

薄層屋上緑化による建物温熱環境改善効果に関する実測調査

佐 竹 晃 野 津 常 義^{*1}
森 橋 大 輔

要 旨

環境やアメニティ性向上への関心の高まり，東京都条例による義務化等を背景に，屋上緑化の普及が進んでいる．なかでも建築物への荷重が少なく，メンテナンスを省力化できる無灌水型薄層緑化システムの普及が拡大している．屋上緑化には，ヒートアイランド現象緩和，景観向上，躯体・防水層保護といった効果のほかに，屋上の滞在温熱環境改善，最上階居室の温熱環境改善や空調負荷低減といった効果があるとされている．しかしながら，この温熱環境改善効果や空調負荷低減効果に関するデータは十分に揃えられておらず，普及が進む無灌水型の薄層緑化システムについてはなおさらである．

今回，この温熱に関わる効果を明らかにすべく，マンション，事務所ビルに採用した薄層屋上緑化にて，長期実測を行ったのでその結果を報告する．実測の結果，薄層屋上緑化でも夏の最上階居室の温熱環境を改善する効果があること，屋上断熱された建築物では灌水の有無が夏の日射熱遮蔽効果に殆ど寄与しないことが明らかとなり，またその改善効果量を定量化することができた．

キーワード 屋上緑化 / セダム薄層緑化 / 断熱・遮熱効果 / 環境配慮

目 次

- | | |
|--------|--------|
| 1．はじめに | 2．実測概要 |
| 3．実測結果 | 4．まとめ |

INVESTIGATION INTO THERMAL PROPERTIES TO BUILDING OF THIN ROOFTOP GREENING SYSTEM

Akira SATAKE Tsuneyoshi NOZU Daisuke MORIHASHI

Synopsis:

Rooftop greening have come into wide use recently. Especially, thin and no sprinkling-water types rooftop greening has been spreading, because which can economize a maintenance and there is little load to construction. The reason that has come into wide use is for mitigation of urban heat island phenomena has become crucial, the regulations of Tokyo government and the increase in desire for amenity etc. In addition, it's said that rooftop greening have thermal effect that reduce air conditioning load of the highest floor's rooms. In this study, in order to clarify the thermal effect to building, we have been making as observation of the climate, temperature and heat flux at the greening roofs at a condominium and an office building. We will report the variations of the temperature and the balance of heat flux inside the rooms, after greening and sprinkling-water. And show the improvement of the thermal index in the rooms below by measurement and numerical simulations.

^{*1} 建築エンジニアリング・設計部

1. はじめに

環境やアメニティ性向上への関心の高まり、東京都条例による義務化^{注1)}、緑化システム商品の進展を背景に、屋上緑化の普及が進んでいる。なかでも建築物への荷重が少なく、剪定や灌水等のメンテナンスを省力化できる、無灌水型のセダム薄層緑化システムの普及が拡大している。

屋上緑化の主な導入目的は、ヒートアイランド現象の緩和、地域緑化への貢献、景観・アメニティ性向上等を期待したものであるが、この他に夏期の屋上や最上階居室の温熱環境を改善し、またその効果により最上階居室に対して省エネルギー効果があるとされている。具体的には夏期冷房負荷低減・天井焼け込み低減、冬の断熱等の効果が期待されている¹⁾。

これまでに、屋上緑化層各部の温度特性や熱収支に関わる実測や、実測結果に基づく熱水分物性値の解明といった研究事例等は多く行われてきた²⁾³⁾が、実際の建築物最上階居室での温熱環境改善効果や省エネルギー効果に関する実測データは、未だ十分揃えられていない。そして、普及が進む無灌水型のセダム薄層緑化システムについては、植生・土壌からの水分蒸発が少なく、夏期の温熱環境改善効果が灌水型緑化に比べ期待出来ないとされているものの、十分なデータをもって示されていないのが現状である。

本報告は、緑化手法の違いや灌水の有無による最上階居室への熱的影響・効果を明らかにすることを主目的とし、集合住宅と事務所ビルに採用した薄層屋上緑化システムにて、実フィールドにおける長期実測を行った結果である。

2. 実測概要

表-1 に示した、東京都に建つ2つの建築物の屋上薄層緑化システムにて、温熱環境に関わる長期実測を実施した。
2.1 集合住宅屋上緑化^{注2)}

集合住宅屋上のほぼ全面(約 200m²)に、軽量で建築構造への負担が少なく、灌水が殆ど不要な薄層緑化システム(以下薄層緑化)^{4),5)}を採用した(写真-1)。また一部(10m²程度)に、土壌厚さ約 30mm のセダム緑化マット(以下超薄層緑化)を採用した(図-1)。屋上スラブ構成は、鋼管中空コンクリート(t=250mm)+硬質ウレタンフォーム系断熱ボード(t=35)+アスファルト露出防水の外断熱構造である。その上面に、薄層緑化区では人工軽量土壌(t=100)を設け、セダム類と花卉類(野菊等)を植生に採用した(図-3)。実測は 2001 年 5 月から 2003 年 4 月までの2年間行った。実測項目は、薄層緑化部2ヶ所と、超薄層緑化部、非緑化部各1ヶ所にて、土中温度、スラブ上表面温度、スラブ上表面熱流量等と、屋上での外気象(外気温湿度、水平面日射量)とし、室内側の実測は行っていない(図-1,3)。なお、2ヶ所の薄層緑化部で得られた実測値には顕著な差がなかったため、次項実測結果では両者を平均した値を示す。

2.2 事務所ビル屋上緑化

当社本店の屋上に薄層緑化システム試験区を設置した(写真-2)。ここでの屋上緑化は、タイマーによる自動灌水

表-1 実測調査対象

	緑化種類(計測対象)	屋上スラブ	下階室状況
集合住宅	・薄層セダム(無灌水) ・超薄層セダム(無灌水) ・非緑化	外断熱構法	不実測 (間欠空調と推定される)
事務所ビル	・薄層セダム(無灌水) ・芝(灌水有り) ・非緑化	内断熱構法	日中～夜間 連続空調
備考 (調査の ねらい)	緑化有無、緑化厚さの違い、灌水有無での比較評価	断熱構法の違いによる比較評価	-



写真-1 集合住宅屋上緑化(図-1 A 方向より望む)

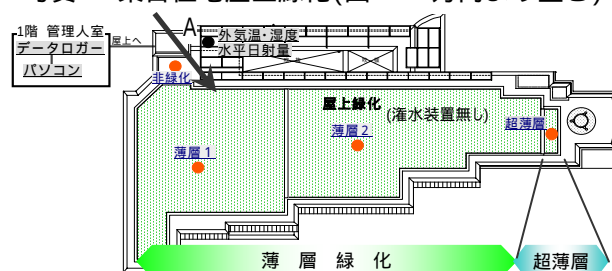


図-1 集合住宅屋上緑化平面図、測定点



写真-2 事務所ビル屋上緑化(図-2 B 方向より望む)

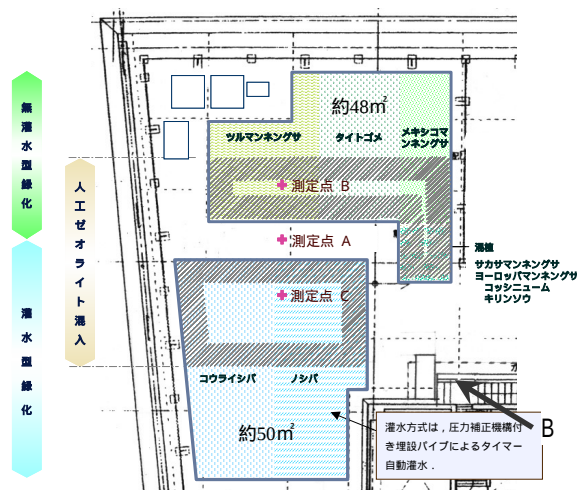


図-2 事務所ビル屋上緑化平面図、測定点

方式の芝緑化区(土壌厚 120、写真-2 左側)と、無灌水型のセダム薄層緑化区(土壌厚 60、写真-2 右側)に大別される。屋上スラブ構成は、タイル仕上げコンクリートスラブの室内側に、樹脂系断熱ボード(t=30)貼り付けた内断熱構造である。

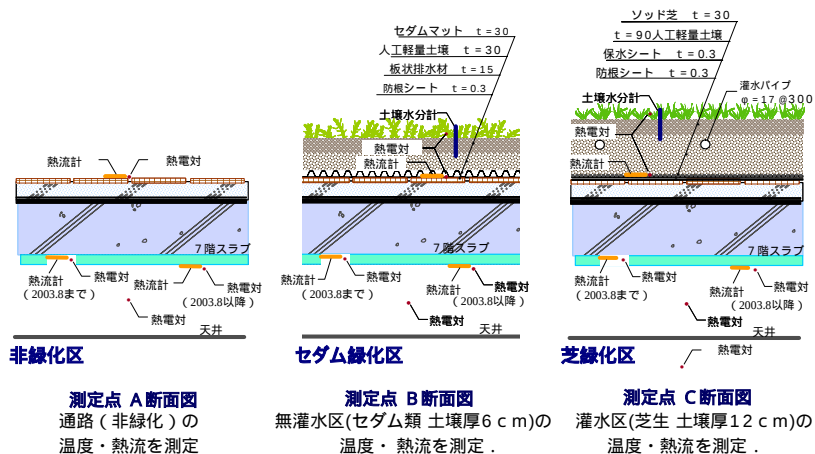
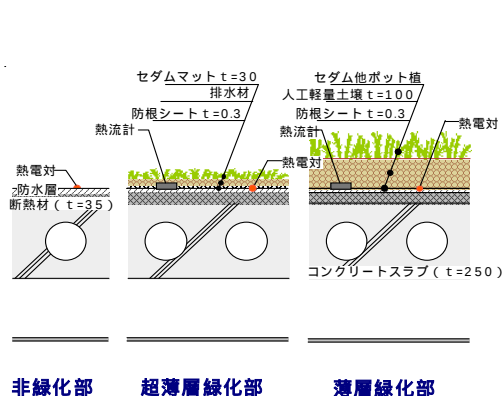


図-3 屋上緑化断面図と計測点(集合住宅)

図-4 屋上緑化断面図と計測点(事務所ビル)

実測は2002年1月から現在まで継続して行っている。実測項目は、薄層セダム緑化区、芝緑化区、非緑化区各1ヶ所にて、土壌内温度、スラブ上下面の温度・熱流量、最上階居室温や土壌水分率等と、屋上での外気象(外気温、水平面日射量)とした(図-2,4)。なお、スラブ下表面の温度・熱流センサーは図-4に示したように盛り変えを行い、2003年8月以降は断熱材下表面での実測を行っている。最上階室は一般事務室となっており、通常は平日8:00~18:00の間、冷暖房がなされている。

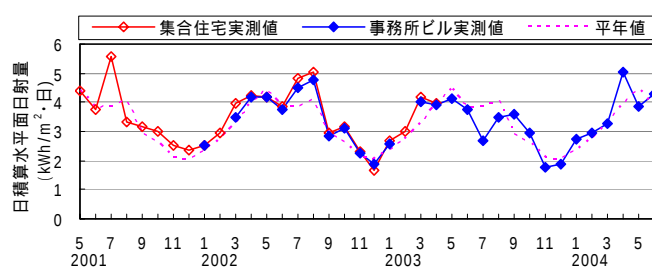


図-6 水平面日射量実測結果(日積算値)

3. 実測結果

3.1 外気温と水平面日射量

2001年5月から2004年6月までの、外気温の日最高・日最低の月別平均値を図-5に、水平面日射量日積算値の月別平均を図-6に示す。両図中には東京(大手町)での平年値を併せて示した。

外気温は、2001年夏や2002年の冬から夏にかけて平年より高く、2003年夏は平年より低い冷夏であった。日射量も同様に2001年夏、2002年夏に平年より多く、晴天日が多かったこと、また気温が低かった2003年7月は日射量が少なく、曇天日が多かったことがわかる。しかしながら、全体的に見ると実測値は平年値に近い推移をしており、今回の屋上緑化に関わる実測結果が、平均的な気象条件下で得られたものであったと言える。

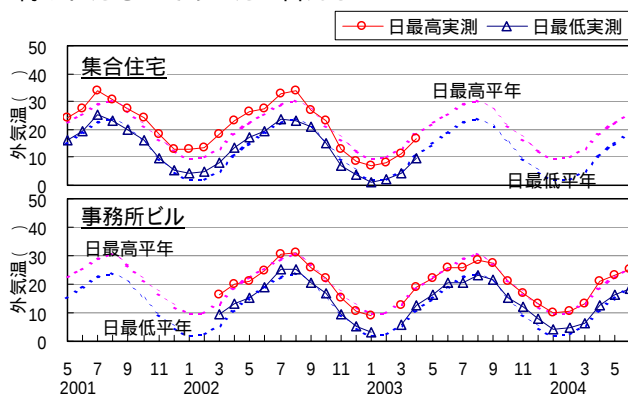


図-5 外気温実測結果

3.2 事務所ビルでの最上階居室気温(空調運転状況)

事務所ビルでは、屋上緑化直下階の室温計測を、床から高さ約2mの位置にて実施した。その結果の各日同時刻の値を夏期、冬期に分け、また平日と土日に分けて、1ヶ月分平均した結果を、図-7に示す。

夏期、冬期ともに、平日は8:00に冷暖房が運転開始され、夏期は18:00に冷房停止、冬期は18:00以降に徐々に暖房停止されていたと見られる。平日就業時間帯の室温は、夏期、冬期ともに25℃前後で推移していた。なお、休業日(祝土日)も昼前に室温が変動しており、平日程強くないが冷暖房運転がなされていたことがわかる。

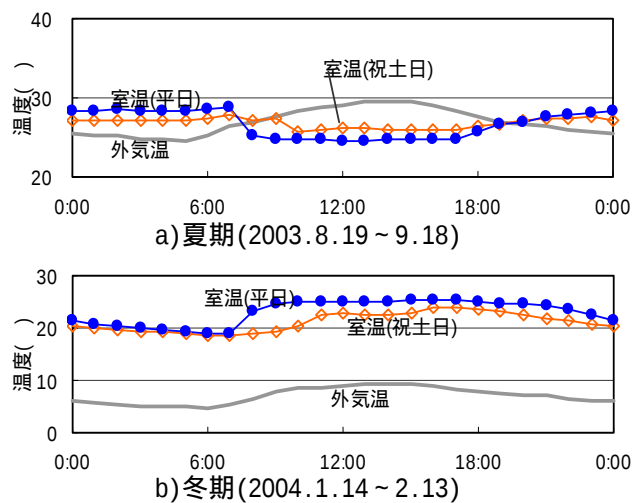


図-7 最上階居室気温

3.3 屋上緑化による屋上環境改善効果

写真-2 に示した範囲の屋上表面サーモ画像を、夏期晴天日の正午から 1 時間毎に撮影した結果を図-8 に示す。

屋上表面温度は 13:00 に最高値を示し、非緑化部では約 50 に上昇している。これに対し、緑化部では 35 程度と、外気より 2 程度の上昇で収まっており、非緑化部に対して約 15 低く保たれている。芝緑化区とセダム緑化区を比較すると、セダム緑化区の表面温度が若干低かった。これは、セダム緑化区は土壌を外から視認できない程、緑被率が高かったのに対し、芝緑化区では芝の合間に土壌が視認できる状況であったことが、起因していると考えられる。いずれにしても屋上緑化は、夏期の屋上表面温度を継続的に低下させ、屋上滞在温熱環境を改善させる効果のあることが確認された。

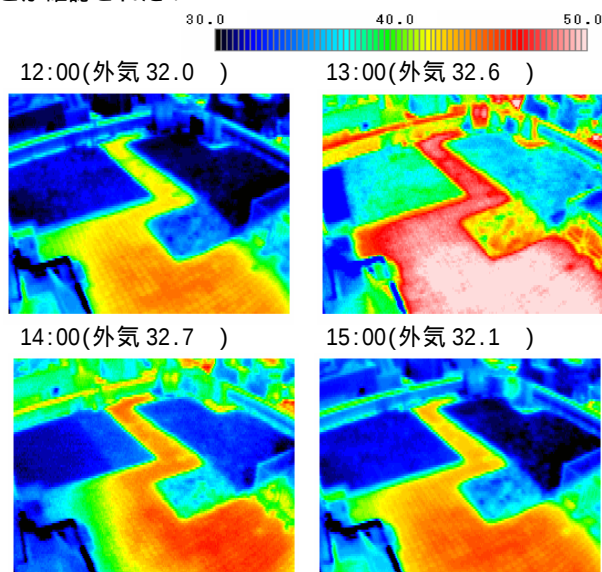


図-8 屋上サーモ画像(事務所ビル,2002.08.29)

3.4 屋上スラブ屋外側表面温度

屋上スラブ屋外側表面(以下スラブ上表面)温度実測結果と、外気温、水平面日射量について、各日同時刻の実測値を月毎に平均処理した。その結果のうち夏期と冬期の結果を、集合住宅と、事務所ビルに分けて示す。

(1)集合住宅屋上緑化(外断熱)

薄層緑化部、超薄層緑化部、非緑化部のスラブ上表面温度、外気温、水平面日射量の、夏期(8月)の結果を図-9に、冬期(1月)の結果を図-10に示す。

夏期のスラブ上表面温度は、非緑化部では水平面日射量が最高値を示す 12:00 に 60 と、日最高外気温より 25 以上高く推移した。超薄層緑化部では、14:00 に最高値を示し日最高外気温より約 15 高くなり、薄層緑化部は 16:00 に最高値を示し日最高外気温より若干の上昇で収まった。土壌厚が増すに従い夏期日中の日射熱が遮断されている様子わかる。また明け方のスラブ上表面温度は、薄層緑化部や非緑化部が外気温相当まで低下するのに対し、超薄層緑化部では外気温より 5 近く高く推移していた。今回の実測結果だけでは明言できないが、超薄層の緑化基盤最下部にある中空層(樹脂製排水マット)が熱抵抗とな

って夜間のスラブからの熱放出を妨げている可能性がある。

冬期のスラブ上表面温度は、夏期の結果と概ね同じ時間帯に最大値を示すが、日最高外気温との差は夏期より小さい。なお、明け方の温度は、非緑化部が最も低くなっている。非緑化部は天空放射により冷却され易いため、よく冷却される日には外気温より 7 程低くなっていた⁵⁾。

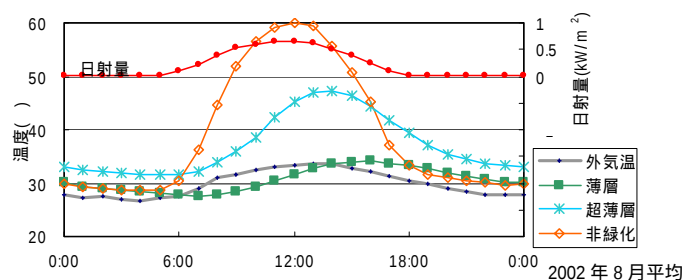


図-9 屋上スラブ上表面温度と外気温(夏期)

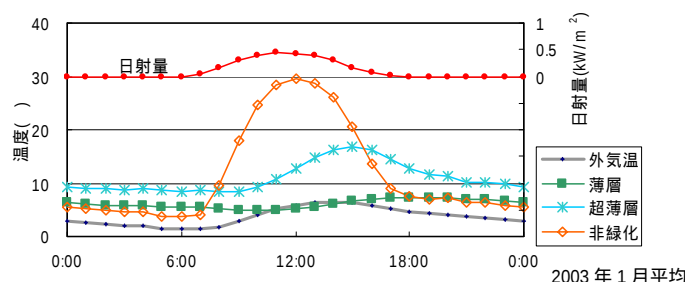


図-10 屋上スラブ上表面温度と外気温(冬期)

(2)事務所ビル屋上緑化(内断熱)

芝緑化区、セダム緑化区、非緑化区のスラブ上表面温度、外気温、水平面日射量の、夏期(8月)の結果を図-11に、冬期(2月)の結果を図-12に示す。

非緑化区温度は、日射量ピークから若干遅れた 13:00 に最高値を示し、外気温より夏期で約 17、冬期で約 10 高かった。スラブが内断熱でありコンクリートの高い熱容量の影響で前記外断熱ほどは昇温しない様子わかる。緑化区の温度は、芝、セダム区ともに、また夏期、冬期ともに日較差が約 2 と終日殆ど一定であり、冬期夜間は非緑化部に比べ 8 程高く保たれ、緑化の保温効果が確認された。

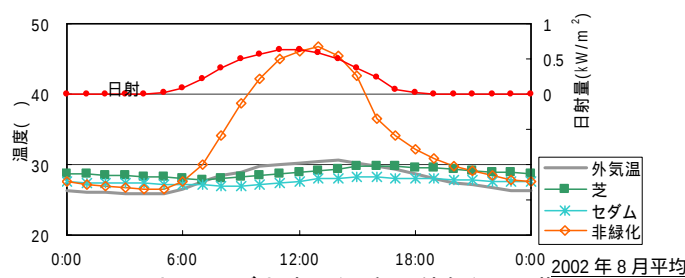


図-11 屋上スラブ上表面温度と外気温(夏期)

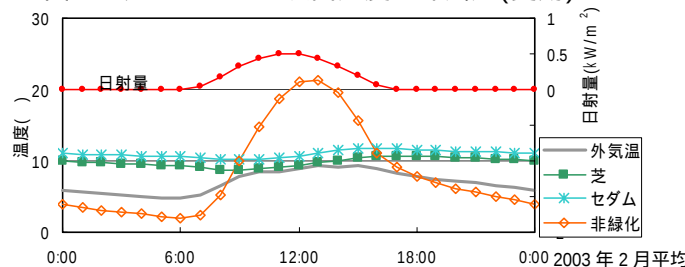


図-12 屋上スラブ上表面温度と外気温(冬期)

3.5 屋上スラブ上表面熱流量

屋上スラブ上表面の熱流量実測値を、前項と同様に各日同時刻の値を月毎に平均処理した。以下にその結果を示す。

(1) 集合住宅屋上緑化(外断熱)

薄層緑化部と超薄層緑化部の屋上スラブ上表面熱流量の、夏期と冬期の結果を図-13 に併せて示す。以下、熱流量の正は、屋上スラブから室外側に熱が流れている(夏は放熱、冬は熱損失)ことを表している。

夜間の熱流量は、両緑化部で両季節ともに $5\text{W}/\text{m}^2$ 前後で推移し、緑化種類や季節間で顕著な差はなかった。夏期日中は日射熱が屋上スラブへ流入している様子が見られる。その量は薄層緑化部で最大約 $3\text{W}/\text{m}^2$ 、超薄層緑化区で約 $14\text{W}/\text{m}^2$ であり、土壌が厚い薄層緑化のほうが、夏期に屋上スラブへ流入する日射熱を遮る効果が高いことわかる。冬期は、薄層緑化部では日中も屋上スラブから放熱(暖房熱損失)が行われているのに対し、超薄層緑化部では若干の日射熱の流入が起こっている。冬期は、超薄層緑化のほうが最上階居室の温熱環境を向上させる効果があることがわかる。

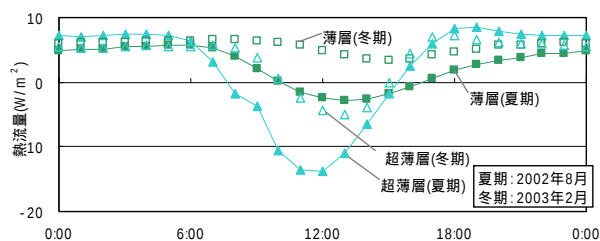


図-13 スラブ上表面熱流量(夏期と冬期)

(2) 事務所ビル屋上緑化(内断熱)

芝緑化区とセダム緑化区のスラブ上表面熱流量の、夏期と冬期の結果を図-14 に示す。夏期は、両緑化区とも夜間に屋上スラブから熱が放出され、日中に屋上スラブへ熱が流入している。この日中の流入量は、無灌水のセダム緑化区のほうが少なく、夏期の最上階居室温熱環境の改善効果はセダム緑化区のほうが高いといえる。冬期は、熱流量がほぼ0となる昼過ぎを除くと、大半の時間で熱流出(熱損失)が起こっている。この流出量は、セダム緑化区のほうが若干少なく優位であることがわかる。

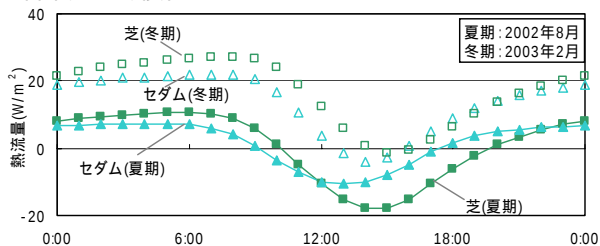


図-14 スラブ上表面熱流量(夏期と冬期)

3.6 土壌含水率の年変化(事務所ビル)

事務所ビルでは、灌水を定期的(週に1回前後)に行う芝緑化区と、無灌水のセダム緑化区にて、土壌含水率を実測した。その長期変化を図-15 に示す。芝緑化区では、灌水直後や降雨直後を除くと、冬期に $0.4\text{m}^3/\text{m}^3$ 弱、夏期に $0.2\text{m}^3/\text{m}^3$ 強で年間を通して安定した推移をしており、 $0.2\text{m}^3/\text{m}^3$ を大きく下回することはなかった。セダム緑化区で

は、夏期や中間期に土壌含水率が低く推移し、冬期は高く推移する傾向が見られた。夏期や中間期のセダム緑化区では2~4週間にわたり過度に土壌乾燥状態になることが幾度あり、図-15 中に枠で示した夏期に土壌含水率低下が始まなくなる $0.05\text{m}^3/\text{m}^3$ を下回る頻度が約15%出現した。

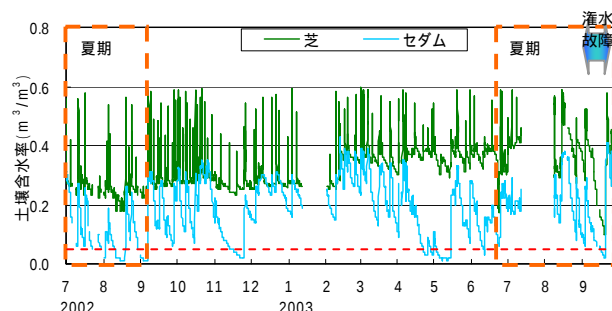


図-15 土壌含水率の長期変化

3.7 屋上スラブ下表面熱流量(事務所ビル)

事務所ビルでは、緑化区と非緑化区の屋上スラブ下表面(断熱材下面)熱流量を実測した。この実測値の差が、屋上緑化による最上階居室熱環境の改善量であるといえる。各日同時刻の値を1ヶ月分平均した結果のうち、夏期の結果を図-16 に冬期の結果を図-17 に示す。

夏期の非緑化区では、 $4\sim 7\text{W}/\text{m}^2$ の居室への熱流入が一日を通し継続的にあった。緑化区ではこの熱流入が大幅に低減され、夜間は逆に居室の熱が屋上スラブへ流出している。屋上緑化が、最上階居室の熱環境改善や冷房負荷低減に寄与していることがわかる。なお、セダム緑化区と芝緑化区では、若干セダム緑化区が室への熱流入が少ない傾向があるが、両者に顕著な差はないといえる。

冬期は、全試験区とも一日を通して居室の熱がスラブ側へ流出していた。その量は、非緑化区と芝緑化区が同等で、セダム緑化区が一日を通し $2\text{W}/\text{m}^2$ 前後少なく優位であった。

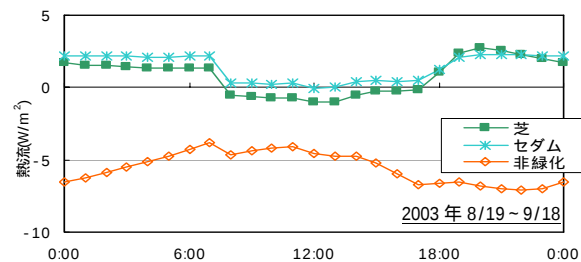


図-16 スラブ下表面熱流(夏期)

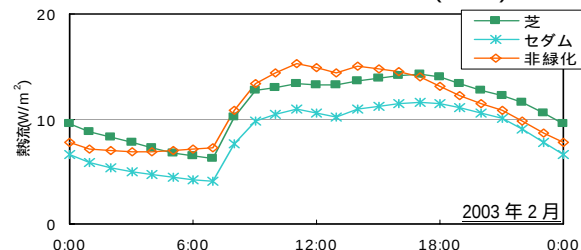


図-17 スラブ下表面熱流(冬期)

図-18 に、スラブ下表面熱流量の日最大値、日最小値、および日積算値の長期的な変化を示した。緑化により、継続的に夏期の日射熱流入が遮断されていること、冬期の熱流出量がセダム緑化区で低減されていることがわかる。

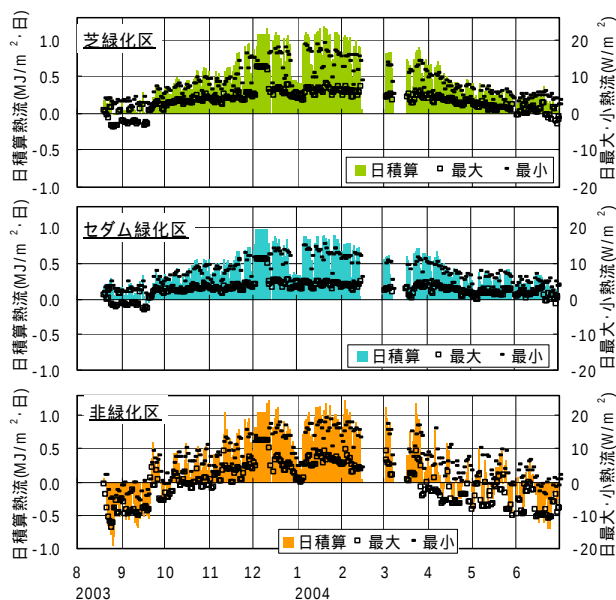


図-18 屋上スラブ下表面熱流量の長期変化

3.8 屋上緑化による最上階熱環境改善量

屋上緑化による最上階居室の温熱環境改善効果量を、天井スラブ下表面での熱流量日積算値により評価した。熱流量日積算値を1年間分月毎に平均した、集合住宅の結果を図-19に、事務所ビルの結果を図-20に示す。室内側計測を行っていない集合住宅の結果は、スラブ上表面温実測値を用いた非定常熱伝導シミュレーション^{注3)}により推定した結果で、事務所の結果は実測値の集計結果である。

集合住宅では、薄層緑化により夏期の日射遮熱が行われる半面、冬期はこの遮熱作用により暖房熱損失が大きくなることがわかる。超薄層緑化部は、非緑化部と殆ど差が無かった。薄層緑化の夏期の日平均遮熱効果は $0.47(\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{日})$ であり、家庭用エアコン電気料金^{注4)}に換算すると $1.3(\text{円}/\text{m}^2 \cdot \text{日})$ 、 80m^2 住戸の場合約 $100(\text{円}/\text{戸} \cdot \text{日})$ と推定された。

事務所ビルでも、緑化の日射遮熱効果で夏期の室内側への熱流入が改善されている。この改善量は約 $2(\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{日})$ であり、エアコン電気料金^{注4)}に換算すると約 $3.3(\text{円}/\text{m}^2 \cdot \text{日})$ であった。冬期は、芝緑化により日暖房熱損失量が若干大きくなること、セダム緑化では同熱損失量が低減されることがわかる。図-20に示した夏期・冬期にのみ継続的に冷暖房を行われると想定すると、屋上緑化による冷暖房電力料金の年間削減効果は、芝緑化では約 $350(\text{円}/\text{m}^2 \cdot \text{年})$ 、セダム緑化では約 $500(\text{円}/\text{m}^2 \cdot \text{年})$ と推定^{注4)}される。

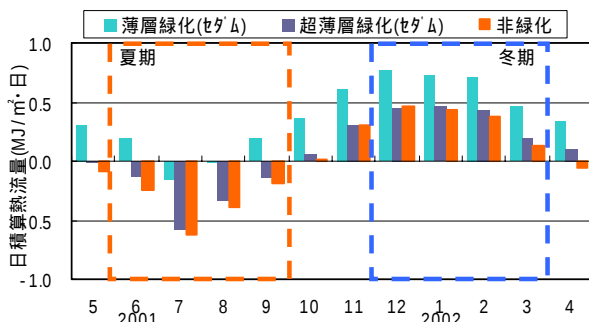


図-19 屋上スラブの日積算熱流量(集合住宅)

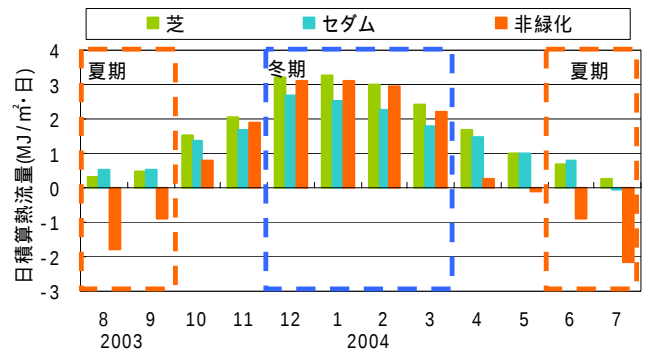


図-20 屋上スラブの日積算熱流量(事務所ビル)

なお、集合住宅と事務所ビルで冬期の傾向が異なったことや、熱流量のオーダーが異なるのは、断熱構法、冷暖房条件(室温条件)、断熱材厚が両者で異なることが起因していると考えられる。

4. まとめ

集合住宅と事務所ビルに採用した薄層屋上緑化にて、温熱環境に関わる長期実測を実施し、以下の知見を得た。

- ・夏期日中の屋上緑化部表面温度は、外気温同等に維持され、緑化が屋上滞在温熱環境の改善に寄与することを確認した。この表面温度は灌水有りの芝緑化区と、無灌水のセダム緑化区で同等であった。
- ・土壌厚 100mm 前後の薄層屋上緑化は、夏期の最上階居室温熱環境を向上させる効果をもつことを確認し、この効果による冷房負荷低減量を定量化した。一方、屋上緑化の日射遮熱作用が、冬期最上階居室温熱環境を悪化させる傾向にあることを確認した。
- ・土壌厚 30mm 程度の超薄層緑化では、最上階居室の温熱環境には殆ど影響しない。
- ・屋上緑化に灌水をすると、水の蒸発散現象により、最上階居室の夏期温熱環境が向上すると言われているが、内断熱がなされた屋上では、その効果は確認できなかった。

断熱が施された屋上スラブでも、薄層屋上緑化が、最上階居室の特に夏期の温熱環境改善等に寄与することを明らかとした。しかしながら、その年間効果量は断熱材厚の増大といった手法と比べて、目を見張るような大きなものではなかった。今後、今回明らかになった省エネ効果の他にも、環境保全効果や防水層保護効果等を明らかとし、初期コストや植生保全コストの増大等も勘案した、総合的な薄層緑化システムの評価を行っていく必要がある。

注1)平成 13 年に「東京における自然の保護と回復」に関する条例が改正。「敷地が民間 1000m^2 以上、公共 250m^2 以上の建築物の、敷地・屋上(歩行可)の 20% 以上に緑化を義務付ける」等が定められた。

注2)集合住宅屋上緑化の実測結果は、一部既報^{文5)}にて報告した。今回事務所ビルの結果とあわせて再考察した結果を報告する。

注3)室温を、2月24日、8月28日の年Sin波周期で推移すると仮定。

注4)家庭用電力料金 24 円/kWh、業務用電力料金 15 円/kWh。エアコン COP(成績係数)=2.5 とした。

参考文献

- 1)環境改善のための屋上緑化建築技術認定基準(BCJ-CS-7-2002)、(財)日本建築センター、2002.01
- 2)堀口、梅干野他、屋上芝生植栽の熱的特性に関する実験的研究(その1～その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、1991
- 3)垣鍔、溝口、雨海、石橋：薄層屋上緑化ユニットの熱的性能に関する実験的研究、日本建築学会環境系論文集、pp79-84、2004.04
- 4)田窪、小口：人工軽量土壌を用いた屋上緑化における土壌厚と各種植生との関係、前田建設技術研究所報 Vol.42、pp97-102、2001.9
- 5)佐竹、丸山、志村、義江：環境共生共同住宅レックスハイツ文京春日-環境配慮技術の導入効果に関する実測調査-、前田建設技術研究所報 Vol.43、pp75-82、2002.9