

1次元植物キャノピーモデルを用いた大気境界層モデルの構築とその精度の検討 Development and Verification of Numerical Atmospheric Boundary Layer Model with One-Dimensional Plant Canopy

金 裕奉, 大阪大学大学院, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1, E-mail: ybkim@ga.eng.osaka-u.ac.jp
 山口克人, 大阪大学大学院, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1, E-mail: yamaguti@ga.eng.osaka-u.ac.jp
 町村 尚, 大阪大学大学院, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1, E-mail: mach@ga.eng.osaka-u.ac.jp
 近藤 明, 大阪大学大学院, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1, E-mail: kondo@env.eng.osaka-u.ac.jp
 惣田 訓, 大阪大学大学院, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1, E-mail: soda@ga.eng.osaka-u.ac.jp
 Yu-Bong Kim, Osaka University, 2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka, 565-0871, Japan
 Katsuhito Yamaguchi, Osaka University, 2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka, 565-0871, Japan
 Takashi Machimura, Osaka University, 2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka, 565-0871, Japan
 Akira Kondo, Osaka University, 2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka, 565-0871, Japan
 Satoshi Soda, Osaka University, 2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka, 565-0871, Japan

An atmospheric boundary layer model¹⁾ was combined with two vegetation models, a zero-dimensional vegetation model (Model 1) and a one-dimensional plant canopy model (Model 2), which give the surface boundary conditions for the 3-dimensional numerical atmospheric simulations. The models were applied to the Kansai area (240km x 240km, 5km), then the nesting technique was applied to give the boundary conditions for the Kyoto area (120km x 120km, 5km), Japan. The simulation results of wind vectors and potential temperature were compared with the observed data at Kyotanabe, Kyoto, Sonobe, Otsu, and Minamikomatsu from AMEDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) data. Both models showed good agreements with the observed data in the daytime. However, Model 1 overestimated the wind velocities generated from the mountain at Kyotanabe, Otsu, and Minamikomatsu in the nighttime. It will be concluded that the 1-dimensional plant canopy model can simulate the complex relationships of the momentum, heat, and water vapor within and above the plant canopy.

1. はじめに

植物は人間の生活しているほとんどの環境中に存在し、水分の蒸散や日射の遮断によって日中は周りの温度の上昇を防ぎ、夜間は防風効果と蓄熱効果、長波放射の遮断によって周りの温度の低下を防ぐ効果がある。それゆえ、人間の生活環境に直接関係する微気象に及ぼす植物の影響とその特性を明らかにすることは都市の大気環境の数値モデルを用いて解析する上で極めて重要である。Deardorff²⁾により提案された0次元植生モデルは3次元大気境界層モデルの境界条件としてよく用いられている。そのモデルでは、単層と仮定した植生と土壌面を組み合わせている。植生による抵抗を粗度で表現し、風速の減少効果を考えている。また、植生層の熱収支と地表面の熱収支・水分収支を用いて植生と土壌面の温度・比湿を求め、単純に植生上端の空気と植生層と土壌面との温度・比湿を重み平均した値を大気境界層の温位及び比湿の境界値として設定している。しかしながら、背丈の高い森林の抵抗を粗度を用いて表現することは困難であり、植生の条件によっては単純な重み平均が不適切なことがある。特に、夜間において山風が強くなってしまいと植生内部の温度が高く評価されてしまう問題が挙げられている。したがって、0次元植生モデルにおいて植生内部の特有な微気象とその上空との運動量、水分・熱との相互関係を解析するには限界があると考えられる。実際、植生による大気への影響をより正確に再現・予測するためには植生と大気との運動量、熱および水分の相互関係を明確に表現できるという有次元植生モデルが必要になる。本研究では3次元大気層の地表面の境界条件として1次元植物キャノピーモデルを用いて大気環境の3次元数値モデルを構築した。京都地域を対象として、植生を0次元化した単純なモデルとの比較を行い、その特性を検討した。さらに、アメダスデータを用いてモデルの妥当性を検討した。

2. モデルの概要

3次元大気層の基礎方程式は、運動量の保存式、温位、比湿の保存式、連続の式、および静水力学方程式から構成されてい

る。以下にその基礎式を示す¹⁾。

$$\frac{dU}{dt} = fV - c_p \Theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} + g \frac{z^* - s}{s} \frac{\partial z_G}{\partial x} + D(U) \quad (1)$$

$$\frac{dV}{dt} = -fU - c_p \Theta \frac{\partial \Pi}{\partial y} + g \frac{z^* - s}{s} \frac{\partial z_G}{\partial y} + D(V) \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W^*}{\partial z} - \frac{1}{z^* - s} (G_2 U - G_3 V) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d\Theta}{dt} = D(\Theta), \quad \frac{dq}{dt} = D(q), \quad \frac{\partial \Pi}{\partial z^*} = -G_1 \frac{g}{c_p \Theta} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x} + V \frac{\partial}{\partial y} + W^* \frac{\partial}{\partial z^*} \quad (5)$$

$$D() = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial}{\partial x} + K_H G_2 \frac{\partial}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_H \frac{\partial}{\partial x} + K_H G_2 \frac{\partial}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial}{\partial y} + K_H G_3 \frac{\partial}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_H \frac{\partial}{\partial x} + K_H G_3 \frac{\partial}{\partial z^*} \right) + G_1^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V \frac{\partial}{\partial z^*} \right) \quad (6)$$

ここで、

$$\Pi = \left(\frac{P}{P_0} \right)^{R_d/c_p}, \quad \Theta = T\Pi, \quad z^* = s \frac{z - z_G}{s - z_G}, \quad G_1 = \frac{s}{s - z_G}$$

$$G_2 = \frac{z^* - s}{s - z_G} \frac{\partial z_G}{\partial x}, \quad G_3 = \frac{z^* - s}{s - z_G} \frac{\partial z_G}{\partial y}$$

ここで、x, y, x は Cartesian 座標系であり、U, V, W はそれぞれ x, y, x 方向の風速である。f, g, s はコリオリ力、重力、xyz 座標系の計算領域高さであり、 Θ, q, c_p は温位、比湿、比熱であり、 K_H, K_V はそれぞれ水平、鉛直方向の拡散係数であり、 z_G, z^* はそれぞれ標高、 z^* 座標系の鉛直成分である。T, Π はそれぞれ温度、Exner 関数である。

鉛直方向の乱流拡散係数は標準 k-ε モデルを用いて決定した。3次元大気層の境界条件としては以下に説明するモデル1と2を用いた。

2-1. Model 1 (0次元植生モデル)

3次元大気層の境界条件として0次元植生モデル²⁾を適用した場合の概要を Fig. 1 に示した。そのモデルとしては、植生の高さを地表面と同様なレベルで考えるため、植生の高さは0である。一方、3次元大気層の地表面境界条件は葉面、裸地および水面の温度を土地利用面積により重み平均した値を用いた。

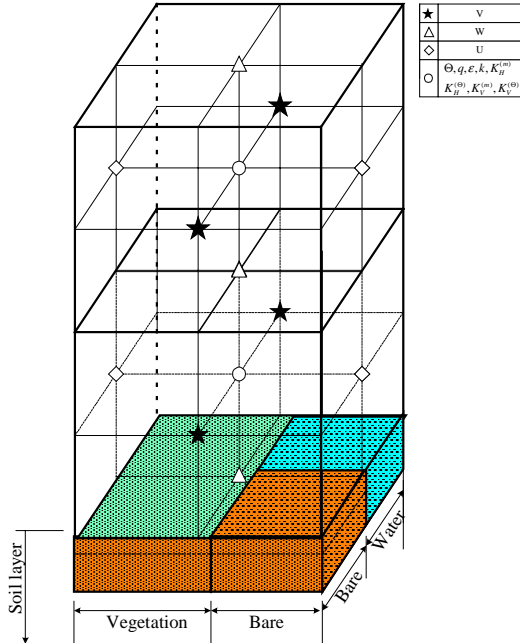


Fig. 1 A schematic diagram of the surface boundary layer of atmospheric boundary layer applying Model 1 as 0 dimensional vegetation model.

2-2. Model 2 (1次元植物キャノピーモデル)

3次元大気層の境界条件として1次元植物キャノピーモデルを

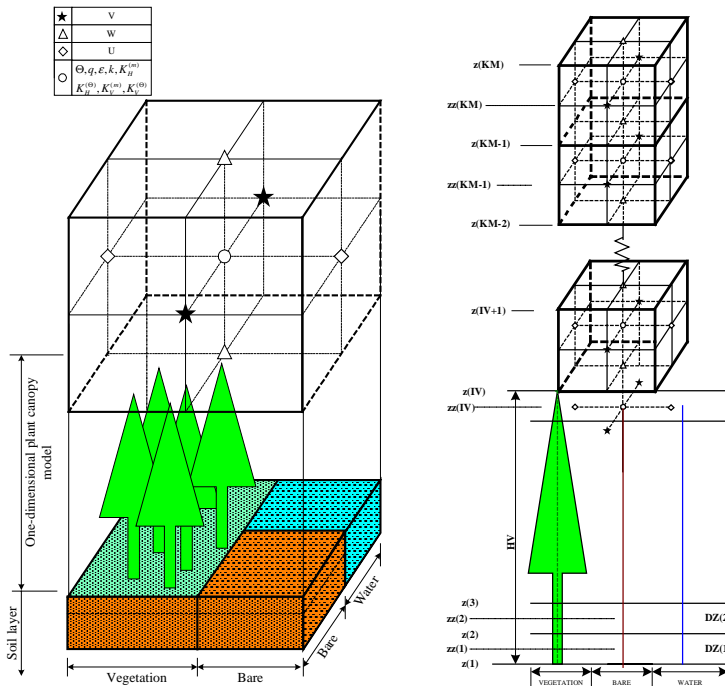


Fig. 2 A schematic diagram of the surface boundary layer of atmospheric boundary layer applying Model 2 as 1 dimensional plant canopy model.

適用した場合の概要を Fig.2 に示した。植生の高さを考えているため、植生と大気との運動量や熱や水蒸気との相互関係をより正確に与えることができる。一つのメッシュは植生と裸地と水の領域で構成されている。植生の高さまでは1次元運動量、温位、比湿の保存式、乱流エネルギー方程式、乱流エネルギー消散率を用いて各領域における風速、温度、比湿、乱流量を求める。植生の高さにおける植生と裸地と水の値を重み平均した値を3次元大気層の地表面境界条件として設定した。植生の高さは20[m]と仮定した。乱流モデルとしては植生の抵抗を考えた標準 k-ε モデル³⁾を用い、植生内部での乱流拡散係数を求めた。乱流エネルギー方程式、乱流エネルギー消散方程式の基礎式を示す³⁾。

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{v_i}{\sigma_i} \frac{\partial k}{\partial z} \right] - \overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{vw} \frac{\partial V}{\partial z} + \beta g \overline{w\theta} - \epsilon \quad (7)$$

$$+ C_d a(z) |U^3 + V^3| - C_d a(z) \sqrt{U^2 + V^2} k$$

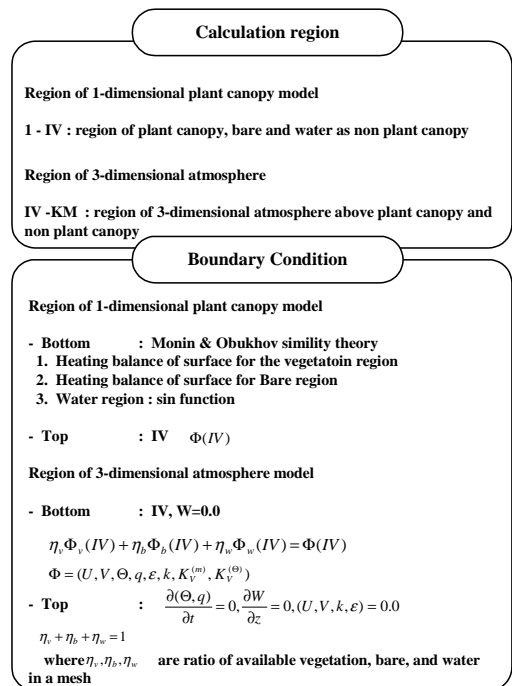
$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{v_i}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right] + \frac{\epsilon}{k} \left[\begin{array}{l} -c_{\epsilon 1} \overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z} - c_{\epsilon 1} \overline{vw} \frac{\partial V}{\partial z} \\ + c_{\epsilon 3} \beta g \overline{w\theta} \\ -c_{\epsilon 2} \epsilon + 1.5 C_d a(z) |U^3 + V^3| \end{array} \right] \quad (8)$$

$$- 0.4 \times 6 C_d a(z) \sqrt{U^2 + V^2} \epsilon$$

$$\overline{uw} = -K_M^{(m)} \frac{\partial U}{\partial z}, \quad \overline{vw} = -K_M^{(m)} \frac{\partial V}{\partial z}, \quad \overline{w\theta} = -K_M^{(\theta)} \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

ここで、k、ε は乱流エネルギー、乱流エネルギーの消散率であり、 \overline{uw} 、 \overline{vw} 、 $\overline{w\theta}$ はそれぞれレイノルズ応力、熱フラックスである。C_d、a(z) は植生の抵抗係数、葉面積密度であり、c_{ε1}、c_{ε2}、c_{ε3} はそれぞれ乱流エネルギー消散方程式の係数である。

式(7)の右辺の第2、3項は風速シア(風速勾配)によるエネルギー生成項、第4項は浮力によるエネルギー生成項、第5項はエネルギー消散項、第6項は植生によるエネルギー生成項、第7項は植生によるエネルギー消散項である。



3. 計算条件

京都地域において流れ場を高い精度で解析するため、多重ネスティングを用いた。ネスティングに用いた計算領域は広領域(Grid A)、狭領域(Grid B)の二つとした(Fig. 3 と Table 1)。シミュレーションは午前8時から開始して3日間行い、初期条件の影響がなくなる3日目の計算結果を用い、1991年～2000年までの8月の晴天日の京都、京田辺、園部、大津、南小松の5ヶ所におけるアメダスの時間平均値との比較を行った。

Table 1 Calculation condition

	Grid A	Grid B
Latitude	33.8700°~35.870°	34.733°~35.400°
longitude	133.950°~136.950°	135.267°~136.267°
Area	240 km×240km	80 km×80km
Grid Number	60×60	80×80
Distance of 1 Mesh	4km	1km

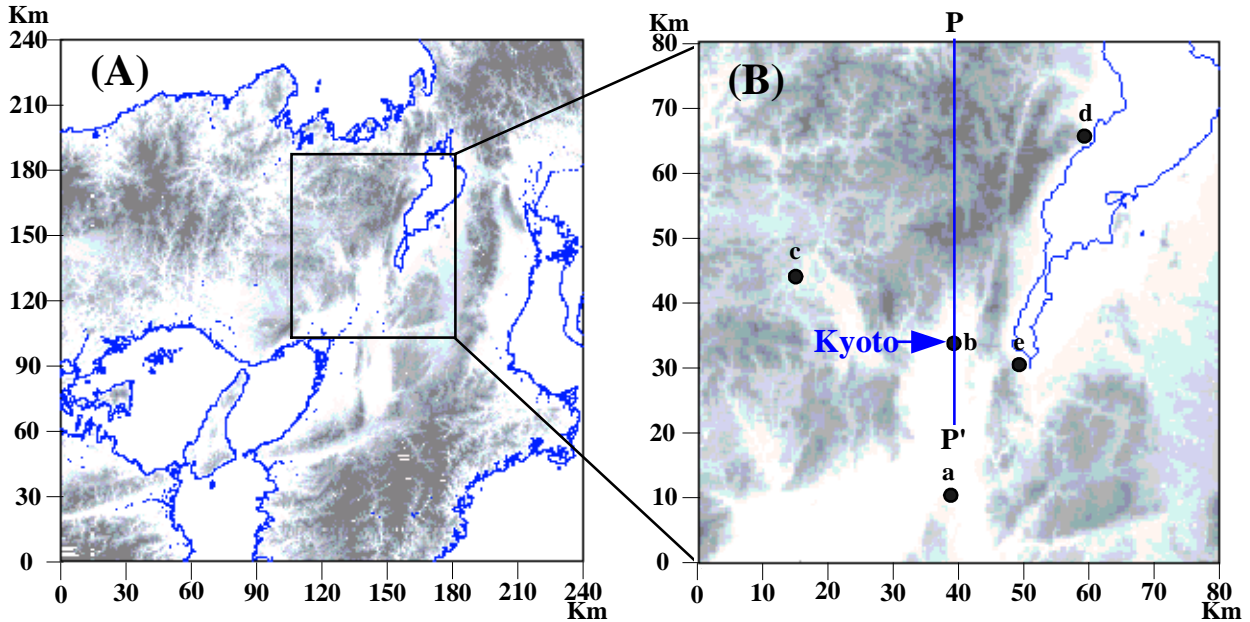


Fig. 3 Calculated Area.

a : Kyotanabe b : Kyoto c : Sonobe d : Otsu e : Minamikomatsu

4. 結果および考察

Fig. 4と5にモデル1およびモデル2を用いた地表面から22mの3日目の12時と24時の狭領域の流れ場の結果を示した。昼間は京都まで海風の影響が見られ、山の部分の風速に少し差が

あるが、全般的な流れ場にモデルによる差異はあまりない。夜間になると、昼間に発生した海風の影響が消えて山風が支配的である。しかしながら、夜間になると、モデル1は山風が強くなっており、モデルによる差異が見られる。

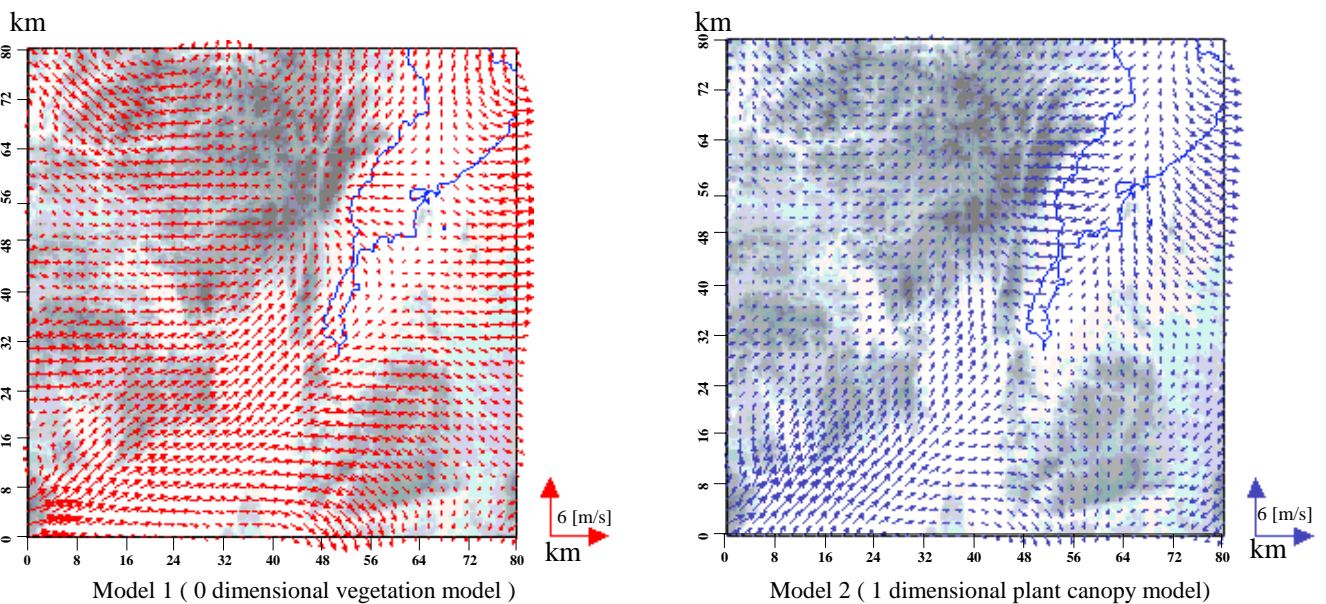


Fig. 4 The modeled horizontal wind vector at 22m above the ground at 12 [LST].

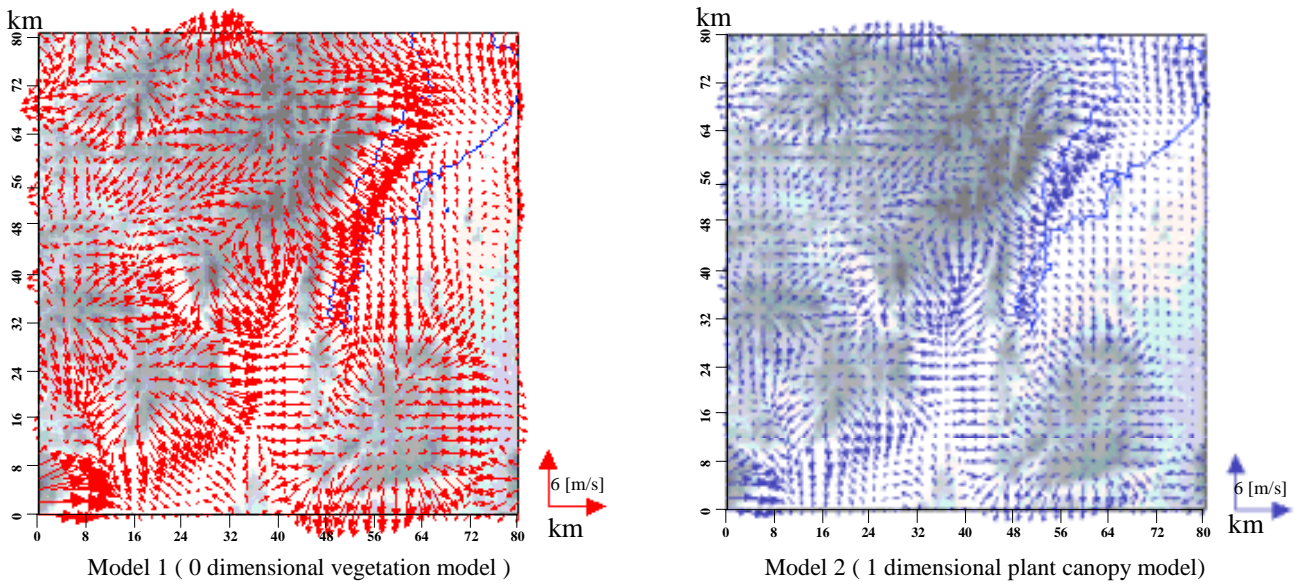


Fig. 5 The modeled horizontal wind vector at 22m above the ground at 24 [LST].

京都において計算結果の流れ場とは、昼間は海陸風の影響を及ぼしており、夜間になると京都は北方向の山部分から山風の影響を及ぼしている。その地域においてモデルによる鉛直方向の風速の特徴を検討するため、Fig.3に示した PP'断面の風速分布をFig. 6と7に示した。その結果によると、Fig.4のように鉛直方向の流れ場は水平方向の流れ場と同様に昼間はモデルによる

大きな差異は見られないことがわかる。しかしながら、夜間になると、京都の北側に位置する山の部分において、地表面から約30mまでのモデルによる差異が大きくなっている。モデル2において山の部分で風速が弱くなっていることは、夜間は大きな乱流混合が行われなため、植生の抵抗による風速の減速効果が行ったと考えられる。

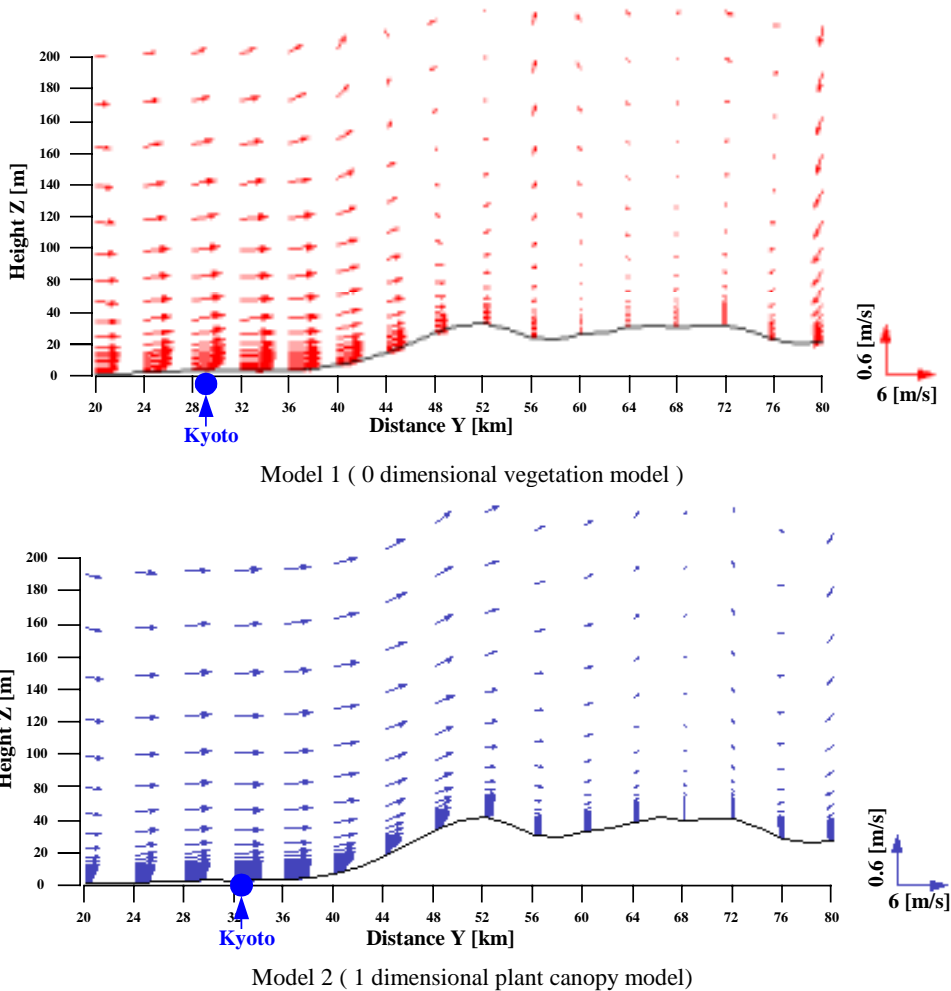


Fig. 6 The modeled wind vector profiles in the vertical plane through PP' in Fig. 3 at 12 [LST].

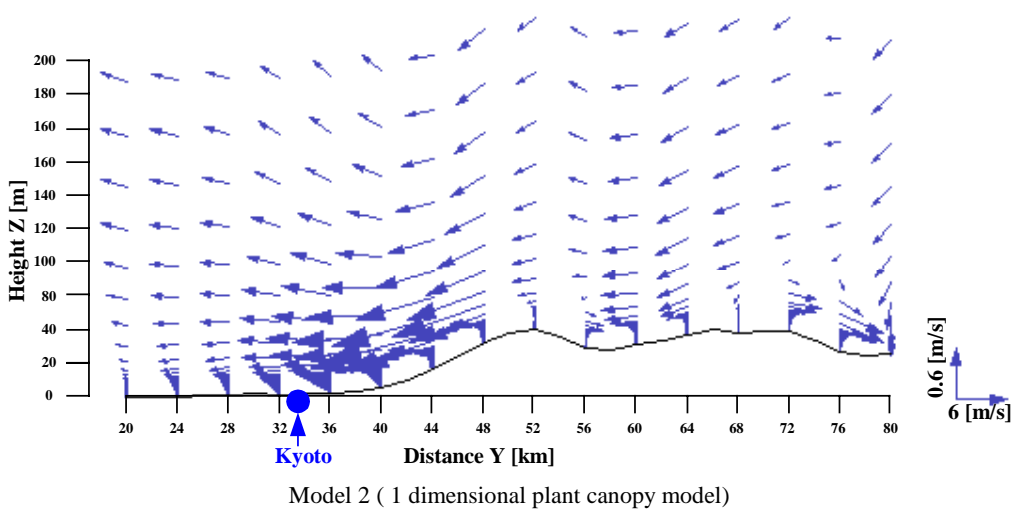
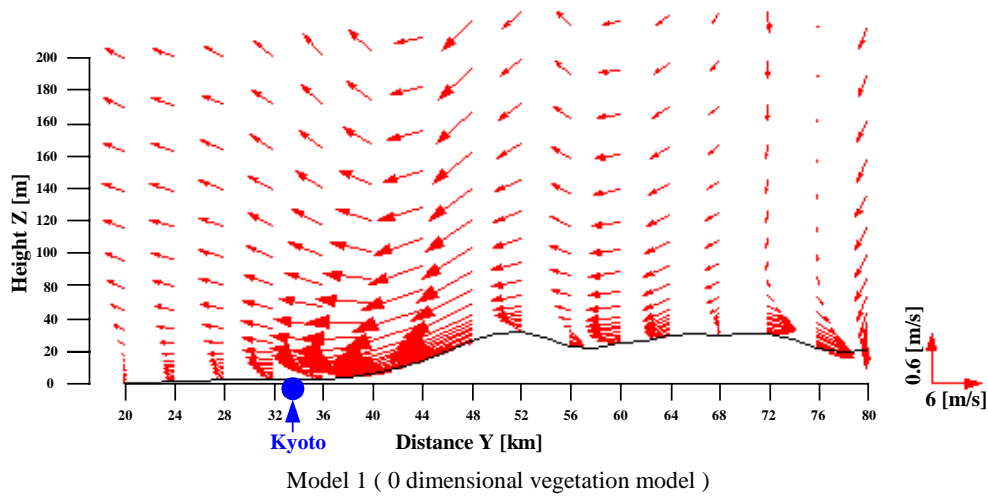


Fig. 7 The modeled wind vector profiles in the vertical plane through PP' in Fig. 3 at 24 [LST].

Fig.8 に 5ヶ所のアメダス観測値と計算値との比較を示した。昼間においては植生モデルの相異による影響はあまり大きくなかったが、夜間においてはその影響が大きく現れ、風向について

ではアメダス観測値とよく一致しないことが多かったが、風速はモデル 2 の方がアメダス観測データとよく一致している。

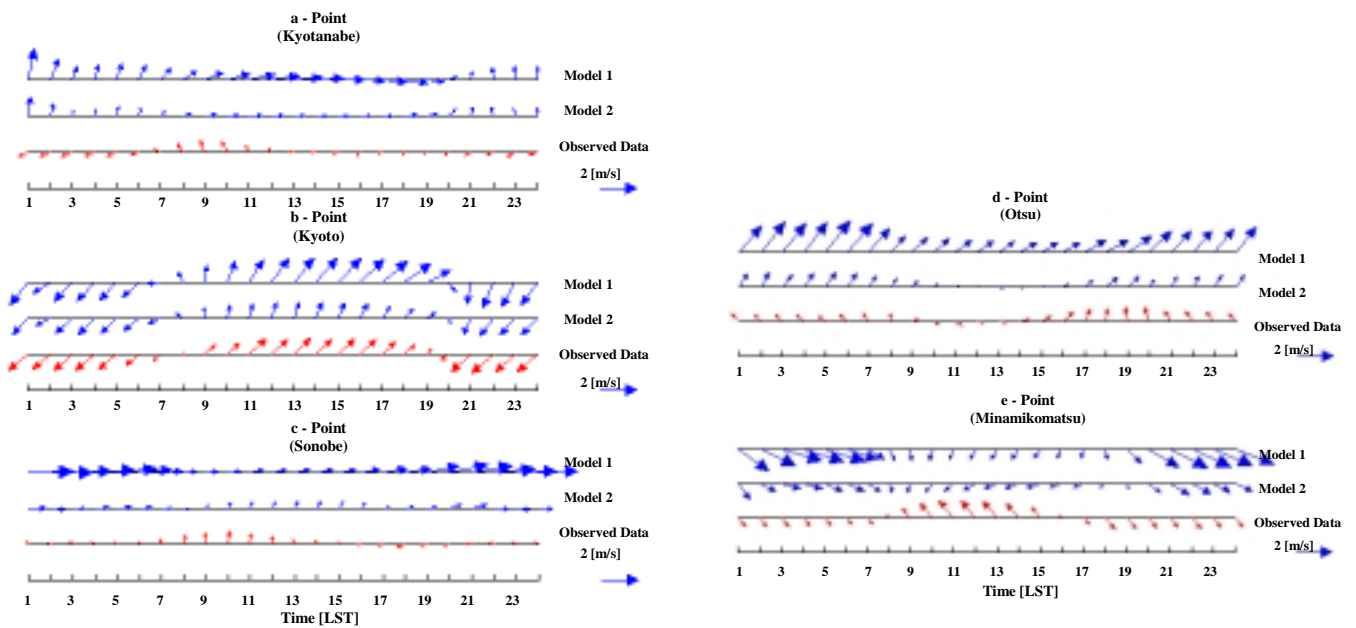


Fig. 8 Diurnal variation of the observed and simulated wind vectors at four points as Kyotanabe, Kyoto, Sonobe, Otsu, and Minamikomatsu.

5. 結論

乱流混合が強く発生される昼間においては、3次元大気モデルの境界条件として1次元植物キャノピーモデルと0次元植生モデルの適用による差異があまりなかったが、乱流混合が弱いため、植生の抵抗による風速減速が大きくなっている。したがって、夜間において植生による風速の減少の影響が大きい夜間は植生を有次元として考えると、0次元植生モデルより植生と大気間の運動量の相互関係をより正確に解析が可能であると考えられる。アメダス観測値との比較による風向はあまり合わないことがあったが、風速についてはよく一致している。今回の研究では、全領域の植生の高さを20mと仮定したが、今後は実際の植生の高さや葉面積密度を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 呉, 近藤, 山口, 水間, "地域開発スケールの流れ場の日変動シミュレーション," 空気調和・衛生工学会論文集, 76 (1999), pp. 29-39.
- 2) Deardorff, J.W.: Efficient Prediction of Ground Surface Temperature and Moisture with Inclusion of a Layer Vegetation, *J.Geophy.Res.*, 83(1978), pp. 1889-1903.
- 3) Liu, L., and Chen J. M., Black T.A. and Novak M. D.: E-Modelling of Turbulent Air Flow Downwind of a Model Forest Edge, *Boundary-Layer Meteorol.*, 77(1996), pp. 21-44.
- 4) Kondo, J. and Watanabe, T.: Studies on the Bulk Transfer Coefficients over a Vegetation Surface with a Multilayer Energy Budget Model, *J. Atmos. Sci.*, 49(1992), pp. 2183-2199.