

名古屋市とその周辺地域における熱環境シミュレーション

NUMERICAL SIMULATION OF THERMAL ENVIRONMENT
IN NAGOYA CITY AND ITS SUBURBS

水鳥雅文*・田村英寿*・丸山康樹*

Masafumi MIZUTORI*, Hidetoshi TAMURA*, Kouki MARUYAMA*

ABSTRACT ; A three-dimensional numerical model for the simulation of urban heat islands is developed, and it is applied to Nagoya City and its suburbs. On the basis of the simulated results, the present state of thermal environment and the effect of improved plans in the area are discussed.

The good performance of the model are confirmed by comparison of numerical results with in-situ data at a typical day of summer. And the following characteristics of the thermal environment are obtained;

- 1) A weak ascending current occurs in the urban area at night.
- 2) A front of sea breeze is formed in the urban area in the daytime.

The effect of improving the thermal environment is simulated in the two cases, one is the case of eliminating 50% of the actual artificial heat, the other is the case of increasing the green coverage ratio in urban area to 50%. The changes of air temperature, humidity and wind velocity are evaluated by comparison of the improved case with the actual case using this model.

KEYWORDS ; thermal environment, urbanization, Nagoya City, numerical simulation

1. はじめに

都市化による熱環境の悪化、いわゆるヒートアイランド化は、都市のアメニティーを悪化させるばかりでなく、冷房需要などを増加させ、エネルギー消費の増大をもたらすといった側面があり、省エネルギーの観点からも重要な問題である。

当所では、これまでに名古屋市とその周辺地域を対象に、既往データをもとに、都市熱環境とその影響要因の実態を分析してきた(水鳥ら(1993))。その結果、1)都市化の影響とみられる温暖化や乾燥化が着実に進行していること、2)宅地化の進行と温暖化や乾燥化との間に明瞭な相関関係が認められること、3)日中の伊勢湾からの冷たい海風が都市部の気温に対し冷却効果を持っていること、などを示した。

本報告では、都市熱環境をシミュレーションするための3次元数値解析モデルを新たに構築し、これを用いて名古屋市およびその周辺地域における熱環境のメカニズムの解明と、その概略の改善方策について考察する。

2. 数値モデルの概要

本研究では、都市域における温暖化や乾燥化を予測・評価するための数値解析モデルを開発した。具体的には、地形の起伏の効果が反映されるような鉛直三次元座標系を用いて、都市部での局地風、海陸風、山谷風などといった風の場と、それによる大気中での熱と水蒸気の移流、拡散を計算した。

* (財)電力中央研究所 Central Research Institute of Electric Power Industry

計算対象領域は、図-1に示すような、名古屋市を中心とした南北方向約100km、東西方向約80kmの範囲（水平メッシュ1km）である。大気部分は5.4kmまでを15層で、地中・海中部分はそれぞれ0.5m、2mまでを5層でモデル化した。

本モデルの基礎方程式および境界条件は表-1に示すとおりである。大気中の方程式は川又ら(1992)、Kimura et al.(1991)を、地表面の熱収支式は川又ら(1992)、Yamamoto et al.(1973)、Kimura et al.(1991)を、また乱流粘性・拡散係数の算定はKimura et al.(1991)、斉藤ら(1987)をそれぞれ参考にしている。

都市温暖化の影響要因の効果を表現する地表面の熱収支パラメータとしては、地表面粗度(z_0)、蒸発効率(β)、地表面熱容量(C_1)、熱伝導係数(K_g)を考慮し、国土数値情報(1992)の土地利用区分毎に、川又ら(1992)、Kimura et al.(1991)、竹内ら(1981)を参考に、表-2のように値を設定している。一例として蒸発効率の分布を図-2に示す。蒸発効率は河道周辺部が高く、また市街地中心部でその周辺地域よりも低くなっている。なお、計算メッシュ毎のパラメータの値は、メッシュ内の土地利用区分の割合をもとに加重平均したものである。

また人工排熱量については、一次エネルギー消費（電力、都市ガス、LPG、重油、軽油、灯油、石炭など）の実態から推定した人工排熱分布（図-3：水鳥ら(1993)）に基づき設定している。ただしこれらのうち、煙突等を介する工場などからの排熱は、地表面熱収支式中の人工排熱（AH）ではなく、熱輸送方程式中の大気直接加熱（ Q_d ）として、排出口の高さを考慮した上で与えるように工夫した。

3. 名古屋市周辺地域の熱環境の再現

本モデルを用いて、一般風が弱くかつ晴天が続いた典型日な真夏日（1990年8月3日～8日の6日間）を対象とした熱環境シミュレーションを実施した。計算の初期条件（午前8時）や境界条件として設定する気象条件は、この6日間の観測値より、表-3のように設定している。また、計算結果と比較する実測値についてもこの6日間の平均値を用いている。なお、計算は約60時間行い、解の定常性を確認した後、最後の24時間の値をもって計算結果としている。

図-4、5は、対象領域内における気温および風向・風速の日変化の計算結果と実測結果とを比較したものである。これより両者は概ね一致しており、本モデルによる計算結果が現状をよく再現するものであることがわかる。

また図-6は、一例として5時、15時における地上気温および地上風速分布の計算結果を示したものであるが、この図ならびに他の計算結果を要約すると、名古屋周辺における熱環境の特徴として以下を指摘できる。

- (1)早朝5時頃に都市部と周辺部との気温差が顕著になる。
- (2)日中、都市部から北西方向の周辺部に高温域が形成される。
- (3)夜間から早朝にかけて、名古屋市中心部で弱い上昇気流が生じる。
- (4)日中、大河川からの風の発散が認められる。
- (5)日中、市中心部に海風前線が形成される。

4. 熱環境改善方策の効果

こうした現象を緩和する方策を探るため、1)現状の人工排熱量を50%に削減した場合、および、2)都市内の緑化率⁽¹⁾を50%まで引き上げた場合、を想定した熱環境シミュレーションを行った。

図-7は、1)、2)それぞれの場合について、一例として名古屋市中心部（中区）における気温の日変化を現状と比較したものであるが、この図ならびに水蒸気量を調べた計算結果から、以下を指摘できる。

- 1)人工排熱を現状の50%に削減した場合、夜間に約0.5℃の気温低下がみられるが、日中気温はほとんど低下しない。また、大気中の水蒸気量は現状とほとんど変わらない。

2)緑化率を50%に引き上げた場合、日中、夜間ともに約1.0℃の気温低下がみられる。また、大気中の水蒸気量が増加する。

また図-8は、2)の緑化率を引き上げた場合の15時の風系を示したものであるが、緑化を促進した場合、日中、都市部に吹き込む海風が弱まり、市内に形成される海風前線の位置がやや海寄りに移動していることが示されている。大和田(1989)の報告によれば、1978頃の海風前線は1988年の位置よりも海寄りにあり(図-9)、今回の緑化促進による風系の変化は、これと符合する結果であるといえる。

5. おわりに

以上、本研究では、都市熱環境をシミュレーションするための3次元数値解析モデルを新たに構築し、これを用いて名古屋市とその周辺地域における熱環境の実態と、その改善方策について考察した。

今後は、都市熱環境シミュレーションモデルの精度向上を図るとともに、名古屋市とその周辺地域について具体的な熱環境改善方策を検討していく予定である。なお、本研究を遂行するにあたり、多大なご協力をいただいた(株)アーク情報システム 鈴山 宏氏に心より謝意を表します。

補注) 緑化率：国土数値情報における6つの土地利用分類の内、水田、畑・果樹園等、森林の3つの項目の占める割合として定義。

参考文献

- 大和田道雄、中村達博、山田光範(1989)、都市気温の時間的・空間的变化について、1989年日本地理学会講演予稿集、pp.219-220
- 川又孝太郎、河原能久、玉井信行(1992)、熱収支モデルによる東京圏の熱環境解析、環境システム研究、Vol.2、pp.294-298
- Kimura, F. and Takahashi, S. (1991), The Effects of Land-use and Anthropogenic Heating on the Surface Temperature in the Tokyo Metropolitan Area : A Numerical Experiment, Atmospheric Environment, Vol. 25B, No. 2, pp.155 - 164
- (財)日本地図センター(1992)、数値地図ユーザーズガイド
- 水鳥雅文、角湯正剛(1993)、名古屋市とその周辺地域における熱環境の実態、電力中央研究所研究報告 U93016、pp.1-45
- Saitoh, T. and Fukuda, K. (1985), Three-Dimensional Simulation of Urban Heat Island, Bulletin of JSME, Vol. 28, No. 235, pp.53 - 59
- 斉藤武雄、千葉秀樹(1987)、都市大気における汚染物質および道路粉じんの3次元挙動とヒートアイランド、天気、Vol.34、pp.195-203
- 竹内清秀、近藤純正(1981)、大気科学講座1 地表に近い大気、東京大学出版会、pp.118-134
- Yamamoto, G., Shimanuki, A., Aida, M. and Yasuda, N. (1973), Diurnal Variation of Wind and Temperature Fields in the Ekman Layer, Journal of Meteorological Society of Japan, Vol. 51, No. 6, pp.377 - 387

表-1 基礎方程式および境界条件

【基礎方程式】

〔運動方程式〕

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u u}{\partial x} + \frac{\partial u v}{\partial y} + \frac{\partial u w}{\partial z} = f u - h \theta \frac{\partial \pi'}{\partial x} + g h' \frac{\partial \pi'}{\partial x} - z \pi' \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (h K_{lm} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h K_{lm} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{vm} \frac{\partial u}{\partial z})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial u v}{\partial x} + \frac{\partial v v}{\partial y} + \frac{\partial v w}{\partial z} = -f v - h \theta \frac{\partial \pi'}{\partial y} + g h' \frac{\partial \pi'}{\partial y} - z \pi' \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (h K_{lm} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h K_{lm} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{vm} \frac{\partial v}{\partial z})$$

〔静力学方程式〕

$$\frac{\partial \pi'}{\partial z} = \frac{h}{z} \frac{g \theta'}{\Theta}$$

〔熱輸送方程式〕

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} + \frac{\partial \theta' u}{\partial x} + \frac{\partial \theta' v}{\partial y} + \frac{\partial \theta' w}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (h K_{lm} \frac{\partial \theta'}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h K_{lm} \frac{\partial \theta'}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{vm} \frac{\partial \theta'}{\partial z}) + \frac{z \pi'}{h} \frac{\partial \theta'}{\partial z} (K_{vm} \frac{\partial \theta'}{\partial z}) + c_p \rho$$

〔比湿輸送方程式〕

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial q u}{\partial x} + \frac{\partial q v}{\partial y} + \frac{\partial q w}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (h K_{lm} \frac{\partial q}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h K_{lm} \frac{\partial q}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{vm} \frac{\partial q}{\partial z}) + \frac{z \pi'}{h} \frac{\partial q}{\partial z} (K_{vm} \frac{\partial q}{\partial z})$$

〔地中・海中熱伝導式〕

$$C_s \frac{\partial \theta_s}{\partial t} = R_s - H - LE - S + AH \quad \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{K_s}{\rho_s C_s} \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2}$$

ここに、

z : 大気層上端高さ, z_0 : 地表高さ, $z^* = \frac{z(z-z_0)}{h}$, $h = z_t - z_0$; (w^* も同様), f : コリオリパラメータ, g : 重力加速度, c_p : 大気の比熱, ρ : 大気密度,

c_s : 土壌または海水の比熱, ρ_s : 土壌または海水の密度, T_s : 地中または海中の温度,

K_x : 土壌または海中の熱伝導率, K_{lm} , K_{vm} , K_{hs} , K_{vs} : 粘性・拡散係数,

$\theta = T(\frac{p_0}{p})^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$; 温度, $\theta = \text{const.}$; 基準温度, $\theta' = \theta - \theta$; 温度変動,

Q : 大気の大気直接加熱,

$\pi' = c_p (\frac{p}{p_0})^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - \pi_0$; エクスター関数, $\pi_0 = \text{const.} - \frac{g}{\Theta}$

R_s : 正味の放射量, $H = -\rho c_p K_{vs} \frac{\partial \theta}{\partial z}$; 顕熱輸送量, $LE = -\rho L K_{vs} \frac{\partial q}{\partial z}$; 潜熱輸送量,

$S = -K_s \frac{\partial T_s}{\partial z}$; 地中・海中への熱伝導 (伝達), AH : 人工排熱,

L : 気化熱, β : 蒸発効率

【境界条件】

地表面境界 ($z=0$ m): $u=v=w=0$, $\theta=\theta_s$, $q=q_s$ (地表面熱収支から求める。)

地中・海中境界: 地中 ($z=-0.5$ m) $T_s = \text{const.}$, 海中 ($z=-2.0$ m) $T_s = \text{const.}$

上層境界: ($z=3720$ m): $w=0$, $\theta=\theta_t$, $\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0$, $\theta_t = \text{const.}$, $q_t = \text{const.}$

積層境界: $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial x} = 0$ (y 方向も同様)

表-2 地表面熱収支パラメータ

土地利用区分	地表面粗度 (m) (Z_n)	蒸発効率 (β)	地表面熱容量 (C_s)	熱伝導係数 (K_s)
水田	0.01	0.1	$2^* C_{10}$	K_{s0}
畑・果樹園等	0.05	0.05	$2^* C_{10}$	K_{s0}
森林※	0.1~1.5	0.1	$5^* C_{10}$	K_{s0}
建物用地※	0.1~1.5	0.02	$10^* C_{10}$	$2^* K_{s0}$
道路・鉄道	0.4	0.0	$10^* C_{10}$	$2^* K_{s0}$
河川・池等	0.001	0.5	C_{10}	K_{s0}

※森林・建物用地が混在する場合における地表面粗度については、建物用地の占有率に応じて、以下のように決定した。

建物用地占有率

Z_0
0.1 (m)
0.4 (m)
1.5 (m)

表-3 各気象要素の初期・境界条件

気象要素	初期条件
風	$u=v=w=0.0$ m/s (上下端は境界条件)
大気温度	大気最上端 (4800 m) $\theta_t = 48.8^\circ\text{C}$ (境界条件) 大気最下層 (10 m) $\theta_0 = 28.5^\circ\text{C}$ 地表面 (0 m) $\theta_0 = 28.5^\circ\text{C}$... 陸地表面 $\theta_0 = 28.0^\circ\text{C}$... 名古屋港外海面 $\theta_0 = 30.0^\circ\text{C}$... 名古屋港内海面
比湿	相対湿度 = 76% (陸域: 上端 (4800 m) は境界条件)
日射	緯度 35° N, 7 月 30 日の赤緯で時間変化を設定 大気透過率 $T_s = 0.6$
地中・海中温度	$T_g = 28.5^\circ\text{C}$... 地中温度 (最下層 (-0.5 m) は境界条件) $T_s = 28.0^\circ\text{C}$... 名古屋港外海中温度 (最下層 (-2.0 m) は境界条件) $T_s = 30.0^\circ\text{C}$... 名古屋港内海中温度 (最下層 (-2.0 m) は境界条件)

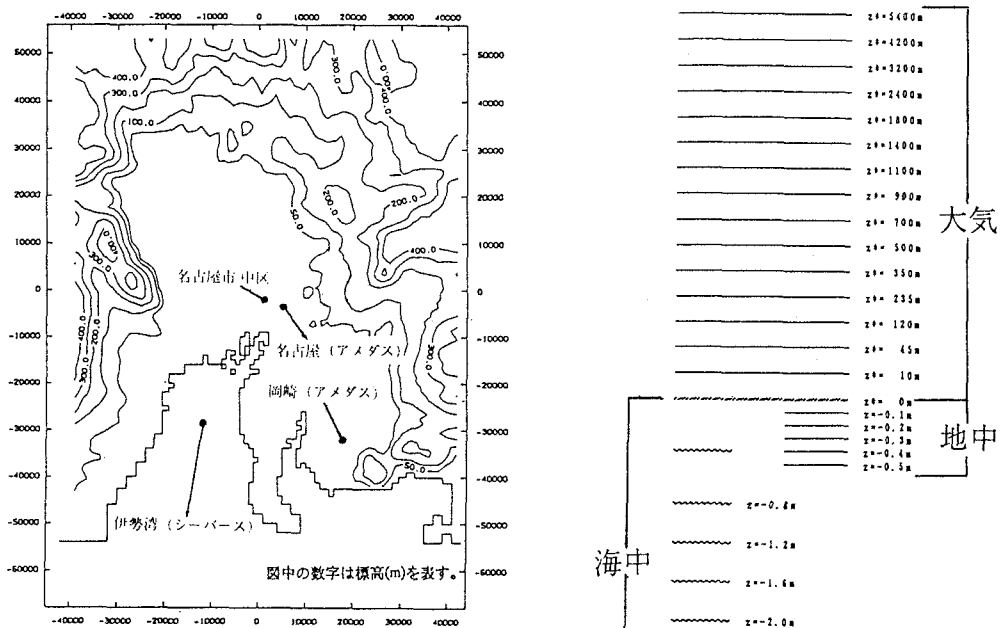


図-1 計算対象領域の概要 (左：平面図，右：鉛直断面図)



図-2 計算対象領域内の陸域における蒸発効率の分布

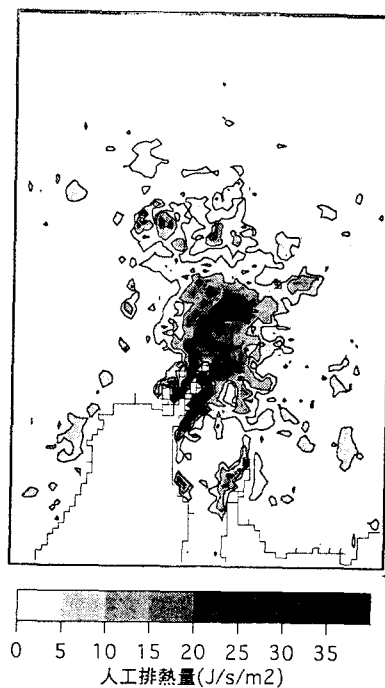


図-3 人工排熱発生量の分布

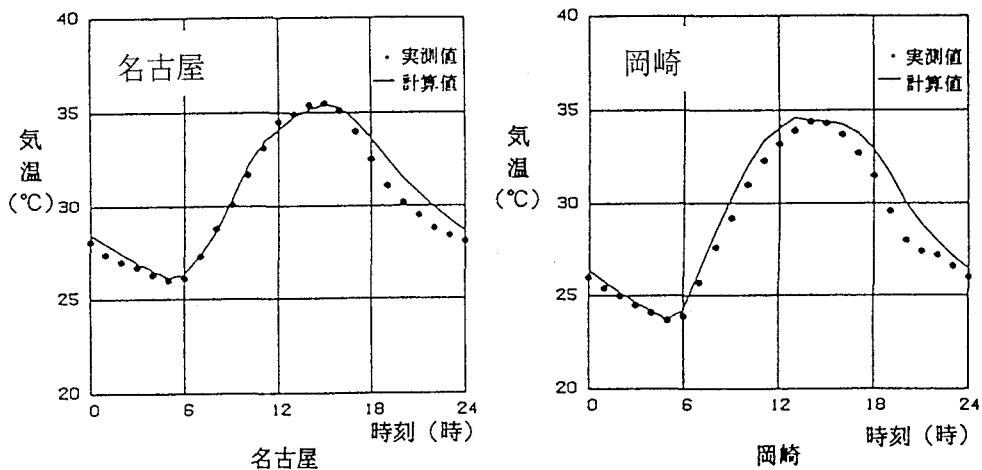


図-4 名古屋，岡崎における気温の日変化の計算値と実測値との比較

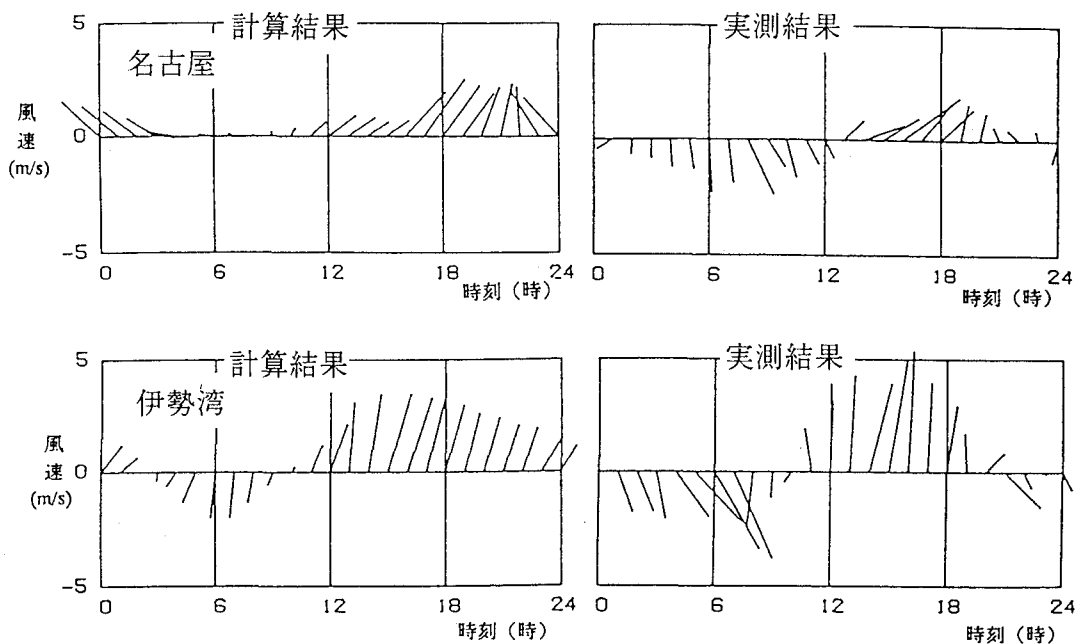


図-5 名古屋，伊勢湾における風向・風速の日変化の計算結果と実測結果との比較

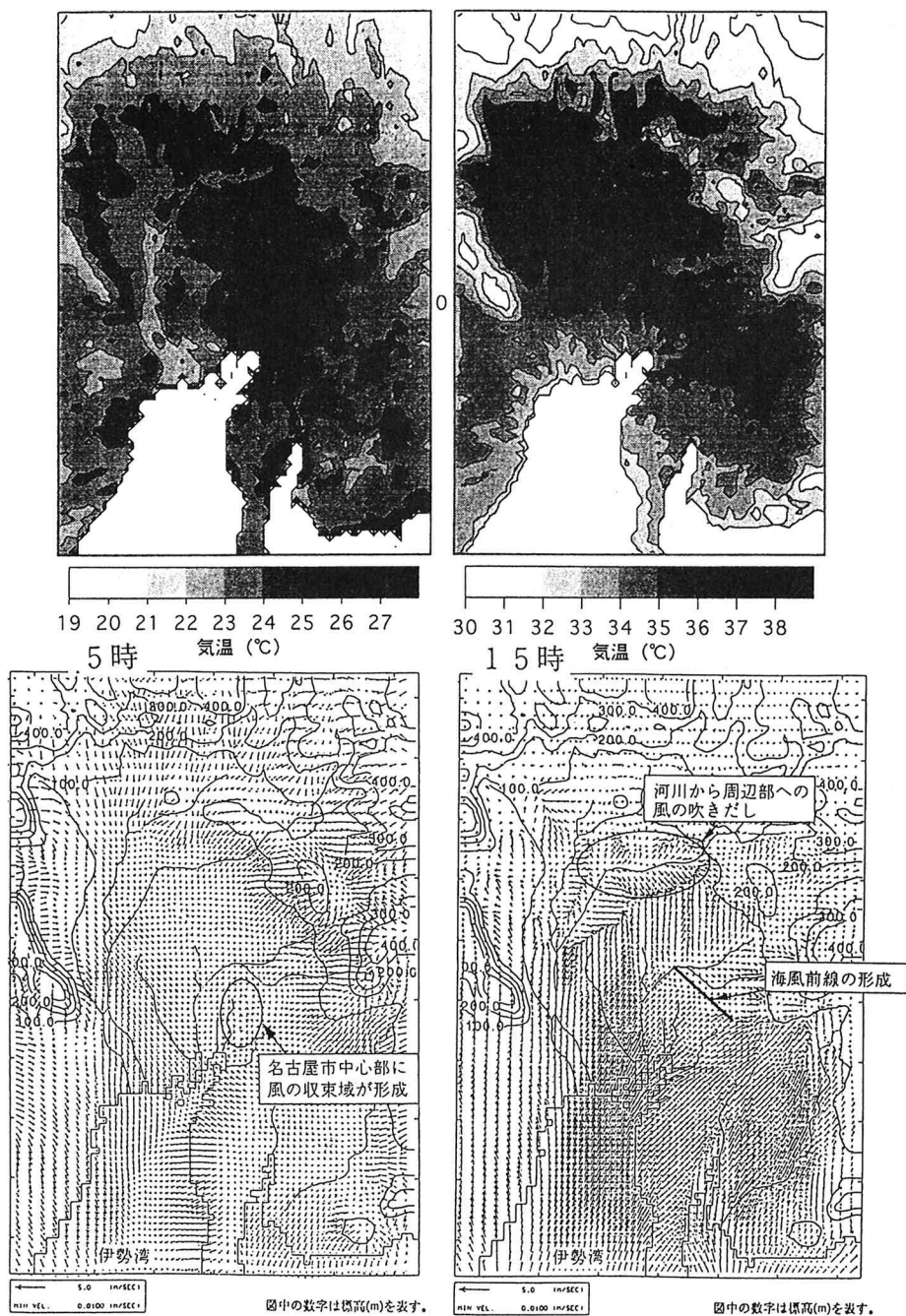


図-6 5時, 15時における気温分布(上)と風向・風速分布(下)の計算結果

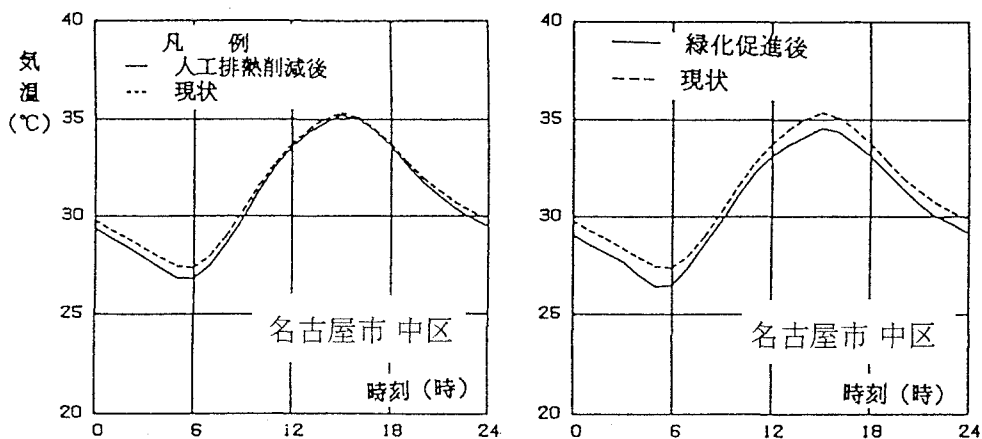


図-7 概略の改善方策による名古屋市中区での気温の日変化の計算結果

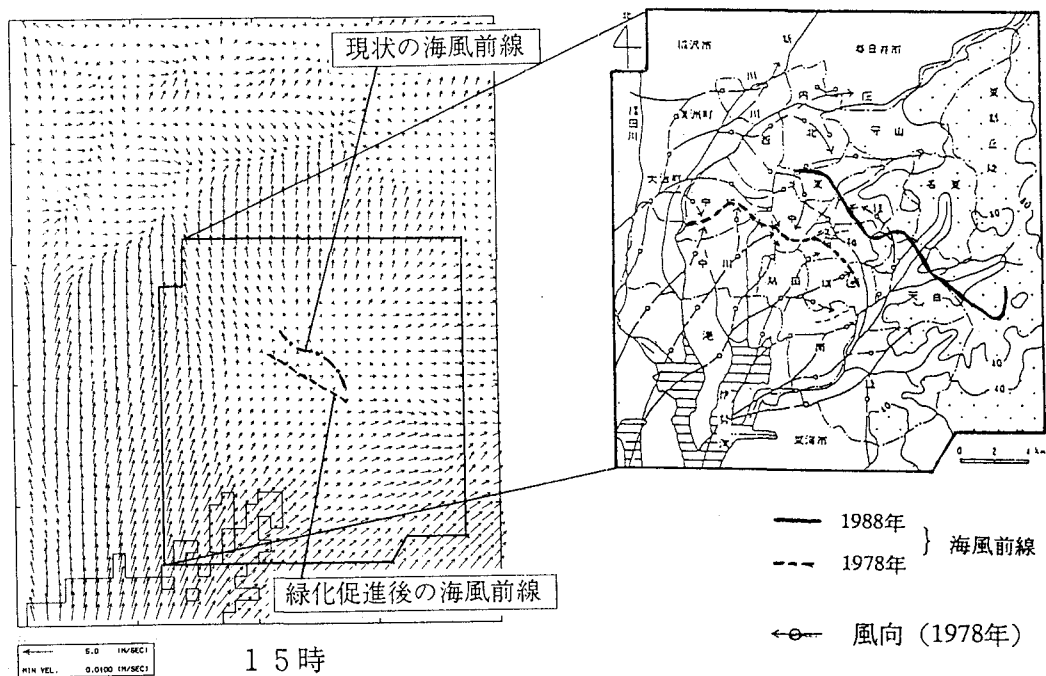


図-8 緑化率を引き上げた場合の風向・風速分布の計算結果(15時)
および緑化に伴う海風前線の移動(左)

図-9 都市化にともなう海風前線の移動(大和田ら(1989)) (右)