

神戸地域の市街化にともなう大気環境の変化

URBANIZATION EFFECT ON ATMOSPHERIC ENVIRONMENT IN KOBE CITY AREA

玉井昌宏¹・道奥康治²・松下晃己³

Masahiro TAMAI, Kohji MICHIOKU and Akemi MATSUSHITA

¹正会員 博(工) 大阪大学助教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

²正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

³非会員 前神戸大学工学部学生

Local climate change with urbanization in Kobe City area was investigated by using a turbulence closure model. Wind and temperature fields in air were computed with respect to the present ground conditions in the city and those of about fifty years ago when the city area was less extended. Parameters of ground surface such as albedo, geometrical roughness and water content of the old age were estimated from correlation between land use and categories of governmental districts. The analysis showed that urbanization in the last fifty years brings local warming such air temperature increases of about 0.5 degree in daytime and 0.3 degree in nighttime at the maximum. Intensification of sea-land breezes by the urbanization is also confirmed.

Key Words : Local climate change, atmospheric environment, turbulence closure model, urbanization

1. はじめに

都市域の大気環境は、市街地の拡大や高密度化のような地域規模の要因と、温室効果ガスの増加など地球規模の要因とが互いに関わりあって経年的に変化する。これらの要因は相互に影響を及ぼしあうために、実測データから個別要因の影響を分離抽出することは非常に困難な作業である。そこで、数値シミュレーションによって、両者の影響を個別に評価しようとする試みが盛んに行われている。例えば、一ノ瀬¹⁾は土地利用データLUISを用いて、大阪湾岸地域を対象として現在と江戸後期を想定した数値解析を実施して、夏季晴天日の最高気温が135年間に最大2℃程度上昇したことを示している。一方、大橋²⁾は大阪近郊の衛星都市程度の面積の領域における都市再開発シナリオを想定した数値シミュレーションによって、最高気温の上昇が最大で0.5℃程度となることなどを提示している。

本研究においても、これらの先行研究と同様の視点にたって、都市域の土地利用変化が大気環境におよぼす影響を定量的に評価することを試みる。但し、ここではLUIS等の既存の土地利用情報によらず、行政区別の土地利用面積から地表面条件を推定する。こうした方法が計算精度におよぼす影響についても検証する。

本研究では、急峻な山域と内海にはさまれた狭い地域であるにも拘わらず、規則的な海陸風が観測される神

戸市とその周辺地域を対象とする。同地域では過去50年間に顕著な市街化が進行した経緯がある。現在と約50年前の土地利用状況に対して同一の気象条件の下に大気シミュレーションを実施して、都市化の気温や海陸風構造に及ぼす影響について考察する。

2. 神戸市域における土地利用の変遷

図-2のように過去50年間で神戸市の行政区画は130km²ほど増加している。絶対面積・面積比率ともに田畑・森林が減少し、宅地面積が増加し神戸市の都市化が急速に進行しており、地表面条件が大きく変化している。

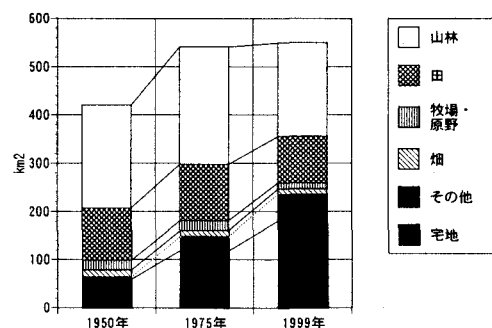


図-1 神戸市市域の土地利用の変化

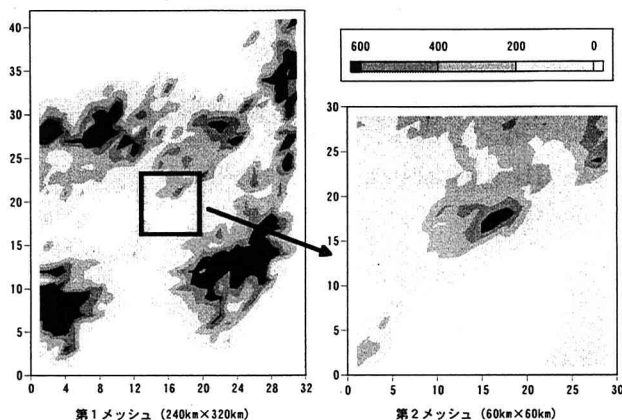


図-2 計算対象領域と標高(m)

3. シミュレーションの方法

(1) 大気流動モデルHOTMAC

本研究では、三次元大気シミュレーションモデルHOTMAC³⁾を用いる。大気成層中の乱流輸送は、Mellor・Yamadaの乱流完結モデル⁴⁾で記述されており、様々な地形や森林キャノピー、海陸境界の影響などを考慮できるモデルである。従来の大気モデルに比べて計算に要するデータ量は格段に少なくuser-friendlyである。なお、計算時間間隔は、各時間ステップにおいてCFL条件を満足するように変更されている。

(2) 対象地域と地形

表-1 計算メッシュの諸元

メッシュ番号	格子間隔		格子数		
	水平	鉛直	水平		鉛直
			東西	南北	
1	8km×8km	不等間隔	30	40	21
2	2km×2km	不等間隔	28	28	21

計算対象地域を図-2に示す。縦軸、横軸はメッシュ番号であり、濃淡で示した標高は国土地理院の数値地図250mメッシュデータから与えられる。最初に、北緯34.76度、東経135.18度を中心とする東西240km×南北320kmの大領域を対象とする第1メッシュに対して計算を行い、これをもとに神戸市周辺（北緯34.72度、東経

表-2 地表面パラメータ

No.	土地利用	パラメータ		
		アルベド	粗度(m)	土壌水分率
1	田	0.2	0.051	0.9
2	畑	0.1	0.01	0.7
3	果樹園	0.2	1	0.5
4	その他の果樹園	0.2	0.5	0.4
5	森林	0.15	2	0.4
6	荒地	0.2	0.01	0.3
7	建物用地(A)	0.15	1	0
8	建物用地(B)	0.15	0.05	0
9	幹線交通用地	0.1	0.01	0.1
10	その他の用地	0.2	0.01	0.3
11	湖沼	0.0328	0.001	1
12	河川敷(A)	0.0328	0.0003	0.9
13	河川敷(B)	0.2	0.001	0.8
14	海浜	0.3	0.005	0.7
15	海水域	0.0328	0.0003	1

135.22度を中心とする東西56km×南北56kmの小領域)を細分化した第2メッシュの計算を行うネスティング手法を採用する。第1、第2メッシュの諸元を表-1に示す。

(3) 地表面パラメータ

表-2のように、各種土地利用形態と三つの地表面パラメータとの関係はPielkeの報告⁵⁾から与えられる。地表面パラメータとしては、アルベド、粗度、土壌水分量に加えて人工廃熱や比熱等の土壌パラメータも重要である。通常、人工排熱は土地利用に応じた単位面積あたりの排熱量を計算メッシュ内において積算することにより与える。しかし、過去のエネルギー利用に関する適当なデータを入手することができなかったことから、本研究ではこれを省略している。人工排熱は、冬季や夜間に影響が大きくなることから、この点については、別途検討する予定である。

現在(1996年)と1952年の土地利用状況を対象としてシミュレーションを行う。前者に関しては、国土地理院の土地利用情報(KS-202)に基づいて土地利用区分を与える。図-3は1996年の地表面パラメータ(以降GRD96と記す)である。1952年の地表面パラメータの推定については後述する。

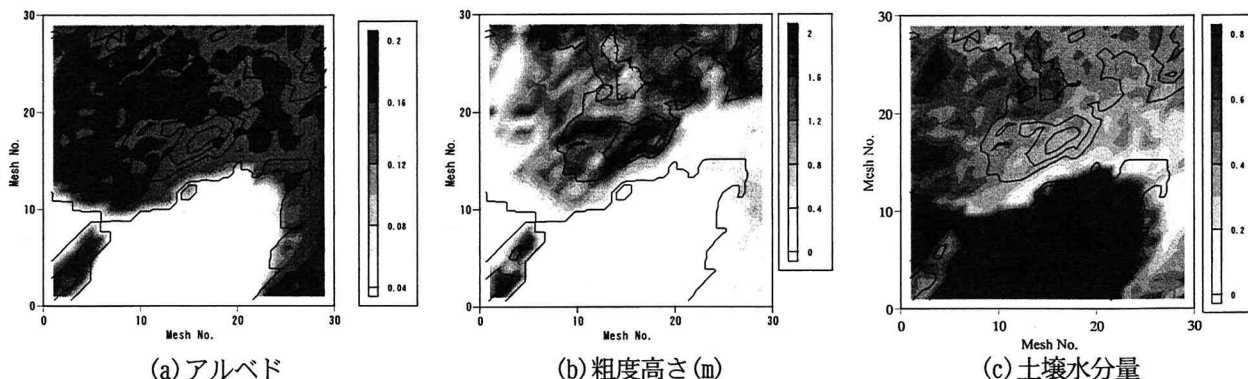


図-3 地表面パラメータ(KS-202, GRD96)

(4) 全天日射量

全天日射量に関しては、大阪管区気象台の毎時観測値を全計算領域に与える。

(5) 高層気象

計算領域周辺においては、潮岬、輪島、米子の3地点で1日4回(3,9,15,21時)高層気象観測が行われている。この3地点における風向、風速データを計算メッシュ毎、1時間毎のデータに内挿補間して、ナッジングにより逆転層以上の計算格子点に取り込む。

(6) 初期条件

海拔0mにおける温位、風向・風速についてはアメダス観測所における日本標準時(JST)0時の観測値から概算して与える。海拔0mの気圧は大阪管区気象台のJST 0時における値を用いる。海面温位の初期値はNOAA衛星画像から概算する。温位の高度分布については潮岬高層気象観測所のデータより逆転層の上下層に一定勾配の温位分布を仮定する。

4. モデルの検証

(1) 計算対象日時

本研究の目的より、地表面条件の変化が大気熱環境に大きく反映される日を選定してシミュレーションを実施する。日本列島が高気圧におおわれる夏場の晴天日として、1997年7月19,20日を計算対象日時とした。3.で述べた方法に従い、表-3のように初期条件を設定した。地表面条件は図-4を用いる。現在の地表面条件に対して、1997年7月19,20日の気象条件のもとで実施されたシミュレーションケースをCase-1と記す。

表-3 初期条件

対象日時	1997年7月19日～20日	
海面温位	297K	
海拔0m気圧	1014hPa	
計算時間	72hr	
初期風	風速	25m/s
	風向	30°(北北東)
初期温位勾配	高度1,000m未満	0.003K/m
	高度1,000m以上	0.003K/m

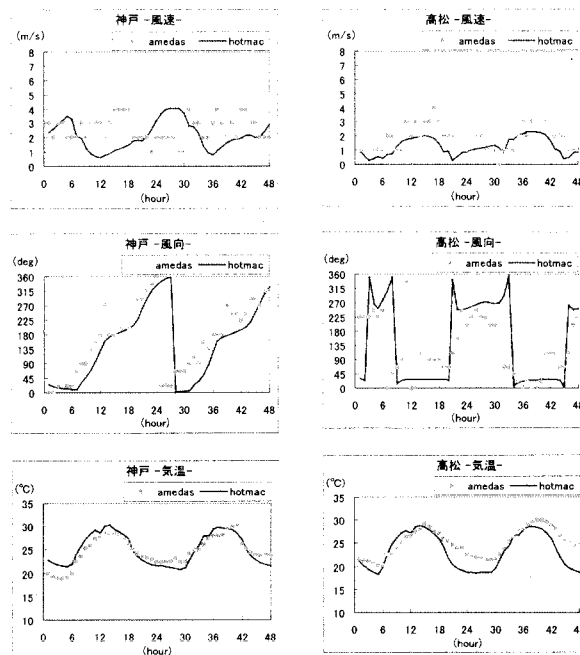
(2) 計算結果

Case-1における代表的な地点における風向、風速、地表面気温について、アメダス観測値と計算結果の比較の例を図-4に示す。神戸と高松ともに、計算結果は海陸風パターンや気温の日周変化を概ね再現している。

5. 過去における地表面パラメータの推定

(1) 推定方法

市街化にともなう大気環境変化を事後評価する上で、過去の土地利用に関するなるべく正確な情報を得ることは重要である。しかし、大都市においても、大気シミュレーションのメッシュサイズに対応できる程度の詳細な



(a) 神戸 (b) 高松
図-4 計算結果とアメダスデータの比較

土地利用情報を過去にさかのぼって収集することは非常に困難である。

神戸の場合、メッシュデータとして土地利用情報のデータベース化が整備されたのは1975年以降である。1996年と比較すると一部の新興住宅街の造成を除けば、土地利用に関して両者に大きな違いを見いだすことは難しく、都市化が大気環境におよぼす影響を調べるためには、もう少し時代をさかのぼる必要がある。

1975年以前において正確で容易に入手できる情報は行政区単位でまとめられた土地利用の統計資料である。そこで本研究では、旧版地図から行政区分を読みとり、府県が保有する統計年鑑より各行政区における土地利用区分別の面積割合を算出する。3.(3)で用いた各土地利用に対する地表面パラメータの設定値に、これらの面積割合を乗じて総和し、行政区単位毎の地表面パラメータを算出する。計算格子は行政区よりも小さいことから、格子が属する行政区に対応した地表面パラメータを与える。ひとつの格子が複数の行政区にまたがる場合には、格子内の行政区の面積比により加重平均する。

なお、本推定方法において、時代をさかのぼるほど行政区数が減少して空間分解能が低下し、地表面条件の再現精度が劣化することには留意しなければならない。

(2) 地表面パラメータ推定精度の検証

上記のような地表面パラメータ推定の妥当性を検証するために、まず、現況の行政区情報を用いて地表面データを再現し、国土地理情報に基づく図-3と比較する。なお、行政区の単位として、神戸市については過去においても区単位で管理されていることから区を最小単位とし、その他の地域については市あるいは郡を最小単位としている。

図-5は本手法により再現された1996年の地表面パラメータ（GRD-Sim96）である。国土地理院地理情報（KS-202）からの推定値（GRD96）と比較すると、視覚的にもある程度の違いが認められる。このような濃淡分布では両者の誤差が大きいように見えるが、二つの方法の算定値をメッシュ毎に相互比較すると図-6のようになり、アルベドと土壌水分量については高い相関性が確認される。これに比べて地表面粗度の相関性は低い。通常、行政区は1計算格子メッシュより大きく、パラメータ値が平滑化されるために、土地利用別による変動の大きいパラメータは、相関性が低下することはやむをえない。例えば、1行政区域内に、都市域と森林域の二つの土地利用がある場合、GRD-Sim96では、パラメータ値は平均化されて、各計算メッシュに割り当てられる。一方、KS-202では、同一の土地利用を持つ地域の単位が計算メッシュより大きい場合が多く、各土地利用の値がそのまま割り当てられることになる。

図-6の地表面パラメータ推定値（GRD-Sim96）を用いて再現された1997年7月19, 20日のシミュレーション結果（Case-1'）と、KS-202に基づいた結果を比較し、本推定法が計算結果の誤差におよぼす影響を確認する。評価指標として、RMSD（Root Mean Squared Difference）とモデルの一致性インデックス d （index of agreement）の2つを用いる。⁶⁾なお、 $d=1.0$ は両者完全一致、 $d=0.0$ は完全不一致であることを示す。

図-7に風速、風向、温度に関する二つの指標の時間変化を示す。RMSD、 d ともに日中に誤差が大きく、夜間に

誤差が小さいことを表わしている。通常、観測値と計算値の差異を検討する場合には、全く逆の傾向になる⁹⁾。これは、乱流モデルが大気境界層の減衰する夜間のシミュレーションを得意としないことに起因している。これに対して、今回の地表パラメータの評価方法による誤差は、日射の影響が顕著となる日中により大きくなる。気温に比べて風向、風速の誤差の方が大きいのは、これは、同様の大気数値シミュレーションに関する既往の研究において、一般的に認められる傾向⁹⁾である。第2メッシュの誤差は、第1メッシュより大きくなっている。既述のとおり、第2メッシュでは、行政区単位で平滑化される影響が現れるからであると考えられる。ほとんどの期間において $d>0.8$ 、特に第2日目以降では、 $d>0.9$ であり、今回の地表面パラメータの推定方法による誤差は許容範囲内であると判断される。地理情報データの無い時代のシミュレーションに際しては本手法によって行政区分の情報から地表面パラメータを推定することとする。

6. 神戸市域の都市化にともなう大気環境の変化

(1) 地表面パラメータ

所要の行政区情報が得られた最も過去として1952年の地表面パラメータ（GRD-Sim52と記す）を上記の方法から推定した。図-8はGRD-96との偏差を第2メッシュについて示したものである。神戸市南部と大阪市から堺市にかけては埋め立てによる陸域の増加が顕著であり、ア

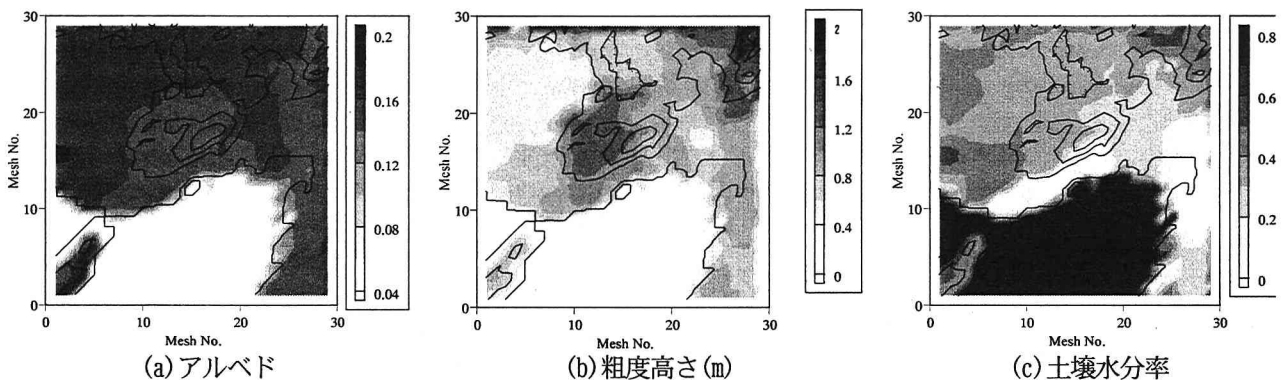


図-5 行政区単位土地利用により推定した地表面パラメータ（GRD-Sim96）

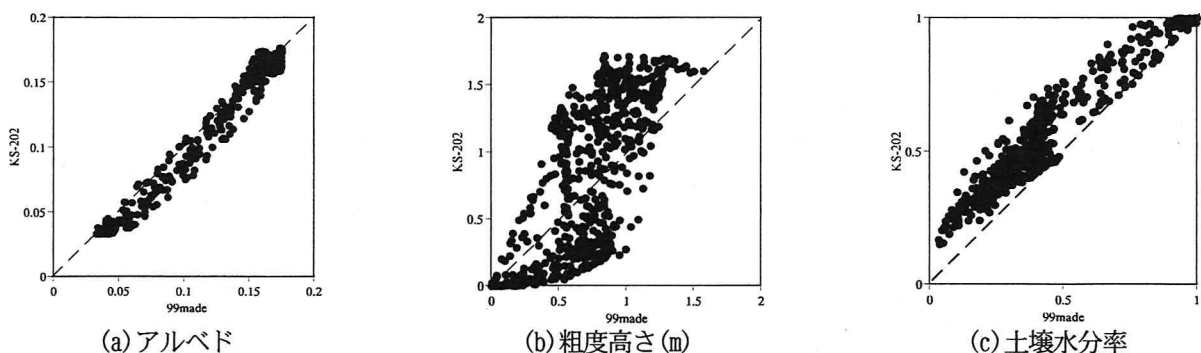


図-6 KS-202とGRD-Sim96の差異

ルベドが増加し、土壌水分が減少している。特に、大規模住宅団地の開発が進行した大阪、堺、豊中などでは土壌水分の減少が顕著である。

比較対象である1997年7月19,20日の気象条件のもとにGRD-Sim52を与えてシミュレーションを実施した。以降、Case-2と記す。以下では、約50年間の都市化が大気環境におよぼす影響を考察する。

(2) 地表面温度と気温

図-9は、Case-1の地表面温度からCase-2のそれを差し引いた温度偏差を示している。また、図-11は地上1.5mの気温のCase-1とCase-2間の偏差である。昼間（JST 14時）の地表面温度と気温を見比べると、気温が地表面気温に強く影響されていることがわかる。日中の最高気温の上昇量は最大で0.5℃程度であり、100年間に1℃程度上昇するという一般的な認識や、一ノ瀬⁹⁾の提示した計算結果とも合致している。夜間についても最大0.3℃程度の温度上昇が認められる。広い範囲で気温上昇が認められるのに対して、地表面温度偏差については白色で示された負の領域がかなり広がっている。これは日射のピークを過ぎると急速に地表面が冷却されることを示していると考えられる。図中に矢印で示した地域は地温偏差と気温偏差が逆の傾向を示している。六甲山の東側に位置しており、図-8(b)より粗度高さが大きく低下してい

る地域である。紙面の都合でここでは提示できないが、風速ベクトル偏差図を参照すると、昼間の海風はこの地域において最も強化されていることがわかった。これらのことから、地温と気温の偏差の差異は、この海風の強化が強く影響していると考えられる。

ヒートアイランド現象は夜間に顕著であると考えられるが、阪神間や三田などにおいて特段顕著な気温上昇が見られるわけではない。これは、本解析において人工排熱を考慮しなかったことや都市キャノピー構造を再現していないこと⁹⁾にも起因していると考えられる。これらについては今後の検討課題としたい。

淡路島北部や、泉南地方の海岸線において、予想外の気温の変動が認められる。これは、GRD96では2km角のメッシュの標高により海岸線が表示されるのに対して、GRD-Sim52では、行政区分地図から海岸線位置を割り出しているからである。これにより両者による地表面温度の間には大きな誤差が生じることになるが、この誤差は海岸線付近の1計算メッシュ内で生じることになる。

(3) 陸海風の構造

神戸市においては晴天時には顕著な海陸風が観測されており、「陸域-海域」間の熱・物質交換、ひいては沿岸部の大気環境に重要な役割を果たしている。図-11は1997年7月20日の2時と15時における三宮上空の東西、南北、鉛直方向風速 u , v , w の鉛直分布である。夜間の陸風($v < 0$)、昼間の海風($v > 0$)が再現されている。Case-1の15時における v から、Case-2のそれを引いた偏差を、図-11と同じ鉛直断面で示せば図-12のようになる。高度100mまでの下層において、海風が強化されているが、絶対値は0.1m/s程度である。100~300m付近までは六甲山が障害となって風速は逆に低下している。紙面の都合で図面は割愛するが、夜間においては高度100m付近を除いて、陸風が強化されていた。

(5) 計算結果の精度

図-7に示したとおり、上述の地表面パラメータ推定法による風速値の誤差は第2メッシュで0.1m/sのオーダーであり、Case-1とCase-2の偏差の0.1m/sは誤差程度の大きさになってしまう。加えて、高度1.5mの気温偏差についても、計算ケース間の偏差は高々0.5℃程度であり、これも図-7の第2メッシュの誤差の範囲内に入ってしまう。従って、本研究で提示したパラメータ算出方法では、50年間の過去と現在の偏差について明確にするためには、十分な計算精度が得られていないというのが現状である。

7. まとめと今後の課題

本研究では、神戸市域を対象として数値シミュレーションを行い、過去50年間に於ける都市化が大気環境におよぼす影響について検討した。土地利用情報がデータベース化されていない時代にまでさかのぼるために、当時の行政区別の土地利用面積率に基づいて地表面パラメータを推算した。計算結果は約50年間の都市化にもなつて昼間の気温が最大で0.5℃程度上昇すること、海陸風0.1m/s程度強化されることなどを示した。但し、今回提示した地表面パラメータ推定法では、約50年間の差異を検出するために計算精度が十分でないことも併せ

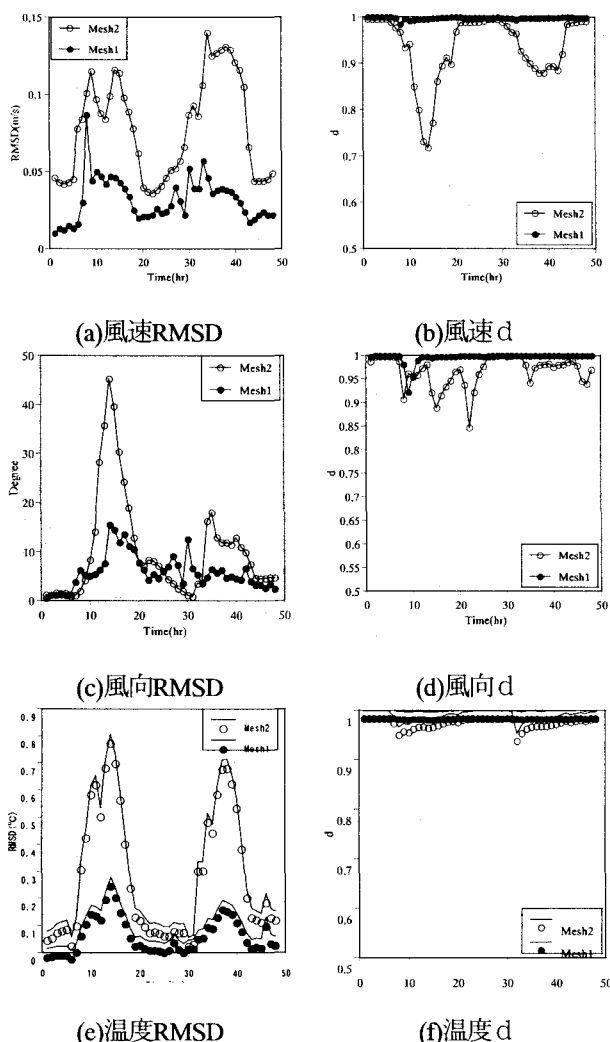


図-7 CASE1とCASE1' の偏差

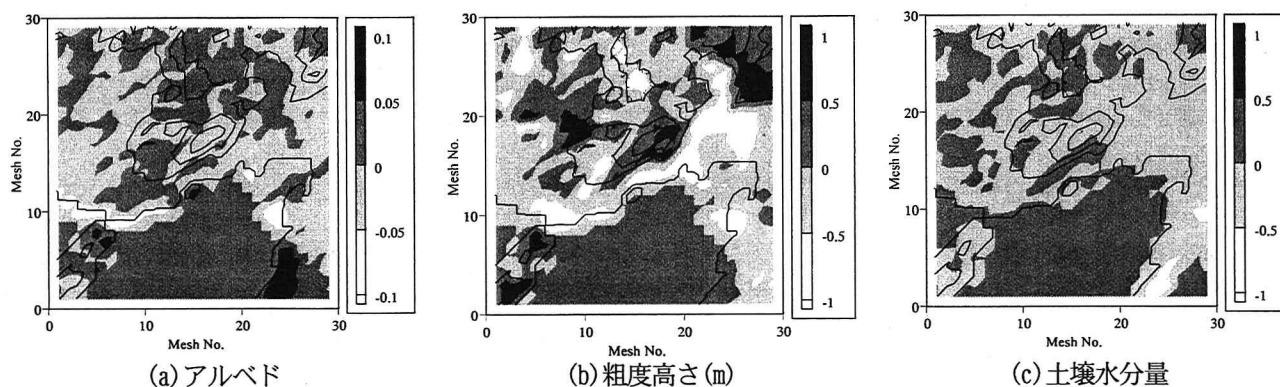


図-8 地表面パラメータの偏差

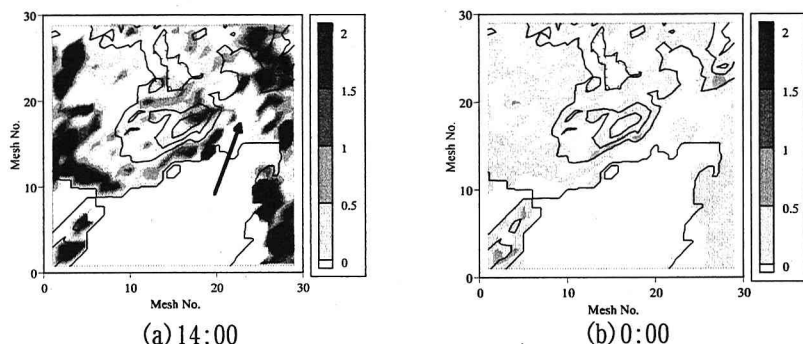


図-9 地表面温度差

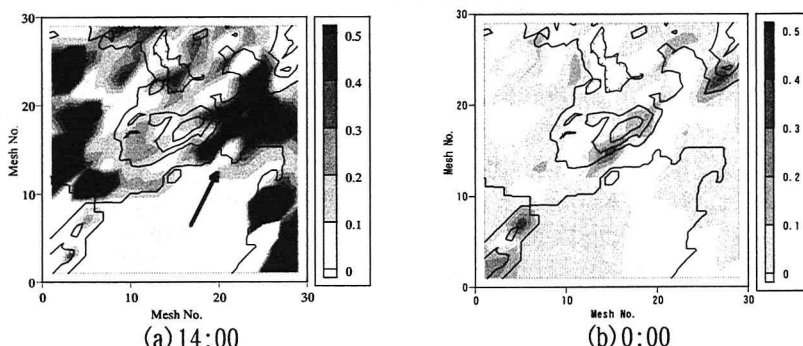


図-10 地上1.5mの気温

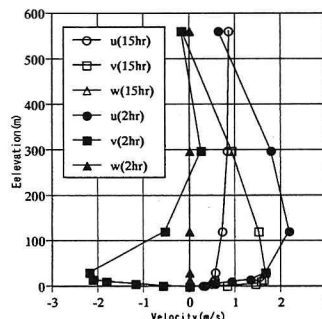


図-11 風速鉛直分布

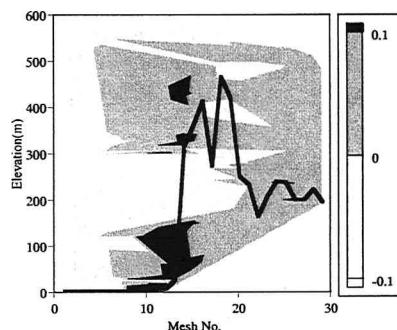


図-12 v方向風速偏差

て明らかとなった。

こうした問題点を解決するために、1)氷見山による過去の土地利用データの利用、2)今回考慮しなかった比熱等の土壌パラメータの影響評価等が今後の検討課題である。

参考文献

- 1)一ノ瀬俊明：近世以降の土地利用変化に起因するローカルな気候変動～数値シミュレーションによるアプローチ～，環境システム研究，Vol.27，pp.115-126，1999。
- 2)大橋唯太：京阪神地域における都市再開発が局地気候に与える影響について～領域型数値モデルを用いた実験～，第28回環境システム研究論文発表会講演集，pp.339-344，2000。

- 3)T.Yamada：A numerical simulation of urbanization on the local climate, J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 81, pp.1-19, 1999。
- 4)G.L.Mellor and T.Yamada：A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers, J. Atmos. Sci. 31, pp.1791-1806, 1974。
- 5)R. A.Pielke：A three dimensional of the sea breeze over the south Florida, Mon. Wea. Rev., 102, pp.115-139, 1974。
- 6)X.M.Cai and D.G.Steyn：Modellin study of sea breezes in a complex coastal environmet, J. of Atmospheric Environment, 34, pp.2873-2885, 2000。

(2002. 9. 30受付)