

屋上緑化と太陽光発電の最適条件(ベストミックス)に関する屋外実験

1093239 坂下 剛 1093349 野村 洋平
指導教員 成田 健一

1. 研究目的 都市部ではヒートアイランド緩和を目的とした屋上緑化が実用化されている。一方で、太陽光発電は新エネルギーの中で適用範囲が広く、屋上への設置が進められている。今後、太陽光発電を屋上緑化と併用して設置することにより、屋上緑化によるヒートアイランド緩和効果と夏期の室温上昇を抑制することによる省エネ効果と、太陽光発電による経済的効果の双方のメリットが期待できる。しかしながら、ソーラーパネル設置によるヒートアイランドへの影響は明確とされていない。そこで、屋上緑化とソーラーパネルの表面温度や熱収支特性を明らかにし、それらを比較することにより、建物屋上面での屋上緑化と太陽光発電の共存策(ベストミックス)を探ることを目的として実験を行った。



写真1. 屋上緑化試験区 写真2. ソーラーパネル
表1. 蒸発散測定と灌水日

日付	8月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
蒸発散測定	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
灌水	○	○							○	○				○	○																		

表2. 試験区リスト

試験区名	植生	土壌厚	大きさ		
			試験区	小試験区	ろ紙版
芝区	芝	80mm	2000mm×2000mm	500×500mm	—
セダム区	キリンソウ、コラルカーベット マンネンガササカサ、ツル、メキシコ	80mm	2000mm×2000mm	500×500mm	—
コケ区	スナコケ	80mm	2000mm×2000mm	500×500mm	—
土壌区	—	80mm	2000mm×2000mm	500×500mm	—
無処理区	(屋上スラブむき出し)	—	—	—	—
ソーラーパネル	—	—	500×800mm	—	500×800mm

2. 実験概要 東京都江東区にある東京都環境科学研究所の屋上に屋上緑化とソーラーパネルを設置した(写真 1.2)、測定場所には6種類の試験区があり、植物は3種類、その他は土壌区、無処理区、ソーラーパネルの3種類がある。屋上緑化では、灌水を行う区画と行わない区画の2つを設けた。灌水区は1日間隔を目安に灌水を行い(表1)、各測定日の測定終了後に試験体1㎡辺り5ℓの灌水を行った(図1)。また、屋上緑化と土壌区には、試験区内に蒸発量測定のための小試験体を設け(表2)、重量変化から蒸発散量を算出した。重量測定は、9時から17時にかけて1時間ごとに行い、風による秤量誤差が生じるため、各試験区5回測定の平均を測定値とした。測定器材のリストや断面を表3、図2に示す。重量測定には電子天秤、試験体内部温度・伝導熱・正味放射量

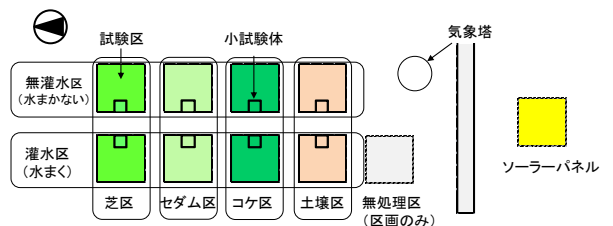


図1. 試験区設置状況

表3. 各機器設置リスト

設置場所	測定項目	使用測器	測定間隔	実験期間
気象観測タワー	気温・湿度	温湿度計(縦型強制通風筒)	1分	8月3日 ~ 8月31日
	風向・風速	風車型風向風速計		
	短波放射量	全天日射計		
	長波放射量	精密赤外線放射計		
各試験区	表面温度	精密赤外線熱電対	1分	8月3日 ~ 8月31日
	正味放射量	放射収支計		
	試験区温度	熱電対		
	伝導熱	熱流板		
ソーラーパネル(ろ紙法)	正味放射量 風向・風速 表面温度	4成分放射収支計 3次元超音波風向風速計 サーミスタ温度計	1秒	11月21日 ~ 12月13日

・表面温度の測定には、熱電対・熱流板・放射収支計・赤外線熱電対を使用した。気象状況の測定には、気象観測タワーを用いた。

3. 表面温度の評価 図3は、各試験区の表面温度の経時変化である。灌水区については、無処理区の表面温度が、気温のピーク時では他の試験区よりも5℃以上高くなっている。また、ソーラーパネルでは屋上緑化の試験区と表面温度に大きな違いはない。一方、無灌水区では、屋上緑化と土壌区の温度が上昇し、無処理区との差が小さくなっている。そのため、ソーラーパネルの表面温度は、各試験区よりも低くなるのがわかる。

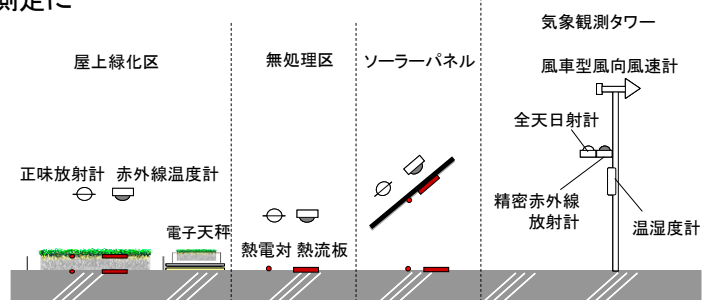


図2. 設置断面図

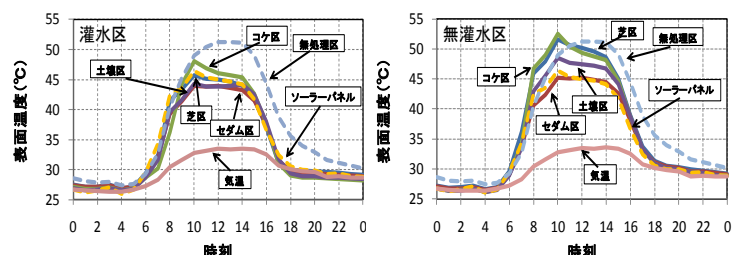


図3. 各試験区の表面温度経時変化

4. 熱収支の解析方法 熱収支式を図 4 に示す。屋上緑化では正味放射量 R_n 、伝導熱 G を直接測定し、重量変化から求めて蒸発量 E から式 (2) を用いて潜熱 LE を算出、式 (1) より顕熱 H を残差として求めた。ソーラーパネルでは、ろ紙法を用いた。ろ紙法ではアクリル板にろ紙を貼り付けた試料をソーラーパネルの表面上部に設置し(写真 3)、20 分から 30 分間暴露し、重量測定をした。その重量変化と気温・湿度・表面温度から物質伝達率 k や対流熱伝達率 α を算出し、ろ紙法で得られた伝達率と風速の関係を求め、式 (4) で対流熱伝達率 α を求めることで顕熱 H の算出に適用した。ソーラーパネルには、潜熱 LE はないため、顕熱 H と正味放射量 R_n を式 (1) を用いて伝導熱 G を残差として求めた。

$$R_n = H + LE + G \quad \text{--- (1)}$$

$$LE = (2.5 \times 10^6 - 2400 \times \theta_s) \times E \quad \text{--- (2)}$$

$$\alpha = \frac{H}{\theta_s - \theta_a} \quad \text{--- (3)}$$

$$k = \frac{\alpha}{0.83 C} \quad \text{--- (4)}$$

$$\beta = \frac{E}{k(x_s - x_a)} \quad \text{--- (5)}$$

R_n : 正味放射量[W/m²]
 H : 顕熱フラックス[W/m²]
 LE : 潜熱フラックス[W/m²]
 G : 伝導熱[W/m²]
 L : 気化の潜熱[J/kg]
 E : 蒸発量[kg/m²・s]
 θ_s : 表面温度[°C]
 θ_a : 外気温度[°C]
 β : 蒸発効率
 k : 物質伝達率[kg/m²・s・(kg/kg)]
 x_s : 表面の絶対湿度[kg/kg]
 x_a : 外気の絶対湿度[kg/kg]
 α : 対流熱伝達率[W/m²・K]
 C : 湿り空気の比熱[J/kg・K]

図 4. 熱収支式、蒸発効率の算出



写真 3. ソーラーパネル(ろ紙法)

5. 熱収支の比較 8 月 8 日の芝区の灌水と無灌水、無処理区、ソーラーパネルの熱収支を比較した(図 5)。無処理区の顕熱は、他の試験区と比較して 2 倍程度高い。屋上緑化では、潜熱が大きくそのため顕熱と伝導熱が小さい。しかし、ソーラーパネルは、芝区と比較しても顕熱は大きくなく、無灌水区よりも顕熱は小さい。しかし、伝導熱においては、ソーラーパネルがもっとも大きいことがわかる。

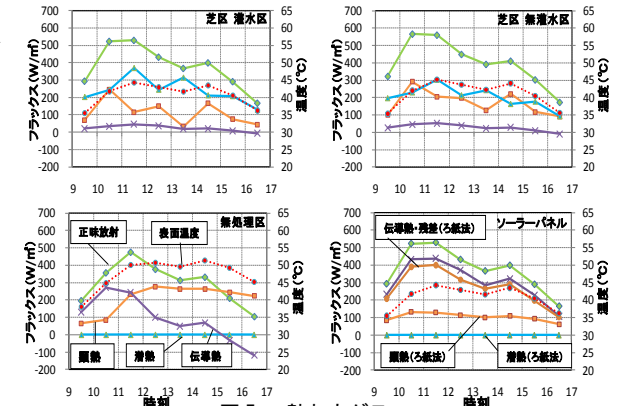


図 5. 熱収支グラフ

6. 蒸発効率による評価 蒸発効率とは、同じ表面温度の水面からの蒸発量に対する比率である。蒸発効率 β は蒸発散量や表面・大気の温度と式 (3) (4) で得られる物質伝達率 k を用いて式 (5) から算出した。図 6 は蒸発効率 β の日平均で、8 月 8 日の蒸発効率 β が大きくなっている。これは、8 月 8 日の 2 日前から天候が悪く、さらに灌水を行ったことで土壌水分量が多くなったためだと予想される。また、芝区の蒸発効率は他の試験区と比較しても全体を通して安定していることがわかる。

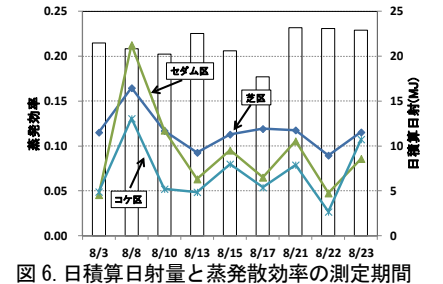


図 6. 日積算日射量と蒸発散効率の測定期間

7. 屋上面積の屋上緑化とソーラーパネルの条件設定による比較 屋上の面積を 100 m² と仮定し、表 4 に表す条件を設定し顕熱の比較を行った。表 4 の①は無処理が 100 m²、②から⑤までが緑化 20 m² と無処理 80 m²、⑥から⑧までは緑化 20 m² とソーラーパネル 80 m² という条件である。顕熱は 8 月 8 日の日積算の値を原単位とし、表 4 の面積を元に顕熱と発電量を算出した(図 7)。図 7 から①の設定と比較し、②から⑤の条件で施工した場合、顕熱は 70~100W/m² 小くなる。また、⑤の組み合わせがもっとも小さくなることがわかる。さらに、屋上緑化とソーラーパネルの割合を⑥から⑧の条件にすると①の半分以下になり、その中でも、芝とソーラーパネルの組み合わせがもっとも顕熱が小さい。図 7 のように発電量についてもソーラーパネルの面積が増える分、発電量も増えることがわかる。

表 4. 条件設定表

条件	無処理 (m ²)	芝 (m ²)	セダム (m ²)	コケ (m ²)	ソーラーパネル (m ²)	合計 (m ²)
①	100	0	0	0	0	100
②	80	20	0	0	0	100
③	80	0	20	0	0	100
④	80	0	0	20	0	100
⑤	80	0	0	0	20	100
⑥	0	20	0	0	80	100
⑦	0	0	20	0	80	100
⑧	0	0	0	20	80	100

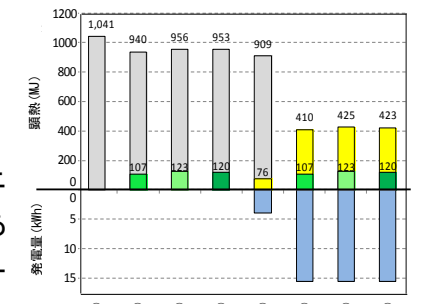


図 7. 設定条件毎の顕熱と発電量の比較

8. まとめ ソーラーパネルは屋上緑化と比較しても顕熱は低く、さらに屋上緑化などは灌水しなければならないことを考えるとメンテナンスフリーであるソーラーパネルはメリットも多い。また無処理区と屋上緑化よりもソーラーパネルと屋上緑化の組み合わせの方が顕熱も小さいことから、無処理のままよりもソーラーパネルを設置することでヒートアイランド緩和効果と経済的なメリットもある程度期待できる。