

セダムを植栽した屋上緑化面における放射収支、 地中熱貫流および地中温度長期観測

新津潔¹・一ノ瀬俊明²

¹非会員 (独)国立環境研究所地球環境研究センターアシスタントフェロー(〒305-8506 茨城県つくば市小野川116-2)

E-mail:niitsu.kiyoshi@nies.go.jp

²正会員 (独)国立環境研究所地球環境研究センター主任研究員(〒305-8506 茨城県つくば市小野川116-2)

E-mail:toshiaki@nies.go.jp

近年都市のヒートアイランド現象が問題となっているが、その解決策の一例として建物の屋上緑化事業が注目されている。セダムを屋上面に植栽したオフィスビルにおいて植栽の有無と灌水が屋上の熱環境に与える影響を把握するために、屋上緑化面上の放射収支、地中熱貫流および地中温度の長期観測を行った。

セダムによる屋上緑化は、建物の表面温度を低下させると同時にその日変化が小さくなるため、日没後の放熱現象が緩やかとなり周囲の空気への影響を軽減することが期待できるが、植生量が減少するとその効果も低下することがわかった。

Key Words : rooftop greening, sedum, radiation balance, soil heat flux, soil temperature

1.はじめに

近年重大な都市問題となっているヒートアイランド現象の解決策として、建物の屋上緑化事業に注目が集まっている。人工地盤上の緑化は荷重に制限があることや地盤下層からの水分補給が難しいことから、乾燥に強く、薄層土壌でも育つセダム類を使用した屋上緑化に注目が集まっている。

植生上の熱収支観測に関しては比較的古くから観測が行われてきた。古藤田¹⁾は水文環境や水資源、あるいは農業の生産性向上のための基礎的資料を構築する観点から牧草地上で放射収支、熱収支、蒸発量の観測を1年間行った。近年では、山本²⁾が屋上緑化の効果を定量的に評価するために、夏期の5日間にセダムの一種であるメキシコマンネングサを軽量人工土壌マットに植栽して熱収支・水収支観測を行い、植生量及び灌水の有無が及ぼす建築物屋上面への熱負荷緩和効果を測定した。その結果、植被率と熱負荷緩和効果は概ね比例関係にあり、その効果は土壌が乾燥しているほど大きかった。また、加藤³⁾は人工地盤上の緑化に必要な土壌中の保水量を測定することを目的として、夏期に薄層土壌に植栽したメキシコマンネングサの土壌水分量、日射量および土中温度の計測を行った。

これらの既往研究では夏期の1ヶ月以内の短期間について観測を行っており、本研究では季節変化を捉える目的で1年を超える長期間の観測を行った。

そこで、セダム類を屋上面に植栽したオフィスビル(国立環境研究所地球温暖化研究棟;RC造 3F)の屋上緑化面上に

において、セダム植栽の有無と灌水が屋上の熱環境に与える影響を把握するために、放射収支、地中熱貫流および地中温度の観測を1年を超える長期間に渡って行った。

2.観測の概要

観測実施場所である屋上面は北側半分の平坦部分と25度の傾斜角度がついた南側半分とにわかれている(図-1)。これは南風が吹送した際に風下側に発生する負圧を利用して建物内へ導風するためのデザインで、今回の観測は主として平坦部分で実施した。観測期間は2002年9月17日から2004年1月14日までの約17ヶ月間485日で、そのうち晴天日(近傍にあるアメダスつくばの観測データから雨量0mm、日照時間5時間以上のどちらの条件も満たす日で抽出した)は230日間となった。なお、2003年5月末まではセダムの養生のためにスプリンクラーによる灌水を実施したが、2003年6月以降は灌水を停止したため、植生量が前年同時期と比較して全体的に減少した状態で観測した。センサー設置部分への灌水の直接の影響はなく、灌水でセンサーが濡れることはなかった。観測場所は建物屋上で南面に面しており周囲に遮蔽物ではなく、日の出から日没まで十分な日射量があった。この屋上緑化システムの特徴は、全体の厚さが50mm程度と薄く土砂が少ないため湿潤時であっても50kg/m²と軽いこと、また乾燥に強い種類のセダムを使用しているため灌水の手間とコストが低減されることがあげられる。

植栽されているのはアルブム(*Sedum Album*)、サカサマン

ネングサ(*Sedum Reflexum*), キリンソウ(*Sedum Kamtschatium*), メキシコマンネングサ(*Sedum Mexicanum*), タイトゴメ(*Sedum Orziholium Makino*), マルバマンネングサ(*Sedum Makinoi*), ツルマンネングサ(*Sedum Sarmentosum*)の7種類で, 混植されている。夏期にはイネ科の一年草が飛来して自生していた。冬期には常緑のサカサマンネングサ, キリンソウ, マルバマンネングサは残ったが, 夏期にもっとも多勢のツルマンネングサは枯死した。

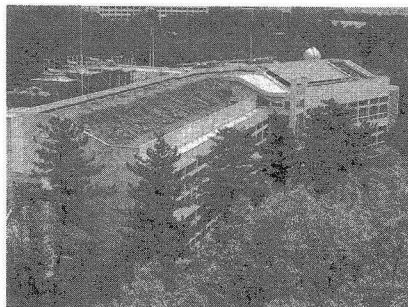


図-1 地球温暖化研究棟外観(2003年4月撮影)

観測に使用した機器は, 短波長・長波長が上下それぞれ個別に計測できる放射収支計(Kipp&Zonen社CNR-1), T型熱電対, 熱流板(Hukseflux社UT03)で, 設置場所にはセダムの有無と, 観測場所の地面が平坦か斜面かという条件を考慮して表-1のように決定して, 設置した(図-2)。観測結果は毎分値を1時間平均したものを分析に使用した。

なお, 地中温度T3は2003年3月以降にセンサー不良のため観測を中止し, T2, T4は観測方法変更のため2003年8月で終了した。さらに観測実施場所でのローカルな気象条件を観測するために, 2003年7月から自動気象観測装置を設置して観測終了時まで気象観測を行った。

表-1 観測項目および設置場所

観測項目	単位	設置場所
放射収支計	W/m ²	平坦セダム植栽地(T1同地点)
地中温度 T1	℃	平坦セダム植栽地(HF1同地点)
地中温度 T2	℃	斜面セダム植栽地
地中温度 T3	℃	平坦セダム密植地
地中温度 T4	℃	斜面裸地
地中温度 T5	℃	平坦裸地(HF2同地点)
熱貫流HF1	W/m ²	平坦セダム植栽地(T1同地点)
熱貫流HF2	W/m ²	平坦裸地(T5同地点)

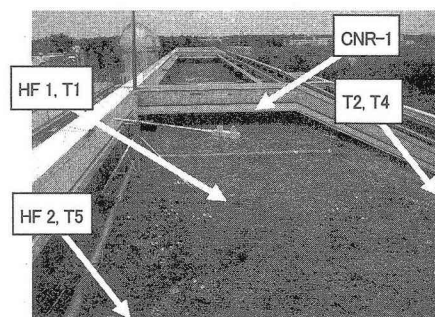


図-2 観測機器設置状況

3.観測結果

(1)放射収支の観測結果

アルベド及び正味放射収支量は以下の式で計算した。

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

$$\text{正味放射収支量: } R_{net} (W/m^2) = Sd + Ld - (Su + Lu)$$

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

a)全天日射量の観測結果

図-3の左図は屋上緑化面上で観測された晴天日の全天日射量(Solar Radiation)を, 右図は正味放射収支量(Net Radiation)を月毎にアイソプレス形式で表示したものである。縦軸が月, 横軸が時刻を表している。アイソプレス形式による表示の場合以下同様である。

晴天日日中の全天日射量の最大値は, 季節変化に伴い暖候期で750~900W/m², 寒候期で500~600W/m²であった。最大値は2003年4月13:00で909W/m²であった。正午の最小値は2004年1月の434W/m²であった。日々の最大値は4月22日12:00に990.7W/m²を記録した。2003年の6月から8月の期間は天候が不順であったため曇天, 雨天が多く, 分析の対象となる晴天日は観測日数の30%以下であった(7月は4日間しかなかった)。正午のアルベドは季節によらず13~18%の範囲内にあり年平均で15%であった。

b)正味放射収支量の観測結果

晴天日の正味放射収支量(以後Rnetとする)の季節変化(図-3の右図)をみると, 正午のRnetは植生量が最も多かった2002年9月には327W/m², 植生量が減少した10月には468W/m²と増加するが, 11月から2003年1月の寒候期は350W/m²前後にまで低下した。2月以降450W/m²を超えるようになり, 3月から8月までは500 W/m²を大きく超える。前年と比較して植生量の減少した2003年9月は441W/m², 10月は398W/m², 11月は352W/m², 12月は298W/m², 2004年1月は245W/m²であった。晴天日日中のRnetの最大値は6月27日11:00に686.7W/m²であった。晴天日正午のRnetについて2年分の観測データのある9月以降1月までを前年同時期と比較すると, 9月は114W/m²増加したが, 10月は

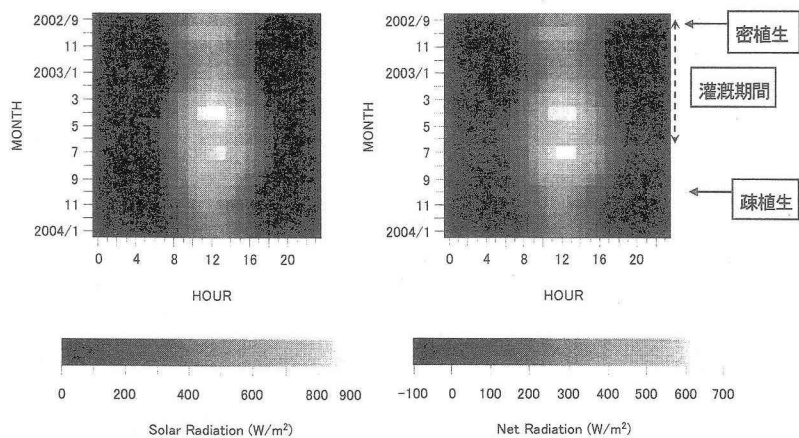


図-3 晴天日の全天日射量(左)と正味放射収支量(右)のアイソプレス比較

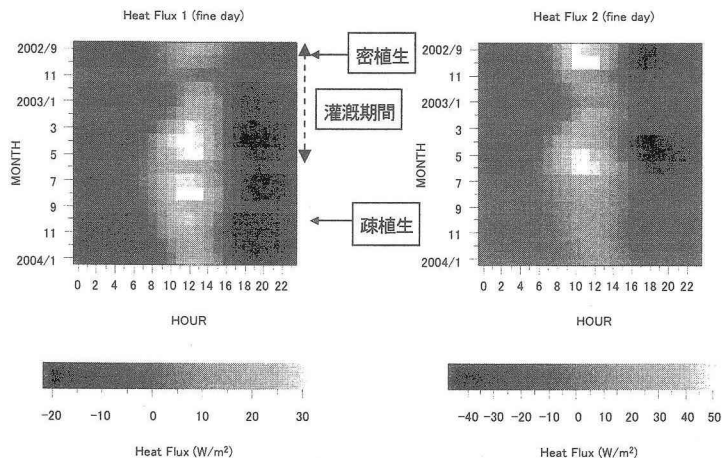


図-4 植栽の有無による地中熱貫流アイソプレス比較(左:セダム植栽地, 右:裸地)

-70W/m²低下し、11月は5W/m²と微増、12月は-8W/m²の微減、1月は-112W/m²の大幅減となった。9月にRnetが35%増加したのは前年と比較して全天日射量が27%多かった上に、植生量が大幅に減少したためと考えられる。逆に10月と1月で大幅に減少したのは植生量が減少したにもかかわらず、全天日射量が10月に10%、1月に27%と大幅に減少したためであると考えられる。

ところでRnetの正午の月平均値は、天候が不順となった2003年6月から8月の曇天・雨天日を含めた月平均では400W/m²以下と低く、特に晴天日が4日間しかなかった2003年7月は326W/m²しかなかった。

一方、夜間のRnetは年間を通じておよそ毎時-100~-10W/m²の範囲内にあるが、地中温度の高い暖候期には毎時-50~-10W/m²の範囲内であった。

晴天日のRnetの日最大値は暖候期に550~650W/m²で、

寒候期には300W/m²前後であり、暖候期の方が大きくなった。最大値は2003年6月の13:00で640W/m²であった。晴天日日没後の毎時のRnetは、気温と地中温度が低く日中のRnetが少ない時期でも-100~-70W/m²を記録するのに対して、気温と地中温度が高く日中のRnetの多い暖候期では-40~-20W/m²と小さくなった。

(2)地中熱貫流観測結果

図-4は晴天日の観測結果をアイソプレス形式で示したものである。図中明色で示される正の数値は土中に埋設したセンサー一面に対して下向きの、暗色で示される負の数値は上向きの熱貫流を示している。正午のセダム植栽地HF1(図-4の左図)の下向き熱貫流は、2002年9月、10月では12~20W/m²で11月には5W/m²程度と一旦減少するものの、12月から2003年2月の期間では12~23W/m²、3月以降は35W/m²を超えて同時期の裸地(HF2)に近くなった。

40W/m²を超えるような最大値は地中温度が高くなってくる2003年4月から8月の期間に発生し、その最大値は51.9W/m²(2003年8月11:00)であった。

一方で日没後19:00の上向き熱貫流は、9月、10月では10～13W/m²、11月には4W/m²以下と一旦減少するものの、12月から2003年2月の期間には15W/m²前後となり、3月以降は20W/m²を超えた。地中温度が高くなると7月に最大値30.4W/m²を示した。このように日中の下向き熱貫流と日没後の上向き熱貫流の大小は対応する関係にあった。全期間を通じた日々の最大値は下向きの地中熱貫流が82W/m²(2003年7月23日12:00)、上向きの地中熱貫流で64.7W/m²であった(2003年7月11日18:00)。

裸地(HF2)の正午の地中への下向き熱貫流は2002年10月には56.7W/m²と最大で、それに対応して夕方(17:00)には上向きの熱貫流(43.8W/m²)が見られた。地中温度が低下する11月から2003年3月の期間には日中の下向き熱貫流は小さくなるものの、セダム植栽地(HF1)よりも常に大きく1日の振幅が大きい。下向き熱貫流の最大値は地中温度が高くなる2003年6月の10:00～12:00で60～65W/m²であった。一方日没後の上向き熱貫流は地中温度が高い時期には日没前後の時間に大量に観測され、翌朝まで継続した。全期間の日々の最大値は下向きの地中熱貫流が140.6W/m²(2003年6月27日11:00)、上向きの地中熱貫流で87.4W/m²であった(2003年5月1日18:00)。

このように、植栽地、裸地それぞれで日中は下向きの熱貫流(図中明色)が観測されたが、裸地の方が日々の観測値で最大約5倍大きくなった。日没後はいずれも上向き熱貫流(放熱現象:図中暗色)が観測されたが、裸地の方が植栽地より急激で大きく、植栽地は緩やかで小さかった。また、前年同月と比較して植生が疎になると、植栽地と裸地との明瞭な差異は見られなくなった。

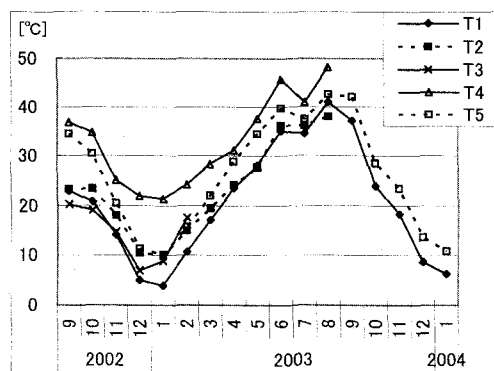


図-5 正午の地中温度比較(但しT3は2003年2月まで、T2、T4は2003年8月まで)

(3)地中温度観測結果

a)晴天日正午の地中温度比較

図-5は晴天日正午の地中温度を示したものである。但しT3に関してはデータの信頼性のある2003年2月まで、またT2、T4はセンサー移設のため2003年8月までを示してある。最も地中温度が高いのはT4(斜面の裸地)でありT5(平坦面の裸地)やT2(斜面のセダム)よりも高い。また、T1(平坦面のセダム)はT5(平坦面の裸地)より低く、2003年8月を除いたほとんどの時期でT2(斜面のセダム)より低い。すなわち同時刻の地中温度は、裸地>セダム植栽地(T4,T5>T1,T2,T3)であり、斜面>平坦面(T4>T5,T2>T1)であった。最暑期8月の正午の地中温度を比較すると斜面の裸地T4は48.3℃、平坦面の裸地T5は42.6℃、平坦面のセダム植栽地T1は41.0℃、斜面のセダム植栽地T2は38.0℃であった。

b)地中温度と場の気温との比較

図-6の左図は晴天日の平坦セダム植栽地T1の地中温度と場の気温との差をアイソプレスで表現したものである。図中で暗色部分が示しているように2003年7月、8月、9月の午後には明瞭な温度差があり、13:00～18:00に10℃～13℃地中温度の方が気温より高くなった。一方で7:00、8:00には逆に気温の方が1～2℃高くなっている。10月の午後は4～7℃高く、11月～1月の午後は1～2.5℃高くなった。夜間の地中温度はセダム植栽地の場合でも気温より高く、気温より低くなるのは明け方日の出前である。右図は同様に晴天日の平坦裸地の地中温度T5と場の気温との差をアイソプレスで表現したものである。暗色部分が示しているように7月～10月の暖候期の午後には明瞭な温度差があり、11:00～18:00に10～16℃地中温度の方が気温より高くなっている。一方で明け方7:00～9:00には逆に気温の方が1～3℃程度高くなった。地中温度T5は11月～1月の午後には1～2℃高くなったが、夜間から早朝、午前には逆に気温の方が1～4℃高くなった。

c)セダム植栽の有無による比較

図-7はT5(平坦の裸地)とT1(平坦のセダム)の晴天日の地中温度を比較したアイソプレスである。図中の暗色部分は裸地の方がセダム植栽地よりも地中温度が高いことを示しており、逆に明色部分はセダム植栽地の地中温度の方が高いことを示している。

裸地T5はセダム植栽地T1と比較して日中は高い地中温度を示す。しかし、日没時刻以後は逆にT5の方が低くなり、翌日の日の出前に温度差が最大となることが多い。

2002年の9月は天候がよくセダムやその他の植物が多く繁茂していたため、2003年の同時期と比較して日中のT5とT1の地中温度差は12℃と大きく、夜間の逆転現象も4℃と顕著に見られた。2002年10月から翌年6月の期間でも日中に5、6℃の温度差が観測されているが、夜間の逆転現象は1℃程度と明瞭ではない。2003年7月～9月の天候不順の時期には日中の温度差も小さく、夜間の逆転現象もほとんど見られない。植生が減少した2003年10月以降は日中に最大で5℃程度の温

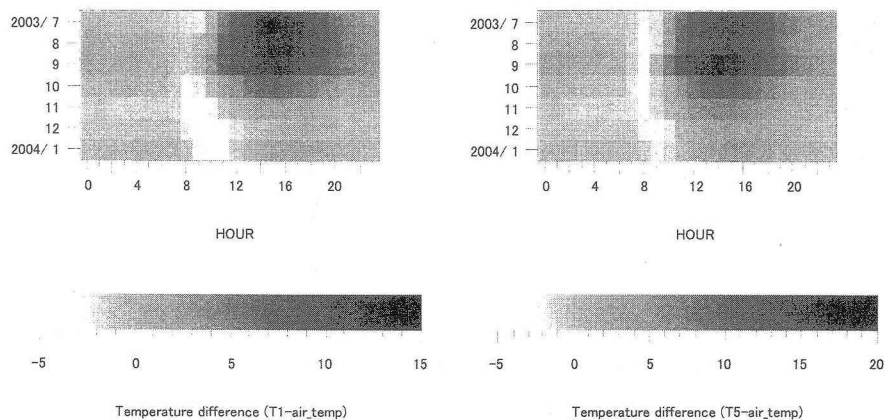


図-6 晴天日の地中温度と外気温との比較(左:T1平坦セダム植栽地, 右:T5平坦裸地)

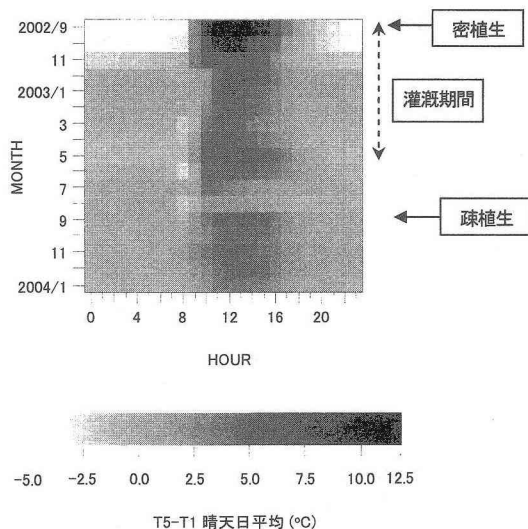


図-7 平坦裸地T5と平坦セダム植栽地T1の地中温度比較

表-2 晴天日の地中温度の日較差 (単位℃ T1:平坦セダム T2:斜面セダム T3:平坦セダム密植地 T4:斜面裸地T5:平坦裸地)

	2002				2003												2004
	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1
T1	8.3	10.6	11.5	9.2	9.0	15.5	18.2	19.3	18.9	19.6	18.4	20.0	18.5	15.1	10.8	9.7	8.9
T2	10.0	14.8	18.6	16.2	15.1	20.3	21.4	21.0	20.3	22.1	19.0	14.9					
T3	5.4	8.2	13.2	11.2	13.7	21.1											
T4	22.7	24.1	22.1	26.2	22.4	25.2	27.1	27.1	28.4	29.2	27.3	31.7					
T5	22.6	21.7	18.8	14.3	12.7	19.4	23.8	24.0	26.2	24.7	19.5	21.8	23.8	19.1	14.9	13.8	11.8

度差が見られるが、夜間の逆転現象は見られなかった。

T5とT1の日中の最大温度差は2002年9月20日12:00の14.7℃であった。夜間の地中温度の逆転現象はT5で放射冷却現象が発生しやすい地中温度の高い時期に見られるが、

その最大値は2003年6月21日8:00で7.3℃であった。

地中温度の日変化

表-2は晴天日の地中温度の日較差を各月の平均値で示したものである。セダム植栽のあるT1, T2, T3の方が裸地

T4, T5よりも日較差が小さいことがわかる。特に植物が繁茂していた2002年9月, 10月では最も日較差が小さいのは平坦セダム密植地T3で, 次に平坦セダム植栽地T1, 斜面セダム植栽地T2の順である。一方裸地の方は斜面, 平坦ともに日較差が大きい。

ところが冬期に冬枯れで植生が減少したり, 灌水を停止して植生が減少するとセダム植栽地でも日較差が大きくなり, 裸地とほぼ同じ結果となった。

4.結論

1年以上にわたるセダム植栽の屋上緑化面の長期観測結果から, 晴天日に関して以下のような成果が得られた。

日中の正味放射収支量は暖候期には概ね400～600W/m²の範囲内にあり, 寒候期では300W/m²前後となった。夜間の正味放射収支量は通年で-100～-10W/m²の範囲内にあるが, 地中温度の高い暖候期には-50～-10W/m²の範囲内であった。正午のアルベドは季節によらずおよそ15%で, 一般的な草地の観測結果と同等であった。

地中熱貫流の観測結果から, 植栽地, 裸地それぞれで日中は下向きの熱貫流が観測されたが, 裸地の方が最大で約5倍大きくなった。日没後は上向き熱貫流(放熱現象)が観測されたが, 裸地の方が植栽地より急激で大きく, 植栽地では緩やかで小さかった。植生が疎になると, 植栽地と裸地との明瞭な差異はなくなった。

植栽地の地中温度は, 日中は裸地よりも低く(最大で約15℃), 夜間は逆に高く(約4～6℃)になったが, 植生が疎になると温度差は減少した。夜間に植栽地と裸地の地中温度が逆転するのは, 地中熱貫流の観測結果に見られるように, 裸地で日没後に放射冷却現象が発生して地中の熱を急速

かつ大量に大気中に放熱し, 地中温度が植栽地よりも低下するためと考えられる。一方で植生が疎となった観測期間の後半には, 植栽地と裸地の地中温度差は縮小した。地中温度の日較差は裸地よりも植栽地の方が小さく, 日変化は緩やかであった。

これらの結果から, セダムによる屋上緑化は建物の表面温度を低下させると同時に日変化が小さくなるため, 日没後の放熱現象が緩やかとなり周囲の大気への影響を軽減することが期待できるが, その効果は植生量に大きく依存する結果となった。

謝辞:本研究は環境省地球環境研究総合推進費B-56「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。

参考文献

- 1) 古藤田一雄: 草地の熱収支と蒸発散, 地理学評論, 57(Ser.A)-9, pp.611-627, 1984
- 2) 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
- 3) 加藤泰子, 山本聡, 石田均, 前中久行: 土壌水分および日射量測定に基づく薄層土壌の必要保水量について, ランドスケープ研究64(5), pp.541-544, 2001

LONG-TERM OBSERVATION OF RADIATION BALANCE, HEAT FLUX AND SOIL TEMPERATURE AT ECO-BUILDING WITH ROOFTOP GREENING OF SEDUM

Kiyoshi NIITSU and Toshiaki ICHINOSE

The authors had a long-term observation of radiation balance, heat flux and soil temperature at an eco-building for 17 months to evaluate the effect of mitigation of rooftop greening of Sedum for thermal environment. Diurnal net radiation above the vegetation was between 400 ~ 600 W/m² in warmer season and about 300 W/m² in winter. Nocturnal net radiation was between -100 ~ -10 W/m² throughout the year, and it was between -50 ~ -10 W/m² especially in warmer season. Albedo of Sedum was always about 15%, equal to grass at noon.

Diurnal heat flux of bare land penetrating into the ground was 5 times larger than Sedum, and it was radiated back to the atmosphere after the sunset. Diurnal soil temperature under Sedum was 15 degrees in Celsius lower than bare land, however nocturnal soil temperature under Sedum was 4 to 6 degrees in Celsius higher than bare land during the night. Because there were covered with vegetations of Sedum, radiative cooling didn't occurred there. Meanwhile, radiative cooling did occurred in the bare land. These effects was depending upon the total amount of vegetation.