

# 都市気候モデルによる関東地方の流れ場・温度場の数値解析

Numerical Analysis of Velocity and Temperature Fields over Kanto Plane

村 上 周 三\*・持 田 灯\*\*・金 相 璣\*・大 岡 龍 三\*  
Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA, Sangjin KIM and Ryoza OOKA

Mellor-Yamadaの大気乱流モデルを用いて局地風を中心とした関東地方の速度場・温度場を解析した結果を示す。本研究では都市化の効果を調べるために、現状の土地利用状況を考慮した場合と、都心まで全て緑地であると仮定した場合の2つのケースについて数値解析を行い、観測データと比較した。土地利用状況を考慮した解析では、海風の発生時の風速分布、地表面温度分布に関して、実測データとよく一致する結果が得られた。

## 1. 序

都市化による土地利用状況の変化、人工排熱量の増大はヒートアイランドのような都市固有の気候を形成し、大気汚染等の環境問題を引き起こす。近年、筆者らはこのような都市気候問題を対象とする数値解析手法の研究を行ってきた。本稿では関東地方の夏季の局地風を中心とした都市気候の構造を Mellor-Yamada のモデル<sup>1)~3)</sup>を用いた数値解析により調べた結果を示す。ここでは、現状の土地利用状況を考慮した場合と、都心まで全て緑地であると仮定した場合について解析を行い、土地利用状況の差異が流れ場、温度場の予測結果に及ぼす影響について検討した。

## 2. 解析概要

### (1) 計算ケース(表1, 注1)

表1に計算ケースを示す。ケース2では国土庁の国土数値情報の土地利用データ(1kmメッシュ)を基に、現状の土地利用分類に応じて地表面に関する各パラメータを設定した(注1)。これと比較するために全解析領域の地表面で草地に対応するパラメータを一様に与える計算(ケース1)も行った。

### (2) 乱流モデル・基礎方程式(表3, 注2)

Mellor-Yamada モデル<sup>1)~3)</sup>はレベル1~4まで階層化されており、レベル4が工学分野で用いられる乱流モデル

表1 計算ケースおよび土地利用分類によるパラメータの設定値

ケース	土地利用分類	地表面の蒸発効率 $\beta$ (文5)6)	アルベード	粗度長 $Z_0$ (m)	人工排熱 ( $W/m^2$ )
ケース1	土地利用分類を考慮せず	0.3	0.2	0.05	0
ケース2	田	0.6	0.2	0.05	0
	畑	0.3	0.1	0.01	0
	果樹園	0.4	0.2	1	0
	その他の樹木畑	0.3	0.2	0.5	0
	森林	0.3	0.15	2	0
	荒地	0.4	0.2	0.01	0
	建物用地	0	0.15	1	50
	幹線交通用地	0	0.1	0.01	4
	その他の用地	0.3	0.2	0.01	0
	河川地及び湖沼	1.0	0.03	0.001	0
	海浜	0.6	0.3	0.005	0
	海水域	1.0	0.03	0.001	0

\*東京大学生産技術研究所 第5部

\*\*新潟工科大学(東京大学生産技術研究所研究員)

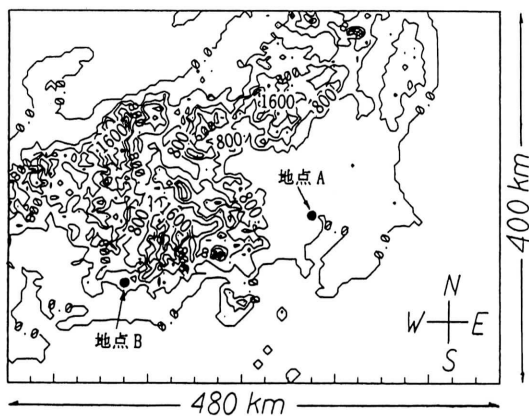
の場合の Differential Second-moment Closure Model に対応する。同モデルでは乱れ長さスケール  $l$  を与えるのにエネルギー散逸率  $\varepsilon$  ではなく、 $l$  そのものを未知量として取り扱う。このモデルのレベル 1~4 の中で、乱流エネルギー  $q^2/2$ 、乱れ長さスケール  $q^2 l$  と相当温位の分散  $\theta_v^2$  の3つの乱流量の偏微分方程式を解くレベルをレベル 3 と呼ぶ。このレベル 3 を簡略化して  $q^2/2$  に対してのみ偏微分方程式を解き、他は代数方程式から求めるレベルがレベル 2.5 である。このレベルは工学分野の乱流モデルの分類に従えば代数応力モデル (Algebraic Second-moment Closure Model) に対応する。本解析ではこのレベル 2.5 のモデルを使用した。

(3) 設定条件

7 月下旬の太陽高度に基づき午前 6 時から計算を開始し、その後 33 時間の時間積分を行った。水平方向 480 km × 400 km の解析領域 (図 1) を 8 km の等間隔で 60 × 50 メッシュに分割し、鉛直方向には地表面から高度 5 km までの大気を 20 メッシュに不等間隔に分割した。地表に接するメッシュの幅は 4 m である。又、地表より地下は深さ 1 m までを 5 メッシュに分割した。

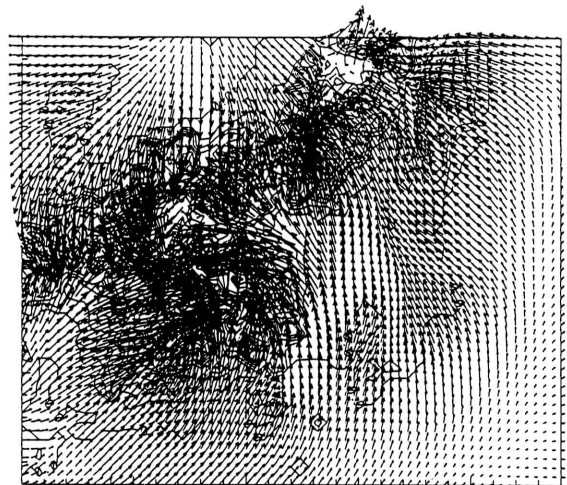
(4) 初期条件, 境界条件 (注 3, 注 4, 注 5)

①境界条件 地表面温度は既往の文献<sup>3), 4)</sup>と同様に 1 次熱収支モデルより求めた。ここで、地表面の摩擦応力、顕熱輸送量はモニン・オブコフの相似則より導出される浮力補正項を含む形の対数則より与えた (注 3)。又、地表面の水蒸気輸送量は  $\beta$  法により与え、各土地利用に対応する蒸発効率  $\beta$  は文献 5), 6) 等を参考に表 1 のように設定した (注 4)。上空面境界上では風速 0.5 m/s の南風 ( $U=0$  m/s,  $V=0.5$  m/s),  $\Delta\theta_v=0$ ,  $Q_w \cong 0$ ,  $q^2=0$ ,  $l=0$  とした。上空面, 下面以外の計算領域外周での  $U, V, \theta, Q, q^2, q^2 l$  等の境界値は、境界上で、表 3 の方程式 (6), (7), (13), (14), (15), (16) 式に、諸量の水平方向の勾配 0 の条件を代入し、これにより得られる鉛直方向 1 次

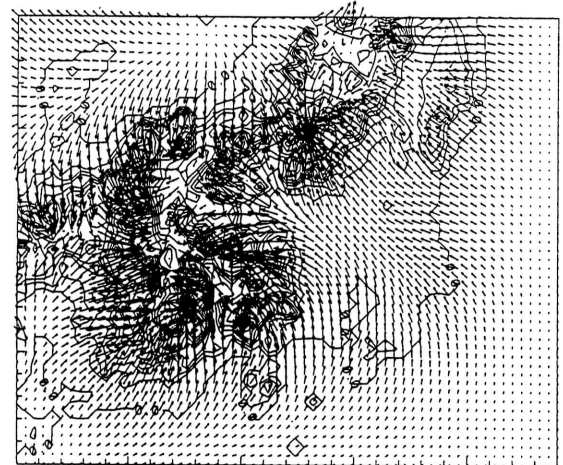


・ 図中の数値は標高 (m) を示す

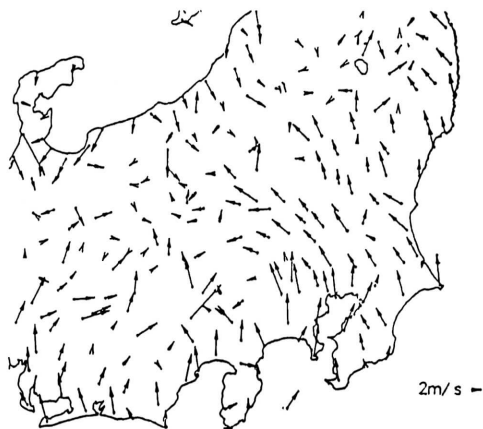
図 1 計算領域



(1) ケース 1  
(地表面は全て草地と仮定した場合, 7 月下旬)



(2) ケース 2  
(現状の土地利用を考慮した場合, 7 月下旬)



(3) 観測データ  
(1985 年夏の 50 日間の平均, 桑形 (文 7))

図 2 水平面内の風速ベクトル (高さ 100m, 15 時)

元の方程式系を解くことにより与えた。又、深さ 1 m の地中温度は  $22^{\circ}\text{C}$ <sup>8)</sup>、水面温度は  $25^{\circ}\text{C}$ <sup>9)</sup> とした。

②初期条件 注 5) 参照。

### 3. 解析結果

#### (1) 平均風速ベクトル分布 (図 2)

図 2 に計算開始から 33 時間後の午後 3 時の高さ 100 m の風速分布の比較を示す。現状の土地利用を考慮したケース 2 の結果 (図 2 (2)) は観測結果 (図 2 (3)) と風速、風向ともによく対応している。これに対して、解析領域を一様に草地と仮定したケース 1 (図 2 (1)) では、全般に観測データより高風速となる。又、ケース 2 では東京湾から前橋方面への南東風が極めてよく再現されているのに対して (図 2 (2))、ケース 1 では海からの南風が風中左へ傾かず内陸側に直進してしまう領域が見られる (図 2 (1))。このような差異は、ケース 2 では土地利用に応じて表 1 に示す様に  $Z_0$  に分布 (建物用地:  $Z_0=1\text{ m}$ , 森林:  $Z_0=2\text{ m}$ ) を与えているのに対して、ケース 1 では草地を仮定し、全領域で  $Z_0=0.05\text{ m}$  としていることや、次に述べるように地表面温度分布の性状がケース 1 とケース 2 で異なること等により生じるものと考えられる。

#### (2) 温度分布 (図 3)

図 3 に図 2 と同時刻の地表面温度分布を示す。ケース 2 は土地利用分布を反映し、都心部で最大値を示す (図 3 (2))。又、その数値は既往の実測結果<sup>10)</sup> と概ね対応している。これに対して、土地利用を考慮しないケース 1 では茨城県南部付近に最大値が存在し、分布の傾向がケース 2 とは全く異なる (図 3 (1))。

#### (3) 地表面の熱収支 (図 4)

都心部 (図 1 の地点 A) と森林部 (図 1 の地点 B) の地表面熱収支の比較を図 4 に示す。また、表 2 に地点 A, B で地表面境界条件として与えた各パラメータの値を示す。国土数値情報の土地利用データは  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  メッシュ毎に表 1 に示す土地利用分類が与えられている<sup>11)</sup>。表 2 に示す数値は地点 A, 地点 B を各々含む  $8\text{ km} \times 8\text{ km}$  メッシュ内の 64 個の  $1\text{ km}$  メッシュにおいて各々、表 1 のように土地利用分類と各パラメータを対応付けた結果の平均値である。表 2 より現状の土地利用状況を考慮したケース 2 の場合、地点 A (都心) に比べて地点 B (森林) では蒸発効率  $\beta$ 、地表面の粗度長  $Z_0$  が大きく、人工排熱量が大幅に小さく与えられている事が判る。一方、ケース 1 では地点 A, B とともに草地に対応する同一の数値が設定されている。

土地利用状況を考慮したケース 2 では地点 A と地点 B の熱収支には著しい差異が認められる (図 4 (2))。即ち、地点 A (図 4 (2) ①) に比べて地点 B (図 4 (2) ②) では日中の潜熱輸送量の絶対値が大幅に増加し、逆に顕熱

輸送量の絶対値が減少する。ケース 2 の場合に地点 B で潜熱輸送量が増加するのは表 2 に示したように、地点 A に比べて蒸発効率  $\beta$  が大きく与えられているためである。この負値を示す潜熱輸送量の絶対値の増加により、ケース 2 の場合の地点 B では地表面温度が  $28.3^{\circ}\text{C}$  と地点 A の場合の  $37.0^{\circ}\text{C}$  に比べて大幅に低下する (表 2)。これにより、地点 B では地表面温度と気温の差が小さくなり、顕熱輸送量の絶対値が地点 A に比べて大幅に低下しているものと考えられる (図 4 (2) ②)。

一方、地表面が全領域で一様に草地であると仮定したケース 1 の場合、地点 A と B の熱収支の差は極僅かであり (図 4 (1))、表 2 に示した地表面温度の差も小さい。

これらの結果から、地表面の温度分布を正しく予測するためには、 $\beta$  や  $Z_0$  等の地表面パラメータを正しく設定することが重要であることが確認される。又、この地表温度の分布性状の差異と上述した風速ベクトル分布の差異 (図 2) は密接に関連しているものと推定される。

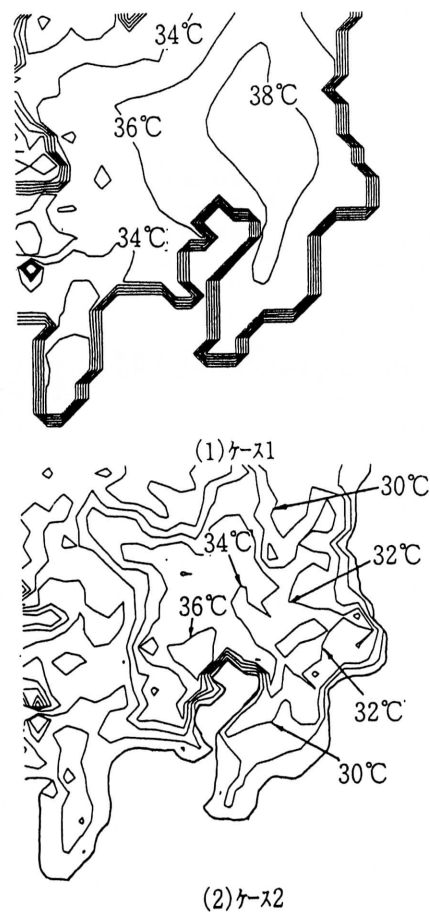


図 3 地表面の温度分布  
[7 月下旬の 15 時. 各点の温度は水平方向の  
メッシュスケール  $8\text{ km} \times 8\text{ km}$  の平均である.]

表 2 地点 A, B で与えた各パラメータの値と地表面温度

ケース	地点	地表面の 蒸発効率 $\beta$	アルベード	粗度長 $Z_0$ (m)	人工排熱 ( $W/m^2$ )	地表面温度 (15 時の予測結果)
ケース1	地点 A	0.3	0.2	0.05	0	36.8°C
	地点 B					34.9°C
ケース2	地点 A	0.076	0.147	0.891	40.234	37.0°C
	地点 B	0.411	0.148	1.725	1.291	28.3°C

(上記の数値は  $\Delta x = \Delta y = 8km$  メッシュの平均値、地点 A, B の位置は図 1 参照)

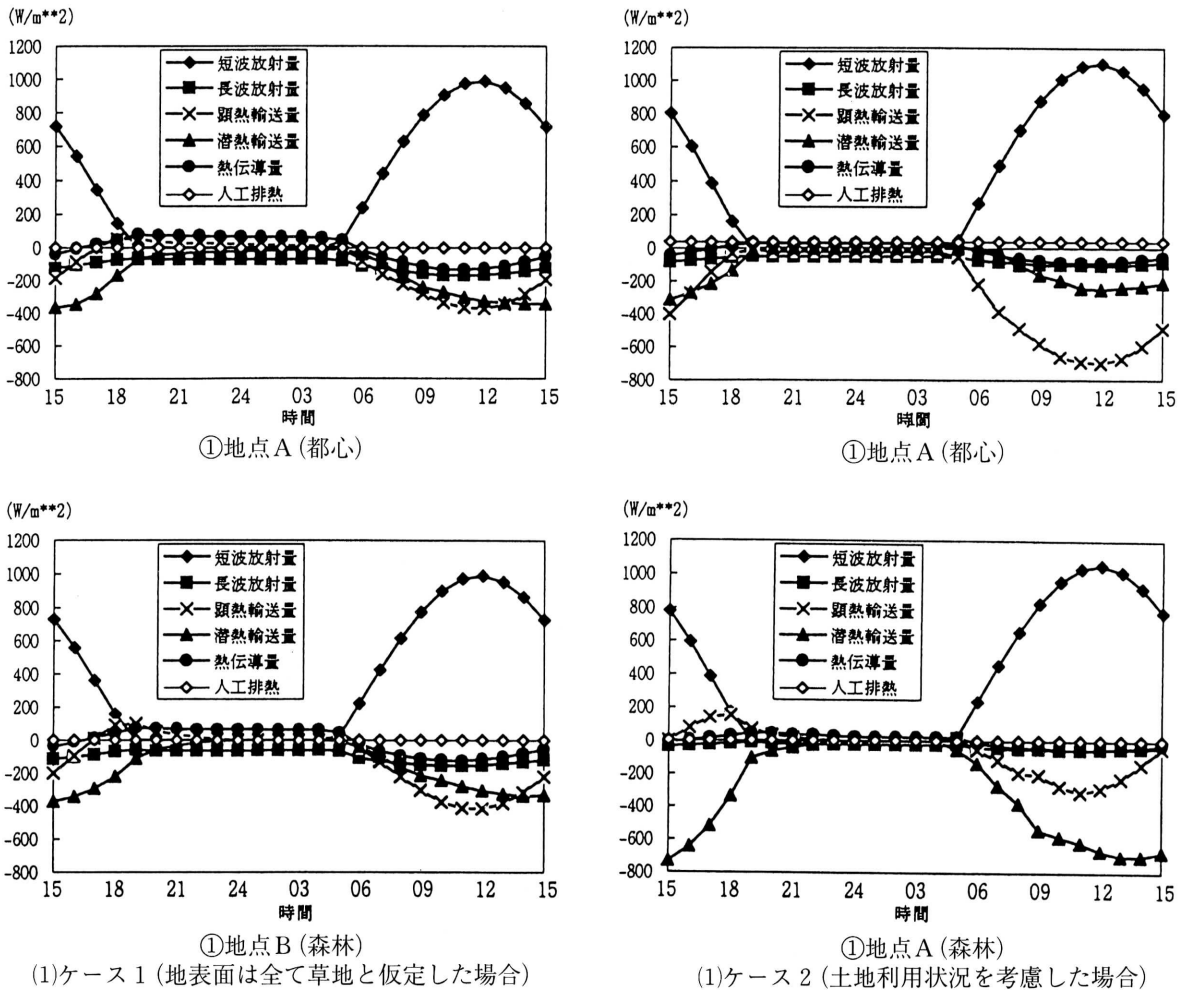


図 4 地表面熱収支の日変化(図 1 中の地点 A, B)

#### 4. ま と め

(1) 現状の土地利用状況を反映する形で地表面のパラメータを設定したケース 2 では、海風の発生時の風速分布、地表面温度分布に関して、実測データとよく一致する結果が得られた。

(2) これに対して、全領域が一様に草地であると仮定したケース 1 では風速値、風向、地表面温度分布等に関して、

観測データおよびケース 2 と異なる傾向を示した。

(3) 即ち、都心部の流れ場、温度分布を正しく再現するためには、土地利用に応じた地表面パラメータの最適な設定が必要である。表 1 に示した各パラメータの値中には、蒸発効率  $\beta$  や人工排熱量等の様に改善の余地のあるものもあり、この点に関しては今後更に検討を加えていきたい。

謝 辞

本研究実施にあたり尾島俊雄教授 (早稲田大学, 本所客員教授), 吉澤徹教授 (本所 1 部), 半場藤弘講師 (本所 1 部), 山田哲司博士 (Yamada Science and Art Corporation), 吉門洋博士 (資源環境技術総合研究所), 杉山寛克氏 (早稲田大学大学院) から種々の貴重な御助言をいただいた。記して謝意を表します。

注 1) ケース 1, 2 とともに全ての地表で  $C_p = 1256$  ( $J/kg \cdot K$ ),  $\rho = 1500$  ( $kg/m^3$ ) とした。表 1 に示した各パラメータの値の妥当性については, 今後更に検討を加えて行きたい。

注 2) Yamada 等はレベル 2.5 を中心として複雑地形上にも適用可能な形に大気乱流モデルを拡張した<sup>3), 4)</sup> (表 3)。この方程式系では圧力の静力学平衡を仮定し, 連続式は, 風速の鉛直成分を求めるために用いられる。地形の起伏に対応するために鉛直方向には次式に示す  $z^*$  で定義される座標を用いる (図 5)。

$$z^* = \bar{H} (z - z_g) / (H - z_g)$$

ここで,  $H$  と  $\bar{H}$  はそれぞれ  $z$  と  $z^*$  に基づく座標系での計算領域上限の座標値 (本計算では  $H = 5000m$ ,  $\bar{H} = 2774m$  と設定)。又,  $z_g$  は地表面の高さである。表 3 の各式はこのからへの座標変換が施されている。

注 3) 地表付近の風速, 温位の分布に対して, 以下の浮力補正  $\Psi$  を含む形の対数則を仮定した。

$$V_s(z) = u_* k^{-1} [\ln \{(z + z_o) / z_{ot}\} - \Psi] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & (\Theta(z_1) - \Theta_G) \\ &= \frac{Pr_t}{k} T_* \left[ \ln \left( \frac{z_1 + z_{ot}}{z_{ot}} \right) + \left( \frac{z_o}{z_{ot}} \right) - \Psi \right] \quad (2) \end{aligned}$$

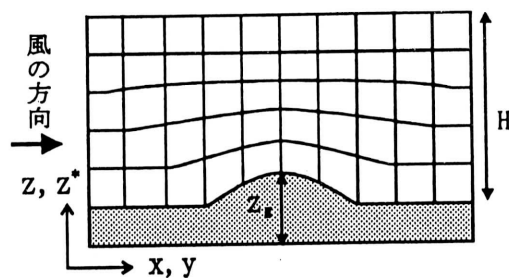


図 5 地形に沿った座標系

$\Psi$ : Panofsky の安定度による補正項

$$\Psi(\zeta) = \int_0^{\zeta} (1 - \Phi(\zeta')) / \zeta' d\zeta'$$

不安定の場合:  $\Phi(\zeta) = (1 - 15\zeta)^{-1/4}$

安定の場合:  $\Phi(\zeta) = (1 + 5\zeta)$

$k$ : カルマン定数 ( $k = 0.4$ )

$V_s$ : 水平風速成分 ( $= \sqrt{U^2 + V^2}$ )

$\Theta$ : 温位

$u_*$ : 摩擦速度

$T_*$ : 基準温度スケール

$\zeta$ : 無次元高さ ( $= z / L$ )

$L$ : モニンオブコフの長さスケール

$$(L = -u_*^3 / (q\beta v_g H_t))$$

$H_t$ : 鉛直方向の乱流温度輸送量 ( $H_t = -u_* T_*$ )

$Pr_t$ : 中立時の乱流 Prandtl 数 (本研究では  $Pr_t = 1$ )

$S_{ct}$ : 中立時の乱流 Schmidt 数 (本研究では  $S_{ct} = 1$ )

$z_o$ : 運動量に対する粗度長

$z_{ot}$ : 温度に対する粗度長。ここでは, Garratt 等に従い,

$$\ln(z_o / z_{ot}) = 2 \text{ の関係より } z_{ot} \text{ を与えた。}$$

注 4) 地表面の比湿を次式より与えた。

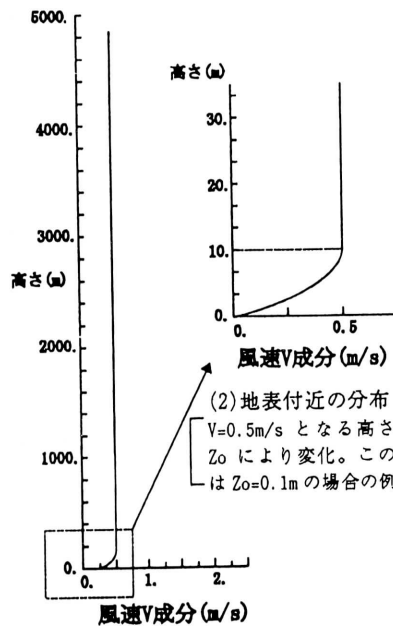
$$q_G = q(z) + \beta (q_{sat} - q(z)) \quad (3)$$

$q_G$ : 地表面の比湿 ( $kg/kg$ )

$\beta$ : 地表面の蒸発効率<sup>5), 6)</sup>

$q(z)$ : 高さ  $z$  での比湿 (水蒸気混合比,  $kg/kg$ )

$q_{sat}$ : 地表面初期温度 (陸地で  $18^\circ C$ , 水面で  $25^\circ C$ ) に対する飽和比湿



(1) 計算領域全体の分布

図 6 風速の初期値の鉛直分布

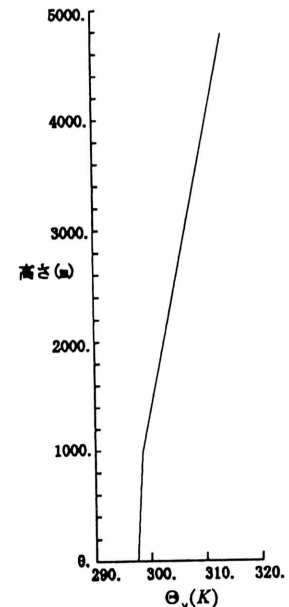


図 7  $\Theta_v$  の初期値の鉛直分布

注5) 初期値の風向は全領域で南風とした。風速は水平面内では一様と仮定し、地表付近では、風速のV成分(南北方向成分)の鉛直分布を浮力補正項Ψを含む形対数速度分布(注3(1)式)より与え、風速U成分(東西方向成分)は0とした(図6(2))。又、注3(1)式より与えられるVが0.5m/s以上となる高さでは全ての領域においてV=0.5m/sとした(図6(1))。相当温位Θ<sub>v</sub>の初期値は水平面内では一様、鉛直分布は高さについて線形的に増加するとして図7のように与えた。Θ<sub>v</sub>の水平面内平均値<Θ<sub>v</sub>>の鉛直分布は、計算を通じて変わらず、初期値Θ<sub>v</sub>の鉛直分布と等しいと仮定した。総水分混合比は地表面はβ法により与えた(注4(3)式)。又、地表面以外は相対湿度50%とした。乱流量の初期値はMellor-Yamadaのレベル2のモデルを用いて与えた。このレベル2のモデルは、全ての乱流統計量の時間微分項及び、移流、拡散項を無視することにより導出される代数モデルである<sup>1),2)</sup>。

注6)  $K_{xx} = 2c(\Delta x) |\partial U / \partial x|$ ,  
 $K_{yy} = 2c(\Delta x) (\Delta y) |\partial V / \partial y|$   
 $K_{xy} = c(\Delta x) (\Delta y) \{ |\partial U / \partial y| + |\partial V / \partial x| \}$

$c = 0.01$

注7) 文献1)の表記に従って、 $\bar{S}_M, \bar{S}_H$ を示すと以下のようになる。

$$\bar{S}_M = \frac{3A_1}{\gamma_1 - \gamma_2 \Gamma + 3A_1 \Gamma / B_1} (\gamma_1 - \gamma_2 \Gamma) \quad (4)$$

$$\bar{S}_H = 3A_2 (\gamma_1 - \gamma_2 \Gamma) \quad (5)$$

但し、

$$\Gamma = R_f / (1 - R_f)$$

$$R_f = -\beta g \bar{w} \bar{\theta} / (P_{xx} + P_{yy})$$

$$\gamma_1 = 1/3 - (2A_1 / B_1)$$

$$\gamma_2 = (B_2 / B_1) + (6A_1 / B_1)$$

$$P_{xx} = -\bar{u} \bar{w} (\partial U / \partial z)$$

$$P_{yy} = -\bar{v} \bar{w} (\partial V / \partial z)$$

$$A_1 = 0.78, A_2 = 0.79, B_1 = 15.0, B_2 = 8.0$$

主な記号

x, y, z: 空間座標の3成分

(x: 東西方向, y: 南北方向, z: 鉛直方向)

Δx, Δy, Δz: x, y, z各方向のメッシュ分割幅

U, V, W: 風速のx, y, z成分のアンサンブル平均

表3 複雑地形上の大気乱流モデル(mellor-Yamadaのレベル2.5)<sup>3),4)</sup>

<p>①水平方向の運動方程式</p> $\frac{DU}{Dt} = f(V - V_g) + g \frac{\bar{H} - z^*}{H} \left( 1 - \frac{\langle \Theta_v \rangle}{\Theta_v} \right) \frac{\partial z_g}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{xy} \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\bar{H}}{H - z_g} \frac{\partial}{\partial z^*} (-\bar{u} \bar{w}) \quad (6)$ $\frac{DV}{Dt} = -f(U - U_g) + g \frac{\bar{H} - z^*}{H} \left( 1 - \frac{\langle \Theta_v \rangle}{\Theta_v} \right) \frac{\partial z_g}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xy} \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\bar{H}}{H - z_g} \frac{\partial}{\partial z^*} (-\bar{v} \bar{w}) \quad (7)$ <p>ここで、gは重力加速度、K<sub>xx</sub>, K<sub>xy</sub>(=K<sub>yx</sub>), K<sub>yy</sub>は水平方向の拡散に関する渦動粘性係数(注6)。</p> $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x} + V \frac{\partial}{\partial y} + W^* \frac{\partial}{\partial z^*} \quad (8)$ <p>②地衡風成分のU<sub>g</sub>(z*)とV<sub>g</sub>(z*)</p> $fU_g(z^*) = fU_g(\bar{H}) \frac{\langle \Theta_v \rangle}{\langle \Theta_v(\bar{H}) \rangle} + g \frac{H - z_g}{H} \int_{z^*}^{\bar{H}} \frac{1}{\langle \Theta_v \rangle} \frac{\partial}{\partial y} \Delta \Theta_v dz' - \frac{g}{H} \frac{\partial z_g}{\partial y} \int_{z^*}^{\bar{H}} \frac{\Delta \Theta_v}{\langle \Theta_v \rangle} dz' \quad (9)$ $fV_g(z^*) = fV_g(\bar{H}) \frac{\langle \Theta_v \rangle}{\langle \Theta_v(\bar{H}) \rangle} - g \frac{H - z_g}{H} \int_{z^*}^{\bar{H}} \frac{1}{\langle \Theta_v \rangle} \frac{\partial}{\partial x} \Delta \Theta_v dz' + \frac{g}{H} \frac{\partial z_g}{\partial x} \int_{z^*}^{\bar{H}} \frac{\Delta \Theta_v}{\langle \Theta_v \rangle} dz' \quad (10)$ <p>ここで、ΔΘ<sub>v</sub> = Θ<sub>v</sub> - &lt;Θ<sub>v</sub>&gt;であり、&lt;&gt;は水平面内の平均。</p> <p>③連続の式</p> $\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W^*}{\partial z^*} - \frac{1}{H - z_g} \left( U \frac{\partial z_g}{\partial x} + V \frac{\partial z_g}{\partial y} \right) = 0 \quad (11)$ <p>ここで、<math>W^* = \frac{\bar{H}}{H - z_g} W + \frac{z^* - \bar{H}}{H - z_g} \left( U \frac{\partial z_g}{\partial x} + V \frac{\partial z_g}{\partial y} \right)</math> (12)</p>	<p>④乱流エネルギー - q<sup>2</sup>/2</p> $\frac{D}{Dt} \left( \frac{q^2}{2} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{K_{xx}}{\sigma_q} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{K_{yy}}{\sigma_q} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{2} \right) \right] + \left( \frac{\bar{H}}{H - z_g} \right)^2 \times \frac{\partial}{\partial z^*} \left[ q S_q \frac{\partial}{\partial z^*} \left( \frac{q^2}{2} \right) \right] - \frac{\bar{H}}{H - z_g} \left( \bar{u} \bar{w} \frac{\partial U}{\partial z^*} + \bar{v} \bar{w} \frac{\partial V}{\partial z^*} \right) + \beta_{\nu} g \bar{w} \bar{\theta}_v - \frac{q^3}{B_1} \quad (13)$ <p>ここで、q<sup>2</sup> = u<sup>2</sup> + v<sup>2</sup> + w<sup>2</sup>。S<sub>q</sub> = 0.2、B<sub>1</sub> = 16.6、σ<sub>q</sub> = 1.0。</p> <p>⑤乱れ長さスケール</p> $\frac{D(q^2 l)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{K_{xx}}{\sigma_l} \frac{\partial (q^2 l)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{K_{yy}}{\sigma_l} \frac{\partial (q^2 l)}{\partial y} \right] + \left( \frac{\bar{H}}{H - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left[ q l S_l \frac{\partial (q^2 l)}{\partial z^*} \right] - f l \left[ \frac{\bar{H}}{H - z_g} \left( \bar{u} \bar{w} \frac{\partial U}{\partial z^*} + \bar{v} \bar{w} \frac{\partial V}{\partial z^*} \right) - \beta_{\nu} g \bar{w} \bar{\theta}_v \right] - \frac{q^3}{B_1} \left[ 1 + F_2 \left( \frac{l}{kz} \right)^2 \right] \quad (14)$ <p>ここで、S<sub>l</sub> = 0.2、F<sub>1</sub> = 1.8、F<sub>2</sub> = 1.33、σ<sub>l</sub> = 1.0。</p> <p>⑥内部エネルギー - (相当温位 Θ<sub>v</sub>)</p> $\frac{D \Delta \Theta_v}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{K_{xx}}{\sigma_{\Theta_v}} \frac{\partial \Delta \Theta_v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{K_{yy}}{\sigma_{\Theta_v}} \frac{\partial \Delta \Theta_v}{\partial y} \right] + \frac{\bar{H}}{H - z_g} \left[ \frac{\partial}{\partial z^*} (-\bar{w} \bar{\theta}_v) + \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial R_N}{\partial z^*} - W^* \frac{\partial \langle \Theta_v \rangle}{\partial z^*} \right] \quad (15)$ <p>ここで、σ<sub>Θ<sub>v</sub></sub> = 1.0。R<sub>N</sub>は正味の長波放射量。</p> <p>⑦総水分混合比 Q<sub>w</sub></p> $\frac{D Q_w}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{K_{xx}}{\sigma_{Q_w}} \frac{\partial Q_w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{K_{yy}}{\sigma_{Q_w}} \frac{\partial Q_w}{\partial y} \right] + \frac{\bar{H}}{H - z_g} \frac{\partial}{\partial z^*} (-\bar{w} q_w) \quad (16)$ <p>ここで、σ<sub>Q<sub>w</sub></sub> = 1.0。</p> <p>⑧鉛直方向の乱流フラックス</p> $\bar{u} \bar{w} = -l q \bar{S}_M (\partial U / \partial z) \quad (17a) \quad \bar{v} \bar{w} = -l q \bar{S}_M (\partial V / \partial z) \quad (17b)$ $\bar{w} \bar{\theta}_v = -l q \bar{S}_H (\partial \Theta_v / \partial z) \quad (18a) \quad \bar{w} q_w = -l q \bar{S}_H (\partial Q_w / \partial z) \quad (18b)$ <p><math>\bar{S}_M, \bar{S}_H</math>: 浮力による補正項(注7)。</p>
---	--

$u, v, w$ : 風速変動の各成分  
 $U_g, V_g$ : 地衡風成分  
 $q = (\langle u^2 \rangle + \langle v^2 \rangle + \langle w^2 \rangle)^{1/2}$   
 $T$ : 絶対温度  
 $\Theta$ : 温位 ( $\Theta = (P_o / P)^{R/C_p T}$ )  
 $\Theta_v$ : 相当温位  
 $P_o = 1000\text{mb}$   
 $\theta_v$ :  $\Theta_v$  の変動成分  
 $Q_w$ : 総水分混合比 (水蒸気 + 液水)  
 $q_w$ :  $Q_w$  の変動成分  
 $\beta$ : 地表面の蒸発効率  
 $f$ : コリオリパラメータ  
 $l$ : 乱れ長さスケール  
 $g$ : 重力加速度 ( $9.8\text{m/s}^2$ )  
 $\beta_V$ : 体積膨張率 ( $\beta_V = 1 / \langle \Theta_v \rangle$ )  
 $z_g$ : 地面の標高  
 $z^*$ : 座標変換後の鉛直座標  
 $C_p$ : 比熱 ( $\text{J/Kg} \cdot \text{K}$ )  
 $\rho$ : 密度 ( $\text{kg/m}^3$ )

(1995年12月14日受理)

## 参考文献

- 1) Mellor, G.L., and Yamada, T., 1974, A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary layer, J of Applied Meteorology, Vol. 13, No. 7, 1791-1806.
- 2) Mellor, G.L., and Yamada, T., 1982, Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problem, Rev. Geophys. Space Phys., Vol. 20, No. 4, 851-875.
- 3) Yamada, T., and S. Bunker, 1989, A Numerical Model Study of Nocturnal Drainage Flows with Strong Wind and Temperature Gradients, J of Applied Meteorology, 28, 545-554.
- 4) 村上周三, 持田灯, 金相璣, 1994, 都市気候モデルによる関東地方の流れ場, 温度場の数値解析 (その1) — 緑被率の変化の影響に関する検討 —, 日本建築学会関東支部研究報告集, 77-80.
- 5) 渡辺力, 1992, 森林蒸発散量の熱収支的評価法について, 水文・水資源学会誌, Vol. 5, 39~45.
- 6) Kondo, J., and Watanabe, T., 1992, Studies on the Bulk Transfer Coefficients over a Vegetated Surface with a Multilayer Energy Budget Model, J of Atmospheric Sciences, Vol. 49, 2183-2199.
- 7) 桑形恒男, 近藤純正, 東北南部から中部地方までのアメダス地点における地表面粗度の推定, 1990年3月, 天気, 55-59.
- 8) 三浦昌生, 尾島俊雄, 1993年12月, 95地点の実測による都心と郊外の地中温度差について, 日本建築学会計画系論文報告集, 35-44.
- 9) 気象庁, 1992年3月, 北太平洋海洋気候図 (1987-1990).
- 10) 高俣俊, 三浦秀一, 尾島俊雄, 1994年2月, 東京江東区における緑地, 河川のクールアイランド形成のための実態調査研究 — 都市環境における緑地オープンスペースによる熱的效果 (その2) —, 日本建築学会計画系論文集, 75-83.
- 11) 国土庁計画・調整局, 建設省国土地理院, 1992, 国土数値情報.