特集

都市空間の温度管理 (ヒートアイランド)

都市緑化のヒートアイランド抑制効果

山田 宏之*

キーワード：ヒートアイランド、緑地、屋上緑化、体感温度、熱中症

1. 緑地の熱収支

緑地とコンクリートやアスファルト面の熱収支を比較したものが図-1である。芝生面の反射率は20%程度、古くなったコンクリート面の反射率も20~25%程度であるので、最も大きな違いは蒸発潜熱の有無という点になる。これが緑地のヒートアイランド抑制効果の根源となっている。

それならば水面を作ればいいじゃないかと考える人もいるかもしれないが、それは早計である。緑地は、その上を人が自由に利用することができるが、水面ではそうはいかない。都市内の土地は多目的に使えることが重要であり、蒸発潜熱を得るためだけに土地を死蔵するというのは明らかに効率が悪い。その他、都市防災や景観性、生態系といった様々な観点から考えても、都市に導入するヒートアイランド対策施設としては、緑地は非常に優れたアイテムである。

2. 都市緑地とヒートアイランド

気象の現象を捉える場合に、その現象のスケールに応じた見方をすることが大切である。例えば、「樹林の中の気温が市街地よりも3℃低くなった」という現象と、「北半球の平均気温が3℃高くなった」という2つの現象があったとする。温度だけを見れば、いずれも同じ3℃の差を伴う現象であるが、前者は涼しくて結構ですね、といった程度の話、後者は、人類の存亡に関わる大問題である。

これほど極端な違いではないにしろ、都市の緑と気象という問題を考える場合でも、スケールの違う対象については、それぞれの温度差の持つ意味を注意して考えていかなければならない。

2.1 緑被率と気温

まずは、都市全体を対象とするようなスケールを考えてみたい。都市のヒートアイランドを記述した古い教科書によれば、ヒートアイランド現象

は冬季の明け方に最も顕著に現れ、夏季や最高気温時には不明瞭であるとされてきた^{1,5)}。

東京の大手町では、1876年の気象台設置以来、気象観測が続けられてきているが、この観測開始時から2000年までの124年分の冬日（最低気温が0℃未満の日）と真夏日（最高気温が30℃以上の日）の年間日数の変化を調べた結果が図-2である。冬日は誰の目にも減少していることが明らかであろうが、真夏日の日数は本当に増加しているのかどうか明瞭でない。

図-1 緑地の熱収支

The control effect of a heat island phenomenon by urban greening

*和歌山大学システム工学部 Hiroyuki YAMADA

図-2 東京の気候変化 (1876~2000)

このように気象台のデータだけを見れば、ヒートアイランド現象は冬季の明け方に最も顕著であるという記述は疑いようがない。ところが、夏季の日中のヒートアイランド化が不明瞭という結論には、納得がいかないという人が多いのではないだろうか。コンクリートやアスファルトなどに囲まれた市街地は、郊外の田園地帯などと比べて明らかに暑く感じられるものである。しかし、この傾向は気象台の測定結果からはクリアーに見出すことができないのである。

気象台での気温測定は、芝生広場の中の百葉箱を用いて行われてきた。現在は百葉箱を使わないことが多いが、それでも測定場所に関しては、一辺の長さが20m以上でおおよそ600㎡以上の平坦な芝生広場で測るものと規定されている³⁾。

つまり、気象庁が発表する気温というものは、芝生で覆われた開けた緑地内で測られているということになる。これは測定条件を一定にして、局所的な気象変動の影響を極力排除するための設定である。そこで、都市の街中で我々が実際に体感するような気温を知るためには、アスファルト舗装や人工排熱といった局所的な気温変動要因を逆に取り込むような測定方法を工夫しなければならない。そのためには、実際の日常生活圏において、多数の測定点における気温を同時に測定することが必要となる。

多数の人間が温度計を持って多数点を同時に測定するというのが理想であるが、現実には難しい。そこで以下のような便法が考案された。最高気温

や最低気温の出現時刻前後には、気温の上昇、下降傾向が緩み、天候の急変などがなければ、1時間程度は大きな変化を示さないのが普通である。この時間帯を利用して、数十分間程度の間に複数の気温を測定して回れば、それほど大きな誤差を生じずに気温分布を測定することができることになる。

そのような方法で測定した東京都内の気温分布の例が図-3である。70ヵ所の気温を測定した結果から描いた等温線図である。緑の影響を調べるための調査ということから、測定点は大規模な緑地周辺に重点的に配置して行った。

最も気温が高かった地点が新宿3丁目付近の33.3℃、最も気温が低かったのが明治神宮内の25.5℃である。最大気温差は実に7.8℃に達した。

図から分かるように、明治神宮や新宿御苑のような大規模緑地内では一様に気温は低い。皇居内や赤坂御所内は測定していないため、等温線を描いていないが、恐らく、他の大規模緑地内と同等の気温であろうと推察される。

緑地以外で低温化を示したのは、新宿の高層ビル群の中である。高層ビル群の間は、見かけ上、渓谷状の地形となり、ここでは入射する日射エネルギーの絶対量が減少することから、日中の気温は低くなることが理論的に示されている。実際に測定を行った3日間とも気温は周辺よりも低い値を示し、実測上からもこれが裏付けられることになった。現代都市の最終進化形である摩天楼街は、実はクールアイランド化してしまうということな

図-3 東京都中心部の気温分布 (1994.9.20 14:00)

のである。

東京都以外に、平地の中小都市における事例として、埼玉県幸手市⁹⁾の気温分布の様子を示す(図-4)。これは真夏の晴天日の14時前後に測定したものである。このような中小都市では、車に特

図-4 埼玉県幸手市の気温分布 (1989.7.21 14:00)

殊な温度計を装着し、走行しながら気温分布を測定することが可能となるため、測定効率は飛躍的に向上する。

これらのような調査結果を積み重ねることにより、緑地による気温の低減効果が分かってきた。ある地域の緑被率が10%増えると、0.3~0.1℃気温が低下するというのが結論である。非常に小さな値に思えるが、都市全体といった大きなスケールで考えた場合、0.3℃の気温低減であっても、その影響は比較的大きなものとなる。

なお、最近の精密なコンピューターシミュレーションによる推定でも、概ねこれらの実測結果から導かれた値に近い気温の低減効果が示されている²⁾

2.2 緑地と気温

樹林地、芝生地のような緑地は、日中、その表面から盛んに水を蒸発させている。水の蒸発熱は 40.66kJ/mol (540cal/g) である。すなわち、水 1 g が蒸発することにより、その場所から 540cal の熱を奪っていくということになる。

芝生地のような所からは、夏季の日中に4～5 mm程度の蒸発散があることが知られている。例えば日蒸発散量を5 mmとすると、1 m²あたり、1日に約2,700 kcalの熱を奪っていることになる。この熱量は、一般的な家庭用エアコンを3時間程度動かしたときの冷却量に匹敵する。このような効

果から、芝生広場のような緑地上は、コンクリートやアスファルトに覆われた市街地内よりも低温となるのである。

樹林地の蒸発散量は一般に芝生地よりも大きい。また、樹林地内には、低温の空気が一時的にせよ滞留するため、日中の樹林地内は、芝生地のような開放地よりもさらに低温となる。このような緑地内外での気温の測定結果は多数発表されている^{8) 11)}。測定場所、測定時期により温度差はまちまちであるが、最大で5.0~7.0℃程度、一般的には2.0~3.0℃程度の気温差が夏季の日中に観測されている。前述したように、広域的に見た場合の緑地の気温低減率が0.3℃/緑被率10%、とすると、完全に緑を失った都市内は平均して3.0℃程度気温が上昇するという計算になる。それに対し樹林地内では気温が3.0℃低下するとすれば、都市内であっても樹林の中の空間では、ヒートアイランド化による昇温の影響を完全に消去するだけの低温化が期待できることになる。

このようなスケールでの調査の一例として、和歌山市の和歌山城公園内外における気温分布を図-5に示す¹¹⁾。この図でも見られるが、緑地周辺の市街地では、緑地からの低温空気の流出（にじみ出し）により、ある程度気温が低下することが知られている。いくつかの研究事例⁸⁾によると、気温低減効果が及ぶ範囲は数mから数百m程度の範囲である。

2.3 樹木と気温

日中、高温化の著しい素材で覆われた都市内で

図-5 和歌山城周辺の気温分布 (2000.8.8 12:00)

の暑さの緩和を考えた場合、街路樹などの単木の効果も期待されることになる。例えば、仙台市のケヤキ並木を対象に実施された気温測定の結果⁷⁾では、0.5~1.5℃の気温低減が観測されている。単木を対象に緑陰内外の気温差を測定した研究結果⁴⁾によると、緑陰内での気温低減量は最大でも1.0℃程度である。蒸発面が小さい点、低温空気を滞留させられない点などから、気温低減効果は樹林地よりも小さなものとなる。

このように実際に気温の下がる量は小さいが、冷却能力そのものを考えた場合には、この数値から想像される以上に大きな働きをしていることが分かっている。単木を対象に夏の1日の総蒸散量を測定した結果がある⁶⁾。それによると、樹冠面積23㎡のイチヨウで1日あたり220ℓ/本、樹冠面積32㎡のイチヨウで452ℓ/本という数値が示されている。例えば、高木1本あたりの日蒸散量を200ℓとすると、その冷却効果は、およそ家庭用のエアコン10台を12時間半運転したときと同等という計算になる。

1日で水を200ℓ蒸散させるような高木が1,000万本植えられていたとすると、127kW・h × 10,000,000本 = 1,270,000,000kW・hの電力量相当の冷却作業を行ったことになる。これを家庭用エアコンの電気料金で金額換算すると、実に1日で100億円近い値となるのである。

3. 屋上緑化・壁面緑化の効果

屋上緑化や壁面緑化は、建築物の遮熱材である。「断熱材」という言葉を用いるのは正確ではない。緑地は蒸発潜熱によって入射エネルギーを消去することによって熱の侵入を防いでおり、断熱抵抗値は非常に小さいのである。

緑化していない一般的な屋上においては、太陽からの放射エネルギーの20~35%程度は反射されて、残りが屋上面で熱に変わり、これがスラブ内に伝導していく。スラブの内部もしくは上部において、この伝導を抑制するために設置されるのが屋根断熱材である。

これに対して屋上緑化をした場合には、反射、伝導以外に、潜熱伝達という別の熱移動ルートが加わることになる。潜熱とはすなわち、植物や土壌からの水分蒸発による冷却ということである。

これは水分条件、植物種などによって様々な値となるのだが、最大で入射エネルギーの90%に達すると言われている。20%を反射し、残り80%のうちの90%を潜熱で逃がすとなると、太陽エネルギーのうち、わずか8%しか伝導にまわらないということになり、その効果は大きい。

実際に屋上緑化の底、すなわち緑化したスラブ面の上に温度センサを入れて計測した結果、土壌厚20cmでスラブ面温度の日変化が1℃以下という値が得られた(図-6)。断熱効果を強めるようとして断熱材の厚みを増すと、保温効果も増大してしまい、夜間の放熱を妨げるような現象が起きるものだが、屋上緑化の場合、日中の熱の多くを潜熱の形で消してしまい、その上、断熱抵抗自体は小さいために夜間の放熱はさほど妨げないのである。

このような遮熱効果により、建物内の熱負荷を低減させて冷房量を減らせれば、冷房に伴う排熱とエネルギー消費量の双方を減らすことができ、間接的にヒートアイランドの抑制効果を発揮するということになる。

また、当然ながら蒸発散に伴う冷却も行われるため、地上の緑地と同様、外気の昇温を抑える直接効果も発揮している。図-7は、植栽基盤厚5cmでセダム類によって緑化された屋上面で測定した、気温の鉛直分布である。緑化されていない面と比べると、日中であれば上空1.28m地点でも0.7℃低温化している。

4. 緑の温熱環境改善効果

4.1 夏季の屋外温熱環境

日本の気候下では、夏季において高温、高湿の影響により、人体に対して極めて高い暑熱負荷がかかる。特にアスファルトなどの、表面温度が高くなりやすい素材で覆われた都心部では、道路や周辺建物などからの輻射の影響も加味されて、暑

図-6 屋上緑化による温度低減効果 (1995.8.15 東京都内)

図-7 緑化面上の気温鉛直分布 (2001.8.13 兵庫県西宮市内)

熱環境の悪化は著しいものとなる。

暑熱環境下での熱ストレスの強度を表す指標はいくつかあるが、ISOではWBGT (Wet-Bulb Globe Temperature) を用いると定めている (ISO7243)。WBGTは以下の式で定義される、比較的測定が容易な指標であり、現在ではWBGT値を直接測定する機器も開発されている。

$WBGT = 0.7tnw + 0.2tg + 0.1tdb$ …… 輻射の影響が大きい時

$WBGT = 0.7tnw + 0.3tg$ …… 輻射の影響が小さい時

tnw : natural wet-bulb temperature (輻射と気流に晒して測定した湿球温度), tg : globe temperature (グローブ温度), tdb : dry-bulb

図－8 緑陰，東屋，日向のWBGT比較（2005.9.2 和歌山市内）

temperature（乾球温度）

このWBGT値について，例えば財団法人日本体育協会¹²⁾では，WBGTが28℃以上では激しい運動競技は中止し，31℃以上ではすべての運動を中止すべきである，という目安を公表している。WBGTが31℃を超えると，安静時でも熱中症の危険性が高まると言われている。

4.2 緑陰内の温熱環境

WBGTのような指標で温熱環境を評価する場合には，日射強度の違いが大きく影響してくる。したがって，単木緑陰のようなものであっても，その効果は大きく現れる。

図－8は藤棚の緑陰内と木製の東屋，陽の当たる芝生広場上のWBGTの日変化を比較したものである。日向の広場のWBGTは最高で33.2℃に達している。暑熱リミットの31.0℃を遥かに超えており，体力に自信のある若い人でも，長時間晒されると熱中症の危険がある。

それに対して藤棚や東屋のWBGTの低下は歴然としており，日陰内は最大でも29.3℃と，安静であれば十分に安全な暑熱レベルに抑えられているのである。

このように，屋外での運動，休憩の場としての公園緑地には，緑陰のような日陰設置が必須であ

ると考えるべきである。東屋のような施設の日陰でも十分効果は期待できるが，緑陰の暑熱環境緩和効果と比較すると若干性能が劣り，より質の高い日陰の提供のためには人工的な遮光施設よりも樹木のほうが望ましいと考えられる。

引用文献

- 1) 大後美保，長尾隆：都市気候学，朝倉書店（1972）
- 2) 半田真理子：都市気象と緑，新都市，51(5)，（財）都市計画協会（1997）
- 3) 気象庁：地上気象観測指針，（財）日本気象協会（1993）
- 4) 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，46(3)，p.161-175（1983）
- 5) Landsberg H.E.：The Urban Climate，ACADEMIC PRESS（1981）
- 6) 日本造園学会編：造園ハンドブック，技報堂（1978）
- 7) 境田清隆，鈴木雅幸：密生した街路樹をもつ路上空間における晴天日の気温分布，地理学評論，67(8)（1994）
- 8) 山田宏之，丸田頼一：小規模樹林内における夏季の気温の低減について，造園雑誌，53(5)，p.163-168（1990）
- 9) 山田宏之：埼玉県幸手市における夏季の都市気温分布と緑地分布の関連についての解析，造園雑誌，57(5)，p.157-162（1994）
- 10) 山田宏之：都市気温分布と緑地分布の関連についての都市間比較，ランドスケープ研究，58(5)，p.253-256（1995）
- 11) 山田宏之，他：WBGT値を用いた緑地内外の夏季における暑熱強度分布の解析，第29回環境システム研究論文発表会講演集，p.249-254（2001）
- 12) 財団法人日本体育協会：スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック，（財）日本体育協会（1998）