

植生マットを用いた屋上緑化に関する実証実験 — 続報：冬期における暖房の消費エネルギーの比較 — Field Experimental Results on the Rooftop Green with the Textile Mats - 2nd Report: The Comparison of the Electric Power on the Air-Conditioner in Winter -

川島 久宜*¹ 加藤 千尋*² 鎌田 祥啓*³ 黒岡 秀次*⁴ 石間 経章*¹
Hisanobu Kawashima Chihiro Kato Yoshihiro Yarita Hidetsugu Kurooka Tsuneaki Ishima

*¹ 群馬大学 Department of Mechanical System Engineering, Gunma University
*² 宇部日東化成 株式会社 Ube – Nitto Kasei Co., LTD (当時群馬大学・院)
*³ 群馬大学・院 Department of Mechanical System Engineering, Gunma University
*⁴ 日和サービス株式会社 Nichiwa service LTD.

Corresponding author: Hisanobu KAWASHIMA, hkawa@gunma-u.ac.jp

ABSTRACT

A field experiment with a rooftop green on a prefab container was performed to compare with an electric power saving effect on an air-conditioner in winter season. The two prefabs were set on the housetop of the ATEC in Gunma University to compare the rooftop green effect to the building. In this experiment the temperatures at an atmosphere, rooftop, ceiling, and inside of the prefab were recorded with the thermocouple. The electric power of the air-conditioner was also recoded. The electric power on the prefab with the rooftop green became larger than that without rooftop green, because the textile mat for the rooftop green had been cooled while the nighttime. Then, large electric power was spent to increase of the room temperature.

キーワード: 屋上緑化, 植生マット, 実証実験, 省エネルギー

Key Words : Rooftop Green, Textile mats, Field experiment, Energy saving

1. はじめに

昨今、化石燃料の枯渇化が世界規模で重要な問題となっていることは周知の事実である。化石燃料の消費に伴って生成・排出される二酸化炭素 (CO₂) をはじめとした温室効果ガスと地球環境には密接な関連があることが示されており⁽¹⁾、地球温暖化を抑制するためには、CO₂ の排出を削減することが重要である。

日本における CO₂ 排出量に注目すると、第一に化石燃料を使用する運輸に関連する排出量が最も多く、次いで建造物に関するものが多い⁽²⁾。つまり、この 2 つの主要因に注目して CO₂ 排出量を削減することが CO₂ の排出量削減に有効であると言える。

建造物に関する CO₂ 排出量の削減に注目すると、日本では 2004 年に工場立地法が改正され、工場敷地内に緑地を設けることが義務付けられた。その方法の一つとして屋上緑化がある。屋上緑化は緑化材による CO₂ の吸収、植物の蒸散にとまなう潜熱の放出、断熱材としての効果など様々な効果が期待されており、屋上や壁面を用いた緑化^{(3), (4)}や一

般家庭でも蔭植物を用いたグリーンカーテン (壁面緑化) が注目されている⁽⁵⁾。省エネルギーデバイスとして屋上緑化を用いる効果を直接調べるためには、同じ環境の下で同一の建物に対して緑化の有無を比較することが最も有効で、その効果を理解することに役立つと言える。

近年、都市部で問題となるヒートアイランド現象の抑制として用いられている緑化に関する研究は、植物の蒸散効果に関するものが多い。香川ら⁽⁶⁾や三坂⁽⁷⁾は、芝生が植栽された土壌に対して重量計測を行うことにより、芝生からの蒸発量の算出法を示している。吉田ら⁽⁸⁾や横山ら⁽⁹⁾は屋上緑化に対する蒸散の効果と植栽に用いた土壌に対する含水の効果について報告している。吉岡ら⁽¹⁰⁾は路面への散水による蒸散効果を明らかにするために、大気からの放射、対流、土壌における蓄熱などの熱輸送現象を考慮した固気液 3 相を対象とした数理モデルを構築し、散水時における都市部の熱環境変化について報告している。

これまでに報告されている緑化に関する研究は、緑化材への熱の流入、流出を正確に評価することに注目したものや、実験施設に対する熱移動現象について述べられている



図1 プレハブ外観



図2 植生マット

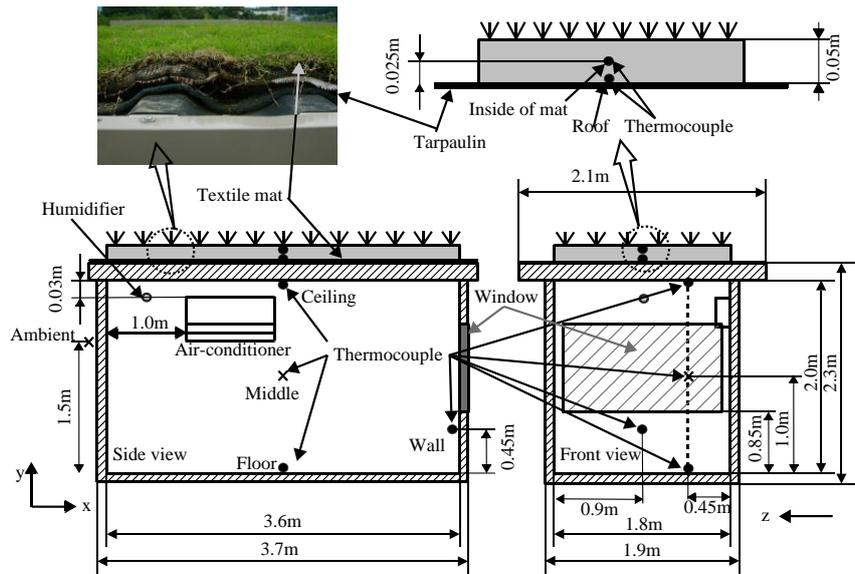


図3 緑化プレハブにおける温度計測位置

ものが多く、実際に屋上緑化を用いた省エネルギー効果について直接比較したものは報告されていない。本研究では同機種種のアコンを設置した2棟のプレハブを隣接させて配置し、一方のプレハブの屋上に緑化面を製作し、もう一方のプレハブと直接比較する実証実験を行った。前報⁽¹⁾では夏期におけるアコンの消費電力について報告した。本報では冬期におけるアコン（暖房設定）に関して、屋上緑化の有無によるアコン消費電力の違いについて報告する。また、前報⁽¹⁾および本報で示した計測結果をもとにアコン消費電力に対する周囲環境の影響に関して報告する。

2. 実験装置および方法

実験設備および実験方法は前報⁽¹⁾と同様であるためここでは簡単に記す。実験は群馬大学工学部（群馬県桐生市）に隣接する3階建てのアドバンスト・テクノロジー高度研究センター（ATEC: Advanced Technology Research Center）の屋上（地上から13.1m）に2棟のプレハブ（外形寸法：長さ×幅×高さ = 1.9m×3.7m×2.3m）を1.6m離して隣り合わせに設置し、一方のプレハブ屋上に緑化を施した。実験に用いたプレハブは、溶解亜鉛メッキ合板に焼付け塗装が施されたものであり、板厚は0.6mmから2.3mmである。また南側の側面には幅1.6m、高さ0.9mの引き違い窓が床から0.85m高い位置に設けてある。

屋上緑化基盤材には鶴飼⁽¹²⁾が開発した植生マット（有限会社 古河産業社製フォレストエコマット）を用いた。図1、図2に実験に用いたプレハブの外観と使用した植生マットにコウライシバを植栽した一例を示す。この植生マットは屋上緑化用に開発された緑化材であり、トウモロコシをはじめとする生分解速度の異なる数種類の繊維用いてを袋状⁽¹³⁾にし、土壌（黒土60%、バーク28%、ビートモス12%）を圧入⁽¹⁴⁾する。

実験ではプレハブ屋上に防水シートを敷いた後に、0.5m×0.5m×0.05mの植生マット（湿潤時で50kg/m²以下）をプレハブ屋上に計26個敷き詰めることにより1.8m×3.5mの緑化面を製作した。本報で示す冬期の実験では灌水は行っていない。

実験では2棟のプレハブに同機種種のアコン（National社製228TB、消費電力0.46kW/h@夏期、0.39kW/h@冬期）を設置した。2機のアコンはプレハブ側面の中央近くに配置するように側面から1.0m離れた位置に、また北側壁面に床から高さ1.8mの位置に設置した。実験は2009年12月1日から2010年1月31日の間、アコンを20℃の暖房に設定したときのプレハブ内温度とアコンの消費電力を計測した。実験では風量を2台とも「自動」と設定した。

図3に緑化プレハブに対する温度計測位置の概略図を、表1に温度計測位置の諸元を示す。図3はプレハブの側面図と正面図である。計測はプレハブ室内温度と外気温度（室内中央（H=1.0m）、自然通風シェルタ内に設置した外気温度（H=1.5m）、図中×で表示）、物体温度（床上（H=0m）、天井面（H=2.0m）、窓側の壁面（H=0.45m）、屋上面（H=2.15m）、植生マット内部（Depth=0.025m）、図中●で表示）をK型熱電対により計測し、データロガ（GRAPHTEC社製GL200A）に蓄積した。各温度はそれぞれ10分毎に24時間のデータを集積した。アコンの消費電力は5分間の積算値を電力計（横河メータ&インスツルメンツ株式会社

表1 温度計測位置

Indoor	Floor (H=0), Middle (H=1.0m), Ceiling (H=2.0m), Wall (H=0.45m)
Outdoor	Roof (H=2.15m), Inside of mat (Depth=0.025m), Ambient (H=1.5m)

製 CW120) に蓄積した。非緑化プレハブの温度計測は、緑化プレハブと同位置について計測した。またデータの整理に用いた日照時間は気象庁発表による群馬県桐生市の観測データ (アメダス) ⁽¹⁵⁾ を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 エアコン非稼働時における温度履歴

図 4 に 2009 年 12 月 2 日におけるエアコン非稼働のプレハブ内温度履歴を示す。この日の群馬県桐生市の天候は晴れであった。図 4(a) は気象庁発表の群馬県桐生市におけるアメダスのデータ ⁽¹⁵⁾ から引用した 10 分毎の日照時間である。図 4(b) から図 4(f) はそれぞれ 2 棟のプレハブに取り付けられた外気温度(b)、屋上面(c)、天井(d)、壁面(e)、床から 1m 上方の位置(f)での温度計測結果である。

図 4(a)、図 4(b) より 7:00 頃から日照時間は長くなり、気温は朝 8:00 頃から徐々に高くなった。また 15:00 頃には 17.3°C に達した。その後、16:00 頃に日照時間が短くなると気温も急激に低下した。気温はその後緩やかに低下した。

屋上面の温度履歴 (図 4(c)) を見ると、緑化プレハブの屋上面温度は外気温度と類似した変化となり、気温が最高温度に達するまで緩やかに上昇した。この日の緑化プレハブの屋上面温度は 8:00 では 5.0°C であったが、16:00 では 15.1°C に達した。次に 16:00 以降の温度低下の傾向を見てみると、外気温度は 16:00 に急激な温度低下が生じているものの、屋上面での変化は小さい。このことは植生マットの熱拡散の効果が小さく、急激な外気温度の変化に対して追従性が弱いことを意味する。

非緑化プレハブの屋上面温度は外気温度が上昇する 8:00 頃から上がりはじめ、12:00 頃に 30.7°C に達した。その後屋上面温度は下がり 16:40 に 7.6°C になった。非緑化プレハブの屋上面のように日光が直接当たる箇所では外気温度よりも温度が高くなる。その場合、最高温度に達するのは 12:00 頃である。この傾向は前報 ⁽¹¹⁾ に示した夏期の計測データでも同様である。プレハブの屋上面を加熱する要因は太陽からの放射熱であり、晴れた日では正午が最も日射量が多くなると言われている。そのため屋上面を含むプレハブ壁面の温度は日射量の影響により正午に最も温度が高くなったと推察できる。また、金属の比熱は土壌に比べて小さいために、日射量が減少する正午過ぎに屋上面の温度が低下したと考えられる。気温は地表に熱が蓄えられるのに時間を要するため屋上面温度よりも若干遅れて最大となる。

天井面の温度 (図 4(d)) を見てみると、どちらのプレハブに対しても最大となる時刻は概ね正午である。また、緑化プレハブの天井面温度の方が非緑化プレハブの天井面温度に比べて約 7°C 程度低い。さらに壁面 (図 4(e))、床から 1m の位置での温度 (図 4(f)) 履歴も最大到達温度は異なるもののその温度履歴の傾向は天井面と同様であった。

3.2 暖房設定時における 1 日のプレハブの温度履歴とそ

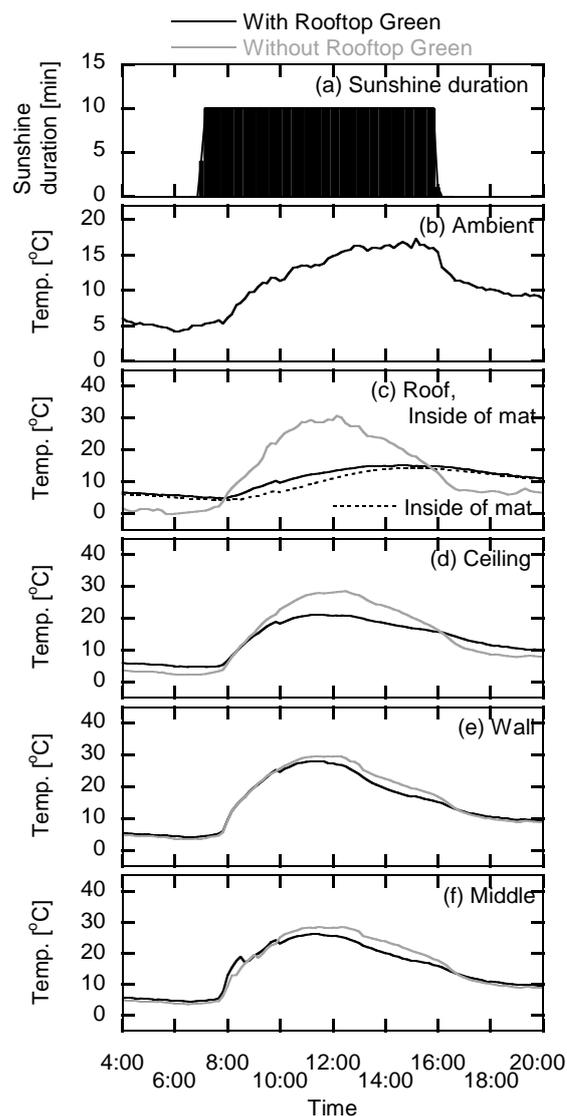


図 4 エアコン非稼働時の温度計測結果 (2009/12/2)

のときのエアコン消費電力

2 棟のプレハブに対して暖房を設定したときの 2009 年 12 月 25 日について、4:00 から 20:00 までの日照時間 ⁽¹⁵⁾ (アメダス、群馬県桐生市) (a)、外気温度(b)、各プレハブのエアコン消費電力(c)、天井面の温度(d)の時間履歴を図 5 に示す。この日は晴れであった。

図 5(a)、(b) より外気温度は日照時間が長くなった 8:00 頃から徐々に上がり始め 15:00 頃に最大となり、16:00 頃から徐々に下がり始めた。一方、図 5(c) より緑化の有無によらず、外気温度が上昇し始める 8:00 頃から 10:00 にかけてエアコンの消費電力は徐々に小さくなるのがわかる。また、10:00 から 15:00 の間は各プレハブに取り付けられたエアコンの作動状況が異なり、非緑化プレハブに取り付けたエアコンは駆動していないものの、緑化プレハブに取り付けたエアコンは駆動していた。このときの天井面の温度 (図 5(d)) を見てみると、10:00 から 15:00 の間、非緑化プレハブの天井に比べて緑化プレハブの天井面の方が温度が低く、

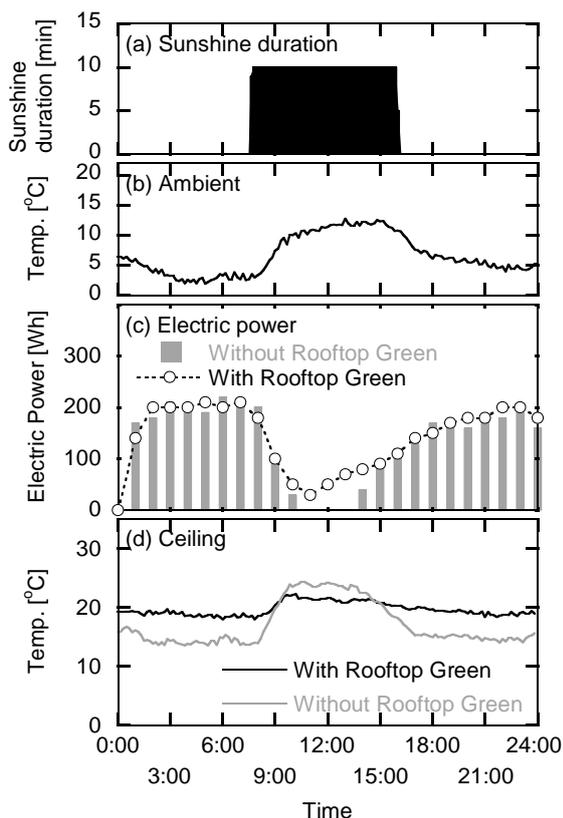


図5 暖房時におけるエアコン消費電力，2009/12/25

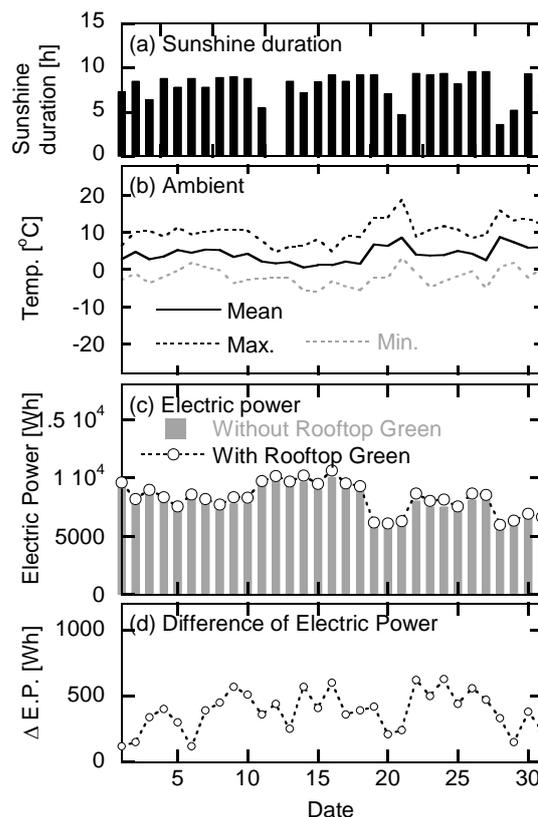


図6 暖房時における2010年1月のエアコン消費電力

表2 エアコン消費電力の比較 (2009年8月⁽¹¹⁾と1月)

	With Rooftop Green		Without Rooftop Green		With R.G./Without R.G.	
	Summer	Winter	Summer	Winter	Summer	Winter
Total electric power [kWh]	35.3	256.2	42.2	244.3	0.84[-]	1.05 [-]
Mean electric power [Wh]	1140	8300	1360	7900	0.84[-]	1.05 [-]

Difference of electric power, With Rooftop Green-Without Rooftop Green	Summer season	Winter season
	Maximum [Wh]	100
Minimum [Wh]	-400	120.0
Mean [Wh]	-221.6	384.2

一方、夜間では非緑化プレハブの方が緑化プレハブよりも低い。このことは緑化基盤材として用いた植生マットの断熱の効果が顕著となり温度上昇までに要する時間が長いためである。また、この結果は、言い換えれば植生マットは温度が下がりにくく、暖まりにくい効果を持つことを示している。

図5(c)のエアコン消費電力をもとにして、2009年12月25日のエアコン消費電力積算量を比較すると、非緑化プレハブでは6570Whであるのに対し、緑化プレハブでは6980Whとなり、緑化プレハブに設置したエアコンの方が非緑化プレハブに対して6%程度消費エネルギーが多くなった。

3.3 暖房設定時における1月のエアコン消費電力

次に2010年1月の温度、エアコン消費電力の計測結果を図6(a)~(d)に示す。図6(a)~(d)はそれぞれ群馬県桐生市におけるアメダスの観測結果⁽¹⁵⁾から得た日照時間(a)、プレハブの外気温度(b)、エアコン消費電力(c)、2棟のプレハブのエアコン消費電力の差(d)である。

図6(a)を見ると2010年1月は日照時間が7時間以上である日数が多い月であることがわかる。図6(b)に一日の外気温度の平均値とその日の最低気温、最高気温を示す。1月の平均気温は4℃であり、最低気温、最高気温の平均値はそれぞれ-2℃、10℃程度であった。

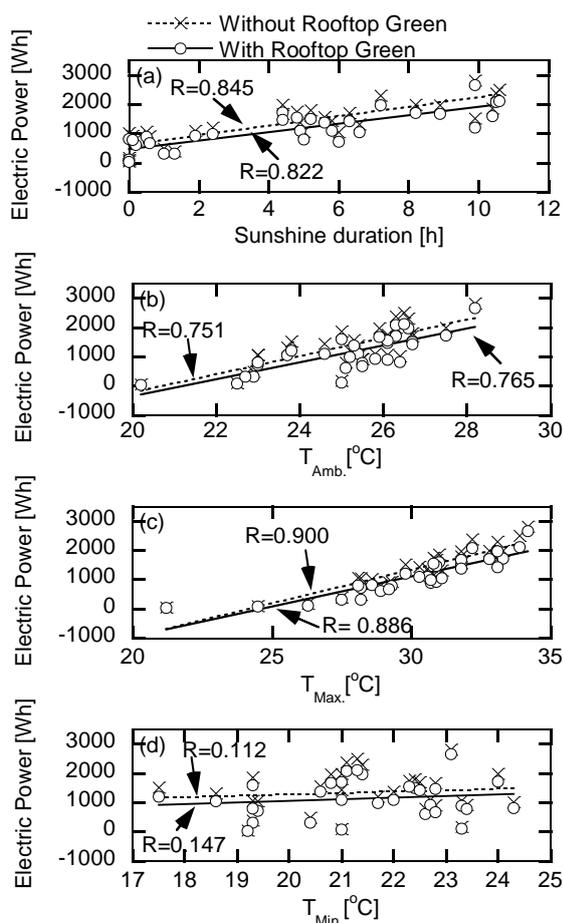


図7 夏期（2009年8月）における
エアコン消費電力に対する影響⁽¹¹⁾

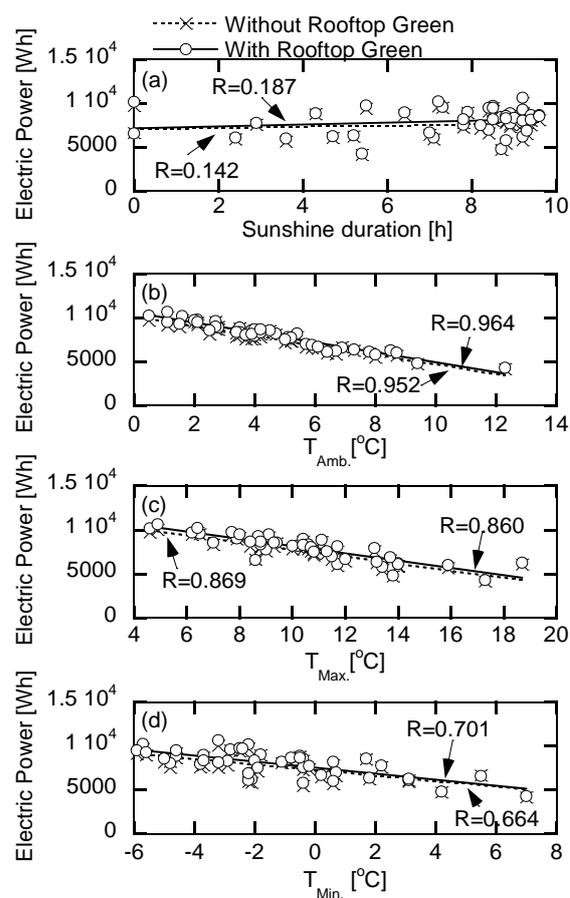


図8 冬期（2010年1月）における
エアコン消費電力に対する影響

図6(c)は緑化プレハブと非緑化プレハブに対するエアコン消費電力の1日当たりの積算量を示している。1月は外気温が低くエアコンは終日運転していたためにどちらのプレハブも1日当たりのエアコン消費電力は多くなり、両者の差は一見小さい。2010年1月におけるエアコン消費電力の月平均および総量は、緑化プレハブでは8300Wh、256.2kWhであり、非緑化プレハブでは7900Wh、244.3kWhであった。両者を比較すると平均電力量、積算電力量ともに緑化プレハブの方が約5%の消費電力の増加となった。図6(d)は2棟のプレハブに要したエアコン消費電力の差（緑化プレハブ－非緑化プレハブ）を示している。図より、1月エアコン消費電力は緑化プレハブの方が最大で630.0Whとなり月平均で384.2Wh多い。表2に2009年8月と2010年1月のエアコン消費電力のまとめを記す。

前報⁽¹¹⁾に示したように、緑化プレハブ、非緑化プレハブに対する2009年8月のエアコン消費電力はそれぞれ平均1140Whと1360Whであるのに対し、2010年1月の平均エアコン消費電力はそれぞれ8300Whと7900Whであり、冬期の方が夏期に比べて格段に大きい。これらの結果から緑化基盤材に用いた植生マットは、ガラスウールに代表される断熱材としての効果が期待されるだけでなく、保温・保

冷材のような蓄熱材としての効果を兼ね備えていると理解できる。夜間に冷やされた植生マットはプレハブ屋上面に対して、日中の温度上昇を抑制する効果があり、夏期では室内の温度上昇を抑制するために冷房に関する消費電力を削減する。一方、冬期では日中の温度上昇を妨げ、冷熱源としての効果が顕著となるために暖房に関する消費電力が増加したと考えられる。以上の結果からエアコン消費電力は、緑化を施すことにより夏期では16%の削減、冬期では5%増加となり通年では約10%程度の省エネルギー効果を得る事がわかる。

3.4 エアコン消費電力と各種パラメータとの相関

前報⁽¹¹⁾および前節で示したように緑化プレハブに対するエアコン消費電力は、非緑化プレハブに比べて夏期では小さくなり、冬期では大きくなる。そこで緑化材に対する周囲環境の影響を明確にするために、日照時間、外気温、最高気温、最低気温をパラメータとしてエアコン消費電力について整理したものを図7、図8に示す。図7は夏期の計測データ⁽¹¹⁾（2009年8月）を用い、図8は冬期の計測データ（2010年1月）を用いてそれぞれ相関を調べた。夏期におけるエアコンの設定温度は26度の冷房とし、風量は

表3 エアコン消費電力に対するパラメータとの相関係数

	Summer	
	With	Without
	Rooftop Green	Rooftop Green
Sunshine duration	0.822	0.845
$T_{Amb.}$	0.765	0.751
$T_{Max.}$	0.886	0.900
$T_{Min.}$	0.147	0.112
Winter		
Sunshine duration	0.187	0.142
$T_{Amb.}$	0.964	0.952
$T_{Max.}$	0.860	0.869
$T_{Min.}$	0.701	0.664

「自動」とした⁽¹¹⁾。図中の(a)~(d)はそれぞれ日照時間(a), 外気温度の平均(b), 最高(c), 最低(d)である。また図中の破線と実線はそれぞれ非緑化プレハブと緑化プレハブに対する線形近直線であり、 R は相関係数である。表2に算出された相関係数を示す。

図7に示した夏期における計測データを見ると、エアコン消費電力と最も相関係数が大きいのは最高気温であり緑化プレハブ、非緑化プレハブともに0.886、0.900である。次いで日照時間、外気温度との相関係数が大きく、最低温度に対しては小さい相関となる。この原因として、緑化材が外気の温度変動に対して抵抗源として働くため室内の温度変動が小さくなり、その結果エアコンの駆動回数が少なくなったためだと推察される。緑化の有無について比較すると、緑化を施すことにより日照時間、外気温度に対して相関係数が若干小さくなるもののほぼ同程度である。最高気温と日照時間には正の相関があることから、両者の効果は緑化プレハブのエアコン消費電力に対して同様の効果を与えることが予想される。屋上緑化の効果に対して最高気温との相関に若干の違いが生じているが、その原因として本解析では温度の時間履歴の影響を無視していることが挙げられる。

冬期における相関係数を見てみると、夏期では最高気温に対して相関係数が大きくなったのに対して、冬期では外気温度、最高気温、最低気温の順となり、日照時間に対しては最も相関値は小さかった。この原因は夜間などでプレハブ自体が冷やされたために、日射時間が多くなってもプレハブ内部の温度が暖められるまでに時間を必要とすることが原因の一つとして考えられる。また、日中でも気温が上がらず暖房の駆動時間が長くなったことも原因の一つだと考えられる。

表3より、夏期、冬期のエアコン消費電力に対する外気温度などの影響について調べたところ、夏期、冬期で最も相関係数が大きくなるパラメータは季節によって異なり一意に一つのパラメータのみを用いてこれを整理することは難しいことがわかる。

4. まとめ

植生マットを用いた屋上緑化に関する実証実験として、プレハブに設置したエアコンの消費電力を調べた。実験では群馬県桐生市にある群馬大学に隣接した3階建てのATEC (Advanced Technology Research Center) の屋上に2棟のプレハブを設置し、一方のプレハブ屋上に植生マットを用いて屋上緑化を施した。室内には同機種の空調機を設置し、稼働、非稼働時におけるプレハブ室内の温度、外気温度、エアコン消費電力を計測した。本報では前報⁽¹¹⁾に引き続き2009年12月から2010年1月に対して冬期の実証実験データを取得し、以下の知見を得た。

1. 緑化基盤材に用いた植生マットにより緑化プレハブ天井面温度の温度変化は非緑化プレハブの天井面に比べて小さい。これは植生マットは夜間では温度低下が小さく日中では温度上昇が小さいためである。
2. 緑化を施したプレハブは、屋上面の温度上昇が小さいためにエアコン（暖房設定）の駆動時間が長くなり、結果として非緑化プレハブに比べてエアコン消費電力は大きくなる。本実験で用いた緑化面積（1.8m×3.5m）を施したプレハブの場合、冬期（2009年1月）では屋上緑化を施すことにより5%のエアコン消費電力の増加となった。
3. エアコンの駆動条件に関して気温などをパラメータとして整理した結果、夏期と冬季では運転状況が異なり一つのパラメータを用いて整理することは難しい。

本研究を行うにあたり、古川正二氏（(有)古河産業）には植生マットの提供を受けた。ここに謝意を記します。

参考文献

- (1) STOP THE 温暖化 2008, 環境省地球環境局(企画), (独) 国立環境研究所(監修), <http://www.env.go.jp/index.html>
- (2) 環境と空気・水・熱, 空気調和・衛生工学会誌, (2007), <http://www.shasej.org/>
- (3) 例えば東京都環境局「緑化計画と屋上緑化」, <http://www2.kankyo.metro.tokyo.jp/green/index.htm>
- (4) 例えば国土交通省屋上庭園, http://www.mlit.go.jp/crd/park/shisaku/gi_kaihatsu/okujyo/index.html
- (5) 例えば東京都環境局「壁面緑化ガイドライン」, http://www2.kankyo.metro.tokyo.jp/heat/wallgreen/hekime_n%20guideline.htm
- (6) 香川治美, 林徹夫, 谷本潤, 片山忠久, 芝生植栽が都市熱環境に及ぼす影響に関する研究 第1報 土壌の含水状態を考慮した芝生植栽の蒸発散特性の定量的特定, 日本建築学会計画系論文集, 507 (1998), pp.7-12.
- (7) 三坂育成, ヒートアイランド対策の現状と課題—屋上緑化等の被覆対策技術を中心として—, 関東の農業気

象, 2 (2005), pp.10-14.

- (8) 吉田篤司, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 屋上緑化の熱特性と熱負荷特性—その1 熱収支と実測—, 日本建築学会近畿支部研究報告集 (2004), Paper No. 4062, pp.245-248.
- (9) 横山仁, 山口隆子, 石井康一郎, 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—, 東京都環境科学研究所年報 (2004), pp.3-10.
- (10) 吉岡真弓, 登坂博行, 都市散水効果の定量評価に向けた大気・地下連成—水・熱環境モデルの開発, 日本ヒートアイランド学会論文集, 5 (2010), pp.11-23.
- (11) 川島久宜, 加藤千尋, 鎌田祥啓, 黒岡秀次, 石間経章, 植生マットを用いた屋上緑化に関する実証実験—夏期における冷房の消費エネルギー削減効果—, 日本ヒートアイランド学会論文集, vol.6 (2011), pp.1-7.
- (12) 鶴飼恵三, 古川正二, 植生マットを利用した屋上緑化工法の開発, 土と基礎, 53-4 (2005), pp.27-29.
- (13) 大澤善次郎, 上石洋一, 佐藤和彦, 鈴木賢治, 深沢秀明, 古川正二, 生分解速度が異なる繊維素材を用いた環境に調和する植生マットの開発, 特定非営利活動法人 北関東産官学研究会情報誌 HiKaLo, 7 (2002), pp.22-24.
- (14) (有)古河産業, <http://www.eco-mat.jp/index.htm>
- (15) 国土交通省 気象庁, 気象観測データ, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

(Received March 9, 2011, Accepted July 26, 2011)