都市気温分布と緑地分布の関連についての都市間比較

A Comparison of the Value of the Ratio of Air Temperature Reduction Effect of Open Spaces in Some Cities.

山田宏之*
Hiroyuki YAMADA

摘要：本論では現在までに実施してきた6都市（杉並区、長野市、幸手市、栗橋町、庄和町、野田市）における気温分布と緑地分布との関連についての総括的な解析を行った。気温分布については市街域での高温、緑地域での低温が全都市、全時刻の結果について認められ、最も気温差の大きかったのは14時であった。これは一般的なヒートアイランド特性とは異なるが、測定方法に起因するものであると考えられた。緑地の気温低減率の比較の結果、都市規模が大きいほど気温低減率が大きくなる傾向が認められた。そこで、都市の総人口との関連について解析したところ、14時、4時については総人口の対数値と気温低減率が直線関係にあることが分かった。

1. はじめに

平成6年の夏に建設省より発表された緑の政策大綱^[10]には、緑の機能として、まず第1にヒートアイランドの抑制という項目が上げられている。筆者は、このような都市の高温化の抑制を目的とした緑地計画のための基礎資料として、緑地による都市気温低減効果の計量と解析を実施してきた^[20)~27]。これら6都市（杉並区、長野市、野田市、幸手市、庄和町、栗橋町）は、それぞれ都市気温分布測定を実施するために必要な測定点の確保の容易さ、移動観測に適した道路配置の形態などの条件を満たしている都市の中から、都市規模をさまざまに変えて選択したものである。

本論では、現在までに行ってきた6都市分の研究成果を相互比較し、都市規模の違い等に起因する緑地の気温低減効果の差異を明らかにし、都市における緑地の気温低減効果の特性について、より普遍的な特性を明らかにすることを目的としている。

2. 研究方法

(1)都市気温分布と緑地

まず、過去に実施してきた6都市における測定結果^[20)~27]の相互比較から、都市の気温分布と緑地との関連についての共通の特性を抽出した。それらの結果を、現在までに得られている都市のヒートアイランド現象の一般的特性と比較し、その差異の原因について考察を行った。

気温の測定は、杉並区においては、最高・最低温度計を用いた定点測定法で行い、他の5都市では、サーミスタ温度計を自動車に掲載した移動測定法によった。いずれも夏季の晴天時に測定を実施したものであり、測定時刻は14時、4時の2回を標準とし、22時の測定を適宜加えた。これらの情報は表-1にまとめた。緑地分布は地形図と航空写真により把握した。

(2)緑被率と気温との関係について

緑被率と気温の関係は、気温の測定点を中心とした直径500mの範囲の緑被率を説明変数、気温を目的変数にした回帰分析により解析した。緑被率は航空写真から計測した。

ここでは、緑被率と気温との間の回帰分析結果から得られた6都市の個々の回帰係数の値について、都市の総人口等との関連を相関分析、回帰分析により解析した。回帰分析は、14時、4時の測定結果から得られた緑地の気温低減率を目的変数に、都市総人口を説明変数にして変数変換を交えて解析を行い、考察した。

3. 結果および考察

(1)都市気温分布と緑地

都市内外での気温の分布については、測定を行った6都市、杉並区^{[20][21]}、長野市^[22]、幸手市^{[26][27]}、庄和町^[23]、栗橋町^[25]および野田市^[24]の全てについて、市街地での高温化、郊外での低温化が全時刻の測定結果について認められた。

庄和町のように比較的小規模の都市で、中心市街地がまとまった形で存在している場合には、等温線の形は単純な同心円状を呈する場合が多く、いわゆるヒートアイランドと言われる現象を明瞭に示す事例となった。杉並区のように、ほぼ全域が都市化されているような場所では、建築物の高密集地域で高温、緑地の多い地域で低温となり、等温線は複雑な形状を呈するようになった。また、野田市の事例に見られたように、市街地域に樹林地等の緑地がくさび型に入り込んでいるような場所では、やはり低温域が都市内の高温域に貫入するような形の等温線が出現した。以上の事例については気温分布の概略図を図-1に示す。

いずれの場合も、14時（最高気温時）の測定結果は、都市の地表面被覆状態を強く反映した形となり、例えば、F.Vukovich(1983)^[4]によって得られた結果などと良く一致している。緑地域の低温化については、比較的大面積の樹林、水田等の存在する場所で特に顕著に現れ、杉並区内の測定例では最大5℃に達するほどの気温差が認められる場合もあった。測定時刻別の比較では、6都市ともに最も気温差の大きくなったのは14時（最高気温時）であった。22時、4時の測定では、一般的に14時の結果ほどの気温差は生じなかった。

このように微気象観測の結果得られた気温分布は、最高気温時に最大の温度差を示すという点で、一般に言われるヒートアイランド現象の、秋から春にかけての低温の期間の最低気温が、東京

表-1 各都市での測定日、測定方法など

対象都市	測定日	測定時刻	測定方法※
杉並区	1987年8月20,21,22日	最高・最低気温時	最高最低
長野市	1989年8月8,9,10日	14時, 22時, 4時	サーミスタ
野田市	1990年7月23,24,25,26,27,28,29日	14時, 4時	サーミスタ
幸手市	1989年7月21,24,8月18,21,22,23,24日	14時, 22時, 4時	サーミスタ
栗橋町	1990年8月7,8,13,14日	14時, 4時	サーミスタ
庄和町	1990年7月30,31日,8月2,3,5日	14時, 4時	サーミスタ

※：最高最低→最高最低温度計を設置しての固定観測
サーミスタ→サーミスタ温度計による移動観測

*財)都市緑化技術開発機構

のような大都市において上昇するという特性¹⁾⁸⁾²⁸⁾とは大きく異なったものであった。

これは、緑地内部と都市化された市街地を測定場所にして得られる値から気温分布図を作成することが原因であると考えられる。緑地内外の気温差が夏季の最高気温時に最大となるというのは、緑地域での気温測定の結果²⁰⁾²⁸⁾、あるいは森林気象の測定結果⁶⁾²⁸⁾などから広く証明されている事実である。すなわち、緑地と市街地の気温差が原因で形成される都市気温分布は、夏季の最高気温時に温度差が最大になる現象として観察されるのである。例えば図－1で示した庄和町の例では、市街地は、あたかも周辺の水田地帯（緑地）の中に浮いた島のような位置関係になっており、市街地と緑地の気温差がそのままヒートアイランドとなって現れる典型例と理解できる。

ここで、主に気象台の測定結果から観測されるヒートアイランドとの違いについて更に考察してみる。気象台での気温測定は、一定面積以上の広さの芝生の露場に設置した百葉箱内で行われており、微気象的には市街地と緑地内の中間的な場所における平滑化された気温を測定しているということになる。このような条件下で得られた値は、気温に与える微気象の影響が除かれているという点で、都市全体の気温を代表する指標としてふさわしいものと理解できる。この数値から作成される温度分布図は、冬季の最低気温時にヒートアイランドが最も顕著であり、夏季の最高気温時に最も不明瞭であるというような特性を示し¹⁾²⁸⁾⁸⁾、これが本当の意味での都市のヒートアイランド現象であると言えるであろう。

それに対し、緑地と市街地の気温差に起因して現れるヒートアイランドの方は、さまざまな条件の測定場所での微気象的な気温差を元に得られたものであり、都市そのものよりも、気温が測定された場所の特性を強く反映している。つまり、気温に与える微気象的な影響を最大限取り入れて測定を行っている訳である。このことから、こうして得られた気温分布というのは、本来の意味での都市のヒートアイランドというよりは、局所的な現象を集約した結果現れるものであり、「局所的ヒートアイランド」とでも表現した方が適切であろうと考えられる。

本論では、都市そのものに起因して現れる気温分布を「構造的ヒートアイランド」、微気象的な緑地－市街地間の気温差を地図にプロットしていくことで現れる気温分布を「局所的ヒートアイランド」と仮に名付けて、その特徴の概要を表－2にまとめた。一般的なヒートアイランドの特性については、吉野（1986）²⁸⁾、大後、長尾（1972）¹⁾より引用した。筆者が過去行ってきた研究²⁰⁾²⁷⁾は、全て緑地内部と市街化された地域との比較を行ったものであり、「局所的ヒートアイランド」の特性を論じてきたものと言えよう。

表－2 2種のヒートアイランドの特性

	構造的ヒートアイランド	局所的ヒートアイランド
季節別	冬季に気温差が最大	夏季に気温差が最大
時刻別	夜間から最低気温時（明け方）に気温差が最大	最高気温時（14時前後）に気温差が最大
気温差	最大15℃（カナダの事例）	最大5℃（杉並区の事例）
主な成因	人工排熱、煙霧、都市構造物、土壌水分の減少	緑地と市街地の気温差
測定方法	特殊な場所を避け露場に近い同一条件下で測定	緑地内、道路脇などを主に測定

図－1 杉並区、庄和町、野田市の気温分布例

夏季最高気温時における最大温度差という性質は、前述したように、緑地部分での低温化と、アスファルト、コンクリート等に覆われた場所での高温化の相乗効果として現れるものであり、基本的には、緑地域での潜熱による表面温度の低減効果に起因するものである。

「構造的ヒートアイランド」の特性からは、大都市のヒートアイランドは夏季の最高気温時には不明瞭である、という結論が得られる。ところが現実問題として、夏季の日中、都心部において顕著な高温、郊外あるいは緑地内における低温が明確に体感される。これは東京のような巨大都市だけではなく、人口数万人程度の小都市においても同様である。このような日常生活圏での体感を緑地計画等に反映するためには、「局所的ヒートアイランド」の特性を良く理解することが必要となろう。

(2) 緑被率と気温との関係について

測定を行った6都市における、各気温測定点周辺の土地の緑被率と気温との間の、回帰直線の傾きを表すグラフを図－2に、回帰分析の結果得られた緑地の気温低減率（回帰係数の値を10倍して符号を逆にした数値）を表－3に示す。これらは2～7日分の測定結果について、層別因子を含む回帰分析¹⁴⁾によって回帰係数の共通化を図って得たものである。14時の結果では、気温低

図－2 各都市での気温－緑被率間の回帰直線の傾き比較

表－3 各都市で得られた緑地の気温低減率

対象都市	気温低減率（℃／緑被率10％）		
	14時	22時	4時
杉並区	-0.32±0.09	****	-0.25±0.04
長野市	-0.27±0.02	-0.17±0.02	-0.15±0.01
野田市	-0.24±0.01	****	-0.10±0.01
幸手市	-0.21±0.01	-0.15±0.01	-0.13±0.01
庄和町	-0.19±0.01	****	-0.06±0.01
栗橋町	-0.18±0.01	****	-0.11±0.01

減率の最大値は杉並区における $-0.32^{\circ}\text{C}/\text{緑被率 } 10\%$ 、最小値は庄和町における -0.19°C であった。これらの気温低減率の値に、統計的に有意な差が認められるか否かについて検定を行った。

まず、各都市における回帰式の決定の際に用いた、層別因子を含む回帰分析の手法を用いた検定¹⁴⁾を行った。その結果、 $Y = -0.022(\pm 0.0007)X + C$ 、という回帰式が得られ、残差平方和の増分は有意にはならなかった。すなわち、回帰係数の差は無視できるということになった。2番目として、各都市において日別に決定された回帰係数の値を、それぞれ独立した気温低減率であるとみなし、それらの平均値の差について一元配置分散分析法により検定するという方法を試みた。変数の正規性については、尖度、歪度の累積率を用いた検定¹¹⁾を試みたところ問題はないという結果になった。等分散性についても、Bartlett test の結果、問題のないことが分かった。そこで分散分析を行った結果、有意水準 1% で各群間に差が認められた。多重検定法の結果、杉並区と野田市、幸手市、栗橋町、庄和町の間、および長野市-庄和町間に、それぞれ有意な差が認められた。以上の検定結果から、14 時における緑地の気温低減率については、日別のばらつきを考慮した場合は差が認められないが、都市間の差についての検定を行えば僅かに差が認められるという結論に至った。

次に、各都市の緑地の気温低減率の値について、その差があるという前提に立った解析を進めることにする。各都市の気温低減率を比較しつつ検討した結果、都市規模が大きいほど気温低減率が大きくなる傾向が認められた。そこで各都市の総人口を取り上げて解析した結果、14 時については、図-3 に示すように人口の対数値と気温低減率が直線関係にあることが判明した。14 時の緑地の気温低減率を Y 、人口を X とした場合の両者の関係式は、 $Y = 0.095 (\pm 0.011) \text{Log}_{10} X - 0.238$: ($r = 0.975$ $F_0(1,4) = 77.2$) となり、1% 水準で有意になった。

各都市について必ずしも都市域全体を測定対象としているわけではないので、総人口を都市の特性値として用いるには若干問題があるが、大まかに都市規模を表す指標としては最もふさわしいと考え、この値を用いた。

ところで、杉並区の指標としては、東京都 23 区の総人口を用いた方が適当であるという考え方もできる。すなわち、杉並区で得られた気温分布特性は、東京圏の巨大な市街地の特性により生じたものであると見なすこともできるからである。そこで、杉並区の人口指標を東京都 23 区の人口とした場合の回帰直線が図-4 である。気温低減率と人口の関係式は、 $Y = 0.055 (\pm 0.006) \text{Log}_{10} X - 0.051$: ($r = 0.976$ $F_0(1,4) = 79.3$) となり、若干当てはめ精度は向上した。

ここで図-3 の式と図-4 の式の優劣を論じることは、データ数から見てあまり意味のある作業であるとは考えられず、この点については更に多数のデータが収集された後に再度論ずるべき問題であろう。

都市規模の指標として人口密度を用いた場合についても解析したが、こちらは何等意味のある関係を見いだせなかった。

上記のような相関関係が生じる理由を以下のように考察した。まず、計算結果は、緑被率の高い所と低い所の気温差が、大都市ほど大きくなることを示している。これには 2 通りの理由が考えられ、1つは、都市規模の大きい都市ほど緑地の気温低減効果がより大きくなるため、という考え方である。いわゆる「オアシス効果」⁵⁾により、市街地内の緑地で蒸発散が盛んになる可能性はあるのだが、都市内の緑地の水分状態、植物の生育条件等から考えると、これが永続的に続くというのはほとんどあり得ないことである (Oke, 1979)¹⁹⁾。2つめの考え方は、逆に緑地の少ない地域での高温化が大都市において、より大きくなることが原因とするものである。一連の研究のうち、杉並区、長野市の気温

図-3 緑地の気温低減率と都市人口の関係

図-4 緑地の気温低減率と都市人口の関係
(杉並区の指標として 23 区人口を使用)

分布図を検討した結果からも、それを裏付けるような傾向が認められた²⁰⁾²²⁾。この昇温過剰の理由としては、高密度市街地における人工排熱の増加の影響、熱が拡散しにくいことによる影響などが原因として考えられる。本論文の解析においては、これらの要因については考慮に入れず、緑被率のみを都市気温の説明要因に取り上げているので、このような結果になったものと考えられる。

次に、22 時、4 時の結果についてである。22 時については測定例が 2 都市分しかないため詳しい解析は加えられなかったが、2 都市の気温低減率は、ほぼ誤差の範囲で一致する値である。

4 時の結果については、14 時の場合と全く同様な手法で解析を行った。6 都市 19 日分の全測定結果に層別因子を含む回帰分析を行い回帰係数の差の検定を行った結果、有意水準 1% で差が認められた。係数を統一した回帰式は、気温 ($^{\circ}\text{C}$) を Y 、緑被率 (%) を X とし、 $Y = -0.012(\pm 0.0006)X + C$ 、となった。

一元配置分散分析による方法も同様に行ったところ、有意水準 1% で各群間に差が認められ、多重検定の結果から、杉並区と他の 5 都市との間にそれぞれ差が認められた。4 時における緑地の気温低減率については、日別のばらつきを考慮した場合、都市間の差についてのみ検定した場合、共に差が認められるという結論に至った。

4 時の測定結果についての、都市人口と気温低減率の関係は図-3 のようになり、有意な相関関係は見出せなかった。14 時と同様に杉並区の人口として東京都 23 区の人口を用いた結果が図-4 である。4 時の気温低減率を Y 、人口を X とした場合の両者の関係式は、 $Y = 0.063 (\pm 0.014) \text{Log}_{10} X - 0.191$: ($r = 0.912$ $F(1,4) = 19.7$ となり、有意水準 5% で相関関係が認められた。4 時についても、都市規模の増加と共に気温低減率が増加する傾向にある可能性が高い。

本論のように、気温-緑被率 (あるいは緑地率) 間の解析を都市間の比較にまで拡張して論じた類似は見いだせない。しかし、関連する研究事例としては、例えば、ヒートアイランドの最大温

度差と都市人口の関係を調べた例がある²⁸⁾。この結果でも、やはり最大温度差と都市人口の対数値、あるいは平方根とが直線関係にあることが示されている。

4. まとめ

本論の結果を要約すると以下のようになる。

①緑地内部や市街化された地域を測定点に含むような方法で把握したヒートアイランドは、14時（最高気温時）に気温差が最大となり、従来研究されてきている都市のヒートアイランド現象とは分けて論じる必要があるものと考えられた。

②14時の測定結果については、人口の対数値と緑地の気温低減率が明確な直線関係にあることが判明し、緑被率の高い場所と低い場所との気温差が大都市ほど大きくなるということが分かった。

本論の結果からは、都市内における緑地の存在効果は、緑地内部あるいはごく近辺の局所的な範囲で有効であり、その効果は都

市全体へ波及するほど大きくはないということになった。たとえ東京の緑地をいくら増加させたとしても、大手町の気象庁で測定される夏季の最高気温に与える影響は僅少なものであろうと考えられる。従って、都市緑化によるヒートアイランドの軽減というのは、主に夏季日中に現れる局所的なヒートアイランドの軽減に寄与するものであり、緑化された地区の気温のみを低減させ得るということである。

また、本論で行った都市間比較により、大都市においては緑地の少ない市街地での昇温が、中小都市よりも大きくなる傾向がつかめた。従って、市街地内高温化の影響は、大都市部ほど深刻である。この点から、大都市における緑化の推進は、中小都市よりも重要かつ効果的であると言えるであろう。

東京都内のような大都市では、地区スケールでの緑地計画、緑化計画においてヒートアイランド対策が重要な目的となり、中小都市では、周辺の緑地域を含めた広域での緑地計画において、今後の都市拡大に伴うヒートアイランド対策が重要となるであろう。

参考および引用文献	建設広報協議会	Boundary-Layer Met.,17,p167-173
1) 大後美保・長尾隆 (1972): 都市気候学, P56-57,63-65, 朝倉書店	11) 岸根卓郎 (1981): 理論応用統計学, P351-352, 養賢堂	20) 山田宏之・丸田頼一 (1989): 都市における緑地の気象緩和作用についての実証的研究: 造園雑誌 52(5) P127-132
2) Electric Power Research Institute (1992):Cooling Our Communities -A Guidebook On Tree Planting And Light-Colored Surfacing-,P27-36: U.S.Environmental Protection Agency	12) Leonard O.Myrup (1969): A Numerical Model of the Urban Heat Island: Jour.Appl.Met., 8, p908-918	21) 山田宏之・丸田頼一 (1991): 緑地による都市気象緩和作用の定量的解析: 造園雑誌 54(5) P299-304
3) 福井英一郎 (1956): 都市における気温分布と緑地: 都市問題 47-7,P699-705	13) 森信成 (1987): 高い内部相関がある要素を用いて重回帰式を求めることについて-気温予想を例として-: 研究時報 39-1, P1-12	22) 山田宏之他 (1992): 長野市における気温・湿度分布と緑地の気象緩和作用について: 造園雑誌 55(4) P291-308
4) Fred M.Vukovich (1983): An Analisis of the Ground Temperature and Reflectivity Pattern about St.Louis, Missouri,Using HCMMM Satellite Data: Jour. Appl.Met., 22, p560-571	14) 奥野忠一他 (1971): 多変量解析法: p112-127, 日科技連	23) 山田宏之・丸田頼一 (1992): 埼玉県庄和町における都市気温分布と緑地の気象緩和作用について: 造園雑誌 55(5) P349-354
5) 羽生寿郎他 (1984): 農業気象学, P55, 文永堂	15) Richard J. Hutcheon et al (1968): Observations of the Urban Heat Island in a Small City: Bull. Am.Met.Soc., 48-1, p7-9	24) 山田宏之 (1993): 千葉県野田市における都市気温分布と緑地の気温低減効果について: 日本農業気象学会 1993 年度全国大会講演要旨, P220-221
6) 原田泰 (1951): 森林気象学, P101-118, 朝倉書店	16) Sam I.Outcalt (1972): A Reconnaissance Experiment in Mapping and Modeling the Effect of Land Use on Urban Thermal Regimes: Jour. Appl. Met., 11, p1369-1373	25) 山田宏之 (1993): 埼玉県栗橋町における都市気温分布と緑地の夏季の気温低減効果について: 造園雑誌 56(5) P331-336
7) 本條毅 (1991): 植生による都市気候の制御, シンポジウム「都市の気候変化と制御」講演論文集, 日本学術会議, P23-26	17) 鈴木栄一 (1978): 気象統計学, P121-132, 地人書館	26) 山田宏之 (1994): 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) P157-162
8) 石野久彌他 (1993): 東京首都圏における空調設計用外気温度の分布特性に関する研究: 日本建築学会計画系論文報告集 453, P17-27	18) 鈴木悌司・前崎武人 (1974): 緑地の都市気温に及ぼす影響-札幌市での調査事例-: 85 回日本林学会大会講演集, P299-301	27) 山田宏之 (1994): 水田湛水が中小都市の都市気温分布に与える影響について: 日本農業気象学会 1994 年度全国大会講演要旨, P226-227
9) 環境庁 (1989): 環境白書 (平成元年版), P65-70	19) T.R.Oke (1979): Advectively-Assisted Evapotranspiration from Irrigated Urban Vegetation:	28) 吉野正敏 (1986): 新版小気候, P57-86: 地人書館

Summary: It is the purpose of this paper to point out that the difference or the common feature of the effects of open spaces for reduction air temperature of the city,Suginami, Nagano, Satte, Kurihashi, Shyowa and Noda. The results may be summarized as follows:

1. Air temperature distributions around the urbanized areas shows the same property. In the afternoon (14h) the difference of the temperature becomes the maximum value.

2. The strong correlation is observed between the air temperature reduction ratio of open spaces and the common logarithmic number of population of each cities.