

37. セダムを植栽した屋上緑化面における放射収支、地中温度及びヒートフラックスの観測

Long-term Observation of Radiation Balance, Soil Temperature and Heat Flux at Eco-Building with Sedum Rooftop Greening Technology

新津潔*・一ノ瀬俊明*

Kiyoshi NIITSU*・Toshiaki ICHINOSE*

Abstract; Heat island phenomenon is recognized one of the serious problem in the large city. For the mitigation of thermal pollution in the city, rooftop greening technology for the office building is becoming popular in recent years. The long-term observation of radiation balance, soil temperature and heat flux in the CCRH (Climate Change Research Hall) at NIES (National Institute for Environmental Studies) started from the middle of September 2002. Diurnal soil temperature of bare land in fine day was 10 degrees Celsius higher than vegetated part in September and October, and fell rapidly after the sunset. On the other hand, the variation of soil temperature of the vegetated part was small and calm.

Soil temperature on the inclined part was higher than the flat, but the temperature difference between the inclined part and the flat extended from 2.1 degrees Celsius in September to 10.9 degrees Celsius in January at noon, because the effect of solar altitude between the inclined part and flat was obviously shown in winter.

Rooftop greening decreased the surface temperature and the temperature variation, the impact to the air temperature above the vegetated part was smaller than the ordinary building top.

Keywords; Heat island, Radiation Balance, Heat Flux, Rooftop Greening, Sedum

1. はじめに

本研究では、様々な環境保全手法を取り入れて平成 12 年度に建設された国立環境研究所地球温暖化研究棟(4900 m²、3F、RC 構造)において、放射と熱の挙動に関する通年モニタリングを実施し、個別の環境保全技術の環境負荷低減性の比較検討および評価することを目的としている。今回はそのうち、屋上緑化面(セダム植栽)における放射収支観測、地中温度、地中熱貫流を観測して分析することとした。

2. 観測手法

2.1 観測実施場所

観測実施場所は独立行政法人国立環境研究所地球温暖化研究棟(茨城県つくば市小野川 16-2 北緯 36° 02' 53"、東経 140° 07' 27")の屋上緑化面で、建物外観は図 1 に示したとおりである。また観測機器は図 2 に示すように屋上緑化面上に設置した。地球温暖化研究棟の屋上緑化面では斜面部分に植栽したセダム

* 独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Onogawa16-2, Tsukuba-shi, Ibaraki, JAPAN 305-8506

の養生のために、夏期(4月から10月まで)は週3回夜8時から、冬期(11月から3月まで)は週2回朝10時に灌水が実施されているが、センサー設置場所への灌水の直接の影響はない。観測場所は建物屋上のため周囲に遮蔽物などはなく、日の出から日没まで十分な日射量がある。屋上にはセダム類が植栽されているが、その他にもイネ科の一年草が自生しており、夏期にはセダムに優先して繁茂している。

2.2 観測に使用した機器

今回の観測に使用した機器は Kipp&Zonen 社製放射収支計 CNR-1、プリード社製熱電対、Hukseflux 社製熱流計 UT03 で、LSI 社製データロガーBABUC abc(20ch 用)で毎時データを自動記録した。

2.3 観測項目及び設置場所

放射収支計を使用して短波長下向き(全天日射)、短波長上向き(地表面反射日射)、長波長下向き(大気放射)、長波長上向き(地表放射)のそれぞれ4データを観測し、それらからアルベド(短波長下向きに対する短波長上向きの百分率)および正味放射収支量を計算によって求めた。また、地中温度の計測には熱電対を使用し植栽の有無、斜面か平坦かを考慮して表1のような5地点で計測した。熱貫流は植栽の有無を考慮して平坦の2地点に熱流計を設置した。

2.4 観測実施期間及び分析期間

2002年9月17日午前0時より継続的な観測を開始し、現在も進行中である(表2)。今回の分析に使用したのは2002年9月17日より2003年3月31日までの合計で196日間である。なお、隣接するアメダスつくばのデータから1mm以上の雨量を観測した日を雨天日とし、晴天日を抽出した。また、10月18日(32日目)および12月18日(93日目)の日中は草刈のため、12月27日、1月10日・31日にはそれぞれセンサーのメンテナンスを実施したため、作業実施中は観測を停止している。地中温度T3のデータは2月26日から3月28日の分に関し、接触不良と思われる不明瞭なデータとなり信頼性が低いため、この期間の分析からは除外した。

表 1 観測に使用した機器と設置場所

機器名	観測項目名	測定単位	設置場所
CNR-1	短波長下向き(全天日射)	W/m ²	植栽面(T1 直上)
CNR-1	長波長下向き(大気放射)	W/m ²	植栽面(T1 直上)
CNR-1	短波長上向き(地表面反射日射)	W/m ²	植栽面(T1 直上)
CNR-1	長波長上向き(地表放射)	W/m ²	植栽面(T1 直上)
CNR-1	センサー内温度	℃	
熱電対	地中温度 T1	℃	平坦植栽面(Heat Flux 1 同地点)
熱電対	地中温度 T2	℃	斜面植栽面
熱電対	地中温度 T3	℃	平坦植栽面、密生地
熱電対	地中温度 T4	℃	斜面裸地
熱電対	地中温度 T5	℃	平坦裸地(Heat Flux 2 同地点)
UT03	熱流 Heat Flux 1	W/m ²	植栽面(T1 同地点)
UT03	センサー内温度	℃	
UT03	熱流 Heat Flux 2	W/m ²	裸地 (T5 同地点)
UT03	センサー内温度	℃	

表 2 観測期間及び晴天日数(晴天日:アメダスつくばで雨量を観測しなかった日)

月	日数	晴天日数	観測通算日数	備考
2002 年 9 月	14	9	14	17 日から開始
10 月	31	20	45	18 日センサー周辺の小規模な草刈
11 月	30	27	75	
12 月	31	24	106	18 日屋上面全体の草刈、27 日センサーメンテナンス
2003 年 1 月	31	24	137	10 日、31 日センサーメンテナンス
2 月	28	20	165	2/26 から 3/28 まで T3 データ不良
3 月	31	23	196	

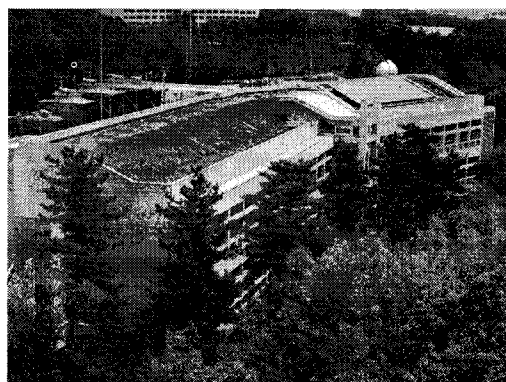


図 1 地球温暖化研究棟全景(2003 年 4 月)

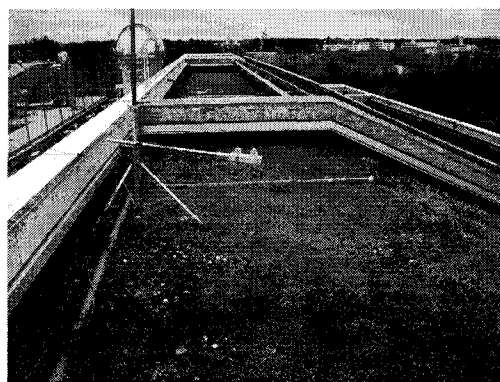


図 2 機器設置状況(左手前は灌水パイプ)

3. 観測結果及び考察

3.1 アイソプレスによる分析

(A) 放射収支計のデータ

アルベド及び正味放射収支量は以下の式によって計算される。

$$\text{アルベド: } \alpha (\%) = \text{Su} / \text{Sd} \times 100 \quad \text{——— (1)}$$

$$\text{正味放射収支量: } \text{Rnet} (\text{W/m}^2) = \text{Sd} + \text{Ld} \cdot (\text{Su} + \text{Lu}) \quad \text{——— (2)}$$

ただし、Sd: 短波長下向き(全天日射) Ld: 長波長下向き(地表面反射日射) Su: 長波長下向き(大気放射) Lu: 長波長上向き(地表放射)である。

図3は屋上緑化面上で観測された毎日の全天日射量と正味放射収支量を全期間に渡ってアイソプレス形式で表示したものである。雨天日が含まれているため、十分な日射量がない雨天日のデータは黒い帯状に示されている。図4は全天日射量と正味放射収支量について、晴天日のデータを各月で平均し図3と同様にアイソプレス形式で表現したものである。正午の全天日射量について見ると、太陽高度の変化に伴って9・10月は約900 W/m²、11・12月は35%減の約600 W/m²、1・2月は約800 W/m²、3月は約1000 W/m²となっている。正味放射収支量も同様に9・10月は約700 W/m²、11・12月は約500 W/m²、1・2月は約600 W/m²、3月は約800 W/m²となっている。

表3は、セダム植栽面におけるアルベド(全天日射と地表面反射日射の比の百分率)をまとめたものである。正午のアルベドはおおよそ14~18%を示し、太陽高度の低くなる朝夕では少々高くなり25%を超える。

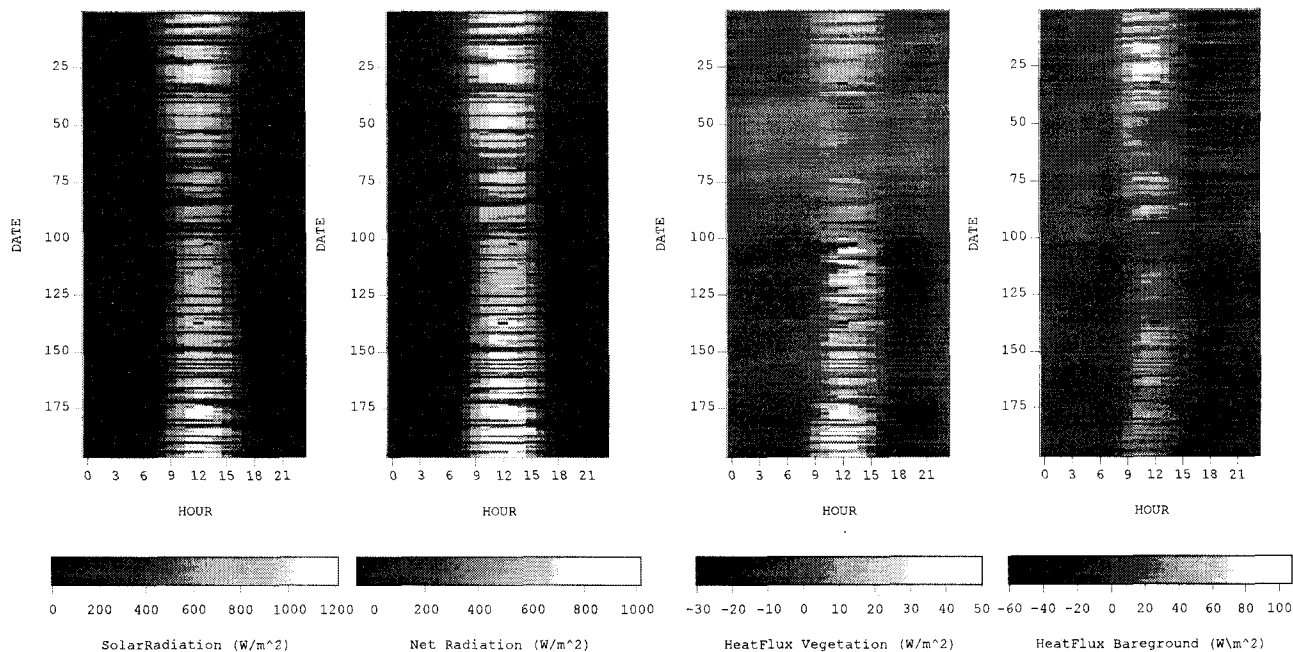


図3 全天日射量(左)と正味放射収支量(右)のアイソプレス
縦軸は通算観測日数、横軸は時刻である。(図7も同様)

図7 植栽の有無による地中熱貫流比較
左: Heat Flux 1 植栽地 右: Heat Flux 2 裸地
(+は下向きの、-は上向きの熱流を示す。)

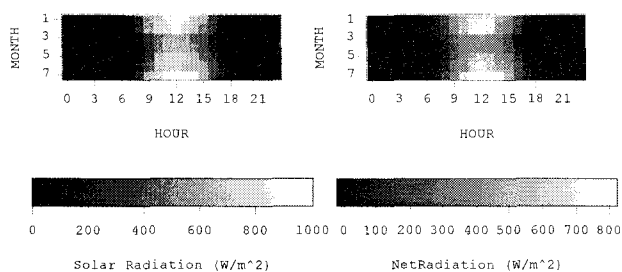


図4 各月晴天日の平均値のアイソプレス
(左: 全天日射量 右: 正味放射収支量)
縦軸: 観測開始からの月数(1: 9月、3: 11月、5: 1月、7: 3月) 横軸: 時刻 (図6、8も同様)

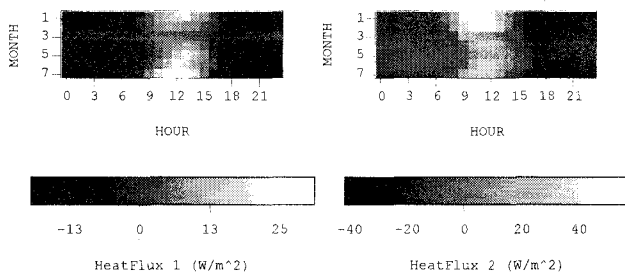


図8 植栽の有無による地中熱貫流のアイソプレス
(左: 植栽地 右: 裸地)+は下向き、-は上向きの熱流を示す。

図6 地中温度差のアイソプレス
(左: 平坦部の裸地 T5と植栽地 T1、右: 裸地の斜面 T4と平坦部 T5)

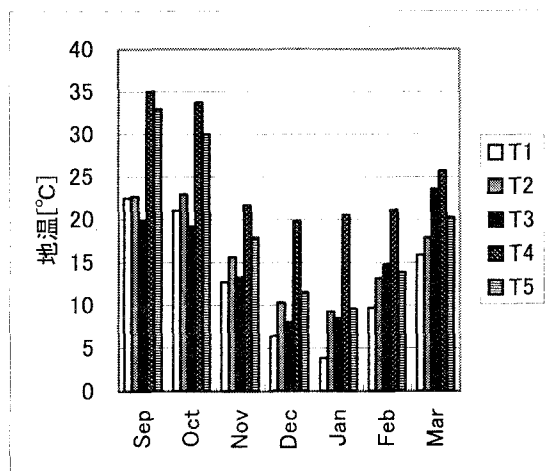


図5 正午における地中温度比較(晴天日平均)

表 3 日中のアルベド(晴天日の平均)

月\時刻	8	9	10	11	12	13	14	15	16
9 月	22%	20%	19%	18%	18%	19%	19%	21%	23%
10 月	22%	19%	17%	16%	17%	17%	18%	20%	24%
11 月	22%	18%	17%	16%	16%	17%	18%	19%	24%
12 月	28%	21%	18%	17%	17%	18%	19%	21%	26%
1 月	26%	20%	18%	16%	16%	17%	18%	19%	23%
2 月	22%	18%	16%	15%	15%	15%	16%	17%	19%
3 月	17%	15%	15%	13%	14%	15%	15%	15%	16%

(B) 晴天日の地中温度データ

図 5 は正午 12:00pm の地中温度の晴天日平均を観測が不調であった 3 月のデータを除き示したものである。全期間を通じて $T_4 > T_5 > T_2 > T_1 > T_3$ の関係が成り立っている。すなわち、地中温度は裸地 > 植栽地 ($T_{4,5} > T_{1,2,3}$) であり、斜面 > 平坦 ($T_4 > T_5, T_2 > T_1$) ということを示している。

図 6 は地中温度に関して植栽の有無 ($T_5 - T_1$)、斜面と平坦の違い ($T_4 - T_5$) を各月の平均値データをもとに示したものである。T5 は平坦部の裸地で図 5 に示したように日中は T1 (平坦部のセダム植栽部分) よりも高い温度を示し、9・10 月には最大で 10℃ 前後、11～3 月でも 4～5℃ 程度高い温度を示した。一方で、9・10 月の日没後から夜間にかけては T5 (裸地) のほうが T1 (植栽地) よりも 2～3.5℃ 低い。T4 は裸地の斜面部で、図 5 に示したように日中は常に T5 (裸地の平坦部) より高い。9・10 月には約 2℃～5℃ 高く、特に、太陽高度が低くなる冬期 (12～2 月) にはむしろ 8℃～12℃ と拡大している。これは平坦部の T5 より斜面部の T4 の方が日射入射角が大きくなり日射量が多くなるためと考えられ、日射量の少ない冬期の方が夏期よりもその影響が大きいくでると考えられる。また、表 4 に示したように地中温度の日較差は植栽部分 (T1) の方が裸地 (T5) よりも小さい。

表 4 晴天日の地中温度の日較差 (℃ T1:セダム植栽部 T5:裸地)

	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月
T1	7.4	9.1	9.5	8.1	8.7	12.8	16.7
T5	20.1	19.1	15.4	13.0	12.4	16.0	21.6

(C) 熱貫流データ

図 7 は屋上緑化面で観測された毎日の熱貫流データを全期間にわたってアイソプレス形式で表示したものである。Heat Flux 1 はセダム植栽面の放射収支計 CNR-1 直下に熱電対 T1 と共に設置し、Heat Flux 2 は裸地に熱電対 T5 と共に設置した。地中温度 (T1、T5) の観測結果と同様に、日中の熱貫流は Heat Flux 1 (植栽部分) の方が Heat Flux 2 (裸地) よりも小さい。

Heat Flux 1 で特徴的なことは、12 月の大規模な草刈後 (観測 93 日目以降) に日中は正の熱貫流 (下向き) が増大し、日没後は Heat Flux 2 と同様の負の熱貫流 (上向き) が顕著に観測される事である (1～3 月)。裸地に設置した Heat Flux 2 では、9・10 月は日中に大量の正の熱貫流が観測され、日没後に急激な負の熱貫流 (上向き) が観測されることが特徴である。11～3 月の期間も同様の傾向であるが数値はそれほど大きくない。この Heat Flux 1 で草刈後に観測された熱貫流の傾向は、雑草が枯れ少数のセダム類が残ったため地表面が裸地と同様になったことが原因と考えられ、3 月には裸地とほぼ同数値で同様の傾向が見られた。

図 8 は晴天日のデータを各月で平均してアイソプレス形式で示したものである。正午の植栽部分(Heat Flux 1)の地中への熱貫流は、9・10 月では 12~19 W/m² で 11 月には 5 W/m² 以下と一旦減少するものの、12 月には約 12 W/m²、1・2 月には 12~20 W/m² で推移しており、3 月には 30 W/m² を超えて裸地に近くなっている。一方で日没後 19 時の上向き熱貫流は、9・10 月ではおよそ 10~12 W/m²、11 月には 3 W/m² 以下と一旦減少するものの、12~2 月には 12~15 W/m²、3 月には 20 W/m² で推移している。

一方で、正午の裸地(Heat Flux 2)の地中への熱貫流は 9・10 月には最大で 55 W/m² と大きく、17 時から 18 時には急激な負の熱貫流(30~40 W/m²)が見られる。冬期にはその数値は小さくなるものの同様の傾向が見られ、植栽部分(Heat Flux 1)よりも常に大きく振幅が大きい。それに対して、植栽部分(Heat Flux 1)における熱貫流は裸地(Heat Flux 2)よりも小さく、振幅が小さい。

上向きの熱貫流は植栽部分で 9・10 月に 17 時から、11~3 月には 16 時から翌朝にかけて観測され、裸地では 9~12 月と 3 月には 15 時から、1・2 月には 16 時から翌朝にかけて観測される。

4. 考察

4.1 日中の地中温度の通年観測結果

(A)日中の地中温度は植栽地よりも裸地の方が高い。なぜなら、植生が繁茂することにより地面に対する直達日射量が少なくなると同時に、土壌水分の蒸発が抑制されるため日中の地中温度は低くなるが、冬期に植生量が減少すると地中温度差は減少する。一方で夜間は裸地のほうが地中温度は低くなる。これは地表面に植生がないため日没後の急速な放射冷却現象により、大気中に放熱するためと考えられる。

(B)日中の地中温度は平坦部より斜面部の方が高い。研究対象地域での南中時の太陽高度は春・秋分では 53 度、夏至では 77 度、冬至では 30 度である。一方で斜面の傾度は 25 度(実測値)あるため、今回の観測期間で秋分または冬至の際の斜面に対する日射入射角は、それぞれ平坦部の夏至または春・秋分の際のそれとほぼ同じとなる。したがって日射入射角の大きい斜面側の地中温度は平坦部よりも高いが、春・秋よりも冬の方がその影響が大きいいため、地中温度の差は冬に拡大する。

4.2 放射特性について

裸地の特性として、日中は地中への熱貫流は大きく地中温度も高い。一方で、日没後は短時間に大量に放熱がなされ地中温度は下がる。特に 9・10 月にはこの傾向が顕著に見られる。植栽地の特徴として、日中の地中への熱貫流は小さく地中温度は低く保たれる。日没後の放熱も緩やかなため周囲の大気への影響は少ないと考えられる。

これらの結果から、セダムを屋上に植栽することにより地表面温度を低下させると同時に、日変化を小さくするため周囲の大気への影響を軽減することが期待できる。

5. 謝辞

本研究は環境省地球環境研究総合推進費「環境低負荷型オフィスビルにおける地球・地域環境負荷低減効果の検証」(代表者：一ノ瀬俊明)の一部として実施された。

6. 参考文献

- 1) H. F. M. ten Berge 著 九州地下水研究会訳(1996): 裸地表面と低大気層における熱と水分の輸送, 森北出版
- 2) 近藤純正(2000): 地表面に近い大気の科学, 東京大学出版会
- 3) 小泉隆(1983): 接地気層の気温変化に及ぼす地表面熱収支の影響, 地理学評論 56-8, 567-578
- 4) 古藤田一雄(1984): 草地の熱収支と蒸発散, 地理学評論 57-9, 611-627
- 5) 成田健一・関根毅(1991): アスファルト舗装面の表面温度と熱収支の解析, 地理学評論 64A-2, 125-137