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

EXPERIMENTAL STUDY ON HEAT BUDGET
FOR FOLIAGE LAYER OF LAWN-PLANTING

Effect of rooftop lawn-planting on thermal environment Part 1

梅干野 晃*, 何 江**, 堀口 剛***, 王 革****

Akira HOYANO, Jiang HE, Takeshi HORIGUCHI and Ger WANG

In order to make clear the effect of rooftop lawn-planting on the thermal environment, outdoor experiments were carried out with lawn-planting mock-ups throughout two years. This paper for the first part of our study describes the outline of mock-ups and measurement items and measuring methods. Main subjects of the paper are about diurnal and annual characteristics of heat budget for the foliage layer of lawn-planting. The following items were analyzed with the experimental data.

1. Reflected solar radiation from the surface of lawn.
2. Radiant temperature of lawn and temperatures in the lawn-planting layers.
3. Heat flow below the layer of foliage.
4. Heat capacity of the layer of foliage.

Keywords : *rooftop planting, lawn, foliage layer, temperature distribution, heat flow, diurnal variation, annual variation*

屋上植栽, 芝生, 葉群層, 断面温度, 熱流, 日変化, 年変化

1. はじめに

ヒートアイランド現象やその他の熱環境問題が顕在化しつつある都市では、その対策の一つとして都市緑化が取り上げられ、植栽の熱環境調整効果が注目されている。もう一方では、省エネルギーや快適な室内の熱環境形成の観点からも、建築植栽による日射遮蔽や断熱効果等が期待できる。この一つの植栽手法として屋上芝生植栽があげられる。

芝生の微気象調節効果に関して、実際の芝地における実測例¹⁻⁶⁾があり、芝生の熱収支及び水収支を把握するために、試験体による暴露実験⁷⁾も行われている。しかし、これらの研究は実測による考察に留まっている。

一方、芝生の表面温度等の数値計算についていくつかの方法⁸⁻¹⁰⁾が提案されているが、計算上のパラメータが多いことと、パラメータの値の設定が容易でないことから、数値計算による芝生の熱環境調整効果を検討する

ためには解決すべき問題点が残されていると思われる。

本研究では、屋上芝生植栽が屋外及び室内の熱環境に及ぼす効果を明らかにするために、芝生植栽の試験体を製作して屋外実験を行い、芝生植栽の熱収支及び水収支の日・年変化についてデータ解析し、熱収支シミュレーションに必要な芝生の熱物性値を提示する。

第1報では屋外実験の概要や測定方法などを述べ、葉群層の熱収支を考察する。第2報では、熱収支に大きく影響する水収支に着目し、芝生の蒸発散量や芝生植栽の保水性を明らかにする。第3報では、第1報と第2報で得られた結果を踏まえ、葉群層における伝熱モデルを提案すると共に、年間の測定データよりこのモデルに基づく芝生の熱物性値を算出する。さらに、熱収支シミュレーションによって、屋上芝生植栽の熱環境調整効果について、芝生植栽を行っていない場合と比較しながらその効果を明らかにする。

* 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 教授・工博

** (株)OMソーラー協会(海外技術者研修協会研修生)・工博

*** (株)ジャグラス

**** 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 大学院生

Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

OM Solar Association (AOTS. Technical Trainee), Dr. Eng.

Jagras CO., LTD.

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

2. 屋外実験の概要

2. 1 基本的考え方

芝生植栽の熱収支特性については葉群層（芝生の葉の先端から茎下まで）とその下の盛土層に分けて考えることとする。芝生の葉群層での日射反射や長波長放射授受、対流熱伝達、蒸発散などは、仮想した葉群層の表面で行なわれるものとする。また、葉群層の表面温度は芝生の上方からみた放射温度で表し、盛土層への熱伝導については茎下の温度を用いる。すなわち、葉群層の伝熱は図1のようにモデル化した。

図1 芝生の葉群層の断面と伝熱モデル

以上の考え方に基づいて、主に葉群層の熱的特性を明らかにするために、屋上芝生植栽を取り入れた建物を想定した実物大の芝生植栽の試験体を製作し、約2年間にわたる屋外での連続実験を実施した。

2. 2 試験体の概要

図2に芝生試験体AとBの断面図を示す。両芝生試験体はコンクリートスラブの上にそれぞれ異なる盛土を載せ、芝生を植えたものである。すなわち、盛土層については一般的な工法と新たに開発した工法を採用した。芝生試験体Aは、一般的な屋上芝生植栽で、改良土（90mm厚）とパーライト（30mm厚）を盛土として、芝生の生育の限界に近い土厚としたものである。芝生試験体Bの盛土層は、重量の軽減を図るために、成形発泡スチロールのボックス（740mm×740mm×65mm）を敷き詰め、その上に緑化基盤材と人工土壌を入れ芝生を植栽したものである。

本実験に用いた芝生は、種を蒔いて生育させたのではなく、既に生育した高麗芝を植えたものである。通常の張芝の場合は目地を取って植えるが、本実験では密植した。また、植えた後に目土として山砂を約10mm程度撒き、散水した。なお、高麗芝を採用した理由は、日本では一般的なものであることと、冬に芝が枯れるので緑葉の場合との比較検討が可能なことである。

屋上スラブに相当する部分は、30mm厚のコンクリートスラブで、上面を防水処理したものである。スラブの勾配は1/100とした。試験体の表面積は約2m×2mとし、試

図2 芝生試験体AとBの断面

験体の下部には室内に相当する空間を設けた。この室内空間には面発熱体を床面に2cm浮かせて設置し、冬季に発熱させた。試験体の周囲は200mm厚の発泡スチロールで断熱し、発泡スチロールの外表面及びスラブの上面は1mm厚のゴムシートで防水した。また、芝生の土表面からの流水と盛土層の下部からの排水を測定するために、試験体の西側にそれぞれ流水口と排水口を設けた。

比較のためにコンクリートスラブのみのコンクリート試験体も製作した。この試験体のコンクリートスラブの厚さは100mmとし、表面は上記と同様のゴムシートで防水した。

また、芝生の蒸発散量を把握するために試験体の重量変化を連続的に測定する必要がある。しかし、上記試験体では重量の測定が不可能なために、芝生試験体A、Bと同じ断面構造を有し（ただし室内空間はなし）、表面積740mm×740mmの芝生小試験体（A'、B'）を製作した。これらの試験体は、15mm厚の木製のボックスに芝生植栽をしたものである。なお、ボックスの内外表面は防水塗料で防水処理した。

2. 3 測定項目と測定方法

1) 芝生表面の反射日射量

芝生試験体のほぼ中央で葉群層の上方30cmの高さに設置した下向きの日射計（感度：23[kcal/m²h]/mV、精度：±3%）を用いて、芝生表面の反射日射量を測定した。

2) 断面の温度分布

各試験体の断面の温度は、線径0.1mmのT熱電対を用いて測定した。土壌の温度測定に用いた熱電対は感温部を防水処理したものである。また、芝生試験体の上方2mの高さに設置した放射温度計（波長感度：2~14μm、精度±1℃）によって芝生試験体表面のほぼ中央部（直径50cm円内）の平均の放射温度を測定した。

3) 熱流分布

3 試験体のコンクリートスラブの上面に310mm×310mm×2mmの熱流計（感度：56[kcal/m²h]/mV、精度：3%）を貼付し、熱流を測定した。また、芝生の茎まわりと根まわりに埋設した80mm×20mm×2mmの熱流計（感度：15[kcal/m²h]/mV、精度：5%）を用い、芝生の茎下と根まわりの熱流を測定した。

4) 芝生試験体の表面流量と排水量

芝生試験体の表面からの流出量及び盛土層の下部からの排水量は、試験体の西側から取り出し、転倒升型雨量計（精度0.5mm、口径200mm）に導いて連続的に測定した。なお、定期的に試験体から取った土のサンプルを秤量瓶に採取し、含水率を求めた。

5) 芝生の蒸発散量

表面積740mm×740mmの芝生小試験体を電子台秤（測定精度：±1g）に載せ、試験体全体の重量を連続的に自動計測した。試験体の重量変化の測定データより芝生小試験体の蒸発散量や結露量などを算出した。

6) 芝生の生育状況

写真撮影により芝生の生育状態を定期的に観測した。また、芝生の葉のサンプルを採取することにより、芝生の葉指数と葉丈、及び、葉の含水率を測定した。葉指数の測定方法としては、10cm×10cmの方形区内の芝生を刈

出して、刈芝の重量を測り、葉の本数を数えた。さらに、約50本の葉を採集し、その長さの平均値を求めた。芝生の管理については、夏季に数回の芝刈りを行い、葉丈は12cm前後の状態に保った。夏季の緑葉時には、芝生試験体AとBの葉指数はそれぞれ約1500本/m²、3500本/m²であった。

7) 気象条件

各試験体から約5m以上離れた高さ3mのペントハウスの屋上に日射計（感度：123[kcal/m²h]/mV、精度：±2.5%）を設置し、水平面全日射量を測定した。また、試験体から約5m離れた場所で、転倒升型雨量計を用いて降水量を、約1.5mの高さにおいて通風アスман温湿度計（線径0.1mmのT熱電対を使用）および矢羽根式風向風速計（風向の精度：±3%、風速精度：0.5m/s~2m/s以下の場合は±0.3m/s；2m/s以上の場合は±5%）によって、外気温と湿度、および風向・風速を測定した。

8) データの収録方法

上記のすべての測定項目のアナログ出力をデータローガーによってパソコンに取り込み、1分または10分おきにミニフロッピーディスクに収録した。

9) 実験経過

周辺地物からの影響が少なくかつ開放的な場所（東京工業大学長津田キャンパス内の2階建て建物の屋上、面積約20m×25m）を実験場所とした。各試験体は互いに約2m以上離して設置した。連続測定は1990年7月24日から1992年9月まで継続した。図3は夏季に撮影した実験場所の風景写真である。

3. 熱収支特性に関するデータ解析

3.1 芝生の日射反射率

夏季と冬季の典型的な晴天日における日射反射率の時間変化を図4に示す。芝生の指向反射特性^{11, 12)}がある

図3 屋外実験場所の風景写真

図4 晴天日における芝生表面の日射反射率の経時変化

図5 曇天日における芝生表面の日射反射率の経時変化

図6 芝生表面の日射反射率の年変化 (1990年8月1日～1991年7月31日)

ため、日射反射率は太陽高度と共に変化するが、正午前後(11:00～13:00)はほぼ一定な値を示している。夏季の日射反射率の値は冬季より2%程度大きい。また、冬は両試験体の芝生の枯れ状態が異なるため日射反射率の値には差がみられ、夏の生育状態の良い芝生試験体Bの方が2%程度大きくなっている。図5に曇天日の日射反射率を示す。日射反射率の時間変化はほとんどなく、晴天日における正午前後の値とほぼ等しい。

次に、前述のようにほぼ同じ値を示す毎日の11時から13時までの日射反射率の平均値を用いて、芝生の日射反射率の年変化を求めた。図6に示すように、年間を通じて日射反射率は芝生試験体Aでは18%～30%、芝生試験体Bでは20%～31%の範囲で変化している。5月末から11月上旬までの緑葉の期間では反射率はほぼ一定の値を示すが、11月中旬から3月の芝生が枯れた期間の値は小さくなる傾向がみられ、緑葉の出始める前の4月の反射率が最も小さくなる。両芝生の反射率を比較すると、緑葉の時に生育状態の良い芝生Bの方が年間を通して数%大きい。なお、日射反射率の値がばらつきを示す理由は、雨または前日が雨の日である。

3. 2 断面温度分布

夏及び冬の典型的な晴天日について、1時間おきの実

測データによる3試験体の断面温度分布の一日の経時変化を図7に示す。なお、同図に示した冬の晴天日には、3試験体について同じ発熱量で発熱をさせている。

コンクリート試験体では、夏にはコンクリートスラブの上面温度は日中に最大で60℃近くに上昇し、早朝でも気温より下がらない。日較差は夏には30℃に達しているが、冬には水平面全日日射量が夏ほど多くないことや室内を発熱していることから20℃程度である。一方、芝生の放射温度は、芝生の生育状態が異なるため両試験体で差が見られ、生育状態の良い芝生試験体Bの方が夏冬ともに日中の温度上昇は少ない。日較差は、夏では水平面全日日射量が多いが葉群層での蒸発散のために約10℃と13℃である。冬では全日日射量は夏より少ないが、枯葉のため16℃、17℃と夏より大きい。

室内の温度変化をみると、コンクリート試験体では29～48℃、冬でも12～25℃変化している。これに対し、芝生試験体AとBについては日変化は1℃以内である。夏は両芝生試験の室温はほぼ等しいが、冬に室内で発熱させたときは、芝生試験体Aよりも芝生試験体Bの室温は発泡スチロール層の断熱効果により約7℃も高い。芝生試験体Bの発泡スチロール層に形成される温度勾配は約10℃である。

図7 夏季と冬季の晴天日における各試験体の断面温度分布（1時間毎）

図8 夏季と冬季の晴天日における芝生の放射温度、基下の温度及び気温の経時変化（芝生試験体A）

3.3 芝生葉群層の放射温度と基下の温度

1) 日変化について

図8は、夏季と冬季の典型的な晴天日における芝生Aの放射温度と基下の温度の時間変化を示したものである。同図より葉群層における温度分布を季節別に考察する。

夏季における晴天日の日中は、放射温度は最高で気温より6℃程度高くなり、基下の温度は気温とほぼ等しいか数度高い。すなわち、日中の葉群層の温度は緑葉の蒸発散作用にもかかわらず、常に気温より高い。夕方から早朝にかけては、放射温度は気温より若干下がるものの、基下の温度は気温より数度高い状態を維持する。

一方、冬季の晴天日においては、水平面全日射量は夏季ほど多くないものの、枯葉のために日中は気温より最高で10℃以上高くなり、夜間は天空放射によって気温より5℃以上下がる。基下の温度は日中でも気温より5℃近く低く、夜間は気温とほぼ等しくなる。

以上のことから、緑葉と枯葉の状態によって葉群層の温度分布と気温との関係は大きく異なることがわかる。さらに、夜間から朝方にかけての葉群層内での結露量も、放射温度と茎まわりの温度から推察すると夏季と冬季で大きく異なると考えられる。この考察については第2報（芝生植栽の水収支に関する研究）に譲る。

図9 芝生表面の放射温度と茎下の温度の日較差の年変化(芝生試験体A)

図10 放射温度の日較差と茎下の温度の日較差との関係

図11 放射温度と茎下の温度及び気温の日較差の関係

図12 「芝生の放射温度-気温」と日射量の関係

表1 「放射温度-気温」と水平面全天日射量の関係

1月	:	$Y=0.024X-3.9$	($R=0.95$)
2月	:	$Y=0.028X-4.5$	($R=0.96$)
3月	:	$Y=0.033X-4.2$	($R=0.98$)
4月	:	$Y=0.016X-3.1$	($R=0.95$)
5月	:	$Y=0.017X-1.4$	($R=0.93$)
6月	:	$Y=0.017X-1.7$	($R=0.92$)
7月	:	$Y=0.009X-1.4$	($R=0.92$)
8月	:	$Y=0.018X-1.4$	($R=0.95$)
9月	:	$Y=0.014X-1.9$	($R=0.97$)
10月	:	$Y=0.026X-2.5$	($R=0.98$)
11月	:	$Y=0.031X-3.2$	($R=0.96$)
12月	:	$Y=0.025X-4.2$	($R=0.95$)

Y: 「芝生葉群層の放射温度-気温」(°C)

X: 水平面全天日射量 (kcal/m²h) R: 相関係数

2) 年変化について

図9は、年間について各月に晴天日が最も多い10日間の期間の測定データより求めた芝生Aの放射温度と茎下の温度を日最高値、日最低値、日平均値で表したものである。放射温度の年変化の範囲は-5°Cから47°Cまでである。枯葉の状態の3月～4月頃の晴天日には放射温度の日較差は年間を通して最も大きくなり、最大で30°C近くに達する。また、茎下の温度の日較差は常に放射温度よりも小さく、最大でも20°C以内である。

放射温度の日較差と茎下の温度の日較差について、両者の相関関係を図10に示す。季節の変化による違いが若干みられるが、両者は正の相関関係がある。放射温度、茎下の温度、気温の3要素の日較差について相互の相関関係を示す図11より、放射温度と茎下の温度の日較差はそれぞれ気温のその約1.9倍、0.7倍であることがわかる。

3) 気象要素との関係

各月において、芝生の生育状況がほとんど変わらないと考えられる晴天日が続いた4日間をこの月の代表日とし、月別に1時間おきのデータを用いて「芝生の放射温度-気温」及び「茎下の温度-気温」と主な気象要素(日射、気温、湿度、風速)との関係を検討した。その結果、前者は日射量と高い相関があるものの、後者は各気象要素と有意な相関はみられなかった。表1に示したのは「芝生の放射温度-気温」(Y)と水平面全天日射

図13 夏季の晴天日における各試験体の熱流の経時変化

図14 冬季の晴天日における各試験体の熱流の経時変化

図15 根まわりとコンクリートスラブ上面の日最大・最小熱流の年変化(芝生試験体A)

量(X)の直線近似式である。年間にわたって直線の傾きと切片の値が異なり、これらの違いは4月から9月にかけての緑葉期間と10月から3月までの枯葉期間にほぼ対応する。図12は、2月、5月、7月、11月を例として示したものである。

3. 4 盛土層における熱流

盛土層の熱流の変動特性について、盛土層の上部にあたる根まわりの熱流を用いて検討した(外から室内方向への熱流を正とする)。図13、図14に示したのは、夏と冬の晴天日における芝生試験体Aの根まわりとコンクリートスラブ上面の熱流、及びコンクリート試験体のコン

クリートスラブ上面の熱流である。コンクリート試験体の上面では日中 250kcal/m²h前後に及ぶが、芝生試験体の根まわりの熱流では最大でも夏15kcal/m²h、冬10kcal/m²h程度で、水平面全天日射量の最大値に対してそれぞれ2%、2.5%と小さい値を示す。また、根まわりの熱流が最大となるのは水平面全天日射量よりも1~2時間程度の時間遅れがある。また、芝生試験体のコンクリートスラブ上面の熱流は一日中数kcal/m²h以内であることから、芝生試験体の室内空間はほとんど外界条件の影響を受けないことがわかる。

図16 葉群層における断面温度分布及び熱流の変化

年間について芝生試験体Aの根まわり及びコンクリート上面の熱流の日較差を図15に示す。根まわりの熱流は年間に $-5 \text{ kcal/m}^2\text{h} \sim 60 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 変化しており、発熱期間を除いて、コンクリート上面の熱流の年変化範囲は $-20 \text{ kcal/m}^2\text{h} \sim 10 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ である。

3. 5 葉群層の熱容量

以上、葉群層の放射温度と茎下の温度及びその下の盛土層における熱流の変化特性を中心にデータ解析を行った。さらに、第3報で芝生の表面温度を求める計算モデルを検討するために、葉群層の熱抵抗と熱容量を明らかにする必要がある。ここで後者について検討した結果を述べる。

図16は、日射の変動が激しいときの葉群層における温度及び熱流変化の一例である。同図にみられるように、11時45分から日射量が急激に減少した後、芝生の放射温度と茎下の熱流が最低値になるまで、それぞれ約2分と5分を必要とする。

日射量の変化に対する茎下の熱流の追従性を明らかにするために、1分おきに測定したデータとその30分間の平均値を用いて、両者の相関を図17に示す。1分おきのデータを用いた場合と比べ、30分間の平均値を用いた場合の相関は高くなり、相関係数は0.91である。1分間～20分間についても同様な検討を行い、その結果を図18に示す。茎下の熱流と日射量の相関係数は平均値の時間間隔が大きくなるにつれて高くなる。30分間の平均値を用いれば、日射の変動に対する茎下の熱流の時間遅れがほぼ無視できる。すなわち、葉群層における熱収支を検討する場合、30分間隔以上の熱収支計算については葉群層の熱抵抗のみを考慮すればよい。また、枯葉の場合についても検討した結果、同様な結論が得られた。

4. まとめ

芝生の熱収支特性を把握するために、芝生植栽を葉群層とその下の盛土層に分けて考え、年間にわたる屋外実

図17 茎下の熱流と日射量の相関関係(91.10.2 10:30-14:00)

図18 平均値の時間間隔と相関係数の関係

験で得られた測定データを解析し、以下のような知見を得た。

- (1) 芝生表面の日射反射率の値には日変化がみられ、芝生が枯れ始めてから緑葉が出始めるまでの期間に日射反射率の値は10%程度下がるが、緑葉期間の値は25～30%である。
- (2) 芝生の放射温度は年間に $-5^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 変化し、日較差は 30°C 以内である。また、芝生の放射温度及び茎下の温度の日較差は前者の方が大きく、両者とも気温の日較差と近似的な直線関係がある。
- (3) 「芝生の放射温度-気温」と水平面全天日射量が高い相関を示す。さらに、緑葉の期間と枯葉の期間でこれらの直線近似式の係数は異なる。
- (4) 盛土層の熱流の測定データを考察した結果、緑葉の時と枯れの時にも葉群層の日射遮蔽効果が大きいことがわかった。例えば、水平面全天日射量が最大となるときの、根まわりの熱流はそれの2%前後しかない。また、夜間では根まわりの熱流(負値)は最大で $30 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 以内である。
- (5) 芝生の葉群層は葉の先端から茎下までと考え、上面の温度は放射温度、下面の温度は茎下の温度とすると、30分間前後の日射量の平均値を用いて熱収支を検討する場合、葉群層の蓄熱量が無視でき、熱抵抗のみを考慮すればよい。なお、葉群層の熱抵抗の値については第3報で考察する。

⑬：本論文はすでに参考文献13, 14)に発表したものを修正・加筆したものである。

■引用文献

- 1) 龍谷光三、清家清、梅干野晃：夏期における芝地の照り返し特性について (1) (芝地の温度分布特性について)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 343-344, 1973. 10
- 2) 近藤三雄他：樹木、芝生の微気象調節効果に関する実証的研究、造園雑誌、43(3), 1983
- 3) 清田信：芝地からなる緑地の微気象環境、グリーン研究報告集、59, 1990
- 4) 瀧石和人、片山忠久、林徹夫、塩月義隆、北山広樹、前田昌一郎：都市熱環境における土地被覆状況の影響に関する調査研究 (その1 緑陰内およびその周辺における熱環境)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1471-1472, 1991
- 5) 清田信他：林地と芝地における熱収支の比較、環境情報科学、21-2, 1992
- 6) 原園芳信他：林地と造成された芝地の熱環境および水収支の特徴、農業気象、48-2, 1992
- 7) 梅干野晃、萩原賢二：屋上の芝生植栽による照り返し防止・焼け込み防止効果、日本建築学会建築環境工学論文集第5号、pp. 133-234, 1983
- 8) J.W. Deardorff, Efficient Prediction of Ground Surface Temperature and Moisture, with Inclusion of a Layer of Vegetation, Journal of Geophysical Research, Vol.83, pp.1889-2903, 1978
- 9) 平岡久司：植栽での温熱空気移動のモデリング、熱・空気環境小委員会第19回シンポジウム、pp. 11-20, 1989
- 10) 恩村定幸、松本衛：屋上芝生植栽による蒸発冷却効果に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 767-768, 1992. 8
- 11) 龍谷光三、清家清、梅干野晃：芝地の照り返し特性について (7) (芝表面の指向反射特性)、日本建築学会関東支部研究報告集、pp. 77-80, 1975
- 12) 龍谷光三、清家清、梅干野晃：芝地の照り返し特性について (8) (芝地の光指向反射特性について)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 91-92, 1975. 10
- 13) 梅干野晃、何江、王革、堀口剛：屋上芝生植栽の熱的特性に関する実験研究 その1、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 927-928, 1991. 9
- 14) 梅干野晃、何江、王革、堀口剛：屋上芝生植栽の熱的特性に関する実験研究 その4、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 757-758, 1992. 8

(1993年11月10日原稿受理, 1994年5月20日採用決定)