

軽量・薄層型屋上緑化技術のヒートアイランド緩和効果の定量評価に関する研究

EVALUATION OF EFFECTS OF LIGHT AND THIN TYPE ROOFTOP GREENING ON MITIGATING HEATISLAND

三坂育正 — *1 石井康一郎 — *2
 横山 仁 — *3 山口隆子 — *4
 成田健一 — *5

Ikusei MISAKA — *1 Koichiro ISHII — *2
 Hitoshi YOKOYAMA — *3 Takako YAMAGUCHI — *4
 Ken-ichi NARITA — *5

キーワード：
 ヒートアイランド, 屋上緑化, 熱収支, 蒸発効率

Keywords:
 Heat island, Rooftop greening, Heat balance, Evaporation efficiency

In order to evaluate the effects of mitigating urban heat island by light and thin type rooftop greening system which could be applied in existent buildings, basic experiment about thermal characteristics of greening system were carried out.

The results of heat balance analysis show the latent heat consumption of evapotranspiration at greening system to prevent increase sensible heat. But mitigating effects by greening system were varied in kind of plants, water condition and so on. Using evaporation efficiency as an index of evaporation ability, it is able to evaluate the difference of the effects by plants and water condition.

1. はじめに

近年、都市域がその周辺地域よりも高温となる、いわゆるヒートアイランド現象が問題となっている。ヒートアイランド現象の主な形成要因の一つに、都市化に伴い緑地や河川が減少し人工物に変化したことによる地表面の不透水性が挙げられる¹⁾。そのため、ヒートアイランド緩和の視点から、都市の緑地面積を増大させることが必要とされるが、高度に密集化した都市内に大規模な緑地を形成することは難しく、建築物の緑化、とりわけ屋上の緑化が目立っている。屋上緑化は2001年に東京都が自然保護条例の改正により、屋上の緑化を義務付けたことを契機に大きな広がりを見せている。屋上緑化に伴うヒートアイランド緩和効果に関しては、多くの研究事例が見られ^{例えば 2),3)}など、植物の蒸発散による表面温度低下や顕熱低減といった効果が示されている。一方で、維持管理手間を省力化できる利点により普及が進む薄層型の屋上緑化に関しては、その効果について疑問を投げかける意見も見受けられ⁴⁾、薄層型の屋上緑化による効果の定量的な評価が求められている。

そこで、本研究は、既存建物において適用可能な軽量・薄層型屋上緑化によるヒートアイランド緩和効果を定量的に評価することを目的として、既存建物屋上に複数の緑化試験体を設置し、その熱特性や熱収支特性の評価を行った。

2. 実験概要

実験は、東京都江東区の建物上に試験区を設置し、無処理を含めた6種類の試験区を対象として行った。

緑化試験区のリストをTable-1に、試験区全体の概観をFig-1に

示す。緑化試験区は、塩ビ製のパレット式植栽基盤(500mm×500mm×80mmH)を製作し、その中に人工軽量土壌(有機質、湿潤比重0.8程度)を80mm充填し、各試験区の指定された植物を植栽したものを設置した。土壌厚は、既存建物への適用を考慮し、建物荷重60kg/m²を満たすよう設定し、セダム区に関しては、一般に普及されている土壌厚を参考として50mmとした。パレットの底面には排水用の穴を設け、パレットの下には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、保水型を指向して底面に穴を設けていない。各試験区の面積は、放射・温熱環境項目測定用として4000mm

Table-1 試験区リスト

試験区名	植生	土壌	土壌厚 (mm)	大きさ (放射・温熱用)	大きさ (蒸発用)
芝区	芝	有機質人工土壌	80mm	4000×3000mm	500×500mm
芝乾燥区	芝	有機質人工土壌	80mm	4000×3000mm	500×500mm
イワダレソウ区	ヒメイワダレソウ	有機質人工土壌	80mm	4000×3000mm	500×500mm
セダム区	セダム	有機質人工土壌	50mm	4000×3000mm	500×500mm
土壌区	—	有機質人工土壌	80mm	4000×3000mm	500×500mm
無処理区	—	—	—	—	—

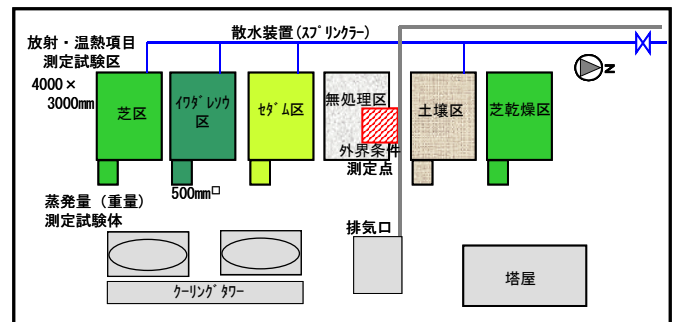


Fig-1 試験区設置状況

*1 竹中工務店技術研究所 主任研究員 博士 (工学)
 (〒270-1395 印西市大塚 1-5-1)
 *2 東京都環境科学研究所 基盤研究部 部長
 *3 東京都環境科学研究所 主任研究員 博士 (農学)
 *4 東京都環境科学研究所 研究員
 *5 日本工業大学工学部 教授 工博

*1 Chief Researcher, R&D Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.
 *2 Director of Basic Research Division, The Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection
 *3 Chief Researcher, The Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection, Dr. Agr
 *4 Researcher, The Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection
 *5 Professor, Nippon Institute of Technology, Dr. Eng.

×3000mm（上記パレット 48 個を敷き詰める）、重量測定用として 500mm×500mm（上記パレット 1 個）とした。重量測定用のパレットに関しては、パレット 1 個にて評価を行うため、周囲を断熱材にて囲う形とした。

測定項目および測定点断面図を Table-2 および Fig-2 に示す。各測定データは、1 分毎にサンプリングを行い、10 分平均値をとって解析を進めた。なお、蒸発散量に関しては、重量変化を連続計測したが、風による乱れの影響を除外するために、1 時間の移動平均を取り解析を行った。

緑化試験区および測定機器の設置は 2003 年 7 月下旬に行い、測定は 8 月 10 日より開始した。蒸発散量などの測定に関しては、植栽施工後、約 1 ヶ月の養生期間を設けたあと、本格的な測定を開始した。散水のスケジュールを Fig-3 に示す。なお、8 月上旬の養生期間においては、すべての試験区で朝 8 時から 5mm に相当する散水を手撒きにて行い、観測開始時における生育はほぼ良好であり、試験区ごとの生育や群落密度に大きな差はみられなかった。

3. 気象概況と表面温度

3-1 測定期間中の気象概況

測定期間中における気象状況については Fig-4 に示す。

測定を開始した 8 月 10 日以降、8 月中旬は降雨が続き、気温が最高でも 25℃に満たない日が続いた。その後 8 月下旬になると天候が回復し、22~25 日は日射量も多く、気温も日中 30℃を超した真夏日となっているが、8 月は全体的には曇りがちで、気温もあまり上昇していない。9 月に入ると、中旬は 8 月下旬と同様な状況であったが、中旬になると好天が続き、気温が高く夏日が増えた。

以上の気象状況から、天候に恵まれた 9 月 14~15 日を中心に行った熱収支解析結果を中心に述べる。

3-2 表面温度経時変化

9 月 14 日~15 日の表面温度の測定結果を Fig-5 に示す。表面温度は、赤外線熱電対を用いた測定値に、後述する手法で得られた放射率の補正を行うことで算出した。

測定結果より、無処理区の表面温度が植栽した試験区に比べ、常に高く推移していることが確認できる。特に、日中では無処理区の表面温度（屋上面温度）は 60℃に達するのに対し、植栽区の表面温度はそれよりも低く、芝やイワダレソウの植栽区では 35℃程度と 25℃以上も低くなっている。植栽区の表面温度では、芝やイワダレソウは、日中は気温と同等か 3~5℃程度高くなっているが、夜間には逆に 1℃程度気温よりも低くなっており、放射冷却によって空気

を冷やす効果が期待できる。セダムの表面温度は、土壤面とほぼ同じか高く推移しており、日中には 45℃程度まで達していた。土壤区は、14 日朝は散水を行っているため、15 日に比べると表面温度は低くなっているが、他の植栽区は 2 日ともほぼ同じ経時変化となり、植栽区の蒸発散特性が 2 日間で同じ傾向であったと推察できる。

Table-2 測定項目および測定機器・測定点

測定種類	測定項目	測定機器	点数	備考	
外界条件	気温・湿度	CVS-HMP-45D	1		
	風向・風速	風車型風速計	CVG-5103	1	測定タワーを設置して計測
	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-202	1	
	雨量(給水量)	転倒ます式雨量計	OOT-34T	1	
蒸発量・含水量	電子天秤	SB32000	1	無処理区除く5試験体	
放射特性 温熱環境	アルベド(上下短波放射)	長短波放射計	MR-40	1	6試験区
	放射率(上下長波放射)	放射計	MR-40	1	6試験区
	放射收支	放射收支計	CPR-Q7	1	6試験区
	表面温度	赤外線熱電対	iR-L/c. SV-T-80F	1	6試験区
		サーモカメラ	TH7102	1	集中観測時にスポット測定
	地中温度	T型熱電対	T-TCC	3	7試験体、土壌上・下部・躯体表面で3点
データ収録	伝導熱量	熱流計	CPR-PHF-01	3	7試験体、土壌上・下部・躯体表面で3点
	データロガー	マイコンカー	C-CR10X		
		データロガー	サーモゲージEF		

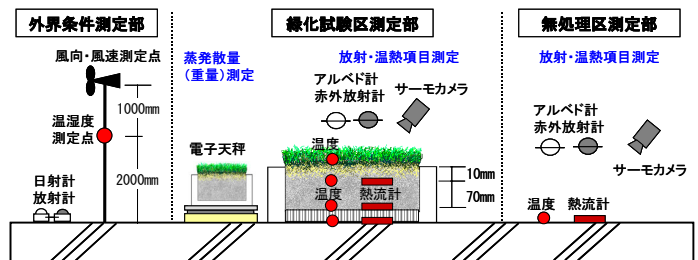


Fig-2 測定項目および測定点断面図

試験区	8														9															
	~18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
芝区	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
イワダレソウ区	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
セダム区	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
土壌区	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
芝乾草区	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○ 手撒きによる散水(5mm) × 降雨により散水無し
● スプリンクラーによる散水(5mm/日) ▲ スプリンクラーによる散水(5mm/3日)

Fig-3 散水スケジュール

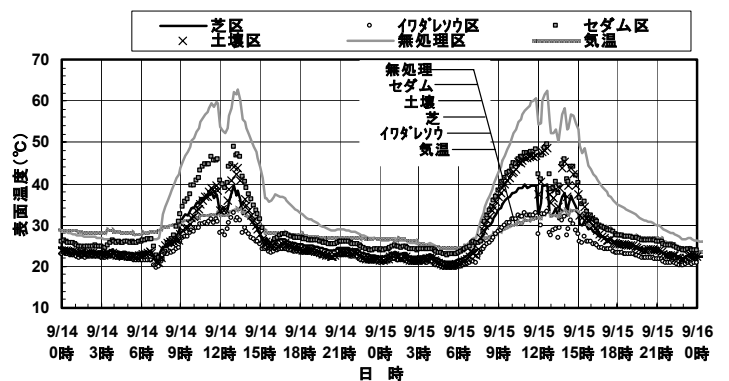


Fig-5 表面温度の経時変化

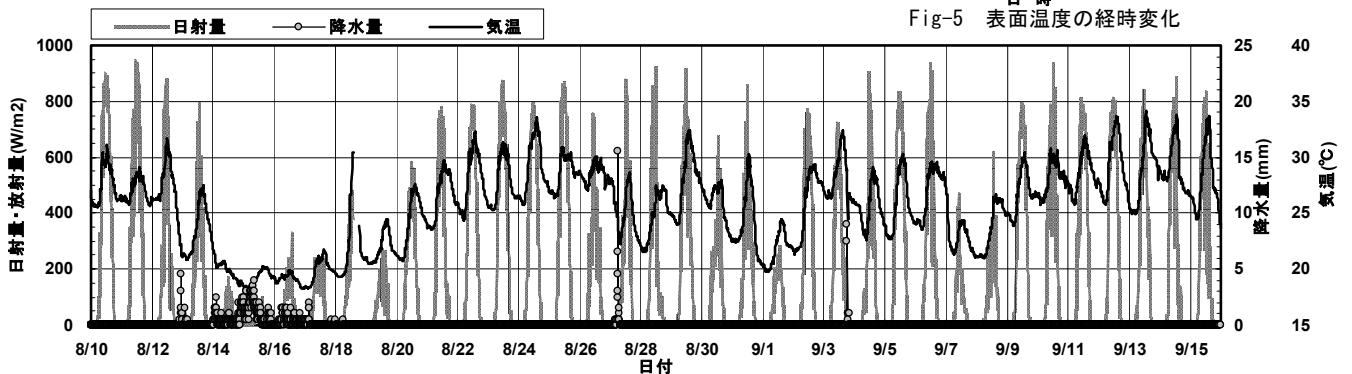


Fig-4 気象概況（日射量・気温・降水量）

4. 熱収支による評価

4-1 放射特性の評価

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⁴, 顕熱⁵, 潜熱⁶, 伝導熱⁷ [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 (=5.670×10⁻⁸W/m²・K⁴)

a, ε : 各試験体日射反射率(アルベド), 放射率

放射特性を明らかにするため、アルベド、放射率の算出を行った。

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、以下の式で算出する。

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

放射率 ε については、日射の影響を受けない夜間を対象として、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 $L \uparrow$ 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 (σT_s^4) との比として算出した。

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

各試験区における測定結果を Table-3 に示す。

アルベドの測定結果によると、植栽を施した試験体のアルベドは、0.14~0.16 程度であった。無処理区は表面が黒っぽいため値が小さく、逆に土壤区は乾燥により表面が白くなっているために、値が大きくなっているものと考えられる。

放射率は、イワダレソウの値が 0.99 と他に比べて高くなったが、他の区は 0.97 程度で、試験区による差はほとんど見られなかった。

4-2 熱収支解析結果

測定データを用いて、各試験体の熱収支項の算出を行った。

正味放射量については、放射収支式(2)において、日射量・大気放射量および表面温度の測定値と、アルベド・放射率を用いて算出した。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算出し、表面における地中への伝導熱は、表面からの深さ 10mm に設置した熱流計による伝導熱量の測定値に、各試験区の表面から 10mm までの蓄熱量を加える補正を行い算出した。なお、蓄熱量の算出に必要な各試験区の熱容量は、土中上下 2 箇所に設置した熱流計による伝導熱量の差と地中温度の変化量の関係から得られた値を用いた。顕熱に関しては、熱収支式(1)式の残差として算出した。

9月14~15日の芝区とセダム区および無処理区における熱収支の経時変化を Fig-6 に示す。熱収支の経時変化より、無処理区においては、日中の顕熱や伝導熱が大きく、それぞれ正味放射量の半分程度の大きさになるのに対し、芝区では、日中に潜熱が大きくなることにより、顕熱や伝導熱が小さくなり、日中においても顕熱が負の値をとることもある。顕熱が直接大気を加熱し、伝導熱が室内への貫流負荷であると考えれば、芝は薄層型であってもヒートアイランド緩和や空調負荷低減といった効果が期待できる。しかしながら、

セダム区においては、散水を行った 14 日午前では潜熱が大きいものの蒸発の効果はすぐに小さくなり、15 日ではほとんど蒸発散の効果は見られない。2 日間を通して、伝導熱は小さくなっているものの、顕熱が無処理区よりも大きな値となっている。この要因としては、熱収支項の算出にあたり、顕熱を熱収支式(1)の残差として算出しているため、各項目の測定誤差を含んでしまっていること、特に伝導熱が小さいことから、土壤表層への蓄熱やセダムそのものへの蓄熱といった分が、顕熱として算出されてしまったものと考えられる。今後、これらの誤差を除外できるような詳細な熱収支項の測定方法を検討することが必要であろう。

4-3 蒸発効率による評価

得られた熱収支項から、各植栽区における蒸発散特性を評価する目的で、蒸発効率を算出し比較を試みる。得られた顕熱と表面温度-気温の温度差から算出する対流熱伝達率 α (W/m²・K) から、ルイス則を仮定して物質伝達率 kx (kg/m²・s・[kg/kg']) を算出した⁵⁾。この

Table-3 各試験区のアルベド、放射率

	芝区	イワダレソウ区	セダム区	無処理区	土壤区	芝乾燥区
アルベド	0.141	0.156	0.149	0.108	0.215	0.161
放射率	0.976	0.990	0.971	0.971	0.978	0.973

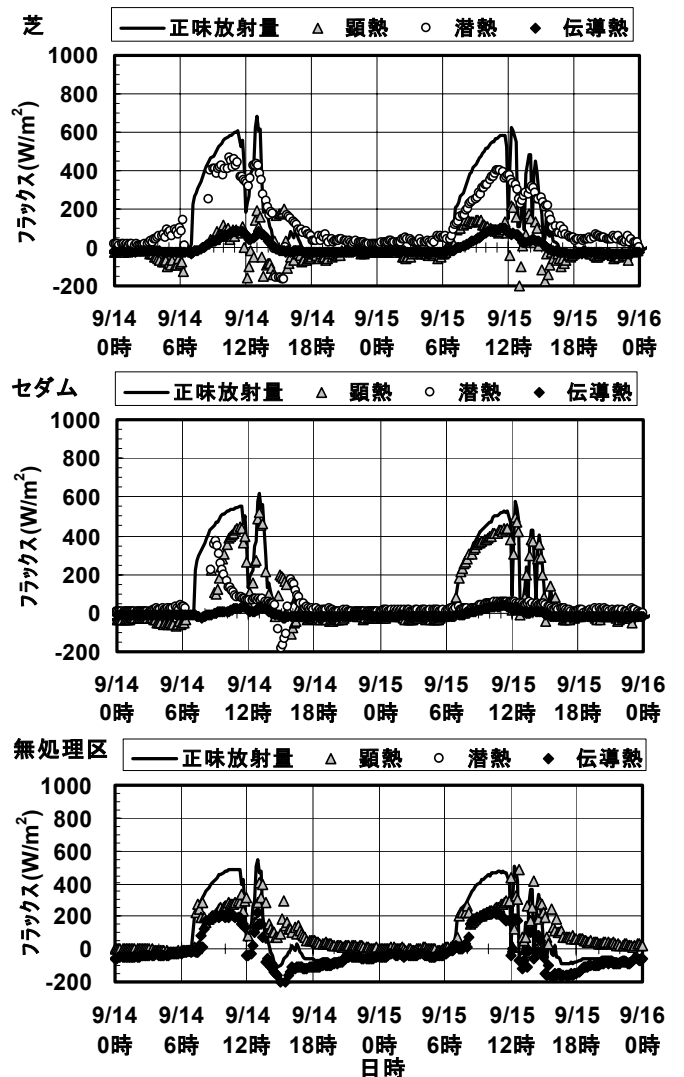


Fig-6 熱収支の経時変化(芝区・セダム区・無処理区)

物質伝達率に表面の飽和絶対湿度及び空気の絶対湿度との差を乗じることによって得られる潜熱を、重量変化から算出した潜熱の測定値と比較することで蒸発効率 β の算出を試みる。対流熱伝達率、物質伝達率および蒸発比の算出については、以下の式に従った。

$$\alpha = \frac{H}{(T_s - T_a)} \quad (6)$$

$$kx = \frac{\alpha}{(C_p \times 0.83)} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{E}{kx \times (es_{T_s} - ea)} \quad (8)$$

C_p : 空気の比熱 [J/kg·K]

es_{T_s} : 表面温度に対する飽和絶対湿度 [kg/kg³],

ea : 空気の絶対湿度 [kg/kg³]

算出した蒸発効率について、芝区とセダム区の9月14~15日における経時変化を、Fig-7に示す。9月14~15日の蒸発効率の変化では、日中における芝区の蒸発効率が0.3程度であるのに対し、セダムでは0.1程度と小さくなっている。14日朝には、スプリンクラーによる散水を行っているため、芝・セダムとも午前の蒸発効率がやや高いが、セダム区では、蒸発効率はすぐに低下し、散水による蒸発散効果の持続時間が小さいことがわかる。芝区においても、14日と比較すると、散水翌日の15日における蒸発効率には値の低下が見られる、それでも0.2程度の蒸発効率は維持されている。

蒸発特性に関して、Fig-8は8月19日~9月20日における、日積算日射量と各試験区における蒸発効率の変化を示したものである。植栽試験区の中でも、芝区およびイワダレソウ区では、蒸発効率は定期的な散水を行った8月後半では0.3~0.6程度で安定して推移し、散水の頻度を減らした9月中旬では散水後に徐々に小さくなる傾向がみられるが、0.2以上を維持している。一方で、セダム区は定期的な散水を行った8月20~23日およびその後の8月下旬は0.4程度の蒸発効率であったが、9月中旬ではほぼ0.1以下となり、散水を行っても蒸発効率はあまり高くならなかった。これは、8月には定期的な散水によりセダムがC3植物^{注1}の生理に似てきたために蒸散が活発になり、その後乾燥が続くにつれて徐々に蒸散能力が低下する、というセダムそのものの植物生理が変化したことが推察される。また、土壌区は散水や降雨後に一時的に高くなるが、それ以外ではほぼ0.1程度の蒸発効率であった。芝乾燥区では、この期間中にはほとんど散水を行っていないにもかかわらず、0.2程度の蒸発効率が維持されていた。なお、8月27日の蒸発効率、特に芝乾燥区における値が大きいのは、早朝に降った雨の影響と考えられる。

以上の結果から、既存建物においても、屋上緑化を行うことにより、植栽の蒸発散による潜熱消費によって、大気を加熱したり、建物に熱を伝えたり蓄える熱が小さくなることで、ヒートアイランド緩和の効果があることが確認できた。蒸発散効果の指標となる蒸発効率は、散水状況や植物の生育・生理状況によって変化がみられた。

5. まとめ

既存建物に適用できる軽量・薄層型屋上緑化技術のヒートアイランド緩和効果を定量的に評価する目的で、試験区における熱収支特性に関する調査を行った。測定・解析結果より、薄層型屋上緑化においても顕熱が低減しており、ヒートアイランド緩和が期待できる。また、屋上緑化によるヒートアイランド緩和効果は、植栽の種類や灌水・日射条件および植物の生理状況等により異なるが、蒸発効率が違いを評価する上での指標の一つとなり得ることも示唆できた。

【参考文献】

- 1) 環境省：平成12年度ヒートアイランド現象の実態解析と対策のあり方について報告書，23-39，2001.3
- 2) 梅干野見，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，No.462，31-39，1994
- 3) 香川治美，林哲夫，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上発散特性の定量的特定，日本建築学会計画系論文集，No.507，7-12，1998
- 4) 田中俊六：省エネルギーシステム概論，オーム社，291-299，2003.12
- 5) 成田健一，野々村善民，小笠頭：自然風下における窓面対流物質伝達率の実測 都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究，日本建築学会計画系論文集，No.491，29-56，1997.1
- 6) 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，3-10，2004

【謝辞】本研究を遂行するにあたり、東京都土木技術研究所および農業試験場のご指導・ご協力を賜りました。また、実験に際しては、芝浦工業大学(当時)の曾我美吉子氏、田崎優介氏および日本工業大学の綿貫良太氏、池崎徹氏(当時)に協力頂きました。ここに感謝の意を表します。

注1：C3植物とは、日中にCO₂を吸収し、光合成を行う一般的な植物のことである。セダムは、通常、夜間にCO₂を吸収するCAM型(サボテン型)光合成を行っていると考えられているが、水分を与えつづけるとC3植物に似た振る舞いをする事が報告されている。

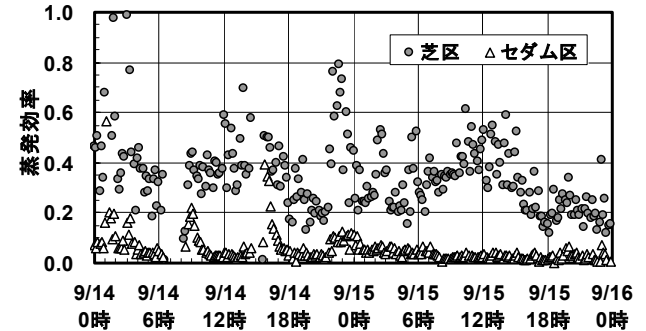


Fig-7 蒸発効率の経時変化 (芝区・セダム区)

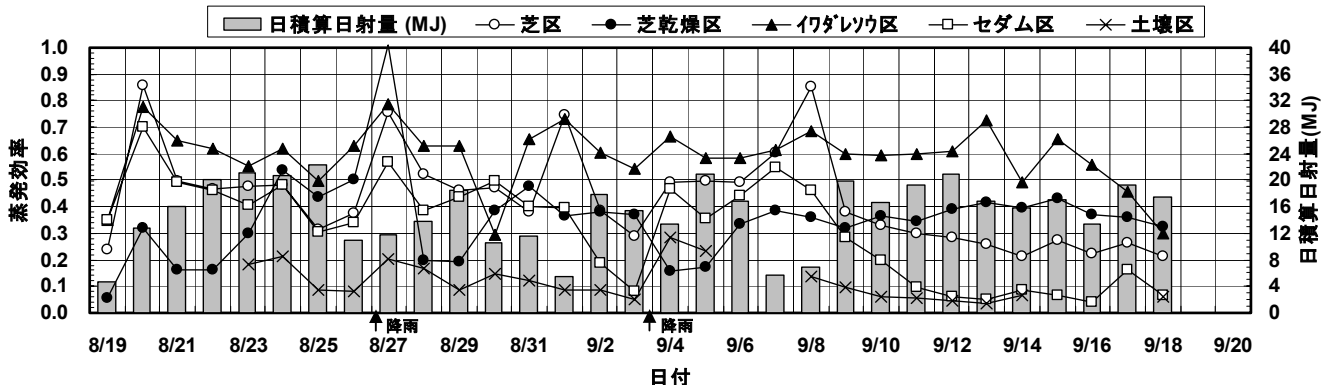


Fig-8 実験期間中の日積算日射量と蒸発効率