

樹林における熱収支及び微気象の多層モデルの効果的な解析法に関する研究

中央大学大学院	学生員	加藤 拓磨
独立行政法人土木研究所	正会員	手計 太一
中央大学理工学部	正会員	山田 正
	正会員	日野 幹雄

1. はじめに

著者らは1998年から2002年までに都市内緑地における微気象観測を行なった。そこで捉えられた現象を説明するために、既往の代表的なモデルである単層モデルと2層モデルを用いて検討を行なった。しかし、これらのモデルでは観測された現象を全く説明することができなかつた。そこで、本研究では既往の多層モデルに改良を加え、森林内部や葉温を詳細に説明できるモデルの構築を進めている。本論文では9つの変数(  $S \downarrow, S \uparrow, L \downarrow, L \uparrow, T_{ground}, T_{leaf}, T_{air}, q_{air}, U$  ) を Taylor 展開し、その変化を Newton-Raphson 法による逐次近似を行う。

2. モデル概要

本研究では、熱収支式と Bulk 式から成立する以下に示す大気 - 植生 - 土壌間の放射や顕熱・潜熱 flux に関するモデルを用いる。土壌を1層、大気・植生をそれぞれ複数の層に区切り、地表面に一番近い層を第1層目とし層を数えていく。

2-1 基礎方程式

短波・長波放射を鉛直下向き成分  $S \downarrow, L \downarrow$  と鉛直上向き成分  $S \uparrow, L \uparrow$  の2方向の成分だけで表現する。

$$\frac{dS \downarrow}{dz} = FaS \downarrow - Far_f S \uparrow \quad (1) \quad \frac{dS \uparrow}{dz} = -FaS \uparrow + Far_f S \downarrow \quad (2)$$

$$\frac{dL \downarrow}{dz} = FaL \downarrow - Fa\sigma T_{leaf}^4 \quad (3) \quad \frac{dL \uparrow}{dz} = -FaL \uparrow + Fa\sigma T_{leaf}^4 \quad (4)$$

地面・葉面の熱収支、顕熱・潜熱 flux は次式で表す。

$$R_{ground} = (1 - r_g)S \downarrow + L \downarrow \quad (5)$$

$$R_{ground} = \sigma T_{ground}^4 + H_g + iE_g + G \quad (6)$$

$$R_{leaf}(L) = (1 - r_f)F((S \downarrow(L+1) - S \downarrow(L)) + (S \uparrow(L-1) - S \uparrow(L))) + F(L \downarrow(L+1) + L \uparrow(L-1)) \quad (7)$$

$$R_{leaf} = 2F\sigma T_{leaf}^4 + H + iE \quad (8)$$

$$H_g = c_p \rho c_h U (T_{ground} - T_{air}) \quad (9)$$

$$iE_g = i\rho c_e U (q_{ground} - q_{air}) \quad (10)$$

$$H_v = c_p \rho c_h U a (T_{leaf} - T_{air}) \quad (11)$$

$$iE_v = i\rho c_e U a (q_{SAT}(T_{leaf}) - q_{air}) \quad (12)$$

境界条件は地面で  $S \uparrow = r_g S \downarrow, L \uparrow = \sigma T_{ground}^4$  とする。ここで  $F$  は放射に対する葉面の傾きを表すファクターで、放射の向きに対して葉がすべて垂直ならば  $F=1$ 、すべて平行ならば  $F=0$ 、等方的ならば  $F=0.5$ 、 $a$  は葉面積指数、 $r_f, r_g$  は葉面、地面のアルベドである。 $a=0$  とおくことでその層は大気のみと表現できる。ここで

$H_g, H_v$  は地面・葉面の顕熱 flux,  $iE_g, iE_v$  は地面・葉面の潜熱 flux,  $G$  は地中熱流量である。全体の顕熱・潜熱 flux は次式によって計算する。  
 $H = H_g + H_v \quad (13) \quad iE = iE_g + iE_v \quad (14)$   
 気温・湿度・風速の分布は次式より表現する。

$$K_h \frac{\partial^2 T_{air}}{\partial z^2} - c_h U a (T_{air} - T_{leaf}) = 0 \quad (15)$$

$$K_q \frac{\partial^2 q_{air}}{\partial z^2} - c_e U a [q_{air} - q_{SAT}(T_{air})] = 0 \quad (16)$$

$$K_m \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - c_d a U^2 = 0 \quad (17)$$

$K_h, K_q, K_m$  は乱流拡散係数、 $c_h, c_e, c_d$  は顕熱と水蒸気に対する葉面交換係数および葉面抵抗係数である。

2-2 基礎方程式の Taylor 展開

9つの変数(  $S \downarrow, S \uparrow, L \downarrow, L \uparrow, T_{ground}, T_{leaf}, T_{air}, q_{air}, U$  ) と  $T_{ground}^4, T_{leaf}^4$  を

$$T_{ground} \equiv T_{ground} + \Delta T_{ground} \quad (18) \quad T_{leaf}(L) \equiv T_{leaf}(L) + \Delta T_{leaf}(L) \quad (19)$$

$$T_{air}(L) \equiv T_{air}(L) + \Delta T_{air}(L) \quad (20) \quad q_{air}(L) \equiv q_{air}(L) + \Delta q_{air}(L) \quad (21)$$

$$U(L) \equiv U(L) + \Delta U(L) \quad (22)$$

$$T_{ground}^4(L) \equiv T_{ground}^4(L) + 4T_{ground}^3(L)\Delta T_{ground}(L) \quad (23)$$

$$T_{leaf}^4(L) \equiv T_{leaf}^4(L) + 4T_{leaf}^3(L)\Delta T_{leaf}(L) \quad (24)$$

とおき、(1) ~ (4), (6), (8), (15) ~ (17) 式を Taylor 展開すれば、「短波放射」は

$$-S \downarrow(L) + (1 - Fad_z)S \downarrow(L+1) + r_f Fad_z S \uparrow(L-1) = 0 \quad (25)$$

$$-r_f Fad_z S \downarrow(L+1) + (1 - Fad_z)S \uparrow(L-1) + S \uparrow(L) = 0 \quad (26)$$

「長波放射」は

$$-L \downarrow(L) + (1 - Fad_z)L \downarrow(L+1) + 4Fad_z \sigma T_{leaf}^3(L)\Delta T_{leaf} = -Fad_z \sigma T_{leaf}^4(L)$$

$$-(1 - Fad_z)L \uparrow(L-1) + L \uparrow(L) - 4Fad_z \sigma T_{leaf}^3(L)\Delta T_{leaf} = Fad_z \sigma T_{leaf}^4(L) \quad (27), (28)$$

「地面・葉面の熱収支」は

$$4(\sigma T_{ground}^3 + c_p \rho c_e U)\Delta T_{ground} \quad (29)$$

$$-c_p \rho c_e U \Delta T_{air}(1) - i\rho c_e U \Delta q_{air}(1)$$

$$= R_{ground} - \sigma T_{ground}^4 - H_g - iE_g - G$$

$$(4 \times 2F\sigma T_{leaf}^3(L) + c_p \rho c_e U a)\Delta T_{leaf}(L) \quad (30)$$

$$-c_p \rho c_e U \Delta T_{air}(L) - i\rho c_e U \Delta q_{air}(L)$$

$$= R_{leaf}(L) - 2F\sigma T_{leaf}^4(L) - H(L) - iE(L)$$

キーワード：蒸発散，葉温，熱収支式

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部 TEL 03-3817-1805, FAX 03-3817-1803

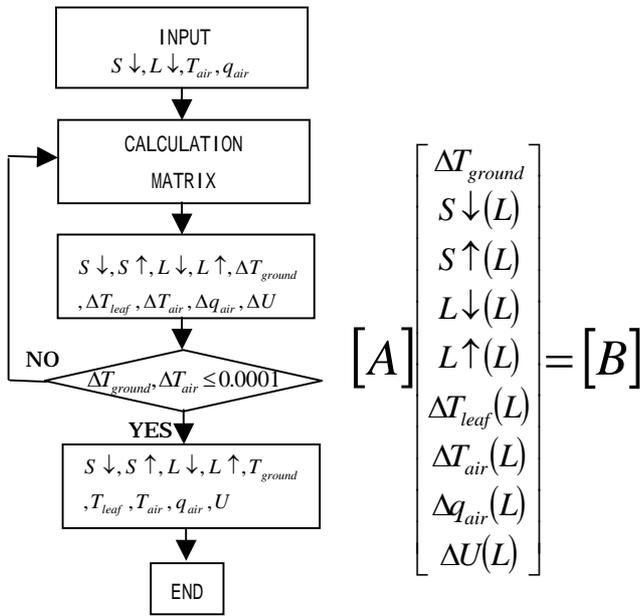


図-1 計算フローチャートとマトリックス

「気温分布」は

$$\begin{aligned}
 & c_p \rho_c U a (dz^2) \Delta T_{leaf}(L) + \frac{K_h(L-1) + K_h(L)}{2} \Delta T_{air}(L-1) \\
 & + \left\{ -\frac{K_h(L-1) + 2K_h(L) + K_h(L+1)}{2} - c_p \rho_c U a (dz^2) \right\} \Delta T_{air}(L) \\
 & + \frac{K_h(L) + K_h(L+1)}{2} \Delta T_{air}(L+1) \\
 & = -c_p \rho_c U a (dz^2) (T_{leaf}(L) - T_{air}(L)) \\
 & - \frac{K_h(L-1) + K_h(L)}{2} T_{air}(L-1) + \frac{K_h(L-1) + 2K_h(L) + K_h(L+1)}{2} T_{air}(L) \\
 & (L) - \frac{K_h(L) + K_h(L+1)}{2} T_{air}(L+1)
 \end{aligned} \tag{31}$$

と展開できる．比湿・風速も気温と同様に展開する．

### 2-3 マトリックス化

モデルの最上層に日射量・長波放射量・気温・比湿を境界条件として入力する．(25)～(31)式の左辺(未知数)をマトリックス[A]，右辺(既知数)をマトリックス[B]に代入し， $S \downarrow, S \uparrow, L \downarrow, L \uparrow, \Delta T_{ground}, \Delta T_{leaf}, \Delta T_{air}, \Delta q_{air}, \Delta U$ を求める．そして，(18)～(24)として新たにマトリックス[A]，[B]を算出し， $\Delta T_{ground}, \Delta T_{leaf}$ が0に収束するまで計算を繰り返す(一般化したNewton-Raphson法)(図-1)．

### 3. 計算結果

本研究ではモデルの1層を1m，大気層・植生層をそれぞれ10層に区切り，土壌1層と合わせて21層とし，森林の観測によって得られる一般的な値をモデルに用いて計算した．2000年8月27日小石川後楽園(東京都)で観測した実測値(日射量，気温，比湿)の瞬間値を入力し計算した．図-2，図-3より大気層の気温(15m; cal)は入力した実測値とほぼ同じであるが植生層では変化が見られた．葉温は常に気温より低く，その差は最大で4程度である．計算時間は従来の計算手法より大幅に短縮することができた．

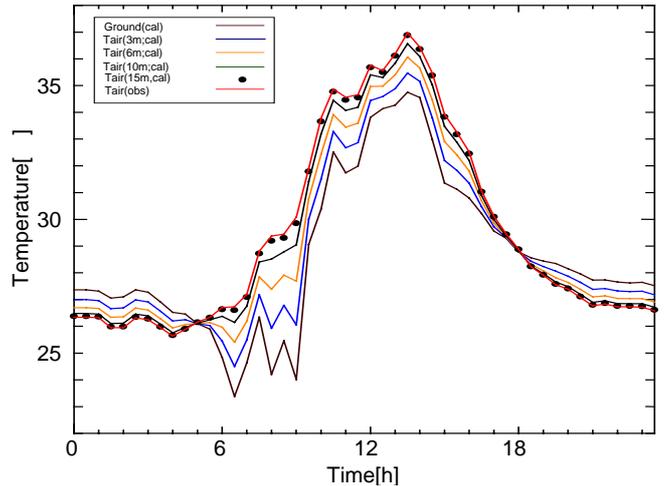


図-2 気温・地温の計算値と気温の実測値の時系列

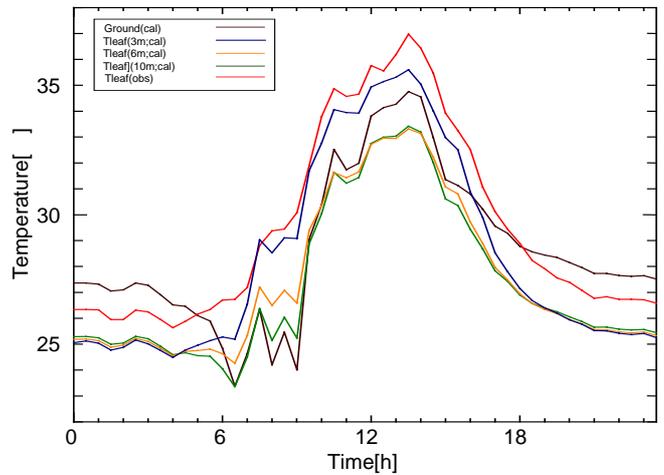


図-3 葉温・地温の計算値と気温の実測値の時系列

### 4. まとめ

夏季における葉温の挙動と周辺微気象因子との関係について既往の理論を用いて検討を行った．従来，提唱されている解析法では本研究が目的とする計算を行うには多大な計算時間を擁するものであったが，本研究の手法によりモデルの精度を落とすことなく計算時間を高速に行うことが可能となった．

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) Jones, G. H.: Plants and microclimate, Cambridge university press, 1994.
- 2) Watanabe, T., 1993: The bulk transfer coefficients over a vegetated surface based on K-theory and a 2nd-order closure model. J. Meteor. Soc. Jpn., Atmos. Sci., 49, 2183-2199.
- 3) 近藤純正：水環境の気象学，朝倉書店，1996.
- 4) 日野幹雄：境界値問題の解法，朝倉書店，1981.
- 5) 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回関東支部技術発表会講演概要集，II-36，pp.230-231，1999.
- 6) 手計太一，志村光一，山田正，日野幹雄：都市内緑地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，水工学論文集，第45巻，pp.265-270，2001