

8. 都市の熱環境における海風の導入効果

THE EFFECT OF SEA BREEZE FOR URBAN THERMAL ENVIRONMENT

田村英寿* 丸山康樹*

Hidetoshi TAMURA , Kohki MARUYAMA

ABSTRACT ; Urban heat island problem is actualized in many cities, and tends to rise a peak of energy demand in the summer daytime. We investigate the new city concept with environmental symbiosis and energy conservation, and a new city model is analyzed from various standpoints. In this study, we remark two effective countermeasures for urban thermal environment, that is, (1) arrangement the city formation to make the most of sea breeze, (2) urban green planting and energy conservation in the city. We estimate these effects on typical summer by 3-D numerical model for heat island simulation which calculate the distribution of velocity, air temperature, and humidity. The effect of each countermeasures is evaluated from the results, and spatial differences of effects in the city is made clear.

KEYWORDS ; distributed city, thermal environmental countermeasures, sea breeze, numerical simulation

1. はじめに

現在の都市では、ヒートアイランド現象による高温化が年々顕在化しており¹⁾、夏の冷房エネルギー需要を増大させる一因となっている。このため、将来的な都市設計を考える上で、熱環境対策を考慮することが重要な要因の一つと考えられる。ヒートアイランド現象そのものは、現われ方に違いはあるものの様々な季節や時間帯において見られる現象であるが²⁾、電力ピーク時の冷房需要の増大など、将来的な都市のエネルギー供給構想を考える上で最も問題視されるのは、やはり夏の日中の熱環境であろう。これを改善するためには、都市内に様々な熱環境改善技術を導入することに加えて、日中の海風に代表される自然の風をうまく活用できるような都市配置の工夫を検討することも重要と考えられる。

このようなことから、(財)電力中央研究所では、筆者らを含めた様々な分野の研究者から構成される「ネットワーク都市研究会」を設置し、様々な都市機能を分担する都市クラスターをネットワーク化した新しい都市構想を構築した³⁾。具体的には、人口約60万人、面積約70km²を有する仮想的な都市を海岸付近に新設する場合を想定し、経済、エネルギー・資源、交通、防災、情報等と環境との共生の観点から将来の都市像について検討するとともに、その効果を評価した。ここでは、本検討の一部として、筆者らが開発した熱環境予測三次元数値モデルを使って、真夏日を対象に、海風を活用できる都市配置等による熱環境改善効果を予測した結果について述べる。

2. 都市の熱環境改善策の検討

ここでは、「都市全体の配置」と「配置された都市の内部」という二つの空間スケールから改善策を検討する。

2. 1 海風の冷却効果を活用するための都市配置の工夫

広域的(100km四方程度のスケール)に見ると、都市全体の気象は海陸風や山谷風といった局地風の影響を受けている。中でも日中の海風は沿岸都市の気温を低下させる働きを有すると考えられるが、逆に都市そのものが海風の構造を変化させることも指摘されている⁴⁾。このため、海風の冷却効果を活用できるよう都市配置を工夫することによって、沿岸都市の熱環境が改善されることが期待できる。例えば、都市の規模と

* (財)電力中央研究所 我孫子研究所 環境科学部

Environmental Science Department, Abiko Research Lab., Central Research Institute of Electric Power Industry

気温上昇との関係を調べた実測⁵⁾によれば、都市人口と都市内外間の気温差との間に高い相関関係があることが指摘されている。この一因として、海風のような涼しい風が都市内を通過するにつれて風下側ほど高温化したり、都市の中心部での上昇気流によって風が遮蔽されることが考えられる。このことから、熱環境を改善する方法の一つとして、例えば70km²程度の都市を4～9km²程度の複数の都市クラスターに分け、間に森林等の緑地を挟んでこれらを分散配置する方法が考えられる。ちなみに、夏の日中を対象とした現地実測⁶⁾によれば、都市内における1km程度の半径を有する緑地が周辺都市の気温を低下させる影響範囲は、自身の面積と同程度であると推測されている。この知見から、各々の都市クラスターの半径が1km程度である場合、夏の都市の気温低下に有効な最小緑地面積は都市と同程度であることが推察される。

2. 2 都市内への緑化・省エネ技術の導入

次に、配置された都市の内部に視点を移してみると、都市化に伴う熱環境悪化の主要な原因として、緑地・水面の減少や人工構造物等の増加に伴う「蒸発量の減少と地中蓄熱量の増大」と、エネルギー消費に伴う「人工排熱量」による地表面熱収支の

変化を挙げることができる⁷⁾。こ

れを改善するためには、構造物の屋上緑化によって緑地を拡大する方法や、交通・輸送手段の改善による運輸エネルギーの削減や、熱電供給・情報通信システム等の改善による建物の省エネルギーによって人工排熱量を削減する方法が考えられる³⁾。

3. 数値シミュレーションによる熱環境改善効果予測

3. 1 数値モデルの概要

前章で挙げた熱環境改善策の導入効果を予測するため、筆者らが開発した熱環境予測三次元数値モデルによる検討を行った。ちなみに、実在都市を対象とした数値シミュレーションによって、本モデルが典型的な真夏日における気温や海陸風等を概ね精度よく再現できることが確認されている⁸⁾。

このモデルでは、表-1に示す基礎方程式により、数10～100km四方程度の領域を1km程度の水平分解能で非定常的に計算する。各時間ステップの計算は、「地表面熱収支の計算」、「地中・海中の計算」、「大気中の計算」の順番で、以下のように行われる。

表-1 本検討に用いた数値モデルの基礎方程式

[水平方向運動方程式]

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} &= f_{hv} - h\theta \frac{\partial \pi'}{\partial x} + gh \frac{\theta}{\Theta} \frac{z_T - z^*}{z_T} \frac{\partial \alpha}{\partial x} \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial x} \left(hK_{hm} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hK_{hm} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(hK_{vm} \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} &= -f_{hu} - h\theta \frac{\partial \pi'}{\partial y} + gh \frac{\theta}{\Theta} \frac{z_T - z^*}{z_T} \frac{\partial \alpha}{\partial y} \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial x} \left(hK_{hm} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hK_{hm} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(hK_{vm} \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) \end{aligned}$$

[静力学方程式 (鉛直方向運動方程式)]

$$\frac{\partial \pi'}{\partial z^*} = \frac{h}{z_T} \frac{g\theta}{\Theta^2}$$

[連続方程式]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z^*} = 0$$

[温度の輸送方程式]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial \theta u}{\partial x} + \frac{\partial \theta v}{\partial y} + \frac{\partial \theta w}{\partial z^*} = \frac{\partial}{\partial x} \left(hK_{hm} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hK_{hm} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(hK_{vm} \frac{\partial \theta}{\partial z^*} \right) + \frac{hQ_a}{c_p \rho}$$

[水蒸気量の輸送方程式]

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial qu}{\partial x} + \frac{\partial qv}{\partial y} + \frac{\partial qw}{\partial z^*} = \frac{\partial}{\partial x} \left(hK_{hm} \frac{\partial q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hK_{hm} \frac{\partial q}{\partial y} \right) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(hK_{vm} \frac{\partial q}{\partial z^*} \right) + \frac{\ell E_{ah}}{\rho L}$$

[地表面熱収支式]

$$c_s \frac{\partial \theta_0}{\partial t} = Rn - H - LE - S + AH$$

[地中・海中熱伝導式]

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{K_g}{\rho_g c_g} \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2}$$

u: 東向き風速, v: 北向き風速, w*: 上向き風速 (鉛直方向は変換座標系(下記)),
 $\pi' = c_p \left(\frac{p}{p_0} \right)^{R/c_p} + \frac{gz}{\Theta}$: エクススナー関数, $\theta = \Theta + \theta'$: 温位, Θ : 基準温位 (一定値),
 θ' : 基準温位からの変動分, g: 重力加速度, f: コリオリパラメーター, K_{hm} : K_{vm} :
 大気中の水平・鉛直粘性係数, $z^* = \frac{z_T(z - z_G)}{h}$ (w^* も同様に定義), $h = z_T - z_G$,
 z_T : 大気上端高さ(5400m), z_G : 地表高さ, K_{hm} : K_{vm} : 大気中の水平・鉛直拡散係
 数(温度・比湿), Q_a : 高層人工排熱による大気的直接加熱量(単位体積あたり),
 ℓE_{ah} : 地上で発生する潜熱排熱量, ρ : 大気密度, c_p : 大気熱容量, L: 気化熱
 量, c_s : 地表面熱容量パラメーター, θ_0 : 地表面温位, Rn: 地表面に入射する正
 味の放射量, $H = -\rho c_p K_{vh} \frac{\partial \theta}{\partial z}$ (顕熱輸送量), $LE = -\rho L K_{wv} \frac{\partial q}{\partial z} \times \beta$ (潜熱輸送量),
 $S = -K_g \frac{\partial T_g}{\partial z}$ (地中・海中伝熱量), AH: 低層人工排熱による地表面の加熱量,
 β : 蒸発効率パラメーター, T_g : 地中・海中温度, K_g : 地中・海中熱伝導率,
 c_g : 土壌・水の比熱, ρ_g : 土壌・水の密度

表－2 本計算で用いた地表面パラメーター

土地利用区分	地表面粗度 $z_0(\text{m})$	蒸発効率 β	地表面熱容量 $c_t(\text{J}/\text{cm}^2/\text{K})$	熱伝導係数 $k_g(\text{J}/\text{cm}/\text{s})$
水田	0.01	0.2	8.38	0.0109
畑・果樹園等	0.05	0.1	8.38	0.0109
森林	0.1	0.2	21.0	0.0109
建物用地	1.5	0.04	41.9	0.0218
道路・鉄道	0.4	0.0	41.9	0.0218
河川・池等	0.001	1.0	4.19	0.0109

まず、日射や長波放射、人工排熱等を考慮して、地表面熱収支式（表－1）から地表面温度や大気への熱・水蒸気・運動量のフラックス、地中・海中への熱伝導量を計算する。なお、地表面のパラメーターは表－2に示すように土地被覆毎に設定する。また、人工排熱量については、都市におけるエネルギー消費量が日中と深夜とで約10倍以上も違うこと⁹⁾から、時間変化を考慮して設定する。

次に、地表面熱収支式から計算された地中・海中への熱伝導量を介して、鉛直方向のみの熱拡散方程式（表－1）を使って、地中は50cm、海中は2mまでを5層に分割して温度分布を計算する。ここでは、地中・海中最下層での温度は一定値を設定した。

最後に、地表面から大気へのフラックスを介して、静力学近似とブジネスク近似のもと、水平運動方程式、鉛直方向の静力学方程式、連続方程式、温度・水蒸気量の輸送方程式（表－1）から大気中の風速・温度・水蒸気量を三次元的に計算する。鉛直方向には地形に沿った座標系を設定し¹⁰⁾、地上から上空5400mまでを下層ほど細かく16層に分割する。ここでは、大気の側方境界条件は、一回微分ゼロのノイマン条件とした。

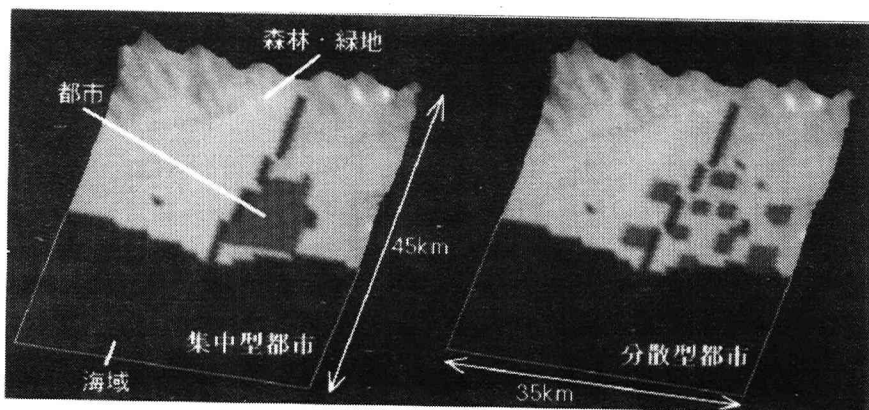
3. 2 計算ケースと計算条件

計算領域として、ここでは図－1に鳥瞰図的に示したような、南側に海、北側になだらかな山地（最大標高は約400m）を有する東西約35km、南北約45kmの仮想的な地形を設定した。この地形の海岸付近の平野部に、面積約70km²、人口約60万人の都市を配置する場合を想定して、「都市配置の工夫」、および「緑化・省エネ技術の導入」による熱環境改善効果予測を行うため、以下の(1)～(3)のケースについて検討を行った。

(1)「集中型都市」：既存の大都市を想定して、都市機能を1カ所にまとめて集中配置した場合。都市内平均で緑被率は約30%、8月の月平均人工排熱量は約10W/m²である（図－1(a)）。

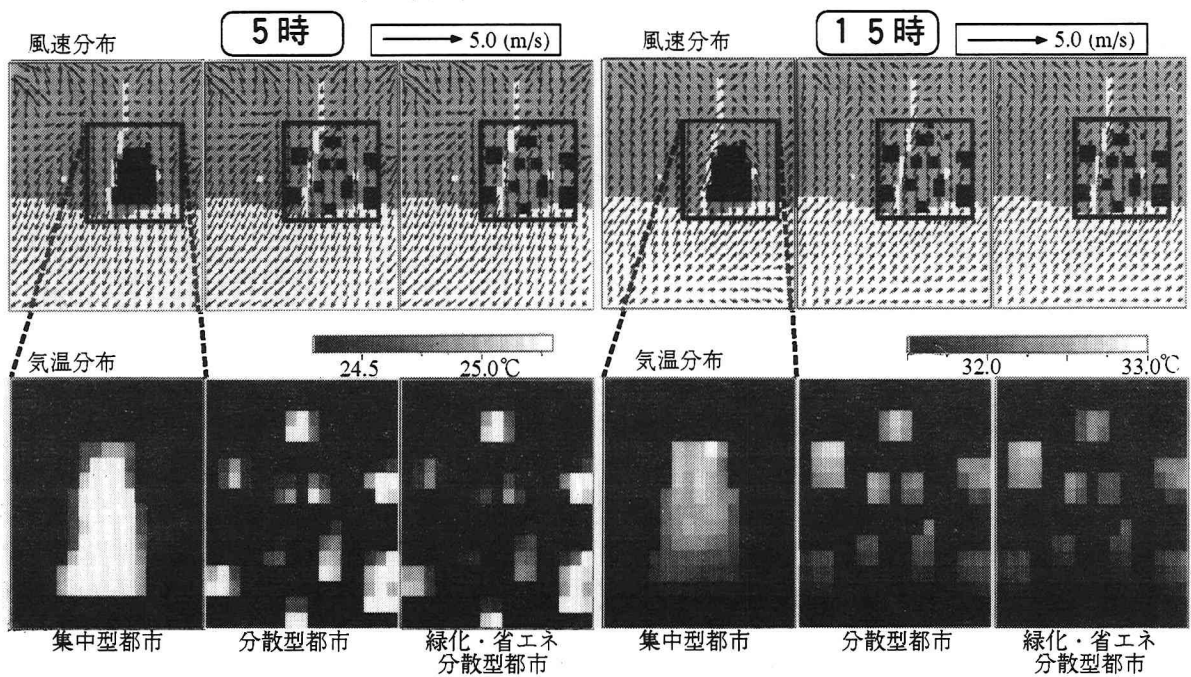
(2)「分散型都市」：都市を12の都市クラスターに分け、間に緑地を挟んで分散配置した場合。ただし、海岸線から都市全体の重心位置までの距離が基準ケースとほぼ同じ（約7km）になるようにする。また、各都市クラスター間の距離は、前述したように都市間の緑地面積が都市面積と同程度になるようにする。都市内平均の緑被率や人工排熱量は集中型都市の場合と同じとする（図－1(b)）。

(3)「緑化・省エネ分散型都市」：分散型都市に、さらに「建物の屋上緑化」、「交通・輸送・熱電供給・情報通信システム改善による省エネルギー」といった緑化・省エネ技術を導入した場合。ただし、ここでは、緑化可能な平屋根面の約70%を緑化することで都市面積の約7%相当分の緑地面積を拡大したとする。また、同時に、高効率分散型電源や地域熱供給システム等により夏の人工排熱量を約15%削減したとする。



図－1 水平計算領域の概略

計算時の気象条件（温度・湿度・



図－２ 早朝5時と日中15時における地上10mの風速分布と都市内の気温分布

日射量等)は中部地方太平洋側における典型的な真夏日のものを設定し、午前8時を計算開始時刻として40時間計算を行い、最後の24時間分の計算結果を採用した。また、人工排熱量の時間変化パターンについては、ここで検討した仮想的な都市における8月の総電力需要の時間変化曲線³⁾から無次元のロードカーブを求め、これが全ての都市クラスターにおける人工排熱量の時間変化に等しいと仮定した。

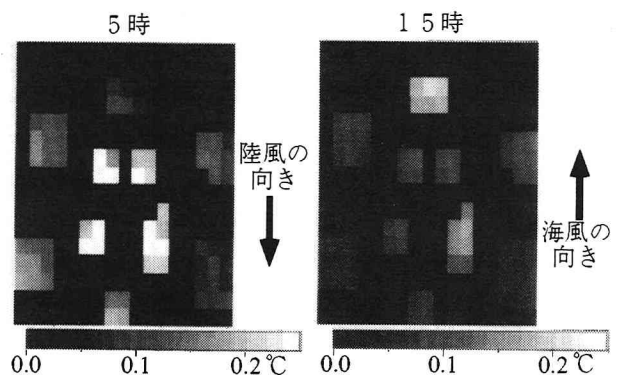
3. 3 計算結果と考察

上記の3つの計算ケースについて、気温・風速・水蒸気量について結果を比較した。まず、図－2では、5時と15時における各計算ケースの地上10mの風速分布と都市内の気温分布を示した。

次に、図－3では、この都市気温のうち、「分散型都市」と「緑化・省エネ分散型都市」の気温差の分布を示した。また、図－4では、日中15時を対象に、海岸線からの距離を横軸にとったときの都市内の平均気温と平均水蒸気量を示した。最後に、図－5では、同じく日中15時を対象に、「集中型都市」と「分散型都市」の風の場をパーティクルによって三次元的に可視化した結果を示した。これらより、以下の知見が得られる。

(1) 早朝と日中における都市内平均気温の特徴

都市内平均気温で見ると、都市の分散配置によって早朝0.3℃、日中0.2℃、分散配置した都市にさらに緑化・省エネ技術を導入することによって早朝0.2℃、日中0.1℃の気温低下が認められる。すなわち今回の検討例では、都市配置の工夫による都市内平均気温の低下量は、緑化・省エネ技術の導入による低下量と同等以上と予測される。また、気温低下量は日中よりも早朝の方が大きい、これは日中よりも早朝の



図－３ 早朝5時と日中15時における分散型都市と緑化・省エネ分散型都市の気温差の分布
(分散型都市－緑化・省エネ分散型都市)

方が大気が安定し、地表面熱収支や人工排熱量の変化の影響が地上付近の大気により現われやすくなるためと考えられる（図-2）。

(2) 都市配置の工夫による気温低下の特徴

集中型都市の中央部では、都市の高温化によって海風の収束と上昇気流が見られ、これが海風の冷却効果をブロッキングし、高温化を助長する一因となっている可能性がある。都市の分散配置による気温低下

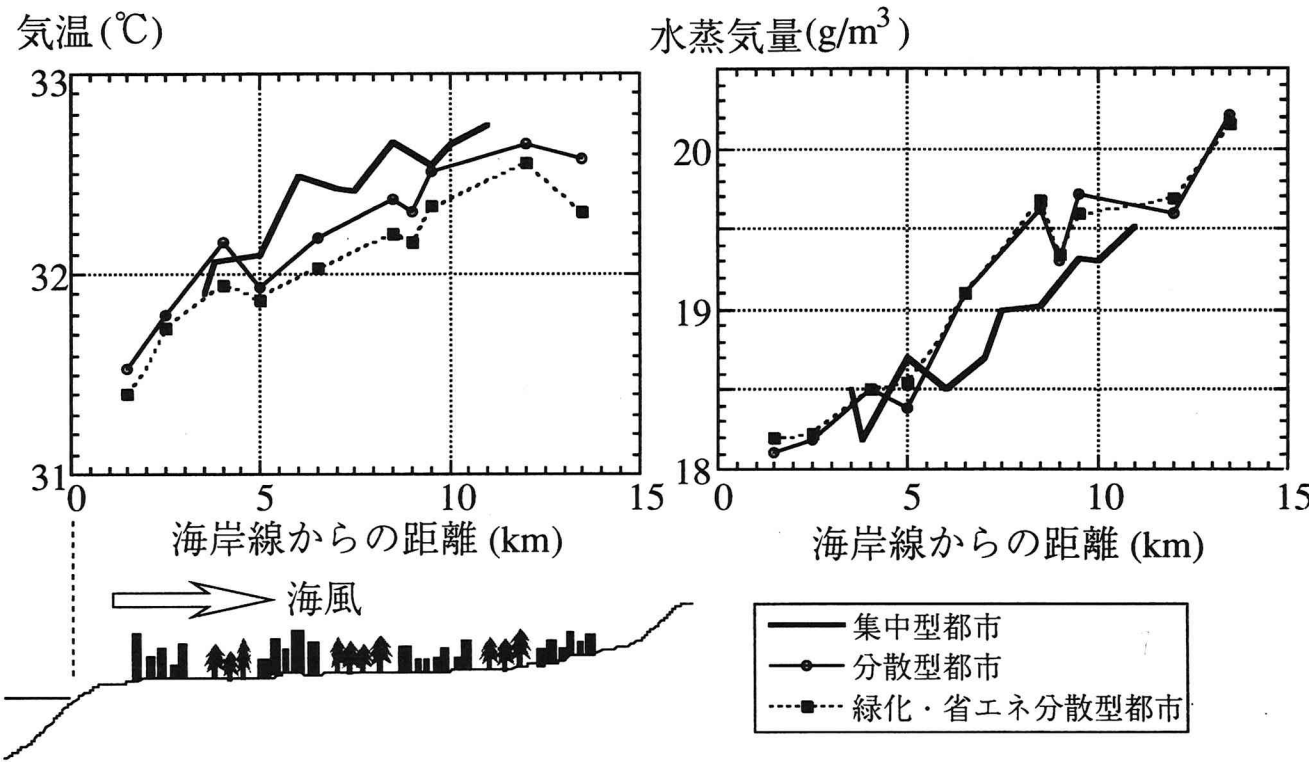


図-4 日中15時における海岸線からの距離と地上10mの気温・水蒸気量との関係
(各プロットは、都市クラスター内の平均値を表す。)

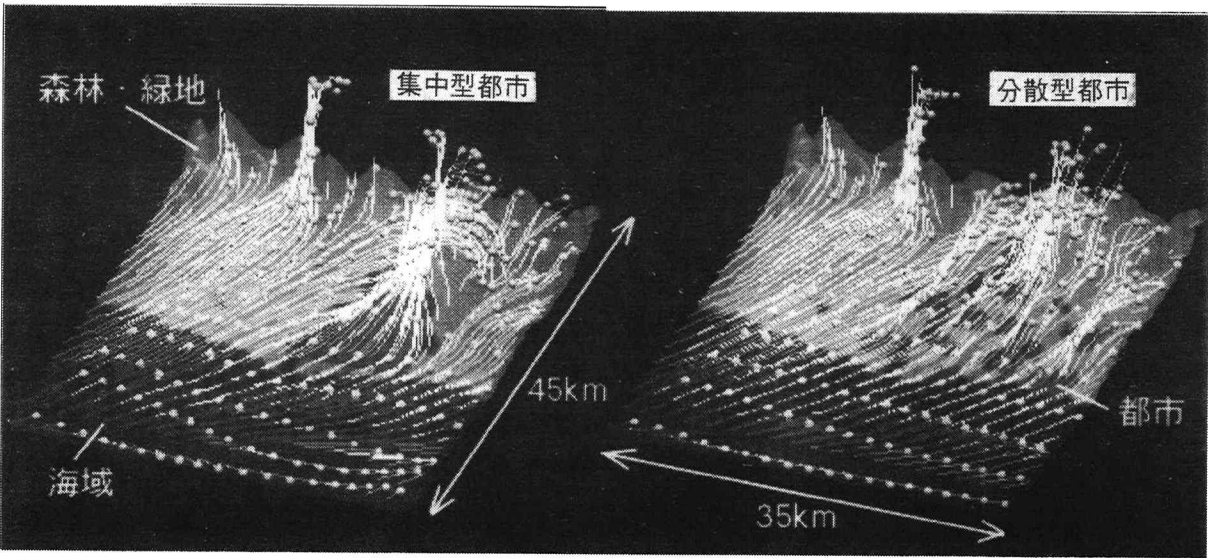


図-5 パーティクルを用いた流線表示による日中15時における三次元風速場

量は、都市の中心部で特に大きく最大0.4℃（都市平均で約0.2℃）であるが、これには分散配置によって風の収束が弱まり、都市の中心部まで海風が届きやすくなることも寄与していると思われる（図－5）。

(3) 緑化・省エネ技術の導入による気温低下の特徴

緑化・省エネ技術の導入による気温低下は都市全体で認められるが、各都市クラスター内の風下側ほど気温低下は顕著であり、最大で早朝0.4℃、日中0.3℃である。これは、風上側からの冷却効果が移流によって風下側に累積された結果と考えられる（図－3）。

(4) 都市配置の工夫による都市内の水蒸気量変化の特徴

都市の分散配置によって、都市内の水蒸気量の増加が見られ、都市配置の工夫が乾燥化対策にも寄与することが示唆される。また、その効果は気温と同様に都市の中心部において特に顕著であり、都市周辺の緑地からの水蒸気の移流が都市内の水蒸気量に重要な役割を果たしていると考えられる（図－4）。

4. おわりに

本検討では、三次元数値シミュレーションによって、海風の冷却効果を活用できるような都市の分散配置や緑化・省エネ技術の導入による熱環境改善効果、および都市内の場所による改善効果の相違を予測した。今回のようなマクロ的な熱環境予測によって得られた知見は、効果的な都市の熱環境改善策や導入場所を選定したり、日中と夜間とで熱負荷が異なる数種類の建物用途を都市内にうまく配置するなど、都市全体のスケールでの熱環境改善策や夏の省エネ・ピークシフト策の検討に活かされることが期待される。

参考文献

- 1) 水鳥雅文・角湯正剛：名古屋市とその周辺地域における熱環境の実態、土木学会水工学論文集、第38巻、pp.363-368、1994
- 2) 原田朗：大気汚染と気候の変化、気象学のプロムナード11、東京堂出版、223p.、1982
- 3) ネットワーク都市研究会：環境共生・省エネルギーを目指した新都市構想、電力中央研究所総合報告、Y02、95p.、1996
- 4) 吉門洋：海岸の都市が海風と汚染質拡散に与える影響の数値実験、天気、vol.37、No.10、pp.681-688、1990
- 5) T.R.Oke : City Size and the Urban Heat Island, Atmospheric Environment, Pergamon Press 1973, Vol.7, pp.769-779, 1973
- 6) 神田学・稲垣聡・日野幹雄：夏期に森林・水面が果たす気候緩和効果に関する実測とその周辺域への伝達機構に関する数値解析による検討、土木学会水工学論文集第35巻、pp.585-590、1991
- 7) 近藤純正編著：水環境の気象学－地表面の水収支・熱収支－、朝倉書店、350p.、1994
- 8) 水鳥雅文・田村英寿・丸山康樹：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、環境システム研究、vol.22、pp.292-299、1994
- 9) 一ノ瀬俊明・花木啓祐・松尾友矩：細密地理情報にもとづく都市人工排熱の時空間分布の構造解析、環境工学研究論文集、31、pp.68-78、1994
- 10) Kimura, F. and Takahashi, S. : 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, 1991