

サブグリッドスケールの土地利用が大気境界層に与える影響のモデル化
- $k-\varepsilon$ モデルにおける都市化域のパラメタリゼーション-

Modeling Study on the Parameterization of Sub-grid Scale Land Use Distribution
for the Development of Atmospheric Boundary Layer
- Expression of Urban Canopy in the $k-\varepsilon$ Turbulence Model -

岡村 聖* 北田敏廣*
Kiyoshi OKAMURA* Toshihiro KITADA*

ABSTRACT: Modeling of mixed urban and vegetation canopy is presented in the framework of the $k-\varepsilon$ turbulence model, for the use of the mesoscale meteorological model, which can account for the detailed effects of complex canopy layer of buildings and vegetation. The model takes into account LAI (Leaf Area Index) for building and vegetation, availability of water in the soil layer by vegetation, heat storage of buildings, change of solar radiation flux due to the change of angle between solar radiation and building's roof and wall etc. Examples of model application are also presented. The model well reproduced the tendency such that for sunny days daytime-sensible heat flux from earth's surface increases for building canopy from day to day, but not for vegetation canopy. The reason was shown that vegetation can utilize water in deeper soil layer for its evapo-transpiration so that latent heat flux does not decrease drastically. Was also indicated the possibility which vegetation canopy can form cool island due to development of relatively cool mixed layer with large turbulence, associated with drag and strong wind shear by vegetation, and small sensible heat flux from the canopy to upper layer.

KEYWORDS: urban canopy, local climate, numerical modeling, heat island, turbulence model.

1 序論

メソスケール気象モデルが、土地利用の変化に伴う広域の流れ、気温等気象場の変化の予測にしばしば使われる。筆者らは、どちらかと言えば、このような都市域の土地利用の影響を簡略化して、ごく簡単なパラメータで扱い、数百 km 四方の大領域における流れ、気温等に対する地形の影響と土地利用変化の影響を相対的に評価することを試みてきた。熱環境の緩和等を考える場合に、土地利用計画等においてそのような大きなスケールで考えないといけない特有の現象もあり、ある程度それらを明らかにしてきたと思っているが、同時に、もう少し小さな規模 (10~20 km)、すなわち、大都市であれば中心地域をちょうどカバーするような規模では、都市キャノピーの存在がどのように上空大気およびキャノピー内での平均気温、平均風速等に影響するかを見積もれることが重要となる。このようなキャノピーのモデル化は、植生に対して Yamada (1982)、それを都市キャノピーに拡張した Uno et al. (1988)、Vu Thanh Ca et al. (1995) 他の研究が見られる。本研究はそれらを発展させ、例えば、1 km 四方内で、高さ方向への分布を持った植生、高さの異なる都市建造物群等が様々な割合で混在する場合の熱、運動量、水蒸気輸送への影響をパラメタライズする方法を鉛直 1 次元のフレームで検討したものである。植物や建物の LAI はもちろん、植物の土壌水分の availability、建物の壁体への蓄熱効果、太陽高度の変化、キャノピーの短波、長波放射に対する応答もモデル化されている。これらのパラメータに対する広範な感度解析を、キャノピーから上空大気に向かう各種フラックス等について行った。また、高さの異なる植物群の種々の割合での導入が、高温の緩和にどのような仕方での程度有効であるか等も検討した。この報告での定式化は、むしろ空間多次元への拡張が可能である。

2 数値モデル

2.1 支配方程式

モデルは、筆者らの研究室で、従来から継続的に研究を行ってきたものに、Yamada (1982) を参考にキャノピーに関する項を考慮したものである。 η_P 、 η_U は、植生、建物の被覆率を示す。 a_L 、 a_S は、植生の葉、茎の面積密度を、 a_R 、 a_W は、建物の屋根面、側壁面の面積密度を示す。

$$\frac{\partial U}{\partial t} = f_c(V - V_g) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial U}{\partial z} \right) - [\eta_P \{a_L(z) + a_S(z)\} + 0.25\eta_U a_W(z)] C_d |U| U \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = f_c(U_g - U) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial V}{\partial z} \right) - [\eta_P \{a_L(z) + a_S(z)\} + 0.25\eta_U a_W(z)] C_d |V| V \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_T} \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) + \frac{1 - \eta_P - \eta_U}{\rho C_p} \frac{\partial R_N}{\partial z} + \frac{1}{\rho C_p} [\eta_P \{a_L(z) + a_S(z)\} H_P + \eta_U \{a_R(z) + a_W(z)\} H_U] \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_Q} \frac{\partial Q}{\partial z} \right) + \frac{\eta_P}{\rho} a_L(z) E_P \quad (4)$$

* 豊橋技術科学大学 Dept. Ecological Eng., Toyohashi Univ. Technol., Toyohashi 441, Japan

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \underbrace{\nu_t \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right\}}_P + \underbrace{\left(-\frac{\nu_t}{\sigma_T} \frac{g}{\Theta_v} \frac{\partial \Theta_v}{\partial z} \right)}_G - \underbrace{\left(\eta_P \{a_L(z) + a_S(z)\} + 0.25\eta_U a_W(z) \right)}_G C_d [|U|^3 + |V|^3] \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P + (1 - C_{3\varepsilon}) G) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{4}{\sqrt{3} B_\varepsilon C_\mu} \frac{\varepsilon}{k} [\eta_P \{a_L(z) + a_S(z)\} + 0.25\eta_U a_W(z)] C_d [|U|^3 + |V|^3] \quad (6)$$

2.2 植生キャノピー

Fig. 1に植生キャノピーと建物キャノピーのLAIを示す。植生キャノピー内の熱収支を次式で表す。

$$\frac{\partial R_{NP}}{\partial z} = \eta_P \{a_L(z) + a_S(z)\} H_P + \eta_P a_L(z) t E_P \quad (7)$$

左辺は放射、右辺第1, 2項は大気植生間の顕熱流束、潜熱流束の収束発散を表す。顕熱、潜熱流束は次式で表される。

$$H_P = \rho C_p C_{hP} \sqrt{U^2 + V^2} (T_P - T), \quad E_P = \rho \frac{C_{hP} \sqrt{U^2 + V^2}}{1 + C_{hP} r_s \sqrt{U^2 + V^2}} (Q_{sat}(T_P) - Q) \quad (8)$$

C_{hP} は顕熱のバルク輸送係数、 C_p は定圧比熱、 ρ は空気密度である。 r_s は気孔抵抗でありJarvis(1976)の式を用いた。

植生の蒸散や土壌水分移動は、SiBを参考に、多層で扱っている。植生に関する各パラメーターは、SiBの常緑広葉樹のものを採用した。

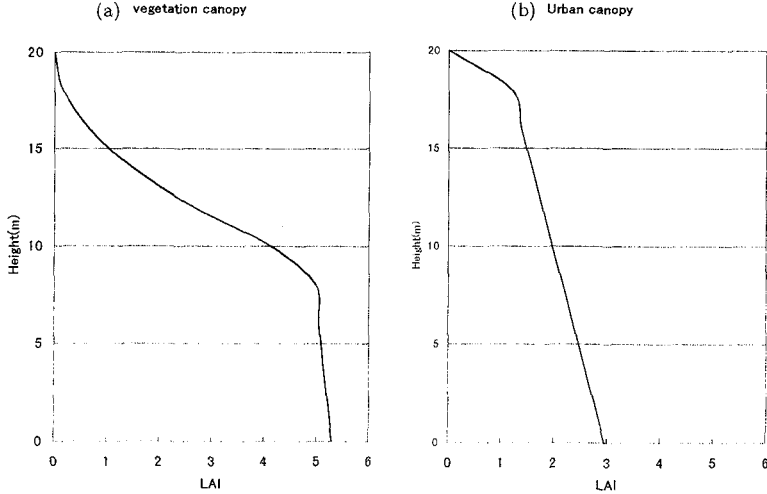


Fig. 1. Schematic expression, LAI (Leaf Area Index), of (a) vegetation and (b) building canopy. For building, LAI for roof + side wall is illustrated.

2.3 建物キャノピー

建物キャノピー内の熱収支を次式で表す。

$$\frac{\partial R_{NU}}{\partial z} = \eta_U \{a_R(z) + a_W(z)\} H_U + \eta_U \{a_R(z) + a_W(z)\} G_U \quad (9)$$

左辺は放射、右辺第1項は大気建物間の顕熱流束、第2項は壁体内外へ向かう熱流束の収束発散を表す。顕熱、壁体内外への熱流束は次式で表される。また、壁体内では熱伝導方程式を計算し、蓄熱効果を考慮している。

$$H_U = \rho C_p C_{hU} \sqrt{U^2 + V^2} (T_U - T), \quad G_U = \rho_U C_{gU} K_U \frac{\partial T_U}{\partial z_U}, \quad \frac{\partial T_U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z_U} \left(K_U \frac{\partial T_U}{\partial z_U} \right) \quad (10)$$

2.4 放射

(1) 太陽放射

植生キャノピー空間を通過する太陽放射フラックス $S_P^\downarrow(z)$ は次式で表される。 F はextinction coefficientである。

$$S_P^\downarrow(z) = \eta_P S_{top}^\downarrow \exp \left[-F \int_z^{top} \{a_L(z) + a_S(z)\} dz \right] \quad (11)$$

建物キャノピー空間を通過する太陽放射フラックス $S_U^{\downarrow}(z)$ は次式で表される。

$$S_U^{\downarrow}(z) = \eta_U S_{top}^{\downarrow} \left[\cos \theta \exp \left\{ - \int_z^{top} a_R(z) dz \right\} + \sin \theta |\cos A| \exp \left\{ - \int_z^{top} 0.25 a_W(z) dz \right\} \right. \\ \left. + \sin \theta |\sin A| \exp \left\{ - \int_z^{top} 0.25 a_W(z) dz \right\} \right] \quad (12)$$

太陽の天頂角 θ 、太陽方位角 A は、球面三角法により次式で表される。

$$\cos \theta = \sin \theta_L \sin \theta_D + \cos \theta_L \cos \theta_D \cos \theta_H, \quad \sin A = \frac{\cos \theta_D \sin \theta_H}{\sin \theta} \quad (13)$$

θ_L は任意地点での緯度、 θ_D は太陽の偏角、 θ_H は時間角である。

$$\theta_D = 0.4092797 \sin \left(\frac{2\pi}{365} \cdot \frac{t}{86400} \right), \quad \theta_H = \theta_{L0} + \frac{2\pi}{86400} t \quad (14)$$

t はグリニッジ天文台において春分点の正午から計った時間で、 θ_{L0} は観測点の経度である。

(2) 赤外放射

キャノピー空間を通過する赤外放射フラックス $R_P^{\downarrow}(z)$ 、 $R_U^{\downarrow}(z)$ は次式で表される。

$$R_{P,U}^{\downarrow}(z) = \eta_{P,U} \left\{ R_{top}^{\downarrow} \exp \left[-F \int_z^{top} a_{P,U}(z) dz \right] + \sum_{nt=z+1}^{top} \sigma T_{P,U,nt}^4 \exp \left[-F \int_z^{nt} a_{P,U}(z) dz \right] \right\} \quad (15)$$

但し、 $a_P(z) = a_L(z) + a_S(z)$ 、 $a_U(z) = a_R(z) + a_W(z)$ である。

キャノピー空間を通過する赤外放射フラックス $R_P^{\downarrow}(z)$ 、 $R_U^{\downarrow}(z)$ は次式で表される。

$$R_{P,U}^{\downarrow}(z) = \eta_{P,U} \left\{ R_{bot}^{\downarrow} \exp \left[-F \int_0^z a_{P,U}(z) dz \right] + \sum_{nb=3}^{z-1} \sigma T_{P,U,nb}^4 \exp \left[-F \int_{nb}^z a_{P,U}(z) dz \right] \right\} \quad (16)$$

但し、 $a_P(z) = a_L(z) + a_S(z)$ 、 $a_U(z) = a_W(z)$ である。

(3) 正味の放射量

キャノピー層内の放射の収束発散は次式で表される。

$$\frac{\partial R_{NP}}{\partial z} = [F \{a_L(z) + a_S(z)\}] \{S_P^{\downarrow}(z) + R_P^{\downarrow}(z) + R_P^{\uparrow}(z) - \varepsilon_P(z) \sigma T_P^4\} \quad (17)$$

$$\frac{\partial R_{NU}}{\partial z} = \{a_R(z) + 0.25 a_W(z)\} S_U^{\downarrow}(z) + [F \{a_R(z) + a_W(z)\}] R_U^{\downarrow}(z) + F a_W(z) R_U^{\uparrow}(z) \\ - [F \{a_R(z) + a_W(z)\}] \varepsilon_U(z) \sigma T_U^4 \quad (18)$$

$$\varepsilon_{P,U}(z) = \sum_{nt=z+1}^{top} \exp \left[-F \int_z^{nt} a_{P,U}(z) dz \right] + \sum_{nb=3}^{z-1} \exp \left[-F \int_{nb}^z a_{P,U}(z) dz \right] \quad (19)$$

3 シミュレーションケース

本研究のモデル自身は、種々の高さの建物群や植生群とその混合体からなる地表面を取り扱える構造になっているが、本報では、第一ステップとして、地表は建築物か植生かどちらかの単一の地物で覆われており、しかもその高さは20 mで一定とし、被覆の割合だけを0 (C1: 基本ケース)、0.1、0.3、0.6と変化させたケースのシミュレーションを行った。Table 1に各ケース間の違いを示す。建築物、植生のLAI等は上に、述べた通りであり、入力としての太陽放射、土壌水分の初期状態等その他の条件は、すべてのケースについて同じである。

Table 1 Simulation Case

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
η_P : 植生被覆率	0	0.6	0.3	0.1	0	0	0
η_U : 建築物被覆率	0	0	0	0	0.6	0.3	0.1

* 植生、建築物共に高さは20mの一定

4 結果および考察

先のTable 1に示されているように、本報のシミュレーションケースのねらいは、(1) 建物と植生という性質の異なるキャノピーの影響、(2) その被覆率の違いの影響を、大気境界層の諸特性に対してみることにある。

4.1 キャノピー層から上空大気へ向かう熱フラックスと土中の水分量の関係

地表面特性が上空大気への顕熱および潜熱フラックスをどう変えるかは、大気境界層の時間変化に影響し、ひいては局地的な流れを励起するものとなる。Fig. 2aは、このフラックスの日変化のケース間による違いを見るために、高度20 m (C2からC7の条件

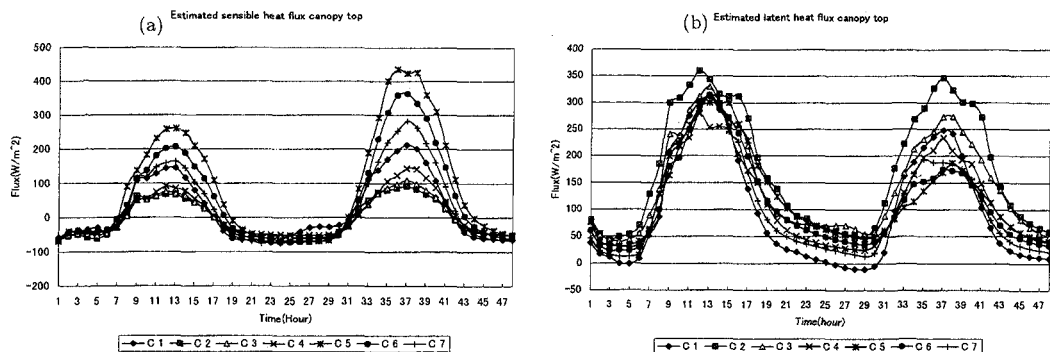


Fig. 2. Diurnal variations of (a) sensible and (b) latent heat flux for the cases of C1 to C7 (see Table 1) at 20 m high above ground. Positive and negative numbers for upward and downward fluxes, respectively.

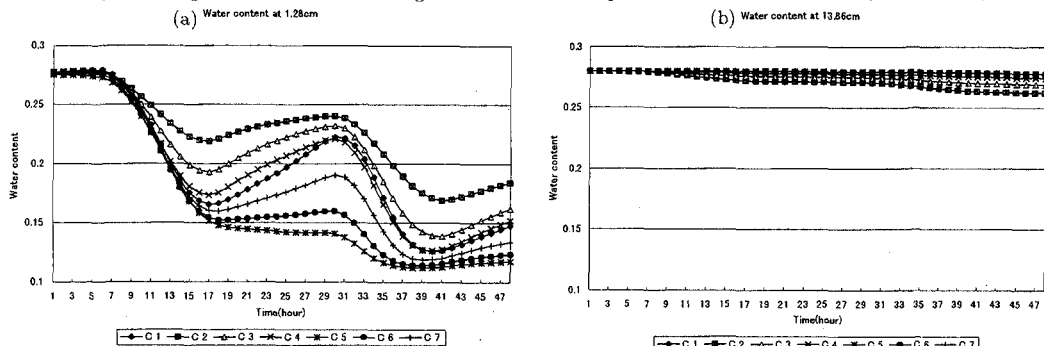


Fig. 3. Diurnal variation of water content in soil layer at (a) 1.28 cm and (b) 13.86 cm in depth.

では、ちょうどキャノピー層の上端のレベルに位置する)での各ケースの顕熱フラックスを2日分プロットしたものである。図中、正の符号は大気上空へのフラックスをあらわす。

日中、1日目よりも2日目の顕熱フラックスの方が概して大きい。Fig. 2bに示す潜熱フラックスはほぼ逆の変化を示すから、2日目の顕熱フラックスの増大は、土壌の水分量の減少により潜熱フラックスが2日目に減少した分を補償するように生じていることが伺える。この2日目の日中の顕熱フラックスの増大は、建物が存在するC5からC7のケースでより鮮明であり、しかも建物による地表面の占有率が大きいほど(C5-60%、C6-30%、C7-10%)大きい。

一方、植生が存在するC2からC4のケースでは、2日目における急激な潜熱フラックスの減少も見られず(Fig. 2b)、したがって顕熱フラックスの増加もない(Fig. 2a)。この傾向は、地表の植被率が高いC2(60%)でもっとも顕著である。降水がないという条件は、すべてのケースで共通であるから、植生がある場合に2日目でも潜熱フラックスが落ちないことは、土中のより深いところから植物が水分を吸い上げ気中に供給していることを意味する。実際、Fig. 3bに示すように、深部(13.86 cm)ではC2からC4ケースの含水率がC5からC7ケースのそれに比べて低くなっている。一方、浅い所(Fig. 3a: 1.28 cm)では逆に植生のあるケースの方が、含水率が高くなっている。この原因として、植生キャノピー内の比湿が大きく地表面レベルでは比湿の鉛直勾配が小さくなって地表面からの水蒸気フラックスが小さくなる、地表面に届く太陽放射が葉群によるさえぎりにより小さくなること等が考えられる。

以上、建築物の存在は、大気への顕熱フラックスを増やすが、植生の存在は、逆にこれを減らすという、しごく妥当な結果が得られた。また、建築物がある場合には、降水のない状態が続くことにより、日に日に大気への顕熱フラックスが増えて行くが、植生の場合にはこの増加が緩やかであるかあるいは期間が短ければ増加がみられない。植生が存在することにより地下の深い部分に存在する水分も蒸発散に利用され気候緩和に役立つことが示されている。すなわち、植生のない場合は、地表近くの浅い部分の水分が蒸発により急激に失われた後、深部の水分を有効に利用するすべがないことが、気温の上昇に利いている。

4.2 大気境界層の性状に及ぼす影響

先項4.1で、地表を覆うキャノピーの違いにより、キャノピー層から上空大気に向かう顕熱・潜熱フラックスに大きな違いがあることが示された。この違いが温位の鉛直分布にどう関わっているかをFig. 4aに示す。Fig. 4aは14時における温位の鉛直分布であるが、図は、まず、ケース間で混合層の高さおよび層内の温位に大きな違いがあることを示唆する。混合層の温位がもっとも高いのは、建物キャノピーが6割を占める場合(C5)で約25°C、基本ケース(C1)が約22°C、もっとも低いのが、植生キャノピー6割の場合(C2)で約19°Cであり最高と最低で6度Cの差がある。この最高と最低の間で各ケースの混合層の代表温位は、Fig. 2aに示されている各ケースの日中の顕熱フラックスの大きさと同じ順に並ぶ。裸地の場合(C1:基本ケース)にくらべ、建物を建てれば温位が上がり、植生を導入すれば温位が下がることを明瞭に示している。

混合層高度の場合は、温位そのものの場合とは少し傾向が異なる。すなわち、混合層高度がもっとも高いのが建物キャノピーの場合(C5:2200 m)であることは同じであるが、次に植生キャノピーのケースが続く(C2:1500 m程度)、一番低いのが、基本ケース(C1:約1200 m)となっている。すなわち、基本ケースの場合、混合層内の温位は、植生の場合(C2からC4)より大きい、混合層高度は植生ケースよりも低いことを意味する。実は、次の乱れの運動エネルギー(TKE: Total Kinetic Energy)の鉛直分布(Fig. 4b)とFig. 4aの対比が示すように、混合層高度はTKEの鉛直分布と良い対応を示す。このTKE方程式の各項蓄量分布(Fig. 5a-C1: Fig. 5b-C2: Fig. 5c-C5)が、TKE鉛直分布(Fig. 4b)の形成、したがって、混合層の形成に関するケース間の違いを明らかにして

いる。すなわち、C2（植生60TKEの浮力生成項は、三つのケース（C1、C2、C5）で一番小さいが、植生の大きなLAIに基づく流れに対する抗力とシアーによるTKE生成項が一番大きく、これが温位は低い混合層高度は高いという状態を維持している。ケースC5（建物60で大きく、大きなTKE値と高い混合層高度の形成に寄与している。基本ケースC1（裸地）では、TKEの浮力生成項はC5にくらべて小さいがC2よりは大きい、ただし、キャノピー層を持たない小さなラフネスレングスのためにシアー生成項が地面の近くに押し付けられ、C2やC5に比べてこの項はるかに小さいことが、C1の場合の混合層成長を妨げている。

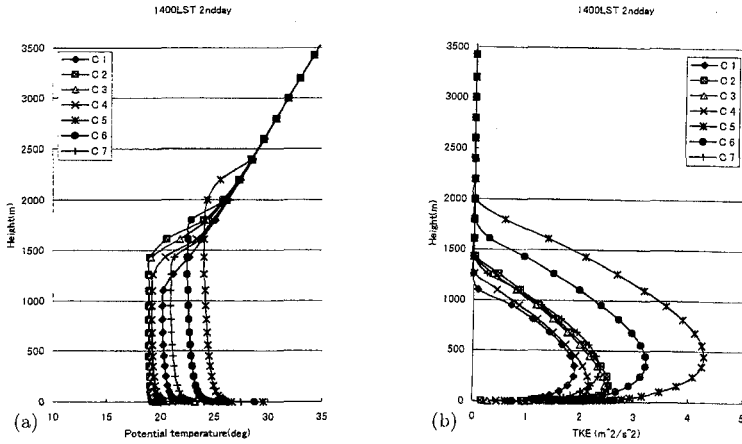


Fig. 4. Vertical profiles of (a) potential temperature and (b) total turbulent kinetic energy (TKE) at 14:00LST.

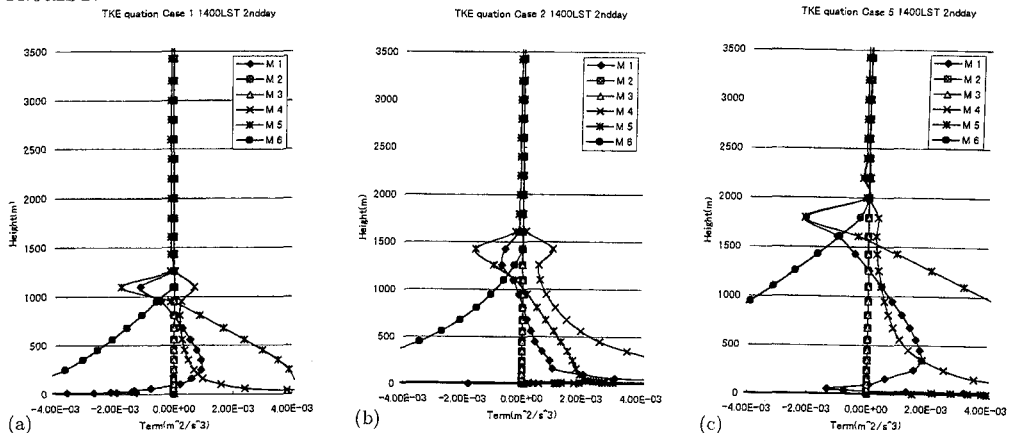


Fig. 5. Vertical profiles of various terms in the transport equation of TKE at 14:00LST for (a) C1, (b) C2, and (c) C3. M1 for the rate of temporal change, M2 the turbulent diffusion, M3 the production due to drag, M4 the shear production, M5 the buoyancy production, and M6 the dissipation rate.

5 結論

地表面が建築物や植生およびその混合体で覆われている場合の熱、物質、運動量に対する輸送モデルを提案し、それを用いて簡単なシミュレーションを行った。モデルは、例えば、1 km四方内で、高さ方向への分布を持った植生、高さの異なる都市建造物群等が様々な割合で混在する場合の熱、運動量、水蒸気輸送への影響をパラメタライズする方法を検討している。植物や建物のLAIはもちろん、植物の土壌水分のavailability、建物の壁体への蓄熱効果、太陽高度の変化、キャノピーの短波、長波放射に対する応答もモデル化されている。

予備的なモデルシミュレーションにより、建築物の存在は、大気への顕熱フラックスを増やすが、植生の存在は、逆にこれを減らすという、しごく妥当な結果が得られた。また、建築物がある場合には、降水のない状態が続くことにより、日に日に大気への顕熱フラックスが増えて行くが、植生の場合にはこの増加が緩やかであるかあるいは期間が短ければ増加がみられないこと、この原因として、植生が存在することにより地下の深い部分に存在する水分も蒸発散に利用され気候緩和に役立つこと、一方、植生のない場合は、地表近くの浅い部分の水分が蒸発により急激に失われた後、深部の水分を有効に利用するすべがないことが、気温の上昇に利いていること、等が示された。

- [1] Kitada, T., 1987: Boundary Layer Meteorology, **41**, 217-239.
- [2] 北田敏廣、岡村聖、高木久之, 1995: $k-\epsilon$ / メソスケール気象モデルによる濃尾平野の局地風解析—様々なスケールの地形効果—, 環境工学研究論文集, **32**, 241-252.
- [3] Kitada, T., K. Okamura, S. Tanaka, 1997: Effects of Topography and Urbanization on Local Winds and Thermal Environment in Nohbi Plain, Coastal Region of Central Japan, J. Appl. Meteor., to appear.
- [4] Yamada, T., 1982: A numerical model study of turbulent air flow in and above a forest canopy, J. of the Meteor. Soc. of Japan, **60**, 439-454.