

土木研究所資料

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

平成13年3月

国土交通省土木研究所
河川部都市河川研究室

Copyright © (2001) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

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

河川部都市河川研究室 室 長 吉谷 純一
河川部都市河川研究室 主任研究員 木内 豪

要 旨

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提案するため、メソスケールの都市気象を解析するためのシミュレーションモデルを開発し、首都圏エリアに本モデルを適用した場合の地上気温や風系の再現性について検証を行った。また、自然環境を活用した対策として都市河川の水面再生と屋上緑化を対象として、東京23区内で重点的にこれらの対策を実施した場合の気温低下効果をシミュレーションにより試算した。

キーワード：ヒートアイランド現象、メソスケール気象モデル、都市河川、水面再生、
屋上緑化

○皇親王國公府大臣等 (附(05)) 衣冠のき関に就いて

皇親王國公府大臣等、衣冠のき関に就いて、
皇親王國公府大臣等、衣冠のき関に就いて、

皇親王國公府大臣等、衣冠のき関に就いて、
皇親王國公府大臣等、衣冠のき関に就いて、

皇親王國公府大臣等、衣冠のき関に就いて、
皇親王國公府大臣等、衣冠のき関に就いて、
皇親王國公府大臣等、衣冠のき関に就いて、
皇親王國公府大臣等、衣冠のき関に就いて、

目 次

1. 序論	1
1. 1 数値モデルによるヒートアイランド軽減策に関する既往研究	1
1. 2 都市気象モデリングの現状	2
1. 3 本研究の目的	3
2. 都市気象モデルの構築	5
2. 1 都市気象モデルの特徴	5
2. 2 メソスケールモデル	6
2. 3 境界層モデル	8
2. 4 地表面モデル	8
2. 5 地中温度の算出方法	11
2. 6 地表面パラメータの設定	12
2. 7 都市キャノピーの簡易モデル	14
2. 8 人工排熱モデル	17
3. 屋上緑化と河川の水面再生による気温低減効果の試算	20
3. 1 試算の概要	20
3. 2 屋上緑化の効果に関する計算条件	26
3. 3 水面の再生効果に関する計算条件	28
3. 4 ヒートアイランド現象の再現結果	29
3. 5 屋上緑化によるヒートアイランド現象の軽減効果	37
3. 6 水面の再生によるヒートアイランド現象の軽減効果	41
4. 結論	47
参考文献	48



1. 序論

1. 1 数値モデルによるヒートアイランド軽減策に関する既往研究

都市の気候緩和に関する研究は、現地調査に基づく実証的研究から数値計算等に基づく将来の対策技術の研究に移行しつつある。まず、メソ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事例について米国と日本における研究を整理する。

米国におけるヒートアイランド軽減策に関する研究では、主として建物屋根面のアルベド増大と緑化の推進に着目した効果の試算が行われている。Sailor (1995) は CSUMM (Colorado State University Mesoscale Model) をロサンゼルス市域 (L.A.) に適用し、屋根・道路面のアルベド変化と緑被率変化がヒートアイランド軽減に与える影響を試算している。その結果によると、アルベド増 (対策域平均で 0.082, L.A. で 0.138) により L.A. で 1.5°C 近い気温低下、緑被増 (対策域平均で 0.070, L.A. で 0.124) では L.A. で 1.3°C 以上低下すると推定している。また、Taha (1996, 1997) は Sailor と同じく CSUMM を同地域に適用し、緑地を増大した場合とアルベドを高めた場合の気温低減量を推定し、アルベド増が可能な地域で 0.07 増大させると最大で 2.0°C 気温が低下し、アルベド 0.13 の増大に対しては 4.5°C の気温低減が可能であると推定している。

我が国では、例えば村上ら (1997) が首都圏を対象に土地利用変化に起因するヒートアイランドの形成について数値モデルによる検討を行い、首都圏の拡大により海風循環とヒートアイランド循環の相互作用が生起することを確認している。Kusaka et al. (1999) や杉山ら (1997) は関東平野を対象として、土地利用変化が気温場、風速場に及ぼす影響を検討している。

Kimura and Takahashi (1991) は、人工排熱の削減による都市スケールでの気温低減効果について、関東平野を対象として排熱の影響を検討している。大手町地点地上 1.5m の計算結果によると、排熱を全て取り除いた場合、最高気温発生時で 0.5°C 程度、最低気温発生時で 3°C 程度気温が低下することを示している。一ノ瀬ら (1997) は東京 23 区を包含する比較的狭い領域での解析により、人工排熱を完全に排除したときの夏期気温低下量は大手町地点で日中 0.5°C 程度、夜間で 1.5°C 程度となることを示している。一方、田村・水鳥 (1999) は、都市建築物群における日射、放射、風の遮蔽効果をモデル化した都市キャノピーモデルを組み込んだメソスケールモデルを用いて東京 23 区の熱環境を推定しており、排熱量を 50% 削減した場合にはキャノピー内の気温低下量が、14 時では最大 1.5°C 以上、早朝 5 時で $0.3\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ となると推定している。このように、人工排熱の削減による気温低下量の推定値には幅があるが、これは人工排熱量の推定精度と関係していると考えられる。斉藤 (1997) は今後のエネルギー消費増に伴う人工排熱量の伸びを仮定して、将来、東京都心部で夏期の気温が 43°C を超える状態になると警鐘を鳴らしている。

緑地を増大させた場合の都市スケールの気温低減効果についてもいくつか数値計算による検討が行われている。三上ら (1997) によると、緑の倍增計画を踏まえて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て数値モデルによる効果を推定しており、日最高気温に対して区部北西部で最大 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 の低下にとどまったと報告している。半田・浦野 (1996) も緑地増大の効果を試算し、効果的な緑地の配置について検討しており、東京都区部の緑被率を 22.5% から 30% に増大した場合、一部気温が上昇するエリアもみられるが、 $0.05\sim 0.2^{\circ}\text{C}$ の気温低下が見られている。ただし、実測値と計算値との乖離が大きく、気温低下量の推定値の解釈には注意が必要と思われる。

都市内を流れる河川は、周辺の都市構造物に比べて表面温度が低く安定で、かつ粗度が小さいことから、河川が気温場や海陸風の侵入に影響を及ぼしていると考えられる。海風の侵入に及ぼす影響としては、鹿島地域や大阪平野を対象とした地上観測データの統計解析により河川沿いで海風の侵入時刻が早くなることが示されている（北林，1976；江口，1977；福田ら，1998）。気温の低下という観点では、河川等の水面が微気象に及ぼす効果については多くの研究がなされている（藤原，1999）が、都市規模での気温低下にどの程度の効果を発揮しているかについて数値シミュレーションにより検討された事例は見受けられない。

直接河川の効果を試算した事例ではないが、参考になる検討として、例えば Myrup (1969)，Oke (1972) の報告がある。Myrup (1969) は 1 次元の数値計算により、蒸発可能面積の大小と気温の関係を明らかにしている。これによると、蒸発可能面積の占める割合が 1 割異なると最大気温で 3.5°C の違いが生じる。しかし、現実には移流の影響があるため、この関係が成り立たないと考えられる。Oke (1972) は気候モデルを用いて蒸発散可能面積と気温低下量の関係を示し、都市の 30% を蒸発散可能面積が占めることにより、最大の気温低下量に対して 66% の気温低下が達成できるとしている。

1. 2 都市気象モデリングの現状

前述のように、都市特有のヒートアイランド現象を解明するとともに、ヒートアイランド現象軽減策の効果を推定するため、様々な数値モデルが開発・利用されてきたが、必ずしも気象観測結果を十分な精度で再現できるまでには至っていないと考えられる。その理由は色々考えられるが、複雑な土地利用、人工排熱、都市キャノピーといった都市特有の気象形成要因の存在とそのモデル化の難しさが挙げられる。

人工排熱の時空間分布については、一ノ瀬ら (1994) による細密数値情報を用いた推計や水鳥・田村 (1999) による細密数値情報等を用いた推定が行われている。将来の開発動向や土地利用の変化などを踏まえた将来の人工排熱を推定したものとしては河原ら (2000) の取り組みがある。さらに、このようにして推定された人工排熱をメソスケールモデルに取り込んで排熱の影響を試算した事例としては、前述したように一ノ瀬ら (1997) や田村・水鳥 (1999) らの研究が挙げられる。

田村・水鳥 (1998, 1999) は都市キャノピー内の放射環境、風環境を考慮して建物間の気温、比湿を計算できる都市キャノピーモデルを開発している。また、そのモデルをメソスケールモデルに組み込んで東京 23 区における熱環境の推定を行っている。山口 (1998) も都市キャノピーモデルを組み込んだメソスケールモデルを大阪都市域に適用している。いずれも、実測の気温の日変動パターンや絶対値は必ずしも良好に再現されておらず、放射冷却の抑制が効くはずの最低気温も実測値を 2°C 程度下回る傾向が見られている。また、Taha (1999) は都市キャノピーを構成する構造物による貯熱効果を Grimmond et al. (1991) のヒステリシスモデルで表現し、メソスケールの数値シミュレーションを行っている。

都市の複雑な土地利用を計算に反映させるために、土地利用に固有の地表面パラメータの値を設定し、1 つの計算格子のパラメータには格子内の各土地利用の面積比率に応じた平均値を用いるのが通例である。また、地表面からのフラックスをより精度良く算出するため、サブグリッド規模の非一様性に対応したパラメータ化手法が導入されている (Avissar, 1989；Kimura, 1989)。

しかし、土地利用情報としてやや解像度の粗い国土数値情報などを利用している場合には、計算格子の解像度を上げて沿岸部などの土地利用の急減部においては計算精度が悪くなる恐れがある。また、国土数値情報を基本とする土地利用分類では、建物用途別の分類や公園・緑地の分類がなく、将来の土地利用変化の影響を推定しようとする場合に不都合が生じるものと考えられる。

植生地や裸地などでは表層の土壌水分量が時空間的に変化し、地表面熱収支の面から不均一性をもたらしている。土壌水分量は地表面からの蒸発量や植物からの蒸散量を左右するとともに、蒸発や降雨によって時間的に変動する特性を持っているが、これまでの都市気象の数値計算では土壌水分量を表すパラメータとして一定の蒸発効率を用いているため、土壌の乾湿や土壌の種類の影響が反映されていない。土壌水分量の違いがヒートアイランドの計算結果に与える影響については仙台を対象として検討が行われており（木内ら、2000）、土壌水分量の多寡が都市部の気温場や風系に与える影響を示している。Hafner and Kidder (1999) は AVHRR データに基づいて推定した土壌水分条件等を用いた都市気象解析を行っている。Jacobson (1999) は数値モデルにより土壌水分量の多寡が気温、風速、汚染物質濃度に与える影響を示している。山口 (1998) は土壌層を3層にわけてそれぞれの層の水収支と地表面過程を組み込んでメソスケールの都市気象シミュレーションを行っている。また、本研究の基礎モデルとなる MM5 の最新バージョンには地表面過程モデルが組み込まれた (Chen and Dudhia, 1999) が、我が国に適用するにあたっては、条件設定等においてモデルの改良が必要と思われる。

1. 3 本研究の目的

以上のような現状把握の上で、本研究ではヒートアイランド対策の効果をより精度良く推定するモデルを得るため、NCAR の MM5 を基本として、地表面の状態を表す情報として細密数値情報、国土数値情報、数値地図を用い、地表面における水熱移動過程、都市キャノピー内における夜間の放射冷却抑制効果、人工排熱の時空間変動、サブグリッドスケールの土地利用分布のパラメライゼーションを組み込んだメソスケールモデルを開発し、夏期晴天日の気温場、風速場の推定精度を検証する。

次に、本モデルを用いてヒートアイランド対策による気温低減効果の推定を行う。本研究で対象とする対策は、これまで全く効果の定量化がなされてこなかった河川等の水面再生による都市スケールでの夏期の気温低減効果および都市構造物の屋上緑化を主体とした都市内緑化による気温低減効果である。水面の再生と屋上緑化の対象域は東京 23 区に限定した。それは、この地域の土地利用が首都圏のヒートアイランド現象に大きな影響を及ぼしていることによる。

水面再生の可能性としては、過去に蓋掛けされた水路を蘇らせるばかりでなく、都市河川流域における水循環の再生による河川基底流量の増大や湧水の復活による小規模な池、沼地の再生、使用されなくなった農業用水路の利用などが挙げられる。

都市内の緑地による都市規模のヒートアイランド軽減効果については前述のように、これまでも数値モデルを用いた推定が行われている。しかし、屋上緑化を対策として想定した検討は行われていない。東京都では緑化基準を改正し、ビル緑化を加えた新しい基準に基づく緑化指導を平成 12 年 4 月から開始しており、従前の緑化基準に加えて屋上の面積（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基準となった。屋上緑化には、宅地における熱収支を変え、潜熱輸送量の増加により大気加熱を抑制する効果とと

もに、建物への伝導熱量の減少による室内熱負荷の低減とそれに伴う人工排熱量の抑制という二重の効果があり、屋上緑化が可能な面積如何ではかなり効果的な施策になると予想される。

2. 都市気象モデルの構築

2. 1 都市気象モデルの特徴

本研究で用いたシミュレーションモデルは、米国ペンシルバニア州立大学で汎用の気象計算モデルとして開発され (Anthes and Warner, 1978), その後, NCAR (米国大気研究センター) においてさらに改良された MM5 (The fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model) を基本にしている. MM5 は非静力学方程式に基づいて 3 次元の大気流れと圧力, 気温, 水蒸気分布等を予測できるメソスケールモデルで, 米国においては研究用ばかりでなく実務上の気象予測にも使用されている. MM5 は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解析に用いるには不都合な点がいくつか挙げられる. そこで, 以下に示すような改良を加えた.

1) サブグリッドスケールのモデリング

MM5 では各計算格子には卓越する 1 つの土地利用のみを与えているため, 我が国の都市のような複雑な土地利用形態に適用する場合や計算メッシュサイズが大きい場合には, サブグリッド規模の一様性の仮定が成り立たず, 地表面からのフラックス輸送量の算定結果に大きな違いが生じることが予想された. そこで, 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サブグリッドスケールのパラメータ化手法 (Avissar and pielke, 1989 ; Kimura, 1989) を導入した. 具体的には, MM5 の境界層モデルを修正して, サブグリッド毎に大気との運動量, 熱, 水蒸気の交換を計算し, それを合算して大気下層の計算格子に付与するサブグリッド手法を用いた.

2) 土地利用情報

MM5 で使用する土地利用データのうち, 日本に適用できるものは USGS の分解能 30 秒のデータであり, これを都市気象の計算に適用するには解像度が粗すぎる. そこで, 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 (解像度 30 秒) と細密数値情報 (解像度 10m) を使用できるように修正した. 同様に, 標高情報についても国土地理院の数値地図に含まれる標高データを分解能 45 秒で使用するように修正した. 土地利用は国土数値情報と細密数値情報の分類を後述するように 13 分類に集約した.

3) 地表面過程モデルの改良

従来の都市気象モデルでは各土地利用面からの蒸発散量の算出にバルク式を用い, 土地利用分類ごとに一定の蒸発効率を与える手法が一般的である. しかし, この場合には地表面の水文条件の変化に対応した潜熱輸送量の算出が困難であった. そこで, 今回 MM5 の境界層過程に地表面モデル (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も同時に予測できるようにした. 地表面モデルは, 森林や田畑などの自然地に適用するばかりでなく, 公園・緑地や建物用地内の緑地にも適用した.

4) 人工排熱

都市のヒートアイランド形成の大きな原因のひとつは社会経済活動によって発生する人工排熱である. オリジナルの MM5 では人工排熱を扱うことができないため, 接地層下面に土地利用分

類や時間に応じた量の人工排熱を潜熱フラックスと顕熱フラックスの形で与えられるようにモデルを修正した.

5) 都市キャノピー

都市キャノピーは大気下層の熱輸送や放射環境に大きく影響を及ぼすと考えられるが, 人工排熱同様 MM5 ではこれを考慮していない. 前述のように, 最近, いくつかの都市気象モデルが都市キャノピーをメソスケールモデルの中に組み込んでいるが, モデルが非常に複雑であるにもかかわらず, 最低気温の推定精度向上につながっていないように見受けられる. ここでは, 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. 2 メソスケールモデル

MM5 で用いられている地形に沿った(x, y, σ)座標系における非静力学モデルの基礎方程式は次のように表される (Grell et al., 1994)

圧力

$$\frac{\partial p'}{\partial t} - \rho_0 g w + \gamma p \nabla \cdot \mathbf{V} = -\mathbf{V} \cdot \nabla p' + \frac{\gamma p}{T} \left(\frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_0 \right) \quad (1)$$

運動量 (X成分)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) = -\mathbf{V} \cdot \nabla u + v \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) - e w \cos \alpha - \frac{u w}{r_{\text{earth}}} + D_u \quad (2)$$

運動量 (Y成分)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left(\frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) = -\mathbf{V} \cdot \nabla v - u \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) + e w \sin \alpha - \frac{v w}{r_{\text{earth}}} + D_v \quad (3)$$

運動量 (Z成分)

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\rho_0}{\rho} \frac{g}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} + \frac{g}{\gamma} \frac{p'}{p} = -\mathbf{V} \cdot \nabla w + g \frac{p_0}{p} \frac{T'}{T_0} - \frac{g R_d}{c_p} \frac{p'}{p} + e(u \cos \alpha - v \sin \alpha) + \frac{u^2 + v^2}{r_{\text{earth}}} + D_w \quad (4)$$

熱力学

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla T + \frac{1}{\rho c_p} \left(\frac{\partial p'}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla p' - \rho_0 g w \right) + \frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_0 \quad (5)$$

ここに, u, v : 風速の x 方向及び y 方向成分, w : 風速の鉛直方向成分, T : 温度, T₀ : 参照温度,

$\dot{Q}=dQ/dt$: 空気の単位質量, 単位時間あたりの加熱量, ρ : 空気の密度, ρ_0 : 参照状態の密度, R_d : 乾燥空気の気体定数, c_p : 乾燥空気の定圧比熱, D_u, D_v, D_θ : 鉛直と水平方向の拡散と境界層内の乱れや対流による鉛直混合を表す項, θ_0 : 基準温位, γ : 乾燥空気の定圧比熱と定積比熱の比, g : 重力加速度である. eu と ew の入った項はコリオリ力の成分を表している. ここで, $e = 2\Omega \cos \lambda$, $\alpha = \phi - \phi_c$, λ : 緯度, ϕ : 経度, ϕ_c : 中央経度である. $u \partial m / \partial y$ や $v \partial m / \partial x$, r_{earth} の項は曲率の効果を表す. m はマップスケールファクターである.

鉛直座標 σ は次式により定義される.

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t} \quad (6)$$

$$p^* = p_s - p_t \quad (7)$$

ここに, p_t : モデル上端面を定義する気圧 (一定値), p_s : 地表面の気圧である.

移流項は次のように展開される.

$$\mathbf{V} \cdot \nabla A \equiv m u \frac{\partial A}{\partial x} + m v \frac{\partial A}{\partial y} + \dot{\sigma} \frac{\partial A}{\partial \sigma} \quad (8)$$

$$\dot{\sigma} = -\frac{\rho_0 g}{p^*} w - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} u - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} v \quad (9)$$

収束項は次のように展開できる.

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = m^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{m} \right) - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + m^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v}{m} \right) - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{\rho_0 g}{p^*} \frac{\partial w}{\partial \sigma} \quad (10)$$

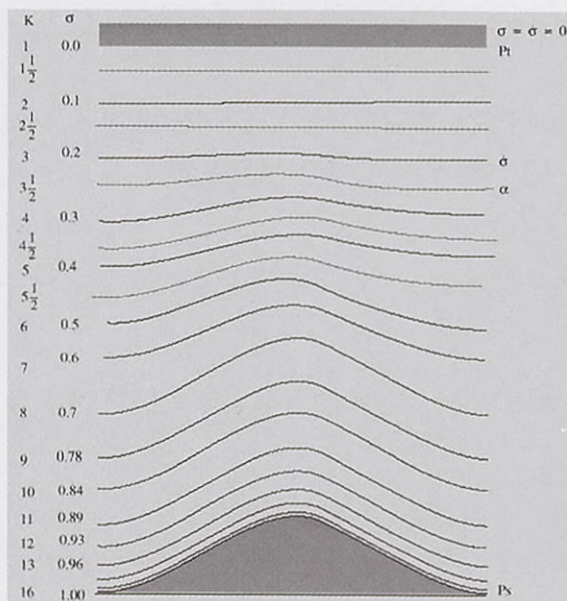


図1 σ 座標の概念図

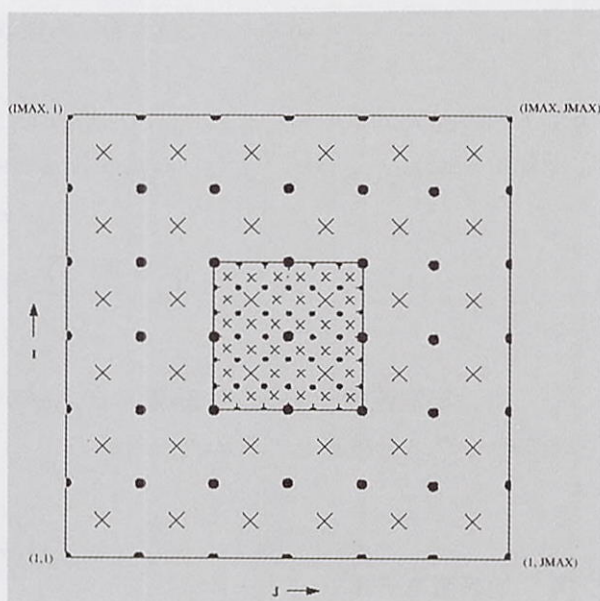


図2 計算格子

2. 3 境界層モデル

MM5にはいくつかの境界層モデルが用意されているが、サブグリッドパラメータ化の手法の導入し易さから Eta PBL モデルを採用した (Janjic, 1990, 1994) . Eta PBL モデルでは、境界層 (及びその上の自由大気) に Mellor-Yamada スキームのレベル 2.5 を採用し、接地層には Mellor-Yamada スキームのレベル 2 を適用している. さらに、接地層の下部 (地表面からモデルの最下点まで) には薄い "Dynamical turbulence layer" を設けている.

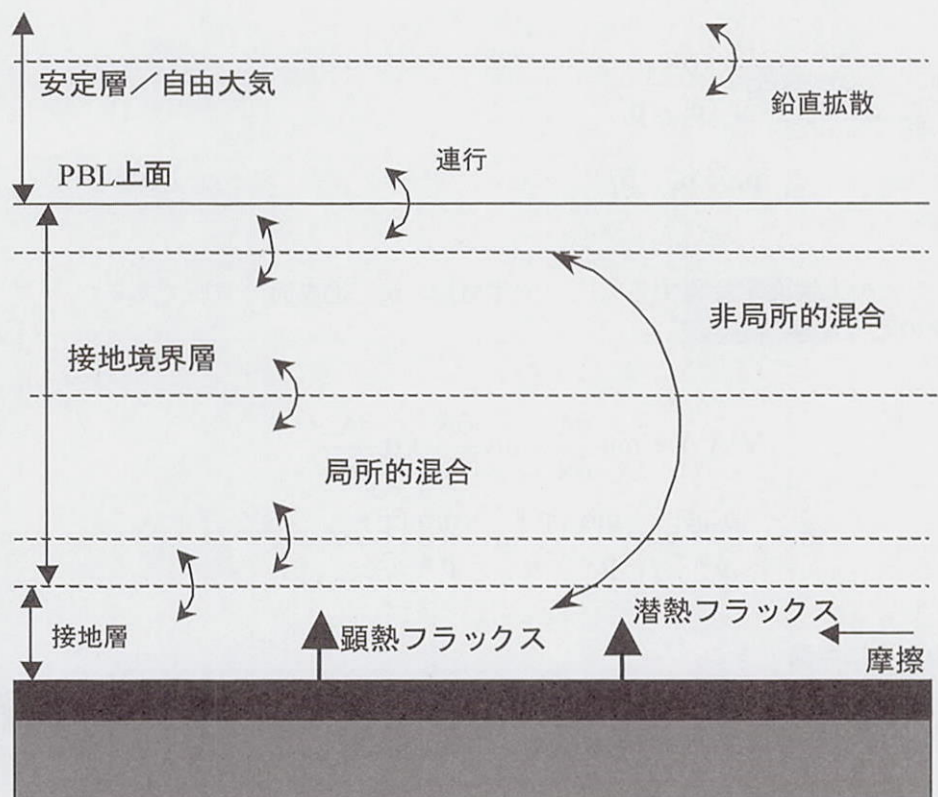


図3 接地境界層における各フラックス輸送過程

大気下端の乱流エネルギー q^2 は式(11)を用いて、土地利用分類別に計算される摩擦速度 u_{*i} を面積 a_i で加重平均して求めた. また、乱流エネルギーはモデル大気の上端で消失する.

$$q^2 = B_1^{2/3} \sum_i a_i u_{*i}^2 \quad (11)$$

ここで、 B_1 は経験定数である. 1 計算メッシュの地表面フラックスはメッシュ内の土地利用分類ごとのフラックスを積算して求めた.

2. 4 地表面モデル

本研究では、土壌や植生の物理的、生理的反応をモデル化した地表面モデル (LSM: Land Surface Model) を MM5 の境界層モデルに組込んだ. 地表面モデルは表層の土壌水分量を予測し、

土壌の蒸発効率や熱容量、熱伝導率などのパラメータを地表面水分量の関数として与える。これにより、土性の違いや土壌の水分条件に依存した地表面熱収支の算定ができる。

本研究で用いた地表面モデルのうち、表層土壌の水収支は Noilhan and Planton (1989) のモデル (NP モデル) に基づいており、土壌 2 層とその上の植生層における水収支を計算し、潜熱輸送量を計算するための蒸発効率を算出する。このモデルでは、地表面の水分量 w_g 、表層土壌の水分量 w_2 、葉部において保留される水量 w_r は次のように表される (Deardorff, 1978)。

$$\frac{\partial w_g}{\partial t} = \frac{C_1}{\rho_w d_1} (P_g - E_g) - \frac{C_2}{\tau} (w_g - w_{geq}) \quad 0 \leq w_g \leq w_{sat} \quad (12)$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial t} = \frac{1}{\rho_w d_2} (P_g - E_g - E_{tr}) \quad 0 \leq w_2 \leq w_{sat} \quad (13)$$

$$\frac{\partial W_r}{\partial t} = \text{veg}P - E_r \quad \text{and} \quad 0 \leq W_r \leq W_{r \max} \quad (14)$$

$$C_1 = C_{1sat} \left(\frac{w_{sat}}{w_g} \right)^{b/2+1} \quad (15)$$

$$C_2 = C_{2ref} \left(\frac{w_2}{w_{sat} - w_2 + w_f} \right) \quad (16)$$

$$\left(\frac{w_{geq}}{w_{sat}} \right) = \frac{w_2}{w_{sat}} - a \left(\frac{w_2}{w_{sat}} \right)^p \left(1 - \frac{w_2}{w_{sat}} \right)^{8p} \quad (17)$$

ここで、 τ ：一日の長さ、 ρ_w ：液状水の密度、 d_1 ：含水率の日変化が及ぶ深さ、 d_2 ：第一層を含む土層厚さの総計、 veg ：緑被率、 P ：植生上部における降雨量、 P_g ：地表面への到達雨量（キャノピーからの滴下雨量＋非遮断雨量）、 E_r ：植生の湿潤面からの遮断蒸発量、 E_{tr} ：乾燥した植生からの蒸散量、 E_g ：土壌からの蒸発量、 $W_{r \max}$ ： W_r の最大値、 w_{geq} ：重力と毛管力がバランスするときの表層水分量、 w_{sat} ：飽和水分量、 W_f ： C_2 の上限を定める定数、 C_{1sat} 、 C_{2ref} 、 a 、 b 、 p は土壌の分類ごとに決定されたパラメータである。

LSM では、地表面を植生域と非植生域（裸地）に分け、これら地表面からの蒸発散量を計算する。地表面からの蒸発散量 E は、 E_r 、 E_{tr} 、 E_g をそれぞれの面積率に基づいて合計した値となる。

$$E = E_g + E_{tr} + E_r \quad (18)$$

$$E_r = \rho_a \text{veg} \delta \frac{q_{sat}(T_s) - q_a}{R_a} \quad (19)$$

$$\delta = \begin{cases} \left(\frac{W_r}{W_{r \max}} \right)^{2/3}, & \text{if } q_{\text{sat}}(T_s) \geq q_a \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

$$E_{\text{tr}} = \rho_a \text{veg}(1 - \delta) \frac{q_{\text{sat}}(T_s) - q_a}{R_a + R_s} \quad (21)$$

ここで、 δ ：遮断降雨により濡れている葉面の面積率、 T_s ：地表面温度、 ρ_a ：空気密度、 R_a ：空気力学的抵抗で $R_a = 1/(C_H V_a)$ 、 C_H ：顕熱に対するバルク輸送係数、 V_a ：ある高さにおける風速、 R_s ：表面抵抗で、最小気孔抵抗 $R_{s \min}$ と葉面積指数LAIと関係づけられた次式で与えられる。

$$R_s = \frac{R_{s \min}}{\text{LAI} F_1 F_2 F_3 F_4} \quad (22)$$

$$F_1 = \frac{f + R_{s \min}/R_{s \max}}{1 + f} \quad (23)$$

$$F_2 = \frac{w_2 - w_{\text{wilt}}}{w_{fc} - w_{\text{wilt}}} \quad \text{and } 0 \leq F_2 \leq 1 \quad (24)$$

$$F_3 = \begin{cases} 1 - 0.06(q_{\text{sat}}(T_a) - q_a) & (q_{\text{sat}}(T_a) - q_a) \leq 12.5 \text{ g/kg} \\ 0.25 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

$$F_4 = 1 - 1.6 \times 10^{-3} (T_a - 298.15)^2 \quad (26)$$

$$f = 0.55 \frac{R_g}{R_{gl}} \frac{2}{\text{LAI}} \quad (27)$$

F_1, F_2, F_3, F_4 はそれぞれ光合成有効放射量 (PAR) の影響、土層の水分量の影響、大気の水蒸気圧の影響、周囲温度の影響を表すパラメータ、 w_{fc} ：圃場容量、 w_{wilt} ：しおれ点の含水量である。 $R_{s \max}$ は5000s/mで一定値を与える。 R_{gl} と $R_{s \min}$ には土地利用分類に応じて表2に示すように異なる値を用いる。 F_3 の関係式は Jacquemin and Noilhan (1990) に従った。裸地面からの蒸発量に関するパラメータ H_u の算出には NP モデルの式 (29) を用いた。緑被率 veg の与え方については後述する。

$$E_g = \rho_a (1 - \text{veg}) \frac{H_u q_{\text{sat}}(T_s) - q_a}{R_a} \quad (28)$$

$$H_u = \begin{cases} 0.5 \left(1 - \cos \left(\pi \frac{W_g}{W_{fc}} \right) \right), & \text{if } W_g \leq W_{fc} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (29)$$

2. 5 地中温度の算出方法

地中温度並びに地表面温度は式 (30) ~ (33) に示す鉛直 1 次元の熱伝導方程式と地表面の熱収支式に基づき算定する。図 4 に示すように、土壌層全体の厚さは 63cm で、計算上、この土壌層を 6 層に分割する。各層の厚さは $d_{zsi}=1, 2, 4, 8, 16, 32\text{cm}$ である。地中下端温度には地上気温を 24 時間以上にわたって平均した値を用いる。また、地表面温度の初期値には NMC の客観解析から得られる地上気温を与える。西沢ら (1979) は夏期の東京都心部における地温が周囲よりも 4°C 程度高いことを報告したが、これは都市では土壌や人工地地覆の熱特性が異なるためと考えられる。そこで、道路用地、建物用地では地表面の高温化の影響が地中にも及んで地中下端温度が高くなっていると仮定し、アスファルト、コンクリートを対象とした浅枝・藤野 (1992) や福田ら (1997) の実験結果を参考に、地中下端温度を道路用地で 5°C 、建物用地で 3°C 高く設定した。熱伝導方程式は土地利用分類ごとに適用し、熱伝導率と熱容量も土地利用区分ごとに定める。ただし、地表面モデルを用いる土地利用区分 (表 2 参照) では、熱容量、熱伝導率には土壌水分量の関数を用いる (Chung and Horton, 1987)。内水面の表面温度には一定値を与える手法を用いた。

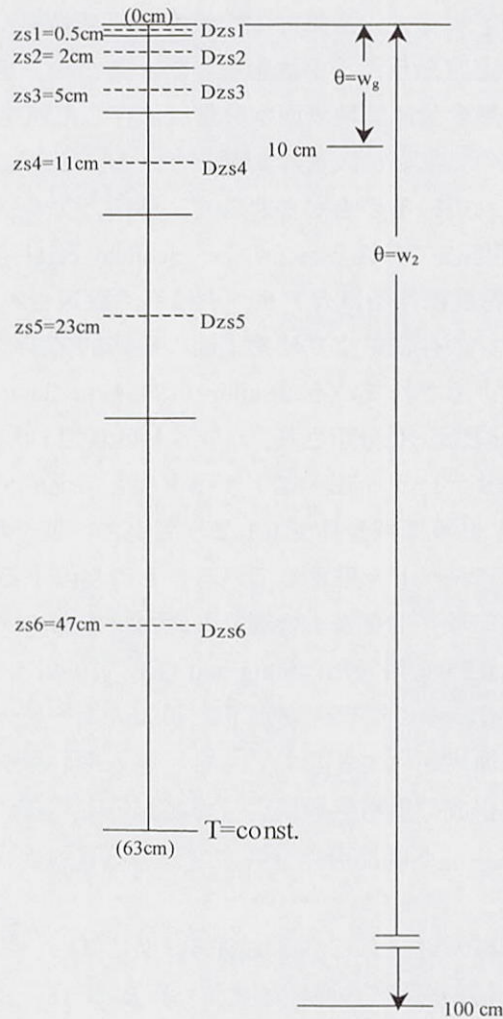


図 4 土壌の分割模式図

$$C_p(\theta) \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(\theta) \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) \quad (30)$$

$$R - \varepsilon \sigma T_s^4 = H + \ell E + G \quad (31)$$

$$C_p(\theta) = (1 - \theta_{\text{sat}}) C_{\text{soil}} + \theta C_{\text{water}} + (\theta_{\text{sat}} - \theta) C_{\text{air}} \quad (32)$$

$$\lambda = 0.243 + 0.393\theta + 1.534\theta^{0.5} \quad (33)$$

ここで、 T_g ：地中温度、 C_p ：土壌の熱容量、 λ ：土壌の熱伝導率、 z ：深さ、 ε ：反射率、 σ ：ステファン・ボルツマン定数、 R ：有効放射量、 H ：顕熱輸送量、 ℓE ：潜熱輸送量、 G ：地中伝導熱量、 $C_{\text{water}}=4.2\text{E}6$ (J/m³/K)、 $C_{\text{soil}}=1.26\text{E}6$ (J/m³/K)、 $C_{\text{air}}=1004.0$ (J/m³/K) を与えた。

2. 6 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、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手法を用いた。ただし、地表面モデルを適用する場合には、蒸発効率、熱伝導率、熱容量には地表面水分量に依存した値を算出する。

都市のアルベドは地表近傍の気温場に大きな影響を与えることが Taha et al. (1997) や Sailor (1995) などによって検討されているにもかかわらず、都市のアルベド値の設定手法は未だ確立されておらず、0.1～0.25 の範囲内で与えられている。Seaman et al. (1989) は建物密度に応じて 0.12～0.25 を与えており、高密度になるほどアルベドは高く設定されている。一方、Aida の実験 (1982) では、都市キャニオンの存在により建物上面の平均的アルベドはキャニオンが全くない場合に比べ 2 割減少することが示されている。Sailor (1995) は 23 の土地利用分類ごとにアルベドを設定しており、このうち建物が 10 分類され、アルベドが 0.12～0.16 の値をとっている。Hafner and Kidder (1999) は AVHRR データを用いてアルベドなどの面的分布を推定してヒートアイランドの計算に利用しているが、計算領域全体で 0.1 よりも小さい値を示している。これは、AVHRR のチャンネル 1 のみを用いてアルベドを推定していることに起因すると思われる。

本研究では土地利用ごとのアルベドを表 1 の通り与えた。水田のアルベドは石田ら (1997) の報告から、成熟期を仮定して 0.25 を用いた。Song and Gao (1999) は小麦、大豆やトウモロコシ畑のアルベド値を報告しており、多くのデータが 0.2～0.3 の高い値となっていることから、畑も水田と同じ値とした。幹線交通用地は主としてアスファルトやコンクリートなどの材質により構成されている。これらの値は組成や供用年数によって変わってくるが、実道での測定結果を参考に 0.14 とした。建物用地のアルベドは都市キャニオンによる日射の吸収効果も含む値として 0.12 を用いた。

地表面粗度の与え方にも各種の方法があるが、実測データに基づいて土地利用分類との対応付けがなされている Kondo and Yamazawa (1986) の式 (5a) 及び (6) を参考に設定した。この式を用いた粗度算出にあたっては、建物の高さとして平成 8 年度土地利用現況調査結果 (東京都区部) から得られる建物用途別の平均の建坪率、建物階数、中高層化率 (4 階以上の建物の割合)、土地利用比率を用いた。また、細密数値情報の整備範囲外の建物用地における粗度は Sailor (1995)

を参考に与えた。射出率は Oke (1987), Grell et al. (1994) より引用した。熱伝導率, 熱容量には Oke (1987), Sailor (1995), 杉山ら (1997), 木内・小林 (1999) の用いた値を参考に与えた。

表1 本モデルの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 (W/m/K)	熱容量 (J/m ³ /K)	射出率
田	25	—	5	0.63	4.20E+6	0.92
畑・造成地・その他用地	25	—	5	1.05	1.84E+6	0.92
森林・荒れ地	15	—	95	1.05	1.84E+6	0.98
内水地	8	100	0.1	0.63	4.20E+6	0.98
海浜・海水域	8	100	0.1	0.63	4.20E+6	0.98
公園・緑地	20	—	10	1.05	1.84E+6	0.92
建物用地	12	0	50	1.70	2.10E+6	0.90
一般低層住宅, 密集低層住宅	12	0	44	1.70	2.10E+6	0.90
中高層住宅地	12	0	86	1.70	2.10E+6	0.90
商業・業務用地	12	0	107	1.70	2.10E+6	0.90
公共公益施設用地	12	0	22	1.70	2.10E+6	0.90
工業用地	12	0	51	1.70	2.10E+6	0.90
交通用地	14	0	10	0.70	1.40E+6	0.95

地表面モデルで用いるパラメータには表2～4に示す値を設定した。表3, 表4の値は Noilhan and Planton (1989) に従う。植生に関しては, 土地利用分類ごとに一定の植生種類を表2に示すように割り当て, Bougeault et al. (1991), Dorman and Sellers (1989), Jacquemin and Noilhan (1990) に基づいて地表面過程モデルで用いるパラメータを定めた。土壌条件に関する既存のデジタルデータとしては, 国土数値情報の自然地メッシュデータがあるが, このメッシュデータの分類と表3の分類との対応関係が不明確なため, 今回は使用せず, 対象域全体でローンを仮定した。これについては3章で説明する。

表2 本モデルの土地利用分類別の植生パラメータ一覧

カテゴリー	植生分類	R _{gl}	R _{smin}	LAI
田	Irrigated Cropland and Pasture	100.	40.	6.0
畑・造成地・その他用地	Dryland Cropland and Pasture	100.	40.	6.0
森林・荒れ地	Mixed Forest	30.	125.	6.0
公園・緑地	Grassland	100.	40.	6.0

表3 土壌分類別のパラメーター一覧 (1)

土性分類 (国際法)	$W_{sat} (m^3/m^3)$	$W_{fc}(m^3/m^3)$	$W_{wilt} (m^3/m^3)$
S (Sand)	0.395	0.135	0.068
LS (Loamy sand)	0.410	0.150	0.075
SL (Sandy Loam)	0.435	0.195	0.114
SiL (Silt loam)	0.485	0.255	0.179
L (Loam)	0.451	0.240	0.155
SCL (Sandy clay loam)	0.420	0.255	0.175
SiCL (Silty clay load)	0.477	0.322	0.218
CL (Clay loam)	0.476	0.325	0.250
SC (Sandy clay)	0.426	0.310	0.219
SiC (Silty clay)	0.482	0.370	0.283
C (Clay)	0.482	0.367	0.286

表4 土壌分類別のパラメーター一覧 (2)

土性分類 (国際法)	C_{1sat}	C_{2ref}	A	b	P
S (Sand)	0.082	3.9	0.387	4.05	4
LS (Loamy sand)	0.098	3.7	0.404	4.38	4
SL (Sandy Loam)	0.132	1.9	0.219	4.90	4
SiL (Silt loam)	0.153	0.8	0.105	5.30	6
L (Loam)	0.191	0.8	0.148	5.39	6
SCL (Sandy clay loam)	0.213	0.8	0.135	7.12	6
SiCL (Silty clay load)	0.385	0.4	0.127	7.75	8
CL (Clay loam)	0.227	0.6	0.084	8.52	10
SC (Sandy clay)	0.421	0.3	0.139	10.40	8
SiC (Silty clay)	0.375	0.3	0.075	10.40	10
C (Clay)	0.342	0.3	0.083	11.40	12

サブグリッド (土地利用) ごとに地表面からの蒸発散量を算出するためには、土地利用分類毎の緑被率 (当該緑地面積の中で植生により占められている面積の割合) が必要となる。同一の土地利用分類であれば緑被率も同じ値とする方法や植物活性度指数 NDVI を用いて緑被率を推定する手法 (Carlson et al., 1997) がある。前者には、土地利用分類ごとの緑被率の値を幾らにすればよいかという点についての検討が必要である。また、後者についても、緑被率算出上のパラメータを地上データを用いて決定するという作業が必要になる。本研究では両方について検討を行い、最終的には、東京都の緑地面積に関する情報に基づき、土地利用分類別の緑被率を定め、それを計算対象域全域に適用する方法をとった。これについては3章で説明する。

2. 7 都市キャノピーの簡易モデル

都市キャノピーのモデル化や都市キャノピーが地上気温の形成に与える影響の検討については

Oke (1981), Swaid (1982), Johnson et al (1991) 他, 多数の研究がある. 本研究では屋上緑化や水面再生といった対策の効果を明らかにすることに主眼をおいているため, 都市キャノピーによる夜間の放射冷却の抑制効果を考慮する簡易なモデルを用いた.

簡易モデルでは, キャノピー内における正味の長波放射量を式 (34) から算出する. また, 建物屋根・屋上面に対しては式 (35) を適用する. なお, 建物壁面温度, 建物屋根面温度は地表面温度に等しいと仮定すると, 建物用地における長波放射量は建物の建坪率 β_b を用いて式 (36) により算出される.

$$\text{道路・建物キャノピー: } L_{\text{net},c} = \psi_s L \downarrow + \psi_w \sigma T_w^4 - \sigma T_s^4 \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \text{建物屋根・屋上面} \quad & : L_{\text{net},r} = \psi_r L \downarrow + (1 - \psi_r) \sigma T_w^4 - \sigma T_r^4 \\ & \psi_r = (1 + \psi_s)/2 \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \text{建物用地平均の放射量: } \quad & \overline{L_{\text{net}}} = \beta_b L_{\text{net},r} + (1 - \beta_b) L_{\text{net},c} \\ & = \{\beta_b + (1 - \beta_b) \psi_s\} (L \downarrow - \sigma T_s^4) \end{aligned} \quad (36)$$

ここで, $L_{\text{net},c}$: 道路・建物キャノピーにおける正味の長波放射量, $L_{\text{net},r}$: 建物屋根・屋上面における正味の長波放射量, $L \downarrow$: 下向きの長波放射量, ψ_s : 道路・建物キャノピーにおける空のビューファクター (天空率), ψ_w : 壁面のビューファクター ($=1 - \psi_s$), T_w : 壁面温度, T_s : 地表面温度, T_r : 建物屋上面温度, β_b : 建物用地の建坪率である. 建物屋根面高さは一様ではないため, 屋根・屋上面でも天空率が1になるとは限らない. そのため, 屋根・屋上面での天空率として, 地上における天空率と周囲に物体がない場合の天空率 ($=1$) との平均値を便宜的に用いた.

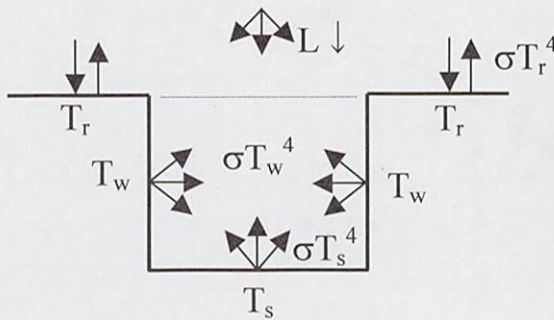


図5 都市キャノピーの模式図

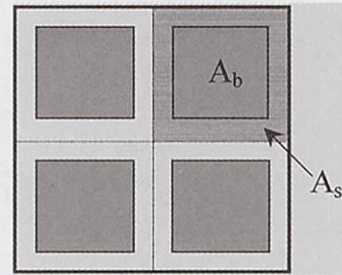


図6 建物配置の模式図

キャノピーモデルの適用にあたって, 建物用地には式 (36) を, 道路用地には式 (34) を用い, 天空率と建坪率には各計算メッシュ平均の値を用いる. メッシュ平均の天空率は水平方向の代表長さ W と鉛直方向の代表長さ H から次式によって算出する.

$$\psi_s = \cos \beta, \quad \beta = \tan^{-1} \left(\frac{H}{W/2} \right) \quad (37)$$

東京都が実施する土地利用現況調査結果では建物用途別, 区別の建物敷地面積, 建坪率, 建物

階数に関する情報が整理されている。1 計算メッシュ内の建物用地と道路面積の和を A 、1 計算メッシュ内の建物用地の総面積を A_t 、建物敷地面積を A_s 、建坪率を β_b とすると、建物の平面積 $A_b = \beta_b A_s$ であるからメッシュ内の建物用地と道路用地における平均的な建物間の幅 W は式 (38) で表すことができる。また、建物の平均高さ H は建物の平均階数を用いて算出する。その際、1 階あたり 3m、基礎と屋根部分で 1m を与える。

$$W = \sqrt{\frac{A}{A_t/A_s}} - \sqrt{A_b} = (\sqrt{A/A_t} - \sqrt{\beta_b})\sqrt{A_s} \quad (38)$$

関東平野を対象とする場合、東京都では建坪率や建物階数などのデータが揃っているが、それ以外の地域ではデータが整備されていないところがほとんどである。そこで、天空率算出のための建坪率、建物敷地面積、建物階数を土地利用状況から推定する手法を検討した。図 7～9 は東京都区部と多摩地域における建坪率、建物敷地面積、建物階数と土地利用面積割合との関係を示している。図 7 から、各種建物平均の建坪率は商業業務用地と密集低層住宅地が全建物用地（商業・業務用地、工業用地、中高層住宅地、低層住宅地、公共公益施設用地）に占める割合と高い相関があることがわかる。また、平均敷地面積の場合には、土地利用面積割合との相関性が低い。その中にあるのは密集低層住宅地の全建物用地に対する割合との対応関係がよい結果となった（図 8）。

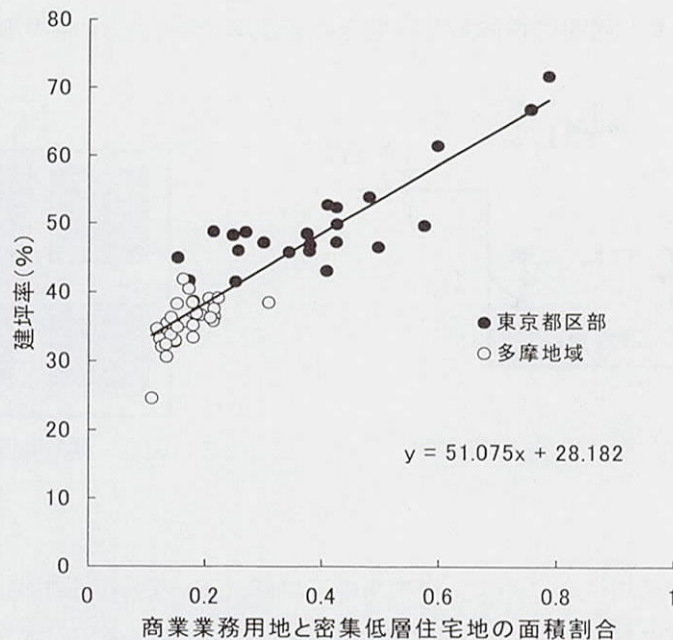


図 7 建坪率と商業業務・密集低層住宅地の面積割合の関係

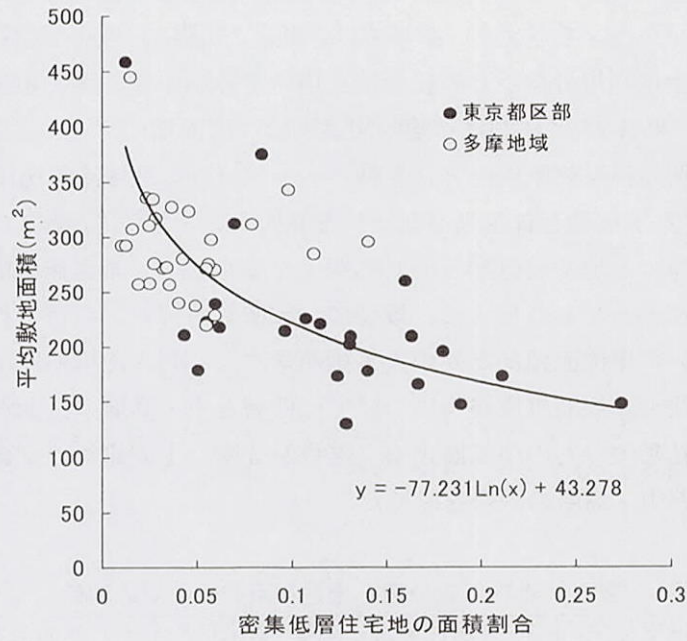


図 8 平均敷地面積と密集低層住宅地の面積割合の関係

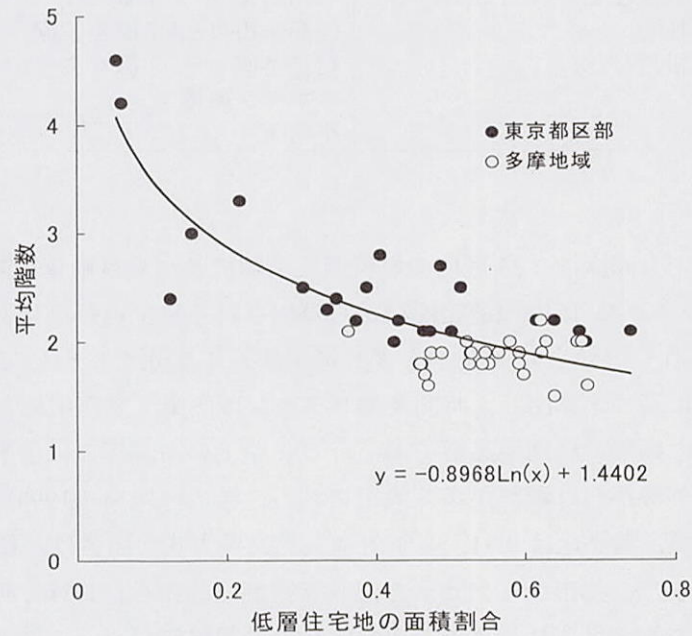


図 9 平均階数と低層住宅地の面積割合の関係

図 9 によると、平均階数は低層住宅地の面積割合との相関性が高い。これは、低層住宅地の定義が「3 階以下の建物」となっており、低層住宅地が多い場合には自ずと平均階数も低下することによる。

2. 8 人工排熱モデル

MM5 では人工排熱が考慮されていないため、何らかの修正が必要である。本モデルでは、人工

排熱は接地層下端に放出されるとして取り扱った。排熱量は土地利用別に設定した日平均値の原単位をもとに日変動パターンを与えた。原単位は、東京 23 区における建物用途別の総排熱量と細密数値情報に基づく土地利用分類ごとの総面積を用いて算出した。建物用途別の総排熱量の算出にあたっては、まず、東京 23 区における建物用途別延べ床面積のデータ（東京都土地利用現況調査結果）、建物用途別の熱需要原単位と日変動パターン（日本地域冷暖房協会, 1995, 1997）を用いて 23 区全体における排熱量と日変動パターンを算出する。さらに、表 5 に示す東京都の建物用途分類と細密数値情報の土地利用分類との対応関係を設定して、細密数値情報の土地利用分類別の排熱量と時間変動パターンを計算する。最後に、細密数値情報から得られる土地利用分類ごとの土地利用面積を用いて単位面積あたりの人工排熱量すなわち人工排熱原単位を求める。なお、専用独立住宅、集合住宅、住商併用建物については低層と中・高層の区別が付かないため、東京都土地利用現況調査結果のうちの中高層化率（階数が 3 階以上の建物の割合）を用いてそれぞれの建物における低層と中・高層の割合を求めた。

表 5 建物用途分類と土地利用分類の対応関係

細密数値情報の土地利用分類	一般低層住宅地・密集低層住宅地	中・高層住宅地	商業・業務用地	その他の公共公益施設用地	工業用地
土地利用現況調査の建物分類	専用独立住宅 集合住宅 住商併用(1/2)		専用商業 住商併用(1/2) 宿泊遊興 スポーツ興業 事務所	官公庁 厚生医療 教育文化	専用工場 住居併用工場 倉庫運輸 農林漁業施設

自動車排熱についても同様に、23 区内の燃料販売実績に基づく自動車排熱量（末次ら, 2000）と細密数値情報に基づく 23 区内の道路面積から算出される単位道路面積あたりの自動車排熱原単位を設定した。これらの値と時間変動を表 6 に示す。工業用地については、原単位は末次ら（2000）の検討結果に基づき算出し、時間変動パターンは商業・業務用地と同じと仮定した。

人工排熱には潜熱と顕熱の区別が必要である。ビル屋上の冷却等では潜熱の割合が大きい、各部屋のエアコン室外機からは顕熱が多く放出される。渡辺・尾島（1994）の推定によると、冷却塔方式の場合、顕熱、潜熱比は 9:91、空気対空気熱交換方式の場合は、顕熱、潜熱比は 92:8 であったとしている。また、都市キャノピーの熱収支観測（池田ら, 1996；神田ら, 1997）においても、冷却塔に起因すると見られる無視できない量の潜熱輸送があることが示されている。そこで、本研究では建物用途別に人工排熱の顕熱と潜熱への配分比率を仮定した。住宅用地では全ての建物が空気対空気熱交換方式により排熱を放出するものと仮定し、顕熱と潜熱の配分比率は渡辺・尾島（1994）を参考に 9：1 とした。また、それ以外では東京都の資料や牧村ら（1994）の結果を参考に、冷却塔方式が 50%、空気対空気熱交換方式が 50%と仮定し、顕熱と潜熱の配分比率は 1：9 とした。自動車排熱は 100%顕熱の形で放出されると仮定した。国土数値情報を適用する範囲（土地利用分類の「建物用地」）については、細密数値情報から得られる首都圏の建物用地面積の割合で重み付けをした顕熱と潜熱の排熱原単位及び時間変動パターンを用いた。

人工排熱量を定量化する際、いくつかの研究では人工排熱量がエネルギー消費量に等しいとする取り扱いをしている。しかし、建物屋根面や壁面からの伝導熱や窓等を通じて室内に伝わる短

波放射・長波放射は都市大気から顕熱として室内に持ち込まれる循環熱量ではなく、太陽エネルギーに起因する熱量であるから、この分はエネルギー消費による排熱以外の分として人工排熱に付加する必要がある。そこで、今回作成した土地利用分類別の人工排熱原単位には給湯、電力消費に伴う熱量ばかりでなく、室内の熱負荷のうち、伝導熱や透過熱も外気に放出される分として加えた。すなわち、式(39)のうち、①～④までを人工排熱量としてカウントし、⑤は室内と室外の間で循環している熱量で、①と②に比べると小さいと想定される。①～④は機器投入エネルギー量 E と冷房需要(除去熱量) Q の和 $E+Q=(1+1/\eta)E$ により算出した。 E と η の値は末次ら(2000)の検討結果を参考にした。

$$\text{冷房排熱量} = \underbrace{\text{建物伝導熱}}_{\text{①}} + \underbrace{\text{放射透過熱}}_{\text{②}} + \underbrace{\text{電力消費に伴う熱}}_{\text{③}} + \underbrace{\text{給湯に伴う熱}}_{\text{④}} + \underbrace{\text{外気からの移流熱}}_{\text{⑤}} \quad (39)$$

以上のようにして算出される土地利用分類別の排熱の顕熱分原単位、潜熱分原単位、時間変動パターンを表6にまとめる。

表6 人工排熱の原単位と時間変動

	商業・業務 用地	公共公益 施設用地	中高層 住宅地	低層 住宅地	工業用地	道路用地	建物用地
顕熱原単位 (W/m ²)	53.28	7.79	19.47	10.49	38.23	53.30	17.42
潜熱原単位 (W/m ²)	43.08	6.30	2.16	1.17	30.92	0.00	8.93
0～1時	0.113	0.292	0.072	0.072	0.113	0.663	0.119
1～2時	0.087	0.282	0.072	0.072	0.087	0.589	0.113
2～3時	0.098	0.302	0.072	0.072	0.098	0.486	0.119
3～4時	0.095	0.322	0.072	0.072	0.095	0.424	0.122
4～5時	0.098	0.322	0.072	0.072	0.098	0.452	0.122
5～6時	0.070	0.322	0.072	0.072	0.070	0.658	0.118
6～7時	0.084	0.322	0.072	0.072	0.084	1.097	0.120
7～8時	0.525	1.031	0.336	0.336	0.525	1.220	0.495
8～9時	1.156	1.583	0.456	0.456	1.156	1.275	0.777
9～10時	1.406	1.610	0.552	0.552	1.406	1.278	0.885
10～11時	2.358	1.775	0.576	0.576	2.358	1.282	1.084
11～12時	2.280	1.933	0.744	0.744	2.280	1.254	1.211
12～13時	2.220	1.861	0.984	0.984	2.220	1.176	1.345
13～14時	2.323	1.938	1.464	1.464	2.323	1.244	1.690
14～15時	2.125	1.845	1.608	1.608	2.125	1.290	1.735
15～16時	2.311	1.928	1.248	1.248	2.311	1.312	1.545
16～17時	2.017	1.752	1.056	1.056	2.017	1.314	1.339
17～18時	2.111	1.673	1.128	1.128	2.111	1.314	1.387
18～19時	0.899	0.878	1.128	1.128	0.899	1.241	1.045
19～20時	0.763	0.619	3.000	3.000	0.763	1.095	2.201
20～21時	0.507	0.530	3.312	3.312	0.507	0.939	2.347
21～22時	0.118	0.353	2.880	2.880	0.118	0.875	1.969
22～23時	0.118	0.242	1.608	1.608	0.118	0.781	1.116
23～24時	0.118	0.282	1.416	1.416	0.118	0.742	0.998

3. 屋上緑化と河川の水面再生による気温低減効果の試算

3. 1 試算の概要

ここでは東京都心部で屋上緑化と河川の水面再生による気温低減効果の試算を行う。計算対象領域は関東平野を含む 366km 四方の母領域（領域 1）と東京 23 区を含む 114km 四方のネスト領域（領域 2）である。

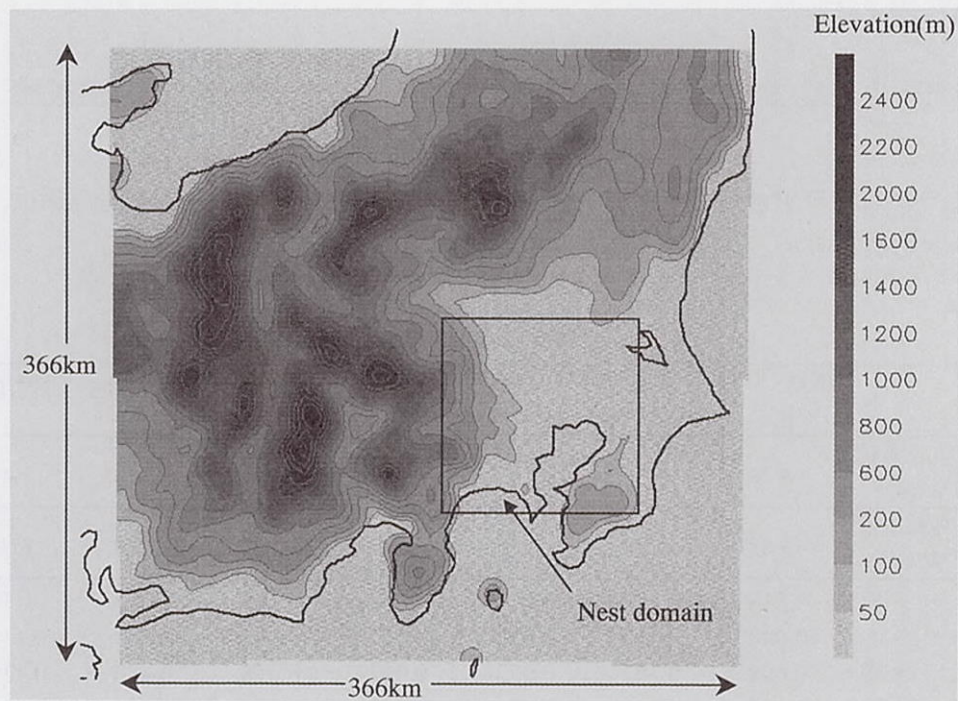


図 10 領域 1 の計算範囲と標高分布

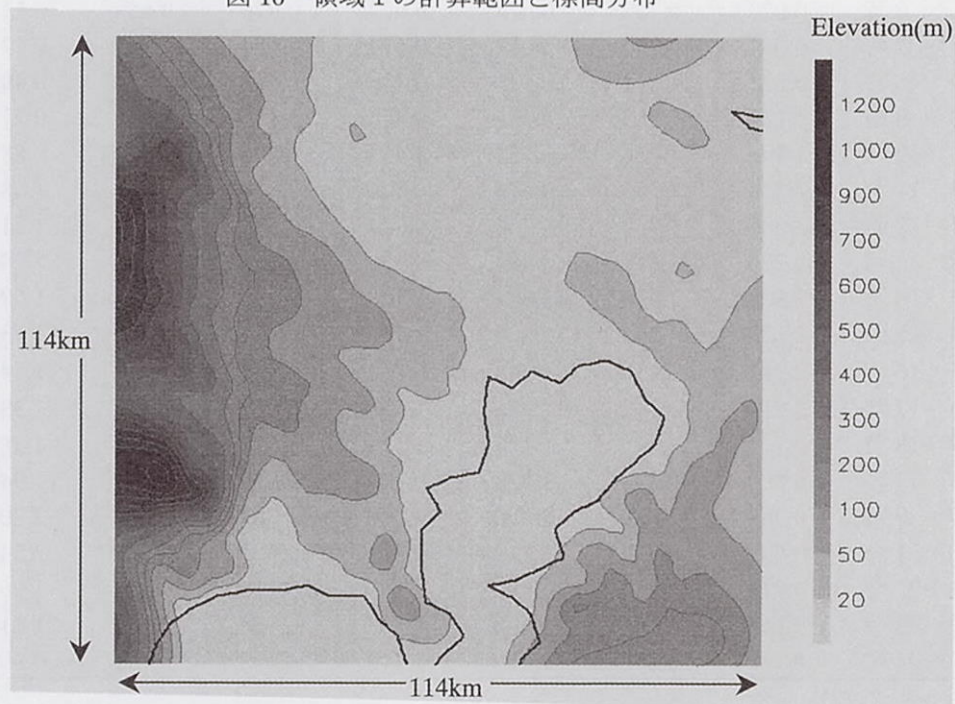


図 11 ネスト領域の計算範囲と標高分布

領域1の解像度は6km, 計算メッシュ数は61×61, 領域2は2km, 57×57とした。鉛直方向は100mbの等圧面までを25層に分割した。この場合、モデル最下層の厚さはおよそ15mとなる。領域1の初期条件、境界条件には計算対象日を含むNMC (National Meteorological Center) の全球解析データを用いた。本データの解像度は2.5°×2.5°で、データには各等圧面上における風速u, v成分、相対湿度、仮温度、海上気圧、SSTなどが含まれている。ネスティングの手法としては、領域2の計算結果を領域1の結果にフィードバックする2-WAY NESTINGを用いた。雲モデルはなし、微物理モデル (moisture model) は雪、氷を含まない暖かい雨 (warm rain)、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を採用した。地表面が受ける短波放射量と長波放射量は、雲による吸収と散乱を考慮して算出される。雲量は、大気中の水蒸気量と相対湿度を変数として、低層、中層、高層の別に算出される。

土地利用条件としては、細密数値情報が整備されている地域では第5期 (1994年版) の細密数値情報を使用し、それ以外の地域では国土数値情報 (1992年版) を用いた。計算領域における各土地利用分類の面積率分布を図12～図21に示す。これらの図からわかるように、ネスト領域の境界部では3×3メッシュごとに同じ土地利用条件を与えている。細密数値情報に基づく東京23区内及び細密数値情報の全対象域内における土地利用分類別の存在割合を表8に示す。

表7 各物理モデルの概要

基礎方程式	Three-dimensional non-hydrostatic dynamics
境界層モデル	Mellor and Yamada closure model level 2.5 (Janjic, 1990, 1994)
雲モデル	None
放射モデル	Simple cooling
微物理モデル	Warm rain scheme
ネスティング	Two way
境界・初期条件	NMC global analysis
地表面モデル	Noilhan Planton Model, six-layer soil model, Subgrid parameterization

表8 細密数値情報に基づく東京23区及び全対象域の土地利用比率

土地利用分類	東京23区					全対象域
	1974年	1979年	1984年	1989年	1994年	1994年
1)山林・荒地等	0.9	1.0	0.8	0.8	0.7	19.1
2)田	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	13.7
3)畑・その他の農地	3.3	3.2	2.9	2.8	2.5	14.5
4)造成中地	2.3	2.7	2.6	1.4	1.9	1.0
5)空地	7.2	6.5	5.9	6.0	5.3	5.5
6)工業用地	4.4	4.3	4.1	3.8	3.7	3.6
7)一般低層住宅地	21.6	22.6	22.2	22.3	22.0	14.5
8)密集低層住宅地	7.1	7.5	7.3	7.1	7.0	1.7
9)中・高層住宅地	2.9	3.1	3.7	4.3	4.7	1.6
10)商業・業務用地	12.1	12.6	12.9	13.1	13.5	4.4
11)道路用地	16.9	15.6	15.4	15.5	15.3	7.7
12)公園・緑地等	5.3	5.5	6.0	6.6	6.7	2.8
13)その他の公共公益施設用地	10.3	10.2	10.6	10.9	11.3	5.0
14)河川・湖沼等	4.8	4.6	5.0	5.1	4.8	4.1
15)その他	0.7	0.5	0.5	0.5	0.4	0.7

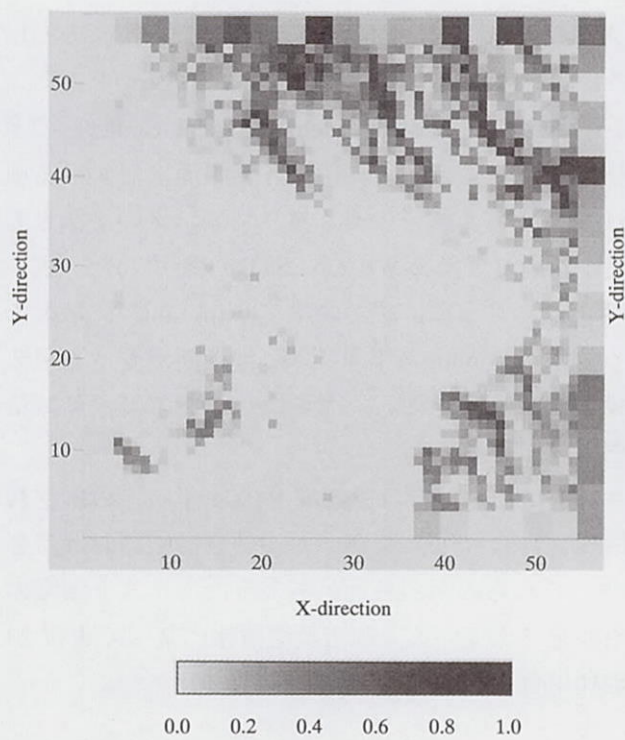


図 12 水田の面積割合

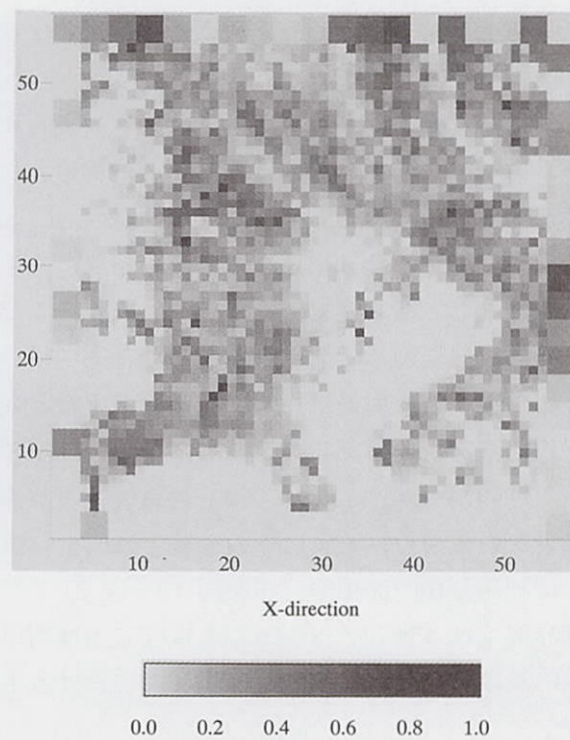


図 13 畑・造成地・その他用地の面積割合

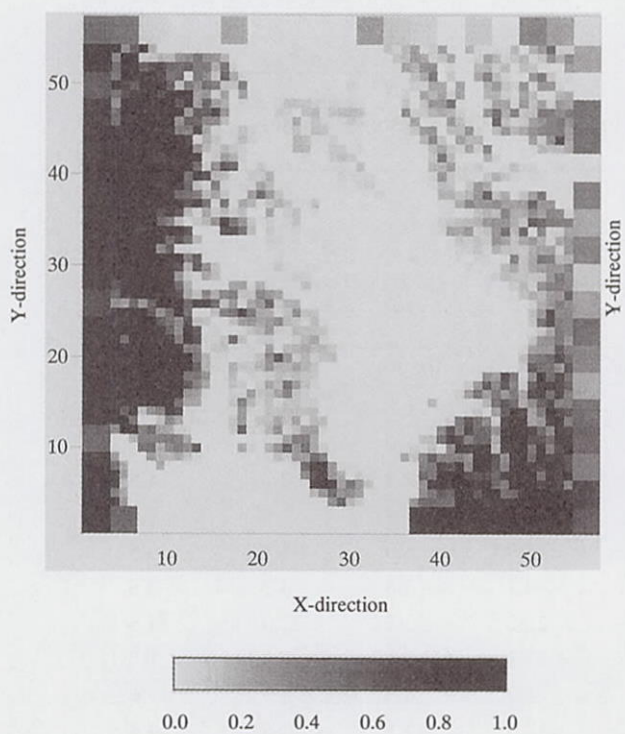


図 14 森林・荒地の面積割合

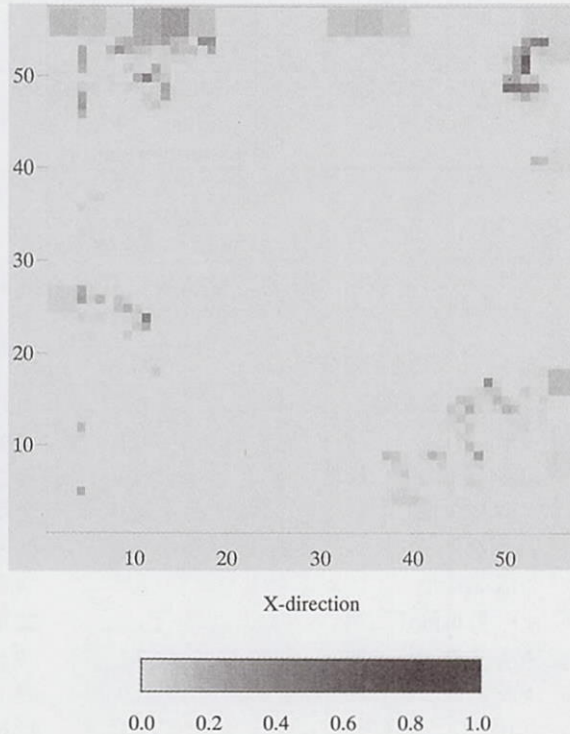


図 15 建物用地の面積割合

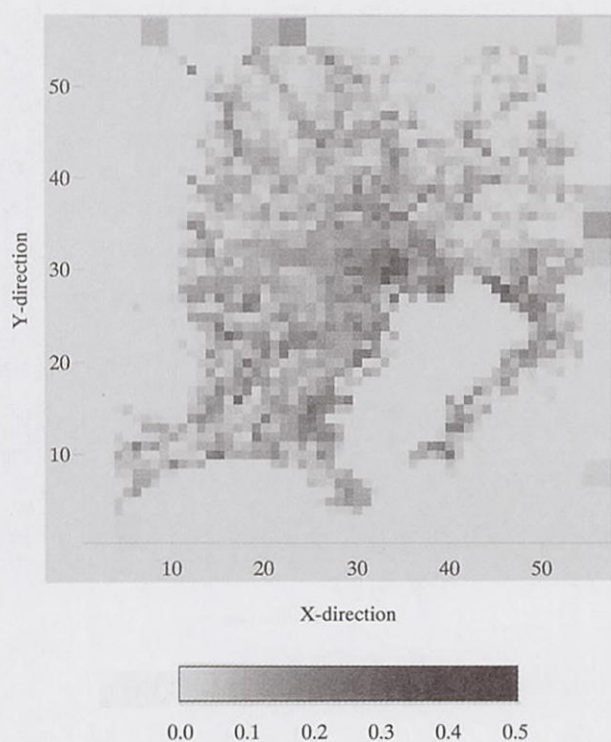


図 16 交通用地の面積割合

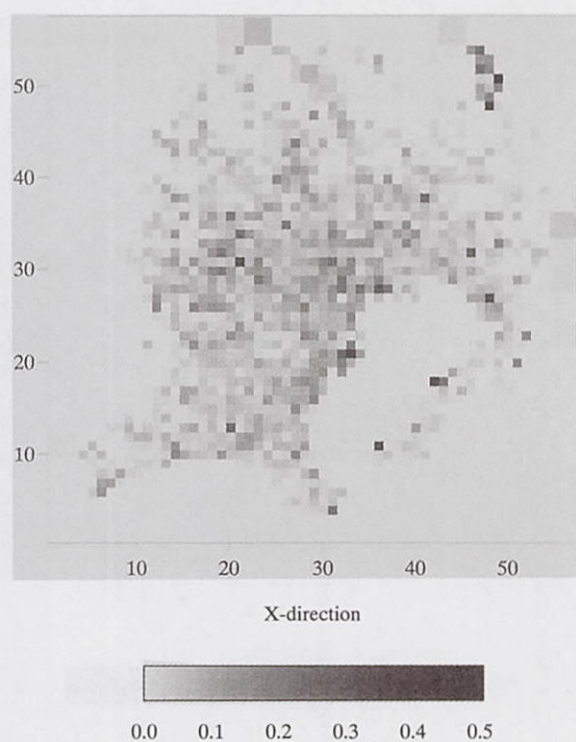


図 17 公共公益施設用地の面積割合

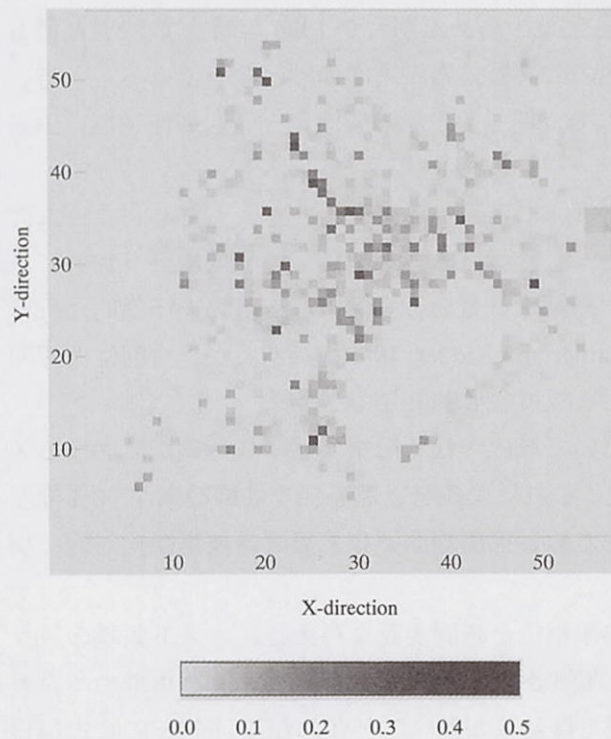


図 18 公園・緑地の面積割合

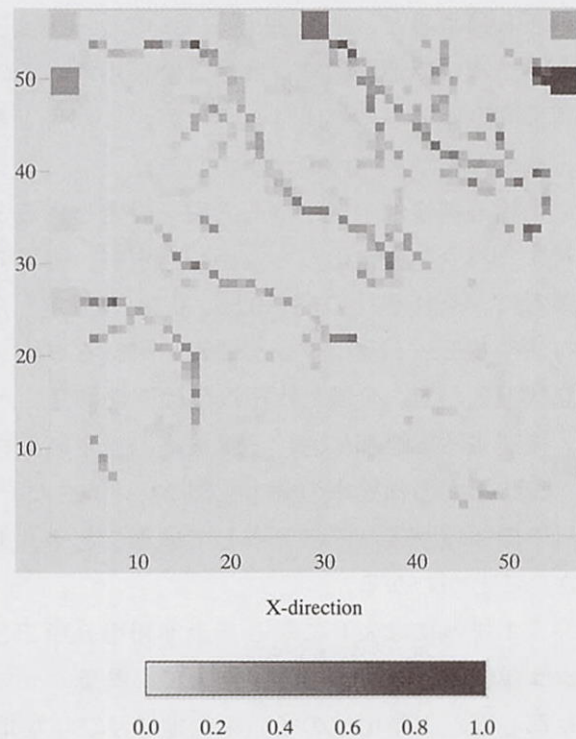


図 19 内水地の面積割合

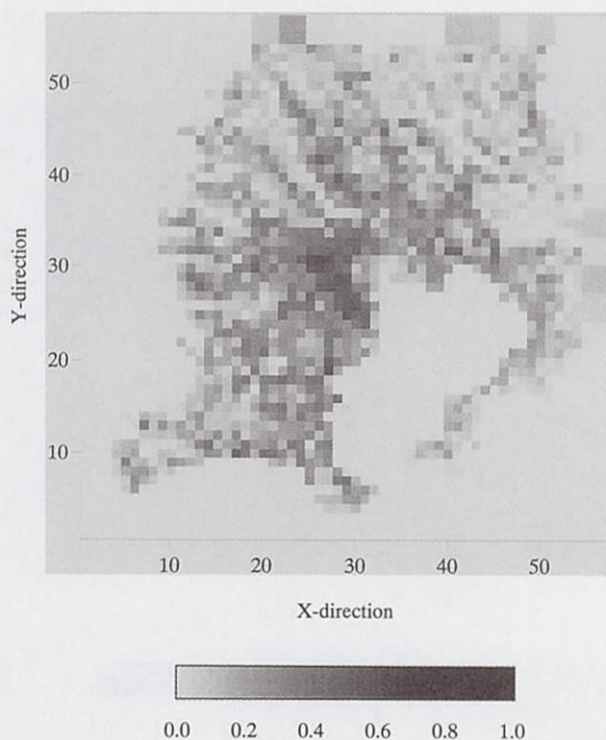


図 20 一般低層住宅・密集低層住宅の面積割合

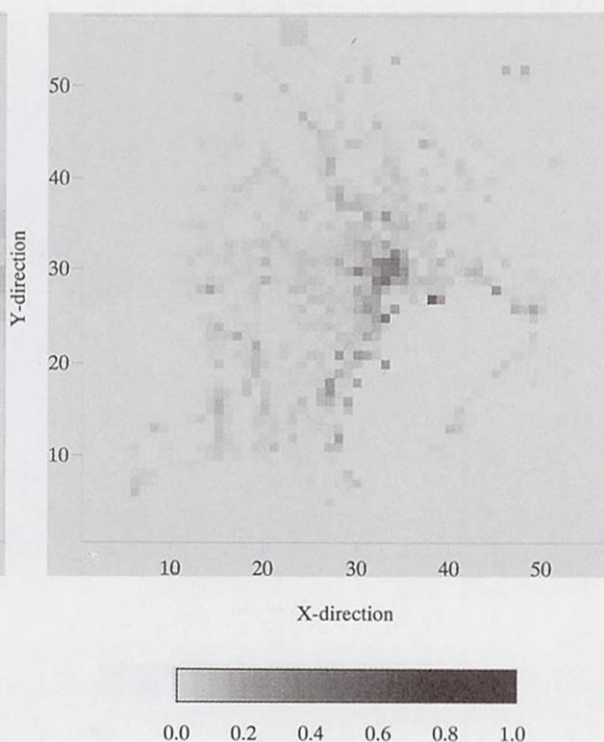


図 21 商業・業務用地の面積割合

表 8 によると、東京 23 区においては一般低層住宅地の占める割合が 1994 年時点で 22% と最も高く、次いで道路用地、商業・業務用地、その他の公共公益施設用地の順となっている。一方、首都圏全体でみると山林・荒地等が 19.1% と最大で、畑・その他の農地、一般低層住宅地、田の占める面積が大きいことがわかる。

土壌の種類は全域でローム層を仮定し、表 3、表 4 に示された値を用いた。ただし、ロームに対するパラメータのうち、飽和含水率、圃場容量、しおれ点の含水率については中野（1991）を参考に、それぞれ 0.68、0.55、0.20 と設定した。初期水分量の分布は水収支計算を予備的に行う方法やリモートセンシング情報を用いる方法（Hafner and Kidder, 1999）があるが、今回は仮想的な状況として、全域で水田以外は圃場容量、水田は飽和含水率を与えた。

後述する東京都における緑被率の算定結果を用いて算出される母領域とネスト領域におけるメッシュ平均の緑被率の分布を図 22、図 23 に示す。これによると、都心部では緑被率が 30% 程度以下の領域が広域的に分布していることや、東北本線、東部線沿いなどでは緑被率が相対的に小さいことがわかる。

人工排熱には表 6 に示した土地利用分類ごとの原単位と時間変動を与えた。ネスト領域のメッシュ単位に計算される日平均人工排熱量のうち、顕熱分を図 24 に示す。商業・業務用地の多い東京都心部と工業用地の多い京浜地域及び京葉地域で排熱量が多いことがわかる。図 25 には式 (41) により算定されるネスト領域の天空率分布を示す。天空率の最小値は 0.2 であった。

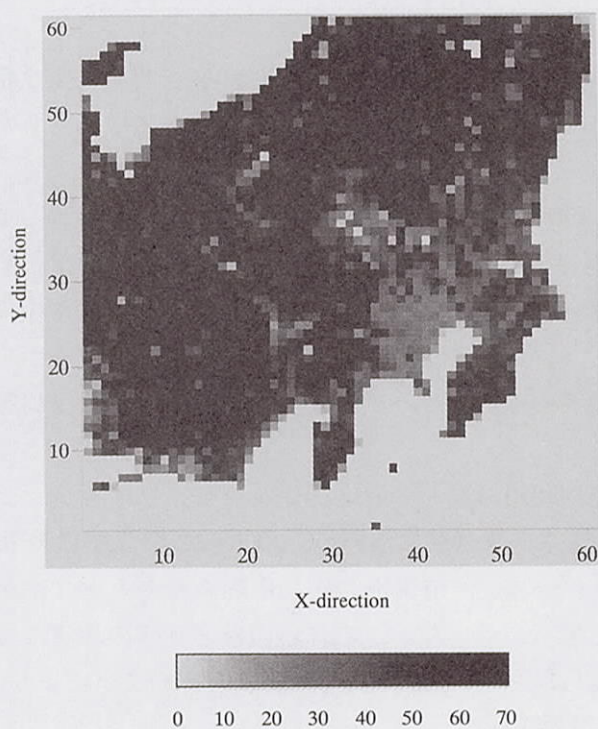


図 22 母領域の緑被率分布

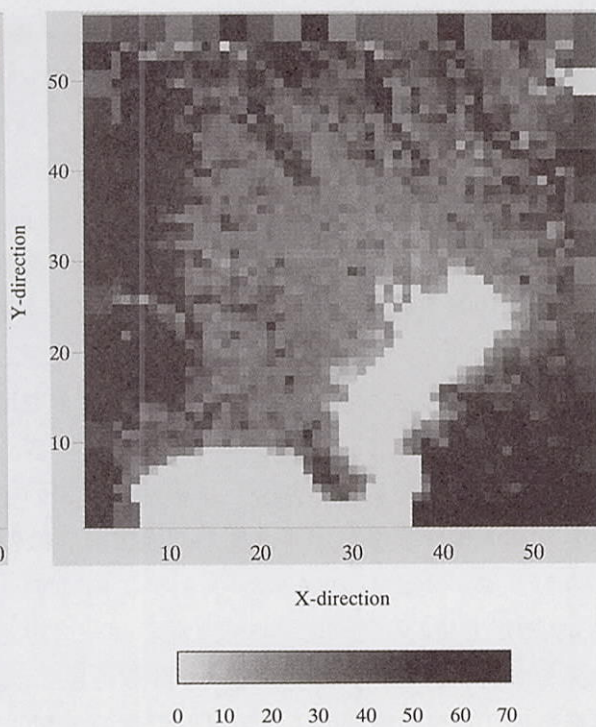


図 23 ネスト領域の緑被率分布

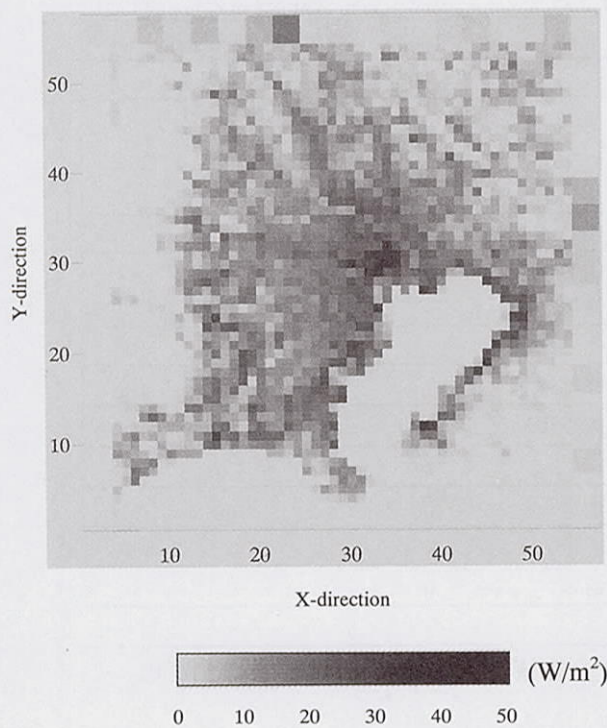


図 24 建物・道路からの日平均人工排熱量（顕熱）

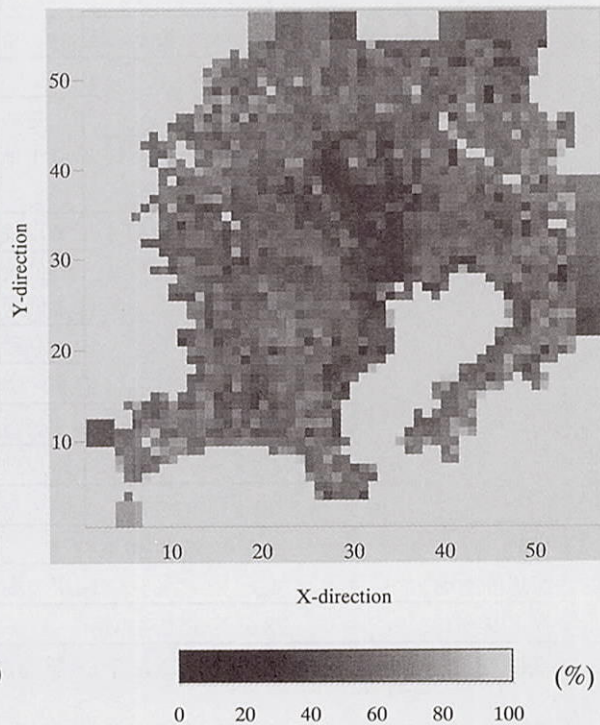


図 25 天空率の分布

3. 2 屋上緑化の効果に関する計算条件

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推定する。それ以外の領域についても、東京 23 区で求められた値を適用した。

東京都都市計画局による緑被率は、1998 年版の東京都の現存植生図から読みとった樹林地、草地、農地それぞれの占める割合、1998 年版公園調書（東京都建設局）に基づく公園内の緑が占める面積、1998 年版緑化に関する調査報告（東京都建設局）に基づく街路樹（歩道上の植栽や中央分離帯・交通島の緑地）の占める割合等を計算し、ランドサットによる対象域全体の緑被率からそれぞれの緑の占める割合を差し引いた量を宅地等の緑が占める割合としている。また、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みどり率の値を表 9 に示す。将来の緑被率は緑の東京計画（東京都資料、2000）に基づき 15 年後のみどり率が現状の 28.6%から 32%に増加するケースと、市街地の建物用地のみでみどり率が 16.4%増加してみどり率が 45%となるケースを対象とした。なお、これらのみどり率の数値には水面分が含まれる。Oke (1972) の計算結果によれば、45%の蒸発散可能面積を持つことにより、蒸発散面 100%の場合による気温低下量の 8 割弱が達成される。

表 9 東京都区部におけるみどり率の推定値（現状）と計算で用いる緑地率、緑被率の将来想定値

		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
				畑・その他の農地				
草地		1.2	1.2	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	-	-	-	-	-

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

緑地率（各土地利用面積に占める緑地の割合）と緑被率（緑地内で実際にみどりで覆われている面積の割合）は、各土地利用について式（40）が成り立つように設定した。すなわち、緑被率と緑地率は気象計算用の土地利用分類ごとに一定値とし、建物用地と道路用地以外の土地利用分

類における緑地率は 100%と定めて式(40)から緑被率を求める。また、建物用地と道路用地については緑被率を 100%と仮定して、式(40)から緑地率を逆算する。土地利用分類別の土地利用面積は細密数値情報の値を用いる。

23 区土地利用分類別のみどり率＝

$$\text{土地利用分類別の土地利用面積} \times (\text{緑地率} / 100) \times (\text{緑被率} / 100) / 23 \text{ 区土地利用面積} \quad (40)$$

表 8 と表 9 を比べるとわかるように、東京 23 区の水面は細密数値情報では 4.8%，植生図から読みとられる水面積は 4.3%であるため、0.5%の違いが生じる。気象計算では細密数値情報に基づく土地利用分類ごとの面積をそのまま用いる。したがって、計算上の 23 区における水面積は東京都のみどり率の試算値よりも 0.5%高い値となっている。

建物用地内の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を調整した。細密数値情報では、建物用地には 6 分類あるが、いずれの分類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建物用地の緑地率が 50%必要となり、現状より 26.4%の緑地率増が必要である。

屋上緑化のモデル化にあたっては、建物用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。屋上緑化に必要な土壌の厚さを 20cm 以上にとれば建物への熱伝導は無視できると考えられることから、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・緑地の分類に算入する。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。残る建物部分についてのみ、表 1 のパラメータを用いた地表面温度の算出を行う。建物部分の面積が屋上緑化により減少するが、排熱は減少しないとして取り扱う。道路用地については、主としてアスファルト舗装に覆われている歩道や車道と、街路樹などの緑被部分に分け、緑被部分は森林・荒地等の分類に算入した。建物用地と道路用地における緑地、街路樹等の取り扱いを図 26 に模式的に示す。

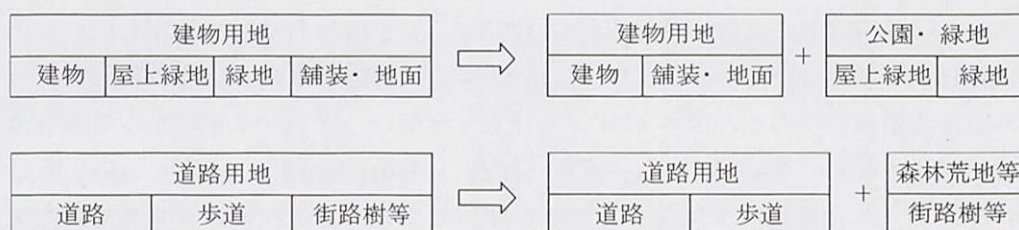


図 26 建物用地、道路用地内の緑の取り扱い

3. 3 水面の再生効果に関する計算条件

水面の再生効果を試算するにあたり、再生可能性を前提にシナリオを作成する必要がある。

現状の水面積に関して、平成元年度の国土数値情報によると、23 区内の「内水地」の面積比率は 6.3%である。さらに、細密数値情報(1994 年)の分類「河川・湖沼等」では 23 区全面積に対する水面積の割合は 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も小さいものと推定される。東京都の土地利

用現況調査によると、23 区内の水面・河川・水路の面積比率は、昭和 56 年度の 7.4%から平成 8 年度は 5.1%に減少している。

昔の水面積については、松浦・島谷（1987）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がある。これによると、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、水空間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。松浦・島谷によると、水面減少の主たる原因は 1）隅田川河畔の埋め立て、2）江戸城の堀の役目も兼ねた運河、小河川の埋め立て、暗渠化、3）江東区の木場の埋立てであるとしている。このような埋立てには戦後復興や高度経済成長に伴う都市化が深く関わっている。昭和初期には武蔵野台地上の零細河川が徐々に姿を消していき、戦後復興のために、旧江戸城の外濠をはじめとして、運河が焼け跡の残骸、焼土などによって埋め立てられ、その後は市街地の中小河川も谷筋の排水路としての役割しか果たさなくなり、道路化していった（鈴木，1978）。江東地区の農業用水路網は、30 年代の経済の高度成長期における都市化の影響により、雑排水路・下水道的な存在となっていた（鈴木，1978）。

東京の河川暗渠化の実態としては、戦後から昭和 30 年代にかけて、焼け跡のがれき処理等により埋め立てられた河川や後述の 36 答申以前に下水道化された河川が 11 河川あり、河川延長 30.8km のうち、29.2km が暗渠化された。その後、昭和 30 年前後の都区部の広範囲にわたる水害多発がきっかけとなり、昭和 36 年 10 月の「東京都市計画河川下水道調査特別委員会」より 14 河川を下水道幹線とすべきであるとの報告がなされた（八十川ら，1998）。これは通称、36 答申と呼ばれている。これにより、順次下水道幹線としての整備がなされ、河川延長 80.8km のうち、56.5km が暗渠化されることとなった。また、昭和 46 年 3 月には「江東防災総合委員会」から江東地区の防災事業に関する基本方針が報告され、他の方式と暗渠化・埋め立て方式の組み合わせで江東内部河川の整備をすべきとされた。その後、昭和 50 年代になり、暗渠化・埋め立て対象河川の整備を促進するところとなった。その後、社会情勢の変化に伴い行われた埋め立て・覆蓋化の見直しについては八十川ら（1998）に記されている。

23 区全体での水面積に関しては、八十川ら（1998）が廃止河川の延長を算出している。それによると、明治 16 年、明治 42 年、大正 14 年、昭和 12 年の地形図と平成 7 年度の地形図を比較し、区部全体の廃止流路は全長の 78%にものぼっている（ただし、いつの時点に対して 78%廃止されたかは明確に記述されていない）。また、高橋・尾島（1986）の結果によると、1909 年から 1980 年の 71 年間で 57%の水際線減少になっていると報告している。これらの調査結果でも廃止された河川の水面積までは明らかとされていない。最近の水面積の状況について、細密数値情報や東京都の調査結果に基づき判断すると、ほぼ横這い状態にあると言える（図 27）。

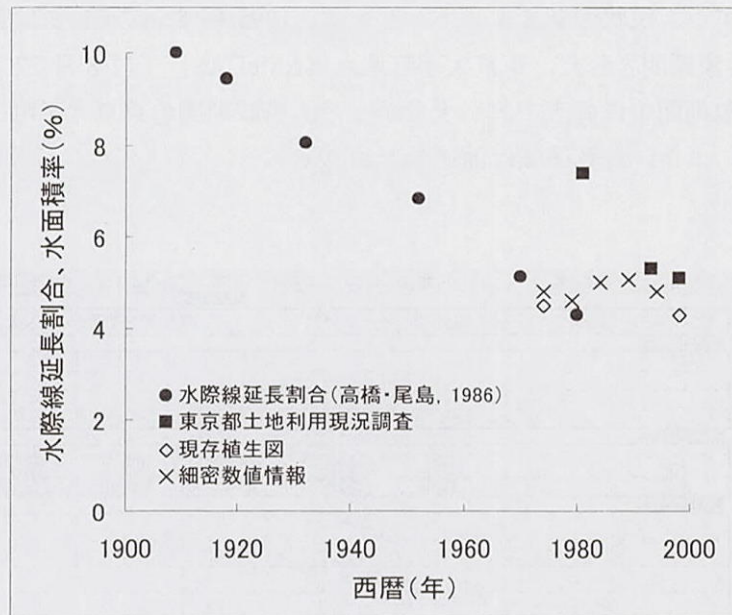


図 27 各種資料から算出される水面積率及び水際線延長割合

水際線とは河川・運河等の兩岸及び湖沼等の全周距離を足したもの。

割合は 1909 年（明治 42 年）を 10 としたときの各年における水際線延長を意味する。

東京都土地利用現況調査による 1981 年の値は 25m メッシュのポイントサンプリングに基づく。

都市河川では平常時における流量が減少したという実態があるが、それに伴い水面幅も減少していると仮定できることや高速道路が河川上に設置されたことも更なる水面の減少要因であるが、これらは統計上現れてこない。このような要因も加味し、現状で得られる調査結果をもとに判断すると、23 区全体では河川等の占有面積が過去およそ 100 年間で 10%から 5%弱に減少したものと想定される。

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。八十川ら（1998）は、廃止された河川の上部は公園や緑道、道路、宅地などに転用されており、廃止流路の上部空間は 75%が道路に転用され、下部空間は水路や下水道として利用されているものが 71%，下部空間の 33%は覆蓋部分で残りは埋め立て部分であるというような実態を明らかにしている。蓋掛けされた河川が再生された事例は我が国では存在せず、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。しかしながら、埋められた河川の再生に関する意識は徐々に高まる兆しを見せ、フランスにおける再生事例も紹介されている（石川，1999）。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想定した。計算上は、各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）がせせらぎ用水や池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. 4 ヒートアイランド現象の再現結果

緑化や水面再生による気温低下の効果を明らかにするため、まず、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月の晴天日（8月23日21:00～8月26日5:00）を対象期間とした。東京大手町地点（AMeDAS）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。当該期間の東京大手町における気象状態は下図の通りである。また、計算領域は前述のとおりである。

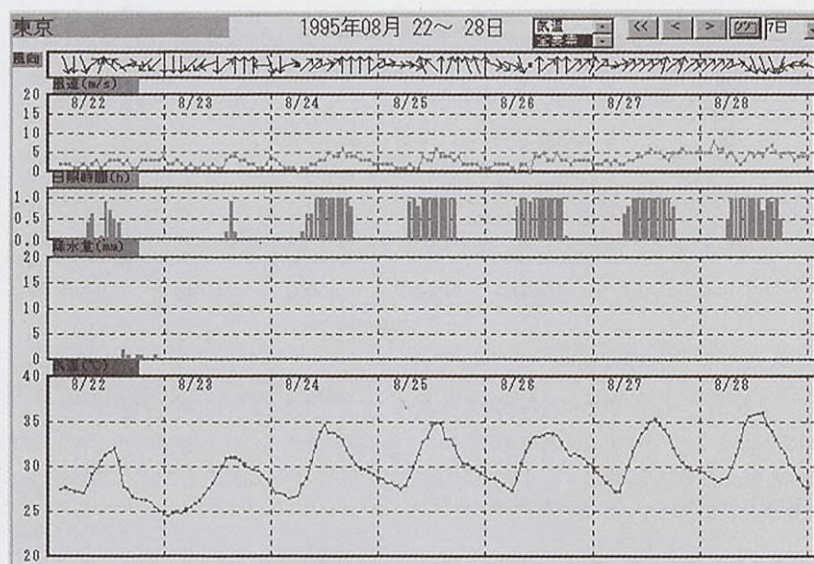


図 28 東京・大手町の気象状況

(a) 関東平野全体の気温・風速場の再現結果

関東平野を中心とした母領域の地上気温と地面からの高さ10mにおける風速ベクトルの時間変動を図29に示す。なお、日中と朝方・夜間では気温のレンジを変えて表示してある。母領域の計算結果では、東京都心部を中心とする高温域が終始形成されていることや、午前9時ごろから海風が発達し始め、相模湾からの南風、東京湾からの海風と九十九里海岸からの南東風が確認される。また、海風発達・侵入に伴い午後にかけて首都圏沿岸部の高温域が内陸側に移動することがわかる。25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海風の侵入が遮られ、北からの郊外風が発生している様子が確認される。この現象は、Yoshikado and Kondo (1989) による観測により明らかにされ、吉門 (1990) や Kusaka et al. (2000) による数値計算によっても現象が再現されている。これは、都市の存在により都市上空の気圧が低下するため、海風の侵入を妨げるように都市部より内陸に位置する郊外から都市部に風が吹き込むことによる。この現象も25日18時の時点では消滅しており、群馬県の内陸部へ熱せされた大気が移流している。

8月24日と8月25日の同時刻の結果を比較すると、25日の方が日中、首都圏地域の高温化傾向がより明瞭に現れている。また、12時と15時の結果を見ると、24日の方が25日に比べ、海風の前線域が内陸に侵入している。25日の場合、15時でも北東の風が都市部に吹き込んでいる。実際、浦和や越谷といった埼玉県南部の都市における気温の実測値（図30）をみても24日より25日の最高気温がそれぞれ0.8℃と0.6℃高い。このような違いには土壌水分量の時間変化の影響も関係しているものと考えられる。

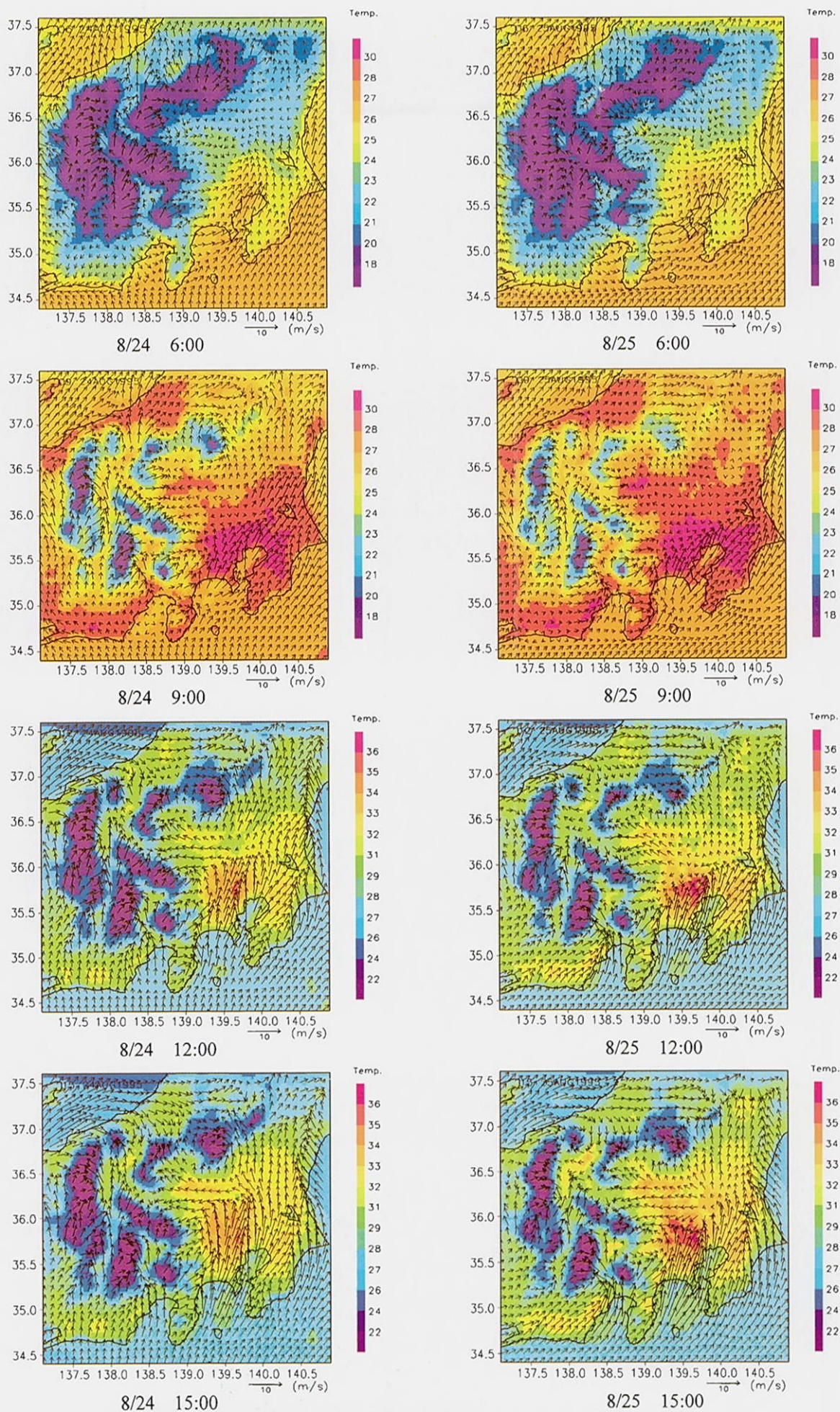


図 29 母領域の地上気温と風速ベクトル分布の計算結果
(9:00 までと 12:00 以降で温度のスケールが異なる)

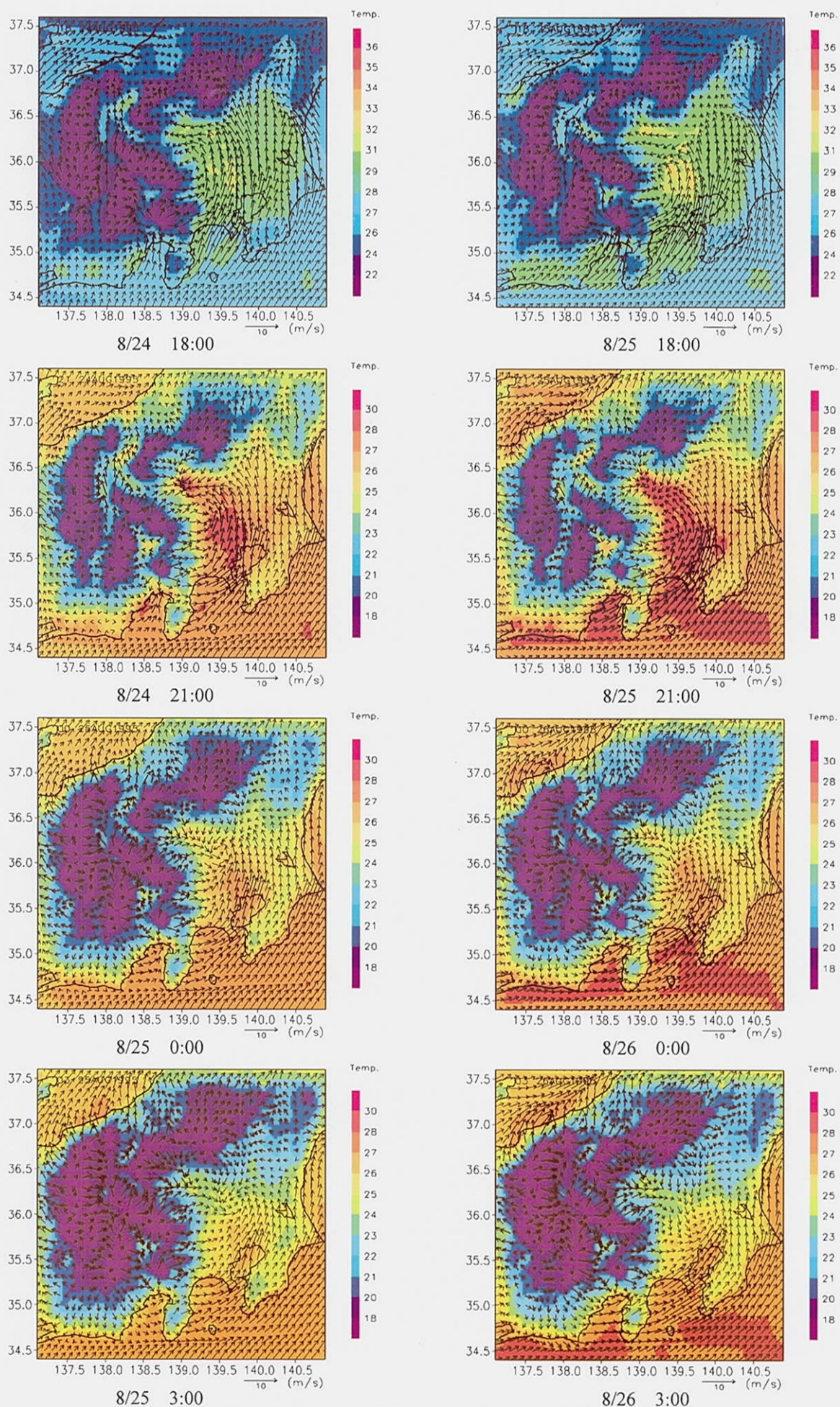


図 29 母領域の地上気温と風速ベクトル分布の計算結果 (つづき)
(18:00 までと 21:00 以降で温度のスケールが異なる)

(b) 東京都心部とその周辺における気温・風速場の再現結果

東京都心部を中心とする関東平野を対象としたヒートアイランドの解析については、これまで多くの論文が出されているが、都区部以外も含んだ多数地点で気温変動を定量的に検証した事例は数少ない。しかしながら、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の検証が必要である。

図 30 は東京都の AMeDAS 地点全てと埼玉県、千葉県、神奈川県などの代表的な AMeDAS 地点における実測気温と計算結果（地上 1.5m）を比較したものである。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ものの、実測値との乖離特性は地点ごとに異なることがわかる。新木場、横浜、船橋は東京湾に近接している地点であり、新木場では計算上の気温変動の振幅や最高気温が実測値よりも小さくなる傾向が見られる一方で、横浜では計算における 25 日の最高気温が実測値を若干上回っている。計算結果は 2km メッシュの代表気温であり、メッシュ内の土地利用分布は考慮しているが位置特性までは計算結果に反映されないのに対して、実測値は測定地点より風上側の土地利用の影響を受ける。従って、沿岸域のような土地利用の急変部では測定結果と計算値に違いが表れる可能性をはらんでいる。また、東京西部に位置する府中と青梅における計算結果では最高気温が高めに計算される傾向がみられる。一方、練馬、八王子、浦和、我孫子、越谷では実測値にかなり近い計算結果となっている。東京大手町では、他の地点に比べて夜間の計算結果と実測値の差が大きくなっている。これには人工排熱の推定精度や都市キャノピーの取り扱いの影響など様々な現象が影響していると考えられる。

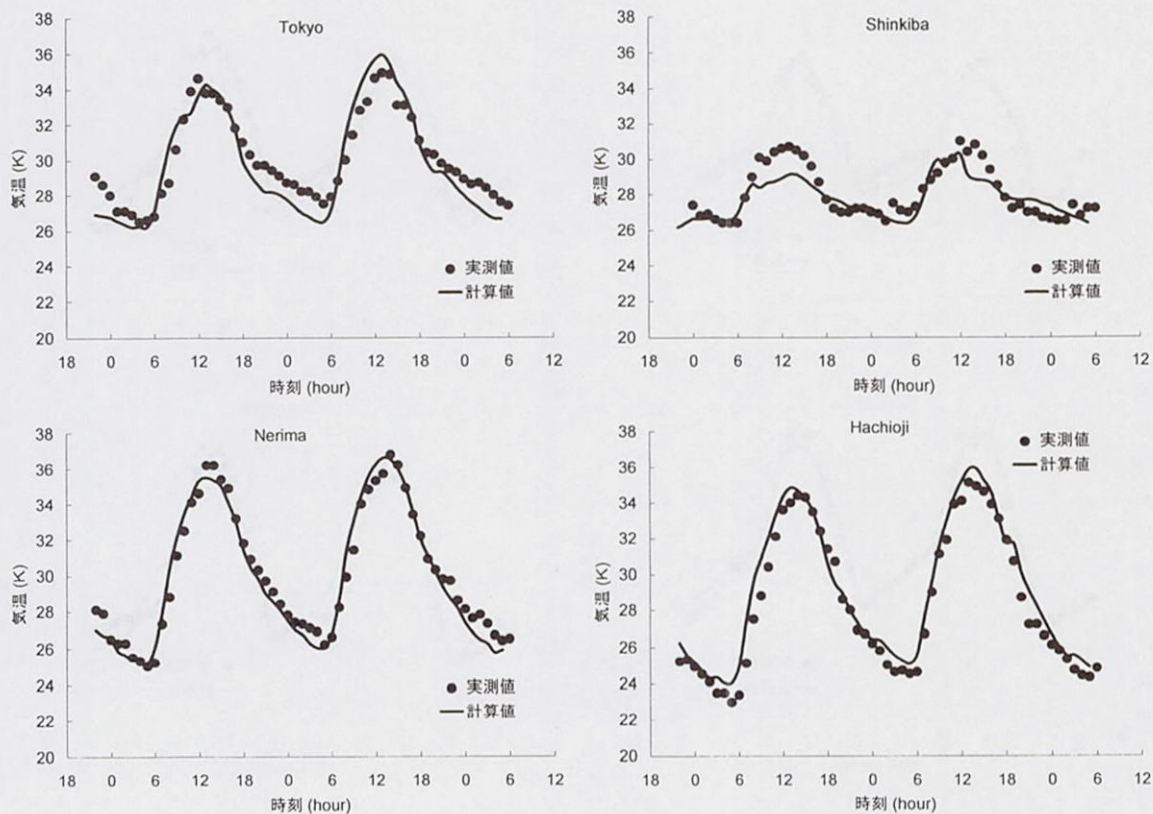


図 30 AMeDAS 地点における計算結果と実測値の比較

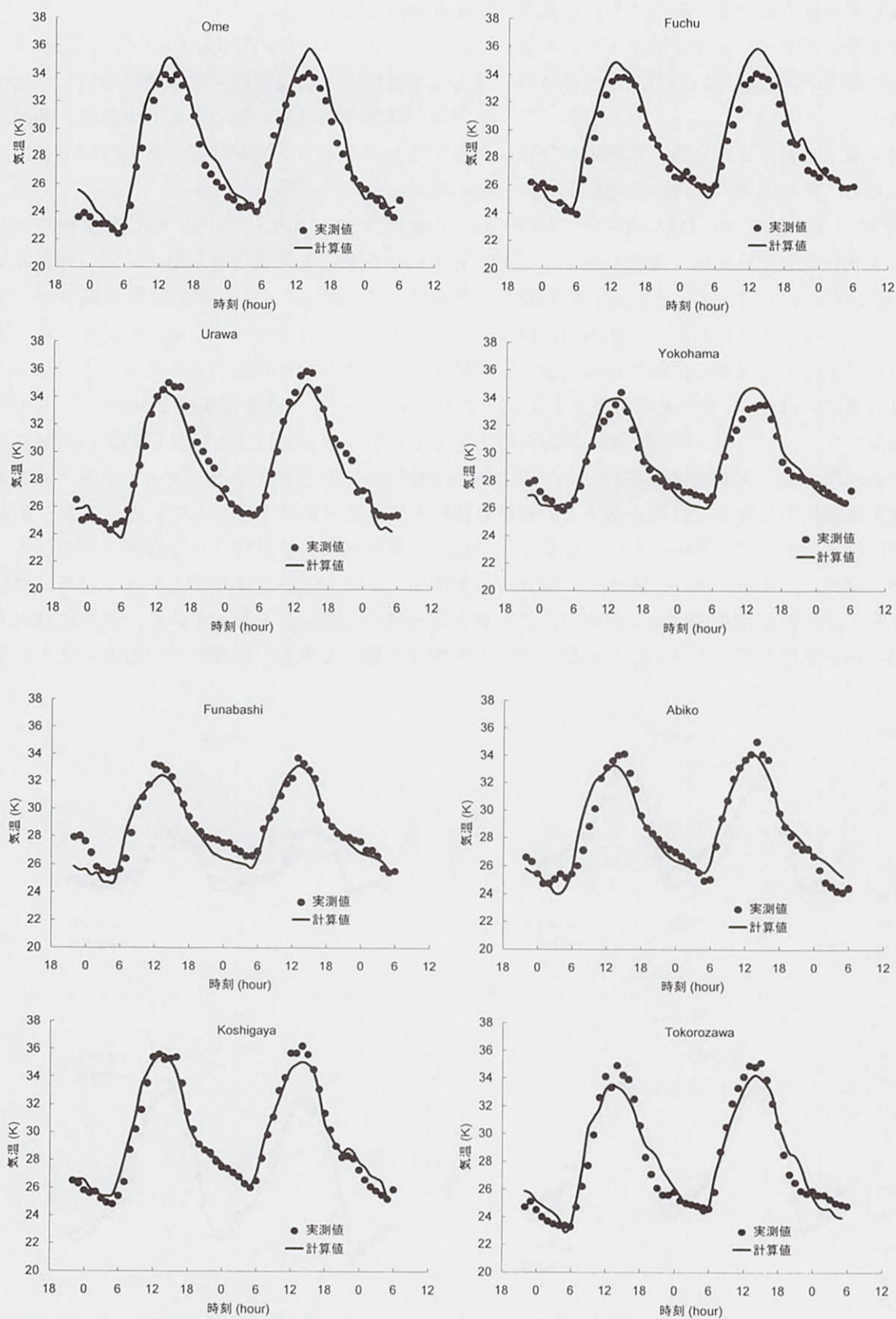


図 30 AMeDAS 地点における計算結果と実測値の比較 (つづき)

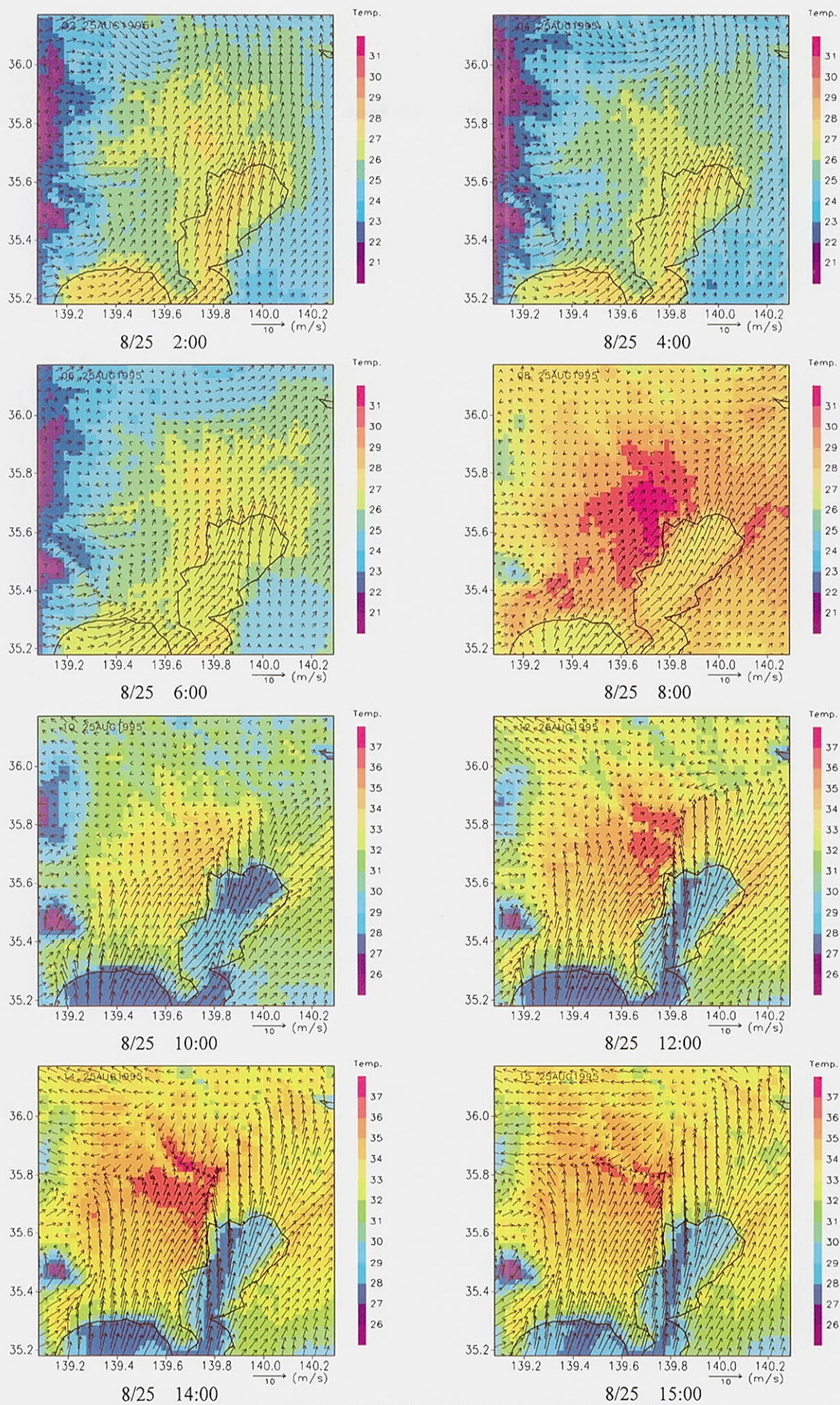


図 31 ネット領域の地上気温と風速ベクトル分布の計算結果
(8/25 8:00 までと 8/25 10:00 以降で温度のスケールが異なる)

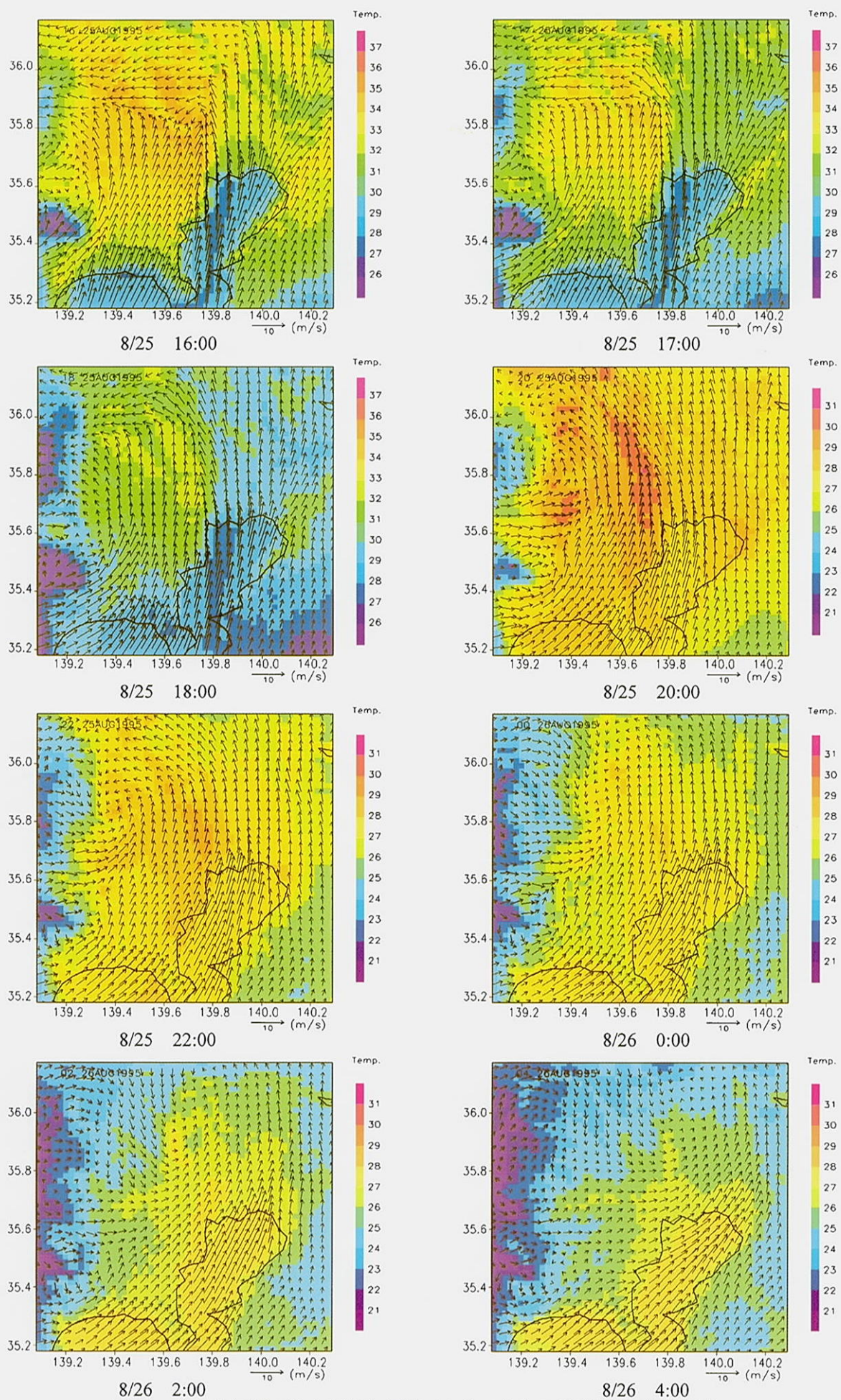


図 31 ネスト領域の地上気温と風速ベクトル分布の計算結果 (つづき)
(8/25 18:00 までと 8/25 20:00 以降で温度のスケールが異なる)

図 31 には対象期間内における地上 1.5m の気温と地上 10m の風速ベクトルを示す。25 日の午前 8 時頃から都心部の高温化が始まり、午前 12 時には荒川下流部の両岸、東京の下町地域で気温が 36℃を超える計算メッシュが出現している。この時点で、既に北側から都区部の高温域に吹き込む風速ベクトルが確認される。14 時には都区部の高温域が中央線に沿うような形で多摩方面へ拡大するとともに、荒川左岸域における北よりの風も強くなっている様子が伺える。14 時から 15 時にかけては都心部で気温が低下する傾向が現れ、海風の気圧傾度力が郊外風の気圧傾度力を上回るようになり、北よりの風が東京湾からの海風と合流するような形で西方に侵入していく様子が見られる。17 時以降は、高温域が埼玉県北西部に移動しつつ気温が低下していく状況が計算されている。

以上見てきたように、本研究で開発したモデルに関しては、都心部における夜間の冷却現象や一部地域における再現性の向上が今後の課題として残されるが、気温や風速場については概ね良好な結果を得ることができたと考えられることから、以下においては、前述してきた条件設定により各種対策の効果を試算する。

3. 5 屋上緑化によるヒートアイランド現象の軽減効果

屋上緑化等により東京 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 32 に示す。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。そのため、図 32 では時間帯にかかわらず都心部で屋上緑化の効果が認められる。さらに、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侵入し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℃以上上昇しているエリアが出現している。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、都心部の高温域も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。このことは、25 日の 10 時や 12 時のベクトル変化量を見ると、緑化域の北側で北向きのベクトルが大きくなっていることから明らかである。緑の増大による気温の変化には、地表面の熱収支が変わり、顕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海風の侵入による効果が複合されていると言える。

図 33 と図 34 には緑化実施前と実施後における顕熱輸送量、潜熱輸送量、地中伝導熱量（水中や建物への伝導熱量も含む）及び人工排熱量を示す。これらの値は東京 23 区内の一定範囲（北緯 35.7~35.8, 東経 139.75~139.85）の領域平均値である。人工排熱量は緑化実施前後で変化はない。みどり率が約 16%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約 1.5 倍になり、顕熱輸送量は緑化実施前の 50%程度に減少している。地中伝導熱量は日中では緑化実施前後であまり差がないが、夕方から夜間までは屋上緑化により地中から大気への放熱量が 20W/m²程度減少している。

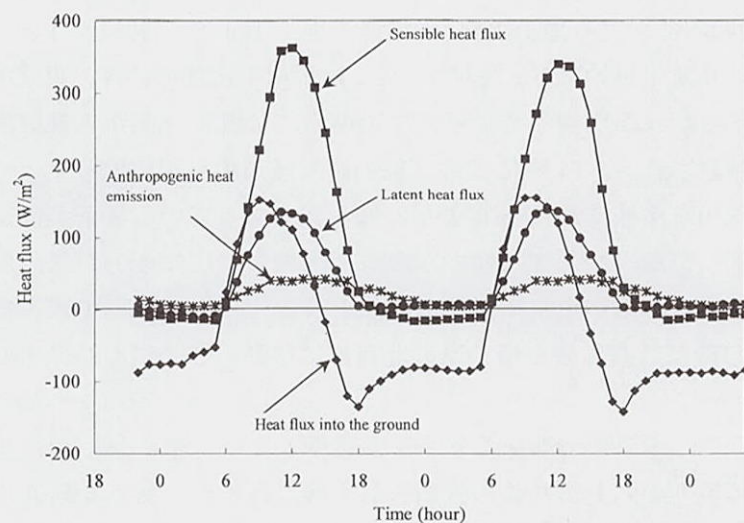


図 33 屋上緑化の実施前（現状）における領域平均の熱収支

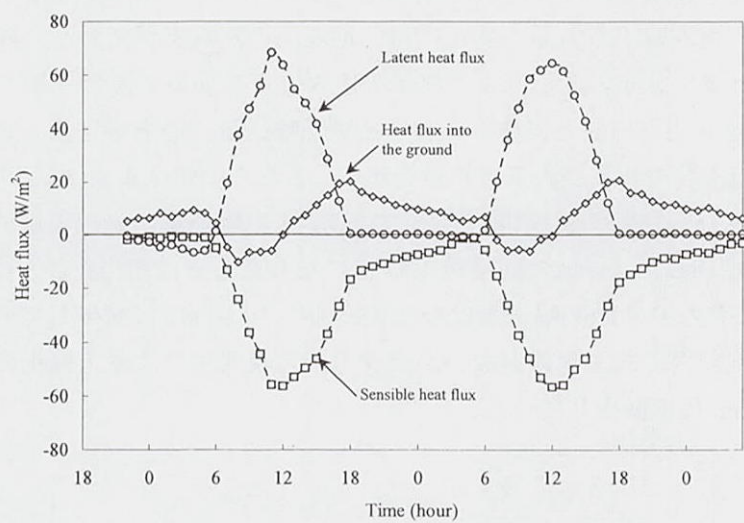
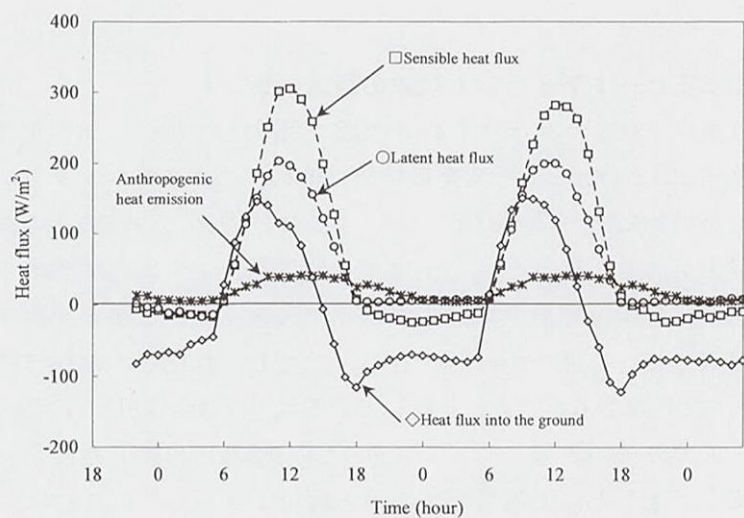


図 34 屋上緑化実施後の領域平均の熱収支（上）と各熱収支成分の変化量（下）
熱収支成分の変化量は、屋上緑化実施後から実施前を引いた値である。

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）の時間変動を図 35、図 36 に示す。図 32 の分布図でもみたように、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、新木場では低下量もわずかで、緑化対象域から外れる沿岸部に位置する横浜や船橋ではほとんど気温の変化はみられない。また、練馬の気温低下量は対象期間の 1 日目に比べて 2 日目の方が大きい。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。

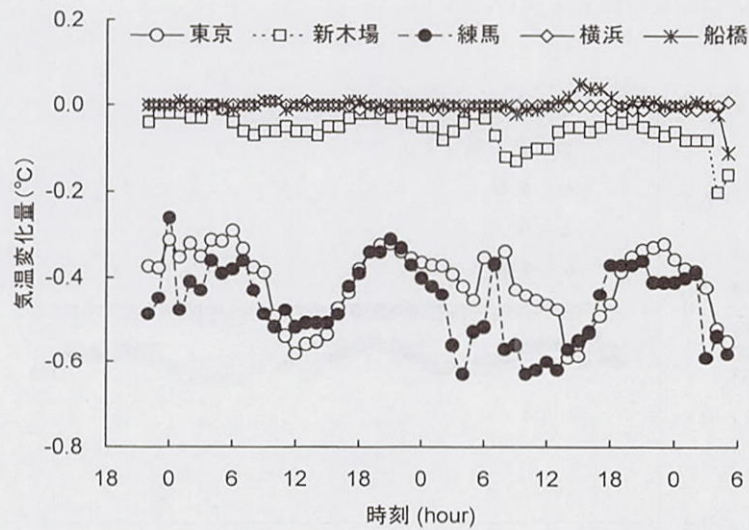


図 35 屋上緑化による気温変化量の時間変動（東京都区部及び沿岸部）

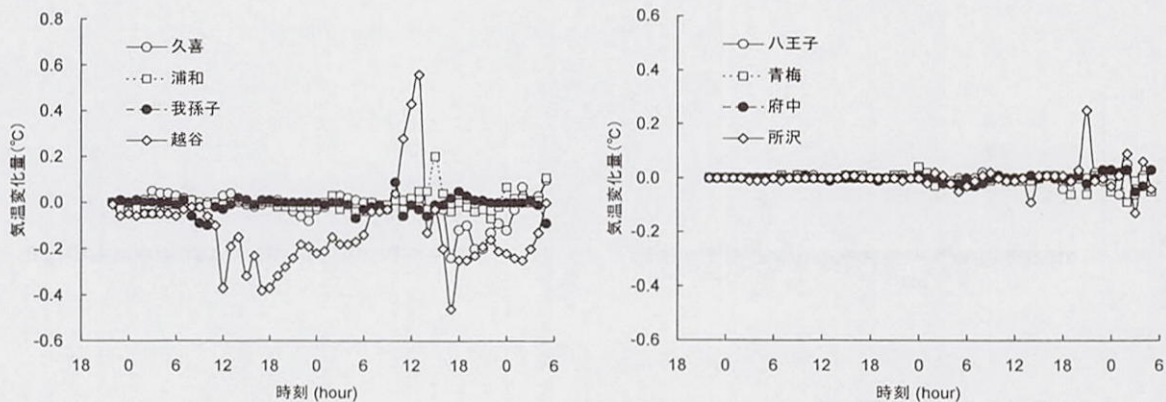


図 36 屋上緑化による気温変化量の時間変動

（左：東京都区部の北部および北西部，右：東京多摩地区および所沢）

北部と北西部の各地点の特徴としては次のような点が挙げられる。まず、対象期間の 1 日目には越谷では午前中から気温の低下が始まっている（図 36 左）が、2 日目には正午ごろに気温の上昇が起こり、午後 3 時頃からは逆に気温が低下する傾向が見られる。浦和でも 2 日目に若干気温

が上昇する時間帯が存在している。5地点の中では最も内陸側に位置する久喜では、2日目の夕方気温低下効果が発現している。1日目の8月24日と2日目の25日を比べると、緑化により高温になる地域の出現位置や緑化による気温低下の範囲が異なり、図35、図36に見られる1日目と2日目の違いは一般風や気圧配置の違いによるものと考えられる。東京西部における気温変化量をみると、都心部の緑化の影響は1日目にはほとんどみられないものの、2日目にはわずかなではあるが、時間により気温の増減が生じている。これらは、日中内陸部に移流された暖かい大気が海陸風循環により南下したことによる。そのため、東京西部の4地点の中では北側に位置する青梅と所沢で増減の度合いが大きい。

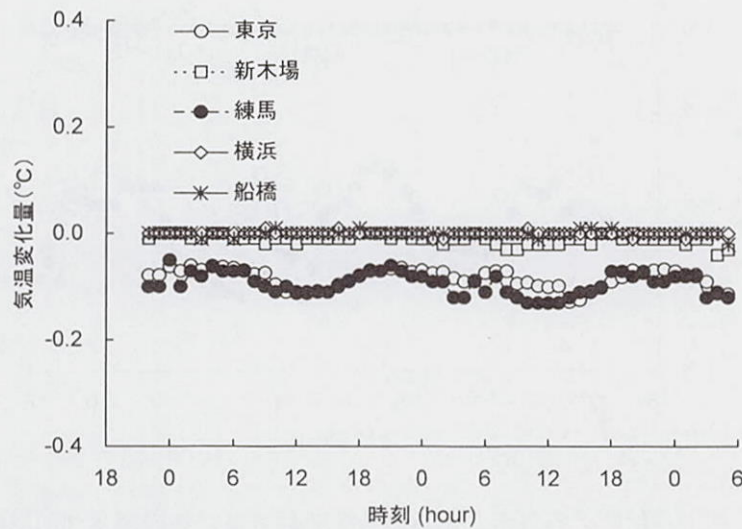


図37 屋上緑化による気温変化量の時間変動 (32%緑化の場合、東京都区部及び沿岸部)

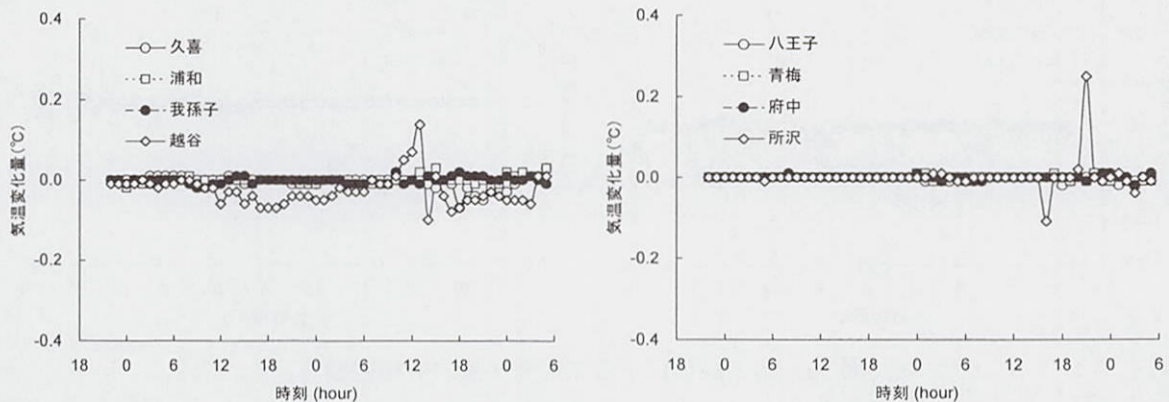


図38 屋上緑化による気温変化量の時間変動

(32%緑化の場合、左：東京都区部の北部および北西部、右：東京多摩地区および所沢)

屋上緑化によりみどり率が32%になった場合の各地点における気温の変化量を図37、図38に

示す。東京と練馬における気温の低下量は45%緑化の場合に比べて小さくなり、夜間と日中の低下量の違いも小さい。また、浦和や越谷といった東京都区部の北部、北西部の都市への影響も小さくなっている。これは、45%緑化の場合は現状から16.4%増であるのに対して、32%緑化の場合は現状から3.4%増で、緑化増分が約1/5しかないことによる。

3. 6 水面の再生によるヒートアイランド現象の軽減効果

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39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、最大で 0.6°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、気温低下域の北側には逆に気温が増大するエリアが出現する。これは、都市上空の気圧低下が原因で阻まれていた海風の内陸部への侵入時刻が対策により早まったためと考えられ、風速ベクトルの変化にもその様子が表れているが、緑地を増大させたケースに比べると、風速ベクトルの変化量は小さい。

屋上緑化の結果と同様に、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40、図41である。水面の増加量が緑の増加量に比べて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。ただし、時間的な変動パターンは屋上緑化の場合と異なっており、日射のない時間帯においては、水面の再生により若干の気温上昇が見られた。これは、計算上、水体の表面温度を一定値にしており、夜間には気温よりも水温が高くなっていることによる。

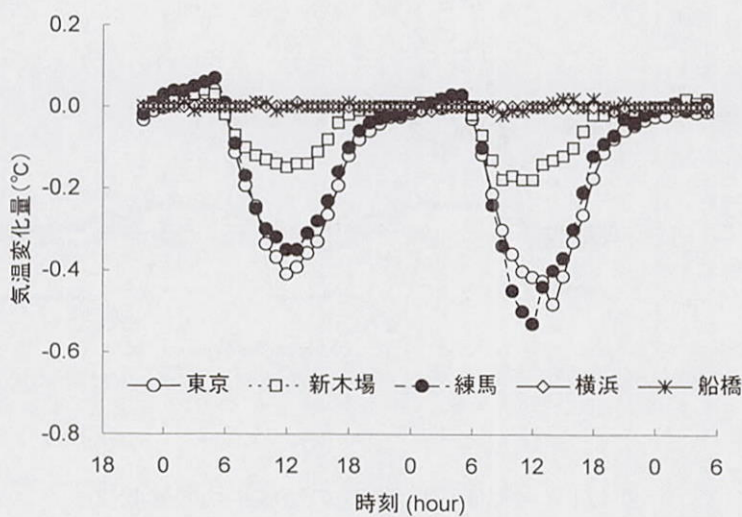


図40 水面再生による気温変化量の時間変動（東京都区部及び沿岸部）

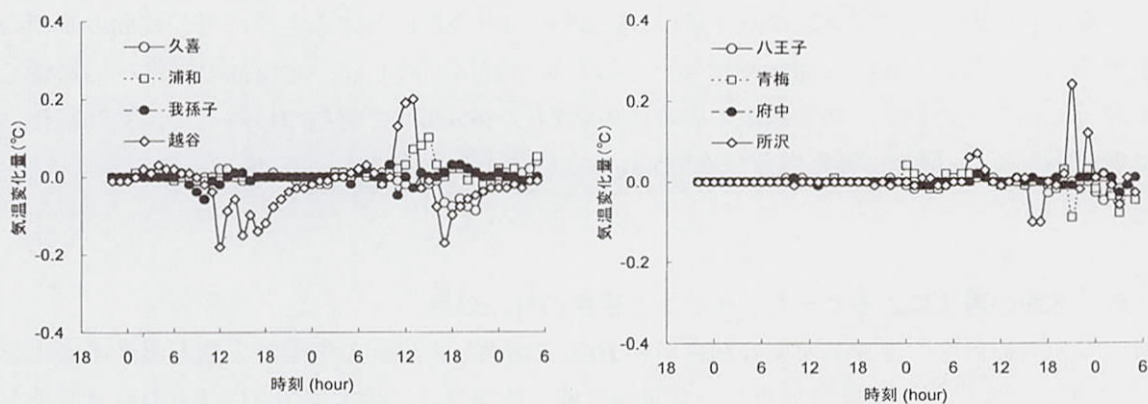


図 41 水面再生による気温変化量の時間変動

(左：東京都区部の北部および北西部，右：東京多摩地区および所沢)

水面再生の有無による領域平均の熱収支の違いを図 42 に示す。なお、平均領域は図 33 の場合と同じである。潜熱輸送量はほとんど変わらないが、水体の持つ蓄熱効果により、領域平均の地中伝導熱量が大きくなっていることがわかる。単位水面積あたりの水体の貯熱量や水温変動は水深や流れの有無により左右されるが、今回の計算では水温は変化せず、また水深に関する条件は特に考慮していないことから、これらの点については改良の余地がある。

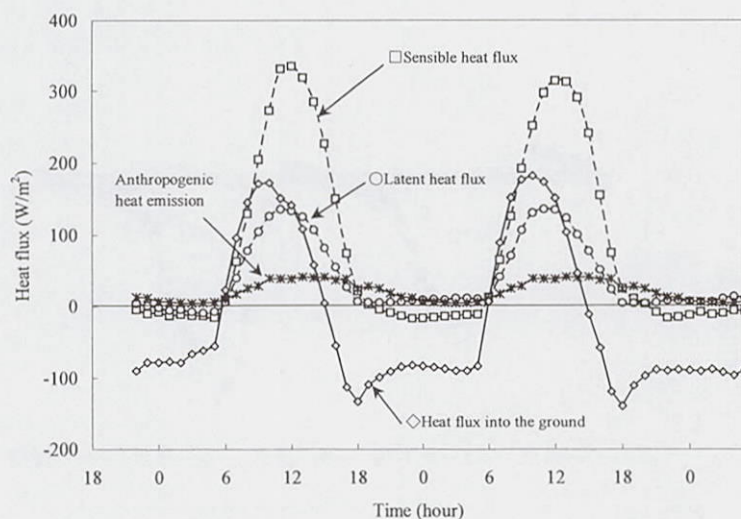


図 42 (1) 水面再生実施後の領域平均の熱収支

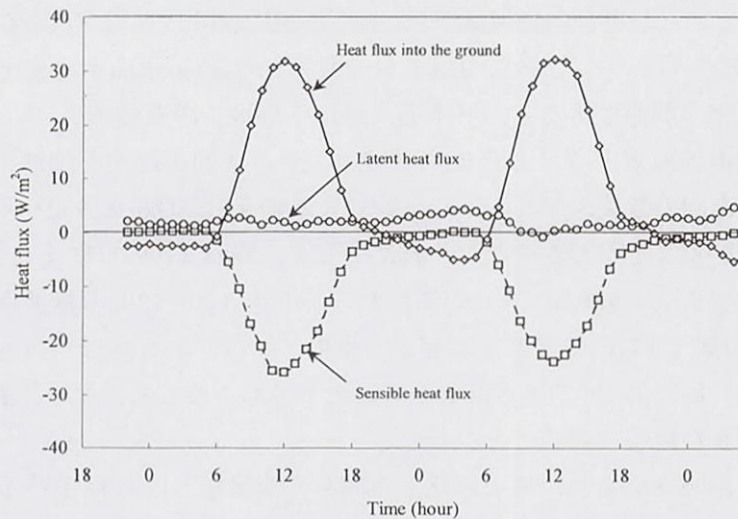


図 42 (2) 各熱収支成分の変化量

熱収支成分の変化量は、水面再生実施後から実施前を引いた値である。

3. 7 屋上緑化と水面再生の効果に関する考察

以上の結果を用いて、水面再生と屋上緑地の効果の比較及び既往研究結果との比較を行う。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 10 である。また、屋上緑化と水面再生を同時に行い、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 10 に示した。屋上緑化のみと水面再生のみで比較すると、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、水面再生の影響はわずかである。一方、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、水面再生と屋上緑化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た。

三上ら (1997) の試算では、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ており、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 の低下にとどまったと報告している。このシナリオで緑被率をどの程度にしているかは不明であるが、仮に緑被率=100%であるとする、みどり率の増分は公園面積の増分 10%と樹林地の増分 7%の合計 17%になるから、単位気温低下量は 0.22°C ということになり、今回の計算結果よりやや小さい。

山田 (1993) は利根川沿いの小都市において気温の実測値と直径 500m 範囲内の緑地率の関係を整理し、他の地域 (杉並区、長野市、庄和町) での同様の測定結果を含めて、4 時で緑地率 10%あたり $0.06\sim 0.25^{\circ}\text{C}$ 、14 時で $0.18\sim 0.32^{\circ}\text{C}$ の気温低下が生じると報告している。今回の屋上緑化の計算結果 (領域平均値、14 時) はこの実測値を $0.1\sim 0.2^{\circ}\text{C}$ 上回る結果となっている。ただし、現地の実測値には交通量や土地利用の違いといった緑被率以外の影響も加味されているため、緑被率が高くなっても必ずしも気温が低下しないケースも見られる。

Oke (1972) の示した蒸発散面積率と蒸発散による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℃程度、最低気温に対しては0.3℃程度となっている。また、福岡（1983）が示した「水面＋緑地＋畑地」の面積率と都市内外の最大気温差の関係によると、「水面＋緑地＋畑地」の面積率が28.6%から45.0%まで増えた場合の最大気温差の変化はおよそ0.5℃であった。「水面＋緑地＋畑地」の面積率をみどり率と読み替えれば、今回の数値シミュレーションによる結果は、Oke（1972）や福岡（1983）の報告に近い値となっていることがわかった。これに対して、Taha（1997）によると、6%の緑被率増により緑化域中心部で2℃、辺縁部で1℃の気温低下が推定され、12%の緑被率増に対しては、緑地域西部で3℃、周辺部で1℃の気温低下が起こる結果となっている。これらの数値は緑被率10%あたりに換算すると、周辺部でも1.6℃以上の気温低下が起こることになり、表10で整理した結果に比べてかなり大きな数値であることがわかる。

再生可能な水面には限りがあり、屋上緑化も再開発や改築などにあわせて行うため一気には進展しないと考えられることから、本研究で検討した屋上緑化や水面再生に加えて、熱源対策も組み合わせることにより、全体として都市の気候緩和を図ることが重要であるといえる。

表10 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 (℃/10%)		出典
		4 時	14 時	
水面再生	東京（大手町）	0.00	0.84	本研究
	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	本研究
	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	本研究
	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	本研究
	練馬	0.25	0.41	
	領域平均*	0.28	0.51	
緑地	杉並区など4地域	0.06-0.25	0.18-0.32	山田（1993）
緑地	東京	0.08**	0.22**	三上ら（1997）

*) 平均範囲は図33の場合と同じ。**) 最低気温及び最高気温生起時。

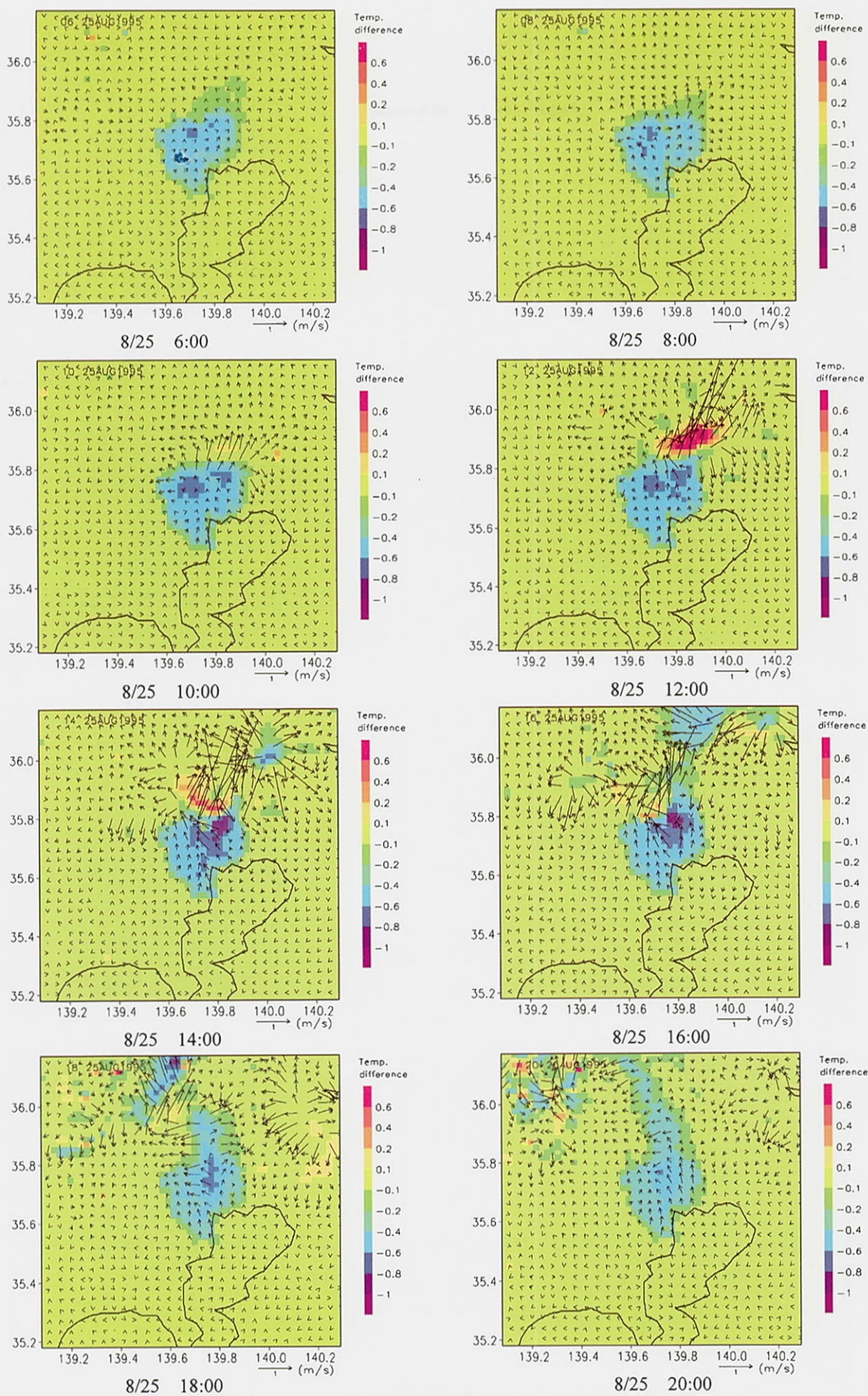
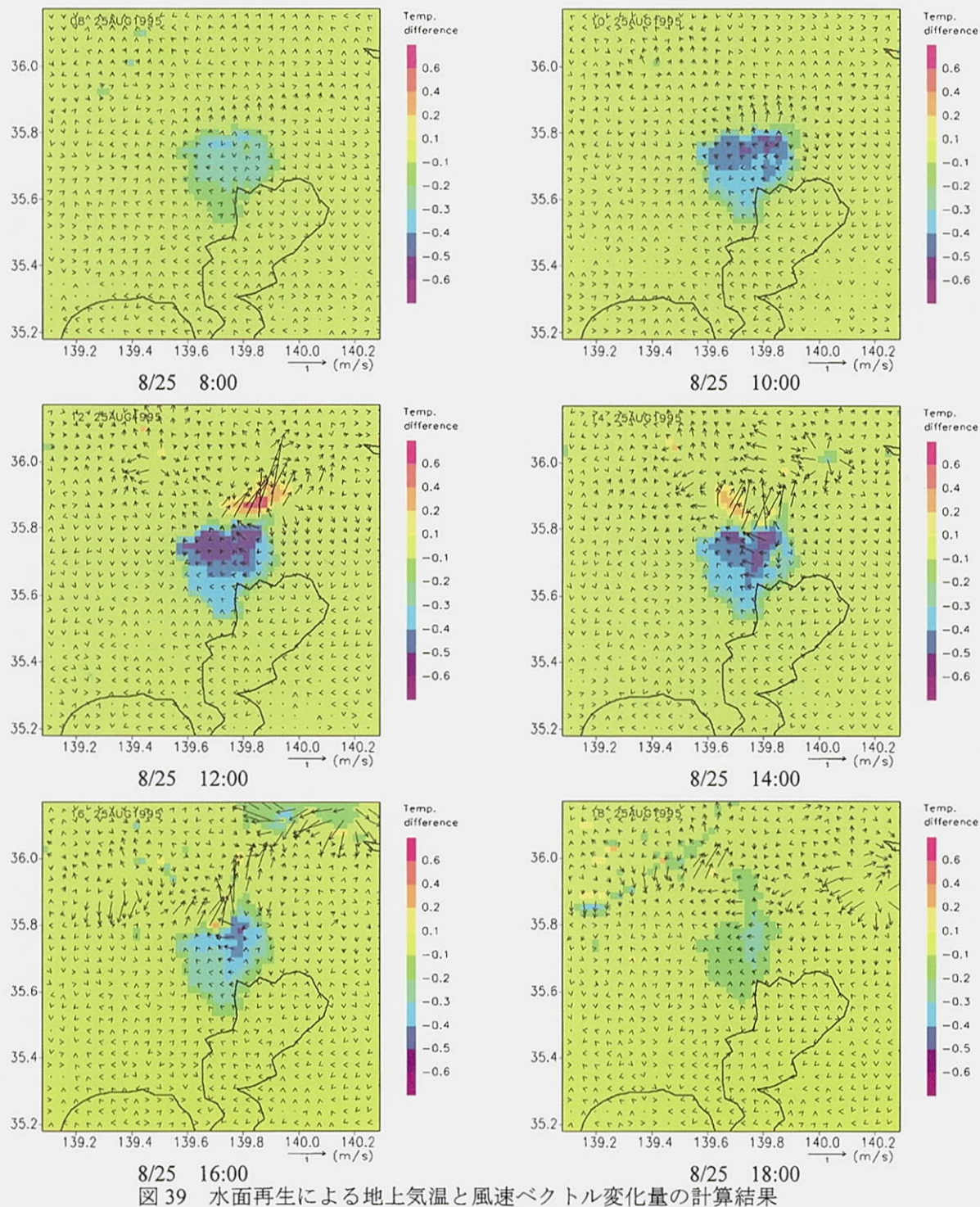
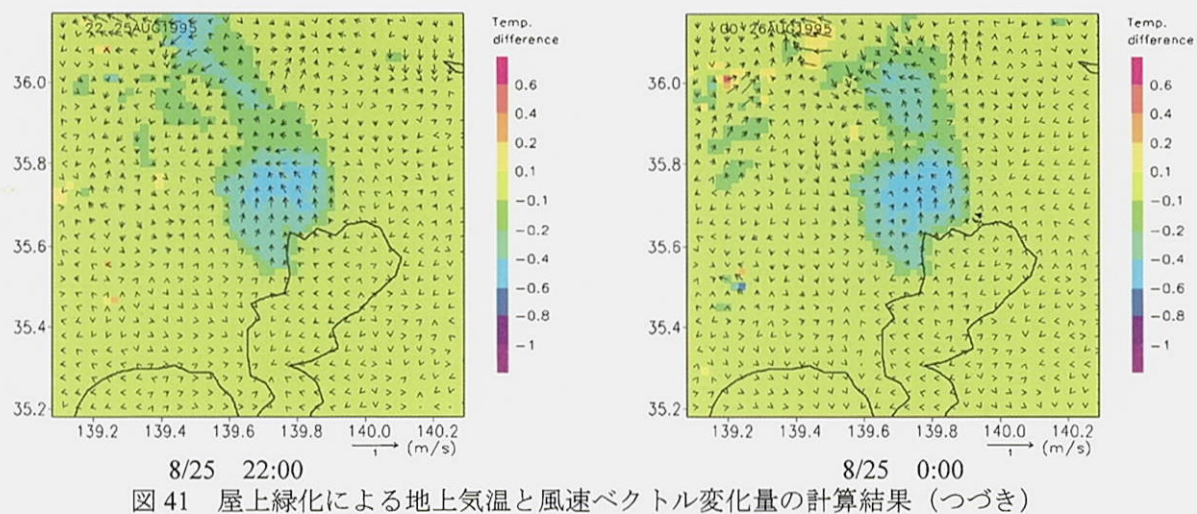


図 32 屋上緑化による地上気温と風速ベクトル変化量の計算結果
(気温、風速ベクトルともに、緑化後から緑化前の値を差し引いた結果を示す)



4. 結論

本研究では、ヒートアイランド対策の効果を推定するメソスケール気象モデルを構築し、水や緑を活用した様々な対策の実施による夏期の気温低減効果を推定した。本章で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- 1) ヒートアイランド対策の効果を精度良く推定するモデルを得るため、NCAR の MM5 を基本として、地表面の状態を表す情報に細密数値情報、国土数値情報、数値地図を用い、地表面における水熱移動過程、都市キャノピー内における夜間の放射冷却抑制効果、人工排熱の時空間変動、サブグリッドスケールの土地利用分布のパラメリゼーションを組み込んだメソスケールモデルを開発した。
- 2) この本モデルを関東平野に適用して夏期晴天時のメソスケール大気流れを計算し、その結果を首都圏における主要な AMeDAS 測定地点での実測値と比較したところ、気温の日変動や最高気温、最低気温の値とその発生時刻が概ね一致していた。また、海陸風循環に伴って埼玉県南部において海風が収束する状況や午後に内陸部へ高温域が移動する様子などが再現された。

このモデルを用いて、河川の水面再生と都市建築物の屋上緑化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、次のような結果が得られた。

- 3) 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ることがわかった。
- 4) 水面の再生の効果については、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ことが明らかとなった。
- 5) 単位面積あたりの気温低減効果で各種の対策を比較すると、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。
- 6) 再生可能な水面には限りがあり、屋上緑化も再開発や改築などにあわせて行うため、すぐには面積が拡大しないと考えられることから、本研究で検討した屋上緑化や水面再生に加えて、熱源対策も組み合わせることにより、全体として都市の気候緩和を図ることが重要であるといえる。

シミュレーション結果には、地表面水文条件の与え方や都市キャノピーのモデリング方法、人工排熱の時空間分布の推定精度、土地利用分類ごとのパラメータなど複数の要因が影響を及ぼしていると考えられるが、今後どの要因がどの程度影響しているかについて検討する余地がある。また、対策の実施による気温低下量や気温低下域は総観場の気象条件にも影響されることから、さらに色々な気象条件のもとでの計算結果を蓄積する必要がある。

参考文献

- 1) Aida, M.: Urban albedo as a function of the urban structure - A model experiment, *Boundary-Layer Meteorology*, 23, 405-413, 1982.
- 2) Anthes, R.A. and T.T. Warner: Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies. *Mon. Wea. Rev.*, 106, 1045-1078, 1978.
- 3) Avissar, R. and R. Pielke: A parameterization of heterogeneous land surfaces for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology, *Monthly Weather review*, Vol.117, 2113-2136, 1989.
- 4) Bougeault, P., J. Noilhan, P. Lacarrere and P. Mascart: An experiment with an advanced surface parameterization in a mesobeta-scale model. Part I: Implementation, *Monthly Weather Review*, Vol.119, No.10, 2358-2373, 1991.
- 5) Carlson, T.N. and D. A. Ripley: On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index, *Remote Sensing Environment*, 62, 241-252, 1997.
- 6) Chen, F. and J. Dudhia: Land-surface model development for the MM5 V.3 system, In preprints, Workshop on land-surface modeling and applications to mesoscale models, Boulder, June 24-25, 1999.
- 7) Chung, S-O. and R. Horton: Soil heat and water flow with a partial surface mulch, *Water Resources Research*, 23(12), 2175-2186, 1987.
- 8) Deardorff, J.W.: A parameterization of ground surface moisture content for use in atmospheric prediction models, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.16, 1182-1185, 1977.
- 9) Dorman, J. L. and P. J. Sellers: A Global Climatology of Albedo, Roughness Length and Stomatal Resistance for Atmospheric General Circulation Models as Represented by the Simple Biosphere Model (SiB). *Journal of Applied Meteorology*, Vol.28, No.9, pp.833-855, 1989.
- 10) Grell, G., J. Dudhia and D. Stauffer: A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR/TN-398+STR, 1994.
- 11) Hafner, J. and S. T. Kidder: Urban heat island modeling in conjunction with satellite-derived surface/soil parameters, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.38, 448-465, 1999.
- 12) Jacobson, M. Z.: Effects of soil moisture on temperatures, winds, and pollutant concentrations in Los Angeles, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.38, 608-616, 1999.
- 13) Jacquemin, B. and J. Noilhan: Sensitivity study and validation of a land surface parameterization using the HAPEX-MOBILHY data set, *Boundary-Layer Meteorology*, 52, 93-134, 1990.
- 14) Janjic, Z. I.: The step-mountain coordinate: physical package, *Monthly Weather review*, Vol.118, 1429-1443, 1990.
- 15) Janjic, Z. I.: The step-mountain eta coordinate model: further development of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes, *Monthly Weather review*, Vol.122, 927-945, 1994.
- 16) Jia, Y. and N. Tamai : Integrated analysis of water and heat balances in Tokyo Metropolis with a distributed model, *Journal of Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.*, Vol.11, No.2, 150-163, 1998.
- 17) Johnson, G. T., T.R.Oke, T.J.Lyons, D.G.Steyn, I.D.Watson and J.A.Voogt: Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night, part I: theory and tests against field data, *Boundary-Layer Meteorology*, 56, 275-294, 1991.

- 18) Kimura, F.: Heat flux on mixtures of different land-use surface: test of a new parameterization scheme, *J. Met. Soc. Japan*, 67(3), 401-409, 1989.
- 19) Kimura, F. and S. Takahashi: The effect of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: a numerical experiment, *Atmospheric Environment*, Vol.25-B, No.2, 155-164, 1991.
- 20) Kinouchi, T and M. F. Jasinski : Mesoscale modeling of urban-rural complex with the inclusion of land surface processes, Preprint of the third symposium on the urban environment, p.74-75, Aug., 2000.
- 21) Kondo, J. and H. Yamazawa: Aerodynamic roughness over an inhomogeneous ground surface, *Boundary-Layer Meteorology*, 35, 331-348, 1986.
- 22) Kusaka, H, F. Kimura, H. Hirakuchi, and M. Mizutori: The Effects of Land-Use Alteration on the Sea Breeze and Daytime Heat Island in the Tokyo Metropolitan Area, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 78, No. 4, pp. 405-420, 2000.
- 23) Myrup, L.O.:A numerical model of the urban heat island, *J. Applied Met.*, Vol.8, 908-918, 1969.
- 24) Noilhan, J and S. Planton: A simple parameterization of land-surface processes for meteorological models, *Mon. Wea. Rev.*, 117, 536-549, 1989.
- 25) 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, 1972, 9pp. (Chandler, T. J.: Urban climatology and its relevance to urban design, WMO Technical Note No.149, 1976 より再引用)
- 26) Oke, T.R.: Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations, *Journal of Climatology*, Vol.1, 237-254, 1981.
- 27) Oke, T.R.: *Boundary Layer Climates*, 2nd Edition, Methuen, London, 1987.
- 28) Sailor, D.J.: Simulated urban climate response to modifications in surface albedo and vegetation cover, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.34, 1694-1704, 1995.
- 29) Seaman, N.L., F.L. Ludwig, E.G. Donall, T.T. Warner, C.M. Bhumralker: Numerical studies of urban planetary boundary layer structure under realistic synoptic conditions. *J. Appl. Meteor.*, 28, 760-781, 1989.
- 30) Song, J., W. Gao: An Improved Method to Derive Surface Albedo from Narrowband AVHRR Satellite Data: Narrowband to Broadband Conversion. *Journal of Applied Meteorology*: Vol. 38, No. 2, pp. 239-249, 1999.
- 31) Swaid, H.: The role of radiative-convective interaction in creating the microclimate of urban street canyons, *Boundary-Layer Meteorology*, 64, 231-259, 1993.
- 32) Taha, H.: Modeling the impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the south coast air basin, *Atmospheric Environment*, Vol.30, No.20, 3423-3430, 1996.
- 33) Taha, H.: Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the south coast air basin, *Atmospheric Environment*, Vol.31, No.11, 1667-1676, 1997.
- 34) Taha, H, D. Sharon and J. Haney: Mesoscale meteorological and air quality impacts of increased urban albedo and vegetation, *Energy and Buildings*, 25, 169-177, 1997.
- 35) Taha, H.: Modifying a mesoscale meteorological model to better incorporate urban heat storage: A bulk-parameterization approach, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.38, 466-473, 1999.

- 36) Yoshikado, H., and H. Kondo: Inland penetration of the sea breeze in the suburban area of Tokyo, *Boundary-Layer Meteorology*, 48, 389-407, 1989.
- 37) 浅枝隆, 藤野毅: 舗装面の熱収支と蓄熱特性について, *水文・水資源学会誌*, Vol.5, No.4, 1992.
- 38) 江口恒夫: 大阪市の海陸風について, *天気*, Vol.24, No.12, 739-746, 1977.
- 39) 藤原宣夫編著: 都市に水辺をつくる, 「第2章2 水辺と微気象」, 技術書院, 1999.
- 40) 福田忠弘, 鹿島正彦, 鈴木譲, 神田学: 海風前線マップの作成による都市河川の海風効果の検証, *水工学論文集*, 42, 49-54, 1998.
- 41) 福田萬大, 深沢邦彦, 荒木美民, 藤野毅, 浅枝隆: 夏季自然状態での各種舗装の熱環境緩和特性に関する実験的研究, *土木学会論文集 No.571/V-36*, 149-158, 1997.
- 42) 福岡義隆: 都市の規模とヒートアイランド, *地理*, Vol.28, No.12, 34-42, 1983.
- 43) 半田真理子, 浦野明: 緑被の熱環境に及ぼす効果, *土木技術資料*, Vol.38, No.12, 38-43, 1996.
- 44) 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*, 第31巻, 263-273, 1994.
- 45) 一ノ瀬俊明, 下堂菌和宏, 鶴野伊津志, 花木啓祐: 細密地理情報にもとづく都市気候数値シミュレーション地表面境界条件の高精度化, *天気*, 44-11, 785-797, 1997.
- 46) 池田駿介, 財津知亨, 渋谷昌史: 都市キャノピーの夏期の熱構造に関する現地観測, *土木学会論文集*, No. 539/II-35, 167-175, 1996.
- 47) 石田祐宣, 石田智美, 近藤純正: 水田地帯における熱収支の季節変化, *水文水資源学会誌 Vol.10*, No.2, 123-132, 1997.
- 48) 石川浩: 埋められた河川の再生に関するシンポジウム〜川を太陽のもとに取り戻そう〜, *河川*, No.640, 53-59, 1999.
- 49) 神田学, 高柳百合子, 横山仁, 森脇亮: 銀座オフィスビル街における熱収支特性, *水文・水資源学会誌*, 10, 329〜336, 1997.
- 50) 河原能久, 小林裕明, 末次忠司, 木内豪: 都市における人工排熱の時空間分布の推定—東京都23区の現状と将来—, *土木技術資料*, Vol.42, No.3, 44-51, 2000.
- 51) 木内豪: 気候に配慮した都市計画における河川等水辺の役割—ドイツでの事例調査報告—, *雨水技術資料 Vol.19*, 91-100, 1995.
- 52) 木内豪, 小林裕明: 快適な都市熱環境創造のための舗装の高温化抑制策に関する検討, *土木学会論文集*, No.622/VII-11, 23-33, 1999.
- 53) 木内豪, M.F.Jasinski, 末次忠司: 土壌条件が都市と郊外の晴天時気象に及ぼす影響の数値計算, *水文・水資源学会 2000 年研究発表会要旨集*, p.12-13, 2000.
- 54) 北林興二: 海陸風の統計的解析, *公害*, 11, 80-98, 1976.
- 55) 牧村功他多数: 事務所建築における竣工設備データ, *建築設備士*, p.82, 1994.12.
- 56) 松浦茂樹, 島谷幸宏: 水辺空間の魅力と創造, 鹿島出版会, 1987.
- 57) 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*, 49-56, 1997. (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)
- 58) 水鳥雅文, 田村英寿: 東京23区における夏季人工排熱分布の時空間特性, *電力中央研究所報告 U99019*, 1999.
- 59) 村上周三, 持田灯, 金相璣, 大岡龍三: 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, 日本建築学会計画系論文集, No.491, 31-39, 1997.
- 60) 中野政詩: 土の物質移動学, 東京大学出版会, 1991.
- 61) (社) 日本地域冷暖房協会: 地域冷暖房技術手引書, 1997.
- 62) (社) 日本地域冷暖房協会: プロジェクト 2010 日本全国地域冷暖房導入可能性調査研究 平成 6 年度報告書, 1995.
- 63) 西沢利栄, 山下孔二, 鈴木守人: 東京都心部における地温分布, 地理学評論, 52-6, 283-292, 1979.
- 64) 斉藤武雄: ヒートアイランド, 講談社ブルーバックス, 1997.
- 65) 末次忠司, 河原能久, 木内豪, 小林裕明: 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 1) - 都市河川等の水熱エネルギー活用の効果 -, 土木研究所資料第 3722 号, 2000.
- 66) 杉山寛克, 持田灯, 村上周三, 尾島俊雄: 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集, No.492, 83-90, 1997.
- 67) 鈴木理生: 江戸の川・東京の川, 井上書院, 1989.
- 68) 高橋信之, 尾島俊雄: 首都圏における水路網の変遷に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No.363, 38-44, 1986.
- 69) 田村英寿, 水鳥雅文: 建物周辺における熱環境予測手法の開発 (その 1) - 建物群を考慮した地表面モデル, 電力中央研究所報告 U97067, 1998.3.
- 70) 田村英寿, 水鳥雅文: 建物周辺における熱環境予測手法の開発 (その 2) - 東京 23 区を対象とした数値シミュレーション, 電力中央研究所報告 U99022, 1999.12.
- 71) 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 -, 2000.12.
- 72) 山口克人: 環境調和型都市の大気環境形成手法評価のための都市キャノピモデルに関する研究, 研究成果報告書, 1998.3.
- 73) 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, 21-27, 1998.
- 74) 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, 681-688, 1990.
- 75) 渡辺浩文, 尾島俊雄: 河川水熱利用地域冷房施設の大気への熱的影響に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No.460, 61-69, 1994.

