

植栽の熱・水分・二酸化炭素収支のモデル化に関する考察 (その1) モデル化の意義とモデル計算の例

Modeling of the Budgets of Heat, Water Vapor, and Carbon Dioxide within Vegetation

Part 1 A Meaning of Modeling, and an Example Computed Using the Model

平岡久司

Distributions of heat, water vapor and carbon dioxide within a tree were computed, using our numerical model. The model consists of three submodels : a turbulence model for a flow within vegetation, a model for a radiation transfer within vegetation and a stomatal conductance model. Wind velocity, air temperature, specific humidity, CO₂ concentration and leaf temperature were computed. The transpiration and photosynthesis were active in the top and windward parts of the tree, where a great deal of photosynthetically active radiation was absorbed by leaves. On the other hand, the part of low air temperature, high humidity and low CO₂ concentration was advected behind the tree.

1. はじめに

この一連のレポートの目的は、植栽の熱・水分・二酸化炭素収支のモデル化に関する現在までの研究成果を概説することです。建築環境工学の分野で、このような、植栽のモデル化の研究をするのは、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・心理的効果だけでなく、熱・空気環境の改善にも大きな潜在的力を持っているからです。

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します。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します。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します。1枚の葉は入射する日射エネルギーの約半分を吸収します。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ます。逆に、冬季は葉が落ちてしまっているため、太陽の日射がそのまま家の壁や窓に入ってきて来ます。暖房効果や暖房負荷の軽減効果をもたらします。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ます。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ません。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ます。屋上に植栽することも省エネルギー効果をもたらします。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します。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ます。

次に、都市の緑地や公園を取り上げてみます。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ます。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ます。また、植物は二酸化炭素を吸収し、酸素を放出しますから、都市の空気を浄化する作用も持っています。

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ります。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します。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ます。

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します。これらのことは、観測や体験から定性的には分っていますが、定量的な取り扱いはまだ不十分な状況です。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ります。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ます。また、解説書としては文献^{(1)~(6)}があり

ます。参考にしてください。

次の節からは、一本の樹木を対象として、植栽の熱・水分・二酸化炭素収支の計算例を示し、定量的な取り扱い方法について述べます。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場合です。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、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ます。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だと考えます。

2. 樹木の熱・水分・CO₂ 収支モデル

樹木の熱収支メカニズムは図1から把握できます。

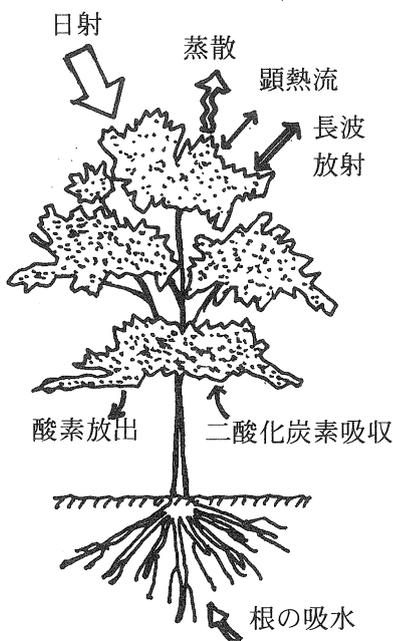


Fig. 1 Mechanism of heat balance

葉は日射と二酸化炭素を吸収し、根から供給される水とにより光合成を行い、気孔から酸素を放出します。その際に水蒸気も放出します（蒸散）。この気化熱によって、吸収された日射エネルギーを潜熱として放出し、葉温が上昇するのを抑制します。ただし、熱収支には、長波放射交換や葉と周囲空気との顕熱交換をも考慮する必要があります。

上記の樹木の熱・水分・二酸化炭素収支のメカニズムをモデル化しようとする、次のようになります。まず第一に、葉面での熱・水分・二酸化炭素収支式が必要になります。熱収支式には葉に吸収される日射量、長波放射量を知る必要があります。このために、葉群内の放射伝達のモデル化が必要になります。蒸散量を知るためには、気孔の開閉状態を知る必要があります、気孔の開閉（気孔コンダクタンス）のモデル化が必要になります。葉と周囲空気との熱・水分・二酸化炭素の相互作用を知ることも必要になります。このために周囲空気の流れを知る必要があります。空気の流れのモデル化が必要になります。空気は大抵の場合乱流状態ですから、一般に乱流モデルと呼ばれているモデル化が必要になります。最後に、植物内部での水の流れのモデル化が必要になります。この点に関しては、主に根がどのように土壌内水分を吸収するかが問題になってきますから、根の水分吸収モデルと呼ばれています。以上をまとめますと、植栽の熱・水分・二酸化炭素収支モデルを作成するには、次の4つのサブモデルが必要になります。

- (1) 植栽内の空気相の乱流モデル
- (2) 植栽内の放射伝達モデル
- (3) 気孔コンダクタンスモデル

(4) 根の水分吸収モデル

今回は上記4つのサブモデルのうち、(1)~(3)のモデルを組み合わせ、樹木の熱・水分・二酸化炭素収支を計算した例を示します。

今回の樹木の熱・水分・二酸化炭素収支モデルには、次の2つの仮定を用いました。即ち、[仮定1]：樹木には土壌から十分な水分供給があり、気孔コンダクタンスに葉の水ポテンシャルは影響しない。[仮定2]：単一葉の散乱特性は反射率、透過率、射出率によって表される。[仮定1]は、今回用いた気孔コンダクタンスモデルに必要です。この仮定は、樹木に関してはそれほど問題ではありません。樹木は地中深く根を張っていますから水補給が不足する場合は少ないためです。日本のように降水量の多い地域では問題ありません。スペインの半沙漠地帯でのブドウの木（灌漑されている）の観測やカナダの森林地帯での樹木の観測からも、この仮定の妥当性が示されています。ただし、草に関してはこの仮定は成り立たない場合が生じます。草の根は浅いため、根の部分の土壌水分の減少が起こり易いためです。[仮定2]は、今回紹介します Ross の植物群落内放射輸送方程式の拡散近似式の導出の際に必要となります。しかし、この仮定の妥当性は計算結果と測定データとの対応から検証されており^{(6),(7)}、大抵の植物に関して使用可能です。

使用したモデルおよび収支式を以下に示します。

2.1 使用した植物乱流モデル^{(8),(9)}

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{P}{\rho} \right) - \beta g_i (\Theta - \Theta_0) - \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} - F_i \quad (2)$$

$$\frac{D\Theta}{Dt} = -\frac{\partial \overline{\theta u_j}}{\partial x_j} + \frac{a [H + H_{vap} + H_{O_2} - H_{CO_2}]}{\rho c_p} \quad (3)$$

$$\frac{Dq}{Dt} = -\frac{\partial \overline{qu_j}}{\partial x_j} + \frac{0.018aE}{\rho} \quad (4)$$

$$\frac{DC}{Dt} = -\frac{\partial \overline{cu_j}}{\partial x_j} - aA_n \quad (5)$$

$$\frac{Dk}{Dt} = P_k + G_k + U_j F_j - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{v_l}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) \left[c_{\varepsilon 1} P_k + c_{\varepsilon 3} G_k + c_{\varepsilon p} a k^{\frac{3}{2}} - c_{\varepsilon 2} \varepsilon \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{v_l}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

ここで、

$$F_i = c_f a U_i \sqrt{U_j U_j}, \quad P_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, \quad G_k = -\beta g_j \overline{\theta u_j},$$

$$\overline{u_i u_j} = -v_l \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad \overline{\theta u_i} = -\frac{v_l}{P_l} \frac{\partial \Theta}{\partial x_i},$$

$$\overline{qu_i} = -\frac{v_l}{\sigma_v} \frac{\partial q}{\partial x_i}, \quad \overline{cu_i} = -\frac{v_l}{\sigma_c} \frac{\partial C}{\partial x_i}, \quad v_l = C_D \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

係数値は、 $P_l = \sigma_v = \sigma_c = 0.9$, $c_f = 0.275$, $c_{\varepsilon p} = 4$, とした^{(10),(11)}。他の係数値は Viollet 型に従った。

[記号] U_i : 風速, P : 相対圧, Θ : 気温, q : 比湿, C : CO_2 濃度 [mol/m^3], k : 乱流エネルギー, ε : 粘性散

逸率, β : 体膨張率, a : 葉面積密度 [m^{-1}], ρ : 湿潤空気密度, c_p : 湿潤空気の定圧比熱, H : 葉と空気との顕熱交換 [$\text{W}/\text{m}^2\text{s}$], H_{vap} : 蒸散による水蒸気の熱交換, H_{CO_2} : 葉に吸収される CO_2 による熱交換, H_{O_2} : 葉からの O_2 による熱交換, E : 蒸散量 [$\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$], A_n : 正味光合成量 [$\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$], g_j : 重力加速度.

2.2 葉面での熱・水分・ CO_2 収支

葉面での熱・水分・ CO_2 収支を式で表すと、次のように表わされます。

(a) エネルギー収支

$$a(Q_{PAR} + Q_{NIR} + R_{net}) = a(H + l_v E + H_{vap} + H_{O_2} - H_{CO_2}) \quad (8)$$

ここで, $H = 2h_c(T_l - \Theta)$, $H_{vap} = C_p^{vap}(T_l - \Theta)E$, $H_{CO_2} = C_p^{CO_2}(T_l - \Theta)A_n$, $H_{O_2} = C_p^{O_2}(T_l - \Theta)A_n$.

(b) 蒸散量

$$E = g_s \left(\frac{e_s(T_l)}{P_0} - c_s^{vapor} \right) = \alpha_v \frac{P_0}{R(\Theta + 273.15)} (c_s^{vapor} - c_a^{vapor}) \quad (9)$$

ここで, $c_a^{vapor} \approx q/0.622$.

(c) 光合成量

$$E = g_s \left(\frac{e_s(T_l)}{P_0} - c_s^{vapor} \right) = \alpha_v \frac{P_0}{R(\Theta + 273.15)} (c_s^{vapor} - c_a^{vapor}) \quad (9)$$

$$A_n = \alpha_c \frac{P_0}{R(\Theta + 273.15)} (c_a^{CO_2} - c_s^{CO_2}) = \frac{g_s}{1.6} (c_s^{CO_2} - c_i^{CO_2}) \quad (10)$$

ここで, $c_a^{CO_2} = C \frac{R(\Theta + 273.15)}{P_0}$.

また, $\alpha_v = \alpha_c = h_d / (\rho c_p)$ と仮定した。熱伝達率は, $h_c = 6.79 + 5.99u$ とした⁽⁷⁾。

[記号] Q_{PAR} : 葉によって吸収される PAR (Photosynthetically Active Radiation), Q_{NIR} : 吸収される NIR (Near InfraRed radiation), R_{net} : 正味長波放射量 [W/m^2], l_v : 水の気化熱 [J/mol], h_c : 熱伝達率, T_l : 葉温, g_s : 気孔コンダクタンス [$\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$], P_0 : 大気圧 [Pa], e_s : 飽和水蒸気圧, c_s^{vapor} : 葉面上の水蒸気のコル分率, R : 理想気体定数, $c_s^{CO_2}$: 葉面上の CO_2 コル分率, $c_i^{CO_2}$: 気孔内の CO_2 コル分率, u : 風速 (絶対値) [m/s], C_p^{vap} : 水蒸気の定圧コル熱容量 [$\text{J}/(\text{mol K})$], $C_p^{CO_2}$: CO_2 の定圧コル熱容量, $C_p^{O_2}$: O_2 の定圧コル熱容量.

2.3 植栽内の放射伝達方程式

葉に吸収される放射量を求めるには、植栽内の放射伝達モデルが必要になります。この研究では、短波放射長波放射ともに、Ross の放射伝達式^{(13), (14)}を採用しました。

(a) 短波放射の式

(11)式のように、放射輝度を直達成分と間接成分に分離します。このように分離するのは、太陽があるため、短波放射の輝度に強い指向性があるためです。

$$i(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = i_d(\mathbf{x}, \mathbf{r}) + I(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \quad (11)$$

直達成分と間接成分の式は以下のように表されます。

$$r_j \frac{\partial i_d(\mathbf{x}, \mathbf{r})}{\partial x_j} = -a(\mathbf{x})G(\mathbf{x}, \mathbf{r})i_d(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \quad (12)$$

$$r_j \frac{\partial I(\mathbf{x}, \mathbf{r})}{\partial x_j} = -a(\mathbf{x})G(\mathbf{x}, \mathbf{r})I(\mathbf{x}, \mathbf{r}) + a(\mathbf{x}) \int_{\omega'=4\pi} \Gamma(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}')I(\mathbf{x}, \mathbf{r}')d\omega' + a(\mathbf{x})e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \quad (13)$$

ここで,

$$\begin{aligned} e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) &= \int_{\omega'=4\pi} \Gamma(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}')i_d(\mathbf{x}, \mathbf{r}')d\omega' , \\ G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) &= \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) \mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_L d\omega_L , \\ \Gamma(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') &= \frac{T(\mathbf{x})}{\pi} \Gamma_T(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') + \frac{R(\mathbf{x})}{\pi} \Gamma_R(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') \\ \Gamma_T(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') &= \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) H[(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_L)(\mathbf{r}' \cdot \mathbf{r}_L)] d\omega_L \\ \Gamma_R(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') &= \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) H[-(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_L)(\mathbf{r}' \cdot \mathbf{r}_L)] d\omega_L , \\ H[f] &= f \quad \text{if } f \geq 0, \quad H[f] = 0 \quad \text{if } f < 0 , \\ \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi} g(\mathbf{x}, \mathbf{r}_L) d\omega_L &= 1 . \end{aligned}$$

(b) 長波放射の式

$$r_j \frac{\partial i(\mathbf{x}, \mathbf{r})}{\partial x_j} = -a(\mathbf{x})G(\mathbf{x}, \mathbf{r})i(\mathbf{x}, \mathbf{r}) + a(\mathbf{x})e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) + \frac{1-\varepsilon(\mathbf{x})}{\pi} a(\mathbf{x}) \int_{\omega'=4\pi} \Gamma_R(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}')i(\mathbf{x}, \mathbf{r}')d\omega' \quad (14)$$

ここで, $e(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = \frac{\varepsilon(\mathbf{x})}{\pi} G(\mathbf{x}, \mathbf{r})\sigma(T_l(\mathbf{x}) + 273.15)^4$.

[記号] i : 放射輝度, i_d : 直達成分, I : 間接成分, \mathbf{r} : 放射輝度の方向を示す単位ベクトル, g : 葉の配置関数, $(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_L)$: 内積, ω : 立体角, T : 単一葉の透過率 (短波), R : 単一葉の反射率 (短波), ε : 単一葉の射出率 (長波), σ : Stefan-Boltzman 定数, \mathbf{r}_L : 葉面の向きを表す単位ベクトル, 添字 L は葉を示す。

2.4 気孔コンダクタンスモデル

気孔コンダクタンスモデルに関しては、Collatz らの C_3 植物の半実験的モデル⁽¹⁵⁾ を使用しました。このモデルは以下のように表されます。

$$g_s = m \frac{h_s A_n}{c_s} + b \quad (15)$$

$$A_n = \frac{g_s}{1.6} (c_s - c_i) \quad (16)$$

$$A_n = A - R_d \quad (17)$$

$$A = \min(J_E, J_C, J_S) \quad (18)$$

ここで, $J_E = \alpha \cdot Q_{PAR} \cdot (p_i - \Gamma^*) \sqrt{(p_i + 2\Gamma^*)}$, $J_C = \frac{V_m(p_i - \Gamma^*)}{p_i + K_c(1 + [O_2] \sqrt{K_o})}$, $J_S = V_m/2$, $R_d = 0.015V_m$, $\Gamma^* = [O_2] \sqrt{(2\tau)}$,

$p_i = c_i P_0$.

パラメータの温度依存性は次のように表されます。

$$k = k_{25} Q_{10}^{(T_i - 25)/10}, \quad k = (K_c, K_o, \tau, V_m) \quad (19)$$

$T_i > 35$ では,

$$V_m = V_m^o \left\{ 1 + \exp \left[\frac{-a + b(T_l + 273)}{R(T_l + 273)} \right] \right\}^{-1} \quad (20)$$

$$R_d = R_d^o \left\{ 1 + \exp [1.3(T_l - 55)] \right\}^{-1} \quad (21)$$

〔記号〕 h_s : 葉面上の相対湿度, m, b : 実験定数,

c_s : 葉面上の CO_2 モル分率, c_i : 気孔内の CO_2 モル分率, A : 光合成量 [$\text{mol/m}^2\text{s}$], R_d : 光呼吸, α : CO_2 固定効率 (実験定数), Q_{PAR} : 葉に吸収される PAR [$\text{mol/m}^2\text{s}$], p_i : 気孔内の CO_2 分圧 [Pa], Γ^* : 補償点, V_m : Rubisco の最大能 [$\text{mol/m}^2\text{s}$] (実験定数), K_c : CO_2 に対する Michaelis 定数, K_o : 酸素の阻害物質定数, $[O_2]$: 気孔内の酸素分圧 [Pa], τ : CO_2/O_2 - specificity ratio, a, b : 実験定数.

以上, (1)式から(21)式を解けば, 樹木の葉群内の熱・水分・二酸化炭素収支が計算できます。しかし, Ross の放射伝達式は放射輝度に対する微積分方程式であり, 現在のコンピュータでは直接計算することは困難です。この研究では以下に示す拡散近似解法により放射輝度を求めます。

2.5 放射伝達式の拡散近似⁽¹⁶⁾

(a) 短波放射

短波放射に関しては, 直達成分は(12)式を直接解きます。間接成分に関しては拡散近似を行います。拡散近似では輝度を(22)式のように仮定します。

$$I(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = U(\mathbf{x}) + cF_j(\mathbf{x})n_j \quad (22)$$

ここで, $c = \frac{3}{4\pi}$.

拡散近似式は以下のようになります。

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{c_j(\mathbf{x})}{a(\mathbf{x})} \frac{\partial U(\mathbf{x})}{\partial x_j} \right] - \gamma_0(\mathbf{x})a(\mathbf{x})U(\mathbf{x}) = \frac{\partial d_j(\mathbf{x})E_j(\mathbf{x})}{\partial x_j} - a(\mathbf{x})E(\mathbf{x}) \quad (23)$$

$$F_\alpha(\mathbf{x}) = -\frac{c_\alpha(\mathbf{x})}{a(\mathbf{x})} \frac{\partial U(\mathbf{x})}{\partial x_\alpha} + d_\alpha(\mathbf{x})E_\alpha(\mathbf{x}) \quad (24)$$

ここで,

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

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

境界条件は,

$$\frac{c_j}{a} \frac{\partial U}{\partial x_j} n_j = 2\pi U + d_j E_j n_j \quad (25)$$

ここで,

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

$$d_j(\mathbf{x}) = \frac{1}{\chi_j(\mathbf{x})}, \quad \chi_\alpha(\mathbf{x}) = (\alpha_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) - \beta_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}))^{-1},$$

$$\alpha_0 = \int_{\omega=4\pi} G(\mathbf{x}, \mathbf{r})d\omega = 2\pi,$$

$$\beta_0(\mathbf{x}) = \iint_{\omega=4\pi, \omega'=4\pi} \Gamma(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}')d\omega d\omega',$$

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

$$\beta_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) = \iint_{\omega=4\pi, \omega'=4\pi} \Gamma(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') r_{\alpha} r'_{\alpha} d\omega d\omega' .$$

(b) 長波放射

長波放射に関しては、(14)式を(26)式のように直接に拡散近似します。

$$i(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = U(\mathbf{x}) + cF_j(\mathbf{x})r_j \quad (26)$$

拡散近似式は次のようになります。

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{c_j(\mathbf{x})}{a(\mathbf{x})} \frac{\partial U(\mathbf{x})}{\partial x_j} \right] - \gamma_0 a(\mathbf{x}) U(\mathbf{x}) = -a(\mathbf{x}) E(\mathbf{x}) \quad (27)$$

$$F_{\alpha}(\mathbf{x}) = -\frac{c_{\alpha}(\mathbf{x})}{a(\mathbf{x})} \frac{\partial U(\mathbf{x})}{\partial x_{\alpha}} \quad (28)$$

ただし、

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

境界条件は、

$$\frac{c_j}{a} \frac{\partial U}{\partial x_j} n_j = 2\pi (U - \bar{i}_{out}) \quad (29)$$

ただし、 $\bar{i}_{out} = \frac{1}{\pi} \int_{\omega=2\pi} i_{out}(\mathbf{r}) - (\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}) d\omega$,

$$\gamma_0(\mathbf{x}) = \alpha_0 - \beta_0(\mathbf{x}) , \quad c_j(\mathbf{x}) = \sqrt{c\chi_j(\mathbf{x})} ,$$

$$\chi_{\alpha}(\mathbf{x}) = \left[\alpha_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) - \beta_{\alpha\alpha}(\mathbf{x}) \right] ,$$

$$\alpha_0 = \int_{\omega=4\pi} G(\mathbf{x}, \mathbf{r}) d\omega = 2\pi ,$$

$$\beta_0(\mathbf{x}) = \frac{1 - \varepsilon(\mathbf{x})}{\pi} \iint_{\omega=4\pi, \omega'=4\pi} \Gamma_R(\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{r}') d\omega d\omega' ,$$

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

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

[記号] $i_{out}(\mathbf{r})$: 入射する放射輝度, n_j : 内向き単位法線ベクトル, ギリシャ文字の添字 : 総和しない.

3. 計算結果

3.1 計算条件

計算領域は 48m(x) × 30m(y) × 30m(z) としました。一辺が 6m の立方体の樹木を、点 (15m, 15m, 7m) を中心として配置しました。葉面積密度は 1m⁻¹ としました。

(a) 放射の条件

太陽高度は 60 度, x 軸方向に入射するものとしました。直達日射量, 拡散日射量の算出は文献⁽¹⁷⁾に従いました。大気透過率は 0.8 としました。湿度 50%, 気温 20 度として, 天空長波放射量を文献⁽¹⁸⁾の(4.83)式から求めています。地面のアルベドは 0, 射出率は 1 としました。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)としました。射出率は0.9としました。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)としました⁽¹³⁾。葉の配置関数はuniform型を取り上げました。

(b) 気流計算の条件

流入境界 (x=0 の y-z 平面) : 粗度 $z_0=1$ [cm], $U(z)=\frac{u_*}{K} \log\left(\frac{z}{z_0}\right)$, $k=u_*^2/\sqrt{C_D}$, $\varepsilon(z)=u_*^3/(kz)$, $U(30m)=2[m/s]$, $\Theta=20[C]$, $q=5.82[g/Kg]$, $C=13.9[mmol/m^3]$, とした。他の成分は0。

3.2 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)の結果を図示したものです。

(a) 計算変数について

図2に風速ベクトルを示します。葉群の抵抗により、樹木内部から下流部にかけて風速が減少しています。伴流域での渦の循環は発生していないことが分ります。

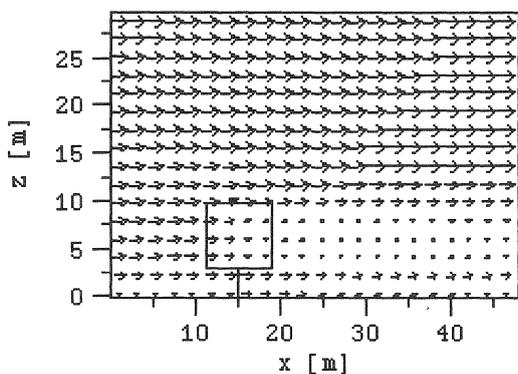


Fig.2 Wind velocity vector

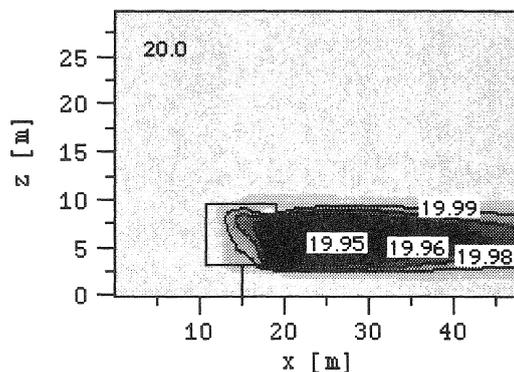


Fig. 3 Distribution of air temperature [°C]

図3に気温の分布を示します。樹木の内部と風下側に気温の低温部が広がっているのが分ります。

図4に比湿の分布を示します。気温の分布と同様に高い比湿部が風下側に見られますが、この傾向は気温に比べて少し高い位置に見られます。

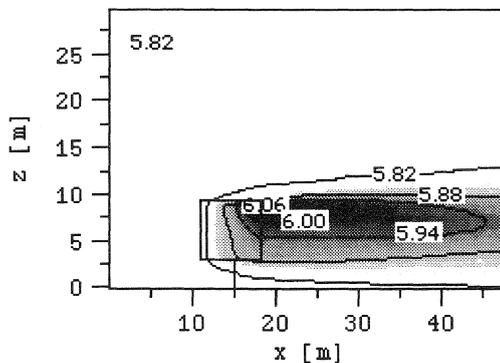


Fig. 4 Distribution of specific humidity [g/Kg']

図5にCO₂濃度分布を示します。比湿と同様の傾向を示しています。

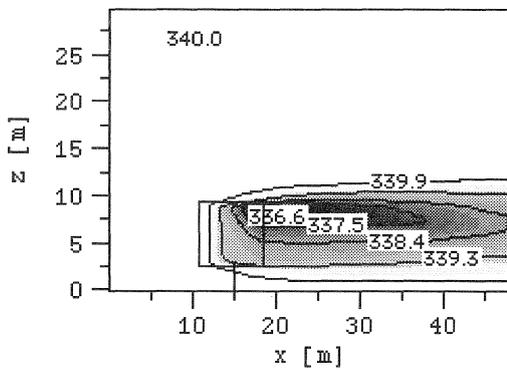


Fig.5 Distribution of CO₂ [□mol/mol]

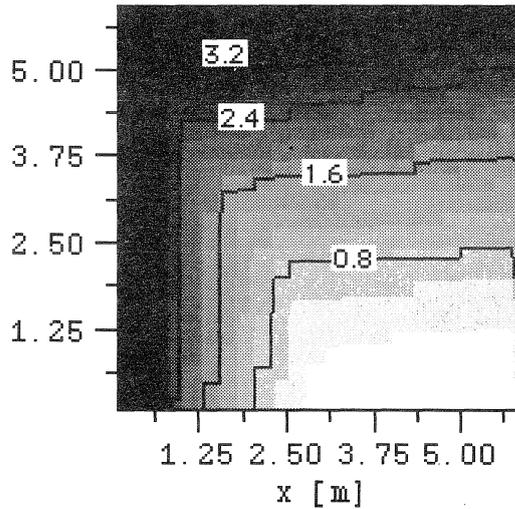


Fig.6 Transpiration rate in foliage [mmol/m³s]

(b) 葉群部分に関して

図6に蒸散量を示します。葉からの蒸散量は直達日射が当たる樹木の上端部と前面部で大きくなっています。しかし、図2に示したように、気温は風下側で低くなっています。

図7に正味の光合成量を示します。蒸散量と同様に、この量も直達日射の当たる樹木の上端部と前面部で大きくなっています。しかし、図4に示したように、CO₂濃度は風下側で低くなっています。

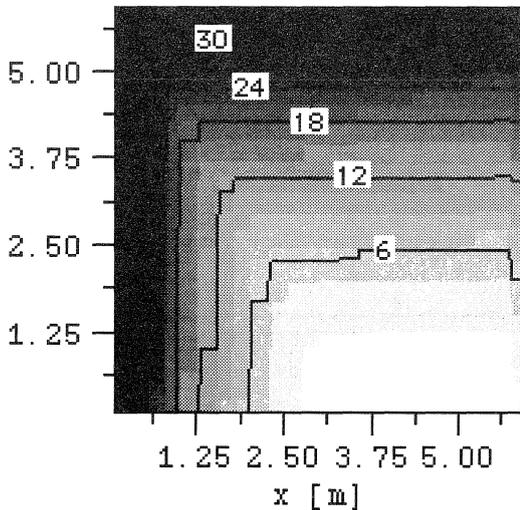


Fig.7 Net CO₂ assimilation rate [mmol/m³s]

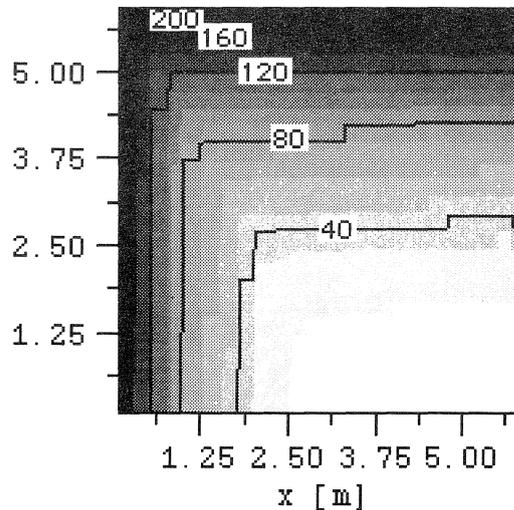


Fig.8 PAR absorbed by leaves [W/m³]

(c) 葉群内での熱収支

図8から図12に葉群内での熱収支を示します。図8は葉に吸収されるPARを示します。図9は吸収されるNIRです。PARは直達日射の当たる樹木の上端部と前面部で強く吸収されますが、NIRでは比較的樹木内部まで日射が到達しているのが分ります。また、NIRはPARに比べて吸収される量は小さいのが分ります。図10に正味の長波放射量を示します。負値は射出になっていることを示します。今回の計算条件では、葉群からの正味放射はほぼ全領域で負値を示し、射出側になっています。上端部に強い射出域があるのは、天空放射量が小さいためです。また、正味長波放射量は吸収されるNIRと同じオーダーになっています。

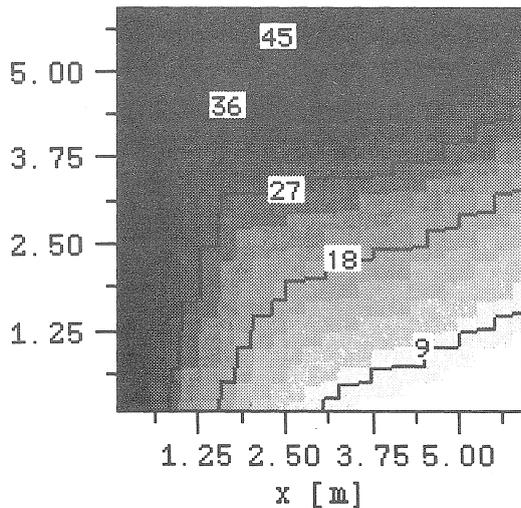


Fig.9 NIR absorbed by leaves [W/m³]

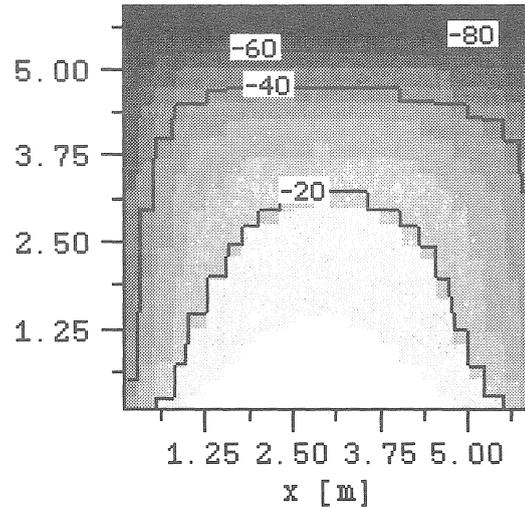


Fig.10 Net long wave radiation [W/m³]

図 1 1 に顕熱量, 図 1 2 に潜熱量を示します。図 1 1 と図 1 2 において, 正值は葉からの流出, 負値は流入を示します。顕熱量は小さく, 吸収された日射量の殆どが蒸散による潜熱として葉から放出されているのが分ります。潜熱量はすべて流出になっています。図 1 2 の潜熱による放熱の分布と図 8 の葉に吸収される PAR 量の分布とは, 同じような分布をしています。顕熱での熱の流出は樹木の風上上端部 (図 1 1 右上部) で生じています。これは, 強い日射量と比較的小さい熱伝達率に因るものと思われます。葉群の大部分で流入側になっているのが分ります。特に, 樹木の風上上端部と風下部で流入顕熱量が大きくなっています。風上上部では, 強い蒸散と比較的低い葉温 (葉温の図は省略) が原因と推定されます。風下部では低い葉温が原因です。この領域での葉温の低下は, 小さい日射吸収量と比較的強い長波放射の射出に因ります。蒸散による葉と周囲空気との熱交換量は, 顕熱流 (図 11) の $10^{-1} \sim 10^{-2}$ のオーダーでした。また, 光合成による O_2 と CO_2 とによる熱交換量は, さらに $10^{-2} \sim 10^{-3}$ のオーダーでした。そのため, 図は省略しました。

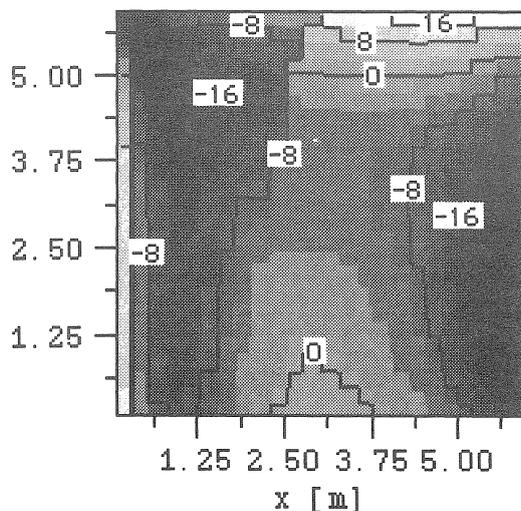


Fig.11 Sensible heat in foliage [W/m³]

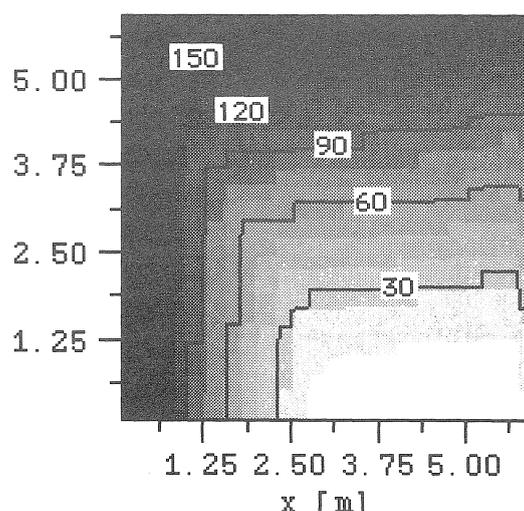


Fig.12 Latent heat in foliage [W/m³]

4. まとめ

以上, このレポートでは, 建築環境工学の分野において, 植栽の熱・水分・二酸化炭素収支モデルを研究することの意義についての考えを述べました。また, モデルについても記述し, その計算結果も示しました。しかし, 植栽の熱・水分収支モデルを都市気候の解析に使おうとすると, 都市境界層の乱流モデルの作成が必要になります。また, 大気境界層モデルの精度の検討もしなければなりません。土壌呼吸モデルも作成しなければなりません。植栽の熱・水分・二酸化炭素収支モデルを実際の問題に適用して役立てようとする, まだ克服しなければならない

問題が多く存在します。これらは今後の課題です。

以後、(その2)では、第2.1節で述べた植栽の乱流モデルの説明、(その3)では、第2.3節で述べた Ross の植物群落内放射伝達式の導出、(その3)では、第2.5節で述べた Ross の放射伝達式の近似解法の説明、(その4)では、第2.4節で述べた気孔コンダクタンスモデルのレビュー、を行います。また、機会があれば、根の水分吸収モデルや土壌呼吸モデル、高精度の植栽の乱流モデルなどについても解説したいと思います。

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

参考文献

- (1) 日野, (1992). ‘ヒートアイランドとクールアイランド’, in “地球環境と流体力学”, 朝倉書店, pp.195-229.
- (2) 日野, 神田, (1992). ‘植生による気候緩和効果と都市環境への応用’, in “地球環境と流体力学”, 朝倉書店, pp.195-229.
- (3) 日野, (1998). ‘植生層内の乱流の数値モデルおよび気候緩和効果’, in 大宮司, 三宅, 吉澤 (編), “乱流の数値流体力学”, 東大出版会, pp.575-587.
- (4) 渡辺, (1999). ‘植生微気候モデルの現状と課題’, *ながれ*, 18, 94-100.
- (5) 神田, 森脇, (1999). ‘植生による大気環境保全機能’, *ながれ*, 18, 101-106.
- (6) 平岡, 中村, (1990). ‘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, G. の測定データとの比較’, *日本建築学会計画系論文報告集*, 第416号, 17-24.
- (7) 平岡, (1993). ‘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*, 第443号, 1-6.
- (8) 平岡, 丸山, 中村, 桂, (1989). ‘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集*, 第406号, 1-9.
- (9) 平岡, 丸山, 中村, 桂, (1990). ‘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集*, 第416号, 1-8.
- (10) 大橋, (1998). ‘樹木模型周辺気流の数値シミュレーション’, *日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州) 環境工学 D II*.
- (11) 大橋, 神山, 成田, (1999). ‘樹木の抵抗係数に関する風洞実験 その2 抵抗係数の算出と数値シミュレーション’, *日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国) 環境工学 D II*, pp.523-524.
- (12) Daudet, F. A., Silvestre, J., Ferreira, M. I., Valancogne, C. and Pradelle, F., (1998). ‘Leaf boundary layer conductance in a vineyard in Portugal’, *Agri. Forest Met.*, 89, 255-267.
- (13) Ross, J., (1981). “*The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*”, Dr W. Junk Pub.
- (14) Ross, J. and Nilson, T., (1975). ‘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., Scripta Book Co., pp.327-336.
- (15) Collatz, G. J., Grivet, C., Ball, J. T. and Berry, J. A., (1991). ‘Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer’, *Agri. Forest Met.*, 54, 107-136.
- (16) 平岡, (1997). ‘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*, 第495号, 31-36.
- (17) 日本建築学会 (編), (1978). “*建築設計資料集成 1 環境*”, 丸善, pp.104.
- (18) 近藤, (1994). “*水環境の気象学*”, 朝倉書店.