

ダム湖およびダム下流河川の水質・土砂制御技術に関する研究

独立行政法人土木研究所水工研究グループダム水理チーム

かしわ い じょうすけ
上席研究員 柏井 条介

1. 研究対象

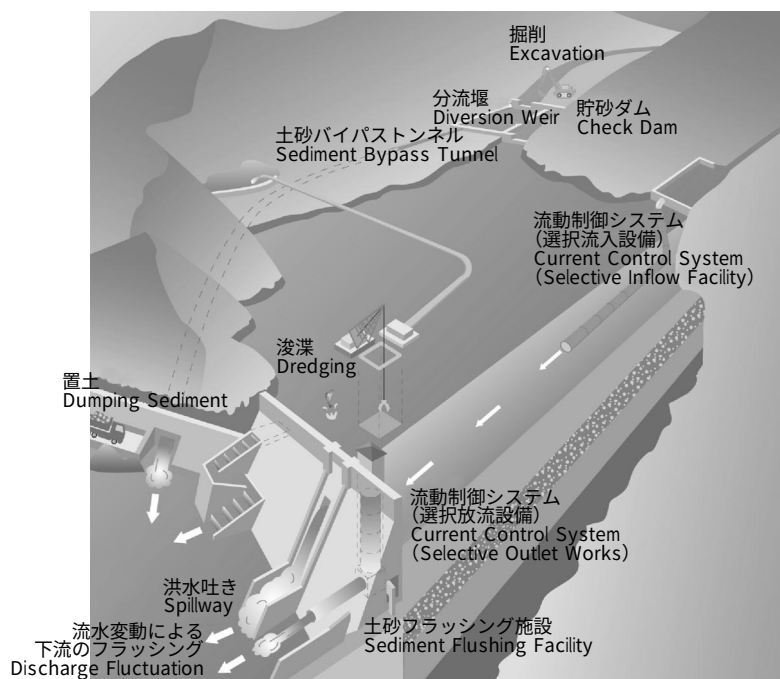
河川は流水の通り道である。特にダムが建設される山間地では急流を形成している場合が多い。従って、ダム貯水池の建設により水流は大きく淀むことになる。水流が淀むことにより主として二つの大きな問題が生じる。堆砂問題と水温・水質問題であり、本研究の対象である（図－1 参照）。

2. 貯水池の堆砂問題と技術的課題

貯水池の堆砂問題は二つの側面をもっている。貯水池を埋没させることにより貯水池の効率を低下させるという側面と、流下土砂を捕捉することにより下流の土砂環境を変化させるという側面である。堆砂問題は前者を論じる場合の用語としては適当であるが、後者の問題を論じるには限定的

な意味合いをもち必ずしも適当ではない。近年、貯水池の土砂管理問題の用語が用いられるようになってきているのはこうした背景があり、ここでも土砂管理の視点で以下を記述する。なお、上流側の河床が上昇する場合には上流側の土砂環境も変化させることになるが、上流側への影響範囲は下流側と比較して限定的なものである。

貯水池の土砂管理を適切に実施していくための技術的な課題は二つの側面に大別できる。一つは貯水池への流入土砂の把握とその挙動の解明であり、他は下流に土砂を供給する方法に関する技術開発である。



図－1 研究概要図

3. 貯水池の流入土砂の把握とその挙動の解明

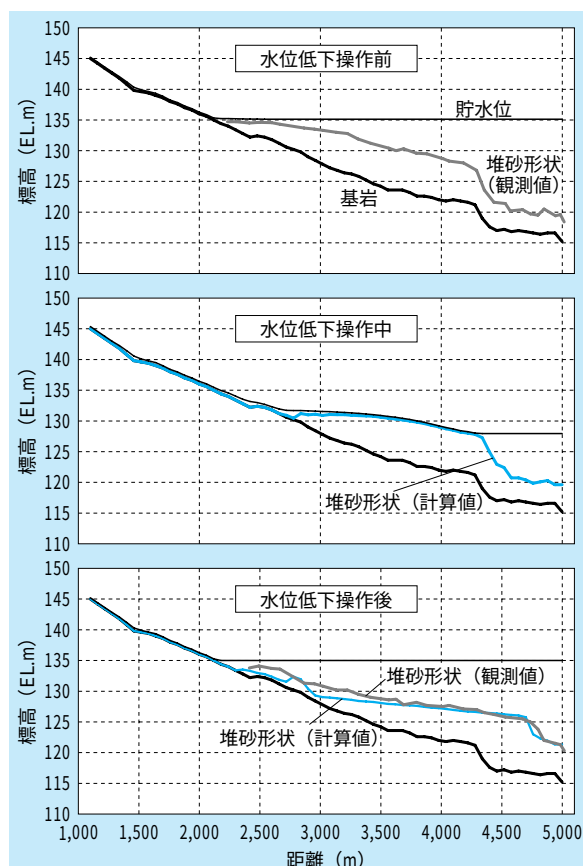
本研究では、貯水池への流入土砂の把握とその挙動の解明に対応するものとして、近傍類似ダムからの流入土砂量の推定方法を提案しており、地質や気象が類似しているダムでは、単位集水面積当たりに存在する裸地（崩壊地）面積の割合や集水域の山地の急峻さが重要なパラメーターとなる場合が多いことを示した。また、年変動の大きい流入土砂量を確率により評価する方法を提案している。

堆砂対策や土砂管理の観点からは流入土砂の量とともに粒径分布に関する情報も必要である。本研究では全国の国土交通省のダムで行われたボーリング調査の結果を整理し、シルト以上と以下の成分が平均的には同程度存在すること、ダムによりばらつきが大きいこと、微細成分の構成比率は流域の表層地質が堆積岩である場合に大きく、火山岩である場合に小さい傾向があることなどを明らかにしている。

また、微細粒子を含む流入土砂の貯水池内の挙動を予測するための数値シミュレーションソフトを開発している。開発したソフトは有限体積法および Mac Cormack 法による1次元河床変動計算ソフトであり、流れの計算を不定流計算として実施するものである。本ソフトにより常流、射流の混在流れの計算、底面からの巻き上がり量と降下量が均衡しない非平衡の浮遊砂の計算などが可能であり、図一2に計算例を示す。図は、水位低下による排砂操作を実施した貯水池の計算例であり、計算結果は堆砂測量結果をよく表している。

4. 土砂供給方法

貯水池流入土砂を下流に供給する方法として、貯水位を一時的に低下させて流れの土砂輸送力を回復させる土砂フラッシング、貯水池を迂回する



図一2 貯水位低下時を含む堆砂計算事例（有限体積法）

水路を通じて洪水時に貯水池に流入する土砂流れをダム下流に直接放流する土砂バイパスング、掘削・浚渫土をいったんダム下流河道内に仮置きし、洪水時に掃流させる河道内仮置きなど、いくつかの方法が実施されるようになっているが実施例は限られている。このため、各種方法の技術的な確立が求められている。

各手法実施時の貯水池流入土砂の排出効果については先に示した数値シミュレーションを用いて検討することができる。本研究では、主たる対象として土砂フラッシングやバイパスングで必要となる水理構造物の磨耗対策、および仮置き土の侵食現象を取り上げて検討を進めている。

磨耗対策に関する研究では、ライニング材料の磨耗・損傷量予測を行うための試験装置開発を行うとともに、磨耗の原因である流下土砂の水路壁面への衝突現象の解明・予測を行っている。

図一3は、製作を進めている試験装置の概要図である。水路壁面への土砂の衝突はさまざまな角度で生じる。このため、磨耗・損傷試験では壁面

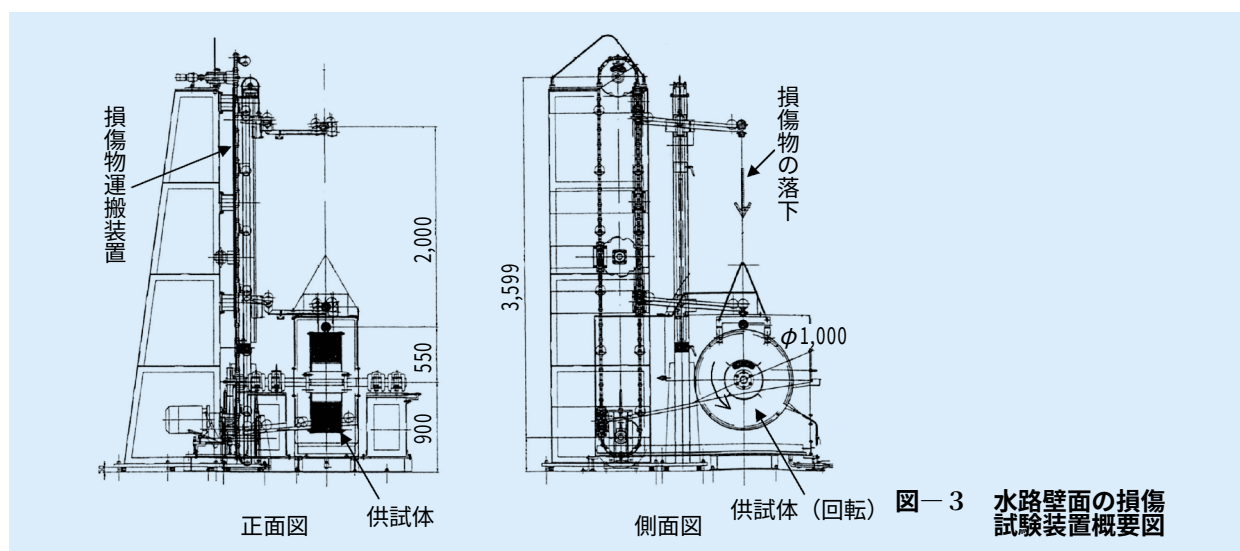


図-3 水路壁面の損傷試験装置概要図

となる供試体と衝突物の衝突角度が重要なパラメーターとなり、適切に制御する必要がある。ここで、衝突物は自由落下させるのが容易である。そこで、供試体を回転させ衝突時の相対的な速度比を変化させることで衝突角度を変化させるものとしている。今後、本装置を用いてコンクリート等の損傷試験を実施する予定である。

図-4は水路上を流下する砂礫の運動を高速ビデオで撮影した例である。ビデオ映像を解析することにより、流れの場と砂礫の衝突速度・角度、放出速度・角度の関係を調査しており、こうした調査を通じ、水路壁面に対する衝突条件を推定することを予定している。本結果と上述の磨耗・損傷試験結果を合わせることで、水理構造物の磨耗・損傷量の予測方法、適切なライニング方法、維持管理方法を提案したいと考えている。

仮置き土の侵食状況については、侵食実験による現象把握を実施している。その結果、置土表面

が水面上にある場合、侵食状況が置土上流部の侵食と側部の侵食に分けて議論できることが明らかになっている。今後、さらに実験を重ねるとともに侵食状況の予測モデルを作成していく予定である。

5. 水温、濁水現象の予測

貯水池の水質問題として、従来から冷水放流、濁水長期化、富栄養化が取り上げられてきた。水温に関しては近年、生態系保全の観点から温水放流についても問題視され、冷・温水放流として取り上げられるようになっている。本研究では、冷・温水放流、濁水長期化を対象としている。

貯水池の水温、濁水現象については数値シミュレーションにより予測検討されるのが一般的であるが、現地データが不足していることもありモデルの検証が十分ではない問題がある。

特に出水による濁水の挙動についてはモデルの検証に多くの労力が費やされているのが現状である。

本研究では、出水中および出水後の詳細な現地観測を実施し、濁水の挙動を把握した。また、乱流（標準 $k-\epsilon$ ）モデルを用いた鉛直2次元のシミュレーションソフトを作成して再現計算を行い、濁水の流動が流入濁質の粒

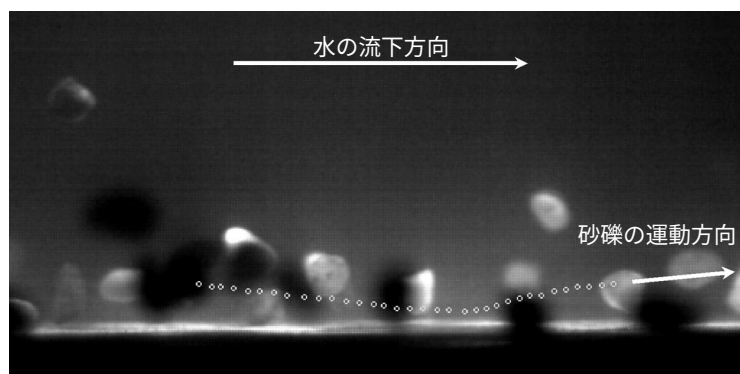


図-4 砂礫の運動例

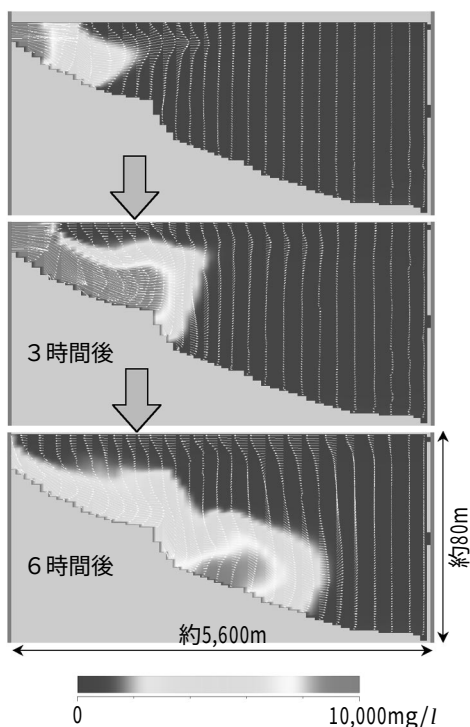


図-5 出水時の濁水挙動計算例
(鉛直2次元モデル)

度分布の影響を受けることなどを明らかにした。さらに、モデルの違いによる影響を明らかにするため、圧力の取り扱い（静水圧、非静水圧）、渦動粘性係数（拡散係数）の取り扱い（係数一定、リチャードソン数等局所的な水理量の関数とする場合、乱流モデル）の異なるいくつかのソフトを作成し同一条件で計算を行った。その結果、圧力の取り扱いによる差は明確でないこと、出水規模

が大きくなるに従って、モデル間の差が大きくなることなどを示している。図-5は乱流モデルによる濁水の侵入状況を再現した例である。

6. 水温，濁水制御

水温制御として流入水温を近似した放流水温とすることを目標に設定した。こうした放流水温制御の可能性を検討するため、日本の地域別の流入水温や気象条件を整理するとともに、貯水池規模等を変化させた数値シミュレーションを実施した。その結果、貯水池の回転率が小さいほど、また貯水池規模が大きいほど放流水温の制御可能な期間が長くなることなどを示した。図-6はそうした水温制御が可能な場合の取水位置の変化例を示したものであるが、夏場の温水放流を避けるため、取水位置を徐々に下方に移動させていく必要があることが示されている。

濁水制御に関しては、貯水池内に設けたカーテン（フェンス）と放流設備の連携運用により、流入濁水と貯留水の混合を低減する方法について検討を実施しており、適当な運用を行うことにより清澄水を貯水池上方に保存する効果が期待できることを明らかにした。

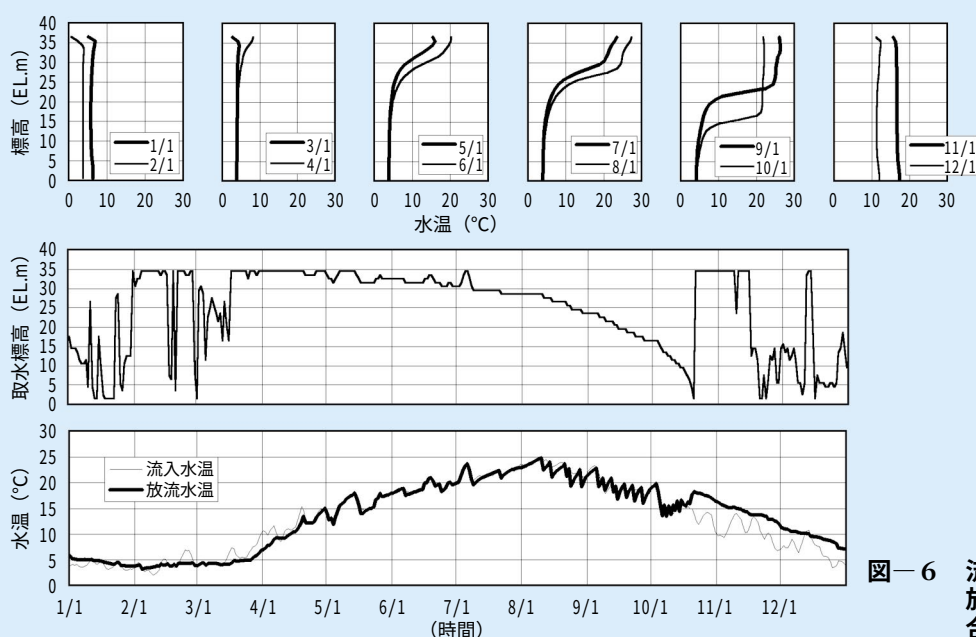


図-6 流入水温を近似させた放流水温制御を行う場合の取水標高変化例

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

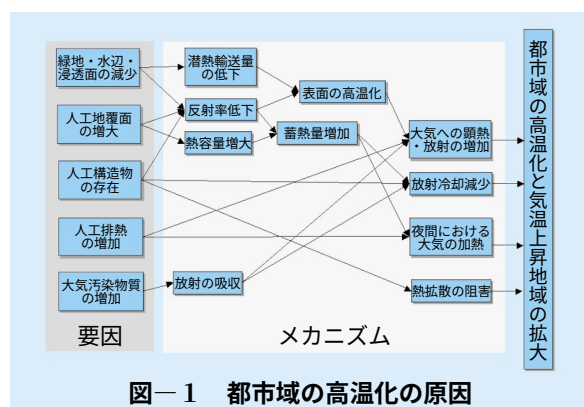
独立行政法人土木研究所水工研究グループ水理水文チーム

上席研究員 深見 和彦

ふか み かずひこ

1. 研究対象

人口の集中と大量のエネルギー消費、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）が進行していることが広く知られている。アスファルトやコンクリートによる地面の被覆等がその主たる原因と指摘されたり、水循環系再生計画における緑地・水面保全計画がその対策ともなると期待されたりすることがあるが、実際の現象は種々の要因によって引き起こされており、都市や地域によっても異なる（図－1）。このため、本研究では社会基盤整備におけるヒートアイランド現象への影響を定量的に評価するとともに、その軽減策を提示することを目的とした取り組みを行った。2.で本研究の概要と成果の一部を紹介する。



図－1 都市域の高温化の原因

2. 本研究における検討内容と成果

(1) 本研究における検討内容

本研究では「都市域におけるヒートアイランド現象のシミュレーション手法の確立」「対策技術および対策シナリオの提案」「対策シナリオの費用と気温低減・使用エネルギー削減効果の評価手法の提案」の3項目を達成目標とした（図－2）。これらの目標を達成するため、平成11年度から15年度にかけて、土木研究所水工研究グループ水理水文チームと、同 基礎道路技術研究グループ舗装チームが共同で本研究を分担・実施した。

- ① 都市域におけるヒートアイランド現象のシミュレーション手法の確立
- ② 対策技術および対策シナリオの提案
 - ②－1 温度低減性能に優れた舗装材料の提案
 - ②－2 各種対策シナリオの開発
- ③ 対策シナリオの費用と気温低減・使用エネルギー削減効果の評価手法の提案
 - ③－1 社会基盤整備に伴うヒートアイランド軽減対策の効果の解明（道路と建物を対象）
 - ③－2 緑被や水域など気候緩和効果の予測と評価手法の提案
 - ③－3 排熱対策の効果の予測と評価手法の提案

図－2 本研究の達成目標

(2) 都市域におけるヒートアイランド現象のシミュレーション手法の確立

本研究では、無償で提供されている米国大気研究センター（NCAR）のMM5に修正を加え

て、首都圏における地表面標高、土地利用、人工排熱等の情報を用いて、夏期晴天時の気温、湿度、風速の時空間分布をシミュレートできるモデルを作成した。これにより、首都圏（それ以外の地域でも利用可）における都市のヒートアイランド現象を再現するとともに、各種対策の効果を試算することができる。なお、人工排熱の時空間分布データも本研究において整備した。

(3) 対策技術および対策シナリオの提案

対策は、大別して、「自然環境の保全や復元による対策」「人工被覆の熱特性改善に基づく対策」「人工排熱の削減による対策」に分類される（図-3）。本研究では、対策シナリオとして、屋上緑化、河川等水面の再生、保水性舗装や遮熱性舗装、民生部門や業務部門における人工排熱の削減などを取り上げ、気温低減効果の検討を行った。さらには、「一般市民の参加できる対策」として、打ち水という昔ながらの行為を取り上げ、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」なる社会実験に参画し、数値シミュレーションや現地における気温低減効果の計測を通

じて、打ち水の効果を定量化した。図-4には、さまざまな対策を行った都市の景観イメージを示す。

対策シナリオの一つとして水面再生の効果について図-5、6に示す。図-6は、シミュレーションモデルを用いた計算結果の一例で、過去100年間にわたって都区内の河川、水路や沿岸海域の埋め立てが行われてきたが、仮にこれらの埋め立てがなかったとしたら、どの程度地上気温が現状に比べて低減するのかを試算したものである。東京湾湾奥の埋め立て地での低減量はもちろん大きいですが、都区部と埼玉県との境界部分を超えて効果が及んでいることがわかる。

対策間の気温低下量を比較すると、同じ割合だけ各対策の面積を増やした場合（全土地面積の10%で対策を行った場合）、日中の気温低下量が最も大きいのは水面の再生で、舗装による対策も一定の効果が期待されることがわかる（図-7）。

対策シナリオの提案とともに、特定の対策について掘り下げる取り組みとしての個別対策技術検討を行った。その一つとして、「都市環境に配慮

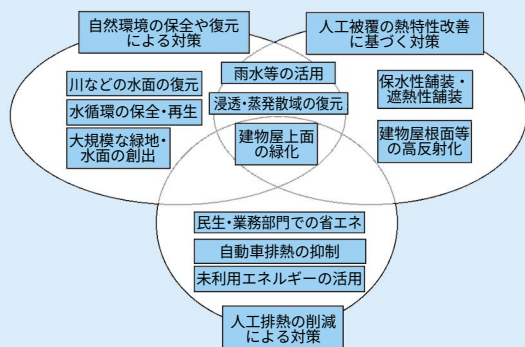


図-3 ヒートアイランド現象の軽減対策

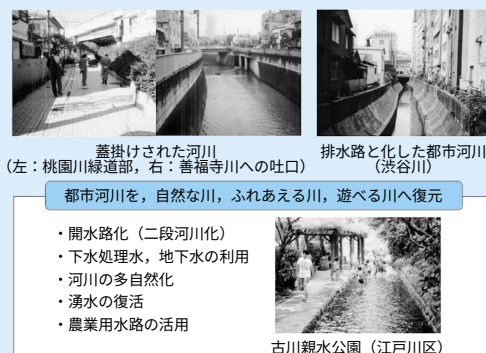


図-5 河川の水面再生や水循環の保全によるヒートアイランド軽減

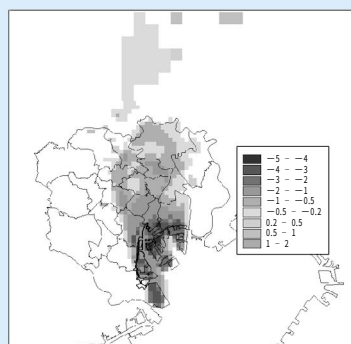


図-6 都区部と沿岸域の水面が保全されていた場合の気温低減量（夏期晴天日の正午）

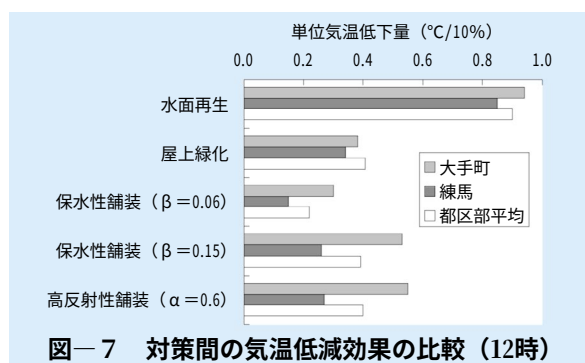


図7 対策間の気温低減効果の比較 (12時)

した舗装構造に関する研究」を行い、温度低減の性能を期待する新技術として、保水性舗装、遮熱性舗装、明色化舗装を検討し、保水能力、色調、熱反射特性などとともに、実際の温度低減機能について把握した。また、保水性舗装の特定エリアでの試験施工による実測調査で、舗装直上1mで夏期日中最大1℃程度の気温低減効果が確認された。一方、街路スケールのシミュレーションにより、路面温度低減舗装と植樹を組み合わせることにより、歩行者空間の熱環境の改善に有効であることが示されている(図8)。また、これら舗装の耐久性についても検証を行った。その結果、保水性舗装・遮熱性舗装とも、舗装本来の耐久性は確認された。しかし、路面温度低減性能の耐久性についてはまだ把握されていない。

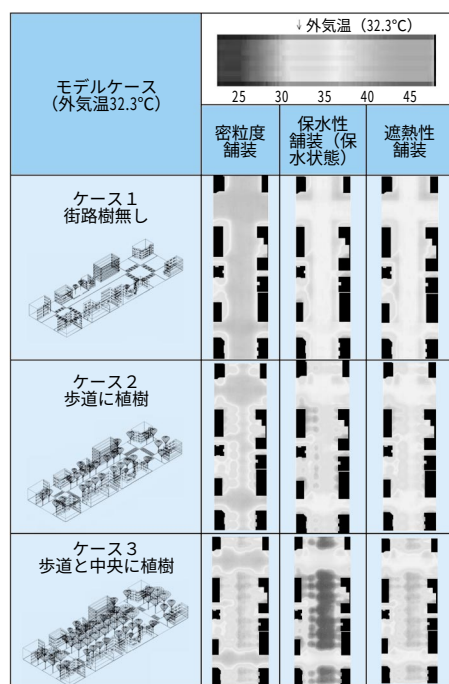


図8 地上1.5m高さにおける平均放射温度MRTの分布 (13:00)

さらに、「ヒートアイランド低減効果を目指した高性能の遮熱性塗料の開発」を民間会社との共同研究により実施した。本塗料は、舗装や屋根などの表面に遮熱コート材を塗布して日中高温化する人工構造物の表面温度の低減を図るものである。ここでは、黒～灰色系の遮熱性塗料を開発し、遮熱コート材の日射反射性能および温度低減性能を示した。本開発により明度 (L^* 値) 40 (濃灰色) で日射反射率50%以上という性能が実現された(図9)。本塗料は、関東地方整備局と東京都により実施された「環境舗装東京プロジェクト」等にも採用されている。

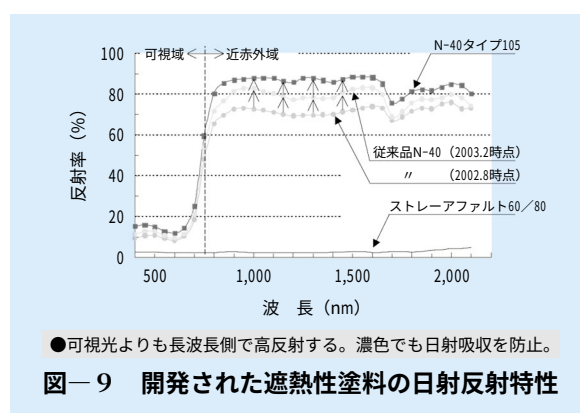
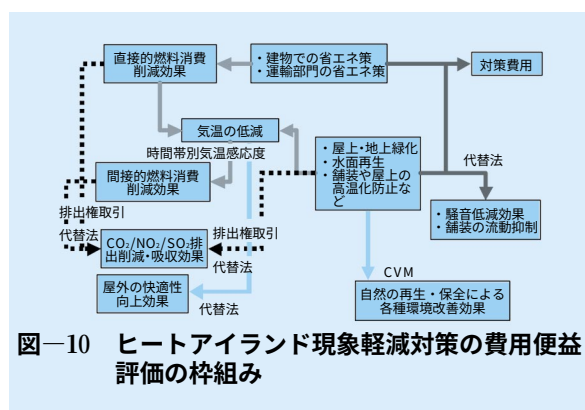


図9 開発された遮熱性塗料の日射反射特性

(4) 対策シナリオの費用と気温低減・使用エネルギー削減効果の解明

本研究においては、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、各種対策シナリオの設定条件と、それらシナリオのもとでの気温低減効果のシミュレーションの結果を利用して、対策実施に要するトータルの費用(初期費用と維持管理費用)と各種便益の算定を行い、費用便益評価に基づく有効な対策の提示を行った。費用便益評価の対象とした対策は、屋上緑化、地上緑化、河川等水面再生、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。便益としては、気温低下による電力消費量の削減や快適性の向上、CO₂削減、大気浄化効果、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、道路騒音低減、舗装の耐久性の向上等を対象とした



(図-10)。

費用便益評価の結果を表-1に示す。表中、屋上緑化と水面再生の「重複有」とは、CVMによる環境改善等の効果（リラクゼーション効果、レクリエーション効果、景観向上、生態系保全など）の受益範囲のオーバーラップを許容することを意味する。また、電力（燃料）削減便益とそれに伴うCO₂削減の便益は合計して表示している。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、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、今後、屋外の快適性についてCVMによる評価が必要であると考えられる。

表-1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と評価された。また、保水性舗装や遮熱性舗装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はなく、都市の自然環境の保全によるさまざまな価値の適正な評価が重要であることが伺える。なお、以上はさまざまな仮定、条件設定のもとでの一つの試算であることを断っておく。

3. おわりに

シミュレーション技術の高度化や対策メニューの多様化への対応、費用便益評価手法の改善・精度向上など、本研究で残された課題も多いが、その後もヒートアイランド対策技術の開発や実施、効果に関する関心・ニーズが高いことから、継続的な取り組みが重要であると考えられる。

国土交通省では、環境行動計画（案）を策定し、その中においてヒートアイランド対策への取り組みについても言及している。「水面確保計画ガイドラインの作成」「ヒートアイランド対策に関する舗装技術の研究開発」「打ち水の実施による国民のヒートアイランド問題への意識向上」などもメニューとして掲げられた。また、道路局では平成17年度から自治体が実施する保水性舗装等の試験施工・調査への補助制度を創設することとなった。このように、本研究で取り上げた対策がさらなる進展を遂げようとしている。

一方、地球温暖化の進行による夏期のヒートア

일랜드現象の過酷化が懸念されている。ヒートアイランド対策は地球温暖化時の酷暑対策としても有効に活用できるものであり、今後も長期的な計画を立て対策を進展させていくことが重要である。

最後に、本研究に共同参画されたすべての方々に敬意を表し、本稿の締めくくりとしたい。

表-1 費用と便益の試算結果

(単位：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	8.5	87.8	147.7	38.6	15.7	—	988.1	-689.8	0.30
屋上緑化(重複有)	8.5	87.8	1239.5	38.6	15.7	—	988.1	402.0	1.41
水面再生	17.6	—	461.3	—	29.8	—	1062.7	-554.0	0.48
水面再生(重複有)	17.6	—	2662.0	—	29.8	—	1062.7	1646.7	2.55
地上緑化	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	23.2	31.0	—	—	68.2	—	67.1	55.3	1.82
高効率エアコン	1.0	405.3	—	—	0.2	—	143.2	263.3	2.84
HEMS	1.0	405.3	—	—	0.2	—	119.8	286.7	3.39
高効率自動車	0.2	48.1	—	0.2	0.05	—	88.1	-39.5	0.55