

(II-55) 都市内緑地における樹林表層温度の日変化に関する植物生理学的検討

中央大学大学院 学生員 ○手計太一
中央大学理工学部 正会員 山田 正

中央大学理工学部 正会員 志村光一
中央大学総合政策学部 正会員 日野幹雄

1. はじめに 2000 年夏の小石川後楽園における微気象観測の結果、気象条件によって葉温が急激に低下するという現象を捉えた。その現象の解明を目的に、植物生理学的な検討を行なった。

2. 観測概要 2000 年 8 月 21 日～28 日までの 8 日間、小石川後楽園（東京都文京区）において微気象観測を行なった。小石川後楽園とその周辺の概要を図-1 に示す。観測地点は、小石川後楽園内に 1 点と小石川後楽園から 30m 離れた中央大学構内の 1 点である。観測項目を表-1 に示す。樹幹上において観測用ポールを設置し熱収支観測を行なった。葉温の計測には、赤外放射温度計（サーモグラフィ）を用いた。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。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 枚の葉温の瞬間値を平均化している。

3. 観測結果 本論文では、特に気温、葉温、大気飽差、葉温飽差、葉気温差の 5 要素の解析結果を示す。図-2 は気温と葉気温差（葉温－気温）との関係である。図中の●が観測値である。気温が 25～30[℃]付近までは、気温と葉温

表-1 観測項目

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)



図-1 小石川後楽園とその周辺図

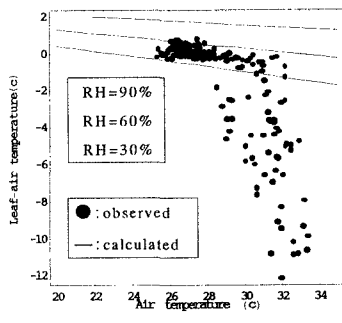


図-2 気温と葉気温差の関係

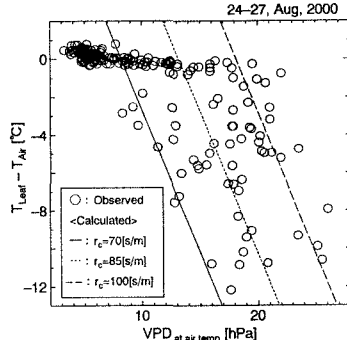


図-3 大気飽差と葉気温差の関係

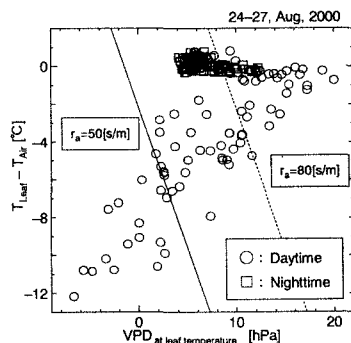


図-4 葉温飽差と葉気温差の関係

はほとんど同じであることがわかる。気温が 30[℃]付近を境に、気温上昇とともに葉温は気温よりも低下していくことがわかる。このような現象を実測値として捉えた報告は、著者ら以外にないと思われる。図-3 は大気飽差と葉気温差との関係である。図中の○が観測値である。大気飽差が 10[hPa]以下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葉温は気温よりも急激に低下する。これは、大気が乾燥するに従い、蒸散が促進され葉温が低下すると考えられる。図-4 は葉温飽差と葉気温差との関係である。図中の○、□が観測値である。夜間の葉温飽差は 2～10[hPa]

付近で推移し、日中の葉温飽差が減少するに従い葉温は気温よりも低下していくことがわかる。

4. 既往の理論を用いた検討

これまでの観測結果について、熱収支と Bulk 式を用いた理論を用いて比較、検討を行なった。熱収支式、Bulk 式の群落・空気力学抵抗を用いた表現は下記のように表せる。

$$Rn = G + H + IE \dots (1)$$

$$H = \frac{\rho c_p (T_{leaf} - T_{air})}{r_a} \dots (2)$$

キーワード：葉温、気孔コンダクタンス、蒸散、赤外放射温度、微気象

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部 TEL03(3817)1805, FAX03(3817)1803

$$IE = \frac{\rho c_p (e_{leaf}^* - e_{air})}{\gamma(r_a + r_c)} \dots (3)$$

(ここで、 R_n : 正味放射量[W/m²], G : 地中熱流量[W/m²], H : 顕熱 flux[W/m²], IE : 潜熱 flux[W/m²], ρ : 空気密度[kg/m³], c_p : 定圧比熱[J/kg/K], T_{leaf} : 葉温[°C], T_{air} : 大気温度[°C], r_a : 空気力学抵抗[s/m], e_{leaf}^* : 葉温における飽和水蒸気圧[hPa], e_{air} : 水蒸気圧[hPa], γ : 乾湿球計定数[hPa/K], r_c : 群落抵抗[s/m]である.)

上記の (1) ~ (3) 式を用い、熱収支観測の値から空気力学抵抗 (r_a) を推定し、その値と高度 16m と 13m の気温の差を比較したものが図-5 である。高度 13m は樹林の表層部分であり、直接計測した葉温の代わりに用いることで、 r_a の妥当性を示すものである。気温差が負の範囲では、(2) 式の左辺は正、右辺の分子は負であることから、 r_a は負になる。しかし、気温差が正の場合、 r_a が非常に大きくなるため、横軸は絶対値を用いて表示したこの図面から、 r_a がほとんど一定の値をとることがわかる。

次に、(1) ~ (3) 式に Δ を与え展開すると、葉気温差は以下のように表現できる。

$$T_{leaf} - T_{air} = \frac{r_a R_n}{\rho c_p} \frac{\gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} - \frac{e_{air}^* - e_{air}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \dots (4)$$

$$\Delta = \frac{e_{leaf}^* - e_{air}}{T_{leaf} - T_{air}} \dots (5)$$

(ここで、 e_{air}^* : 大気温度における飽和水蒸気圧[hPa]である.)

(4) 式からわかるように、葉気温差は、正味放射量 (R_n) と群落・空気力学抵抗 (r_c , r_a), 大気飽差に大きく依存する。この (4) 式に $R_n=300$ [W/m²], $r_a=18$ [s/m], $r_c=100$ [s/m] を一定与え、相対湿度が 90[%], 60[%], 30[%] の場合における気温と葉気温差の計算結果と観測値の比較をしたものが図-2 である。実線が理論値である。気温が低いところの挙動はこれまでの理論でも表現が可能であることがわかる。しかし、気温が 30[°C] 以上での葉温の急激な低下という現象を表現はできない。

さらに、濡れた植物表面を自由水面として考えると、

$$r_c = 0 \dots (6)$$

$$T_{leaf} - T_{air} = \frac{r_a R_n}{\rho c_p} \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} - \frac{e_{air}^* - e_{air}}{\Delta + \gamma} \dots (7)$$

となる。そしてこの (7) 式に (5) 式を代入すると、

$$T_{leaf} - T_{air} = \frac{r_a R_n \gamma}{\rho c_p} \frac{-VPD(T_{air}) - VPD(T_{leaf})}{\gamma} \dots (8)$$

となる。(8) 式より葉気温差は、 r_a , R_n , 大気飽差、葉温飽差に依存する式形になることがわかる。そして、(8) 式の両辺を気温と葉温との独立した形に展開すると、下記のようなになる。

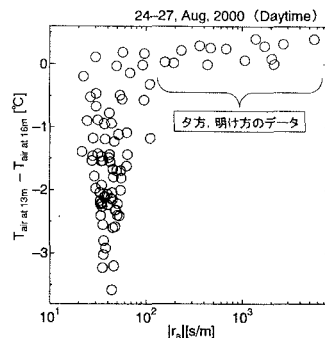


図-5 r_a と高度 16m と 13m の気温差の関係

$$T_{leaf} + \frac{VPD(T_{leaf})}{\gamma} = \frac{r_a R_n \gamma}{\rho c_p} \frac{-VPD(T_{air})}{\gamma} - T_{air} \dots (9)$$

この (9) 式を用いて、大気飽差と葉気温差の関係を計算した。条件として $R_n=600$ [W/m²], $VPD(T_{leaf})=15$ [hPa] で一定に与え、 r_a が 70, 85, 100[s/m] の場合について計算した。その計算結果と実測値を比較したものが図-3 である。実線、点線、破線が計算値である。この場合、大気飽差が約 10[hPa] 以上の範囲における、葉温の急激な低下を表現することができた。しかし、大気飽差の低い値における葉気温差を表現することはできない。

次に条件として $R_n=600$ [W/m²], $VPD(T_{air})=18$ [hPa] で一定に与え、 r_a が 50, 80[s/m] の場合について計算した。その計算結果と観測値を比較したものが図-4 である。実線、点線が計算値である。計算結果によれば、葉温飽差と葉気温差の関係は直線的であるのに対し、観測値は不連続な挙動を示し、両者は全く異なる挙動を示す。この要因として、パラメータの多くを固定していることが挙げられるが、それだけでは葉温飽差が 18[hPa] 付近における急激な変化を表現できるとは考えられない。

5. まとめ

本稿に示した観測結果は、1998 年の観測においても捉えられた現象であった。2000 年における観測結果においても同様の現象を捉えることができ、その現象の解明のために既往の理論を用いて検討を行なった。

最も単純な形に展開し、パラメータの多くを固定した条件で解析をした。その結果、現象の全てを表現することはできないが、一部の挙動については表現ができることがわかった。しかし、葉温が急激に変化する部分や葉温飽差と葉気温差との関係については、全く表現することができなかった。これはパラメータの決定そのものではなく、式形から検討を加える必要があることが考えられる。

謝辞: 本研究の遂行にあたり、東京都東部公園緑地事務所、小石川後樂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) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1996.

2) Jones, G. H.: Plants and microclimate, Cambridge university press, 1994.