

数値気候モデルによる関東地方の局地気象の解析

—初期温位分布, 海面温度, 地中の熱容量及び人工排熱の影響の検討—

Numerical Analysis of Local Climate in Kanto Plane

—Effects of Initial Temperature Profile, Seawater Temperature, Ground Heat Capacity and Artificial Beat Release—

金 相 璣*・大 岡 龍 三**・持 田 灯*・村 上 周 三**

Sangjin KIM, Ryuzo OOKA, Akashi MOCHIDA and Shuzo MURAKAMI

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 の大気乱流モデルを用いた数値解析により調べた結果を示す。本報では、温位分布の初期値、海面温度の分布、地中の熱容量、人工排熱等の取扱いの相違が流れ場、温度場の予測結果に与える影響を調べる。また、計算結果を既往の観測結果と比較し、その予測精度の改善を検討する。

1. は じ め に

著者らは、近年、Mellor-Yamada 型の大気乱流モデル¹⁻⁵⁾に基づく都市気候の数値解析手法の研究を行ってきた^{1, 2)}。都市気候の数値解析では、種々の物理量の初期条件、境界条件を与える必要があるが、現状では、その全てに対して参考となる観測データがある訳ではない。従って、妥当な結果を得るためには、これら各種条件が予測結果に及ぼす影響を把握しておく必要がある。本研究では既報²⁾の解析に対して、初期条件や境界条件の取扱いに修正を加え、予測精度の改善を図るとともに、温位分布の初期値、

海面温度の分布、地中の熱容量、人工排熱等の取扱いの相違が予測結果に及ぼす影響を検討した。

2. 解 析 概 要

2.1 計算 CASE (表 1)

表 1 に今回行った 5 つの計算 CASE を示す。表 1 では参考のために既報²⁾の条件も併記している。

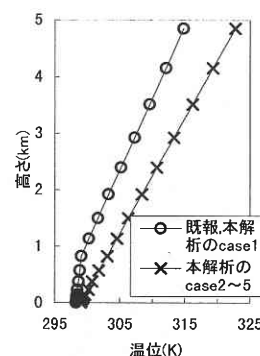


図 1 温位の初期値の鉛直分布

表 1 各 CASE における計算条件とその差異

計算 CASE	温位の初期値の鉛直分布(図 1、注 2)	海面温度	熱容量(表 4) (J/m ³ ・℃)	人工排熱(表 5) (W/m ²)	備考
CASE1	0~1km: 1K/km 1km 以上: 4K/km	25℃固定	1.884E+6 固定	建物用地 100 幹線交通用地 4	
CASE2	0~1km: 5K/km 1km 以上: 5K/km	25℃固定	1.884E+6 固定	建物用地 100 幹線交通用地 4	CASE1 に対して温位の初期鉛直分布を変更(図 1)
CASE3	0~1km: 5K/km 1km 以上: 5K/km	南北: 25℃~27℃ 東京湾: 28℃	1.884E+6 固定	建物用地 100 幹線交通用地 4	CASE2 に対して海面温度を変更
CASE4	0~1km: 5K/km 1km 以上: 5K/km	南北: 25℃~27℃ 東京湾: 28℃	土地利用に応じて変化	建物用地 100 幹線交通用地 4	CASE3 に対して熱容量の取り扱いを変更
CASE5	0~1km: 5K/km 1km 以上: 5K/km	南北: 25℃~27℃ 東京湾: 28℃	土地利用に応じて変化	・首都圏: 民生用エネルギーを考慮(図 3) ^{6,7)} ・その周辺: 建物用地 50 幹線交通用地 4	CASE4 に対して人工排熱を変更
既報 ²⁾	0~1km: 1K/km 1km 以上: 4K/km	25℃固定	1.884E+6 固定	建物用地 50 幹線交通用地 4	

*東京大学生産技術研究所 第 5 部

**東京大学生産技術研究所 附属計測技術開発センター

CASE 1 (基本 CASE) CASE 1では国土庁の国土数値情報⁸⁾の土地利用データ (100 m 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蒸発効率 (β), albedo, 粗度長 (Z_o) 等のパラメータを表2のように設定している。蒸発効率 β については、表3に示す既報の値に対して、文献9～11)を参考して、地表面からの潜熱フラックスの日積算値が水田では 18500 kJ/m^2 、畑では 14400 kJ/m^2 、裸地では 14200 kJ/m^2 になるように調整し、変更を加えた (表3)。他の計算上の相違点は注1) 参照。

CASE 2 CASE 1では初期値の鉛直方向の温位勾配は既報と同様に、1 km 未満は 1 K/km 、1 km 以上は 4 K/km としたのに対して、CASE 2では、吉門等¹²⁾の観測データを参考にして、鉛直方向で 5 K/km となるように変更した

(図1)。他の条件はCASE 1と同じである。

CASE 3 CASE 2に対して、海水面温度を変更した。すなわち、CASE 1, 2では海水面温度を 25°C で一定にしているのに対して、CASE 3では8月の平均海水面温度分布¹³⁾を参考に図2中に示すような分布を与えた (図2)。

CASE 4 CASE 3に対して、土地利用に応じて地中の熱容量を変化させた。各土地利用毎の熱容量の値は表3を参照。

CASE 5 CASE 1～4では建物用地で人工排熱を 100 W/m^2 と一定にしたのに対して、CASE 5では東京首都圏は民生用エネルギー消費に伴う排出を考慮して分布を与えた^{6, 7)}。ここで、排熱量は、建物用途別延床面積メッシュデータ^{14～16)}にエネルギー消費原単位¹⁷⁾を乗ずること

表2 土地利用分類によるパラメータの設定値

土地利用分類	地表面の蒸発効率 β	albedo α	粗度長 $Z_o(\text{m})$
田	0.5	0.2	0.05
畑	0.3	0.1	0.01
果樹園	0.3	0.2	1
その他の樹木畑	0.3	0.2	0.5
森林	0.3	0.15	2
原野(荒地)	0.3	0.2	0.01
建物用地	0	0.1	1
幹線交通用地	0	0.1	0.01
その他の用地	0.3	0.2	0.01
河川地及び湖沼	1.0	0.03	0.001
海浜	0.6	0.3	0.005
海水域	1.0	0.03	0.001

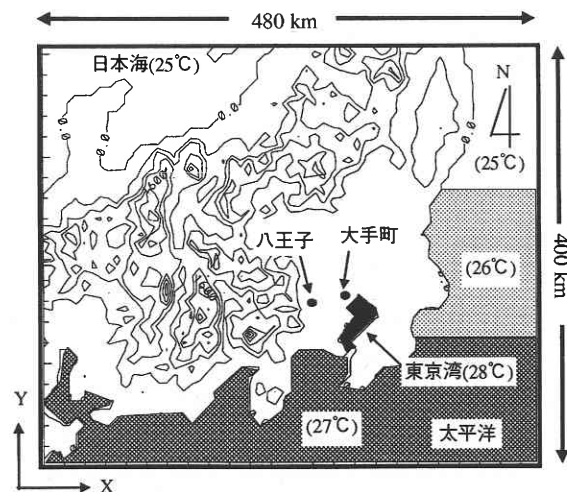


図2 計算領域

(海水面温度はCASE 1, 2では 25°C で同様、CASE 3～5では図中に示す温度分布を与えた)

表3 蒸発効率 β , 熱容量, 人工排熱量の設定値

土地利用区分	蒸発効率 β		熱容量 ($\text{J/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$)		人工排熱 (W/m^2) (注1)	
	既報 ²⁾	本計算	既報及びCASE1～3	CASE 4, 5	CASE 1～4	CASE5
田	0.6	0.5	1.884E+6	$3.0\text{E}+6$	0	民生用のエネルギー消費から推定 ^{6, 7)} (図3)
畑	0.3	0.3		$2.0\text{E}+6$	0	
果樹園	0.4	0.3		$2.0\text{E}+6$	0	
その他の樹木畑	0.3	0.3		$2.0\text{E}+6$	0	
森林	0.3	0.3		$2.0\text{E}+6$	0	
原野(荒地)	0.4	0.3		$2.0\text{E}+6$	0	
建物用地	0	0		$2.1\text{E}+6$	100	
幹線交通用地	0	0		$1.4\text{E}+6$	4	
その他の用地	0.3	0.3		$2.0\text{E}+6$	0	
河川地及び湖沼	1.0	1.0		$4.2\text{E}+6$	0	
海浜	0.6	0.6		$1.3\text{E}+6$	0	
海水域	1.0	1.0		$4.2\text{E}+6$	0	

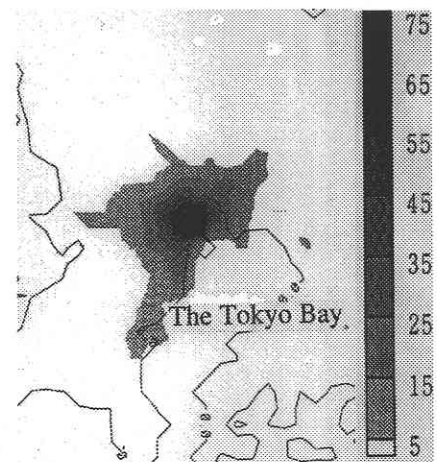


図3 CASE5で用意した人工排熱の分布^{6, 7)}

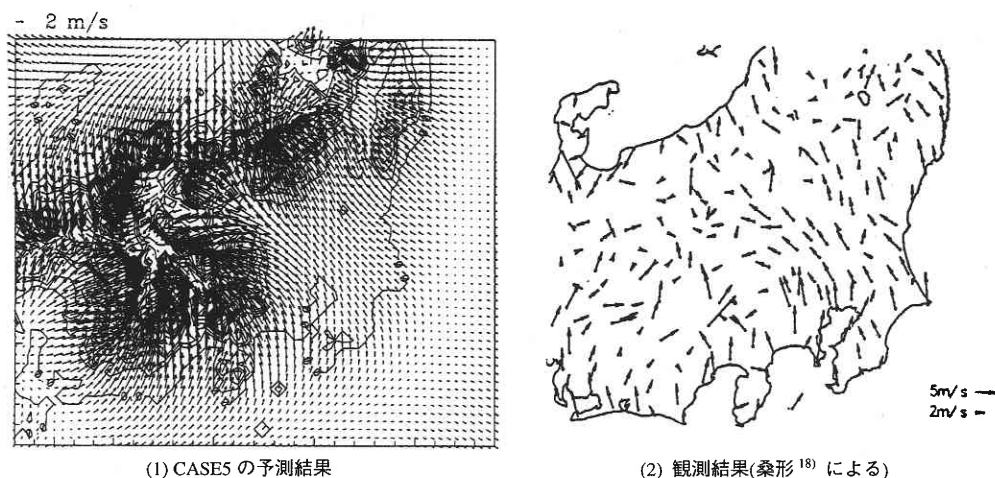


図4 風速ベクトル (100 m, 15時)

により推定した。これにより CASE 1～CASE 4 の場合、大手町を含む $8\text{ km} \times 8\text{ km}$ メッシュでの人工排熱量の平均値 75 W/m^2 に対して、CASE 5 では 63.3 W/m^2 となった。但し、CASE 5 の首都圏以外の地域の建物用地の人工排熱量は 50 W/m^2 とした。CASE 5 の人工排熱分布を図3に示す。

2.2 乱流モデル

既報²⁾ 同様に複雑地形に適用可能な形に拡張された Mellor-Yamada モデルのレベル 2.5^{1, 2, 3, 5)} を利用 (注3)。

2.3 解析領域、メッシュ分割

既報と同様に、 $480\text{ km} \times 400\text{ km}$ の解析領域 (図2参照) を、水平方向には 8 km の等間隔、 60×50 メッシュに分割した。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、地表より地下は深さ 50 cm までを 5 メッシュに分割した (注4)。

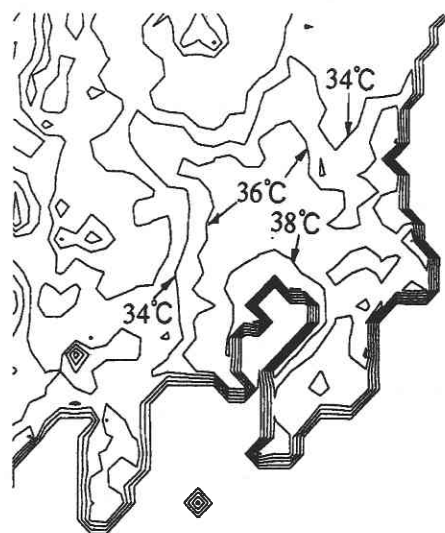


図5 地表面温度分布 (15時, CASE5)

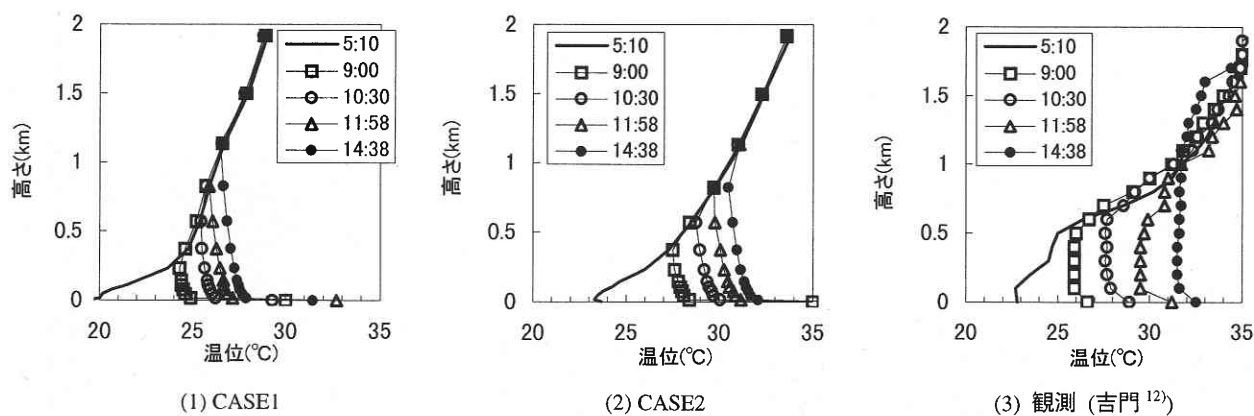


図6 温位の鉛直分布

2.4 境界条件

地表面温度は文献 1～5) と同様に 1 次元熱収支モデルから算出。他の境界条件、初期条件については文献 1, 2) 参照。但し、上述したように、温位分布の初期値、海水面温度の分布、地表面の albedo、地中の熱容量、人工排熱等の分布、数値については文献^{1, 2)} に対して変更を加えている (注 1)。

3. 予測結果に及ぼす各種要因の影響

8 月上旬の太陽高度に基づき午前 6 時からスタートし、その後 33 時間の時間積分を行った。

まず、今回行った 5 つの計算 CASE の中で、各条件の設定が最も実態に近いと考えられる CASE 5 と観測結果の比較した例を示す。図 4 は計算開始から 33 時間後の 15 時の

高さ 100 m における CASE 5 の風速分布と観測¹⁸⁾ による風速分布の比較である。CASE 5 の結果 (図 4 (1)) は観測結果 (図 4 (2)) と風向がよく対応している。また、風速値を調べると、CASE 5 (図 4 (1)) の場合、山岳の影響のある地域を除いて、2～5 m/s 程度の値となり、観測結果 (図 4 (2)) とほぼ一致している。

図 5 に同じく CASE 5 の 15 時の地表面温度分布を示す。地表面温度は都心部を含む東京湾岸で最大値を示す。又、都心中心部の最大温度 (約 38℃) は既往の実測結果²¹⁾ とよく対応している (注 5)。

以下、温位分布の初期値、海水面温度の分布、地中の熱容量、人工排熱等の取扱いの相違が予測結果に及ぼす影響を検討する。

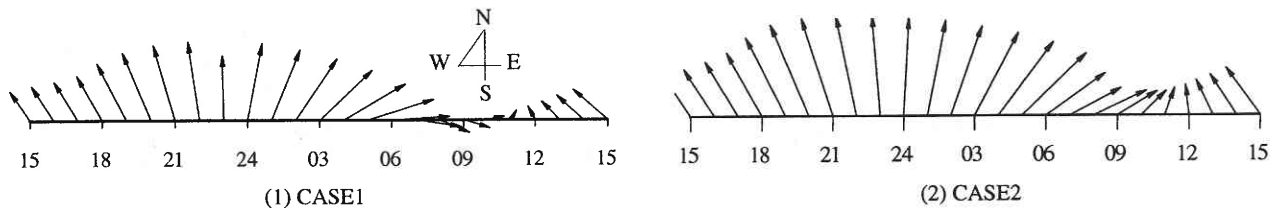


図 7 風速・風向の時間変化 (大手町)

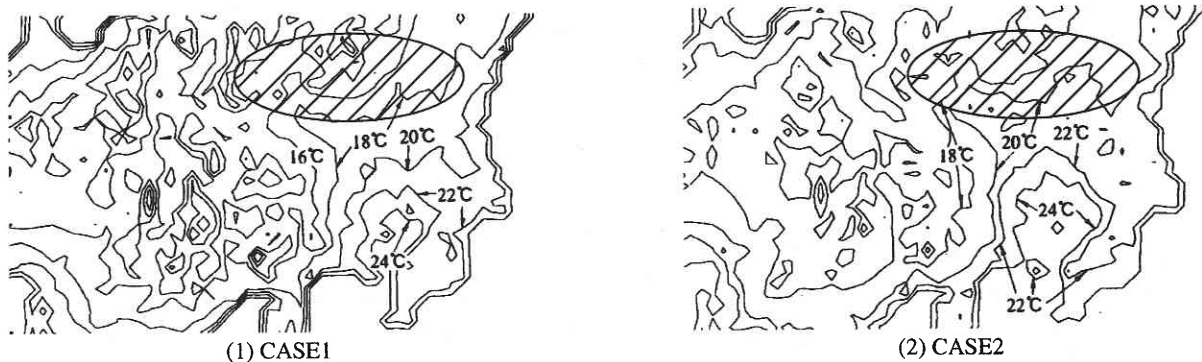


図 8 地表面の温度分布 (午前 5 時)

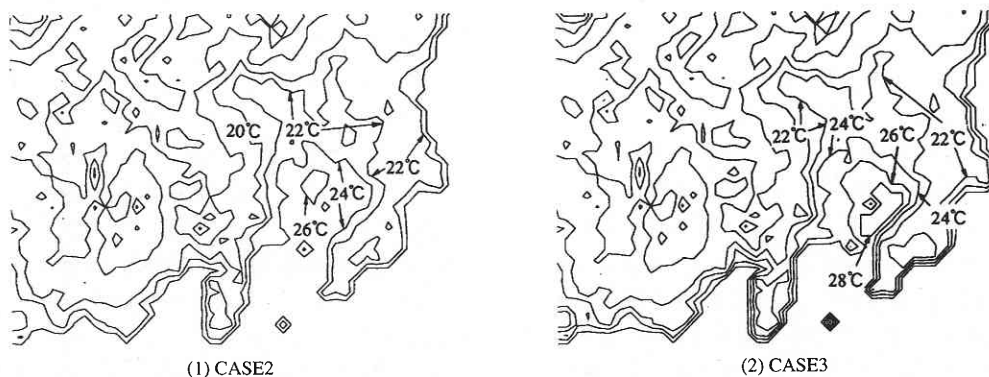
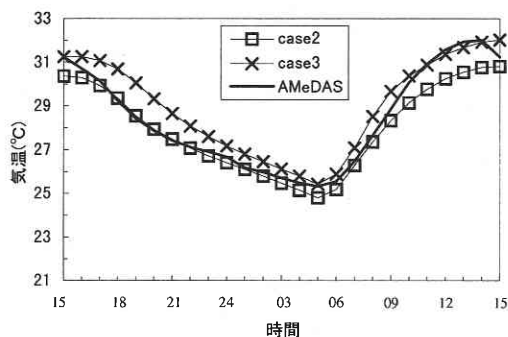
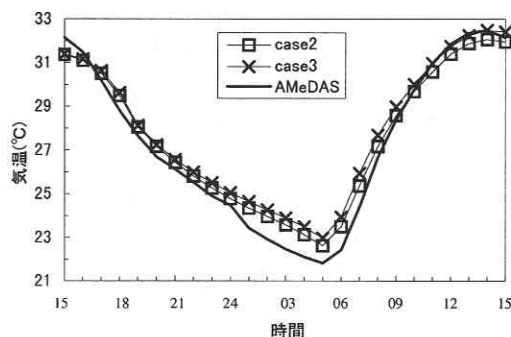


図 9 地表面の温度分布 (午前 3 時)



(1) 大手町



(2) 八王子

図 10 気温の時間変化 (高さ 10 m)

3.1 初期温位分布の影響 (CASE1 と CASE2)

図 6 に CASE 1 と CASE 2 の浦和における温位の鉛直分布の時間変化を示す。図 1 に示すように、CASE 1 では既報 2) と同様に 1 km 未満は 1 K/km, 1 km 以上は 4 K/km の勾配を持つ温位の鉛直分布を初期値として与えたのに対して、CASE 2 ではこれを吉門等の観測結果¹²⁾に対応する温位分布に変更している。両 CASE ともに大気混合層の高さ (1 ~ 1.5 km 程度) までは時間変化が見られるが、それ以上では初期値の分布がそのまま保持される。従って、当然のことながら、観測値を初期値とした CASE 2 の方が CASE 1 の結果に比べて、観測値によく一致する。図 7 に大手町における風速・風向の時間変化を示す。CASE 1 (図 7 (1)) では、午前中に陸風が発生しているのに対して、CASE 2 (図 7 (2)) では陸風が発生しておらず、この点に関しては CASE 1 の方が優れている。次に早朝 (午前 5 時) の地表面の温度分布を図 8 に示す。群馬県から栃木県の北部に到る山岳部 (図中の \square 部) において、CASE 1 (図 8 (1)) では CASE 2 (図 8 (2)) よりも約 2°C 地表面温度が低下しており (注 6)、このような内陸の標高の高い地域の地表面温度の差が陸風の発生の有無に関する CASE 1 と CASE 2 の差の主因となっているものと推定される (注 7)。

3.2 海面水温の影響 (CASE2 と CASE3)

計算 CASE の概要に示したように、CASE 2 では海面水温を 25°C で一定にしているのに対して、CASE 3 では 8 月の平均海面水温分布を与えている (図 2)。図 9 に午前 3 時の地表面温度を示す。CASE 2 (図 9 (1)) に比べて、CASE 3 (図 9 (2)) では東京湾等の海水温を上昇させたことにより、関東地方の海に近い領域の温度が 1°C ~ 1.5°C 程度上昇している。又、ここには示さぬが、昼間にも同じような差が見られ、その温度差は一日中を通じて殆ど同じである。図 10 には大手町と八王子の高さ 10 m における気温の時間変化を示す。大手町では海水温を上昇させた CASE 3 の方が、CASE 2 に比べて一日を通じて 1°C ~ 1.5°C 程度気温が高い。しかし、八王子での CASE 2 と

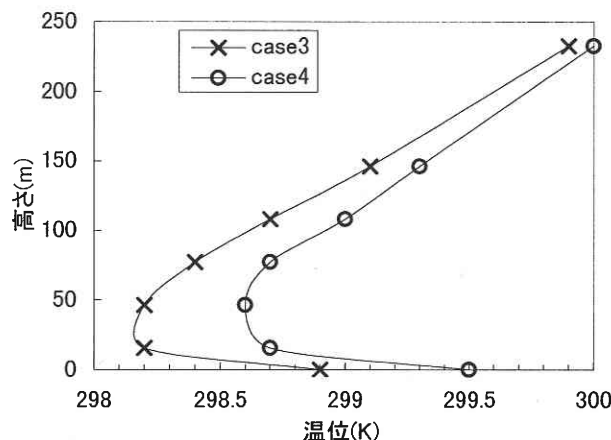


図 11 温位の鉛直分布 (大手町, 午前 3 時)

CASE 3 の気温には、夜間若干の差が見られるが、大手町のような顕著な差は見られない。この結果は海からの移流効果が、都心部では大きい影響を及ぼし、海面水温の影響は無視し得ぬことを示している。

3.3 地中の熱容量の影響 (CASE3 と CASE4)

CASE 1 ~ CASE 3 では土地利用の差にかかわらず、地中の熱容量を 1884 kJ/m³°C と一定としていた。これに対して、CASE 4 では土地利用に応じて地面の熱容量を表 3 のように変化させた。この結果、大手町を含むメッシュの熱容量は CASE 3 の 1884 kJ/m³°C に対して、CASE 4 では 2171 kJ/m³°C と増加した。図 11 に午前 3 時の大手町における温位の鉛直分布を示す。CASE 3 より大手町の熱容量が大きく設定された CASE 4 の場合、地表の蓄熱の影響により、早朝においても CASE 3 よりも気温が高く、対流混合層の影響がより上方まで及んでいる。

3.4 人工排熱の影響 (CASE4 と CASE5)

CASE 1 ~ 4 では人工排熱を建物用地で 100 W/m² と一定にしたため、大手町では 75.5 W/m² (8 km メッシュ平均)、八王子では 33.4 W/m² である。これに対して、CASE 5 では図 3 に示したように、首都圏では民生用エネルギー消費

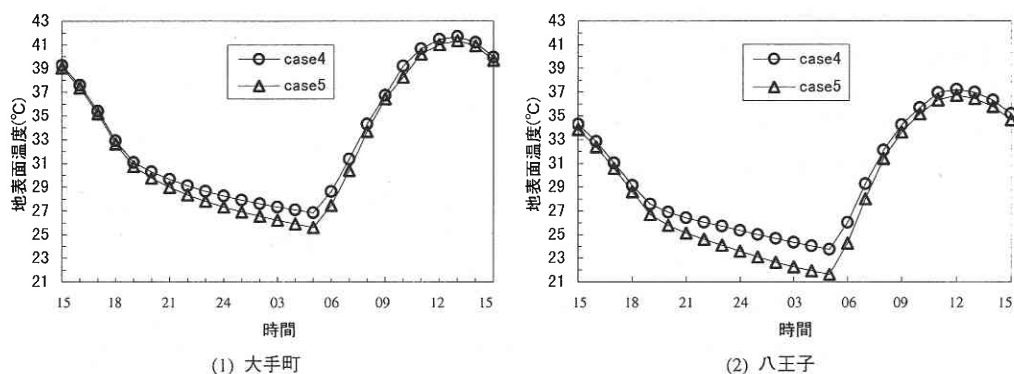


図 12 地表面温度の時間変化

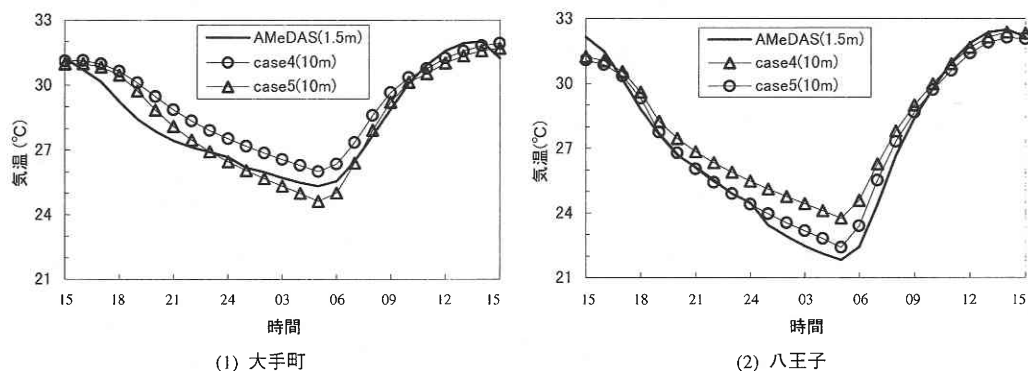


図 13 高さ 10 m における気温の時間変化

に伴う排出を考慮した分布^{6,7)}を与えており、人工排熱は大手町では 66.3 W/m^2 、八王子では 1.3 W/m^2 となった。図 12 に大手町と八王子における地表面温度の日変化を示す。大手町では、CASE 4 に比べて CASE 5 の地表面温度が一日中約 1°C 程度低下しており、特に、夜間に大きな差が見られる。これは大手町における CASE 4 の人工排熱 (75.5 W/m^2) に比べて、CASE 5 の人工排熱 (66.3 W/m^2) が減少したためである。八王子の場合も大手町と同様に、夜間の方が両 CASE の差は大きい。図 13 は気温の日変化の比較である。CASE 5 の場合、CASE 4 と比べて夜間の気温が低下し、AMeDAS の測定値に近づいている。また、AMeDAS データをみると、夜間は大手町の気温が高く、昼間は八王子の気温が高くなっている。尚、今回の計算では、人工排熱量は一日を通じて一定とし、その時刻別変化の影響は考慮していない。この点については、今後検討を加えたい。

4. 結 論

- (1) 本稿で検討した計算 CASE の中で、計算条件の設定が最も現実に近いと考えられる CASE 5 CASE 5 の風速分布、温度分布は観測結果とよく対応し、既報²⁾の解析結果に比べて、多くの点で改善がみられた。但し、この CASE においても陸風が発生しない等の問題も残

されている。

- (2) 温位の鉛直分布の初期値は計算領域全体の温度の絶対値を決定するので、十分な配慮が必要である。
- (3) 地表面温度の初期値や地中温度の境界条件の設定の適否は陸風の再現に大きな影響を及ぼす。
- (4) 海水温度の値は 1 日を通じて、都心部の気温に無視し得ぬ影響を及ぼす。
- (5) 地中の熱容量や人工排熱量は特に夜間の地表面温度や気温に大きく影響する結果となった。

注 1) 相対湿度は、既報²⁾では 1 km まで 50%，1 km 以上

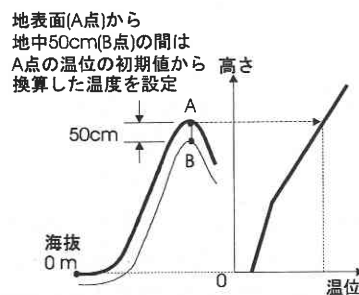
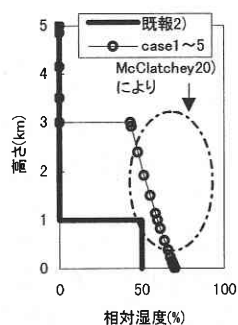


図 14 相対湿度の初期値 図 15 大気中の初期地表面温度及び地中温度の設定

は 0% とした (図 14). 本解析の CASE 1 ~ 5 では 3 km までは McClatchey の大気モデル²⁰⁾ を用い, 3 km 以上の上空では 0% とした (図 14). 地中温度は既報²⁾ では, 大手町において地下 1 m で 22.5°C としたが, 本解析では文献 19) 等参考として地下 50 cm で 26.1°C になるように設定した (注 2). 建物の albedo は street canyon 内の日射の相互反射 (天空率の減少) を考慮して, 既報²⁾ の 0.15 に対して本解析では 0.1 とした. 又, 人工排熱は既報²⁾ では建物用地で 50 W/m², 幹線交通用地で 4 W/m² として設定したが, 本解析の CASE 1 ~ 4 では建物用地で 100 W/m², 幹線交通用地で 4 W/m² とした. 又, CASE 5 では杉山・尾島等^{6, 7)} を参考にし, 首都圏の民生用エネルギー消費から推定される人工排熱分布を与えた (図 3).

注 2) 山岳部等のような標高の高い地域の地表面温度の初期値は大気中の温位の初期値の鉛直分布 (図 1) と同じ高さのそれに等しいと仮定した (図 15). 又, 地中温度の初期値は設定された地表面温度と同じとした. 地表面温度, 地中温度は計算の進行より変化するが, 地中 50 cm の土壤温度は, この様に与えられた数値がそのまま境界条件となる. この取扱いについては, 今後検討が必要であると考えている.

注 3) 山田等が開発した HOTMAC モデル 4.5 に対して著者らがいくつか改良を加えたソフトを利用.

注 4) 但し, 地表に接する大気側のメッシュの鉛直幅は既報の 4 m に対して, 本解析の全ての CASE で 20 m.

注 5) 文献 21) の実測データを用いて夏季の晴天日の地表面温度を地表被覆別に平均すると以下ようになる. 地面が, 緑で 30°C, 水で 26°C, 道路で 48°C, 屋上面で 48°C, 東壁面で 42°C, 西壁面で 42°C, 南壁面で 45°C, 北壁面で 38°C である. これを都心部の土地利用状況⁸⁾ を考慮して加重平均すると, 都心部で約 38°C となる. CASE 5 の結果は図 5 に示すように, 都心部の最大値が 38°C となり, 実測結果とよく一致する. 既報¹⁾ の結果では都心の最大値が 36°C とやや低めであったので, この点に関しても改善がみられる.

注 6) この CASE 1 と CASE 2 の差は, 注 2) に示したように, 本解析では, 山岳部の地表面温度の初期値と地中温度の境界条件を大気中の温位の初期分布より与えているために生じている.

注 7) ここには示さぬが, CASE 2 と同じ温位の鉛直分布を初期値とした CASE 3 ~ 5 の結果においても, 風速・風向の時間変化は CASE 2 と同様であり, 陸風が発生しなかった.

謝 辞

本研究は日本建築学会・地球環境委員会 (大田利彦委員長) の「都市気候モデリング WG」(村上周三主査) の活動の一環として行われたものである. 本研究実施にあたり山田哲司博士 (Yamada Science and Art Corporation), 吉門洋博士 (資源環境技術総合研究所) を始めとする同小委員会の委員各位から種々の御助言をいただいた. 又, 尾島俊雄教授 (早稲田大学) から種々の貴重な御助言・御協力をいただいた. ここに記して深甚なる謝意を表します.

(1997 年 8 月 10 日 9 日 受理)

参 考 文 献

- 1) 村上周三, 持田灯, 金相璣, 大岡龍三, 1997 年 2 月, 関東地方における土地利用状況の変化と流れ場・温度場の関係, Mellor-Yamada 型の都市気候モデルによる局地気象解析, 日本建築学会論文報告集, No.491, 31-39.
- 2) 村上周三, 持田灯, 金相璣, 大岡龍三, 1996 年 2 月, 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, 東京大学生産技術研究所 生産研究, No.48, 2, 33-39.
- 3) George L. Mellor. and Tetsuji Yamada., 1974, A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers, Journal of Applied Meteorology, Vol.13, No.7, 1791-1806.
- 4) George L. Mellor. and Tetsuji Yamada., 1982, Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems, Reviews of Geophysics and Space physics, Vol.20, No.4, 851 - 875.
- 5) Tetsuji Yamada. and Susan Bunker., 1989, A Numerical Model Study of Nocturnal Drainage Flows with Strong Wind and Temperature Gradients, 1989, Journal of Applied Meteorology, Vol.28, 545-554.
- 6) 尾島俊雄, 村上周三, 持田灯, 杉山寛克, 金相璣, 1997, 東京首都圏におけるヒートアイランドの形成に関する数値解析—都市圏の拡大が及ぼす影響に関する検討—, 東京大学生産技術研究所 生産研究, No. 49, 4, 27-32.
- 7) 杉山寛克, 持田灯, 村上周三, 尾島俊雄, 1997, 沿岸部における都市圏の拡大がヒートアイランドの形成に及ぼす影響に関する解析, 日本建築学会計画系論文集, No. 492, 83 ~ 90.
- 8) 国土庁計画・調整局, 建設省国土地理院, 1992, 国土数値情報.
- 9) 福岡義隆, 張一平, 鳥居淳., 1990 年 11 月., 水田と畑における熱収支の違い., 中国・四国の農業気象., 第 3 号., 1 ~ 10.
- 10) 大上, 田頭, 大槻, 丸山, 1993, 4, 水田, 畑地, 裸地, アスファルト舗装面における熱収支特性と温度環境, 農業土木学会論文集, 164 号, 97 ~ 104.
- 11) 藤野毅, 柴原千浩, 浅枝隆, 村瀬範芳, 和気亜紀夫., 1994 年 2 月, 浸透性舗装の水分・熱移動特性と冷却効果, 水工学論文集, 第 38 巻, pp 235-240.
- 12) 吉門洋, 水野建樹, 近藤裕昭, 北林興二, 下形茂雄, 山本晋, 1993, 大都市域上空における汚染物質輸送の観測的研究, 工業技術院 資源環境技術総合研究所第 6 号, 1 ~ 136.
- 13) 気象庁, 1992 年 3 月, 北太平洋海洋気候図 (1987 ~ 1990)

- 14) 渡辺浩文, 1994, 東京首都圏における熱汚染のメッシュ別
定量化に関する調査研究, 早稲田大学博士論文.
- 15) 渡辺浩文, 尾島俊雄, 1994, 河川水熱利用地域冷房施設の
大気への熱的影響に関する研究, 日本建築学会計画系論文
集, 第 460 号, 61 ~ 69.
- 16) 小松悟, 本間進太郎, 渡辺浩文, 尾島俊雄, 1993, 人工排
熱量の増加に伴う東京首都圏の都市気候の変化に関する研
究, 日本建築学会関東支部研究報告集, 37 ~ 40.
- 17) 早稲田大学尾島研究室, 1995, 建築の光熱水原単位, 早稲
田大学出版部.
- 18) 桑形恒男, 近藤純正, 1990 年 3 月, 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, 天気, 55
~ 59.
- 19) 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 (その 2 東京における地
中温度分布に関する実測調査研究), 日本建築学会計画系
論文報告集, 第 454 号, 35 ~ 44.
- 20) McClatchey, R. A, Fenn, R.W., Selby, J. E. A., Volz, F. E., and
Garrig, J. S. (1971). No. 354, AFCRL-71-0279.
- 21) 高偉俊, 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 (その 2 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), 日本建築学会計画系論文報告集, 第 456
号, 75 ~ 83.