

# $k-\epsilon$ モデルを使った2次元森林シミュレーション

鈴木一成 (岐阜大学大学院・工学研究科)

玉川一郎 (岐阜大学・工学部)

## 1 はじめに

温室効果気体の増加とそれに伴う地球温暖化に関連して、現在、陸域生態系の効果が注目されている。その為には、長期にわたる正確な観測とそのモデル化が必要であり、観測についてはその領域代表性がもっとも大きな問題となる。しかしながら、その代表性を調べるだけの高密度観測は現実には非常に困難である。

そこで、本研究では森林の2次元の数値シミュレーションを行い、不均一な森林で現在行われている観測値がどのような意味をもつのかを考察する。

## 2 モデルの構築と基礎方程式

各種の植生で覆われた森林と大気との間で行われるエネルギー、物質交換過程を調べるために本研究では植生層を18層(1[m]間隔)に分割して計算を行う $k-\epsilon$ 型2次元植生多層モデルを構築した。モデルの概要をFig.1に模式図として示す。構成する方程式系は高橋<sup>1)</sup>の鉛直1次元モデルとほとんど同じである。乱流輸送に関しては平岡ら<sup>2)</sup>の作成した乱流モデルを用いた。それぞれの方程式系ならびに式中の記号、パラメータの説明をTable 1に示す。主に大気系、植生(土壌)系の2つの系からなり、葉(地表)面と大気との熱の収支及びCO<sub>2</sub>収支によって結合されている。

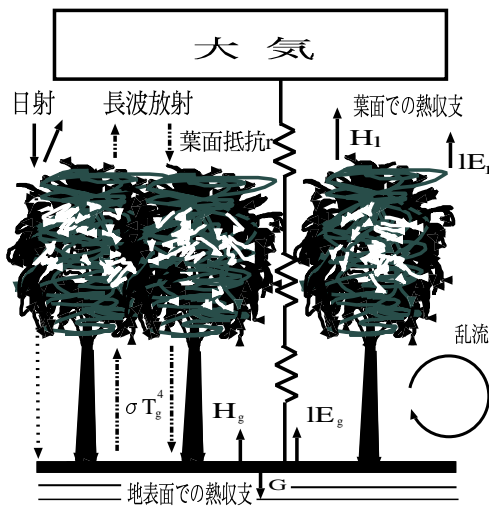


Fig. 1: モデルの概念図

「大気系方程式」は、流れ場に群落抵抗を付加した2次元 Navier-Stokes 方程式 (2)、葉面と大気との物質・エネルギーの交換の項を付加した移流拡散方程式 (5)~(7) からなる。乱流粘性係数  $\nu_t$  は  $k-\epsilon$  モデル (式 (3)、(4)) から求め、熱の乱流拡散係数  $\alpha_t$  は乱流プラントル数が一定 (0.9) となるよう  $\alpha_t = 0.9\nu_t$  を与えた。圧力に関しては式 (1) を考慮して式 (2) よりポアソン方程式を導き緩和法により解いた。式 (5)~(7) の最終項が葉面からの交換量である。

「植生(土壌)系方程式」は式 (8)~(15) からなる。放射伝達は1次元として式 (11)~(13) で表した。式 (8) は葉面の熱収支式で葉面の生理学的機能は Jarvis(1976)<sup>3)</sup> の気孔コンダクタンスモデル (式 (9)) で表現した。

また式 (2)、(4) にでてくる係数  $C_d$  及び  $C_{pe}$  は予備実験を行い、 $C_d = 0.25$ 、 $C_{pe} = 0.8$  とした。

未知変数は風速 ( $u, w$ )、圧力  $P$ 、気温  $T$ 、比湿  $q$ 、CO<sub>2</sub> 濃度  $c$ 、葉面温度  $T_l$ 、地表面温度  $T_g$ 、さらに各層における放射量 ( $S^\downarrow, L^\downarrow, L^\uparrow$ ) の11個であり、(1)~(15) の基本方程式及び境界条件等からなる連立方程式を差分化し時間積分を行った。流れ場の計算では時間ステップを0.01秒間隔とし、葉面温度などの計算は0.1秒間隔とした。移流項は1次の風上差分で求め、格子点配置はスタガード格子を用いた。

## 3 実験条件

本モデルを名古屋大学構内の二次林に適用した。上端境界条件として構内の微気象観測、CO<sub>2</sub> 濃度集中観測及び中京 TV 塔での観測データを用いた。また、計測されたタワー付近の葉面積密度の鉛直分布 (高橋<sup>1)</sup>) と Fig.2 で表される樹木の分布図 (鳥羽、私信) を組み合わせて2次元の葉面積密度分布を作成した。図の中心に観測タワー (20.75[m]) が建てられており、A が今回の計算対象領域で B が計測された葉面積密度分布の領域である。

今回は樹木を以下の3パターンで配置し、数値シミュレーションを行った。

- 水平一様に配置。(‘水平一様モデル’)  
計測されたタワー付近の葉面積密度分布を水平一様に与えた。

Table 1:  $k - \varepsilon$  型 2 次元植生多層モデル基礎方程式

(連続の式)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

(運動量の輸送拡散方程式)

$$\frac{DU_i}{D\tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u_i u_j}) - F_{r_i} \quad (2)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad \overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} k \delta_{i,j} - \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

$$F_{r_i} = a C_d U_i [U_j^2]^{\frac{1}{2}}$$

(乱流エネルギー、粘性消散率の輸送拡散方程式)

$$\frac{Dk}{D\tau} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} = P_k - \varepsilon + F_k \quad (3)$$

$$\frac{D\varepsilon}{D\tau} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon + C_{p\varepsilon} F_\varepsilon) \quad (4)$$

$$F_k = U_i \cdot F_{r_i}, \quad P_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

$$F_\varepsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L}, \quad L \propto \frac{1}{a}$$

(気温・比湿・CO<sub>2</sub> の輸送拡散方程式)

$$\frac{DT}{D\tau} = \frac{\partial}{\partial x_i} (-\overline{u_i t}) + ac_h U [T_l - T] \quad (5)$$

$$\frac{Dq}{D\tau} = \frac{\partial}{\partial x_i} (-\overline{u_i q}) + ac_e U [q_{sat}(T_l) - q] \quad (6)$$

$$\frac{DC}{D\tau} = \frac{\partial}{\partial x_i} (-\overline{u_i c}) + ac_{co_2} U [C_{leaf} - C] \quad (7)$$

$$\alpha_t = \frac{\nu_t}{Pr_t}, \quad \overline{u_i t} = -\alpha_t \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

$$\overline{u_i q} = -\alpha_t \frac{\partial q}{\partial x_i}, \quad \overline{u_i c} = -\alpha_t \frac{\partial C}{\partial x_i}$$

(葉面の熱収支式)

$$F S^\downarrow + F(L^\downarrow + L^\uparrow) = 2F\sigma T_l^4 + H_l + lE_l + F_l \quad (8)$$

$$H_l = c_p \rho c_h U [T_l - T], \quad E_l = \rho c_e U [q_{sat}(T_l) - q]$$

(葉面の交換係数)

$$r_a = \frac{1}{c_h U}, \quad r_s = \frac{1}{0.018 g_s}$$

$$\frac{1}{c_e U} = r_a + r_s, \quad \frac{1}{c_{co_2} U} = 1.6^{2/3} + 1.6 r_s$$

$$g_s = \frac{g_{s,MAX} \cdot PAR}{PAR + g_{s,MAX}/A} \cdot (1 - B\Delta e) \cdot \left( \frac{T - T_n}{T_o - T_n} \right) \left( \frac{T_x - T}{T_x - T_o} \right)^{(T_x - T_o)/(T_o - T_n)} \quad (9)$$

(地表面の熱収支式)

$$(1 - ref_g) S_g^\downarrow + L_g^\downarrow + L_g^\uparrow = H_g + lE_g + G \quad (10)$$

(放射伝達式)

$$\frac{dS^\downarrow}{dz} = F_a S^\downarrow \quad (11)$$

$$\frac{dL^\downarrow}{dz} = F_a L^\downarrow - F_a \sigma T_c^4 \quad (12)$$

$$\frac{dL^\uparrow}{dz} = -F_a L^\uparrow + F_a \sigma T_c^4 \quad (13)$$

(葉(地表)面温度の予報式)

$$\frac{dT_l}{d\tau} = \frac{F_l}{\rho_l \cdot C_l \cdot V_l} \quad (14)$$

$$\frac{dT_g}{d\tau} = \frac{F_g}{\rho_g \cdot C_g \cdot V_g} \quad (15)$$

$U_i$ : 風速の 2 成分、 $P$ : 圧力 (静水圧からのずれ)、 $\nu_t$ : 乱流粘性係数、 $a$ : 葉面積密度、 $k$ : 乱流エネルギー、 $\varepsilon$ : 粘性消散率、 $T$ : 気温、 $q$ : 比湿、 $C$ : CO<sub>2</sub> 濃度、 $\alpha_t$ : 熱の乱流拡散係数、 $S^\downarrow$ : 下向きの短波放射、 $L^\downarrow$ : 下向きの長波放射、 $L^\uparrow$ : 上向きの長波放射、 $\sigma$ : ステファンボルツマン定数、 $F$ : 葉の傾きファクター (0.5)、 $C_p$ : 空気定圧比熱、 $\rho$ : 空気密度、 $T_l$ : 葉面温度、 $l$ : 水の気化熱、 $q_{sat}(T_l)$ : 温度  $T_l$  における飽和比湿、 $g_s$ : 気孔コンダクタンス、 $g_{s,MAX}$ : 最大気孔コンダクタンス、 $PAR$ : 光合成有効放射量、 $\Delta e$ : 飽和差、 $T_n$ : 最小気温、 $T_o$ : 最適気温、 $T_x$ : 最大気温、 $ref_g$ : 地表面のアルベド、 $G$ : 地中熱流量、 $\rho$ : 葉の密度、 $C_l$ : 葉の熱容量、 $V_l$ : 葉の体積、 $\rho_g$ : 土壌の密度、 $C_g$ : 土壌の熱容量、 $V_g$ : 土壌の体積

$C_\mu$ : 0.09、 $C_d$ : 0.25、 $\sigma_k$ : 1.0、 $\sigma_\varepsilon$ : 1.3、 $C_{\varepsilon 1}$ : 1.44、 $C_{\varepsilon 2}$ : 1.92、 $C_{p\varepsilon}$ : 0.8、 $C_d$ : 0.25、 $c_h$ : 0.06、 $A$ 、 $B$ : 植生によって決まる。

- 現実の樹木配置。(‘2次元モデル’)

実際の樹木分布に近い形で今回作成した 2 次元の葉面積密度分布を与えた。

- 領域半分に配置。(‘森林境界モデル’)

モデルは周期境界であり、森林境界の現象を見るために 2 次元モデルの葉面積密度分布の半分を 0 にした。

以降、この 3 パターンの樹木配置でのシミュレーション結果を、( ) 内の名前で表現する。

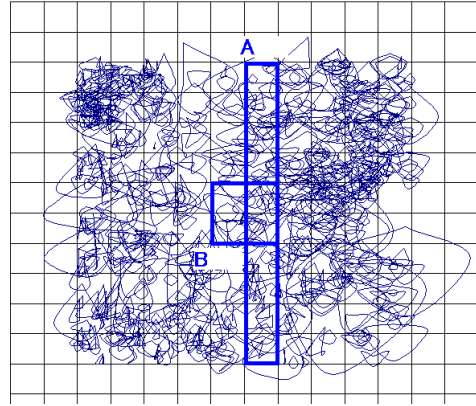


Fig. 2: 樹木の分布図 (鳥羽、私信)

名古屋大学構内の二次林における樹木の分布図である。図の中心に観測タワーが建てられており、格子幅は縦横ともに 5[m] である。(上が北である)。

#### 4 実験結果及び考察

Fig.3 に 2000 年 8 月 22 日のタワー上端 (20.75[m]) における顕熱 ( $H$ )、潜熱 ( $lE$ )、CO<sub>2</sub> フラックス ( $F_{CO_2}$ )、気温 ( $T$ ) の観測値 (点) と ‘2次元モデル’ の計算値 (実線) 及び ‘水平一様モデル’ の計算値 (波線) を示す。

はじめに観測値とモデルの計算値の比較を行う。フラックス、物理量ともに若干の差はあるものの、良好に観測値を再現できているといえる。この日は観測より 10 時、12 時、14 時に曇ったことがわかっている。その影響で顕熱フラックス、潜熱フラックスの観測値がその時ともに減少している。計算値もこれをよく再現できている。CO<sub>2</sub> フラックスについても量的には観測値、計算値に差があるものの、曇ったことによる光合成量の減少は計算値も再現できている。観測では夜間に潜熱フラックスが負の値になっている。これは夜間に放射冷却による葉面の結露と考えられる現象を示している。今回モデルでは葉面での水蒸気交換は気孔でのみ行われると仮定しており、日射のない夜間は気孔を閉じており、大気との交換をゼロとしている。したがって結露のような葉の気孔以外で起こる水蒸気交換は表現できない。その結果潜熱フラックスがなく、熱収支のバランスをとるために顕熱フラックスが負になったと考えられる。またそれが原因で、気温の低下にもつながったと考えられる。

次に‘2次元モデル’の計算値と‘水平一様モデル’の計算値の比較を行う。気温(T)の日変化を見てみると‘水平一様モデル’に比べ‘2次元モデル’の気温は低くなり、これは観測値をほぼ再現できている。これはタワー付近の葉の分布は森林全体からみると密であり、‘水平一様モデル’では現実より密な森林を考えてしまっている。その影響で気温が観測値より上昇してしまったのではないかと考えられる。しかしながら‘2次元モデル’はより現実に近い葉の分布をしており、気温が高くなりすぎなかったのは、周りの冷たい空気の移流の効果と考えられる。

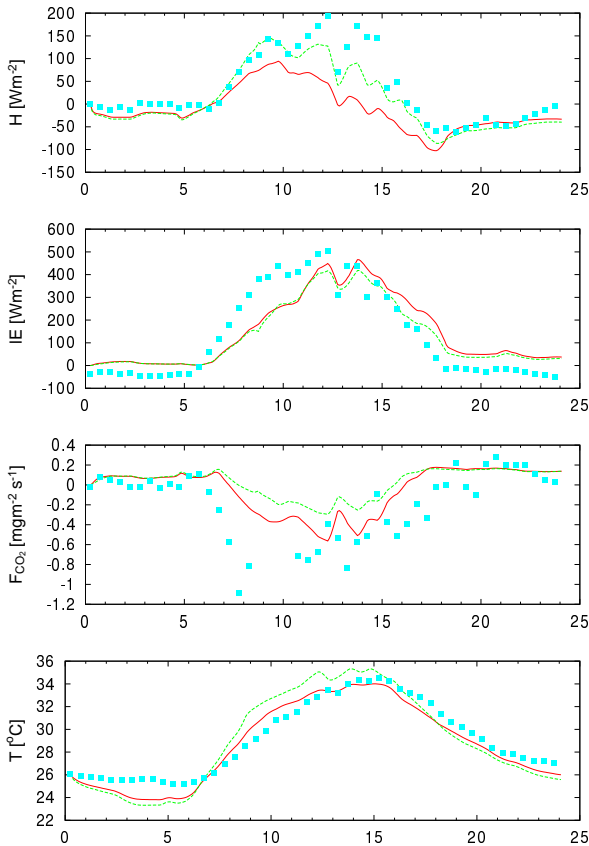


Fig. 3: 日変化

タワー上端 (20.75[m]) における各フラックス及び気温の日変化を示したものである。上から顕熱 (H)、潜熱 (IE) および CO<sub>2</sub> フラックス (F<sub>co2</sub>)、気温 (T) である。点が観測値、実線が‘2次元モデル’の計算値、破線が‘水平一様モデル’の計算値である。

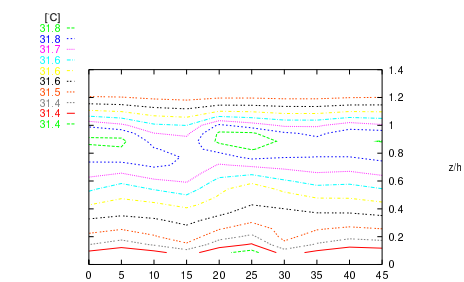
Fig.4 は‘2次元モデル’の 10[hour] における気温、CO<sub>2</sub> 濃度の分布図である。図の縦軸は樹高で無次元化した高度である。以降、高度と呼ぶ。

上の図は気温の分布図である。水平 0 ~ 5[m]、高度 0.9 付近と、水平 20 ~ 25[m]、高度 0.9 付近に気温のピークがみられる。ここはもっとも葉面積密度が大きく、日射量の多い森林上層である。逆にその下層では日射エネルギーが上層でほとんど吸収されるので、周囲より気温が低くなっている。また森林上層では乱れが大きく上下の温度差が少ないのに対し、森林下層で

は風速、乱れがともに弱く上下に混ざらないこともわかる。

下の図は CO<sub>2</sub> 濃度の分布図である。図からわかるように CO<sub>2</sub> 濃度の極小値は森林上層ではなくその少し下、高度 0.6 ~ 0.8 付近にある。森林のはたらきによる CO<sub>2</sub> の吸収量は森林上層で最大値となるが、ここは都市内の二次林であり常に上方から濃度の濃い空気が森林内に入ってきて、徐々に吸収されながら CO<sub>2</sub> 濃度が減少していく。また下層では土壌呼吸や葉面の呼吸などによって CO<sub>2</sub> は排出される。したがって濃度の極小値はその途中の、本モデルでは高度 0.6 ~ 0.8 付近に現れる。水平位置でみると、極小値の地点は水平 10 ~ 15[m]、25[m] 付近である。水平 10 ~ 15[m] に関してみると、ここは上層林がなく中層林が多く繁茂している場所である。仮に 1次元モデルで実験を行ったとすると、この地点の高度 1 付近には葉がないので CO<sub>2</sub> 濃度は吸収されず、極小値の地点はもう少し下層になる。しかしながら今回は 2次元モデルであり、周囲の上層林が CO<sub>2</sub> を吸収し乱流によって濃度が平均化される。極小値の地点には、はじめから濃度の薄い空気が流れ込んでくるので、CO<sub>2</sub> の吸収量が最大となるこの地点で極小値が現れたと考えることができる。

気温の分布図



CO<sub>2</sub> 濃度の分布図

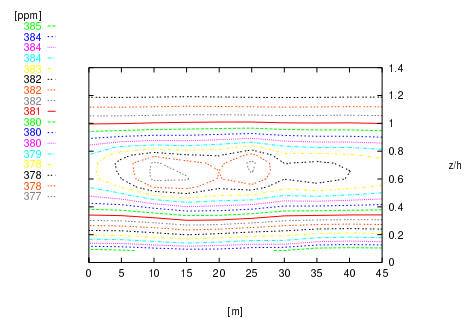


Fig. 4: 10[hour] における気温、CO<sub>2</sub> 濃度の分布図  
10[hour] における気温、CO<sub>2</sub> 濃度の分布図である。ともに縦軸が樹高 h[m] で無次元化した高度、横軸が水平距離 [m] である。

Fig.5 は高度 18[m](樹高)、21[m](観測地点)、30[m] における鉛直風及び顕熱フラックスの水平分布である。図より、樹木の分布の不均一性によって生じた鉛直風

が 30[m] 付近までほとんどなくなる事がわかる。しかしながらその値は小さく、それによる輸送量  $\overline{WT} = \int_{45}^0 W_x \cdot T_x dx$  は乱流輸送量の 1% 程度である。また顕熱フラックスをみてみると、高度 18[m] では不均一性の影響で値に大きな差があるが、上空 30[m] (高度 1.7) 付近では、場所による違いはほとんどなくなる。

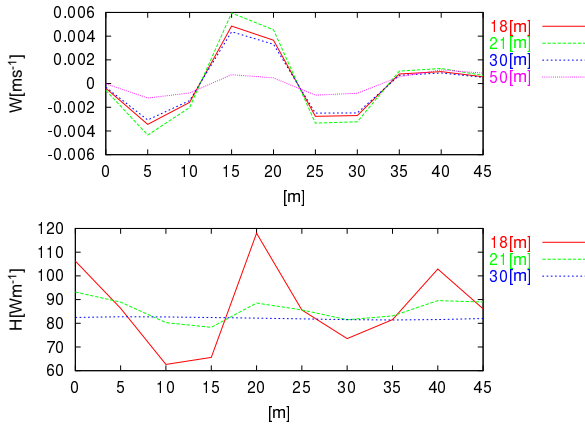


Fig. 5: ある高度における W 及び H の水平分布  
ある高度 (18[m]:樹高、21[m]:観測地点、30[m]) における鉛直風 (W) 及び顕熱フラックス (H) の水平分布である。

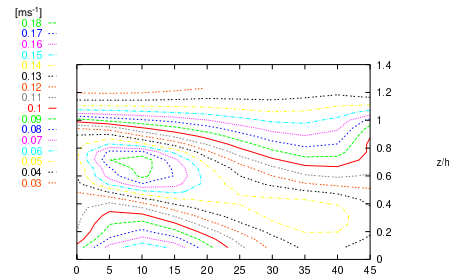
Fig.6 は ‘森林境界モデル’ における 10[hour] の風速差 (‘2次元モデル’ との差)、気温の分布図である。風速差の図をみてみると、全体的に森林がなくなったことによって抵抗量が減るので風速は大きくなっていることがわかる。水平 0 ~ 15[m] までは森林がなくなったので変化量が多いのは明かであるが、他にも水平 30 ~ 40[m]、高度 0.2 ~ 0.4 でも変化量が多いのが読み取れる。‘2次元モデル’ では運動量は抵抗の多い森林上層を通らなければ伝わって来ることができなかったが、‘森林境界’ では横からの運動量の輸送があり、葉による抵抗のないこの地点の風速がより大きくなったと考えられる。

次に気温の図をみてみると、先の ‘2次元モデル’ の計算値では気温のピークが水平 20 ~ 25、高度 0.8 ~ 1 であったのに対し、‘森林境界モデル’ では、水平 40 ~ 45 へと変化していることがわかる。これは風速が大きくなったことや、森林外の冷たい空気によって水平 20 ~ 25 地点の顕熱フラックスが増加し、気温の上昇が抑えられたと考えられる。水平 20[m]、高度 0.86 での顕熱フラックスの増加率は 1.75 倍であった。しかしながら今回放射過程を 1次元としており、森林境界における放射量の増加は再現できていない。

## 5 まとめ

樹木分布の不均一性の与える影響について考察するために、 $k-\epsilon$  型 2次元植生多層モデルを構築し、名古屋大学構内の二次林に適用した。本モデルで水平一

## 風速差の分布図



## 気温の分布図

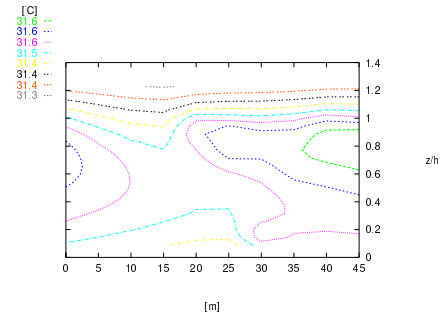


Fig. 6: 10[h] における風速差、気温の分布図  
10[h] における風速差、気温の分布図である。ともに縦軸が樹高 h[m] で無次元化した高度、横軸が水平距離 [m] である。

様での計算も行い 2次元との比較をした。

結果、両モデルとも若干の差があったものの観測値を再現できた。‘2次元モデル’、‘水平一様モデル’の計算値に移流の効果による違いがあったものの、観測地点でその差は小さく、ある一点でのフラックス量を見積もる目的なら 1次元モデルで十分再現できることがわかった。

また ‘2次元モデル’ での計算値からフラックス量において、樹木分布の不均一性の影響は樹高の 1.5 ~ 2 倍の高さでほとんどなくなることがわかった。

森林境界では風速が大きいことや外のフレッシュな大気が流入することでフラックス量が増加することがわかった。しかしながら今回は計算領域が狭く、その影響がどこまで続くかは示せなかった。

## 参考文献

- 1). 高橋 厚裕 (1999): 大気-森林間のエネルギー・物質交換過程に関する研究. 修士論文, 名古屋大学.
- 2). 平岡 久司・丸山 敬・中村 泰人・桂 順治 (1989): 森林群落内および都市キャノピー内の乱流輸送に関する研究 (その 1). 日本建築学会計画系論文報告集, 406 号,
- 3). Jarvis, P.G. (1976): The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. Philosophical transaction of the Royal Society of London B, 273, 593-610.