マット植物を用いた屋根緑化による夏季の暑熱軽減効果

柴田忠裕*

千葉県農林総合研究センター Chiba Prefectural Agriculture and Forestry Research Center.

摘要：厚さ数 cm の薄層基盤で育成されたマット植物による傾斜屋根緑化は、高い暑熱軽減効果をもち、室温の上昇が抑制されたが、基盤がより厚いマット植物を用いた場合と比較し、緑化効果はほぼ同程度であること、さらに、エアコン稼働時の省エネに有効であること、マット植物はそれを構成する植物の種類によって緑化効果に大差が無いことが明らかになった。これにより、積載荷重制限の大きい一般住宅や金属折板屋根等の傾斜屋根緑化用素材として、マット植物は有用であり、暑熱対策に有効であることが判明した。
キーワード：マット植物、薄層基盤、暑熱軽減、屋根緑化

SHIBATA, Tadahiro : **The Effect of slope-rooftop greening using mat plants to mitigate summer heat.**
Abstract : Slope-rooftop greening using plants grown on light, thin mats with a thickness of a few centimeters is highly effective in reducing the air temperature within buildings. We found that slope-rooftop greening using thin mats had similar greening effects with the one using thicker mats and reduced energy consumption by air conditioners. Furthermore, the effectiveness of mat plants was not so much different among the species of plants used for the mat plants. As a result, mat plants were found to be effective greening material for general houses with slope-rooftop having a light load limit or tilted metal slope-rooftop to mitigate summer heat.
Key words : mat plants, thin layer growing medium, summer heat mitigation, slope-rooftop greening

1. はじめに

「マット植物」とは、厚さ数 cm の薄層培地で栽培された植物で、近年屋上緑化に使われ始め、生産も増加している^{9, 10)}。しかし、マット植物の更なる生産振興を図るため、新規の需要を開拓する必要がある。そこで、陸屋根より面積が広く¹²⁾、積載荷重制限が厳しい一般住宅等の傾斜屋根緑化に的を絞り、マット植物の施工による緑化効果について検討するため、4 試験を実施した。即ち、①マット植物を構成する基盤厚が緑化効果に及ぼす影響を検討し、②マット植物の種類間差が緑化効果に及ぼす影響を検討した。③さらに、より軽量化を図るため、半分の厚さの 2 cm で育成した超薄層マット植物の緑化効果を冷房稼働時の消費電力で求め、④最終的にこれら薄層基盤で栽培されたマット植物へ安定して給水を図るための保水基盤材の効果を検討し、若干の知見を得たので報告する。
なお、各試験では供試植物、試験対象物（建物）、測定機器等が異なるため、表-1 に仕様を取りまとめた。

表-1 試験区の設定
Table.1 Setting of Experimental plot.

	試験 1	試験 2	試験 3	試験 4
試験場所	千葉農林総研圃場	千葉農林総研圃場	千葉農林総研圃場	千葉農林総研圃場
実施年月	2004年5～7月	2004年8月	2005年7～8月	2008年4～9月
対象物	発泡スチレンボード製の箱(容積0.15m ³) + 傾斜屋根	ログハウス (容積11.97m ³)	ログハウス (容積11.97m ³)	ログハウス (容積11.97m ³)
マット植物の基盤厚	0, 4, 8, 16cm	4 cm	0, 2, 4 cm	4 cm
供試植物	ペニーロイヤルミント	コウライシバ、メキシコマンネングサ、アオスゲ、タマリユウタマズダレ混植、ハynesブルーパンフィク	タイム・ロンギカウリス	タイム・ロンギカウリス
保水基盤	無	1.5 cm厚の発泡フェノール樹脂板保水量(10 L/m ²) (松村工業製)	1.5 cm厚の発泡フェノール樹脂板保水量(10 L/m ²) (松村工業製)	1.1cm厚の木質系保水基盤材(保水量10 L/m ²) (大建工業製)
灌水方法	毎日0時20 L/m ²	毎日0時20 L/m ²	毎日0時20 L/m ²	毎日0時20 L/m ²
冷房	無	無	エアコンAN2EDS (ダイキン工業製)	エアコンAN2EDS (ダイキン工業製)
測定項目	箱内中央部の温度、気温	室内中央部の温度、気温、南面する屋根表面温度	室内中央部の黒球温度、気温、消費電力量	室内中央部の黒球温度、気温、消費電力量、日射量、流入熱流量
測定間隔	60分	60分	60分	10分(気温は60分)
測定機器	温度ロガー-3650 (HIOKI製)	温度ロガー-3650 (HIOKI製)、放射温度計IR-TA (CHINO製)	黒球MT-01GT + 温度測定素子MT-010 + データロガー-2300A、温度ロガー-3650 (HIOKI製)	黒球MT-01GT + 温度測定素子MT-010 + データロガー-2300A、日射計MS-202・熱流計MF-180 + 電圧ロガー-3671・コミュニケーションベース3913 (以上英弘精機製)、温度ロガー-3650 (HIOKI製)

* 連絡先著者 (Corresponding author) : E-mail : t.shbt2@mb.pref.chiba.lg.jp
〒266-0006 千葉県千葉市緑区大膳野町 808 番地 808 Daizenno-cho, Midori-ku, Chiba-city, 266-0006, Japan

2. マット植物の基盤厚が閉鎖空間内の温度に及ぼす影響(試験1)

2.1 材料および方法

試験は千葉市緑区千葉県農林総合研究センター圃場で実施した。厚さ8 cmの発泡スチレンボードを用い、内径で縦横50 cm、手前側の高さ50 cm、奥側60 cmとした台形状の箱を作り、その上を1辺が75 cm、厚さ12 mmの合板で覆い屋根とした。合板表面は、合成高分子系ルーフィングシートで被覆し、その上に黒色のスレート瓦を張り付け試験に供した。基盤厚の影響を調査するため、さらにその上に木枠を設け、土砂流失防止用としてポリエステル製防根シートを内側に展開し、マット植物育成用標準培地(赤土:ピートモス:真珠岩系粉状パーライト=2:1:1)を0, 4, 12 cmの厚さに充填した。そして、予め厚さ4 cmの同培地で育成したペニーロイヤルミント(*Mentha pulegium*)のマット植物を2004年5月10日に張り付け、基盤厚4, 8, 16 cmの試験区とした。なお、対照として、スレート瓦のみの無緑化区も設けた。試験用箱は、傾斜面を南に向けて設置し、タイマーと電磁弁を組み合わせ、傾斜の最高位に10 cmピッチで径3 mmの穴が開いた塩ビ管を配管し、地下水を毎日午前0時に20L/m²灌水した。試験期間中、ボタン式の温度ロガー(HIOKI 製温度ロガー3650)を容器のほぼ中心部(温度ロガーを天版中心部から25 cm下垂するよう設置)に設置し、中の温度を60分毎に測定した。

2.2 結果および考察

試験期間中、晴天が連続した7月7日~11日の5日間の平均温度を図・1に示した。気温は日の出と共に上昇し、13時に最高気温に達した後、序々に低下した。一方、スレート瓦のみの無緑化区の内部温度は9時以降急激に上昇し、12時に50℃に達した後4時30分まで50℃以上が継続した。これに対し、緑化区の内部温度はほぼ25℃前後で安定していた。なお、最厚の16 cm区は、最薄の4 cm区と比較して最大1.2℃低温で推移し、8 cm区はその中間にあった。

図・1 2004年7月7日~11日の試験区内の平均温度

Fig.1 Average temperature in each treatment during 7 to 11 July 2004.

無緑化区は、太陽の放射熱が次第に合板に伝導し、容器内に再放射された結果、内部の温度が上昇したのと考えられたが、緑化区は植物体と基盤により遮熱され、容器内への熱の伝導が少なかったと判断された。また、緑化するための培地厚は緑化効果に大きな影響を及ぼさず、4 cmの培地厚で育成された標準的なマット植物でも、高い緑化効果が得られ、今後の屋上或いは屋根緑化に応用できると判断された。このことは、薄層でも高い緑化効果が得られるとのいくつかの報告^{11, 14, 16)}とも合致する。

3. マット植物の種類が室温に及ぼす影響(試験2)

3.1 材料および方法

千葉市緑区千葉県農林総合研究センター圃場で棟を東西方向に建てたログハウス(床面積4.95 m², 屋根面積13.2 m²)を6棟使い試験を実施した(写真・1)。外壁は45 mm厚の木材、屋根部分は19 mm厚の木材からなり、上に黒色のスレート瓦を張り付け、西面に40×60 cmの窓付きドアと40×60 cmの片開きの窓を持ち、他の面には窓もドアもない構造のものである。

2004年8月1日に各棟の屋根に、予め慣行に準じて厚さ4 cmの培地で栽培したコウライシバ(*Zoysia tenuifolia*), メキシコマンネングサ(*Sedum mexicanum*), アオスゲ(*Carex breviculmis*), タマリユ+タマスダレ混植(*Ophiopogon japonicus* 'Tamaryu' & *Zephyranthus candida*), ハイネズ'ブルーパシフィック'(*Juniperus conferta* 'Blue Pacific')の5種類のマット植物をログハウス屋根全面に張り付けた。これらマット植物は、地上部の全面が植物で覆われたものを供試した。なお、屋根緑化の施工手順は、スレート瓦葺きの屋根全面を合成高分子系ルーフィングシートで覆い、保水基盤として1.5 cm厚の発泡フェノール樹脂板(保水量約10 L/m², 松村工芸製)を接着剤で張り付け、その上にマット植物を置き、マット区とした。対照として、スレート瓦葺きのみのログハウスを無緑化区とした。

灌水は、20 cm間隔で径3 mmの穴が両側に開いた塩ビ管を嶺の部分に設置し、電磁弁とタイマーの組み合わせにより井戸水を毎日午前0時に約20 L/m²灌水した。窓から入る西日の影響を排除するため、ガラス面には赤外線遮断フィルムを貼りつけ、さらにヨシズを垂らし遮光した。

試験期間中、窓を閉め切った状態でログハウス中央の床から1 mの部分に設置した温度ロガー(HIOKI 製温度ロガー3650)で室温を、放射温度計(CHINO 製IR-TA)で南面する屋根面の表面温度を60分毎に測定した。試験期間中の気温は、試験場所から5 m離れた場所で地表から1 mの部分の温度を、温度ロガー(HIOKI 製3650)で60分毎に測定した。

3.2 結果および考察

図・2 にほぼ快晴が連続した8月5~7日の屋根表面温度の推移を示した。無緑化区のスレート瓦表面は日の出と共に急

写真1 試験用ログハウス

Photo. 1 The cabin for study

激に温度が上昇し、12時には50℃を超え、日没後は急激に低下した。一方、緑化区は植物の種類に関係なく25～30℃で推移した。同日の室温は図-3に示したとおりで、室温のピークは気温より2～3時間遅れて現れる傾向がみられた。無緑化区の室温は、日の出とともに急激に上昇し40℃を超えたが、各緑化区は植物の種類に関係なくほぼ同様の室温を示し、無緑化と比較して最大6℃低く推移した。

一般に、太陽光で屋根面が熱せられ、その熱が室内に伝導するため、室温が上昇したと考えられるが、緑化植物及び緑化のための基盤が持つ遮熱効果により室温上昇が抑えられたものと判断された。緑化による室温の低下については、いくつかの報告^{4, 6)}があるが、マツト植物の様な薄層基盤でも、夏季の室温上昇抑制効果が期待でき、植物の種類による差は小さいことが判明した。屋根緑化に用いる植物は、蒸発散量からみて種類間差は小さいという報告⁷⁾があるが、本研究でも種類間差は小さかった。メキシコマンネングサは乾燥条件下でCAM型光合成特性を示し、湿潤条件下ではC3型の光合成特性を示すことが知られている¹⁾。さらにメキシコマンネングサは、基盤土壤に水が十分ある状態では、対照の芝生より蒸発散量が多いという報告⁷⁾もある。本研究では灌水し植栽基盤が湿った条件で調査を行ったため、メキシコマンネングサも他の植物と同様に蒸発散したと思われる。従って、室温の温度上昇抑制効果は、植物が持つ蒸発散作用と太陽光の遮蔽による効果が大きいと考えられた。

4. マツト植物の基盤厚が室温、冷房稼働時の消費電力に及ぼす影響(試験3)

4.1 材料および方法

試験2と同じ構造のログハウスを3棟供試し、予め慣行に準じて栽培したタイム・ロンギカウリス (*Thymus longicaulis*) の培地厚4cm(慣行)と2cm(超薄層)の

図-2 異なるマツト植物で屋根緑化したログハウスの2004年8月5～7日の南面する屋根の平均表面温度

Fig. 2 Average roof surface temperature at each log-house with slop-rooftop greened with mat plants of different species during 5 to 7 August 2004.

図-3 異なるマツト植物で屋根緑化したログハウスの2004年8月5～7日の平均室温

Fig. 3 Temperature in the room of cabin greened with several Mat Plants during 5 to 7 August 2005.

マツト植物を、2005年7月10日にログハウス屋根全面に張り付けて緑化し、それぞれ4cm区、2cm区とした。なお、屋根緑化の施工手順は、スレート瓦葺きの屋根全面を合成高分子系ルーフィングシートで覆い、保水基盤として1.5cm厚の発泡フェノール樹脂板(保水量約10L/m²、松村工芸製)を接着剤で張り付け、その上にマツト植物を置床した。対照として、スレート瓦葺きを無緑化区とした。

灌水は、20cm間隔で径3mmの穴が両側に開いた塩ビ管を嶺の部分に設置し、電磁弁とタイマーの組み合わせにより井戸水を毎日午前0時から1回当たり約20L/m²灌水した。窓から入る西日の影響を排除するため、ガラス面には赤外線遮断フィルムを貼りつけ、さらにヨシズを垂らし遮光し

た。試験期間中、窓を閉め切った状態で、中央部分の床から 1 m の位置に黒球（英弘精機製 MT-01GT）と温度測定素子（英弘精機製 MT-010）を設置し、60 分毎にデータロガー（英弘精機製 2300A）で黒球温度を測定した。試験期間中の気温は、試験場所から 5 m 離れた場所で地表から 1 m の部分の温度を、温度ロガー（HIOKI 製 3650）で 60 分毎に測定した。各ログハウスには、エアコン（ダイキン工業製 AN22EDS-W (2.2 Kwh)）を設置し、黒球温度の測定日以外に室温を 25℃に設定して稼働し、1 日あたりの消費電力量を求めた。

4.2 結果および考察

晴天が連続した 8 月 19～21 日の平均気温、室温を図-4 に示した。日の出とともに無緑化区の室温は急激に上昇し、9 時から 17 時まで 35℃以上が連続し、13 時には約 40.5℃に達したが、マット植物を張り付けた緑化区は、基盤の厚さに関係なく室温はそれほど上昇せず、無緑化区と比較して 2 cm 区で最大 6℃、4 cm 区で 7℃程度低かった。

図-5 は 25℃に設定したエアコン稼働時（2005 年 9 月 1～3 日）の 1 日当たりの平均消費電力量を示したもので、無緑化区の 2.26 kwh に比べ 2 cm 区は 0.37 kwh（削減率：16.4%）、4 cm 区は 0.49 kwh（21.7%）減少し、エアコン使用時の省エネにつながる事が判明した。

これまで、薄層土壌による緑化でも遮熱効果が大きいことが報告^{11, 14, 16)}されているが、2 cm 区の超薄層マット植物でも 4 cm 区と比較してほぼ同等の緑化効果を有することが判明し、軽量化を求められる屋根緑化用素材として超薄層マット植物が有用であると考えられた。

図-4 異なる培地厚のマット植物で屋根緑化したログハウス内の 2005 年 8 月 19～21 日の平均黒球温度

Fig.4 Average temperature of each log-house with slope-rooftop greened by mat plants of different thickness during 19 to 21 August 2005.

図-5 異なる培地厚のマット植物で屋根緑化したログハウスの 2005 年 9 月 1～3 日の一日当たりの平均エアコン消費電力量

Fig.5 Average electric consumption by air conditioning at each log-house with slope-rooftop greened with mat plants of different thickness during 1 to 3 September 2005.

5. マット植物下の保水基盤の有無が、室温、熱流量、冷房稼働時の消費電力量に及ぼす影響（試験 4）

5.1 材料および方法

タイム・ロンギカウリスの 4 cm 厚のマット植物を供試し、2008 年 4 月 12 日に試験 2 と同様にログハウス屋根に張り付け緑化した。ただし、保水基盤として、最大 10L/m² 保水可能な厚さ 11 mm の木質系保水基盤（大建工業社製保水ボード（仮称））を用い、合成高分子系ルーフィングシートに接着し、その上にマット植物を置床した。対照として、スレート瓦葺きの無緑化区と木質系保水基盤のみを張り付けた木質系保水基盤区を設けた。その他の管理は試験 2 に準じた。また、各ログハウスには、エアコン（ダイキン工業製 AN22EDS-W (2.2 Kwh)）を設置し、黒球温度の測定日以外に室温を 25℃に設定して稼働し、1 日あたりの消費電力量を求めた。

マット植物の張り付けと同時に、日射量、熱流の流れを測定するため、南面するログハウス屋根面に全天日射計（英弘精機製 MS-202）、室内天井の南面部分の中央に熱流計（英弘精機製 MF-180）をシリコンで接着固定し、10 分毎に電圧ロガー（英弘精機製 3671）でデータを集積した。さらに、窓を閉め切った状態で、中央部分の床から 1 m の位置に黒球（英弘精機製 MT-01GT）と温度測定素子（英弘精機製 MT-010）を設置し、10 分毎にデータロガー（英弘精機製 2300A）で黒球温度を測定した。試験期間中の気温は、試験場所から 5 m 離れた場所で地表から 1 m の部分の温度を、温度ロガー（HIOKI 製 3650）で 60 分毎に測定した。

5.2 結果および考察

図-6 に、晴天が連続した 2008 年 7 月 22～25 日のログハウス内の平均黒球温度を示した。無緑化区の室温は 7 時以降

急激に高まり、14時頃に 45℃を越し、17時まで継続した。

一方、緑化区及び木質系保水基盤区は、12時過ぎまではほぼ気温と同一に推移したが、その後は若干高温で推移し、13時頃に 35℃を超え 18時まで継続した。同日の 10 分毎に計測した熱流量、日射量の推移は図-7 に示したとおりであるが、日射量は日の出とともに増加し、11 時前後に 1000 w/m² を超えその後減少した。無緑化区への熱の流入は、日射量の増加に伴って多くなり、16 時以降は逆に流出に転じた。一方、緑化区及び木質系保水基盤区は、6 時以降に流入し始め、16 時以降は逆に流出に転じた。1 日当たりの平均熱流量は、表 2 に示したとおりで、3 区とも室内へ入る熱量の方が多い結果となったが、その量は無処理区に比べ緑化区及び木質系保水基盤区で著しく少なかった。この要因として、屋根緑化により太陽光の熱エネルギーが遮断され、さらに緑化部分が冷却の場所として作用していると考えられ、これまでのいくつかの報告^{6, 15)}とも合致する。図-8 は 25℃に設定したエアコン稼働時(2008 年 8 月 19～21 日)の 1 日当たりの平均消費電力量を示したもので、試験 3 と同様に、無緑化区の 2.37 kwh に比べ緑化区は 0.38 kwh (16.0%)、木質系保水基盤材区は 0.32 kwh (13.5%) 減少し、エアコン使用時の省エネにつながる事が判明した。

マット植物は高密度不織布と組み合わせると、夏季でも順調に生育し、高い緑化効果が得られたとの報告⁸⁾があり、本試験からも保水基盤の必要性と緑化効果が明らかとなった。

図-6 マット植物と保水基盤の組み合わせで屋根を被覆したログハウスの 2008 年 7 月 22～25 日の平均黒球温度

Fig. 6 Average temperature in each log-house with slop-rooftop covered with various combination of mat plants and water-holding base during 22 to 25 July 2008.

図-7 マット植物と保水基盤の組み合わせにより屋根緑化したログハウスに入出した 2008 年 7 月 22～25 日の平均熱流量、日射量

Fig. 7 The amount of Heat flow and Insolation entering and going out of the room greened with combination of water-holding base and Mat plants during 22 to 25 July 2008.

表-2 2008 年 7 月 22 日～25 日のログハウスに流入する 1 日当たりの平均熱流入量

Table.2 The amount of heat flux per day into each log-house during 22～25 July 2008

調査項目	無緑化区	緑化区	木質系保水基盤材区
熱流量(w/m ²)/day	-2730.9	-162.2	-240.4
無緑化との対比(%)	—	-94.1	-91.2

図-8 マット植物と保水基盤の組み合わせで屋根を被覆したログハウスの 2008 年 8 月 19～20 日の 1 日当たりの平均エアコン消費電力量

Fig. 8 Average electric consumption by air conditioning per day at each log-house with slope-rooftop covered with various combination of mat plants and water-holding base during 19 to 21 August 2008.

6. まとめ

屋上緑化による省エネ効果に関しては、建物の構造、立地条件、地域等によって異なるため評価が難しいが、無緑化に比べて屋上を緑化すると冷暖房で消費されるエネルギーの節約につながるという報告^(2,3,4,5,13,15)が多数あるが、それら多くは培地が厚い場合であり、4 cm 程度の薄層培地で育成されたマット植物でも、ほぼ同等の緑化効果が得られたことから、屋上緑化の軽量化につながり、荷重を気にすることなしに、しかも安価で容易に施工可能になり、屋上緑化の更なる振興に寄与するものと考えられた。なお、培地量が少ないマット植物に水を安定して供給するために、保水基盤材との組み合わせが効果的であり、これまで困難であった一般木造建築や金属折板屋根の緑化に有効であると考えられた。

引用文献

- 1) 飯島健太郎・近藤三雄(1996)：メキシコマンネングサの光合成型ならびに生育に及ぼす土壌水分と気温の影響：東京農業大学農学集報 41(3)：156-163
- 2) 洞田浩文，西村正和，中村正則（1995）：建築物の熱環境に及ぼす屋上緑化の効果：大成建設技術研究所報第 25 号，313-316
- 3) 石黒巖，小中俊雄，小池正之，余田章，本間毅（1994）：都市空間の人工地盤における無土壌緑化の基礎的研究（Ⅲ）－屋上緑化が最上階室温に及ぼす影響－：第 25 回日本緑化工学会研究発表要旨，110-113
- 4) 唐沢明彦，土田保（2001）：建築物の熱環境に及ぼすポーラスコンクリート屋上緑化システムの効果：日緑工誌 27（1）205-208
- 5) 並木裕（1991）：都市の緑化と省エネルギー－グリーンアメニティによる都市づくり－：REFORM 3，25-31
- 6) 野島義照，沖中建，瀬戸裕直，倉山千春，二階堂稔，高砂裕之（1995）：屋上緑化による夏期の建築物および都市の熱負荷の軽減効果の実証的研究：日緑工誌 20（3），168-176
- 7) 大野朋子，山本聡，前中久行（2006）：メキシコマンネングサおよび芝生薄層緑化からの蒸発散量：ランドスケープ研究 69（5），431-436
- 8) 大西竹志，下村孝，水野志穂，今西純一（2006）：屋上緑化におけるマット植物と高密度不織布を用いた薄層緑化技術の検討：日緑工誌 32（1），68-73
- 9) 柴田忠裕（2005）：薄層基盤植物「マット植物」の品質検定とマット化可能植物の検索及び利用特性：ランドスケープ研究 68（5），513-516
- 10) 柴田忠裕（2007）：新緑化素材「マット植物」：農業および園芸 82（5），585-597
- 11) 田中順一（2001）：都市公園における薄層土壌による屋上緑化技術：造園技術報告集 1,70-73
- 12) 山田宏之（2002）：都市環境とみどり：環境緑化新聞社,20
- 13) 山田宏之，前田由利（2003）：木造住宅における草屋根造成技術とその評価：造園技術報告集 2,94-97
- 14) 山田宏之，養父志乃夫，中島敦司，中尾史郎（2004）：屋上緑化による熱遮蔽効果の解析：ランドスケープ研究 67（5），453-456
- 15) 山田宏之，露木博視，石川嘉崇，中島敦司，中尾史郎，養父志乃夫（2005）：木造住宅の緑化された屋根による屋内温熱環境への影響解析：ランドスケープ研究 68(5)：893-896
- 16) 山口隆子，横山仁，石井康一郎（2005）：軽量薄層型屋上緑化システムにおけるヒートアイランド緩和効果：ランドスケープ研究 68（5），509-512

(2009.7.6 受理)