

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

要 旨

既存建物の屋上に普及可能な軽量薄層な緑化施設のヒートアイランド緩和効果を定量的に明らかにするために、建物屋上に複数の緑化試験体を設置し、その熱収支特性を調べた。その結果、既存建物に適用できる薄層型屋上緑化システムにおいても、蒸発散による潜熱消費によって顕熱を低減させ、ヒートアイランドを緩和する効果を有することが確認できた。ただし、その効果は、植物の種類や灌水等により異なることが明らかとなった。

キーワード：軽量薄層型屋上緑化、ヒートアイランド緩和効果、熱収支、蒸発散

Study of Mitigating Urban Heat Islands by Light and Thin Rooftop Greening

YOKOYAMA Hitoshi, YAMAGUCHI Takako,
ISHII Koichiro

Summary

A main enumeration was carried out for mitigating the urban heat island effect by light and thin rooftop greening at the existent building. Seven kinds of light and thin rooftop greening systems were installed on the existent building roof, and those heat characteristic and heat balance were analyzed.

It reduced sensible heat, and the effect which mitigated the urban heat islands could be confirmed as for the light weight rooftop greening as well which could be applied in the existent building. It confirmed that mitigating the urban heat islands by rooftop greening varied in the kind of plant, water condition and so on.

Key Words : Light and thin rooftop greening, Mitigating the urban heat islands, Heat balance, Evapotranspiration

1 はじめに

過去100年間において、地球の平均気温は約0.6℃上昇しているのに対し、日本の平均気温は約1℃、大都市では約2.5℃上昇しているといわれている。しかし、東京の場合、これらをさらに上回り約3℃上昇しており、東京におけるヒートアイランドの深刻さを物語っている。ヒートアイランドの原因として、地表面被覆の人工化、人工排熱の増加、都市形態の変化等が示されているが、ヒートアイランドは、熱帯夜の増加や日中の高温化等都市の温暖化をもたらし、熱中症の増加や光化学オキシダントの生成、さらには、都市型集中豪雨との関連も指摘されるなど、早急な対策が求められている¹⁾。

東京都では、ヒートアイランド対策推進会議を設置し、各局が一丸となって効果的な対策を推進しており²⁾、その主要な対策の一つとして建物屋上等の緑化をあげ、「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」)において、一定規模を超える敷地を有する建築物の新增改築時における屋上緑化を義務づけている。しかし、建築物の大半を占める既存建物の屋上は、条例の対象外となっており、建築基準法により厳しい荷重制限が定められていることなどから、屋上緑化の普及が十分に図られていないのが現状である。

こうしたなか、屋上緑化によるヒートアイランド緩和効果に関しては、以前から梅干野ら³⁾⁻⁵⁾により精力的に研究が進められているが、近年特に、屋上緑化に対する関心の高まりとともに、研究が活発化している。ただし、その多くは、表面温度や建物内部への伝導熱量の低減等で評価しているものであり⁶⁾⁻¹⁰⁾、熱収支等の解析に基づいた定量的な評価事例^{11), 12)}は少ない。さらに、既存建物への普及を視野に入れた軽量な基盤材による効果を調べた例はほとんど無く、実際に、軽量薄層な屋上緑化施設が、どの程度の緩和効果を持つのかは定かでない。

そこで本研究では、既存建物にも適用できる軽量薄層な屋上緑化システムを持つヒートアイランド緩和効果を定量的に明らかにするために、所内の建物屋上に軽量薄層な緑化試験体を設置し、その温熱環境ならびに熱収支特性を調べた。

2 材料及び方法

実験は、東京都環境科学研究所(東京都江東区)自動車排出ガス実験棟屋上において行った。試験区は、植生の違いに着目し、無処理を含めた7区(芝区・イワダレソウ区・セダム区・土壌区・芝乾燥区・スラジライト区・無処理区)を設定した。

(1) 緑化試験体の仕様

各試験区のリストを表1に、試験体の仕様を図1に示す。緑化試験体として、専用の塩化ビニル製のパレット式植栽基盤(500mm×500mm×80mmH)を製作した。

基盤設置後、中に人工軽量土壌(「ピバソイル」東邦レオ社製、湿潤比重0.8)を80mm充填し、各試験区に植物苗を、群落密度がほぼ同一となるよう定植した。セダムは、一般に薄層土壌で生育するとされる¹³⁾ことから、セダム区のみ土壌厚を50mmとした。パレットの底面には排水用の穴を設け、その下に排水用のプラスチック製の層を設けた。なお、芝乾燥区のパレットは、保水型を指向したため底面に穴を設けない仕様とした。各試験区の大きさは、4m×3m(上記パレット48個を敷設)で、その近傍に、蒸発散量測定用として周囲を断熱材にて覆ったパレット1個(500mm×500mm)を設置した。

表1 試験区リスト

試験区名	植物名	土壌	土壌厚
芝区	コウライシバ	有機質人工軽量土壌	80mm
芝乾燥区	コウライシバ	有機質人工軽量土壌	80mm
イワダレソウ区	ヒメイワダレソウ	有機質人工軽量土壌	80mm
セダム区	メキシコマンネングサ	有機質人工軽量土壌	50mm
土壌区	—	有機質人工軽量土壌	80mm
スラジライト区	コウライシバ	スラジライト	75mm
無処理区	—	—	—

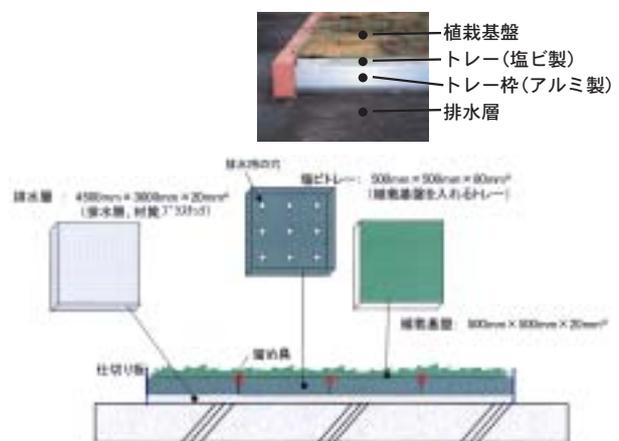


図1 試験体の仕様

(2) 測定項目および測定機器

本実験における測定項目及び測定機器を表2に、測定の概要を図2に、測定機器の設置状況を写真1に示す。各測定項目の測定方法は、以下の通りである。

表2 測定項目および測定機器

測定内容	測定項目	測定機器	機器名
外界条件	気温・湿度	温湿度計	CSV-HMP-45D
	風向・風速	風車型風速計	CVG-5103
	全天日射量	全天日射計	MS-402
	大気放射	赤外放射計	MS-202
	雨量	転倒ます雨量計	COI-34T
蒸発散量	試験体重量	電子天秤	SB32000
放射特性	アルベド	長短波放射計	MR-40
	放射率	放射率放射計	CPR-Q7
	放射収支	放射収支計	iR-t/c,SV-T-80F
温熱環境	表面温度	サーモカメラ	TH7102
	地中温度	T型熱電対	T-Tcc
データ収録	各データ	熱流計	CPR-PHF-01
		データロガー	C-CR10X,サーモダックEF

① 外界（気象）条件

外界条件として、日射量、大気放射量（下向き長波放射量）、風向・風速、温度・湿度、雨量を測定した。実験棟屋上の中央位置に設置した高さ3mの観測用ポ

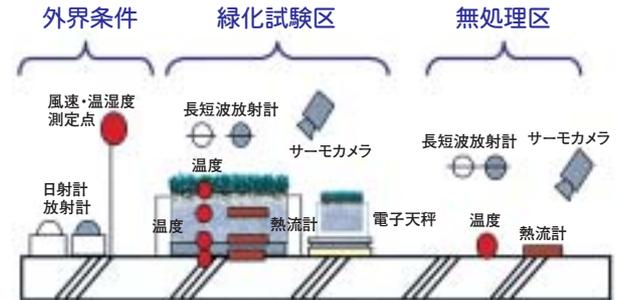


図2 測定の概要



外界条件（気象）観測用機器



測定器（熱流板）の設置状況（芝区）



試験区における測定状況（芝区）
（写真中央の機器は、放射収支計）



試験区（セダム区）
（手前は、蒸発散量測定用試験体）

写真1 機器の設置および測定状況

ールの最上部に風向・風速計を、屋上面から2mの高さに日射計、大気放射計（精密赤外放射計）を、屋上面から1.5mの高さに通風式温湿度計を設置し、外界気象条件を測定した。雨量は、雨量計を屋上面に設置して測定した。

② 蒸発散量

各試験区における蒸発散量は、蒸発散量測定用の試験体の重量を計測することによって求めた。計測は電子天秤による1分ごとの自動計測とともに、集中観測時には、人手による計測を1時間ごとに実施した。

③ 放射特性・温熱環境

各試験体上の高さ0.3mに放射収支計を設置して正味放射量を測定するとともに、放射4成分（上向き・下向きの短波・長波放射量）をそれぞれ独立して計測できる長短波放射計を一定期間各試験区に設置し、アルベド、放射率等の放射特性を算出した。

温熱環境として、各試験体の表面温度、土壌中の温度並びに伝導熱量を測定した。土壌中の測定点は、土壌の上部と下部の2点とし、上部は土壌と植生の境界部分、下部は土壌の最下部とした。また、トレー下部の躯体表面の温度と熱流量も併せて計測した。表面温度の測定は、直接植栽に熱電対を貼り付けるとともに、高さ0.5mに設置した赤外線熱電対により連続的に計測した。また、集中観測時には、サーモカメラ（赤外放射温度計）により、試験区内外の温度分布を計測した。

(3) 放射収支・熱収支の評価

屋上緑化の効果を定量的に評価するために、放射収支・熱収支特性の評価を行った。

熱収支・放射収支式は、以下で表現される。

$$\text{熱収支式} \quad Rn = H + IE + G \quad (1)$$

$$\text{放射収支式} \quad Rn = (1-a) \times S + L\downarrow - \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2)$$

Rn, H, IE, G : 正味放射量、顕熱、潜熱、伝導熱 [W/m²]

S : 日射量（短波放射量） [W/m²]

$L\downarrow$: 大気から入射する長波放射量 [W/m²]

T_s : 表面温度 [K]

σ : ステファン・ボルツマン定数

$$(\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^{-4})$$

a, ε : 各試験体日射反射率（アルベド）、放射率

アルベドは、入射した短波放射量（日射量）に対する反射した短波放射量の割合を示すもので、以下の式で算出した。

$$a = \frac{S\uparrow}{S\downarrow} \quad (3)$$

放射率については、日射の影響を受けない夜間に、植栽表面に貼り付けた熱電対の表面温度から算出される長波放射量 $L\downarrow$ と、赤外線熱電対で測定した表面温度から算出した長波放射量（ $\varepsilon \sigma T_s^4$ ）との比として算出した。

$$\varepsilon = \frac{L\uparrow}{\sigma T_s^4} \quad (4)$$

正味放射量は、放射収支式(2)において、日射量・大気放射量（下向き長波放射量）および表面温度の測定値と、算出したアルベド・放射率から求めた。潜熱は、重量測定値から蒸発散量を算出することによって求め、表面における地中への伝導熱は、熱流計による伝導熱量の測定値に試験体表層部の蓄熱量の補正を行うことで算出した。顕熱については、本研究で用いた試験体が小面積なため、十分な吹走距離（フェッチ）が得られなかったことから、実測ではなく、(1)式の残差として求めた¹¹⁾。

各計測データの1分間値を連続してデータロガーに収集し、解析には10分間平均値を用いた。

緑化試験体は2003年7月下旬に施工し、試験体設置後に測定機器を設置した。測定は施工後約1ヶ月の養生期間を経た後に開始した。

気象庁アメダスデータ（新木場）によると、2003年8月は、平均気温が24.8℃であり、過去10年の平均値26.4℃に比べると1.6℃低かった。また、降水量は341mmで、過去10年の平均値108mmと比べると、233mm多かった。これらのことから、2003年の夏は、低温多雨の冷夏であったといえる。各試験区の植物は、低温・多雨の影響を受け、当初若干の生育遅延がみられたが、観測開始時における生育はほぼ良好であり、試験区ごとの生育に差はなかった。また、病害虫や生育障害等実験に支障を来すような生育不良はみられなかった。

8月上・中旬の養生期間においては、すべての試験区に5mm/日の灌水を行った。ただし、8月中旬には降雨が多かったため、灌水は行わなかった。その後、8月20～23日は、芝乾燥区と無処理区を除く全試験区に対して5mm/日の灌水を行った。8月24日～9月12日は、芝区・イワダレソウ区のみ同様の灌水を継続し、他の試験区には灌水しなかった。これは、それぞれの試験区を構成する植物に一般的とされる管理を指向したことによる。主観測期間となる9月12日以降は、3日に1度、芝乾燥区を除く全区に対して灌水

を行った。解析は比較的天候に恵まれた9月中旬の測定値を対象として行った。なお、スラジライト区は、他と異なる土壌および基盤材を用いており、熱特性も異なることから、検討から除外した。

3 結果および考察

(1) アルベドおよび放射率

各試験区における測定結果を表3に示す。

アルベドの測定結果によると、屋上緑化区のアルベドは、0.14~0.16で、植栽の種類や生育状況などにより、値に違いが見られた。無処理区のアルベド(0.11)は、一般にコンクリートの値とされる0.51⁴⁾に比べると小さいが、これは、屋上面が汚れていたために黒色化していたことが原因と考えられた。また、土壌区は、一般的な自然土壌(裸地)の値(0.05~0.15¹⁵⁾)に比べて大きかったが、これは、用いた人工土壌の色が白色に近かったためと考えられた。

放射率については、イワダレソウ区がやや高い値(0.99)を示したが、全体として試験区間差は小さかった。

表3 各試験区におけるアルベドおよび放射率 (2003年9月15日)

	芝区	イワダレソウ区	セダム区	土壌区	芝乾燥区	無処理区
アルベド	0.14	0.16	0.15	0.22	0.16	0.11
放射率	0.98	0.99	0.97	0.98	0.97	0.97

(2) 表面温度

晴天となった9月15日の各試験区の表面温度の測定結果を図3に示す。

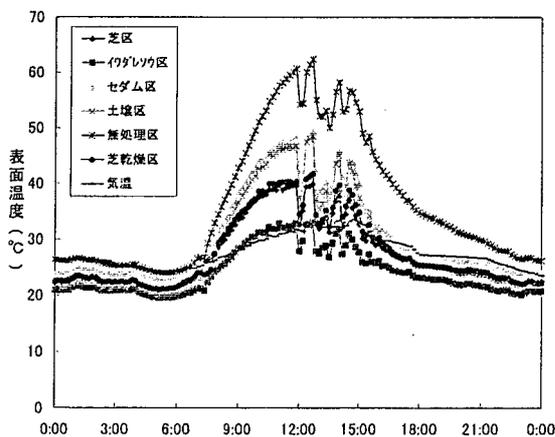


図3 各屋上緑化試験区の表面温度 (2003年9月15日)

無処理区の表面温度が、他の試験区に比べ、日中、常に高く推移した。無処理区の表面温度は最高で62.5℃に達したのに対し、他の試験区では平均で40.2℃で、無処理区よりも約20℃低かった。試験区の中で最も低かったのはイワダレソウ区で33.2℃で、気温(33.3℃)とほとんど差がなかった。以下、芝区<芝乾燥区<土壌区<セダム区の順で、それぞれ、40.0℃、41.9℃、48.5℃、49.4℃となり、最も高かったセダム区の表面温度は土壌区よりも高かった。最も低かったイワダレソウ区と最も高かったセダム区との温度差は約16℃で、無処理区とセダム区との差(約13℃)よりも大きく、植物の違いで大きな差が認められることがわかった。これらは主として、植物の生理的特性や熱特性の違いによるものと考えられるが、詳細は次節の熱収支解析により検討する。

(3) 熱収支

9月14~15日の各試験区における熱収支の経時変化を図4に示す。無処理区、芝乾燥区を除き、14日8時頃に一時的な顕熱の上昇が見られるが、これは灌水による急激な試験体重量の増加によるものであり、実際の顕熱を示すものではない。

芝区、イワダレソウ区、芝乾燥区では、14、15日ともに、顕著な潜熱の発生が認められた。一方、セダム区と土壌区では、14日の午前中に潜熱の発生が認められたものの、午後は急速に低下し、翌15日はほとんど発生は認められなかった。

表4に、比較的安定した日射量が得られた15日10:40-11:40の熱収支項の平均値を示す。正味放射量は、セダム区で最も高く620W/m²で、無処理区で最も低く470W/m²であった。土壌区は無処理区とほぼ同値で、各緑化区に比べ低かった。無処理区では、表面温度が高かったことが、また、土壌区ではアルベドが高かったことが、正味放射量が低い主な原因であると考えられた。各区の正味放射量の値は、条件が類似した既往の研究結果とほぼ一致した^{11), 12)}。

各熱収支項について比較すると、無処理区では、正味放射量(470W/m²)の約6割が顕熱(270W/m²)に、約4割が伝導熱(200W/m²)配分されていたのに対し、緑化区では、正味放射量に占める潜熱の割合が大きいため、顕熱や伝導熱の割合が小さくなっていた。イワダレソウ区では、潜熱が正味放射量(590W/m²)の約85%にあたる500W/m²発生してお

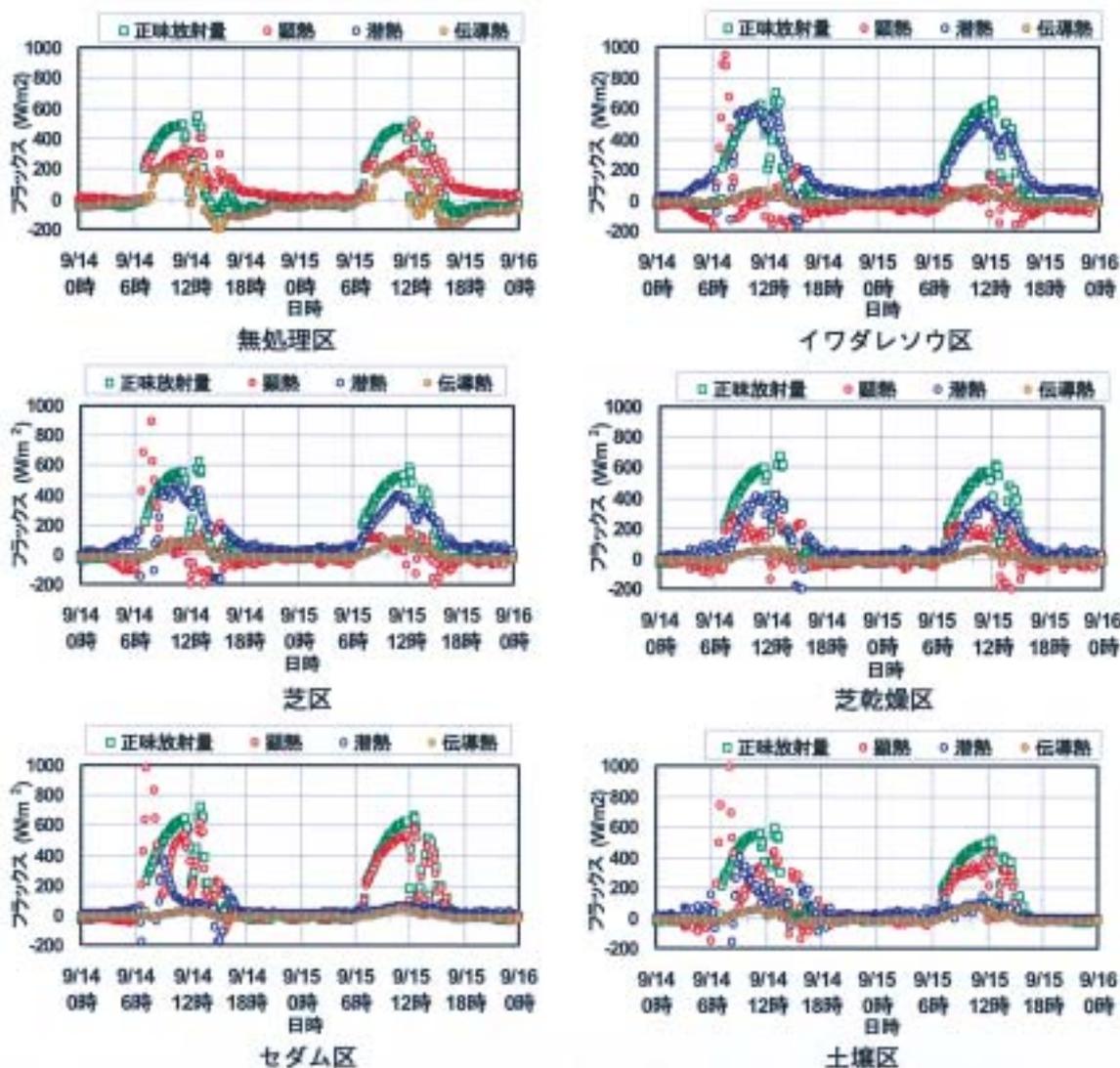


図4 熱収支各項の経時変化 (2003年9月14日～15日)

表4 各試験区における熱収支 (2003年9月15日 10:40～11:40の平均値、単位: W/m²)

	芝区	イワダレソウ区	セダム区	土壌区	芝乾燥区	無処理区
正味放射量	520	590	620	470	560	470
潜熱	380	500	60	90	350	—
顕熱	40	20	520	320	150	270
伝導熱	100	70	40	60	60	200

り、全試験区の中で最も大きかった。そのため、顕熱が20W/m²となり全試験区中最も小さかった。伝導熱も70W/m²と小さく、無処理区と比較すると、顕熱で約1/14、伝導熱で約1/3の値であった。

芝区においても、380W/m²近い潜熱の発生が認められ、顕熱も、イワダレソウ区に次いで小さかった。清田¹⁸⁾らによる地上の芝地の熱収支観測結果では、約650W/m²の正味放射量に対して、約470W/m²の潜熱の発生が認められている。今回の観測値は、これと比較すると若干少ないが、屋上緑化における芝は地上

の芝に比べ、薄層土壌であることや高温となりやすいことなど、栽培環境が劣悪であることを考慮すれば、ほぼ妥当な値といえよう。

一方、セダム区の日中の熱収支は、土壌区と同様に、潜熱の発生がほとんど無かった。セダムは、乾燥条件下において、日中、蒸発散を行わないCAM型光合成¹⁷⁾を行うとされていることから、日中はほとんど潜熱の発生が見られなかったものと考えられた。セダム区の潜熱は60W/m²と最も小さく、正味放射量の多くが顕熱(520W/m²)に配分され、何も植栽されていない土壌区や無処理区の顕熱よりも大きい結果となった。この結果からすれば、セダム区は、建物への伝熱は小さく抑えられるものの、日中は、無処理区よりも大気を加熱してしまうこととなる。このような解析結果となった原因の一つとして、セダム区の粗度が無処

理区に比べ大きく、より多くの顕熱が上空大気に伝わりやすかったことが考えられる。また、セダムは、芝やイワダレソウとは異なり草丈が高く、CAM植物であることから植物体には多量の水分を含むため、植物体への相当量の蓄熱が考えられる。したがって、今回用いた熱収支の評価法では、植物体への蓄熱は考慮していないことから、顕熱を過大評価している可能性がある。今後、セダム区の熱収支の評価に際しては植物体への蓄熱を考慮した検討が必要であろう。なお、セダム区の顕熱は15時頃から急激に低下し、他の緑化区同様、夜間はほぼ0の値に近かった。一方、無処理区においては、夜間においても、上向きの伝導熱とともに、顕熱の発生が引き続き認められた。これらのことから、夜間においては、セダム区においても他の屋上緑化区同様、大気温の低下をもたらすものと考えられた。

芝乾燥区においても、正味放射量の約63%にあたる350W/m²の潜熱が発生し、顕熱が150W/m²に抑えられていた。芝乾燥区は、セダム区と同様、無灌水の設定であるが、セダム区には灌水を行った14日も、芝乾燥区には灌水を行っておらず、より厳しい水分条件であった。通常、既存建物の場合、屋上面を緑化することを想定しておらず、灌用水施設の整備等メンテナンスに関わる環境を整えにくいのが実状である。そうした場合、芝は、乾燥条件下においても相当量のヒートアイランド緩和効果を発揮する点において、既存建物の屋上緑化に対して適性が高いことが示された。今後、イワダレソウ等他の植物についても同様の検討を行う必要があると考えられた。

現在、ヒートアイランド対策効果指標の一つとされている顕熱¹⁶⁾を基準に各試験区における日中のヒートアイランド緩和効果を比較すると、イワダレソウ区および芝区は、他区に比べ顕熱が非常に小さく、ヒートアイランド緩和効果が高い屋上緑化施設であることがわかった。また、他の試験区については、芝乾燥区<土壌区<無処理区<セダム区の順となり、セダム区が最も大きかった。このことから、セダムを用いた屋上緑化は、日中のヒートアイランド緩和に関しては、その効果をほとんど期待できない屋上緑化であると結論づけられる。

4 まとめ

本研究は、軽量薄層の緑化試験体を既存建物屋上に設置し、それらの熱収支特性を調査測定することによって、軽量薄層な屋上緑化施設の持つヒートアイランド緩和効果を定量的に検討することを目的として行った。

得られた主な結果は、以下の通りである。

- (1) 表面温度は、無処理区が最も高く62.5℃であったのに対して、屋上緑化区は全体平均で40.2℃であった。屋上緑化区の中で最も低かったのは、イワダレソウ区で33.2℃で、最も高かったセダム区(49.4℃)とは約16℃の差がみられた。
- (2) 日中における熱収支解析の結果、大気を直接加熱する顕熱が最も小さかったのはイワダレソウ区で、無処理区の1/14であった。以下、芝区<芝乾燥区<土壌区<無処理区<セダム区の順であった。芝乾燥区においても顕熱が小さかったことから、芝は、乾燥条件下においてもヒートアイランド緩和効果を発揮するものと考えられた。
- (3) セダム区は、灌水直後は蒸発散が行われたが、すぐに低下し、土壌区と類似した傾向を示した。このことから、灌水を行えない管理下においては、日中のヒートアイランド緩和効果を期待できない屋上緑化であると考えられた。ただし、無処理区に比べ伝導熱は非常に小さかったことから、断熱効果については一定の期待ができるものと考えられた。
- (4) 本研究の結果から、既存建物にも適用可能な軽量薄層な屋上緑化システムにおいても、一定のヒートアイランド緩和効果を有することが明らかとなった。しかし、効果は、植物の種類や、灌水の頻度等により異なった。今回の結果では、イワダレソウ区および芝区で効果が高く、セダム区で効果が低いことが明らかとなった。

5 謝辞

本研究の遂行ならびに本論文のとりまとめにあたり、日本工業大学工学部 成田健一教授、ならびに、株竹中工務店技術研究所主任研究員 三坂育正博士より、多大なるご指導・ご協力をいただきました。記して深く感謝申し上げます。

なお、本報は、東京都農業試験場および東京都土木

技術研究所との共同研究の一部を取りまとめたものである。

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) 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).
- 3) 梅干野晃・萩原賢二：屋上の芝生植栽による照り返し防止・焼け込み防止効果、日本建築学会建築環境工学論文集』5、pp.133-140 (1983).
- 4) 梅干野晃・山下富大：ツル植物による植栽スクリーンの日射遮蔽効果、日射透過率と表面温度について、日本建築学会建築環境工学論文集』345、pp.141-146 (1984).
- 5) Hoyano, A.: Effects of Rooftop Turf-planting Layers upon Building Thermal Environment, Memories of the Faculty of Engineering Kyushu University, 44, pp.135-148 (1984).
- 6) 原蘭芳信・池田英男・中瀬勲：軽量な人工培地を用いた建物屋上緑化、造園雑誌52 (5)、pp.85-90 (1989).
- 7) 堀口剛・梅干野晃・王革：屋上緑化システムの提案とその熱的性能の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1523-1524 (1993).
- 8) 梅干野晃・何江・堀口剛・王革：芝生葉群層の熱収支特性に関する実験研究、屋上芝生植栽の熱環境調整効果 第1報、日本建築学会計画系論文集』462、pp.31-39 (1994).
- 9) 山本奈美・川島茂人・村上暁信・渡辺達三：メキシコマンネングサを用いた屋上緑化において植栽密度及び灌水の有無が屋上の熱環境に与える影響、ランドスケープ研究67 (5)、pp.443-446 (2004).
- 10) 山田宏之・養父志之夫・中島敦司・中尾史郎：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)、pp.453-456 (2004).
- 11) 原蘭芳信・池田英男：屋上での簡易養液栽培による室内熱環境への影響、農業気象46 (1)、pp.9-17 (1990).
- 12) 野島義照・沖中健・瀬戸裕直・倉山千春・二階堂稔・高砂裕之：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、日本緑化工学会誌20 (3)、pp.168-176 (1995).
- 13) 日経アーキテクチュア：事例に学ぶ屋上緑化、設計～施工～メンテナンスの勘所、日経BP社、pp.206 (2003)
- 14) 近藤純正：地表面に近い大気の科学－理解と応用－、東京大学出版会、pp.324 (2000).
- 15) 近藤裕昭：人間空間の気象学、朝倉書店、pp.156 (2001).
- 16) 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).
- 17) M.クルーゲ、I.P.ティン（野瀬昭博訳）：砂漠植物の生理・生態、九州大学出版会、pp.242 (1993).
- 18) 清田信・北宅善昭・原蘭芳信・矢吹万寿：林地と芝地における熱収支の比較、環境情報科学 第4回環境研究発表会論文20-2、pp.62-66 (1991).