

1-2 ヒートアイランド現象軽減手法の費用対効果に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 13～平 15

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】

都市の高温化や地球温暖化の抑制を図るためには、各種対策の効果と費用を明らかにし、効果的な対策を提示する必要がある。このため、本研究では屋上緑化、水面の再生、舗装の改善、自動車排熱の抑制などのヒートアイランド軽減対策を実施した場合の省エネルギー効果、大気への負荷削減効果、生活環境の向上効果や対策費用の面から社会経済的影響の定量化を行うことを目標として実施する。平成 15 年度は、ヒートアイランド低減効果を目指した高性能の熱反射性塗料の開発を行い、濃灰色で日射反射率 50%の遮熱性舗装を実現した。また、住民参加型のヒートアイランド対策としての打ち水の実施可能性とその効果の検証を行い、その有効性を示した。最後に、各種ヒートアイランド対策シナリオに対する費用と便益の定量化を行い、地上緑化や家庭部門の排熱削減対策が有効であること、屋上緑化（重複利用を見込まない場合）や舗装による対策の B/C が他の対策よりも小さくなることを示した。

キーワード：ヒートアイランド、緩和対策、費用便益評価、CVM、遮熱性舗装、打ち水社会実験

1. はじめに

都市中心部の大気と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。また、それぞれが複数の異なる要因から成っているため、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。そのため、本研究では、ヒートアイランド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、メソスケールでのシミュレーションによって各種対策シナリオのもとで気温低減効果の定量化を行ってきた。

一方、有効な対策を考える上では、対策の実施費用、広い意味での便益、速効性、持続性、実現可能性も重要である。費用に見合う便益があるのならば、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おり、各種のヒートアイランド対策の実施に係る費用と気温低減以外も含む総合的な効果の関係については、

これまで検討された事例がないことから、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。そこで、本研究では様々な対策の費用と便益の定量化により有効な対策の提示を行う。

また、本研究の一環として、「ヒートアイランド低減効果を目指した高性能の熱反射性塗料の開発」を共同研究として実施してきており、その成果についても報告する。

さらには、住民参加型のヒートアイランド対策の実施可能性とその効果を探る上でも有益なケーススタディになると考えられる「大江戸打ち水大作戦」が実施され、効果の把握等を行ったことから、その成果について報告する。

2. ヒートアイランド低減効果を目指した高性能の熱反射性塗料の開発

2.1 概要

都市域のヒートアイランド現象が社会的な問題となる中で、舗装など人工地覆の高温化がその原因の一つと言われており、早急な対策が求められている。その様な状況から開発されてきた遮熱性舗装¹⁾は、路面に遮熱コート材を塗布して日中の路面温度の低減を図る新しい舗装技術である。遮熱性舗装は低騒音舗装の機能を損なうことなく路面温度の低減が可能であることから、沿道環境の保全と熱環境対策とを両立できる技術として有効に機

能する可能性を有している。

土木研究所と(株)NIPPOコーポレーション、長島特殊塗料(株)では、より適用効果の高い対策技術として確立させていくことを目的とした、遮熱性舗装の高性能化に関する共同研究を実施してきた。ここでは、車道への適用を考慮した黒色系の遮熱性舗装について、新規開発した遮熱コート材の日射反射性能および温度低減性能に関する検討結果を報告する。また、遮熱性舗装は既設舗装への施工性が優れている一方で、反射日射により人体への熱負荷が増えるのではないかと、反射日射により大気が加熱されるのではないかと指摘されている。そこで、これらの観点から遮熱性舗装による都市熱環境改善の可能性に関して考察を行ったので報告する。

2.2 遮熱性舗装の概要と高性能化

遮熱性舗装は、路面に遮熱コート材を塗布して日射反射率を高めることにより、路面温度の上昇抑制を図ることができるものである(図-1)。使用する黒色系の遮熱コート材は、日射のうち、可視域の反射率を抑制したまま近赤外域のみを高反射できる。よって、日射エネルギー量の約50%を占める近赤外線を高反射して蓄熱を防ぐので、黒色の色調を持ちつつも温度低減化を図ることが可能となる。

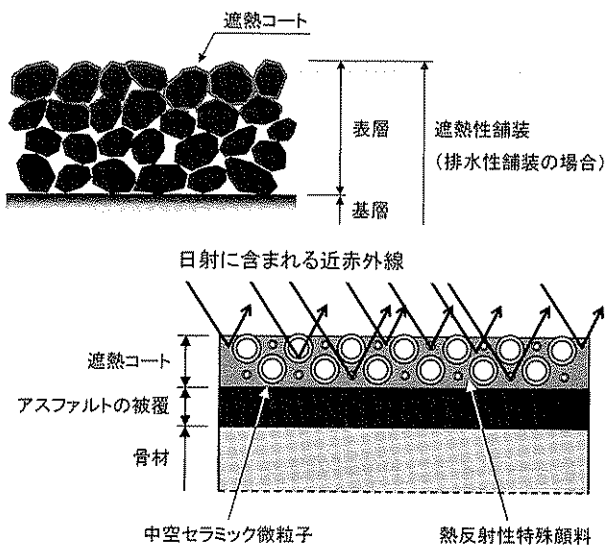


図-1 遮熱性舗装の舗装断面と温度抑制機能の概念

2.3 実験結果と考察

本研究では、区画線の視認性確保を考慮して、車道用として望ましい明度を L^*40 (社)日本塗料工業会 塗料用標準色見本帳 N-40 相当程度以下と定め、現在実用化されている遮熱コート材(従来品、(株)NIPPOコーポレーション・長島特殊塗料(株)製)を性能基準として、反射特性の改善と更

なる路面温度低減化を目標とした。具体的には、塗膜構造の検討や新規材料の導入検討等である。

(1) 反射特性の見直し

図-2に、従来品と本開発品(例としてN-40タイプ105)の反射特性を示す。 L^* 値はいずれも約40であり、同様の黒色系の色調を持つ。可視域を低反射としつつも近赤外域を高反射する遮熱コート材の反射特性がみられるなかで、N-40タイプ105については近赤外域の反射レベルが約90%にまで達しており、2002年8月時点での従来品よりも約20%も向上している。一方、図-3のN-40タイプ105とN-40タイプ104は一部の材料を使い分けてみた結果であり、近赤外域の反射性能が改善していることから、適切な材料選定や配合設計を実施していくことで遮熱コート材としての反射レベルを向上できることがわかる。

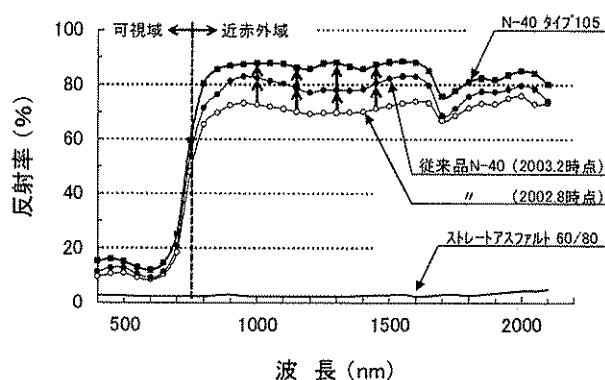


図-2 本開発品(N-40タイプ105)の反射性能

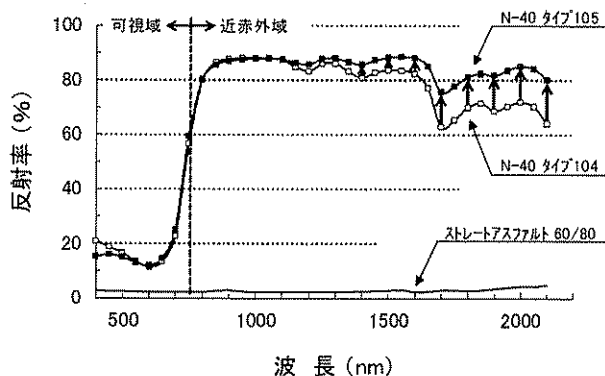


図-3 材料選定と反射特性の改善

(2) 日射反射率の向上

明度と日射反射率の関係について、従来品 N-40 と N-60(いずれも2003年2月以降)を基準に、本開発品の一部をプロットした(図-4)。これより、本開発品の日射反射率が全体的に従来品よりも向上していることがわかり、特に目標明度を L^*40 以下と規定した場合にはN-40タイプ105の日射反射率が高く、温度低減化に対する有効性が期待できる。なお、ここで示す日射反射率とはJISA 5759

に定義されるものである。

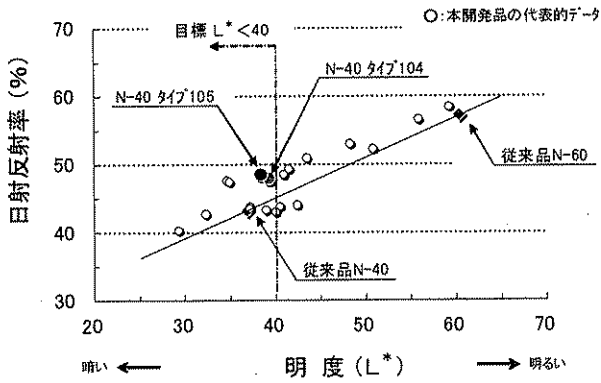


図-4 明度と日射反射率の関係

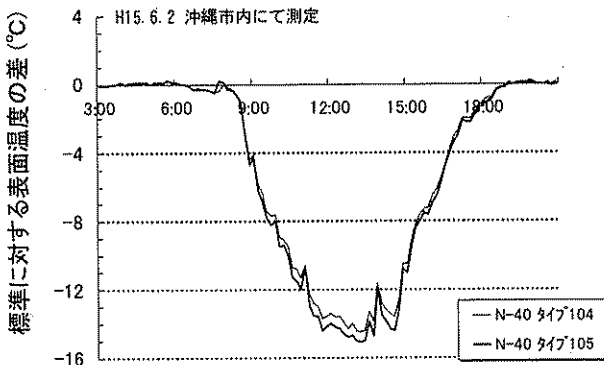


図-5 標準舗装に対する温度低減量

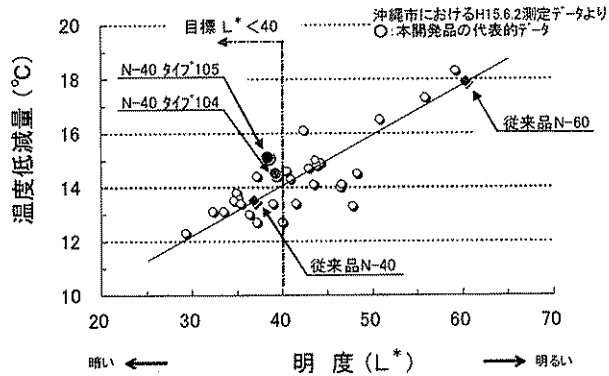


図-6 本開発品の温度低減性能

(3)屋外での舗装表面温度

本開発品のうち、選定した32種類について沖縄市内に供試体を設置し、屋外において舗装表面温度を測定した。供試体は密粒度アスコン 13mmTOP に遮熱コート材をコーティングしたホイールトラッキング試験用のものであり、熱電対は先端部を約5cm露出させて遮熱コート材とアスコンとの界面に接着し、それぞれの供試体の周囲には断熱処理を行った。図-5に示す遮熱コートを塗布しない標準に対する最大温度差は、N-40タイプ104が14.5℃、N-40タイプ105が15.1℃であり、黒色系でありながら高

い温度低減効果が得られていると共に、図-2ならびに図-3に示したN-40タイプ105の反射特性の改善が舗装表面温度の更なる低減化につながっている。一方、明度と、同一時刻における温度低減量の関係を示せば図-6のとおりであり、 $L^* < 40$ 以下で日射反射率の高いN-40タイプ105が特に温度低減量が大きく、従来品を越える温度低減性能が得られていることがわかる。

また、図-7は数種類の反射性塗膜を用いた遮熱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、土木研究所構内で測定した結果である。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℃近い路面温度の低減が確認された。一方、冬期においては、密粒舗装と遮熱性舗装の温度差はそれほど大きくない。

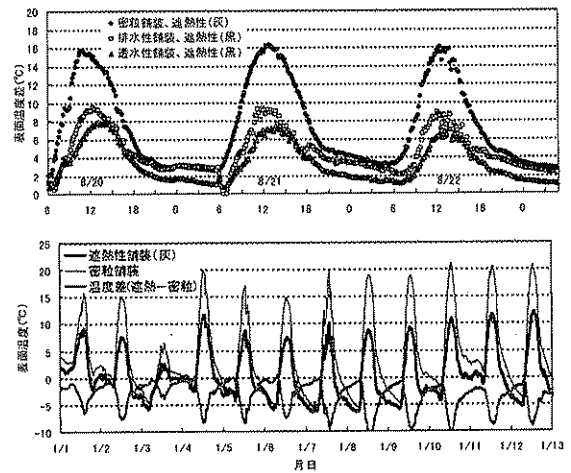


図-7 遮熱性舗装の表面温度測定結果

(上：夏期・表面温度差，下：冬期・表面温度+温度差)

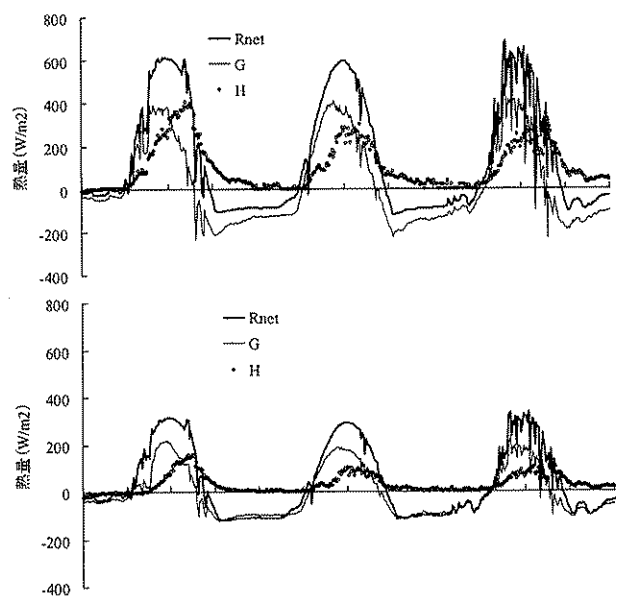


図-8 舗装面の熱収支(上：密粒，下：遮熱性(灰色))

舗装面からは大気を直接加熱する顕熱が、大気と舗装面の温度差に応じて上空に輸送される。図-8は測定結果に基づき整理した密粒舗装と遮熱性舗装の熱収支であるが、遮熱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、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。これは蓄熱量が少ないことを意味しており、熱帯夜問題解消にも効果的であることが示唆される。

2. 4 熱環境改善効果の定量化

(1) 都市大気への影響

東京23区の道路用地(細密数値情報における道路用地のうち、道路の緑地率7.9%に相当する面積を除く面積分、約88km²)に遮熱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、現状の舗装面のアルベド値は0.1、遮熱性舗装のアルベド値は0.6を与えた。遮熱性舗装導入による気温変化量を図-9に示す(具体的計算設定は後述の3.5(4)に同じ。計算モデルには都市キャノピーモデルは組み込まれていないため、建物壁面からの熱輸送や建物による日影の影響などは考慮されていない)。舗装の表面温度が低下したことに起因して、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。なお、今回のモデルでは路面反射が建物により吸収される影響(その逆も含む)は考慮されていない。

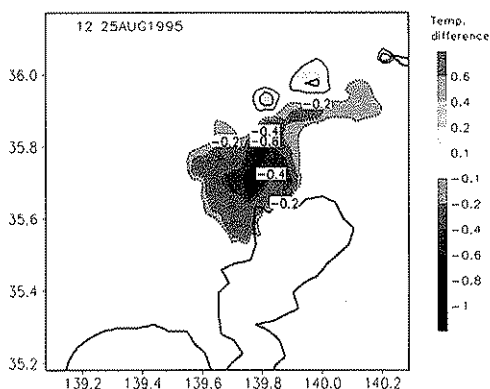


図-9 遮熱性舗装導入による気温の変化(8/25 12:00)

(2) 反射日射の大気による吸収

路面で反射される日射は、大気中に存在する空気分子やエアロゾルによって散乱されるとともに、水蒸気、酸素、二酸化炭素、オゾンなどにより吸収される。また、路面から放出される長波放射も、水蒸気や二酸化炭素などによって吸収され、大気から再び放射される。したが

って、路面からの反射日射と長波放射のどちらがより大気の加熱効果が大きいかがポイントとなる。Kondo²⁾によれば、地表面から放出される長波放射は、日中、100m以下の大気を加熱し(放射加熱と呼ぶ)、高度5cm付近で14℃/時以上、高度1.5mでも約4℃/時の放射加熱が生じる計算となる。浅枝ら³⁾は、舗装面を対象として放射加熱の検討を行い、地上から数10mの高さまでは局所的に極めて多くの長波放射が吸収されると算定している。また、地表面に向かう日射の吸収量は高度にほとんど変わらず大気層1m通過において1W/m²であるのに対して、長波放射の吸収量(放射加熱量)は地上1mでおおよそ10W/m²/mと、日射の10倍となることが示されている³⁾。これらの知見からすると、反射日射で太陽からの入射エネルギーを上空に逃がす方が下層大気の加熱量は少なくなると考えられる。

(3) 反射日射が周囲建物に及ぼす影響

舗装面を囲うように建物が存在する街路空間の場合、舗装面で反射される日射の一部は沿道の建物に吸収されて壁面温度を上昇させるのではないかと考えられる。その程度は街路の幾何構造や建物壁面の熱物性、反射特性に依存する。キャノピーモデルを用いて試算したところ、建物が路面の反射日射の一部を吸収して壁面温度がわずかに増大するが、街路空間(キャノピー)全体としての反射率は増大するとともに、街路空間から上空大気への顕熱量は減少する結果となり、都市のヒートアイランド化を抑制する方向に働くことがわかった。

(4) 人体への影響

人間の温冷感覚は人体の温熱生理反応の結果として現れ、人体への熱負荷が増えると暑さが助長される。屋外における人体への熱負荷として最も大きな割合を占めるのは全天日射である。密粒舗装を遮熱性舗装に変えると、反射日射が増え、長波放射が減るため、遮熱性舗装は人体への熱負荷を増大させる可能性があるが、地上近傍の気温場や人体足下から伝わる熱伝導にも変化が生じて、熱負荷を軽減する方向にも作用する。屋外で6名の被験者が路面中央に立って申告実験を行ったところ、通常の舗装に較べて遮熱性舗装の方が涼しいと感じる人が7割(残りはどちらでもない)であった⁴⁾。

2. 5 まとめ

遮熱性舗装は、既設舗装も含めて遮熱コート材を路面に塗布するのみで安定した温度低減効果が得られることから、路面温度の抑制によるヒートアイランド対策として有効な方法と考えられる。低騒音舗装と組み合わせた場合にタイヤ路面騒音の低減効果がみられること⁵⁾や、

路面温度の低減化に伴うわだち掘れの抑制効果も期待されることから、実道におけるこれらに関するデータの蓄積と分析が今後必要である。

3. 市民参加型のヒートアイランド対策の実施効果に関する検討

3.1 検討の目的

ヒートアイランド対策を総合的かつ早急に実施するには、国や地方自治体が主導で実施する対策に加えて、民間事業主体や個人が主体的に実施する対策も必要不可欠である(図-10)。例えば、東京都において民間建物等の屋上緑化によって気温低減を図ろうとする取り組みは条例によって誘導されており、民間、個人による対策は多少なりともそうした国、自治体側の後押しを必要とする。

より積極的な意味での市民参加型のヒートアイランド対策の代表的なものとしては、省エネルギー行動が挙げられる。省エネ行動は省エネ機器の導入などにひけをとらない程の排熱削減効果があることが昨年度の検討で明らかとなっている。市民参加型、個人実践型の対策にかかる費用はそれほど大きくならないと考えられることから、この範疇における他の対策実施の可能性について検討の余地がある。

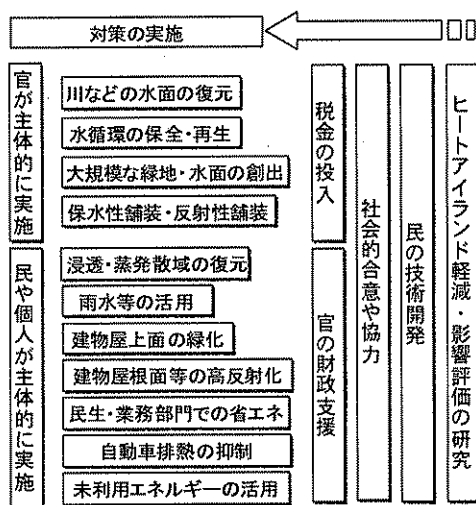


図-10 ヒートアイランド対策の役割分担と実施過程

このような「一般市民の参加できる対策」という視点を重視し、打ち水という昔ながらの行為を現代の社会問題である都市の酷暑解消につなげようという発想から、雨水や雑用水などの利用を前提とした「大江戸打ち水大作戦」(以下、本作戦)なる壮大な社会実験が繰り広げられた。土木研究所は計画段階から本作戦に関わり、数値シミュレーションによる検討や作戦当日における計測を実施したので、社会実験としての成果とともに、それらの結果について報告する。

3.2 大江戸打ち水大作戦

NPO第3回世界水フォーラム事務局が主体となり、「ヒートアイランド現象の緩和」という目的のために、風呂の残り水や雨水や再生水など水の二次利用、再利用を促進させる試みとして「大江戸打ち水大作戦」が実施されることとなった。主に5つのNPO団体が参加し、国土交通省、環境省、東京都などが後援となった。

「江戸の知恵に学べ」の号令の下、NPOを中心として、「みんなの手で灼熱の東京の気温を2℃下げよう」と100万人の参加者を目標にホームページの作成、ラジオ、テレビなどを通じてのPR活動、打ち水参加への呼びかけが約1ヶ月間行われた。本社会実験への最終的な参加者数については事務局が次のように算定した。まず無作為の電話による聞き取り調査を行い、「大江戸打ち水大作戦」を知っている人の割合22.2%、「大江戸打ち水大作戦」に参加した人の割合8.5%が算定された。この値を基に、東京23区内の世帯数3,995,219から打ち水参加者数を約34万人とした。このように、東京23区内という広大な地域、34万人という多数の市民が参加した社会実験はこれまでには無かった試みであると思われる。

3.3 打ち水重点地区による効果の測定概要

本作戦では「打ち水」の効果を実測により明らかにしようという目的で、重点地区として東京都墨田区東向島1~3丁目(図-11、図-12)において、土木研究所、中央大学、荒川河川事務所が協同して、集中的な気温と湿度の測定、サーモグラフィーを用いた地表面温度の測定(以下、本実験)を行った。この地域は東京の23区内東部に位置し、いわゆる下町と言われる地域である。この地域では墨田区が雨水貯留施設の設置を推進・支援しており、打ち水用の水として、これらの雨水を利用することができた。

打ち水は、図-12に示す黒線で囲まれている地区(東向島1~3丁目)で12:00より約20分~25分間行った。特に、第一寺島小学校と墨田川高校はイベントとしてそれぞれ500リットル、600リットルの水が撒かれ、地藏坂通りは商店街の協力により約1,700リットルの散水が行われた。また国道6号沿いでは、散水車を使い約600m間を20分程かけて11,000リットルの水を撒いた。打ち水に用いた天水の水温は、この地域の日平均気温(約27℃)とほぼ同じであった。このような場合、水は貯熱より潜熱効果の方が遙かに大きいと考えられるため、水温の解析は行わなかった。

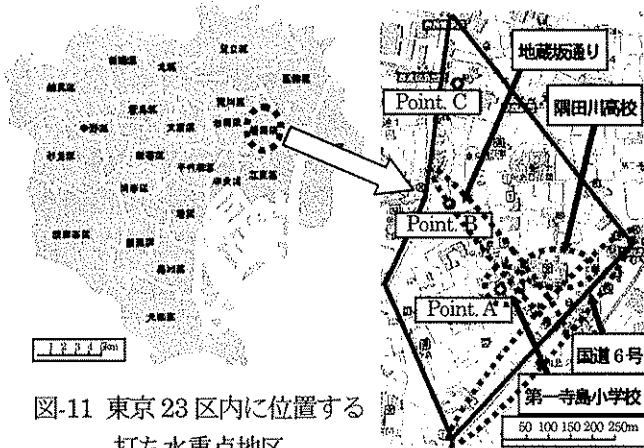


図-11 東京 23 区内に位置する
打ち水重点地区

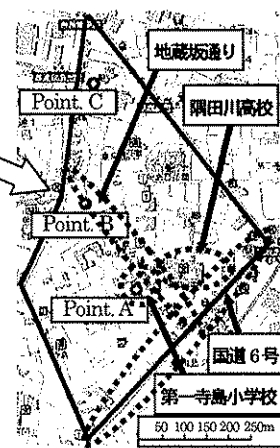


図-12 打ち水地区の地図
(墨田区東向島 1~3 丁目)

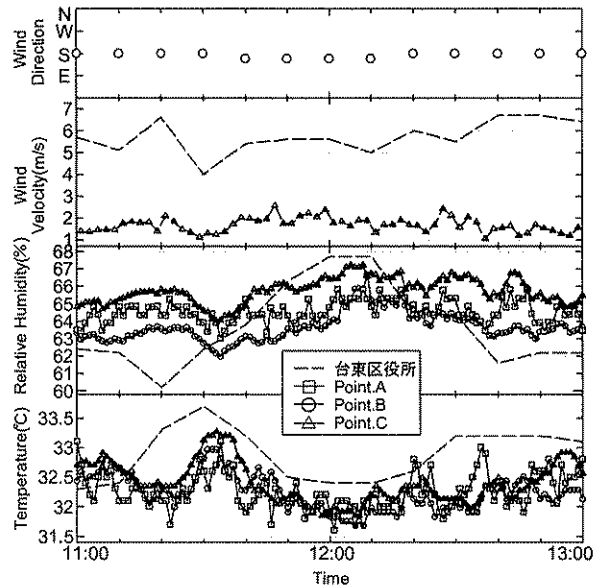


図-13 定点観測 Point における気温、相対湿度、風速、
風向の時系列 (観測 Point. A~C, 台東区役所)

3. 4 観測結果と考察

(1) 実験当日の天気概況

今夏は気温の低い日が続いていたが、観測日は関東地方を太平洋高気圧が覆い、日中 30℃を越す真夏日となった日であった。また、観測時間中は、7~8m/s の南風が吹く、海風の非常に強い一日であった。

(2) 定点観測における気温、相対湿度

図-12 に示す第一寺島小学校 (Point. A)、地藏坂通り (Point. B)、白髭神社 (Point. C) で定点観測を行った。各観測ポイントの地上から約 1.5m の地点に通風式温湿度計を設置し、気温、相対湿度の計測を行った。また観測 Point. C では風速計を設置し風速の測定も行った。

また、打ち水エリア外のデータとして、東京都台東区役所 (打ち水地域から東南東方向に直線距離約 3km, 地上 43m地点に器材設置) において計測している気温、相対湿度、風速データを東京都環境科学研究所より提供頂き利用した。なお、今後台東区役所の気温を外気温、相対湿度を外相対湿度と本稿では定義する。

Point. A, Point. B, Point. C, 及び東京都台東区役所における気温、相対湿度、風速、風向の時系列を図-13 に示す。11:30 頃から 12:00 にかけて打ち水地域の気温・外気温の減少、相対湿度・外相対湿度の増加が起こる。気温低下時に南方からの風速が上昇している事から、気温の減少、相対湿度の増加は海風による海上の湿った相対的に冷たい空気の流れによるのではないかと考えられる。

図-14 に外気温と打ち水地点の気温差、相対湿度の差 (台東区役所の値から打ち水エリアの値を引いた) の時系列を示す。12:00 に Point. A における外気温との差が 0.5℃, Point. B における外気温との差が 0.1℃大きくなっている事が分かる。また 12:00~12:05 までの間に外相対湿度差が Point. A, Point. B 共に 1.5%程度下がって

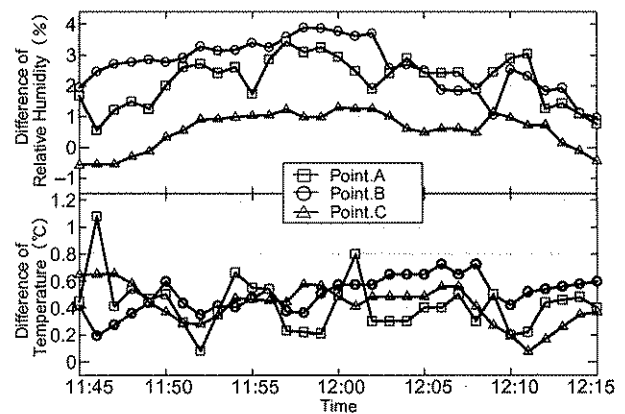


図-14 台東区役所と定点観測 Point における気温、相対湿度の差の時系列 (11:45~12:15)

る事が分かる。この気温と相対湿度の変動が打ち水によるものではないかと考えられる。図-15 は打ち水エリア及び、外気温の打ち水前後 15 分間 (12:00 を境として前後 15 分間) の平均気温の比較を行ったものである。打ち水前に比べ、打ち水後では Point. B で約 0.3℃, Point. A で 0.1℃, Point. C で 0.01℃程度気温が減少している事が分かる。台東区役所でも気温の減少は起こっており、総観規模で気温の減少が起きていると言える。しかし、打ち水エリアの気温低下量は外気温低下量より大きくこの差分が打ち水の影響ではないかと考えられる。Point. B が他の 2 地点に比べ気温の減少が大きいの、通りであるため風が通りやすかった事、Point. B の通りでは打ち水量が 1,700 リットルと他地点に比べ多かったためではな

いかと考えられる。

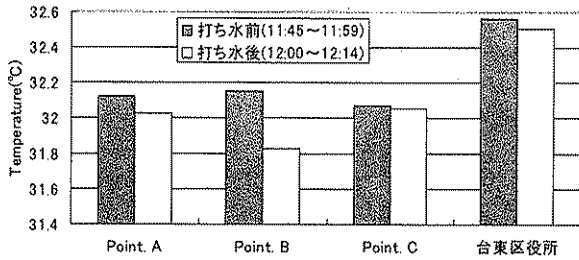


図-15 打ち水前後 15 分間の平均気温の比較

3. 5 メソスケールモデルを用いた打ち水効果の算定

(1) 概要

打ち水を大規模に実施した場合のヒートアイランド軽減効果を試算するため、メソスケールモデルによるシミュレーションを行った。モデルの概要は既に昨年度の年度報告書でも説明しているので省略するが、打ち水のモデリングに関係する部分のみ記述する。

(2) 打ち水効果の算定条件

打ち水の対象範囲は東京 23 区全域とした。このうち、建物用地では敷地面積の 40% 相当分、道路用地のうち、不浸透面の 50% 相当分を打ち水可能域と想定した。また、植生面・裸地面では、70% の面積に打ち水が可能と設定した。残りの 30% では打ち水は無く、刻々の土壌水分量に応じた蒸発散が生じると仮定している。この想定によれば、東京 23 区全体のほぼ 40% の面積 (約 265km²) において打ち水が行われる勘定となる。

打ち水の時間帯は 11:30~12:30 と 17:30~18:30 の 2 ケースとした。打ち水された地表面においては、バルク式 (β法) の蒸発効率 β を一定値 (=0.7) として与えた。比較として、土壌水分量の多寡の影響を見るための計算も行った。条件としては、初期の土壌水分量が領域全体で飽和水分量の 35% の場合、東京 23 区内のみで飽和水分量の 52.5% とした場合 (5 割増) 及び圃場容量にほぼ等しくなる場合 (飽和水分量の約 81%) の 3 ケースとした。地表面モデル (NP モデル) の蒸発効率と含水率の関係には次式⁷⁾ を用いた。

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

$$H_u = \begin{cases} 0.5 \left(1 - \cos \left(\pi \frac{W_g}{W_{fc}} \right) \right), & \text{if } W_g \leq W_{fc} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

(3) その他の設定条件

土壌の種類は全域でローム層を仮定し, Noilhan and

Planton⁷⁾ の土壌パラメータを与える。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⁸⁾ を参考に、それぞれ 0.68, 0.55, 0.20 と設定した。土地利用分類毎の緑被率 (緑地面積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。

表-1 計算条件の一覧

ケース	打ち水	打ち水域の蒸発効率	$\theta_{ini}/\theta_{sat}$
0	なし	—	0.350
W1	なし	—	0.525
W2	なし	—	0.809
U1	11:30~12:30	0.70	0.350
U2	17:30~18:30	0.70	0.350

θ_{ini} : 初期含水率, θ_{sat} : 飽和含水率

(4) メソスケールモデルの適用結果

a) 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。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。この場合、モデル最下層の厚さはおよそ 15m となる。母領域の初期条件、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。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。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。

以上の条件のもと、打ち水効果等をシミュレートする。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。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。

b) 土壌水分の影響

東京のような大都会では蒸発面が少ないので土壌乾燥化の影響がそれほど大きくないと思われるが、結果としては図-16 に示すように大手町のような都心であっても土壌水分量の多寡の影響を受けて地上気温 (高さ 1.5m) に差が生じている。また、東京 23 区内の一定範囲 (北緯 35.7 度~35.8 度, 東経 139.75 度~139.85 度) の領域平

均値で見ると大手町地点以上の違いが生じることがわかる。また、相対湿度の違いは極わずかであった(図省略)。気温低下量は様々なヒートアイランド対策に比肩する程度⁹⁾に大きく、相対湿度の増加量は想像するほど大きくないことがわかる。

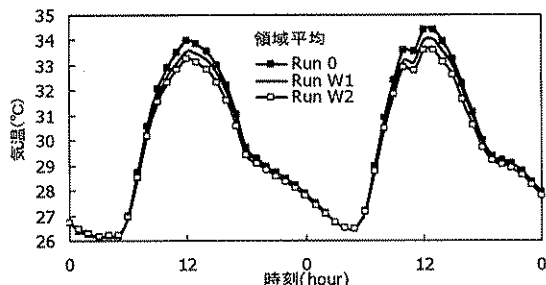


図-16 土壌水分の違いが地上気温に及ぼす影響

c) 打ち水の効果

図-17～19には、打ち水の有無と打ち水時間帯の違いによる気温と相対湿度の違いを示す。正午の打ち水により気温低下量は大手町で約2.2℃、練馬で約2.4℃(いずれも2日分の平均)であった。また、正午打ち水よりは夕方の方が相対湿度の増加量が小さいことがわかる。

正午打ち水による気温低下量空間分布(Run U1の気温-Run 0の気温)とRun U1の風速ベクトルを図-20に示す。基本的には打ち水範囲全域とその周縁部で大きな低下効果が確認できる。また、13時には影響範囲が拡大している様子が見られる。

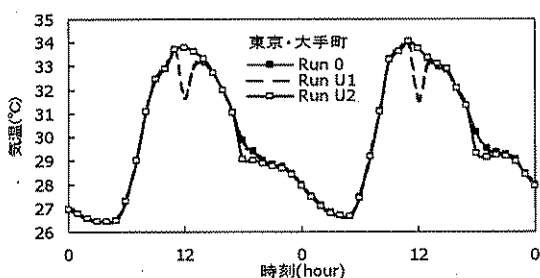


図-17 打ち水の有無による気温の違い(大手町)

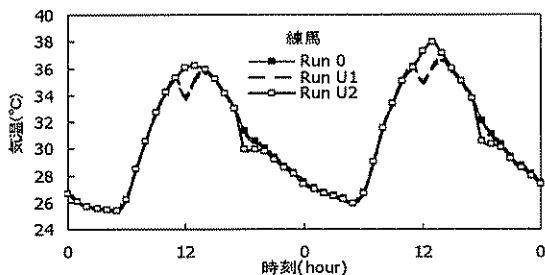


図-18 打ち水の有無による気温の違い(練馬)

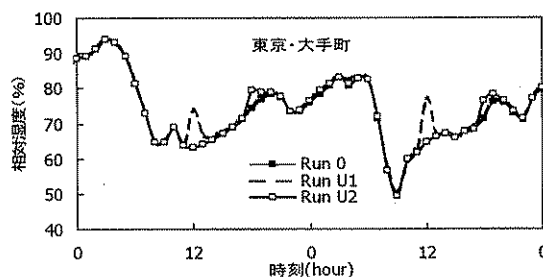


図-19 打ち水の有無による相対湿度の違い(大手町)

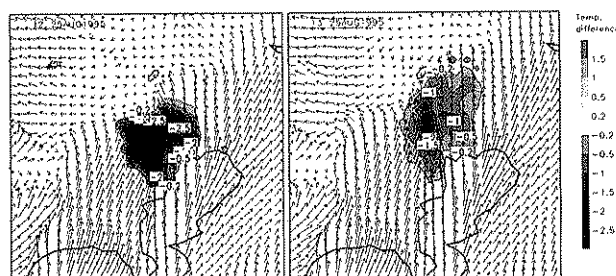


図-20 打ち水の実施による気温の変化

体感温度への影響という点で考えると気温の低下と湿度の上昇は相反する効果をもたらすことから、効果的な打ち水面の選択(高温化した地表面への打ち水)や気象条件(湿度条件)の違いと打ち水実施効果についての知見の蓄積が必要である。

3.6 まとめ

散水によるヒートアイランドの緩和を市民の手で行う事を目的として東京23区内で行われた社会実験にあわせて、重点地区として大々的に散水が行われた東京都墨田区東向島1～3丁目において気温・相対湿度の測定を行った。その観測結果と数値計算から、打ち水による気温低減効果の評価を行った。本研究により得られた主な知見を以下に示す。

(1) 打ち水前後15分間の平均気温の比較を行ったところ、地点Bにおいては、通りであるため風が通りやすかったことと打ち水量が他地点に比べ多かったことから、0.3℃の低下が確認された。

(2) MM5を用いた数値計算を行い、打ち水による気温低減効果の評価を行った。23区内の約40%の約265km²で打ち水を行う条件下で計算を行った。その結果、打ち水後の気温低下量は2～2.5℃程度であった。

4. ヒートアイランド軽減対策の費用便益評価

4.1 概要

ヒートアイランド対策を効率的に進めるには、対策費用とそれによりもたらされる便益が妥当であることが求

められる。ここでいう便益とは、一義的には、ある対策によってもたらされる気温低減とそれに伴う波及効果で、例えば、夏期の空調に使用される電力量が削減されることである。また、広義には、ヒートアイランド対策が有する副次的効果も含めた波及効果で、例えば、緑化による大気中の二酸化炭素を吸収する効果がそれに該当する。多様なヒートアイランド対策の中で、どれを選択するのかは、一義的効果、副次的効果がどの程度あるのか、どれだけ初期費用や維持管理費用を要するか、実施主体が誰か、といったことを基準として判断することができると考えられる。

ヒートアイランド現象の軽減対策実施がもたらす便益についての検討事例としては、例えば、Rosenfeldら¹⁰⁾がロサンゼルス市域を対象に、空調エネルギー消費削減が年間1.75億ドル相当の効果で、光化学スモッグ削減効果はその倍もあると見積もっているが、その他にはほとんど皆無といって良いほど検討が行われていない。そこで、本研究では、便益（一義的効果以外の副次的効果も含む）の定量化を試みるとともに、対策シナリオ別に費用と便益の算出を行った。費用に関しては、昨年度、対策の個別事例の収集等を通して実施費用の把握を行ったことから、それらの結果を用いた。

4.2 対策シナリオ

費用便益評価の対象とした対策は、屋上緑化、地上緑化、河川のせせらぎを創出するといった水面再生、保水性舗装、熱反射性舗装、建物用遮熱塗料、各種排熱削減策とした。排熱削減策としては高効率機器・システムの導入・普及と低公害車導入を対象とした。以下、各対策の具体的な導入量について説明する。

(1) 屋上緑化、地上緑化

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。そこで、緑の東京計画¹¹⁾に基づき、15年後のみどり率（樹林地、草地、農地、宅地内の緑、公園、街路樹、河川、水都、湖沼などの占める面積割合）が現状の28.6%から32%に増加するケースと長期的な屋上緑化の普及によりみどり率（水面と緑被の占める面積率）が45%となるケースを想定した。なお、現状では屋上緑化がなされていないものと仮定した。地上緑化の対策可能量は屋上緑化ほど大きくないと考えられるが、屋上緑化との比較を行うという観点から、非常に仮想的ではあるが、屋上緑化と同量の面積を地上緑化するシナリオ（みどり率で28.6%から32%に増加するケ

ース）を設定した。

(2) 水面の再生

本研究においては将来のシナリオとして、蓋掛けされた河川の開渠化、使われなくなった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、すなわち23区内で水面積が5%増加し、約10%になるものと設定した。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。

(3) 保水性舗装、遮熱性舗装

保水性舗装、遮熱性舗装ともに、東京23区の道路用地（細密数値情報における道路用地のうち、道路の緑地率7.9%に相当する面積を除く面積分、約88km²）に施工した場合を想定した。保水性舗装では、既設舗装の切削と排水性舗装のオーバーレイ後に保水材の注入を行うと想定し、遮熱性舗装では、既設舗装への遮熱塗料の塗布のみを行うと想定した。気温低減効果には、保水性舗装の蒸発効率が0.15の場合の気象シミュレーション結果を利用し、保水・蒸発機能は常時継続すると仮定した。また、遮熱性舗装のアルbedoは、粉塵等による機能低下に伴い当初設定値（0.6）の82%で維持されるとし、その分、気温低減効果も線形的に割り引かれるものと仮定した。

(4) 遮熱性塗料

屋上緑化の代替として遮熱性塗料を非木造建築物の屋根面に塗布するシナリオを想定する。塗布面積は、屋上緑化でみどり率を45%にする場合に緑化すべき屋上面積に等しいとした。また、その施工は新規着工や改装に合わせて行われるものと想定した（したがって、費用は従来塗料と遮熱性塗料の差額分の積算により求める）。

(5) 省エネルギーによる排熱削減

東京都区部を想定した場合、人工排熱全体の大きな割合を占めている民生・運輸部門の排熱削減はヒートアイランド現象の緩和に大きく寄与することがこれまでの検討により明らかとなっている。民生部門における省エネルギー対策としては、現行実施されているトップランナー規制による機器効率の改善や住宅・建築物の省エネ性能の向上に加えて、トップランナー機器の拡大、高効率機器の加速的普及、待機時消費電力の削減、家庭用ホームエネルギーマネジメントシステム（HEMS）の普及、業務用需要におけるエネルギーマネジメントの推進が考えられている¹²⁾。また、運輸部門における今後の対策としてトップランナー基準適合車の加速的導入やハイブリッド自動車等車種の多様化の推進が想定されている¹²⁾。そこで、これらの動向を踏まえ、本研究では高効率エア

コン, HEMS (Home Energy Management System) 及びハイブリッド自動車の普及を省エネルギー対策による費用便益評価の対象とした。

各対策による排熱削減量のシナリオは、将来のエネルギー消費削減目標に基づき、排熱削減量=エネルギー消費削減量として設定する。経済産業省の発表した長期エネルギー需給見通しによると、民生部門（家庭+業務）でのエネルギー消費量は、原油換算ベースで108百万kl/年程度（2000年度）で、2010年度時点で、家庭部門で200万kl/年程度の削減が目標とされている。これらの目標値を、全国の世帯数と東京23区の世帯数で按分すると、東京23区の削減目標は家庭部門で約16.2万kl/年となる。

長期エネルギー需給見通しによると、運輸部門においては新規対策による省エネ量目標は100万kl/年とされ、これを主に乗用車への対策で達成することとされている。この目標値を、全国の自動車保有車両数と東京23区の自動車保有車両数で按分し、東京23区の削減目標は約4.2万kl/年となる。この削減のために、従来型自動車をハイブリッド自動車に代替するシナリオを想定する。

4. 3 費用の算出

各対策の費用算出にあたっては、初期費用分を年あたりの減価償却費用に換算し、それに毎年の維持管理費用をたし合わせて、各対策の年費用とした。

$$\begin{aligned} \text{各対策の年費用} &= \text{減価償却費用} + \text{年維持管理費用} \\ \text{減価償却費用} &= \text{初期費用} \times \text{定額法係数} \times \text{法定償却率} \end{aligned}$$

表-2 ヒートアイランド対策の費用比較

対策	初期費用	維持管理費用	備考
屋上緑化(事例)	7~112千円/m ²	0~3千円/m ²	耐用年数10年(建物として捉える場合は70年)
屋上緑化(東京都)	17~46千円/m ²	2~6千円/m ²	「屋上緑化の手引き02年」(東京都)より
都市緑化	17千円/m ² 用地買収費は除く	235~393円/m ²	東京都立公園の場合 耐用年数:事業期間50年
河川二層化	382千円/m ²	1.8千円/m ²	釜川(栃木県)の事例
水面再生	84.6千円/m ²	1.9千円/m ²	北沢川(東京都)の事例 緑道整備費用含む
保水性舗装	3.4千円/m ²	-	東京都・舗装会社提供資料 直接工事費のみ
遮熱性舗装	5.1千円/m ²	-	
建物用遮熱性塗料	シリコン系:1.5~2.5千円/m ² フッ素系:1.8~3.0千円/m ²	-	メーカーヒアリング 塗料のみの費用
省エネルギー行動(BEMS)	初期:1.0~2.0千円/m ² 普及期:0.25~0.5千円/m ²	-	耐用年数:20年
高効率機器	高効率エアコン:43千円/台 ヒートポンプ給湯器:400千円/台 潜熱回収型給湯器:86千円/台	-	従来機器との差
断熱化	544千円/世帯 3.8千円/m ²	-	省エネルギーセンター調査より
建物日射遮蔽	31.8千円/m ²	-	大林組技術研究本館の事例
低公害車	572千円/台	-	従来車との差

・河川の二層化と水面再生の単位面積は河川空間面積で整理
・省エネルギー行動、断熱化、建物日射遮蔽は延床面積で整理

ここで、定額法係数は0.9、法定償却率は耐用年数の逆数とした。各対策の初期費用と維持管理費用は対策の個別事例の収集等を通して得られた情報(表-2)に基づいて表-3の通り与えた。表-3で遮熱性塗料の耐用年数はメーカーヒアリング、地上緑化は文献13に基づき定め、それ以外は法定耐用年数を与えた。4.2で説明したシナリオを想定したときの対策量とその費用を表-4にまとめる。

表-3 費用便益評価で用いた費用と耐用年数

対策	初期費用(千円/m ²)	維持管理費用(千円/m ² /年)	耐用年数(年)	備考
屋上緑化	28.8	4.0	20	「屋上緑化の手引き02年」(東京都)の平均値
水面再生	84.6	1.9	50	北沢川(東京都)の事例 緑道整備費用含む
地上緑化	17.0	0.235	50	東京都立公園の場合
保水性舗装	8.67	-	10	東京都・舗装会社提供資料 に間接工事費、諸経費上乘
遮熱性舗装	7.26	-	10	
遮熱性塗料	0.75	-	10	シリコン系(既存塗料との差額)
対策	初期費用(千円/台)	年維持管理費用(千円/台)	耐用年数(年)	備考
高効率エアコン	43.0	-	6	従来機器との差
HEMS	180.0/20.0	-	10	普及初期/普及期に区別
高効率自動車	572.0	-	6	従来車との差

表-4 各対策の対策量と年費用

対策	対策量	年費用	年費用/対策量
屋上緑化(29→32%)	18.6km ²	988億円	53.1億円/km ²
屋上緑化(29→45%)	99.4km ²	5,270億円	53.0億円/km ²
水面再生	31.0km ²	1,063億円	34.3億円/km ²
地上緑化(29→32%)	18.6km ²	102億円	5.5億円/km ²
保水性舗装	87.9km ²	685億円	7.8億円/km ²
遮熱性舗装	87.9km ²	571億円	6.5億円/km ²
遮熱性塗料	99.4km ²	67億円	0.68億円/km ²
高効率エアコン	223.0万台	143億円	0.64億円/万台
HEMS	265.6万台	120億円	0.45億円/万台
高効率自動車	10.3万台	88億円	8.54億円/万台

4. 4 対象とした便益とその評価方法

(1) 概要

本研究で試算の対象とした便益の評価項目を表-5に整理する。対象項目は対策の種類によって異なるため、どの便益をどのように算定したのかについては後述する。生態系保全や景観向上といった直接的には貨幣価値での評価が難しいものについてはCVM(Contingent Valuation Method)を用いることとし、既存の研究成果を参考にしながら定量化を行った。CVMは、「環境、特

に清流や貴重な生物、あるいは景観など私たちにとってかけがえのない存在物の価値を明らかにする手法」として用いられることが多い¹⁴⁾。他にも環境価値を評価する方法として、代替法、トラベルコスト法、ヘドニック法といった顕示選好法（人々の経済行動から得られるデータをもとに間接的に環境の価値を評価する手法）があるものの、市場データに反映されない野生生物の価値や生態系の価値などを評価することは不可能であった¹⁵⁾。一方のCVMにも長所、短所があるが、対象とする便益を幅広く捉えられることと、既存の調査事例が比較的豊富であることから、本手法を採用した。

表-5 費用便益分析の対象とした対策と便益

対策種別	便益の種類
全対策共通	気温低下による夏期電力消費の削減
	上記によるCO ₂ 、NO _x 等の排出抑制
	気温低下による快適性の向上
自然の保全再生策 (緑化、水面再生)	CO ₂ 吸収効果
	NO ₂ ・SO ₂ 吸収
	リラクゼーション効果
	レクリエーション効果
	景観向上
	生態系保全
	直接的なエネルギー需要抑制
	上記に伴うCO ₂ 、NO _x 排出抑制
道路	騒音低減
	水循環機能の保全
	耐久性の向上
高効率機器・システム	直接的なエネルギー需要抑制
	上記に伴うCO ₂ 、NO _x 排出抑制

(2) 気温低下による夏期エネルギー消費量の削減効果
 気温の低下に伴い、空調等に要する電力消費量が削減されることが知られている。7、8月の平日の電力消費量データより算出される電力10社合成最大電力の気温感応度は2000年時点で500万kW/℃に達し、東京都はそのおよそ1/10を占めている。ただし、これは1日の平均的な気温感応度であることからこれをそのまま用いることは電力削減効果の誤差要因となる。そこで、本研究では時間帯ごとの気温感応度の既往調査結果¹⁶⁾と対策による現状からの気温低下量空間分布のシミュレーション結果から、式(3)により23区内外の電力削減効果を算定した。ここで用いた気温感応度を図-21に示す。

$$\Delta M = - \sum_{t=1}^{24} \sum_{i,j} f(t) M(i,j) \Delta T(i,j,t) \quad (3)$$

ここで、 ΔM : 1日あたりの電力削減量 (kWh), $f(t)$: 気温感応度 (最大電力比率/℃・日), $M(i,j)$: 計算メッシュ(i,j)における最大電力 (kWh/h), $\Delta T(i,j,t)$: 計算メシ

ユ(i,j)における時刻tの気温低下量(対策後の気温-現状の気温)(℃)である。メッシュ毎の最大電力 $M(i,j)$ は、23区内における最大電力と人工排熱の比から求めた原単位に、メッシュ毎の人工排熱量を乗じて求めた。ここで、人工排熱データはメソスケールの計算で用いているものを使い、最大電力は東京都全体における月別と年合計の電力消費量、23区年合計の電力消費量、1日の付加曲線から求めた。また、電力削減量を貨幣価値に換算するため、(3)式で得られる値に電力単価を乗じる。電力単価には、電気事業便覧による業務用(15~20円/kWh, 基本料金込み)と家庭用(25円/kWh, 基本料金込み)の中間的な値として20円/kWhを用いた。さらには、業務建物では冷房に都市ガスが利用されていることから、ガス冷房普及率と冷房需要における家庭、業務のシェアを既存の報告より引用して、都市ガスも含めたエネルギー消費量削減効果を算出した。このようにして得られる便益には23区内の対策によって23区外の気温が低減することによる効果も含まれる。

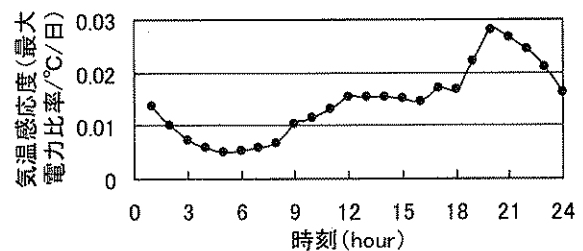


図-21 最大電力で正規化した時間帯別の気温感応度

(3) 気温低下によるエネルギー消費削減に伴うCO₂排出抑制

CO₂排出削減効果は、式(3)で得られた値にCO₂排出原単位とCO₂排出権取引価格を乗じて求める。CO₂排出原単位には東京電力(株)¹⁷⁾による公表値である0.381kg-CO₂/kWhを用いた。CO₂排出権取引値には、EUや英国におけるCO₂の市場取引価格¹⁸⁾の平均的な値として1,000円/t-CO₂を与えた。

(4) CVMを用いた環境改善等効果(TWTP)の定量化

ここでは、屋上緑化、地上緑化と水面再生を対象としてCVMを適用し、総支払い意志額TWTPを算出する。これらによる環境等の改善効果として、一般的には、気温低減の他に、リラクゼーション効果、レクリエーション効果、延焼防止、生態系保全、景観向上、水質環境改善、雨水一次貯留、大気汚染緩和、地球温暖化防止が挙げられる。なお、今回はCVMを適用するためのアンケート調査を独自に実施するのではなく、既往の研究成果を用いたことから、それら既往の研究成果を対象とした

便益のみが評価されることとなる。

a) 屋上緑化

屋上緑化を対象としたCVMの適用事例は皆無に近い
ため、唯一既往事例として報告のある平山ら¹⁹⁾の研究
結果を用いた。この研究では幅広い屋上緑化の効果(空
気浄化機能、緑陰の熱遮断効果、防風効果、雨水貯留
効果、加湿効果、騒音軽減効果、防火・防熱効果、建
築物の保護効果、鳥類の誘致・繁殖効果、リラックス
効果、リフレッシュ効果、景観向上効果、植物揮発成
分による効果、宣伝効果、環境教育効果)を示して、
都内の屋上緑化されている集合住宅の住民とその周
辺住民(当該集合住宅から半径100mの円内)を対
象とした支払意志額のアンケートが行われ、屋上緑
化を行う集合住宅の住民は、679.2円/世帯・月、
周辺住民では179.8円/世帯・月の負担を許容する
結果となっている。便益の総額を出す場合は、これ
らの支払い意志額に対象範囲内の世帯数を乗じる必
要がある。対象範囲としては、屋上緑化面積に相当
する建物部分に存在する昼間人口に、誘致圏として
その周辺半径100mの昼間人口を加えた。その際、
各屋上緑化建物の影響範囲が他の建物の影響範囲と
重なる部分も重複カウントする場合と、しない場合
(23区昼間人口を上限值とする場合)の双方で便
益を算定した。

b) 水面再生

河川の環境整備を対象としたCVM調査事例は多数
存在するが、都市河川の環境整備への支払い意志額
には幅が見られる。これは、各事例で対象とした地
域の状況や対象とする効果、河川整備の規模が異な
るためと考えられる。ここでは大都市での調査事例
として、東京都北区での評価事例を参考とした。本
事例は事業個所から2kmの範囲の住民を対象にし
たもので、支払い意志額は10,215円/世帯・年
である。便益の算定において、河川整備総延長は、
水面再生面積を河川空間の幅(10mを想定)で除し
て求め、その総延長にわたって左右岸に500mの
範囲に存在する昼間人口を便益範囲とした。この
範囲全体に上記の支払い意志額を適用した。屋上緑
化と同様、重複なしと重複ありの双方で試算を行
った。

c) 地上緑地

地上緑地の環境改善等効果を評価するため、都市
公園を対象としてCVMが用いられている既往研究²⁰⁾
を参照した。この研究では、自治体が都市公園を
維持できなくなったと想定し、荒廃を防ぐために
設立された組織の活動を支援するための基金に対
する支払意志額が把握された。3箇所の近隣公園
を対象とした研究が行われ、平均値として近隣居
住者(誘致距離500m圏域内)では420~794
円/世帯・月が、公園利用者では749~830円/世

帯・月がそれぞれ得られている。ここでは3事例
平均の近隣居住者による年支払い意志額3,418
円/人・年を全対象範囲に適用した。地上緑化
1個所当たりの面積は、近隣公園の目安とされ
ている2haで整備されるとして必要な公園の
数を算出し、各公園の誘致範囲(500mの範囲)
内の人口を算定した。屋上緑化、水面再生と同
様に各誘致範囲の重複を許容する場合としない
場合の双方で便益を試算した。

(5) 保水性舗装と遮熱性舗装導入の便益

舗装の高温化抑制によって流動わだち掘れ量
が抑制される方向に働くことが想定される。し
かしながら、現状における東京都の維持修繕頻
度は年あたり全道路面積の5%程度(20年に
1回の頻度に相当)であると試算されており²¹⁾
、耐用年数を超えていることから、本検討では
これ以上の修繕頻度低減は起こらないと想定
した。なお、保水性舗装、遮熱性舗装ともに
舗装の構造上の耐用年数を一般的なアスファ
ルト舗装と同様に10年を想定した。

保水性舗装は、開粒度アスファルト混合物の
空隙に保水性を有する細粒砂やグラウトを注
入したものであるが、これによる負の便益と
して排水性能と騒音低減性能の損失が考えら
れる。騒音については、既往の路面騒音測定
車による騒音調査結果に基づき、従前の排水
性舗装(低騒音舗装)に較べて保水性舗装(表
層空隙の80%充填タイプ)に変えることによ
って2.5dB(A)だけ騒音レベルが増大するも
のと仮定した。一方、遮熱性舗装では、従来
の排水性舗装の排水機能を損なわず、かつ騒
音低減性能を有することが実測により確認さ
れている。そこで、遮熱性舗装による騒音低
減量の妥当な数値として1dB(A)を見込んだ。
騒音の貨幣評価原単位には200円/dB・m²
・年²²⁾を用い、保水性舗装、遮熱性舗装の
施工面のうち、従来、排水性舗装であった
面積(全道路用地の約8.8%に相当)にこの
効果を適用した。

(6) 緑地による大気浄化の便益

緑地は光合成によるCO₂の吸収と固定を行
う機能の他に、窒素酸化物、硫黄酸化物を吸
収し、大気浄化に役立っている。小川ら²³⁾
は、森林、都市公園、耕地によるNO₂・SO₂
吸収、C固定、O₂放出を対象とした大気
浄化機能の経済評価を行っている。評価手法
としては排煙脱硝・脱硫装置の減価償却・維
持費、O₂工業用価格に基づく代替法が適
用されている。同文献では、森林の面積
:2,515万haに対する大気浄化機能評価額
を520,452億円と評価しており、これより
、単位代替額は206.9円/m²となる。な
お、CO₂やNO₂などの放出は地球環境、
大気環境に負の影響をもたらすものである
一方、O₂については特に問題化している
ものではないことから、O₂は

便益評価の対象外とし、上記原単位も O2 算出分の便益は除いたものである。

(7) 排熱削減策による大気浄化の便益

今回対象とした排熱削減策のうち、ハイブリッド自動車については、燃料消費量の削減によって大気汚染物質 (NOx) も削減されることから、その便益を算出した。ここで、NOx 排出削減量=23 区乗用車類 NOx 排出量×(23 区乗用車燃料消費削減量)/(23 区乗用車燃料消費量)として求め、便益への換算では、前出の文献 24)の排煙脱硝装置の減価償却・維持費 (124.4 千円/年) を用いた。

他の排熱対策 (高効率エアコンと HEMS) でも電力使用量の削減があり大気汚染物質の削減になるかもしれないが、現状の排出自体が環境への影響をクリアした上で行われていることを考慮して、ここではあえて便益として算定しなかった。

(8) 気温低減による快適性向上の便益

ヒートアイランド対策の実施によって夏期の気温が低減すれば都市空間の快適性も向上することが期待できる。このような快適性向上に係る便益も CVM により評価できるものの既往事例が見当たらなかったことから、別の評価手法として代替法を適用した。ここでは対策による気温低減量に相当する熱量を人為的に冷房機器によって除去する場合の費用を算出し、それを快適性向上の便益とする。便益の算定では、23 区内の地上からの高さ 3m の空間に存在する空気 (流動はしないものと仮定) を冷房すると想定し、シミュレーションにより得られる時刻別メッシュ毎の地上 1.5m における気温低減量を熱量に換算し、前述の貨幣換算単価を乗じた後、90 日分の効果を算出した。

(9) エネルギー消費量の直接的な削減効果

屋上緑化や遮熱性塗料は建物屋上面、屋根面からの熱貫入量を減らして、夏期の冷房負荷削減に直接的に寄与する。また、断熱効果がある場合には冬期の暖房負荷の削減も期待できる。一方、高効率エアコン、HEMS、高効率自動車は、現行の機器・自動車に対して直接的にエネルギー消費量を削減する効果がある。そこで、これらの効果を貨幣換算して便益に加える。

屋上緑化による直接的省エネルギー効果は文献 24)に基づき 90 日分の効果として算定した。遮熱性塗料については、オフィスビルにおける年間冷房負荷削減量の原単位として 12MJ/m²/年²⁵⁾を用いた。高効率エアコンと HEMS の電力消費量削減効果原単位は、既往調査事例より、それぞれ 781.8kWh/年/台、656.3kWh/年/台と設定した。高効率自動車については、シナリオで想定した原油換算削減量をガソリンの年間削減量に変換して、100 円/リットルの単価を用いて算出した。

4.5 便益と費用の算定結果

以上の方法に基づいて算出される便益の結果を前出の費用とあわせて表-6 に示す。なお、気温の低減による間接的な効果である電力削減便益とそれに伴う CO2 削減の便益で比較すると圧倒的に電力削減の便益が大きかったので、燃料削減の欄に合わせて表示してある。また、23 区外の便益は 23 区内の便益のおよそ 15% を占めており、対策域外への波及効果も無視できないことがわかった。気温低減による快適性向上便益は、代替法によるものではあるが、上記の電力削減便益のおよそ 2 倍程度と大きな効果を有していた。厳密な相対比較のため、今後、

表-6 各対策の年便益と年費用

(億円/年)

対策	燃料間接削減	燃料直接削減	TWTP	大気浄化 (NOx等)	快適性向上	騒音低減	修繕費削減	コスト	B-C	B/C
屋上緑化(32%)	8.5	87.8	147.7	38.6	15.7	—	—	988.1	-689.8	0.30
屋上緑化(32%)重複有	8.5	87.8	1239.5	38.6	15.7	—	—	988.1	402	1.41
屋上緑化(45%)重複有	45.1	468.6	6616.8	205.7	83.8	—	—	5269.9	2150.1	1.41
水面再生	17.6	—	461.3	—	29.8	—	—	1062.7	-554	0.48
水面再生・重複有	17.6	—	2662	—	29.8	—	—	1062.7	1646.7	2.55
地上緑化(32%)	8.5	—	380.3	38.6	15.7	—	—	101.6	341.5	4.36
保水性舗装	13.9	—	—	—	29.2	-38.5	—	685.4	-680.8	0.01
遮熱性舗装	13.6	—	—	—	32.8	15.4	—	571.1	-509.3	0.11
遮熱性塗料(緑化45%相当)	23.2	31	—	—	68.2	—	—	67.1	55.3	1.82
高効率エアコン	1	405.3	—	—	0.2	—	—	143.2	263.3	2.84
HEMS	1	405.3	—	—	0.2	—	—	119.8	286.7	3.39
高効率自動車	0.24	48.1	—	0.2	0.05	—	—	88.1	-39.51	0.55

注)

- ・気温低減に関連する便益は夏期90日間分の値。それ以外の便益は年間を通した値。
- ・保水性舗装の保水・蒸発機能は常時継続すると仮定。
- ・遮熱性舗装のアルベドは当初設定値の82%で維持されるとし、その分、気温低減効果も線形的に減少するものと仮定。
- ・舗装面からの反射波によって建物壁面が加熱される効果や建物や街路樹による日影の影響は考慮していない。
- ・遮熱性塗料の費用は遮熱性塗料と従来塗料の差額分とし、工事費は含まない。
- ・騒音低減効果は路面騒音測定車による実測データに基づき算出。

屋外の快適性に関する CVM による評価が必要である。

B/C で見た場合、地上緑化と家庭部門の排熱削減対策が最も有効であることがわかる。また、保水性舗装や遮熱性舗装では他の対策に比べて B/C が小さくなっている。この理由としては修繕工事費削減の効果が全くないと仮定していることや沿道歩行者への温熱的緩和効果を CVM 等により評価していないことがあげられる。屋上緑化の B/C は、対象範囲の重複を見込まない場合は他の対策よりも小さな B/C となることが明らかとなった。屋上緑化や水面再生による便益の大きな部分を気温低減以外の環境改善効果 (TWTP) が占めており、これが B/C の結果を左右していることから、ヒートアイランド対策としてだけでなく、都市の自然環境の保全による様々な価値の適正な評価が重要であることが伺える。

5. おわりに

本研究の最終的な目標であるヒートアイランド対策の費用と便益の提示を行うことができた。便益の算では、可能な限り幅広い項目の定量化を試みたものの、算定精度については更に検討の余地を残す項目が多いと考えられる。また、より厳密な対策間の相对比较を行うのであれば更に付け加えるべき項目も存在するものと思われる。しかしながら、他にこのような費用便益を算出した既往研究事例がないことを考えると、対策の選択の判断資料となる情報を提供するという初期の目標は達成できたものとする。さらなる精度の向上が今後の課題である。

参考文献

- 1) 吉中保, 根本信行: 路面温度のヒート抑制を目的とした機能性舗装に関する一検討, 土木学会舗装工学論文集 第6巻, pp.29~38, 2001.12
- 2) Kondo, J.: Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.49, No.2, 75-94, 1971.
- 3) 浅枝ら: 加熱された舗装面上空の 대기加熱過程の解析, 土木学会論文集 No.467/II-23, 39-47, 1993.
- 4) 吉中保, 木内豪, 深江典之: 遮熱性舗装による歩行空間の暑熱緩和効果に関する検討, 土木学会第59回年次学術講演会 (投稿中).
- 5) 吉中, 木下, 木内ほか: 都市の熱環境改善と沿道環境向上を目指した遮熱性舗装の研究開発, (社)日本道路建設業協会, 第13回懸賞論文, 2003.
- 6) 新田弘之, 吉田武, 城戸浩: 路面温度低減型舗装に関する研究, アスファルト合材 No.66, pp.7~11, 2003.4
- 7) Noilhan, J and S. Planton, 1989: A simple parameterization of land-surface processes for meteorological models, Mon. Wea. Rev., 117, 536-549.
- 8) 中野政詩: 土の物質移動学, 東京大学出版会, 187pp, 1991.
- 9) 土木研究所水理水文チーム: ヒートアイランド現象軽減のための各種対策の提案とその効果, 平成14年度土木研究所講演会講演集, 土木研究所資料第3876号, 2003.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 資源エネルギー庁ホームページ (<http://www.enecho.meti.go.jp/policy/energy/enesan1.htm>)
- 13) (社)日本公園緑地協会, 建設省都市局公園緑地課: 大規模公園費用対効果分析手法マニュアル, 1999.
- 14) 肥田野登: 環境と行政の経済評価, 勁草書房, 1999.
- 15) 栗山浩一: 公共事業と環境の価値-CVMガイドブック, 築地書館, 1997.
- 16) 三菱総合研究所地球環境研究センター: 持続可能な発展に向けての取り組み, 1992.
- 17) 東京電力(株)ホームページ(http://www.tepco.co.jp/env/environment/report/Pages/ka_26-j.html)
- 18) Point Carbon (<http://www.pointcarbon.com/>)
- 19) 平山豪, 中井検裕, 中西正彦: CVMによる東京都における屋上緑化推進施策の評価, 日本都市計画学会都市計画論文集38号, 595-600, 2003.
- 20) 太田晃子, 蓑茂寿太郎: CVMによる近隣公園の経済的価値評価の研究, ランドスケープ研究, 64(5), 679-684, 2001.
- 21) 土木研究所基礎道路技術研究グループ(舗装チーム): 都市環境に配慮した舗装構造に関する研究, 平成15年度年度報告書, 2004.
- 22) 道路投資の評価に関する指針検討委員会編: 道路投資の評価に関する指針(案), 日本総合研究所, 1998.
- 23) 小川, 三輪, 嶋田, 小川: 日本における緑地の 대기浄化機能とその経済的評価, 埼玉県環境科学国際センター報第1号, 2000.
- 24) (財)都市緑化技術開発機構: 新・緑空間デザイン技術マニュアル, 誠文堂, 1996.
- 26) 大島, 近藤, 速水: 高反射率塗料による日射遮蔽効果の検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1509-1512, 1998.