

緑のカーテンが教室の温熱環境に及ぼす効果

The Effects of Green Screen on the Thermal Environment of Classroom

成田健一*

Ken-ichi NARITA

要旨：小学校の校舎に施工された「緑のカーテン」による、教室の温熱環境改善効果について実測した。「緑のカーテンは」教室の放射環境の改善に大きく寄与しており、窓が開放され気温差が小さい場合にも、体感温度は大きく異なっている。一方「緑のカーテン」は通風阻害というマイナス面もあり、外壁との距離を確保するなど施工上の工夫が望まれる。SET*による評価では、放射環境改善による体感温度の低下は、通風阻害による上昇量の2倍程度と見積もられた。照度については非緑化教室に比べ1/3程度に小さくなるが、今回は明るさが確保されている非緑化教室でも照明は通常点灯されていたため、照明エネルギーの増大にはなっていなかった。

キーワード：ヒートアイランド、壁面緑化、温熱快適性、通風、蒸散

Abstract : Microclimatic observations about the thermal environment of classroom with outer vertical green screen were performed during 20 days in summer. Green screen have a large effect of improving the radiation environment, although it leads also negative effect for thermal comfort to reduce the cross ventilation rate. As for the illumination in the classroom, it was decreased to one-third of that without screen condition. However, it does not result in the increase of extra electric energy for the lighting, because artificial lighting equipments were always used even a well-lighted condition by the sky light.

Key Words : heat island, wall greening, thermal comfort, cross ventilation, transpiration

はじめに

近年、ヒートアイランド対策として「緑のカーテン」と呼ばれる壁面緑化が広がりをみせている。「緑のカーテン」とは、必ずしも明確な定義がなされているわけではないが、一般には建物の外側にネット等を取り付け、“ヘチマ”や“ゴーヤ”など、つる性の植物を窓の外や外壁近くに這わせたものをさしているようである。夏の強い日差しを和らげ、蒸散効果により涼風が得られ、クーラーなしでも部屋の温度を下げられる「自然のカーテン」、との解説で、戸建て住宅や集合住宅のベランダなど、個人で手軽に取り組める環境活動としてNPOなどによる市民活動の場で「緑のカーテン」という用語が象徴的に使われている。一方、いわゆるエコスクールという考え方の一つの活動として、学校の校舎への「緑のカーテン」の導入が東京都を中心に広がっている。平成19年度には、東京23区内だけでも100校余りの小学校で「緑のカーテン」が施工されている。しかしながら、このような「緑のカーテン」が実際にどのように教室の温熱環境に影響

を及ぼしているかを、人体の熱収支に基づく温熱環境形成のメカニズムに沿って実測した報告はわずかしかなかく（例えば、岡崎ほか、2006）、多くは熱画像による表面温度の画像が紹介されるに留まっている。そこで、今回は「緑のカーテン」が導入されている東京都杉並区の小学校を対象に、単に気温差のみではなく、体感指標に寄与する放射環境や通風条件までを含めた系統的な実測調査を行い、さらには懸念される室内照度についても評価を試みた。

1. 実測方法

今回測定を実施したのは、杉並区立桃井第一小学校の3階建ての校舎で、真南より約15度西に向けた南壁面に施工された緑化部分を対象とした。校舎の平面プランは、標準的な北廊下型で、建物の南側に教室が東西方向に連続して配置され、南側の校庭に面しているという配置である。測定期間は、2006年8月21日～9月10日の20日間とした。この期間の前半は夏休み期間中であり、無人で原則として窓は閉め切った状態となっているため、

*日本工業大学 工学部 建築学科

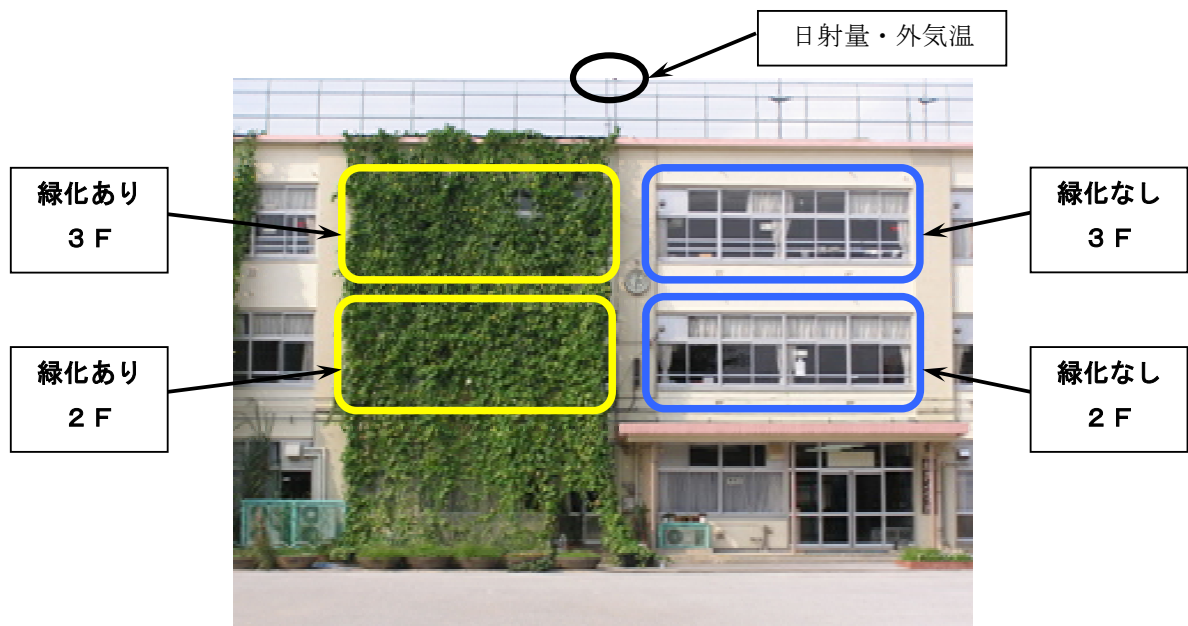


図1 測定対象とした教室の位置関係とバックグラウンドデータの測定位置

内部発熱がないという問題はありますが、この間のデータは校舎に空調装置を導入し窓を締め切って冷房したと仮定した場合の空調負荷の差異を近似的に表わしていることになる。一方、測定期間の後半は2学期が始まり、休日以外は授業などで生徒たちが在室し、通常の使われ方をした状態の把握が可能である。以上の異なる2種類の条件下における検討を目的に、上記の測定期間を設定した。

緑化面は2教室分の幅で施工され、この時期は屋上高さまで十分に生育していた。教室の温熱環境測定は、2階と3階を対象に、緑化が施工された教室とその東側の隣接する緑化なしの普通教室の計4教室で実施した(図1)。なお、バックグラウンドとしての全天日射量、外気温は、対象教室上部の屋上フェンス部分で測定した。

使用した測器の一覧を表1に示す。外気温・壁面温度・植物体温度・グローブ温度などは、線径0.32mmのT熱電対を使用し、後述する風速とともに1秒間隔でデータログに自動収録した。外気温は、二重のアルミ製日射遮蔽シェルタでカバーした内筒に装着(自然通風)、内外壁面温度はアルミテープで約10cm這わせて固定、葉

温は5cm程度這わせて接点部をテープで固定(教室側から施工したため、直射を受けない内側の日陰部分の葉)、茎温は1cm程度茎の内部に接点を茎とほぼ平行に差し込んでテープで固定し測定した。教室内については、直径15cmのグローブ球を南側の内壁から内側へ180cm、天井面から40cmの位置にぶら下げ、そのすぐ近傍で、無指向性の熱式ボールセンサで風速を測定した。温湿度センサと照度計は、教卓側の黒板の上端部にセンサを固定した。なお、参考として、赤外線放射カメラによる熱画像の測定を8月24日についてのみ、1時間毎に行った。

植物を育てるコンテナは、校舎の外壁から約2m離れた位置に設置されており、そこから屋上面に張られたネットに沿って成長する。屋上端部でのネットの外壁からの距離は、40cm程度である(図2)。コンテナには底面に6cmほど木炭が敷き詰められており、その上に24cm程度の培養土が充填されている。調水器によりコンテナ

表1 使用測器の一覧

測定項目	測定機器	機種	測定間隔
日射量	全天日射計	EKO ML 020VM	1秒
風速	無指向性熱式風速計	testo FA-491	1秒
内外気温 内外壁面温度 葉温・茎温 グローブ温度	T熱電対	線径0.32mm	1秒
室内 温湿度	サーモレコーダ	ESPEC RS-11	2分
室内 照度	照度計	HIOKI 3640	1秒
熱画像	赤外線放射温度計	AVIO TSV-600	1時間 (8/24)



図2 緑のカーテンの設置状況(6月30日)

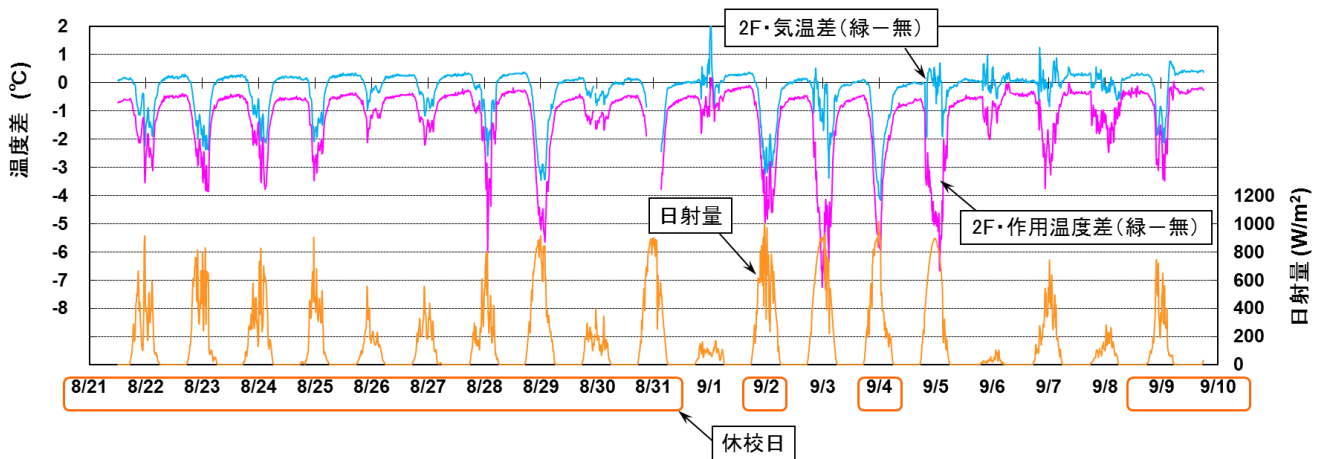


図3 測定期間の日射量および緑被の有無による気温差と作用温度差(2F)

の水位は底面から3cmに常に調節されている。雨が降った場合は雨水が利用され、過剰水はオーバーフローから排水される。また、木炭層に埋設されたコルゲート管により、根系の通気性が確保されるよう工夫されている。

2. 結果と考察

2.1 教室内の温熱環境の比較

図3に、測定期間の日射量の変化と緑被の有無による教室内の気温差と作用温度差を示す。横軸の日付で、枠で囲んである日は休校日を表わしており、窓を閉め切った状態での結果である。作用温度(OT: Operative Temperature)は、気温とグローブ温度から求めた平均放射温度(MRT: Mean Radiant Temperature)の平均値で、気温とMRTが体感に対してほぼ同じ影響力を持つと仮定した場合の放射を加味した体感温度を意味している。緑被の有無による温度差は、日射量の変化に大きく左右されている。天候に恵まれた9月2日~9月5日の変化に注目すると、休校日に日中大きな気温差が生じ

ているのに対し、開校日は日中の気温差が非常に小さくなっている。これは、通常の使用状況では窓が開放され、通風の効果が効いているためである。

そこで、日射量と緑被の有無による温度差との関係を、日中11時~13時の平均値でプロットしたのが図4である。窓を閉め切っている休校日の気温差は概ね日射量に比例しているのに対し、開校日の気温差は晴天日でも1度程度に収まっている(左図)。一方、作用温度差については、休校日・開校日を問わず、ほぼ一定の関係を示しており、晴天日には6度程度の温度差が生じている。このように、教室内の温熱環境には放射環境の改善が大きく寄与している。窓を開放して気温差が小さくなっている場合でも、放射環境を加味した体感温度では、緑被の有無で大きな差異があり、「緑のカーテン」は教室の温熱環境の改善に大きく貢献していることがわかる。

以上のような放射環境の改善は、緑被による日射遮蔽効果(日傘効果)によるものである。そこで、まず緑被の有無による外壁面温度を比較する(図5・上)。ここでは、天候に恵まれた9月2日~5日の4日間について示

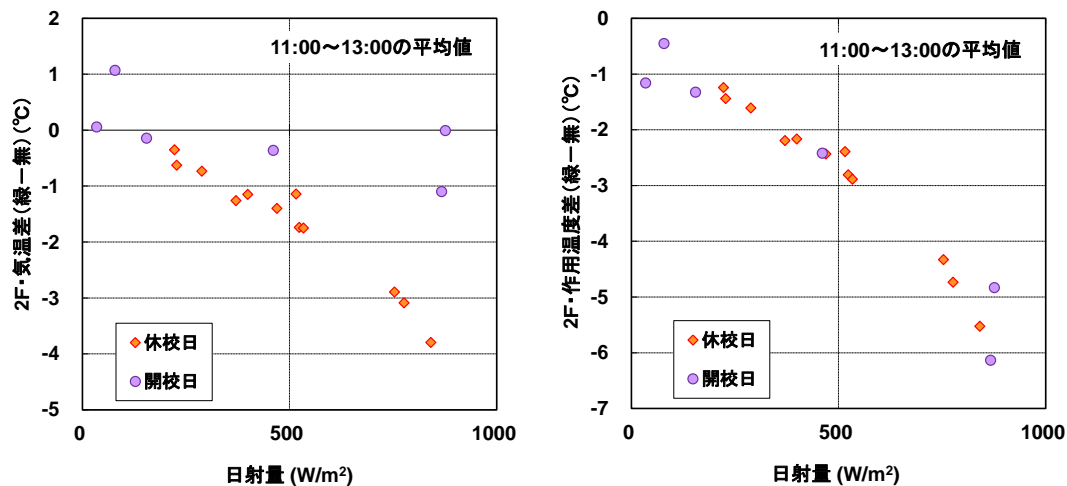


図4 緑被の有無による気温差(左)と作用温度差(右)(日中, 2F)

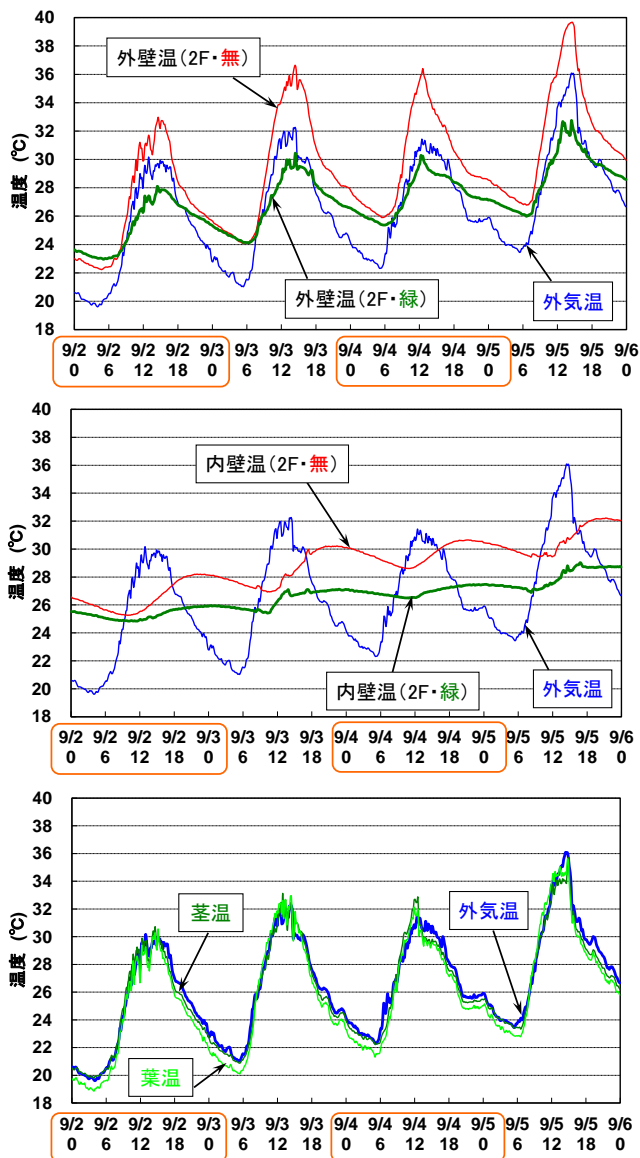


図5 緑被の有無による外壁温(上)と内壁温(中)の比較、および緑被面の温度(下)

したが、日中のピーク時には6~7℃の差が認められる。緑なしの壁面温度の最高値は40℃以下と比較的低くなっているが、これは壁面が乳白色で日射反射率が高いこと、そしてこの季節の日中の太陽高度が高く、南壁面の受熱日射量が大きくないことに起因している。なお日中、緑被の裏面にあたる建物外表面の温度は、外気温より低くなっている。

次に、緑被の有無による教室の内壁面温度を比較する(図5・中)。内表面温度は、建物躯体の大きな熱容量の影響で、最高温度のピークが時間遅れを伴って日中ではなく夜半前頃に現れている。しかしながら、やはり3℃程度緑化教室の方が低くなっており、日射遮蔽の効果が室内表面まで及んでいることがわかる。

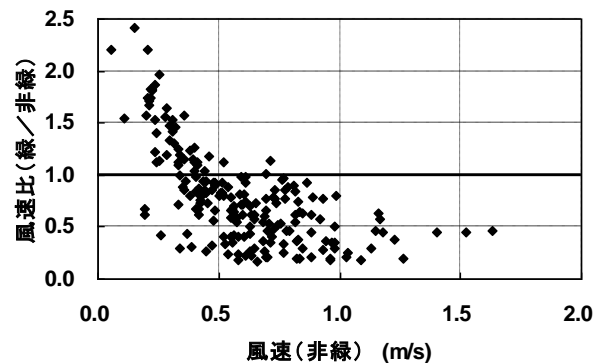


図6 緑被の有無による風速の比較(2F, 10分平均値)

以上のような日傘効果に加え、「緑のカーテン」が温熱緩和手法として優れている点は、ブラインドやロールカーテンなどの人工物とは異なり、日射を遮蔽しているスクリーン自体が高温化しないという点である。これは、言うまでもなく植物の蒸散作用によるもので、緑被面自体の温度は日中でも外気温とほぼ等しくなっている(図5・下)。しかしながら、逆に日中、蒸散作用で気温よりも数℃のオーダーで低温となることもない。ただし夜間については、植物体の熱容量が小さいことから放射冷却作用で気温よりも1℃程度は低温となっている。

2.2 風通しを考慮した総合的な温熱環境評価

放射環境に加え、教室内の温熱環境に及ぼすもう一つの大きな要素は、通風(風通し)である。図6は、窓が開放されていた時間帯について、緑被の有無による教室内の平均風速を比較したものである。0.5m/s以下の弱風時は、風速計の精度の影響が大きくなるためデータのバラツキが大きくなっているが、0.5m/s以上のある程度安定した風が吹いている状況では、風速比がほぼ0.5程度を示している。このように「緑のカーテン」は、通風の阻害要因としても作用している。

そこで、次に標準有効温度(SET*: Standard Effective Temperature)を用いて、緑被による放射環境の改善効果と通風阻害による風速低減効果を総合的に評価することを試みる。SET*は、PMV(Predicted Mean Vote: 予測平均温冷感申告)と並んで現在最も利用されている温熱指標で「温熱感覚および放射量が実在環境におけるものと同等になるような相対湿度50%の標準環境の気温」を意味している(空気調和・衛生工学会, 2006)。PMVは直接的に感覚量で示される指標であるためわかりやすいが、ここでは皮膚からの蒸発損失に風速が考慮され推定精度がPMVより高く、具体的な温度として評価されるSET*を用いることとした。なお、計算条件は、着衣量0.3clo(夏服: 半袖・半ズボン)、代謝量は1Met(椅座位読書)とした。

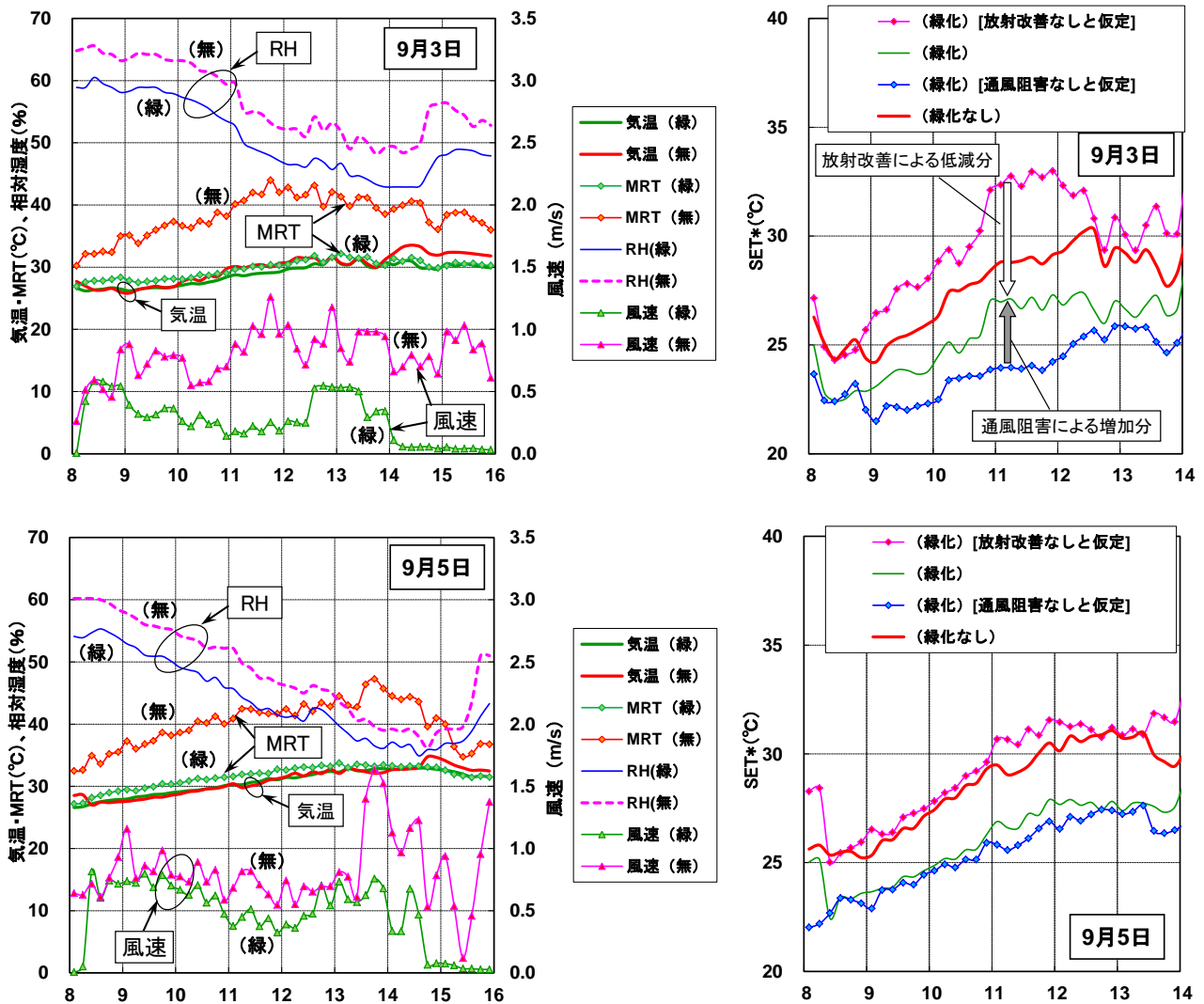


図7 各環境要素の経時変化（左）とSET*による緑のカーテンの総合的温熱環境評価（右）（2F）

図7・左図は、午前8時から午後4時までの緑化教室と非緑化教室の気温・平均放射温度（MRT）・相対湿度（RH）・風速の変化を表している。3日は両教室間で風速差が大きく、5日は風速差が小さくなっている。原因は定かではないが、風向の違いに起因していると思われる。図7・右図は、ほぼ窓が開放されている8時～14時のSET*の変化を示したものである。緑化教室では28℃以下に抑えられているのに対し、非緑化教室では30℃を超えている。

さらに、この図には緑化教室で非緑化教室と同じ風速を仮定した場合のSET*を併せて示した。これは、緑被による通風障害がなかった場合に相当する。風速差が大きかった3日では、通風障害により最大3℃程度SET*が上昇してしまっていることがわかる。一方、緑化教室で非緑化教室と同じ平均放射温度を仮定した場合の結果も示している。これは、緑被による放射環境の改善が無かった場合に相当するが、33℃を超える結果となってい

る。この結果と実際の緑化教室のSET*との差が、緑被による放射環境の改善によるSET*の低減分とみなせる。最大で6℃程度の効果になっており、従って放射環境の改善効果は通風障害によるマイナス効果の倍程度と見積もられる。なお、この仮想計算結果は実際の非緑化教室よりも高い値となっているが、これは仮想計算結果には緑化教室での通風障害の効果も加わっているからである。その証拠に、風速差が小さい5日の結果では、両者はほとんど一致している。

2.3 教室内の照度に及ぼす影響

教室の適正照度の値は、200～750luxと言われている（JIS Z 9110-1979）。図8は教室の使用時間にあたる8:30～15:30における緑被の有無による照度の差異を示したものである。休校日に関するデータから、教室内の照度は積算日射量にほぼ比例し、緑被により教室照度は約1/3に低下し、適正照度を下回ることがわかる。しかしながら、開校日のデータに注目すると、緑被がない

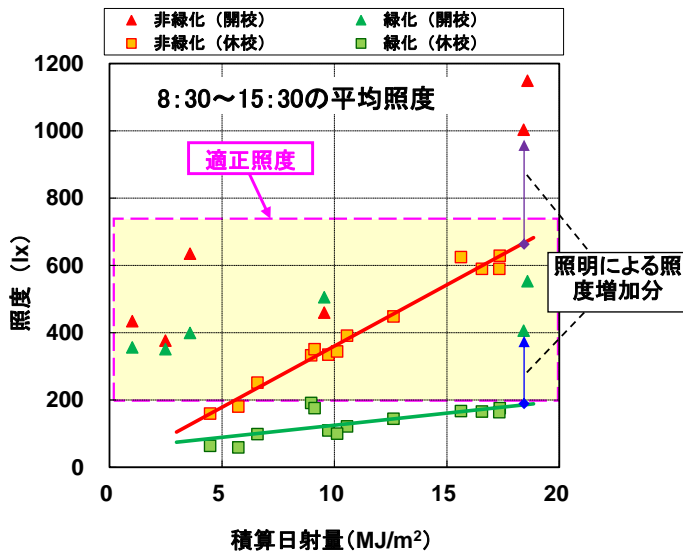


図8 緑被の有無による照度の違い

教室で適正照度が確保されている場合でも、緑化された教室と同様に照明が点灯されていることがわかる。

今後は、極端な照度不足が起こらないように、緑のカーテンの厚みをコントロールし、温熱環境の改善効果とうまくバランスを取るよう工夫することが望ましいと思われる。ただし、今回の事例のように通常でも照明を使用している場合には、緑被によって教室が暗くなったとしても、新たに電灯照明が必要となるわけではないため、必ずしもエネルギー消費の増大にはなっていない。

2. 4 屋上面の影響と夜間外気の導入

図9は、2階と3階の教室気温を比較したものであるが、同じように緑被を有していても、3階の方が昼夜とも室温が高くなっている。最上階に関しては屋上面の対策を併せて行うことが望ましいといえる。

また、夜間、教室は防犯等の理由から閉め切った状態となるのが一般的であるが、夜間の外気温は室温に比べ5℃以上低温であることから、高窓に窓格子を設置するなどの工夫によりナイトパーシ（夜間外気導入による躯体冷却）を行うことが効果的と思われる。

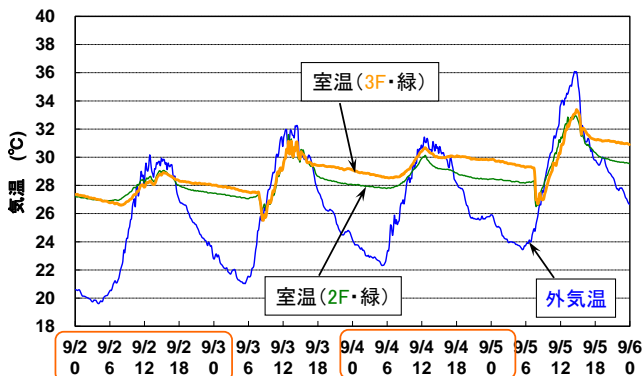


図9 2階と3階の教室気温の比較（緑被有）

2. 5 蒸散量の簡易推定

今回の測定では、蒸散による潜熱フラックスの定量的評価には至らなかったが、コンテナへの給水量が量水器により把握されている。その量は、7/9～9/8の61日間に9.2 m³という値である。今回の「緑被」面積は177 m²であるが、日量にして平均1510の水が蒸散したことになり、蒸散が昼間の12時間起こっていたと仮定すると、潜熱フラックスは48W/m²となる。既往の研究（萩島ほか、2005）と比較すると、ほぼ妥当な値といえる。

おわりに

「緑のカーテン」には放射環境の改善によるプラスの効果がある反面、通風阻害によるマイナス要因も指摘された。緑被と外壁面との間にスペースを確保することなどで、通風阻害要因はかなり小さくできると考えられる。ただ今回の事例を含め、多くは校舎に付随的な工事を行わないことが前提という形で「緑のカーテン」の発注がなされており、屋上の取り付け部分にスペースをとることは難しいようである。このような点については、発注側の行政機関との調整も必要と思われる。今後は、屋上緑化との併用や夜間外気の導入など、地域住民との協力体制も踏まえながら、さらなる工夫の展開が期待される。

今後は、熱収支の観点からの考察を進めるとともに、植物の種類や剪定方法を含めた「緑のカーテン」の最適な施工方法の検討を進めたい。

謝 辞

本測定は「緑のカーテン」の施工・管理を担当した山本工務店からの委託研究として実施した。なお測定の実施に際しては、桃井第一小学校の方々に大変お世話になった。ここに記して深く感謝の意を表します。

補 注

① 実際に教室を使用している教諭の方々に伺ったところ、「教室が暗く感じるから」というのが照明使用の理由であった。また、環境省の下記報告書でも、調査対象としたモデル校の全てで、天候に関係なく常に電灯照明が点灯されていると報告されている。環境省（2007.10.19 更新）「学校エコ改修と環境教育事業」平成18年度報告書 事業報告 <http://www.ecoflow.jp/project/pdf/h18_project_report.pdf> , 2007/10/20 参照

引用文献

萩島 理・谷本潤・高尾京子(2005) 壁面緑化システムの熱収支構造に関する屋外観測. 日本建築学会技術報告集, No.22, 253-258.
 空気調和・衛生工学会(編) (2006) 新版 快適な温熱環境のメカニズム—豊かな生活空間をめざして. 空気調和・衛生工学会, 東京, 231pp.
 岡崎沙織・須永修通 (2006) 屋上および壁面植栽が教室の温熱環境に与える影響に関する実測解析. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 575-576.