

京阪神地域における海陸風・山谷風の数値シミュレーション —— 都市と山地の効果について ——

大橋唯太*・木田秀次*

* 京都大学大学院理学研究科

要旨

領域型メソスケールモデルによって、京阪神地域におけるヒートアイランド及び局地循環の構造・動態を調べた。数値モデルの結果は局地循環が発達する好天静穏日の実測結果とよく一致している。この地域でのヒートアイランドの特徴として、大阪市・吹田・京都の3地域で顕在化、特に吹田地域の高温領域が海風の侵入とともに内陸へと移動していく点が挙げられる。大阪湾からの海風の侵入速度は大阪都市域へのヒートアイランド風の収束と周囲の山地で発達する谷風による発散効果のバランスに支配されている。

キーワード：京阪神地域、局地循環、ヒートアイランド、数値実験

1. はじめに

夏季日中には、日本列島の至る所で海風や谷風といった局地循環の発達が明瞭にみとれる。現在に至るまでに、それに関する研究が数多くなされてきたが、特に近年には都市が局地循環に与えている効果について注目されるようになってきた。都市を持った環境場で形成される、いわゆるヒートアイランド構造がその上部を吹走してくる局地循環と相互作用を起こすといったことが予想される。そういった研究の中で注目されるのが、Yoshikado(1992)の数値実験である。彼は鉛直2次元近似であったが、海風とヒートアイランド循環が相互作用を起こすことで結果的に海風の変形・変質がもたらされることを示唆した。実際、東京湾から侵入する海風が都市によって変形・変質する様子を捉えた観測結果と定性的に一致するものであった。また Kitada et al.(1998)によって濃尾平野での都市効果についても研究されている。しかしながら日本は特に複雑地形を有する場合が多く、従って都市効果によって変形・変質した局地循環の動態は決して先の Yoshikado(1992)が示した結果が一般的なものであるとは言えないであろう。

例えば京阪(大阪-京都)地域は関東平野や濃尾

平野と環境が大きく異なる。1つは平野部が比較的細長く谷地形として考えることができること、そして2つ目が平野の終端部に京都という大都市を持つことである。この2つの状況が局地循環にどのような影響を及ぼしているかについては非常に興味深い。そして、とりわけ大阪湾から侵入してくる海風は上述の環境場を吹走していくことになる。

研究対象としている京阪地域におけるヒートアイランド構造の実態は、実は不明であると言っても過言ではない(かろうじて田中,1984 によって、京都でのヒートアイランド風の観測が行われているが、詳細は後述する)。従って本研究の最終的な目標は、京阪地域における都市効果について数値実験を通して調べるだけではなく、実測からもヒートアイランド構造の実態を掴むことである。また京阪地域との比較のために、神戸都市域も含んだ数値実験を行っている。しかしながら本研究でターゲットとしている地域はあくまで大阪から京都に延びている淀川水系に沿って広がっている大阪平野域であることに注意してもらいたい。

2. 数値モデル

本研究に先立って、我々は領域型メソスケールモデ

ルを開発しており、ここではその概要について説明していく。

以下に示すように、非圧縮性流体及び静力学平衡を仮定した方程式系である。

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = -\frac{1}{D} \frac{\partial(Du_1 u_1)}{\partial x_1} + fu_2 - \theta \frac{\partial \pi}{\partial x_1} + \left(\frac{x_3 - m_i}{m_i} \right) \frac{\partial m_x}{\partial x_1} + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial x_1} \left(K_m \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) \quad i=1,2,3 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = -\frac{1}{D} \frac{\partial(Du_1 u_2)}{\partial x_1} - fu_1 - \theta \frac{\partial \pi}{\partial x_2} + \left(\frac{x_3 - m_i}{m_i} \right) \frac{\partial m_x}{\partial x_2} + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial x_3} \left(K_m \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{1}{D} \frac{\partial(Du_1 \theta)}{\partial x_1} + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial x_3} \left(K_h \frac{\partial \theta}{\partial x_3} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{1}{D} \frac{\partial(Du_1 q)}{\partial x_1} + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial x_3} \left(K_h \frac{\partial q}{\partial x_3} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial x_3} = -D \frac{g}{\theta} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(Du_1)}{\partial x_1} = 0 \quad (6)$$

ここで、

$$(x_1, x_2, x_3) = (x, y, z^*), \quad (u_1, u_2, u_3) = (u, v, w^*)$$

$$D = \frac{m_i - m_x}{m_i} \quad \text{である。}$$

また運動量の拡散係数 K_m 及び熱のそれ K_h は次式で定義される。

$$K_m = C_\mu \frac{E^2}{\varepsilon} \quad (C_\mu = 0.04 : \text{高木・北田, 1998}) \quad (7)$$

$$K_h = \frac{K_m}{Pr} \quad (8)$$

E 及び ε は以下の式から得られる。

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{1}{D} \frac{\partial(Du_1 E)}{\partial x_1} + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial x_3} \left(K_m \frac{\partial E}{\partial x_3} \right) + \frac{K_m}{D^2} \left[\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right)^2 \right] - \frac{K_h g}{D} \frac{\partial \theta}{\partial x_3} - \varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\frac{1}{D} \frac{\partial(Du_1 \varepsilon)}{\partial x_1} + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{K_m}{1.3} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_3} \right) + \frac{1.44 \varepsilon K_m}{E D^2} \left[\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right)^2 \right] - C \frac{1.44 \varepsilon K_h g}{E D} \frac{\partial \theta}{\partial x_3} - \frac{1.92 \varepsilon^2}{E} \quad (10)$$

ここで、

$$C = 0.2 \quad \text{for} \quad \frac{\partial \theta}{\partial x_3} \geq 0$$

である(高木・北田, 1994)。

$$= 1.0 \quad \text{for} \quad \frac{\partial \theta}{\partial x_3} < 0$$

計算開始日時は夏季7月29日午前3時としており、1992年同日の播磨灘東部及び大阪湾周辺の海面温度が衛星 NOAA-AVHRR データから選択されている。初期値は同日の NCEP 客観解析データの温位及び比湿プロファイルを水平一様に与えている。なお、本研究では一般風のない状態で議論を進めている。

計算領域を Fig.1 に示す。地形の起伏の情報として 1km メッシュ平均標高データ(国土地理院), また土地利用のそれに関しては 100m メッシュ 15 カテゴリーデータ(国土地理院 1988 年版)を使用している。土地利用データは各種地表面フラックスを計算する際に必要とされる。その方法に関しては、Kimura(1989)に従っている。また土地利用毎に対して粗度長や蒸発効率といった特性パラメータも当然必要となるが、それらの値は一ノ瀬他(1997)・近藤(1994)・Seaman et al.(1989)を参照して決定している。対象地域における代表的な土地利用種の被覆率について Fig.2 に示しておく。

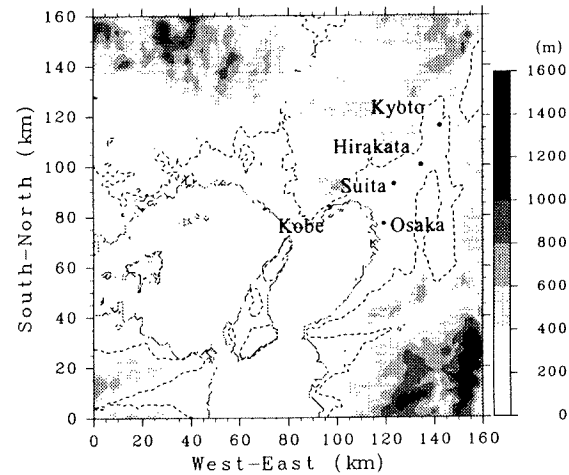


Fig.1 Calculation domain and topography in the present study. The tones indicate 200m interval ASL (above sea level).

3. 数値実験

3.1 実測との比較

第1章で述べた研究目的を遂行するにあたって、我々が開発した領域型モデルが現実の場をどの程度再現でき得るかという精度の問題についてまず立ち回しておく必要がある。モデルと比較する実測値の観測点は Fig.3 で示された計 5 地点であり、1992~1996 年

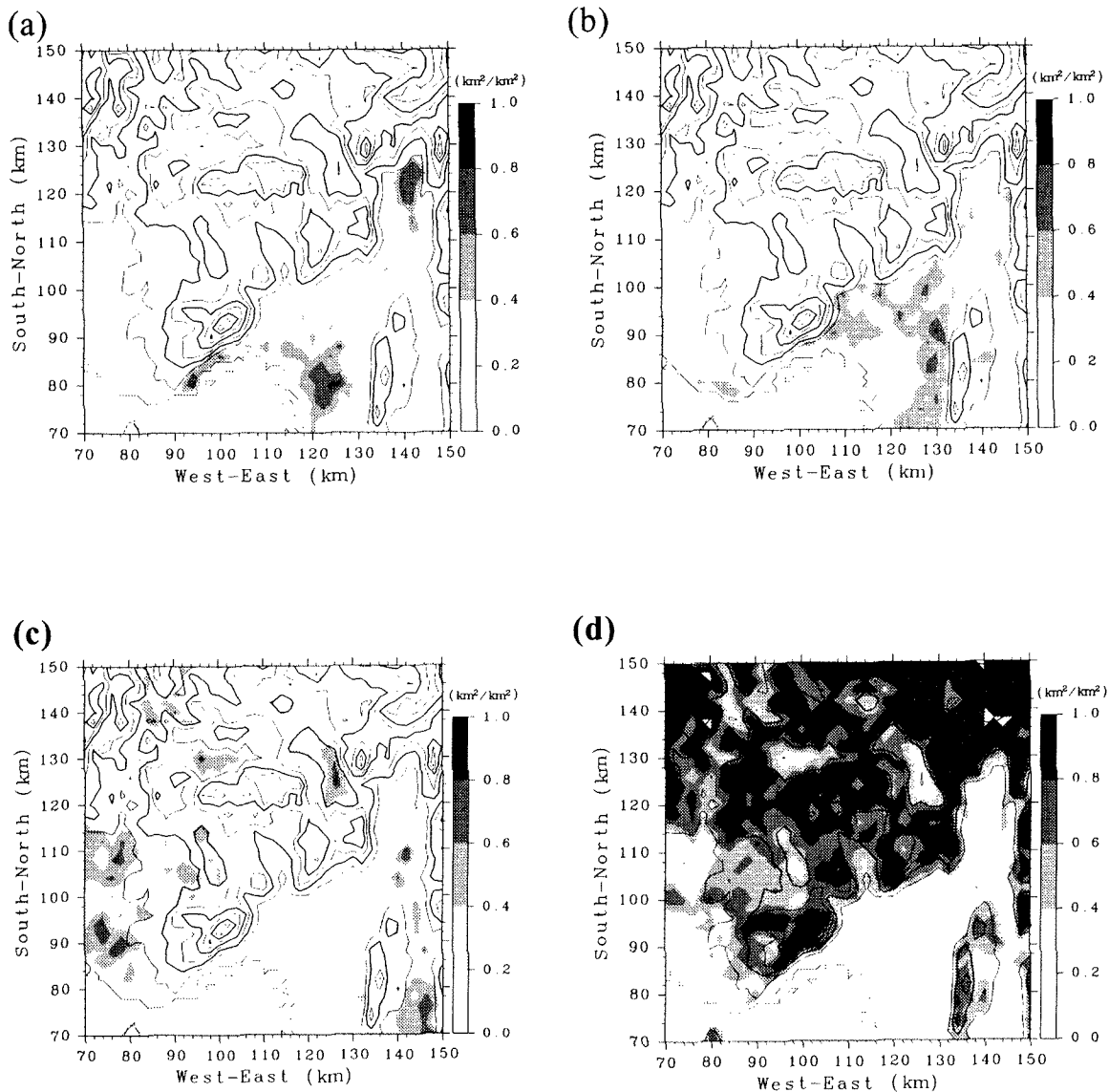


Fig.2 Covering rate of (a)the tall and big buildings, (b)dwellings, (c)paddy fields and (d)forests.

の7・8月の AMeDAS 及び大気汚染常時監視データ時間値を使用している。一般風が局地循環に影響を与えていない日のそれらを選択するために、以下に示す条件を与える。

条件1 大阪・枚方・京都 AMeDAS の日積算日照時間がいずれも6時間以上(局地循環が発達する条件)

条件2 潮岬・米子ゾンデの850hPaでの9・15時風速がいずれも5m/s以下(発達した局地循環が無変形である条件)

同地域において、850hPaの風速が15m/s以上の時には局地循環が発達しない事を高田・田中(1996)が示している。ただし15m/s以下であれば発達するが、一般風による変形は多少なりともあり得るという意味である。このような理由から、5m/sというかなり小さな値に

Table.1 The number of days under two conditions. Parentheses indicate the percentage to total number of days.

	Present Study	Takada and Tanaka(1996) May-September in 1978-1993
Total	310	1071
Condition 1	136 (43.9%)	427 (40.0%) only Kyoto AMeDAS
Condition 2	14 (4.5%)	115 (10.7%) less than 15m/s

設定した。場所は少し異なるが、岡山平野での海風が一般風による変形を受けていない時には米子での850hPaの風速がこの値に近い(佐橋,1978)という事実に従ったものである。結果的に、選択された日数が占める割合は全日数に対して4.5%とかなり少なく(Table.1), 一般風の影響をほとんど受けていない無変形である局地循環が発達する日がいかに稀であるかがわかる。

以上の操作によって選択された日に関して、特別にアンサンブル平均したものとモデル計算結果を比較してみる(Fig.4)。また比較対象地点についてはFig.3に示す。

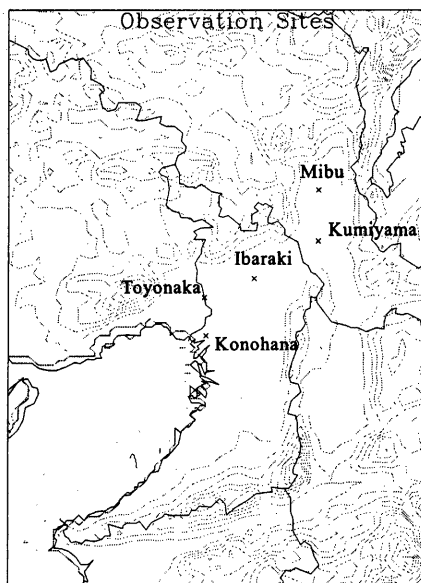


Fig.3 Observational points compared with the calculated results. Konohana, Ibaraki, Kumiyaama and Mibu are observation stations for air pollution network. Toyonaka is the AMeDAS station. Contour lines indicate 100m interval ASL.

この比較結果を見てもわかるように、全体的にどの地点においてもモデル結果が実測値のそれに近いことがわかる。即ち、我々が開発したモデルは実際の風の場をよく表現でき得るものと言える。また、(a)-(d)地点の変動を見ると、海風の内陸侵入に伴う位相のずれが計算・実測共にきれいに表現されている。一方、(e)

地点は風速のピークが共に午後早く(13-14時)に現れており、最も内陸であることから考えても海風によるものと違うことは明らかである。この地点では日中終始南成分を持った風が卓越し、その最大風速は約2m/sである。これは後述する京都都市域でのヒートアイランド風に相当するものと考えられ、田中(1984)によっても事例としてその鉛直構造等が示されている。

3.2 三極ヒートアイランド構造とその変動

風と気温場の動態について、ここで述べることにする。Fig.5はそのモデル結果である。12時(Fig.5a)には大阪湾から約10km程度侵入している。また京都都市域ではFig.5(a)-(c)を見てもわかるように、前節で述べた南風に覆われている。一方で、大阪都市域と京都都市域の間となる茨木市・枚方市付近では無風に近い状態かもしくは山際では谷風が形成されているのが見て取れる。以後海風は内陸へと徐々に侵入していき、16時(Fig.5c)には枚方市を越えて大阪府と京都府の県境付近にまで達する。

一方、地上気温の水平構造は特に興味深い。まず12時には大阪市、吹田市、そして京都市付近に極大域を持った分布を示している。これら三つの極大域に吹き込む形で海風及びヒートアイランド風が存在していることもわかる。これ以後、背後に山が存在している大阪市及び京都市付近の極大域は終始移動することはないが、吹田市付近にあった極大域は海風の侵入に伴って内陸へと移動していく様子が見て取れる。また、神戸市は京阪神地域の中では最も気温の低い状態が終始保たれており、夕方以降でも最も高温域が保たれるのは京都市であった(Fig.5c)。このことは地形の影響がかなり効いている事を意味しており、海岸都市と内陸都市の大きな違いと言える。

また、Fig.6は地上付近における風の水平収束・発散分布(14時)を示したものである。大阪平野域に注目して、吹田付近に海風による収束(厳密には内陸から吹くヒートアイランド風との収束も含んでいる)、また京都市域にはヒートアイランド風によるそれが見られており、大きい所では海風前線付近は $-10 \times 10^{-4} \text{ s}$ 、京都のヒートアイランド風が $-6 \times 10^{-4} \text{ s}$ 程度である。例えば、関東で有名な気象現象である環八雲の形成には、東京湾及び相模湾からの海風収束とヒートアイランドの相互作用が重要であるが(甲斐他,1995)、そこでは $-6 \times 10^{-4} \text{ s}$ 前後の収束値を示すことが知られている。従って、ヒートアイランドである事と収束オーダーから考えれば、夏季に上述の領域では雲が形成されている可能性が高いことが予想される。

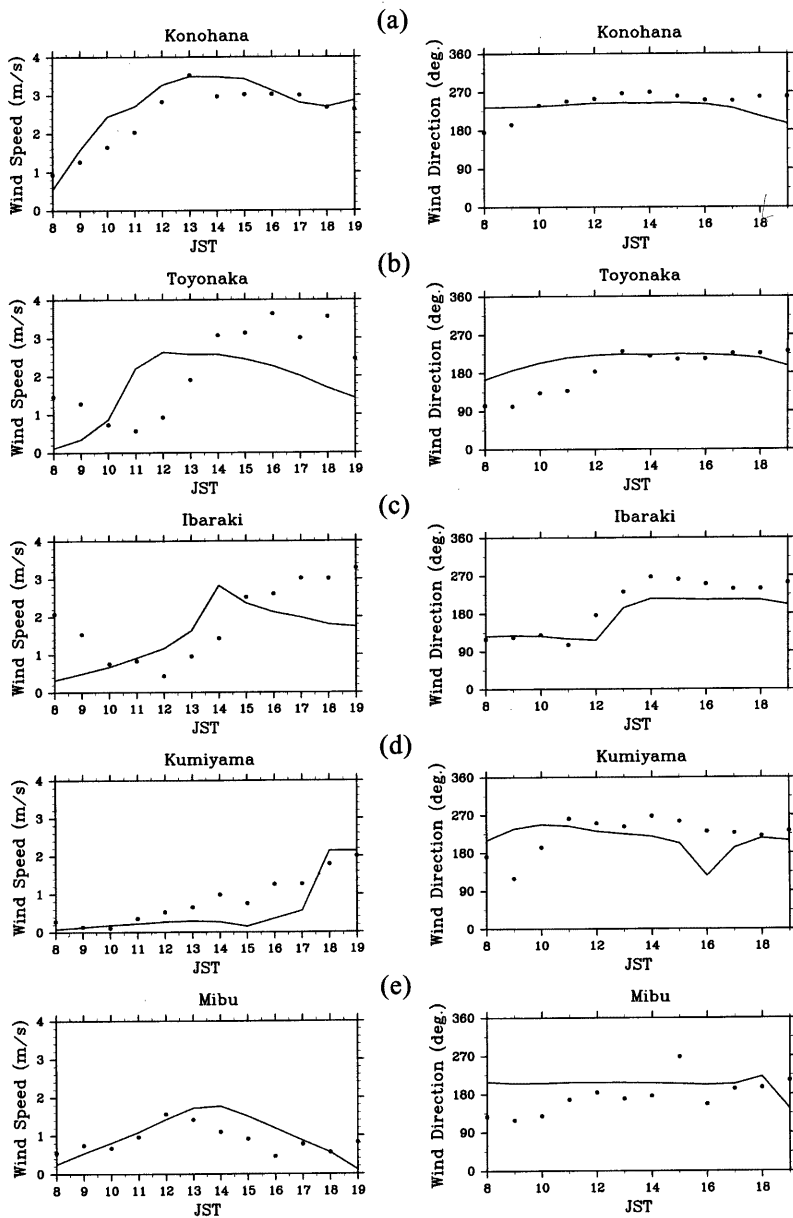


Fig.4 Temporal variations of wind speed (left side) and wind direction (right side) at (a)Konohana, (b)Toyonaka, (c)Ibaraki, (d)Kumiyama and (e)Mibu. Solid circles and lines indicate observed and calculated series.

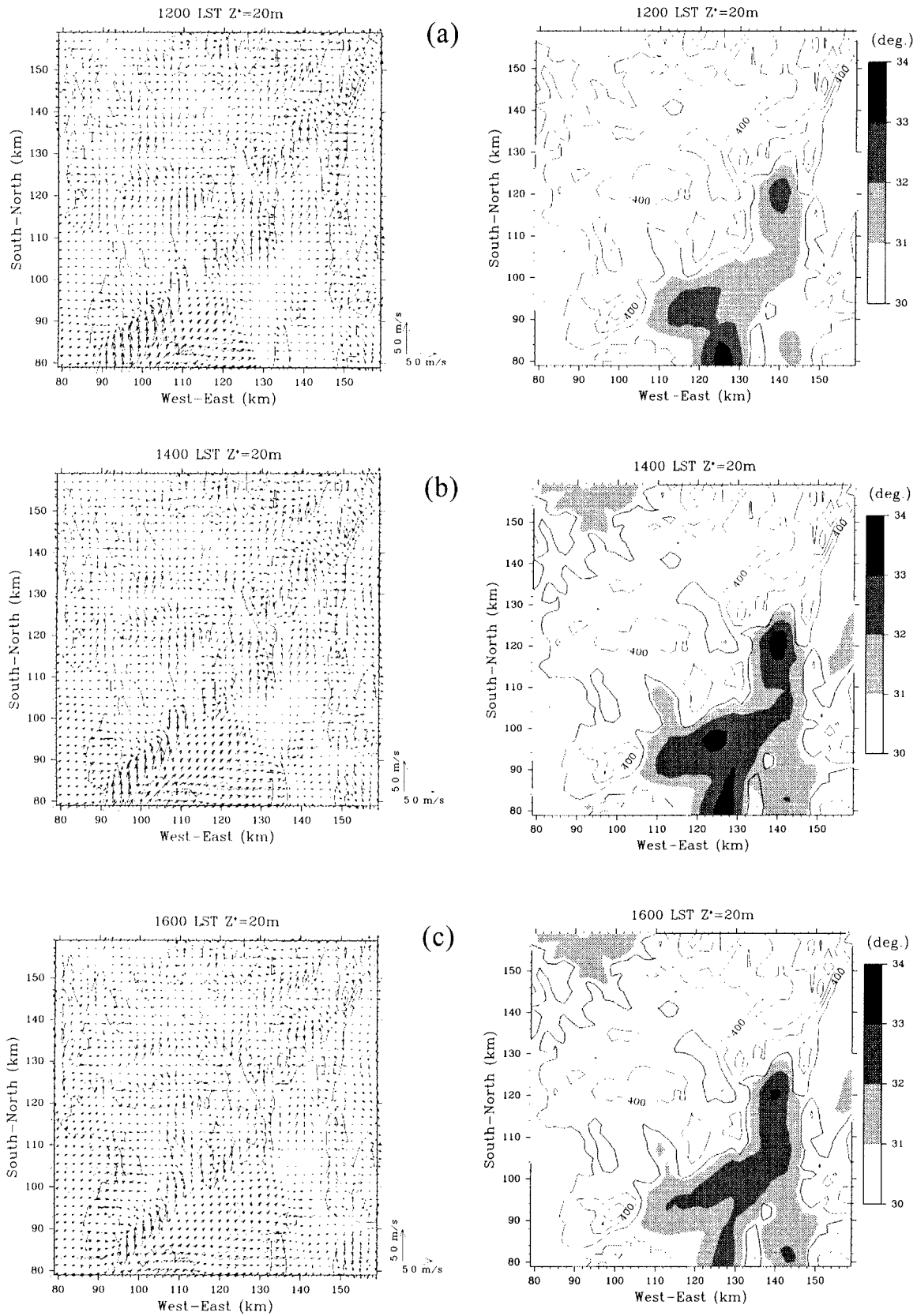


Fig.5 Horizontal distribution of wind vectors(left side) and air temperature(right side) at the height of $z^*=20\text{m}$, at (a)1200LST, (b)1400LST and (c)1600LST. Contour lines indicate 200m interval ASL.

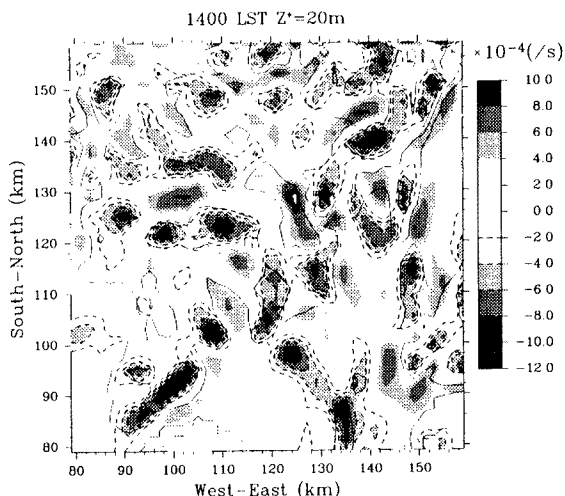


Fig.6 Horizontal distribution of wind convergence and divergence at the height of $z^*=20\text{m}$ at 1400LST. Broken lines indicate convergence.

3. 3 ヒートアイランドと山地の効果

前節でシミュレートされた京阪神地域の局地循環及びヒートアイランドの動態がどのようなメカニズムによって決定されているか、特に夕方には京都にまで到達する大阪湾からの海風に注目して調べていくことにする。

ここでTable 2で示すようなCASE RUNを行う。これらの実験から、京阪神地域での都市域と山地の分布が海風にどのような影響を与えているかを知ることができる。なお、前節までの議論で行われた通常の実験をControlと名付けておく事にする。Fig.7(a)は山を持た

Table 2 List of case runs.

Control	Standard Run
Flat	Without Mountain
No-urban	Without Osaka Urban Area
High	Height of Mountain is 1.5 Times

ない平坦地形での実験結果である(Flat,14時)。大阪市北部の吹田付近と京都付近で特に風の収束が目立つ。これはまさにヒートアイランドによるものであるが、実際の状態(Fig.5b)に比べるとかなり様相が異なっている事がわかる。Flatによれば、京阪間である茨木・枚方付近では上述の収束風の影響を受けるはずだが、実際のControlでは無風に近い領域になっている。また、京都付近のヒートアイランドによる収束風もControlの方はかなり弱まっている。この理由として、大阪平野の周囲を囲む山地がヒートアイランドによる収束を弱めている事が考えられる。日中に山際では谷風循環が発達しており、これが丁度ヒートアイランド循環とは逆向きのセンスで働くことになる。つまり気圧傾度の関係

から、都市の周囲に山が存在する事がヒートアイランドによる収束を緩和しているのである。

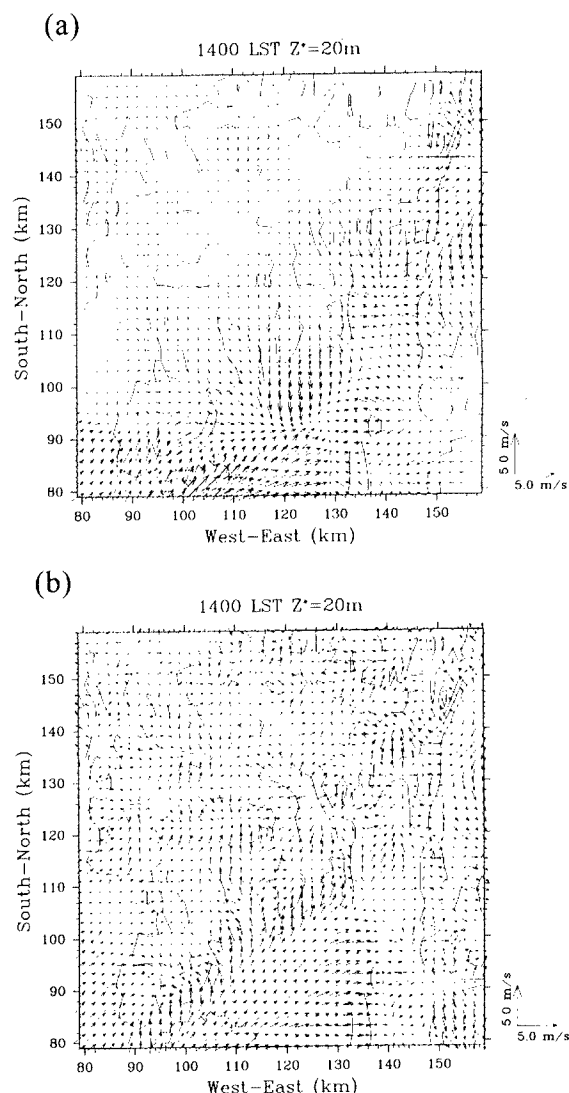


Fig.7 Horizontal distribution of wind vectors at the height of $z^*=20\text{m}$ at 1400LST, for (a)Flat and (b)No-urban.

Fig.8は都市と山地の存在が大阪湾から侵入してくる海風の侵入速度にどのような影響を与えているかを見たものである。海風の侵入距離は主観的にはあるが、前線面を形成する鉛直流が極大値を取る位置から決定してある。平坦な場合には、大阪市北部のヒートアイランド収束によって海風の侵入が阻まれて遅くなる(特に14~16時は停滞)。例えば大阪都市域が存在しないNo-urbanの場合(Fig.7b)には海風は内陸奥までかなり早く侵入している(厳密には谷風との結合によるものである)。従って、このFlatでは夕方までに京都域に海風が到達する事はない。Controlの場合にはそのような停滞が生じることなく、内陸にたやすく侵入し

ている。また、山を現実より高くした High ではさらに侵入速度が増している事もわかる。以上の結果より、ここでの都市の存在は海風の侵入を阻む力を持っているが、周囲に山地が存在する事がそれを緩和する事で侵入を容易にしていると言える。とどのつまり、ヒートアイランド収束効果と谷風発散効果のバランスによって海風の侵入速度が決定されていると言える。

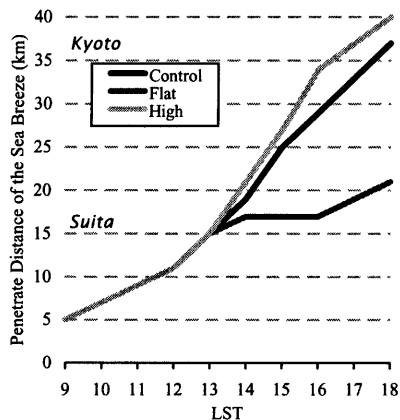


Fig.8 Temporal variation of penetrate distance of the sea breeze from Osaka bay for each case.

4. おわりに

京阪神地域におけるヒートアイランド構造とその動態に関して、領域型メソスケールモデルを用いて調べた。海風との関係に注目した為に夏季日中の好天静穏日に限定した話である。その結果、以下の事が明らかになった。

- 京都市域では、海風が到達する時刻までは南成分を持ったヒートアイランド風が卓越する。これはモデルからだけでなく、大気汚染常時監視データの解析結果からも明らかになった。
- ヒートアイランドは大阪市・吹田市・京都市付近で顕在化している。ただし吹田市付近のそれは、海風の侵入に伴って内陸へと移動していく様子が見られた。
- 大阪湾からの海風収束及び京都市付近のヒートアイランド風収束は、関東での環八雲を形成する海風収束に匹敵するものであり、これらの場所がヒートアイランド地域であることから、同様に雲が形成される可能性が高い。

- 平坦な地形では、大阪湾の海風が夕刻までに京都に到達する事はない。これは内陸から大阪都市域に向かうヒートアイランド風の収束が海風の侵入を妨げている理由による。
- 大阪平野の周囲に山地が存在すると、海風の侵入速度が大きくなる。また山が高い程にその事が顕著化する。これは山が存在することで、ヒートアイランドとは逆向きの気圧傾度が作り出されることが理由である(谷風循環による発散効果)。
- 上述2件の事から、この地域での都市化(ヒートアイランドの増大)は海風の侵入を遅らせ、逆に山地の存在がそれを速くする。このバランスでもって実際の海風侵入速度が決定されていると言える。

謝辞

本研究の遂行に際し、京都市・京都府・大阪府・大阪市の大気汚染常時監視局、並びに気象庁からデータを提供して頂きました。また、神戸商船大学・海洋機械工学講座・海洋情報科学研究室 (<http://misa.kaiyou.kshosen.ac.jp/>) から海面温度のデータ提供をして頂きました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- 一ノ瀬俊明・下堂菌和宏・鶴野伊津志・花木啓祐 (1997): 細密地理情報にもとづく都市気候数値シミュレーション地表面境界条件の高精度化, 天気, Vol.44, pp.785-797.
- 甲斐憲次・浦健一・河村武・朴(小野)恵淑 (1995): 東京環状八号線道路付近の上空に発生する雲(環八雲)の事例解析-1989年8月21日の例-, 天気, Vol.42, pp.417-428.
- Kimura,F. (1989): Heat Flux on Mixtures of Different Land-Use Surface: Test of a New Parameterization Scheme, J.Meteor.Soc.Japan, Vol.67, pp.401-409.
- Kitada,T, Okamura,K and Tanaka,S. (1998): Effects of Topography and Urbanization on Local Winds and Thermal Environment in the Nohbi Plain, Coastal Region of Central Japan:A Numerical Analysis by Mesoscale Meteorological Model with a $k-\epsilon$ Turbulence Model, J.Appl.Meteor., Vol.37, pp.1026-1046.
- 近藤純正 (1994): 水環境の気象学, 朝倉書店, 348pp.

- 佐橋謙 (1978): 岡山周辺の海陸風について, 天気, Vol.25, pp.357-363.
- Seaman,N.L., Ludwig,F.L., Donall,E.G., Warner,T.T. and Bhumralkar,C.M. (1989): Numerical Studies of Urban Planetary Boundary-Layer Structure under Realistic Synoptic Conditions, J.Appl.Meteor., Vol.28, pp.760-781.
- 高田望・田中正昭 (1996): 複雑な地形・海陸分布上の海風の動態, 京都大学防災研年報, 第 39 号 B-2, 1984, PP.177-192.
- 高木久之・北田敏廣 (1994): ドップラーソーダによる大気境界層下部の乱れの鉛直分布とその $k-\epsilon$ 乱流モデルによる解析, 天気, Vol.41, pp.827-846.
- 高木久之・北田敏廣 (1998): 海風侵入後, 日没から夜間安定成層時にかけてドップラーソーダ観測により得られた乱流運動エネルギーの2次元 $k-\epsilon$ 乱流モデルによる解析, 天気, Vol.45, pp.76-92.
- 田中正昭 (1984): 盆地上空の安定層と局地風の形成, 京都大学防災研年報, 第 27 号 B-2, 1984, PP.107-119.
- Yoshikado,H. (1992): Numerical Study of the Daytime Urban Effect and Its Interaction with the Sea Breeze, J.Appl.Meteor., Vol.31, pp.1146-1164.

付録

記号リスト

- f: コリオリパラメータ
 θ : 温位
 π : Exner 関数
q: 比湿
g: 重力加速度
 m_t : モデル上端高度
 m_g : 地上高度
E: 乱流運動エネルギー
 ϵ : 乱流運動エネルギーの消散率
Pr: 乱流 Prandtl 数

Numerical Simulation of the Land-Sea Breezes and the Valley-Mountain Winds in the Keihanshin Region.

— Effects of Urbanizations and mountains —

Yukitaka OHASHI* and Hideji KIDA*

*Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

Using a regional mesoscale model, we investigate the structures of the heat island and the local circulation in the Keihanshin (Kyoto, Osaka and Kobe) region. Calculated results correspond with observed those under the calm condition. The features are that the three heat island areas; Osaka, Suita and Kyoto are obvious and a heat island area in Suita moves inland due to the invasion of the sea breeze. A balance of the convergence of the heat island wind into the Osaka urban area and the effect of divergence produced by the valley wind over the surrounding mountains, controls a penetrate speed of the sea breeze from Osaka bay.

Keywords: Keihanshin region, local circulation, heat island, numerical experiment