

建物屋上緑化工法の開発

小河義郎* 茂木正史* 白石祐彰*
中村裕介* 脇田明幸**

1. まえがき

近年、都市部のヒートアイランド現象を緩和し、良好な自然環境を創る手段として屋上緑化が注目されている。屋上を緑化することにより直下階の空調エネルギーを削減することができ、省エネや環境問題の緩和策として期待されている。また、各行政が屋上緑化の指導を開始し、一定規模以上の敷地を有する建築物について屋上緑化を義務付け始めたことから、屋上緑化に対する気運が高まっている。

そのような背景から、顧客に積極的に提案できる屋上緑化技術を蓄積するために、各行政指導要項や既存工法等の動向調査をし、施工性が良く脱着可能で低コストな緑化システムの開発を行った。現在、このシステムを技術研究所と東京支社の屋上に適用し、植物の生育状態の観察、緑化システムによる各部（緑化基盤下、天井内）の温度低減効果やエネルギー削減効果の確認および灌水システムの機能検証を行っている段階である。

ここでは、屋上緑化に対する各行政機関の動向を簡潔に述べ、開発した緑化システムの概要、実大実験により検証した温度低減効果および各地域のエネルギー削減効果をシミュレートした結果と屋上緑化に係わるコストについて報告する。

2. 行政機関の指導要項について

東京都は平成 13 年 4 月から「自然保護条例」の改正により屋上緑化の指導を開始した。民間の建物では敷地面積 1,000m² 以上、公共施設は 250m² 以上の敷地を有する建築物について屋上緑化を義務付けて推進している。この東京都の指導を受けて、区、市町村、各自治体レベルでの屋上緑化への取り組みも強化されて

いる。一方、指導が厳しくなった反面、屋上緑化をすることにより様々な助成・緩和措置を受けることができる場合があるので、屋上緑化を計画する際には、事前にそれらを適用できる建物なのかを検討する必要がある。そのため、主な「行政指導要項および助成・緩和一覧」を作成している。

3. 奥村式屋上緑化工法について

3.1 奥村式屋上緑化工法の概要

図-1 に緑化プランターの概要を、写真-1 に緑化プランターの敷設状況を示す。開発した屋上緑化システムは、保水・排水層となる空隙（空隙率 18%）を有するポリスチレンをパレット内に収めてユニット化し、緑化プランター同士を連結する施工性の良い着脱可能な緑化システムである。灌水は、緑化プランター内に設置したシース管内に挿入した灌水チューブよりパレット底に給水する。その水をポリスチレンに設けた開口部内の土壌の毛細管現象により上昇させ、植物の根に水を供給する方式である。

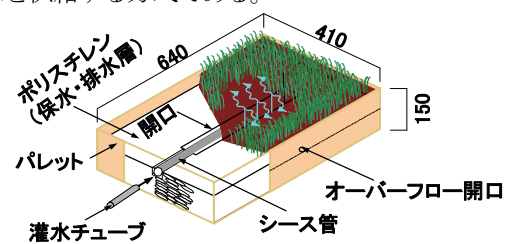


図-1 緑化プランターの概要



写真-1 緑化プランターの敷設状況

*技術研究所 **東京支社建築設計部

緑化システムは植物を植える緑化プランター（パレット+ポリスチレン+土壌）と、植物に給水を行う灌水装置から構成されている。図-2に緑化プランターの断面構造を示す。緑化プランターは水の供給面から、土壌厚が薄い50mm（ポリスチレン100mm）のP10タイプと、土壌厚が100mm（ポリスチレン厚50mm）のP5タイプの2種類とした。P10タイプはセダム類（多肉型の地被植物）や芝を、P5タイプは、草花、低木類（約1m以下）を対象としている。

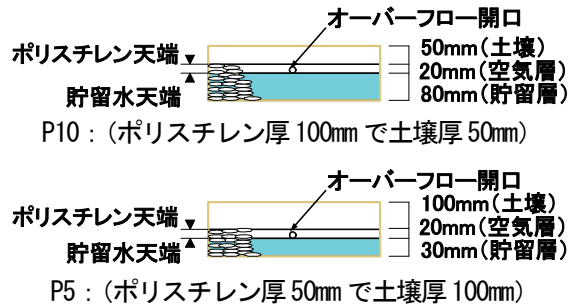


図-2 緑化プランターの断面構造

3.2 緑化システムの特長

図-3に緑化システムの施工手順を示す。当システムは緑化プランターを並べ、灌水チューブをセットし、ポリスチレン上部に土壌を入れ植栽するといった施工性の良いシステムである。その他の特長を以下に示す。

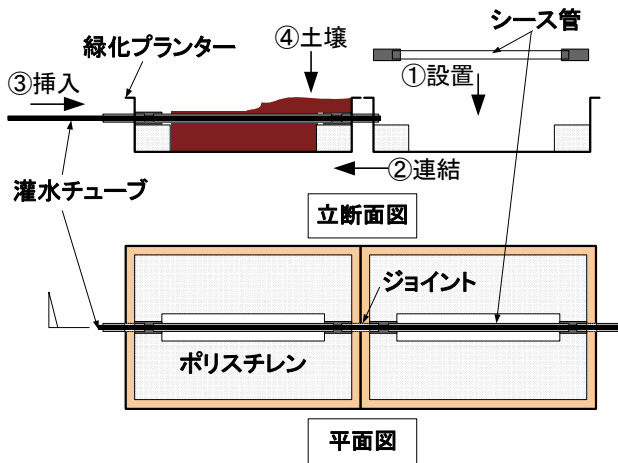


図-3 緑化システムの施工手順

i. 移動可能

緑化プランター内に緑化基盤（保水・排水層+土壌）が収まっており、1緑化プランター当たりP10タイプで15kg（55kg/m²）、P5タイプで20kg（80kg/m²）と軽量なので、建物メンテナンス等の際に容易に移設・復旧することが可能である。

- ii. 断熱性能（省エネ効果）
保水・排水層に熱伝導率の低いポリスチレンを用いているため、断熱効果が高い。
- iii. 雨水貯留機能
緑化プランター内の空隙を有するポリスチレンに、雨水や水道水を貯留することができる。
- iv. 通気層の確保
ポリスチレン上部とオーバーフロー開口の間の空気層は、根腐れ防止に有効である。
- v. システム構成材料の省略化
通常の緑化システムに必要な保水・排水層への土壌の混入を防ぐフィルターは、空隙が小さいポリスチレンで兼用でき、防水面への根の侵入を防ぐ耐根層の機能は塩ビ製のパレットが果すので、通常の緑化システムに必要な材料を省略でき、コスト削減となる。

4. 実大実験

4.1 実験目的

屋上緑化システムに適合する植物を選定することや、当システムを用いて屋上緑化することにより得られるエネルギー削減効果（緑化プランターの熱伝導抵抗より求める）を算出するために、技術研究所の屋上で実大実験（施工面積：25m²）を行った。

4.2 植栽について

緑化プランターは土壌厚が薄い50mmのP10タイプと、土壌厚が100mmのP5タイプの2種類を対象として、以下の植物を植栽した。表-1に実験に用いた主な植物を示す。ティフブレアは屋上緑化に用いられた例が殆どない芝ではあるが、コウライ芝等と比べて成長しても背丈が低く雑草の繁茂を抑制するアレロパシー効果を有する植物のため、メンテナンスが少なくなるという利点があることや、耐寒性が強いという特性がある。そのため、今後、屋上緑化用の芝として普及する可能性が高いので選定した。ティフブレアを植栽した緑化プランターの熱伝導抵抗を算出している。

表-1 選定した主な植栽の一覧

分類	種類	プランターのタイプ
セダム	ディコンドラ	P10
	ツルマンネングサ	P10
芝	ティフブレア	P10、P5
草花	タマリユウ	P10、P5
ハーブ	ローズマリー	P5

4.3 測定概要

図-4に測定ポイントを、表-2に測定項目と使用した測定機器を示す。緑化システムを適用することによるエネルギー削減効果を求めるためには、緑化プランターの熱伝導抵抗が必要となる。熱伝導抵抗は文献に記載されている緑化構成材料の物性値を用いて算出できるが、土壌の水分状況や植物の生育状態に影響する可能性がある。そのため本実験では、実状に即した熱伝導抵抗を算出するために、構成材料の各層の温度や土壌水分等を測定した。

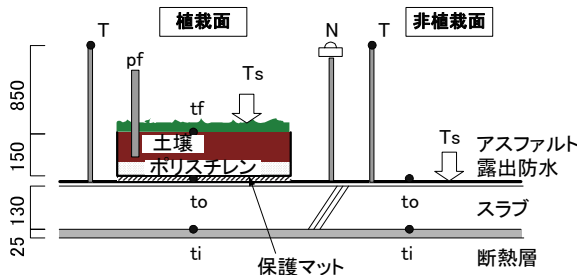


図-4 測定ポイント

表-2 測定項目と測定機器一覧

測定項目	測定部位	記号	測定機器	備考
温度	土壌表面	tf	T型熱電対	防水処理
	防水層上面	to	T型熱電対	防水処理
	スラブ下端	ti	T型熱電対	
	地表面(H=1m)	T	T型熱電対	防水処理
	屋上表面	Ts	サーモカメラ	
日射	地表面(H=1m)	N	日射計	電圧検出型
土壌水分	土壌	pF	PFメータ	電圧検出型

4.4 測定結果

a. 屋上表面温度

図-5にサーモカメラを用いて撮影した屋上表面温度(Ts)を示す。外気温度は午後2時頃に最も高く、緑化をしていない屋上表面温度もそれに伴い上昇していた。しかしながら、緑化部分は植物からの蒸発潜熱により表面温度の上昇を抑え、技術研究所の屋上では緑化した部分の表面温度はしていない部分の表面温度に比べ約12℃低かった。尚、最大較差は8月11日の22℃（緑化部分38℃、非緑化部分60℃）であった。

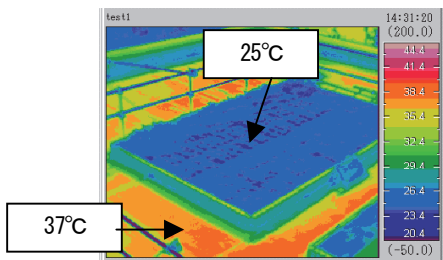


図-5 屋上表面温度（サーモグラフィ）（9月末）

b. スラブ下端の温度

図-6に屋根スラブ下端の温度(ti)を示す。スラブ下端の温度は躯体の蓄熱効果により時間遅れが生じ、外気温度(T)が最大時の数時間後にピークを迎える。そのスラブ下端の温度について見てみると、P10タイプでは緑化システムが無い場合に比べ最高で17℃、ポリスチレンが無く土壌厚50mmのものに比べて約8℃の温度低減効果が見られた。

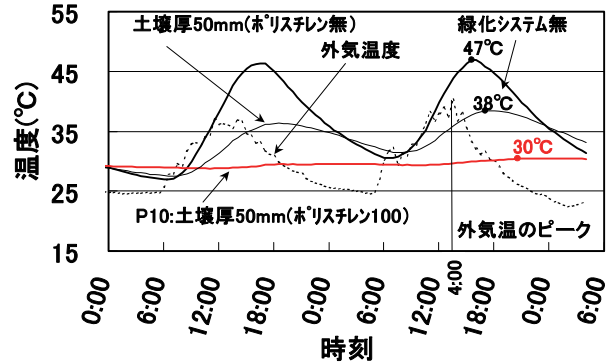


図-6 屋根スラブ下端の温度（7月末）

4.5 熱伝導率の算出

建築センターの認定基準では、土壌や植栽部分の含水状況により熱特性が大幅に変動することを勘案し、不利となるような熱伝導率（熱伝導抵抗）を用いて、断熱効果を算出しなければならないとされている。

ここでは、芝を対象とした緑化プランターの熱伝導抵抗(Rp)を、構成する各部材の物性値から求める方法と、実測データを基に求める2種類の方法により算出した。

a. 物性値から求めた熱伝導抵抗(oRp)

表-3に物性値から求めた熱伝導抵抗を示す。

表-3 (1) 熱伝導抵抗 (oRp) (P10タイプ)

期間	緑化プランター層構成	厚み	熱伝導率	熱伝導抵抗	
		t (m)			
夏期	芝			0.88 ¹⁾	
	土壌	0.050	0.25 ¹⁾	t/λ=0.20	
	保水・排水層	0.100		1.57*	
	パレット	0.001	0.17	0.01	
	パレット下空気層			0.00	
				ΣoRp	2.66
冬期	芝			0.33	
	土壌	0.050	0.20	0.25	
	保水・排水層	0.100		1.57	
	パレット	0.001	0.17	0.01	
	パレット下空気層			0.00	
				ΣoRp	2.16

*：発泡ポリスチレンの空隙率部（18%）に常に水が貯留されているものと考え、ポリスチレンと水の熱伝導率を考慮し、体積比により算出

表-3 (2) 熱伝導抵抗 (oRp) (P5 タイプ)

期間	緑化プランター層構成	厚み	熱伝導率	熱伝導抵抗
		t (m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)
夏期	芝			0.88 ¹⁾
	土壌	0.100	0.25 ¹⁾	$t/\lambda=0.40$
	保水・排水層	0.050		0.79*
	パレット	0.001	0.17	0.01
	パレット下空気層			0.00
	ΣoRp			
冬期	芝			0.33
	土壌	0.100	0.20	0.50
	保水・排水層	0.050		0.79
	パレット	0.001	0.17	0.01
	パレット下空気層			0.00
	ΣoRp			

* : 発泡ポリスチレンの空隙率部 (18%) に常に水が貯留されているものと考え、ポリスチレンと水の熱伝導率を考慮し、体積比により算出

b. 実測データから求めた熱伝導抵抗 (eRp)

夏期 (7月)、冬期 (12月) 共に、外気温度 (T) と天井内温度が日射の影響を受けず定常状態と見なせる夜間帯の温度測定値 (夏期 : AM1:00~AM5:00、冬期 : PM23:00~AM7:00) から、植栽部分が芝 (ティフブレア) の場合の熱伝導抵抗 (eRp) を算出した。

緑化プランターの熱伝導抵抗の算出手順を (a)、(b) の枠内に、表-4 に実測データから求めた緑化プランターの熱伝導抵抗を示す。

(a) スラブへ侵入する熱量 (Qc) の算出

屋外の空気が緑化プランターを介してスラブへ侵入する熱量 (Qc) を、屋根スラブ上下端 (to, ti) の温度測定値とコンクリートの熱伝導率の物性値を用いて算出する。図-7 に熱移動の概要を示す。

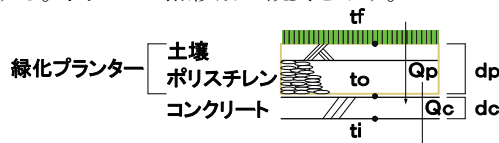


図-7 熱移動の概要

$Q_c = \lambda_c \times \Delta t_c / d_c, \Delta t_c = t_o - t_i$ <p>Qc : スラブへ侵入する熱量 (W/m²), dc : スラブ厚 0.13 (m) λ_c : コンクリートの熱伝導率 1.6 (W/mK)</p>

(b) 緑化プランターへ侵入する熱量 (Qp) の算出

屋外から緑化プランターへ侵入する熱量 (Qp) は、緑化プランターから屋根スラブへ侵入する熱量 (Qc) と同等である。これらを考慮し、スラブ上端 (to) と土壌表面 (tf) の温度測定値を用いて緑化プランターの熱伝導抵抗 (eRp) を算出する。尚、本算出では防水層の熱伝導抵抗が小さいことからその影響を無視している。

$Q_p = \lambda_p \times \Delta t_p / d_p = \lambda_c \times \Delta t_c / d_c = Q_c$ $\lambda_p = (\lambda_c \times \Delta t_c / d_c) / (\Delta t_p / d_p) = \lambda_c / d_c \times \Delta t_c / \Delta t_p \times d_p$ $eRp = d_p / \lambda_p = d_c / \lambda_c \times \Delta t_p / \Delta t_c = Rc \times \Delta t_p / \Delta t_c$ $\Delta t_p = t_f - t_o$ <p>Qp : 緑化プランターへ侵入する熱量 (W/m²) eRp : 緑化プランターの熱伝導抵抗 (m²K/W) Rc : コンクリートの熱伝導抵抗 (m²K/W) λ_p : 緑化プランターの熱伝導率 (W/mK)</p>

表-4 熱伝導抵抗 (eRp)

	熱伝導抵抗 eRp (m ² K/W)*1	
	P10	P5
夏期 (7月)	1.15 (0.43)*2	0.57 (0.27)
冬期 (12月)	0.67 (0.31)	0.30 (0.18)

*1 : 土壌の給水や降雨による水分状態の変動が、各部温度に影響を与えているため、測定値から求めた熱伝導抵抗の上限5%と下限5%を除いた月平均 (7, 12月) を熱伝導抵抗 eRp とした。

*2 : () 内は物性値から求めた熱伝導抵抗に対する比率 (eRp/oRp)

c. 緑化プランターの熱伝導抵抗 (Rp)

実測データを基に算出した熱伝導抵抗 (eRp) は、物性値を基に算出した熱伝導抵抗 (oRp) の約 20~40% であった。この違いは降雨による土壌水分 (pf) の状態、植物の種類や生育状況が文献に示されているものと相違していたためであると推測される。

4.6 考察

実大実験から得られた知見を下記に示す。

- i. 屋上で緑化することは屋上表面温度の上昇を抑え、緑化した部分の表面温度はしていない部分に比べ地域較差はあるが、10°C以上の温度低減効果が見込める
- ii. 植栽面が芝 (ティフブレア) の当緑化システムを用いて屋上緑化することにより、スラブ下端の温度は緑化してない場合に比べ、ポリスチレンが厚い 100mm の P10 タイプでは 17°C 程度の温度低減が可能であると思われる
- iii. 物性値を基に算出した熱伝導抵抗を用いて緑化プランターの断熱性能を算出すると、過大評価となる可能性がある

5. 各地域のエネルギー削減効果の検証

実大実験から算出した緑化プランターの熱伝導抵抗 (eRp) を用いて、気象条件が異なる地域 (札幌、仙台、東京、大阪、福岡) のエネルギー削減効果を算出した。

表-8 各地域の開口部と壁の断熱材の仕様

地域	区分	開口部		
		壁*		
		熱貫流率 K (W/m ² K)	厚み t (mm)	熱伝導抵抗 R (m ² K/W)
札幌	I	2.33	65	t/λ=2.32
仙台	III	3.49	35	1.25
東京、大阪	IV	4.65	35	1.25
福岡	V	4.65	35	1.25

*：(内断熱：押出し法ポリスチレンフォーム λ=0.028KW/m)

表-9 外壁構成材料の物性値の緒元

外壁層構成	厚み t (m)	熱伝導率 λ (W/mK)	熱伝導抵抗 R (m ² K/W)
熱伝達抵抗 (屋外側)	—	—	0.040 ²⁾
コンクリート	0.18	1.600	t/λ=0.113
断熱材	表-8		
せっこうボード	0.0095	0.220	0.043
熱伝達抵抗 (室内側)	—	—	0.090 ²⁾

b. 解析結果および考察

図-10 に緑化した場合の緑化していない場合に対する冷暖房期間の熱貫流量の低減率を示す。屋根スラブ面だけで評価した場合、冷暖房期間の緑化による熱貫流量の低減率は約 10~30%の範囲であつが、住戸全体から見た低減率は P10 タイプで約 5~7%、P5 タイプで約 4%であった。住戸全体では、緑化の対象外である開口部や壁からの熱損失の影響を受け、低減効果が小さくなったものと思われる。

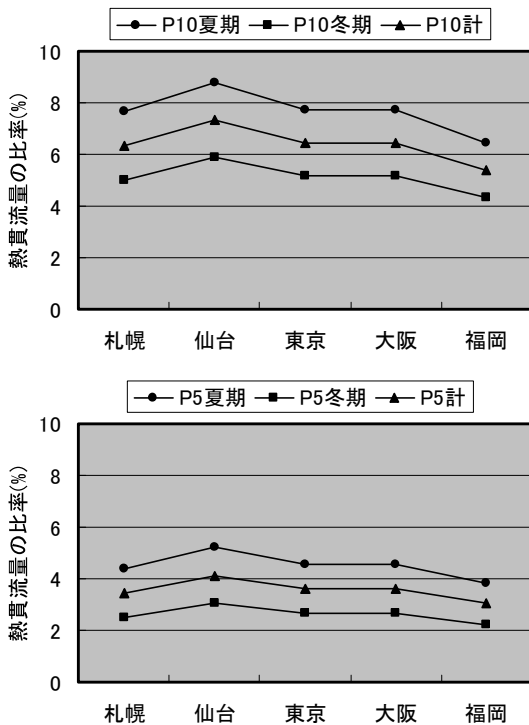


図-10 冷暖房期間の熱貫流量の低減率

6. 緑化に係わるコスト

移設施工費を低減し、ユーザ側の嗜好に合わせた配置変更を可能とする、移動可能な緑化システムは多く存在する。それら既存システムと当社緑化システムのコスト比較を行った。図-11 に移動可能な緑化システムを施工する場合の平均材工費に対する各システムの材工費の割合を示す。

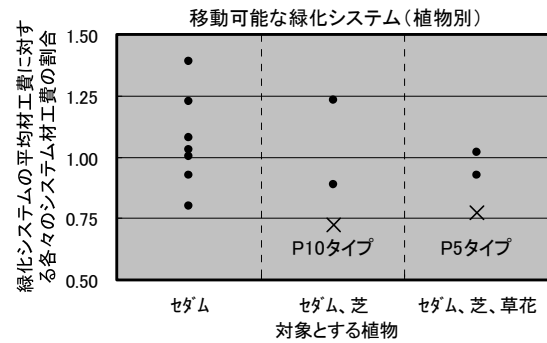


図-11 緑化システムの平均材工費に対する割合

既存工法のシステムの性能が様々で一概に比較することはできないが、当社屋上緑化システム(芝の植栽込み)は移動可能な工法の中でも低コストで設置可能である。また、芝を対象とした当緑化システムを移設・復旧する場合には、土壌や保水・排水層を新設せずに使用できるので、既存工法の半分程度(既存工法の新設費用の約1/4)で施工することができる。

7. あとがき

開発した屋上緑化工法は、移動可能な緑化システムの中でも比較的 low コストで施工できる。また、当システムを用いて屋上緑化することにより、室内からの熱損失量を低減し、空調エネルギーを削減できることが確認できた。施工してから約1年経過した現在、選定した殆どの植物は良好に生育しているが、プランター内の薄層土壌に植栽していることを考慮すると、根腐れや水の供給面から、今後も継続して植物の生育状況の観察、灌水システムの検証を行う必要がある。

【参考文献】

- 1) (財) 建築環境・省エネルギー機構 (IBEC)、 「IBEC」、No. 132、p9、2002. 9
- 2) (財) 建築環境・省エネルギー機構 (IBEC)、 「住宅の次世代省エネルギー基準と指針」、p75、2002