

大都市とその沿岸の土地利用の変化と人工排熱が 大気環境へ与える影響の評価

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF THE CHANGE OF LAND-USE AND ENERGY
CONSUMPTION ON LOCAL CLIMATE IN COASTAL LARGE CITY

重光泰宗* ・ 佐藤歩** ・ 中辻啓二*** ・ 村岡浩爾***

Yasumune SHIGEMITSU, Ayumu SATOH, Keiji NAKATSUJI, Kohji MURAOKA

ABSTRACT; Urbanization has been well in progress accompanied by the change of land-use due to concentration of population and consumption of a lot of energy. In particular, large-scale reclamation projects have been constructed in the coastal areas in Japan. Such a tendency is found in the world that 'heat island' phenomena can be appeared in most of metropolitan cities because of the temperature difference between urban and rural areas. In the present study, therefore, the effects of urbanization and construction of reclaimed islands on the local climate are examined using a 15-levels-three dimensional atmosphere numerical model with high-order turbulence modelling.

KEYWORDS; Atmospheric Boundary Layer, Energy Consumption, Urbanization, Reclamation, Heat Island

1. はじめに

大都市は温暖化し、乾燥化する傾向にある。例えば、大阪では1922年からの70年間に年平均気温で2.27℃の上昇が起こっている。年最低気温はさらに大きく3.40℃の上昇である。また、熱帯夜の発生日数も1940年代では0~15日(平均6日)であったのが、1990年代前半では15~55日(平均35日)に及んでいる。都市の人口の集中とエネルギー消費量の増大、ならびに都市の地表面性状の改変が人工熱の集中的な排出をもたらし、熱の島(ヒートアイランド)となって都市域の微気象を変えることとなった。我国のエネルギー消費密度は1959年から12年経過した1971年には約3倍に増大している。国土の狭い我国ではアメリカの9倍、フランスの6.5倍、そして、ドイツの1.8倍のエネルギー消費密度である。また、ニューヨークでは人工熱発生量と日射エネルギーの比は6.8倍にも達している。大阪では1990年にその比率は約1.1倍となっている。その値が増加傾向にあるのは十分予想できる。

一方、環境庁は1990年に東京湾の海域の埋立開発が首都圏でのヒートアイランド現象を助長する可能性があることから、環境アセスメントの検討項目の一つになり得ることを公表している。埋立開発行為の影響評価を海域の水理現象に限って議論してきた開発者ならびに学識経験者にとって極めて刺激的な指摘であった。このような背景の下に、本研究では大阪湾沿岸域を対象に土地利用の変化や人工排熱の増加が近畿圏の大気環境に及ぼす影響を及ぼすかを検討する。また、ウォーターフロントの開発によって海域が陸域となり、さらに都市機能を有した都市域となることから、とくに埋立開発行為が大気環境に及ぼす影響評価を行う。手法は大気の運動を扱うことから、三次元・非定常・成層・乱流を考慮できる数値モデルである。

*(株)関西電力 The Kansai Electric Power Co., Inc., **;大阪大学大学院 Graduate School of Osaka University, ***;大阪大学工学部土木工学科 Department of Civil Engineering, Osaka University.

2. 計算対象領域および解析方法

2. 1 三次元大気モデル

大気境界層内の運動は地表面の熱収支や地表面地形の影響を強く受けるので、三次元的に取り扱う必要がある。基礎方程式系は、運動方程式、内部熱エネルギー方程式、混合比の保存方程式、連続方程式から構成しており、静力学平衡を仮定している。また、地形の形状をうまく表現するために z^* 座標系に座標変換を行った。定式化ならびに差分化は山田(1992)の報告に詳しいので、参照されたい。

基礎方程式に含まれる乱流諸量のうち水平方向成分は Smagorinsky (1963) の Sub-Grid Scale の概念を導入した。また、鉛直方向成分は成層の影響を強く受けることから Mellor and Yamada (1982) の乱流モデル・レベル 2.5 を用いた。乱流に関連する方程式は以下の通りである。

・乱流エネルギーの方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{q^2}{2} \right) + U \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{2} \right) + V \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{2} \right) + W^* \frac{\partial}{\partial z^*} \left(\frac{q^2}{2} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{2} \right) \right] + \left(\frac{\bar{H}}{H - z_c} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left[q l S_q \frac{\partial}{\partial z^*} \left(\frac{q^2}{2} \right) \right] \\ &+ \frac{\bar{H}}{H - z_c} \left(-\overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z^*} - \overline{vw} \frac{\partial V}{\partial z^*} \right) + \beta g \overline{w\theta_v} - \frac{q^3}{B_1 l} \end{aligned} \quad (1)$$

・乱流長さスケールの方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 l}{\partial t} + U \frac{\partial q^2 l}{\partial x} + V \frac{\partial q^2 l}{\partial y} + W^* \frac{\partial q^2 l}{\partial z^*} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial q^2 l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial q^2 l}{\partial y} \right) \\ &+ \left(\frac{\bar{H}}{H - z_c} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(q l S_l \frac{\partial q^2 l}{\partial z^*} \right) \\ &+ l F_1 \left[\frac{\bar{H}}{H - z_c} \left(-\overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z^*} - \overline{vw} \frac{\partial V}{\partial z^*} \right) + \beta g \overline{w\theta_v} \right] - \frac{q^3}{B_1} \left[1 + F_2 \left(\frac{l}{\kappa z} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 U, V, W^* はそれぞれ東西、南北および鉛直方向の風速成分、 x, y, z^* はそれぞれ東西、南北および鉛直方向座標、 t は時間、 z_c は標高、 $\bar{H}$ は計算領域上限の高さ、 H は上面の境界の高さを固定せずに質量の保存を考慮して時間と場所によって変化する物質表面、 K_x, K_y は水平渦動粘性係数である。また、 $q^2 = \overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}$ は乱流エネルギー、 $\overline{w\theta_v}$ は乱流による熱フラックスである。式中の定数の値は Mellor and Yamada (1982) に倣って (F_1, F_2, S_q, S_l, B_1) を (1.8, 1.33, 0.2, 0.2, 16.6) とした。

上記の式を解いて得られた q, l を用いて、乱流諸量は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} & -\overline{uw} = q l \widetilde{S_M} \frac{\partial U}{\partial z}, \quad -\overline{vw} = q l \widetilde{S_M} \frac{\partial V}{\partial z} \\ & -\overline{w\theta} = \alpha q l \widetilde{S_M} \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad -\overline{wq_v} = \alpha q l \widetilde{S_M} \frac{\partial Q_v}{\partial z} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\widetilde{S_M}$ はリチャードソン数の関数であり、 α は乱流プラントルの逆数である。

2. 2 計算対象領域

計算対象領域は図-1に示した大阪湾を囲む 120 km 四方および鉛直 5 km の空間である。計算格子間隔は水平方向を 2 km とし、鉛直方向を不等間隔 15 層に分割した。鉛直方向の分割は次式で示されるような格子レベル (ξ) と鉛直座標 (z) との関係にしたがって設定した。

$$\begin{aligned} z &= a(\xi - 1) \quad \text{for} \quad 1 \leq \xi \leq \xi_{lin} \\ z &= a\xi^2 + b\xi + c \quad \text{for} \quad \xi_{lin} \leq \xi \leq \xi_{max} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\alpha=8\text{m}$, $z_{\text{max}}=5000\text{m}$, $\xi_{\text{lin}}=4$, $\xi_{\text{max}}=16$ とした。

2. 3 境界条件および初期条件

- ・表層第一層は constant flux layer と仮定している。
- ・計算領域の上面では風向は一定で時間変化はなしとし、温位と混合比は初期温位場から決定され、時間変化はないものとする。また、乱れについては0であると仮定する。
- ・側面境界値は基礎方程式および乱れに関する方程式の水平方向の項を無視し、積分することにより決定する。
- ・風に対する初期条件は計算領域上面において一様に与え、下層は対数分布を仮定する。温位に対する初期条件は海面では温位を与え、上層では減衰率を与える。混合比に対する初期条件は各層で与えられた温位から求める。また、乱れに関する初期条件は0とする。

2. 4 地表面熱収支モデル

土壌層の温度 T_s は次の熱伝導方程式を解くことによって求められる。

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z_s} \left(K_s \frac{\partial T_s}{\partial z_s} \right) \quad (5)$$

ここで、 K_s は土壌の拡散係数であり、 $K_s = \lambda / C_s$ と定義される。 λ は熱伝導率、 C_s は熱容量である。式(5)の境界条件は、地表面熱収支と最下層では一定温度および熱フラックスを0とした。表面熱収支は次式によって与えられる。

$$(1-\alpha)S\downarrow + R_L\downarrow - R_L\uparrow + A = H + LE + G_0 \quad (6)$$

ここで、 $S\downarrow$ は太陽からの短波放射、 α はアルベド、 $R_L\downarrow$ は大気から入射する長波放射、 $R_L\uparrow$ は大気への長波放射である。 H , LE は顕熱および潜熱フラックス、 G_0 は地中への伝導熱である。

以上のように、地表面温度の決定には、アルベド、拡散係数、熱伝導率および粗度の影響を受ける。また、土中の水収支は解いていないので、地表面の水分量は一定値として与える。都市化の影響を評価する場合に重要な要素は地表面の改変および人工排熱量を正確にかつ適切に与える必要がある。本研究では各計算格子点において国土地理院の土地利用情報をもとに各種パラメータの設定を行った。また、現況の人工排熱は眞東ら(1993)の大阪市の人工排熱データをもとに土地利用との相関分析を行って土地利用区分ごとに設定した。また、環境庁(1991)に倣って時間帯別供給電力を指標に時間別人工排熱量を設定した。

3. 土地利用変化および人工排熱の大気環境に与える影響

3. 1 計算条件

2. で設定した土地利用および人工排熱を現時点での近畿圏の現状であるとする。(以後、「現状」と称する)ここでは、都市化がさらに進んだ場合を考える。一つは大阪湾の15mあるいは18m水深以浅が埋め立てられたと仮定する。(以後、「埋立I, II」と称する)いま一つは人工排熱が2倍に増加した場合と、人工排熱が0の場合を想定する。(以下、「将来I, 0」と称する)なお、この仮想埋立が大阪湾での流動や物質輸送に及ぼす影響は中辻ら(1993)によって検討済みである。仮想埋立地には既存の人工島(ポートアイランド等)の土地利用状況をもとに都市機能用地50%、緑地20%および道路等30%の土地利用配分を施した。対象時期を夏季の8月15日とし、5,000m上空において南西、3m/sの高層風を与えた。海面温度は26℃の一定値とし、初期の温位勾配は海面から500mまでを0.001K/m、それより上

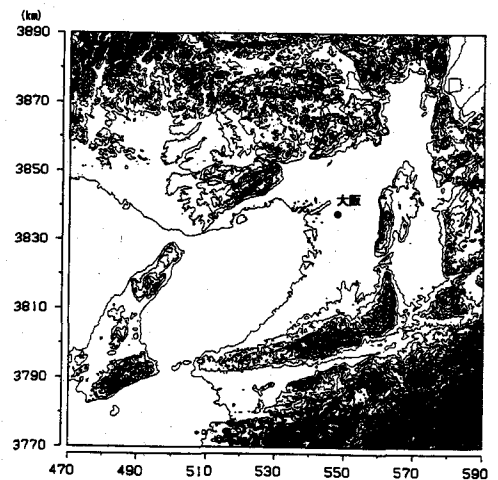


図-1 計算対象領域

層を 0.003 k/m の安定勾配とした。

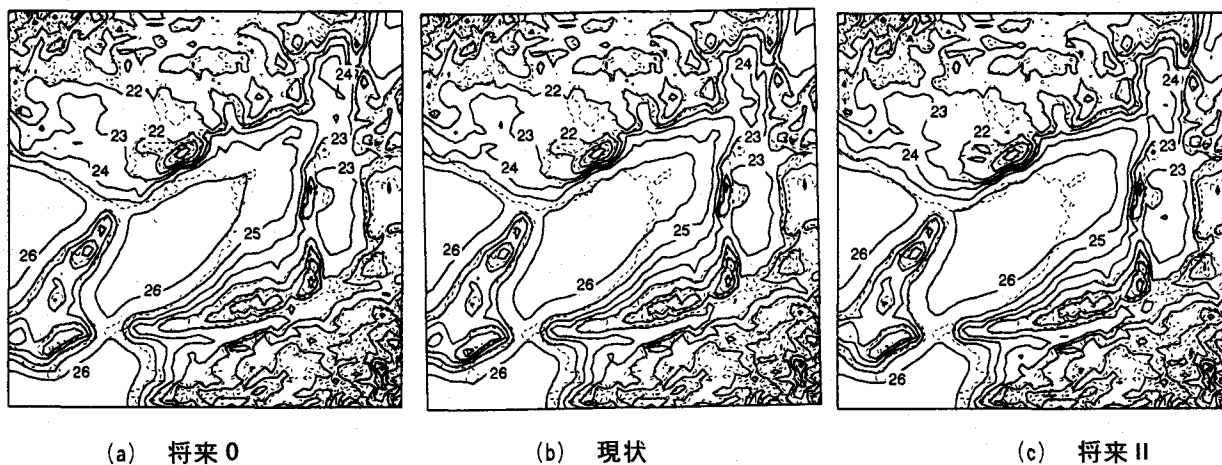


図-2 午前5時の地上10mにおける気温の分布

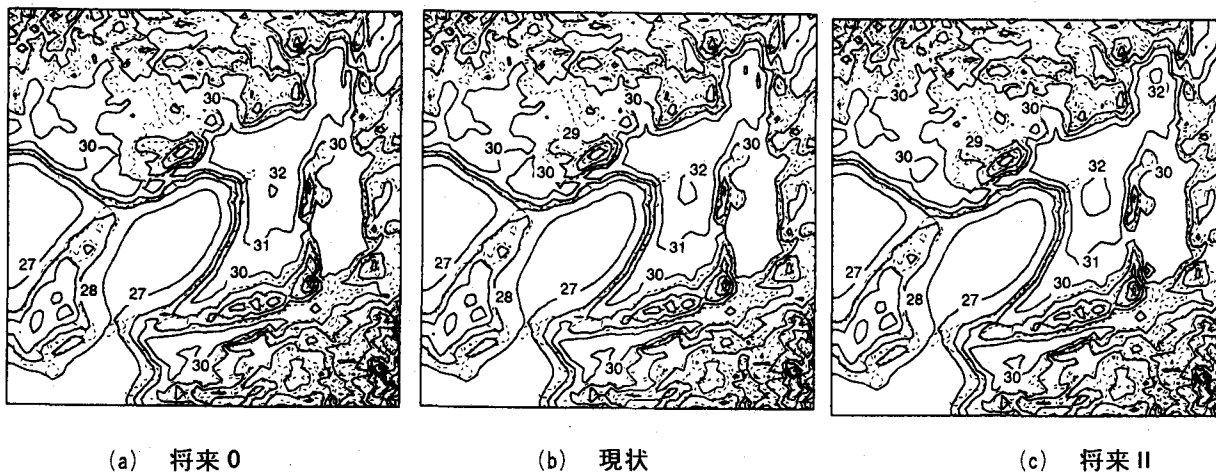


図-3 午後1時の地上10mにおける気温の分布

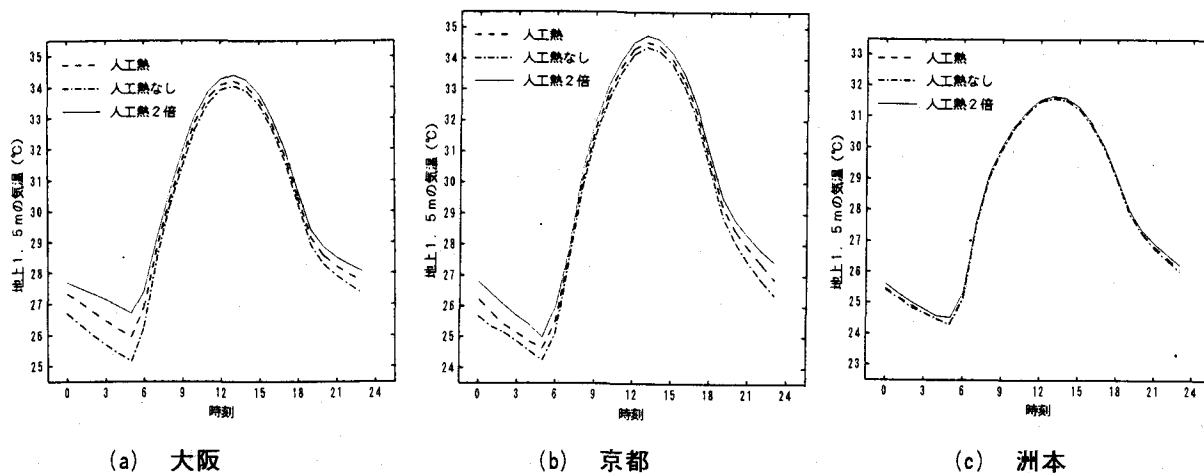


図-4 代表観測点における地上1.5mの気温の日変化

3. 2 人工排熱の大気環境に及ぼす影響

図-2は地上10mにおける午前5時の気温の分布を示す。午前5時は気温が最も下がり、人工排熱の影響が反映される時間帯である。人工熱がない場合(将来0)には大阪平野は25℃台の気温であったのが、現状の人工熱を与えた場合(現状)には、大阪平野の内陸半域まで26℃台の気温に上昇している。これは実質的な気温の上昇に対する人工熱の寄与分となる。現状と将来I(人工熱が2倍に増加)とを比較してみると、全体的にはそれほど明瞭な変化は生じていない。ただし、気温26℃の等気温線に見られるように、都市部では高温域が僅かながら広がっている様子が見られる。これは都市化が進んでいる地域ほど人工排熱量が多いことから、人工排熱量が2倍になることによる絶対量の増加が、都市化が進んでいる地域ほど大きいためである。仮に、都市とその周辺地域との経済較差が是正されることなくエネルギー需要の伸び率が都市とその周辺地域とで将来も同じであるとすると、人工排熱の増加の影響は都市域にさらに顕著なものとなると予想される。同様のことが京都盆地と奈良盆地との気温変化にも見られる。京都盆地においては人工熱の増加に伴って24℃台の気温域が南部に拡大している様子が見られる。ところが近接した同じ盆地であっても、奈良盆地では23℃の気温域の拡大が見られない。この原因は京都と奈良との都市の規模が異なるためであろう。なお、風の影響はほとんど認められなかったため、図には示していない。

図-3は同じ地上高さの午後1時の気温の分布を示している。将来0、現状、将来Iと順に見ても、人工排熱の増加による日中の気温への影響はほとんど見られない。これは良く言われているように人工排熱は夜間に比べて日中への影響は少ないことと一致するものである。

図-4は大阪、京都、洲本における地上1.5mの気温の時間変化を示している。これらの図においても明らかに人工排熱の増加の影響は夜間に大きいことが示されている。この中でも特に、大阪の将来Iでは最低気温は約1℃も上昇することが分かる。また、それぞれの観測点で最高気温にも僅かな上昇が認められる。

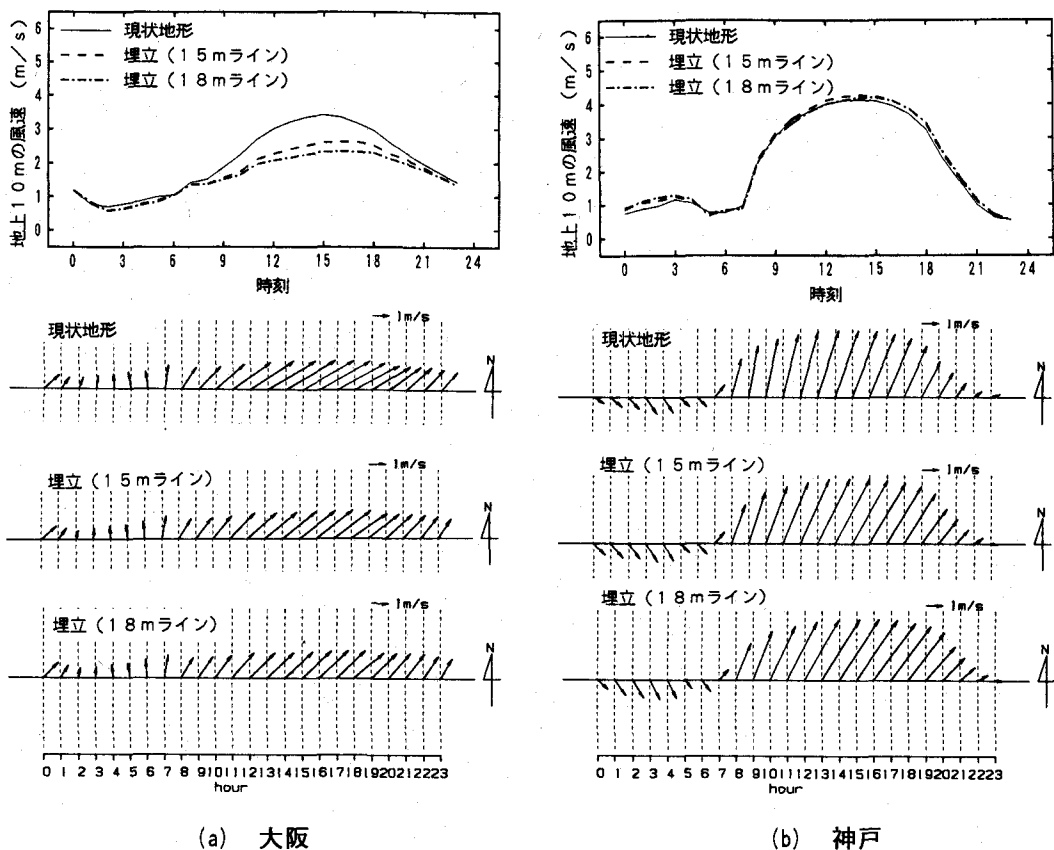


図-5 代表観測点における地上10mの風の日変化

3. 3 沿岸域の埋立開発が大気環境に及ぼす影響

仮想した15mあるいは18m以浅の大阪湾湾奥部海域の埋立により、現状の水表面積(1500km²)はそれぞれ74%(埋立Ⅰ)と64%(埋立Ⅱ)に減少する。この条件の下で影響評価を行った。

図-5は大阪および神戸における地上10mの風速・風向の時間変化を示している。下段のベクトル図は上から現状、埋立Ⅰ、埋立Ⅱの場合の風速・風向の時間変化を、そして上段の図は風速の絶対値の比較を示している。大阪では埋立にともなって日中の風速が大幅に減少している様子が分かる。これは湾奥部の埋立に伴って大阪都心域と海との距離が大きくなることから、大阪では海風の発達が抑制された結果であろう。この傾向は下段の風速・風向の時間変化や風の水平分布(頁数の関係で図には示していない)からも分かる。一方、神戸では埋立の影響は見られない。これは神戸は大阪と比較して大阪湾に近接しているために海風の発達の抑制は神戸では進まなかったものと考えられる。また、大阪では埋立にともない風向きが西南西から南南西に変化してきていることから、風向きにも影響が現れていることが分かる。

図-6は地上10mにおける午後1時の気温の分布を示す。現状の地形の場合には大阪の都心域にのみ32℃の等気温線が存在していたが、埋立Ⅰでは現状の海岸線付近まで32℃の等気温線が広がっていることが見られる。また、都心の北側および北西部にも32℃の等気温線が現れている。この原因として、先ほど述べたように海風が弱まったため大阪湾からの冷気の移流による冷却効果が減少したことが指摘できる。さらに、埋立Ⅱでは32℃の高温域が大阪の都心から南西部に向かって広がっている様子が分かる。大阪湾から

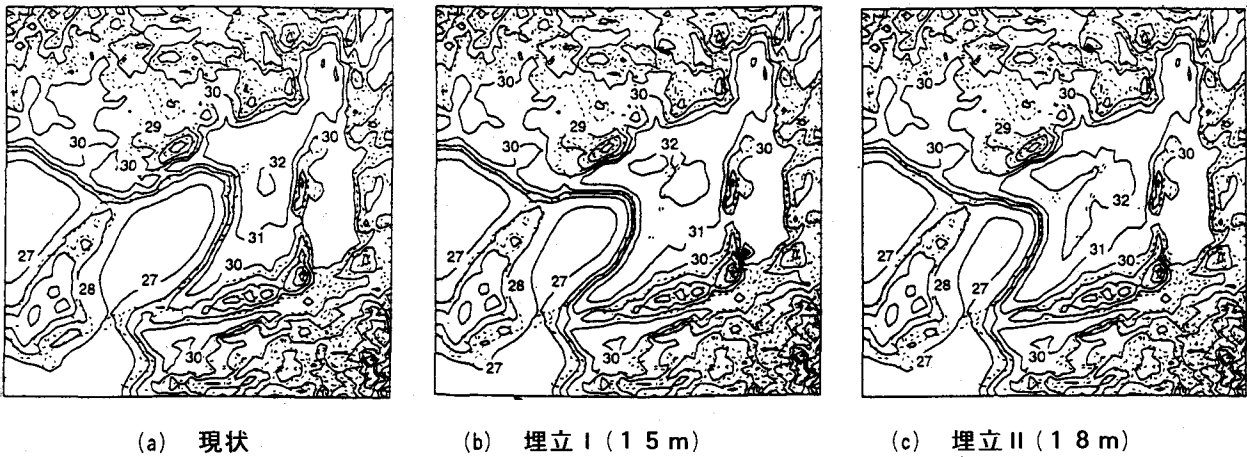


図-6 午後1時の地上10mにおける気温の分布

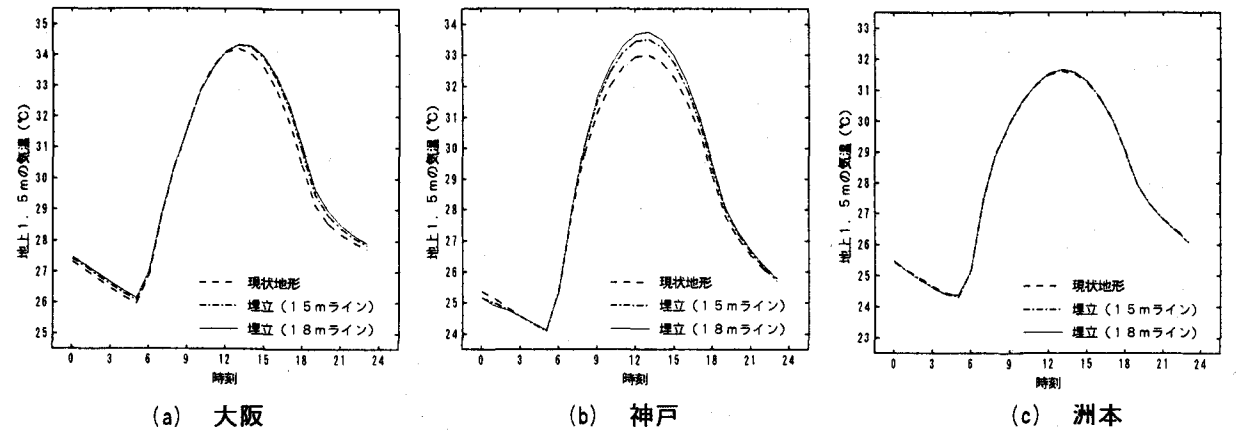


図-7 代表観測点における地上1.5mの気温の日変化

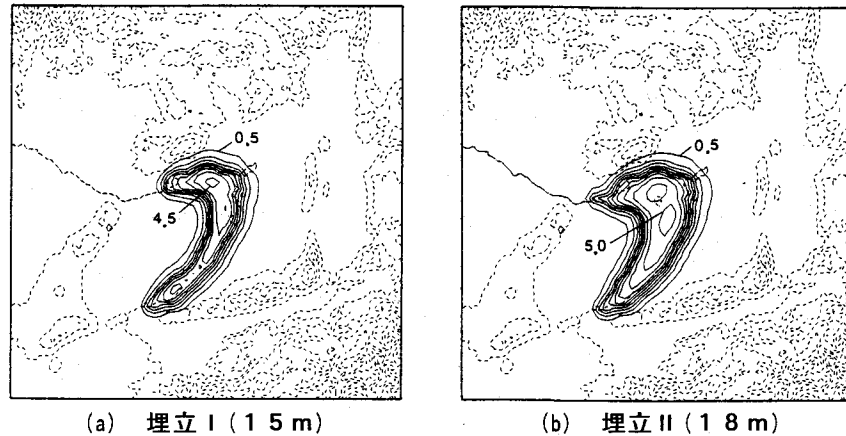


図-8 代表観測点における地上10mの風の日変化

都心に向けて淀川沿いに楔状に3.2℃以下の気温が現れているのは興味深い。

図-7は大阪、神戸、洲本における地上1.5mの気温の時間変化を示している。神戸では埋め立ての増加にともない最高気温で約1℃の上昇が見られる。一方、大阪では午後1時より翌朝の5時までわずかな気温の上昇が認められるが、洲本では埋め立ての影響はほとんど現れていない。これは先ほども述べたように、神戸は海域に近接していることから埋め立ての影響を敏感に受けるためである。

図-8は図-6を別の観点から示したものであり、現状から埋立Iおよび埋立IIへの気温の上昇分を地上10mの高さについて描いたものである。これを見ても埋立の影響はそれほど広い範囲まで及んでいないことが分かる。ただし、現状の海岸線付近にある地域は埋立の影響を直接に受けるために、大幅な気温の上昇が見られる。また、同図から大阪の都心では埋立Iおよび埋立IIとで気温の上昇分に変化はほとんどなく、0.5℃程度の上昇量に留まっている様子が分かる。

4. まとめ

現状の土地利用および人工排熱のデータをもとに、大阪湾の埋立開発を含む将来の土地利用変化および人工排熱の増加の影響を三次元大気数値モデルを用いて検討した結果、以下のことが分かった。

- (1) 人工排熱の増加の影響は夜間の気温に現れるが、風の場合の影響はほとんど認められない。
- (2) 人工排熱量が現状の2倍になった時には、大阪の地上部近くの夜間の気温上昇は約1℃と見込まれる。
- (3) 埋立の影響は夜間の気温や風にはほとんど影響せず、日中の気温に顕著に現れる。
- (4) 埋立が進むにつれて内陸部では海風の発達が抑制されることから大阪湾上の冷気の移流が減少する。その結果、気温の上昇が生じる。海域に近接した地域ほど埋め立ての影響を敏感に受ける。
- (5) 大阪では水深15m水域の埋立と18m水域の埋立では大きな違いはなく、地上10mの気温では0.5℃の上昇にとどまる。

参考文献

- 環境庁(1991): 近畿圏における土地利用の変化等に伴う気候変動に関する検討業務報告書。
- 眞東健一郎, 西村康之, 村岡浩爾(1993): 土木学会第48回年次学術講演会概要集第II部門, pp.200-201.
- Mellor, G. L. and Yamada, T.(1982): Rev. Geophys. Space Phys., Vol.20, pp.851-875.
- 中辻啓二・末吉寿明・村岡浩爾・山根晴三(1993): 海洋開発論文集, Vol.9, pp.67-72.
- Smagorinsky, I.(1963): Monthly Weather Review, Vol.91, No.3, pp.99-164.
- 山田哲二(1992): 大気環境シミュレーション, 第3章, 白亜書房, pp.134-202.