貯水型屋上緑化システムの ヒートアイランド緩和効果に関する研究

横山　仁　三坂　育正*　三輪　隆*　石渡健太郎**
佐々木啓行　青木　正敏**　石井康一郎
(*(株)竹中工務店　**東京農工大学)

要　旨

貯水型屋上緑化システムのヒートアイランド緩和効果を明らかにするために、従来の軽量薄層型屋上緑化システムとの比較実験を行った。その結果、貯水型屋上緑化システムは従来型屋上緑化システムに比べ、表面温度が平均で約 2℃、最大で約 5℃低かった。潜熱は約 1.4 倍であったのに対し、顕熱は約 1/3 であった。また、貯水型屋上緑化システムは降雨直後だけでなく、その後無降雨状態が継続しても従来型システムを上回る蒸発散が認められた。両システムの蒸発散量の差は、強日射（正味放射）条件ほど大きかった。

キーワード：ヒートアイランド、雨水利用、屋上緑化、熱収支、蒸発散

Study of Mitigating Urban Heat Islands by Rooftop Greenery System with Container Tank of Rain Water

YOKOYAMA Hitoshi, MISAKA Ikusei*, MIWA Takashi*, ISHIWATA Kentaro**
SASAKI Hiroyuki, AOKI Masatoshi**, ISHII Koichiro
(* Takenaka Corporation R&D Institute,　** Tokyo University of Agriculture and Technology)

Summary

In order to carried out for mitigating the urban heat island effect by the rooftop greenery system with container tank of rain water(Tank system), we examined with the conventionally light and thin rooftop greening system(Conventionally system). As a result, surface temperature on the Tank system was lower 2℃ On an average and 5℃ At the maximum than the Conventionally system. As follows likewise, latent heat flux and sensible heat flux of the Tank system was 1.4 and 1/3 times larger than the Conventionally system. The Tank system continued evapotranspiration to exceed the Conventionally system at no rain condition. The difference between evapotranspiration of these systems was larger so that sunlight was stronger (net radiation was larger).

Key Words: Evapotranspiration, Heat balance, Rain Water Use, Rooftop Greening, Urban Heat Islands

1. はじめに

ヒートアイランド現象は、都市の中心部の気温を等温線で表すと郊外に比べて島のように高くなることから命名された都市部の熱汚染現象である。その原因として、都市化により緑地や水面、農地等が減少し、アスファルトやコンクリート等の人工構造物が増え、熱が吸収・蓄熱されやすくなったことや、エアコンや自動車からの人工排熱が増加していることなどがあげられている[1,2]。

ヒートアイランド対策としては、人工排熱の削減や地表面被覆の改善等が考えられるが、後者の一環として市街地の緑化面積を増やすことが進められている。

東京都では、平成 12 年に「東京における自然の保護と回復に関する条例」通称自然保護条例を全面的に見直し、市街地等の緑化を一層推進することとした[3]。その一環として、地上だけではなく、新たに緑を増やせる緑化スペースとして建築物の屋上等の緑化の指導を平成 12 年 4 月から開始した。自然保護条例では、一定規模以上の建物の新増改築時における屋上緑化を義務付けているが、既存の建物には特に規定はなく、既存建物の屋上緑化の普及は十分に進んでいない。

近年､既存建物に対応した屋上緑化システムとして、軽量薄層の基盤を持つシステムが普及してきている。しかし、屋上における薄い土壌に根付いた植物は常に高温乾燥の過酷な環境条件にさらされている。このことから、屋上緑化植物は水ストレス・熱ストレスを受けやすく、常に枯死の危険性にさらされている。加えて、土壌水分が少ない状態や植物の被覆度の低い状態では、十分にヒートアイランド緩和効果が発揮されないものと考えられることから、植物の健全な生育が不可欠である。健全な生育のためには、定期的な灌水が必要とされるが、それは夏季における上水道の使用量を増加させるなど、潜在的な環境負荷を増大させるという懸念がある。

したがって、植物への十分な給水量を確保しながらも、上水の使用量を抑制し、なおかつ集中豪雨等による洪水を抑制できるような貯水性能の高い屋上緑化システムが望まれる。

本研究は、雨水を貯留することで節水とともに雨水流出遅延効果をもたせた貯水型屋上緑化システム[5]のヒートアイランド緩和効果を明らかにするために、従来の軽量薄層型屋上緑化システムと熱環境を比較した。

2. 試験体の概要

(1)従来型屋上緑化システム

アルミニウム製の枠で固定した塩ビ製トレー（500mm×500mm×80mm H）に、人工軽量土壌（有機質、湿潤比重 0.8 程度：東邦レオ社製ビバソイル）を充填し、植物（コウライシバ）を植栽したものを従来型屋上緑化システム（以下、従来型システム）とした。詳細は、横山（2004）[4]を参照されたい。

(2)貯水型屋上緑化システム

貯水型屋上緑化システム（以下、貯水型システム）は、FRP 製容器（500mm×500mm×250mmH）内に、植栽部を支持するための高さ 200mm の樹脂製支持部材を設置し、緩効性高度化成肥料やゼオライトを低融点ポリエステルで熱融着した廃ポリエステル繊維製マット(480mm×480mm×20mmH)を乗せ、その上に植物（ノシバ）を植栽したものである。貯水型システムの模式図を図 1 に示す。貯水型システムは、容器の下部 100mm（長期貯留層）に雨水を貯留し、樹脂製支持部材により容器の最上部に設置された植栽部へ給水用不織布の毛管現象により給水を行うものである。一方、容器の上部 100mm（短期貯留層）は排水用不織布により常時は貯水の空き容量として確保しつつ、大雨時には短期的に雨水を貯留した後、排水用不織布の毛管現象により徐々に排水を行うものである。貯水型システムは、三輪(2006)[5] に基本性能が記されている。

なお、従来型システムではコウライシバを用いていたが、貯水型では、常に湿潤状態にある植栽環境を考慮し、より耐湿性・耐病性の高いノシバを用いた。しかし、両者はともに耐乾性・暑熱性に優れたシバで、生理・生化学的特性にほとんど相違がないことから[6,7]、本研究では同一条件での比較は問題ないものと判断した。

3. 実験方法

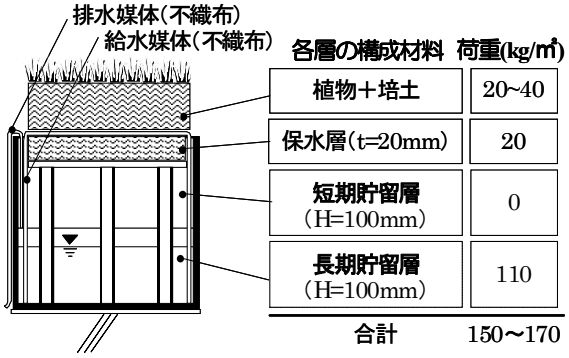
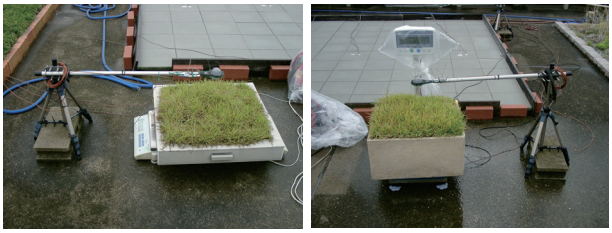


図 1．貯水型屋上緑化システムの概要

実験は、2006 年 8 月 21 日～12 月 18 日に、東京都環境科学研究所自動車排出ガス実験棟屋上にて行った。上記のうち、9 月 15～28 日は表面温度等の集中観測を行った。

従来型および貯水型それぞれの試験体の高さ約 30cm の位置に、正味放射計および赤外線熱電対を設置し、放射収支ならびに表面温度を測定した。また、土壌中の温度を測るために表面から下部 1 cm に熱電対を設置するとともに、貯水型システムでは水温を計るため、水中に熱電対を設置した。表面から土壌への熱流量を測るため、表面から下部 1 cm に熱流計を設置した。蒸発散量は電子天秤により、その重量変化から測定した。以上の測定項目のほか外界条件として、全天日射量、大気放射量、風向・風速、温度・湿度を計測した。屋上の中央付近に設置された高さ 3 m の観測用ポールの最上部に風向・風速計を、屋上面から 2m の位置に日射計、大気放射計を、屋上面から 1.5m の高さには通風式温湿度計を設置しそれぞれ測定を行った。各計測データは、1 分間の平均値をデータロガーに収集した。なお、集中観測時には、表面温度と蒸発散量を 30 分おきに 9 : 00～17 : 00 まで測定した。実験の状況を図 2 に、測定項目を表 1 に示す。なお、貯水型システムは実験期間中、渇水することはなく、常に長期貯留槽から植栽部に水が供給される状態にあった。



従来型システム　　貯水型システム

図 2．従来型（左図）および貯水型（右図）システムの実験状

表 1. 測定項目および測定機器

表3－2 測定項目と測定点、測定機器

測定種類	測定項目	測定機器		測定点数	備考
従来型屋上緑化システム	正味放射量	放射収支計	CPR-Q7	1	集中観測時
	表面温度	赤外線熱電対	iR-t/c.SV-T-80F	1	
		サーモカメラ	TVS-610	1	
	地中温度	T 型熱電対	T-TCC	2	
	伝導熱流量	熱流計	CPR-PHF-01	1	
	重量	電子天秤	SB32000	2	システムが重量制限オーバーのため、2台で測定
貯水型屋上緑化システム	正味放射量	放射収支計	CPR-Q7	1	集中観測時
	表面温度	赤外線熱電対	iR-t/c.SV-T-80F	1	
		サーモカメラ	TVS-610	1	
	地中温度	T 型熱電対	T-TCC	2	
	伝導熱流量	熱流計	CPR-PHF-01	1	
	重量	電子天秤	LDS-60H	1	
外界条件	気温・湿度	温湿度計	CVS-HMP-45D	1	測定タワーを設置して計測
	風向・風速	風車型風速計	CVG-5103	1	
	日射計（全天日射量）	全天日射計	MS-402	1	
	大気放射（長波放射）	精密赤外放射計	MS-402	1	
データ収録	データロガー	マイクロロガー	C-CR10X	1	連続計測項目

4. 結果と考察

(1)表面温度

晴天となった 9 月 21 日の正午における熱画像を図 3 に、観測期間中（9 月 19～21 日）の時系列データを図 4 に示す。観測期間中は、平均して貯水型が従来型に比べ約 2℃低くなっていた。日中強い日射にさらされた 20 日と 21 日についてはシステム間の差異が大きく、特に 21 日については 10 時半から 13 時までで 4.5℃、最大で 5℃程度の表面温度差が見られた。

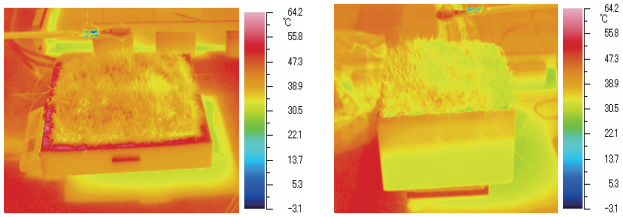


図 3. 従来型（左図）および貯水型（右図）システムの熱画像

（2006 年 9 月 21 日、11:30）

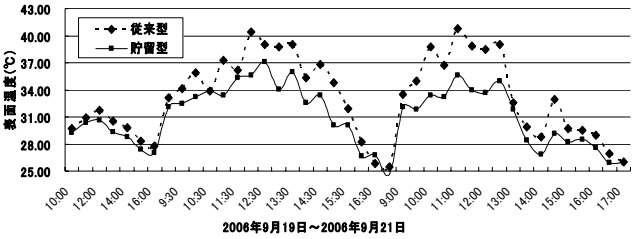


図 4.　従来型および貯水型システムの表面温度の推移

（2006 年 9 月 19～21 日）

(2)熱収支

本研究では表面の薄い層の熱収支を考え、熱容量は無視し、層に入るエネルギーと出るエネルギーはいつも等しいとした[7)]。熱収支式は以下の式で表される。

$$Rn=H+lE+G \quad （1）$$

Rn：正味放射（W/㎡）、H：顕熱（W/㎡）、lE：潜熱（W/㎡）、G：伝導熱（W/㎡）

潜熱 lE は、試験体の重量変化から蒸発散量 E（g/h・㎡）を測定し、水の蒸発潜熱（J /kg）と表面温度 T s （℃）を用いて求めた。求められた潜熱と実測により求めた正味放射量と伝導熱から、（1）式より顕熱を算出した。

一般に屋上が緑化されていない建物の場合には、表面が濡れている場合を除けば蒸発散による潜熱の消費がないため、屋上に入ってきた放射収支量は顕熱と伝導熱に分配される。顕熱は大気を直接暖めるため、大気加熱量と表現することも可能で、この熱がヒートアイランドを促進させる主要因とされている[8)]。

また、伝導熱として屋上から建物躯体に伝わった熱は、夏季においては最上階の貫流熱負荷（冷房負荷）となる。この負荷を処理するための冷房運転によるエネルギーは、最終的には人工排熱として都市大気に放

出されるが、顕熱として放出される場合、この熱もヒートアイランドを促進させることになる。

一方で、屋上緑化を行った場合には、植栽による蒸発散で潜熱を消費するため、緑化をしていない場合に比べて相対的に屋上からの顕熱や伝導熱が小さくなる。顕熱が小さくなることでヒートアイランド緩和効果が期待され、伝導熱が小さくなることで、空調負荷削減効果による人工排熱の低減によるヒートアイランド緩和効果が期待される[2)]。こうしたことから、ヒートアイランド現象の緩和に対し、顕熱および伝導熱の低減は極めて重要である。

晴天となった9月19～21日の測定結果を図5に示す。

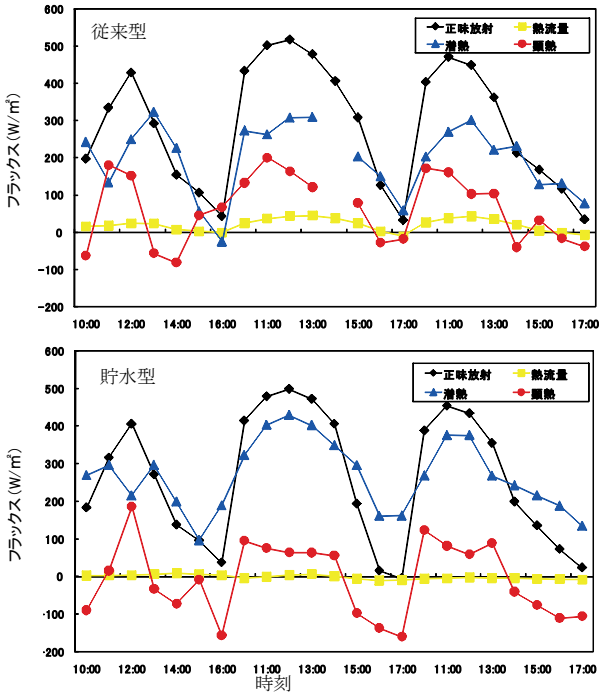


図5.従来型（上図）および貯水型（下図）システムにおける熱収支の日変化（2006年9月19～21日）

正味放射量は両システム間に大きな差異は認められずほぼ等しかった。伝導熱は、両システム共に小さかったが、貯水型で特に小さかった。

潜熱は、期間を通じて貯水型システムの方が大きかった。最も正味放射が大きかった20日の正午における潜熱を比較すると、従来型システムが約310W/㎡であったのに対し、貯水型システムは約430W/㎡で、貯水型システムの方が約1.4倍大きかった。

顕熱は、観測期間中を通して貯水型システムの方が小さく、最も正味放射が大きかった20日の正午で比較すると、従来型システムが約170W/㎡であったのに対し、貯水型システムは約60W/㎡で、貯水型システムの顕熱は従来型システムの約1/3であった。

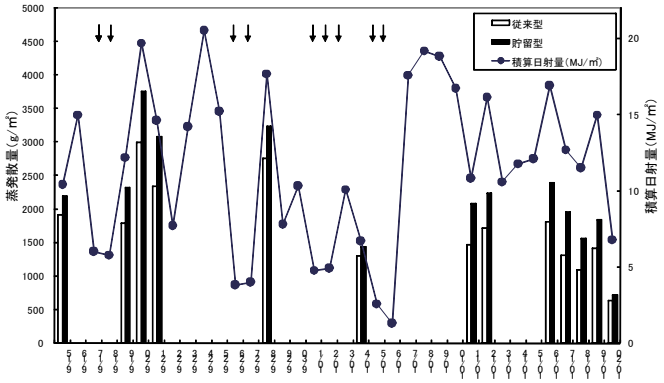


図6. 従来型システムと貯水型システムの蒸発散量の推移

(2006年、↓は降水日)

顕熱の低減に最も影響を及ぼす潜熱算出の基礎となる蒸発散量の推移をみると、貯水型システムは降雨直後だけでなく、無降雨状態が続いた状況においても従来型システムを上回っており、ヒートアイランド緩和効果が持続することを示している（図6）。このことは、貯水型システムが、夏期の無降雨の状態が続く状況においても、従来型システムよりもヒートアイランド緩和効果が維持される点で、より優れていることを意味している。

また、正味放射量と蒸発散量の関係をみると、両者ともに正味放射量が増加するとともに蒸発散量も増加する傾向がみられるが、貯水型のほうが蒸発散量の増加量が大きかった（図7）。このことから、正味放射量が増える、すなわち強日射となり高温となりやすい条件下ほど、貯水型はより大きな効果が期待できることが示唆された。

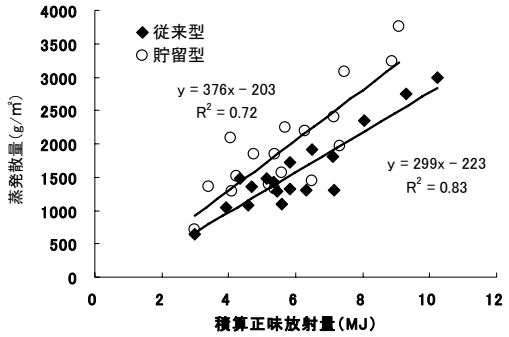


図7. 正味放射と蒸発散量との関係

5. まとめ

貯水型屋上緑化システムのヒートアイランド緩和効果を明らかにするために、従来の軽量薄層型屋上緑化

システムと比較実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 表面温度は、従来型屋上緑化システムに比べ貯水型屋上緑化システムの方が、平均で約 2℃、最大で約 5℃低かった。

(2) 貯水型屋上緑化システムは従来型屋上緑化システムに比べ熱収支が改善されていた。すなわち、貯水型屋上緑化システムは従来型屋上緑化システムに比べ、潜熱が約 1.4 倍で、顕熱は約 1/3 であった。また、伝導熱は極めて僅少であった。

(3) 貯水型屋上緑化システムは、降雨直後だけでなく、無降雨状態が継続する状態においても、従来型システムを上回るヒートアイランド緩和効果が持続することがわかった。またその効果は、ヒートアイランド現象がより顕著になる条件（正味放射量が大きい）ほど、より大きいことがわかった。

参考文献

1) ヒートアイランド対策関係府省連絡会議：ヒートアイランド対策大綱、pp.18(2004).

2) ヒートアイランドの対策と技術　森山正和編　学芸出版社　p91～93（2004）

3) 東京都：ヒートアイランド対策取組方針～環境都市東京の実現に向けて～、pp.43(2003).

4) 屋上緑化のヒートアイランド緩和効果－軽量薄層型屋上緑化に関する検討－　横山仁、山口隆子、石井康一郎　東京都環境科学研究所年報 2004 p3～23 (2004)

5) 貯水型屋上緑化システムの開発と基本性能評価　三輪隆、三坂育正、石井康一郎、横山仁、山口隆子　東京都環境科学研究所年報2006（2006）

6) 芝生と緑化　日本芝草学会編　ソフトサイエンス社　p13～19（1987）

7) 緑空間の計画と設計　中島宏、五十嵐誠、近藤三雄共著　経済調査会　p285 (1995）

8) 環境省：平成13年度ヒートアイランド対策手法調査検討業務報告書、第５章対策技術導入効果の評価手法の検討、pp.135-184 (2002).