

(39) 土地利用の変化が濃尾平野の気温分布に与えた影響に関する数値解析
—土地被覆の改変と人工熱源増加の気温変化に対する寄与—

NUMERICAL ANALYSIS OF THE SHIFT OF DAILY HIGH TEMPERATURE ZONE CAUSED BY
URBANIZATION IN THE UPSTREAM AREA OF SEA BREEZE IN NOHBI PLAIN, CENTRAL JAPAN

北田 敏廣*・久保田庄三**
Toshihiro KITADA*・Shozo KUBOTA**

ABSTRACT; During a decade from 1975 to 1985, the zone of daily high temperature in Nohbi Plain, Central Japan, shifted from the city center of Nagoya toward its inland suburbs. Through numerical simulations, the mechanism of this phenomenon has been clarified as horizontal heat transport by the sea breeze which is heated up over newly urbanized area near the coast. Direct effects of the increase in artificial heat source on the regional-scale temperatures were found to be rather negligible.

KEYWORDS; land use, urbanization, heat island, regional climate, meteorological model

1. 序論

都市化に伴う気候の変化が東京などの大都市域で注目されている。土地利用が森林や水田から建築物、舗装面に変わることによって太陽放射に対する地表の熱的な応答が変わること、人工熱源が増加すること等が気候変化の原因と考えられている。このように局所的に土地利用の仕方が変わるとき、その場所の微気候が変化するのは当然であるが、土地利用の改変が大規模に生ずれば、気候の変化が地域特有の流れを通じて他の場所にも及ぶことが考えられる。筆者らは、濃尾平野を含む地域を対象に、1975年と1985年の10年間で隔てた土地利用および気象データを解析することにより、総観規模の気圧傾度が緩やかで局地風が発達しやすいとき（従って、大気汚染の意味でも環境に深刻な影響を与えやすいとき^{1,2)}）、日最高気温域が名古屋の都市部（1975年）からむしろ内陸部（1985年）に移動したことを見出した³⁾。本稿は、これに対する説明を提示するとともに、この現象に対する予備的な数値シミュレーションを行ったものである。

2. 濃尾平野に生じた10年間の変化 —1975年と1985年—

2.1 地表条件の変化

'75年から'85年の10年間に、図1に示す領域では、宅地の増加を含む都市化が進み、領域内の“陸地面積”の約12%（約400km²）が水田や森林から都市化域へと変わった³⁾。図2はこの変化を視覚化したものであるが、名古屋の東部および北部の都市化の進展を示す。領域内の総人口は、661万人（1975年）から658万人（1985年）とほとんど変化していないので、上記の都市化は人口密度分布の変化ならびに広い意味での社会資本の拡充に対応するものと考えられる。

* 豊橋技術科学大学 (Dept. of Regional Planning, Toyohashi Univ. Technol., Toyohashi 441, Japan)

** 東京都 (Tokyo Metropolitan Office)

2. 2 人工熱源の変化

最近調査された各種燃料使用量および交通量を基に、濃尾平野における人工排熱強度（約 1km^2 当り）の分布を推定した。熱源推定のための基礎資料⁴⁾は、愛知県環境部が1986年度を対象として調査した市町村別の、(1) 煤煙発生施設を持つ工場等（発電所を含む）の重油換算の燃料使用量、(2) 民生用等の群小煙源についてのガス（LNG, LPG）、灯油の使用量、(3) 幹線道路の車種別走行量、および地域メッシュ統計による(4) 人口分布である。以上の諸量を、燃料別発熱量⁵⁾、自動車の車種別、走行距離当り発熱量⁶⁾、人体発熱量⁶⁾により熱量に換算した。また、人口分布は厳密に1975年と1985年のデータ⁷⁾を用いたが、その他の量については上述の1986年の調査を1985年の値と見なし、さらに地域別の工業出荷の変化率（1975年～1985年）⁸⁾から1975年の値を推定した。ただし、発電所については大気に放熱される量を約15%⁹⁾と見積もっている。

以上の計算を基にすると領域内の総人工排熱量は1975年の $1.05 \times 10^8 \text{Gcal/y}$ から1985年の $1.10 \times 10^8 \text{Gcal/y}$ まで10年間に約5.2%増加したものと推定できる。図3は、1985年における人工熱源の空間分布を示す。最大は知多半島の付け根の伊勢湾側にあり約 $13 \text{Gcal/km}^2 \cdot \text{h}$ である。たかだか5.2%の伸び率であることから想像されるように1975年の人工熱源分布も図3とほとんど同じである。また、5月の名古屋の全天日射の月平均日量は $18.1 \text{MJ/m}^2 \cdot \text{day}$ ¹⁰⁾、すなわち約 $180 \text{Gcal/km}^2 \cdot \text{h}$ で人工熱源が最強の所でも平均日射の約7%である。さらに、他の場所との比較で言えば1987年の東京都の推定人工熱源が約 1.23Gcal/y ¹¹⁾で濃尾平野と大差がない。

2. 3 流れ場の変化

総観規模の気圧配置が、上述のように高気圧支配の下に緩やかな気圧傾度を示すとき、図2の土地利用の違いがこのスケールの流れ場そのものにどの程度の影響を与えるかを実データを基に調べたものが、図4a、

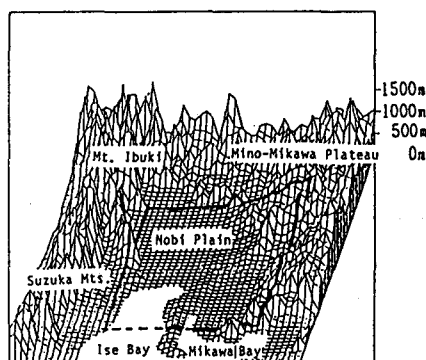


Fig.1 Investigated domain, circled with thick solid line, and its surrounding area.

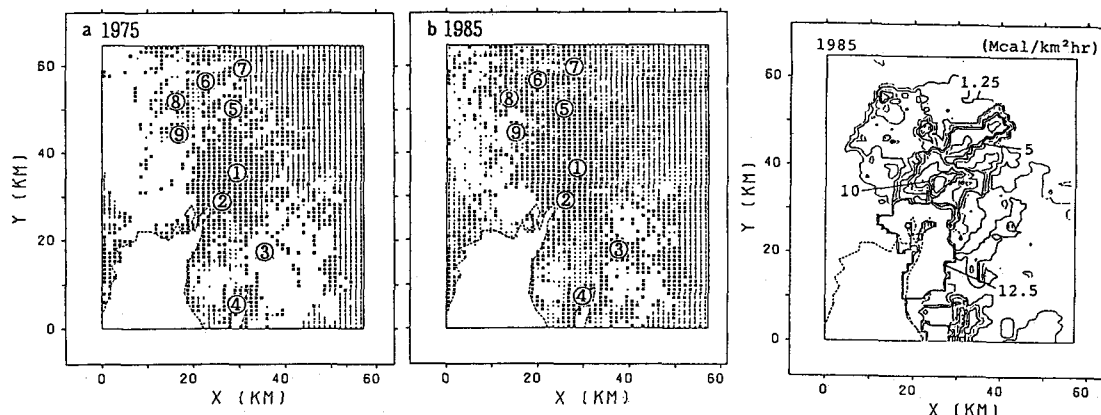


Fig.2 Distribution of land-use-type in Nohbi plain, Central Japan in (a)1975 and (b)1985. The land-use-types are expressed as: (*) :urban area, (.) :forest, (o) :grass land, (x) :water surface (including rice paddy field). The numbers ① through ⑨ denote some of the observation points where wind and temperature data are collected: ①Showa-ku ②Minami-ku ③Kariya ④Handa ⑤Komaki ⑥Konan ⑦Inuyama ⑧Ichinomiya ⑨Inazawa

Fig.3 Spatial distribution of annually averaged one-hour-strength of artificial-heat-sources in Nohbi plain in 1985. Unit is in $\text{Mcal}/(\text{km}^2 \cdot \text{h})$. Total artificial heat discharged in the area is $1.10 \times 10^8 \text{Mcal/y}$ in 1985.

bである。図4aが1975年5月12日の、図4bが1985年5月12日のいずれも18時の流れ場を示す。両年ともに、同様の気圧配置の日を9日ずつ選んだうちの一例を示している。地表の状態が変われば、熱的にも機械的にも流れ場に何らかの影響を与えているはずであるが、図4a,bを見る限り、10年間の都市化の進展の影響とはつきり特定できる変化は見られない。むしろ、このスケールの流れの場は、海陸の分布、山岳の存在など（熱的効果も含めて）地形的な要因がその骨格を決め、少々の土地利用の変化は流れ場そのものをあまり変えないものと考えられる。実際、この地域の流れ場の日変化は、両年ともに、(1)9時頃から、海沿い、山沿いで局所的に互いに独立に海風、谷風が始まり、だんだんに強まって、(2)12時頃から、海風と谷風が一連の流れを作り直近の山に向かう場を形成、さらに、(3)15時以降は、むしろ近くのを迂回するような形で木曽川沿いに中部山岳の熱的低気圧に吹き込むような流れを20時頃まで続ける。図4a,bは、ちょうどこの段階に相当する。中部山岳のヒートローの中心は、図4の領域をはるかに外れた所に位置するが、Kondo(1990)¹²⁾の行った数値実験はこのことをよく示している。

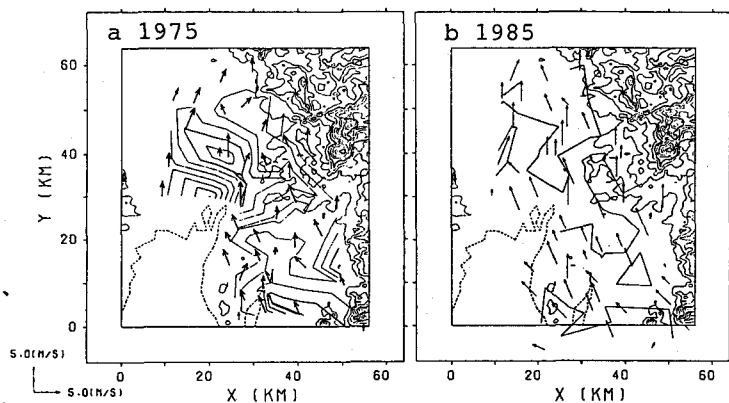


Fig.4 Observed winds in Nohbi plain at 1800LST on 12 May in (a)1975 and (b)1985.

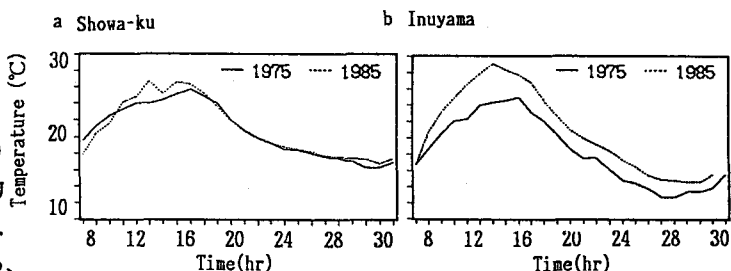


Fig.5 Comparison of diurnal variations of observed temperatures at (a)Showa-ku, Nagoya and (b)Inuyama on 12 May in 1975 and 1985.

2. 4 気温場の変化

図2に示す程度の土地利用の変化は、(メソβスケールの)流れ場そのものにはさしたる影響を与えていないように見えるものの、地表気温にはかなりの変化をもたらした。その最も特徴的なものは、内陸部の高温化である。図5a,bは、昭和区(図2の①)と犬山(図2の⑦)における、'75年と'85年の観測気温の日変化であるが、名古屋の都市中心部にあたる昭和区の最高気温がほとんど変化していないのに対して、内陸部の犬山の気温上昇が顕著である。

2. 5 海風層に対する地表からの加熱

図5bに示されている気温上昇は犬山だけの特異現象ではない。このことを調べるために基準の海岸線からの距離を横軸に、縦軸に日最高気温をとって観測点のデータをプロットしたものが図6である。図に明確に示されていることは、'75年の場合には内陸部の気温がむしろ低いのに対して、'85年の場合にはほぼ海岸

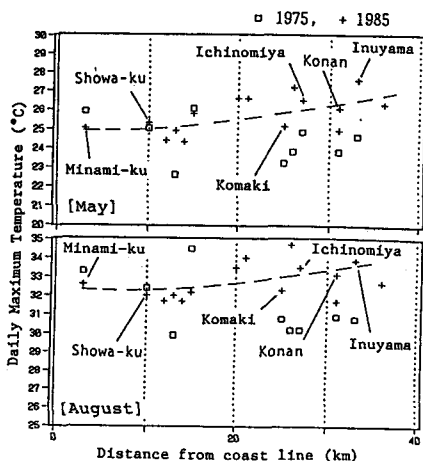


Fig.6 Spatial variation of observed daily maximum temperature around a south-north line on 12 May 1975 and 1985, and 26 August 1975 and 24 August 1985. The distance is measured from assumed coast-line at $y=25$ km. Plus signs are for 1985, and open squares for 1975.

からの距離に比例して日最高気温が上昇していることである。内陸部の都市化の度合は、むしろ名古屋ほどではなく、この気温上昇には、海風時の風上側地域の都市化の進展に伴う、海風層に対する地表からの顕熱流束の増加が大きく寄与しているものと考えている。図7は、昭和区の気温を基準にとったときの'75年と'85年の気温分布(14時)³⁾であるが、'85年の方が高温域が名古屋の北方に広がっている。

3. 数値解析

図6, 7に示されている”海風時の上流にあたる地域の都市化に伴う高温域の内陸への移動”に関する予備的な数値シミュレーションを行った¹³⁾。流れそのものの推定は、観測データを基にした客観解析¹⁴⁾によった。利用したデータは、1時間毎の地上風、名古屋テレビ塔の観測風(約150mまで)、6時間ないし12時間毎の浜松、輪島、潮岬における上層観測風である。さらに、中層風(150~1500m)のシアーに関しては、公資研(現資環総研)のNRIPRメソスケールモデルの出力データ¹⁵⁾を参考にした。この1時間毎に得られた三次元流れ場(格子幅:水平方向約1km、鉛直方向50m、ただし最下層は約10m)を用いて、熱輸送シミュレーション(温位)を行った。熱輸送の式に対して、terrain followingの座標変換を用いた。計算領域は東西約57km、南北約65km、高さ方向には地表から約3kmである。計算にあたっては、最下層10mを接地層とし、地表境界における次の熱収支式を境界条件として用いた¹⁶⁾。

	α	β	ϵ	$z_0(m)$
Water surface	0.20	0.2	0.95	0.01
Forest	0.20	0.5	0.95	1.00
Grass land	0.20	1.5	0.95	0.10
Urban area	0.15	3.0	0.90	1.00

Table 1 Surface parameter; α :albedo, β :Bowen's ratio, ϵ :emissivity, z_0 :roughness length

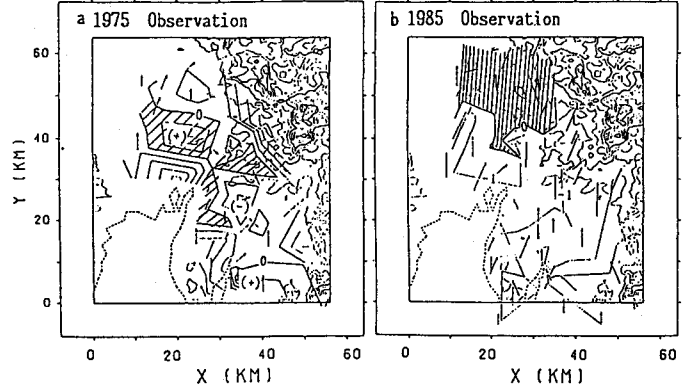


Fig.7 Horizontal distribution of observed temperatures in Nobi Plain at 1400LST on 12 MAY in (a)1975 and (b) 1985. The temperatures are presented in terms of deviations from that at Showa-ku, Nagoya. Hence zero value of the contour indicates the same temperature as that of Showa-ku. The shaded area shows high temperature zone. Contour interval is 1°C.

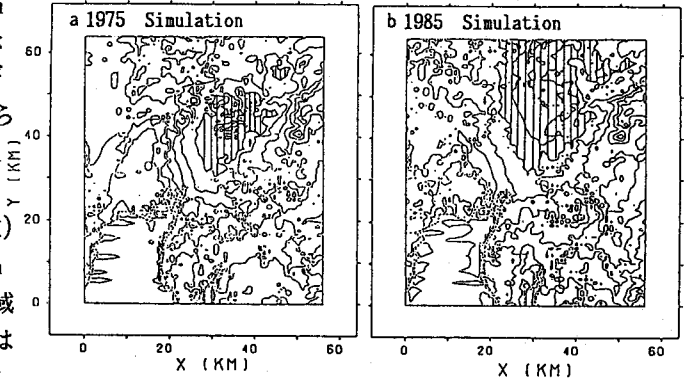


Fig.8 Same as in Fig.7 but for the simulated temperatures at $z = 10m$, which corresponds to the 2nd vertical grid.

$$K^*(1-\alpha) + (1.2\sigma T_{10}^4 - 171) + Q_A - \epsilon\sigma T_s^4 + \rho_g c_g K_g \frac{\Delta T}{\Delta z} + (1 + \frac{1}{\beta})\rho_c p K_T \frac{\Delta T}{\Delta z} = 0 \quad (1)$$

ここに、ほとんどの変数名は慣用によっているが、 T_{10} は高さ10mでの気温、 T_s は仮の地表面レベルでの気温(仮定した粗度長 z_0 を仮の地表面と仮定)、 $\Delta T = T_{10} - T_s$ 、 $\Delta z = 10 - z_0$ 、 Q_A は人工排熱強度を示す。地表面の状態は、アルベド(α)、ボーエン比(β)、長波放射率(ϵ)、粗度長(z_0)で表現し、地表によって設定した値を表1に示す。その他、式中の土壌の単位体積当たりの熱容量、熱拡散係数、ボルツマン定数はそれぞれ、 $C_g \rho_g = 1.68 \times 10^6 \text{ Wm}^{-3} \text{ K}^{-1}$ 、 $K_g = 4 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、 $\sigma = 5.7 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ である。なお、左辺第2項は大

気からの長波放射を表す項でSwinbank(1963)¹⁷⁾による経験式である。さらに、接地層に対する熱拡散係数はBusinger-Dyer-Pandolfoの普遍関数¹⁸⁾を用いて推定した(安定成層: $\phi_h = \phi_m = 1 + 5(Z/L) = (1 - 5R_i)^{-1}$, $Z/L = R_i / (1 - 5R_i)$ 、不安定成層: $\phi_h = \{1 - 16(Z/L)\}^{-1/2} = (1 - 16R_i)^{-1/2}$, $\phi_m = \{1 - 16(Z/L)\}^{-1/4} = (1 - 16R_i)^{-1/4}$, $Z/L = R_i$; gradient Richardson数 $R_i = g(\Delta T / \Delta Z) / T(\Delta U / \Delta Z)^2$; $U_* = \kappa Z(\Delta U / \Delta Z) / \phi_m$; 熱拡散係数 $K_T = \kappa U_* Z / \phi_h$)。また、接地層より上層では、Mellor and Yamada(1974)の2nd order closure のレベル2-モデルを基にしたもので、Kondo(1989)¹⁹⁾に述べられている定式を用いた。また、水平方向拡散係数は、次式により与えた($\alpha^2 = 0.52$)。

$$K_H = \alpha^2 \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) \right]^{1/2} \quad (2)$$

4. 結果及び考察

4.1 '85年における内陸部の高温化

図8a, bに14時の気温場($z=10m$ における)を示す。図7の観測値と比較すべきものである。図7と同様に、昭和区の観測点に相当する格子点での気温からの偏差を示しており、斜線部が高温域に該当する。図7の観測値と比較すると、'75年の高温域(図8a)がやや東より出現しているが、定性的には'85年における高温域(図8b)の北方への移動をよく再現していると考えられる。また、図9は図6に記した内陸に行くほど日最高気温が高くなる('85年)という点に関連して、'75年からの日最高気温の上昇分を観測値と計算値について比較したものである。観測値の方が気温上昇の程度がやや大きい、計算値も内陸に行くほど上昇分が増加する傾向を示しており、海風上流部の都市化に伴う内陸の高温化(海風層の加熱)を証明するものと考えられる。

4.2 人工熱源の影響

ここまで示した計算はすべて人工熱源も含めた結果であるが、この人工熱源がどの程度気温に影響しているのかを調べるために、'85年を対象に人工熱源の寄与を0にした計算も行った。計算における人工熱源強度の日変化パターンは、相対強度にして日中(午前6時~午後6時)が1、夜間(午後6時以降、翌朝午前6時まで)を1/3として与えた。図10は、この時の日最高気温および日最低気温への人工熱源の寄与を示す。図中 +印が日最低気温への寄与を、□印が日最高気温への寄与を示す。いずれも、人工排熱強度が大きい南区、昭和区に該

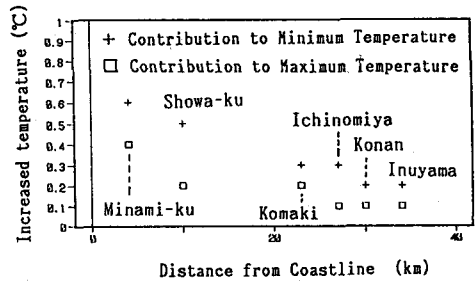


Fig.10 Same as in Fig.9 but for the possible increase of temperatures due to artificial heat sources on 12 May 1985. These increased temperatures were obtained by performing two simulations, i.e. with- and without-artificial heat sources. Open squares show contributions of artificial heat sources to daily-maximum-temperature, and plus signs those to daily-minimum-temperature.

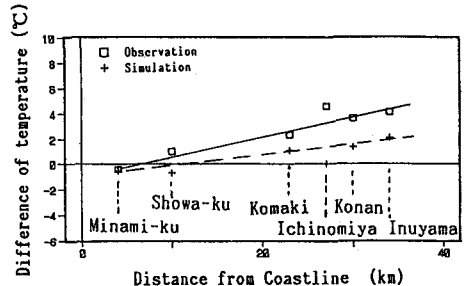


Fig.9 Spatial variation, along a south-north line, of the increase of daily-maximum-temperatures on 12 May between 1975 and 1985. Positive value shows that the daily-max-temperature was higher in 1985 than in 1975, and vice versa. Open squares are for the observed temperatures and plus signs for the simulation temperatures.

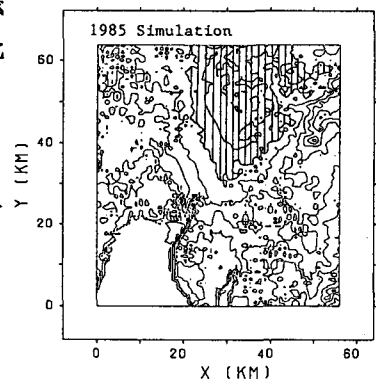


Fig.11 Same as in Fig. 8b but for the simulation without artificial heat sources.

当する格子点で影響が大きい、その寄与は高々 0.6°C であることがわかる。すなわち、都市化の度合いが大きい名古屋中心部の方が内陸よりも人工熱源の影響が大きいこと、夜間の方が人工熱源の気温に対する寄与が大きいこと等を示している。人工排熱強度最大の所が、知多半島にあるので(図3)、さらにくわしく人工熱源の面的な影響を見るために図8bと同じく昭和区に該当する格子点での気温からの偏差を14時について示したものが図11である。すなわち、図8bと図11の違いは計算に人工熱源が含まれているかどうかだけである。図8bと11の比較は、気温分布が人工熱源の有無によって面的にもあまり変わらないことを示している。

5. 結論

'75年から10年間に生じた濃尾平野の都市化の進展にともない気温場がどのように影響を受けたかを、高気圧の支配下で気圧傾度が緩やかな総観場の日を対象に調べた。その結果、(1)海風の上流部にあたる地域の都市化により内陸の最高気温が上昇する、(2)都市化域を吹走する海風層の加熱がその原因である、(3)人工熱源そのものの寄与は大きくない(1km^2 という範囲で平均した熱源強度および気温と言う意味において)、ことがわかった。すなわち、濃尾平野では人工熱源の直接的影響よりはむしろ地表被覆の改変の方がはるかに気温に影響していること(しかも、局所的のみならず地域の規模で)を示す。今回は、流れ場の推定は観測風を基にした客観解析によった。従って、流れ場に対する様々なスケールの地形的効果はある意味ですべて含まれているわけであるが、数値モデルにより流れ場そのものも計算する場合、対象領域を包含する規模の地形効果には十分注意する必要があると考える。例えば、本研究の場合は、中部山岳地帯を中心に発達するヒートローの影響が極めて大きい、これの効果は、新聞天気図に示されているような空間、時間スケールの気圧配置では粗すぎて表現できないし、また、もちろん図1のみを対象領域とするような流れの計算では、この熱的低気圧は生成しない。筆者らも乱流モデルを入れた流れの数値モデル^{20, 21, 22)}によるこの問題の数値シミュレーションを準備している。

(謝辞)

解析のために必要なデータを提供していただいた愛知県環境部大気保全課の方々に深甚の謝意を表します。また、国井克彦氏(現日本原子力研究所)は、研究の最初の段階で気象データの整理、解析を、中道健二氏(現豊橋技科大大学院生)は、人工熱源の調査を担当した。さらに、松尾浩嗣氏(豊橋技科大大学院生)にはこの原稿作製時にお世話になった。あわせて謝意を表します。

(参考文献)

- 1) Kitada, T. and Ueda, H. (1989) Encyc. Envir. Control Tech., P.N. Cheremisinoff, Ed., Gulf Pub., 2, 583-630.
- 2) Kitada, T. and Kitagawa, E. (1990) Atmos. Envir., 24A, 1545-1559.
- 3) 北田敏廣、国井克彦、久保田庄三 (1991) 衛生工学研究論文集、土木学会、27, 117-127.
- 4) 愛知県環境部大気保全課資料 (1991).
- 5) 河村 武、橋本道夫 編 (1990) 環境科学 III. 測定と評価, 316 pp., 朝倉書店.
- 6) 半谷高久、松田雄孝 編 (1977) 都市環境入門, 262 pp., 東海大学出版会.
- 7) 総理府統計局 (1976, 1986) 昭和50年および60年国勢調査.
- 8) 愛知県 (1977, 1986) 工業統計表.
- 9) 尾島俊雄 (1975) 熱くなる都市、NHK放送出版協会.
- 10) 東京天文台 編 (1989) 理科年表、丸善.
- 11) 守田 優、菊池国明 (1990) 土木学会第45回年次学術講演会講演集、II巻、832-833.

- 12) Kondo, H. (1990) J. Meteor. Soc. Jpn., 68, 419-434.
- 13) 久保田庄三 (1992) 豊橋技科大修士論文、141 pp.
- 14) Kitada, T. et al. (1986) J. Climate Appl. Meteor., 25, 767-784.
- 15) 近藤裕昭 (1991) 私信.
- 16) 例えば、Oke, T.R. (1978) Boundary Layer Climates, 372pp., Methuen & CO LTD, London: 和訳、
斉藤直輔、新田 尚 (1981) 境界層の気候、朝倉書店.
- 17) Swinbank, W.C. (1963) J. Royal Meteor. Soc., 89, 339-348.
- 18) 例えば、Panofsky, H.A. and Dutton, J.A. (1984) Atmospheric Turbulence, 397pp., John-Wiley.
- 19) Kondo, H. (1989) Report of the NRIPR, No.44, 76 pp.
- 20) Kitada, T. (1987) Bound.-Layer Meteor., 41, 217-239.
- 21) Kitada, T. et al. (1991) Energy & Buildings, 16, 979-992.
- 22) Kitada, T. and Takagi, H. (1992) Int. Seminar on Monitoring and Modelling in the Meso-
scale, Aristotle Univ. Thessaloniki, Greece/ KFA, Julich, Germany, in press.