

都市内樹林における葉温の挙動と微気候因子との 関係に関する研究

STUDY ON THE RELATIONSHIP BETWEEN LEAF TEMPERATURE OF FOREST TREES AND MICROCLIMATE IN A GREENLAND OF URBAN AREA

手計太一¹・志村光一²・山田正³・日野幹雄⁴

Taichi TEBAKARI, Koichi SHIMURA, Tadashi YAMADA and Mikio HINO

¹ 学生員 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

² 正会員 工博 中央大学助手 理工学部土木工学科 (同上)

³ 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (同上)

⁴ 正会員 工博 中央大学教授 総合政策学部 (〒192 東京都八王子市東中野 742-1)

The purpose of this study is to clarify the role of forest in urban area from a viewpoint of urban environment by observing the leaf temperature and micrometeorological factors, such as air temperature, wind speed, humidity, solar radiation, soil heat, and CO₂ concentration. In the midsummer of August 2000, the micrometeorological observation was carried out at Koishikawa Korakuen Gardens (in Bunkyo-ku Tokyo, Japan) for a week. The following results were obtained: 1) In the daytime, the leaf temperature rapidly lowered, when some critical conditions were exceeded. In the nighttime, the air and leaf temperature were almost the same. 2) When the flux of solar radiation increased above about 400W/m², the leaf temperature lowered linearly with it. 3) Within VPD (vapor pressure deficit) became higher than 4hPa, the leaf temperature rapidly lowered further than the air temperature. 4) Simultaneously with this, the carbon dioxide concentration began to lower.

Key Words: sudden temperature decrease of leaf temperature, infrared radiation thermometer, saturation deficit, evapotranspiration, plant physiology, photosynthesis

1. はじめに

都市域における緑、特に樹木の果す環境気象を明らかにする研究の一環として、ここ数年著者らは、東京都の後楽園庭園の樹木について赤外放射温度計による葉温の他、微気象観測を続けてきた。

著者らは、1998年8月の観測結果から、これまでに報告されていないような葉温の特徴的な日変化の挙動を捉えた^{1), 2)}。その挙動の解明を目的に、観測項目を増やし観測を行ってきた。

本研究では、2000年8月にも、1998年と似たような葉温の特徴的な日変化を確認した。さらに、同時に行っている微気象観測データと葉温に密接な関係が見出されたので、その詳細について報告する。

熱収支については、いくつかの文献がある。^{4), 5)}なお、蒸発散メカニズムの解明、モデル化に関しては多くの研

究がなされており、それらの研究成果は近年著しく増加している。植物生理学的な面においても80年代のS i B以降、S V A Tモデルの発展、およびGAME等におけるタワー観測により、現象の認識・モデル化は確実に進展していると思われる。

2. 観測・解析概要

(1) 観測概要

2000年8月24日から8月27日までの4日間、中央大学理工学部校舎屋上(高さ70m)より赤外放射温度計(NEC三栄株式会社製)を用いて小石川後楽園(東京都文京区)の樹木と周辺の都市域の表面温度を観測した。赤外放射温度計を用いた水ストレス反応の検出の有効性が中原・井上⁵⁾によって示されている。これを利用して葉温の

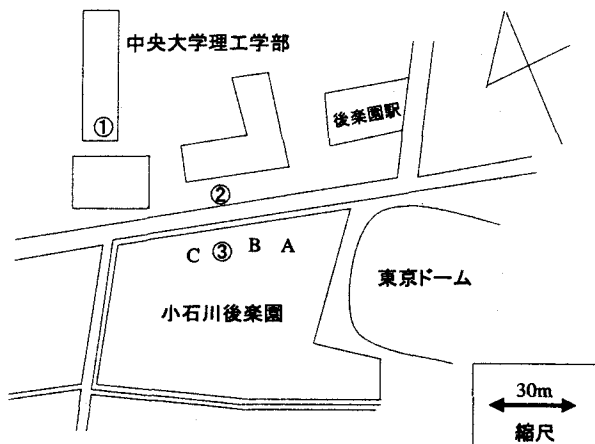


図-1 小石川後楽園とその周辺の平面図

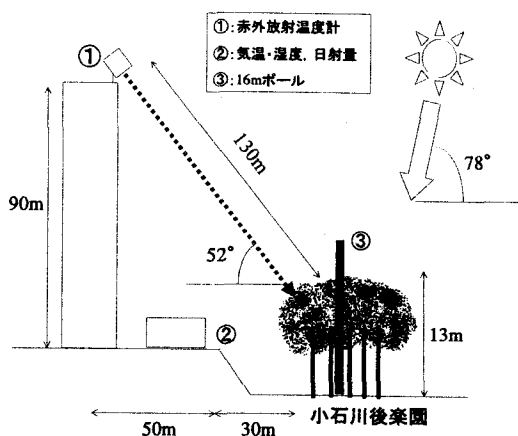


図-2 小石川後楽園と観測ポイントの断面図

表-1 測定項目・測定機器

項目	測定機器	測定間隔・解析手法	設置場所
森林表層温度	赤外放射温度計 (NEC三栄機)	30分毎に撮影	①
気温・湿度	通風式乾湿球計 (英弘精機)	1分間隔 → 30分平均	②
全天日射量	日射計 (英弘精機)	1分間隔 → 30分平均	②
気温・湿度	通風式乾湿球計 (英弘精機)	1分間隔 → 30分平均	③ (林床)
正味放射量	放射収支計 (英弘精機)	1分間隔 → 30分平均	③ (林床)
地中熱流量	熱流計 (英弘精機)	1分間隔 → 30分平均	③ (林床)
気温・湿度	サーミスタ式 (Onset社)	1分間隔 → 30分平均	③ (樹幹上)
風速	熱線式風速計 (芝浦電子)	1分間隔 → 30分平均	③ (樹幹上)
CO ₂	CO ₂ モニタ (ADC社)	1分間隔 → 30分平均	③ (樹幹上)

挙動から蒸散のタイミングを掴むことを試みた。同時に、小石川後楽園内において微気象観測を行った。さらに、小石川後楽園内の観測ポイントから約30m離れた中央大学理工学部校舎内においても微気象観測を行った。

図-1は小石川後楽園とその周辺の図である。小石川後楽園は、西面に東京ドーム、北面は道路と鉄道、東面は比較的背の低いビル、南面は高いビルに囲まれており、いわば熱の海に浮かぶ緑の島である。観測した樹木は、落葉樹 (ムクノキ、ケヤキ)、常緑広葉樹 (シイノキ、クス) である。またどの植物も高さ13m付近の葉の表面温度を計測した。各樹種とも3ヶ所 (同高度) の3枚の葉の表面温度の瞬間値を平均化している。本研究では、どの樹種の葉温もほとんど同じ挙動であったので、4樹種全てを平均化したデータを解析した。さらに、東京における太陽高度約78°、照射角度52°から、観測している樹木は、裏や背中を見ているのではない。直射日光も当たっている。

小石川後楽園内の観測ポイントは、図-1中の③である。ここは、道路境界から10m離れている地点である。図-2は小石川後楽園と観測ポイントの断面図である。表-1は観測機材の一覧である。林床において、正味放射量、地中熱流量、気温・湿度の観測を行った。さらに、16mのポールを設置し、鉛直方向2m毎に気温・湿度の観測、

高度16m (樹幹上3m) において二酸化炭素濃度の観測を行った。高度16m (樹幹上3m)、14m (樹幹上1m) においては風速の観測も行った。本研究においては、高度16mと14mにおける気温・湿度からBowen比を算定し、潜熱・顕熱fluxを算定した。

小石川後楽園内における観測ポイントから30m離れた中央大学理工学部校舎内においては、全天日射量、気温・湿度を観測した。

(2) 放射温度計 (サーモグラフィ) の補正

透過・吸収誤差を避けるために、波長帯を8~13μmという長波長帯を用いている。また、葉温を計測する場合の射出率はほぼ1.0で良いことは知られているので、本研究においては射出率を1.0で固定し、観測を行なった。

3. 解析方法

(1) 正味放射量の算定方法

正味放射量は林床部でのみ観測を行ったので、樹幹上での正味放射量は下記のように算定した。

長波放射量 ($R\downarrow$) は次式を用いて算定する (Holtslag et al., 1981)。

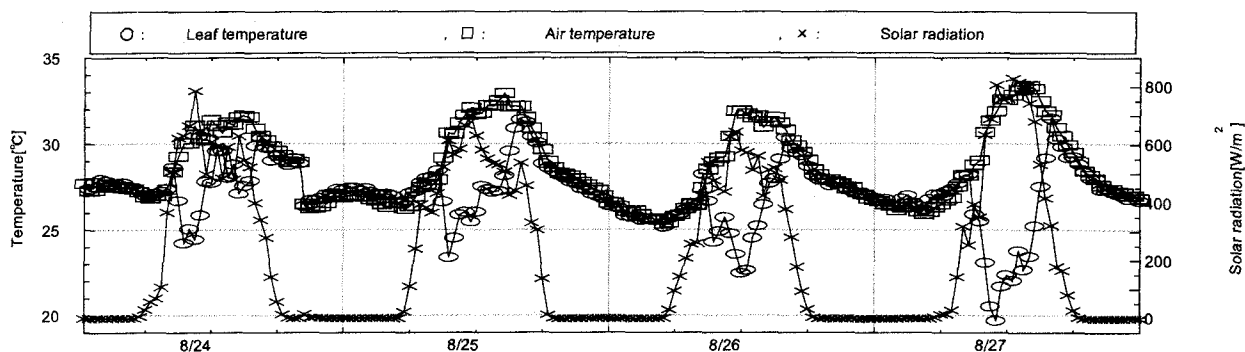


図-3 気温（高度 14m）、全天日射量、葉温の時系列

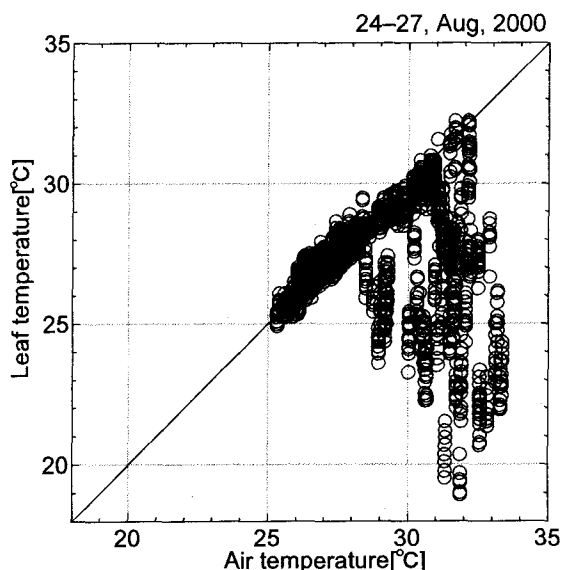


図-4 気温（高度 14m）と葉温の関係

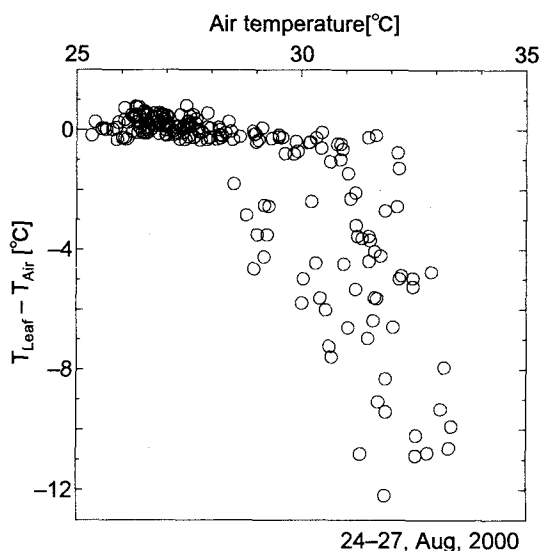


図-5 気温（高度 14m）と葉温－気温（高度 14m）との関係

$$R \downarrow = \sigma T_a^4 + c(1 - \text{ref}) R_s \quad (1)$$

（ここで、 σ : Stefan-Boltzmann's constant, T_a : 地上の代表気温, c : 0.07, ref : albedo, R_s : 全天日射量である。）

次に、上式の長波放射量 ($R \downarrow$) から、正味放射量 (R_n) を次式で算定した。

$$R_n = R_s(1 - \text{ref}) + \varepsilon R \downarrow - \varepsilon \sigma T_l^4 \quad (2)$$

（ここで、 R_s : 日射量, ref : albedo, ε : 射出率, σ : Stefan-Boltzmann's constant, T_l : 葉温である。）

(2) Bowen 比法による潜熱・顕熱 flux の算定

高度 16m（樹幹上 3m）と 14m（樹幹上 1m）における気温・湿度から Bowen 比を算定し、潜熱・顕熱 flux を算定した。解析には、気温・湿度の 30 分平均を用いた。

$$LE = \frac{R_n - G}{Bo + 1} \quad (3)$$

$$H = Bo \times LE \quad (4)$$

$$Bo = \frac{c_p (T_{16} - T_{14})}{l(q_{16} - q_{14})} \quad (5)$$

（ここで、 Bo : ボーエン比, G : 地中熱流量, LE : 潜熱 flux, H : 顕熱 flux, T_{16}, T_{14} : 高度 16m（樹幹上 3m）, 14m（樹幹上 1m）における気温, q_{16}, q_{14} : 高度 16m（樹幹上 3m）, 14m（樹幹上 1m）における比湿, l : 水の気化潜熱, c_p : 空気定の定圧比熱である。）

4. 観測・解析結果と考察

本研究においては、解析に用いた気温、湿度のデータは葉温を観測した高度とほぼ同じである高度 14m の値を用いている。

(1) 葉温と気温（高度 14m）の関係

図-3 は気温と日射量と葉温の時系列である。観測期間中毎日、最高気温が 30℃ を超え、最低気温も 25℃ と非常に暑い日であることがわかる。4 日間とも朝 8 時から 9 時にかけて気温は上昇、それに伴い、周辺の建物、道路

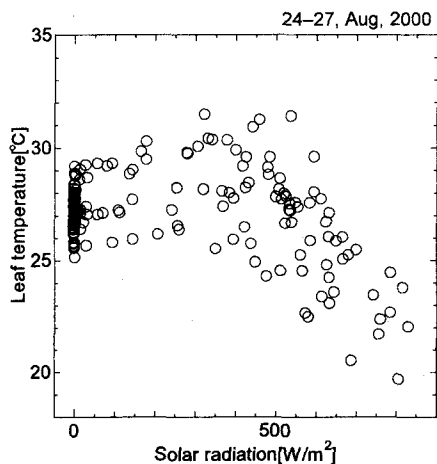


図-6 日射量と葉温の関係

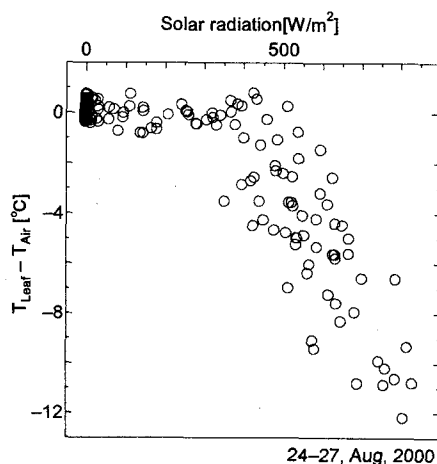


図-7 日射量と葉温-気温（高度 14m）との関係

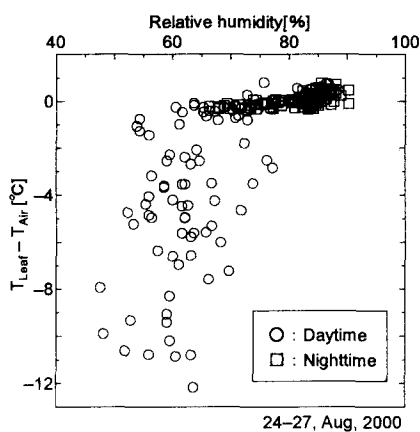


図-8 相対湿度（高度 14m）と葉温-気温（高度 14m）との関係

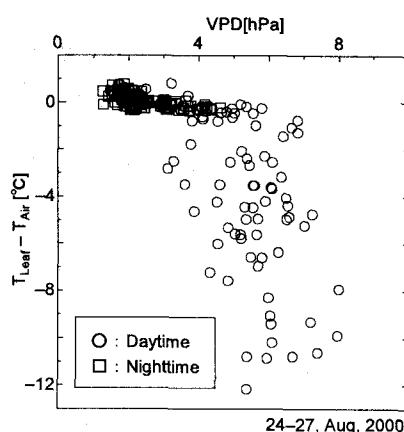


図-9 VPD（高度 14m）と葉温-気温（高度 14m）との関係

などの温度も急上昇し、日中の周辺の建物、道路の表面温度は最高で 50°C ～ 60°C にも達する。そして 14 時から 15 時にかけて葉温は気温とほぼ同じくらいになる。

また、夕方から朝方にかけては、気温と葉温はほとんど同じである。

図-4 は気温と葉温の関係である。気温約 30°C を境に葉温の急激な低下が現れている。さらに、気温約 30°C 以下では葉温と気温はほとんど同じである。すなわち、ある一定以上に達すると、日射による葉の表面温度の上昇はほとんどみられないと考えられる。また、観測期間を通して、葉温は気温を超えることはほとんどない。

図-5 は気温と（葉温-気温）の関係である。気温約 30°C までは葉温と気温はほとんど同じであるが、それを境に急激に葉温は気温よりも低下することがわかる。そして、その差は最大で 12.2°C であった。

(2) 葉温と日射量の関係

図-3 から、日射量の増加に従い、葉温は低下していくことがわかる。さらに日射量が最大を示す時間付近で葉温が最も低下している。日中は、日射量と葉温の挙動は負の相関があることがわかる。

図-6 は日射量と葉温の関係である。この図面から日射量が $0\sim$ 約 $400\text{W}/\text{m}^2$ の間では、日射量の増加とともに葉温も多少上昇する（しかし、大気温度も同時に上昇している。図-7 参照）。しかし約 $400\text{W}/\text{m}^2$ を境に葉温が低下している。

図-7 は日射量と（葉温-気温）の関係である。日射量が約 $400\text{W}/\text{m}^2$ 付近までは葉温と気温はほとんど同じである。この間にも、蒸散によって葉温は気温と同程度の温度を維持しようとしていると考えられる。しかし、それを境に直線的に葉温は気温よりも低くなる。

(3) 葉温と湿度（高度 14m）の関係

図-8 は相対湿度と（葉温-気温）の関係である。相対湿度が約 $65\sim 100\%$ の範囲では、葉温と気温はほとんど同じ傾向にある。さらに相対湿度 65% 以下の範囲では急激に葉温は気温よりも低下していく。

図-9 は VPD と（葉温-気温）の関係である。本論文中的 VPD とは、大気飽差のことである。大気飽差を用いた理由は、熱収支式、Bulk 式（コンダクタンス表示）を用いると、葉温と気温の差は、純放射と抵抗が大気飽差に依存する式形になるからである。VPD が $0\sim$ 約 4hPa

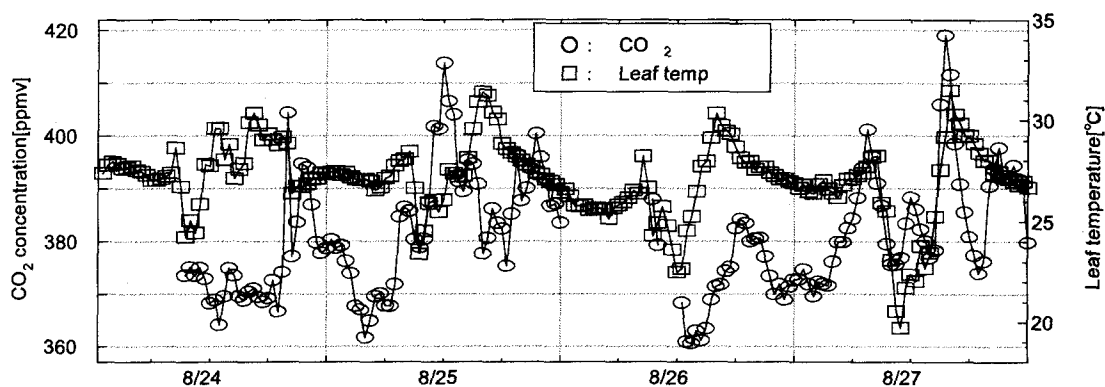


図-10 二酸化炭素濃度（樹幹上）と葉温の時系列

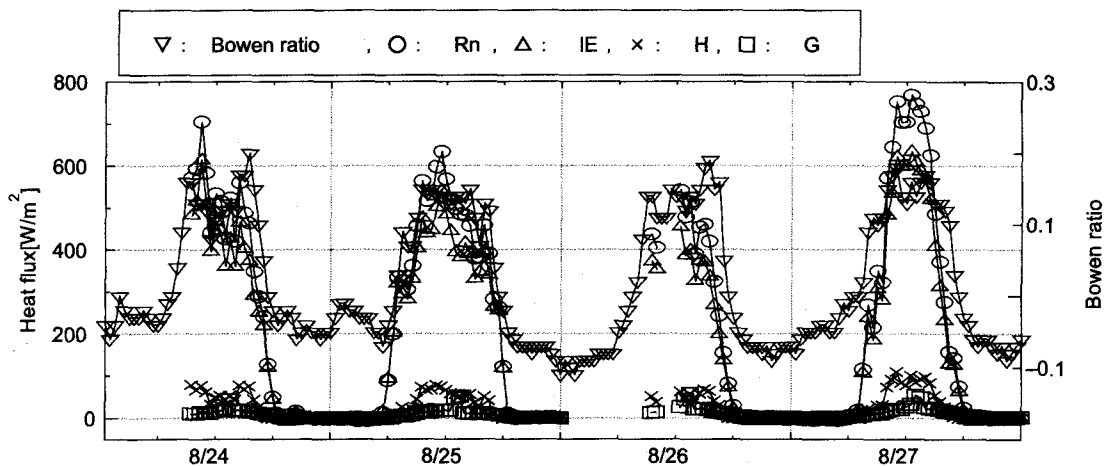


図-11 正味放射量、潜熱・顕熱 flux、地中熱流量、Bowen 比の時系列

の範囲では葉温と気温はほとんど同じである。VPD が約 4hPa を境に急激に葉温は気温よりも低下していく。

(4) 葉温と二酸化炭素濃度（樹幹上）の関係

図-10 は葉温と二酸化炭素濃度の時系列である。葉温の低下し始めるのとほぼ同じ時刻に二酸化炭素濃度が低下している。これは、光合成のためには葉内に二酸化炭素が必要であり、外気の二酸化炭素を吸収するために気孔を開き、水蒸気も通り易くなることで葉温も低下していると考えられる。また、日中においては二酸化炭素濃度の変化が激しく高濃度をしめすが、これは、自動車の排ガス、工場からの排ガスなど社会活動による影響によるものと考えられる。

(5) 葉温と Bowen 比、潜熱・顕熱 flux の関係

図-11 は Bowen 比と Bowen 比法で算定した正味放射量、地中熱流量、潜熱・顕熱 flux の時系列である。Bowen 比は 0.13~0.2 の範囲で推移している。さらに、正味放射量の最大で約 80% 以上が潜熱として放出され、これにより大気中に水分を供給している。

図-12 は Bowen 比と（葉温-気温）差の関係である。Bowen 比が 0.13~0.1 の範囲では葉温と気温はほとんど同じであるが、それ以上の範囲では急激に葉温が低下し

ている。Bo>0.1 とは H/IE>0.1 ということであり、顕熱 flux が潜熱 flux の 1/10 以上になると葉温は気温よりも低下するということを意味する。

図-13 は潜熱 flux と（葉温-気温）の関係である。潜熱 flux の増加とともに葉温は気温よりも直線的に低下していくことがわかる。

【なぜ、顕熱 flux は負にならないか】

$T_{\text{leaf}} - T_{\text{air}} = 12^{\circ}\text{C}$ のイベントに注目する。図-12 より Bowen 比は正であるから、樹林としての H は上向きである。しかし、葉温は気温よりも 12°C 低いことから、H は下向きにならねばならない。これは、単位水平面あたりに、樹冠の表面においては、葉面の占める割合は極めて小さい（スカスカ）ので、流れの中に小面積の cool point を置いた状態であって、全体としては単位水平面あたりの顕熱輸送は負にはならない。また、樹冠から深いところでは、葉温と気温はほぼ同じくらいであり、葉温の急激な低下以前と同じような状態にあると推定される。以上から、全面が $T_{\text{leaf}} - T_{\text{air}} = 12^{\circ}\text{C}$ の状態ではないと考えられる。

5. まとめと今後の課題

夏季における葉温の挙動と周辺微気象因子との関係に

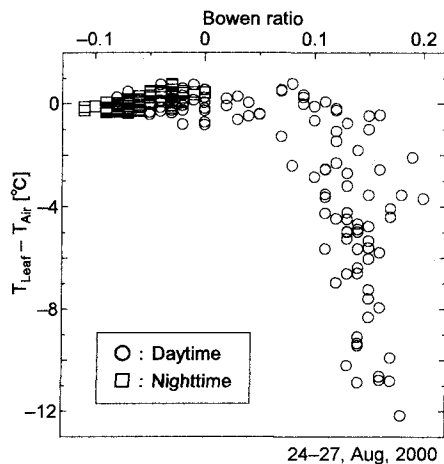


図-12 Bowen比と葉温-気温（高度14m）との関係

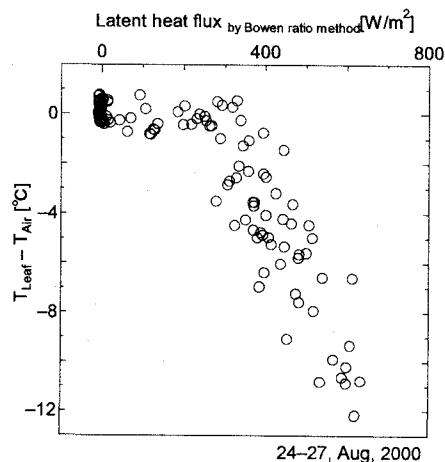


図-13 潜熱 flux と葉温-気温（高度14m）との関係

ついて、現地観測に基づいて考察を行った。本研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) 日射があるにも関わらず、（したがって、周辺の建造物は日射の増加とともに昇温するが）日射が比較的弱い間は葉温と気温はほとんど同じである。日射が強くなり始めると葉温は気温よりも急激に低下するという現象が観測された。この現象は、8時から9時頃から始まり、14時から15時頃に終り、葉温と気温は同じくらいになる。また、葉温と気温の差は最大で12.2°Cもあることが観測された。

さらに夕方から朝方にかけては、葉温と気温はほとんど同じであった。このような挙動は、観測期間中毎日観測された。

このような現象（葉温-大気温差の不連続な急変）は、これまでの著者らの報告以外にないと思われる。

- (2) 葉温が低下している時間帯においては、葉温と日射量は負の相関にある。さらに、日射量が400W/m²以上を境に、日射量上昇とともに直線的に葉温は低下する。これは強い日射により気孔が開き蒸散が促進することによるものと考えられる。
- (3) VPD（大気飽差）が4hPa以上の範囲では、VPDの上昇とともに葉温は気温よりも急激に低下する現象が捉えられた。これは、大気の乾燥化が蒸散を促進し、葉温が低下していると考えられる。
- (4) 二酸化炭素濃度の低下し始める時刻と葉温の低下し始める時刻はほぼ同じである。これは、植生が光合成のために植生が二酸化炭素を必要とし、吸収するために気孔を開く。そのため、蒸散も活性化するために葉温の低下が観測されたと考えられる。
- (5) 本観測中においては、正味放射量の最大で約8割以上が潜熱として大気中に水蒸気を供給してい

ることが観測された。さらに、この潜熱 flux が増加するとともに葉温は気温よりも低下するという現象が捉えられた。この結果からも、葉温の低下は蒸散の促進と考えられる。

以上の(1)～(5)の結果から、気温や日射量の上昇に伴い、二酸化炭素濃度の低下・潜熱 flux の増加という結果から、蒸散作用の活性化により葉温の低下という現象が捉えられたと考えられる。このような現象は、都市内樹林においては著者らによる観測報告以外に例はないと思われる。

今後、本観測結果の解明のためにモデル化を進めるとともに、この現象が都市内という特殊な環境によるものなのかを検討していく必要がある。

謝辞：本研究の遂行にあたり、東京都東部公園緑地事務所、小石川後楽園公園事務所の多大な協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 手計太一・志村光一・山田正・日野幹雄：夏季における葉の表面温度の日変化に関する研究，第26回関東支部技術研究発表会講演概要集，II-36，pp.230-231，1999。
- 2) 手計太一・志村光一・山田正・日野幹雄：夏の大気環境が葉の表面温度に与える影響，第54回土木学会年次学術講演会，II-353，pp.708-709，1999。
- 3) 近藤純正：水環境の気象学，朝倉書店，1996。
- 4) Jones, G. H.: Plants and microclimate, Cambridge university press, 1994。
- 5) 中原正一・井上吉雄：赤外放射測温によるトマトの水ストレス反応の検出，農業気象53(3)，pp.191-199，1997。

(2000.10.2 受付)