樹木の熱・水分・二酸化炭素収支のモデル化に関する考察

MODELING THE BUDGETS OF HEAT, WATER VAPOR, AND
CARBON DIOXIDE WITHIN A TREE

平岡 久司*

Hisashi HIRAOKA

Modeling the balances of heat, water, vapor, and carbon dioxide within three-dimensional vegetation was tried. This model consists of three submodels: a model for turbulent flow within vegetation, a model for radiation transfer within vegetation, and a stomatal conductance model. This model was applied to a single tree. The numerical experiment resulted in the following:

- 1) A great deal of short wave radiation absorbed by leaves was released through transpiration.
- 2) The influence of long wave radiation on the energy balance within the tree was not negligible.
- 3) The sensible heat transfer due to water vapor flux from leaves hardly affected the energy balance within the tree. The fact indicates that the results from the turbulence model for dry air are almost equal to those of the turbulence model for moist air.

Key words : *vegetation, turbulence model, radiation transfer model, stomatal conductance model*

植栽, 乱流モデル, 放射輸送モデル, 気孔コンダクタンスモデル

1. はじめに

植物は人の心を和ませたり、建物や都市の美観といった視覚的心理的效果だけでなく、熱・空気環境の改善にも大きな潜在的力を持っている。例えば、部屋の中に置かれた植物は、臭気を消したり、二酸化炭素を吸収し酸素を放出することにより空気を浄化する。また、家の周りに植えられた落葉樹は、住居の熱環境に大きな効果をもたらす。夏は太陽日射を遮蔽し、家の壁や窓に入る日射量を大幅に減少させ、夏の暑さの緩和や冷房負荷の軽減といった省エネルギー効果をもたらす。1枚の葉は入射する日射エネルギーの約半分を吸収する。冷房負荷を考えると、樹木は大きな省エネルギー効果を持っている。ビルにおいても、外壁に蔭を這わせると、壁面に入射する日射量を激減させる。また、葉の蒸散作用により葉面は上昇せず、葉からの長波放射の射出量は増大しない。このように葉は入射した日射を顕熱に変換することなく、壁面に入射する日射量を減少させる。屋上に植栽することも省エネルギー効果をもたらす。植生による日射量の減少効果だけでなく、根による保水効果により、長期間に渡る蒸発散によって屋上面の温度上昇を和らげ、屋上から室への流入熱を減少させるのを可能にする。植物は建物の熱環境を考えたとき、大きな省エネルギー効果を潜在的に持っている。次に、都市の緑地や公園を取り上げてみる。緑地は都市部の中のクールス

ポットになっており、市街地部に比べて低温になっていることが観測から明らかになっている。都市内に緑地を適切に配置することによって、都市の気温上昇を緩和することが期待できる。また、植物は二酸化炭素を吸収し、酸素を放出するため、都市の空気を浄化する作用も持っている。森林や水田に目を向けると、植栽が地球の温暖化の抑制に大きな役割を持っていることが分かる。植物の二酸化炭素固定作用によって、人間活動により排出された二酸化炭素を吸収し、大気中の二酸化炭素濃度の上昇を抑制する。植物と海洋は二酸化炭素の巨大な吸収源であり、地球温暖化を抑制する役割は大きいと考えられる。

以上のように、植栽は見た目の心地良さといった視覚的心理的な面だけでなく、熱環境面にも重要な役割を果たす。これらのことは、観測や体験から定性的には分っているが、定量的な取り扱いはまだ不十分な状況である。植栽の熱・水分収支モデルを作成することにより定量的な取り扱いが可能になる。以上に述べたような背景から、我々は植栽の熱・水分・二酸化炭素収支のモデル化を検討している。この研究の目的は、一本の樹木を対象として、植栽の熱・水分・二酸化炭素収支のモデル化を行うことである。樹木は3次元形態をしており、モデル化の点からは最も難しい。3次元の樹木のモデル化が可能になれば、森林などの1次元場と見做せる植生のモデル化は、

* 京都大学工学研究科環境地球工学専攻 助手・博士(工学)

Research Assoc., Div. Global Environment Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.

3次元モデルの解法の近似化あるいはモデルの一部を実験式に置き換えることにより簡易化される。その意味で、ここで取り上げた3次元植栽のモデル化は重要と考える。

本研究では、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、葉群内の熱・水分・二酸化炭素収支の計算を行った。今回報告するモデルは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。植栽内の乱流モデルは我々が提案したモデルを用いた。植栽内の放射輸送モデルに関しては Ross のモデルを用いた。気孔コンダクタンスモデルについては Collatz のモデルを用いた。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1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。次の節で、この研究で使用したサブモデルの説明を行う。

2. モデルの詳細

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。

Table 1 にこの研究で用いた植栽内の湿潤空気の流れモデルを示す。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_{CO2} と S_{O2} 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_{CO2} と S_{O2} のオーダーは $10^6[s^{-1}]$ であるから、 S_{CO2} と S_{O2} 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_{CO2} と H_{O2} 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_{CO2} と H_{O2} のオーダーは $10^4[W/m^2s]$ であるから、 H_{CO2} と H_{O2} は省略できる。以後、計算に於ては、 S_{CO2} 、 S_{O2} 、 H_{CO2} 、 H_{O2} 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。3種の放射量(Q_{PAR} 、

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_j}{\partial x_j} &= S_{vap} + S_{CO2} - S_{CO2} \quad (1), & \frac{DU_j}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} - \beta g_i (\Theta - \Theta_0) - \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} - F_i \quad (2) \\ \frac{D\Theta}{Dt} &= -\frac{\partial \bar{\theta} u_j}{\partial x_j} + \frac{a[H + H_{vap} + H_{O2} - H_{CO2}]}{\rho c_p} \quad (3), & \frac{Dq}{Dt} &= -\frac{\partial q u_j}{\partial x_j} + S_{vap} \quad (4) \\ \frac{DC}{Dt} &= -\frac{\partial \bar{c} u_j}{\partial x_j} - a A_n \quad (5), & \frac{Dk}{Dt} &= P_k + G_k + U_j F_j - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (6) \\ \frac{D\varepsilon}{Dt} &= \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) \left[c_{\varepsilon 1} P_k + c_{\varepsilon 3} G_k + c_{\varepsilon 2} a k^{\frac{3}{2}} - c_{\varepsilon 2} \varepsilon \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (7) \\ S_{vap} &= 0.018 a E / \rho, & S_{CO2} &= 0.032 a A_n / \rho, & S_{CO2} &= 0.044 a A_n / \rho \\ \rho &= \rho_a / (1 - q) = \rho_a (1 + q), & c_p &= c_{pv} + (c_{pu} - c_{pv}) q \\ F_i &= c_f a U_i \sqrt{U_j U_j}, & P_k &= -\bar{u}_i u_j \frac{\partial U_j}{\partial x_j}, & G_k &= -\beta g_j \bar{\theta} u_j, & \bar{\theta} u_i &= -\frac{v_t}{P_n} \frac{\partial \Theta}{\partial x_i} \\ \bar{u}_i u_j &= -v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} + \frac{2}{3} v_t \delta_{ij} (S_{vap} + S_{CO2} - S_{CO2}) \\ \bar{q} u_i &= -\frac{v_t}{\sigma_v} \frac{\partial q}{\partial x_i}, & \bar{c} u_i &= -\frac{v_t}{\sigma_c} \frac{\partial C}{\partial x_i}, & v_t &= C_D \frac{k^2}{\varepsilon} \end{aligned}$$

CD	σ_k	σ_ε	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	$c_{\varepsilon 3}$	$c_{\varepsilon p}$
0.09	1.0	1.3	1.44	1.92	Viollet type	1.5(Ohashi, 2000)

(Note) We assumed that $P_n = \sigma_v = \sigma_c = 0.9$, and we set $c_f = 0.275$.

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

(a) Heat exchange between ambient air and leaves

$$a(Q_{PAR} + Q_{NIR} + R_{net}) = a(H + l_v E + H_{vap} + H_{O2} - H_{CO2}) \quad (1), \quad H = 2h_c(T_l - \Theta) \quad (2)$$

$$H_{vap} = C_p^{vap}(T_l - \Theta)E \quad (3), \quad H_{O2} = C_p^{O2}(T_l - \Theta)A_n \quad (4), \quad H_{CO2} = C_p^{CO2}(T_l - \Theta)A_n \quad (5)$$

(b) Water vapor flux

$$E = g_s \left(\frac{e_s(T_l)}{P_0} - c_s^{vap} \right) = \alpha_v \frac{P_0}{R(\Theta + 273.15)} (c_s^{vap} - c_a^{vap}) \quad (6), \quad c_a^{vap} \approx q/0.622$$

(c) Photosynthetic rate

$$A_n = \alpha_c \frac{P_0}{R(\Theta + 273.15)} (c_s^{CO2} - c_s^{CO2}) = \frac{g_s}{1.6} (c_s^{CO2} - c_i^{CO2}) \quad (7), \quad c_a^{CO2} = C \frac{R(\Theta + 273.15)}{P_0}$$

We assumed that $\alpha_v = \alpha_c = h_c / (\rho_a c_{pa})$, and $h_c = 6.79 + 5.99 u$, (Daudet et al., 1998).

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

(a) Short wave radiation

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

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

$$e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = \int_{\omega'=4\pi} \Gamma(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') i_d(\mathbf{x}, \mathbf{r}') d\omega' \quad (4), \quad G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) [(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_L)] d\omega_L$$

$$\Gamma(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{T(\mathbf{x})}{\pi} \Gamma_T(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') + \frac{R(\mathbf{x})}{\pi} \Gamma_R(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}')$$

$$\Gamma_T(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) H[(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_L)(\mathbf{r}' \cdot \mathbf{r}_L)] d\omega_L$$

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

$$H[f] = f \quad \text{if } f \geq 0, \quad H[f] = 0 \quad \text{if } f < 0$$

(b) Long wave radiation

$$r_j \frac{\partial i(\mathbf{x}, \mathbf{r})}{\partial x_j} = -a(\mathbf{x}) G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) i(\mathbf{x}, \mathbf{r}) + \frac{1 - \varepsilon(\mathbf{x})}{\pi} a(\mathbf{x}) \int_{\omega'=4\pi} \Gamma_R(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') i(\mathbf{x}, \mathbf{r}') d\omega' + a(\mathbf{x}) e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \quad (5)$$

$$e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = \frac{\varepsilon(\mathbf{x})}{\pi} G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \sigma(T_l(\mathbf{x}) + 273.15)^4 \quad (6), \quad \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) d\omega_L = 1$$

Q_{NIR} と R_{net} は次式で与えられる。

$$Q_{NIR} \text{ or } Q_{PAR} = (1 - T - R) \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi, \omega=4\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) |(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_L)| i(\mathbf{x}, \mathbf{r}) d\omega d\omega_L$$

$$R_{net} = \frac{\varepsilon}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi, \omega=4\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) |(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_L)| i(\mathbf{x}, \mathbf{r}) d\omega d\omega_L - 2\varepsilon\sigma(T_i + 273.15)^4$$

放射輝度 (i) は Ross の植物群落内放射輸送モデルから計算される。

Ross の植物群落内放射輸送モデルを Table 3 に示す。Ross のモデルでは単一葉の散乱特性は規定されていない。しかし、この論文では、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。この理由は、Ross のモデルを拡散近似解法 (Table 6, 7) で解くためである。

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 C_3 植物の光合成モデル (Table 4(3)式) が組み合わされている。彼らの C_3 植物の光合成モデルは Farquhar らのモデル⁸⁾を簡易化したものである。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。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^{注1)}。

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_{ep} 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(5)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2)}。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

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

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

$$A_n = f(Q_{PAR}, T_i, c_i) \quad (3) : \text{Photosynthesis model by Farquhar et al. (1980)}$$

This is simplified by Collatz et al. (1991).

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

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

$$J_E = \alpha \cdot Q_{PAR} \cdot (p_i - \Gamma_s) / (p_i + 2\Gamma_s), \quad J_S = V_m / 2, \quad J_C = \frac{V_m (p_i - \Gamma_s)}{p_i + K_c (1 + [O_2] / K_o)}$$

$$R_d = 0.015 V_m, \quad \Gamma_s = [O_2] / (2\tau), \quad p_i = c_i P_o$$

temperature dependency : $k = k_{25} Q_{10}^{(T_i - 25)/10}$, $k = (K_c, K_o, \tau, V_m)$ (3)

When $T_i > 35$,

$$V_m = V_m^o \left\{ 1 + \exp \left[\frac{-a + b(T_i + 273)}{R(T_i + 273)} \right] \right\}^{-1}, \text{ and } R_d = R_d^o \left\{ 1 + \exp [1.3(T_i - 55)] \right\}^{-1}$$

[Table 6] Diffusion Approximation for short wave radiation

Assumption in Diffusion Approximation : $I(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = U(\mathbf{x}) + c F_j(\mathbf{x}) r_j$ (1)

Diffusion Approximation equations :

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

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

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

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

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

$$\gamma_0(\mathbf{x}) = \alpha_0 - \beta_0(\mathbf{x}), \quad c_j(\mathbf{x}) = \frac{1}{c \chi_j(\mathbf{x})}, \quad d_j(\mathbf{x}) = \frac{1}{\chi_j(\mathbf{x})}, \quad \chi_\alpha(\mathbf{x}) = (\alpha_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) - \beta_{\alpha\alpha}(\mathbf{x})) c$$

$$\alpha_0 = \int_{\omega=4\pi} G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) d\omega = 2\pi, \quad \beta_0(\mathbf{x}) = \iint_{\omega=4\pi, \omega'=4\pi} \Gamma(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') d\omega d\omega',$$

$$\alpha_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) = \int_{\omega=4\pi} G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) r_\alpha r_\alpha d\omega, \quad \beta_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) = \iint_{\omega=4\pi, \omega'=4\pi} \Gamma(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') r_\alpha r'_\alpha d\omega d\omega', \quad c = \frac{3}{4\pi}$$

[Table 7] Diffusion Approximation for long wave radiation

Assumption in Diffusion Approximation : $i(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = U(\mathbf{x}) + c F_j(\mathbf{x}) r_j$ (1)

Diffusion Approximation equations :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{c_j(\mathbf{x})}{a(\mathbf{x})} \frac{\partial U(\mathbf{x})}{\partial x_j} \right] - \gamma_0(\mathbf{x}) a(\mathbf{x}) U(\mathbf{x}) = -a(\mathbf{x}) E(\mathbf{x}) \quad (2), \quad F_\alpha(\mathbf{x}) = - \frac{c_\alpha(\mathbf{x})}{a(\mathbf{x})} \frac{\partial U(\mathbf{x})}{\partial x_\alpha} \quad (3)$$

$$E(\mathbf{x}) = \int_{\omega=4\pi} e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) d\omega = \alpha_0 \frac{\varepsilon(\mathbf{x})}{\pi} \sigma (T_i + 273.15)^4 \quad (4), \quad c = \frac{3}{4\pi}$$

Boundary Condition : $\frac{c_j}{a} \frac{\partial U}{\partial x_j} n_j = 2\pi (U - \bar{i}_{out})$ (5)

$$\bar{i}_{out} = \frac{1}{\pi} \int_{\omega=2\pi} i_{out}(\mathbf{r}) |(\mathbf{r} \cdot \mathbf{n})| d\omega, \quad \gamma_0(\mathbf{x}) = \alpha_0 - \beta_0(\mathbf{x}), \quad c_j(\mathbf{x}) = 1 / (c \chi_j(\mathbf{x})),$$

$$\chi_\alpha(\mathbf{x}) = [\alpha_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) - \beta_{\alpha\alpha}(\mathbf{x})] c, \quad \alpha_0 = \int_{\omega=4\pi} G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) d\omega = 2\pi, \quad \alpha_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) = \int_{\omega=4\pi} G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) r_\alpha r_\alpha d\omega,$$

$$\beta_0(\mathbf{x}) = \frac{1 - \varepsilon(\mathbf{x})}{\pi} \iint_{\omega=4\pi, \omega'=4\pi} \Gamma_\alpha(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') d\omega d\omega', \quad \beta_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) = \frac{1 - \varepsilon(\mathbf{x})}{\pi} \iint_{\omega=4\pi, \omega'=4\pi} \Gamma_\alpha(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') r_\alpha r'_\alpha d\omega d\omega'$$

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¹¹⁾に従った。晴天日を想定し、大気透過率は 0.8 とした。湿度 40%、気温 20 度として、天空長波放射量を文献¹²⁾(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。これらの値は葉の持つ典型的な値である。PAR conversion factor (PAR/短波放射量)は、太陽高度 60 度のとき、0.425 (直達日射)、0.7 (拡散日射)とした(これらの値は Ross によって測定された、文献⁴⁾参照)。葉の配置関数 ($g(x, r_L)$)は uniform 型 ($g(r_L)=1$)を取り上げた。

3. 3 気流計算の条件

1) 流入境界 ($x=0$ の y-z 平面): 粗度 $z_0=1$ [cm],

$$U(z) = (u_* / \kappa) \log(z/z_0), \quad k = u_*^2 / \sqrt{C_D}, \quad \epsilon(z) = u_*^3 / (\kappa z),$$

$$U(30m) = 2 \text{ [m/s]}, \quad \Theta = 20 \text{ [C]}, \quad q = 5.82 \text{ [g/Kg]}, \\ C = 13.9 \text{ [mmol/m}^3\text{]}, \text{ とした。他の成分は 0。}$$

2) 上端境界条件 ($z=30m$): $U=2$, $V=0$, $\Theta=20$, $q=5.82$, $C=13.9$, $\partial W/\partial z=0$, $\partial k/\partial z=0$, $\partial \epsilon/\partial z=0$, とした。

3) 地面境界条件: 風速は対数則、 $\Theta=20$, $q=5.82$,

$$C=13.9, \quad \partial k/\partial z=0, \quad \epsilon(z_1) = C_D^{3/4} k_1^{3/2} / (\kappa z_1), \text{ とした。}$$

4) 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。

5) 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。

6) 葉群の抵抗係数 (c_f): 大橋らの実験に従い、 $c_f=0.275$ とした。一般に、 $c_f=0.2 \sim 0.3$ の値である。

3. 4 気孔コンダクタンス計算の条件

Collatz らの気孔コンダクタンスモデルに入れるパラメータ値は、現時点では Collatz らが行った実験データしかない。従って、今回は Collatz らパラメータ値 (文献⁶⁾)をそのまま用いた。Collatz らのモデルは C_3 植物の光合成のメカニズムを考慮したモデルであるため、樹木の葉にこれらの数値を入れても定性的には妥当と考えられる。

3. 5 計算結果

以下に示す計算結果は全て、 $y=15m$ での x-z 断面 (樹木の中心)の結果を図示する。

(I) 周囲空気について

Fig. 1 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。Fig. 2 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。Fig. 3 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。Fig. 4 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。

(2) 葉群内のエネルギー収支について

Fig. 5 から Fig. 10 に樹木内の熱収支の詳細を示す。Fig. 5 は葉群に吸収される PAR の分布を示す。Fig. 6 は葉群に吸収される NIR の分布である。Fig. 7 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。Fig. 5 から光合成に影響を及ぼす PAR は直達日射を受ける樹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端で強く射出する。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う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。

Fig. 8 は蒸散による潜熱を示す。Fig. 9 は乾燥空気による顕熱を示す (正値は葉からの放熱を示す)。Fig. 10 は蒸散によって葉から放出される水蒸気の顕熱を示す。Fig. 8 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。Fig. 9 と Fig. 10 から、水蒸気による顕熱は乾燥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

Fig. 11 に蒸散速度の分布を示す。Fig. 12 は正味の二酸化炭素固定速度である。Fig. 13 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端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はほぼ一致している。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、樹木の後方上端部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、Fig. 13 から明らかである。Fig. 14 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。

$\rightarrow = 2.000e+00$

Fig. 1 Wind velocity vectors

Fig. 2 Distribution of air temperature

Fig. 3 Distribution of specific humidity

Fig. 4 Distribution of CO₂ mole fraction

Fig. 5 PAR absorbed by leaves

Fig. 6 NIR absorbed by leaves

Fig. 7 Net long wave radiation within foliage

Fig. 8 Distribution of latent heat

Fig. 9 Distribution of dry air sensible heat

Fig. 10 Distribution of vapor sensible heat

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、乾燥空気による葉面と周囲空気との顕熱交換に比べ、無視しえる。

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. 11 Transpiration rate within foliage

Fig. 12 Net CO₂ assimilation rate

Fig. 13 Stomatal conductance within foliage

Fig. 14 Distribution of 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。

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

文献^{1), 3), 注3)}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。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \bar{\rho} \rangle}{\partial t} - \frac{1}{V_0} \int_{leaf} H(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \bar{\rho}(\mathbf{x}') \bar{v}(\mathbf{x}') n'_j ds(\mathbf{x}') \\ + \frac{\partial \langle \bar{\rho} u_j \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{V_0} \int_{leaf} H(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \bar{\rho}(\mathbf{x}') \bar{u}_j(\mathbf{x}') n'_j ds(\mathbf{x}') = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

葉は体積を持たないと仮定すると、葉の両面の速度（ $\bar{v}(\mathbf{x}')$ ）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。

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

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

$$\hat{S}_{O_2} = 0.032A_n, \quad \hat{S}_{CO_2} = 0.044A_n。$$

$\rho = \rho_a(1+q)$, $|q| \ll 1$ だから、 $\rho \approx const$ と近似すると、

次の連続の式が得られる。

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

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

[Appendix-2] 植栽内の湿潤空気温度方程式の導出（文献¹⁷⁾ 参照）

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_i^v で表すと、次式となる。

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

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。

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

ここで、 $\hat{H}^a$ は乾燥空気（CO₂を含む）のモルエンタルピー、 c^a は乾燥空気の数密度、 $\hat{H}^v$ は水蒸気のモルエンタルピー、 θ は気温、 u_i^a は乾燥空気の数密度、 $\tilde{p}$ は絶対圧を示す。

文献¹⁸⁾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、 $O\left(\frac{D\bar{p}}{Dt}\right) \approx O\left(-\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)$ 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。水蒸気のコ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。

$$\begin{aligned} & \int_V \frac{\partial}{\partial t} (c^a \hat{H}^a + c^v \hat{H}^v) dV + \int_{S-\text{leaf}} (c^a \hat{H}^a u_j^a + c^v \hat{H}^v u_j^v) n_j dS \\ & + \int_{\text{leaf}} (c^a \hat{H}^a u_j^a + c^v \hat{H}^v u_j^v) n_j dS \\ & = \int_{S-\text{leaf}} \kappa \frac{\partial \theta}{\partial x_j} n_j dS + \int_{\text{leaf}} \kappa \frac{\partial \theta}{\partial x_j} n_j dS \end{aligned}$$

次に、水蒸気のコルエンタルピー ($\hat{H}$) を蒸発エンタルピー (l_v)

と温度に依存する項 ($\hat{H}_\theta^v$) に分離して、上式を書き直す。

$$\begin{aligned} & \int_V \frac{\partial}{\partial t} (c^a \hat{H}^a) dV + \int_{S-\text{leaf}} c^a \hat{H}^a u_j^a n_j dS + \int_{\text{leaf}} c^a \hat{H}^a u_j^a n_j dS \\ & + \int_V \frac{\partial}{\partial t} (c^v \hat{H}_\theta^v) dV + \int_{S-\text{leaf}} c^v \hat{H}_\theta^v u_j^v n_j dS + \int_{\text{leaf}} c^v \hat{H}_\theta^v u_j^v n_j dS \\ & + \int_V \frac{\partial}{\partial t} (c^v l_v) dV + \int_{S-\text{leaf}} c^v l_v u_j^v n_j dS + \int_{\text{leaf}} c^v l_v u_j^v n_j dS \\ & = \int_{S-\text{leaf}} \kappa \frac{\partial \theta}{\partial x_j} n_j dS + \int_{\text{leaf}} \kappa \frac{\partial \theta}{\partial x_j} n_j dS \end{aligned} \quad (3)$$

1) 式に気化熱 l_v (定数) を掛けて積分表示すると、

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} (c^v l_v) dV + \int_{S-\text{leaf}} c^v l_v u_j^v n_j dS + \int_{\text{leaf}} c^v l_v u_j^v n_j dS = 0 \quad (4)$$

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。

$$\begin{aligned} & \int_V \frac{\partial}{\partial t} (c^a \hat{H}^a) dV + \int_{S-\text{leaf}} c^a \hat{H}^a u_j^a n_j dS + \int_{\text{leaf}} c^a \hat{H}^a u_j^a n_j dS \\ & + \int_V \frac{\partial}{\partial t} (c^v \hat{H}_\theta^v) dV + \int_{S-\text{leaf}} c^v \hat{H}_\theta^v u_j^v n_j dS + \int_{\text{leaf}} c^v \hat{H}_\theta^v u_j^v n_j dS \\ & = \int_{S-\text{leaf}} \kappa \frac{\partial \theta}{\partial x_j} n_j dS + \int_{\text{leaf}} \kappa \frac{\partial \theta}{\partial x_j} n_j dS \end{aligned} \quad (5)$$

葉面から水蒸気の流入による湿潤空気のコル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。

$-c^v u_j^v n_j = E$ (E は蒸散速度 [$\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$]) を考慮すると、

$$-\int_{\text{leaf}} c^v \hat{H}_\theta^v u_j^v n_j dS = E \hat{H}_\theta^v S_{\text{leaf}} = E C_p^{\text{vapor}} (\theta_l - \theta_a) S_{\text{leaf}} \quad (6)$$

ここで、 $\hat{H}_\theta^v = C_p^{\text{vapor}} (\theta_l - \theta)$ 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。

$c^{\text{CO}_2} u_j^{\text{CO}_2} n_j = A_n$ (A_n は正味の CO_2 固定速度 [$\text{mol}/\text{m}^2 \text{s}$])、

$-c^{\text{O}_2} u_j^{\text{O}_2} n_j = A_n$ (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量は次式となる。

$$\begin{aligned} -\int_{\text{leaf}} c^a \hat{H}^a u_j^a n_j dS & = (\hat{H}^{\text{O}_2} - \hat{H}^{\text{CO}_2}) A_n S_{\text{leaf}} \\ & = [(C_p^{\text{O}_2} - C_p^{\text{CO}_2}) (\theta_l - \theta)] A_n S_{\text{leaf}} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $\hat{H}^{\text{O}_2} = C_p^{\text{O}_2} (\theta_l - \theta)$ 、 $\hat{H}^{\text{CO}_2} = C_p^{\text{CO}_2} (\theta_l - \theta)$ 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。

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

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} 、 $C_p^{\text{CO}_2}$ 、 $C_p^{\text{O}_2}$ 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コル温度方程式 (Table 1(3)式) が得られる。

[SYMBOLS]

a : leaf area density [m^2/m^3]	H_{O_2} : heat exchange of O_2 by photosynthesis
a and b : empirical constants, [Table 5]	H_{CO_2} : heat exchange of CO_2 by photosynthesis
A : photosynthetic rate [mol/m^2]	i : radiance [$\text{W}/\text{m}^2 \text{sr}$]
A_n : net photosynthetic rate [mol/m^2]	i_d : direct component for i
b : empirical constant, [Table 4]	i_{mi} : incident radiance (long wave) [$\text{W}/\text{m}^2 \text{sr}$]
c_p : heat capacity of moist air	I : indirect component for i
c_{p0} : specific heat at constant pressure of dry air	J_c : Rubisco-limited rate [mol/m^2]
c_{pv} : specific heat at constant pressure of vapor	J_E : response to Q_{PAR} [mol/m^2]
c_a^{vapor} : mole fraction of vapor in ambient air	J_S : sucrose synthesis [mol/m^2]
c_s^{vapor} : mole fraction of vapor on leaf surface	k : turbulent energy
$c_a^{\text{CO}_2}$: mole fraction of CO_2 in ambient air	K_c : Michaelis constant for CO_2 , empirical constant
$c_i^{\text{CO}_2}$, c_l : intercellular CO_2 mole fraction	K_o : inhibitory constant for O_2 , empirical constant
$c_s^{\text{CO}_2}$, c_s : mole fraction of CO_2 on leaf surface	l_v : heat of vaporization of water [J/mol]
C : mean molar concentration of CO_2 [mol/m^3]	m : empirical constant, [Table 4]
$C_p^{\text{CO}_2}$: molar heat capacity of CO_2 at constant pressure [W/molC]	n_j : inward normal unit vector
$C_p^{\text{O}_2}$: molar heat capacity of O_2 at constant pressure [W/molC]	NIR : Near Infrared radiation
C_p^{vapor} : molar heat capacity of vapor at constant pressure [W/molC]	$[O_2]$: partial pressure of O_2 [Pa]
	p : partial pressure of intercellular CO_2 [Pa]
	P : mean relative pressure

E : transpiration rate [mol/sm ²]	P_0 : atmospheric pressure [Pa]	R_d : 'Day' respiration [mol/sm ²]	ϵ : viscous energy dissipation ratio, [Table 1]
e_s : saturated vapor pressure [Pa]	PAR : Photosynthetically Active Radiation	R_{net} : net long wave radiation [W/m ²]	ϵ : emissivity of a single leaf (long wave), [Table3] and [Table 7]
g : leaf normal distribution function	q : mean specific humidity [Kg/Kg]	T : transmissivity of a single leaf (short wave)	ρ : moist air density
g_s : gravitational acceleration	Q_{NIR} : NIR absorbed by leaves [W/m ²]	T_l : leaf temperature [C]	ρ_a : dry air density
g_s : stomatal conductance [mol/sm ²]	Q_{PAR} : PAR absorbed by leaves	u : velocity of ambient air (absolute value)[m/s]	σ : Stefan-Boltzman constant
h_c : convective heat transfer coefficient [W/m ² C]	[W/m ²] in Table 2, 1[W/m ²] ~ 4.6[W/m ²]	U_l : mean velocity	τ : CO ₂ /O ₂ -specificity ratio [N.D.]
h_r : relative humidity on leaf surface [N.D.]	[mol/sm ²] in Table 4 and 5	V_m : Rubisco capacity [mol/sm ²], empirical constant	ω : solid angle
H : sensible heat exchange between air and leaves [W/sm ²]	r : unit directional vector	Θ : mean air temperature	The subscripts L and l in Table 3 indicate 'leaf'.
H_{net} : sensible heat exchange of vapor between air of leaves by transpiration [W/sm ²]	$(r_1 \cdot r_2)$ means an inner product of r_1 and r_2 .	α : quantum efficiency for CO ₂ uptake, empirical constant	The superscript o in V_m^o and R_d^o in Table 5 indicates an intermediate value, corrected according to eq.(3) in Table 5 to T_l .
	R : ideal gas constant, [Table 2] and [Table 5]	β : the coefficient of volume expansion	
	R : reflectivity of a single leaf (short wave), [Table 2]	Γ : compensation point [Pa]	

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

注

- 注1) 一般に植物の抗力係数は測定から 0.2~0.3 となっている。今回は 0.275 (表1) とした。また、広葉樹の場合、葉面積密度の平均は1のオーダーである。今回は1とした。
- 注2) 前の文献¹¹⁾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¹¹⁾の(36)式は、本研究の Table 6 の(2)式となる。
- 注3) 前の文献¹¹⁾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

- 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, 1989.12月.
- 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, 1990.10月.
- Hiraoka, H.: Modelling of Turbulent Flows within Plant/Urban Canopies, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol.46&47, pp.173-182.
- Ross, J.: *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*, Dr W. Junk, 1981.
- Ross, J.: Radiation Exchange in Plant Canopies, in *Heat and Mass Transfer in the Biosphere, 1, Transfer Processes in Plant Environment*, ed. By de Vries, D.A. and Afgan, N.H., pp.327-336, Scripta Book Co., 1975.
- Collatz, G.J., Griwet, 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.
- Ball, J.T.: *An Analysis of Stomatal Conductance*, Stanford University, Ph.D thesis, 1988.
- 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.
- 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.
- Ishimaru, A.: *Wave Propagation and Scattering in Random Media*, vol.1, Academic Press., 1978.
- 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, 1997.5月.
- 日本建築学会 (編): 建築資料集成 1 環境, 丸善, 1978.
- 近藤 (編著): 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.
- 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, 1990.10月.
- 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, 1993.1月.
- 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, 1998.10月.
- Bird, R.B., Stewart, W.E., and Lightfoot, E.N.: *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, Inc., 1960.
- ランダウ, リフシッツ: 流体力学, 東京図書, 1970.
- 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.

(2000年8月28日原稿受理, 2001年3月8日採用決定)