

ヒートアイランド現象軽減対策効果の定量化と 費用便益評価に関する研究

深見和彦¹⁾、久保和幸²⁾、木内豪³⁾、
吉谷純一⁴⁾、末次忠司⁵⁾、河原能久⁶⁾、小林裕明⁷⁾、
吉田武⁸⁾、伊藤正秀⁹⁾、新田弘之¹⁰⁾、城戸浩¹¹⁾

Quantification of the effects of heat-island mitigation measures and their cost-benefit analysis

Kazuhiko FUKAMI, Kazuyuki KUBO, Junichi YOSHITANI, Tsuyoshi KINOUCHI,
Tadashi SUETSUGI, Yoshihisa KAWAHARA, Hiroaki KOBAYASHI, Takeshi YOSHIDA,
Hiroyuki NITTA and Hiroshi KIDO

要旨

近年、都市域への人口の集中とエネルギー消費、緑被や水面の減少などにより、都市域の温暖化現象(ヒートアイランド現象)が進行しつつあると懸念されている。本研究では、水面の再生や路面温度低減舗装等の対策がヒートアイランド現象に与える影響を定量的に評価する手法を開発するとともに、それらの各種ヒートアイランド現象軽減対策の費用便益評価手法の開発を行った。

キーワード：ヒートアイランド現象、緩和対策、メソスケールモデル、費用便益評価、路面温度低減舗装

Abstract:

It is widely known that heat island phenomenon has been advanced recently because of population concentration to cities, consumption of much energy, decrease of water body and green coverage etc. The methodology to quantify the effects of heat-island mitigation measures like reconstruction of water body or pavement to reduce road surface temperature was developed. In addition to that, the methodology for cost-benefit analysis on heat-island mitigation measures was developed.

Key Word: heat-island phenomenon, mitigation measures, mesoscale model, cost-benefit analysis, pavement to reduce road surface temperature

- 1) 独立行政法人土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター(ICHARM) 水災害研究グループ
水文チーム 上席研究員
- 2) 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ 舗装チーム 上席研究員
- 3) 元 独立行政法人土木研究所 水工研究グループ 水理水文チーム 主任研究員 (現 東京工業大学)
- 4) 元 独立行政法人土木研究所 水工研究グループ 水理水文チーム 上席研究員 (現 国土交通省 国土
技術政策総合研究所)
- 5) 独立行政法人 土木研究所 水環境研究グループ長
- 6) 元 建設省 土木研究所 河川部 都市河川研究室 主任研究員 (現 広島大学)
- 7) 元 建設省 土木研究所 都市河川研究室 研究員 (現 国土交通省 関東地方整備局)
- 8) 独立行政法人 土木研究所 道路技術研究グループ 特命事項担当上席研究員
- 9) 元 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ 舗装チーム 上席研究員 (現 国土交通省 国土
技術政策総合研究所)
- 10) 独立行政法人 土木研究所 材料地盤研究グループ 新材料チーム 主任研究員
- 11) 元 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ 舗装チーム 研究員 (現 国土交通省 中部地方
整備局)

ヒートアイランド現象軽減対策効果の定量化と費用便益評価に関する研究

目次

1. はじめに	1
2. ヒートアイランド現象の発生原因と軽減対策	3
2. 1 原因の考察	3
2. 2 軽減対策	4
3. メソスケールモデルによる気温低減効果の定量化および将来の都市高温化の推定	7
3. 1 概要	7
3. 2 メソスケールモデル	7
3. 3 モデルの適用性	10
3. 4 気温低減効果の定量化	11
4. 路面温度低減舗装による熱環境改善効果の定量化	19
4. 1 路面温度低減舗装の概要	19
4. 2 路面温度低減効果の検証	19
4. 3 路面温度低減効果の評価方法の開発	20
4. 4 都市熱環境改善効果のシミュレーション結果	22
5. ヒートアイランド軽減対策の費用便益評価	26
5. 1 概要	26
5. 2 対策シナリオ	26
5. 3 ヒートアイランド対策の費用に関する検討	27
5. 4 対象とした便益とその評価方法	31
5. 5 便益と費用の算定結果	34
5. 6 今後の課題	35
6. まとめ	37

1. はじめに

近年、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」が大きな社会問題となっている。特に、熱帯夜日数や真夏日日数の経年的増大に見られるような夏期の酷暑と、東京都心部で生起するような都市域の局所的集中豪雨が、ヒートアイランド現象によるものとの理解によるものであるが、現時点においては必ずしもヒートアイランド現象が主たる原因であるのか、あるいは、地球温暖化を含むより広域の異常気象現象によるものなのかは定かではない。しかしながら、都市の中心部と都市の郊外とでは大きな気温差が生じることは明らかであるし、また、都市の風下側では降雨量が増大するとの報告もあることから、夏期の酷暑や局所的集中豪雨の一因が「ヒートアイランド現象」にあると考えることは当然のことと考えられる。

この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に起因するもの、人口の集積・社会経済活動の拡大による人工排熱の増大に起因するもの、大気汚染に起因して放射量が増大することによるもの、地表面の幾何形状が増大することによるものが挙げられる(図 1-1) 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。特に、土地利用の変化は、社会基盤整備のあり方と深く関わっており、緑地の確保、舗装面の高温化防止、建築物における対策、水面の確保などのヒートアイランド対策を計画的に進めるための様々なガイドラインづくりや技術開発が必要となってきた。

ところで、有効なヒートアイランド対策を考える上で

は、気温低減効果はもちろんのこと、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。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。

しかしながら、現状の研究は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にも含む総合的な効果の関係については、これまでほとんど検討されていない。

そこで、本論文では最終的に、様々な対策の実施シナリオを提案し、そのシナリオの下でどの程度のヒートアイランド現象緩和効果があるのか、また、費用対効果の観点から、各対策の実施がどの程度有効であるかについて、東京圏(東京都区部とその周辺の地域)をケーススタディとして示す。

まず、第 2 章では東京圏におけるヒートアイランド現象の発生原因として考えられる諸要因を概説するとともに、本論文で対象とするヒートアイランド現象の軽減対策を説明する。第 3 章では各種シナリオの提案を行うとともに、そのシナリオのもとでヒートアイランド対策を広域的かつ計画的に実施したときの夏期の気温低減効果について、関東地方一帯を包含したメソスケールの気象シミュレーションモデルを用いた定量化を行う。第 4 章では、第 3 章で検討した諸対策の中でも、水面再生等と

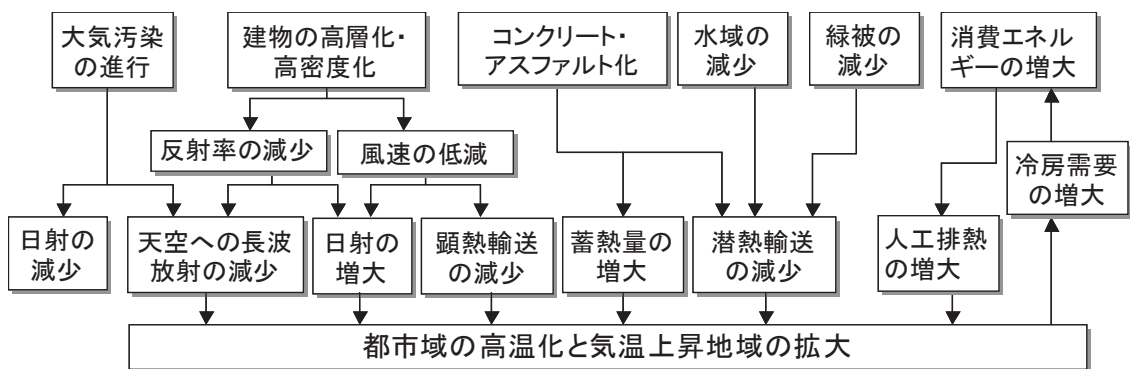


図 1-1 都市におけるヒートアイランド現象の形成要因¹⁾

並んでヒートアイランド現象改善手法の一つとして期待される、路面温度低減舗装による熱環境改善効果の定量化について述べる。第 5 章では様々な対策の費用と便益の総合的な定量化を試みた試算例を示し、有効な対策立案のためのひとつの検討のあり方を提示する。最後に第 6 章でまとめを述べる。

なお、これらの研究成果は、平成 11 年度から 15 年度にかけて土木研究所において実施された重点研究プロジェクト「都市空間におけるヒートアイランド軽減技術の評価手法に関する研究」の成果をとりまとめたものである。

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. ヒートアイランド現象の発生原因と軽減対策

2.1 原因の考察

(1) 概要

本研究では東京23区を中心とした東京圏を対象としたヒートアイランド現象軽減策の提案と効果・便益・費用の定量化を目的とする。そのため、まず、問題の主たる原因について整理しておくことが重要と考えられる。

図2-1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。

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年から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¹⁾。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、ヒートアイランド現象の問題が徐々に顕在化してきたのではないかと考えられる。

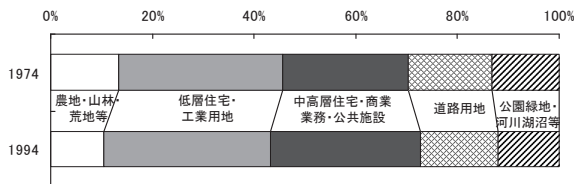


図2-1 東京都区部における土地利用の変化

(2) 緑地の変化

東京都の推計²⁾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(山手線の内側を超える面積に匹敵)失われており、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³⁾。また、緑地の種類別面積割合を見ても、宅地内の緑地が占める割合が増加しており、緑地の質も変化していることが伺われる。

緑地面積の増大を狙って、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。

(3) 水面の変化

全国20都市の水面積の変遷に関する調査結果⁵⁾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。

昔の東京(江戸)の水面積について、松浦・島谷⁵⁾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と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⁴⁾。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・下水道的存在となっていた⁵⁾。八十川ほか⁶⁾によると、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 2-1）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 2-2）、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。

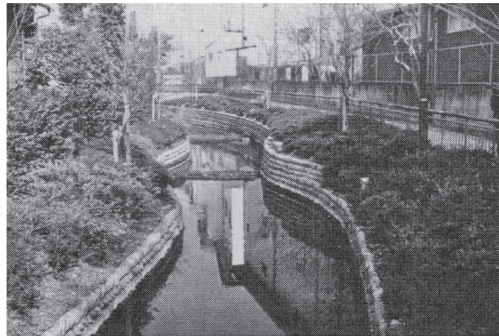


写真 2-1 二層化された河川の事例
(宇都宮市・釜川)



写真 2-2 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)

(4) 人工地被面の変化

土地利用の変化として表面的には現れないものの、その影響が大きいと考えられる要因としては不浸透面積（人工被覆）の拡大や、建物高さや建物密集度の増大などが挙げられる。また、東京都区部では道路面積の占める割合が全体の 15%程度あり、アスファルト等の舗装面が高温化することを考えると、道路等舗装面での対策も必要であると考えられる。

2.2 軽減対策

(1) 社会基盤整備に関連する対策

以上のような原因を踏まえ、ヒートアイランド現象の軽減、特に夏期の気温低減あるいは大気への熱負荷の削

減による熱環境の改善のための有効な対策を考える必要がある。また、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。

前述のように、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おり、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。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てきている⁷⁾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。そこで、本研究では、水と緑の保全・再生を有効なヒートアイランド対策として提案する。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 2-2）。

水面や緑地の減少に変わって、人工地被面が増大していることは前述のとおりである。人工地被面を構成する物質の代表格であるコンクリートやアスファルトは、その熱的な特性から、日中は高温化した表面によってその上の大気を加熱するとともに、日中に蓄えられた熱が夜間に放射熱、顕熱として放出される。したがって、人工地被面に対しては地表面の温度上昇を防ぎ、蓄熱量を抑制するための方策として、1) 道路舗装面や建物の屋上面、壁面などの反射性能を高める、2) 街路樹等で覆って日陰を作る、3) 草地のように蒸発機能を有するようにすることが有効であると考えられる。

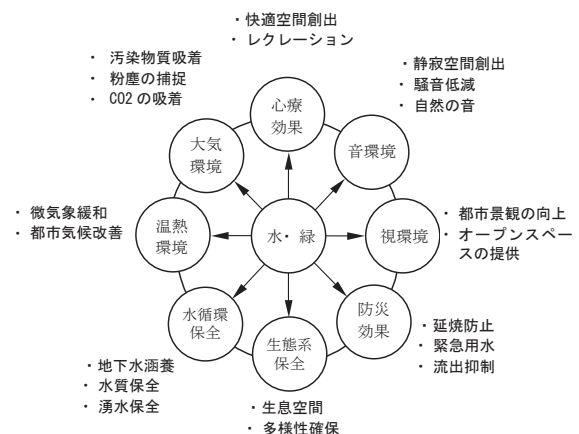


図 2-2 水と緑がもたらす様々な効果

以上のことから、本研究では、社会基盤整備に関連する対策として、屋上緑化、河川等水面の再生、保水性舗装や遮熱性舗装を取り上げることとした。

(2) 市民レベルのヒートアイランド対策

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視野に入れる必要がある（図 2-3）。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が条例によって誘導されている。このように、民間、個人による対策には多少なりとも国、自治体側の財政的支援が必要である。

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、省エネ機器の積極的導入や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明らかとなっている。省エネ行動については費用効果便益での評価対象というよりは、いかにして個人や企業の省エネ行動を促すかという点が重要であると考えられる。本研究においては、省エネ機器導入等による民生部門や業務部門における人工排熱の削減対策を検討対象として取り上げ、気温低減効果の検討を行う。

一方、人工排熱削減対策としての未利用エネルギー活用も省エネルギーの方策として挙げられ、既に詳細な検討を行っている⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。それによると現実的に可能と考えられる水熱エネルギー利用についてみると、局所的には省エネ効果は大きいケースがあるが、例えば東京都 23 区全体で見ると排熱削減への効果は 1~2%程度にとどまると推定されている。このことから、本研究における効果の定量化の対象としては取り上げていない。

また、一般市民の参加できる対策という観点から、雨水や雑用水の利用を前提として打ち水という昔ながらの習慣を復活させ、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「打ち水プロジェクト」の取り組みも行われている¹¹⁾。

以上、本研究で対象とした対策を中心として、様々な対策メニューを図 2-4 に、またそのような対策を行ったときの都市の景観イメージを図 2-5 に示す。

参考文献

- 1) 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
- 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―、2001

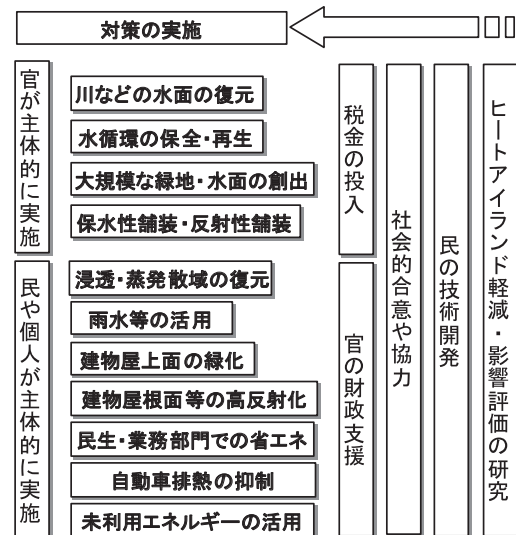


図 2-3 ヒートアイランド対策の役割分担と実施過程

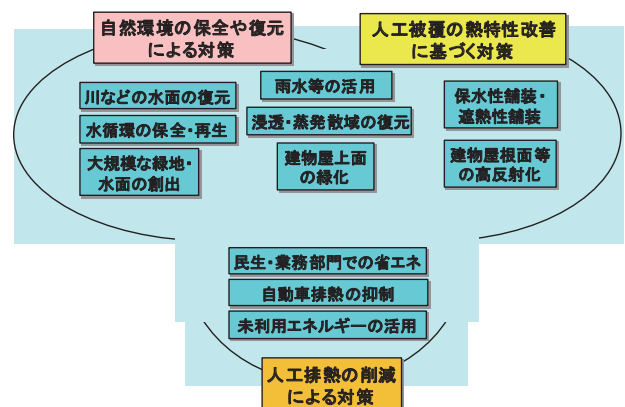


図 2-4 ヒートアイランド現象の軽減対策

- 3) 建設省：建設白書、2000
- 4) 松浦茂樹、島谷幸宏：水辺空間の魅力と創造、鹿島出版会、1987
- 5) 鈴木理生：江戸の川・東京の川、井上書院、1989
- 6) 八十川淳、高橋信之、尾島俊雄：東京都区部における中小河川の廃止と転用実態に関する調査研究、日本建築学会計画系論文集、No. 508、pp. 21-27、1998
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 河原能久、小林裕明、末次忠司、木内豪：水熱エネルギーを利用した地域冷暖房システムによる排熱・

排ガスの削減効果の算定—2010年の東京都23区を例として—, 第28回環境システム研究論文発表会講演集, pp. 443-448, 2000年10月

- 10) 木内豪、吉谷純一、河原能久：都市内水資源の熱エネルギーを利用した地域冷暖房システムの費用効果

分析, 第29回環境システム研究論文発表会講演集, pp. 37-42, 2001年11月

- 11) 狩野学、手計太一、木内豪、榊茂之、山田正：打ち水の効果に関する社会実験と数値計算を用いた検証, 水工学論文集, Vol. 48, pp. 193-198, 2004



図2-5 都市空間におけるヒートアイランド軽減対策のメニューとイメージ

3. メソスケールモデルによる気温低減効果の 定量化

3.1 概要

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。一方、広域的に対策を実施したときの都市や社会全体への影響・効果を評価して対策計画を立案するには、都市スケールでのシミュレーションが必要である。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る。以下では、対策実施による気温低減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。

3.2 メソスケールモデル

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。実際の都市をモデル化する際の課題としては、複雑な土地利用からの熱フラックス、人工排熱の時空間分布、都市キャノピー層（建築物等が存在する大気下層）における熱収支・熱輸送といった都市特有の気象形成要因の定量・モデル化が課題として研究が行われてきた。

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 を基本にした。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¹⁾で、対流システムや前線、海陸風循環や山谷風循環などの再現が可能である。今回、MM5 を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、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²⁾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。以下にその概要を示す。

(1) 地表面フラックスの算定

MM5 では各計算格子に卓越する 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る。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^{3),4)}を導入し、接地層内のフラックス計算においては、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手法を用いた。また、地表面温度の算出にあたっては、熱伝導方程式を数値的に解く MM5 のスラブモデル（平板モデル）を各土地利用面に適用した。

(2) 土地利用情報

オリジナルの MM5 が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ため、土地利用情報として国土地理院が整備・発行する国土数値情報（KS-200-1、土地利用分類ごとの面積率データを使用）と細密数値情報（首都圏 1994 年版、解像度 10m）を使用した。標高情報については国土地理院の数値地図（250m メッシュデータ）を分解能 45 秒で平均化して用いた。土地利用は国土数値情報と細密数値情報の分類を表 3-1 に示す 13 分類に集約した。

(3) 地表面モデルの改良

多く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、蒸発効率は土壌水分量に強く依存することから、潜熱輸送量の日変動をより精度よく再現しようとするならば、地表面モデルにより土壌水分量を推定するのが望ましい。そこで、今回は MM5 バージョン 2.12 に Noilhan and Planton²⁾の地表面モデル（地表面の水分移動モデルと植物生理のモデル、以下 NP モデル）を新たに組み込んで地表面水分量の変化を予測し、地表面の水分量に応じた植生面からの蒸散量や裸地面からの蒸発量の算出ができるようにした。NP モデルは、森林や田畑などの自然地ばかりでなく、公園・緑地や建物用地の緑被部分にも適用した。

都市キャノピー層の存在はローカルな街区（狭領域）スケールにおける熱輸送や放射量に大きく影響を及ぼすと考えられる。都市キャノピーの取り扱いについては、例えば近藤・劉⁵⁾や Masson⁶⁾が詳細なモデル化を行っているが、本章では都市全体を包含する地域（広～中領域）スケールにおいてヒートアイランド現象の全体像を理解することを主眼とし、既述のようにいわゆるスラブモデ

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

表 3-2 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

ルで表現することとした。

(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した。人工排熱には表 3-2 に示す原単位と時間変動分布を用いた。設定方法の詳細は後述する。

(5) 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、体積比熱、反射率の値として土地利用ごとの一定値(表 3-1)を与える。それぞれの値の設

定根拠については、吉谷・木内⁷⁾に整理されている。例えば、海浜・海水域および内水地(河川)では貯熱効果が十分大きく水温上昇が気温変化に比べて小さい観測事実⁸⁾に基づき、それぞれ米国 NCEP 再解析値と日平均気温により、一定の表面温度を与えている。一方、表 3-1 で蒸発効率、熱伝導率、体積比熱の記述がない土地利用分類は NP モデルを適用して熱収支を算出していることを意味する。NP モデルを適用する土地利用における蒸発効率、熱伝導率、体積比熱は地表面水分量に依存した値として算出される。

NP モデルで用いるパラメータのうち、植生に関するもの (R_{gl} : 光合成有効放射量の閾値、 R_{min} : 最小気孔抵抗、LAI: 葉面積密度) は、「田」、「畑・造成地・その他の用

表 3-3 東京都区部における現状と将来のみどり率、緑地率、緑被率の設定値

	みどり率 (1998)	みどり率 (将来)	細密数値情報の 土地利用分類	緑地率 (現状)	緑被率 (現状)	緑地率 (将来)	緑被率 (将来)
樹林地	0.4	0.4	山林・荒地等	100	54.5	100	54.5
農地	1.7	1.7	田	100	67.8	100	67.8
			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
			一般低層住宅地				
			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
	公園	5.1	5.1	公園・緑地等	100	76.5	100
小計	24.3	27.7/ 40.7	-	-	-	-	-
河川等水面	4.3	4.3	河川・湖沼等	0	0	0	0
みどり率計	28.6	32.0/ 45.0	-	-	-	-	-

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

地」に対して（100、40、6）を用い、「森林・荒地地」には（30、125、6）を与えた。

土壌の種類は全域でローム層を仮定し、Noilhan and Planton²⁾の土壌パラメータを与えた。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⁹⁾を参考に、それぞれ 0.68、0.55、0.20 と設定した。土壌水分量の初期値の目安を得るため、まず、降雨、蒸発散、浸透などの水文過程を考慮して土壌水分量や地下水位の変動などを解析できる水循環モデル¹⁰⁾を用いて通年の解析を行い、計算開始時刻（1995 年 8 月 23 日 21 時）のローム層の水分量を算出した。その結果に基づき、水田以外の土壌水分量の初期値は含水率の 50%を与えた。また、水田の土壌水分量の初期値には飽和含水率を与えた。

土地利用分類毎の緑被率（緑地面積の中で植生により占められている面積の割合）は、東京 23 区を対象に東京都都市計画局が算出した値をもとに土地利用分類ごとに推定し、対象領域全域に適用した。なお、東京都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き、最後に残っ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」と呼ぶ。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 3-3 に示す。

（6）人工排熱原単位の設定

人工排熱量は土地利用別に設定した日平均値の原単位と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^{11), 12)}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 3-4 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日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。

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と細密数値情報に基づく 23 区内の道路面積とから、単位道路面積あたりの自動車排熱原単位を算出した。工業用地については、原単位は末次¹³⁾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。ビル屋上の冷却塔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¹⁴⁾の推定によると、冷却塔方式の場合、顕熱、潜熱比は 9:91、

表 3-4 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

表 3-5 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/nf)	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

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^{15), 16)}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¹⁴⁾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ほか¹⁷⁾の結果を参考に、顕熱と潜熱の配分比率が1:9である冷却塔方式が50%、同配分比率が逆となる空気対空気熱交換方式が50%と仮定した。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。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3-5にまとめる。

3.3 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3-1）。母領域の解像度は6km、計算メッシュ数は61×61、ネスト領域は2km、57×57とした。鉛直方向は100hPaの等圧面までを25層に分割した。母領域の初期条件、境界条件には計算対象日を含む全球解析データを用いた。ネスティング手法には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

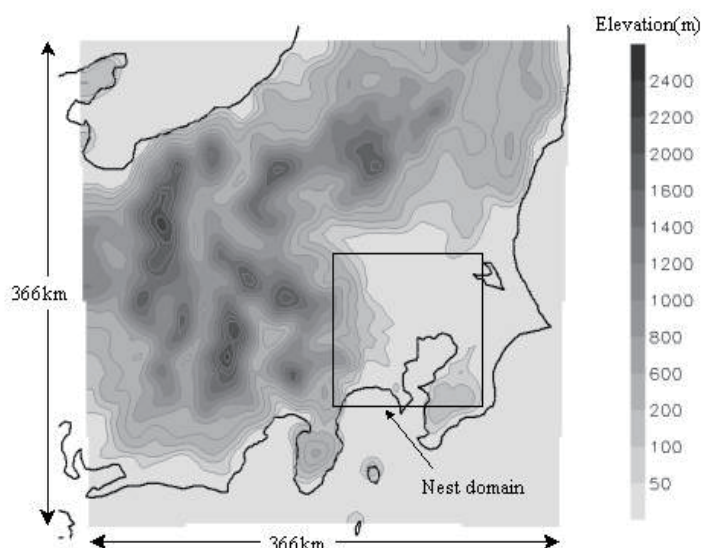


図 3-1 母領域とネスト領域の計算範囲と標高

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。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。

関東平野を中心とした母領域の地上 1.5m における気温と地面からの高さ 10m における風速ベクトルの計算結果を図 3-2 に示す。ここで、地上 1.5m の気温は大気最下層の計算値と土地利用分類ごとに求められる地表面温度から、大気安定度を考慮した相似則に基づいて内挿される地上 1.5m の気温を、計算メッシュ内の土地利用分類ごとの面積率で加重平均した値である。地上 10m の風速は、大気最下層の計算値と地表面の値の間で内挿して得られた値である。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、12 時および 15 時の時間帯では、東京都心部を中心として高温化が進行するに伴って埼玉付近では北よりの郊外風が発生し、海風の侵入が遮られている。しかしその後の時間帯では関東内陸の奥の方まで海風が侵入し、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。一方、図 3-3 に示す AMeDAS 測定点における風向分布を見てみると、観測値からは日中に郊外から都市部へ吹き込む風そのものを明瞭にとらえることはできないが、少なくとも 12 時頃までは海風が埼玉方向には進入していないこと、それ以後、東京湾や相模湾から海風が関東内陸

に吹き込んでいること、といった各時刻における定性的な特徴は、計算結果と符合していることがわかる。これらの現象が、夏季における関東内陸部での午後の高温につながる一因となっている可能性がある。

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 3-4）。

3.4 気温低減効果の定量化

（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ことから、緑の東京計画¹⁸⁾に基づき、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% に増加するケースと長期的な屋上緑化の普及によりみどり率が 45% に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。基本的に屋上緑化面は地上の緑地と同様にモデル化した。屋上緑化には植物による蒸発散機能の他に、これまでコンクリート等により覆われていた屋上・屋根面が植物・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、建物内部への熱負荷減少による空調負荷削減効果は考慮されていない。

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（緑化後の気温計算値から現状の気温計算値を差し引いた値）と地上 10m における風速ベクトルを図 3-5 に示す。日中は気温低減効果が徐々に大きくなりながら、海風により効果の影響範囲が内陸方向に広がっていく。AMeDAS 測定地点における気温変化量は、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℃ 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 3-6）。東京（大手町）と練馬では、日射のない時間帯でも 0.3℃ 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

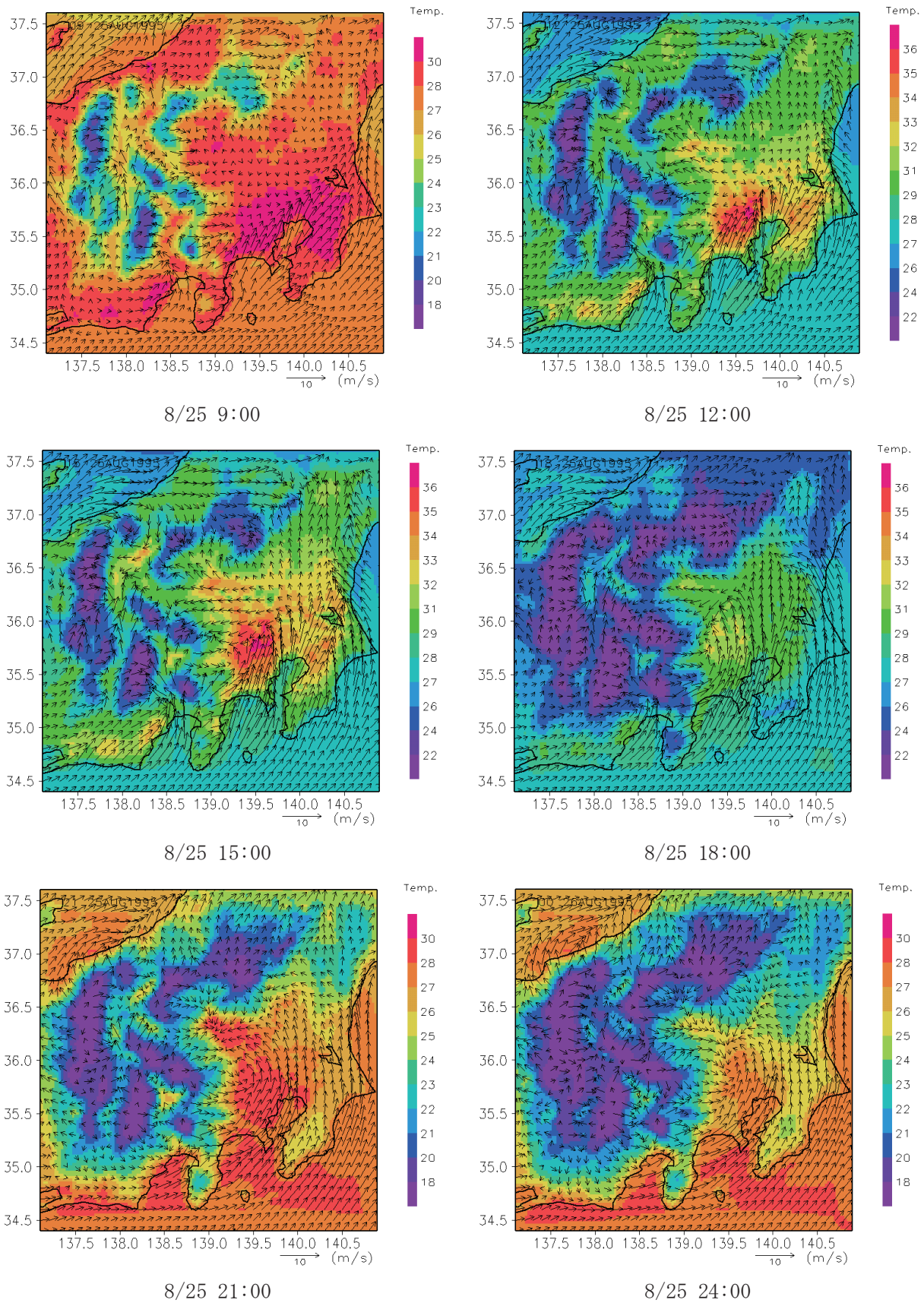


図 3-2 母領域の地上気温と風速ベクトル分布の計算結果
※時刻毎に気温表示の色凡例が異なることに注意

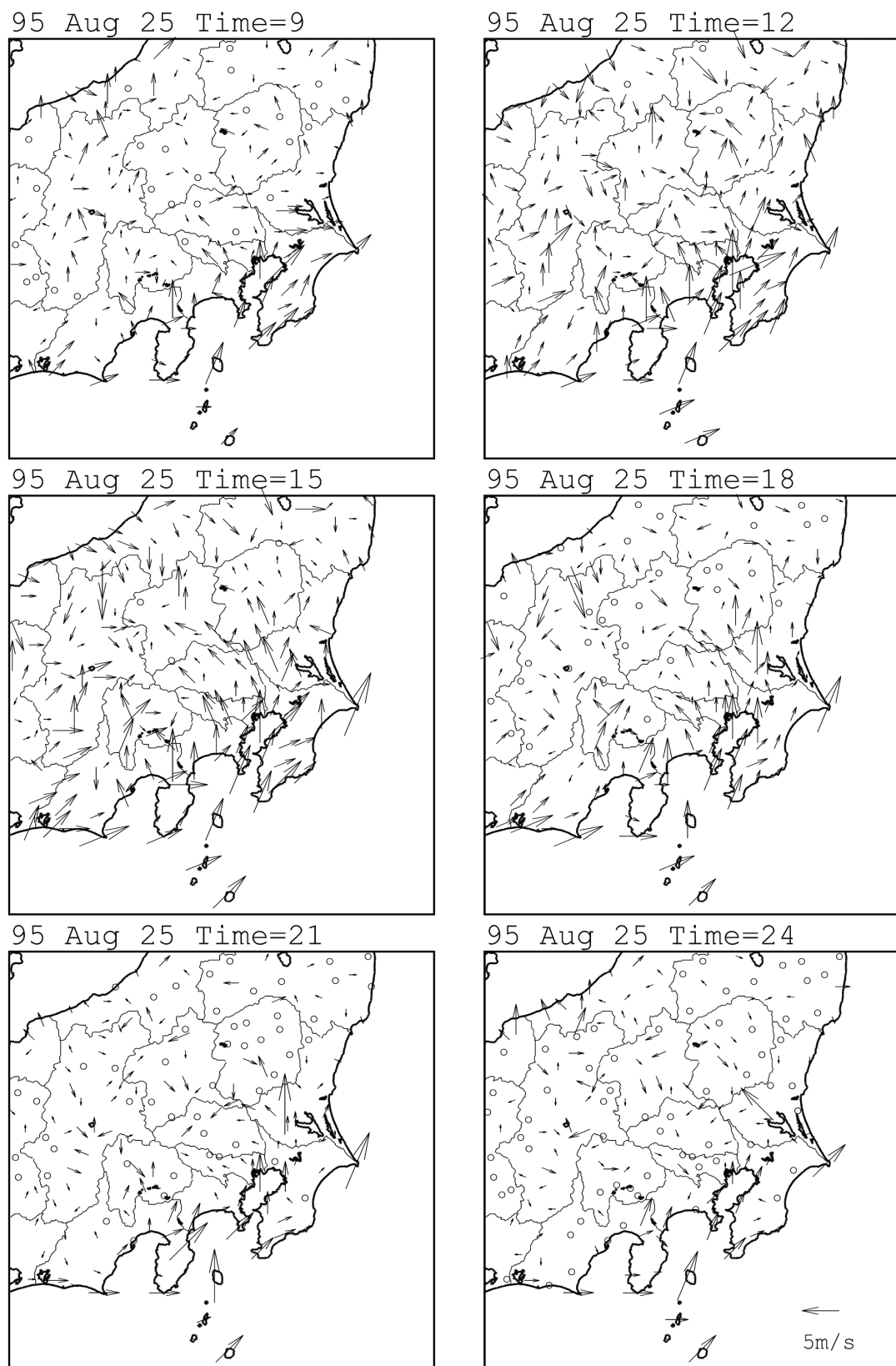


図 3-3 AMeDAS 測定地点における風向風速分布 (1995 年 8 月 25 日 9 時～24 時まで 3 時間おきに表示)

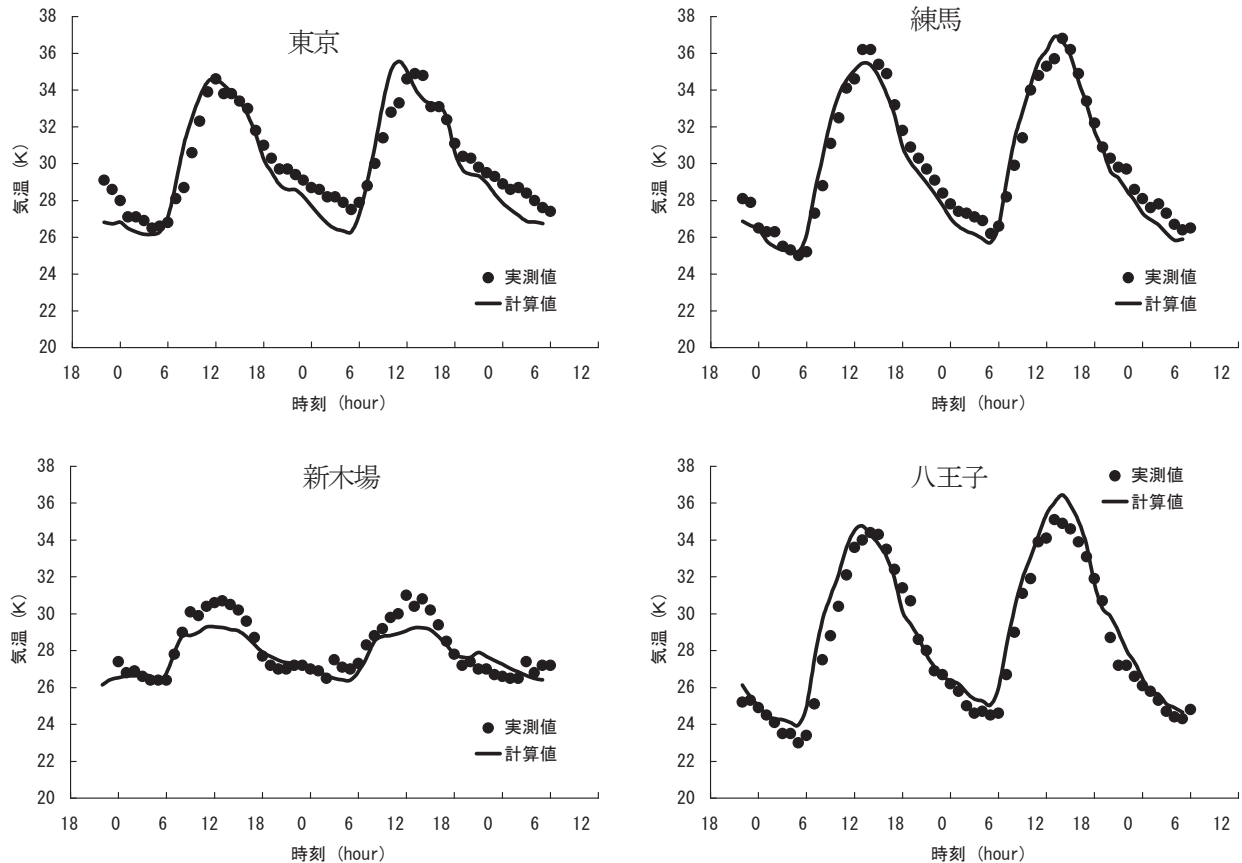


図 3-4 AMeDAS 地点における計算値と実測値の比較
(8 月 23 日 21 時～26 日 5 時)

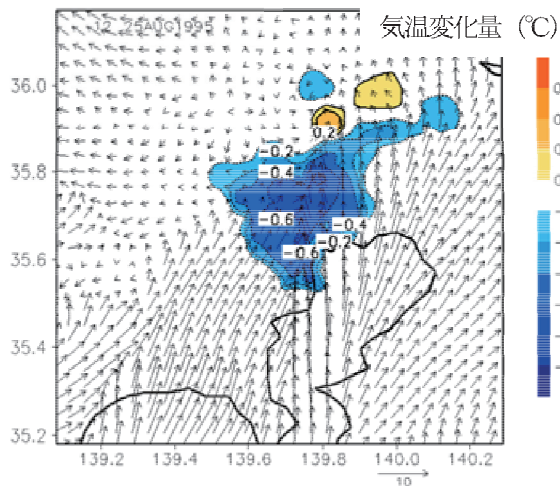


図 3-5 屋上緑化による地上気温の変化量と風速ベクトルの計算結果 (8 月 25 日 12 時)。変化量は対策後から対策前の値を差し引いた結果

因するものである。図 3-7 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 3-8 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。

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℃ と小さい。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 (荷重に耐える建物の屋根面積の総計) はおよそ 43km² と推定されている¹⁹⁾ (緑被率に換算すると約 7 ポイントの増加に相当) 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。

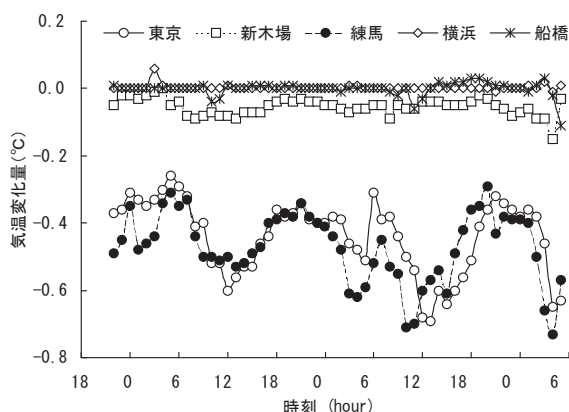


図 3-6 屋上緑化による気温低下量の計算結果

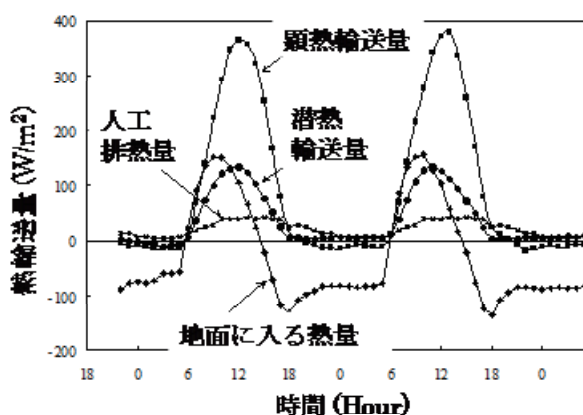


図 3-7 現状における領域平均の熱収支

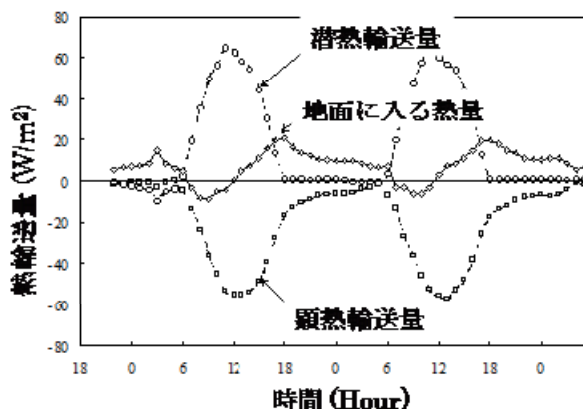


図 3-8 屋上緑化（みどり率 45%）による領域平均の熱収支の変化（緑化後の値から緑化前の値を差し引いたもの）

(2) 水面の再生

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将来のシナリオとして気温低減効果を算定する。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。

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 3-9 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°C 以上の気温低下が発生していることがわかった。気温変化量を地点別に整理したものが図 3-10 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

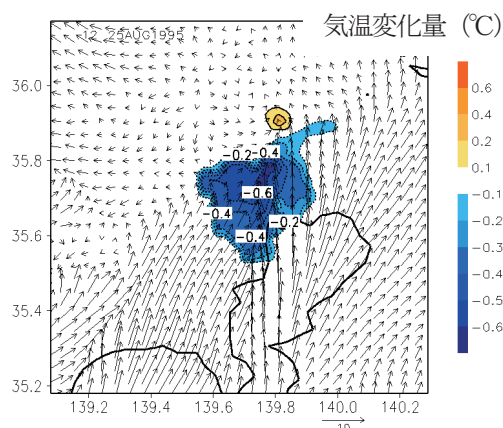


図 3-9 水面再生による地上気温の変化量と風速ベクトルの計算結果（8 月 25 日 12 時）

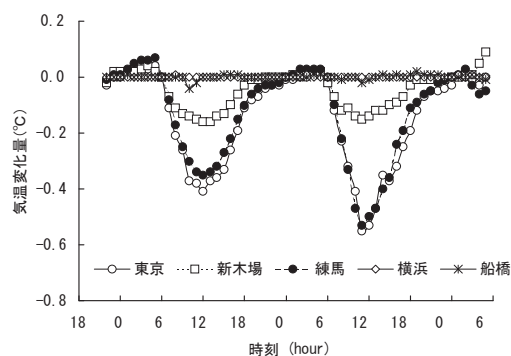


図 3-10 水面再生による代表地点における気温低下量の計算結果

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。

(3) 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²⁰⁾

と遮熱性舗装²¹⁾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、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、遮熱性舗装は、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、実用的で即効性のある対策として期待できる。保水性舗装、遮熱性舗装のいずれにしても、比較的新しい舗装技術であるため、温度低減性能の更なる向上とともに、長期的な耐久性や性能の持続性（例えば反射率の低減がないかどうか）について、実道におけるデータの蓄積と分析が必要である。

なお、本節での検討は、関東一円～都市規模での広・中領域スケールの観点から実施したものであり、狭領域（街区）スケールから見た場合のより定量的な路面温度低減効果や熱環境改善効果については、第4章において詳述する。

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（地表面湿潤時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²²⁾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。

蒸発効率0.15の場合の気温低下量と導入後の風ベクトルを図3-11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、蒸発効率を0.06とした場合（より乾燥した状態）には、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。

2) 遮熱性舗装による都市の高温化抑制効果の推定

遮熱性舗装の舗装供試体レベルでの温度低減性能については実測による確認を行い、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²³⁾。また、密粒舗装と遮熱性舗装の熱収支を比べても、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判明している。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。以上の性能を踏まえて、東京23区の全道路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。計算条件としては、

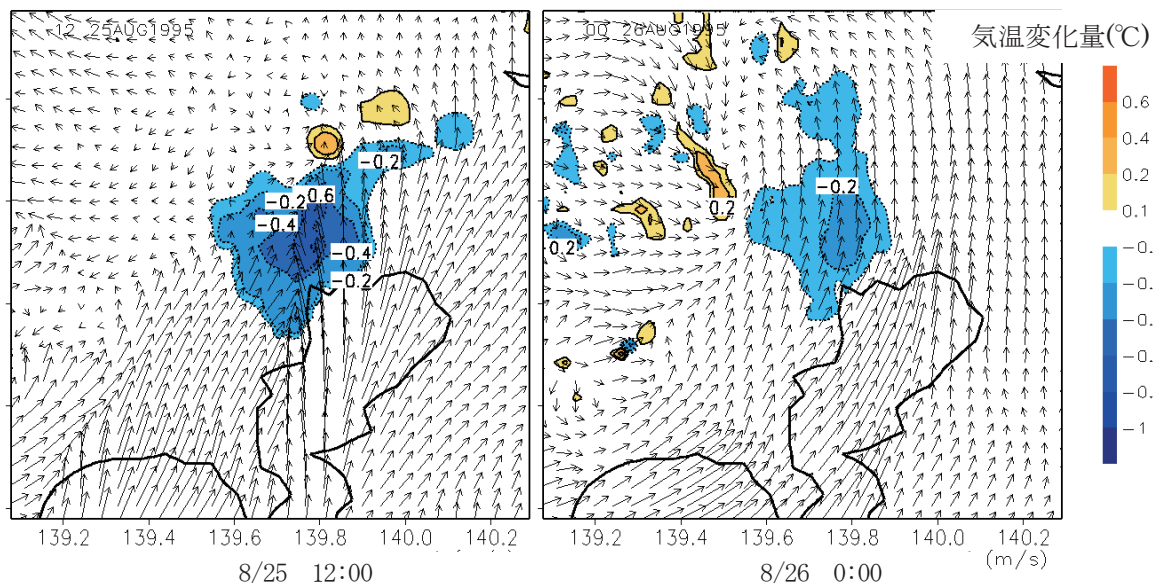


図3-11 保水性舗装導入による地上気温の変化量と風速ベクトルの計算結果
（気温は導入後から導入前の値を差し引いた結果、風速ベクトルは導入後の結果を示す）

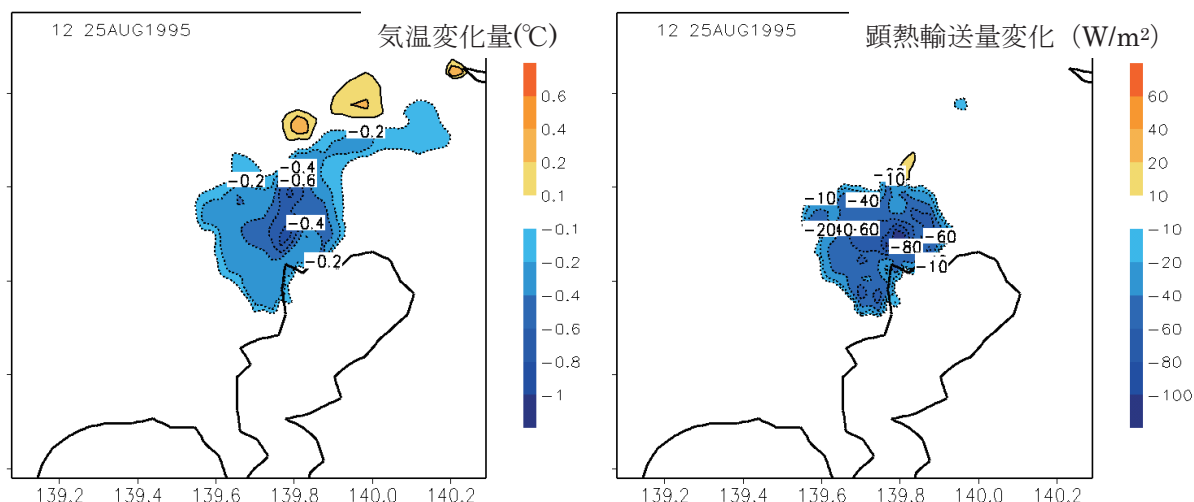


図 3-12 遮熱性舗装導入による気温の変化（左） 及び
遮熱性舗装導入による顕熱輸送量の変化（右）

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と顕熱輸送量の変化量を図 3-12 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。さらに、これらの路面温度低減舗装による、より定量的な路面温度低減効果や、狭領域（街区）スケールにおける熱環境改善効果については、第 4 章においてさらに詳しい検討をおこなっており、そちらをご参照いただきたい。

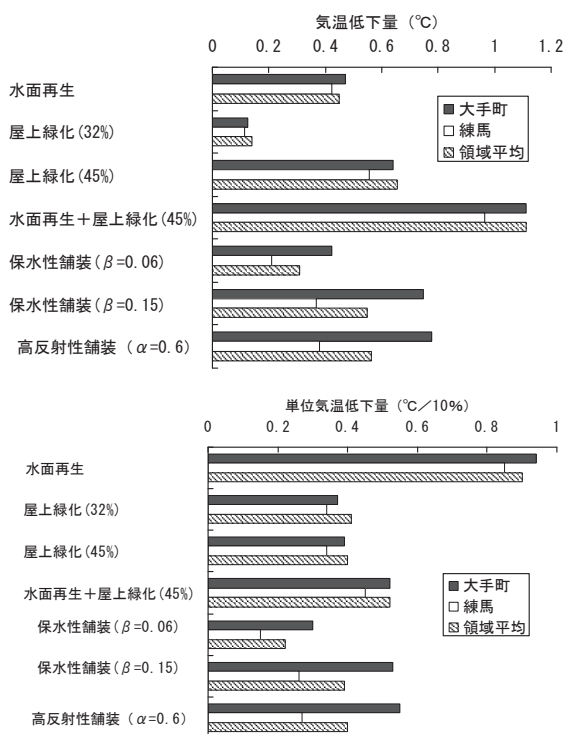


図 3-13 各種対策実施による気温低減効果の比較
（上段：気温低下量、下段：単位面積あたり気温低下量）

（４）対策間の効果比較

前述の水面再生、屋上緑化、保水性舗装、遮熱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・遮熱性舗装導入面積 10%あたりの気温低下量（単位気温低下量）を整理したものが図 3-14 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。また、図 3-13 には水面再生と屋上緑化（みどり率を 45%にした場合）を組み合わせ実施した場合の計算結果も示した。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った。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、貯熱効果が大きいためと考えられる。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と同等の単位面積あたりの効果を示す一方、湿潤度が下がると効

果も大きく減少する。遮熱性舗装では、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。複数の異なる対策を組み合わせた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、遮熱性舗装を同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、街区構造の違いなどを考慮しつつ、地域ごとに最も有効な対策を組み合わせる必要がある。

参考文献

- 1) Grell, G., J. Dudhia, D. Stauffer: A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR/TN-398+STR, 1994
- 2) Noilhan J., S. Planton: A simple parameterization of land-surface processes for meteorological models, Monthly Weather Review, 117, pp. 536-549, 1989
- 3) Avissar, R., R. Pielke: A parameterization of heterogeneous land surfaces for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology, Monthly Weather Review, Vol. 119, No. 10, pp. 2358-2373, 1991
- 4) Kimura F., 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, pp. 155-164, 1991
- 5) 近藤裕昭、劉発華：1次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究、大気環境学会誌、33, pp. 179-192, 1998
- 6) Masson V.: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, Boundary-Layer Meteorology, 94, pp. 357-397, 2000
- 7) 吉谷純一、木内豪：都市空間におけるヒートアイランド現象の軽減に関する研究（その2）—メソスケール気象モデルを用いた都市河川の水面再生と屋上緑化による気温低減効果の推定、土木研究所資料第3783号、2001
- 8) 武若聡、池田駿介、平山孝浩、萱場祐一、財津知亨：都市内河川による大気冷却効果、土木学会論文集 No. 479/II-25, pp. 11-20, 1993.
- 9) 中野政詩：土の物質移動学、東京大学出版会、1991
- 10) Jia Y., G. Ni, Y. Kawahara, T. Suetsugi: Development of WEP model and its application to an urban watershed, Hydrological Processes, Vol. 15, pp. 2175-2194, 2001
- 11) (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
- 12) (社)日本地域冷暖房協会：地域冷暖房技術手引書、1997
- 13) 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
- 14) 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, pp. 61-69, 1994
- 15) 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, pp. 167-175, 1996
- 16) 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, pp. 329-336, 1997
- 17) 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、pp. 82, 1994
- 18) 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
- 19) 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
- 20) 福田萬大、越川喜孝、辻井豪、浅枝隆、藤野毅：夏季に給・散水した保水性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. 613/V-42, pp. 225-236, 1999
- 21) 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年12月
- 22) 近藤純正編：水環境の気象学、pp. 152-159, 朝倉書店、1994
- 23) 木内豪、吉中保、深江典之：ヒートアイランド低減効果を目指した高性能の遮熱性舗装の開発、舗装、39-10, pp. 7-11, 2004

4. 路面温度低減舗装による熱環境改善効果の定量化

4.1 路面温度低減舗装の概要

路面温度低減舗装は、通常の舗装(アスファルト舗装、コンクリート舗装など)と比較して夏季日中の路面温度の上昇を抑制することが可能な舗装である。同舗装は、歩道空間や沿道の熱環境を改善することを目的に、都市部の歩車道や自転車道のほか、公園の広場および駐車場などに適用されている。

路面温度低減舗装には、舗装表層または表・基層に保水した水分が蒸発し気化潜熱を奪うことで路面温度の上昇を抑制する「保水性舗装」や、日射エネルギーの一部を反射する材料(遮熱材料)を舗装表面またはその近傍に固定して路面温度の上昇を抑制する「遮熱性舗装」などがある。図 4-1 に路面温度低減舗装の効果発現の概念を示す。

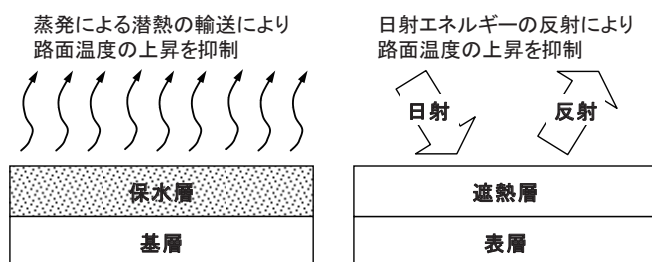


図 4-1 路面温度低減舗装の効果発現の概念

第 3 章では、広～中領域スケールからみた路面温度低減舗装のマクロな効果の検討成果について言及しているが、第 4 章では、路面温度低減舗装に対象を絞った上で、狭領域(街区)スケールにおけるより定量的な効果の検討成果、および、熱環境改善効果について検討した成果を報告する。

4.2 路面温度低減効果の検証

独立行政法人土木研究所構内の試験走路に図 4-2 に示す舗装を構築し、排水性舗装と各路面温度低減舗装の日最大温度差を約 10 日間 1 サイクルとして 5 回繰り返し測定した。10 日間ごとの日最大温度差の平均値を図 4-3 に示す。ただし、測定データの内、雨天当日のデータは除いた。

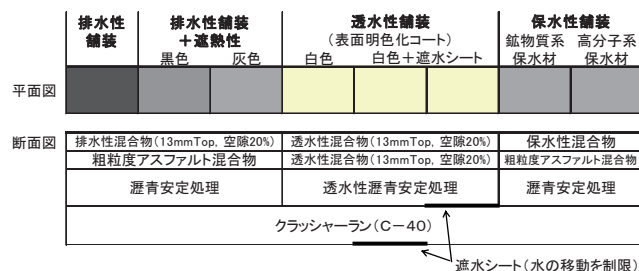


図 4-2 舗装の種類と舗装断面の概要

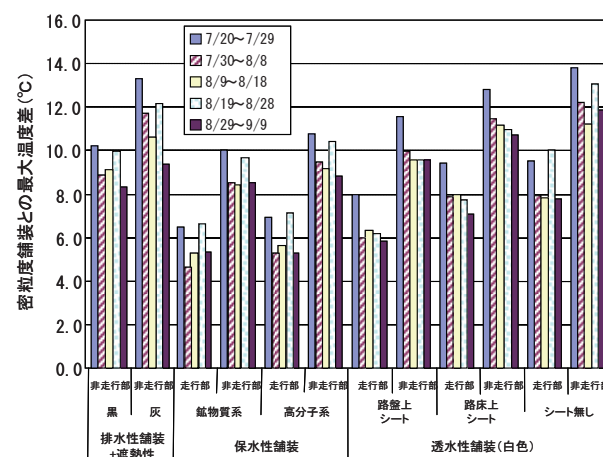


図 4-3 各種舗装の路面温度低減効果

非走行部の各舗装の路面温度低減効果は、遮熱性舗装が 9～13℃程度、保水性舗装が 9～11℃程度、透水性舗装の表面を白色化したものが 10～14℃程度となった。一方、走行部は非走行部に比べ路面温度低減効果が小さくなった。これは、保水性舗装の場合は車両の走行により保水材料が徐々に損失していくこと、遮熱性舗装および透水性舗装(白)の場合は車両の走行による表面の汚れ、塗料の剥がれによるものであった。図 4-4 には、21 万輪通過後の非走行位置と走行位置のアルベド値を示すが、多くの舗装でタイヤ走行部のアルベド値が低下しており、このことが、路面温度低減機能の低下の一因と考えられる。

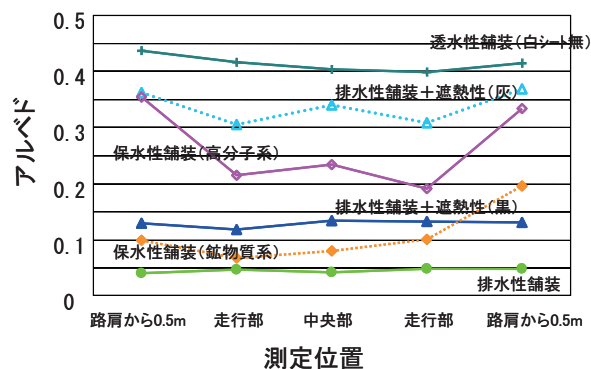


図 4-4 各種舗装の測定位置毎のアルベド

4.3 路面温度低減効果の評価方法の開発

4.3.1 室内評価試験方法の開発

1) 室内評価試験方法の概要

将来の路面温度低減舗装の普及を考えた場合、その材料性状を施工後ではなく施工前に室内で評価できるようにする必要がある。そこで、比較的小さな供試体を用いた室内評価試験方法を開発した。

開発した室内試験装置は図 4-5 に示すもので、供試体表面の上空に設置したランプにより供試体を加熱する。使用するランプは太陽光に近い波長特性を持つものである。試験に用いる供試体の概要を図 4-6 に、試験条件を表 4-1 に示す。

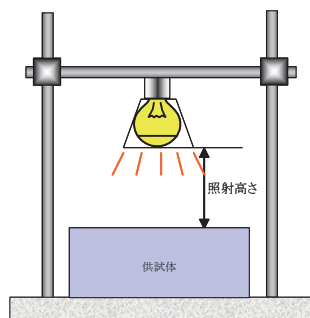


図 4-5 室内試験装置

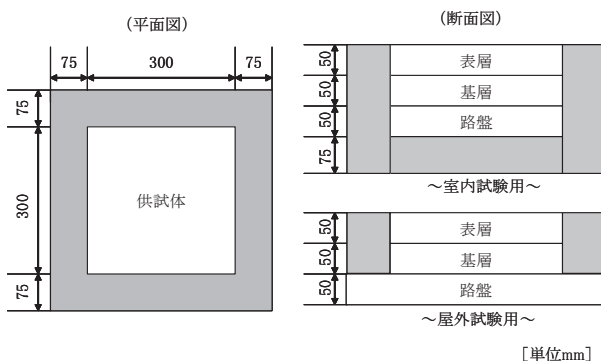


図 4-6 供試体の概要

表 4-1 試験条件

試験条件		備考
温度	30℃	理科年表を参考に、東京の夏季の気象を模した
湿度	70%	
照射時間	8時間	

2) 検討結果

室内試験で得られる各舗装の路面温度低減効果の妥当性については、夏季に屋外で測定した路面温度低減効果と比較し確認した。検討に用いた路面温度低減舗装の一覧を表 4-2 に、夏季に屋外で測定した各舗装の路面温度を図 4-7 に、室内で測定した各舗装の路面温度を図 4-8 に、排水性舗装

の路面温度が 60℃に達したときの屋外と室内で測定した各路面温度低減舗装の路面温度の測定結果を表 4-3 に示す。

表 4-2 表層に用いた舗装材料

①	排水性	13mmTop 排水性混合物(空隙率 20%)
②	遮熱性A	13mmTop 遮熱性混合物(塗布型)
③	遮熱性B	
④	遮熱性C	
⑤	遮熱性D	
⑥	明色性G	13mmTop 明色性混合物(塗布型)

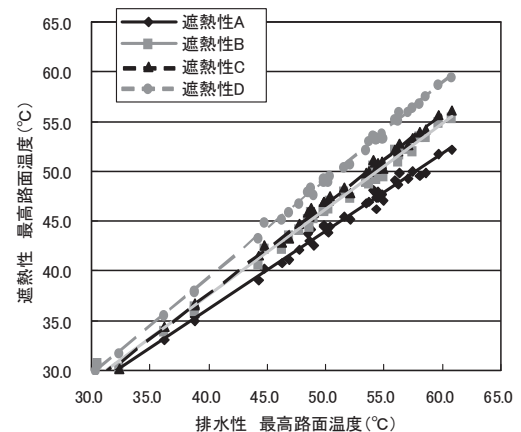


図 4-7 排水性舗装と各供試体の関係（屋外：夏季）

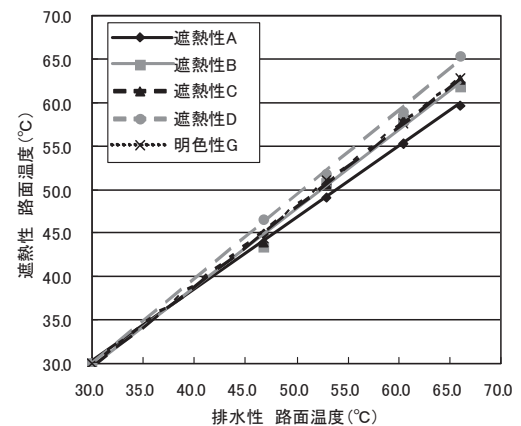


図 4-8 排水性舗装と各供試体の関係（室内）

表 4-3 屋外と室内の路面温度低減舗装の表面温度

	排水性が 60℃のときの路面温度(℃)	
	屋 外	屋 内
遮熱性A	51.8	55.0
遮熱性B	54.8	56.8
遮熱性C	55.7	57.1
遮熱性D	58.9	59.0
明色性G	57.1※	57.2

※夏季以外の時期に測定した結果から推定した値

表 4-3 から、屋外と室内で測定した各路面温度低減舗装の路面温度は概ね一致しており、室内試験により測定した路面温度低減効果から実道での効果を精度良く推定することができると考えられた。

3) 路面温度低減効果の予測式の導入

表 4-3 の結果から回帰分析を行った結果を表 4-4、表 4-5、図 4-9 に示す。この結果から寄与率は極めて高く、P 値も 0.05 以下で有意な回帰線と判断した。回帰分析による予測値と実測値の差は最大で 1.1℃、適用範囲の 95%信頼区間の最大幅は±2.2℃であり、今回対象とした遮熱性舗装の性能の差（屋外の路面温度の幅：7.1℃）に対して小さく実用的な精度で室内試験の路面温度から夏季の屋外の路面温度を予測する式を導くことができたと考えられる。回帰分析で得られた予測式を以下に示す。

$$Y = 1.80X - 47.25 \quad (4-1)$$

ここに、Y：屋外路面温度（排水性：60℃時）

X：室内路面温度（排水性：60℃時）

表 4-4 回帰分析結果

相関係数	寄与率	標準偏差	観測数	P 値
0.973	0.947	0.191	5	0.005

表 4-5 実測値と予測値

	屋外	予測式	残差	95%下限	95%上限
遮熱性A	51.8	52.0	-0.2	49.8	54.2
遮熱性B	54.8	55.2	-0.4	54.0	56.4
遮熱性C	55.7	55.8	-0.1	54.6	57.0
遮熱性D	58.9	59.2	-0.4	57.0	61.4
明色性G	57.1	56.0	1.1	54.8	57.2

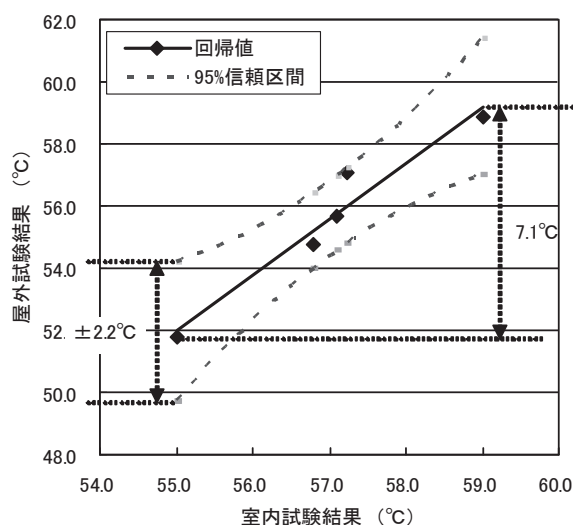


図 4-9 室内試験結果と屋外試験結果

4.3.2 実際の舗装路面温度低減効果を夏季以外に測定した路面温度から推定する方法の開発

1) 検討概要

路面温度低減舗装は夏季における路面温度の低減を目的としたものであるが、その施工は夏季に行われるとは限らない。したがって、その普及のためには任意の季節における「夏季の性能」の評価が必要となる。

季節を限定せずに測定した実道の路面温度から、夏季の路面温度低減舗装の路面温度低減効果を推定する予測式を確立することを目的に、屋外にて各種舗装の路面温度を測定した。測定対象とした舗装の種類を表 4-6 に示す。なお、測定した舗装は 4m×4m とした。

表 4-6 表層に用いた舗装材料

No	混合物名	層厚(mm)
1	13mmTop 遮熱性舗装(塗布型)	50
2	13mmTop 遮熱性舗装(混合型)	20
3	13mmTop 遮熱性舗装(混合型)	20
4	13mmTop 遮熱性舗装(塗布型)	50
5	5mmTop 遮熱性舗装(混合型)	20
6	5mmTop 遮熱性舗装(混合型)	20
7	13mmTop 遮熱性舗装(塗布型)	50
8	8mmTop 遮熱性舗装(混合型)	20
9	5mmTop 遮熱性舗装(混合型)	15
10	13mmTop 遮熱性舗装(塗布型)	50
11	13mmTop 遮熱性舗装(混合型)	50
12	13mmTop 遮熱性舗装(混合型)	50
13	13mmTop 排水性舗装(空隙率 20%)	50

2) 予測式の導入

夏季以外の時期に測定した路面温度から夏季の路面温度低減舗装の路面温度低減効果を推定するため、排水性の路面温度が 0℃から 60℃に達する時期に各舗装の路面温度を測定し、5℃毎の回帰式を求めた。回帰式の算出結果を表 4-7 に示す。排水性舗装を対象としたのは、開発した遮熱性舗装が路面温度低減性能の他、路面騒音低減効果を併せ持つものであり、多くの場合、既設の排水性舗装をこの遮熱性舗装に打ち換えることを想定したためである。

この結果から、排水性舗装が 60℃のときの遮熱性舗装の路面温度を求める式を導いた。

表 4-7 回帰式の算出結果

排水性 路面温度 (°C)	回帰式				95%信頼区間 の最大幅 (±°C)
	傾き a	切片 b	重相関 R ²	標準 偏差	
0	1.753	56.603	0.854	1.407	1.35
5	1.721	50.336	0.891	1.213	1.30
10	1.658	42.601	0.924	1.013	1.20
15	1.603	35.376	0.942	0.887	1.10
20	1.527	28.995	0.956	0.769	1.05
25	1.472	22.881	0.969	0.643	0.95
30	1.426	17.108	0.979	0.531	0.90
35	1.352	12.643	0.985	0.450	0.80
40	1.302	8.010	0.990	0.366	0.75
45	1.250	3.900	0.994	0.293	0.65
50	1.204	0.053	0.996	0.246	0.60
55	1.155	-3.224	0.996	0.225	0.60
60	1.108	-6.137	0.997	0.214	0.55

$$Y = a X_2 + b \quad (4-2)$$

$$a = \{(2.087 \times 10^{-5}) X_1^2 + (-1.240) X_1 + (1.771)\}$$

$$b = \{(9.791 \times 10^{-3}) X_1^2 + (-1.657) X_1 + (5.832 \times 10)\}$$

ここで

Y：排水性が60°Cの時の夏季の遮熱性の路面温度

a、b：回帰式の傾き、切片

X1：排水性の最高路面温度（実測値）

X2：遮熱性の最高路面温度（実測値）

式(4-2)を用いることにより、任意の時期に施工された遮熱性舗装について、その施工時期前後における排水性舗装の最高路面温度と遮熱性舗装の最高路面温度から、排水性舗装の想定しうる一年間を通じた最高路面温度 60°C に対する遮熱性舗装の一年間を通じた最高路面温度を予測することが可能となる。

4.4 都市熱環境改善効果のシミュレーション結果

1) シミュレーションの概要

梅干野らの開発した熱収支数値シミュレーション¹⁾²⁾により解析を行った。

解析では、保水性舗装・遮熱性舗装を導入する場合の効果を示すことを目的に、街区モデルによる熱伝導解析を実施し、これにより得られる道路・沿道建物等の全表面温度分布から、平均放射温度（MRT）の算定を行った。

表 4-8 密粒・遮熱性舗装の解析物性値

	舗装材料の状態	密粒度舗装	遮熱性舗装
熱伝導率(W/mk)	気乾状態	0.73	0.73
容積比熱(MJ/m ³ k)	気乾状態	1.81	1.81
日射反射率	表面乾燥状態	0.10	0.40

表 4-9 保水性舗装の解析物性値

	舗装材料の状態	保水性舗装
熱伝導率(W/mk)		$\lambda = 0.72 \times \phi + 1.06$
容積比熱(MJ/m ³ k)		$C_p = 4.190 \times \phi + 1.665$
含水比 ϕ	気乾状態	0.010
	圃場含水量時*	0.100
備 考	*降雨もしくは涵水後、重力による水の下降が、ほとんどなくなった状態	

表 4-8、表 4-9 に解析に用いた舗装の物性値を示す。

ここで、MRT とは、生活空間における熱環境に表面温度が与える影響を議論するための指標であり、以下の式で算定される。

$$MRT(^{\circ}C) = \sqrt[4]{F_1 \cdot T_{s1}^4 + F_2 \cdot T_{s2}^4 + \dots + F_n \cdot T_{sn}^4} - 273 \quad (4-3)$$

F_n :微小面の形態係数 T_{sn} :微小面の表面温度

これは、表面温度分布と空間形態とにより求まる値であり、評価する空間内で気温・湿度・風速等の他条件が一定の場合、「MRT<気温の箇所では体感的に涼しく、逆の場合は暑く感じる」といった体感的な傾向を示し、歩行者等の暑熱環境について、気温との比較により評価できる指標である。ただし、当該手法は狭領域を対象としており、広域対象（関東一円等、数百 km）、中領域対象（区～都市、数十 km）での評価は行えない。

2) 道路空間モデルの設定

道路空間の形態に着目し、数値シミュレーションを用いてその熱環境緩和効果を検討するため、基本道路空間モデル、基本モデルの歩道に街路樹を設置した場合、基本モデルの歩道及び中央分離帯に街路樹を設置した場合を設定し、それぞれの場合について密粒度舗装、保水性舗装（降雨直後の保水状態）、遮熱性舗装を適用した場合の解析を行った。表4-10に各モデルケースの詳細を示す。

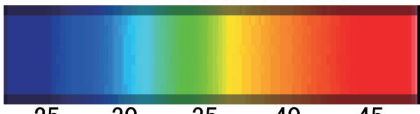
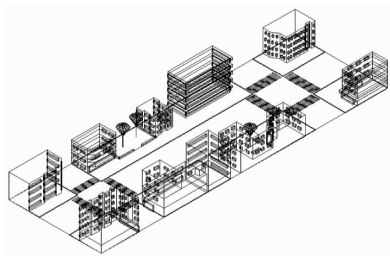
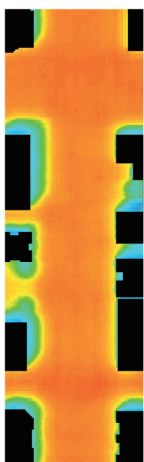
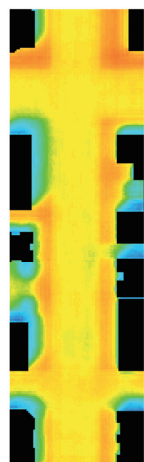
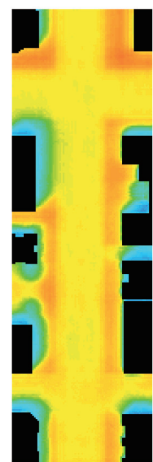
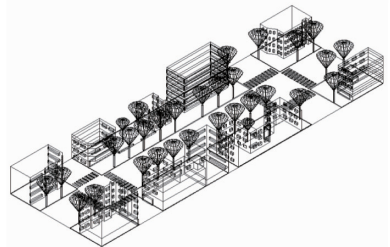
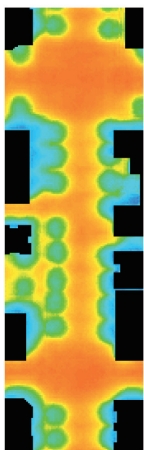
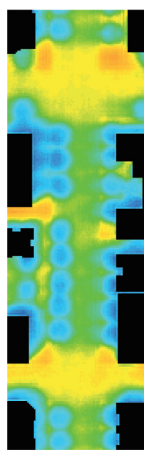
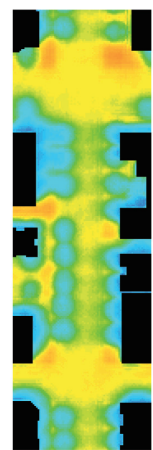
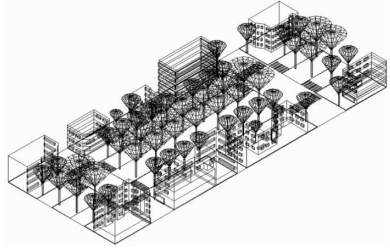
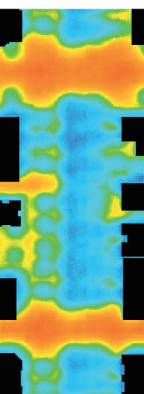
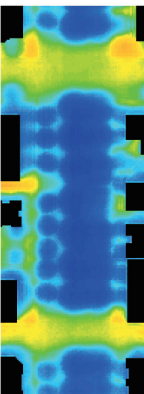
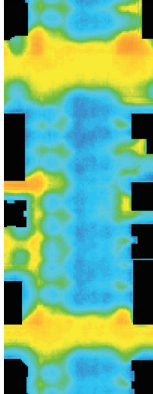
3) 熱環境改善効果の解析結果（MRT）

歩道上の放射熱環境を評価する指標として平均放射温度（MRT）を用い、車道・歩道境界からの離隔に着目して図 4-10 の各点で算定した。

表 4-10 各シミュレーションモデルケース

モデルケース	平面図・断面図
基本ケース ケース 1	断面図 平面図
歩道のみに街路樹を設置したケース ケース 2	・街路樹の高さは 10 m 程度、 ・樹冠直径 5 ～ 10 m 程度 ・日射透過率 10 % ・街路樹を植えた周辺 50 cm 程度は裸地とする。 断面図 平面図
歩道及び中央分離帯に街路樹を設置したケース ケース 3	・上記ケースに中央分離帯（植樹帯）を想定する場合の幅は 10 m とし、樹木は 2 列に植える。車道の幅員は基本ケースと同じ。 断面図 平面図

表 4-11 地上 1.5m 高さの MRT 分布 (13:00)

モデルケース (外気温 32.3℃)	↓ 外気温 (32.3℃)  25 30 35 40 45		
	密粒度舗装	保水性舗装 (保水状態)	遮熱性舗装
ケース 1 街路樹無し 	 北 南		
ケース 2 歩道に植樹 	 北 南		
ケース 3 歩道と中央に植樹 	 北 南		

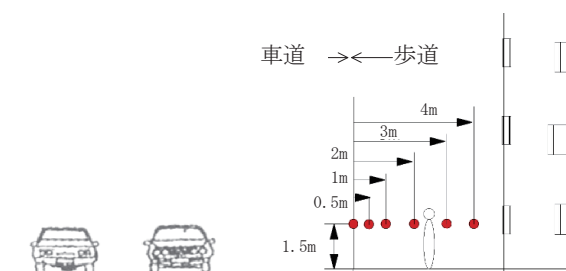


図 4-10 MRT 評価着目点

その結果、舗装種によって MRT は変化し、歩車道境界より 2～3m 程度まで放射熱環境の改善効果が見られた。これらのことから歩道を歩く歩行者やバス停、近接家屋等の熱環境改善効果に寄与することが期待できると考えられる。

表 4-11 は、13 時における各モデルケースの地上 1.5m の高さにおける MRT 分布を示したものである。この時の外気温は 32.3℃ である。

ケース 1 の MRT は、保水性舗装 ≤ 遮熱性舗装 < 密粒度舗装の順となっている。しかし、 $MRT > \text{外気温}$ となっているため道路上では体感的に暑く感じると考えられる。

ケース 2 は、両側の歩道に街路樹を設置したケースである。MRT は保水性舗装 < 遮熱性舗装 < 密粒度舗装の順となっている。街路樹の日射遮蔽効果により車道の真ん中を除き歩道のほとんどが $MRT < \text{外気温}$ となっており、歩道を歩く歩行者は体感的に涼しく感じると考えられる。

ケース 3 は、両側の歩道及び拡幅された中央分離帯に街路樹を設置したケースである。MRT は保水性舗装 < 遮熱性舗装 ≤ 密粒度舗装の順となっている。このケースでは歩道・車道のほとんどの箇所が $MRT < \text{外気温}$ となっている。特に中央分離帯付近において MRT と外気温差が大きくなっている。今回のモデルケースでは最も体感温度が涼しく感じると考えられる。

これらのことから路面温度低減型舗装は、単体で施工する場合より、街路樹との組み合わせることがより効果的であると考えられる。特に街路樹との組合せに関しては、遮熱性舗装より保水性舗装が有効であると試算された。

参考文献

- 1) 梅干野晁、浅輪貴史、高田真人、円井基史：土地利用と熱環境対策からみた都市街区におけるヒートアイランドポテンシャルの特徴、日本建築学会計画系論文集, 2002. 9

- 2) 山村真司、梅干野晁、浅輪貴史：建築外部空間デザインの設計支援を目的とした熱放射環境の予測手法の開発、日本建築学会計画系論文集, 2002. 4、

5. ヒートアイランド軽減対策の費用便益評価

5.1 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など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、例えば、Rosenfeld ら¹⁾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検討が行われていない。そこで、本研究では、図 5-1 に示す枠組みによって便益（一義的效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。

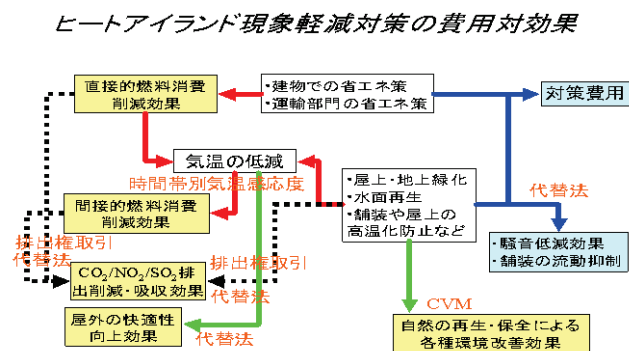


図 5-1 ヒートアイランド現象軽減対策の費用便益評価の枠組み

5.2 対策シナリオ

費用便益評価の対象とした対策は、東京都23区内における屋上緑化、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、遮熱性舗装、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³⁾に基づき、23区内において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) 路面温度低減舗装

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、遮熱性舗装のアルベドは、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、当初設定値における気温低減効果が線形的に割り引かれる（効果が減少する）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、23区内において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²⁾。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³⁾。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⁴⁾。そこで、これらの動向を踏まえ、本研究では民生部門のうちの家庭部門における高効率エアコン及び HEMS、ならびに、運輸部門における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量削減目標に基づき、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 k1/年程度（2000 年度）で、2010 年度時点で、家庭部門で 200 万 k1/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 k1/年となる。なお、東京 23 区での業務部門の削減目標は、41.4 万 k1/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 k1/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 k1/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。

費用便益評価の対象とした対策シナリオを表 5-1 にまとめた。これらは全て 23 区内のみでの対策である。具体の対策量（面積等）は後述する。

5.3 ヒートアイランド対策の費用に関する検討

（１）検討の概要

ヒートアイランド対策を効率的に進めるには、実施する対策の気温低減効果が確保されるとともに、対策費用が妥当であることが求められる。費用の妥当性は対策が

表 5-1 費用便益評価で対象とした対策

対策	対策の概要
屋上緑化	1) 緑地面積 3%増（みどり率現況 29%→32%） 2) 緑地面積 16%増（みどり率現況 29%→45%）
水面再生	水面積を現況 5%から 10%に増大
地上緑化	緑地面積 3%増（みどり率現況 29%→32%）
保水性舗装	道路用地全体（緑地部分は除く）に施工
遮熱性舗装	道路用地全体（緑地部分は除く）に施工
遮熱性塗料	非木造建築物屋根へ塗布。塗布面積は緑地面積 16%増相当
排熱削減	高効率エアコン、HEMS、高効率自動車による省エネで人工排熱を削減

もたらす便益の大小により変わり得るものであることから、最終的には付加価値を総合的に考えた対策の選択が必要となる。これまでのヒートアイランド対策の検討では費用面からの検討が不足していることから、本研究では対策の個別事例の収集等を通して実施費用の把握と相対比較を行った。実施費用の把握対象は表 5-1 に対応して、屋上緑化、地上の緑化、河川の二層化、水面再生（せせらぎ水路の創出）、路面温度低減舗装（保水性舗装、遮熱性舗装）、建物用遮熱塗料、排熱削減策とした。排熱削減策としては高効率機器の普及の他に、省エネルギー行動や建物の日射遮蔽、断熱化、低公害車導入も対象とした。

（２）費用の算定結果

1) 屋上緑化

戸建住宅や業務建物、公共施設を対象として屋上緑化の事例収集と緑化部分に要するコストの抽出を試みた。全体の工事費から緑化部分を抽出するのが難しい事例もあったが、今回調査した事例の費用をまとめると表 5-2 のとおりとなった。これらの事例からは単位面積あたりの屋上緑化導入費用が 0.7～11.2 万円となり、1 オーダー程度の開きがあった。

東京都では平成12年度に「東京における自然の保護と回復に関する条例」（自然保護条例）を改正し、公共施設については敷地面積250㎡以上の建築物の新築、増改築においては屋上緑化を含めた緑化計画書の提出及び一定面積以上の緑化義務づけが行われることとなった（民間

等に対しては敷地面積1,000㎡以上が対象)。こうした動きを受け、東京都財務局営繕部では「公共建築物における屋上緑化の手引き'02」を平成13年12月に策定（平成14年12月改定）し、公共施設における屋上緑化推進を図っている。本手引きでは屋上緑化のタイプを5種類に分類し、適用用途、植物種類、メンテナンス内容、初期の設置費用、維持管理費用等を提示している。これによると材工費は1.7～4.6万円/㎡、維持管理費は2,000～6,000円/㎡と見積もられている。この費用は、概ね300㎡程度の屋上緑化を想定し、ゼネコン、施工業者等からの工事費見積書提示、関連団体（財団法人 都市緑化技術開発機構等）からのデータ提供に基づいている。なお、初期費用に自動灌水装置や躯体補強工事費は計上されず、維持管理費用に水道料金は計上されていない。個別事例調査結果（2例目を除く）と東京都の施工費用単価は概ね同程度の数値を示していることがわかる。

表 5-2 屋上緑化の費用調査結果

建物種別	総費用 面積 維持管理費	備考
1)業務RC造3階建 1992年竣工	950万円 230㎡	地中配管、土盛り (30cm)、芝生、中低木の 苗木、植栽費を含む
2)業務RC造3階建 2001年竣工	4,700万円 420㎡	高木、中低木、草本含む 庭園、敷石、土留め、ウ ッドデッキ、灌水装置等
3)業務RC造25階建 既存ビルの緑化 2000年竣工	2,000万円 880㎡	セダム、盛土3cm、防根 層、風による飛散防止装 置
4)体育館ドーム屋根 上の緑化 1996年竣工	9,500万円 10,000㎡	高木、中低木、芝生、地 被、盛土30～100cm、土 中配水装置等
5)集合住宅 RC3～14階 2002年竣工	1,750万円 1,397㎡ 360円/㎡	芝生が中心、屋上ビオト ープ100㎡、せせらぎ、 盛土
6)中高層集合住宅 2001年施工	初期費用0.7～0.9 万円/㎡	芝生、地被類、ウッドチ ップ、盛土15cm、排水層 5cm、防水・断熱層等

2) 地上緑化

費用算定の対象とした地上緑化は、比較的大規模な民有地における緑化と自治体による都市公園整備である。

都市公園整備については、東京都建設局公園緑地部へのヒアリングにより整備や維持管理に係る費用、現在の整備状況並びに将来目標等について調査を行った。

公園による地上緑化において最も費用がかかる部分と考えられる用地買収費の目安は、一般の路線価ベースで都心部：30～40万円/㎡程度、郊外部：20万円/㎡程度である。また、国有地の場合は全体費用のうち、1/3相当を有償とし、残りは無償貸与という形態で買い上げる場合が多い。しかしながら、用地買収費は非償却資産であり、

費用対便益算定における費用に計上しない場合も多い。事実、都市公園整備に係る費用対便益算定⁹⁾においても用地買収費を含む場合と含まない場合を算定するとしており、ここでは含まない扱いとした。

施設整備費は、個別事例ごとに見た場合、各々の都市公園の整備内容や立地条件が異なるため、ばらつきが大きいと考えられる。また、整備事業自体が複数年次で行われるため、年度ごとの予算データから推計しにくいという側面もある。ここでは文献⁹⁾に掲載された情報に基づき平均値を推計したところ、一般公園3.3haの造成費（＝施設整備費）として、5億6千万円が計上された。これより公園面積あたりの単価は17,000円/㎡となる。

東京都における都市公園の維持管理費は、主として清掃・草刈り・剪定等の委託料と補修費等の工事請負費からなる（他に役務費、光熱水費もあるが、委託料、工事請負費と比較すると無視しうるレベル）。委託料、工事請負費ともに最近の数ヶ年は縮減予算の影響で予算が圧縮されている。平成7年度、8年度の実績が都市公園の適正な維持管理を反映したものと考えると、平成8年度の一般公園（直営）実績では委託料が約315円/㎡、工事請負費が約79円/㎡で合計約393円/㎡であった。また、平成14年度実績では235円/㎡であった。

3) 二層河川

水面再生に関する個別事例として釜川を取り上げ、費用等について整理した。釜川は宇都宮市内を流下する流域面積6.4km²、延長7.3kmの一級河川である。釜川では浸水対策としての放水路建設を行うとともに、昭和60年度から1.9kmの区間で二層化工事、水辺整備工事が行われ平成2年度に完成している。二層化部分の工事費用は約40億円、修景、植栽、広場・公園整備、せせらぎ整備等の水辺整備で13億円を要している。二層化された河川区域の面積は13,860㎡であることから、単位面積あたりの整備費用としては約38.2万円/㎡になる。

4) 水面再生

水面再生に関する個別事例として、北沢川を取り上げ、費用等について整理した。北沢川は玉川上水より分水され、世田谷区内を流れて烏山川と合流し目黒川に名前が変わる。本河川のほとんどの区間は下水路として覆蓋化されていたが、平成5年に暗渠区間の上部をせせらぎ親水公園として整備した。せせらぎには落合下水処理場からの高度処理水を凝集濾過・オゾン浄化した水が流れている。そのための施設は代沢せせらぎ公園の地下施設に設けられている。北沢川の水面再生にかかった費用は緑道整備も含めて約13.3億円である。整備面積は約15,712㎡であったことから、単位面積あたりの整備費用としては

約8.46万円/㎡になる。

5) 保水性舗装

保水性舗装の施工費用には東京都および舗装会社からの情報提供に基づいた。東京都において算出した保水性舗装の単価は3,640円/㎡であった（鉱物系保水材100%充填、舗装厚さ $t=5\text{cm}$ 、夜間工事対象1,000㎡の場合）。また、舗装会社からの情報によると、母体開粒度舗装（舗装厚さ $t=5\text{cm}$ 、高粘度改質アスファルト使用）の施工費用と保水性セメントミルク注入費用を含み、既設舗装の切削費用は含まない場合（日当たり施工量1,050㎡）、直接工事費（材料・工事費共）で3,400円/㎡となり、東京都の算出値とほとんど同等であった。なお、上記の数値には間接工事費、一般管理費、消費税は含まれていない。

6) 遮熱性舗装

遮熱性舗装は、通常の舗装表面に日射の赤外成分を多く反射する特性を有する遮熱性塗料を塗布するものである。本製品を供給している会社から提供された情報によると、表面が濃灰色の場合で5,140～5,950円/㎡の範囲、表面が灰色で4,310円/㎡となり、見た目の色により費用に若干の違いがある。なお、これらは昼間500㎡以上施工する場合の遮熱コートのみでの直接工事費（材料・工事費共）で、間接工事費や一般管理費、母体アスコンの舗設費用は含まない。

7) 建物用遮熱塗料

建物用遮熱塗料は、主として空調設備の無い工場、倉庫の屋根面に塗布して室内温度の上昇を抑制する用途で普及している。塗料自体が高い日射の反射性能を有するとともに、塗料内に中空セラミックスを混入させて断熱効果も与えている。ここでは塗料メーカーより得た情報等に基づき費用を算定した。

価格はベースとなる樹脂によっても違う（反射性能・断熱性能には違いはないが、塗膜の耐久性が違って来る）が、白色遮熱塗料の材料費は概ね700～1,000円/㎡（シリコン樹脂塗料、耐用年数10年程度）あるいは1,000～1,500円/㎡（フッ素樹脂塗料、耐用年数15年程度）である。また、工事費は塗装する物件によって大きく変動するが、概ね800～1,500円/㎡である。したがって、材料と工事を含めた費用は1,500～3,000円/㎡、平均的には2,000～2,500円/㎡であった。なお、耐用年数内であれば特に維持管理等の費用は発生しない。

8) 排熱削減策

i) 省エネルギー行動

省エネルギー行動には①普及啓発等を通じ、自らの意志で省エネルギー行動を誘発させる対策、②省エネルギーをサポートする機器の導入の二通りに分けられる。①

について係るコストは普及啓発に要する費用（行政等による広告宣伝費）であるが、こうした費用が原単位として把握困難である上に、普及啓発と省エネルギー行動との因果関係の説明も難しい。一方、②は近年注目を浴びている対策であり、家庭用はHEMS（Home Energy Management System）、業務用はBEMS（Building Energy Management System）として技術開発、導入促進が行われている。ここではBEMSを例に対策概要、コスト、効果を示す。

BEMSでは、ビル内にあるエネルギー利用機器（冷暖房機器、照明機器等）に対しIT技術を適用しコンピュータ制御することで、ピークカットを含む省エネルギーを達成する。また、機器利用者に対し、エネルギー消費実態をリアルタイムに情報提供し、省エネルギー行動を促す機能が検討されているものも存在する。現在は技術開発・実証導入を通じた普及促進段階であり、ほとんど普及していないものの、経済産業省エネルギー部会⁶⁾の目標では、2010年度に延床面積ベースで30%に導入することが掲げられている。ビルの延床面積規模に応じ、初期段階、普及段階ごとに価格想定されており、面積規模が5,000㎡以上では初期段階、普及段階の価格はそれぞれ2,000円/㎡と500円/㎡で、5000㎡未満ではその半分と見積もられている。維持管理費用については特設計上されておらず、環境省の試算においては耐用年数20年とされている。なお、建物用途や規模等により効果にばらつきがあると予想されるが、経済産業省エネルギー部会の見積りでは導入されたビル全体のエネルギー消費の10%を削減するとされている⁶⁾。

ii) 高効率機器の導入

a) エアコン

平成10年に「エネルギーの使用の合理化に関する法律」（省エネルギー法）が改正され、エアコン、照明機器、自動車等を含む特定機器に対しトップランナー方式が導入され、省エネルギー基準が強化されることになった。こうした法改正を受け、機器メーカーでは効率向上に向けた技術開発を行っており、近年、エアコンのエネルギー消費効率（COP）が改善の一途を辿っている。ここでは、（財）省エネルギーセンターが情報提供を行っている機器データに基づき、家庭用2.8kWタイプ（29機種）を例に機器本体価格と電力料金を整理した。その結果、従来型（COP＝3と想定）、高効率型（COP＝6と想定）の間での本体価格はそれぞれ約20.0万円と24.3万円で、本体価格差4.3万円が1台あたりの初期費用となる。年間電力料金はそれぞれ約3.8万円と2.0万円となり、およそ2.4年で高効率エアコン導入による本体価格上昇分を回収できること

がわかる。

b) 自然冷媒ヒートポンプ式電気給湯器

ヒートポンプを採用した高効率給湯器として、エコキュートが電力会社、給湯器メーカーにより開発されている。高効率のヒートポンプ式電気温水器に自然冷媒を採用し、省エネルギー、脱フロンを実現する。ヒートポンプの採用により、年間平均でCOP3.0以上を実現し、さらに深夜電力利用に伴うエネルギーコスト低減も達成できる。

メーカーカタログより、エコキュートの本体価格は70万円（耐用年数 約10年）でエネルギー費用は7,200円/年（深夜電力 6円/kWh、1,202kWh/年にて換算）と見積もられた。一方、従来型（通常のガス給湯器）の本体価格は30万円（耐用年数 約10年）、エネルギー費用は37,000円/年（都市ガス 3,102Mcal/年にて換算）であるから、ヒートポンプ式電気給湯器の導入による初期費用（本体価格）増分は13.4年で回収できる勘定となる。なお、新エネルギー・産業技術総合開発機構ではエコキュート（CO₂冷媒使用、COP3以上）に対し、従来型給湯器との差額（工事費を除く機器費用のみが対象）の1/2を補助金として拠出している。

c) 潜熱回収型給湯器

従来のガス給湯器に対し、潜熱を回収することで高効率化を達成した潜熱回収型給湯器がガス会社、給湯器メーカーにより開発されている。従来の給湯器では約80%が限界だった熱効率を、排気熱・潜熱回収システムの開発により熱効率を95%までに向上し、省エネルギー化とともに大幅なランニングコストの削減を実現している。潜熱回収型風呂給湯器は、大気中への不要な熱の放出を低減し、CO₂排出量の削減、地球温暖化防止に寄与するほか、低NO_xバーナーを採用し、NO_xも60ppm以下に抑制できる。潜熱回収型給湯器の本体価格は42.8万円（耐用年数 約10年）で、従来の給湯器に較べて、エネルギー費用は給湯のみの場合に年間7,000円削減され、給湯+床暖房の場合で年間9,500円削減される。従来型（通常のガス給湯器）の本体価格を34.2万円（耐用年数約10年）とすると、給湯+床暖房で考えれば、およそ9年で本体価格増分を回収できる勘定である。新エネルギー・産業技術総合開発機構が潜熱回収型（60号以下、効率90%以上）に対し、従来型給湯器との差額（特殊工事費含む）の1/2を補助金として拠出している（ただし、上限の設定あり）。

iii) 断熱化の促進や建物日射遮蔽

業務建物における省エネ対策としての断熱化や日射遮蔽等の効果を示す事例として、ここでは大林組技術研究所本館を紹介する⁷⁾。本建物では98項目にものぼる省エ

ネ手法を採用し、年間エネルギー消費量は100Mcal/m²年（418MJ/m²年）を切り、通常のエネルギー消費レベルの1/4にまでカットした実績を有する。断熱・日射遮蔽に関しては、例えばダブルスキンと呼ばれるガラス張りの温室空間を南面に設けるという工夫を採用し、冬期の太陽熱利用と夏期の自然換気による熱負荷削減を図っている。多数の省エネ手法の採用で、本館での初期投資の増加分は約1億2,000万円であったが、維持管理費用は1年あたり約1,300万円節約可能であり、省エネ手法によるイニシャルコストの増加分は8.7年で償却可能と算出される。

iv) 低公害車

低公害車としては天然ガス自動車（CNG自動車）、ハイブリッド自動車、LPG自動車等が実用化されているが、自動車からの排熱削減に伴うヒートアイランド抑制の観点で最も効果の高いハイブリッド自動車を対象に、費用、効果等を取りまとめる。

ハイブリッド自動車と既存車（ベース車両）の車両本体価格及び燃費データが得られる「シビック」については、ハイブリッド化によって151.8万円→209万円の初期費用増で、燃費改善が20km/1→29.5km/1の効果となっている（10・15モードでの数値）。

9) 相対比較

各対策実施に伴い発生する費用をまとめると表5-3のとおりとなる。保水性舗装と遮熱性舗装だけは間接的経費が含まれていないが、これを含んだ場合には（施工面積にもよるが）1.5～1.7倍程度となる。

排熱削減策以外の対策間で初期費用を単純に比較すると、建物用遮熱性塗料や保水性舗装、遮熱性舗装が安価な方であるが、耐用年数は5～15年程度と短い。それに次いで安価なのは都市緑化や屋上緑化である。河川の二層化や水面再生は今回の事例では最も費用がかかる対策であった。排熱削減対策については、削減効果の違いは無視して従来機器との費用差に基づく回収年数だけで比較すると、エアコンの高効率化が最も回収年数が短い結果であった。

10) 年費用の算出

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、それに毎年維持管理費用をたし合わせて、各対策の年費用とした（次式）。

各対策の年費用＝減価償却費用＋年維持管理費用

減価償却費用＝初期費用×定額法係数×法定償却率

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 5-3)に基づいて表 5-4 の通り与えた。表 5-4 で遮熱性塗料の耐用年数はメーカーヒアリングに基づき、また、地上緑化の耐用年数は大規模公園緑地の費用便益を算定する際の考え方(文献 4)に基づき 50 年と定め(法定耐用年数は 20 年)、それ以外は法定耐用年数を与えた。5.2 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 5-5 にまとめる。なお、仮に地上緑化の耐用年数が 20 年の場合の年費用は 50 年の場合に比べておよそ 1.8 倍となる。

表 5-3 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/㎡	0~3 千円/㎡	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/㎡	2~6 千円/㎡	「屋上緑化の手引き 02 年」(東京都)より
都市緑化	17 千円/㎡	235~393 円/㎡	東京都立公園の場合
河川二層化	用地買収費は除く		耐用年数:事業期間 50 年
水面再生	382 千円/㎡	1.8 千円/㎡	釜川(栃木県)の事例
	84.6 千円/㎡	1.9 千円/㎡	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/㎡	—	東京都・舗装会社提供資料
遮熱性舗装	5.1 千円/㎡	—	直接工事費のみ
建物用遮熱性塗料	シリコン系:1.5~2.5 千円/㎡ フッ素系:1.8~3.0 千円/㎡	—	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/㎡ 普及期:0.25~0.5 千円/㎡	—	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/㎡	—	省エネルギーセンター調査より
建物日射遮蔽	31.8 千円/㎡	—	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

5.4 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 5-6 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⁸⁾。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⁹⁾。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 5-4 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/㎡)	維持管理費用 (千円/㎡/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 5-5 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

表 5-6 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
道路舗装	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) 気温低下による間接的な夏期エネルギー消費量の削減効果

夏期の気温低下に伴い、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（気温の変化量に対する電力消費量の変化量）は2000年時点で500万kW/℃に達し、東京都はそれのおよそ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¹⁰⁾と、3章で述べた気温低減効果の定量化のためのシミュレーション手法から求まる各対策実施による気温低下量の時空間分布を用いて、式(5-1)により23区内外の電力消費量削減効果を算定した。但し、人工排熱削減については、家庭・業務・道路各部門を区別せずトータルでのシナリオにより気温低下シミュレーションを行っている。ここで用いた気温感応度を図22に示す。

$$\Delta M = - \sum_{t=1}^{24} \sum_{i,j} f(t) M(i,j) \Delta T(i,j,t) \quad (5-1)$$

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）、 $\Delta T(i,j,t)$ ：計算メッシュ 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区全体の最大電力及びシミュレーションで用いた人工排熱量から原単位（23区全体における最大電力と人工排熱量の比率）を算出し、それにメッシュ毎の人工排熱量を掛け合わせるにより求めた。23区全体における最大電力の算出では、東京都統計年鑑より得られる東京都全体の月別と年合計の電力消費量、23区年合計の電力消費量から7月の1日あたり23区内電力消費量を算出し、これと東京電力より得られる時刻別電力負荷パターンとから、時間別の電力消費量を求め、最大電力を記録する14時台の電力消費量として与えた。

電力削減量を貨幣価値に換算するため、式(5-1)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、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。

以上の方法により、23区内での気温低減による間接的

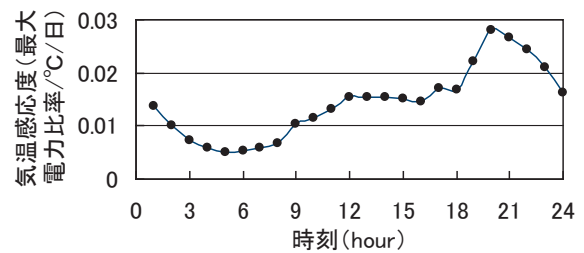


図5-1 最大電力で正規化した時間帯別の気温感応度

な便益はもちろんのこと、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間接的な便益も算出することができる。

(3) 気温低下による間接的な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(5-1)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）による公表値¹¹⁾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¹²⁾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

屋上緑化、地上緑化と水面再生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。そこで、これらを対象としてCVMを適用し、総支払い意志額TWTPを算出する。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で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の適用事例は非常に少ないため、唯一既往事例として報告のある平山ら¹³⁾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、リラクゼーション効果、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。今回、便益の総額を出すに当たっては、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を重複してカウントする場合と、しない場合（23 区昼間人口を上限値とする場合）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。ここでは大都市で調査した事例として、東京都北区での評価事例を参考とした。本事例は事業箇所から 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・年であった。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て、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、便益範囲の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¹⁴⁾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 箇所当たりの面積は、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¹⁵⁾、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見込めないと想定した。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、一般的なアスファルト補正と比較して 3dB 程度の騒音低減性能を有すると期待される従前の排水性舗装（低騒音舗装）について、排水性舗装（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、一般的なアスファルト補正と比較した場合の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¹⁶⁾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¹⁷⁾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（NO_x）も削減されるものと想定して、その便益を算出した。ここで、NO_x 排出削減量＝23 区乗用車類 NO_x 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、文献 17) の排煙脱硝装置の減価償却・維持費（124.4 千円/t）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 により評価できると考えられるものの、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 区内の地面から人間の地上での通常の活動範囲（1 階程度）に相当する高さ 3m までの空間に存在する空気（流動はしないものと仮定）を冷房すると想定する。その気塊の温度は、現実の様々な鉛直プロファイルを想定すると地上 1.5m 相当の気温で代表することができると仮定した。そして、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 日分の効果として便益を算出した。

(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必要がある。

屋上緑化による直接的省エネルギー効果は文献 18) 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 $12\text{MJ}/\text{m}^2/\text{年}$ ¹⁹⁾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 $781.8\text{kWh}/\text{年}/\text{台}$ 、 $656.3\text{kWh}/\text{年}/\text{台}$ 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、1 リットルあたり 100 円の単価を用いて算出した。

5.5 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うち、各対策による気温低下に由来する間接的な効果としての電力削減量とそれに伴う CO_2 削減量の算定結果を表 5-7 に示す。なお、23 区内人工排熱削減による間接的な電力削減量の算定結果には、民生部門（家庭、業務）と運輸部門（自動車）それぞれの人工排熱削減の影響が一体で含まれていることから、排熱量がエネルギー消費量と比例すると仮定した上で、東京都の民生（家庭、業務）、運輸におけるエネルギー消費量（それぞれ 166,365 TJ、253,767 TJ、270,359 TJ）²⁰⁾の比率で按分してそれぞれの要因の効果を抽出した。また、遮熱性塗料に関しては気象シミュレーションを行っていないことから、単位施工面積あたりの気温低減効果は遮熱性舗装と同じであると仮定して便益を算出した。表 5-7 から、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る。

次に、これまで述べてきたような様々な設定条件下での試算として得られた、対象とした全ての便益の算定結果について、前出の費用とあわせて表 5-8 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 CO_2 削減の便益と比較すると、表 5-7 に示すように圧倒的に電力削減の便益が大きかったので、燃料間接

表 5-7 気温低減による間接的な効果としての燃料（電力、ガス）削減と CO_2 排出削減の便益算定結果
(単位：百万円/年)

	23 区内			23 区外			合計		
	燃料削減	CO_2 クレジット	合計	燃料削減	CO_2 クレジット	合計	燃料削減	CO_2 クレジット	合計
屋上緑化（現状→45%）	3813.4	57.7	3871.1	624.2	9.8	634.0	4437.7	67.5	4505.1
水面再生（5%→10%）	1491.4	22.6	1513.9	148.3	2.3	150.6	1639.7	24.9	1664.6
保水性舗装	1161.0	17.6	1178.5	208.7	3.3	212.0	1369.7	20.8	1390.5
遮熱性舗装（アルベド* 60%*0.82）	1176.3	17.8	1194.1	209.1	3.3	212.4	1385.4	21.1	1406.5
遮熱性塗料	1325.1	20.1	1345.1	188.0	2.9	191.0	1513.1	23.0	1536.1
23 区内人工排熱削減	286.5	867.1	1153.6	65.7	205.3	271.0	352.2	1072.4	1424.6
（家庭部門）	77.4	234.2	311.5	17.7	55.4	73.2	95.1	289.6	384.7
（業務部門）	197.7	598.4	796.2	45.3	141.7	187.0	243.1	740.1	983.2
（運輸部門）	11.4	34.5	45.9	2.6	8.2	10.8	14.0	42.7	56.7

表 5-8 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	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	16.6	—	461.3	—	28.2	—	1062.7	-556.6	0.48
水面再生・重複有	16.6	—	2662	—	28.2	—	1062.7	1644.1	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	14	—	—	—	33.8	15.4	571.1	-507.9	0.11
遮熱性塗料(緑化45%相当)	15.4	31	—	—	45	—	67.1	24.3	1.36
高効率エアコン	3.8	405.3	—	—	1.4	—	143.2	267.3	2.87
HEMS	3.8	405.3	—	—	1.4	—	119.8	290.7	3.43
高効率自動車	0.57	48.1	—	0.2	0.01	—	88.1	-39.22	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。

削減の欄に合わせて表示した。気温低減による快適性向上便益は、地上付近の空気を冷房する費用による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には、屋外の快適性に関する CVM による評価が課題である。

表 5-8 に示された試算結果によれば、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との結果となっている。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。また、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 となることが表 5-8 から読み取れる。

さらに、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。

5.6 今後の課題

以上、ヒートアイランド現象緩和のための様々な対策の費用と便益の提示を行った。便益の算定では、可能な限り幅広い項目の定量化を試みたが、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対比較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総合的に算出することを試みた既往研究事例が極めて少ないことを考えると、対策の選択の判断資料となる有益な情報を提供することができたものと考えられる。

また、本研究では直接取り上げなかった市民参加型、個人実践型の対策の効果や推進方策についてもさらなる検討の余地が残されている。

参考文献

- 1) 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、pp. 177、1996
- 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
- 3) 資源エネルギー庁ホームページ(<http://www.enecho.meti.go.jp/policy/energy/enesan1.htm>)
- 4) 社団法人日本公園緑地協会：大規模公園費用対効果分析手法マニュアル、1999
- 5) 伊藤慶治：東京都における公園緑地整備事業の状況、都市公園―平成 12 年度決算及び 14 年度予算について―、No. 157、pp. 4-16、2002
- 6) 経済産業省総合資源エネルギー調査会省エネルギー部会：省エネルギー部会報告書、2001
- 7) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構：省エネルギー建築ガイド、「南面を覆うダブルスキーン 年間エ

- エネルギー消費量を 1/4 にカット」、pp. 18-23、2001
- 8) 肥田野登：環境と行政の経済評価、勁草書房、1999
 - 9) 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
 - 10) 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
 - 11) 東京電力(株)ホームページ(http://www.tepco.co.jp/env/environment/report/Pages/ka_26-j.html)
 - 12) Point Carbon (<http://www.pointcarbon.com/>)
 - 13) 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、pp. 595-600、2003
 - 14) 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)、pp. 679-684、2001
 - 15) 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
 - 16) 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
 - 17) 小川、三輪、嶋田、小川：日本における緑地の大気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
 - 18) (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
 - 19) 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
 - 20) 東京都：都におけるエネルギー需給構造調査報告書、平成 13 年、東京都

6. まとめ

本研究により得られた主要な知見を以下にまとめて整理する。

1. ヒートアイランド現象の発生要因と軽減対策の概略検討

東京23区を中心とした東京圏を対象としたヒートアイランド現象の発生原因として、緑地の変化、水面の変化、人工地被面の変化に着目し、それぞれの過去からの変遷と比較することで、ヒートアイランドの発生要因について考察を加えた。緑地の変化については、過去と比較して人口一人当たりの都市公園面積は増加しているものの、欧米と比較すると小さいことを示した。一方、水面の変化については、江戸時代は水空間の面積が市街地に占める割合が10.9%程度であったのが、現在では4.8%程度まで減少している。これは、戦後復興や高度経済成長に伴い都市化が大きく進んだことが原因と考えられる。人工地被面の変化としては、東京都区部で道路の占める割合が15%程度となっており、都市化に伴って割合が増加していることが確認された。以上の検討より、過去と比較して現在は、ヒートアイランド現象を促進すると考えられる人為的な影響が東京圏に対して加えられてきていることが読み取れることが分かった。

このことから、水と緑の保全の重要性を踏まえつつ、官が主体となる社会基盤整備に関連する対策として、屋上緑化、河川等水面の再生、保水性舗装や遮熱性舗装の推進、民や個人が主体となる対策として、省エネ機器導入等による民生部門や業務部門における人工排熱の削減対策について、本研究でとりあげる重要な対策シナリオ案と位置づけ、それらの効果の定量的分析や費用効果分析を実施することとした。

2. メソスケールモデルによるヒートアイランド軽減のための個別手法の気温低減効果の定量化および将来の都市高温化の評価

都市スケールでのヒートアイランド現象評価を目的として、メソスケール気象モデル(MM5)を用いていくつかのシナリオに基づく気温低減効果の定量化を行った。ここでは、気温低減効果シナリオとして、屋上緑化の推進、水面の再生、舗装の熱特性改善(保水性舗装および遮熱性舗装)および打ち水を挙げた。屋上緑化の推進につい

て、東京23区のみどり率が45%まで増大してシミュレーションを行った結果、最大で0.7℃程度の気温低下が確認されたが、緑化対象域から外れる地域では気温低減効果はほとんど確認されなかった。水面の再生について、東京23区内の水面積の割合を現状の倍に戻した場合についてシミュレーションを行った結果、日中で最大0.6℃程度の気温低下が確認された。保水性舗装による気温低減効果の評価は、都市部の全道路の蒸発効率を0.15としてシミュレーションすることで行った。その結果、日中に都市部で最大0.8℃程度の気温低減効果が確認された。遮熱性舗装による気温低減効果を評価するにあたっては、道路表面の温度として10℃近い温度低減効果を持つ遮熱性舗装が都市部の全道路に導入された場合を想定してシミュレーションを行った。その結果、都市部で正午に0.8℃以上、午後2時に0.6℃以上の気温低減効果が確認された。

これらの検討により、様々なヒートアイランド軽減対策について、その効果が及ぶ時空間スケールを含めてマクロに評価することができた。

3. 路面温度低減舗装による熱環境改善効果の定量化

最初に、路面温度低減型舗装(遮熱性舗装および保水性舗装)の路面温度低減効果の検証を行った。排水性舗装の路面温度との差により、遮熱性舗装、保水性舗装および透水性舗装の路面温度低減効果を調べた結果、非走行部について遮熱性舗装で9~13℃、保水性舗装で9~11℃、透水性舗装で10~14℃の低減効果が確認された。また走行部は非走行部に比べて路面温度低減効果が小さくなった。

路面温度低減効果の評価方法として、太陽光に近い波長特性を持つランプを舗装供試体表面に照射する室内評価試験方法を開発した。屋外と室内で測定した各路面温度低減舗装の路面温度は概ね一致したため、室内試験による測定は、屋外での効果を精度よく推定することができると考えられた。また、季節を限定せずに測定した実働の路面温度から、夏季の路面温度低減舗装の路面温度低減効果を推定する予測式を作成した。

また、街区モデルによる熱伝動解析を実施し、保水性舗装および遮熱性舗装を導入による熱環境改善効果(ここでは、平均放射温度(MRT)を指標とした。)の評価を行った。路面温度低減型舗装と街路樹の組み合わせによりMRTを評価したところ、路面温度低減型舗装を単体で施工するよりも、街路樹と組み合わせることでより効果的に熱環境を改善することができることが分かった。特に、街路樹との組み合わせに関しては、遮熱性舗装より

も保水性舗装が有効であることが分かった。

4. ヒートアイランド軽減対策の費用便益評価

ヒートアイランド現象の軽減対策実施がもたらす費用 (C) と便益 (B) の総合的な評価を試みた。費用便益評価の対象とした対策は、屋上緑化、地上緑化、水面再生、保水性舗装、遮熱性舗装、建物用遮熱塗料、各種人工排熱削減対策である。人工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。さまざまな仮定に基づく試算ではあるが、今回の試算により、様々な対策シナリオの費用対効果について、定量的に比較・総覧するための一つのたたき台を提示することができた。その試算によると、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結果となった。さらに、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と考えられる。

ただし、個々の費用対効果の定量的な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ため、今後より詳細な検討を行う必要がある。たとえば、保水性舗装や遮熱性舗装では他の対策と比較して B/C が小さくなっている理由として、今回便益計算に用いている CVM では、沿道歩行者への温熱的緩和効果を評価できないため、便益が小さく評価されていることが挙げられる。しかしながら、本検討の成果は、様々なヒートアイランド軽減対策の総合的な評価手法の一つの方向性を提示した最初期の事例として重要な意義があると考ええる。

なお、これらの研究成果は、平成 11 年度から 15 年度にかけて土木研究所において実施された重点研究プロジェクト「都市空間におけるヒートアイランド軽減技術の評価手法に関する研究」の成果をとりまとめたものである。