

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— Field Experimental Results on the Rooftop Green with the Textile Mats - The Power Saving Effect of Air-Conditioner in Summer -

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

The field experiment with the rooftop green was tested to confirm the energy saving on the air-conditioner. The two prefabrication rooms set on the housetop at the ATEC in Gunma University. The greening was constructed to the rooftop of one of the rooms, and another rooftop was no changed. The temperatures were measured with K type thermocouple at the inside of the mat, roof, ceiling, several points in the room, and floor. The electric power of the air-conditioner was also recorded. The roof temperature of the greening room became smaller than that of another one. By using roof green, the electric power of the air conditioner decreased 16% in a day against the non-greening room. Furthermore, the power saving effect through August was reached until 11%.

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

地球温暖化が深刻化してきた今日では、世界規模で CO₂ を削減することが最重要課題となっている。(独) 国立環境研究所がまとめた研究報告⁽¹⁾によれば、現在の CO₂ 排出量を維持した場合、2100 年には 1990 年に比べて世界の平均温度は約 2°C から 4°C 程度上昇することが数値シミュレーションによって予測されており、多方面で地球温暖化への警告が発信されている^{(2),(3)}。この温度上昇は水量、生態系、農作物生育、疫病の蔓延など、我々の生活に対して様々な変化を与えることが懸念されている。これらの問題を受け、温室効果ガスの一つである CO₂ を削減することが共通の認識となっている。

日本における年間 CO₂ の排出量は 1990 年以降約 12 万トン⁽⁴⁾を上回り、総排出量の 3 分の 1 が建築物に関連する。そのため建築物に関連する CO₂ の排出を削減することは、地球全体の CO₂ 排出量の削減に対して大きな影響を与える。

建物に関する CO₂ 削減の重要性が明確になった今日、日本では 2004 年に工場立地法が改正され、敷地面積内に緑地

を設けることが義務付けられており、建築物の屋上面や壁面を利用した緑化が盛んに行われている。緑化は CO₂ 削減効果を期待できるだけでなく、景観の向上、大気汚染物質の吸収・吸着をはじめとした様々な効果が期待されている^{(5),(6)}。

近年、都市部で問題となっているヒートアイランド現象の抑制について、植物の蒸発散効果に着目した多くの研究が報告されている。香川ら⁽⁷⁾や三坂⁽⁸⁾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、芝生の蒸発散の算出法を示している。また屋上緑化に対する蒸発散の効果、植栽に用いた土壌水分の効果が報告されている^{(9),(10)}。

屋上緑化は先の研究にあるように植物の蒸発散、土壌水分、灌水など様々な要因により建物内への熱の流入を抑制するため、建築物にある空調設備に関する消費電力の削減を期待できる。しかし、これまでに報告されている多くの研究は、緑化材の熱収支に関する研究に留まっており、建物全体のエネルギー消費に関する報告は少ない⁽¹¹⁾。また、屋上緑化の有効性を示すためには、同一の環境下で同じ施設を用いて緑化効果を直接比較し、省エネルギー効果を議論す



図1 屋上緑化試験区全体図



図2 緑化プレハブを ATEC 屋上に設置した様子



図3 緑化に用いた植生マットのサンプル

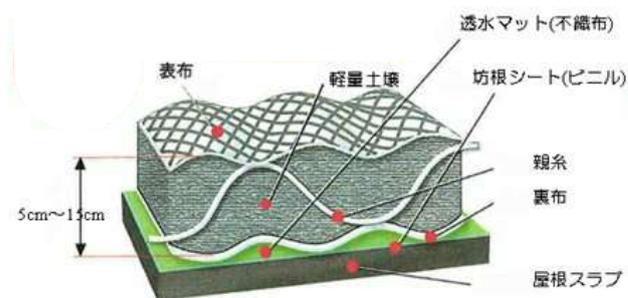


図4 植生マットの解説図⁽¹⁴⁾

る必要であるが、このような研究例は少ない⁽¹¹⁾。

本研究は3階建て建物の屋上に2棟のプレハブを建設し、一方のプレハブの屋上面に緑化を施し、両方の室内に設置されたエアコンの消費電力を直接比較することにより、緑化によるエアコンの消費エネルギー削減効果について調べることを目的とする。また2棟に取り付けた温度計、電力計を用いて長期間にわたって計測することにより夏期における冷房の消費エネルギー削減効果を明らかにすることをあわせて目的とする。

2. 実験装置および方法

実験は群馬県桐生市にある群馬大学に隣接する3階建てのアドバンスド・テクノロジー高度研究センター (ATEC: Advanced Technology Research Center, 図1 参照) の屋上(地上より13.1m)に、図2に示すように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離れた場所に隣り合わせに設置し、一方のプレハブ屋上には緑化を施した。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、鶴飼ら⁽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、厚さ0.05mで50kg/m²以下(湿潤時))を用いた。フォレストエコ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を織ることで袋状にし、土壌を圧入して製作する⁽¹³⁾。また、フォレストエコマットは「親糸」が縫い込まれており、土壌⁽¹⁴⁾(黒土60%, パーク28%, ビートモス12%)を圧入した場合にも植生マットの厚さを保つことが可能である。この植生マットを用いることにより、従来屋上緑化の欠点とされていた土壌の飛散を防ぐことができる。本実験ではプレハブ屋上面に防水シート(図2左図にあるプレハブ屋上面の黒色)を敷いた後に、一辺が0.5m×0.5m×0.05mの植生マットをプレハブ屋上に計26個の植生マットを敷き詰めることにより1.8m×3.5mの緑化面を製作した。また植生マットの表面にはコウライシバを植栽して緑化面を作成する。コウライシバはプレハブ屋上に植生マットを施工する以前に植栽マットに根付かせ、その後屋上面に施工し

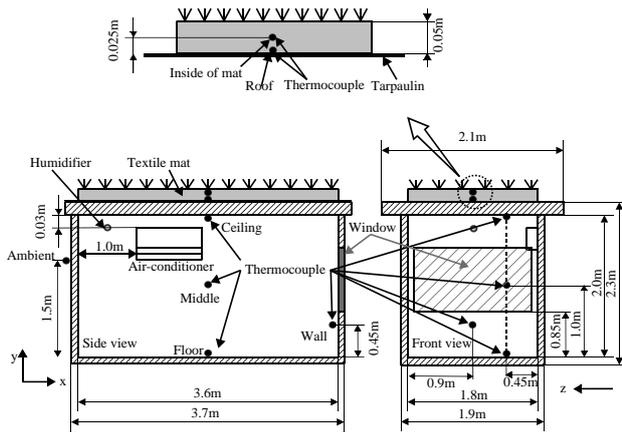


図5 緑化プレハブにおける温度計測位置

表1 温度計測位置

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

た(2009年4月16日施工)。図2に緑化を施したプレハブを、図3に実験に使用した植生マットの一例を、図4に植生マットの解説図⁽¹⁴⁾を示す。なお、コウライシバの生育維持のために晴天日に限り毎回140Lの水を緑化プレハブの屋上面に灌水した。灌水は概ね夕刻に水道水をホースにより行い、植生マット下側から水が流れ落ちる程度行った。140Lの灌水量は植生マットに対して21mm/m²の水を灌水したことに相当する。本実験では灌水時に十分植生マットに水が行き届くよう、植生マットから水が貫通することを確かめたことにより、通常の芝に対して行われる灌水と比較すると若干多い結果となっている。また実験期間を通じて植栽したコウライシバは枯れることなく生育していた。

実験では2棟のプレハブに対して同機種の空調機エアコン(National社製228TB,消費電力0.46kW/h@夏期,0.39kW/h@冬期)を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の位置に取り付けた。本実験は2009年1月から計測を行い、初めに2棟のプレハブの非緑化状態について計測を行い、その後一方のプレハブ屋上に緑化を施した後に2棟のプレハブに設置したエアコンを冷房20°C(4月),26°C(5月~9月)に設定し、温度とエアコンの消費電力を計測した。本実験では実際に使用される環境に合わせて、エアコンの設定を「自動運転」とした。

図5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5にはプレハブの側面図、正面図を示している。計測は2棟のプレハブの室内の気温(床($H=0\text{m}$),中央($H=1.0\text{m}$),天井($H=2.0\text{m}$),窓側の壁面($H=0.45\text{m}$))と室外温度(屋上面($H=2.15\text{m}$),植生マット内部(Depth = 0.025m)),自然通風シェルタ内

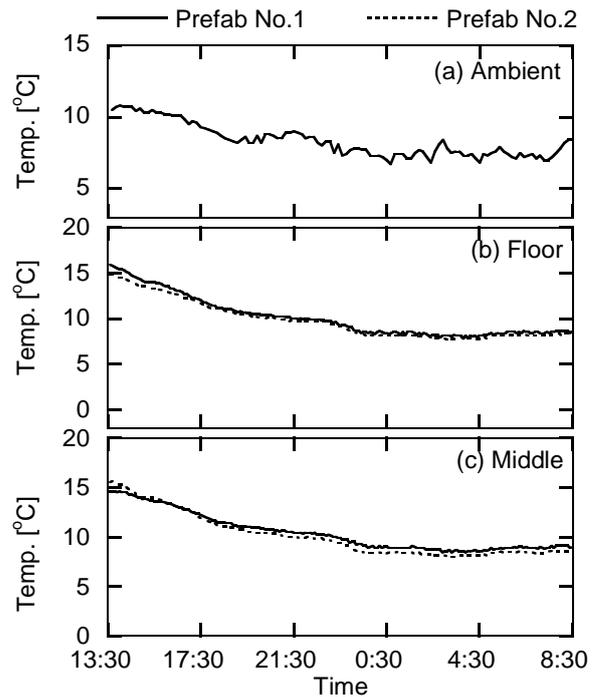


図6 緑化前のプレハブにおける温度履歴
(エアコン非稼働時, 2009年1月29日)

に設置した外気温度($H=1.5\text{m}$)をそれぞれK型熱電対を用いて計測しデータロガ(GRAPHTEC社製GL200A)に蓄積した。各温度計測はそれぞれ1分毎にサンプリングし、24時間のデータを集積した。エアコンの消費電力は5分間の消費電力の積算値を電力計(横河メータ&インスツルメンツ株式会社製CW120)に蓄積した。なお、他方の非緑化プレハブについては、室内に関して緑化プレハブと同位置の温度を計測した。ま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 2棟の非緑化プレハブの温度

屋上緑化によるエアコンの消費エネルギー削減効果を比較するために先立って、実験に使用する2棟のプレハブ施設が同一の実験環境で試験した場合、同等の試験結果を示すかどうかを確認するため、緑化施工前の非緑化プレハブの2棟を用いてそれぞれの室内2箇所について温度計測を行い比較した。

図6と図7に非緑化状態における2棟(No.1, No.2)の温度計測結果を示す。図6は2009年1月29日13:30から翌日8:30までエアコン非稼働時とした場合の計測結果であり、図7はエアコン稼働した場合の2009年1月28日17:00から翌日8:00までの計測結果である。図にはそれぞれ気温(a),床面(b)と床から約1.0mの高さの位置(c)における計測結果が示されている。試験日は両日共に晴れであった。

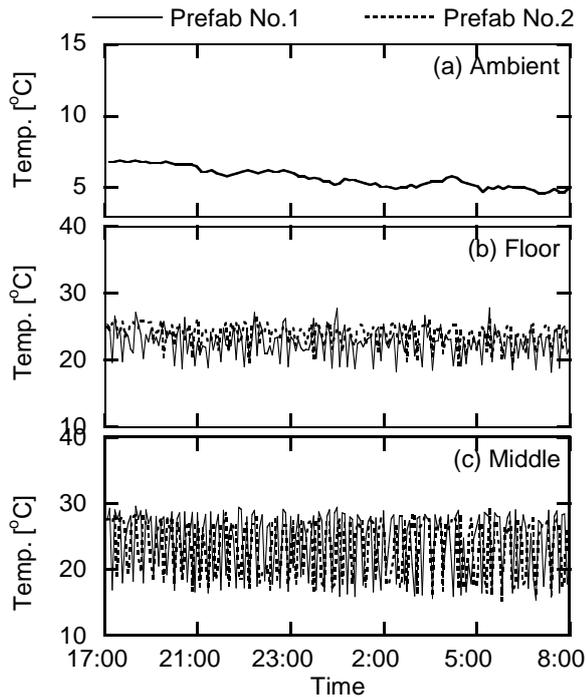


図7 緑化前のプレハブにおける温度履歴
(エアコン稼働時, 2009年1月28日)

図よりエアコンの非稼働, 稼働に関わらず非緑化プレハブ内の温度は, 同じ計測位置ではそれぞれ同じ温度であることがわかる. 図6のエアコン非稼働時の結果から, 室内の気温は計測位置によらず夕方から翌朝にかけて緩やかに低下し, エアコン稼働時(図7)では室内の気温は平均的に一定温度(23.5°C程度)であるものの, エアコンは間欠的に稼働するために激しく変動している. また温度変動は床よりも床から1.0mの方が大きいことがわかる. 床から1.0mの位置では, 最大温度と最小温度の気温差は10°C程度であり, エアコンからの送風により室内の空気が流動したために温度変動が大きくなったものと考えられる.

本実験における温度計測において, 異なる2棟のプレハブ温度が同程度であったことから, マクロなスケールでは同一の環境であると判断した. また次に示す実験結果は, 2棟プレハブに対して同一の実験環境下で調べられているものとして屋上緑化の効果について述べる.

3.2 夏期におけるエアコン非稼働時の温度

2009年7月20日4:00から20:00におけるエアコン非稼働時の温度変化を図8に示す. 図8(a)~(f)はそれぞれ, 10分毎の日照時間, 外気温度, 緑化プレハブと非緑化プレハブに関する屋上面, 天井, 壁面, 床から1m上方の温度履歴を表している. このときの群馬県桐生市の天候は晴れ時々曇りであり, 外気最高温度は32°C(群馬県桐生市における気象庁公表データ⁽¹⁵⁾では36°C)であった. なお7月20日の計測では, 灌水による温度低下の影響を無くすために前日から灌水を行っていない.

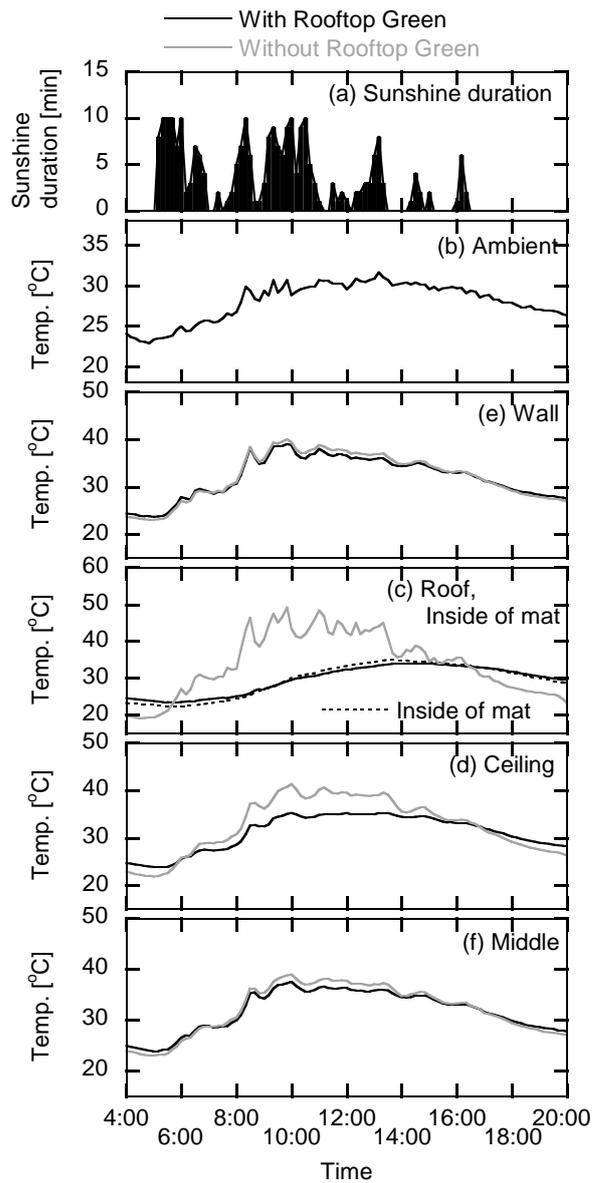


図8 エアコン非稼働時における温度履歴, 2009/07/20

図8(a)より, この日の午前中は晴天であったことから午前中は比較的日照時間が多かったものの, 午後から曇天となり日照時間は少なくなった. 図8(b)の室外気温を見てみると, 6:00頃から12:00頃まで徐々に温度が上がり, 12:00以降徐々に気温が低下した. 屋上面の温度(図8(c))を比較すると, 非緑化プレハブの屋上面の温度は, 日の出(5:10頃)と共に温度が上昇し, 午後には日が隠れると温度が急速に低下する. 一方緑化プレハブを見てみると, 屋上面(植生マットの下)の温度変化は緩やかであり, その傾向は植生マット内部の温度変化と似ている. 屋上面での最大温度は, 非緑化プレハブでは49°Cに達したのに対し, 緑化プレハブでは34°Cとなり, 非緑化プレハブに比べて15°C低かった. また2棟の室内天井面の温度(図8(d))を比較した場合, 最大温度は非緑化プレハブでは41°Cに達したが, 緑化プレハブでは35°Cとなり, 緑化プレハブの方が6°C低かつ

た。このことから緑化材は屋上面から流入する熱量に対して大きな熱抵抗源となり、断熱効果を与えていることがわかる。これは、他の研究者によって報告されている植物の蒸発散、植生マットの水分の影響も加味されていると考える。

室内壁面の温度（図 8(e)）の最大値を比較すると、非緑化プレハブでは 40℃、緑化プレハブでは 39℃となり、1℃の温度差が見られた。両者の違いが小さいことから 2 棟のプレハブに対して、緑化を施していない側面から流入する放射熱量は同程度であることが伺える。

床からの高さが 1m の位置（図 8(f)）では、非緑化プレハブでは 39℃、緑化プレハブでは 38℃となり側壁と同程度の気温差が見られた。また Middle に対して、緑化の有無による温度上昇の傾向と最大温度に大きな違いは見られていない。太陽の位置、プレハブの方位などの影響を無視して表面積比で考えた場合、本実験で用いた緑化面 (6.3m²) は、屋上面を除いたプレハブ室内全体の側面積 (21.6 m²) に対して 30%程度であることから、本実験において熱の流入は側壁に依存する分が大きいと考えられる。

3.3 夏期におけるエアコン稼働時の温度

次に 2 棟のプレハブに対してエアコンを稼働した場合の 10 分毎の日照時間、外気温、プレハブの温度履歴をそれぞれ図 9(a)~(e)に示す。図は、晴天となった 2009 年 7 月 26 日 4:00 から 20:00 に関して、屋上面、天井、植生マット内部の温度計測結果である。なお 7 月 26 日の計測では、灌水による温度低下の影響を無くするために前日から灌水を行っていない。エアコンは 26℃の冷房設定で 24 時間稼働させた。

この日は終日晴天であったため、7:30 頃から 16:00 頃まで日照時間は長い。

図 9(b)の外気温の変化を見てみると、7:30 頃から徐々に気温が上がり、15:00 頃には計測日の外気最高温度 (35℃) となった。その後 17:30 頃には夕立があり急激に温度が低下した。また 4:00 から 20:00 までの平均気温は 30℃であった。

図 9(c)より屋上面での最大温度は、非緑化プレハブでは 56℃ (12:00) に達し、緑化プレハブでは 36℃ (13:20) となり、非緑化プレハブに比べ 18℃低い。また非緑化プレハブの屋上面温度が最大となったとき、緑化プレハブの屋上面は 34℃であった。天井面での温度が最大になる時刻は、非緑化プレハブの場合 12:20 頃であるのに対して緑化プレハブでは 15:20 であった。最大温度とそれまでに要する時刻が遅いことから、屋上面から流入する熱量は、緑化により大幅に軽減されることがわかる。さらに気温は 7:00 頃から 16:00 頃まで徐々に上昇し、その後低下しているのに対して、非緑化プレハブの屋上面温度は 7:00 頃から上昇し、12:00 を最大値にとり低下し始め、16:00 頃から大きく低下し、12:00 を中心とした左右対称となっている。この日の日照時間を見ると、9:00 頃から 14:00 まで大きな値を示し

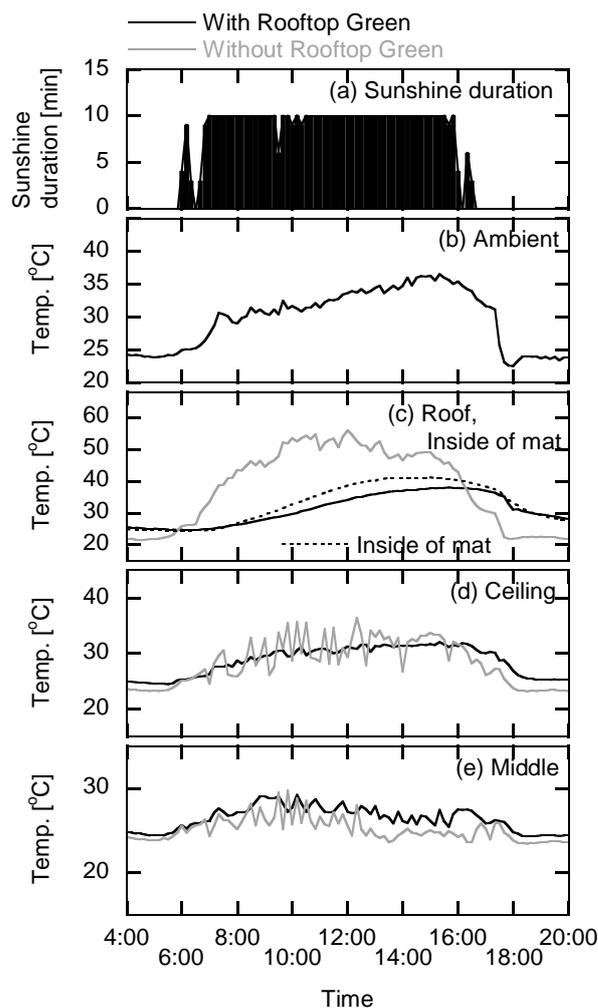


図 9 エアコン稼働時における温度履歴, 2009/07/26

ている。つまり非緑化プレハブの屋上面の温度は外気温よりも日照時間に関連する放射の影響を強く受けることがわかる。

室内天井面の温度履歴(d)を見ると、エアコンを稼働させているため温度変動による違いはあるものの、2 棟の天井面は殆ど温度差が見られなかった。また最大温度は非緑化プレハブでは 36℃ (12:20) であるのに対し、緑化プレハブでは 32℃ (15:20) となり、両者の違いは 4℃であった。緑化プレハブの天井面(d)、室内の気温(e)では温度変動は小さく、緩やかに値が推移するのに対して、非緑化プレハブの室内天井面の温度(d)と室内の気温(e)は緑化プレハブに比べて変動が大きく、天井面で最大 9℃の温度変動が生じていた。これは非緑化プレハブではエアコンの作動回数が多くなっているためだと考えられる。

図 10 の上図(a), (b)には図 9 に示した照射時間と外気温を、図 10(c)に図 9 と同日のエアコン消費電力を示す。図中の消費電力は 30 分間の積算値である。

図より日照時間が大きくなると外気温が上昇するため、エアコンが稼働し、徐々にエアコン消費電力も増加する。8:30 頃には 2 棟のエアコン消費電力の差は明確に区別でき

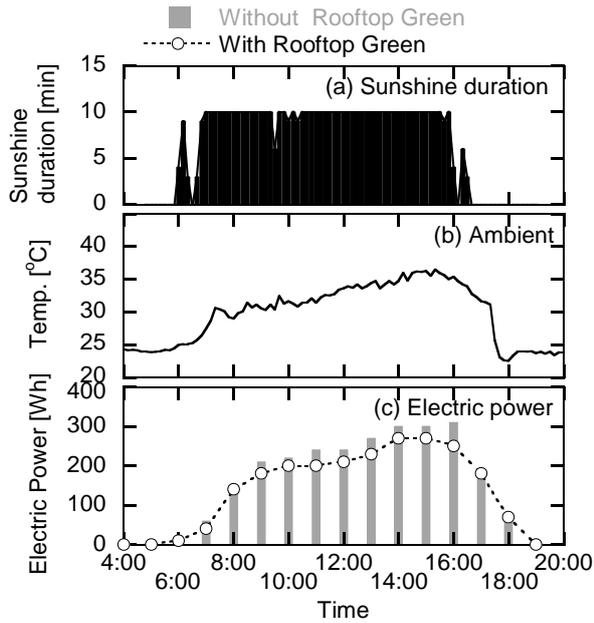


図 10 2009 年 7 月 26 日におけるエアコン消費電力

るまで大きくなる。また 16:00 では照射時間が短くなるが、それにあわせてエアコン消費電力も低下する。さらに 16:00 付近で 2 棟のプレハブのエアコン消費電力の差は最大となっているが、図 9(e)に示したように室内の気温は非緑化プレハブの方が大きく、エアコンが作動していたと考えられる。16:00 以降では夕立により外気温が低下したために 2 棟のプレハブのエアコン消費電力は小さくなった。

図 10 より 2009 年 7 月 26 日 (4:00~20:00) におけるエアコン消費電力の総和について比較すると、非緑化プレハブ、緑化プレハブの積算電力量は、それぞれ 2560Wh, 2270Wh となり、290Wh の差が生じ、11%のエアコンの消費エネルギー削減効果が得られた。

3.4 夏期におけるエアコン消費電力の比較

図 11(a)~(c)に 8 月の群馬県桐生地区における(a)日照時間, (b)最高気温, 最低気温, 平均気温と 2 棟のプレハブの (c)エアコン消費電力を示す。エアコンは 26°Cの冷房に設定し 24 時間運転している。また風量は「自動」としている。

2009 年 6 月~8 月の気象庁発表による気象統計情報⁽¹⁵⁾によれば、気温、雨量は例年なみだったが全国的に日射時間が例年より少ない年であった。図 11(a)を見ると、8 月 1 日から 10 日までの日照時間は 1 日 4 時間以下であり、10 日前後には雨天が続いた。10 日以降には日照時間が増えたものの、その後、若干の低下や変動は見られたが、平均 6 時間程度であった。一方、8 月の平均気温は 25°Cであり概ね一定であった。最高気温、最低気温はそれぞれ 30°C, 21.5°C であった。

図よりエアコン消費電力を見ると、エアコン消費電力は日照時間の結果と良く似ており外気温よりも日照時間と強く影響を受けていることがわかる。次にエアコン消費電

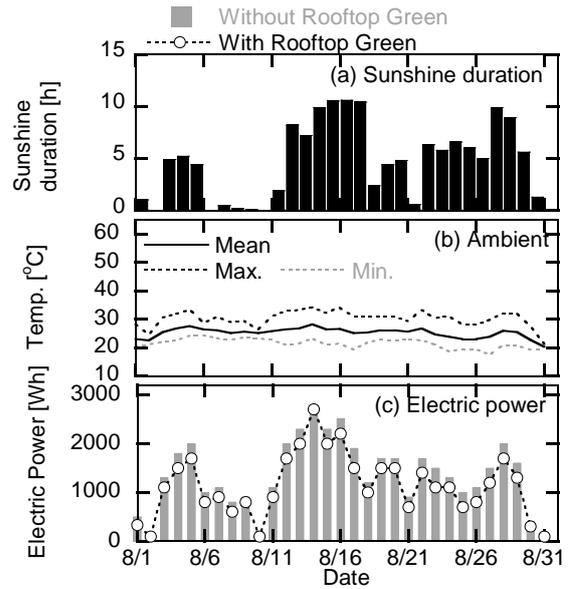


図 11 2009 年 8 月のエアコン消費電力の比較

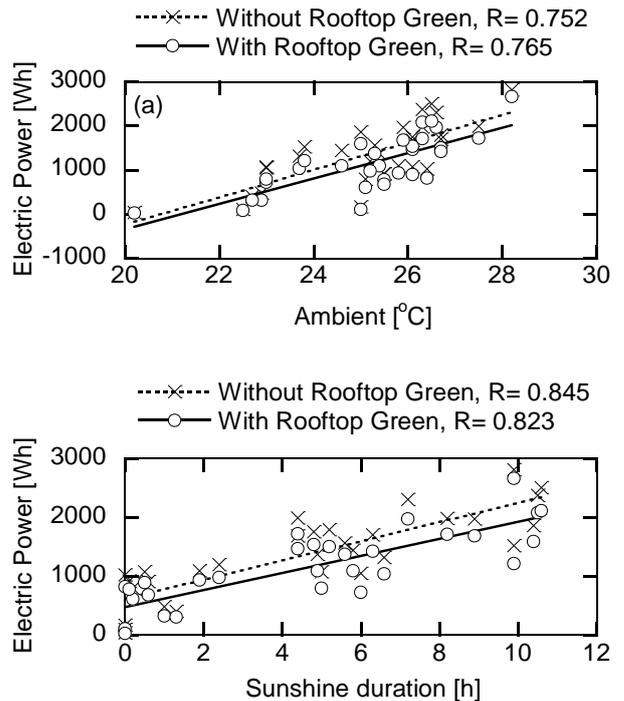


図 12 2009 年 8 月のエアコン消費電力に対する気温(a)と日照時間(b)の相関

力に対する気温と日照時間の影響を調べるため、図 11 のデータを用いてエアコン消費電力に対する相関を調べた。図 12(a), (b)にそれぞれの場合に対する補間直線と相関係数を示したものを示す。図より、エアコン消費電力と外気温との相関は緑化の有無によらず 0.75 程度の同程度の値であった。一方、日照時間に対しては、非緑化プレハブでは 0.84 であり、緑化プレハブでは 0.82 であった。これらの結果からエアコンの消費電力は、気温よりも日照時間に強く影響

される事がわかる。また緑化の有無による消費電力の違いは、8月3日から5日までの間や、8月中旬などに見られるように、日照時間が多く、エアコンが稼働しやすいときに顕著になる傾向が見て取れる。8月のエアコンによる総消費電力は、屋上緑化を施さないプレハブでは42.2kWhであり、屋上緑化を施した場合では35.3kWhであった。本実験で行った実証実験では、2棟のプレハブに対するエアコンの消費電力は、屋上緑化を行うことにより16%の消費エネルギー削減効果を得た。

4. まとめ

植生マットを用いることによる屋上緑化を施したプレハブのエアコン消費電力に関する実証実験を実施した。実験は3階建鉄筋コンクリート屋上に2棟のプレハブを設置し、一方のプレハブの屋上に植生マットを用いて屋上緑化を施した。室内には同機種のアコン機を設置し、稼働、非稼働時におけるプレハブ室内の温度、室外温度、エアコン消費電力を計測した。本報では2009年春から秋に掛けて継続して計測を行うことにより、夏期における2棟のプレハブに対してエアコン消費電力を比較することで以下の知見を得た。

1. 屋上緑化を施すことにより、緑化プレハブの屋上面での温度は非緑化プレハブの屋上面温度よりも小さくなる。このことから、緑化材は断熱効果の働きを持つことがわかる。
2. 屋上緑化有無による1日間のエアコン消費電力を比較した結果、非緑化プレハブに比べて緑化プレハブの方が11%のエアコン消費電力を削減することが確認できた。
3. 夏期における屋上緑化の有無によるエアコン消費電力を比較した結果、8月では16%の消費エネルギー削減効果が得られた。

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。また本論文について査読者より貴重なご意見を多数頂くことができた。ここに謝意を記します。

参考文献

- (1) 最先端の気候モデルで予測する「地球温暖化」、環境儀 (独)国立環境研究所, No.19 (2005).
- (2) 解説映像「地球温暖化シミュレーション」,
<http://www.team-6.jp/cc-sim/>
- (3) 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>
- (4) 環境と空気・水・熱, 空気調和・衛生工学会誌, (2007),
<http://www.shasej.org/>
- (5) 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>
- (6) 例えば国土交通省屋上庭園,

http://www.mlit.go.jp/crd/park/shisaku/gi_kaihatsu/okujoyo/index.html

- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 山崎真理子, 水谷章夫, 大澤徹夫, 熱的薄い壁体建物の屋上・壁面緑化による冷房負荷低減効果, 日本建築学会技術報告集, 15-29 (2009), pp.155-158.
- (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 June 16, 2010, Accepted February 10, 2011)