樹木と天空比が都市の熱環境に及ぼす影響

鳥山 敦・文字信貴・青野靖之・鯉谷 憲

(大阪府立大学農学生命科学研究科大気環境学研究室)

Effects of Foliage and Sky View Factor on the Urban Thermal Environment

Atsushi TORIYAMA, Nobutaka MONJI, Yasuyuki AONO and Ken HAMOTANI

(Laboratory of Atmospheric Environment, Graduate School of Agriculture and Biological Science,)
Osaka Prefecture University, Sakai, 599-8531 Japan

Abstract

We investigated the effects of urban sky view factor and foliage view factor on the thermal environment, based on field experiments in the street canyons of Osaka. Mean radiation temperature (MRT) and physiologically equivalent temperature (PET) are used as the indices of the thermal environment. We found that *MRT* and *PET* decrease with a decrease in the sky view factor and with an increase in foliage view factor. The difference of 0.22 in the sky view factor caused a difference of 23 °C in *PET*. A difference of about 0.27 to 0.35 in the foliage view factor caused a difference of about 8.2 to 9.0 °C in *PET*.

We tried to convert the effect of wind speed to that of the foliage and found that an increase of about 3 ms^{-1} in wind speed is necessary to obtain the same effect as a change in the foliage view factor from 0.27 to 0.35.

Key words: Foliage view factor, Sky view factor, Thermal index, Urban thermal environment.

キーワード: 温熱環境指標, 樹木の形態係数, 天空比, 都市熱環境

1. はじめに

都市の熱環境についてはこれまで様々な研究が行われてきた。最初に行われたものは、都市と郊外の気温の差、都市域内での気温の面的な分布などを観測したものである (Duchworth and Sandberg, 1954 など)。そして生気象学的な側面を取り入れるため、気温に代わって湿球温度、不快指数、有効温度などの指標を用いた研究が行われるようになった (Maruta, 1974 など)。さらにその後、気温、風速、湿度、放射の要素を総合的に評価することができる PMV (predicted mean vote), PET (physiologically equivalent temperature), SET* (standard new effective temperature) などの温熱環境指標が用いられるようになった。これらの研究例には Jendritzky and Nübler (1981), Mayer and Höppe (1987), Matzarakis and Mayer (1991), Saitoh and Yamada (1997) などがある。また都市域でのヒトの熱収支の要素を調べた例としては、都市キャニオンの南

側、西側、東側、北側と住宅地で観測を行ったものがある (Tuller, 1975)。

しかし、都市の構成要素と熱環境の関連を実測をもとに示した研究は少ない。都市域での実測をもとに、温熱指標である PET の日変化を示した Matzarakis *et al.* (1999) では都市キャニオン内で街路樹のある地点とない地点での結果が示されているが、街路樹と熱環境の関連については詳しくは述べられていない。また数値モデルを用いた研究では簡素化のために都市の構成要素を地面、空、建物のみとしているものがほとんどで、街路樹などの構成要素の影響は考慮されていない。

この研究の目的は都市域での建物の建て込み程度と街路樹の量に注目して、それらと体感温度を含めた熱環境との関連を実測をもとに定量化することである。都市域の建て込み具合の指標として今回はそれぞれの観測点における天空比を用い、また街路樹の量を表すものとして樹木の形態係数 (view factor) を用いた。樹木の形態係数とは視野角における樹木の立体角の割合である。そして熱環境の指標として、ヒトに入ってくる短波放射量、ヒトに入ってくる長波放射量、これら双方を統合した平

均放射温度,そして総合的な温熱環境指標である PET の 4 要素を用いた。天空比と樹木の形態係数に差がある地点で観測を行い,先に述べた項目を算出して結果を比較した。さらに樹木の形態係数と風速が熱環境に及ぼす影響の程度を評価する試みを行った。

2. 方 法

2.1 ヒトに入ってくる短波, 長波放射量の算出方法

ヒトと周囲の環境との熱交換は次の式で書き表すことができる。

$$R_{SI} + \varepsilon_h R_{LI} - R_{SO} - R_{LO} - H - \lambda E = 0 \quad (1)$$

ここで, R_{SI} はヒトに入ってくる短波放射量, ε_h はヒトの表面での放射率, R_{LI} はヒトに入ってくる長波放射量, R_{SO} は出ていく短波放射量, R_{LO} は出ていく長波放射量, H は顕熱交換量, λE は潜熱交換量である。

このうち本研究では, R_{SI} を次のように表した。

$$R_{SI} = \frac{R_u}{2} + \frac{R_r}{2} + \frac{R_D}{4} \quad (2)$$

ここで, R_u は上向き短波放射量, R_r は散乱日射量, R_D は法面直達日射量である。ただし (2) 式は形状が球の場合に入ってくる短波放射量を算出する際成り立つ式でありヒトに入ってくる場合の量を厳密に正しく表しているものではないが, この研究ではこれを用いた。

また R_{LI} はグローブ温度計を用いる方法により測定した (Toriyama *et al.*, 1999)。グローブ温度計の熱収支は次の式になる。

$$R_{BSI} + \varepsilon_B R_{BLI} - R_{BSO} - R_{BLO} - H_B = 0 \quad (3)$$

ここで, R_{BSI} はグローブ温度計に入ってくる短波放射量, ε_B はグローブ温度計の放射率, R_{BLI} はグローブ温度計に入ってくる長波放射量, R_{BSO} はグローブ温度計から出ていく短波放射量, R_{BLO} はグローブ温度計から出ていく長波放射量, H_B は顕熱交換量である。この R_{BSI} , R_{BSO} , H_B を計算した後 R_{BLI} を残差として算出し, それを R_{LI} とみなした。

R_{BSI} は (2) 式と同様にして求めた。 R_{BSO} は R_{BSI} に実測したグローブ温度計のアルベド 0.08 をかけて算出した。 H_B は

$$H_B = \rho C_p C_H U (T_{Bd} - T_d) \quad (4)$$

として計算した。なお, ρ は空気密度 (kg m^{-3}), C_p は定圧比熱 ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), C_H は顕熱のバルク輸送係数, U は風速 (m s^{-1}), T_{Bd} はグローブ温度 ($^{\circ}\text{C}$), T_d は気温 ($^{\circ}\text{C}$) である。ここでの C_H は予備実験として純放射計を用いて R_{BLI} を様々な風速条件下で直接測定し, (3) 式から導いた。予備実験で得られた U と C_H の関係を Fig. 1 に示す。これより

Fig. 1. Variation of C_H with U .

$U \leq 2.0 \text{ m s}^{-1}$ の場合

$$C_H = 0.0156 U^{-0.82}$$

$U > 2.0 \text{ m s}^{-1}$ の場合

$$C_H = 0.009 \quad (5)$$

として (4) 式の H_B の計算に適用した。ただし C_H の値については Toriyama *et al.* (1999) と比べて違いが見られる。これは, Toriyama *et al.* (1999) は屋内の風洞で測定したものであるのに対して, (5) 式で示したものはより実測に近い屋外の環境で測定したことによる。(5) 式の C_H の値を用いることにより, Toriyama *et al.* (1999) が述べた直達日射量が大いの場合での R_{LI} の過大評価を改善することができる。

こうして R_{BSI} , R_{BSO} , H_B を計算した後, (3) 式より R_{BLI} を残差として求め, これを R_{LI} とした。

2.2 温熱環境指標

平均放射温度 (MRT) とは, 実際の不均一な放射場においてヒトが周囲環境と放射熱交換を行うのと同等の放射熱交換を行う均一の周囲温度である。これは温熱環境指標を算出する際に周囲からの放射要素を統合したものとして用いられる。この研究では R_{SI} と R_{LI} より以下の式を用いて MRT ($^{\circ}\text{C}$) を算出した。

$$MRT = \left[\frac{(1 - \alpha_h) R_{SI} + \varepsilon_h R_{LI}}{\sigma} \right]^{1/4} - 273 \quad (6)$$

ここで, σ はステファン-ボルツマン定数, α_h はヒトの表面のアルベドである。なお本研究では ε_h を 0.98 とした。また Tuller (1975) において服と皮膚を合わせたアルベドを 0.43 としていることから α_h を 0.4 とした。

MRT は放射の要素のみを表す指標であるが, これとさらに気温, 風速, 湿度等から算出される温熱環境指標として PMV (predicted mean vote) がある (Fanger, 1970)。PMV は熱的に中立 (快適) の状態では 0 の値をとり, 暑くなるに従って値が増加し, 寒い場合は減少する。PMV を都市の熱環境の研究に用いた例として, Jendritzky and Nübler (1981) が短波放射量と長波放

射量のパラメータ化を行ってドイツの都市フライブルク全域での PMV の分布を描いたものがある。そしてその PMV から発展したものが PET (physiologically equivalent temperature) であり、ある環境で算出された熱ストレスの値と同じ熱ストレスの値をとる室内の環境での気温と定義される。PET の算出方法は、まず人体の熱収支式に基づいてその環境での皮膚温度と体の内部の温度 (コア温度) を算出する。そして、気温と平均放射温度が等しく風速 0.1 m s^{-1} 、水蒸気圧 12 hPa の状態で先に算出した皮膚温度とコア温度に等しくなるような気温を PET とする (Mayer and Höppe, 1987)。なお本研究では着衣状態を半袖・半ズボン、代謝速度をリラックスして直立している状態として計算した。この PET を用いることによりその場所での気温、放射、風速、湿度の影響を統合して、快適性を温度として表すことができる。

PMV, PET は室内での快適性の研究から発展してきたものであるが、Mayer and Höppe (1987) はミュンヘンでの都市キャニオンの北側、都市キャニオンの南側、木のある庭、森林内で観測を行い PMV, PET の日変化を明らかにした。Matzarakis and Mayer (1991) はギリシャに熱波があったときのアテネにおける PMV, PET を気象台のデータから計算した。また、Saitoh and Yamada (1997) のように、PET と類似の温熱環境指標 SET* を用いて都市キャニオンにおける放射モデルを併用した解析が行われた。

この研究では都市における天空比および樹木の形態係数と熱環境の関係を明らかにすることが目的であるので、天空比および樹木の形態係数の異なる隣接した地点で観測を行い温熱環境指標 PET を算出した。

2.3 観 測

1999 年 8 月 22 日、25 日、31 日、9 月 5 日に大阪市内で観測を行った。観測日ごとに約 100 m の範囲 (Fig. 2 のエリア A~D) を定め、その中で近接した 3 地点を選び同時に観測を行った。8 月 22 日 (エリア A) はそれら 3 地点で天空比に差が出るように場所を選び、3 点とも東西に通った道路の北側に置いた。それぞれの観測点 A-1, A-2, A-3 とともに周囲はビルであり A-1 は道の片側が駐車場になっていて天空比が大きく、A-3 は道幅が狭くて天空比が小さかった。8 月 25 日 (B)、31 日 (C)、9 月 5 日 (D) は樹木の形態係数に差が出るように場所を選び、3 点とも南北に通った同じ道路の西側に置いた。エリア B は街路樹が 2 列の道幅約 10 m の道路沿いであり、B-1 は街路樹がとぎれていて、B-3 付近には街路樹と植え込みがあった。エリア C は街路樹が 2 列の道幅約 20 m の道路沿いで、C-1 付近は街路樹がとぎれていて、C-3 の周りには植え込みがあった。エリア D は

Fig. 2. Locations of observation points.

Table 1 View factors around the observation points.

Date	Location No.	View factor		
		Sky	Building	Foliage
A (Aug. 22)	1	0.30	0.70	0.00
	2	0.20	0.80	0.00
	3	0.08	0.92	0.00
B (Aug. 25)	1	0.14	0.86	0.00
	2	0.18	0.71	0.11
	3	0.20	0.53	0.27
C (Aug. 31)	1	0.24	0.71	0.05
	2	0.16	0.64	0.20
	3	0.12	0.55	0.33
D (Sept. 5)	1	0.16	0.68	0.16
	2	0.18	0.64	0.17
	3	0.14	0.35	0.51

道幅約 10 m の道路沿いで D-3 付近は道路の両側に植え込みがあった。各観測地点における天空比 (以下 Ψ_s で表す) と樹木の形態係数 (以下 Ψ_F で表す) を Table 1 にまとめた。なお天空比、樹木の形態係数は各観測点で全天写真を撮り計算した。全天写真は地上 1.8 m の高さで真上に向かって撮影した。エリア A では Ψ_F が 3 地点とも 0 で Ψ_s が 0.08 から 0.30 の範囲となる。一方 B から D では Ψ_F が 0.00 から 0.51 の範囲で変化している。それぞれの地点でグローブ温度計 (英弘精機, OES94-342) でグローブ温度、自作の通風乾湿計で乾湿球温度、日射計 (英弘精機, MS-61, ML-020V) で上向

Fig. 3. Time variation of R_{SI} , R_{LL} , MRT , PET for different ψ_s (Aug. 22).

Fig. 4. Relation between ψ_s and R_{SI} , R_{LL} , MAR , PET (averages between 9:00-18:00, Aug. 22).

き短波放射量と下向き短波放射量，直達日射よけのバンドを付けた日射計（英弘精機，MS-12）で散乱日射量，三杯風速計（風杯は牧野応用測器研究所，軸部は微風用に改良）で風速を測定した。各測器は地面から1.1 mの高さに設置した。観測期間中の天気は8月22日（エリアA）は晴れ，その他の日（エリアBからD）は晴れ時々曇りだった。

3. 結 果

3.1 天空比と MRT , PET

Fig. 3 に8月22日の観測から得られたエリアA内の3点における R_{SI} , R_{LL} , MRT , PET の日中の日変化を，Fig. 4 に ψ_s と R_{SI} , R_{LL} , MRT , PET の関係を示す。 R_{SI} , R_{LL} , MRT , PET と最も ψ_s が大きい地点A-

Fig. 5. Time variation of R_{SI} , R_{LI} , MRT , PET for different Ψ_F (Aug. 31).

1 が最大で最も Ψ_S が小さい A-3 が最小である傾向がある。A-1 と A-3 で、 R_{SI} に平均 290 W m^{-2} , R_{LI} に平均 80 W m^{-2} の差が見られ、 Ψ_S が小さくなるに従い R_{SI} , R_{LI} ともに小さくなった。 R_{SI} のこうした変化は Ψ_S が小さくなるにつれて短波放射量が減少することを反映している。一方 R_{LI} の変化については以下のことが原因と思われる。空からの単位面積あたりの長波放射量は他の周囲の構成要素からのものに比べて最も小さく、 Ψ_S が大きい場所で地面、建物などの空以外の構成要素の表面温度が変わらないなら R_{LI} は小さくなる。しかし、 Ψ_S が大きくなると地面、建物などに入射する直達日射が増加し、そのために表面温度が高くなる。このことによる長波放射量の増加分が空からの長波放射量の減少分を上回ったと考えられる。 R_{SI} , R_{LI} とも A-1 が最大で A-3 が最小であったので、 R_{SI} , R_{LI} から算出される MRT も同様の結果となった。そして 3 地点での気温の平均値は 31 から 32°C、風速の平均値は 1.0 から 1.4 m s^{-1} の範囲にあり差は小さかったので PET も MRT と同様の結果となった。なお、Fig. 3 の A-3 の 16:00 から 17:20 までは R_{SI} , R_{LI} ともに他の時間帯と比べて大きな値になっているのは建物の隙間から直達日射が差し込んだためであり、A-2 の 11:40 から 14:40 まで以外の R_{SI} , R_{LI} が大きいのも建物の隙間から直達日射が差し込んだためである。

3.2 樹木の形態係数と MRT , PET

Fig. 5 に 8 月 31 日の観測から得られたエリア C 内の 3 地点での R_{SI} , R_{LI} , MRT , PET の 9:00 から 13:00 までの日変化を示す。 Ψ_F がこの中で最大だった C-3 は R_{SI} が最小である場合が多く、 Ψ_F が最小だった C-1 は R_{SI} が最大である場合が多かった。これは Ψ_F が大きいところでは陰になる時間が長いことによる。しかし C-1 から C-3 の 3 点の R_{LI} については違いは見いだせなかった。 MRT の 3 点での差は主に R_{SI} の差によるものであり、最大で 20°C の差が見られた。そして C-1, C-2, C-3 の 9:00 から 13:00 までの平均風速はそれぞれ 1.3 , 0.6 , 0.9 m s^{-1} と C-1 が最大だったため C-1 の PET の値が C-2 よりも小さくなった時間がほとんどであった。

Fig. 6 はエリア B, C, D (それぞれ 8 月 25 日, 31 日, 9 月 5 日に観測) で得られた Ψ_F と R_{SI} , R_{LI} , MRT , PET の関係を示したものである。ただし、いずれの地点も直達日射が十分に街路に差し込んだ時間帯を選んだので 8 月 25 日は 11:20 から 12:00、31 日は 10:40 から 12:20 まで、9 月 5 日は 11:00 から 12:20 までの平均値である。 R_{SI} については、3 日とも Ψ_F が最大の地点で最小になる傾向がある。エリア C では Ψ_F による R_{LI} の差は見られないが、それ以外は Ψ_F がエリア内の最大の地点で平均値が最小になる傾向がある。そしてすべてのエリアで MRT , PET 共にエリア内で Ψ_F が最大

Fig. 6. Relation between Ψ_F and R_{SI} , R_{LI} , MRT , PET . $\blacklozenge$: average between 11:20–12:00, Aug. 25. $\square$: averages between 10:40–12:20, Aug. 31. $\blacktriangle$: average between 11:00–12:20, Sept. 5.

の点で最小値をとる傾向が見られた。 Ψ_F が最大の地点と最小の地点での PET の平均値の差は、エリア B で 8 °C, C で 10 °C, D で 12 °C だった。エリア C の PET の値が全般的に高いのは気温が他より 5 °C 程度高かったことによる。また、エリア D では R_{SI} , MRT , PET が Ψ_F が最大の D-1 よりも次に Ψ_F が大きい D-2 で大きい傾向があるのは、 Ψ_F に差が小さかったため建物の配置など他の要素の影響が現れたことが原因だと思われる。

4. 樹木の形態係数と風速

Ψ_F の差によって MRT に差が見られたが、これを風速の差に換算する試みを行った。エリア内で Ψ_F が最小である B-1, C-1, D-1 において風速を増加させて、それぞれのエリア内で Ψ_F が最大である B-3, C-3, D-3 と同じ温熱環境指標を伴う場にするために必要な風速の値(相当風速)を算出した。温熱環境指標として PET の他に次式で表される温度 T_{BG} (°C) を用いた。これは放射率とアルベドを人体のものにしたグローブ温度と考えることができる。

$$\begin{aligned} & \sigma(MRT+273)^4 - \epsilon_h(T_{BG}+273)^4 \\ & - \rho C_P C_H U(T_{BG} - T_a) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

これを用いた理由は、 PET は個人の着衣量や活動量を

考慮した温熱環境指標であるのに対して T_{BG} はそれらを考慮しない簡便な指標であることによる。

結果は Ψ_F の差が 0.27 であるエリア B で実際の風速と相当風速の差が PET を用いた場合 2.5 m s^{-1} T_{BG} を用いた場合 2.0 m s^{-1} であり、 Ψ_F の差が 0.28 のエリア C で T_{BG} を用いた場合 2.8 m s^{-1} , Ψ_F の差が 0.35 のエリア D で PET を用いた場合 6.3 m s^{-1} T_{BG} を用いた場合 2.9 m s^{-1} であった。ただしエリア C では PET を用いた場合風速を 10 m s^{-1} 以上に増加させても相当風速を得ることができなかった。これはエリア C の観測日の気温がエリア B やエリア D に比べて平均約 5 °C 高く、また C-1 と C-3 の MRT の差も 15.0 °C と 3 エリア中で最大であったことが理由と考えられる。このことから、特に暑さが厳しい環境では直達日射が遮られることによって得られる快適性と同じだけの効果を得るためには周囲の風速を大きく増加させることが必要であると言える。

5. 結 論

街路樹による放射環境への影響を評価するため、夏に天空比、樹木の形態係数の異なる地点で観測を行った結果次のようなことがわかった。

(1) 樹木のない都市域では、天空比が小さい場所ほどヒトに入る短波放射量が減少する。また天空比が小さ

い場所は直達日射が届かないために都市構成物の表面温度が上昇せず、ヒトに入る長波放射量も小さくなる。天空比の差が 0.22 の地点間では、日中の平均値で短波放射量で 290 W m^{-2} 長波放射量で 80 W m^{-2} の差が見られた。すなわち気象要素に差がなければ建物と地面のみで構成された都市域では夏の暑い環境においては建物が建て込むほど熱的には快適になる。

(2) 街路樹のある都市域では樹木が多くなると直達日射が遮られるためヒトに入ってくる短波放射量が減少する。樹木の形態係数の差が約 0.3 あれば短波放射量は $15 \sim 130 \text{ W m}^{-2}$ の差が生じた。また、樹木が多い場合にはヒトに入ってくる長波放射量も減少する場合があります、樹木の形態係数の差が 0.27 の地点間で 50 W m^{-2} の差が見られる時間帯があった。

(3) 放射環境の差を風速に換算する試みを行った。その結果夏の暑さが厳しい環境では、樹木の形態係数の差が約 0.3 ある場合樹木の形態係数が少ない側で 3 m s^{-1} 以上の風速の増加がないと *PET* から見て等しい体感温度にならないことがわかった。

References

- Duchworth, F.S. and Sandberg, J.S., 1954: The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradient. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **35**, 198–207.
- Fanger, P.O., 1970: *Thermal comfort*. McGraw-Hill Book Company, New York, 244 pp.
- Jendritzky, G. and Nübler, W., 1981: A model analyzing the urban thermal environment in physiologically signification terms. *Arch. Meteorol. Geoph. Biokl., Ser. B*, **29**, 313–326.
- Maruta, Y., 1974: Functions and effects of green space in urban area. *Meteorol. Res. Note*, **119**, 65–70 (丸田頼一, 1974: 市街地の公園緑地の機能効果. 気象研究ノート, **119**, 65–70).
- Matzarakis, A. and Mayer, H., 1991: The extreme heat wave in Athens in July 1987 from the point view of human biometeorology. *Atmos. Environ.*, **25 B**, 203–211.
- Matzarakis, A., Mayer, H. and Izimon, G.M., 1999: Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *Int. J. Biometeor.*, **43**, 76–84.
- Mayer, H. and Höppe, P., 1987: Thermal comfort of man in different urban environments. *Theor. Appl. Climeteorol.*, **38**, 43–49.
- Saitoh, T. and Yamada, N., 1997: Three-dimensional simulation for urban warming and proposal of an environmental index for urban environment. *J. Jpn. Soc. Mech. Eng. (B)*, **63**, 1783–1790.
- Toriyama, A., Monji, N., Aono, Y. and Hamotani, K., 1999: Development of a wet globe thermometer and its application of the research of urban thermal environment. *J. Agric. Meteorol.*, **55**, 253–259.
- Tuller, S.E., 1975: The energy budget of man: Variation with aspect in a downtown urban environment. *Int. J. Biometeorol.*, **19**, 2–13.