

1-10 メソスケールモデルを用いた各種対策による気温低減効果の予測に関する研究

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平 11～平 14

担当チーム：水工研究グループ（水理水文）

研究担当者：吉谷純一，木内豪

【要旨】

都市域のヒートアイランド現象を緩和するために各種対策が提案されているが、複数の代替案を対象とした実現性や気温低減効果に関する比較検討は十分行われていない。このため、本研究は、首都圏を対象としてヒートアイランド現象の実態、原因分析に基づいた対策シナリオを提示し、これらの対策シナリオ実施による気温低減効果を予測することを目標として実施する。平成 14 年度は、東京 23 区における屋上緑化の普及、河川の水面再生、保水性舗装導入に加えて、日射の近赤外線成分を主体に反射させて高温化を防止する高反射性舗装の効果の実測と試算を行い、その有効性を示すとともに、他の対策とともに相対比較を行った。また、2010 年を想定して首都圏の人工排熱量がヒートアイランド現象をどの程度悪化させるのかについて試算を行い、ヒートアイランド現象が広域化する可能性があることを示した。

キーワード：メソスケールモデル，ヒートアイランド，各種対策，高反射性舗装，人工排熱

1. ヒートアイランド現象の発生原因と軽減対策

都市中心部の大気がその周辺部よりも高温となる現象（ヒートアイランド現象）を引き起こしている原因は、都市の成長による土地利用の変化・地表面の人工化と、人口の集積・社会経済活動の拡大によるエネルギー消費量の増大に大別される（図 1）。また、それぞれが複数の異なる要因からなっているため、単一の対策だけでは問題が解決されないのが特徴であり、どのような対策を組み合わせれば原因をどの程度取り去ることができるかを明らかにする必要がある。

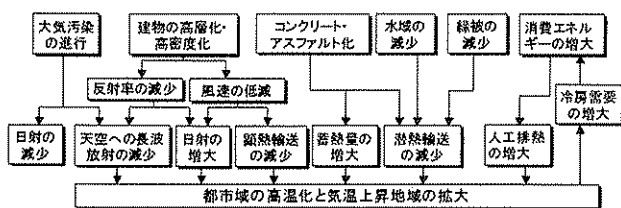


図 1 都市におけるヒートアイランド現象の形成要因¹⁾

本研究では東京 23 区を中心とした首都圏におけるヒートアイランド現象軽減策の提案と効果の定量化を行うが、その前に、問題の主たる原因について整理しておく。図 2 は既存の情報（細密数値情報）をもとに、東京 23 区の土地利用の変遷を示したものである。1974 年から 1994 年までの 20 年間で大きく変化したとは言えないが、農地や水・緑といった自然の占める面積割合が減少している。東京都の推計²⁾では、1974 年から 1998 年までの間に樹

林、草地などの緑と河川、水路、湖沼などの水面が都全体で約 70km²（山手線の内側を超える面積に匹敵）失われており、非常に大きな熱的インパクトを大気に及ぼしてきたことが想像できる。土地利用の変化のうち表面的には現れないものの影響が大きいと考えられる要因として不浸透面積（人工被覆）や建物高さの増大が挙げられる。一方、人工排熱の原因となるエネルギー消費量全体では 1970 から 1998 年の間に東京都全体でおよそ 1.8 倍に増加してきている³⁾。特に、身近な生活空間への影響が大きいと考えられる家庭・業務部門や自動車部門におけるエネルギー消費量はそれぞれ 2.8 倍と 2.4 倍の伸びを示している。このように、土地利用とエネルギー消費の両方における過去数十年の変化によって、都市特有の気象現象の問題が顕在化してきたと言える。また、今後は地球温暖化との相互作用の影響解明も重要となってくるであろう。

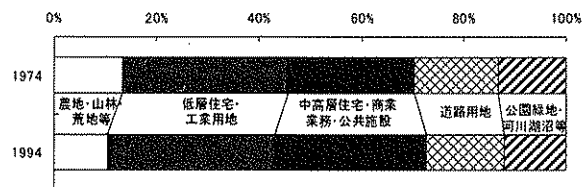


図 2 東京都区部における土地利用の変化

このような原因を踏まえた上で、ヒートアイランド現象軽減のための有効な対策を考える必要がある。本研究ではこれまでに、土地利用に関するものとして水面の再生と屋上緑化の推進といった自然環境の復元対策と道路

や建物などの人工地覆面の改善を取り上げるとともに、エネルギー消費に関するものとして、家庭、業務、運輸部門における省エネルギー対策や、未利用エネルギーの活用などについて検討を行ってきた。

2. ヒートアイランド軽減対策を考えるための視点

ヒートアイランド現象軽減対策の検討にあたって重要な点は、対策による気温低減あるいは大気への熱負荷の削減による夏期の熱環境の改善効果である。気候はエネルギー消費量を左右することから、年間を通したエネルギー消費への影響も視野に入れる必要があるし、ある対策の実施が逆に自然、人体、生態系などに悪影響を及ぼすことがないようにすることも求められる。

次に考えるべきは、対策の実施費用、広い意味での便益、速効性、持続性、実現可能性であろう。費用に見合う便益があるのならば、上記を考慮の上、ある対策をヒートアイランド軽減のためだけの単目的で実施することもあり得るだろうし、その対策が多くの副次的効果をもたらすのであれば、複合的な価値を評価して、積極的にその対策の導入を図るべきである。しかし、現状のヒートアイランド対策の研究は夏期の気温低減効果の提示に止まっているため、本当にその対策を普及させてよいものかどうか判断できない状況にあると思われる。

速効性や持続性は便益や費用にも影響する重要なファクターである。なぜなら、早く実施できて（速効性）、途中で不具合が生じることなく（持続性）長期間供用できれば、それによる便益も長く享受することができるからであり、時間の概念を取り入れることにより、対策間の優劣も異なって見えてくるものと考えられる。実現可能性というのは、効果や環境影響、費用、便益、速効性、持続性などを総合的に考えて導かれる答えであるが、最初から実現が難しいと判断できる対策もあるだろう。

3. メソスケールシミュレーションモデルを用いた都市スケールの効果の定量化

都市特有の高温化を抑制するための対策には様々なスケールでの評価が求められる。局所的な対策の効果を詳細に把握するには街区スケールの気象シミュレーションが必要であるが、対策が広域的に普及したときの社会全体への影響・効果を評価するという観点からは、都市スケールでのシミュレーションによって全体像が見えてくる。本研究では都市全体としてヒートアイランド現象を緩和させる対策の提案を目的にしていることから、後者のアプローチにより検討を進めてきた。以下では、効果定量化のツールとなるメソスケールシミュレーションモ

デルの概要を説明する。

3.1 モデルの概要

これまでも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かったと考えられる。その理由は色々考えられるが、複雑な土地利用、人工排熱、都市キャノピー層（建築物等が存在する大気下層）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一因として挙げられる。

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、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⁴⁾、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を首都圏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あたっては、以下の修正を行った。地表面フラックスの算定部分には、サブグリッドのパラメータ化手法を加えるとともに土壌水分量を予測する地表面モデル⁵⁾を組み込んだ。地表面の土地利用や標高には細密数値情報、国土数値情報、数値地図情報を利用した。また、接地層下面に人工排熱量の時空間変動値を潜熱フラックスと顕熱フラックスの形で与えた。

3.2 モデルの適用性

首都圏を対象にモデルの適用性を検証した。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3）。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に依存する大気冷却率を用いるSimple coolingを用いた。

まず、現状のヒートアイランド現象を対象にモデルの検証を行った。シミュレーションは、1995年8月23日21時～8月26日5時を対象期間とした。ネスト領域における地上1.5mの気温と地上10mにおける風速ベクトルの計算結果を図4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。

また、東京都の AMeDAS 地点全てと埼玉県、千葉県、神奈川県的主要な 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 5）。

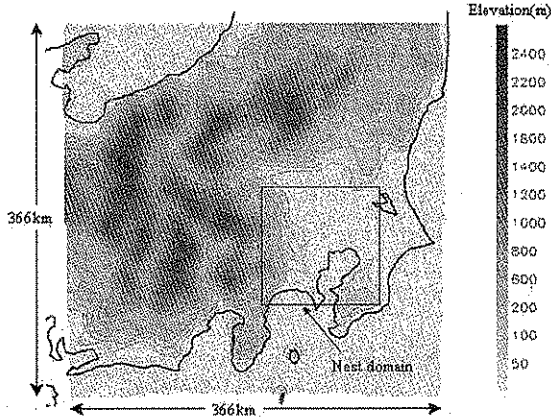


図 3 母領域とネスト領域の計算範囲と標高

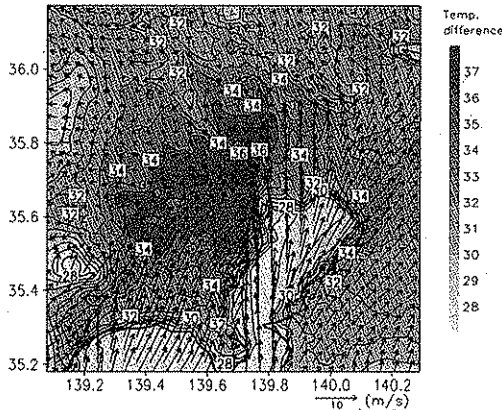
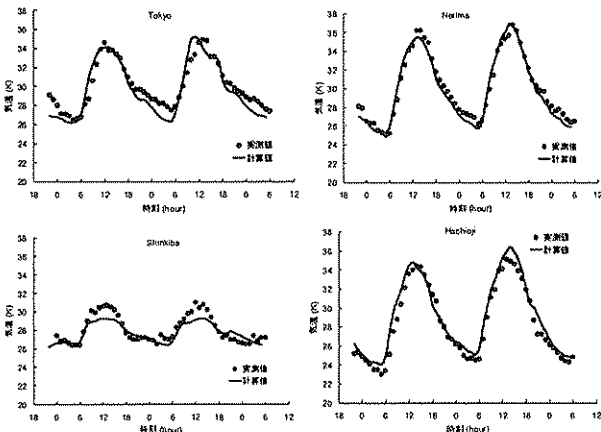


図 4 ネスト領域の風と気温場の計算結果



(8月23日21時～26日5時)

図 5 AMeDAS 地点における計算結果と実測値の比較

4. 水と緑を活用したヒートアイランド現象軽減策

水面や緑地が大気を冷却する作用は我々も身近に経験することであるが、水と緑は、微気象緩和ばかりでなく、都市景観の向上、騒音低減、大気汚染物質の吸着などの

様々な環境的価値を有しており、都市の空間形成にとって重要な役割を果たしている（図 6）。

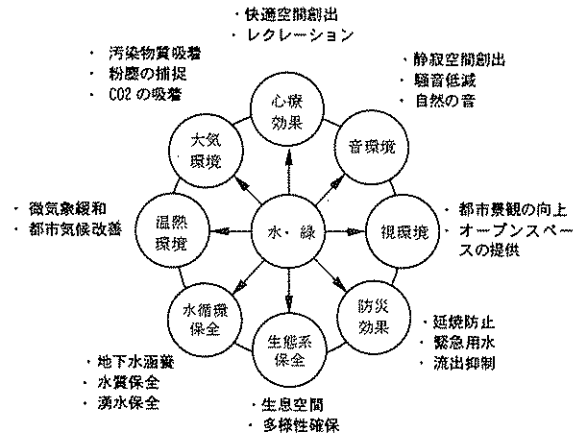


図 6 水と緑がもたらす様々な効果

このような期待と裏腹に、都市の発展に伴って水面や緑地が減少した結果、欧米諸都市に比べてこれらの自然が量的に不足している。前述のように、東京では、1974年から1998年までの25年間で樹林、草地などの緑と河川、水路、湖沼などの水面が都全体で約70km²失われた。都市計画区域内人口に対する都市公園面積は、1967年に2.4m²/人であったものが1998年度末には7.7m²/人と3倍以上にのびているものの、欧米諸国の約1/3と大きく立ち後れている⁶⁾。全国20都市の水面積の変遷に関する調査結果⁷⁾によると、水面積は江戸時代末期で平均10.9%であったが、現況（調査時点）では7.6%に減少し、水面積が10%を超える比較的水辺の豊富な都市の数も11から6に減少している。

最近になってこのような状況を改善して、水と緑を活かした都市づくりが叫ばれるようになってきている⁸⁾ことから、今後、ヒートアイランド現象の緩和により環境負荷の少ない快適な都市づくりを進めていくためには、水や緑の効果を積極的に活用する方策が有効であると考えられる。

4.1 屋上緑化の推進

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。農地・草地が減少していることや地上の緑化可能地が少ないことから、屋上緑化によるヒートアイランド現象の緩和が期待されるが、屋上緑化の効果が都市スケールでどの程度あるのかについては十分に解明されているわけではない。そこで、緑の東京計画²⁾に基づき、15年後のみどり率（水面と緑被の占める面積率）が現状の28.6%から32%に増加するケース

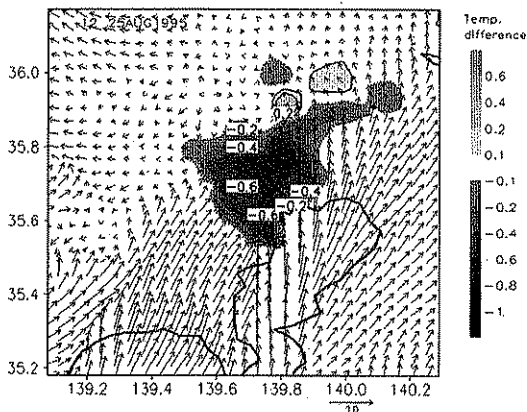


図7 屋上緑化による地上気温の変化量と風速ベクトルの計算結果(8月25日12時)。変化量は対策前から対策前の値を差し引いた結果。

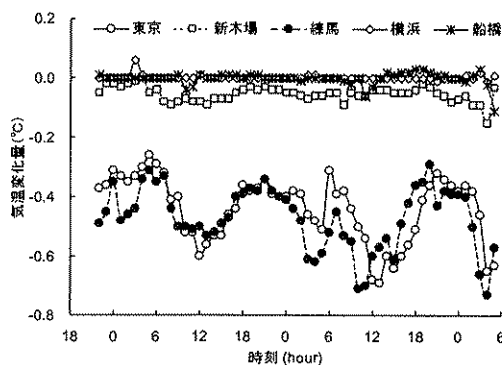


図8 屋上緑化実施による代表地点における気温低下量の計算結果

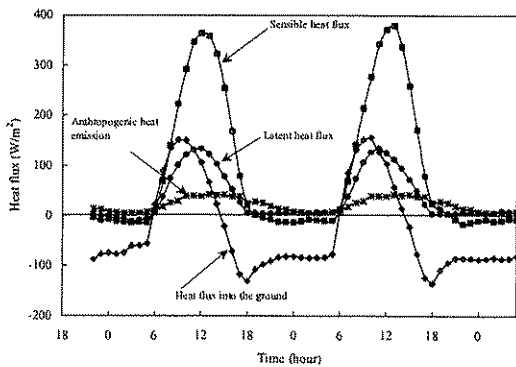


図9 現状における領域平均の熱収支

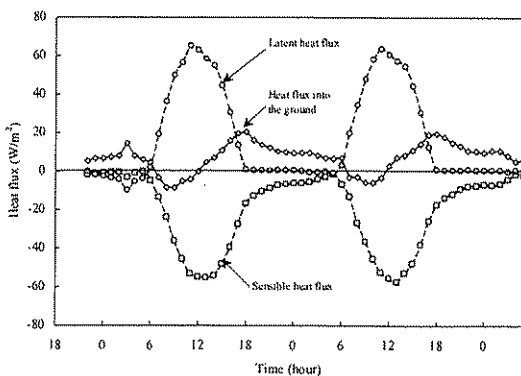


図10 屋上緑化(みどり率45%)による領域平均の熱収支の変化(緑化後の地表面熱収支各項の値から緑化前の値を差し引いたもの)

と長期的な屋上緑化の普及によりみどり率が45%となるケースを想定して、広域的な気温低減効果を試算した。なお、みどり率45%を達成するためには建物用地において50%が緑で覆われている必要がある。

屋上緑化のモデル化の詳細は省略するが、基本的には、屋上緑化面を地上の緑地と同様に扱う。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・土壌により覆われることによる表面温度の低減、建物内部への熱負荷の減少や室内温度の低減効果があるが、本モデルでは、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ている。

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地上10mにおける風速ベクトルを図7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広がっていく。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)は、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0.7°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がみられない(図8)。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ているが、これは屋上緑化による屋根面温度の低下に起因するものである。図9には屋上緑化実施前の顕熱輸送量、潜熱輸送量、地中伝導熱量(水中、建物への伝導熱量も含む)及び人工排熱量の計算結果を示す。また、図10には屋上緑化実施後のそれぞれの熱量から実施前の熱量を差し引いた値を示す。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。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緑化実施前の50%増加し、逆に顕熱輸送量は緑化実施前の50%程度に減少しており、これが気温低下の要因になっていると言える。

15年後、屋上緑化によりみどり率が32%になった場合の東京(大手町)と練馬における気温の低下量は日中で約0.1°Cと非常に比べ小さかった。これは、みどり率45%の場合は現状から緑被率が16.4ポイント増すが、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。既往の研究によると、東京23区の屋上緑化可能地(荷重に耐えうる建物の屋根面積の総計)はおよそ43km²と推定されている⁹⁾(緑被率に換算すると約7ポイントの増加)ことから、屋上緑化以外の緑化対策(壁面緑化、住宅での緑化など)も組み合

わせていくことを考える必要がある。

4. 2 水面の再生

昔の東京（江戸）の水面積について、松浦・島谷⁷⁾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。一方、現状はどうかといえば、例えば細密数値情報（1994年）によると、23区全面積に対する水面積（河川・湖沼等）の割合は4.8%である。水面の変遷に関する既存の調査事例は非常に限られているが、それら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%程度に減少したものと想定される。

このような水面減少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¹⁰⁾。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った¹⁰⁾。八十川ほか¹¹⁾によると、廃止された河川の上流は公園や緑道、道路、宅地などに転用されており、廃止流路の上流空間は75%が道路に転用され、下部空間の33%は覆蓋部分（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%）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。

既に埋め立て・覆蓋化された水面を再生することはそう簡単にはできるものではないが、河川に対する防災、環境、景観、舟運、気候緩和など様々な面からの期待が大きいことも事実であり、かつての豊かな水面を湛えた魅力的な都市空間を取り戻すことによって、過度に人工化した東京に自然の潤いを蘇らせ、都市を再生させることができるのではないかと考えられる。例えば、治水と環境の両立を図りつつ水面を取り戻す方法として二層化された河川（写真1）が考えられるし、蓋掛けされた河川の開渠化や、農業用水路等の再生（写真2）、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が想定できる。そこで、本研究においては将来のシナリオとして様々な水面再生策の実施によって東京23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。水

面再生のための用地としては、公共公益施設用地と道路用地を活用すると想定した。シミュレーションでは、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する。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。

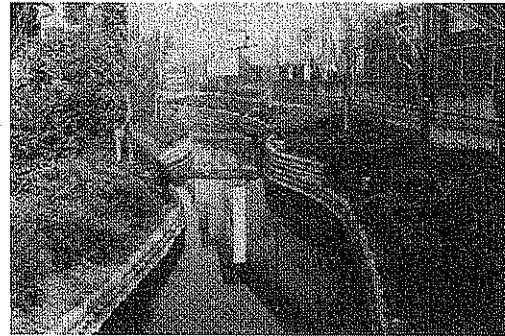


写真1 二層化された河川の事例（宇都宮市・釜川）

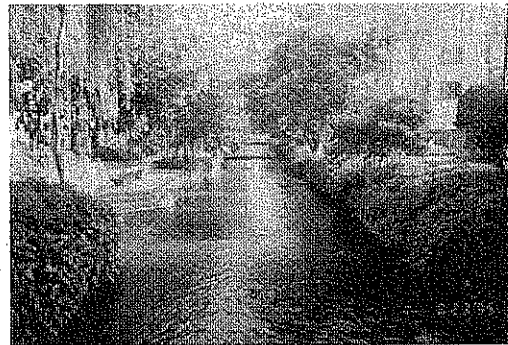


写真2 農業用水路が親水公園となった事例（岡山市・西川緑道公園）

河川等の水面再生による気温低下量と風速ベクトルを図11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0.6℃以上の気温低下が発生しうることがわかった。気温変化量を地点別に整理したものが図12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。図示はしないが、領域平均で見た場合、水面再生により水体の貯熱量が増えて、その分、日中の顕熱輸送量が減少している一方、潜熱輸送量の増加はごくわずかであった。水体の貯熱が気温低減の主たる要因であることがわかる。

5. 舗装の熱特性改善によるヒートアイランド現象の緩和効果

舗装の高温化を防止して都市の気温上昇を抑制することを主たる目的とした新たな舗装として、保水性舗装と高反射性舗装（遮熱性舗装）が開発されてきている。保

水性舗装は、開粒アスファルト舗装の空隙に保水性能を有する細粒やグラウトなどを充填して、雨水などを吸水し、晴天時の蒸発によって舗装の温度上昇を抑制しようとするものであり、一部の自治体においては実道への試験施工等に基づく性能把握が行われているが、効果の持

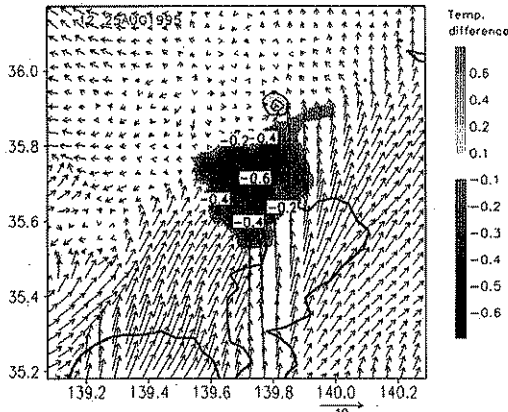


図11 水面再生による地上気温の変化量と風速ベクトルの計算結果(8月25日12時). 変化量は対策後から対策前の値を差し引いた結果.

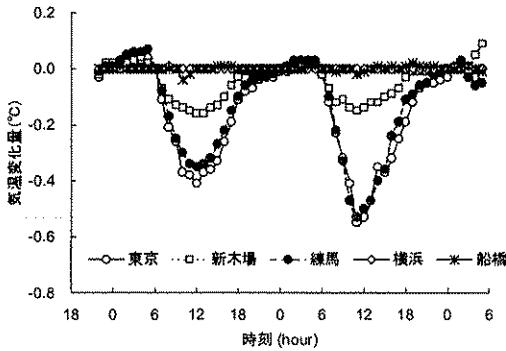


図12 水面再生による代表地点における気温低下量の計算結果

続性、透水性能との両立、騒音低減性能への影響という観点から更なる技術的改善が必要である。一方、高反射性舗装は、舗装表面に特殊塗料を塗布して、日射の反射率を高くすることを意図したもので、安定的な表面温度低減性能を期待できるとともに、既設のアスファルト面に施工が可能であること、透水性舗装や排水性舗装への施工も可能であることから、実用的で速効性のある対策として期待できる。温度低減性能の更なる向上とともに、みかけの色と性能の関係、耐久性、反射日射の影響評価などが検討を要する課題として挙げられる。

5.1 保水性舗装による都市の高温化抑制効果の推定

東京 23 区の全道路に保水性舗装を導入した場合の気温低減効果を試算した。計算に際して、保水性舗装の蒸発効率(飽和の蒸発量に対する実際の蒸発量の比率)の値は 0.06, 0.15 (β 法の定数 β) の2通りを与えた。蒸

発効率は対象期間中、一定値とした。

保水性舗装導入(蒸発効率0.15の場合)による気温低下量と導入後の風ベクトルを図13に示す。日中の時間帯において、都心部で保水性舗装の効果が認められる。また、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。一方、蒸発効率0.06を与えた場合(より乾燥した状態を想定)には、例えば大手町地点における気温低下量の最大値は0.45℃となり、蒸発効率0.15の場合の半分程度の効果に止まる。

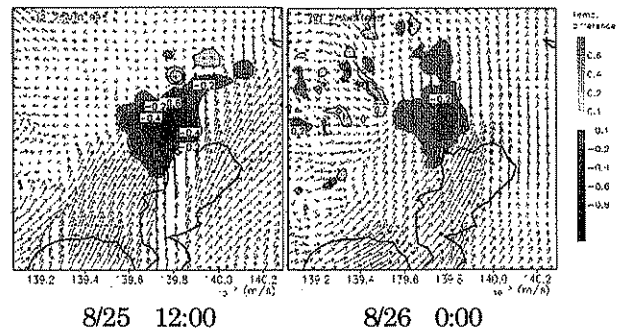


図13 保水性舗装導入による地上気温の変化量と風速ベクトルの計算結果(気温は導入後から導入前の値を差し引いた結果、風速ベクトルは導入後の結果を示す)

5.2 高反射性舗装による都市の高温化抑制効果の推定

高反射性舗装による都市スケールの気温低減効果を推定するにあたり、まず、舗装供試体レベルでの温度低減性能の実測による性能の確認を行った。図14は数種類の反射性塗膜を用いた高反射性舗装の表面温度が標準の密粒舗装に比べてどの程度低下するかを示したもので、表面温度差が大きいほど、温度抑制効果が高いことを示している。8月の晴天日において、灰色系で15℃以上、黒色系の舗装でも10℃近い温度低減が確認された。また、密粒舗装と高反射性舗装の熱収支を整理したものが図15であるが、高反射性舗装では、密粒舗装に比べて顕熱輸送量が日中で半分程度に減少していること、また、午前、午後で顕熱輸送量がほとんどない時間帯が密粒舗装に比べて長いことがわかる。これは蓄熱量が少ないことを意味しており、ヒートアイランド化による熱帯夜問題解消にも効果的であることが示唆される。

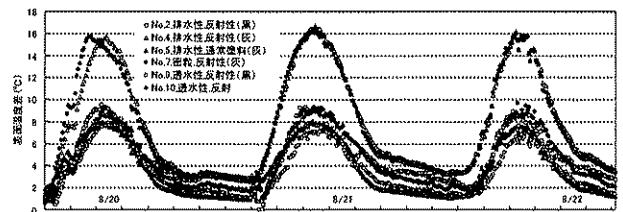


図14 標準舗装に対する表面温度低減量の経時変化

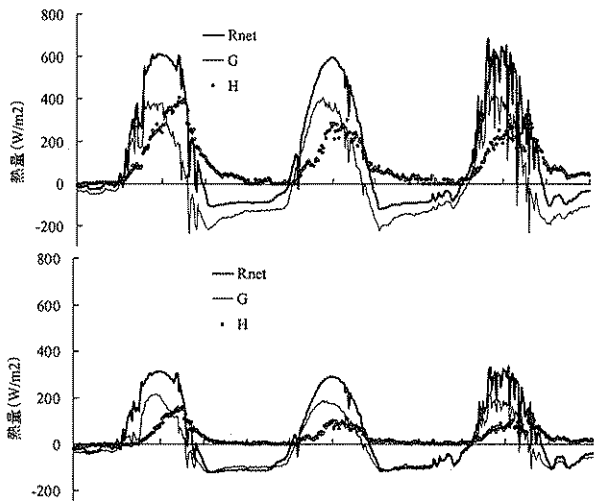


図15 舗装面の熱収支
(上：密粒舗装，下：密粒舗装+灰色特殊塗料)

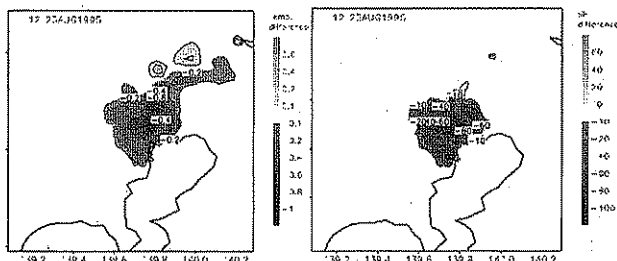


図16 高反射性舗装導入による気温の変化(左)及び
図17 高反射性舗装導入による顕熱輸送量の変化(右)

以上の性能を踏まえて、東京23区の全道路に高反射性舗装を導入した場合の気温低減効果を試算した。計算条件としては、現状の舗装面のアルベド値は0.1、高反射性舗装のアルベド値は0.6を与えた。高反射性舗装導入による気温変化量と顕熱輸送量の変化量をそれぞれ図16と図17に示す。都心部で正午には0.8℃以上、午後2時でも0.6℃以上の気温低減効果が認められた。また、顕熱輸送量は80W/m²以上も減少しており、保水性舗装や屋上緑化に匹敵する量となっていた。いずれも、舗装の表面温度が低下したことに起因している。なお、舗装表面温度の低減量に関する計算結果は前述の実測の低減量よりもやや過少評価されていたことと、路面反射が建物により吸収される影響が考慮されていないことから、表面温度算定上のスキームやパラメータに改良の余地がある。

6. 対策間の効果比較

前述の水面再生、屋上緑化、保水性舗装、高反射性舗装の効果に関する試算結果に基づき、それぞれの対策による気温低下量と、水面10%あたり、緑被率10%あたり、保水性舗装・高反射性舗装導入面積10%あたりの気温低下量を整理したものが図18である。大手町、練馬は

AMeDAS測定地点、領域平均の値は東京23区内の一定範囲(北緯35.7~35.8, 東経139.75~139.85)の平均値である。

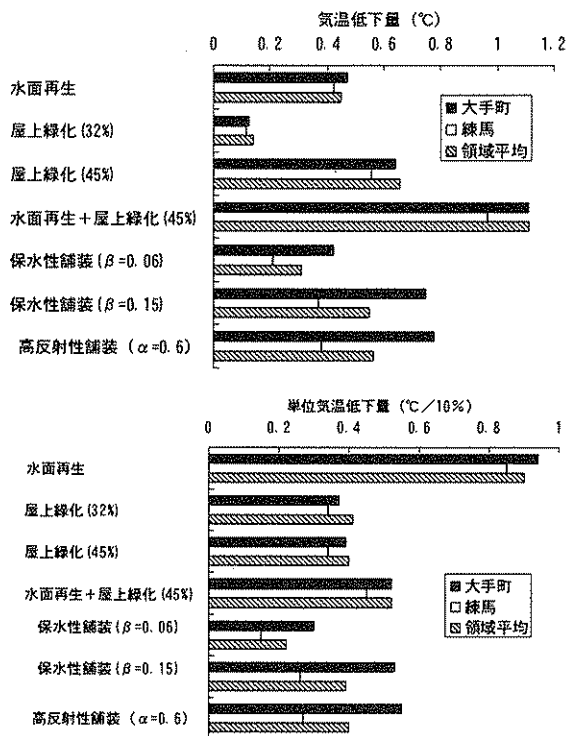


図18 各種対策実施による気温低減効果の比較
(上段：気温低下量，下段：単位面積あたり気温低下量)

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、12時における単位気温低下量は水面が緑地の倍程度の値を示しており、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。これは水面温度が緑地や他の地表面温度よりも相対的に低く、かつ、貯熱効果が大いことによると考えられる。保水性舗装については、蒸発効率0.15の場合には屋上緑化なみの単位面積あたりの効果を示す一方、湿度度が下がると効果も大きく減少する。高反射性舗装では、領域平均で見ると保水性舗装をわずかに上回る単位気温低下量となっている。これらの対策を組み合わせたとときの効果はそれぞれの効果のほぼ線形和によって評価可能であったことから、例えば、水面を全土地利用面積の5%増加、屋上緑化を同10%増加、高反射性舗装を同10%増加させることにより、平均的には約1.3℃の気温低下が可能という結果が導かれる。現実には、対策ごとの特性の違い、地域ごとの土地利用、街区構造などの違いを考慮しつつ、地域ごとに最も有効な対策を組み合わせることによって、最小の投資で可能な限り最大の効果を発揮する必要がある。

7. 現状と将来における人工排熱量の推定とその影響予測

7.1 現状の首都圏人工排熱量の推定

都市における様々な活動によって発生する人工排熱は、ヒートアイランド現象の大きな原因の一つと考えられており、人工排熱の時空間分布についてはこれまでも細密数値情報等の国土基盤情報を用いた推定が行われてきたが、多くは東京23区を対象とし、現状の推計に止まっている。しかし、人工排熱の広域的な発生と大気への放出+将来的な排熱増によって、首都圏の熱環境はさらに悪化することが懸念される。したがって、大きな熱の発生源である東京都心部のみならず、周辺部まで含めた時空間分布と将来排熱量の推計が必要である。

人工排熱量推定手法は木内・吉谷¹²⁾に基づくが、日射の透過や人体発熱に由来する分は今回の結果には含めていない。以下、推定の概要と結果を紹介する。本研究においては既存メッシュデータや都県から収集したデータ等を用いて、首都圏における民生家庭部門、民生業務部門、運輸部門の排熱量の時空間分布を定量化するとともに、後述するように2010年時点での各部門の人工排熱量変化シナリオを作成し、削減対策の有無による排熱の増減量を算出した。

人工排熱削減策を考える場合、まず、人工排熱量に占める各排出源の割合を知る必要がある。図19は、現状人工排熱量（顕熱分のみ）の時間変動の算出例を示す。東京都において日中は全排熱量に占める業務部門の割合が大きいが、夕方以降は、家庭部門、運輸部門の割合が増加していることがわかる。埼玉県では、日中、運輸部門が支配的で、夕方以降は家庭部門が高い割合を占めている。これは意外かもしれないが、業務部門の排熱は全量が顕熱ではなく、冷却水による潜熱輸送も相当量あることによる。

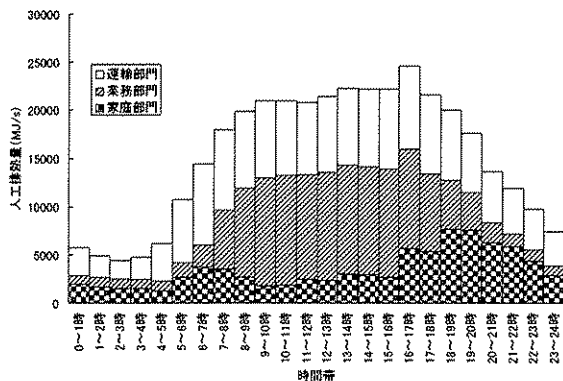


図19 人工排熱量（顕熱）の時間変動（東京都）

図20、21は東京都における業務部門と家庭部門の排熱量内訳の時間変化を示している。業務部門では、日中は

ば一定の割合で排熱が発生し、照明・電力に由来する排熱が冷房機器の駆動用エネルギー消費に起因する排熱を上回る。一方、家庭部門では朝と夜間の2つの時間帯でピークが見られることや、照明・動力由来の排熱が多いことがわかる。

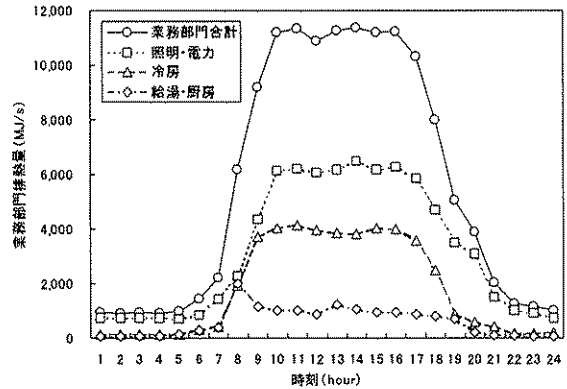


図20 業務部門排熱量の内訳

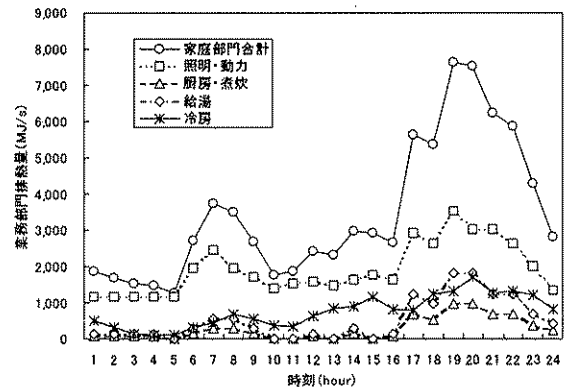


図21 家庭部門排熱量の内訳

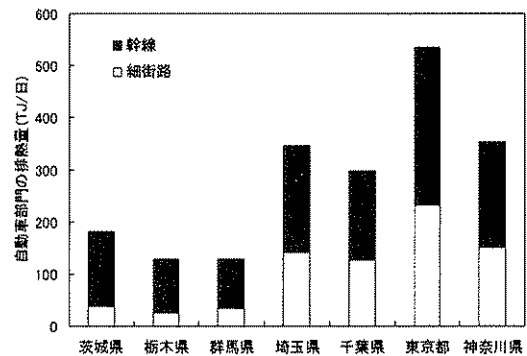


図22 各都県における自動車部門排熱量の推定値比較

図22は自動車排熱量の算定結果を都県別・道路種別に示している。1都3県では細街路交通に由来する排熱量が幹線交通に匹敵する量であることがわかる。図23には東京都全体における車種別の排熱量内訳を示す。乗用車や軽乗用車が半分以上の排出源で、40%程度は貨物車に由来していることがわかる。以上の検討結果を整理すると、東京都における日あたり排熱量は首都圏1都6県の

日あたり総排熱量の38%であり、首都圏全体では運輸部門の占める割合が全体の43%と最も高いことが判明した。また、業務部門からの排熱が卓越するのは日中の都心部に限定されている。最も現象が深刻な東京都区部においては、日中の業務部門の冷房、照明・電力由来の排熱削減と、夜間の家庭部門の照明・動力由来の排熱削減が効果的であろう。

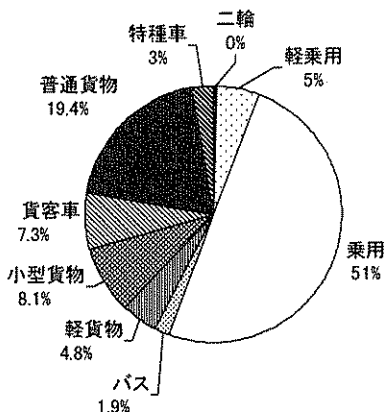


図23 自動車部門排熱量の内訳 (東京都)

7.2 将来の人工排熱増による広域的な熱汚染

今後の我が国の人口は、2010年前後まで微増で推移し、その後は減少の一途をたどるとされていることから、何らの対策を打たない場合、人工排熱は増加を続け、ヒートアイランド現象は今後数十年にわたって解消されずに進行する恐れがある。様々な対策を実施しても、将来人工排熱が増大すれば、対策の効果を帳消しにする可能性を持っている一方で、屋上緑化・壁面緑化や高反射性塗料などの対策でコンクリート・アスファルトによる建物内部への熱負荷を減らして、直接的な排熱削減につながる対策もある。したがって、人工排熱量の抑制によりヒートアイランド現象を緩和するには、将来のエネルギー需要動向の予測や省エネ技術の進展を考慮しながら将来の排熱量時空間分布を推定し、排出原因の分析や気温への影響を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では近い将来(2010年)の人工排熱量の推計も行った。推計条件の詳細は文献 12)に譲るが、結論としては省エネ努力等の対策がない場合、首都圏全体における人工排熱量は現状の約3割増、東京都でも3割弱の増加となることが予想された。また、徹底した省エネ努力によっても、首都圏全体の将来人工排熱量は現状排熱量の93%程度までしか削減できないと推計された。

仮に将来の人工排熱増が起こった場合、現状よりもヒートアイランド現象がどの程度悪化する可能性があるのか試算した。将来の排熱増シナリオは文献 12)に基づいて

おり、これは首都圏全体でおよそ30%増加することに相当する。図24には地上1.5mにおける気温と地上10mにおける風速ベクトルの変化量の分布を示す。排熱増の影響は朝から現れ、特に排熱量の多いエリアで気温上昇が大きくなっていった(図略)。日中は、都心部で0.4℃以上の地上気温の上昇が見られ、夕方から夜間にかけて気温の上昇域が内陸部に移動するとともに、その影響範囲が拡大していることがわかる。現に、首都圏内陸部の埼玉県や群馬県における高温化現象が確認されており、排熱源の広域化(都市の拡大)とエネルギー需要の増大に伴い、ヒートアイランド現象は、今後、さらに広域化する恐れがあると予想される。また、排熱量の増大による気温の上昇は冷房に起因する排熱量のさらなる増大をもたらすことにも注意が必要である。

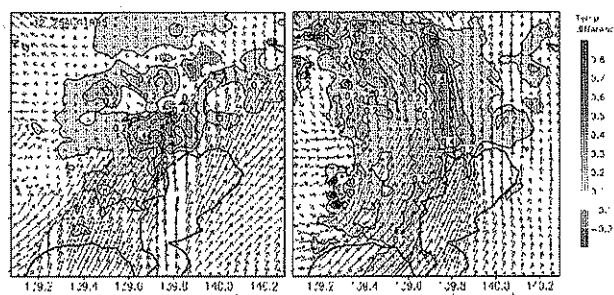


図24 将来の人工排熱増加に伴う気温上昇量の計算結果 (左:12時, 右:20時)

8. 都市排熱が水域に及ぼす影響

都市の排熱に関する研究は、大気への影響を主に進められ、水域への影響については見逃されてきたが、東京湾においては、鞭毛プランクトンの繁殖時期が早まり、夏に起きるはずの赤潮の発生が早まり始めていると報告され、都市からの排熱が一因ではないかと考えられている。一方、ヒートアイランド緩和対策として、これまで大気に放出していた都市の排熱を水域に排出するシステムが考えられるが、水域への新たな熱負荷による生態環境への影響が心配される。そこで、東京湾において実際に水温上昇が生じているのか、生じているとしたら、一体何が水温上昇をもたらしているのだろうかという観点で分析した結果を紹介する。

過去30年以上にわたる東京湾奥部の水温データの分析結果¹³⁾によると、図25に示すように、特定の時期に限ってみると、東京湾の表層水温が経年的に上昇傾向にあることがわかる。また、都市の発展や生活様式の変化による水とエネルギーの消費量増大に伴い、下水道を經由して公共用水域に排出される下水放流水温も経年的に

増大してきていることが明らかとなっている(図26)。東京湾の水温上昇傾向が都市からの放流水温・熱量の増大によるものかどうかについてはさらに分析する余地があるものの、「都市の気温を下げる」ためのヒートアイランド対策が別の悪影響を及ぼすことがないかどうかという総合的な視点で対策を考えることも重要である。

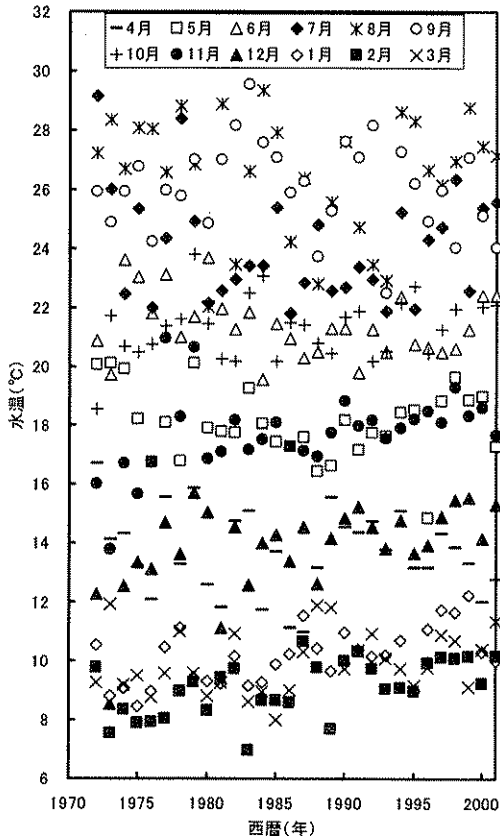


図25 東京湾の表層水温の経年変化

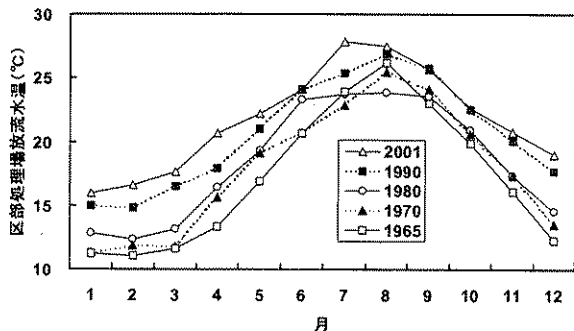


図26 月別放流水温の経年変化

9. おわりに

本論文では前年度までの研究内容の整理や追加の分析を行った結果を述べるとともに、高反射性舗装の特性、人工排熱の将来増が都市大気に及ぼす影響の分析結果を述べた。高反射性舗装を屋外に敷設して舗装温度、気象条件等の観測を行い、夏期晴天時で高反射性舗装の表面温度を通常の密粒舗装に対して15°C程度低減できること

が明らかとなった。また、メソスケールモデルによる試算の結果、高反射性舗装を東京23区の全道路に導入した場合、夏期晴天時日中で屋上緑化や水面再生などの対策と変わらない気温低減効果があることが示された。さらには、排熱源の広域化(都市の拡大)とエネルギー需要の増大に伴い、ヒートアイランド現象は、今後、さらに広域化する恐れがあると予想された。

参考文献

- 1)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.
- 2)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.
- 3)東京都環境局: 都におけるエネルギー需給構造調査報告書, 2001.
- 4)Grell, G., J. Dudhia and D. Stauffer: A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR/TN-398+STR, 1994.
- 5)Noilhan, J and S. Planton: A simple parameterization of land-surface processes for meteorological models, Mon. Wea. Rev., 117, 536-549, 1989.
- 6)建設省編: 建設白書, 2000.
- 7)松浦茂樹, 島谷幸宏: 水辺空間の魅力と創造, 鹿島出版会, 1987.
- 8)都市計画中央審議会基本政策部会水・緑・環境小委員会: 水と緑の環境デザイン, 1998.
- 9)土木研究所緑化生態研究室: 平成10年度重点研究プロジェクト成果報告書, 土木研究所資料3696号, 2000.
- 10)鈴木理生: 江戸の川・東京の川, 井上書院, 1989.
- 11)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.
- 12)木内豪, 吉谷純一: 首都圏における将来の人工排熱量時空間分布の推計, 第30回環境システム研究論文発表会講演集, 205-210, 2002.
- 13)木内豪: 都市の水利用が公共用水域に及ぼす熱的影響の長期的変化-東京都区部下水道と東京湾を事例として-, 水工学論文集, 第47巻, 2003.
- 14)Rosenfeld, A.H., et al.: Policies to reduce heat islands: Magnitude of benefits and incentives to achieve them, Proc. of the 1996 ACEEE summer study on energy efficiency in buildings, Vol.9, p177, 1996.