

壁面緑化による冬期の温熱環境改善効果

鈴木 弘孝

【要旨】

本稿は、樹木を主体とした緑化植物を混植したパネル型の壁面緑化施設を対象として、コンクリート壁との対比からヒートアイランド現象が最も顕著に現れる冬期における建物内外への温熱環境負荷の程度を放射環境と熱収支に着目し、その差を定量的に評価する目的で実験計測し、解析したものである。解析結果から、放射収支については、反射日射量が緑化壁ではピーク時に約 $200W/m^2$ に対して、コンクリート壁では約 $600W/m^2$ と約 3 倍の値を示した。表面温度については、緑化壁面ではピーク時に $30^\circ C$ 以上を記録したのに対し、コンクリート壁では $10^\circ C$ 前後にとどまり、外気温よりも $2\sim5^\circ C$ 低く推移した。顕熱フラックスについては、緑化壁面がピーク時に $500W/m^2$ を示し、コンクリート壁の約 $200W/m^2$ を大きく上回った。蒸発効率については、緑化壁では約 0.1 を示し、夏期のつる性植物の $1/2$ 以下にとどまった。これは植物種の違いとともに、冬期における蒸散活動の低下が要因と推察された。以上の結果から、パネル型の緑化壁は、冬期において建物外壁の表面温度の低下を緩和し、パネル基材との組みあわせにより外断熱材として機能し、建物室内側に対する保温効果の高いことが示唆された。

キーワード：壁面緑化、冬期温熱環境、ヒートアイランド、放射収支、熱収支

1. 背景と目的

大都市の市街地部においては計画的に緑を確保し、ヒートアイランド現象の緩和等持続的発展可能な都市環境を形成していくための対策として、地表面被覆の改善¹⁾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と考えられるが、高層の業務ビルやマンションなど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、建築物の屋上や壁面等の緑化により緑地面積を拡大することが必要とされている¹⁾。市街地における緑化の推進を図るため、平成 16(2004) 年 12 月の都市緑地保全法の改正により「緑化地域制度²⁾」が、都市公園法の改正で「立体都市公園制度³⁾」が創設される等、国においても緑地制度の大幅な拡充強化が図られた。

本稿は、断熱材を使用したパネルタイプの壁面緑化施設を対象として、ヒートアイランド現象による温熱負荷の差が顕著に見られる冬期間を計測期間として、コンクリート壁面と壁

面緑化施設との比較により、表面温度、放射収支、熱収支について計測値を基に解析を行い、建物内・外への温熱環境改善効果の定量的な評価を行うことを目的としている。

2. 方法

2. 1 緑化試験体の概要

実験と計測は、株式会社竹中工務店技術研究所内(千葉県印西市)内の南に面した壁面に、既に設置してあった緑化試験体と隣のコンクリート壁面を対象として実施した。計測・評価対象とした緑化試験体は、株式会社竹中工務店が開発したもので、重さが 30kg/m^2 と軽量ながら、草花から高木まで多様な植栽を実現する壁面緑化システムである。植物は根をパネル内に自由に伸長し、大きく健全に生育することが可能となっている。また、壁面緑化パネルは建物外壁から独立して固定されているため、建物側に漏水や根の侵入などの躯体への影響も解消されている。緑化パネルの基材は、断熱性の高いE P S 製で構成され、植物を植込む表面パネルと裏面のパネルで、中間層の保水性・排水性・通気性・保肥性を兼備した不織布基盤をサンドイッチする構成となっており、灌水は最上部に設置したドリップホースで点滴給水する仕組みとなっている。緑化パネルは、建物の壁面に支障なく緊結でき、防水性・耐風安全性などの建築的要件を満たした仕様となっている。緑化試験体への給水は、4時、7時、10時、13時、16時、19時の6回、3時間ごとにタイマーにより行なった。1回当たりの給水量は約250Lである。評価対象としたパネル試験体に植栽されている植物を表1に示す。壁面緑化試験体の写真については写真1に示す。

2. 2 計測項目と計測方法

(1) 気象条件

気象条件は、測定時における一般的な気象状況を把握するために計測を行うもので、計測項目は、日射量（全天日射量）、大気放射量（下向き長波放射量）、気温、相対湿度、風向・風速とした。測定は、できる限り建物の影響を受けないように配慮し、研究所の敷地内に計測器を設置し、連続で測定した。測定項目と測定方法、使用した測定機器は、表2に示すとおりである。

(2) 放射収支特性、熱収支特性

放射収支特性は、緑化パネル試験体および比較対象とする白壁（コンクリート壁面）に平行に長短波放射計を設置し、垂直面で入射する短波放射（入射日射）と長波放射（大気放射）、および垂直面から出て行く反射短波（反射日射）と長波放射（輻射）の各成分を独立して測定を行った。熱収支特性については、本来、顕熱フラックス、潜熱フラックスを渦相関法等により直接測定することが望ましいが、測定対象とする試験体に十分なフェッチがないこと等を考慮し、伝導成分を直接測定して顕熱フラックスと潜熱フラックスを分離することとした。

なお、測定にあたっては、各データのロガーへの抽出時間は1分とし、解析には10分間の

表1 壁面緑化パネル試験体の植栽リスト

針葉樹	アスナロ コノテガシワ	イチョウ ヒノキ	イヌマキ クロマツ	カヤ ドイツトーヒ	キャラボク 9種
常緑広葉樹	アオキ	アラカシ	イヌツゲ	オオムラサキ	カナメモチ
	キンシバイ	ギンマサキ	クス	クチナシ	クロガネモチ
	モッコク	サツキ	シイ	シャリンバイ	シラカシ
	シロダモ	ツバキ	トキワサンザシ	ナワシログミ	ネズミモチ
	ハクチョウゲ	ヒイラギ	ヒサカキ	ビヨウヤナギ	
落葉広葉樹	イヌシデ	イロハモミジ	ウシコロシ	ウメ	ウエモドキ
	エゴノキ	オウバイ	ガマズミ	クヌギ	ケヤキ
	コウヤボウキ	コナラ	コブシ	ザクロ	シモツケ
	レンギョウ	ナニワイバラ	ニシキギ	ボケ	マンサク
	ミズキ	ムクゲ	ムクノキ	ムラサキシキブ	ムレスズメ
	メギ	ヤマハンノキ			51種

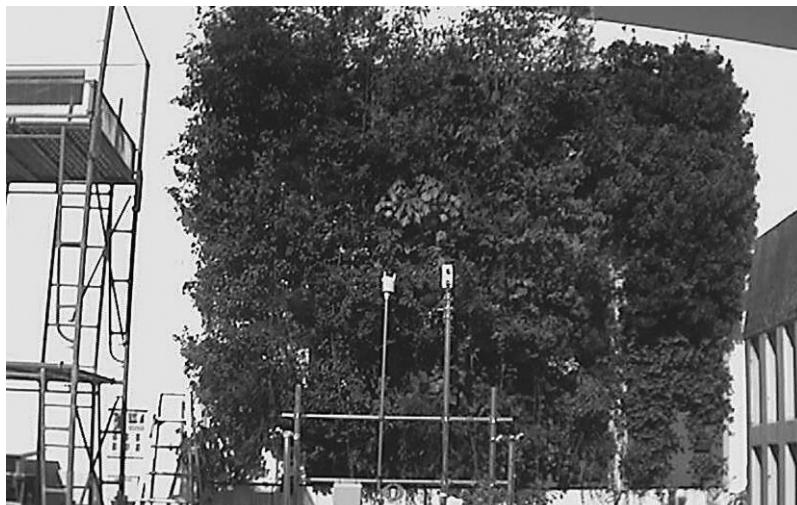


写真1 測定機器の設置状況（緑化パネル正面）

移動平均値を用いた。2007年10月中旬より測定機器の準備および一部設置を開始し、11月初旬に予備測定を行った上で、本測定を開始した。機器設置の都合上、実際の測定期間は、緑化試験体と比較対象とする白壁（コンクリート壁）で若干のずれが生じ、下記の期間において連続計測を行った。

壁面緑化パネル試験体：2007年11月21日～2008年1月15日

コンクリート壁（白壁）：2007年11月25日～2008年1月15日

(3)測定点と測定機器の設置

測定点を図1に、測定機器の設置状況を写真1に示す。

表2 測定項目と測定方法

測定種類	測定項目	測定機器	点数
外界条件	気温・湿度	温湿度計 CVS-HMP-50	1
	風速	超音波風速計 KAIJO DA600-3V	1
	日射計(全天日射量)	全天日射計 英弘精機 MS-601	1
	大気放射(長波放射)	精密赤外放射計 英弘精機 MS-202	1
	降雨量	転倒ます式雨量計 CEM-TBRG	1
放射特性 熱収支特性	入射・反射短波放射量	長短波放射計 英弘精機:MR-50	2
	入射・反射長波放射量		
	表面温度	T型熱電対 T-TCC	2
	伝導熱量	熱流計 英弘精機:MF-180	2
蒸発散量	給水量	流量計	1
	排水量	転倒ます型雨量計 大田計器製作所:OW-34	1
温熱環境	グローブ温度	グローブ温度計 プリード:BST131	2
	WBGT	WBGT計 京都電子	2
	気温・湿度	ウェザートランシミッター VAISALA:WXT510	1
	風向・風速		1
データロガー	データロガー	江藤電気:CADAC21	1

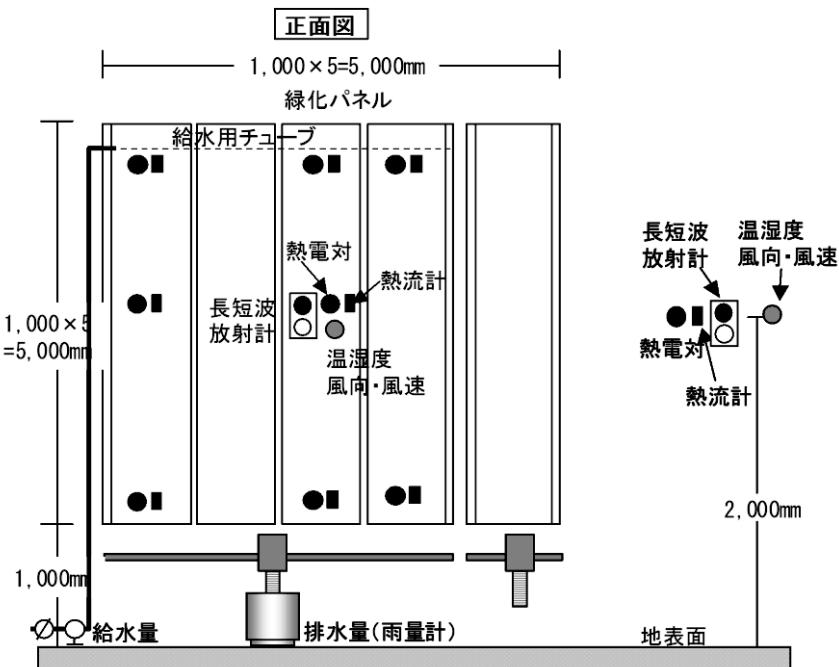


図1 各測定項目の測定点

3. 計測結果と解析・評価

測定期間中における気象状況を下に、本稿での解析を行う「集中解析期間」として 2007 年 12 月 4~10 日の期間を抽出して、以下に解析を進めた。

3. 1 気象データの測定結果

集中解析期間（2007 年 12 月 4~10 日）における外界条件（気象状況）について、日射量・大気放射量および降雨量、気温・相対湿度、および、風向・風速の測定結果を図 2 に示す。

3. 2 表面温度の測定結果

集中解析期間における表面温度の測定結果を図 3 に示す。表面温度は、熱電対を用いた測定を行っているが、特に緑化パネル試験体については、日射の当たり具合やパネルの色等により、表面温度に測定点における分布が生じてしまうことが懸念されるため、長短波放射計による測定で得られる壁面からの輻射量から、放射率を 1.0 と仮定し、平均放射温度として(1)式で算出することとした。

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

ここで、 T_{sr} ：表面温度($^{\circ}\text{C}$)、 $L \uparrow$ ：上向き長波放射量(W/m^2)、 ε ：放射率（未補正時は 1.0）

σ ：ステファンーボルツマン定数

計測期間において、緑化試験体のピーク時の表面温度は 30 $^{\circ}\text{C}$ 以上を記録したのに対して、コンクリート壁は 10 $^{\circ}\text{C}$ 前後であり、気温よりも 5 $^{\circ}\text{C}$ 前後低く、緑化試験体と比較して 20 $^{\circ}\text{C}$ 以上低くなっていた。

3. 3 放射収支特性

建物壁面における放射収支は、式(2)で表せる。

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

ここで、 Rn ：純放射量 [W/m^2]、 $S \downarrow$ ：入射日射量 [W/m^2]、 $S \uparrow$ ：反射日射量 [W/m^2]、 $L \downarrow$ ：大気放射量 [W/m^2]、 $L \uparrow$ ：輻射量 [W/m^2]

放射収支を計測することで、壁面の受熱量となる純放射量を知ることができる。

(1) 緑化パネル面の放射収支

本計測の壁面緑化パネル試験体は、つる性植物を中心に植栽する従来の壁面緑化とは異なり、樹木を植栽することが可能なシステムである。樹木は、常緑樹のみでなく、落葉樹も混せて植栽が行われている。このため、12 月にかけて、落葉による放射・熱特性の変化が予想された。

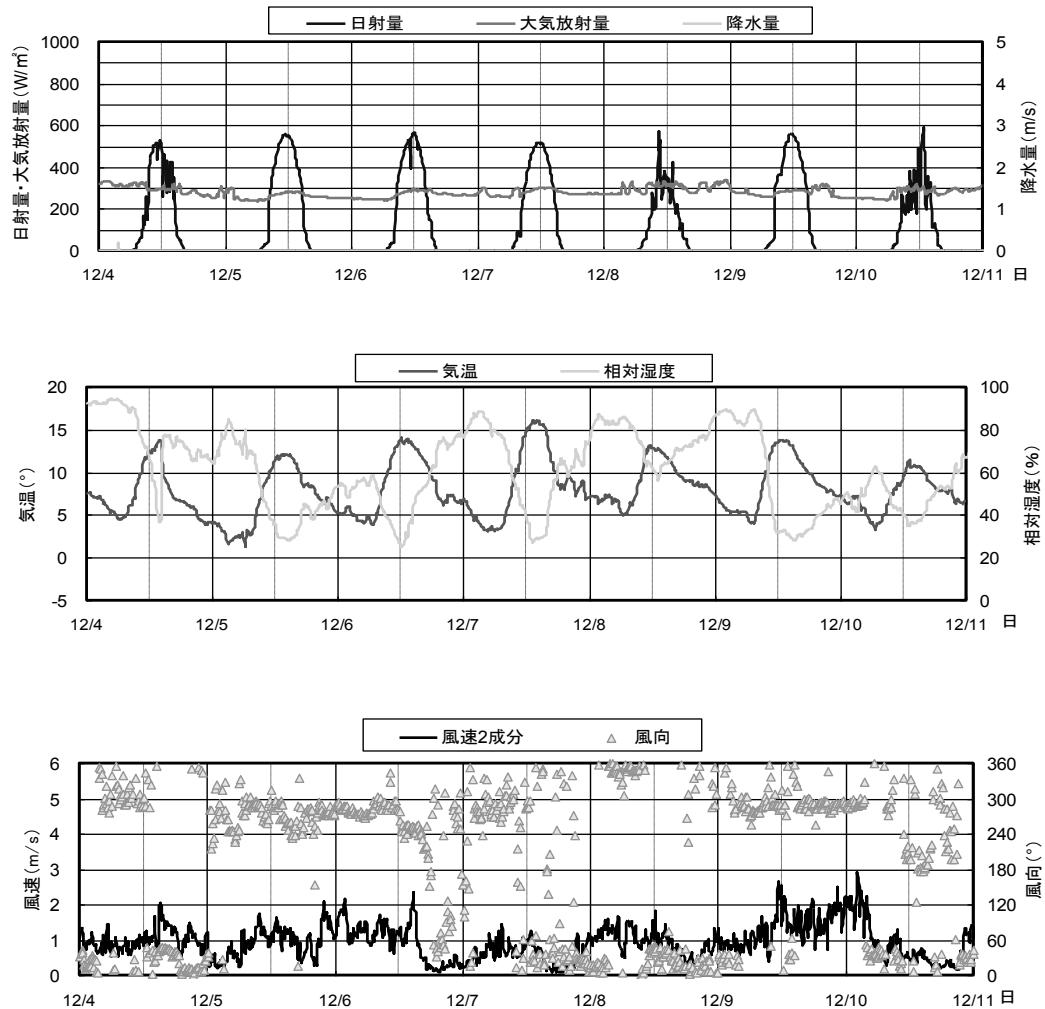


図2 集中解析期間の気象状況

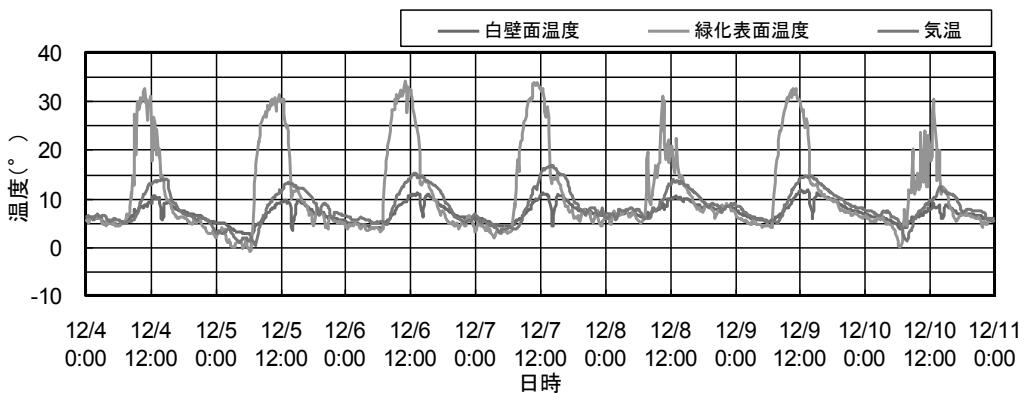


図3 表面温度の経時変化

緑化壁面における放射収支結果について、図4に示す。晴天日の入射日射量は、 885 W/m^2 に対して、入射日射に対する反射日射量の比であるアルベドは、日中の平均が0.20であった。壁面の緑被率変化や、太陽高度の季節変動の影響は、ほとんど認められなかった。アルベドは、大気温度に依存する大気放射と、壁面の表面温度に依存する輻射は、日変化があまり認められなかった。いずれの日も約 100 W/m^2 の幅で変動が認められた。雨天日を除いて、輻射量の方が大気放射量よりも数十 W/m^2 大きな値で推移した。12月の平均大気放射量は 330 W/m^2 、輻射量は 357 W/m^2 であった。

(2) 白壁面の放射収支

白壁面の放射収支結果について、図5に示す。晴天日の入射日射量は、隣接する壁面緑化とほぼ同様で、 893 W/m^2 に対して、アルベドは壁面緑化部よりも高い。日中の平均が0.76、であった。アルベドが0.2程度の緑化パネル面に比べて、0.5以上高い値を示した。緑化壁面に比べて、入射日射量の1/2以上を反射している。また、白壁面のアルベドは、太陽高度に依存し、太陽高度が低いと0.6程度、太陽高度が高くなるにつれて上昇し、13時30分ごろに0.82となりピークを示した。これより、アルベドは太陽高度に依存性が認められた。

大気放射と輻射は、約 100W/m^2 の幅で変動が認められた。緑化パネル面と同様に、雨天日を除いて、輻射量の方が大気放射量よりも数十 W/m^2 大きな値で推移した。12月の平均大気放射量は 330W/m^2 、輻射量は 357W/m^2 だった。12月の輻射量は、緑化パネル面の最大値が 420W/m^2 に対して、白壁面の最大値は 396 W/m^2 であった。これより、輻射量は表面温度に依存しており、最大輻射量の違いは日中の表面温度の違いによるものと考えられる。

(3) 緑化パネル面と白壁面の比較

緑化パネル面と白壁面の放射収支から、純放射量を算出・比較した。結果を図6および表3に示す。晴天時は、緑化パネル面の純放射量が、白壁面の純放射量よりも大きい値となった。最大純放射量は、図6より緑化パネル面が 661W/m^2 に対して、白壁面が 248 W/m^2 であり、 400 W/m^2 以上の差が認められた。緑化パネル面のアルベドは、約0.2、白壁面のアルベドは、約0.76である。12月の最大入射量が、 893 W/m^2 であった。このため最大入射量時に、緑化パネル面と白壁面における短波放射収支には、 $893 \times (0.76 - 0.2) = 500 \text{ W/m}^2$ 程度の差がある。これより、緑化パネル面の純放射量が白壁面よりも大きくなっていたのは、アルベドの違いが要因と考えられる。

3. 4 熱収支解析結果

(1) 热収支の算出方法

前節までで、放射収支により純放射量が得られた。これらの結果から、熱収支解析を行う。熱収支解析を行うことによって、ヒートアイランド現象として問題となる大気への対流による熱輸送量（「顕熱輸送量」）を求めることができる。また、植物の蒸発散による「潜熱輸送量」の割合を求ることで、緑化などのヒートアイランド対策の効果について定量的に評価する

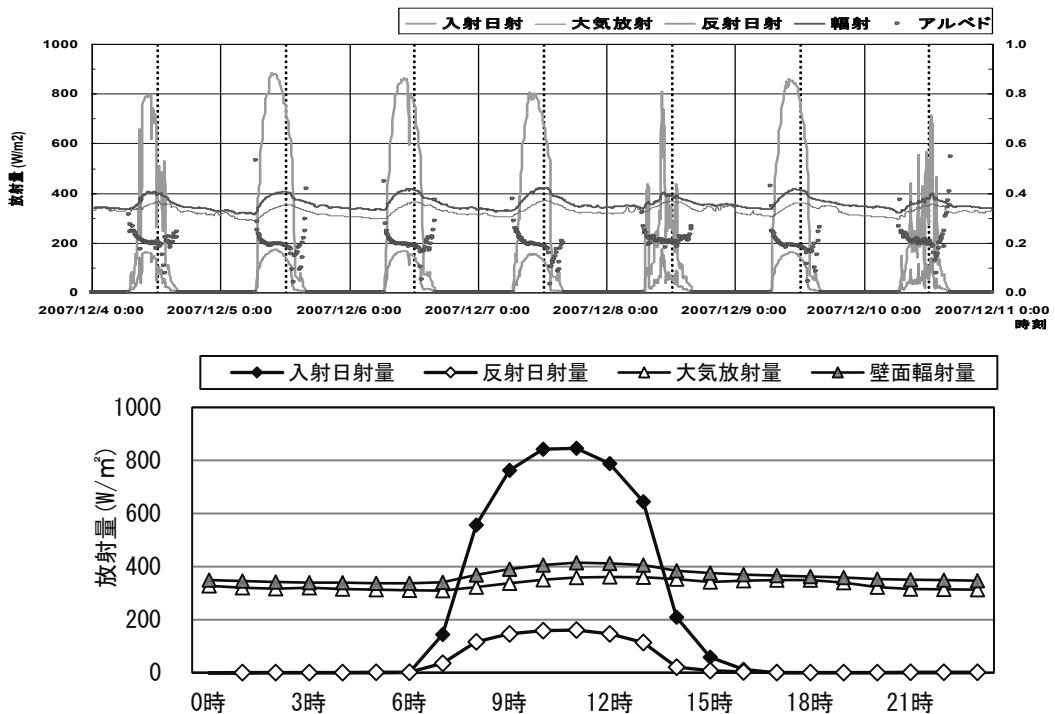


図4 放射収支の変化（壁面緑化パネル試験体）

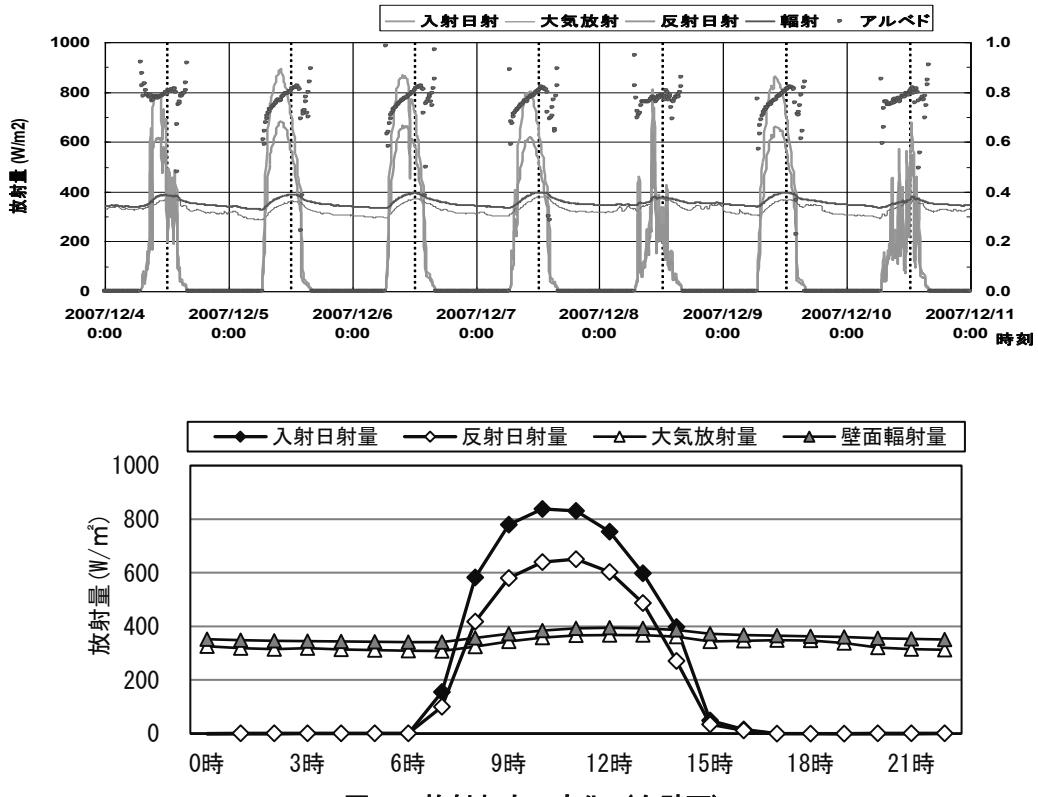


図5 放射収支の変化（白壁面）

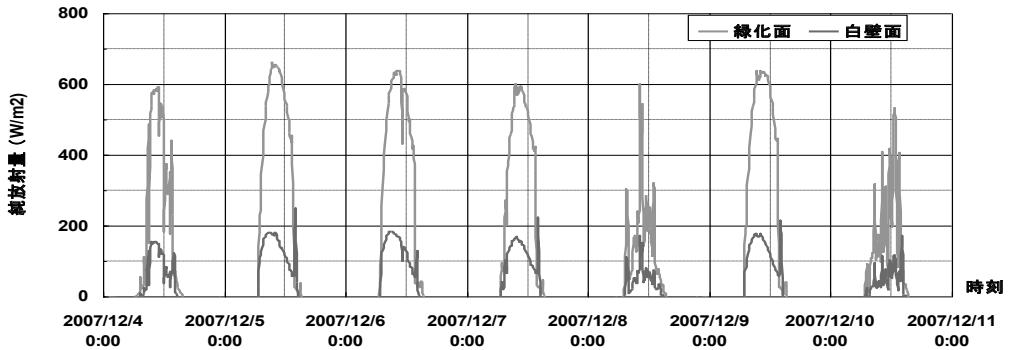


図6 純放射量の経時変化

表3 純放射量の日平均、最大、最小値

(W/m²)

	12月		1月	
	緑化面	白壁面	緑化面	白壁面
平均純放射量	100.22	12.80	58.84	6.67
最大純放射量	661.73	248.49	570.91	194.84
最小純放射量	-40.14	-44.81	-38.19	-41.66

ことができる。熱収支式は、式(3)で表される。

$$R_n = H + lE + G \quad (3)$$

ここで、 R_n ：純放射、 H ：顕熱輸送量 [W/m²]、 lE ：潜熱輸送量 [W/m²]、 G ：伝導熱量 [W/m²])

緑化パネル面は、前節に示した方法で3時間平均の蒸散量を求めて、潜熱輸送量を算出する。また、熱流計を緑化パネル面に12点設置し、その平均から緑化パネル面への伝導熱量を算出した。顕熱輸送量は、純放射量から潜熱輸送量と伝導熱量を引いた残差として、式(4)より求めることができる。

$$H = R_n - (lE + G) \quad (4)$$

また白壁面は、蒸発による潜熱輸送がないため、熱収支式では顕熱輸送量と伝導熱量の和が、純放射量に等しくなる。

$$R_n = H + G \quad (5)$$

伝導熱量は、壁面で熱流計によって計測を行った。顕熱輸送量は、純放射量から伝導熱量を引いた残差から式(6)より求めることができる。

すなわち、

$$H = R_n - G \quad (6)$$

(2) 緑化パネル面の熱収支

緑化パネル面での熱収支を求める。前節の方法で、蒸散量を求めた。結果を図7に示す。12月は、給水期間中の蒸散量は $0.12\text{mm/h} \sim 0.27\text{mm/h}$ であった。蒸発散量 0.25mm/h は、潜熱輸送量に換算して約 180W/m^2 に相当する。計測器寒中の潜熱輸送量は、 $35\text{W/m}^2 \sim 180\text{W/m}^2$ であった。また、伝導熱量について、図8に示す。純放射量が、最大で 580W/m^2 を示すのに対して、緑化パネル面における伝導熱量は、最大で 30W/m^2 である。純放射量の約5%程度が伝導熱量となることがわかる。伝導熱量は、白壁など露出した壁面に比べて、小さい結果となった。緑化パネル面では、樹木の葉による被陰の効果で、緑化パネル表面まで熱が伝わりにくいためと考えられる。

以上の結果から、緑化パネル面の顕熱輸送量を算出し、熱収支解析を行った。12月の週間結果を図9に示した。緑化パネル面の純放射量は、最大 637W/m^2 である。日中は、顕熱輸送量がもっとも大きな熱成分となり、12月の晴天日には最大 577W/m^2 を示した。また、純放射量がほぼ 0W/m^2 になる夜明け前と日没後は、潜熱による熱輸送の影響で、顕熱輸送量がマイナスを示す。

晴天日（2007年12月7日）の蒸発量と熱収支結果を、図10に示した。潜熱輸送量は、4時から22時までの間、 $100\sim200\text{W/m}^2$ を示している。一方で顕熱輸送量は、夜明け前は、約

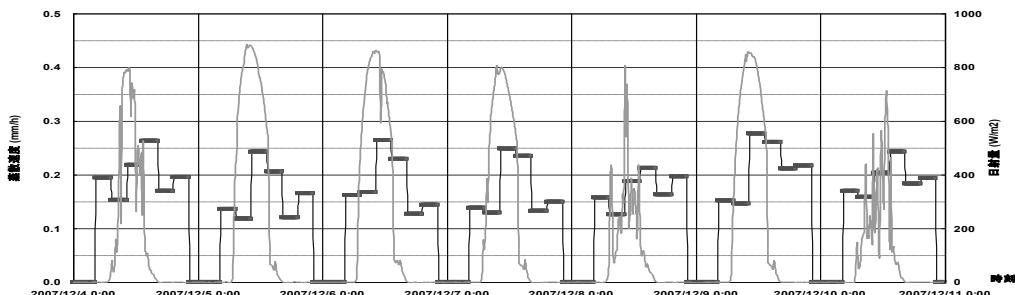


図7 緑化パネルにおける純放射量と蒸散量

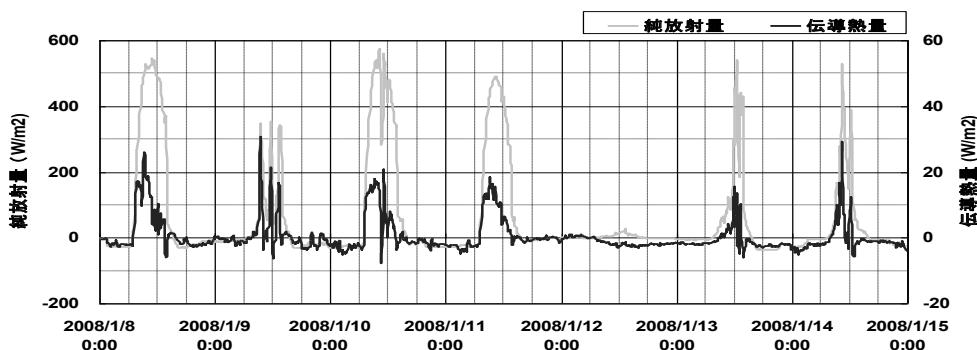


図8 緑化パネルにおける純放射量と伝導熱量

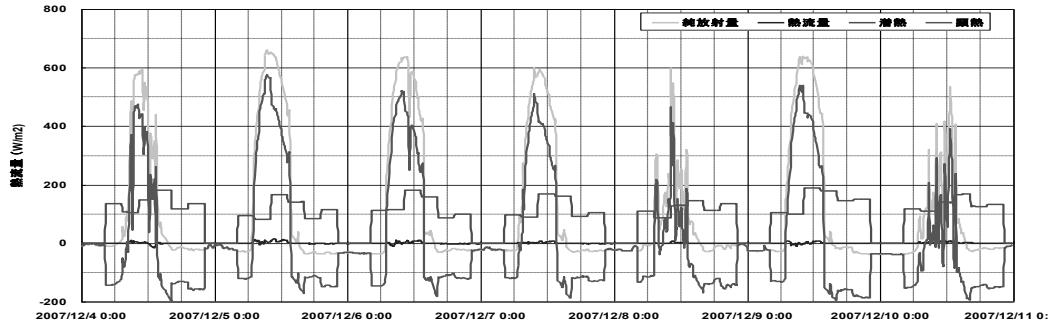


図 9 緑化パネルにおける熱収支の経時変化

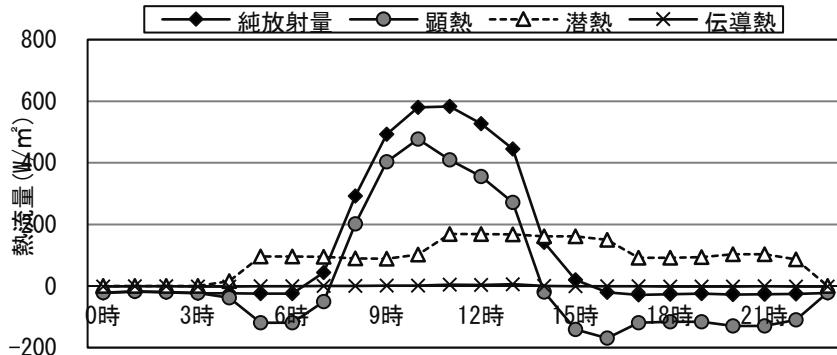
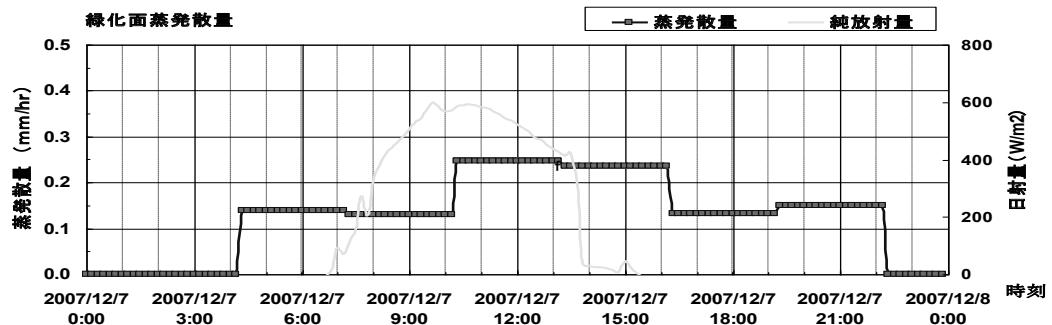


図 10 緑化パネルの蒸発散量と熱収支（2007年12月7日）

−100 W/m²を示し、日が昇るとプラスに転じる。その後、11 時に最大放射量を示した純放射量よりも、少し早い 10 時に最大顕熱輸送量を示す。これは、10 時から 13 時に最大を示す潜熱輸送量の増大分が、純放射量の増大分より大きかったためである。その後、顕熱輸送量は次第に減少し、日没時に再びマイナスになった。

(3) 白壁面の熱収支

白壁面の純放射量と伝導熱量から顕熱輸送量を算出し、熱収支位の結果を図 11 に示した。白壁面の純放射量は、最大 183 W/m²である。夜間、顕熱輸送量はマイナスの値をとった。日が昇ると顕熱輸送量、伝導熱量がともに上昇する。昼前までは顕熱輸送量が、伝導熱量よりも大

きい。しかし、午後は伝導熱量のほうが顕熱輸送量よりも大きくなる傾向が見られた。日射によって温度が上がった壁面は、次第に輻射量が増えて温度上昇が鈍くなる。一方で気温の上昇により、壁面と気温の温度差は小さくなっていく。このため、顕熱輸送量は減少していく。伝導熱量は、白壁が熱容量が大きいため、壁面の温度上昇が鈍くなってしまっても壁体内温度勾配は依然大きく、伝導熱量は顕熱輸送量ほど減少しない。このため、昼前後に顕熱輸送量と伝導熱量の逆転が観察されると考えられた。

前節で求めた熱収支結果を元に、緑化パネル面と白壁面の顕熱輸送量比較結果を、図1-2に示した。日中は、緑化パネル面の顕熱輸送量が白壁面よりも大きい結果となった。一方、夜間は、特に蒸散の影響で緑化面の顕熱輸送量がマイナスになる（大気から緑化面への熱の流入する）時間帯は、緑化面のほうが白壁面よりも顕熱輸送量が少ない、という結果になった。日中は、緑化パネル面の顕熱輸送量は最大 539 W/m²であったのに対して、白壁面の顕熱輸送量は 206 W/m²であった。緑化によるヒートアイランド対策として、蒸発散による潜熱輸送量増加の効果によって、顕熱輸送量を抑制する効果が期待できる。しかし、今回の計測では、緑化面の方が白壁面よりも顕熱輸送量が多い結果となった。この原因として、緑化面のアルベドが平均 0.2 程度であったのに対して、白壁面のアルベドが 0.77 と高く、壁面へ熱量として流入する純放射量に大きな違いがあったこと、今回の測定が冬季であったため植物の生理活動が弱く、緑化パネル面では蒸散による潜熱輸送量が小さかったこと、が挙げられる。

(5) 顕熱輸送量と表面温度

顕熱輸送量は、壁面の表面温度と大気との温度差によって、大気側へ対流で運ばれる熱量である。このため、式(7)で表すことができる。

$$H = k(T_s - T_a) \quad (7)$$

ここで、H : 顕熱輸送量 [W/m²]、k : 対流熱伝達率、Ts : 壁面表面温度[°C]、Ta : 大気温度[°C]

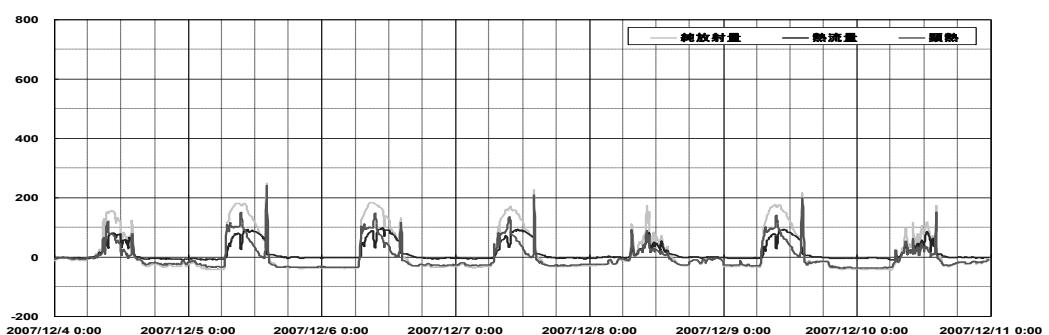


図1-1 白壁面の熱収支

このため、壁面の表面温度を比較することによっても、顕熱輸送量の検討ができる。また、壁面表面温度と大気温度勾配に乘じる係数として対流熱伝達率を算出することによって、熱収支式から算出した顕熱輸送量の結果との整合性があるか、検討が可能になる。壁面の表面温度は、壁面の輻射量から算出することができる。以上から求めた緑化パネル面および白壁面の表面温度結果を、図13に示した。白壁面の表面温度は、輻射量から算出した“白壁面算出温度”，また熱電対を貼り付けることによって直接計測した“白壁面計測温度”の両方を示している。輻射量から算出した温度と、熱電対で計測した温度にはほとんど違いがなく、両者の間には整合性が取れていた。

(6) 対流熱伝達率

対流熱伝達率を、表面温度と顕熱輸送量の結果から算出した。風速が強くなると対流によって運ばれる熱量は増加する。このため壁面表面温度と気温の温度勾配に対して、対流によって大気に運ばれる顕熱量の比を示している対流熱伝達率は、風速の関数となる。

算出された対流熱伝達率と風速との関係を、図14に示した。なお、対流熱伝達率は、表面温度と気温の差が小さい、もしくは顕熱輸送量が小さい場合は、測定精度の点から誤差が大きくなることが予想される。このため、今回は、温度差が2度以上、顕熱量が100 W/m²以上の場合について、対流熱伝達率を算出した。同じ風速の場合、緑化パネル面の方が白壁面よりも高い対流熱伝達率を示した。これは、表面の粗度が、緑化パネル面の方が白壁面よりも大きかったためと考えられる。粗度が大きいことで、壁面と大気が接触する表面積が増加し、その結果壁面から大気へ運ばれる熱量も増加したと考えられる。顕熱輸送量や温度勾配が小さな冬場は、環境の変動が大きいと安定した対流熱伝達率を算出しにくい可能性がある。今回算出された対流熱伝達率は、風速1.0 m/s時に100程度を示した。これは、これまでの夏季の調査に比べて高い値であった。冬季の測定精度および表面粗度の影響について検討を加える必要がある。

3. 5 蒸散量に関して

(1) 物質伝達率、蒸発効率の算出

熱収支式を解析することにより、顕熱量を得ることができた。前節では、顕熱フラックスと表面温度から対流熱伝達率を求めることができた。ここで、ルイス則を仮定することで、熱伝達と物質伝達のアナロジーにより、(7)式により物質伝達率を求めることができる⁴⁾。

$$kx = \alpha / (C_p \times 0.83) \quad (8)$$

ここで、 kx ：物質伝達率、 α ：対流熱伝達率、 C_p ：空気の比熱 (J/kg/K)

前節で求めた対流熱伝達率の結果より、物質伝達率を求めることができる。結果を図15に示した。物質伝達率は、対流熱伝達率とほぼ比例の関係を示すため、傾向は対流熱伝達率のときと同じになる。物質伝達率を求ることによって、蒸発効率は、植物の蒸散活動の活発さを

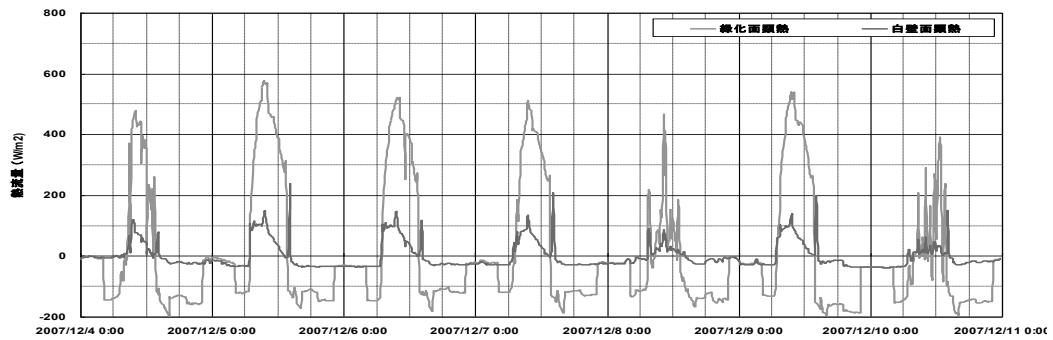


図12 緑化パネルと白壁面の顯熱フラックス

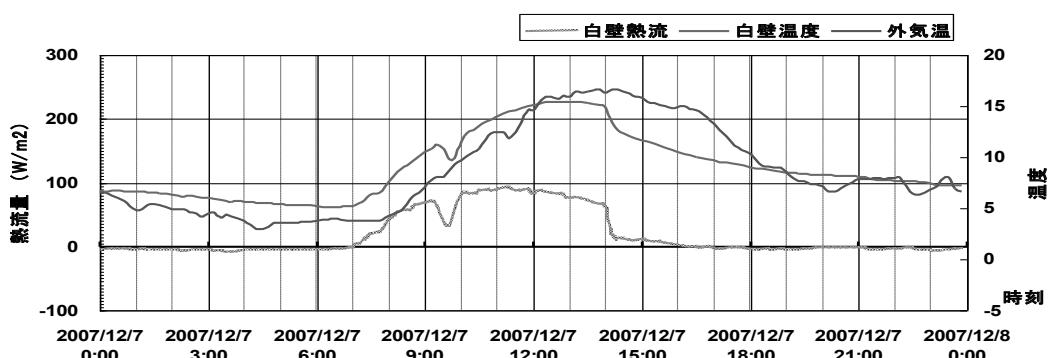
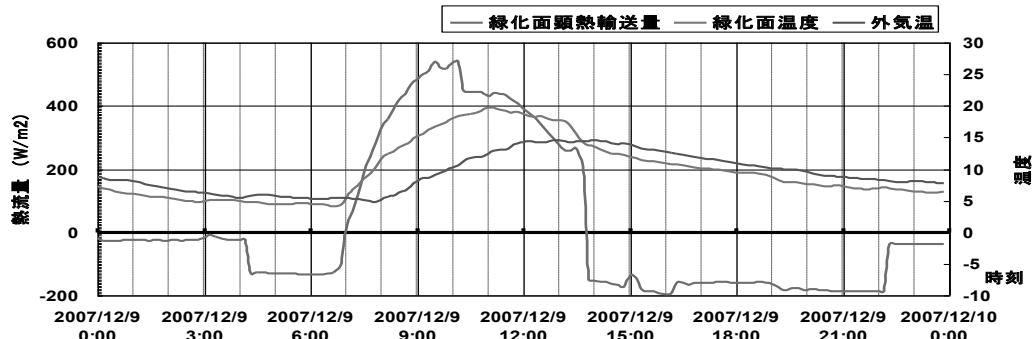
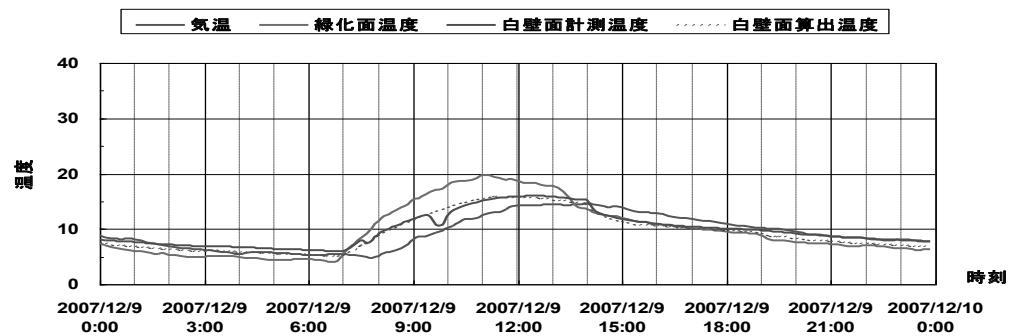


図13 表面温度と気温の経時変化

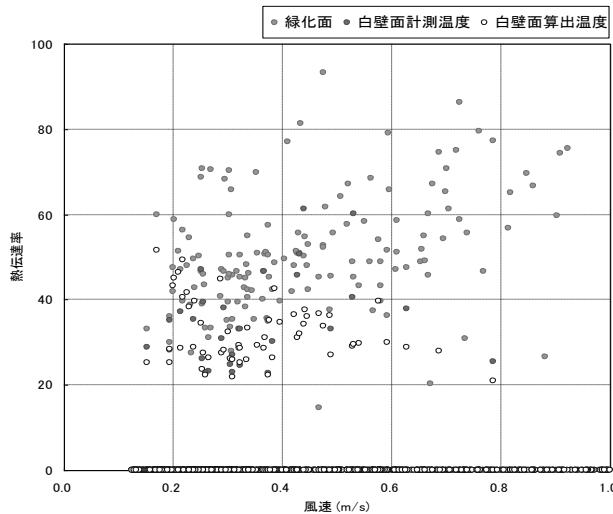


図 14 風速と対流対流熱伝達率の関係（2007 年 12 月）

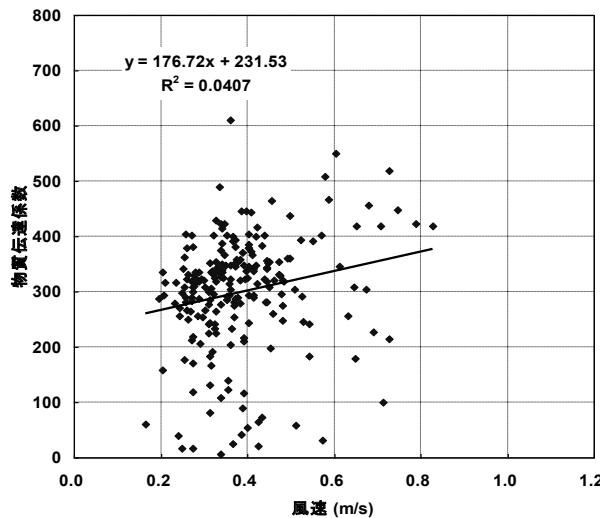


図 15 風速と物質伝達率の関係（2007 年 12 月）

示す指標となる。前節で示したように、緑化によるヒートアイランド対策では、蒸発効率の高さが対策の効果を左右する。このため、蒸発効率はヒートアイランド対策において重要な指標となる。蒸発効率は、(8)式で算出される。

$$\beta = \frac{E}{kx \times (e_{TS} - e_a)} \quad (8)$$

ここで、 β ：蒸発効率、 E ：蒸発散量 [kg/m^2]、 e_{TS} ：表面温度に対する飽和絶対湿度 [kg/kg]、 e_a ：空気の絶対湿度 [kg/kg]

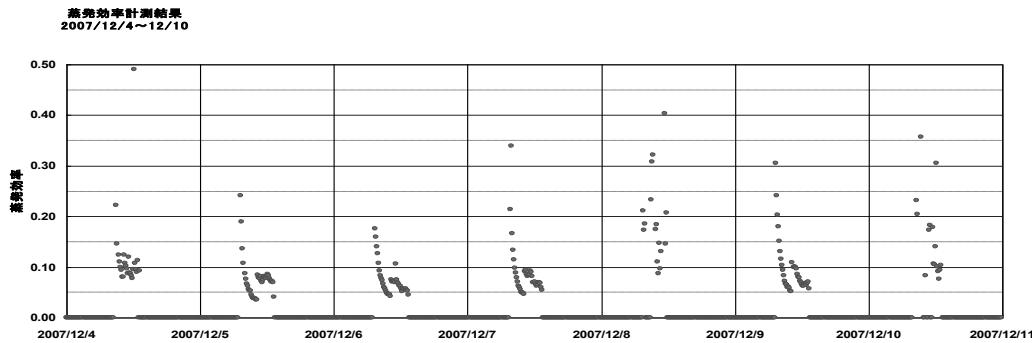


図 16 蒸発効率の経時変化

今回、蒸発効率は、図 16 に示すとおり早朝に高い傾向を示すが、その後は晴天日であるとおよそ 0.05～0.1 を示した。

3. 6 貢流熱流量

(1) 緑化パネル面と白壁面の貢流負荷

緑化は、顕熱フラックス低減によるヒートアイランド対策効果だけでなく、緑化によって建物内への貢流熱量を低減し、空調負荷を低減させる効果が期待できる。結果を図 17 に示した。白壁面の最大熱流量が $60W/m^2$ (?) であったのに対して、緑化パネル面は $15W/m^2$ であり、約 25% 程度に低減された。

(2) 白壁面の熱流負荷

図 18 より白壁面熱負荷の一日の変動は、晴天日に次のような挙動を示すことが観察された。

- 1) 白壁面温度は、午前中は気温よりも早く温度上昇をはじめる。午前中の白壁面は、常に外気温よりも高い。
- 2) 白壁面温度が上昇するにつれ、壁面体内方向の熱流量は増加していく。
- 3) 白壁面温度は、直射日射があたらなくなる 14 時ごろに急激に温度が下がる。このとき、外気温の方が白壁面温度よりも高くなる。
- 4) 白壁面温度が 14 時ごろに急激に低下することで、白壁面表面から壁体内への熱流量も数 W/m^2 程度まで急激に減少する。しばらくは白壁内の温度勾配の方が白壁面気温間の温度勾配よりも大きいため、熱流の方向は、依然壁体内方向である。しかし、17 時ごろに壁面から外気方向への伝導熱流が観察されるようになる。
- 5) 夜間は、壁面から外気方向へ数 W/m^2 の熱流が観察される。その後、夜明けで白壁面温度が上昇すると共に、白壁内方向に熱流が流れる。

(3) 緑化パネル面裏側の熱流負荷

緑化パネル面裏側熱流負荷および緑化パネル表面熱流負荷について、図 19 に示した。表

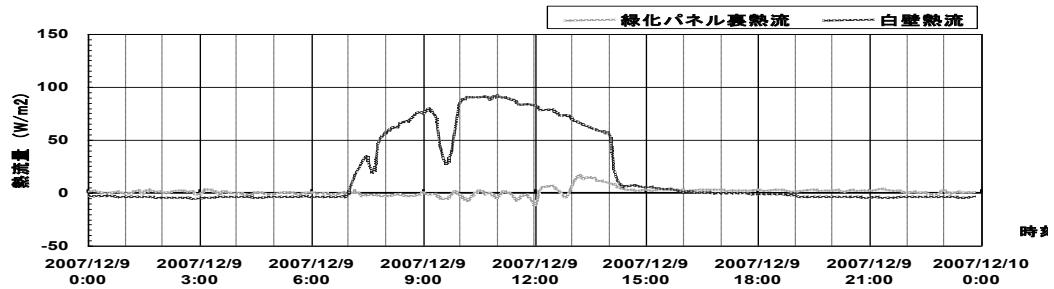


図 17 伝道熱量の経時変化

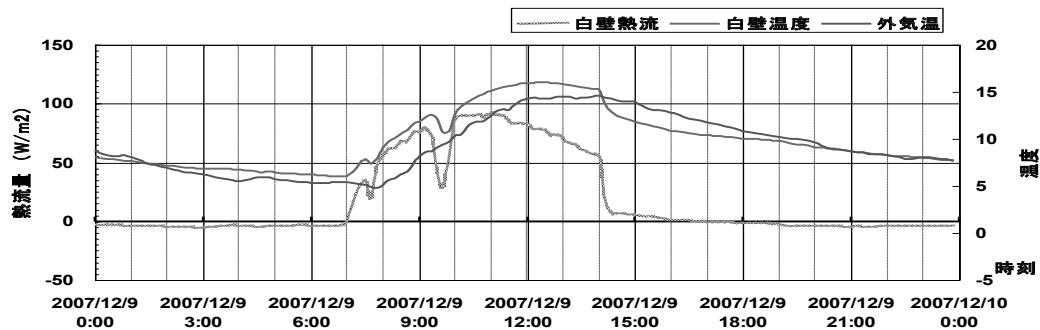


図 18 白壁の温度の経時変化

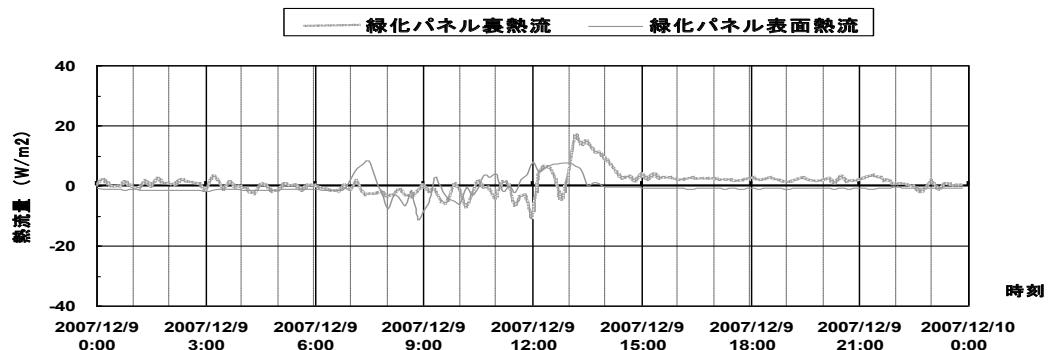


図 19 緑化パネルの伝導熱量の経時変化

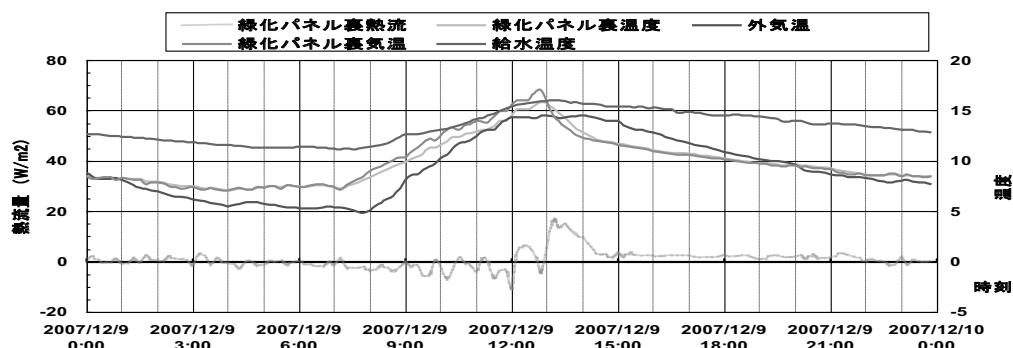


図 20 緑化パネルの温度の経時変化

面・裏面ともに数 $10W/m^2$ の低い値で推移した。また、表面の熱流と裏面の熱流にはほとんど相関がない様子が観察された。これは、今回の壁面緑化試験体の緑化パネル部位が断熱性の高い素材であるため、壁面緑化試験体が断熱材の役割を果たして、数 $10W/m^2$ 程度の熱流では、裏面まで表面からの熱流の影響が無かったためと考えられる。緑化パネル面裏側熱負荷の一日の変動は、図 20 より晴天日に次のような挙動を示すことが観察された。

- 1) 夜間は、緑化パネル裏は外気とは異なり大気への放射が無い。このため、パネル裏気温およびパネル裏面温度は、外気温よりも高く推移する。
- 2) 日がのぼり外気温が上昇するにつれて、熱交換によるものと考えられる温度上昇がパネル裏の気温および裏面温度で観察される。このときの温度上昇は、パネル裏面温度のほうが気温よりも遅い。これは、パネル裏面の構成材熱容量が影響しているためと考えられる。パネル裏気温のほうがパネル面温度よりも温度が高いため、午前中は裏面から緑化パネル方向への熱流量が観察される時間帯が長い。
- 3) 13 時ごろ、緑化裏面気温が急激に下がる。このとき、外気温には温度低下が見られない。このような現象が起った理由として、緑化面周囲の壁面が日陰に入ったことで温度が下がり、その影響で裏面気温も下がったと考えられる。一方、パネル裏面温度に対する影響は、気温よりも小さく、13 時ごろに温度が逆転し、緑化パネル裏面から裏面空気層方向への熱流が観察される。
- 4) その後、パネル裏面温度・気温とも外気温より速い速度で温度が低下していく。13 時ごろに、裏面温度・気温は外気温よりも低くなった。その後 20 時ごろまで裏面温度は外気温よりも低い。20 時を過ぎると、大気への放射が無いパネル裏面温度は、外気温よりも安定した環境で、外気温より高い温度で推移する。

以上のことから、緑化パネル面裏側の熱流負荷は、表面の熱流負荷よりも、むしろパネル裏側の熱交換に影響されている様子が観察された。断熱材利用をした緑化パネル裏の建物への負荷を考える際には、緑化パネル裏側の仕様についても考慮する必要がある。なお、冬季においては、建物用途によって空調負荷が異なるため、その評価は難しい。今回の計測結果では、日中の伝導熱量が白壁面の方が緑化パネルよりも多い結果となった。このことは、住宅のように暖房負荷の多い建物においては、伝導熱および貫流熱が多い方が暖房負荷が小さくなるのに対し、事務所ビルのように冬季においても、室内発熱負荷が大きく冷房負荷が発生している建物では、冷房負荷が大きくなることになる。よって、冬季においては、建物用途によってその評価が異なってくるため、注意が必要である。また、今回比較対象としたコンクリート壁面は、白色塗装されていたために、日射反射率(アルベド)について緑化パネルとの差が大きくなつたが、コンクリート一般との比較とはなりえないことにも留意する必要がある。

今回使用した緑化パネルでは樹木を壁面緑化植物として使用するとともに断熱性に優れたパネル基材を取付けてあることで、外断熱材としての効果を発揮し、室内側に対しての断熱性

がより向上していることが推察でき、冬期における暖房の空調負荷を低減する効果が期待できる。

4. まとめ

断熱材を基材の一部に使用し、これまで壁面緑化にはあまり使用されてこなかった他種類の樹木を植栽した緑化パネルを対象として、壁面緑化による建物内・外への熱環境改善効果を明らかにすることを目的として測定を行った。測定および解析による主な結果は、以下の通りである。

(1) 表面温度

表面温度は、緑化表面は晴天時の日中においては、冬季においても、30°Cに達していた。一方、比較対照とした白壁では、日中でも10°C前後に留まっていた。なお、曇天、雨天時には、両者の温度差はほとんど見られなかった。

(2) ヒートアイランド緩和効果

ヒートアイランド緩和効果として、大気を直接加熱する顕熱フラックスを指標として、緑化パネルと白壁との比較を行った。その結果、冬季においては、晴天時のピークで $300W/m^2$ 以上、緑化パネルの方が大きい結果となった。使用植物とパネル基材は異なるが、過年度に行った夏期での実験結果では、白壁の方が緑化パネルよりも顕熱が大きい結果を得ている。今回の計測結果では、夏期の暑熱環境下とは異なる結果となったが、これは、白壁面の日射反射率(アルベド)が、緑化パネルよりも大きく、冬期の日中のピーク時においては表面温度がコンクリート壁よりも高くなる一方、冬期における植物の蒸散活動が低下することによる潜熱消費が低くなつたことにより、緑化パネルからの顕熱負荷がコンクリート壁面を上回つたためと考えられる。

(3) 蒸発散特性

蒸発の大きさを示す指標として蒸発効率により、緑化パネルの蒸発散特性を評価した。その結果、緑化パネルの蒸発効率は、冬季日中においては、0.1程度であった。この値は、過年度にヘデラヘルリックス等のつる植物を使用した緑化パネルでの夏期の計測結果から得た蒸発効率が0.2~0.4であったことと比べると1/2以下となつてゐた。この理由としては、使用した植物種の違いと、冬期における蒸散活動の低下が考えられる。

(4) 室内側への断熱効果

緑化パネルおよび白壁面(緑化なし)における伝導熱フラックスは、 $100n/m^2$ 程度緑化パネルの方が小さく、室内への熱流入量が小さくなつてゐた。また、緑化植物とともにパネル基材の断熱効果も含めると、室内への熱の流入および室内からの熱の流出も抑制できるものと期待される。コンクリート壁面は、熱容量が大きいが、熱伝導率も高くなるため、熱拡散率も高くなるため、冬期において室内温度の保温効果は高いとは言えない。樹木などの多様な植物で構成された緑化パネル材を建物の壁面に一体的に設置することで、外断熱材としての効果が高ま

り、冬期における空調等の暖房負荷の軽減による大気環境への負荷軽減によるヒートアイランド現象の緩和に寄与することが期待できる。

【謝辞】

本稿は、筆者が 2007 年度に国土交通省からの受託研究により実施した計測データと調査結果を基に新たに加筆修正して、とりまとめたものである。データの計測と解析に当たっては、日本工業大学教授の三坂育正氏、竹中技術研究所の佐久間護氏、小島倫直氏に多大のご協力をいただいた。ここに、お世話になった関係各位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) 国土交通省ホームページ、公園とみどり、緑化地域制度：
http://www.mlit.go.jp/toshi/park/toshi_parkgreen_tk_000080.html
- 3) 国土交通省都市・地域整備局公園緑地課 (2005) : 立体都市公園制度の概要について, 市街地再開発第 427 号, 9-12
- 4) 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

【参考文献】

- ・鈴木弘孝・加藤真司・藤田茂 (2017) : 屋上緑化資材としての芝付きシラス固化ブロックの暑熱緩和効果と保水性, 環境情報科学論文集 No. 31, 305-310
- ・鈴木弘孝・加藤真司・藤田茂 (2016) : 表面温度と日射量から見たグリーンカーテンの温熱環境改善効果, ランドスケープ研究 79(5), 537-542
- ・視覚刺激としての緑のカーテンが室内温熱環境評価に及ぼす影響 (2016) 加藤真司・石井儀光・桑沢保夫・橋本剛・栗原正夫, 日本建築学会技術報告集、第 22 卷第 51 号, pp. 559-564
- ・鈴木弘孝 (2016) : 壁面緑化による温熱環境改善効果, 城西国際大学紀要 24(7), 19-36
- ・鈴木弘孝・加藤真司・藤田茂 (2015) : MRT, WBGT によるグリーンカーテンの温熱環境改善効果の評価, ランドスケープ研究 78(5), 505-510
- ・鈴木弘孝・加藤真司・桑沢保夫・藤田茂 (2015) : SET*, PMV を用いたバルコニー部における緑のカーテンの温熱環境改善効果, 日本綠化工学会誌 41(1), 175-180
- ・鈴木弘孝 (2015) : 夏季におけるヘデラ属 2 種を用いた蒸散量の計測, 城西国際大学紀要 23(7), 57-70
- ・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), 1-24
- ・鈴木弘孝 (2013) : 公開空地の実態と緑化の特性に関する研究－東京都 23 区を対象として－, 城西

- ・緑のカーテンの節電効果に関する研究～浜松市内におけるアンケート調査より～ (2013) 加藤真司・石井儀光・樋野公宏・鈴木弘孝, 日本綠化工学会誌, 39巻1号, 133-136
- ・鈴木弘孝 (2012) : 屋上緑化施設における植栽形態, 城西国際大学紀要 20(7), 1-9
- ・鈴木弘孝・金甫炫・加藤真司・藤田茂 (2011) : 屋上緑化施設の公開, 植栽形態ならびに費用に関する公共と民間の比較, ランドスケープ研究 74(5), 451-456
- ・鈴木弘孝・金甫炫・加藤真司・藤田茂 (2011) : 屋上緑化施設の公開, 植栽形態ならびに費用に関する公共と民間の比較, ランドスケープ研究 74(5), 451-456
- ・鈴木弘孝・三坂育正 (2008) : 季節の違いによる壁面緑化の温熱環境改善効果, 日本綠化工学会誌 33(4) 技術報告, 587-595
- ・鈴木弘孝 (2008) : 建築物緑化の温熱環境改善効果に関する既往研究レビュー, 日本綠化工学会誌 34(2) 特集「建築物緑化による都市の環境改善」, 355-362
- ・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
- ・鈴木弘孝・三坂育正・水谷敦司・田代順孝 (2007) : 壁面緑化パネルを用いた温熱環境改善効果の評価・計測技術, 日本造園学会技術報告集 2007, 90-95
- ・鈴木弘孝・三坂育正・田代順孝 (2007) : パネル型壁面緑化における熱収支特性と蒸発散量の推定, 日本綠化工学会誌 33(1) 技術報告, 303-306
- ・鈴木弘孝・三坂育正・水谷敦司・田代順孝 (2006) : W B G T, S E T *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
- ・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, 日本綠化工学会誌 32(1), 80-85
- ・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
- ・三坂育正・鈴木弘孝・水谷敦司・村野直康・田代順孝 (2006) : 壁面緑化植物の熱収支特性の評価に関する研究, 日本建築学会技術報告, 23号, 233-236
- ・三坂育正・鈴木弘孝 (2006) : 壁面緑化による都市暑熱緩和効果に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 659-660
- ・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
- ・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
- ・野島義照・鈴木弘孝 (2004) : 壁面緑化による夏季の壁面から屋内への熱流および熱流量の軽減効果, ランドスケープ研究 67(5), 447-452

Thermal Environment Improving Effects of Wall-greening in Winter

Hirotaka Suzuki

【Abstract】

On the basis of experimental measurements arranged the panel type of wall greening facility mixed with vegetation, mainly trees, in comparison with a concrete wall, we investigated and analyzed the degree of thermal environmental load on the inside and outside of buildings in winter, when the heat island phenomenon appears most clearly, in order to quantitatively evaluate in net radiation and thermal balance the difference between a green wall and a concrete wall. As a result of the analysis, in net emission, the quantity of reflected solar radiation, the green wall showed at the peak time about 200W/m^2 , while that quantity the concrete wall showed was about 600 W/m^2 , nearly three times that of the green wall,. As for the surface temperature, the green wall showed at the peak time more than $30\text{ }^\circ\text{C}$, while the concrete wall showed about $10\text{ }^\circ\text{C}$, which remained $2\sim 3\text{ }^\circ\text{C}$ lower than the outside temperature. Regarding the sensible heat flux, the green wall showed at the peak time 500 W/m^2 which greatly exceeded what the concrete wall showed, that is approximately 200 W/m^2 . As for the evaporation efficiency rate, the green wall showed about 0.1, which remained less than a half of what vine plants in summer showed. We conjecture that the factors of the difference include decrease in evaporation activity in winter, as well as differences in plant species. The above findings suggest that a panel-shaped green wall is likely to alleviate the lowering of the surface temperature of the exterior wall in winter, and, in combination of the panel base materials with greening plants, act as outside insulation, and also that the heat retention effect on the inside of the building is high.

Key Words: wall greening, thermal environment in winter, heat island, radiation balance, heat balance