

常緑キリンソウを用いた屋上緑化基盤の 熱収支特性変化の解析

山田 宏之¹・大塚 麻理子²・平川 裕麻³

¹非会員 大阪府立大学大学院教授 生命環境科学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1)

E-mail: yamada@envi.osakafu-u.ac.jp

²非会員 大阪府立大学 生命環境科学部 (〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1)

³非会員 オー・ジー株式会社 大阪支店営業第一部 (〒532-8555 大阪府大阪市淀川区宮原4-1-43)

本研究は、常緑キリンソウとメキシコマンネングサを植栽した薄層緑化基盤を屋上に設置し、それらの熱収支特性を2年間に渡って測定することにより、被覆率や水分量が変化した場合の熱収支特性の変化を検証することを目的として実施した。日中の積算蒸発散量を比較すると、マンネングサ区において、キリンソウ区の1.01~1.10倍の蒸発散が認められた。基盤底部の伝導熱に関しては、乾湿に関わらず大幅な低減が認められた。両植栽区とも、被覆率が高く湿潤な状態ではヒートアイランド緩和効果があるが、潜熱、伝導熱いずれで比較してもマンネングサ区の方が効果的であるという結論になった。しかし、乾燥が進むと両植栽区とも対照区の顕熱量を上回り、ヒートアイランド現象をより悪化させる可能性が示唆された。

Key Words : green roof, heat flux, temperature, *Sedum mexicanum*, *Phedimus aizoon*

1. はじめに

過去100年間に於いて日本の平均気温は約1.0℃、大都市では約2.5℃上昇していると言われている。東京においては約3.0℃上昇しており、ヒートアイランド化が顕著である¹⁾。ヒートアイランド化に伴う熱中症の増加や、光化学オキシダントの生成促進、都市型集中豪雨の発生なども指摘されており、対策が求められている。

都市部におけるヒートアイランド現象を緩和するための対策として、屋上緑化や壁面緑化への期待は高い。屋上緑化では、耐乾性に富み、薄層の土壌層においても生育が可能であることから、多肉植物のセダム類を用いた緑化が多く行われている²⁾。国土交通省が実施した平成12~17年の6年間の屋上緑化の施工実績に関する調査では、約30%がセダム類主体の屋上緑化であることが分かっている³⁾。

しかしながら実際の屋上緑化の現場では、セダム類の枯損問題やヒートアイランド緩和材料としての不適切論など、緑化用資材としての適性に関する厳しい見方も多くなってきている。また、植栽当初と比べ、植栽後2年目以降に植物被覆率が大きく低下することも多く、景観性のみならず、ヒートアイランド緩和効果の低下も懸念

される。

本研究では、従来から広く用いられている代表的なセダム属植物であるメキシコマンネングサと、近年、セダム属植物の代わりに用いられる事例が増えつつある常緑キリンソウを取り上げ、これらを植栽した薄層緑化基盤を大学棟屋上に設置し、それらの熱収支特性等を2年間に渡って調査測定することにより、ヒートアイランド現象の緩和効果を比較するとともに、メキシコマンネングサ及び常緑キリンソウの被覆率や水分量が変化した場合の熱収支特性の変化を検証し、これらを用いた緑化の有効性について考察を行う。

2. 研究方法

(1) 植物材料

a) メキシコマンネングサ (*Sedum mexicanum* Britton)

古くから緑化に用いられているベンケイソウ科セダム属の多年草である。乾燥や高低温、塩害、アルカリ性に強いとされ、荒地に自生することが可能であるため、屋上を緑化するのに適しているとされる。本種はCAM型の光合成を行う。CAM型光合成は昼間の気孔閉鎖により体内水分の消費を抑制し、日中の光合成に必要なCO₂

は夜間に吸収または呼吸のリサイクルにより得るという反応系を有する。このため概ね気温25℃以上で気孔を閉じ、植物の蒸散作用による冷却効果が得にくいとされている。いくつかの自治体では、メキシコマンネングサを含むセダム属植物を用いた屋上緑化がヒートアイランド現象の緩和に有効ではないとして³⁾⁴⁾⁵⁾、助成対象から外している。

b) 常緑キリンソウ (*Phedimus aizoon* cv.)

ベンケイソウ科キリンソウ属の多年草である。日本産のキリンソウの品種選抜により、都市緑化に適した植物として2008年頃から市場に登場した。メキシコマンネングサと同様に乾燥や高低温、塩害、アルカリ性に強く、さらに常緑であることから、屋上緑化に適した植物として近年、導入例が増加している。常緑キリンソウは、通常の植物と同じC3型の光合成と、CAM型の光合成を使い分けるとされる(誘導型CAM型光合成)。このタイプの植物は、水分の豊富な状態では気孔を開きC3型の光合成を行うが、水分が不足している状態では気孔を閉じCAM型の光合成を行う。そのため、過湿な場所でも過乾燥な場所でも生育することができ、夏季においても蒸散量の低下が少ないとされている。

しかし、メキシコマンネングサに関しても、条件によっては誘導型CAM型光合成を行うという研究報告がある⁶⁾。常緑キリンソウが実際に屋上緑化に用いられるようになってから日が浅いため、メキシコマンネングサ等と比べて、どの程度の優位性があるのかについては、ほとんど調べられていないのが現状である。

(2) 植栽基盤

メキシコマンネングサを植栽したマンネングサ区と、常緑キリンソウを植栽したキリンソウ区を設けた。実際に屋上緑化に用いられている薄層植栽基盤(A社製)をそれぞれ8セット、計16セットを大阪府立大学生命環境学部棟(4階建)屋上に2012年5月に設置した。容器は490mm×490mm×70mmのエンジニアプラスチック製である。植栽基盤材料としては、上層がマルチング(火山砂利)、下層が人工軽量土壌(A社製)の2層構造となっており、土壌全体の厚さは約70mmである。これはA社が実施する薄層基盤型屋上緑化の標準的な仕様である。植栽基盤の概略構造図を図-1に示す。植栽作業および初期養生はA社圃場においてA社の技術者が行い、実際に屋上緑化用に出荷されている状態を完全に再現した。大学屋上に設置後は、以下のような条件で維持管理作業を行った。まず、実験期間中において、1週間連続して降雨がなければ1回だけ手動散水装置を用いて十分に灌水を行った。降雨があった場合には灌水を行わない。除草は適宜行うが、刈込等の剪定作業と施肥は2年間、一切行っていない。

これらの比較対照区としては、無処理の屋上面を用いて温度等の測定を行った。

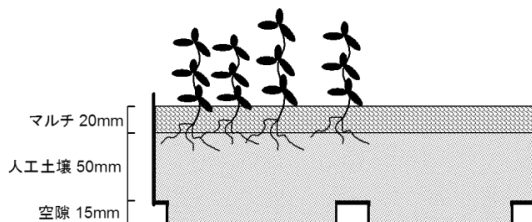


図-1 植栽基盤断面構成図

(3) 植物被覆率の計測

2012年6月より植物の成育期間中、1ヶ月に1度の頻度で、マンネングサ区およびキリンソウ区のそれぞれの代表の植栽基盤を写真撮影した。それらの写真をPCに取り込み、Photoshopを用いて植物被覆部を抽出し植被率を算出した。その際、1枚の写真につき3回同様の操作を行い、その平均を植被率とした。

(4) 温度・熱の計測

灌水(あるいは降雨)からの経過日数と共に、熱収支特性や葉面温度がどのように変化するかという点を中心に測定を行った。

2012年の主要な計測は2012年8月7日～11月2日に行った。そのうち、8月12日、9月12日、17日、22日、27日、28日、10月29日、30日、11月2日に蒸発散量の計測を行った。2013年の主要な計測は2013年7月11日～10月11日に行った。そのうち、8月12日、27日、9月10日、11日、12日、23日、25日、26日、27日に蒸発散量の計測を行った。

測定項目は純放射量、伝導熱流量、葉面温度、屋上表面温度、蒸発散量の5項目である。

マンネングサ区、キリンソウ区、対照区のそれぞれにおいて、植物被覆面あるいは屋上表面から高さ500mmの位置に純放射計(NR-Lite: Kipp & Zonen)を設置し、純放射量を測定した。また、緑化区においては、土壌表面から下30mm、および土壌底部の2地点に自記温度計(DATA mini 9631: HIOKI)の温度センサーを設置し、底部には熱流板(HFP-01: Hukseflux)を設置した。

対照区においては、コンクリートで熱流板の周囲を固めて作成した熱流計測装置を、塗膜防水が施された屋上表面に隙間がないように密着させて設置した。

葉面温度については、キリンソウ区では葉面上に小型ラグセンサーを密着し、1枚当たりの葉面積の小さいマンネングサ区においては、葉群の中にセンサーを差し込み測定を行った。対照区においては、屋上表面にセンサーを固着して計測を行った。

純放射量、伝導熱流量、葉面温度、地表面温度、土底温度についての計測は、10分毎に自動計測で行った。

蒸発散量については、電子天秤（HV-15KGL: A & D）を用いて重量変化から求めた。屋外においては、風や温度変化の影響により計測精度が著しく悪化するため、全て計測時にのみ植栽基盤を載せて、その都度、目視で計測状況の安定性を確かめた上で計測を行った。

計測方法としては、1時間に1度の測定を行ったものと、1日2度重量を測定し、その間の重量の変化の過程を観測したものの2種類がある。なお、重量計測は、降雨後あるいは灌水を行ってから6時間以上が経過し、十分に重力水が抜け落ちた後で行った。計測の際、植栽基盤4枚の重量測定を行い、その平均値を算出して解析に用いた。

上記の測定項目以外に、日射量、降水量および気温のデータを使用した。日射量は4成分放射収支系（MR-40, Eko）降水量は転倒枡雨量計、気温は温湿度計（HMP50AC, Vaisala）によって測定されたものである。

(5) 熱収支特性の解析

屋上緑化の効果を定量的に評価するために、熱収支特性の解析を行う。用いた熱収支式⁸⁾を以下に示す。

$$R_n = H + IE + G \quad \dots\dots\dots \text{式1}$$

（ R_n ：純放射， H ：顕熱， IE ：潜熱， G ：伝導熱）

潜熱（ IE ）に関しては、植栽基盤の重量変化から蒸発散量を算出する。この蒸発散量と葉面温度に応じた水1g当たりの蒸発潜熱の換算係数を用いて潜熱を算出した。計算で求めた潜熱量と、測定によって求められた純放射量および伝導熱流量から、式1より差分により顕熱量を算出した。

なお、対照区については、蒸発量0と仮定して計算を行っている。また、植物群落や土壌層での熱の貯留は0、光合成による太陽エネルギーの減少量も0と設定している。

また、潜熱に対する顕熱の比をボーエン比（ β ）といい、以下のように表される⁹⁾。

$$\beta = H / IE \quad \dots\dots\dots \text{式2}$$

蒸発量から求めた潜熱と、式1によって求められた顕熱から、式2よりボーエン比を算出し、一般的な緑地などとの値と比較を行った¹⁰⁾。

3. 研究結果および考察

(1) 植物生育の季節変化と被覆率

2012年と2013年の被覆率の変化を写真-1および図-2に示す。2012年のマンネングサ区は、植栽基盤を設置した6月の時点で被覆率は37%であったが上昇を続け、10月には91%となり、全観測期間を通じて最大の被覆率となった。植物体は10月上旬頃から全体的に黄化し、11月下旬頃には地上茎の多くが枯れ始めた。冬季には地際部の萌芽を残して、当年生の地上茎は枯れた状態となった。

キリンソウ区は、6月の被覆率は64%とマンネングサ区よりも高い状態であった。しかし、7月に63%、8月に61%と変化が少なかった。9月には52%と大きく減少した。この頃、一部の葉や茎が枯れ始めている状態が観察され、植物体の衰弱あるいは萌芽更新が原因であると考えられる。10月には54%となり、僅かながら上昇がみられた。これは、茎部からの新芽が成長を始め、葉数が増加したことによるものである。その後、当年葉の枯損が進み、被覆率は徐々に低下したが、メキシコマンネングサのように全て枯れてしまうことは無かった。

2013年のマンネングサ区の被覆率は、5月に18%、6月に最低の14%となった。その後、上昇を続け、10月には46%となった。9月の台風による大量の降雨以降に急激に被覆率が増加したが、それ以前は被覆率が土壌面の1/4にも満たないような状態が続いた。被覆率は10月に最大に達したが、2012年と同様、11月下旬頃には枯れ始めて減少した。

キリンソウ区の被覆率は5月に32%、6月に31%、7月に43%、8月に44%、9月に39%、10月には33%となった。マンネングサ区ほど極端ではないが、キリンソウ区においても被覆率の低下は顕著であり、更に、8月を過ぎた頃から急激な減退を見せた。これも2012年と同様に、当年葉の枯損が進んだためであり、同時に新芽の発生が認められている。これは常緑キリンソウの生物季節現象の一環であると考えられるが、まだ気温が高い9月中から落葉が始まるため、ヒートアイランド対策のための緑化用としては欠点となる可能性がある。

植栽2年目の被覆率は、年間を通した平均値でメキシコマンネングサは前年度の約39%、常緑キリンソウは約65%の被覆率に止まった。

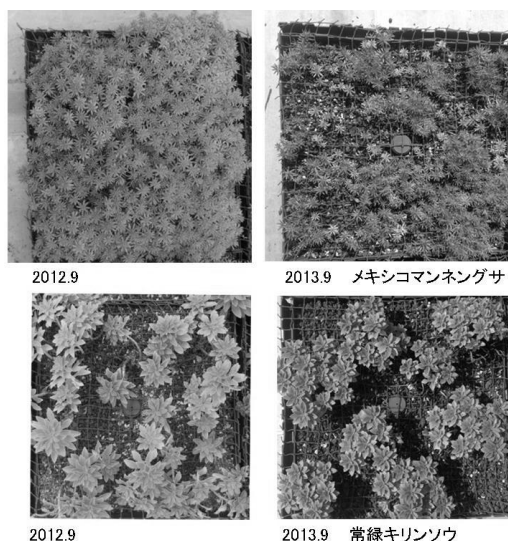


写真-1 2012年、2013年9月の植物被覆状況

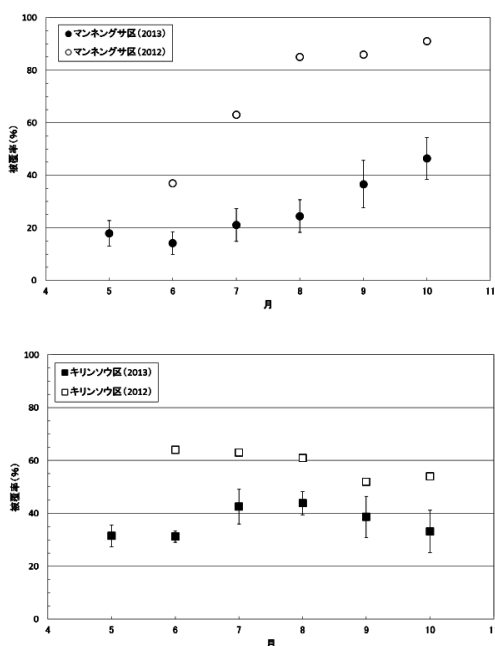


図-2 メキシコマンネングサ (上) と常緑キリンソウ (下) の被覆率変化 (縦棒は標準偏差を示す)

(2) 熱収支特性の比較

a) 潜熱量

土壌が湿潤状態にあると考えられる2012年8月12日(灌水後1日目)の1時間毎の蒸発散量の測定結果を図-3に示す。変動パターンは良く似ており、両区間に大きな差異は無い。これと同様に湿潤状態であると考えられる灌水後1~2日目の測定結果を比較すると、マンネングサ区では、8月12日は、9月12日(灌水後1日目)や9月17日(灌水後2日目、図-4)と比べて蒸発散量は少なかった。日射量や気温、植被率については各日において大きな差異はなかったが、8月のマンネングサ区の状態は、鮮やかな緑色をしていた7月や9月と比べて植物体が少し黄化しているのが観察された。植物が衰弱していたために蒸散量が9月よりも少なくなった可能性が高いと考えられる。また、10月29日(灌水後1日目)や10月30日(灌水後2日目)は、積算日射量が小さく、夏季と比べて蒸発散量は減少した。

キリンソウ区では9月12日、17日は、8月12日と比べて蒸発散量は少なくなっており、マンネングサ区とは逆となった。8月上旬において、キリンソウ区の植被率は9月から低下しており、植物体が衰弱したために蒸散量が少なくなった可能性が高いと考えられる。また、マンネングサ区と同様に、10月29日、30日は、8月と9月と比べて蒸発散量は減少した。

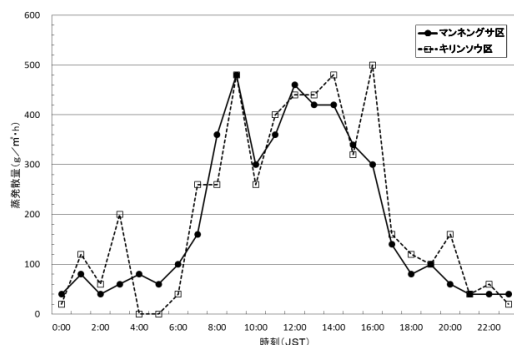


図-3 2012年8月12日の蒸発散量変化

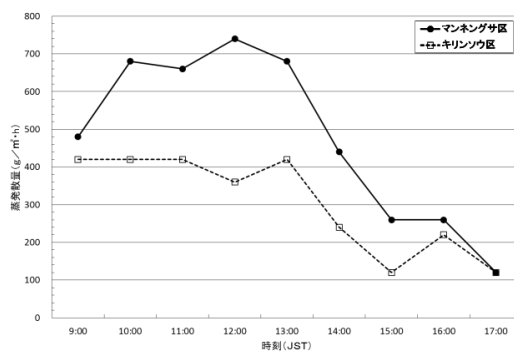


図-4 2012年9月17日9:00-17:00の蒸発散量変化

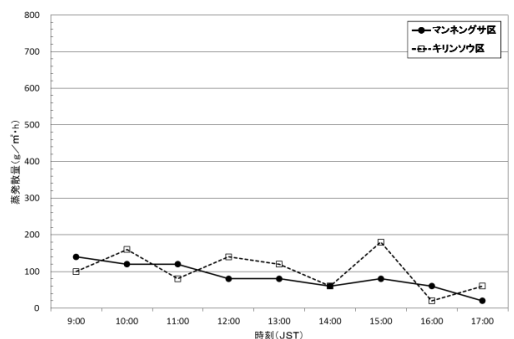


図-5 2012年9月28日9:00-17:00の蒸発散量変化

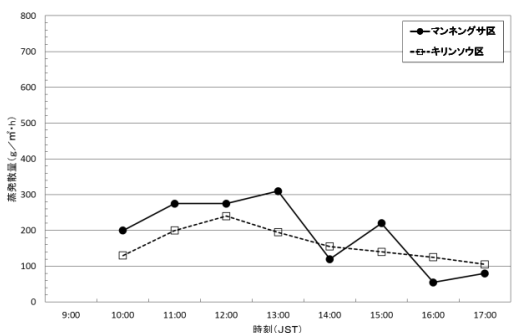


図-6 2013年8月4日10:00-17:00の蒸発散量変化

灌水後4～5日目には、マンネングサ区、キリンソウ区ともに蒸発散量が著しく減少した。9月28日（灌水後5日目）の測定結果を図-5に示す。また、被覆率が低下した2013年8月4日（灌水後1日目）の測定結果を図-6に示す。灌水後1日目であるにも関わらず、2012年の灌水後5日目に近い値まで蒸発散量が減少している。

日中（9～17時）の積算蒸発散量を比較すると、2012年8月と10月には、キリンソウ区がマンネングサ区を僅かに上回っていた。一方、9月には、マンネングサ区がキリンソウ区を上回る傾向が認められた。蒸発散量の最大値は、マンネングサ区で4320 g/m²、キリンソウ区で2740 g/m²であった。この積算蒸発散量から換算した積算潜熱量を図-7に示す。全データの平均では、マンネングサ区がキリンソウ区の1.10倍の積算潜熱量を示した。

この中で、積算日射量が近い9月12日、17日、27日、28日の潜熱量を比較する。各日の積算日射量はそれぞれ、17.8 MJ/m²、16.3 MJ/m²、17.4 MJ/m²、16.9 MJ/m²であった。

灌水後1日目の9月12日において、マンネングサ区ではキリンソウ区の1.65倍の潜熱の発生が認められた。時刻別に見ても、ほぼ全ての時間帯でマンネングサ区がキリンソウ区の値を上回っていた。潜熱フラックスの最高値は、マンネングサ区で429 W/m²、キリンソウ区で227 W/m²であった。灌水後2日目の9月17日についても同様の傾向であり、マンネングサ区ではキリンソウ区の1.58倍の潜熱の発生が認められた。

灌水後4日目の9月27日においては、潜熱量は大幅に減少した。2つの植栽区の間に大きな差異はみられず、積算潜熱量は、マンネングサ区で3.26 MJ/m²（9月12日の約34%）、キリンソウ区で3.26 MJ/m²（同56%）であった。

灌水後5日目の9月28日においては、さらに潜熱量が減った。積算潜熱量は、マンネングサ区が9月12日の約19%、キリンソウ区が約38%となった。

このように両区を比較すると、湿潤な状態ではマンネングサ区の方がキリンソウ区よりも潜熱量が多いが、乾燥してくると両区の間に大きな差はなくなる傾向がみられた。また、マンネングサ区についても、湿潤状態にある場合の蒸発散量は多く、飯島(1996)⁹が指摘しているように、誘導型CAM型光合成を行っている可能性が高いと考えられる。

同様に、2013年の蒸発散量の測定結果から換算した積算潜熱量を図-8に示す。全データの平均では、マンネングサ区がキリンソウ区の1.01倍の積算潜熱量を示した。全体に2012年と比べると潜熱量が大きく減少していることが分かる。また、キリンソウ区の方が、経過日数に伴う潜熱量の減少幅が大きい傾向にある。これは、植物の蒸散特性によるものとも考えられるが、2013年においては被覆率が小さいため、土壌面蒸発の差が大きく現れた可能性もあり、確定できない。

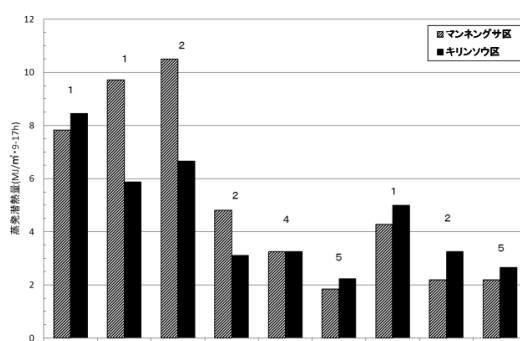


図-7 2012年の積算潜熱量の比較

※図中の数値は散水後の経過日数を表す

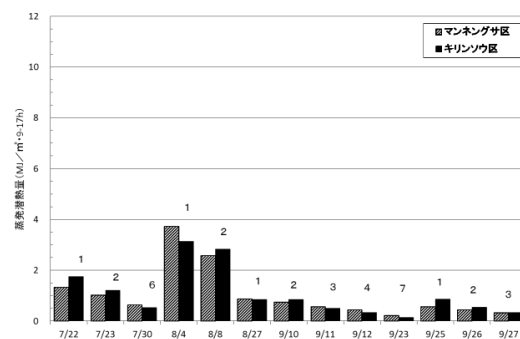


図-8 2013年の積算潜熱量の比較

※図中の数値は散水後の経過日数を表す

b) 伝導熱流量

比較的好天が続いた2012年9月22～28日までの基盤底部の伝導熱の日変化を図-9に、2013年9月23～29日の結果を図-10に示す。また、灌水後の経過日数による日中積算伝導熱量の違いを比較したものを図-11に示す。

両区ともに全測定期間を通して、対照区と比べて日中の大幅な伝導熱の低減が認められた。2012年9月の降水直後の晴天日の平均値で比較すると、マンネングサ区は対照区の約12%、キリンソウ区は対照区の約28%まで低減されていた。マンネングサ区においては、乾燥しても伝導熱の傾向はほとんど変わらなかったが、キリンソウ区においては、乾燥の進行と共に、伝導熱が上昇する傾向が見られた。

以上のように、無降水が続いた場合でも、両区において日中の伝導熱の大幅な低減が認められた。両区を比較すると、日中はマンネングサ区の方がキリンソウ区よりも伝導熱が抑えられる傾向があった。また、どちらの植栽区においても、夜間の伝導熱は対照区と比較して小さな負の値を取り、建物からの放熱が減少していた。

次に、2012年と2013年の測定結果の比較を行った結果、2013年においては全体的に伝導熱流量が大きいことが分

かった。対照区において同程度の熱流量が測定された日において比較を行ったところ、灌水後2日目である2013年8月8日の積算伝導熱流量は、対照区で707 kJ/m²、キリンソウ区で377 kJ/m²（対照区の53%）であった。これに対して2012年の灌水5日目である9月28日の積算地中熱流量は対照区で690 kJ/m²、マンネングサ区で29 kJ/m²（4.1%）、キリンソウ区で147 kJ/m²（21.4%）であった。植栽2日目には、被覆率の減少に伴う潜熱量の減少だけでなく、伝導熱流量の低減効果も悪化し、ヒートアイランド緩和効果は低下すると考えられる。

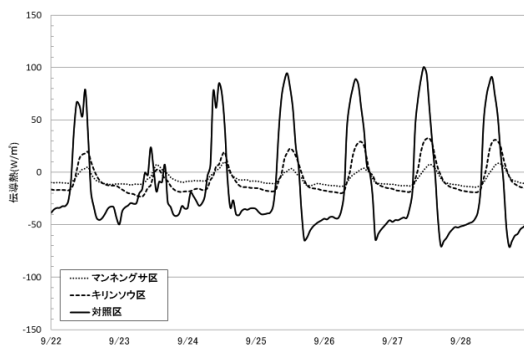


図-9 2012年9月22～28日の伝導熱量変化
（下向き熱流を+とする）

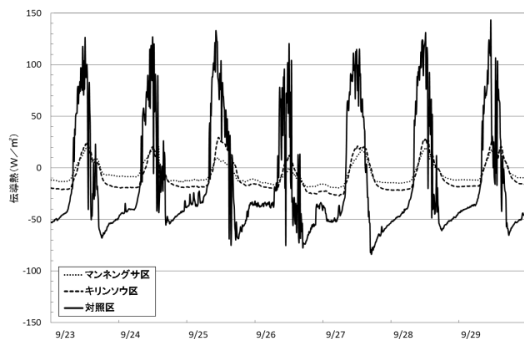


図-10 2013年9月23～29日の伝導熱量変化

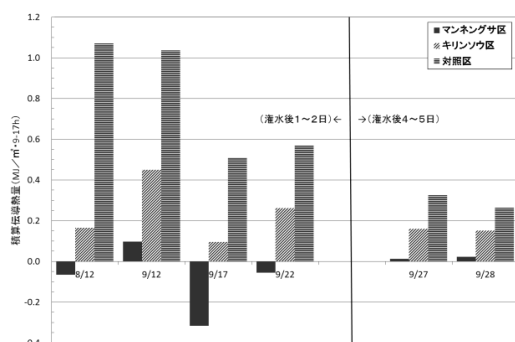


図-11 乾湿による積算伝導熱量の差

c) 顕熱量

2012年8月12日の顕熱の計算結果を図-12～14に示す。また、灌水後1～2日目の日中（9～17時）の積算顕熱量と、灌水後4～5日目の積算顕熱量を比較したものを図-15に示す。同様に、2013年の計算結果を図-16に示す。

灌水後1日目の2012年9月12日において、両区ともに、対照区と比較して大幅な顕熱の低減が認められた。積算顕熱量を比較すると、マンネングサ区は1452 kJ/m²、キリンソウ区は4995 kJ/m²、対照区は7594 kJ/m²であった。マンネングサ区は対照区の約19%、キリンソウ区は約66%となった。灌水後2日目の9月17日についても、良く似た結果が得られた。

灌水後4日目の9月27日において、対照区との差は小さくなった。日中の積算顕熱量は、マンネングサ区は対照区の約85%、キリンソウ区は約88%となった。

灌水後5日目の9月28日において、顕熱フラックスの最高値はマンネングサ区が376 W/m²、キリンソウ区が424 W/m²、対照区が295 W/m²となり、対照区を上回った。積算顕熱量を比較すると、マンネングサ区は7095 kJ/m²、キリンソウ区は7134 kJ/m²、対照区は6582 kJ/m²となり、両区ともに対照区を上回った。緑化区は対照区よりも反射率が小さいため、正午前後に純放射量が100 W/m²程度大きい。乾燥が進行すると、潜熱が抑えられ純放射量のほとんどが顕熱に分配されるため、対照区を上回ったと考えられる。

2012年については、マンネングサ区において灌水後1～2日の平均では対照区の27.9%、灌水後4日以降の平均で88.2%、全体平均で48.0%となった。キリンソウ区において灌水後1～2日の平均では対照区の45.4%、灌水後4日以降の平均で88.5%、全体平均で59.8%であった。

2013年については、マンネングサ区において湿潤時の顕熱量が大幅に増加した。灌水後1～2日の平均では対照区の53.8%、灌水後4日以降の平均で65.7%、全体平均で57.7%となった。キリンソウ区では灌水後1～2日の平均では対照区の29.0%、灌水後4日以降の平均で91.8%、全体平均で55.2%であった。

以上より、どちらの植栽区においても、灌水直後で湿潤な状態では、明確なヒートアイランド緩和効果が認められた。両区を比較すると、被覆率が高く湿潤な状態であれば、マンネングサ区の方がキリンソウ区よりも大きな顕熱の低減効果が認められた。しかし、乾燥してくると両区に大きな差はなくなり、灌水後5日目には対照区を上回ったという結果となった。

被覆率が高くても、夏季に晴天が続き、灌水後5日程度を超えると、顕熱量が屋上面を上回り、ヒートアイランド現象をより悪化させる可能性が示された。これは過去の実験結果³⁾⁴⁾¹⁾と同じ傾向を示しており、常緑キリンソウを使用しても変わらないことが明らかとなった。

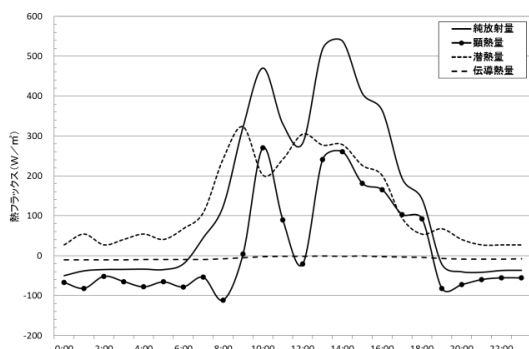


図-12 2012年8月12日のマンネングサ区の熱収支

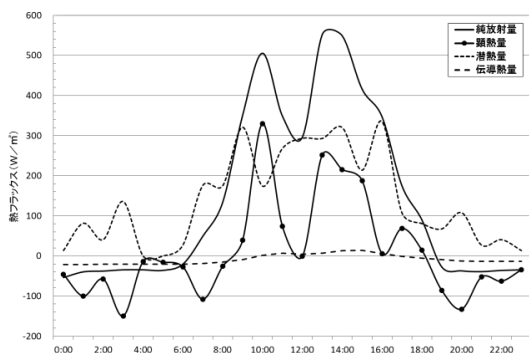


図-13 2012年8月12日のキリンソウ区の熱収支

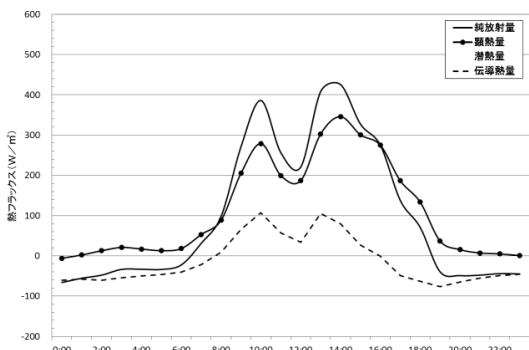


図-14 2012年8月12日の対照区の熱収支

d) ボーエン比

2012年に蒸発散量の計測を行った各日のボーエン比の日中平均を表-1に示す。岩切(2004)¹²⁾は、日本の水田のボーエン比は0.13、裸地で1.41、森林で0.17としている。

マンネングサ区の灌水後1～2日目におけるボーエン比は0.01～0.69(平均0.31)であった。特に9月において非常に小さい値をとっており、9月12日、17日、22日の平均値は0.04であった。一方、8月12日は9月と比べて高い値をとっている。これは、前述したように、8月のマンネングサ区の衰弱の影響であると考えられる。灌水後4、5日目のボーエン比は、それぞれ、1.45、3.12であった。

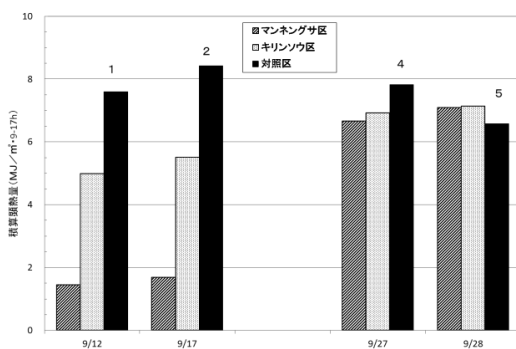


図-15 2012年の積算顕熱量の比較

※図中の数値は散水後の経過日数を表す

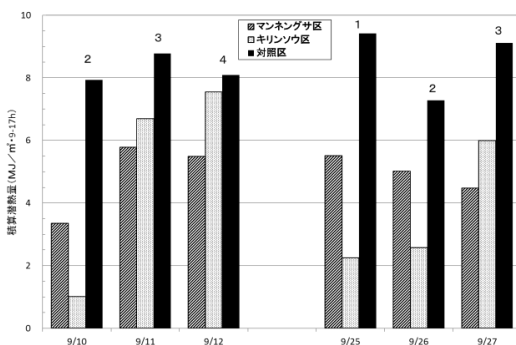


図-16 2013年の積算顕熱量の比較

※図中の数値は散水後の経過日数を表す

9月27日は裸地と同程度、9月28日は乾燥したグラウンド¹⁰⁾に近い値である。

キリンソウ区の灌水後1～2日目におけるボーエン比は0.60～0.97(平均0.75)となり、草地よりもやや低い値である。灌水後4、5日目のボーエン比は、それぞれ2.37、3.24であった。マンネングサ区と比較すると、8月12日以外の全ての日において値が大きかった。

2013年に蒸発散量の計測を行ったデータのうち、連続する3日間のデータを抽出したものが図-17である。9月10～12日のデータを見ると、マンネングサ区は0.45から1.23へ、キリンソウ区は0.12から2.24へと上昇している。また、9月25～27日のデータを見ると、マンネングサ区は0.97から1.37へ、キリンソウ区は0.26から1.75へと上昇している。いずれもキリンソウ区の方がボーエン比の上昇が早い。また、灌水後5日目に測定を行った9月23日には、キリンソウ区においてボーエン比5.00という、全測定期間中の最大値を記録した。これは、9月の葉の更新期の影響があるものと考えられるが、詳細の解析に関しては今後の課題としたい。

以上より、夏季において、どちらの植栽区においても土壌が乾燥するに従ってボーエン比は顕著に上昇する傾

向にあることが確認された。灌水後1～2日目には、水田や森林よりも低い値を示したが、灌水後4日目、5日目には、裸地や乾燥したグラウンドに近い値となっており、一般的な緑地と比べて極めて高くなった。

表-1 2012年測定のパーエン比

測定日	灌水後日数	マンネングサ区	キリンソウ区
8月12日	1日目	0.69	0.60
9月12日	1日目	0.02	0.75
9月17日	2日目	0.01	0.69
9月22日	2日目	0.09	0.97
9月27日	4日目	1.45	2.37
9月28日	5日目	3.12	3.24
10月30日	2日目	0.76	0.21

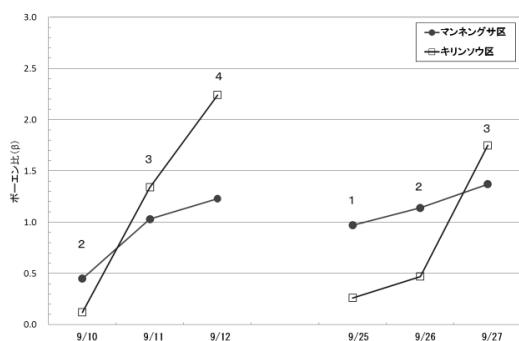


図-17 灌水後の経過日数とパーエン比の関係 (2013年)

※図中の数値は灌水後の経過日数を表す

(3) 葉面温度・屋上面温度の比較

2012年8月14～18日までの5日間の表面温度の経時変化を図-18に示す。灌水後1日目の8月14日は、明け方に降水があり、また日中を通して日射量が小さく、日積算日射量は 7.8 MJ/m^2 であった。両区とも対照区を下回っており、対照区との最大温度差はそれぞれ 3.7°C 、 4.6°C であった。2日目の8月15日の日積算日射量は 11.7 MJ/m^2 で、前日と比べて上昇したものの低い値であった。対照区との最大温度差はそれぞれ 9.6°C 、 8.4°C であった。8月14日と同様に、両区とも対照区を下回っていた。

灌水後3日目の8月16日は晴天となり、日積算日射量は 25.6 MJ/m^2 であった。最高温度がマンネングサ区で 53.4°C 、キリンソウ区で 40.2°C 、対照区で 52.5°C となっており、マンネングサ区は対照区を 0.9°C 上回った。

灌水後4日目の8月17日も晴天で、日積算日射量は 24.6 MJ/m^2 であった。最高温度がマンネングサ区で 57.2°C 、キリンソウ区で 44.4°C 、対照区で 54.5°C となっており、マンネングサ区は対照区を 2.7°C 上回った。

夜間においては、5日間を通して2つの植栽区は対照区より 5°C 程度低かった。また、日中は、マンネングサ区

がキリンソウ区を上回っていたのに対し、夜間はマンネングサ区がキリンソウ区より 1°C 程度低かった。9月の測定結果を見ても同様の傾向であった。

以上のように、マンネングサ区では、日射量が強く乾燥した条件下では、表面温度が対照区を上回ることがあるという結果が得られた。一方、キリンソウ区は、8月、9月ともに対照区よりも常に低いという結果が得られた。

2013年の測定結果からも、マンネングサ区の方が表面温度が高くなる傾向がみられたが、キリンソウ区においても2012年よりも高温化する傾向が認められた。表面温度の最大値を比較すると、8月上旬まではマンネングサ区が対照区を上回っていたが、それ以降は下回った。キリンソウ区においては、9月以降に対照区を上回る日が生じていた。これは9月の落葉進行の影響が大きいと考えられる。

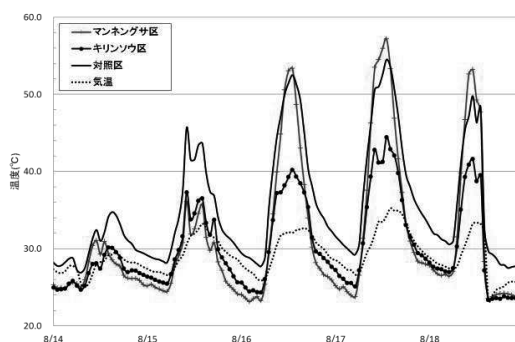


図-18 2012年8月14～18日の表面温度比較

4. 総合考察

マンネングサ区、キリンソウ区ともに、どんな状況であっても、通常の屋上面である対照区と比べて、大幅な伝導熱の低減が認められた。無降水が続き土壌が乾燥した場合でも効果は続いた。建物への伝導熱低減という視点からヒートアイランド緩和効果を評価した場合、薄層植栽基盤を設置することは常に有効であることが分かった。また、2つの植栽区を比較すると、被覆率が高い場合、マンネングサ区の方がキリンソウ区よりも効果的であるとえられる。被覆率が低下すると伝導熱量は増加し、ほぼ同じ気象条件下で比較すると、2013年は2012年の2.47倍になっていた。

日中の積算顕熱量をみると、灌水後1～2日の間は、マンネングサ区、キリンソウ区ともに、対照区と比べて低減効果が認められた。特に、マンネングサ区で、より大幅な低減が認められ、2012年には、対照区の27.9%まで顕熱量を減らしていた。キリンソウ区は、マンネングサ区には及ばないものの顕熱の低減効果は認められ、同じ

2012年において、平均して対照区の45.4%の削減効果であった。

一方、乾燥状態にある場合、両区ともに、対照区と比べて積算顕熱量の低減はほとんど認められなかった。9月の灌水後4日目において、マンネングサ区、キリンソウ区の積算顕熱は、対照区と比較してそれぞれ85%、88%であった。さらに、灌水後5日目については、両区とも対照区を上回っていた。これにより、顕熱の低減という観点からは、土壌が湿潤状態にある場合は、どちらの植栽区ともヒートアイランド緩和効果が得られるが、乾燥状態、とりわけ夏季において降雨後5日目を超えて降雨や灌水が無い場合、顕熱量が増加し、両区ともヒートアイランド現象を助長させる可能性があることが示唆された。また、植栽2年目において大きく被覆率が低下した場合に、大幅な機能低下が確認された。

以上の結果を総合的に評価し両区を比較すると、マンネングサ区の方がキリンソウ区より、ややヒートアイランド現象緩和効果が高いと考えられる。しかし、本実験で使用した常緑キリンソウを屋上緑化に用いる場合は、メキシコマンネングサと同様に植栽後2年目には被覆率が低下し、ヒートアイランド緩和効果も大きく低下する可能性があることが分かった。

本研究では、蒸発散量を手動計測としたため蒸発散量のデータ数が少なく、気象条件との関連で解析を行うまでに至っていない。また、従来あまり問題視されてきていなかった生物季節変化に伴う葉や株の更新が熱収支特性に大きく影響する可能性が示された。より汎用性のある結論を得るためには、今後、様々な条件下で植物種同士を比較する同様の実験を重ね、データを蓄積していくことが必要である。

参考文献

- 1) 気象庁 HP (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)
- 2) 飯島健太郎：屋上緑化空間の多様性と導入植物：日本緑化工学会誌 34(2), pp.338-343, 2008
- 3) 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～, pp43, 2003
- 4) 横山 仁, 三坂育正, 三輪 隆, 石渡健太郎, 佐々木啓行, 青木正敏, 石井康一郎：貯水型屋上緑化システムのヒートアイランド緩和効果に関する研究：東京都環境科学研究所年報, 2007
- 5) 山口隆子, 横山 仁, 石井康一郎：軽量薄層型屋上緑化システムにおけるヒートアイランド緩和効果：ランドスケープ研究 68(5), pp.509-512, 2005
- 6) 飯島健太郎：メキシコマンネングサの光合成型ならびに生育に及ぼす土壌水分と気温の影響：東京農業大学農学集報 41(3), pp.156-163, 1996
- 7) 大野朋子, 山本 聡, 前中久行：メキシコマンネングサおよび芝生薄層緑化からの蒸発散量：ランドスケープ研究 69(5), pp.431-436, 2006
- 8) 羽生寿郎他：農業気象学：文永堂, pp.55, pp.57-61, 1978
- 9) C.Y.Jim, Hongming He：Coupling heat flux dynamics with meteorological conditions in the green roof ecosystem：Ecological Engineering 36, pp.1052-1063, 2010
- 10) 井上君夫：夏季晴天日における農地の気候緩和指数としてのボーエン比測定：農業気象 64(3), pp.157-166, 2008
- 11) 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
- 12) 岩切 敏：新農業気象：全国農業改良普及支援協会, pp.55, 2004

(2014.7.11 受付)

ANALYSIS OF HEAT BALANCE CHARACTERISTICS IN ROOFTOP GREENING BASE THAT USES *Phedimus aizoon* cv.

Hiroyuki YAMADA, Mariko OHTSUKA and Yuuma HIRAKAWA

The present study used *Sedum mexicanum* and *Phedimus aizoon* cv. planted in roof greening base and set up it on the rooftop, and those heat balance characteristics were measured for two years. It aimed to study how the heat balance characteristics changed when the rate of the plant coverage and the volume of water changed, by using those result of a measurements. The *Sedum mexicanum* experiment district was admitted when the amounts of the multiplication evapo-transpiration in daytime were compared and that were 1.58-1.65 times more than the *Phedimus aizoon* cv. experiment district. A big effect of the decrease of conductive heat at a plant base bottom was admitted regardless of dry and wet. If the rate of the plant covering was high and the soil moisture was high, two experiment districts were admitted in the heat island reduction. If the soil moisture was high, it became a conclusion that the *Sedum mexicanum* experiment district was more effective for reduce the heat island phenomenon.