

特集 不動産の環境対策と身近な取り組みの効果【論説】

緑化をめぐる議論～緑のカーテン・屋上緑化・公園緑地の冷気形成

An inquiry into greening — green screen, green roof, and cooling effect of urban park

Ken-ichi NARITA : Nippon Institute of Technology

成田 健一*

本稿では、環境対策としての「緑化」をめぐるいくつかの論点について考えてみたい。建物や街区の「緑化」は、ヒートアイランド現象に伴う夏場の暑熱環境対策や快適空間の創造という観点から数多くの取り組みがなされており、建物や街区の付加価値や資産価値の向上にもつながると幅広い支持を受けている。しかしながら、個々の具体的な緑化手法に関しては、間違った理解や期待が流布している部分がいづつか指摘できる。ここでは、それらのいくつかを紹介することで、正しい理解に基づく緑化の普及の一助としたい。

1. 緑のカーテン

(1) 緑のカーテンは周囲空気を冷やすのか？

「緑のカーテン」とは、植物のツルや葉を窓の外に設置したネットに這わせたもので、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」との触れ込みで、市民活動を中心に広がりつつある。もともとは戸建住宅など小規模なものが中心であったが、プランターに灌水装置を組み込み、通気を確保しながら水位を一定に保つ工夫を加えることで高さ20m程度まで伸ばすことが可能となることから、東京では200を超える小学校で採用されている。「緑のカーテン」を推進しているHPの多くや書籍では「(緑は)蒸散作用により周囲の空気から熱を奪い、冷たい風を作

り出す」と解説されている。

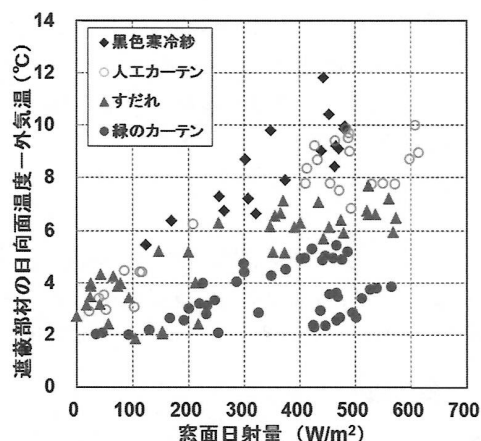


図1 日射遮蔽部材の日向側表面温度

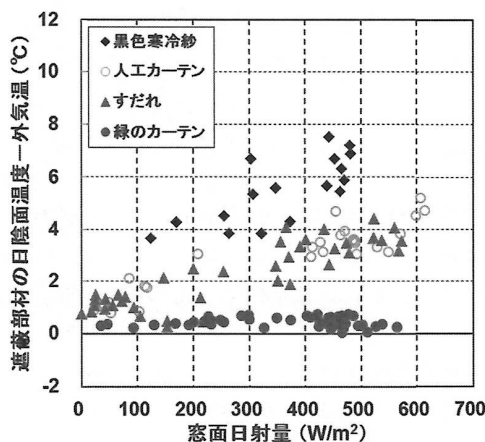


図2 日射遮蔽部材の日陰側表面温度

図1と図2は、西向き窓面の前に様々な日射遮蔽部材をつけた時の日向側(図1)と裏側の日陰側(図2)の表面温度を比較したものである。すだれなどの人工物の遮蔽部材では、日向側の表面温度が気温よりも6~12℃も高くなるのに対し、ゴーヤを用いた緑のカーテンでは2~5℃程度の温度に抑えられている。裏面ではその差異はもっと明確になり、緑のカーテンの裏面温度は気温とほぼ等しくなっている。しかしながら、葉っぱの温度が気温よりも低くはなっていない。当然のことであるが、空気中に気温よりも高い物体を置いて空気が冷えることは物理的にありえない。従って、「緑のカーテンは気温よりも低くなり、周囲の気温を下げる効果があり、部屋に冷風を呼び込むことができる」というのは間違いである。蒸散作用というのは、葉っぱの温度を下げることに貢献しているが、微細ミストのように気化熱で空気を直接冷やす作用はない。

最近では既存住宅だけではなく、新築のマンションにあらかじめ緑のカーテン用のフックを取り付けて普及を図ろうという例も見受けられるが、このような環境志向のマンションでは、開口部の熱的性能向上の観点からLow-Eガラスが採用されるケースも多い。実際に、遮熱Low-Eガラスの場合の室内熱環境を測定してみると、遮蔽部材なしでも、普通ガラスにすだれをつけた場合とほぼ同レベルの効果が得られる。この場合には、緑のカーテンによる追加効果はもはや大きくない。このように、緑のカーテンの効果は建物の環境性能が低い場合には顕著であるが、建物の環境性能が向上すれば相対的に小さくなってしまふ。

(2) 誤解を生む原因は？

緑のカーテンに関する誤解を生む原因には、二つの点が考えられる。一つは、我々が感じる涼しさに対する誤解である。例えば真夏の日中に木陰に入ると涼しいと感じるが、実は木陰と隣接する日向空間の気温はほとんど差がない。通常、何がしかの風が吹いている屋外環境では、空気は良く

攪拌されているため局所的な気温差は小さく、ほぼ一様な気温分布となる。では、なぜ涼しいと感じるかという、それは放射環境の差によるもので、まず直射日光を遮り、さらに日陰面を作ることによって周囲の表面温度を下げ、結果、周囲から受ける赤外放射量が小さくなっていることで涼しさが体感されるのである。「緑のカーテン」を施した室内が涼しく感じられるのは、同じく「放射環境」の改善効果であり、気温が下がっているわけではない。逆に言えば、「気温」が下がっていても「体感温度」は下がるので、暑熱環境緩和対策としては意味があることになる。

もう一つの原因は、巷に跳梁跋扈する気温が下がっているというデータの測定方法の間違いである。温度計で気温を測る場合、当然ながら感温部が気温と等しくなっていることが必要だが、この条件を満たすことは至難の業で、日射が当たっているのは論外、日射を遮蔽しても遮蔽部材が気温よりも高ければ赤外放射で加熱され高めに測定されてしまう。感温部が気温とほぼ同温の部材でシールドされ、尚且つ十分な通風が行われて空気と十分な熱交換が行われる条件を満たさなければ、正しい気温は測定できないのである。

葉っぱの近傍の局所的な気温を測りたい場合は、十分な通風が行えないため、放射の影響が無視できるくらいに細い温度センサ(直径0.03mm以下)を用いるか、超音波風速温度計を用いて「音仮温度」から求める。そのような注意深い測定をすると「緑のカーテン」の周囲では気温低下が生じていないことがわかっている。

2. 屋上緑化

2001年に施行された東京都の義務化条例以来、「屋上緑化」は大きな広がりを見せており、近年は地球温暖化対策のメニューとして施策に盛り込んでいる自治体も数多い。屋上の緑化は、最上階への熱の侵入を防ぐことで冷房負荷を低減し、また屋上表面の温度を下げることでヒートアイランドを緩和すると説明されている。では、屋上緑化

の推進は、本当にヒートアイランド対策として寄与するのであるのか？

(1) 建物の空調負荷削減効果

屋上緑化は、その断熱作用により、建物最上階への熱の侵入を軽減し、結果として建物の空調負荷を削減するといわれている。この効果は、人工排熱を削減しヒートアイランドを軽減すると同時に、省エネルギーにつながるため地球温暖化にも寄与するとされる。図3は業務建物の最上階を対象にシミュレーションで年間の空調負荷削減効果を算定した結果の一例である。まず、効果として大きいのは冷房負荷の削減である。そのため、通年での削減効果でみると、東京以西の温暖地に比べ東北以北では小さくなってしまふ。屋上面に高反射率塗料を塗布するという対策では、冬季の日射熱取得までも大きく削減してしまう。屋上緑化の場合には、冬でもそれほど大きなマイナス効果はないものの、ほとんど効果はないとみなせる。

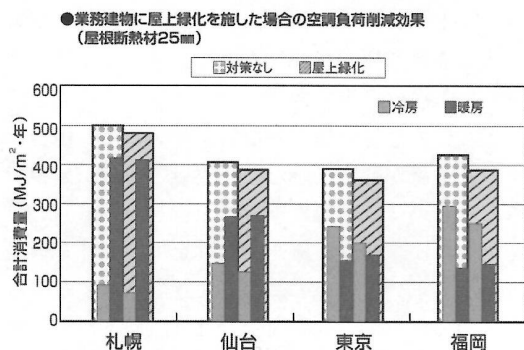


図3 屋上緑化の空調負荷削減効果

このような地域差以上に、屋上スラブの断熱材の厚さという建物性能でその効果は大きく左右される(表1)。当然ながら性能の悪い(断熱なし)の建物に施工した場合に効果が大きく、逆にすでに断熱が施されている建物では追加的な削減効果はわずかではない。先ほどのLow-Eガラスの場合と理屈は同じである。なお、表に示されている削減率は、最上階のみを対象とした場合の値で

あるので、例えば10階建てのオフィスビルでは、建物全体での削減率はこの1/10となってしまう。

以上のように、温暖地に建つ無断熱の工場や倉庫などでは大きな空調削減効果が期待できるが、一般のオフィスビル、とりわけすでに断熱が施された建物での削減効果はかなり限定的なものといえる。となれば、ビルオーナーへの直接的なメリットは少なく、導入へのインセンティブは働かないということになってしまう。

表1 地域別・断熱厚別の空調負荷削減効果
通年空調負荷削減効果(単位:%)

	削減率: %		
	断熱なし	断熱25mm	断熱50mm
札幌	7.2	3.8	2.5
仙台	8.8	4.7	3.2
東京	12.4	7.1	5.0
福岡	15.7	9.4	6.6

※ 対策実施前の建物の断熱材の厚さ

(2) 大気加熱量の削減効果

屋上面を植物で覆うことにより、植物の蒸散作用と土壌面からの蒸発に伴う潜熱フラックスが増大する。その結果として、夏季日中においても表面温度が低く保たれ、大気への対流熱フラックス(大気加熱量)が減少する。表面-大気間の熱輸送効率(対流熱伝達率)が等しければ、大気加熱量は表面温度と気温との温度差に比例すると考えてよい。屋上緑化では、どのような植物や基盤を用いるかによって潜熱フラックスの大きさにかなりの差がある。基盤の保水力により降雨(あるいは散水)後の持続時間にも差があるため、一概に屋上緑化といっても、その効果は一様ではない。

屋上緑化を広範囲に普及させた場合の気温低下効果は、地表面の熱収支モデルと都市境界層の大気モデルを組み合わせた数値シミュレーションにより予測が行われる。植被による潜熱フラックスの増加に関しては、蒸発比(表面温度が等しい水面からの蒸発量に対する緑化表面からの蒸発散量の比)と呼ばれるパラメータで評価するのが一般

的である。研究者によって予測結果に幅はあるが、緑化可能な屋上面を全て緑化しても、その気温低下効果は0.2～0.3℃程度というのが大方の予測結果ではなかろうか。しかも、屋上緑化による気温低下は屋上面付近に限定され、生活圏である地上レベルの気温低下には寄与しないという指摘もなされている。

(3) 屋上緑化の二酸化炭素削減効果

このような屋上緑化に対する否定的な見解に対しては、そうだとしても緑化には二酸化炭素の吸収というメリットがあるはず、との意見が出される。樹高6～7mの通常の街路樹1本のCO₂吸収量は、年間400～500kg-CO₂程度であるが、屋上緑化の場合は草地に低木が混じる程度という形態が大半である。草地の吸収量は年間平方メートル当たり1.6kg-CO₂、低木では1本当たり25kg-CO₂程度に過ぎない。そもそも二酸化炭素の吸収というのは、植物体の形成すなわちバイオマスが増加しないと生じない。にもかかわらず、屋上緑化では荷重制限ぎりぎりまで設計されているため「育てない」という管理が要求される。すなわち、本来的にCO₂吸収という目的とは相反する宿命にある。「屋上緑化は農業とは違う！」といわれる所以である。

(4) 屋上緑化の意義とは

アクロス福岡のような階段状の屋上緑化では、夜間の放射冷却により冷気流が発生し、周辺市街地へ冷気を供給する作用もあると報告されている(図4)。このような局所的な効果は認められるものの、都市全体というスケールでは、残念ながら屋上緑化に大きな気温低下効果を期待するのは難しい。東京23区の屋上緑化可能面積は8%に過ぎないが、その全てを緑化するにも、膨大な時間と費用が必要となる。その費用対効果については、冷静に評価し、合意の下に推進すべきであろう。

「みどり」のもつ多面的な効用を鑑み、アメニティの向上など、良質の緑化空間創りという観点

から屋上緑化が推進されるのであれば、決して否定される施策ではないはずである。単なるヒートアイランド対策を理由に安易に屋上緑化の普及を図るという時代はもう終わっているように思う。

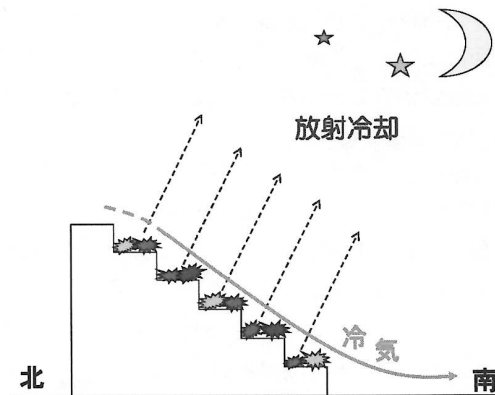


図4 階段状屋上緑化による冷気生成

3. 公園緑地の冷気形成

晴れた夜、緑地内では放射冷却現象により地表面近くに冷気層が形成される。特に静穏な条件下では、冷気の拡散が抑えられるため、緑地内に冷気が効率よく蓄積され、これが一定以上の厚さに達すると、緑地境界を越えて周囲の市街地に流出する。これが冷気の「にじみ出し現象」と呼ばれるものである。

これまで、緑地の風下側の市街地は、緑地から流出する冷気の影響を受けて涼しくなっている、という報告が数多くなされてきた。しかしながら、この場合は風に伴う冷気流出(移流現象と呼ぶ)によるものなので、涼しくなるのは風下側に限られる。一方、「にじみ出し」の場合は、無風の条件下で冷気が重力流的に全方位に流出する現象で、流出の速度は0.1～0.3m/sと非常にゆっくりとしている。移流現象のような乱流ではなく、ほとんど乱れがない状態で緑地から冷気が押し出されてくる。シャボン玉を飛ばしても、ほとんど上下動はせず、ゆっくり水平に移動していく。そのため、冷気は市街地に流出した後も暖気と混合せず、到

達限界まで緑地内の冷たさを保ったままで拡がっていく。それゆえ、流出限界では2℃以上の急激な気温差が形成され、隣どうしの家でも暑さが全く異なるという状況が生みだされる。それに対し日中の移流現象では、市街地に流出した冷気は速やかに市街地の暖気と混合するため、温度差も流出距離に伴って急激に小さくなり、明確な影響範囲を特定することが難しいというのが一般的である。

文献によっては、日中の移流による冷気流出も「にじみ出し」現象と称している場合があるが、現象の性質、出現条件が全く異なるので、両者は明確に区別した方がよい。

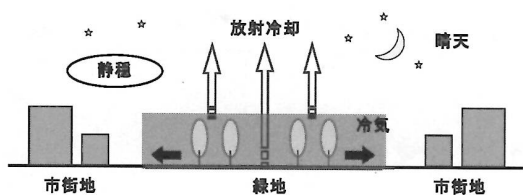


図5 にじみ出し現象の概念図

(2) にじみ出しの影響範囲

ヒートアイランド対策として注目されるのは、冷気流出の影響範囲である。新宿御苑の例では、気象条件や温度差にかかわらず90m程度の位置で常に流出が止まっていた。なお、冷気層の厚さは9～13mで、2階建ての戸建住戸ならすっぽり覆う厚さである。

皇居の「丸の内」側では、冷気層の厚さは17～18m、冷気先端は濠を超えて約300m先の東京駅に達していたケースが報告されている。なお、晴天日が連続した夏季の濠の水温は、夜間でも30℃を超える状態となるが、にじみ出し現象の冷気流はほとんど乱れのない流れであるため、濠を横断する冷気はほとんど水体によって加熱されずに市街地に流出する。一方、自動車による攪拌が起こる幹線道路は、冷気流出の障害となっている。また高層ビル群も、上空の暖気の取り込みで、冷たさを失わせている。

以上のように、冷気の流出限界は市街地の特性が大きく影響し一概に述べることは難しいが、最大でも数百m以内であり、都市全体の気候を緩和するものではない。

(3) 冷気のにじみ出しが起こる緑地規模

今後の都市計画を考える上では、どれくらいの規模の緑地ならヒートアイランド対策として効果があるのかが重要である。これまで実測結果がある公園とそこでのにじみ出し現象の出現頻度をまとめてみた。

表2 公園規模とにじみ出し出現頻度

	長軸最大(m)	短軸最大(m)	面積(ha)	出現度
皇居(濠の内側)	2000	1500	193.0	◎
赤坂御用地	1000	650	62.5	◎
新宿御苑	1050	700	58.3	◎
白金自然教育園	650	500	20.0	◎
戸山公園	500	400	18.7	○
日比谷公園	550	300	16.2	◎
小石川植物園	750	250	16.1	◎
赤塚公園	330	220	9.2	○
新江戸川公園+α	390	250	8.0	◎
有栖川宮記念公園	300	250	4.4	○
小豆沢公園	300	230	4.2	○
パークコート神宮前	140	50	0.5	△
大蔵三丁目	250	60	0.4	△
成城四丁目	70	70	0.3	△

20haを超える大規模公園では2℃以上の温度差の明確な冷気のにじみ出しが確実に出現し、周辺市街地にも流出している。緑被率が高く、斜面を有する場合には8ha程度まで大規模緑地と遜色ない冷気流出がみられるが、グラウンドなどが優占する公園では15ha程度でも冷気生成は弱くなるようである。1ha以下の緑地ではクールスポットは形成されているが、周辺に明確に流出する効果はあまり期待できない。崖線に沿った斜面緑地等では、幅が200m程度あれば十分冷気流出が期待できるため、崖線の斜面部分のみではなく、斜面上部にも緑地を確保することが望ましいといえる。

(4) 自然の冷熱源を活かしたパッシブな街づくり

東京首都圏には、台地面を開析した谷筋が複雑

に入り組んだ微地形が発達している。現在は認識されなくなりましたが、それらの谷筋はかつて、湧水を集めた水系を形成していた。図6の赤坂見附付近も、そのようなかつての谷筋（旧赤坂川）の出口にあたっている。ここは、谷筋の大部分が赤坂御用地として開発を免れてきた。図には赤坂御用地の東端（地点A）での気温変化（8/8～8/9）を載せたが、周辺市街地に比べて2℃以上低温な冷気が21時頃から一晩中流出していることがわかる。これは、まさに自然の冷却源であり、このような自然のポテンシャルを活かした街づくりが望まれる。

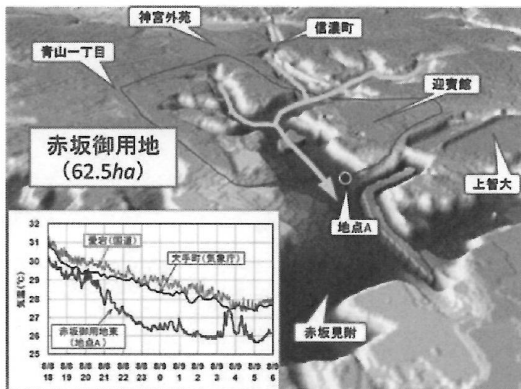


図6 かつての水系に沿った夜間冷気流出

4. おわりに

本稿では、「緑のカーテン」「屋上緑化」「公園緑地の冷気形成」の3つのテーマを取り上げ、環境

対策としての「緑化」推進の意義について考えてみた。その場に座って深呼吸したくなるような「心地よい空間」「気持ちよい」と五感で感じられる空間、そんな空間をつくる力が「みどり」にはあるはずである。それを引出し、尚且つ美しいと感じられる景観づくりを目指すことが、これからの「緑化」を考える上で最も重要な視点ではないかと考えている。

【参考文献】

- (1) 成田健一：緑のカーテンが教室の温熱環境に及ぼす効果、環境情報科学論文集、Vol.21、501-506、2007
- (2) 成田健一：緑のカーテンは周囲空気を冷却するか？環境情報科学論文集、Vol.23、167-172、2009
- (3) 萩島 理・成田健一・谷本 潤・三坂育正・松嶋篤・尾之上真弓、大規模な階段状緑化屋根を有する建築物周辺の微気象に関する実測調査、日本建築学会環境系論文集、第577号、pp.47-54、2004
- (4) 環境省：ヒートアイランド対策ガイドライン、pp.146、2009
- (5) 成田健一・三上岳彦・菅原広史・本條 毅・木村圭司・桑田直也：新宿御苑におけるクールアイランドと冷気のにじみ出し現象、地理学評論、Vol.77 No.6、pp.403-420、2004
- (6) 成田健一・菅原広史：都市内緑地の冷気のにじみ出し現象、地学雑誌、120巻2号、411-425、2011
- (7) 成田健一・菅原広史・横山 仁・三坂育正・松島 大、皇居の冷気生成機能と周辺市街地への熱的影響に関する実測研究、日本建築学会環境系論文集、No.666、705-713、2011