

◆ 報文 ◆

屋上緑化と水面再生によるヒートアイランド現象抑制効果に関する数値シミュレーション

木内 豪* 吉谷純一**

1. はじめに

メソスケール(1km~1000kmオーダーのスケール)の数値モデルを用いてヒートアイランド軽減策の効果を試算した報告例は多いが、これらの研究が対象としている対策は屋根面アルベドの増大、地上の緑地面積の増大、人工排熱の削減である¹⁾。

一方、東京都では、屋上の面積(ビルの管理に必要な設備の設置面積を除いた面積)の20%以上を樹木、芝、草花等で緑化するというビル緑化を加えた自然保護条例を平成13年4月から施行している。しかし、これによるヒートアイランド現象の緩和効果がどの程度あるのかについては明らかにされていない。また、近年、使用されなくなった農業用水路を環境用水路として再生する事例や、埋められた河川の水面を蘇らせようと言う気運があるが、都市規模での気温低下に水面がどの程度の効果を発揮するかについて検討された事例は見受けられない。そこで、本研究では都市のヒートアイランド現象の計算が行えるメソスケールモデルを構築し、東京23区内における都市建築物の屋上緑化および河川の水面再生による首都圏の夏期晴天日における気温低減効果を推定する。

2. メソスケールモデルの概要

1) 基本モデルとその改良

本研究で用いたシミュレーションモデルはMM5²⁾を基本にしている。MM5は非静力学方程式等に基づいて3次元の大気流れと圧力、気温、水蒸気量分布等を予測できるメソスケールモデルで、対流システムや前線、海陸風循環や山谷風循環などの再現が可能である。今回、MM5を直接我が国のヒートアイランド現象のシミュレーションに用いるには不都合な点がいくつかあったため、以下に記す改良を加えた。

- 複雑な都市の土地利用に適した地表面フラックスの算定ができるように1計算メッシュ内の土

地利用の混在をパラメータ化する手法を導入した。

- 土地利用情報として国土地理院が整備・発行する国土数値情報(KS-200-1、土地利用分類ごとの面積率データを使用)と細密数値情報(首都圏1994年版、解像度10m)を使用できるようとした。
- MM5の境界層モデルに地表面モデル³⁾(地表面の水分移動モデルと植物生理のモデル)を組み込み、地表面水分量の変化を予測して、地表面の水分量の変化に対応した潜熱輸送量の算出ができるようにした。
- 接地面下面に土地利用分類や時間に応じた量の人工排熱を潜熱フラックスと顯熱フラックスの形で与えられるようにした。人工排熱の原単位は文献1の値を使用した。
- 都市キャノピー層(建築物等が存在する大気下層)では大気の熱輸送や放射量に大きく影響を及ぼすと考えられることから、長波放射のみ都市キャノピーの影響をパラメータ化する簡易な都市キャノピーモデルを作成した。

2) 地表面パラメータの設定

地表面熱収支の計算では、アルベド(日射の地表面反射率)、空気力学的粗度、蒸発効率、熱伝導率、熱容量、反射率の値として土地利用ごとの一定値を与える(表-1)。表-1で、蒸発効率、熱伝導率、熱容量の記述がない土地利用分類は地表面モデルを適用していることを意味する。

土地利用分類毎の緑被率(緑地面積の中で植生により占められている面積の割合)は、東京23区を対象に東京都都市計画局が算出した値をもとに土地利用分類ごとに推定し、対象領域全域に適用した。なお、東京都では河川等水面の割合を加えて「みどり率」と称している。

この方法による緑被の割合と細密数値情報の土地利用分類との対応関係及び東京都の推定した1998年時点のみどり率の値等を表-2に示す。

3) 屋上緑化の効果に関する計算条件

将来の緑被率は、緑の東京計画⁴⁾に基づき、15年後のみどり率が現状の28.6%から32%に増加す

表-1 土地利用分類別の地表面パラメータ一覧

カテゴリー	アルベド (%)	湿潤度 (%)	粗度 (cm)	熱伝導率 (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	熱容量 (Jm ⁻³ K ⁻¹)	射出率
1) 田	25	—	5	0.63	4.20E+6	0.92
2) 畑・造成地・その他用地	25	—	5	1.05	1.84E+6	0.92
3) 森林・荒れ地	15	—	95	1.05	1.84E+6	0.98
4) 内水地	8	100	0.1	0.63	4.20E+6	0.98
5) 海浜・海水域	8	100	0.1	0.63	4.20E+6	0.98
6) 公園・緑地	20	—	10	1.05	1.84E+6	0.92
7) 建物用地	12	0	50	1.70	2.10E+6	0.90
8) 一般低層住宅、密集低層住宅	12	0	44	1.70	2.10E+6	0.90
9) 中高層住宅地	12	0	86	1.70	2.10E+6	0.90
10) 商業・業務用地	12	0	107	1.70	2.10E+6	0.90
11) 公共公益施設用地	12	0	22	1.70	2.10E+6	0.90
12) 工業用地	12	0	51	1.70	2.10E+6	0.90
13) 交通用地	14	0	10	0.70	1.40E+6	0.95

表-2 東京都区部における現状と将来のみどり率、緑地率、緑被率の設定値

		みどり率 (1998)	みどり率 (将来)	細密数値情報の 土地利用分類	緑地率 (現状)	緑被率 (現状)	緑地率 (将来)	緑被率 (将来)
樹林地		0.4	0.4	山林・荒地等	100	54.5	100	54.5
農地		1.7	1.7	田	100	67.8	100	67.8
草地		1.2	1.2	畠・その他の農地 造成中地 空地	100	29.6	100	29.6
市街地	宅地等	14.7	18.1 / 31.1	工業用地	23.6	100	29.1 / 50	100
				一般低層住宅地	23.6	100	29.1 / 50	100
				密集低層住宅地	23.6	100	29.1 / 50	100
				中・高層住宅地	23.6	100	29.1 / 50	100
				商業・業務用地	23.6	100	29.1 / 50	100
				公共公益施設用地	23.6	100	29.1 / 50	100
道路		1.2	1.2	道路用地	7.9	100	7.9	100
公園		5.1	5.1	公園・緑地等	100	76.5	100	76.5
小計		24.3	27.7 / 40.7	—	—	—	—	—
河川等水面		4.3	4.3	河川・湖沼等	0	0	0	0
みどり率計		28.6	32.0 / 45.0	—	—	—	—	—

みどり率(将来)の値のうち、左側は東京都による15年後の目標値、右側はさらに長期的な期待値

るケースと45%となるケースを対象とした。

表-1の分類7~12の土地利用における緑地を屋上緑化により増加させることで23区全体の将来のみどり率が32%あるいは45%になるように緑地率(各土地利用面積に占める緑地の割合)を調整した。分類7~12のいずれでも緑地率は同じと仮定し、緑被率は100%とする。みどり率45%を達成するためには分類7~12の土地利用における緑地率が50%必要であった。

屋上緑化には植物による蒸発散機能の他に、これまでコンクリート等により覆われていた屋上・屋根面が植物により覆われることによる建物内部への熱負荷の減少並びに表面温度や内部温度の低減効果がある。屋上緑化のモデル化にあたっては、

分類7~12の土地を地上の緑被部分、屋上緑化部分、緑化されない建物屋上部分、舗装・地面部分に分ける。屋上緑化した面から建物への熱伝導は無視できると想定し、屋上緑化部分と地上の緑被部分をあわせた緑地部分を公園・緑地の分類(分類6)に算入した。地上の緑被と屋上緑地の熱物性値には公園・緑地と同じ値を用いて熱伝導方程式を適用する。このようなモデル化により、屋上緑化による蒸発散の促進と表面温度の低下効果が考慮される。

4) 水面の再生効果に関する計算条件

現状の水面積に関して、細密数値情報(1994年)では23区全面積に対する「河川・湖沼等」の面積の割合は4.8%となっている。ただし、細密数値情

報の分類「河川・湖沼等」には海浜地が含まれているため、純粋な内水面はこの値より小さいと推定される。

過去の河川の実態については、八十川ら⁵⁾が廃止河川の延長を算出し、区部全体の廃止流路は全長の78%にのぼっていることを明らかにしているが、廃止された河川の水面積までは明らかとされていない。松浦・島谷⁶⁾が明治13年測量の第一軍管区地方迅速図を用いて行った試算結果によると、当時の東京の市街地面積4,046ha(現在の山手線内側面積が6,200ha)に対して当時の東京の水空間面積は443haであったとしており、水面が市街地に占める割合は10.9%となる。つまり、1世紀以上前の状況としては1割程度が水面であったと考えられる。

将来の水面積のシナリオとしては、蓋掛けされた河川の開渠化、農業用水路等の再生、水循環の健全化による平常時流量増や湧水の復活などの様々な対策により東京23区内で水面積の割合を現状の倍に戻した場合を想定する。土地利用の高度化した東京都区部で建物用地や生活道路を再び河川に戻すにはかなりの困難が伴うものと考えられるが、本研究では仮想的に、水面再生のための用地として公共公益施設用地と道路用地を活用するとし、計算上、各計算メッシュ内でメッシュ面積の最大2.5%分の公共公益施設用地と同じく最大2.5%分の道路用地(いずれも緑被部分は除いた面積)が水面に変わるものと仮定した。これにより、23区内で水面積が5%増加し、約10%になると見込んだ。

3. シミュレーション結果

1) 計算条件

計算対象領域は関東平野を含む366km四方の母領域と東京23区を含む114km四方のネスト領域である(図-1)。母領域の解像度は6km、計算メッシュ数は61×61、ネスト領域は2km、57×57とした。鉛直方向は100hPaの等圧面までを25層に分割した。母領域の初期条件、境界条件には計算対象日を含む全球解析データを用いた。ネスティングの手法には2-Way nestingを用いた。雲モデルはなし、放射モデルには気温のみに依存した大気冷却率を用いるSimple coolingを用いた。

以上の条件のもと、現状のヒートアイランド現象をシミュレートする。現状のシミュレーションは、1995年8月23日21時～8月26日5時を

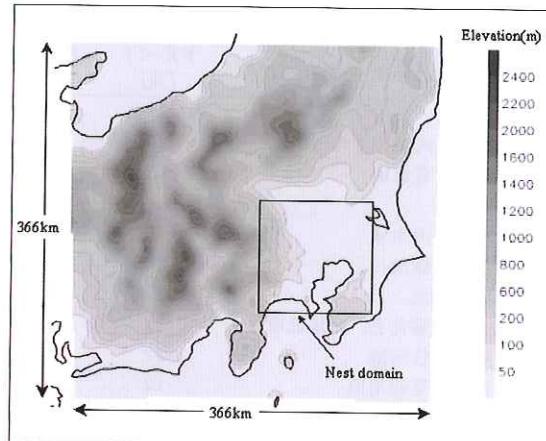


図-1 母領域とネスト領域の計算範囲と標高

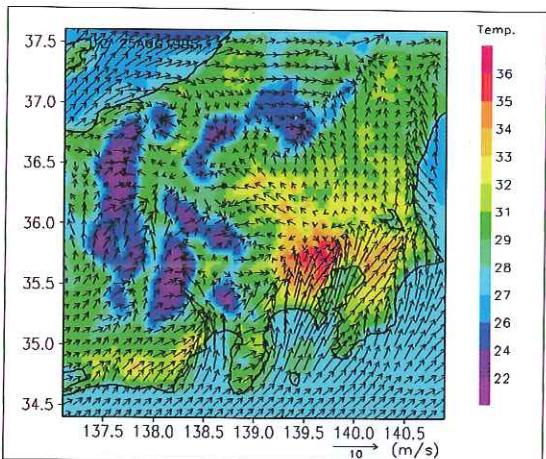


図-2 母領域の風と気温場の計算結果

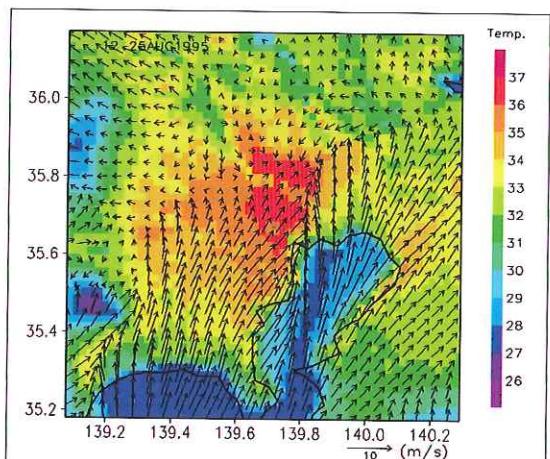


図-3 ネスト領域の風と気温場の計算結果

対象期間とした。東京大手町地点では8月22日に降雨が観測されているが、計算対象期間中は好天で雲が少なかった。

母領域とネスト領域における地上1.5mの気温

と地上 10 m における風速ベクトルの計算結果を図-2、図-3 に示す。この日の計算結果では、東京都心部を中心とする高温化により北よりの郊外風が発生して、海風の侵入が遮られている様子が確認された。この現象は、Yoshikado and Kondo⁷⁾による観測により明らかにされている。

ヒートアイランド対策が郊外や内陸部の気象に及ぼす影響を的確に把握する上でも、また、様々な要因が複雑に影響するヒートアイランド解析の信頼性向上という点からも、都心とその周辺の多地点で精度の良い気温の定量化が必要である。東京都の AMeDAS 地点全てと埼玉県、千葉県、神奈川県の主要な AMeDAS 地点における実測気温と計算結果(地上 1.5m)を比較し、各地点とも気温の絶対値や最高気温の発生時刻、日変動のパターンは概ね良好に再現されていることを確認した(図省略)。以下においては、前述してきた条件設定により屋上緑化の推進と河川の水面再生による気温低減効果を試算する。

4. 屋上緑化の効果の推定

屋上緑化により東京 23 区のみどり率が 45% まで増大した場合の気温低下量と風系の変化を図-4、図-5 に示す。日中は気温低減効果が徐々に大きくなりながら、海風により効果の影響範囲が内陸方向に拡がっていく様子が確認できる。ただし、緑化域の北側に隣接する埼玉県南部地域では 25 日正午には気温が 0.6 °C 以上上昇している。これは、東京湾からの海風と北側からの郊外風が収束していたエリアが内陸部に移動したことにより、都心部の高温な空気が内陸部に移流されたことによるものであると解釈できる。このように、緑地の増大による気温の変化には、地表面の熱収支が変わり、顯熱輸送量が減少することによる影響と気圧分布の変化による流れ場の変化の影響が複合されていると言える。

AMeDAS 測定地点における気温変化量(緑化後の気温から現状の気温を差し引いた値)の時間変動の一例を図-6 に示す。東京(大手町)や練馬といった緑化対象域内の地点では緑化により最大で 0.6 °C 程度の気温低下が見られるが、緑化対象域から外れる沿岸部の横浜や船橋ではほとんど気温の変化はみられない。東京(大手町)と練馬では、日射のない時間帯でも 0.3 °C 程度気温低下が見られるのは、屋上緑化による屋根面温度の低下に起因すると考えられる。

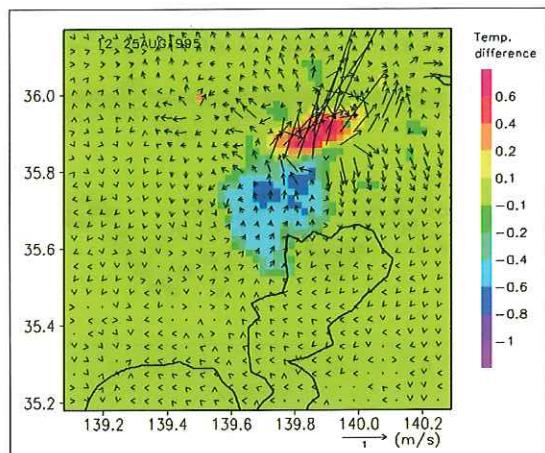


図-4 屋上緑化による気温、風の変化
(緑化後から緑化前の値を引いた結果、12 時)

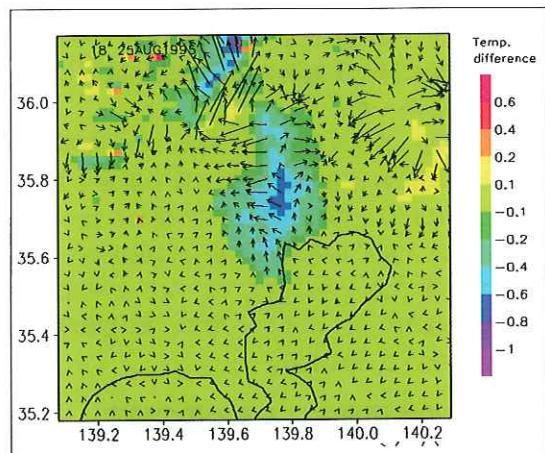


図-5 屋上緑化による気温、風の変化
(緑化後から緑化前の値を引いた結果、18 時)

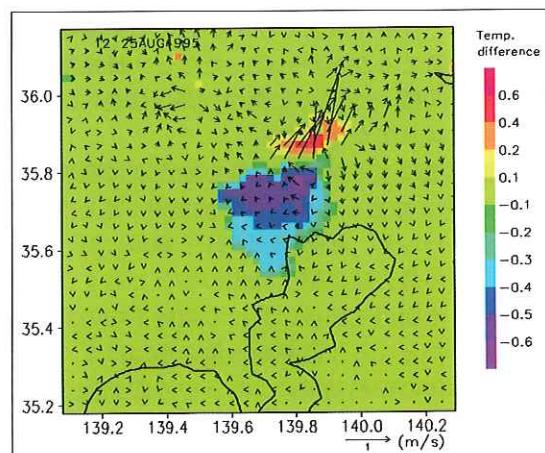


図-7 水面再生による気温、風の変化
(再生後から再生前の値を引いた結果、12 時)

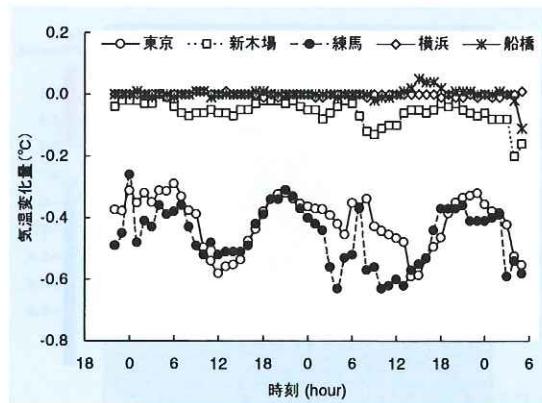


図-6 屋上緑化による気温変化量の時間変動

このような効果を熱収支の面から見てみると、屋上緑化実施に伴いみどり率が約 16 ポイント増加した（緑地の面積が 1.57 倍になったことに相当）ことにより、潜熱輸送量の最大値は 50% 増加し、顯熱輸送量は緑化実施前の 50% 程度に減少していくことがわかった。

屋上緑化によりみどり率が 32% になった場合の東京と練馬における気温の低下量も算定したが、日中で約 0.1 °C とみどり率 45% の場合に比べ小さい。これは、みどり率 45% の場合は現状から 16.4 ポイント増であるのに対して、みどり率 32% の場合は現状から 3.4 ポイント増で、緑化増分が約 1/5 しかないことによる。

5. 河川の水面再生による効果の推定

河川等の水面再生により水面積の割合が約 10% に増大した場合の気温低下量と風系の変化を図-7 に示す。水面再生の効果は早朝から水面増大域全体に現れ、日中は最大で 0.5 °C 以上の気温低下が発生しうることがわかった。ただし、緑地増大のケースと同様、23 区の北側の一部には逆に気温が増大するエリアが出現する。

水面再生による気温変化量を地点別に整理したものが図-8 である。水面の増加量が 5% と小さいにもかかわらず、東京（大手町）と練馬における気温低下量の最大値は屋上緑化の場合とあまりかわらない。水面再生前後における領域平均の熱収支を比較したところ、潜熱輸送量の増加はごくわずかで、水体の貯熱効果により日中の顯熱輸送量を抑えることにより気温が低減されていることがわかった。ただし、今回は水温の変化がないと仮定したが、停滞水の場合には水温の変動が無視し得なくなり、貯熱量もかわってくると考えられる。

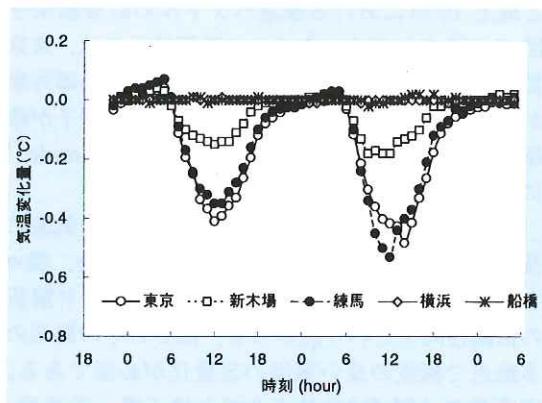


図-8 水面再生による気温変化量の時間変動

6. 計算結果の比較

以上の結果を用いて既往研究結果との比較を行うとともに、屋上緑化と水面再生の効果の比較を行なう。

三上ら⁸⁾は、公園面積が倍になるとともに、建物用地の面積の 7% が新たに樹林地として成熟すると仮定し、日最高気温に対しては区部北西部で最大 0.37 °C の低下がみられ、日最低気温については都心部で約 0.14 °C の低下にとどまつたと報告している。このシナリオにおけるみどり率の増分は、緑被率 = 100% であると仮定すると 17% になるから、単位気温低下量は 0.22 °C となる。Oke⁹⁾の示した蒸発散面積率と気温低下量の関係によると、蒸発散面積率が 28.6% から 45.0% まで増えた場合の気温低下量は最高気温に対しておよそ 0.6 °C 程度、最低気温に対しては 0.3 °C 程度となっている。

今回の計算結果を水面及び緑被率 10%あたりの気温低下量により整理したものが表-3 である。また、屋上緑化と水面再生を同時にい、みどり率を 50%（緑被率 40% + 水面積率 10%）とした場合の計算結果についても同じく表-3 に示した。今回の屋上緑化の計算結果（23 区の一部範囲（北緯 35.7~35.8、東経 139.75~139.85）の領域平均値、14 時）は三上ら⁸⁾の計算結果よりもやや大きい。みどり率を蒸発散面積率あるいは「水面 + 緑地 + 畑地」の面積率と読み替えれば、今回の数値シミュレーションによる結果は、Oke⁹⁾の報告に近い値となっている。

屋上緑化のみのケースと水面再生のみのケースの計算結果を比較すると、4 時では屋上緑化（みどり率 32% 及びみどり率 45%）の単位気温低下量が大きく、水面再生の効果はわずかである。一方、

表-3 水面と緑地の増加による気温低減効果

種別	都市名	単位気温低下量 (°C/10%)	
		4時	14時
水面再生	東京(大手町)	0.00	0.84
	練馬	-0.03	0.71
	領域平均	0.02	0.85
屋上緑化 (32%)	東京(大手町)	0.30	0.35
	練馬	0.34	0.34
	領域平均	0.35	0.37
屋上緑化 (45%)	東京(大手町)	0.29	0.35
	練馬	0.36	0.33
	領域平均	0.37	0.40
水面再生+ 屋上緑化 (45%)	東京(大手町)	0.22	0.45
	練馬	0.25	0.41
	領域平均	0.28	0.51

14時における単位気温低下量は水面が緑地の倍以上の値を示しており、水面再生は、緑地を増やすのに比べて半分以下の面積で同等な効果を得られることがわかる。また、屋上緑化と水面再生の両方を実施した場合には、それぞれ単独で実施した場合の気温低減効果を足しあわせた値とほぼ等しい気温低減効果が計算されることがわかった。

7. おわりに

本研究では、都市空間におけるヒートアイランド現象の効果的な軽減策を検討するため、MM5を基本としていくつかの改良を加えたメソスケールモデルを用いて都市建築物の屋上緑化と河川の水面再生によるヒートアイランド対策を実施した場合の気温低減効果を推定した。屋上緑化の効果については、みどり率を45%まで増大させることにより、最高気温に対して0.6°C以上の気温低下が可能であった。一方、水面の再生については、水面を現状の4.8%から約10%に増大することにより最大で0.5°C程度地上気温が低減すると推定された。単位面積あたりの気温低減効果で対策を比較すると、日中(14時)の気温に対しては、水面再生が屋上緑化の2倍の気温低減効果があった。また、早朝(4時)の気温に関しては、屋上緑化の方が効果的で、面積率10%あたり0.3°C以上の気温低減効果があることが推定された。したがって、このような水面増加と屋上緑化実施の特性の違いを考慮しつつ、可能な限りこれらの量を増やしていくことによって、都市のヒートアイランド化を抑制しながら、水や緑の保全・再生による自然と共生した都市づくりに貢献できると考える。

参考文献

- 吉谷純一、木内豪：都市空間におけるヒートアイランド現象の軽減に関する研究(その2)-メソスケール気象モデルを用いた都市河川の水面再生と屋上緑化による気温低減効果の推定、土木研究所資料第3783号、2001。
- Grell, G., J. Dudhia and D. Stauffer: A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR/TN-398+STR, 1994.
- Noilhan, J. and S. Planton: A simple parameterization of land-surface processes for meteorological models, Mon. Wea. Rev., p.117, pp.536-549, 1989.
- 東京都：緑の東京計画-水と緑がネットワークされた風格都市・東京を目指して-, 2000.
- 八十川淳、高橋信之、尾島俊雄：東京都区部における中小河川の廃止と転用実態に関する調査研究、日本建築学会計画系論文集、No.508, pp.21-27, 1998.
- 松浦茂樹、島谷幸宏：水辺空間の魅力と創造、鹿島出版会、1987。
- Yoshikado, H. and H. Kondo: Inland penetration of the sea breeze in the suburban area of Tokyo, Boundary-Layer Meteorology, p.48, pp.389-407, 1989.
- 三上岳彦、若林明子、宇多川満、伊藤政志：東京のヒートアイランドに関する研究(その2)，東京都環境科学研究所年報, pp.49-56.(計算結果の数値の一部は東京都環境科学研究所ニュース, No.13, 1997.5より引用), 1997.
- Oke, T. R.: Evapotranspiration in urban areas and its implication for urban climate planning. In Preprints, C.I.B. Colloquium, Teaching the Teachers on Building Climatology, Stockholm, Sept.4-6, p9., 1972.

木内 豪*



独立行政法人土木研究所
水工研究グループ
(水理水文)主任研究員
Tsuyoshi KINOUCHI

吉谷純一**



同 水工研究グループ
(水理水文)上席研究員
Junichi YOSHITANI