

森林キャノピーモデルによる熱収支評価に関する感度解析

Sensitivity analyses of the forest canopy model for estimating the heat balance

藤野 毅^{*}・浅枝 隆^{**}・ヴタンカ^{**}・児玉法彰^{***}

Takeshi FUJINO, Takashi ASAEDA, VU Thanh Ca and Houshou KODAMA

Abstract: Modeling of heating and evapotranspiration processes in the plant canopy requires knowledge about plant physiology. The model for heating and vapor transfer in the plant canopy in this paper consists of a sub-model for radiation transfer in the plant canopy, a sub-model for the heating of the canopy, a sub-model for the transport of water in the root-stem-leaf system, and a sub-model for the evapotranspiration in the plant. The model successfully reproduced observation results. However, the computed results also depends on the shape of forest.

Key Words: Forest Canopy, heat balance, evapotranspiration, Numerical model

1. はじめに

植生による気候緩和効果を厳密に評価するためには、まず、土壌—植生—大気間の熱・水分移動について解かなければならない。ここで、植生内における葉面の構造や植生群落の規模などは外部条件である日射や風の、それぞれ植生内部における分布形に大きく影響することが知られている。しかし、これらを観測によってすべて定量的に評価することは困難であるため、植生による気候緩和のメカニズムを理解し、評価するためには数値計算の利用が必要となる。さらに、その結果はいくつかの仮定の元に成り立っているものであり、そうした仮定や結果の検証が不可欠となる。本研究では、こうしたことを背景に、まず、1本の樹木を対象に熱・水分移動に関する種々の観測を行い、次に、この観測値を元に関連した植生モデルの妥当性について検討し、その結果について考察したものである。

2. 観測概要

観測はつくば市内の雑木林において、高さ10m程度の1本の常緑樹を対象に、1996年9月から10月にかけて数日間行なった。気象観測として、周囲の気温・湿度(1.5m)、風速(11m)、日射(地上)を測定した。植生に対しては、葉面温度を放射温度計と赤外放射計によって高さ・方向別に測定した。さらに土中においては、テンシオメーターと熱電対センサーを埋設し、それぞれ5点以上の深さにおいて土壌水分圧と土壌温度を測定した。また、表層土壌を採取して含水率も測定した。

* 埼玉大学理工学研究科

Graduate School of Sci. & Eng. Saitama Univ.

** 埼玉大学工学部

Faculty of Eng. Saitama Univ.

***建設省土木研究所

Public Works Research Institute, Ministry of Construction.

3. 植生モデルの概要

3.1 基礎方程式

植生モデルは非定常の鉛直1次元の場を対象に開発されたもので、大気-植生-土壌系の一体モデルである。主な方程式を以下に記す。

群落内の葉面の熱収支式：

$$\rho_{cp} c_{cp} \frac{dT_{cp}}{dt} = R_n - a(z) H_c(z) - a(z) L e_c(z), \quad (1)$$

顕熱輸送および潜熱輸送：

$$H_c(z) = c_p \rho_a c_h u (T_{cp} - T_a), \quad (2)$$

$$L e_c(z) = L \rho_a c_e u (q_{-cp} - q_a), \quad (3)$$

熱および水蒸気の交換係数：

$$c_h = 0.0145 (\text{一定}), \quad (4)$$

$$c_e = \beta u^{1/2} O_p^{1/2}, \quad (5)$$

$$O_p = O_{pmax} f(R_s) f(T_{cp}) f(\theta V), \quad (6)$$

茎および根内の水分移動方程式：

$$C_p \frac{\partial \psi_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_p \frac{\partial (\psi_p + z)}{\partial z} \right) - S_p(z), \quad (7)$$

根の水分ソース項および蒸散のシンク項：

$$S_p(z) = \frac{\theta}{\theta_s} \zeta_r l_r (\psi_s - \psi_r) \quad z < 0, \quad (8)$$

$$S_p(z) = c_e (q_{-cp} - q_a) \quad z > 0, \quad (9)$$

植生キャノピー層内外における風速の鉛直分布：

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m(z) \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \begin{cases} -c_d a(z) u^2 & 0 \leq z \leq h_c \\ 0 & z > h_c \end{cases} \quad (10)$$

同気温分布：

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h(z) \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) = \begin{cases} a(z) H_c(z) / c_p \rho_a & 0 \leq z \leq h_c \\ 0 & z > h_c \end{cases} \quad (11)$$

同水蒸気分布：

$$\frac{\partial q_a}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h(z) \frac{\partial q_a}{\partial z} \right) = \begin{cases} a(z) e_c(z) / \rho_a & 0 \leq z \leq h_c \\ 0 & z > h_c \end{cases} \quad (12)$$

運動量・熱および水蒸気の乱流拡散係数：

$$K_m = \Lambda^2(z) \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|, \quad (13)$$

$$K_h = \frac{K_m}{Pr}, \quad (14)$$

ρ_{cp} 、 c_{cp} および T_{cp} : 葉の密度 (g/cm^3)、比熱 ($J/g/K$)、および温度 (K) ; t : 時間 ; R_n : 放射収支 (W/m^2) ; $a(z)$: 葉面積密度 ($1/m$) ; $H_c(z)$: 顕熱輸送 (W/m^2) ; $L e_c(z)$: 潜熱輸送 (W/m^2) ; ρ_a 、 c_p および T_a : それぞれ空気密度 (g/cm^3)、比熱 ($J/g/K$)、および気温 (K) ; u : 風速 (m/s) ; c_h および c_e : 葉面と大気間における熱および水蒸気交換係数 ; L : 蒸発の潜熱 (J/kg) ; q_{-cp} : 葉面温度 T_{cp} における飽和比湿 (g/kg) ; β : 植物の種類によって定まる定数 ; O_p : 気孔開度 ; O_{pmax} : 気孔の最大開度 ; R_s : 日射 (W/m^2) ; θV : 葉内水分 (g/g) ; $f(R_s)$ 、 $f(T_{cp})$ および $f(\theta V)$: 気孔開度への影響関数 ($0 \sim 1$) ; C_p : 植生の比水分容量 ($cm^3/cm^3/cm$) ; ψ_p : 根-茎系におけるオスモティック圧力 (cm) ; z : 鉛直座標 (m) ; K_p : 根-茎系における透水係数 (cm/s) ; $S_p(z)$: 根の吸水による水分ソース項 (逆に葉面からの蒸散によるシンク項 (m)) ; θ : 土の含水比 (g/g) ; θ_s : 土の再湿潤における最大含水比 (g/g) ; ψ_s および ψ_r : 土と根の導組織での水分ポテンシャル (m) ; ζ_r : 根の単位長さ当りの導組織の透水係数 (cm/s) ; l_r : 土の単位体積当りの全根の長さ (m/m^3) ; K_m および K_h : 運動粘性係数および熱・水蒸気の乱流拡散係数 (cm^2/s) ; c_d : 抵抗係数 ; h_c : キャノピーの高さ (m) ; $\Lambda(z)$: 混合距離 (m) ; Pr : 乱流プラントル数

3.2 計算条件

計算の初期値や境界値は主に観測値を与える。ここで、地上気温、相対湿度、風速、雲量は、計算領域上端での境界条件として与えられる。これらは、毎正時の値が入力され、便宜上10分間隔でデータを内挿している。次に、土壌の温度と土壌水分圧は初期値として与えられる。また、葉面温度については、観測結果より明け方は高さの違いによる大きな温度差が生じていなかったことから、計算開始時刻である朝6時において一様な分布を与えた。計算領域は、観測より樹木の高さが10mであるので、地上では高さ15mまでとし、地中では深さ5mまでとした。

4. 計算結果

4.1 観測値の再現計算結果

(a)葉面温度の日変化

図一1(a)-(c)にそれぞれの観測日における、樹木の上層、中層、下層の葉面温度の日変化を示す。これより、午前中葉面温度の方が先に上昇し、正午頃ピークを迎え、15時頃からは気温と同じような変化をする。ここで、午前中の葉温の変化については、気温の変化と比べて傾向は同じ様であるが、量的にはかなり変動している。これには、日射と風速が支配的な要因であると考えられる。すなわち、午前中の葉温の変化は雲で直達日射が弱いとき(10月30日)、あるいは、風速が比較的強いとき(9月12日)に葉温が低下する傾向が見られる。気温も長波放射の収支の観点から葉温を決定する主要因であるが、これよりも日射と風速に対する応答のほうが敏感であった。次に、上層・中層・下層それぞれの気温に大きな差はなかったものの、葉温では明らかに高さによる分布が存在する。すなわち、どの日においても日中では上層に行くほど高くなるが、夕方以降ではそれが逆になる。これは、日中では、上層ほど多くの日射量を受けるため高温となるが、夕方以降は放射冷却が卓越するため最も低くなる。これは数値計算の結果においても観測値と同様な結果が得られており、定性的には放射の効果をよく再現したといえる。しかし、特に夜間では計算値の方が過大評価されている。これは、観測では単体樹木を対象にしたため、一様に周囲の影響を受けていることによるものと考えられる。

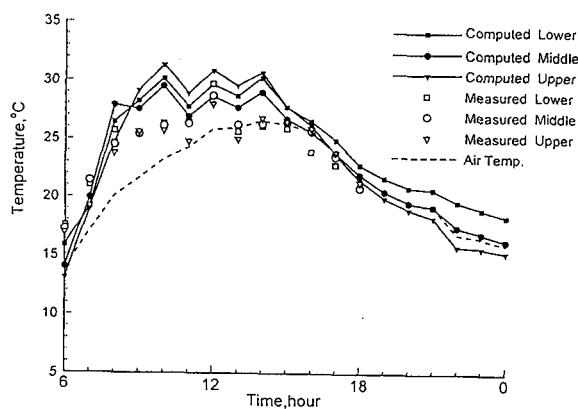
(b)樹木の熱収支

図一2(a)-(c)に樹木の熱収支の計算値を示す。これらの結果から、潜熱輸送量はおよそ日射の4割から5割を占めており、日射によって大きく左右されている。一方、顕熱輸送量は、葉面と気温の差が5度以内であっても日射の多くなる10時ごろに 200 W/m^2 程度も生じている。両者の時間変化を見ると、午前中は顕熱輸送が卓越し、午後になると潜熱輸送が卓越する。ここで、潜熱輸送の算定においては、気孔開度の値にも起因し、さらにそれは日射、葉温、比湿の関数である。この時間遅れについていえば、日射量よりも葉温や比湿の大気との差が影響していると考えられる。これを実証する観測は行っていないが、葉面温度と気温の日中の変化は定性的によく合っていることから、午前中は顕熱輸送の効果によってのみ葉面温度の上昇を防ぐ機能があるものの、気温と同程度にはならないため、蒸散によって、さらに葉面温度を調節する機構であるものと考えられる。これは計算結果として、日射量の最大値に関係なく顕熱輸送量があるピーク(本計算結果では 200 W/m^2 程度)を境に熱交換過程が変化していることがわかることから裏付けられる。最後に、日射がなくなる夜間では、顕熱輸送も潜熱輸送も生じなくなった。

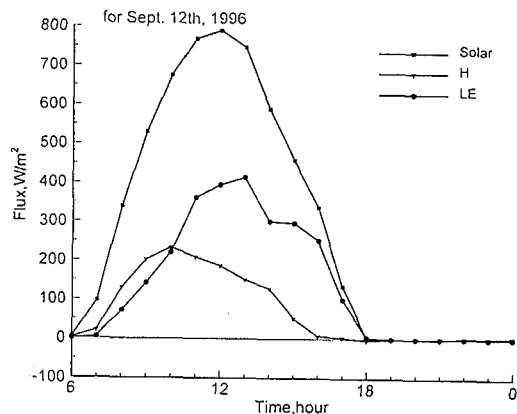
5 モデルパラメーターの感度解析

5.1 計算条件

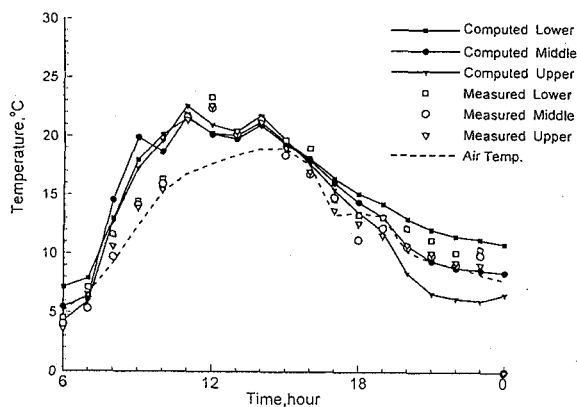
前節で植生モデルは観測値と比較しても妥当な結果を得ることが示された。しかし、観測では樹木の詳細な構造や、微細な気象分布が得られていないため、モデル計算で便宜上用いられたパラメーター依存性についても検討する必要がある。ここでは、その代表的なパラメーターの簡単な感度分析を行い、熱収支等の分布にどう影響するのかを調べた。対象パ



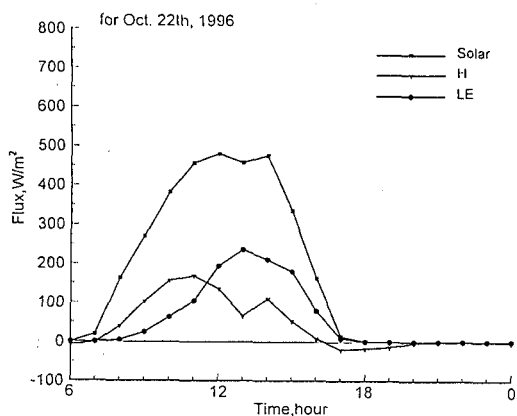
(a) 9月12日



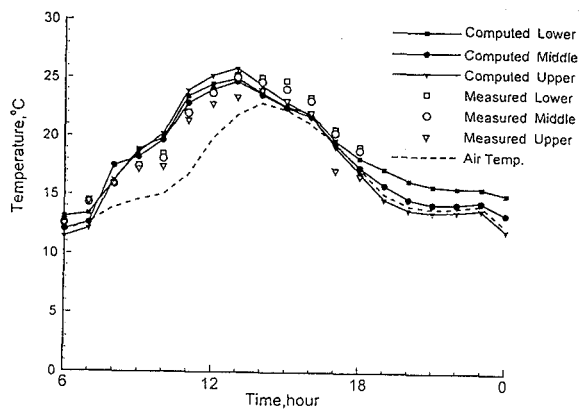
(a) 9月12日



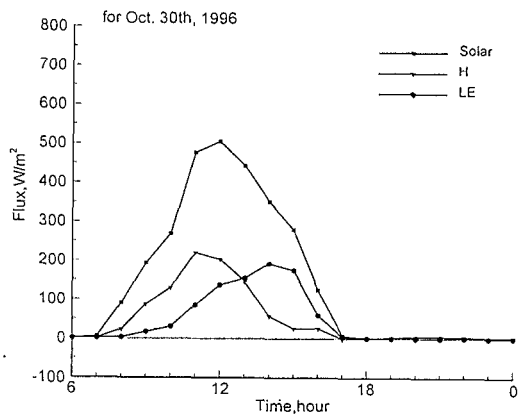
(b) 10月23日



(b) 10月23日



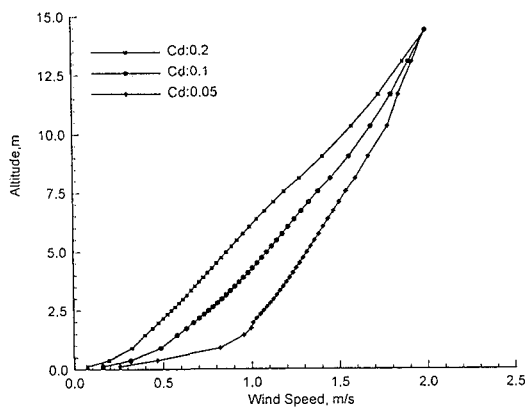
(c) 10月30日



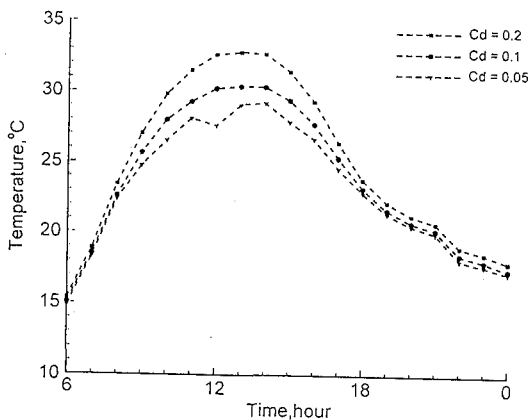
(c) 10月30日

図-1 葉面温度の日変化 (計算値・観測値)

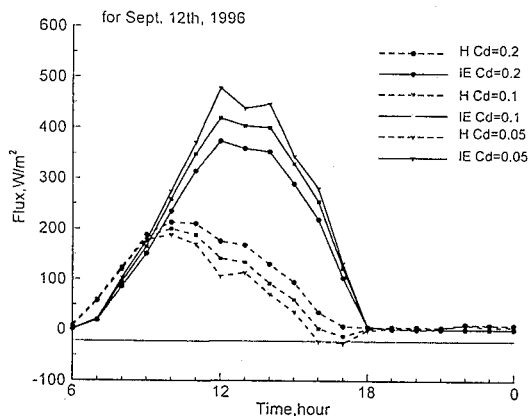
図-2 樹木の熱収支 (計算値)



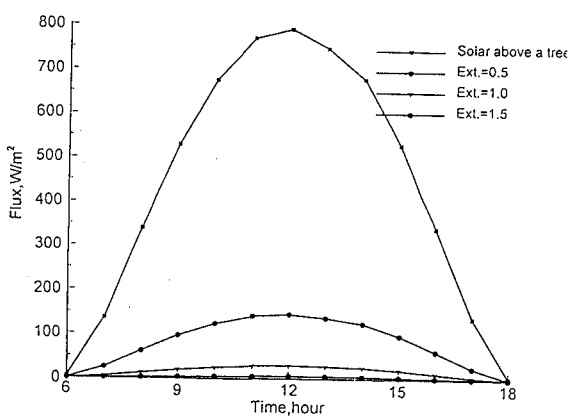
図一 3 鉛直風速分布 (正午)



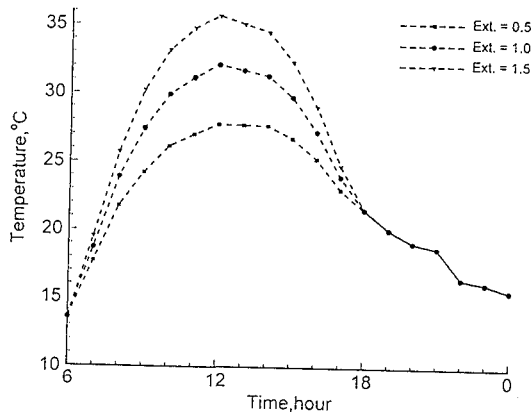
図一 4 樹冠下層部の葉面温度の日変化



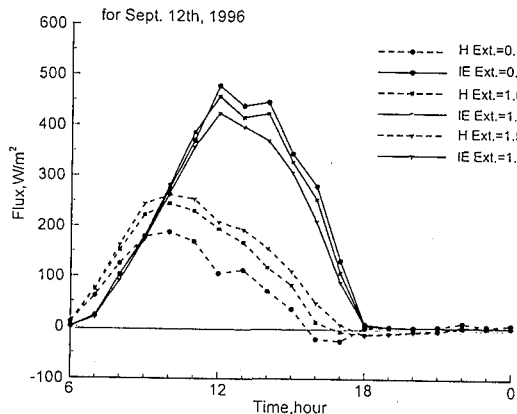
図一 5 樹木の熱収支 (抵抗係数による違い)



図一 6 地面に到達する日射量の日変化



図一 7 樹冠上層部の葉面温度の日変化



図一 8 樹木の熱収支 (減衰係数による違い)

ラメターは樹木の風の抵抗係数 C_d および日射の減衰係数 η とした。ここで、日射の分布は以下の方程式より見積もった。

$$R_s(z) = R_{s0}[\exp(-\eta LAI(z))] \quad (15)$$

計算条件は9月12日を対象とした。気温・湿度は観測値を用いるが、上空風速は2 m/sの定常状態を仮定した。

5.2 計算結果

(a) 風の抵抗係数による影響

ここでは抵抗係数を0.2、0.1、0.05の3通りについて行った。図-3に正午の風速の鉛直プロファイルの比較を示す。これより、抵抗係数の増加によって地上2 mから3 mのあたりで風速の減衰効果が最も大きく現れ、 $C_d=0.2$ では0.5の場合と比べて3分の2以上風速が落ちる。図-4に、それぞれの抵抗係数の場合における下層の葉面温度の日変化を示す。これより、風速が低下する分だけ、大気との熱交換量が減少するため $C_d=0.2$ の場合が最も葉温が高くなる（上層も同様であるがその変化は下層より小さかった）。この場合の樹木の熱収支を図-5に示す。これより、潜熱輸送量は C_d が小さくなるほど増加し、葉温の低下に伴い顕熱輸送量は減少する。

(b) 日射の減衰係数による影響

ここでは日射の減衰係数を1.5、1.0、0.5の3通りについて行った。図-6にそれぞれのケースにおける樹冠下の日射の日変化の比較を示す。減衰係数は指数関数で効いてくるため同じ0.5の違いでも日射の到達量は大きく異なる。これらの場合における上層の葉面温度の日変化を示すと図-7のようになる。これより、減衰係数が大きくなるほど、上層で吸収される日射量が多くなるため葉面温度が上昇する。指数関数を用いた仮定より、逆に下層では減衰係数が大きくなるほどわずかであるが葉温が上昇する。このときの熱収支を図-8に示す。減衰係数が増加すると顕熱輸送量も増加し、潜熱輸送量は逆に減少する傾向が得られた。以上より、葉面積を持つ樹木であっても、風通しや日射の減衰係数によって熱収支は大きく変化し、その傾向が示された。

6. まとめ

根-茎-葉系の水分移動を考慮した植生キャノピー内外の鉛直1次元微気象モデルを開発し、観測値と計算値との比較を行った結果、モデルと実測の次元が異なることなどいくつか条件で異なるものの、気象条件の細かい変化に反応して葉面の熱収支が変化し、葉面温度の変化については実測をよく再現した。さらに、いくつかについて感度解析を行い、その与え方によって結果は大きく異なることを確認した。これらは樹幹形状に大きく依存することを示し、樹木の熱収支を観測において厳密に見積もるためには、樹木の微細な構造も把握する必要がある。

参考文献

- Asaeda T., and Vu T. C. (1993) The subsurface transport of heat and moisture and its effects on the environment: a numerical model., *Boundary-Layer Meteorol.* 65, 159-179.
- Norman, J.M. (1979) Modeling the complete crop canopy. in B.J. Barfield and J.F. Gerber (Editors), *Modification of the Aerial Environment of Crops*. American Society of Agricultural Engineers, MI, 249-277.
- Jones H.G. (1992) *Plants and Microclimate*, Cambridge University Press, 1-323.
- Herkelrath W.N., E.E. Miller and W.R. Gardner (1977) Water uptake by plant (the root contact model), *Soil. Sci. Am. J.*, 41, 1039-1043.