

研究解説

東京首都圏におけるヒートアイランドの形成に関する数値解析

—都市圏の拡大が及ぼす影響に関する検討—

Numerical Analysis of Heat Island over Tokyo Metropolitan Area

—Effect of Urbanization—

尾島 俊雄*・村上 周三**・持田 灯*・杉山 寛克***・金 相 璣*

Toshio OJIMA, Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA, Hirokatsu SUGIYAMA and Sangjin KIM

本研究は、東京首都圏における都市圏の拡大がヒートアイランドの形成に及ぼす影響を解析した。1930年頃と現状の東京の2つのケースについて土地利用の変化と人工排熱を想定した場合の大気乱流モデルを用いた数値解析による比較検討を行った。解析の結果、都市圏の拡大に伴ってヒートアイランドも内陸に拡大し、都市内外の温度差が顕著になる傾向を再現することが出来た。さらに現状では、臨海部の汚染質は海風により内陸部へ運ばれ、ヒートアイランドによる上昇気流によって汚染気塊となって郊外部へ輸送されると推定できることが分かった。

1. 序

アジアの諸都市は急速な近代化の中で、巨大化しつつある¹⁾。とりわけ東京首都圏はその先鞭として20世紀に入って、市街地が郊外へとスプロールし、都市圏の急速な拡大がみられた。その結果、土地利用の変化と人工排熱の増大は都市気温の上昇をもたらした。ヒートアイランドの形成が報告されるようになった。さらに産業社会活動の発展もあって、臨海工業地帯等の汚染質の排出源にとどまらず、排出源から離れた大都市近郊でも大気汚染が顕在化し、夏季の日中には光化学オキシダントによる汚染が発生するようになった。21世紀を目前にして、東京首都圏はヒートアイランド、光化学オキシダント汚染にみられる都市環境の悪化という解決の急がれる問題に直面している。今後のエコシティの在り方²⁾を考える上でも、本報では、まず1930年頃の東京と1990年頃の東京の夏季の気候の変化を数値解析により調べ、現状の東京に至る都市圏の拡大がヒートアイランドの形成に及ぼす影響を解析する。

数値解析による都市気候の研究としては、既に村上ら³⁾による関東地方への適用例がある。本報では、さらに東京首都圏という狭い領域の中において土地利用と人工排熱の精緻な境界条件を計算に組み込むことによりヒートアイランドの形成要因を詳細に検討する。

夏季に形成されるヒートアイランドは、冷房用電力消費を増大させ、都市内外の気温差をもたらすばかりでなく、

都市へ収束する弱い局地風を生じ、ヒートアイランド循環を引き起こすことがある。さらに沿岸部にあっては、ヒートアイランド循環は海陸の温度差に伴う循環（海陸風）に顕著な影響を及ぼすといわれている。臨海部に工業地帯が集積している東京首都圏の場合には、これら循環が汚染質の輸送にも少なからず影響を及ぼすと考えられていることから、本報では粒子拡散モデルを用いて、汚染質の輸送過程の推定も試みている。

2. モデルの概要

2.1 大気乱流モデル

解析に用いた3次元大気乱流モデルは複雑地形にも適用可能な形に拡張した Mellow-Yamada モデルのレベル 2.5⁵⁾である。詳細は文献 (3)-(6) 参照。これはブジネスク近似による静力学平衡モデルであり、運動方程式、連続の式、内部エネルギーの式、総水分混合比の式より構成されている。計算は Yamada 等により開発された HOT-MAC (Higher Order Turbulence Model for Atmospheric Circulation) モデル4.0を利用⁵⁾。但し、水陸分布、人工排熱、土壌の熱伝導率等に関して変更を加えた。

2.2 境界条件

地表面の境界条件は一次元の熱収支式と熱伝導方程式を解くことにより与えられている。詳細は文献 (3), (4), (6) 参照。上空面は風速 0m/s に設定。計算領域外周の境界値は、諸量の水平方向の勾配0の条件を代入し、鉛直方向一次元の方程式系を解くことにより与えた。

2.3 解析領域と計算ケース (表1)

水平方向の解析領域は東京首都圏を中心とした136km

*東京大学生産技術研究所 第5部

**東京大学生産技術研究所 計測技術開発センター

***東京電力㈱

四方を設定した。水平方向の格子数は4 km 間隔の34×34 である。鉛直方向については大気16層(上空5,000m まで)、土壌5層(地中50cm まで)。標高には国土数値情報⁷⁾データを用いた。

計算ケースには都市圏の拡大による影響を比較検討するため、表1に示す2つを設定した。case 1は1930年頃の東京を想定し、case 2は現状(1990年頃)の東京を想定した場合である。

表1 計算ケース

計算ケース	地表面の境界条件
case1 (1930年頃の東京)	土地利用分布(図-1) [地形図に基づく5分類] 人工排熱はないと仮定
case2 (現状(1990年頃)の東京)	土地利用分布(図-2) [国土数値情報による12分類] 人工排熱分布(図-3) [民生用エネルギー消費による排出]

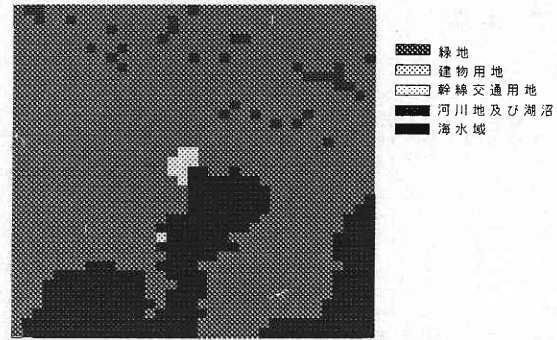


図1 土地利用分布 (case 1, 1930年頃)

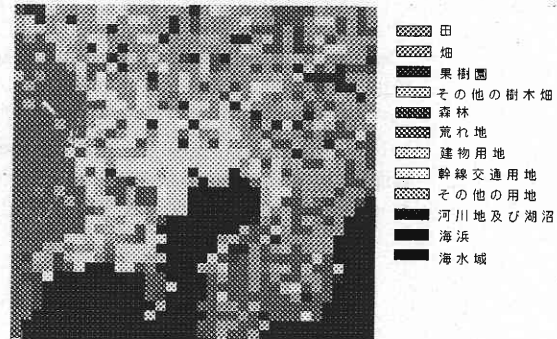


図2 土地利用分布 (case 2, 現状 [1990年頃])

2.4 土地利用分布と人工排熱の与え方 (表2, 図3)

陸地の土地利用分布については表2に示す粗度, アルベド, 土壌湿潤度^{注1)}, 土壌の熱伝導率, 温度伝導率を設定した。case 1は地形図より分類^{注2)}, case 2は国土数値情報⁷⁾に対応して設定した。

人工排熱は東京首都圏の民生用エネルギー消費に伴う排出を考慮した。排熱量は、建物用途別延床面積メッシュデータ⁸⁾にエネルギー消費原単位⁹⁾を乗ずることにより推定した。人工排熱分布を図3に示す。本計算では、8月の日平均のデータを用い、最大値は大手町付近で88W/m² (4 kmメッシュ平均) に達した。

2.5 設定条件

8月上旬の晴天日の太陽高度に基づき午前6時から開始し、36時間の数値積分を行った。以下では2日目の結果を

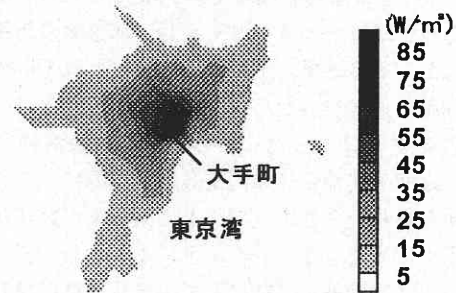


図3 人工排熱分布 (case 2)

表2 土地利用区分と各種パラメーター^{注1)}

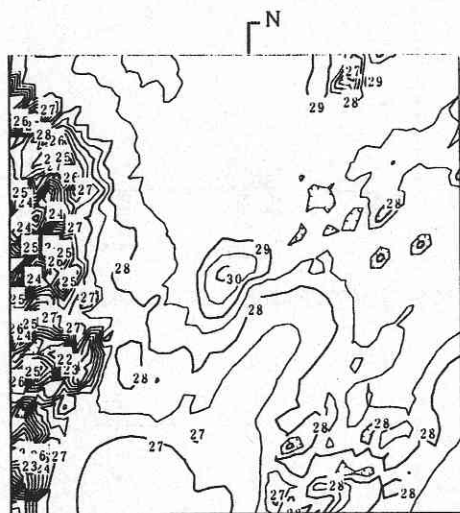
計算ケース	土地利用区分	粗度(m)	アルベド	土壌湿潤度	熱伝導率(Wm ⁻¹ K ⁻¹)	温度伝導率(m ² s ⁻¹)
case1 (1930年頃)	緑地	2	0.15	0.5	1.05	0.57×10 ⁻⁶
	建物用地	1	0.1	0.0	1.7	0.81×10 ⁻⁶
	幹線交通用地	0.01	0.1	0.0	0.7	0.50×10 ⁻⁶
	河川地・湖沼	0.001	0.1	1.0	0.63	0.15×10 ⁻⁶
	海水域	0.001	0.1	1.0	0.63	0.15×10 ⁻⁶
case2 (現状)	田	0.05	0.2	1.0	0.63	0.15×10 ⁻⁶
	畑	0.01	0.1	0.5	1.05	0.57×10 ⁻⁶
	果樹園	1	0.2	0.4	1.05	0.57×10 ⁻⁶
	その他の樹木	0.5	0.2	0.4	1.05	0.57×10 ⁻⁶
	森林	2	0.15	0.5	1.05	0.57×10 ⁻⁶
	荒地	0.01	0.2	0.2	1.05	0.57×10 ⁻⁶
	建物用地	1	0.1	0.0	1.7	0.81×10 ⁻⁶
	幹線交通用地	0.01	0.1	0.0	0.7	0.50×10 ⁻⁶
	その他の用地	0.01	0.2	0.2	1.05	0.57×10 ⁻⁶
	河川地・湖沼	0.001	0.1	1.0	0.63	0.15×10 ⁻⁶
	海浜	0.005	0.3	0.9	2.2	0.74×10 ⁻⁶
	海水域	0.001	0.1	1.0	0.63	0.15×10 ⁻⁶

示す。海面の温度は 26°C ¹⁰⁾、深さ50cmの地中温度は 26.1°C ¹¹⁾に設定。初期風速は計算領域全域で無風とした。

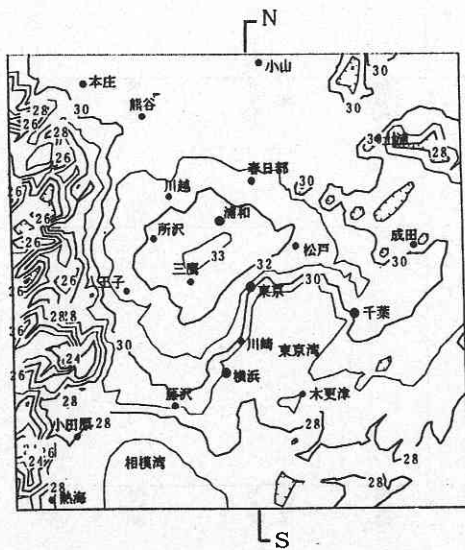
3. 都市圏の拡大に伴うヒートアイランドの形成

図4に気温の水平分布を示す。又、図5に大手町の8月の典型的な晴天日における気温の日変化に関する観測値とcase2(現状)の比較を示す。計算値は観測値と概ね一致している。

図4に示すように都市圏の拡大に伴って形成される高温域も拡大する傾向にある。最高気温も約 2.5°C 上昇し、case2(現状)では最高 33°C に達し、郊外部との温度差は最大で約 4°C であった。case2(現状)の場合、気温は内陸の北西部で高くなる傾向にあり、沿岸部では、海風の



(a) case 1 (1930年頃)



(b) case 2 (現状)

図4 気温の水平分布 (15:00, 高さ10m)

進入により昇温が抑えられている。これらの傾向は既往の観測値¹²⁾とよく一致している。

4. 海風循環とヒートアイランド循環の相互作用

図6~7に都心を横切る南北軸上の鉛直断面内の風速分布を示す。case1(1930年頃)では、海風が約20kmほど内陸に進入し、弱い海風循環が形成される。上空では海側に向けた地上とは逆向きの気流がみられ、海水面に達すると冷やされ、下降気流を生じている。一方でcase2(現状)では、12:00に内陸の10~30km付近で上昇流が発達しはじめる。15:00には、海風は約30kmまで内陸に進入するとともに郊外からも弱い北風が都心に流入している。上昇流はちょうど海風と郊外からの流入風がぶつかる付近で発達し、 $0.2\sim 0.3\text{m/s}$ に及んでいる。case2の場合、case1と比べると上昇流の及ぶ高さは高く、これは地表近傍の高温域の拡大に伴って加熱されたことによるものと考えられる。上空では海側に向けた大きな循環とともに郊外に向けた弱い循環もみられる。郊外に向けた気流は表面温度が下がる春日部より北の上空に達すると冷却され、下降気流となって循環を形成している。形成される循環風もcase1と比べてその規模は大きく、都市化の進展に伴って、海風循環に加えて、ヒートアイランドに伴う循環も顕著になり、両者の相互作用により、海風の構造にも変化が生じているものと推定される。このような傾向は、例えば、吉門による観測結果¹³⁾と対応している。

5. 汚染質の輸送に関する検討

計算で得られた風速、風向、乱流統計量を用い、仮想的に大気中の粒子の移流、拡散を追跡した。ここでは粒子を連続的に毎時間36個放出し、各時間における大気中の位置を特定する方法^{6), 14), 注3)}を取った。排出源は固定発生源からの窒素酸化物の排出¹⁵⁾の多い川崎を設定し、1点より、6時の計算開始と同時に連続的に排出した。なお、case1(1930年頃)では、実際には臨海部に汚染質の発生源はほとんど立地していないが、比較のため、解析を行った。

case1では、12:00には発生源である川崎上空に粒子が

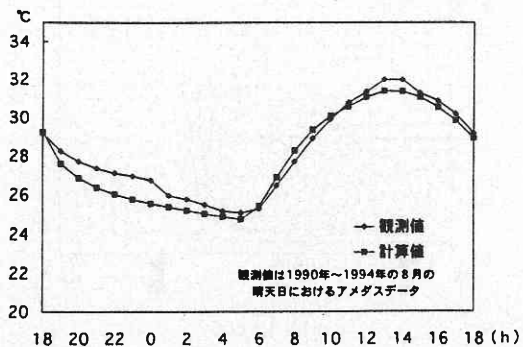
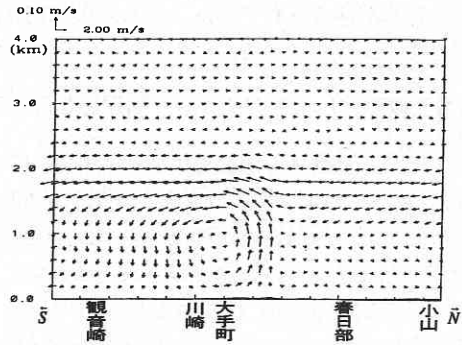
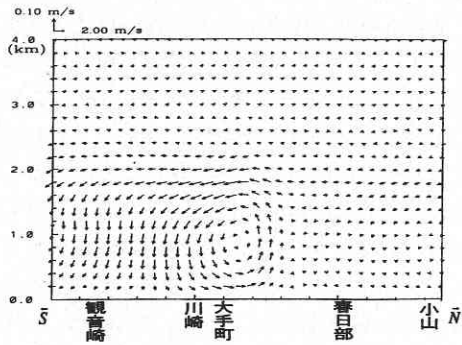


図5 大手町における観測値と計算値(case2)の比較

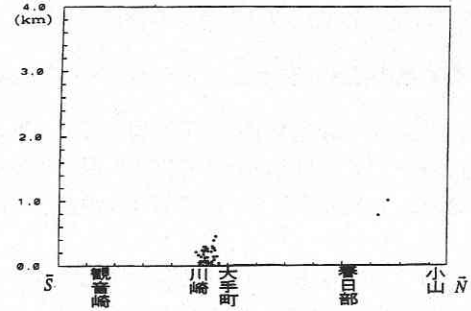


(a) 12:00

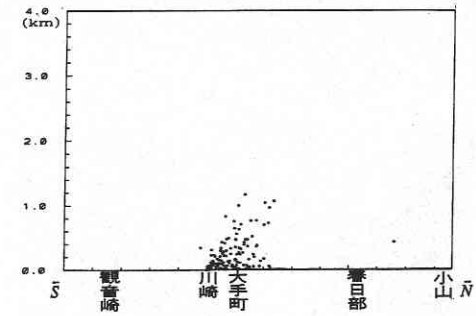


(b) 15:00

図6 鉛直断面内の風速分布 (case 1 [1930年頃])

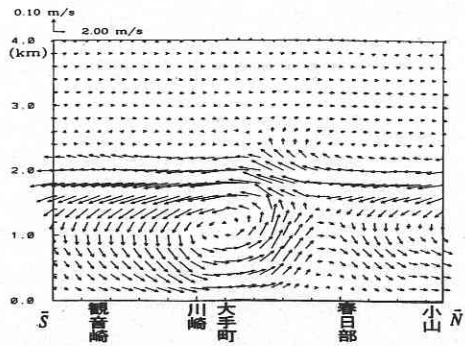


(a) 12:00

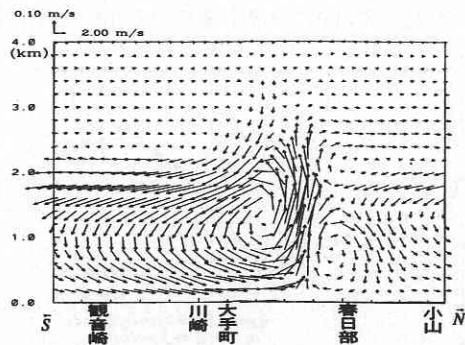


(b) 15:00

図8 粒子の鉛直断面 (case 1, [1930年頃])

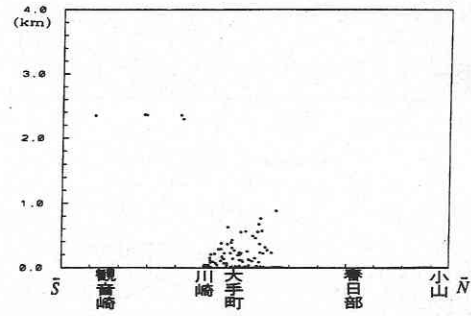


(a) 12:00

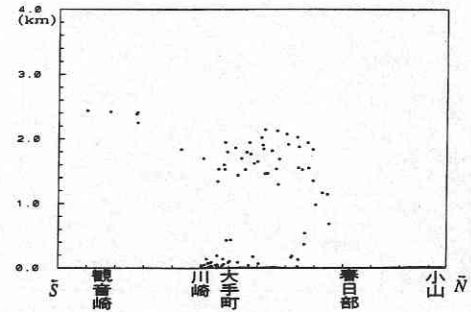


(b) 15:00

図7 鉛直断面内の風速分布 (case 2, [現状])



(a) 12:00



(b) 15:00

図9 粒子の鉛直断面 (case 2 [現状])

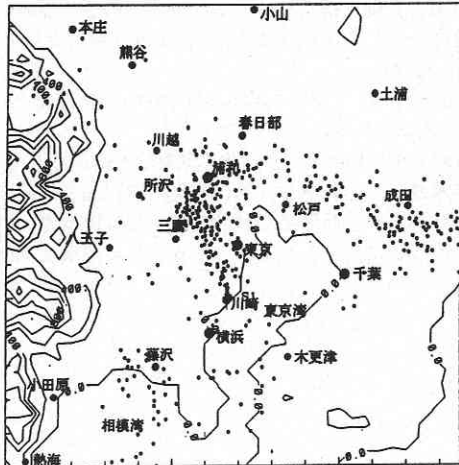


図10 粒子の水平分布 (case 2 [現状], 15:00)

停滞する (図8(a)). 15:00になっても弱い海風循環が発達するものの (図6(b)), 粒子は発生源近くに停滞しつづき、内陸部に粒子が到達することはない (図8(b)).

case 2 (現状) では、12:00には粒子が発生源である川崎上空から風下の都心部にかけて比較的下層に滞留している (図9(a)). 15:00には海風が内陸部へ進入し、さらに都心部で加熱されて上昇気流が発達し (図7(b)), この影響で粒子が上空に持ち上げられ、汚染気塊となって内陸30kmまで及んでいる (図9(b)).

case 2 (現状) の場合の粒子の水平分布を図10に示す。排出源近傍のみならず、東京西部から埼玉県南部、千葉県北部の広範囲の地域に渡って粒子が輸送されている。この傾向は観測結果¹²⁾ともよく対応している。

6. 結 論

- ① case 1 (1930年頃) と case 2 (現状) の解析の結果、都市圏の拡大に伴ってヒートアイランドも内陸に拡大し、都市内外の温度差がより顕著になる傾向を再現することが出来た。
- ② 汚染質の動態を解析した結果、case 1 (1930年頃) では海陸の温度差に伴う海側に向けた弱い循環がみられるもの、郊外に向けた循環は認められず、汚染質も発生源近くに停滞しつづける。一方で case 2 (現状) では、臨海部の汚染質は海風により内陸部へ運ばれる。さらに汚染質は都市化に伴う高温域の拡大による上昇気流と上空における海風循環と弱いヒートアイランド循環の相互作用によって汚染気塊となって、郊外部へ輸送されると推定できる。

注1) 土地利用区分に対応した各種パラメーターの設定にあたっては、Pielke¹⁶⁾、近藤¹⁷⁾を参考に設定。土壤湿度については地表面の相対湿度として0.0~1.0 (=

100%) の間に設定した。詳細は文献(6)参照。

注2) 1930年頃の土地利用は地形図 (大日本帝国陸地測量部作成) に基づき、各メッシュの土地利用を判定する方法を取った。都心部については都心内部の土地利用の構成を計算に反映させるため、詳細なポイントサンプリング調査データ¹⁸⁾を用いた。

注3) 粒子移流拡散モデルには Yamada により開発された RAPTAD (Random Particle Transport And Diffusion)¹⁴⁾を用いた。詳細は文献(6)参照。

謝 辞

本報は尾島が客員教授として本所に1994年8月に着任以来、村上研究室と実施した共同研究の成果の一部をまとめたものである。研究実施にあたり山田哲司博士 (Yamada Science & Art Corporation) を始め、村上研究室では、大岡龍三助手 (第5部)、尾島研究室では、渡辺浩文講師 (東北科学技術短期大学)、高偉俊講師 (早稲田大学理工学総合研究センター) に多大なご協力を頂いた。記して謝意を表する。
(1997年1月16日受理)

参 考 文 献

- 1) 尾島俊雄, 1996年, 巨大化するアジアの都市そのモニタリングとモデリング, 生産研究, 48巻10号, pp. 24-28
- 2) 尾島俊雄, 1995年, 東京首都圏のエコシティ化シミュレーションに関する研究, 生産研究, 47巻6号, pp. 23-29
- 3) 村上周三, 持田灯, 金相璣, 大岡龍三, 1996年, 都市気候モデルによる関東地方の流れ場・温度場の数値解析, 生産研究, 48巻2号, pp. 33-39
- 4) 村上周三, 持田灯, 金相璣, 大岡龍三, 1997年, 関東地方における土地利用状況の変化と流れ場・温度場の関係 Mellow-Yamada 型の都市気候モデルによる局地気象解析, 日本建築学会計画系論文報告集, 第491号
- 5) Yamada, T. and Bunker, S., 1989, A Numerical Model Study of Nocturnal Drainage Flows with Strong Wind and Temperature Gradients, J of Applied Meteorology, 27, pp. 545-554.
- 6) 杉山寛克, 持田灯, 村上周三, 尾島俊雄, 1997年, 沿岸部における都市圏の拡大がヒートアイランドの形成に及ぼす影響に関する解析, 日本建築学会計画系論文報告集, 第492号
- 7) 建設省国土地理院, 1992年, 数値地図ユーザーズガイド
- 8) 小松悟, 本間進太郎, 渡辺浩文, 尾島俊雄, 1993年, 人工排熱量の増加に伴う東京首都圏の都市気候の変化に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 37-40
- 9) 早稲田大学尾島研究室, 1995年, 建築の光熱水原単位, 早大出版部
- 10) 気象庁, 1993年, 北太平洋海洋気候図 (1961-1990)
- 11) 三浦昌生, 尾島俊雄, 1993年, 95地点の実測による都心と郊外の地中温度差について東京における地中温度分布に関する実測調査研究その2, 日本建築学会計画系論文報告集, 第454号, pp. 35-44

- 12) 環境庁企画調整局編, 1990年, 首都圏・その保全と創造に向けて, 大蔵省印刷局
- 13) Yoshikado. H., Kondo. H., 1989, Inland Penetration of the Sea Breeze over the Suburban Area of Tokyo, *Boundary-Layer Meteorology*, 48, pp. 389-407
- 14) Yamada. T., 1985, Numerical Simulation of the Night 2 Data of the 1980 ASCOT Experiments in the California Geysers Area, *Arch. Met. Geoph. Biocl., Ser. A.* 34, pp. 223-247
- 15) 外岡豊, 尾島俊雄, 1986年, 都市環境計画のための大気汚染物質排出構造に関する研究 その2 地域別排出特性について, 日本建築学会計画系論文報告集, 第368号, pp. 21-30
- 16) Pielke R.A., 1984, *Mesoscale Meteorological Modeling*, Academic Press
- 17) 近藤純正, 1994年, 水環境の気象学, 朝倉書店
- 18) 鈴木謙一, 上村晃平, 杉山寛克, 渡辺浩文, 尾島俊雄, 1995年, 東京都区部における超々高層建築導入による熱環境緩和に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集