

気温、湿度が樹木の熱・水分・二酸化炭素収支に与える影響について

The Effect of Air Temperature and Humidity on the Budgets of Heat, Water Vapor, and Carbon Dioxide within a Tree

平岡久司, 京大 (環境地球工), 京都市左京区吉田本町, e-mail: hra@next.gee.kyoto-u.ac.jp
Hisashi Hiraoka, Division of Global Environment Engineering, Kyoto University

In the previous paper (CFD13), we computed the budgets of heat, water vapor, and carbon dioxide within a tree, by using a simulation model. We used a turbulence model for dry air within vegetation. In this work, we used that for moist air. The results by the model for moist air were almost equal to those for dry air. We investigated the effects of air temperature and humidity on the budgets of heat, water vapor, and carbon dioxide. The results showed that air temperature and humidity largely affected the budgets. The cause was not only vapor pressure deficit, but also a change of stomatal conductance according to the changes in temperature and humidity. It became clear that stomatal conductance played an important role in the budgets.

1. はじめに

植栽内の熱・水分・二酸化炭素収支モデルを作成し、そのモデルを樹木に適用し、樹木の熱・水分・二酸化炭素収支の計算を行ったので報告する。使用するモデルは3つのサブモデルからなる。即ち、植栽内の乱流モデル、植栽内の放射輸送モデル、そして気孔コンダクタンスモデルである。このモデルの特徴の1つは、乱流モデルと Ross の放射輸送モデルを使用しているため、1次元から3次元までの植栽の熱・水分収支を予測できることである。もう一つの特徴は、気孔コンダクタンスに影響を及ぼす環境因子間の相互作用を組み込んだ気孔コンダクタンスモデルを使用したことである。前報^{2,3)}では乱流モデルに乾燥空気の植栽内乱流モデルを用いたが、今回は湿潤空気の乱流モデルを用いた。また、気温、湿度、そして風速を変化させ、樹木の熱・水分・二酸化炭素収支がどのように変化するかを調べた。次の節で、この研究で使用したモデルの説明を行う。

2. 使用したモデル

この節では、本研究で用いた3つのサブモデルについて説明する。植栽内の熱・水分・二酸化炭素収支のモデル化の際に次の2つの仮定を用いた。第1の仮定は、植物は土壌から十分な水分を供給されているため、葉の水ポテンシャルは気孔の開閉に影響しない。第2の仮定は、単一葉の放射特性は Lambertian タイプと仮定する、即ち、単一葉の放射特性は葉の透過率、反射率、そして射出率によって決定される。第1の仮定は、この研究で採用した気孔コンダクタンスモデルの使用に必要である。第2の仮定は、Ross の放射輸送モデルを拡散近似によって計算する際に必要である。第2の仮定の妥当性は文献^{1,4), 15)}参照。

Table 1 にこの研究で用いた植栽内の湿潤空気の乱流モデルを示す。この乱流モデルは、前報^{1), 2), 3)}で示した乱流モデルのモデル化の方法に従って、気温、比湿、二酸化炭素濃度の式を含むように修正した。(1)式(連続の式)の導出に関しては[Appendix-1]参照。(3)式(湿潤空気の平均温度方程式)の導出に関しては[Appendix-2]参照。(1)式内の S_{vap} 項は蒸散による水蒸気のソース項を示す。 S_{CO_2} と S_{O_2} 項は光合成によるシンク項とソース項を示す。 S_{vap} のオーダーは $10^{-4}[s^{-1}]$ であり、 S_{CO_2} と S_{O_2} のオーダーは $10^{-6}[s^{-1}]$ であるから、 S_{CO_2} と S_{O_2} 項は省略できる。(3)式内の H_{vap} 項は蒸散による水蒸気の葉面からの流出による顕熱を示す。蒸散による潜熱は湿潤空気の温度方程式には表れない。このことは、蒸散による潜熱は葉を冷却するが、周囲空気の温

[Table 1] Turbulence model for moist air used in this study

$$\frac{U_j}{x_j} = S_{vap} + S_{O_2} - S_{CO_2} \quad (1)$$

$$\frac{DU_i}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{P}{x_i} - \beta g_i \left(- \frac{u_i u_j}{x_j} - F_i \right) \quad (2)$$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{v_i}{x_j} \frac{1}{P_n} \frac{1}{x_j} + \frac{a[H + H_{vap} + H_{O_2} - H_{CO_2}]}{\rho c_p} \quad (3)$$

$$\frac{Dq}{Dt} = \frac{v_i}{x_j} \frac{q}{\sigma_v} \frac{1}{x_j} + S_{vap} \quad (4), \quad \frac{DC}{Dt} = \frac{v_i}{x_j} \frac{C}{\sigma_c} \frac{1}{x_j} - aA_n \quad (5)$$

$$\frac{Dk}{Dt} = P_k + G_k + U_j F_j - \varepsilon + \frac{v_i}{x_j} \frac{k}{\sigma_k} \frac{1}{x_j} \quad (6)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\varepsilon}{k} [c_{\varepsilon 1} P_k + c_{\varepsilon 3} G_k + c_{\varepsilon P} a k^{1.5} - c_{\varepsilon 2} \varepsilon] + \frac{v_i}{x_j} \frac{\varepsilon}{\sigma_\varepsilon} \frac{1}{x_j} \quad (7)$$

$$u_i u_j = \nu_t \left(\frac{U_i}{x_j} + \frac{U_j}{x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (8), \quad F_i = c_f a U_i \sqrt{U_j U_j} \quad (9)$$

$$P_k = \frac{u_i u_j}{x_j} \frac{U_i}{x_j} \quad (10), \quad G_k = \beta g_j \frac{v_i}{P_n} \frac{1}{x_j} \quad (11), \quad \nu_t = C_D \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

$$F_i = c_f a U_i \sqrt{U_j U_j} \quad (13), \quad \rho = \rho_a / (1 - q) \quad \rho_a (1 + q) \quad (14)$$

$$c_p = c_{pa} + (c_{pv} - c_{pa})q \quad (15), \quad S_{vap} = 0.018 a E / \rho \quad (15)$$

$$S_{O_2} = 0.032 a A_n / \rho \quad (16), \quad S_{CO_2} = 0.044 a A_n / \rho \quad (16)$$

C_D	k	c_1	c_2	c_3	c_p
0.09	1.0	1.3	1.44	1.92	Viollet type 1.5(Ohashi,2000)

(Note) We assumed that $P_{\text{rel}} = \nu_t = c = 0.9$, and we set $c_f = 0.275$.

[symbols] U_j : mean velocity, P : mean relative pressure, ρ : mean air temperature, q : mean specific humidity [Kg/Kg], C : mean molar concentration of CO_2 [mol/m³], k : turbulent energy, ε : the rate of viscous energy dissipation, β : the coefficient of volume expansion, a : leaf area density [m²/m³], ρ : moist air density, ρ_a : dry air density, c_p : heat capacity of moist air, c_{pa} : specific heat at constant pressure of dry air, c_{pv} : specific heat at constant pressure of vapor, H : sensible heat exchange between air and leaves [W/sm²], H_{vap} : heat exchange of vapor between air and leaves, H_{O_2} : heat exchange of O_2 by photosynthesis, E : transpiration rate [mol/sm²], H_{CO_2} : heat exchange of CO_2 by photosynthesis, A_n : net photosynthetic rate [mol/sm²], g_i : gravitational acceleration (0,0,-g) [m/s²].

[Table 2] The balances of heat, water vapor, and CO₂ on leaves

(a) Heat exchange between leaves and the surrounding air

$$a(Q_{PAR} + Q_{NIR} + R_{net}) = a(H + l_v E + H_{vap} + H_{O_2} - H_{CO_2}) \quad (1)$$

$$H = 2h_c(T_l - T_a) \quad (2), \quad H_{vap} = C_p^{vap}(T_l - T_a)E \quad (3)$$

$$H_{O_2} = C_p^{O_2}(T_l - T_a)A_n \quad (4), \quad H_{CO_2} = C_p^{CO_2}(T_l - T_a)A_n \quad (5)$$

(b) Water vapor flux

$$E = g_s \frac{e_s(T_l) - e_a}{P_0} - c_s^{vap} = \alpha_v \frac{P_0}{R(+273.15)} (c_s^{vap} - c_a^{vap}) \quad (6)$$

(c) Net photosynthetic rate

$$A_n = \alpha_c \frac{P_0}{R(+273.15)} (c_a^{CO_2} - c_s^{CO_2}) = \frac{g_s}{1.6} (c_s^{CO_2} - c_i^{CO_2}) \quad (7)$$

$$c_a^{vap} = q/0.622 \quad (8), \quad c_a^{CO_2} = C \frac{R(+273.15)}{P_0} \quad (9)$$

We assumed that $\alpha_v = \alpha_c = h_c / (\rho c_p)$, and $h_c = 6.79 + 5.99u$.

[symbols] Q_{PAR} : PAR absorbed by leaves [W/m^2], PAR: Photosynthetically Active Radiation, Q_{NIR} : absorbed NIR (Near InfraRed radiation), R_{net} : net long wave radiation, l_v : heat of vaporization of water [J/mol], h_c : heat transfer coefficient [W/m^2C] (Daudet et al., 1998), T_a : ambient air temperature, T_l : leaf temperature, g_s : stomatal conductance [mol/sm^2], P_0 : atmospheric pressure [Pa], e_s : saturated vapor pressure, R : ideal gas constant, c_s^{vap} : mole fraction of vapor on leaf surface, c_a^{vap} : mole fraction of vapor in ambient air, q : specific humidity of ambient air [Kg/Kg], $c_a^{CO_2}$: mole fraction of CO₂ in ambient air, $c_s^{CO_2}$: mole fraction of CO₂ on leaf surface, $c_i^{CO_2}$: intercellular CO₂ mole fraction, C : ambient air CO₂ molar concentration [mol/m^3], u : velocity of ambient air (absolute value) [m/s], C_p^{vap} : molar heat capacity of vapor at constant pressure, $C_p^{O_2}$: molar heat capacity of O₂ at constant pressure, $C_p^{CO_2}$: molar heat capacity of CO₂ at constant pressure

度変化には影響を及ぼさないことを示す ([Appendix-2]参照)。 (3)式の H_{CO_2} と H_{O_2} 項は光合成による周囲空気との熱交換を示す。 H_{vap} のオーダーは 10^{-2} [W/m^2s] であり、 H_{CO_2} と H_{O_2} のオーダーは 10^{-4} [W/m^2s] であるから、 H_{CO_2} と H_{O_2} は省略できる。以後、計算に於ては、 S_{CO_2} 、 S_{O_2} 、 H_{CO_2} 、 H_{O_2} 項は省略する。

葉面での熱・水分・二酸化炭素の釣り合い式を Table 2 に示す。葉と空気との熱交換を計算するためには植栽内の放射量を知る必要がある。Table 2(1)式内の3種の放射量 (Q_{PAR} 、 Q_{NIR} と R_{net}) を計算するために、本研究では Ross の放射モデル^{4), 5)}を用いた。ここで、添え字 PAR は Photosynthetically Active Radiation を示す。添え字 NIR は Near InfraRed radiation を示す。Ross の植物群落内放射輸送モデルを Table 3 に示す。ただし、短波放射に関する葉群の散乱関数は単一葉の透過率と反射率を用いて表している。長波放射の散乱関数は単一葉の射出率で表している。

Table 4, 5 に Collatz らの気孔コンダクタンスモデル⁶⁾を示す。彼らのモデルでは、Ball の気孔コンダクタンス実験式⁷⁾ (Table 4 (1)式)、正味の二酸化炭素固定速度の式 (Table 4 (2)式)、また、係数 1.6 は水蒸気と二酸化炭素の拡散係数の比)、そして C₃ 植物の光合成モデル (Table 4(3)式) が組み合わされている。C₃ 植物の光合成モデルは Farquhar らのモデル⁸⁾ を簡易化している。Collatz らの光合成モデル⁶⁾ を Table 5 に示す。Collatz らの気孔コンダクタンスモデルでは、葉表面の相対湿度、葉表面の二酸化炭素濃度、そして葉温を既知と仮定して、気孔コンダクタンス、正味二酸化炭素固定

[Table 3] Ross's radiation transfer used in this study

(a) Short wave radiation

$$i(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = i_d(\mathbf{x}, \mathbf{r}) + I(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \quad (1), \quad r_j \frac{i_d(\mathbf{x}, \mathbf{r})}{x_j} = -a(\mathbf{x})G(\mathbf{x}, \mathbf{r})i_d(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \quad (2)$$

$$r_j \frac{I(\mathbf{x}, \mathbf{r})}{x_j} = -a(\mathbf{x})G(\mathbf{x}, \mathbf{r})I(\mathbf{x}, \mathbf{r}) + a(\mathbf{x}) \int_{\omega=4\pi} (\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}')I(\mathbf{x}, \mathbf{r}')d\omega + a(\mathbf{x})e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \quad (3)$$

$$e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = \int_{\omega=4\pi} (\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}')i(\mathbf{x}, \mathbf{r}')d\omega \quad (4)$$

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) |(\mathbf{r}, \mathbf{r}_L)| d\omega_L \quad (5)$$

$$(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}) = \frac{T(\mathbf{x})}{2\pi} \tau(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}) + \frac{R(\mathbf{x})}{2\pi} R(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}) \quad (6)$$

$$\tau(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) H[(\mathbf{r}, \mathbf{r}_L)(\mathbf{r}, \mathbf{r}_L)] d\omega_L \quad (7)$$

$$R(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) H[-(\mathbf{r}, \mathbf{r}_L)(\mathbf{r}, \mathbf{r}_L)] d\omega_L \quad (8)$$

$$H[f] = f \quad \text{if } f \geq 0, \quad H[f] = 0 \quad \text{if } f < 0, \quad \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) d\omega_L$$

(b) Long wave radiation

$$r_j \frac{i(\mathbf{x}, \mathbf{r})}{x_j} = -a(\mathbf{x})G(\mathbf{x}, \mathbf{r})i(\mathbf{x}, \mathbf{r}) + \frac{1-\epsilon(\mathbf{x})}{\pi} a(\mathbf{x}) \int_{\omega=4\pi} (\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}')i(\mathbf{x}, \mathbf{r}')d\omega + a(\mathbf{x})e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \quad (9), \quad e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = \frac{\epsilon(\mathbf{x})}{\pi} G(\mathbf{x}, \mathbf{r})\sigma(T_l(\mathbf{x}) + 273.15)^4$$

[symbols] i : radiance, i_d : direct component of i , I : indirect component, \mathbf{r} : directional unit vector. $(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ means an inner product of \mathbf{r}_1 and \mathbf{r}_2 . a : leaf area density [m^2/m^3], g : leaf normal distribution function, ω : solid angle, σ : Stefan-Boltzman constant, T : transmissivity of a single leaf (short wave), R : reflectivity of a single leaf (short wave), ϵ : emissivity of a single leaf (long wave), T_l : leaf temperature [C]. Indexes L and l indicate leaf.

速度、そして細胞内の二酸化炭素濃度を計算する。本研究では、葉表面の相対湿度、葉表面の二酸化炭素濃度、そして葉温を Table 2 に示す葉面でのフラックスの収支式と組み合わせている。

3. 計算結果

3.1 計算の概要

この研究では、1辺が6m立方の樹木を取り上げた。計算領域は 48m (x軸) × 30m (y軸) × 30m (z軸) とした。(図1参照)。点 (15m, 15m, 7m) を樹木葉群の中心とした。計算領域は 43 × 34 × 34 個のグリッドに分割した。葉面積密度は $1[m^2/m^3]$ とした。

上記に示した3つのサブモデルを結合させることによって、樹木内の熱・水分・二酸化炭素収支を計算した。Table 1 に示した乱流モデルは差分法 (SMAC、Adams-Bashforth Scheme、QUICK 空間差分) で計算した。Table 1 (7)式内の係数 c_{φ} に関しては、大橋ら⁹⁾ によって最適化された値 (1.5) を採用した。

短波放射の計算に関しては、放射輝度の間接成分を拡散近似法により計算した。拡散近似法では精緻解法に比べ、計算機の cpu 時間、メモリ共に大幅に節約できる。短波放射の計算は、乱流モデルの計算とは別個に求められる。長波放射に関しては、放射輝度の方程式 (Table 3(9)式) が直接に拡散近似法によって解かれた。Table 2 の葉面での熱・水分・二酸化炭素収支式、気孔コンダクタンスモデル、そして長波放射の式 (拡散近似式) は乱流モデルのプログラムの中に組み込まれた。Table 6 (短波放射) と Table 7 (長

[Table 4] Stomatal conductance model by Collatz et al. (1991)

$$g_s = m \frac{h_s A_n}{c_s} + b \quad (1), \quad A_n = \frac{g_s}{1.6} (c_s - c_i) \quad (2)$$

$A_n = f(Q_{PAR}, T_l, c_i)$ (3) : Photosynthesis model by Farquhar et al. (1980). This is simplified by Collatz et al. (1991).

[symbols] g_s : stomatal conductance [mol/sm²], A_n : net photosynthetic rate [mol/sm²], c_i : intercellular CO₂ mole fraction, c_s : mole fraction of CO₂ on leaf surface, Q_{PAR} : PAR absorbed by leaves [mol/sm²], h_s : relative humidity on leaf surface, T_l : leaf temperature [C], m and b : empirical constants.

[Table 5] Photosynthesis model by Collatz et al. (1991)

$$A = \min(J_E, J_C, J_S) \quad (1), \quad A_n = A - R_d \quad (2), \quad J_S = V_m/2$$

$$J_E = \alpha Q_{PAR} (p_i - *) / (p_i + 2 *), \quad R_d = 0.015 V_m, \quad p_i = c_i P_0$$

$$J_C = V_m (p_i - *) / \{ p_i + K_C (1 + [O_2]/K_O) \}, \quad * = [O_2] / (2\tau)$$

temperature dependency :

$$k = k_{25} Q_{10}^{(T-25)/10}, \quad \text{where } k = (K_C, K_O, \tau, V_m) \quad (3)$$

When $T_l > 35$,

$$V_m = V_m^0 \left[1 + \exp \frac{-a + b(T_l + 273)}{R(T_l + 273)} \right]^{-1}$$

$$R_d = R_d^0 \left\{ 1 + \exp \left[1. \frac{(T_l - 55)}{R} \right] \right\}^{-1}$$

[symbols] A : photosynthetic rate [mol/sm²], J_E : response to Q_{PAR} , Q_{PAR} : PAR absorbed by leaves [mol/sm²], α : quantum efficiency for CO₂ uptake (empirical constant), p_i : partial pressure of intercellular CO₂ [Pa], J_S : sucrose synthesis, V_m : Rubisco capacity [mol/sm²] (empirical constant), J_C : Rubisco-limited rate, $[O_2]$: partial pressure of O₂ [Pa], K_C : Michaelis constant for CO₂ (empirical constant), K_O : inhibitory constant for O₂ (empirical constant), R_d : 'Day' respiration, $*$: compensation point, τ : CO₂/O₂-specificity ratio, c_i : intercellular CO₂ mole fraction, P_0 : atmospheric pressure [Pa], T_l : leaf temperature [C], R : ideal gas constant, a and b : empirical constants. (Note) The superscript o in V_m^o and R_d^o indicates an intermediate value, corrected according to eq.(3) to T_l .

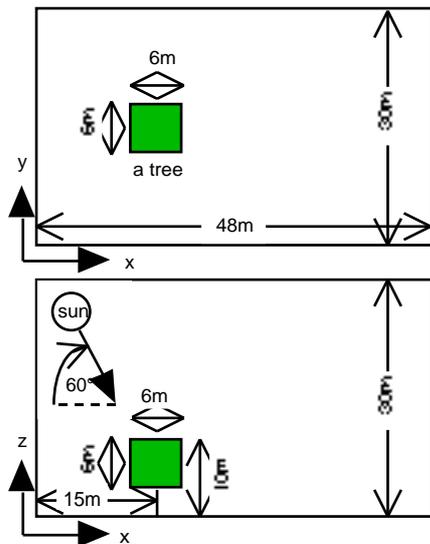


Fig. 1 Outline of the calculation domain

[Table 6] Diffusion Approximation for short wave radiation

Assumption in Diffusion Approximation :

$$I(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = U(\mathbf{x}) + c F_j(\mathbf{x}) r_j \quad (1)$$

Diffusion Approximation equations :

$$\frac{c_j(\mathbf{x})}{x_j} \frac{U(\mathbf{x})}{a(\mathbf{x})} - \gamma_0(\mathbf{x}) a(\mathbf{x}) U(\mathbf{x}) = \frac{d_j(\mathbf{x}) E_j(\mathbf{x})}{x_j} - a(\mathbf{x}) E(\mathbf{x}) \quad (2)$$

$$F_\alpha(\mathbf{x}) = \frac{c_\alpha(\mathbf{x})}{a(\mathbf{x})} \frac{U(\mathbf{x})}{x_\alpha} + d_\alpha(\mathbf{x}) E_\alpha(\mathbf{x}) \quad (3)$$

$$E(\mathbf{x}) = \int_{\omega=4\pi} e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) d\omega = \int_{\omega=4\pi} (\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}) i_d(\mathbf{x}, \mathbf{r}) d\omega d\omega$$

$$E_i(\mathbf{x}) = \int_{\omega=4\pi} e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) r_i d\omega = \int_{\omega=4\pi} (\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}) i'_i(\mathbf{x}, \mathbf{r}) r_i d\omega d\omega$$

Boundary condition : $\frac{c_j}{a} \frac{U}{x_j} n_j = 2\pi U + d_j E_j n_j \quad (4)$

$$\gamma_0(\mathbf{x}) = \alpha_0 - \beta_0(\mathbf{x}), \quad \alpha_0 = \int_{\omega=4\pi} G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) d\omega = 2\pi, \quad c = 3/(4\pi)$$

$$\beta_0(\mathbf{x}) = \int_{\omega=4\pi, \omega=4\pi} (\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}) d\omega d\omega, \quad c_j(\mathbf{x}) = 1/(c \chi_j(\mathbf{x}))$$

$$d_j(\mathbf{x}) = 1/\chi_j(\mathbf{x}), \quad \chi_\alpha(\mathbf{x}) = [\alpha_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) - \beta_{\alpha\alpha}(\mathbf{x})] c$$

$$\alpha_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) = \int_{\omega=4\pi} G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) r_\alpha r_\alpha d\omega, \quad \beta_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) = \int_{\omega=4\pi, \omega=4\pi} (\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}) r_\alpha r_\alpha d\omega d\omega$$

[symbols] I : indirect component of radiance (short wave), a : leaf area density [m²/m³], \mathbf{r} : directional unit vector, n_i : inward normal unit vector.

波放射)に、拡散近似式を示す。拡散近似に関しては、文献^{10), 11)}参照。この研究での拡散近似式は、第2節で述べた第2の仮定を用い、Table 3 に示す Ross の放射輸送方程式から導出した^{注1)}。Table 6 と 7 のポアソン方程式は、双1次線形補間関数を用いた Galerkin 有限要素法によって計算した。

3.2 放射計算の条件

太陽高度は 60 度、x 軸方向に入射するものとした。直達日射量、拡散日射量の算出は文献¹²⁾に従った。大気透過率は 0.8 とした。天空長波放射量は、地上の湿度、気温を与えることにより、文献¹³⁾(4.83)式から求めた。地面のアルベドは 0、射出率は 1 とした。単一葉の日射透過率は、0.1(PAR)、0.5(NIR)、反射率は、0.1(PAR)、0.4(NIR)とした。射出率は 0.9 とした。PAR conversion factor は、太陽高度 60 度するとき、0.425 (直達日射) 0.7 (拡散日射) とした (文献⁴⁾参照)。葉の配置関数は uniform 型を取り上げた。

3.3 気流の計算条件

- 1) 流入境界 (x=0 の y-z 平面) : 粗度 $z_0=1$ [cm], $U(z) = (u_*'/k) \log(z/z_0)$, $k = u_*'/\sqrt{C_D}$, $\varepsilon(z) = u_*'^3/(kz)$, $U(30m) = U_0$ [m/s], $\theta = \theta_0$ [C], $q = q_0$ [g/Kg], $C = 13.9$ [mmol/m³], とした。他の成分は 0。
- 2) 上端境界条件 (z=30m) : $U = U_0$, $V = 0$, $\theta = \theta_0$, $q = q_0$, $C = 13.9$, $W/z = 0$, $k/z = 0$, $\varepsilon/z = 0$, とした。
- 3) 地面境界条件 : 風速は対数則、 $\theta = \theta_0$, $q = q_0$, $C = 13.9$, $k/z = 0$, $\varepsilon(z_1) = C_D^2 k_1^2 / (kz_1)$, とした。
- 2) 流出境界条件 (x=48m の y-z 平面) : 全ての変数に対して x 方向の微分が 0 とした。
- 2) 側面境界条件 (y=0, y=30m の x-z 平面) : $V = 0$, 他の変数は y 方向の微分が 0 とした。

[Table 7] Diffusion Approximation for long wave radiation

Assumption in Diffusion Approximation :

$$i(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = U(\mathbf{x}) + cF_j(\mathbf{x})r_j \quad (1)$$

Diffusion Approximation equations :

$$\frac{c_j(\mathbf{x})}{x_j} \frac{U(\mathbf{x})}{a(\mathbf{x})} - \gamma_0(\mathbf{x}) a(\mathbf{x}) U(\mathbf{x}) = -a(\mathbf{x}) E(\mathbf{x}) \quad (2)$$

$$F_\alpha(\mathbf{x}) = \frac{c_\alpha(\mathbf{x})}{a(\mathbf{x})} \frac{U(\mathbf{x})}{x_\alpha} \quad (3)$$

$$E(\mathbf{x}) = \int_{\omega=4\pi} e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) d\omega = \alpha_0 \frac{\epsilon(\mathbf{x})}{\pi} \sigma (T_l(\mathbf{x}) + 273.15)^4 \quad (4)$$

Boundary condition : $\frac{c_j}{a} \frac{U}{x_j} n_j = 2\pi (U - i_{out}) \quad (5)$

$$i_{out} = \frac{1}{\pi} \int_{\omega=2\pi} i_{out}(\mathbf{r}) - (\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}) d\omega, \quad \gamma_0(\mathbf{x}) = \alpha_0 - \beta_0(\mathbf{x})$$

$$\alpha_0 = \int_{\omega=4\pi} G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) d\omega = 2\pi, \quad \beta_0(\mathbf{x}) = \frac{1 - \epsilon(\mathbf{x})}{\pi} \int_{\omega=4\pi, \omega=4\pi} R(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}) d\omega d\omega$$

$$c_j(\mathbf{x}) = 1 / \left[c \chi_j(\mathbf{x}) \right], \quad \beta_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) = \frac{1 - \epsilon(\mathbf{x})}{\pi} \int_{\omega=4\pi, \omega=4\pi} R(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}) r_\alpha r_\alpha d\omega d\omega$$

$$\alpha_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) = \int_{\omega=4\pi} G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) r_\alpha r_\alpha d\omega, \quad \chi_\alpha(\mathbf{x}) = \left[\alpha_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) - \beta_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) \right] c$$

[symbols] ϵ : emissivity of a single leaf, a : leaf area density [m^2/m^3], T_l : leaf temperature [C], σ : Stefan-Boltzmann constant, ω : solid angle, i_{out} : incident radiance (long wave), n_i : inward normal unit vector, \mathbf{r} : directional unit vector.. $(\mathbf{r} \cdot \mathbf{n})$ means an inner product of vectors \mathbf{r} and \mathbf{n} .

3.4 計算結果

[1] 樹木全体の熱・水分・二酸化炭素収支について

表 8 に示すように、気温、湿度、風速を変えて計算した。

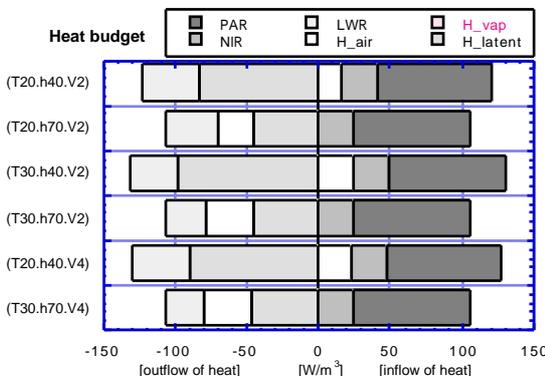
[Table 8]

環境条件	気温[°C]	湿度[%]	風速[m/s]
(T20.h40.V2)	20	40	2
(T20.h70.V2)	20	70	2
(T30.h40.V2)	30	40	2
(T30.h70.V2)	30	70	2
(T20.h40.V4)	20	40	4
(T30.h70.V4)	30	70	4

計算結果を以下に図示する。

(1) 樹木内の熱収支について

図 2 は樹木内の熱収支の平均値を示したものである。



[記号] PAR : 葉に吸収される PAR, NIR : 吸収される近赤外放射, LWR : 正味の長波放射量, H-air : 顕熱, H-vap : 蒸散による水蒸気顕熱, H-latent : 潜熱

Fig. 2 Heat budget within the foliage

全体として、葉によって吸収される短波放射は、蒸散による潜熱と長波放射によって放出される。特に潜熱の影響は大きい。また、蒸散による水蒸気の顕熱流 (H-vap)は無視しえる。低湿度 (湿度 40%) の場合には、葉温が周囲の気温より低くなり、顕熱流は吸収側になる。一方、高湿度 (70%) の場合には、葉温は周囲の気温より高くなり、顕熱流は放射側になる。また、潜熱流も高湿度のため抑制される。風速が 2m/s と 4m/s の場合を比べると、風速 (葉群内の熱伝達率) の影響は小さいことが分る。

(1) 気孔コンダクタンスについて

図 3 に気孔コンダクタンスの最大値、最小値、平均値を示す。気孔コンダクタンスは低温、高湿の場合大きい。高温、低湿度の場合小さくなる。(T20.h40.V2)と(T20.h40.V4)を比較すると風速の影響が表れているが、(T30.h70.V2)と(T30.h70.V4)を比べると、この場合には風速の影響は殆どない。この差は湿度に因るものか気温に因るものか今後検討していきたい。また、気孔コンダクタンスの最低値は、高温時にゼロとなっており、気孔が閉じている。

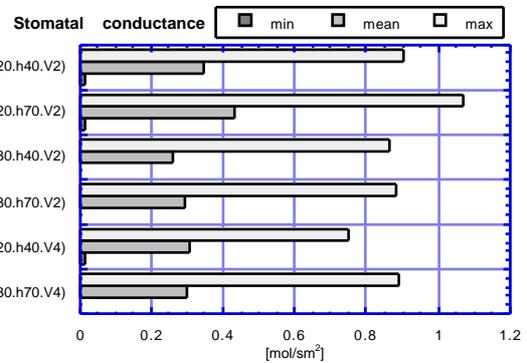


Fig. 3 Stomatal conductance

S

(3) 蒸散速度について

図 4 に蒸散速度の樹木内の単位体積当りの最大値、最小値、そして平均値を示す。気孔コンダクタンスは高湿度、低温で大きくなるが、蒸散速度は低湿度、高温の場合に大きい。低湿度時に蒸散速度が大きくなるのは、飽差が大きくなるのが原因と考えられる。高湿度、低温の場合に小さい。蒸散速度の大小と気孔コンダクタンスの大小は必ずしも一致しない。風速の影響は比較的小さい。最大値、最小値を比べてみると、その差は大きく、気温が 30 度の場合には蒸散速度の最小値はゼロとなっている。ここでは、気孔コンダクタンスもゼロである。この図は樹木の場合によって蒸散速度が大きく変わっていることを示している。

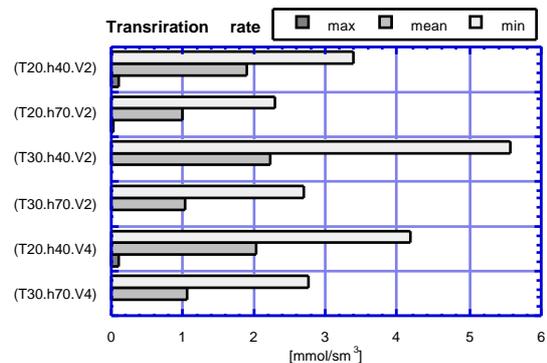


Fig. 4 Transpiration rate

(3) 正味の光合成速度について

図5に正味の光合成速度の最大値、最小値、平均値を示す。正味の光合成速度は、湿度にはあまり影響を受けない。風速の影響は小さい。気温に影響を受ける。最大値、最小値を比べてみると、その差は大きく、気温が30度の場合には正味の光合成速度の最小値は負となっている。ここでは、気孔コンダクタンスもゼロであり、負値は光呼吸速度を表している。

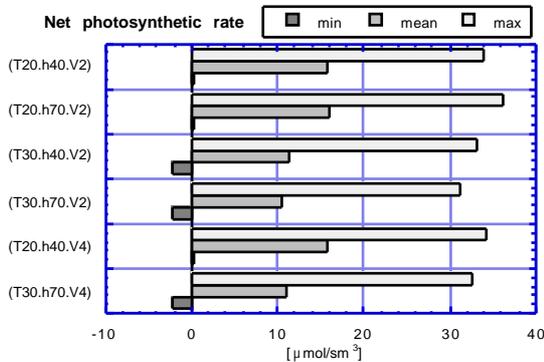


Fig. 5 Net photosynthetic rate

(5) 葉温について

図6に葉温の最大値、最小値、平均値を示す。平均葉温については、高湿度の場合に周囲気温より高くなっている。これは、高湿度時には蒸散による潜熱放出が小さいためと考えられる。風速は、葉温の最大値に少し影響するが、平均値、最低値には殆ど影響していない。また、どの場合も最大値と最低値の差は小さい。

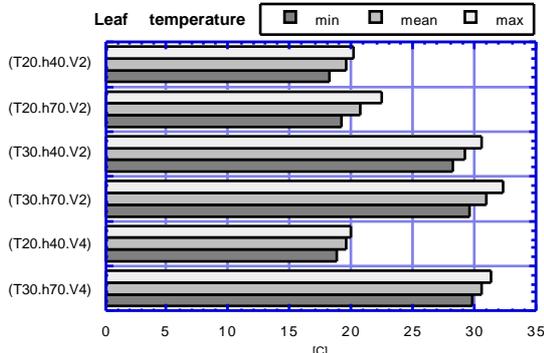


Fig. 6 Leaf temperature

(6) 顕熱流について

図7に図2で示した顕熱流の最大、最小、平均値を示す。

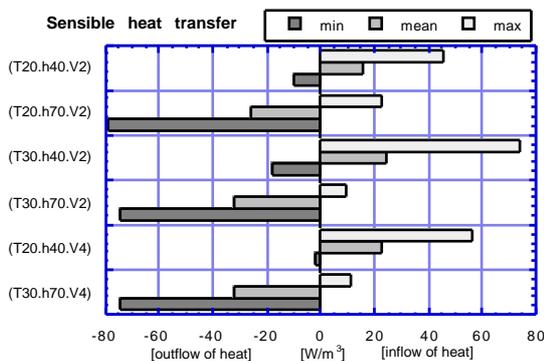


Fig. 7 Sensible heat

正値は葉による吸熱、負値は葉からの放熱を示す。平均値を見てみると、低湿時には吸熱、高湿時には放熱になっている。これは、低湿時には葉温が気温より低くなり、高湿時には葉温が気温より高くなるためである。低湿では高湿時に最大値と最小値の差が大きくなっている。低湿低湿時には風速の影響がみられるが、高温高湿時にはその影響がみられない。

(7) 潜熱流について

図8に潜熱流の最大値、最小値、平均値を示す。

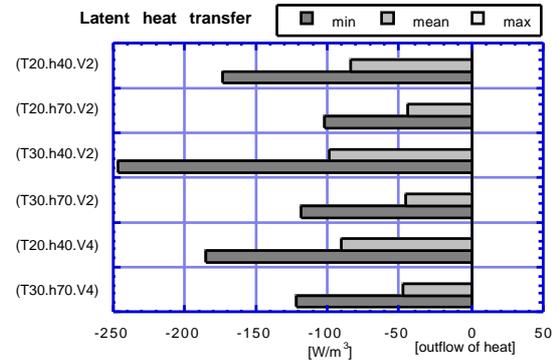


Fig. 8 Latent heat

低湿、高湿度時に潜熱放出が小さくなる。これは飽差が小さくなるためである(気孔コンダクタンスは大きくなるけれども)。高温、低湿度時に潜熱放出が大きい。以上のように、潜熱放出の大小と気孔コンダクタンスの大小とは必ずしも一致しない。この原因は周囲空気と気孔との間の飽差(VPD)に因るものと考えられる。潜熱の最大値(即ち絶対値が最小)をみると、どの場合もゼロ、或は殆どゼロとなっている。蒸散による潜熱流は葉群の場所によって大きく異なっているのが分る。

(8) 正味の長波放射について

図9に正味の長波放射の最大値、最小値、平均値を示す。負値は葉からの放熱を示す。正味の長波放射は湿度と気温の影響を同程度に受けている。同じ気温の時、高湿度の場合に葉温が気温よりも高くなっているにも拘らず放熱が小さくなっているのは、高湿度時には大気放射が大きくなっているためと考えられる。同じ湿度の時、高温の場合の方が放熱が小さくなっているのは、同じく大気放射が大きくなっているためと考えられる。高温、高湿の場合、正味の長波放射の最小値(即ち、絶対値が最大値)には風速の影響が見られる。低湿、低湿の場合は殆ど風速の影響を受けない。

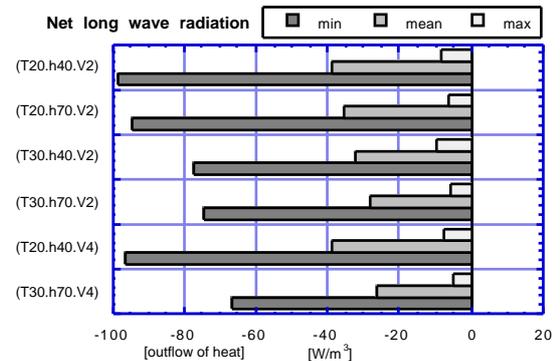


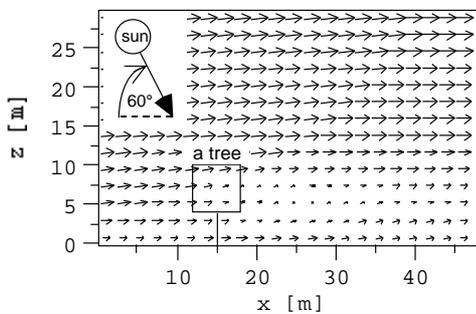
Fig. 9 Net long wave radiation

[2] 計算結果の詳細

以下に、基準としたケース (T20.h40.V2)での計算結果の詳細を示す。以下に示す計算結果は全て、 $y=15\text{m}$ での x - z 断面 (樹木を中心) の結果を図示する。

(1) 周囲空気について

図 10 に風速ベクトルを示す。樹木の下流に大きな伴流域が発生しているのがわかる。建物の伴流域と異なり、この伴流域では逆流は生じていない。単なる風速の減衰となっている。(固定した)渦は発生していない。図 11 に気温の分布を示す。樹木の内部と風下側に気温の低い部分が広がっている。これは、空気が樹木を通過する際に、葉からの蒸散によって冷却され、移流により後流に流されたためである。図 12 に比湿の分布を示す。樹木の内部と風下側に高い比湿の領域が広がっている。この現象は、気温の場合と同様に、葉の蒸散と移流に因る。図 13 に二酸化炭素濃度 (mole fraction) の分布を示す。二酸化炭素の場合も、気温や比湿と同様に、伴流域に低い濃度部分が生じている。この現象は、葉の光合成による空気中の二酸化炭素の固定と移流に因る。



$\rightarrow = 2.000\text{e}+00$

Fig. 10 Wind velocity vectors

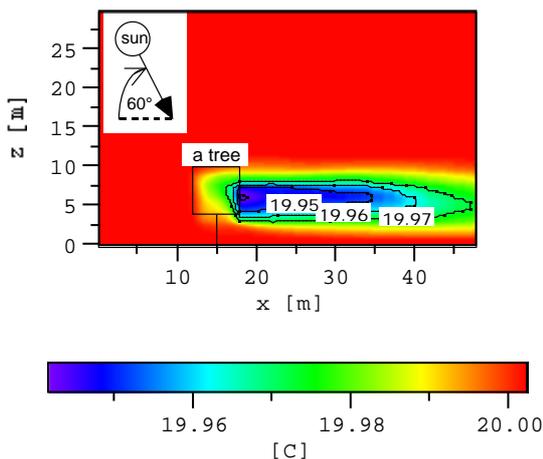


Fig. 11 Distribution of air temperature

(2) 葉群内のエネルギー収支について

図 14 から図 19 に樹木内の熱収支の詳細を示す。図 14 は葉群に吸収される PAR の分布を示す。図 15 は葉群に吸収される NIR の分布である。図 16 は樹木内の正味の長波放射量 (負値は葉からの射出を示す) の分布を示す。図 14 から光合成に影響を及ぼす PAR は直達日射を受ける樹

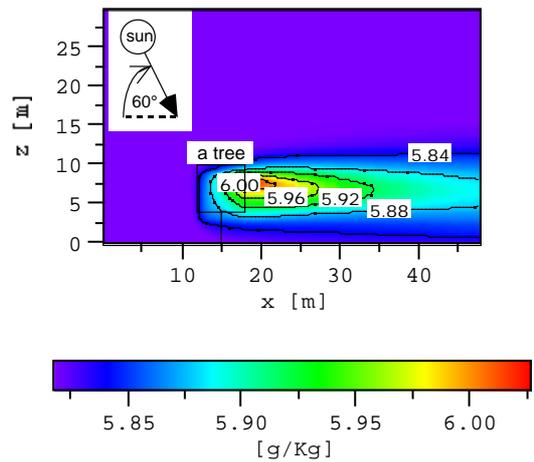


Fig. 12 Distribution of specific humidity

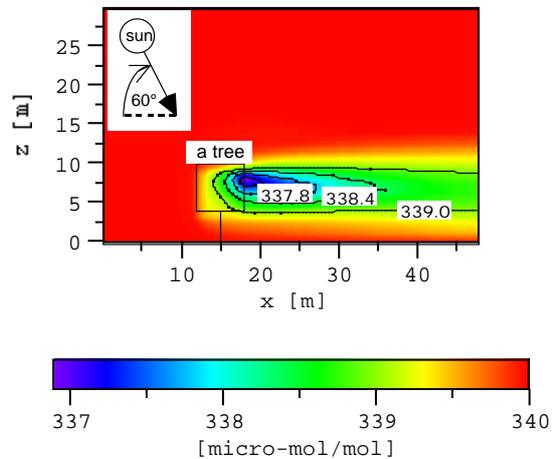


Fig. 13 Distribution of CO₂ mole fraction

木の上面と前面付近で強く吸収されている。一方、NIR は PAR に比べて樹木の内部深くまで浸透している。この差は、単一葉の PAR に対する強い吸収性と、NIR に対する強い散乱性状に起因する。正味の長波放射量は樹木の上部で強く射出する。この原因は、大気放射が、地面や葉の放射に比べて小さいためである。正味の長波放射量は葉群に吸収される NIR と同じオーダーである。このことから、長波放射を簡易に取り扱くと樹木内の熱収支の予測に大きな誤差を生じさせる危険性があることが推定される。

図 17 は蒸散による潜熱を示す。図 18 は顕熱を示す (正値は葉からの放熱を示す)。図 19 は蒸散によって葉から放出される水蒸気の顕熱を示す。図 17 から、葉によって吸収される日射量の大部分が蒸散による潜熱によって放出されることが分る。顕熱によるエネルギーの放出は潜熱による放出に比べて小さい。図 18 と図 19 から、水蒸気による顕熱は空気による顕熱に比べて 10^{-2} のオーダー小さく、無視し得ることが分る。

(3) 蒸散速度、正味の二酸化炭素固定速度の詳細

図 20 に蒸散速度の分布を示す。図 21 は正味の二酸化炭素固定速度である。図 22 は気孔コンダクタンスの分布である。蒸散速度と正味の二酸化炭素固定速度は樹木の上部と前面部で大きくなっている。この領域は PAR が葉によって強く吸収される部分とほぼ一致している。気孔コンダクタンスの分布は、基本的には蒸散速度や正味の二酸化炭素固定速度の分布と一致しているが、樹木の後方上部部

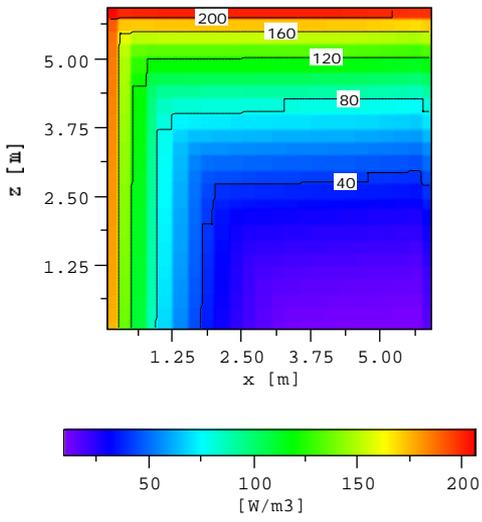


Fig. 14 PAR absorbed by leaves

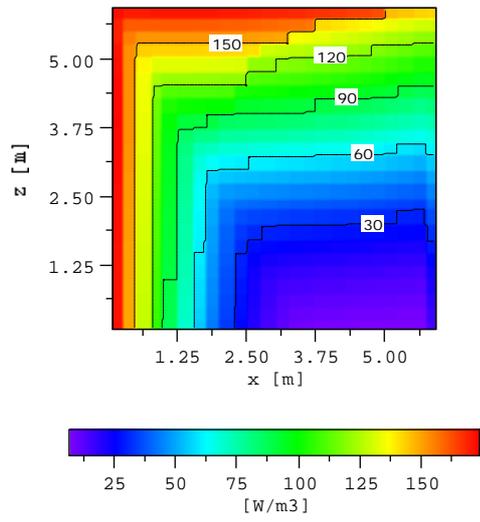


Fig. 17 Distribution of latent heat

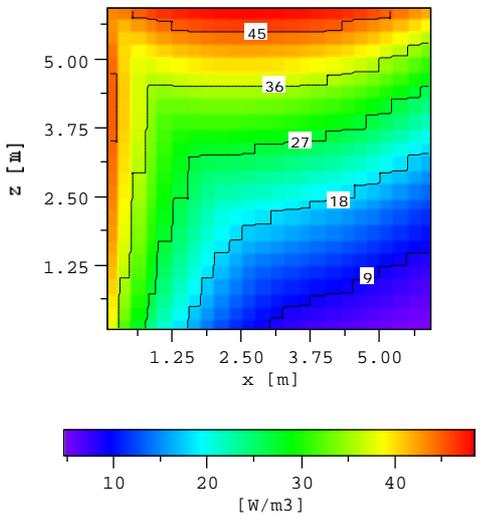


Fig. 15 NIR absorbed by leaves

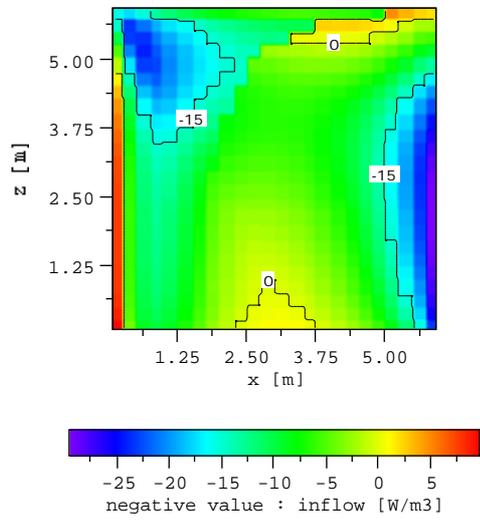


Fig. 18 Distribution of sensible heat

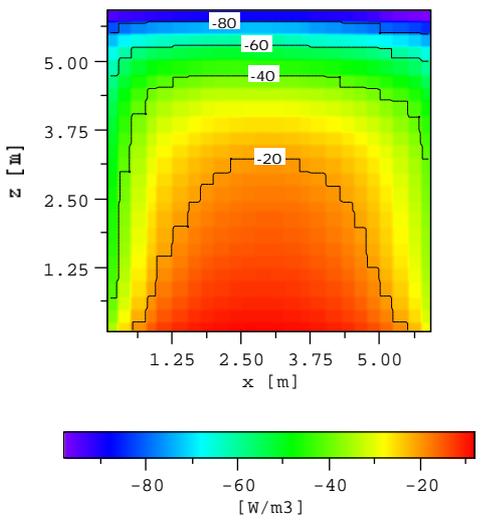


Fig. 16 Net long wave within foliage

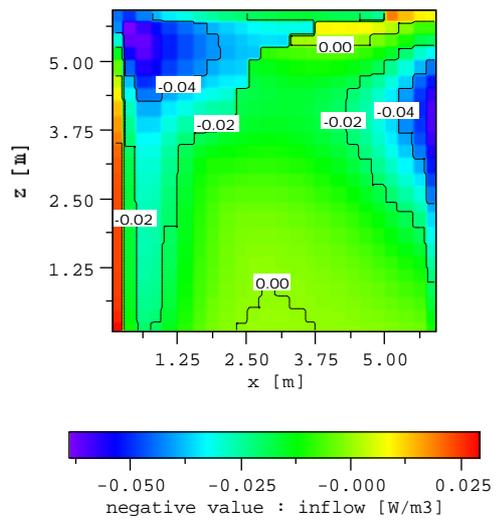


Fig. 19 Vapor sensible heat due to transpiration

で大きな値を示している。風速などの気孔コンダクタンス以外の環境因子も樹木の熱収支に相互的に影響を与えるが、気孔コンダクタンスが樹木の熱収支に大きな影響を与えていることは、図 2 2 から明らかである。図 2 3 は葉温の分布を示す。葉温は樹木の前面下部で高く、後部下部で低くなっている。この現象は、前面下部では直達日射を受け、かつ、長波放射の射出が小さいこと、樹木後部下部では、気温が低く、かつ、吸収される日射量も小さいことが、この原因となっている。

4. まとめと今後の課題

樹木内の熱・水分・二酸化炭素収支を予測するモデルを用いて、シミュレーションを行った。以下の点が明らかになった。

- 1) 低温、高湿度、低二酸化炭素濃度の領域が樹木下流の伴流域に見いだされた。一方、蒸散速度と光合成速度は、直達日射を受ける樹木の前面と上端部で強くなっていた。
- 2) 葉によって吸収される日射量の大部分が蒸散により放熱される。
- 3) 長波放射のエネルギー収支への影響は無視しえない。
- 4) 蒸散による葉からの水蒸気の流入による水蒸気の顕熱による熱交換は、空気による顕熱交換に比べ、無視しえる。
- 5) 風速の大小は樹木の熱収支にあまり影響しない。
- 6) 高湿度では葉温は気温より高くなり、葉から周囲空気の顕熱は放熱側になる。低湿度では吸熱側になる。
- 7) 環境条件の変化による気孔コンダクタンスの変化と蒸散速度の変化とは必ずしも一致しない。
- 8) 正味の光合成速度は風速と湿度変化にはあまり影響を受けない。気温に影響を受ける。
- 9) 湿潤空気の植栽内乱流モデルの結果は乾燥空気の結果と殆ど同じであった。湿潤空気のモデルは必要なかった。

本研究で用いたサブモデルに対しては、個々に検証されている。乱流モデルに関しては、文献^{2), 9)}により、Rossの放射輸送モデルに関しては、文献^{14), 15)}により、気孔コンダクタンスモデルに関しては、文献⁶⁾により、検証されている。拡散近似法に関しても、文献¹⁶⁾により検証されている。従って、今回計算した結果は、定性的には信頼できる。しかし、本研究で行った計算は同一の植物のパラメータを用いて計算したものではない。今後の課題として、同一の植物のパラメータを用いた計算と実測との比較が必要である。

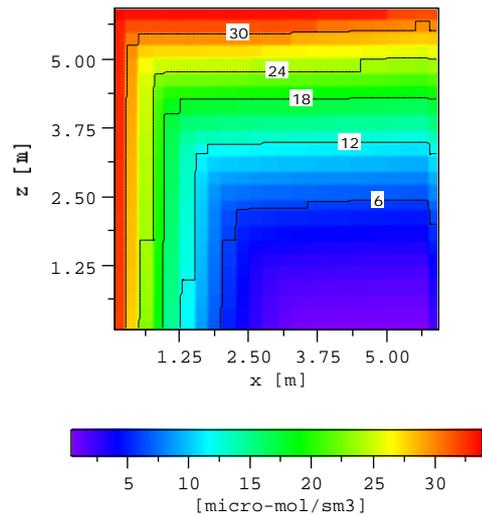


Fig. 21 Net CO₂ assimilation rate

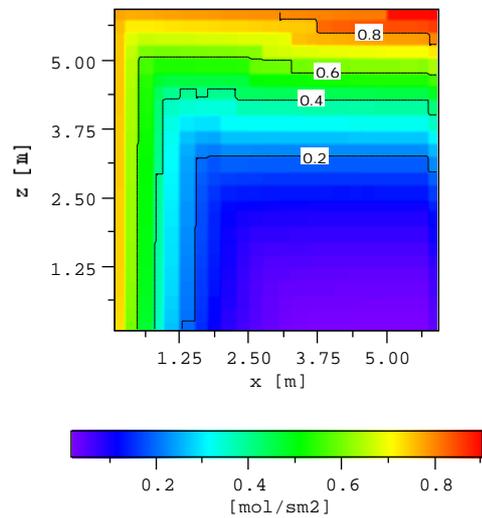


Fig. 22 Stomatal conductance

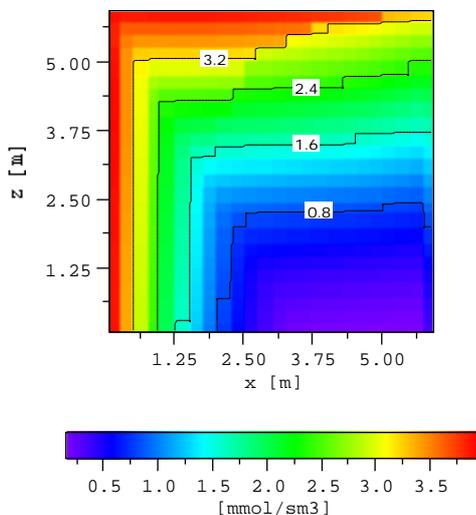


Fig. 20 Transpiration rate

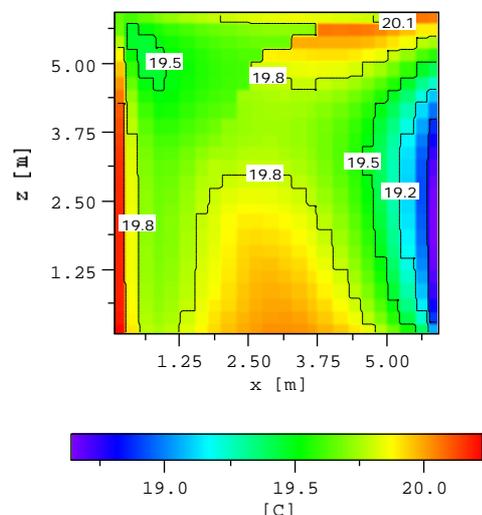


Fig. 23 Leaf temperature

[Appendix-1] 植栽内空気相の連続の式の導出
 空気相の質量保存式（瞬時値）は次式で表される。

$$\frac{\tilde{p}}{t} + \frac{\tilde{\rho}u_j}{x_j} = 0 \quad (1)$$

文献^{1), 3), 注2)}に従って、上式をアンサンブル平均し、次に空気相に関して空間平均すると次式となる。

$$\frac{\langle \tilde{p} \rangle}{t} - \frac{1}{V_0} \int_{leaf} H(\mathbf{x}-\mathbf{x}') \bar{\rho}(\mathbf{x}') \bar{v}(\mathbf{x}') n_j ds(\mathbf{x}') \\ + \frac{\langle \tilde{\rho}u_j \rangle}{x_j} + \frac{1}{V_0} \int_{leaf} H(\mathbf{x}-\mathbf{x}') \overline{\rho(\mathbf{x}') u_j(\mathbf{x}')} n_j ds(\mathbf{x}') = 0 \quad (2)$$

葉は体積を持たないと仮定すると、葉の両面の速度は等しいから、

$$\frac{1}{V_0} \int_{leaf} H(\mathbf{x}-\mathbf{x}') \bar{\rho}(\mathbf{x}') \bar{v}(\mathbf{x}') n_j ds(\mathbf{x}') = 0 \quad (3)$$

また、空間微分に関する葉面での表面積項は次式で表される。

$$-\frac{1}{V_0} \int_{leaf} H(\mathbf{x}-\mathbf{x}') \overline{\rho(\mathbf{x}') u_j(\mathbf{x}')} n_j ds(\mathbf{x}') = a (\hat{S}_{vap} + \hat{S}_{O_2} - \hat{S}_{CO_2}) \quad (4)$$

ここで、 $a = leaf/V_0$ （葉面積密度）、 $\hat{S}_{vap} = 0.018E$ 、 $\hat{S}_{O_2} = 0.032A_n$ 、 $\hat{S}_{CO_2} = 0.044A_n$ 。

$\rho = \rho_a(1+q)$ 、 $|q| \ll 1$ だから、 $\rho \approx \rho_a$ と近似すると、次の連続の式が得られる。

$$\frac{\langle \tilde{u}_j \rangle}{x_j} = S_{vap} + S_{O_2} - S_{CO_2} \quad (5)$$

ここで、 $S_{vap} = a\hat{S}_{vap}/\rho_a$ 、 $S_{O_2} = a\hat{S}_{O_2}/\rho_a$ 、 $S_{CO_2} = a\hat{S}_{CO_2}/\rho_a$ 。

[Appendix-2] 植栽内湿潤空気の温度方程式の導出(文献^{1,7)})

水蒸気の質量保存式をモル濃度 c^v と水蒸気の数密度 u_j^v で表すと、次式となる。

$$\frac{c^v}{t} + \frac{c^v u_j^v}{x_j} = 0 \quad (1)$$

エネルギー保存式をモルエンタルピーで表すと次式となる。

$$-\frac{1}{t} (c^a \hat{H}^a + c^v \hat{H}^v) + \frac{1}{x_j} (c^a \hat{H}^a u_j^a + c^v \hat{H}^v u_j^v) = \kappa \frac{2\theta}{x_j^2} \\ + \frac{D\tilde{p}}{Dt} - \tau_{ij} \frac{u_i}{x_j} + [\rho^a (u_j^a - u_j) g_j + \rho^v (u_j^v - u_j) g_j] \quad (2)$$

ここで、 \hat{H}^a は乾燥空気 (CO_2 を含む) のモルエンタルピー、 c^a は乾燥空気のモル濃度、 \hat{H}^v は水蒸気のモルエンタルピー、 θ は気温、 u_i^a は乾燥空気の速度、 \tilde{p} は絶対圧を示す。

文献^{1,8)}によれば、流体の速度が音速にくらべて小さい場合、運動の結果生ずる圧力の変化は、他の熱力学的諸量の変化に比べて小さいことが記述されている。このことは、次のようにも解釈できる。即ち、(2)式左辺と右辺第1項が温度に関係する項であり、右辺第2、3、4項が運動の結果生じる項である。従って、オーダー比較をすれば、

$$O \frac{D\tilde{p}}{Dt} \quad O -\tau_{ij} \frac{u_i}{x_j} \quad \text{と考えられる。右辺第3項は粘性に}$$

よる運動エネルギーの熱エネルギーへの変換を示す。この項は温度変化に関係する項に比べて小さいため、(2)式では省略できる。従って、圧力変化項も省略できる。水蒸気の

モル濃度が小さいため、 $u_i^v \approx u_i^a \approx u_i$ と見做せるから、(2)式右辺第4項も省略できる。

(2)式を積分表現すれば、次式となる。

$$-\frac{1}{V} \int (c^a \hat{H}^a + c^v \hat{H}^v) dV + \int_{S-leaf} (c^a \hat{H}^a u_j^a + c^v \hat{H}^v u_j^v) n_j dS \\ + \int_{leaf} (c^a \hat{H}^a u_j^a + c^v \hat{H}^v u_j^v) n_j dS \\ = \int_{S-leaf} \kappa \frac{\theta}{x_j} n_j dS + \int_{leaf} \kappa \frac{\theta}{x_j} n_j dS$$

次に、水蒸気のモルエンタルピー (\hat{H}^v) を蒸発エンタルピー (l_v) と温度に依存する項 (\hat{H}_0^v) に分離して、上式を書き直す。

$$-\frac{1}{V} \int (c^a \hat{H}^a) dV + \int_{S-leaf} c^a \hat{H}^a u_j^a n_j dS + \int_{leaf} c^a \hat{H}^a u_j^a n_j dS \\ + \frac{1}{V} \int (c^v \hat{H}_0^v) dV + \int_{S-leaf} c^v \hat{H}_0^v u_j^v n_j dS + \int_{leaf} c^v \hat{H}_0^v u_j^v n_j dS \\ + \frac{1}{V} \int (c^v l_v) dV + \int_{S-leaf} c^v l_v u_j^v n_j dS + \int_{leaf} c^v l_v u_j^v n_j dS \\ = \int_{S-leaf} \kappa \frac{\theta}{x_j} n_j dS + \int_{leaf} \kappa \frac{\theta}{x_j} n_j dS \quad (3)$$

(3)式に気化熱 l_v (定数) を掛けて積分表示すると、

$$-\frac{1}{V} \int (c^v l_v) dV + \int_{S-leaf} c^v l_v u_j^v n_j dS + \int_{leaf} c^v l_v u_j^v n_j dS = 0 \quad (4)$$

であるから、(4)式から気化熱項は消去できて、(3)式は次式となる。

$$-\frac{1}{V} \int (c^a \hat{H}^a) dV + \int_{S-leaf} c^a \hat{H}^a u_j^a n_j dS + \int_{leaf} c^a \hat{H}^a u_j^a n_j dS \\ + \frac{1}{V} \int (c^v \hat{H}_0^v) dV + \int_{S-leaf} c^v \hat{H}_0^v u_j^v n_j dS + \int_{leaf} c^v \hat{H}_0^v u_j^v n_j dS \\ = \int_{S-leaf} \kappa \frac{\theta}{x_j} n_j dS + \int_{leaf} \kappa \frac{\theta}{x_j} n_j dS \quad (5)$$

葉面から水蒸気の流入による湿潤空気の温度変化を考えると、(5)式から、水蒸気の気化熱は考慮する必要がないことが分かる。

$$-c^v u_j^v n_j = E \quad (E \text{ は蒸散速度} [\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})]) \text{ を考慮すると、} \\ - \int_{leaf} c^v \hat{H}_0^v u_j^v n_j dS = E \hat{H}_0^v S_{leaf} = E C_p^{vapor} (\theta_l - \theta_a) S_{leaf} \quad (6)$$

ここで、 $\hat{H}_0^v = C_p^{vapor} (\theta_l - \theta)$ とした。基準温度は周囲空気温度 θ を用いた。 θ_l は葉温、 S_{leaf} は葉面積。

$c^{CO_2} u_j^{CO_2} n_j = A_n$ (A_n は正味の CO_2 固定速度 $[\text{mol}/\text{m}^2\text{s}]$)、 $-c^{O_2} u_j^{O_2} n_j = A_n$ (C_3 植物の光合成では、光呼吸を含めた正味の CO_2 固定速度と正味の O_2 放出速度は等しい、文献⁸⁾) を考慮すると、光合成の際の O_2 と CO_2 によるエネルギー流出入量は次式となる。

$$-\int_{leaf} c^a \hat{H}^a u_j^a n_j dS = (\hat{H}^{O_2} - \hat{H}^{CO_2}) A_n S_{leaf} \\ = [(C_p^{O_2} - C_p^{CO_2}) (\theta_l - \theta)] A_n S_{leaf} \quad (7)$$

ここで、 $\hat{H}^{O_2} = C_p^{O_2} (\theta_l - \theta)$ 、 $\hat{H}^{CO_2} = C_p^{CO_2} (\theta_l - \theta)$ の関係をもちいた。

顕熱流の項は、葉面の対流熱伝達率 (h_c) を用いて、以下の用に表される。

$$\kappa \frac{\theta}{x_j} n_j dS = 2h_c (\theta_l - \theta) S_{leaf} \quad (8)$$

以上、(6),(7),(8)式が葉面と周囲空気とのエネルギー交換を示す。気化熱を考慮する必要はない。但し、 C_p^{vapor} , $C_p^{CO_2}$, $C_p^{O_2}$ は、水蒸気、二酸化炭素、酸素の定圧モル熱容量である。

以上を考慮して、文献^{1), 3)}に従って(2)式の運動エネルギー項を取り除いたエンタルピー式をアンサンブル平均し、空間平均すれば、植栽内の湿潤空気の温度方程式 (Table 1(3)式) が得られる。

謝辞： Computer time was provided by the Supercomputer Laboratory, Institute of Chemical Research, Kyoto University.

注

注1) 以前の文献¹⁾では、「葉の配置関数は植栽内で一定」と言うもう一つの仮定を設けていた。しかし、この仮定は Ross の放射輸送方程式の拡散近似式を導出するのに必要なかった。ただし、文献¹⁾の(36)式は、本研究の Table 6 の(2)式となる。

注 2) 以前の文献¹⁾では、時間微分項を含んだ関数の空間平均の式の記述が無かった。空間微分や時間微分項を含んだ関数の正確な空間平均の式は文献³⁾参照。

参考文献

- 1) 平岡, 丸山, 中村, 桂: 植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究, (その1) 乱流モデルの作成, 日本建築学会計画系論文報告集, No.406, pp.1-9, 1989.
- 2) 平岡, 丸山, 中村, 桂: 植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究, (その2) 実験データとの比較によるモデルの検証, 日本建築学会計画系論文報告集, No.416, pp.1-8, 1990.
- 3) Hiraoka, H.: Modelling of Turbulent Flows within Plant/Urban Canopies, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol.46&47, pp.173-182.
- 4) Ross, J.: *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*, Dr W. Junk, 1981.
- 5) Ross, J: Radiation Exchange in Plant Canopies, in *Heat and Mass Transfer in the Biosphere, I, Transfer Processes in Plant Environment*, ed. By de Vries, D.A. and Afgan, N.H., pp.327-336, Scripta Book Co., 1975.

- 6) Collatz, G.J., Grivet, C., Ball, J.T., and Berry, J.A.: Physiological and Environmental Regulation of Stomatal Conductance, Photosynthesis and Transpiration: a Model that Includes a Laminar Boundary Layer, *Agri. Forest Met.*, vol.54, pp.107-136, 1991.
- 7) Ball, J.T.: *An Analysis of Stomatal Conductance*, Stanford University, Ph.D thesis, 1988.
- 8) Farquhar, G.D., von Caemmere, S., and Berry, J.A.: A Biochemical Model of Photosynthetic CO₂ Assimilation in Leaves of C₃ Species, *Planta*, vol.149, pp.255-267, 1980.
- 9) 大橋, 神山, 成田: 樹木の抵抗係数に関する風洞実験, その4, 乱流モデルの比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 環境工学 D II, pp.669-670, 2000.
- 10) Ishimaru, A.: *Wave Propagation and Scattering in Random Media*, vol.1, Academic Press., 1978.
- 11) 平岡: Ross の植物群落内放射輸送方程式の拡散近似解法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.495, pp.31-36, 1997.
- 12) 日本建築学会 (編): *建築資料集成 1 環境*, 丸善, 1978.
- 13) 近藤 (編著): *水環境の気象学*, 朝倉書店, 1994.
- 14) 平岡, 中村: Ross, J.の植物群落内放射輸送モデルに関する研究, (その1) Szeicz, C.の測定データとの比較, 日本建築学会計画系論文報告集, No.416, pp.17-24, 1990.
- 15) 平岡, 中村: Ross, J.の植物群落内放射輸送モデルに関する研究, (その2) Ranson, K.J.の測定データとの比較, 日本建築学会計画系論文報告集, No.443, pp.1-6, 1993.
- 16) 平岡: Ross の植物群落内放射輸送方程式の拡散近似解法の予測精度の検討, 日本建築学会計画系論文報告集, No.512, pp.9-15, 1998.
- 17) Bird, R.B., Stewart, W.E., and Lightfoot, E.N.: *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, Inc., 1960.
- 18) ランダウ, リフシッツ: *流体力学*, 東京図書, 1970.
- 19) Daudet, F.A., Silverstre, J., Ferreira, M.I., Valancogne, C., and Pradelle, F.: Leaf Boundary Layer Conductance in a Vineyard in Portugal, *Agri. Forest Met.*, vol.89, pp.255-267, 1998.
- 20) 平岡: 樹木の熱・水分・二酸化炭素収支の数値モデルによる算定 (葉群部分), 第13回数値流体力学シンポジウム講演論文集, D09-2, CD-ROM, 1999.