

緑化による都市の熱環境改善に関する研究（その1）

——夏季における人工緑化地盤の熱収支——

三小田 憲 司 小 宮 英 孝 塩 田 耕 三
杉 本 英 夫 喜 田 大 三 宮 川 保 之

Study on Improvement of Urban Thermal Environment by Revegetation (Part 1)

——Thermal Energy Balance of Artificial Ground with Revegetation in Summer——

Kenji Mikoda Hidetaka Komiya Kouzou Shiota
Hideo Sugimoto Daizo Kita Yasuyuki Miyagawa

Abstract

Revegetation on top of a structure is gaining attention as a technique for utilization of urban space. It is also expected to improve the thermal environment of the area. Experiments were conducted on miniature models and the thermal performance of artificial ground with revegetation was reported. These models were of three types according to the material on the surface: concrete, soil, grass. Comparisons of the three clearly show the superiority of the thermal performance of the grass type.

As a result it was found that revegetation on the roof is effective in preventing a heat island because it cools the surface in the daytime, reduces reflection of sunshine, and cuts heat flow from the roof to indoors more than 90 percent.

概 要

建物屋上の緑化は都市空間の有効利用をはかる手段として脚光を浴びつつあるが、大きな社会問題となっている熱環境問題の対策としても期待が持たれている。本研究は、屋上に緑を取り入れたときの熱環境の改善効果を外部に対するヒートアイランド対策と内部に対する省エネ効果の両面から検討したものである。調査ではコンクリート地盤、土地盤、緑化地盤を想定した試験体を製作して、表面温度、地盤内の温度分布、熱流の移動、日射量、放射収支量などを測定し、地表面の熱収支を明らかにした。その結果、屋上緑化により日中の表面温度上昇や日射の照返しが抑制され、ヒートアイランド対策として有効なことが確認された。また夏季に屋根から侵入する熱量は10%以下となり、エネルギー効果も確認された。

1. はじめに

屋上の緑化は限られた都市空間の高度利用をはかり、都会生活にやすらぎのある快適空間を提供するものとしてさかんに導入されるようになった。注目を集めるようになった背景として、屋上の緑化が都市の熱環境問題対策として効果的であることが認識されるようになったことがあげられる。コンクリートに変わり緑の被覆面が増加すれば、表面からの水の蒸発・蒸散が促進され日中の表面温度が下がるので、夏季には外部環境に対して冷却効果が大きい期待できる。また室内環境についても、建物の冷暖房熱量を軽減し、省エネ効果を見込める。

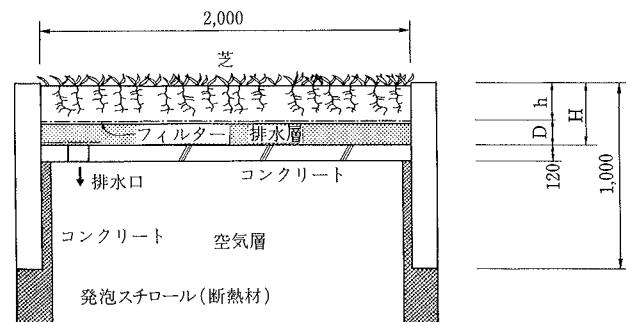
しかし屋上緑化の導入に関して熱の流れを定量的に評価した報告は少なく、確固たる評価を得るためにはヒートアイランド現象に代表される都市の高温化に対する貢献度や省エネの評価を示して、導入効果を明確に打ち出す必要がある。

そこで著者等は、上記の観点からコンクリート地盤、土地盤、緑化地盤を制作して実験を行い、地盤表面の熱収支を算定して、緑化地盤の熱的性能を明らかにした。

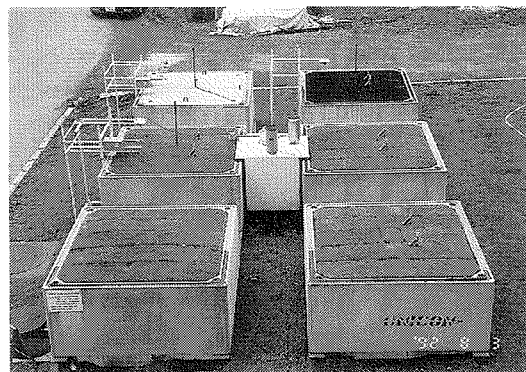
2. 実験概要

2.1 実験装置

2.1.1 模型試験体 同じ型の模型試験体を6基製作し、サイズは $2\text{ m}^{\text{L}} \times 2\text{ m}^{\text{W}} \times 1\text{ m}^{\text{H}}$ (図-1参照)で、いずれも12 cm厚のコンクリート直方体である。床スラブは土層に応じて表-1のように固定した。床スラブの下はコンクリート壁および厚さ15 cmの発泡スチロールで断熱しており、建物の屋根直下階の室内空間を想定した。芝を植栽したときの盛り土の厚さは、天水条件下で15 cm程度が下限であり、30 cm以上の厚さがあれば夏季の最大乾燥期にも健全な生育が期待できる¹⁾ので、これを基準に設定した。



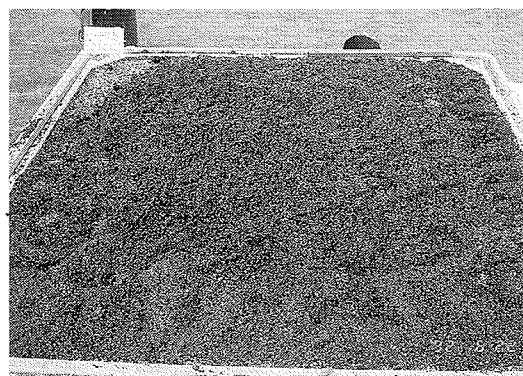
図一1 模型試験体の断面図
(No. 3 のケース)



写真一1 人工緑化地盤の模型試験体

表一1 模型試験体の盛り土の厚さ

記号	表面資材	h 土層(mm)	D 排水層(mm)	H 地盤の厚さ(mm)
No. 1	コンクリート	—	—	—
No. 2	黒ぼく土	150	50	200
No. 3	高麗芝	150	50	200
No. 4	高麗芝	150	50	200
No. 5	高麗芝	300	100	400
No. 6	高麗芝	150	50	200



写真二2 軽量化した盛り土

表一2 模型試験体の盛り土の仕様

記号	表面資材	土層	排水層	重量 (kg/m ²)	軽量化率 (%)
No. 1	コンクリート	—	—	—	—
No. 2	黒ぼく土	黒ぼく	パーライト	174	100
No. 3	高麗芝	黒ぼく	パーライト	174	100
No. 4	高麗芝	黒ぼく(70%) + 発泡スチロール(30%)	パーライト	123	71
No. 5	高麗芝	黒ぼく(70%) + 発泡スチロール(30%)	パーライト	246	141
No. 6	高麗芝	黒ぼく(40%) + 発泡スチロール(60%)	パーライト	72	41



写真三3 排水層 (パーライト)

2.1.2 人工地盤上の盛り土の選定 表一2に人工地盤上の盛り土の仕様を示す。緑化導入の際には、構造的な加重負担を増加させないことすなわち軽量化をはかることが技術的な課題となるため、当社では緑化地盤の軽量化について改良を重ね、軽量土壌改良材を用いた軽量化地盤の開発を続けており、発泡スチロールを土と混合したものを選定した。表面資材はNo.1がコンクリート、No.2が土、No.3～No.6が高麗芝である。

2.1.3 軽量土壌改良材 盛り土は排水性、通気性、透水性等を考慮して土層と排水層で構成した。土層と排水層の比率は3:1が最適でこれに従い、排水層にはパーライトを用いた。土層の基材は黒ぼくと呼ばれる関東ロームの表土で関東近圏に広く分布しているものであり、これに軽量土壌改良材として発泡スチロールを混合して軽量化をはかった。発泡スチロールの混合は、通気性を

長期にわたって保持できる利点もある。土層を15cm、排水層を5cmの地盤を基準にした場合、土層に発泡スチロールを60%添加すると41%に軽量化できる。

2.2 実験方法

図一2に計測装置を示す。計測は、コンクリート地盤(試験体No.1)、土地盤(試験体No.2)、緑化地盤(試験体No.3、No.4)で行った。No.5～No.6は芝の生育調査を行うため放置している。主な計測項目は①人工地盤上の空気温度、②人工地盤内の地中温度、③地盤を通過する伝導熱量、④日射量および反射日射量、⑤純放射量、⑥気温・絶対湿度、⑦雨量である。これらの観測を通して地表面の熱の動きはほぼとらえることができる。データはデータログを介して5分間隔で測定し、記録点の前後20分の平均値として、光磁気装置に収録した。

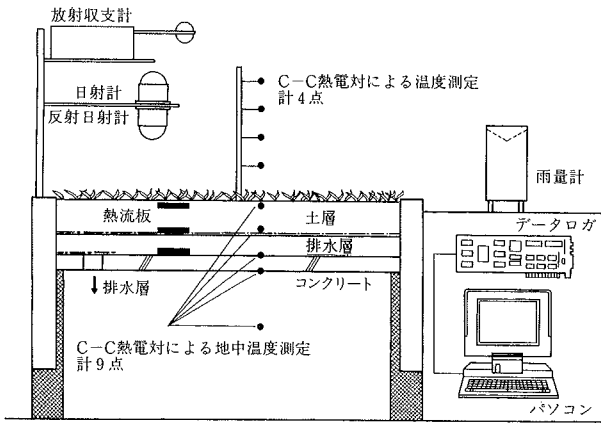


図-2 計測装置

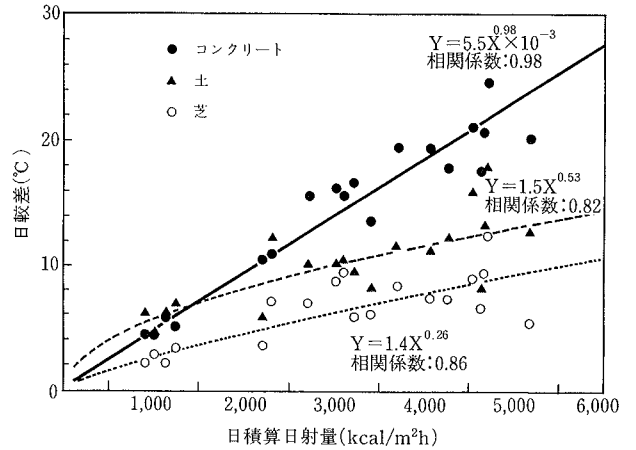


図-5 各試験体の表面温度日較差と日積算日射量の関係

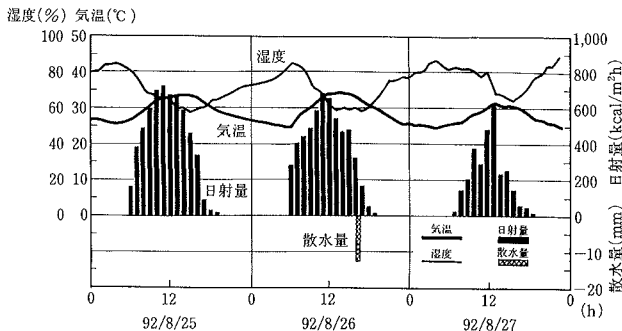


図-3 気象条件

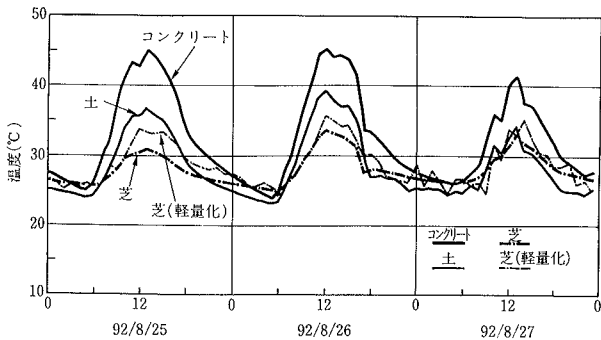


図-4 各試験体の表面温度

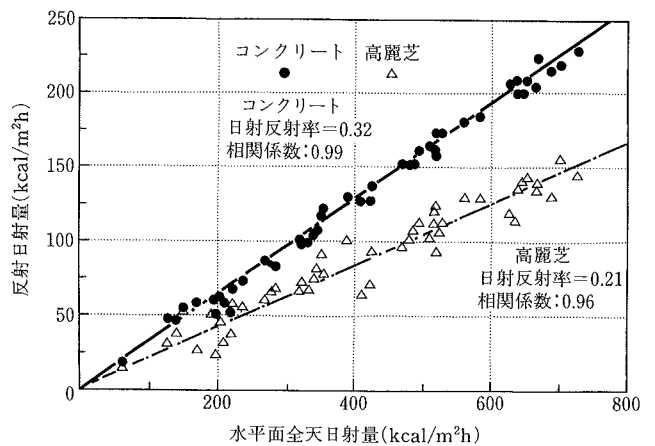


図-6 日射反射率の算定

件を図-3に、各試験体の表面温度変化を図-4に示す。日中のコンクリート表面と芝表面の温度差は10~15°Cあり、緑化による冷却効果が確認された。また、芝の冷却効果は同じように表面からの水の蒸発・蒸散が起こる土と比較しても3°C低い。これは、土が黒色で日射吸収率が高いためである。夜間になっても、熱容量の大きなコンクリート表面には日中の熱が蓄熱されるため、芝表面の方が2~3°C低くなっている。どの試験体でも日中の表面温度が日射量に左右されていることは図-3、4より明らかであるが、緑化地盤では水分の蒸発・蒸散という形でかなりの熱が逃げて行くため日射の影響を緩和している。

図-5に各試験体の表面温度の日較差と日積算日射量の関係を示す。コンクリート地盤では、日射の影響をもちに受けて表面温度が上昇するが、土や芝では表面からの蒸発・蒸散という形で熱を逃がすはたらきが生じ、日射による影響を緩和している。特に芝では土中の水分を保持するはたらきもあるため、その効果は大きい。そのため回歸線の傾きはコンクリート>土>芝となり、緑化地盤が日射による温度上昇を抑制している効果が現れている。

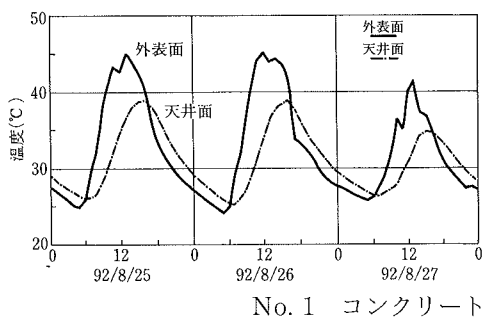
2.3 実験期間

屋上の緑化は、夏には外部環境の冷却効果や冷房熱量削減をもたらす、冬には暖房熱量削減が期待できるが、中でも日射の強い夏季の熱環境改善効果がとりわけ大きい。トータルな熱エネルギー評価を行い、芝の生育状況や維持管理方法を調査するためには年間を通じた長期的観測が必要であり、実験は92年8月から開始し、93年7月までを予定している。本件では92年の8~9月のデータを解析し、夏季の熱環境の改善効果について検討した。今後、冬季の熱環境評価と年間のエネルギーを行う予定である。

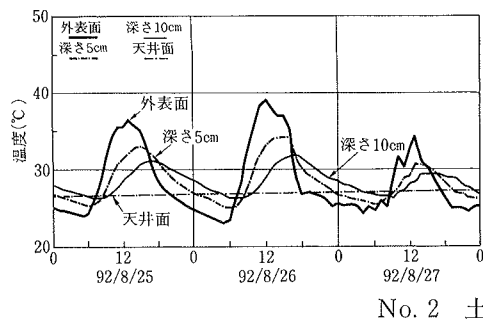
3. 夏季熱収支測定実験の結果

3.1 都市の熱環境に対する屋上緑化効果

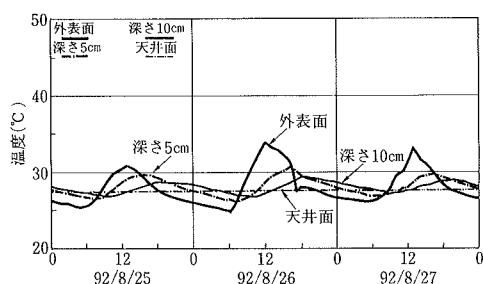
3.1.1 地表面温度の冷却効果 8/25~8/27の気象条



No. 1 コンクリート

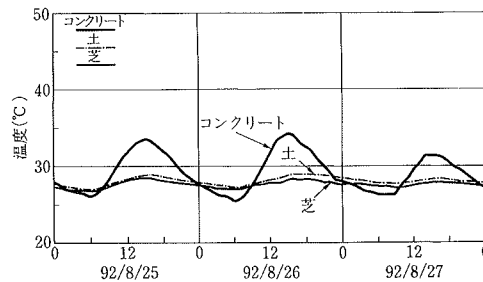


No. 2 土

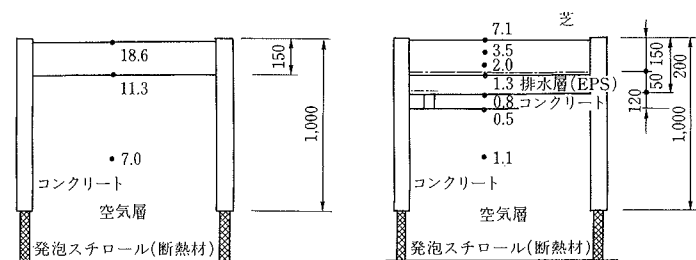


No. 3 芝

図一七 各試験体の地盤内部の温度変化

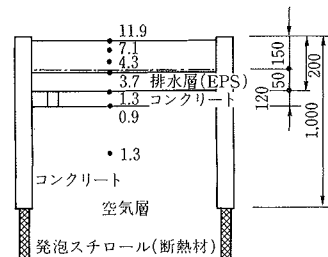


図一八 各試験体の室内温度変化

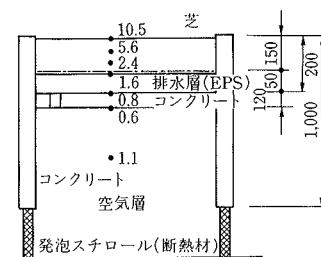


No.1 コンクリート試験体

No.3 芝の試験体



No.2 土の試験体



No.4 芝(軽量化地盤)の試験体

図中の数値はすべて℃で表している。

図一九 各試験体の日較差

3.1.2 日射の照返し防止効果 図一六は9月の測定結果より算定した日射反射率である。標本データは太陽高度があり測定の誤差の少ない10:00~15:00のものを使用した。コンクリートの日射反射率は0.32, 芝は0.21であり, コンクリートを緑化することによって日射の照返しを34%減らせることが確認された。日射反射率は光学的性質によって決まる各物質に固有の値であるが, 都市の高温化や人体に与える不快感は大きな問題である。東京の夏季の日積算日射量はだいたい4,000 kcal/m²・dayと推定されるので, 緑化面積を1m²増やすと, 1日に440 kcalの反射日射量を軽減することが可能である。

3.1.3 赤外線カメラによる放射温度測定 写真一四は赤外線カメラで測定した放射温度である。日中のコンクリート表面の高熱化と緑化による冷却効果が示され, 夜間もコンクリート表面では蓄熱効果で温度が下がらない。都市化に伴うこうしたヒートアイランド現象の出現は, 広域的にはCO₂問題とともに地球温暖化の原因となっている。

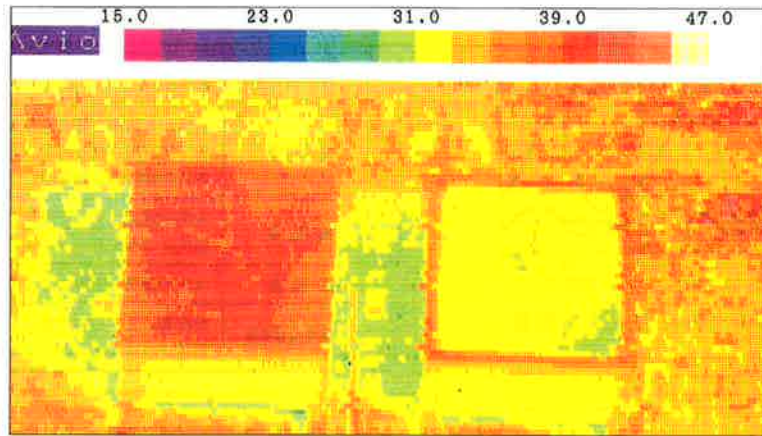
3.2 屋上緑化の省エネ効果

3.2.1 温度変化にみる緑化地盤の断熱能力 図一七に各部温度の経時変化を示す。コンクリート試験体の天

井温度は最高で39℃まで上昇しており, 室内の冷房にかかる負担が大きい上, 輻射熱による室内環境の悪化は避けられない。それに対して, 緑化地盤の天井温度は日変動がほとんどなく27℃で安定している。

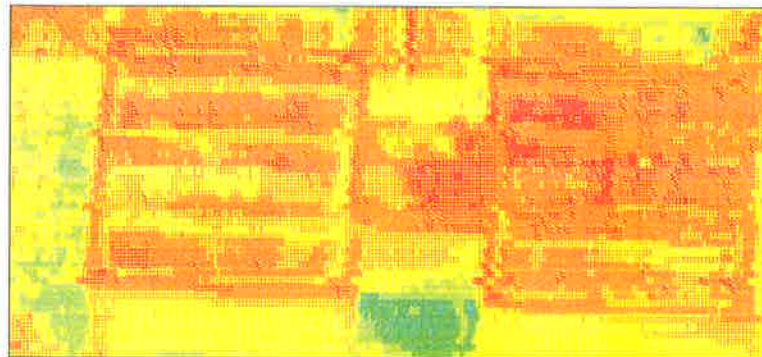
図一八には各試験体の室内温度変化を, 図一九には8月の日較差平均値を示す。コンクリート試験体の室内温度は外表面と2時間の時間後れが生じるため14時にピークに達し, 最高で34℃になり, 午後の熱環境の悪化が目立つ。土や芝は27℃前後で安定しており, 問題はない。

3.2.2 室内に侵入する熱量 図一十, 十一に伝導熱量に関する実験結果を示す。地表面に入射した日射エネルギーの一部が地盤内部を伝導して天井面に達したものが図一十の結果であるが, 緑化した試験体は熱容量の大きなコンクリート試験体と比較して室内に侵入する熱量をカットしている様子を読み取れる。これは試験体を構成する物性値から算定した計算値とも一致した。図一十一には1日に室内に侵入する熱量を8月の平均値で示し, コンクリート417 kcal/m²・day, 土55 kcal/m²・day, 芝30 kcal/m²・dayで, 断熱性能評価は, 芝>土>コンクリートとなることを確認した。



No. 1 コンクリート

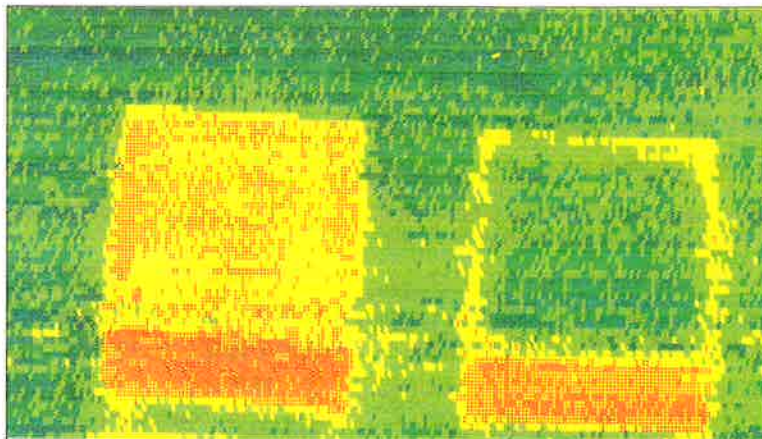
No. 2 土



No. 3 芝

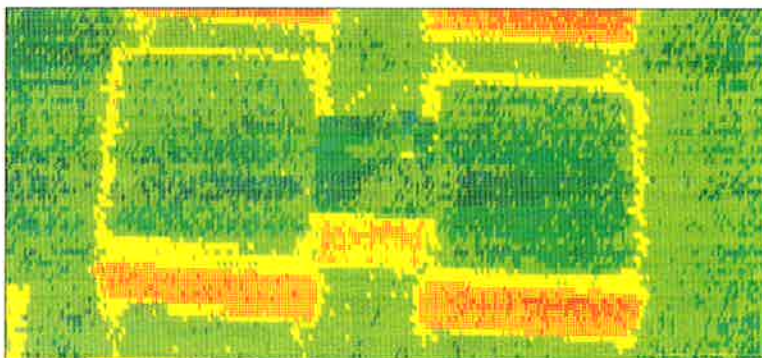
No. 4 芝 (軽量化)

92.7.8 15:00撮影



No. 1 コンクリート

No. 2 土

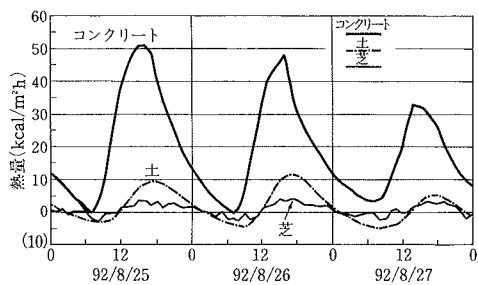


No. 3 芝

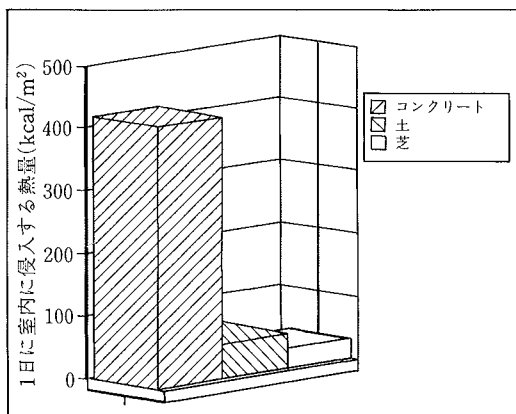
No. 4 芝 (軽量化)

92.7.9 0:00撮影

写真-4 表面の放射温度



図一10 各試験体の室内に侵入する熱量



図一11 1日に室内に侵入する熱量

3.3 緑化地盤の軽量化とメンテナンス

図一7から緑化地盤の表面から深さ10cmの地点で断熱が十分になされていると判断され、断熱性能上は現行（土層15cm、排水層5cm）の地盤をもっと薄くする余地が残っている。

しかし、植物の生育上、薄層化にも限界があり、芝の品種改良や薄い地盤に適した植物の調査等によりこれをクリアする必要がある。現時点では軽量化の手段として軽量添加剤の開発が中心となっているが、薄層化の検討も将来必要となろう。

緑化地盤のメンテナンスは年3回必要でその費用は年間1m²あたり2万円前後である。また、雑草の侵入に対しても強いことが長期観察を通して判明した。

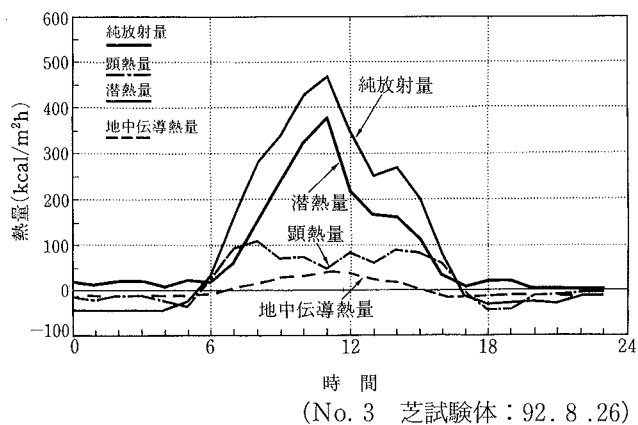
4. 地表面の熱収支の算定

表一3に地表面の熱収支成分を示す。地表面の熱収支方程式は、地表に到達した太陽エネルギーが熱に変換された後いかなる形態で熱が移動したか、エネルギー保存則から定めたものである。

実験から対流熱伝達率を22.7 kcal/m²h°Cと算定した。このときの緑化地盤表面の熱収支を図一12に示す。日中には潜熱量が顕熱量を大きく上回って温度上昇を抑制し、地中伝導熱量はオーダーが小さく省エネ効果を表している。緑化地盤の表面で受けた日射熱のうち、21%は大気中に反射され50 kcal/m²h程度の実効放射を放出して

表一3 地表面の熱収支成分

地表面の熱収支方程式 純放射量=顕熱量+潜熱量+地中伝導熱量	
純放射量	大気から地面に侵入する太陽エネルギーと地面から大気中に向けて放出されるエネルギーの差。反射日射と地面から放出される輻射熱は熱環境にマイナスである。
顕熱量	大気が地面によって暖められるときに生じる熱量。都市の高温化につながる
潜熱量	水分の蒸発・蒸散によって地表面から失われる熱量。
地中伝導熱量	熱伝導により地中に伝わる熱量。建物の屋根からの地中伝導熱量は冷房エネルギーを増大させる。



図一12 地表面の熱収支の算定

いる。残りの熱量は顕熱に38%、潜熱に59%転化される。潜熱量を直接法によって計測することは難しく、今回の測定ではエネルギー収支をもとに推定したが、土中の水分圧の測定から算定する方法についても検討中である。

5. おわりに

今回の調査では、屋上緑化地盤が外部の熱環境や室内の熱環境に与える波及効果を定量的に捕らえ、地盤の断熱性能を確認した。得られた結果は、以下のとおりである。

① 緑化によって日中の表面温度が15°C近く下がり、日射の照返しに2/3になるなどヒートアイランド対策として効果的である。

② 緑化地盤の導入によって、屋根から室内に侵入する熱量が約1/14に軽減し、日中の天井温度の上昇を防いで輻射熱をカットするなどエネルギー効果を確認した。

③ 緑化地盤の土層厚（現行20cm）は、断熱性能の上ではさらに薄くする余地がある。

今後は、冬季の熱環境評価や年間での経済性評価を行うほか、土中の熱・水分の移動現象を解析する予定である。

参考文献

1) 塩田, 喜田, 平間, 杉本: 軽量盛土による人工地盤上の緑化に関する研究 (その1), 大林組技術研究所報, No. 44, p. 95~100, (1992)