

# 植栽内熱・水分・二酸化炭素収支のモデル化に関する考察

## (その2) モデルの検証

### Modeling of the Budgets of Heat, Water Vapor, and Carbon Dioxide within Vegetation: Part 2

#### A Verification Study

平岡 久司

In the previous paper<sup>1)</sup> in 'traverse 1'(2000), we proposed a model for simulating the budgets of heat, water vapor, and carbon dioxide within three-dimensional vegetation. And we applied the model to a single tree and investigated the detail of heat balance within the foliage. In this paper, we examined the validity of our model. We compared the results from the model with the measured data. Our model accurately estimated the measured data.

#### 1. はじめに

都市の緑化は都市の熱環境を緩和することが知られている。しかし、現段階では、このような植栽による緩和作用を定量的に予測することは困難である。このような微気候モデルは 1960 年代に入ってから研究された。例えば、Waggoner and Reifsnnyder<sup>2)</sup>, Lemon et al.<sup>3)</sup>, Goudriaan<sup>4)</sup>, Norman<sup>5)</sup>, 堀江<sup>6)</sup>, Meyers and Paw U<sup>7)</sup>, Naot and Mahrer<sup>8)</sup>, 神田と日野<sup>9,10)</sup>, 吉本ら<sup>11)</sup>。これらの研究の中で特に、Naot and Mahrer は、植栽の微気候のモデルの構築のために、次の5つのサブモデルを統合した：植栽内の乱流モデル、植栽内の短波放射の伝達モデル、気孔コンダクタンスモデル、根による土壌の水分吸収モデル、土壌内での熱・水分同時移動モデル。彼らは、Wilson and Shaw<sup>12)</sup>の植栽内乱流モデルを Mellor and Yamada の乱流モデル<sup>13)</sup>に応用し、気温、湿度の乱流モデルも作成した。彼らは、Norman<sup>5)</sup>の放射伝達モデル、Avisar et al.<sup>14)</sup>の気孔コンダクタンスモデル（これは Jarvis のモデル<sup>15)</sup>に相当する）、そして、Philip and de Vries<sup>16)</sup>の土壌内の熱・水分同時移動モデルを採用した。神田と日野による NEO-SPAM モデル<sup>9,10)</sup>は次のサブモデルを含む：Kondo and Akasi<sup>17)</sup>の乱流モデル、放射伝達モデル、堀江<sup>6)</sup>の気孔コンダクタンスモデル（Jarvis 型）、土壌内での熱・水分移動モデル、そして Herkelrath モデル<sup>18)</sup>を改良した根からの水分吸収モデル。吉本ら<sup>11)</sup>は、Harley and Tenhunen<sup>19)</sup>の光合成モデルを NEO-SPAM に追加した。上記のモデルは植栽内の熱・水分収支モデルの発展に大いに寄与した。しかし、これらのモデルは、完全には3次元植栽には適用できない。都市の緑化による都市の熱環境の緩和、緑地の微気候、或いは樹木のある建物の熱負荷などを予測するためには3次元植栽の熱・水分収支モデルが必要になる。また、これらのモデルは、短波放射を PAR（光合成有効放射）と他の波長成分に分離していない。PAR は気孔の開閉に直接影響を与える。また、個葉の反射率、透過率は PAR 成分の波長域と他の短波波長域で大きく異なる。短波放射に対する反射率と透過率の個々の平均値を用いて植栽内の短波放射分布を計算しても精度の良い放射量は得られない。そのため、前報<sup>1,20)</sup>では3次元植栽にも適用できる植栽内の熱・水分・二酸化炭素収支モデルを提案した。この研究での目的は、測定データとの比較から、前報で示したモデルを検証することである。

#### 2. 検証方法

モデルの詳細は前報<sup>1)</sup>で示したが、そこでの乱流モデルは乾燥空気に対する乱流モデルであった。湿潤空気に対する乱流モデルを表1に示す（詳細は文献<sup>20)</sup>参照）。検証用の測定データは、Naot and Mahrer<sup>8)</sup>の綿畑（高さ 1.4m）での測定データを用いた。綿は葉の両面で蒸散するため、文献<sup>1,20)</sup>に示した表2は以下のように書き換える必要がある（表2）。

Table 1 Turbulence model for moist air within vegetation

(質量保存の式)

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

(平均風速の式)

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \beta g_i (\Theta - \Theta_0) - \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} - F_i \quad (2)$$

(平均気温の式)

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

(平均比湿の式)

$$\frac{Dq}{Dt} = \frac{\partial q}{\partial t} + U_j \frac{\partial q}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{qu_j}}{\partial x_j} + S_{vap} \quad (4)$$

(平均 CO<sub>2</sub> 濃度の式)

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

(乱流エネルギーの式)

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

(粘性散逸率の式)

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

ここで、 $P_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$ ,  $G_k = -\beta g_j \overline{\theta u_j}$ ,  $\overline{u_i u_j} = -\nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} + \frac{2}{3} \nu_t \delta_{ij} (S_{vap} + S_{O_2} - S_{CO_2})$ ,

$$\overline{\theta u_i} = -\frac{\nu_t}{P_n} \frac{\partial \Theta}{\partial x_i}, \quad \overline{qu_i} = -\frac{\nu_t}{\sigma_v} \frac{\partial q}{\partial x_i}, \quad \overline{cu_i} = -\frac{\nu_t}{\sigma_c}, \quad \nu_t = C_D \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad F_i = c_f a U_i \sqrt{U_j U_j},$$

$$S_{vap} = 0.018 aE/\rho, \quad S_{O_2} = 0.032 aA_n/\rho, \quad S_{CO_2} = 0.044 aA_n/\rho.$$

$$\rho = \rho_a / (1 - q) \approx \rho_a (1 + q), \quad c_p = c_{pa} + (c_{pv} - c_{pa})q$$

係数値は以下のようにした： $C_D = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ,  $c_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $c_{\varepsilon 2} = 1.92$ ,

$G_k \leq 0$  のとき,  $c_{\varepsilon 3} = 0$ ,  $G_k > 0$  のとき,  $c_{\varepsilon 3} = c_{\varepsilon 1}$  (Voillet 型モデル),  $P_n = \sigma_v = \sigma_c = 0.9$ .

[記号]  $U_i$ : 風速[m/s],  $\Theta$ : 気温[C],  $\Theta_0$ : 基準温度[C],  $P$ : 相対圧[Pa],  $q$ : 比湿[Kg/Kg],  $C$ : CO<sub>2</sub> モル濃度[mol/m<sup>3</sup>],  $k$ : 乱流エネルギー[(m/s)<sup>2</sup>],  $\varepsilon$ : 粘性散逸率[m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>],  $\nu_t$ : 乱流拡散係数[m<sup>2</sup>/s],  $F_i$ : 葉群による抗力[m/s<sup>2</sup>],  $c_f$ : 抗力係数[-],  $a$ : 葉面積密度[m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>],  $E$ : 蒸散速度[mol/m<sup>2</sup>s],  $A_n$ : 正味の光合成速度[mol/m<sup>2</sup>s],  $\rho$ : 湿潤空気密度[Kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_a$ : 乾燥空気密度[Kg/m<sup>3</sup>],  $c_p$ : 湿潤空気の定圧比熱[J/KgC],  $c_{pa}$ : 乾燥空気の定圧比熱[J/KgC],  $c_{pv}$ : 水蒸気の定圧比熱[J/KgC],  $\beta$ : 体膨張率[C<sup>-1</sup>],  $g_i$ : 重力加速度[m/s<sup>2</sup>],  $H$ : 顕熱流[W/m<sup>2</sup>],  $H_{vap}$ : 光合成時の水蒸気の顕熱流[W/m<sup>2</sup>],  $H_{O_2}$ ,  $H_{CO_2}$ : 光合成時の酸素と CO<sub>2</sub> の顕熱流[W/m<sup>2</sup>].

Table 2 The balances of heat, water vapor, and carbon dioxide on leaves

(a) Heat exchange between leaves and the surrounding air

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

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

(b) The balance of water vapor flux on leaves

$$\frac{E}{2} = g_s \left( \frac{e_s(T_l)}{P_0} - c_s^{vapor} \right) = \alpha_v \frac{P_0}{R(\Theta + 273.15)} (c_s^{vapor} - c_a^{vapor}) \quad (2)$$

ここで、 $c_a^{vapor} \approx q/0.622$ .

(c) The balance of CO<sub>2</sub> flux on leaves

$$\frac{A_n}{2} = \alpha_c \frac{P_0}{R(\Theta + 273.15)} (c_a^{CO_2} - c_s^{CO_2}) = \frac{g_s}{1.6} (c_s^{CO_2} - c_i^{CO_2}) \quad (3)$$

ここで、 $c_a^{CO_2} = C \frac{R(\Theta + 273.15)}{P_0}$  また、 $\alpha_v = \alpha_c = h_c / (\rho_a c_{pa})$ ,  $h_c = 6.79 + 5.99u^{2.1}$ と仮定した。

〔記号〕  $Q_{PAR}$  : 葉群に吸収される PAR[W/m<sup>2</sup>], PAR : 光合成有効放射(Photosynthetically Active Radiation),  $Q_{NIR}$  : 葉群に吸収される近赤外放射量(Near InfraRed radiation) [W/m<sup>2</sup>],  $R_{net}$  : 正味長波放射量[W/m<sup>2</sup>],  $h_c$  : 対流熱伝達率[W/m<sup>2</sup>C],  $l_v$  : 水の気化熱[J/mol],  $T_l$  : 葉温[C],  $C_p^{vap}$  : 水蒸気の定圧モル熱容量[J/(molK)],  $C_p^{O_2}$ ,  $C_p^{CO_2}$  : 酸素と CO<sub>2</sub> の定圧モル熱容量[J/(molK)],  $g_s$  : 気孔コンダクタンス[mol/m<sup>2</sup>s],  $e_s$  : 飽和水蒸気圧[Pa],  $P_0$  : 大気圧[101300Pa],  $R$  : 気体定数[8.314m<sup>3</sup>Pa/(molK)],  $c_s^{vapor}$  : 葉面上の水蒸気モル分率[-],  $c_a^{vapor}$  : 周囲空気の水蒸気モル分率[-],  $c_a^{CO_2}$  : 周囲空気の CO<sub>2</sub> のモル分率[-],  $c_s^{CO_2}$  : 葉面上の CO<sub>2</sub> のモル分率[-],  $c_i^{CO_2}$  : 気孔内の CO<sub>2</sub> のモル分率[-],  $u$  : 風速 (絶対値) [m/s].

測定場所は Gilgal (死海の北約 25Km, Jordan 谷に位置する)。測定日時は 1987 年 8 月 18 日 (午前 1 時) から 20 日 (午後 11 時) の 3 日間。この 3 日間は快晴である。

Naot and Mahrer は 4m の高さで、水平面全天日射量、気温、風速 (絶対値)、比湿を測定している。今回はこれらを上端の境界条件とした。水平面全天日射量は、太陽高度、大気透過率、Bouguer の式、Berlarge の式を用いて、法線面直達日射と拡散日射に分離した。法線面直達日射量は Bouguer の式を用いて、以下のように表される。

$$I_D = I_0 P^{\cos ec(h)}$$

ここで、 $I_D$  は法線面直達日射量[W/m<sup>2</sup>],  $I_0$  は太陽定数 (1353[W/m<sup>2</sup>]),  $P$  は大気透過率,  $h$  は太陽高度を示す。太陽高度は、Gilgal の緯度、経度、そして時刻から求めた。

拡散日射量は ( $I_s$  [W/m<sup>2</sup>]) は、次の Berlarge の式を用いて求めた。

$$I_s = 0.5I_0 \sin(h) (1 - P) \left( 1 - P^{\cos ec(h)} \right) / \left( 1 - 1.4 \log_e P \right)$$

上記 2 式より、水平面全天日射量が計算値と測定値とが一致するように、大気透過率を決定した。法線面直達日射と拡散日射に対する PAR と NIR は、Ross のテキスト<sup>22)</sup>の図 42 と図 43 の PAR conversion factor 値を用いて決定した。

下向き大気放射量 ( $L$  [W/m<sup>2</sup>]) (長波放射) の測定データは無かったため、4m 高さでの気温と比湿のデータを用いて、Brunt の式 (次式) から求めた。

$$L = (0.51 + 0.066\sqrt{e}) \sigma (\Theta_0 + 273.15)^4$$

ここで、 $e$  は水蒸気圧[hPa],  $\Theta_0$  は気温[C]である。

また、二酸化炭素濃度は測定されていないため、高さ 4m で 340[μmol/mol] (3 日間一定) のモル分率を与えた。

次に地表面の境界条件について示す。地表面温度は測定されていないため、地上 0.1m での気温を地表面温度とした。従って、地上 0.1m から地表面までの平均気温の式は計算していない。地表面から地上 0.1m までの気温は等温としている。湿度は断湿、風速はゼロとした。土壌呼吸に関しては、Thorgeirsson and Soegaard<sup>23)</sup>の実験式を用いた<sup>注1)</sup>。

個葉の透過率は 0.1(PAR), 0.3(NIR)、反射率は 0.1(PAR), 0.4(NIR)とした。これらの値の各平均は、Naot and Mahrer の個葉の透過率と反射率に一致するようにしている。Naot and Mahrer は葉の重み付き平均角度を 85 度としている。しかし、(1) Ross の綿畑での消散係数の測定<sup>22)</sup>では、消散係数は太陽高度にそれ程依存しない、(2) 植物図鑑などから綿の葉の図をみる限りでは、葉の角度は直立型ではなく種々の角度をしている、以上 2 点から、葉の向きの確率は uniform 型とした。

このモデルでは、気孔コンダクタンスモデルは、Collatz, et al.<sup>24)</sup>のモデルを採用している。この気孔コンダクタンスモデルは、Ball の気孔コンダクタンスと光合成速度との関係式(実験式)<sup>25)</sup>と光合成モデルとを組み合わせている。綿に対しては、Ball の実験式に表れるパラメータ  $m$  と  $b$  の値は 8.01 と 0.03 とした。これらの値は Ball の測定による綿の値である。Collatz, et al.の光合成モデルに表れるパラメータに関しては、quantum efficiency を 0.24 (Harley, et al.<sup>26)</sup>の綿の測定より)、Rubisco capacity を  $320[\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}]$ とした。Naot and Mahrer が測定した気孔コンダクタンスの最大値に、Collatz, et al.の気孔コンダクタンスの最大値ができるだけ一致するように、この Rubisco capacity 値を決定した。

乱流統計量の境界条件としては、4m 高さでは、乱流エネルギー ( $k$ )、粘性散逸 ( $\epsilon$ ) とともに高さ方向の微分をゼロとした。地表面では、 $k$  の境界条件は高さ方向の微分をゼロ、 $\epsilon$  の境界条件は次式とした。

$$\epsilon(z_1) = \left( C_D^{0.75} k(z_1)^{1.5} \right) / (\kappa_0 z_1)$$

ここで、 $z_1$  は地表面上の第一セル高さ、 $C_D = 0.09$ 、 $\kappa_0$  はカルマン定数。植栽内乱流モデルに表れる係数  $c_{ep}$  は 2.5 とした。これは最適化された値である(図 1 と注 2 参照)。他のパラメータは Naot and Mahrer のものを用いた。

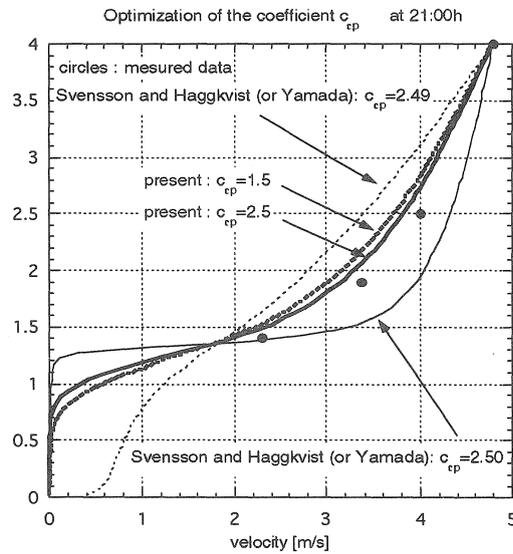


Figure 1 Optimization of the coefficient  $c_{ep}$

入力条件(境界条件)として用いたデータは1時間毎のデータを読み取り、線形補間を行い、連続データとした。短波放射に関しては、前もって1時間毎に計算し吸収量を求めておいた。それらに線形補間を行い、連続したデータとした。Ross のモデルの計算は Schuster-Schwarzchild 近似<sup>27)</sup>を用いた。流体部の計算は安定性解析より安定なタイムステップを算出し、そのタイムステップで非定常計算を行った。長波放射、葉面での各収支、及び気孔コンダクタンスの計算は1分毎に行った。これらのプログラムは乱流モデルのプログラムの中に組み込まれている。計算値は1時間毎に出力した。初期条件は8月18日(午前1時)のデータを境界条件として定常計算し、その結果を3日間の計算のための初期値とした。

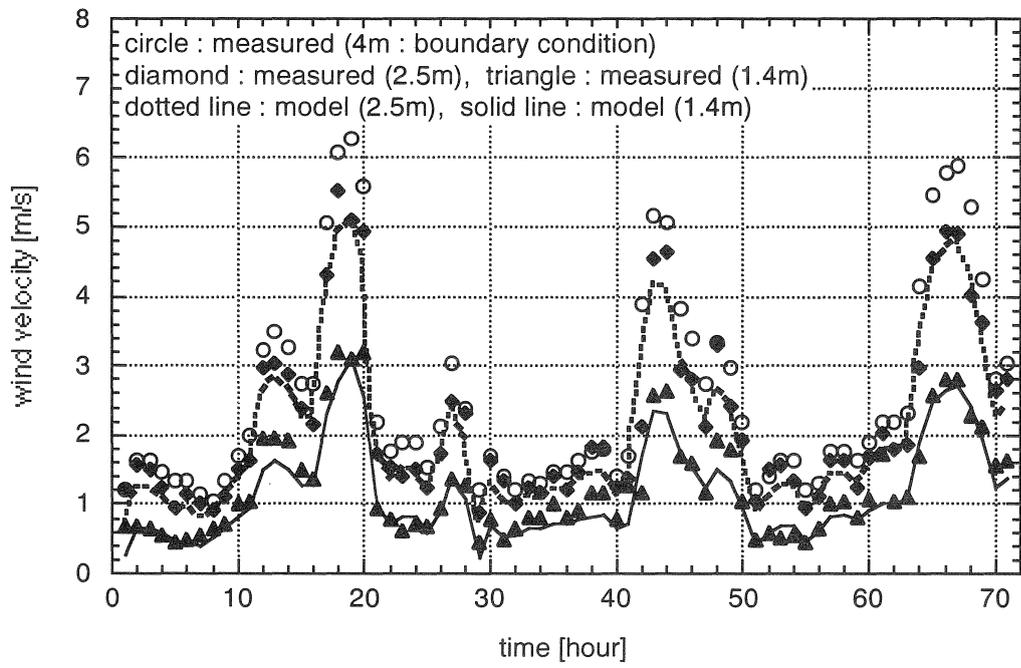


Figure 2 Measured and calculated diurnal changes in wind velocity

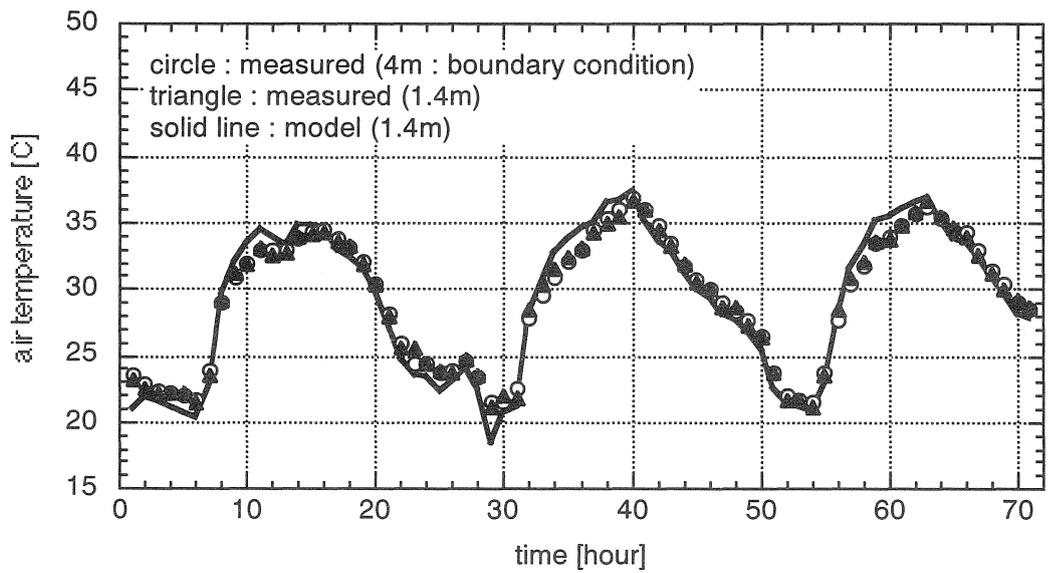


Figure 3 Measured and calculated diurnal changes in air temperature

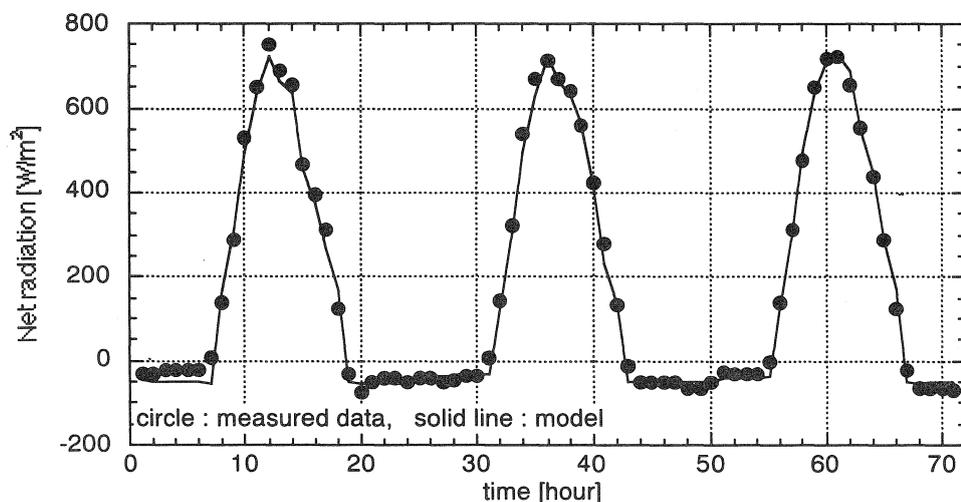


Figure 4 Net radiant flux (measured and calculated)

### 3. 計算結果と測定値との比較

図2は8月18日(午前1時)から20日(午後11時)までの風速の測定値と計算値との比較を示す。風向が示されていないため、風向の変化を考慮した計算はできなかったが、全体として良い一致を示している。図3は気温の測定値と計算値との比較を示す。結果は風速の場合より良い一致を示す<sup>注3)</sup>。図4は正味放射量の測定値と計算値との比較を示す。結果は良い一致を示す。

Naot and Mahrer の測定では蒸発散速度も測定されているが、夜間に土壌からの比較的大きな蒸発量が観測されている。また、夜間に逆の値を示す場合もしばしばあった。また、当時は渦相関法による測定誤差の正確な補正法が確立していなかったため、乱流フラックスの測定精度に問題がある(文字からの private communication)。そのため、蒸散速度の比較はできなかった。

以上、今回は綿用に最適化された気孔コンダクタンスモデルも熱伝達率も利用することはできなかったが、計算結果は測定値と良い一致を示した。

### 4. まとめと今後の課題

文献<sup>20)</sup>で提案した植栽の熱・水分収支モデルでの計算結果と測定データとの比較を行い、モデルの有効性を確かめた。また、気温形成には、気孔コンダクタンスが重要な役割を果たすことが解った。今後、土壌内の熱・水分同時移動式と根からの水分吸収モデルを組み込む必要がある。また、根呼吸、土壌呼吸モデルの開発が、土壌からの二酸化炭素の吸放出フラックスを知る上で必要である。

[注1] Thorgeirsson and Soegaard<sup>23)</sup>の土壌呼吸の実験式では、地中5cmの土壌温をパラメータとしている。Naot and Mahrer の測定では地中5cmの土壌温は測定されていない。そのため、地中10cmの土壌温をパラメータとして用いた。CO<sub>2</sub>モル分率が300~380[μmol/mol]の範囲では二酸化炭素の変化は気孔コンダクタンスにそれ程影響を及ぼさない。

[注2] 係数  $c_{ep}$  の決定には、浮力の影響の少ない、午後9時の風速のデータを用いた。Svennson and Häggkvist<sup>28)</sup>(或は、Yamada<sup>29)</sup>)のモデルの結果も図示している。彼らのモデルは、今日最も使用されている。しかし、結果は図1に示すように、係数  $c_{ep}$  の変化に過敏に反応する。この現象はWilson and Shaw<sup>12)</sup>のデータの場合でも生じた。彼らの  $\epsilon$  式は次式で表される。

$$\frac{D\epsilon}{Dt} = \left(\frac{\epsilon}{k}\right) \left[ c_{e1} P_k + c_{ep} F_j U_j - c_{e2} \epsilon \right] + DIFF[\epsilon]$$

[注3] 気温の計算値と測定値との一致に比べ、風速において一致が悪いのは種々の原因の内、以下の点が考えられる：計算結果はキャンピー上空では対数則に従っている。しかし、2.5m高さの風速の測定値は計算値と一致しない場合がある。即ち、対数則に従っていない。

この原因として“穂波”の現象が考えられる。また、風速が小さい場合には、4m 高さの風速よりも 2.5m 高さの風速の方が大きい場合がある。このことは、自然風は境界層で常に対数則分布をしている訳ではないことを示している。風速の内部不安定による“揺らぎ”が原因と思われる。図3で4m 高さ と 14m 高さの気温（測定値）が常に殆ど一致しているため、浮力が原因とは考えにくい。実際の自然風では、風向が絶えず変化する。また乱流成分と平均風とを正確に分離できないため、モデルによる計算値と測定値が正確に一致しなかったものと思われる。このことは RANS 型のモデルの限界と考えられる。

文献 20 の訂正

1. 54 頁左欄下から 10 行目

(誤)  $[W/m^2s]$  (正)  $[W/m^2]$

2. 55 頁 table 6 最下の式

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

3. 55 頁 table 7 最下の式

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

4. 59 頁右欄 [symbol]欄左側下から 1, 3, 5 行目

(誤)  $[W/molC]$  (正)  $[J/molC]$

5. 60 頁[symbol]欄左から 1 列目,  $H$  の単位

(誤)  $[W/sm^2]$  (正)  $[W/m^2]$

6. 60 頁[symbol]欄左から 1 列目,  $H_{vap}$  の箇所

(誤)  $H_{vap}$ : sensible heat exchange of vapor between air of leaves by transpiration  $[W/sm^2]$

(正)  $H_{vap}$ : sensible heat exchange of vapor between leaves and the surrounding air by transpiration  $[W/m^2]$

7. 60 頁[symbol]欄左から 2 列目,  $Q_{PAR}$  の箇所

(誤)  $1[W/m^2] \sim 4.6[W/m^2]$  (正)  $1[W/m^2] \sim 4.6[\mu mol/sm^2]$

8. 60 頁[symbol]欄左から 2 列目,  $\mathbf{r}$  の箇所

(誤)  $\mathbf{r}$ : unit directional vector (正)  $\mathbf{r}$ : unit directional vector of radiance

参考文献

- (1) 平岡, “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”, *traverse*, 1(2000), *Kyoto university architectural journal*, pp.95-105.
- (2) Waggoner, P.E. and Reifsnnyder, R.E., “Simulation of the temperature, humidity and evaporation profiles in a leaf canopy”, *J. Appl. Meteorol.*, 7(1968), pp.400-409.
- (3) Lemon, E., Stewart, D.W., and Schawcroft, R.W., “The sun’s work in a cornfield”, *Science*, 174(1971), pp.371-378.
- (4) Goudriaan, J., “*Crop Micro-Meteorology: A Simulation Study*”, PODUC, Centre for Agric. Publ. and Doc. Wageningen, The Netherlands, (1977).
- (5) Norman, J.M., “Modelling the complete crop canopy”, in B. Barfield and J. Gerber (eds.), “*Modification of the Aerial Environment of Plants*”, Am. Soc. Agr. Eng. Monograph No.2(1979), pp.249-277.
- (6) 堀江, “気象と作物の光合成, 蒸散そして生長に関するシステム生態学的研究”, *農業技術研究所報告 A* 第 28 号(1981), pp.1-181.
- (7) Meyers, T.M. and Paw U, K. T., “Modelling the plant canopy micro-meteorology with higher order closure principles”, *Agric. For. Meteorol.*, 41(1987), pp.143-163.
- (8) Naot, O. and Mahrer, Y., “Modeling microclimate environments: A verification study”, *Boundary-Layer Meteorol.*, 46(1989), pp.333-354.
- (9) 神田, 日野, “大気-植生-土壌系モデル (NEO-SPAM) による数値シミュレーション, (1) 植生効果のモデリング”, *水文・水資源学会誌*, 3(1990), pp.37-46.
- (10) 神田, 日野, “大気-植生-土壌系モデル (NEO-SPAM) による数値シミュレーション, (2) 植生の気候緩和効果の数値実験”, *水文・水資源学会誌*, 3(1990), pp.47-55.
- (11) 吉本, 原圃, 河村, “大気-植生-土壌系モデルによる高温・高CO<sub>2</sub>濃度条件下のダイズ群落におけるCO<sub>2</sub>収支の解析”, *農業気象*, 56(2000), pp.163-179.
- (12) Wilson, N.R. and Shaw, R.H., “A higher order closure model for canopy flow”, *J. Appl. Meteorol.*, 16(1977), pp.1197-1205.
- (13) Mellor, G.L. and Yamada, T., “A hierarchy of the turbulence closure models for the planetary boundary layers”, *J. Atmos. Sci.*, 31(1974), pp.1791-1806.
- (14) Avissar, R., Avissar, P., Mahrer, Y., and Bradov, B.A., “A model to simulate plant stomata response to environmental parameters”, *Agric. For. Meteorol.*, 34(1985), pp.21-29.
- (15) Jarvis, P.G., “The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field”, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, B.272(1976), pp.593-610.

- (16) Philip, J.R. and De Vries, D.A., "Moisture movement in porous materials under temperature gradients", *Trans. Am. Geophys. Union*, 38(1957), pp.222-232.
- (17) Kondo, J. and Akashi, A., "Numerical study on the two dimensional flow in horizontally homogeneous canopy layers", *Boundary-Layer Meteorol.*, 10(1976), pp.255-272.
- (18) Herkelrath, W.N., Miller, E.E., and Gerner, W.R., "Water uptake by plants. 2. the root contact model", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41(1977), pp.1039-1043.
- (19) Harley, P.C. and Tenhunen, J.D., "Modeling the photosynthetic response of  $C_3$  leaves to environmental factors", in '*Modeling Crop Photosynthesis – from biochemistry to canopy*', (ed. by Boote, K.J. and Loomis, R.S.), CSSA Special Publication No.19(1991), pp.17-39.
- (20) 平岡, "樹木の熱・水分・二酸化炭素収支のモデル化に関する考察", *日本建築学会計画系論文集*, 第 546 号(2001), pp.53-60.
- (21) Daudet, F.A, Silverstre, J., Ferreira, M.I., Valancogne, C., and Pradelle, F., "Leaf boundary layer conductance in a vineyard in Portugal", *Agric. For. Meteorol.*, 89(1998), pp.255-267.
- (22) Ross, J., '*The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*', Dr W. Junk, (1981).
- (23) Thorgeirsson, H. and Soegaard, H., "Simulated carbon dioxide exchange of leaves of barley scaled to the canopy and compared to measured fluxes", *Agri. Forest Meteorol.*, 98&99(1999), pp.479-489.
- (24) Collatz, G.J., Givert, 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 Meteorol.*, 54(1991), pp.107-136.
- (25) Ball, J.T., '*An Analysis of Stomatal Conductance*', Stanford University, Ph.D thesis, (1988).
- (26) Harley, P.C., Thomas, R.B., Reynolds, J.F., and Strain, B.R., "Modelling photosynthesis of cotton grown in elevated  $CO_2$ ", *Plant, Cell and Environ.*, 15(1992), pp.271-282.
- (27) Siegel, R. and Howell, J.R., '*Thermal Radiation Heat Transfer*', McGraw-Hill, (1972).
- (28) Svensson, U. and Haggkvist, K., "A two-equation turbulence model for canopy flows", *J. Wind Eng. and Industrial Aerodyn.*, 35(1990), pp.201-211.
- (29) Yamada, T., "A numerical model study of turbulence airflow in and above a forest canopy", *J. Meteorol. Soc. Japan*, 60(1982), pp.439-454.