、8 月 20 日と 21 日の 2 日間は、使用した緑化パネル試験体のうちの 1 ユニットのポリエチレンで覆い、蒸散量を算出した。計測結果から得られた日蒸散量は、表 2 に示すとおり。8 月 20 日が $2,443\text{g}/\text{m}^2$ 、8 月 21 日が $2,434\text{g}/\text{m}^2$ であり、2 日間の平均では $2,438\text{g}/\text{m}^2$ であった。

蒸散量の最高ピークは、8 月 20 日が 12 時で $311\text{g}/\text{m}^2$ 、21 日が 14 時で $392\text{g}/\text{m}^2$ であり、2 日間の平均は $351\text{g}/\text{m}^2$ を示した。これより、植物（アメリカツルマサキ）からの蒸散量は、パネル材からの蒸発散量の約 60% に相当する。

(3) 潜熱フラックスと正味放射量との関係

重量法による計測値から得られた蒸発散量から、(1)式を用いて潜熱フラックスを算出した。

$$LE = L \times E$$

$$L = 2.5 \times 10^6 - 2400 \times \theta_a \quad \cdots (1)$$

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 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)、 θ_a ：表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)

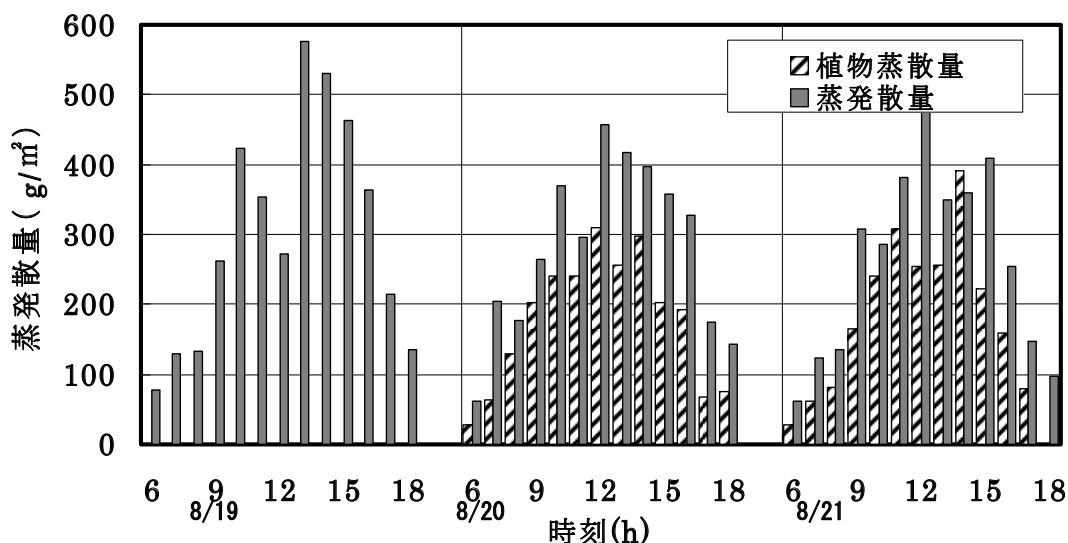


図 6 蒸発散量の推移 (8/19-8/21) ¹²⁾

表 2 蒸発散量の計測結果¹²⁾

区分	項目	8 月 19 日	8 月 20 日	8 月 21 日	平均
ユニット	日蒸発散量 (g/m^2)	4,308	4,015	3,833	4,052
	ピーク時 (g/m^2)	576	457	487	507
植物	日蒸散量 (g/m^2)	—	2,443	2,434	2,438
	ピーク時 (g/m^2)	—	311	392	351
日蒸散量/日蒸発散量		—	0.61	0.64	0.60

表 3 潜熱フラックスと正味放射量¹²⁾

区 分	項目	種類	8 月 20 日	8 月 21 日	平 均
潜熱フラックス (LE)	日積算 (MJ/m^2)	(a) ユニット	9.70	9.27	9.49
		(b) 植物	5.90	5.88	5.89
		(b)/(a)	0.61	0.63	0.62
	ピーク時 (W/m^2)	(a) ユニット	304.8	325.6	315.2
		(b) 植物	207.5	262.3	234.9
		(b)/(a)	0.68	0.81	0.74
正味放射量 (R_n)	日積算 (MJ/m^2)		7.65	8.72	8.19
	ピーク時 (W/m^2)		326.3	369.4	347.9

得られた結果は表 3 に示すとおりである。これより、8 月 20 日の潜熱フラックスの日積算量は、 $9.70\text{MJ}/\text{m}^2$ であり、ピーク時は 14 時で $304.8\text{W}/\text{m}^2$ であった。同じく、8 月 21 日の日積算量は $9.27\text{MJ}/\text{m}^2$ 、ピーク時は 12 時で $325.6\text{W}/\text{m}^2$ であった。2 日間の平均では、潜熱フラックスの日積算量は、 $9.49\text{MJ}/\text{m}^2$ であり、ピーク時は $315.2\text{W}/\text{m}^2$ であった。また、植物（アメリカツルマサキ）の蒸散による潜熱フラックスについて、8 月 20 日の日積算量は $5.90\text{MJ}/\text{m}^2$ であり、ピーク時は 12 時の $207.5\text{W}/\text{m}^2$ であった。同じく、8 月 21 日の日積算量は、 $5.88\text{MJ}/\text{m}^2$ であり、ピーク時は 14 時の $262.3\text{W}/\text{m}^2$ であった。潜熱フラックスの日積算量は、2 日間の平均で $5.89\text{MJ}/\text{m}^2$ でありユニットの約 6 割を占め、ピーク時では平均で $234.9\text{W}/\text{m}^2$ であり、ユニットの約 7 割を占めた¹²⁾。

次に、潜熱フラックスによる熱的効果を正味放射量との関係から検討した。正味放射量は、長短波放射計により計測した大気放射量、輻射量、入射日射量、反射日射量の各計測値の放射収支から、(2) 式により算出した。

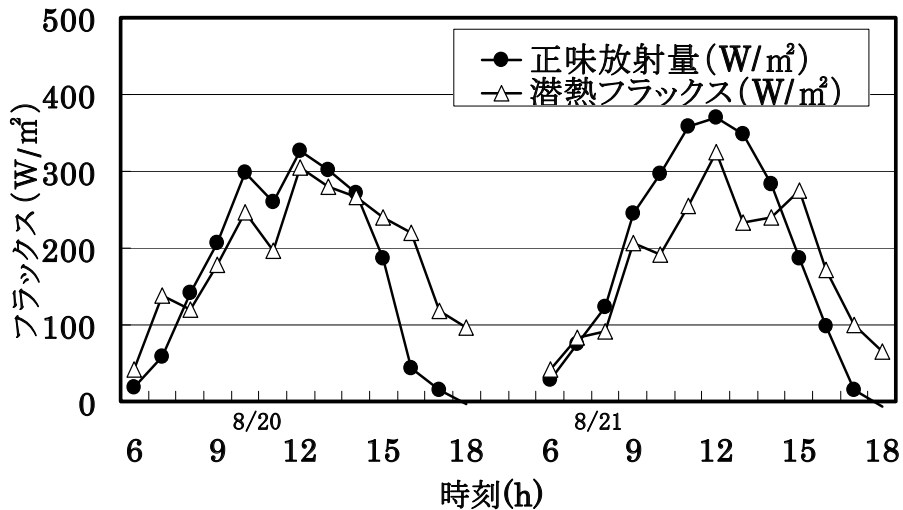


図7 潜熱フラックスと正味放射量の経時変化¹²⁾

$$Rn = (S\downarrow - S\uparrow) + (L\downarrow - L\uparrow) \quad \dots (2)$$

ここで、 Rn : 正味放射量 (W/m^2)、 $S\downarrow$: 入射日射量 (W/m^2)、 $S\uparrow$: 反射日射量 (W/m^2)、 $L\downarrow$: 入射長波放射量 (W/m^2)、 $L\uparrow$: 輻射量 (W/m^2)

算出結果は、表3に示すとおりである。また、潜熱フラックスと正味放射量との経時変化を図7に示す。これより、潜熱フラックスと正味放射量との1日の変化の様子は相似しており、正味放射量の増加につれて潜熱フラックスも増加している。いずれも、12時から14時にかけてピークを示した後、減少している。

正味放射量については、6時から8時と16時から18時にかけては 100W/m^2 以下となり、潜熱フラックスよりも極度に減少が見られた。これは、太陽高度が低くなるこの時間帯において短波日射量が急激に減少するのに対して、潜熱フラックスとしてユニットからの蒸発による熱の輸送が持続し、正味放射量を上回ったためと考えられる。8月20日の日積算量は、 7.65MJ/m^2 であり、ピーク時は13時で 326.3W/m^2 を示した。同じく、8月21日の日積算量は、 8.72MJ/m^2 であり、ピーク時は13時で 369.4W/m^2 を示した。2日間の平均では、日積算量は 8.19MJ/m^2 であり、ピーク時は 347.9W/m^2 であった。

図8は、潜熱フラックスと正味放射量との関係を示したものである。ここで、蒸発散が安定している正味放射量 100W/m^2 以上を解析の対象とした。潜熱フラックスと正味放射量との間には、正の相関が認められ、正味放射量の上昇に伴い、潜熱フラックスも上昇する傾向にある。回帰直線の傾きより、ユニットでは正味放射量の約60%が潜熱として消費されていた。

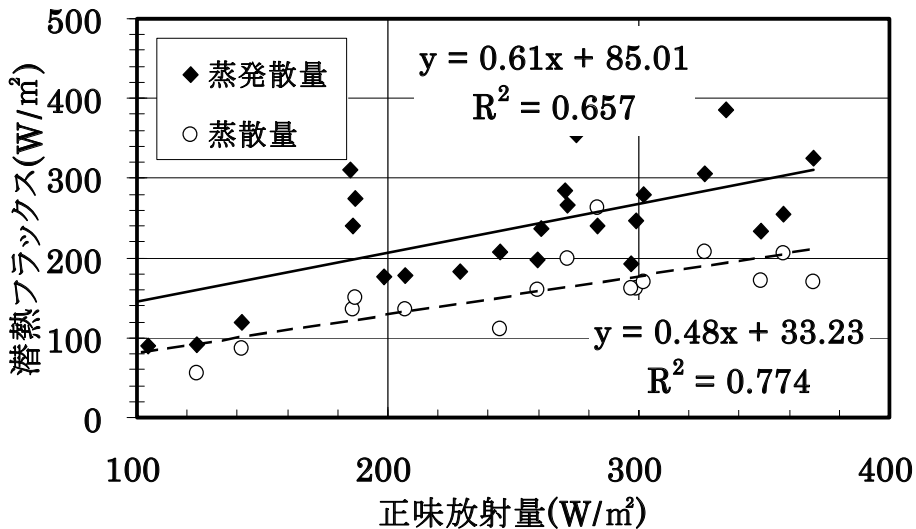


図8 潜熱フラックスと正味放射量の関係¹²⁾

同じく、アメリカツルマサキからの蒸散による潜熱フラックスと正味放射量との間においても、正の相関が認められ、正味放射量の増加量の約50%が潜熱として消費されている¹²⁾。

これより、正味放射量の増加分に対する潜熱フラックスの増加量は植物からの蒸散量による寄与が培土からの蒸発量による寄与よりも高いことが示唆された。正味放射量に対する潜熱フラックスの割合が高いほど、建物外部側に対する顕熱フラックスの上昇を抑止し、温熱環境の改善に寄与していると言える。

したがって、蒸発散による潜熱フラックスが正味放射量の大半を占めていることは、緑化パネル材を用いた壁面緑化による顕熱フラックスの低減効果の大きいこと、中でも植物からの蒸散による熱的効果の高いことが示唆された。

植物体からの蒸散作用はそのほとんどが葉面の気孔を通じて行われ、気孔以外からの蒸散量は5%程度と言われている¹³⁾。緑化パネル材からの蒸発散作用により大気中に放出された水分が液体から気体へと変化（気化）する際に潜熱として消費される。潜熱は外気温の上昇を招かず、蒸発散量が多いほど潜熱フラックスも増大し、ヒートアイランドの原因となる顕熱フラックスの増大を抑制することが期待できる。

加藤ら¹⁴⁾は、アスファルト路面上にプラスチック製のコンテナを設置し、軽量土壌とマサ土を培土とし、メキシコマンネングサとティフトンシバの2種の植物を用いて、蒸発散量を土壌水分と日射量との関係で解析した結果、日平均蒸発散量は6.5mm程度であったことを報告している。今回の計測結果から得た壁面緑化による日蒸発散量は、ユニットの単位面積当たりで3.6mmである。既往の研究例と比べると、本研究での計測値は低い数値を示した。これは今回使用した植物の葉面積指数が、1.18と比較的葉量が少なかったこと、重量法での計測期間中は灌水を行っておらず、培土の保水条件も異なっていることが主たる要因と推察される。

一方、潜熱フラックスと正味放射量との関係について、緑化パネル材からの潜熱フラックスは、正味放射量に対して約 60%を占めていた。筆者ら¹⁵⁾が過年度プランターに配植したヘデラカナリエンシス (*Hedera Canariensis*) を用いて、重量法により蒸散量を計測した結果では、潜熱フラックスは正味放射量の増加量の約 25%であり、今回の計測結果の 1/2 以下であった。

使用植物も異なっており、単純な比較はできないが、壁面緑化においてプランターを使用した場合よりも緑化パネル材の方が、植物と培土が一体化することにより蒸発散の効率性を高めていることが考えられる。培土条件の違いにより蒸発散量が大きく異なることは、壁面緑化による潜熱フラックスを増大させる上で、植物と一体となった培土の存在と構成が有効であることを示唆している。

4. 総合考察

今後、都市市街地において地表面被覆状態を改善してヒートアイランド現象を緩和することにより、生活環境の保全・改善を図るためには、建物の屋上や壁面、人工地盤上等の本来は緑化に適さないと考えられてきた三次元の立面緑化策を総合的に推進していくことが必要である¹⁶⁾。都市部の公園緑地や街路空間などの公的な空間の緑化とともに、屋上等の緑化を推進していくためには、東京都の条例による一定規模以上の建築敷地での緑化の義務付け等の規制措置¹⁷⁾に加えて、緑化施設整備計画認定制度¹⁸⁾等に見られるようなインセンティブとなる税制優遇や東京都特別区等で実施されている助成金¹⁹⁾等の経済的支援措置を一体的に講じていくことが肝要と考えられる。

これらの都市緑化政策ツールとともに、科学的知見の充足策として緑化による温熱環境改善効果を客観的に評価できる定量的な実証データを蓄積させることが重要と考えられる。本研究では、屋上緑化に比して、温熱環境改善効果についての計測データが不足している壁面緑化を中心として、壁面緑化の開発普及を進めていく上で、建物外部側への温熱環境改善効果について計測データをもとに検証を試みた。

具体的には、壁面緑化に使用されている緑化パネル材を用いて放射環境について屋外実験を行った。使用植物としては、壁面緑化に一般的に使用されているヘデラヘリックス (*Hedera helix*) とアメリカツルマサキ (*Euonymus fortunei*) の二種類のつる植物を使用した緑化パネル壁面とコンクリート壁面 (白色塗装) とを比較・対照し、表面温度と MRT (平均放射温度) を算出して、建物外部での放射環境についての評価を行った。表面温度では、日中のピーク時では、コンクリート壁との間での温度差が縮減する一方で、日没後の夜間では、2~3℃緑化壁がコンクリート壁を上回っていた。さらに、MRT (平均放射温度) により放射環境を評価したところ、緑化パネルではピーク時に約 11℃低減し、表面温度のみでは評価することのできない温熱環境改善効果を定量的に評価することができた。壁面を緑化することで、日射や大気放射による建物表面温度の上昇を抑制することができ、建物内への熱の流入を抑制す

るとともに、植物の表面温度を低く維持することで、屋外の大気側への顕熱を抑制することが可能となり、評価指標としての有効性が示唆された。

さらに、壁面緑化植物の蒸散作用による温熱環境改善効果を定量化することを目的として、壁面緑化で使用されているアメリカツルマサキを対象として、緑化パネル材に植栽した試験体を用いた実験を行い、蒸散効果に関する評価を試みた。実験計測の結果、パネル材からの蒸発散量は日積算値で約 3.6kg/m^2 (3.6mm/m^2 に相当) であり、このうち植物からの蒸散量は約 2.2kg/m^2 (2.2mm/m^2 に相当) となり、約 60%を植物からの蒸散が占めた。また、潜熱フラックスと正味放射量との間には、正の相関が認められ、蒸発散量に伴う潜熱フラックスの正味放射量の増加量に占める割合は、パネル材全体で約 60%、このうち植物が 50%となり、潜熱フラックスの増加量の約 80%を植物からの蒸散が占め、潜熱フラックスにおける植物蒸散量の寄与の高いことが示唆された。

壁面緑化による屋外での温熱環境改善効果として、壁面からの放射熱境の改善とともに、植物と緑化基盤材からの蒸発散による気化熱が潜熱として消費され、潜熱は液体が気化して気体に状態変化する際に消費されるため、大気側の熱負荷の上昇に作用しないことから、熱負荷の増大に作用する顕熱の抑制を図り、温熱環境改善に寄与する壁面緑化の主要な効果であり、今回の計測で正味放射量の約 60%に及び、植物の割合が約 80%を占める等、都市の屋外における暑熱緩和に壁面緑化が有用であることを定量的に明らかにすることができた。

まとめ

壁面緑化による建物外部空間の温熱環境緩和効果を定量的に評価することを目的として、壁面緑化パネルを用いた実験と計測を試みた。本研究において得られた主な結果は、以下のとおりである。

- ① 緑化パネルの表面温度は、コンクリート壁面の表面温度と比較すると日中のピーク時で $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 程度低下していた。
- ② 黒球温度の計測値より算出した MRT を比較したところ、コンクリート壁と比べる化パネルの方がピーク時で約 11°C の低減効果が見られた。
- ③ ユニットからの蒸発散量は日積算値で約 4.1kg/m^2 (4.1mm に相当) であり、このうち植物からの蒸散量は約 2.4kg/m^2 (2.4mm に相当) となり、ユニット全体の約 60%を占めた。
- ④ 潜熱フラックスと正味放射量との間には、正の相関が認められ、蒸発散に伴う潜熱フラックスの正味放射量の占める割合は約 60%を示した。

今後、建物外部への緑化による温熱環境改善効果を定量的に評価するため、植物の種類や被覆の度合い、緑化タイプの違い等による更なる基礎データの蓄積を図る必要がある。

本稿は、壁面緑化による建物屋外側への温熱環境改善効果として、建物表面の表面温度低減と放射熱の緩和効果、緑化植物からの蒸散作用による潜熱消費による熱負荷の低減効果を明らかにするために、過年度発表した主要論文3編^{6),7),9)}をもとに統合、再編したものである。

【引用文献】

- 1) 関係府省連絡会議（2004）ヒートアイランド対策大綱，18pp.
(http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/heat_island.)
- 2) ヒートアイランド対策推進会議（2013）ヒートアイランド対策大綱，21pp.
(http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo10_hh_000080.html)
- 3) 鈴木弘孝（2014）壁面緑化の研究動向と普及に向けた諸課題、城西国際大学紀要 22（7），1-25
- 4) 下村孝（2001）壁面緑化資材の利用特性と利用上の課題、日本緑化工学会誌 27（2），399-406
- 5) 武藤浩・興水肇・原田鎮郎・佐久間護（2001）建築物の壁面緑化に関する研究その2 一般人の評価構造に基づく計画上の課題の抽出，日本建築学会大会学術講演梗概集 F-1 分冊、683-684
- 6) 日本政策投資銀行（2004）都市環境改善の視点から見た建築物緑化の展望，日本政策投資銀行，74pp
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 国土交通省都市・地域整備局公園緑地課緑地環境推進室（2004）緑による熱環境改善効果に関する調査について（http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha04/04/040813_.html）
- 11) 鈴木弘孝・三坂育正・水谷敦司・田代順孝（2006）WBGT、SET*による壁面緑化の温熱環境改善効果の評価、ランドスケープ研究 69（5）、441-446
- 12) 鈴木弘孝・三坂育正・田代順孝（2006）蒸発散量の計測によるパネル型壁面緑化の温熱環境改善効果、日本緑化工学会誌 32（1）、80-85
- 13) 山谷知行編集（2001）朝倉植物生理学講座②代謝，朝倉書店、東京、175pp.
- 14) 加藤素子・山本聡・石田均・前中久行（2001）土壌水分および日射量測定に基づく薄層土壌の必要保水量について、ランドスケープ研究 64（5），541-544
- 15) 三坂育正・鈴木弘孝・藤崎健一郎・成田健一・田代順孝（2005）壁面緑化の蒸散効果に関する研究、環境情報科学論文集 19，113-116
- 16) 鈴木弘孝（2006）敷地・街区を対象とした壁面緑化による温熱環境改善効果に関する研究，学位論文，182pp.

- 17) 東京都環境局（2001）「東京における自然の保護と回復に関する条例」改正について
(http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/nature/guide/protection_recovery_04.html)
- 18) 国土交通省公園緑地・景観課ホームページ：緑化施設整備計画認定制度、公園とみどり
(<http://www.mlit.go.jp/crd/park/shisaku/ryokuchi/shisetsuseibi/>)
- 19) 都市緑化機構ホームページ：屋上・壁面緑化の推進に関する諸制度
(<http://urbangreen.or.jp/ug/greentech/>)

【参考文献】

- ・足永靖信、村上周三、吉田伸治、磐田靖子、大岡龍三、持田灯（1999）対流・放射・湿気連成解析による屋外環境共生空間の研究（その 9）団地内キャニオン空間の温熱環境の数値予測と実測の比較、日本建築学会大会梗概集（中国）、903-904
- ・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 22：253-258
- ・梅干野晃・萩原賢二（1983）屋上の芝生植栽による照り返し防止・焼け込み防止効果、日本建築学会建築環境工学論文集：133-140
- ・関係府省連絡会議（2004）ヒートアイランド対策大綱
- ・鈴木弘孝・小島隆矢・嶋田俊平・野島義照・田代順孝（2005）壁面緑化に関する技術開発の動向と課題、日本緑化工学会学会誌 31（2）、247-259
- ・鈴木弘孝・三坂育正・本條毅・田代順孝（2006）パネル型壁面緑化における蒸発散量の推計と熱収支の評価、環境情報科学論文集 No.20、205-210
- ・鈴木弘孝・三坂育正・田代順孝（2007）蒸発効率を指標とした壁面緑化の蒸発特性、ランドスケープ研究 70（5）、401-406
- ・三坂育正・成田健一（2000）緑化による屋外熱環境の緩和に関する研究—その 1—草地における熱収支特性の実測評価、日本建築学会学術講演梗概集（東北）：615-616
- ・三坂育正・成田健一（2002）緑化による屋外熱環境の緩和に関する研究（その 2）、日本建築学会大会梗概集：677-678
- ・三坂育正・鈴木弘孝・藤崎健一郎・成田健一・田代順孝（2005）壁面緑化植物の蒸散作用による温熱環境改善効果、環境情報科学論文集 No.19、113-116
- ・日本建築学会編（2000）拡張アメダス気象データ、340-341
- ・野島義照・沖中健・瀬戸裕直・倉山千春・二階堂稔・高砂裕之（1998）屋上緑化による夏期の建築物および都市の熱負荷の軽減効果の実証的研究、日本緑化工学会誌 20（3）：168-176
- ・野島義照（1998）都市における植生からの蒸散による夏期の温熱環境改善力に関する研究、京都大学学位論文、89-133

- ・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

The Thermal Environment Improvement Effects of Wall Greening

Hiroataka Suzuki

Abstract

This study is intended to quantitatively assess the thermal environment mitigation effects of wall greening, which is attracting attention as a countermeasure against the heat island phenomenon in cities, by measuring the surface temperature and MRT of panels covered with vegetation and of concrete walls (painted white). As a result, the surface temperature of panels was lowered about 2 to 4°C outside peak time, and the MRT was also about 11°C lower at peak time. Next the evapotranspiration from wall panels was measured and the latent heat flux was calculated based on the measurement data. The analysis showed that the evapotranspiration from the vegetation on the panels was about 4.1kg/m² (4.1mm), and the latent heat flux from the panels was about 60% of the net heat emission. The study suggests that it is possible to quantitatively assess how effectively wall greening decreases sensible heat flux.

Keywords : heat island, wall greening, thermal environment, MRT, evapotranspiration,
latent heat flux