

## IV-2 都市環境に配慮した舗装構造に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平12～平15

担当チーム：舗装チーム

研究担当者：伊藤正秀、新田弘之、城戸 浩

### 【要旨】

都市部では、ヒートアイランド現象や局所的な集中豪雨による都市型水害の多発などが見られ、これらへの対策が各方面で進められている。舗装からの対策技術として路面温度低減効果が高い舗装が注目されているが、これらの効果の検証、耐久性の確認などが課題である。そこで本研究は路面温度低減効果が高い舗装について機能評価及び耐久性の評価を行い、それらによる熱環境改善効果について実測調査及びシミュレーションによる解析を行った。

その結果、保水性舗装、遮熱性舗装、明色化舗装は、路面温度低減効果が認められた。保水性舗装は舗装本来の耐久性が確認された。しかし、保水性舗装、遮熱性舗装、明色化舗装の路面温度低減性能の耐久性については把握されていない。また、遮熱性舗装、明色化舗装の明度と色調については今後の課題である。

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1℃程度の気温低減効果が確認された。シミュレーションによる解析では、保水性舗装と街路樹による対策効果の有効性が算出された。

事業の可能性の検討では、路面温度低減舗装を東京都内に施工していく場合、設置面積率が100%となる35年後に路面温度低減効果が期待される面積は12%程度という試算結果となった。

キーワード：ヒートアイランド現象、車道透水性舗装、遮熱性舗装、保水性舗装、明色化舗装

### 1. はじめに（背景及び経緯）

ヒートアイランド現象抑制の対策の一つとして地表面被覆状態の改善が上げられ、地表面を被覆している舗装による対策が検討されている。舗装における対策技術としては、路面温度低減効果のある舗装が開発されているが、路面温度の低減効果が高いことが重要であるとともに、車道としての耐久性が確保されていることも重要となる。また、舗装からの熱環境改善効果としてどれ位施工すれば気温がどれ位さがるのかといったことも把握されていない。

本研究では、平成12年度に既存材料・工法の抽出・温度低減効果に関する評価、平成13年度は温度低減性能に優れた舗装の提案、供試体及び実大規模での路面温度調査、耐久性調査を開始した。平成14年度は耐久性調査の継続調査、路面温度調査及び付加的機能に関する検討、九州技術事務所における保水性舗装の熱環境改善効果の実測調査、平成15年度は、耐久性調査の継続調査、路面温度調査、路面温度低減機能の評価法の開発、街区等レベルにおけるシミュレーション、事業の可能性の検討について試算を行った。

### 2. 研究内容

研究で行った概要を以下に示す。

#### 1) 路面温度低減機能の検証

①温度低減程度の把握、その持続性、耐久性

#### 2) 舗装としての性能の検証

①舗装として必須の性能（疲労破壊輪数55万輪）

②その他の性能（すべり抵抗値の推移、現場透水量の推移）

#### 3) 路面温度低減機能の評価法の開発

①室内で路面温度低減効果を評価する方法の開発

②実際の舗装路面温度低減効果を夏季以外に評価する方法の開発

#### 4) 環境改善効果の評価

①実測による温度低減と気温の関係

②熱環境改善効果対象の考え方・概念の整理

③狭量領域スケールにおけるシミュレーション

#### 5) 事業の可能性の検討

#### 2.1 試験施工の概要

独立行政法人土木研究所内で試験施工を行った舗装構造を図-1、2に示す。なお、路面温度低減機能の評価法の開発で行った供試体舗装構造は5、路面温度低減機能の評価方法の開発で示す。

図-1は、透水性舗装、透水性舗装の表面を薄い白色に明色化した透水性舗装、保水性舗装（鉱物質系）と比較用の密粒度舗装の4種類を施工した。

図-2の舗装の種類は、排水性舗装上に色の異なる熱反射遮材を塗布した遮熱性舗装、開粒度アスファルト混合物の空隙に種類の異なる保水材を充填した保水性舗装、路床・路盤上の遮水シートにより水の移動に制限を設け、さらに表面を白色に明色化した透水性舗装の3種7工区とした。

以上の舗装構造について、路面温度の調査を行った。また、図-2の舗装構造では、促進載荷用の荷重車（総重量約16t）を走行させた。荷重車の走行は最終的には、49kN換算輪数55万輪走行させ、耐久性の調査を行った。

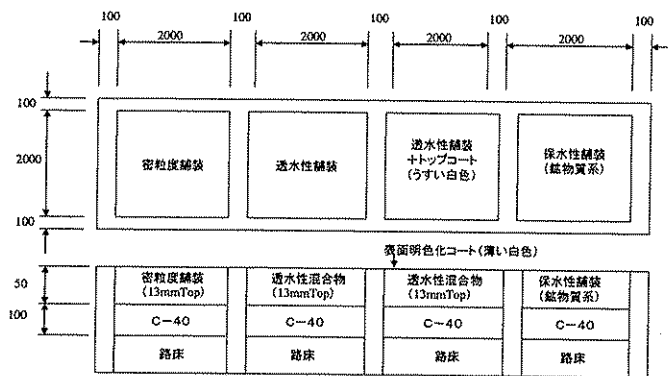


図-1 試験施工の概要(1)

排水性舗装	排水性舗装+遮熱性 黒色 灰色	透水性舗装 (表面明色化コート) 白色 白色+しや水シート	保水性舗装 鉱物質系 高分子系 保水材 保水材
排水性混合物(13mm Top, 空隙20%)	排水性混合物(13mm Top, 空隙20%)	透水性混合物(13mm Top, 空隙20%)	保水性混合物
粗粒度アスファルト混合物	粗粒度アスファルト混合物	透水性混合物(13mm Top, 空隙20%)	粗粒度アスファルト混合物
瀝青安定処理	瀝青安定処理	透水性瀝青安定処理	瀝青安定処理
		クラッシャーラン(C-40)	

図-2 試験施工の概要(2)

### 3. 路面温度低減機能の検証

#### 3.1 路面温度低減程度の把握

##### 1) 路面温度の計測 (供試体調査)

日最高気温での密粒度舗装との比較を行った結果を図-3に示す。

##### ①透水性舗装

最高温度差が1.7℃、平均温度差0℃と、温度低減効果はほとんどみられなかった。

##### ②透水性舗装+表面明色化コート(薄い白色)

最高温度差6.9℃、平均温度差3.7℃となり、①に表面明色化コート(薄い白色)を施工することにより、ある程度の温度低減効果がみられた。

##### ③保水性舗装

最高温度差では15.8℃、平均温度差9.4℃となり、最も温度低減効果がみられた。

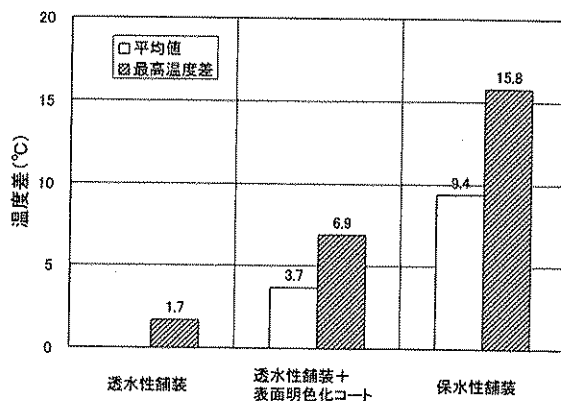


図-3 各種舗装の路面温度調査結果(供試体)

##### 2) 路面温度の計測(実大規模:土木研究所試験走路)

温度低減効果としては、日最大温度差を約10日間平均して比較した。ただし、雨天には温度差が小さくなるので、雨天のデータは除いた。各種舗装の温度低減効果を図-4に示す。

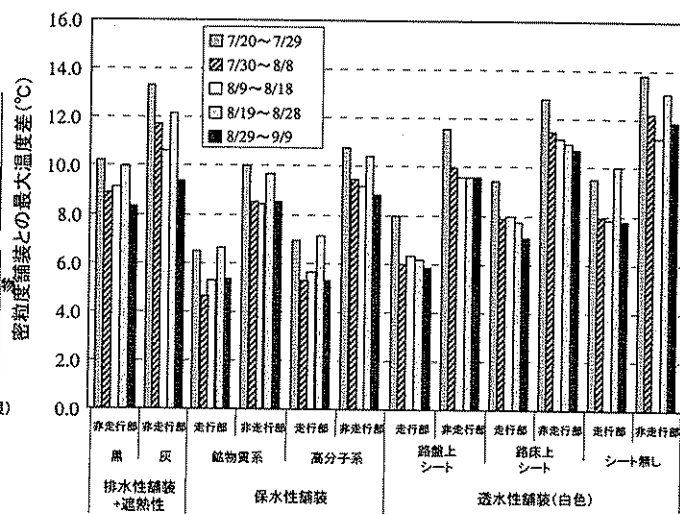


図-4 各種舗装の温度低減効果

まず非走行部だけで比較を行うと、“透水性舗装(白色)シートなし”と“排水性舗装+遮熱性(灰)”が最も温度低減効果が高いことが分かった。また、構造の違いの影響については、透水性舗装において3タイプを施工し比較した結果、シートをしないもの

が最も温度低減効果が高く、シートが表面に近づくほど効果が小さくなった。これより、路盤、路床などの水分の蒸散の影響があることが考えられた。

遮熱性舗装と構造的に近いのは“透水性舗装(白)路盤上シート”であり、これとの比較から表面の特性では、遮熱性舗装(灰)の方が温度低減効果が高いと考えられた。

### 3) アルベドと路面温度の関係

図-4 において、走行部・非走行部を比較すると、いずれの場合も走行部は非走行部より温度低減効果が小さくなっている。走行部は車両の走行によりダメージを多く受けたためと考えられる。ダメージの程度を見るため、図-5 に 21 万輪載荷後の舗装位置によるアルベド値を示す。多くの舗装でタイヤ走行部のアルベド値が低下していることが分かる。

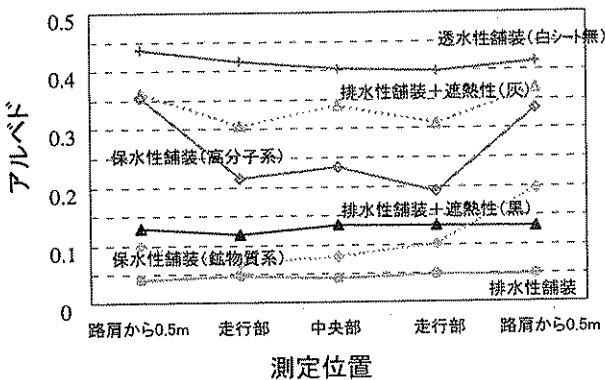


図-5 各種舗装の測定位置毎のアルベド

この原因は、保水性舗装で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により、また遮熱性舗装・透水性舗装(白)はタイヤ走行による汚れ、剥がれによるものであった。

図-6 は各舗装表面のアルベド(日射反射量/日射量)を求め、密粒度舗装との温度比を表したグラフである。

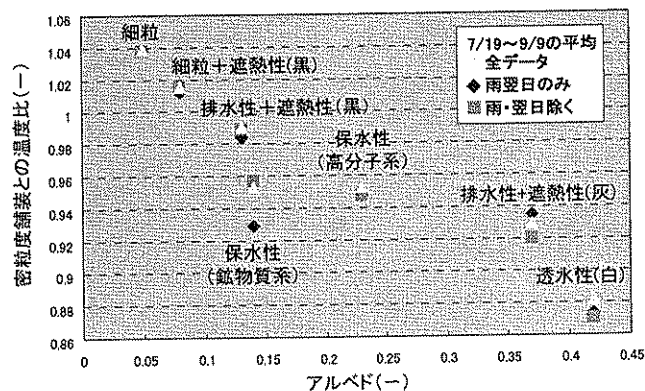


図-6 アルベドと温度比の関係

このグラフで示すように、路面温度低減効果が高かった透水性舗装(白色)のアルベドは最も高く、その他の舗装もアルベドが高くなるにつれ路面温度低減効果が高くなる傾向が見られた。又、鉱物質系は降雨後の路面温度は低くなるがアルベドの高い舗装の方が平均的な温度低減効果が高い傾向が見られた。

### 4. 舗装としての性能の検証

#### 4.1 舗装としての必須の性能

##### 1) 疲労破壊

各工区とも初期値から 55 万輪経過によるひび割れ率は 0% であり、疲労破壊はみられなかった。

##### 2) 塑性変形

図-7 は、55 万輪促進載荷試験後の横断凹凸量の推移を表したグラフである。

##### ① 車道透水性舗装

横断凹凸量は、路床上に遮水シートを設置した工区が一番大きくなり、次に路盤上に遮水シートを設置した工区となった。これによって、路床上や路盤上にシートを設置することにより耐久性が低くなることがわかった。今後遮水効果を考えた場合、シート以外の材料への改良が必要であると考えられる。

##### ② 保水性舗装

2 種類の保水性舗装は、排水性舗装に比べ横断凹凸量が若干低くなる傾向はみられたが、路面温度低減による大きな流動わだち抑制効果はあまりみられなかった。

15 万輪以後急激にわだち掘れが増大しているのは 15 万輪走行後に半年程度の休止期間があり、その後夏期の路面温度の高い時期に走行を行ったことが影響していると考えられる。

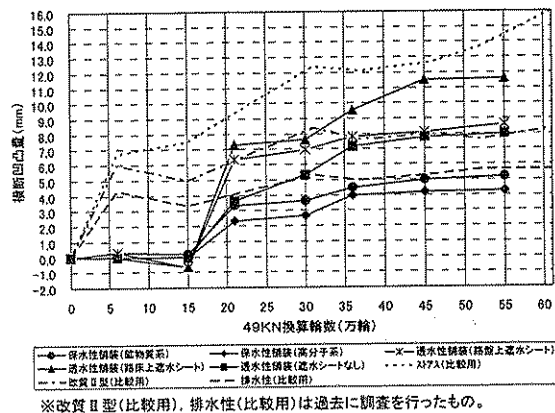


図-7 横断凹凸量の推移

### 3) 平坦性

図-8 は 55 万輪走行までの縦断凹凸量の推移を表したグラフである。各工区の延長が 20m と短いこともあるが縦断凹凸量の経緯にバラツキはあるものの初期値から 55 万輪経過による変化は微小といえる。

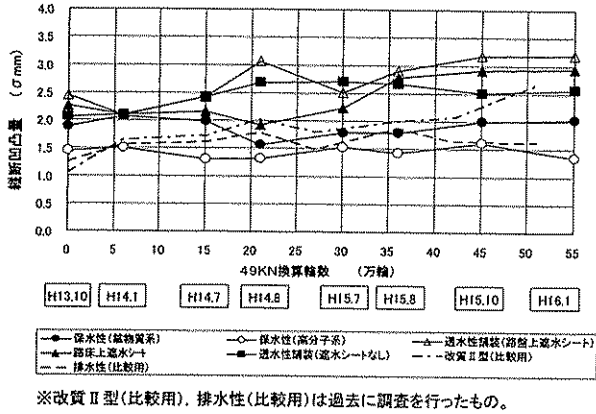


図-8 縦断凹凸量の推移

### 4.2 その他の性能

#### 1) すべり抵抗値

図-9~11 はDFテストによるすべり抵抗値の推移を表したグラフである。

保水性舗装は、15 万輪経過までは、表面の骨材を覆っていた保水性材料が剥奪し、さらに骨材が露出していくことで、すべり抵抗値が経過とともに大きくなる傾向にある。車道導水性舗装は、初期値から 6 万輪経過時では、荷重車走行により骨材の表面性状がすべり対して向上する傾向にある。その後 15 万輪経過に至るまでには、すべり抵抗性が低下しており、表面明色化コート材の摩耗が考えられる。

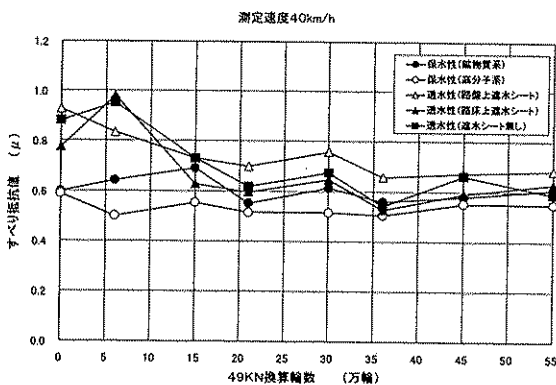


図-9 すべり抵抗測定結果 (40km/h)

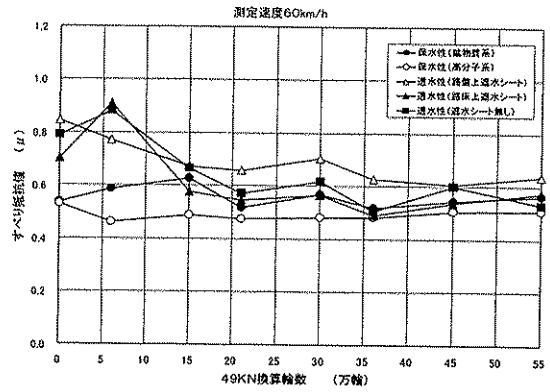


図-10 すべり抵抗測定結果 (60km/h)

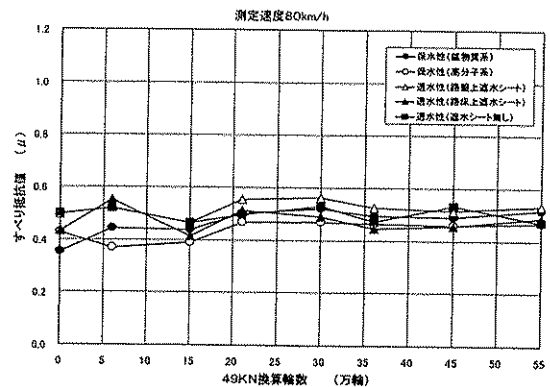


図-11 すべり抵抗測定結果 (80km/h)

#### 2) 現場透水試験

図-12 は車道透水性舗装の現場透水量の推移を表したグラフである。初期値から 55 万輪経過による透水量の変化はほとんどなく、透水量 1000ml/以上を保持し、良好な状態といえる。遮水シートの使用による差はほとんどみられない。

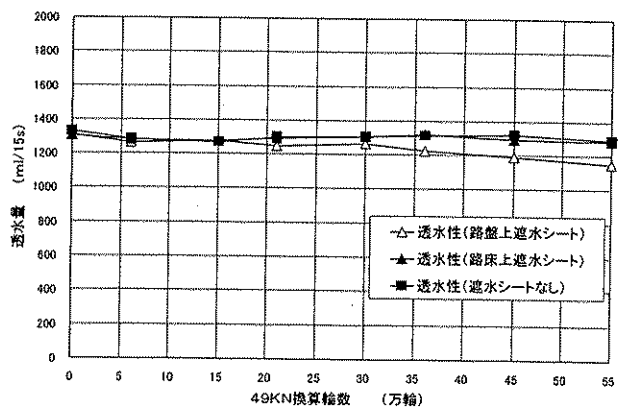


図-12 現場透水試験結果

### 3) 明度 (安全性)

図-13 は各種舗装の明度を表したグラフである。透水性舗装 (白色) の明度は最も高くコンクリート舗装の明度を大きく上まった。また、遮熱性舗装 (白色) も高いが、保水性舗装と同程度であった。

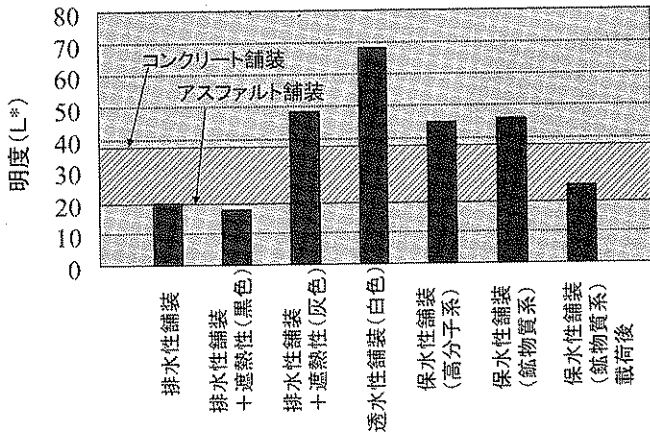


図-13 各種舗装の明度

これらより、透水性舗装で行った白色化はアルベドや明度が高く、実際の道路では眩惑などの影響や白線を引くことができないなど実用上の問題がある。今後、遮熱性舗装、明色舗装については明度と色調をさらに検討する必要があると考えられる。

### 4) 舗装材の種類による保水量

図-14 は各舗装供試体の保水量の変化を表した図である。鉱物質系の保水量は最も高く、高分子系に比べ、2倍程度の保水力が見られたが、共に1日目の日中に急激に保水量が減少してしまう傾向がみられた。また、高分子系の保水量は排水性混合物の保水量とあまり変わらない結果となった。

これらのことから保水性舗装の保水状態での効果は1日程度と考えられ、保水効果の持続性の改良が今後の課題であると考えられる。

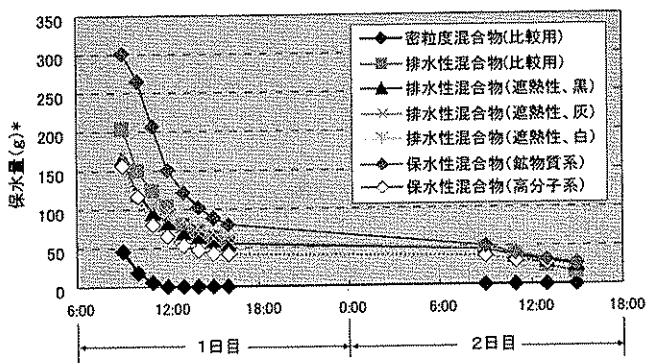


図-14 保水量の変化

### 5. 路面温度低減機能の評価方法の開発

#### 5.1 室内で路面温度低減効果を評価する方法の開発

##### 1) 室内試験方法

室内試験装置は図-15 に示すように、ランプを供試体表面の上空に垂直に設置し照射高さを変えられるものとした。

ランプは太陽光に近い波長特性を持つランプを使用した。路面温度は表面骨材内の温度とし、測定位置は表層表面中央の5cm四方の範囲内で骨材内に埋め込んだ熱電対にて測定を行った。試験条件については表-1 に示す。

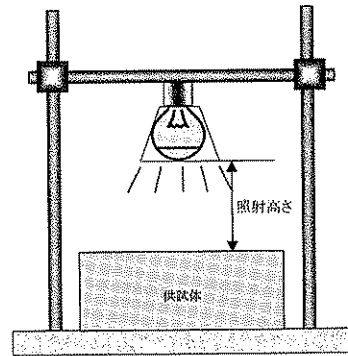


図-15 室内試験装置

表-1 試験条件

試験条件	備考
温度	30℃
湿度	70%
照射時間	8時間
測定間隔	10分

##### 2) 検討に用いた混合物とその構造

供試体の表層に使用した舗装材料を表-2 に示す。供試体の構造については図-16、17 の構造で試験施工を行った。

表-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	13mmTop遮熱性混合物(塗布型)
④ 遮熱性C	13mmTop遮熱性混合物(塗布型)
⑤ 遮熱性D	13mmTop遮熱性混合物(塗布型)
⑥ 明色性G	13mmTop明色性混合物(塗布型)

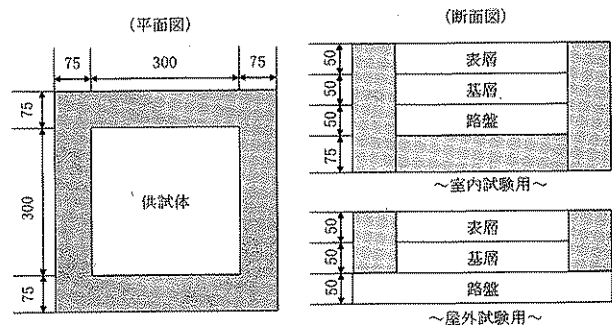


図-16 供試体構造 (30cm×30cm)

[単位mm]

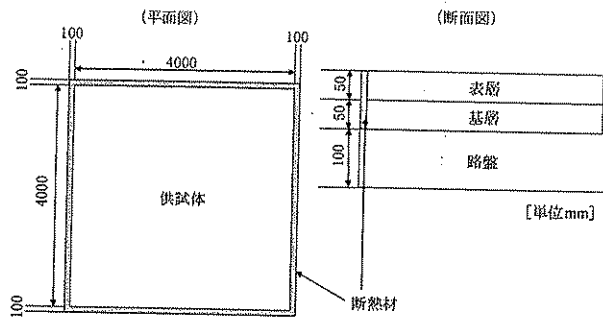


図-17 供試体構造 (4m×4m)

### 3) 供試体サイズの影響

供試体の構造が異なると熱容量が異なることから路面温度の傾向が変わると考えられる。そこで、実大供試体 (4m 角供試体) と 30cm 角供試体について路面温度の傾向の比較を行った。

日射による加熱がある場合には供試体のサイズの影響 (温度差) は小さく、その反対に日射が少ないときは 30cm 角供試体の放熱のしやすさの影響が大きくなり温度差が大きくなる結果となった。

日射の少ない場合には 30cm 角供試体で実大供試体の路面温度を示すことが出来ないことから 1 日の最高路面温度に着目して予測することとした。また、両サイズの最高路面温度に関して温度差を求めた結果、以下のような関係式を得た。

$$Y = 0.97 X \quad (\text{式-1})$$

ここで

Y : 4m 角供試体の最高路面温度 (°C)

X : 30cm 角供試体の最高路面温度 (°C)

### 4) 試験結果 (屋外および室内)

図-18 は平成 15 年の夏季に測定された排水性舗装の最高路面温度と各供試体の最高路面温度の関係を表したグラフである。

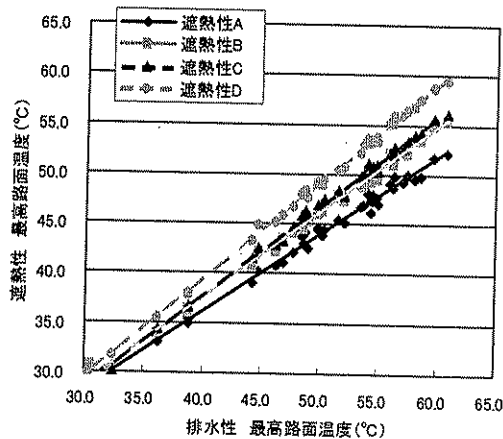


図-18 排水性舗装と各供試体の関係 (屋外：夏季)

各遮熱性舗装の結果から得られた回帰線を用いて排水性舗装が 60°C の時の路面温度を求めた結果を表-3 に示す。なお、明色性 G の路面温度 (\*) は夏季以外の結果から予測した値を用いた。

表-3 回帰式からの算出結果

	排水性:60°Cの時の路面温度(°C)	
	屋外	室内
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

図-19 は室内試験の結果である。室内試験の結果から得られ回帰線を用いて排水性舗装が 60°C の時の路面温度を求めた結果についても表-3 に示す。

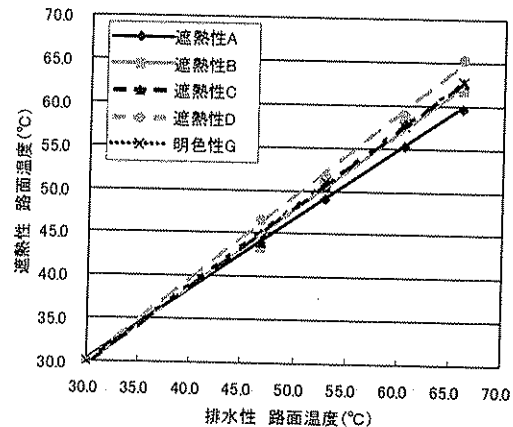


図-19 排水性舗装と各供試体の関係 (室内)

### 5) 予測式の導入

表-4、5 は表-3 の結果を用いて回帰分析を行った結果である。また、図-20 は室内試験結果と屋外試験結果の関係である。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される。回帰分析による予測値と実測値の差は最大で 1.1°C、適用範囲の 95% 信頼区間の最大幅は ±2.2°C 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°C) に対して小さく実用的な精度のある予測式と考えられる。

回帰分析で得られた予測式を以下に示す。

$$Y = 1.80X - 47.25 \quad (\text{式-2})$$

ここに、Y : 屋外路面温度 (排水性: 60°C 時)

X : 室内路面温度 (排水性: 60°C 時)

以上の結果から、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。

表-4 回帰分析結果

相関係数	寄与率	標準誤差	観測数	P値
0.973	0.947	0.191	5	0.005

表-5 実測値と予測値

	屋外	予測値	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

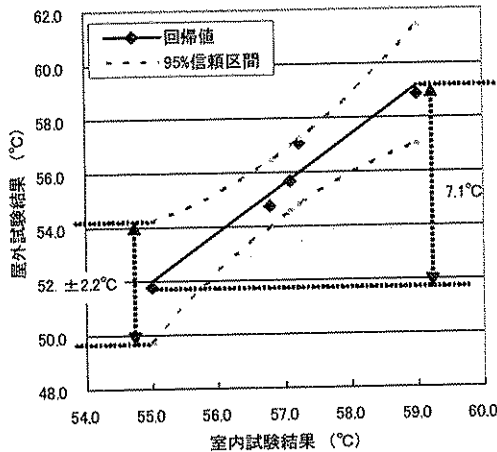


図-20 室内試験結果と屋外試験結果

## 5.2 実際の舗装路面温度低減効果を夏季以外に評価する方法の開発

### 1) 試験条件の検討

供試体のサイズは 4m×4m 供試体で行い、供試体の表層に用いた舗装材料を表-6 に示す。

表-6 表層に用いた舗装材料

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

図-21 は、屋外での試験を行うための気象条件を考慮するため、全測定日における快晴または晴れの日の関係を求めたものである。

その結果、遮熱性舗装と排水性舗装との関係は直線の相関が極めて高く、全測定点中で最も路面温度が低減する側に存在すると傾向がみられた。

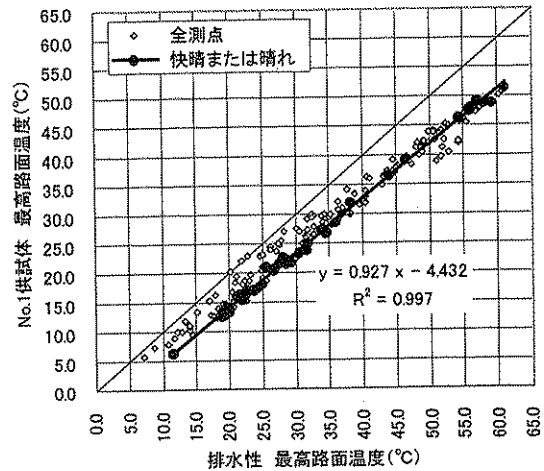


図-21 排水性舗装とNo.1 供試体との関係

この関係から夏季の路面温度を予測するのは容易であると考えられるが、これらの日は全測定日の19.0%しかなく、試験を実施できる可能性（以後、試験実施可能率）が低いため精度を確保しながら試験実施可能率を上げる試験条件の検討を行った。

遮熱性舗装の路面温度の上昇に与える影響は日射量が最も影響が大きいと考えられる。しかし、日射量のみを基準とした場合、季節による変化を考慮していないこと、また一般の気象観測所の項目に日射量はないことから気象観測所で得られる日射時間<sup>3)</sup>に着目し、さらに日々の昼の時間（理論値）に対する割合を判定条件として検討を行った。

上記の判定条件に対する回帰値の標準誤差、試験実施可能率を図-22 に示す。

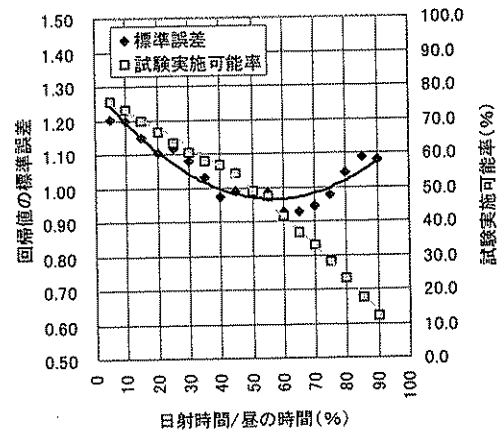


図-22 排水性舗装とNo.1 供試体との関係 (その1)

X 値が大きくなるほど試験実施可能率が低下する結果となった。一方、回帰値の標準誤差は X 値が上がるほど低下し回帰性が良くなると考えられたが 60%を超えると上昇する結果となった。この原因として風速の影響による可能性が考えられた。これまでの報告<sup>4)</sup>にも風速の影響についての記載があることから風速について分析を行った。

その結果、一日の平均風速が 3.3m/s 以下であれば標準誤差への影響が小さく、X 値が大きくなるほど標準誤差も低下する結果となった。(図-23)

また、日射時間の割合と風速の判定条件で得られた回帰式(図-24)は図-16の回帰式と同程度であること、実測値と回帰値の差もほぼ±1.0℃であること(図-25)、さらに試験実施可能率も 19.0%から 35.1%まで上昇することから、日射時間の割合と平均風速を試験条件とすることとした。

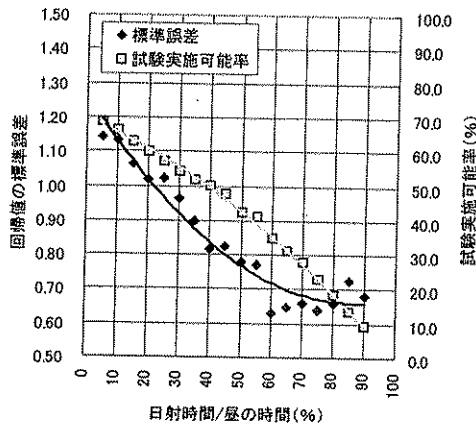


図-23 排水性舗装とNo.1 供試体との関係 (その2)

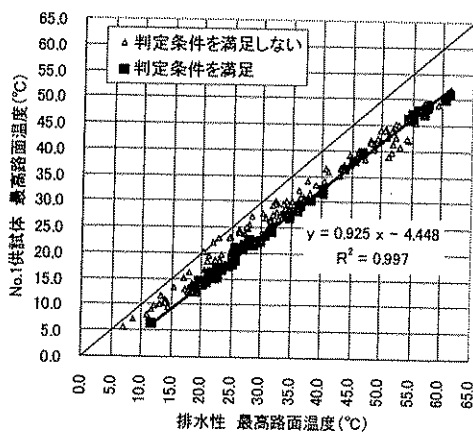


図-24 排水性舗装とNo.1 供試体との関係

## 2) 予測式の導入

前項の試験条件を用いて予測式の導入を行った。導入方法は室内の結果を夏季以外の排水性が 20℃の場合として回帰分析を行った。路面温度の算出結果を表-7に示す。表-8は回帰式からの算出結果、表-9は実測値と予測値を表したものである。

表-8、9の分析結果より、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される。回帰分析による実測値と予測値の差は最大で 1.6℃、図-25より 95%信頼区間の最大幅は±1.1℃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: 10.2℃)に対して小さく実用的な精度のある予測式と考えられる。

回帰分析で得られた予測式を以下に示す。

$$Y = 1.53X - 28.99 \quad (\text{式-3})$$

ここに、

Y : 夏季の屋外路面温度 (排水性 : 60℃)

X : 夏季以外の屋外路面温度 (排水性 : 20℃)

表-7 回帰式からの算出結果

相関係数	寄与率	標準誤差	観測数	P値
0.978	0.956	0.769	12	3.98E-08

表-8 回帰式からの算出結果

供試体 No.	夏季	夏季以外
	排水性が60℃の時の路面温度(℃)	排水性が20℃の時の路面温度(℃)
1	50.4	14.0
2	53.4	15.3
3	56.6	17.9
4	51.7	17.8
5	51.5	15.0
6	51.1	15.5
7	54.1	15.8
8	59.7	19.9
9	60.6	20.4
10	58.0	19.1
11	57.7	19.4
12	55.5	17.4

表-9 実測値と予測値

No.	屋外	予測値	残差	95%下限	95%上限
1	50.4	50.4	0.0	49.4	51.4
2	53.4	52.4	1.0	51.6	53.1
3	56.6	56.3	0.3	55.7	56.9
4	51.7	51.6	0.1	50.8	52.4
5	51.5	51.9	-0.4	51.1	52.7
6	51.1	52.7	-1.6	52.0	53.4
7	54.1	53.1	1.0	52.5	53.8
8	59.7	59.4	0.3	58.5	60.3
9	60.6	60.2	0.4	59.1	61.2
10	58.0	58.2	-0.2	57.4	58.9
11	57.7	58.6	-0.9	57.8	59.5
12	55.5	55.6	-0.1	55.0	56.1



さらに適用範囲の広い予測式を導くことができた。

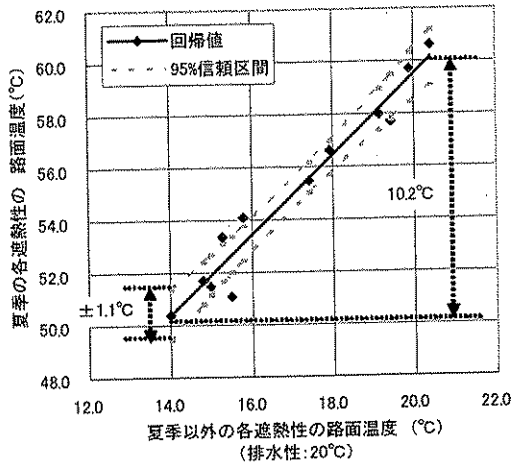


図-25 屋外試験と室内試験の関係

### 3) 予測式の適用範囲の拡大

2) では夏季以外の排水性の路面温度が 20℃の場合で予測式を導いた。しかし、夏季以外の路面温度は 20℃ばかりではなくあらゆる路面温度に対応する式を導く必要がある。

そこで、排水性の路面温度を 0℃から 60℃の範囲で 5℃毎の場合の回帰式を求めた。(表-10)

表-10 回帰式の算出結果

排水性 路面温度 ℃	回帰線				95%信頼区間 の最大幅 ±℃
	傾き a	切片 b	重相関 R2	標準誤差	
0	1.753	58.603	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

この結果から傾きと切片を排水性の路面温度から求める式を導いた。その結果を以下に示す。

$$Y = a X_2 + b \quad (\text{式-4})$$

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

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

ここで

Y : 排水性が 60℃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)

以上から測定条件を決定し夏季以外の屋外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き、

## 6. 環境改善効果の評価

### 6.1 温度低減と気温の関係の調査

図-26 は九州技術事務所構内に設置した試験施工状況である。

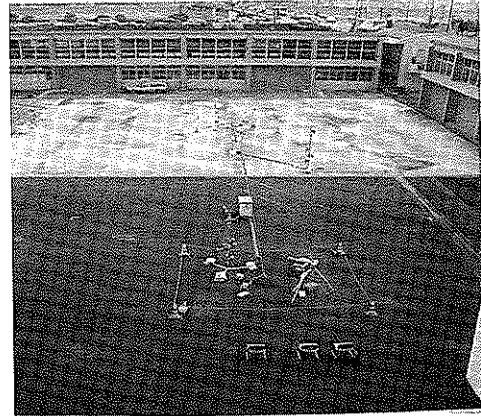


図-26 熱環境改善効果の実測調査状況

工区は、保水性舗装 (鉱物質系) と排水性舗装をそれぞれ 30m×30m の規模で施工し行った。測定は、保水性舗装、排水性舗装の中心に気象観測装置を設置し、日射量、日射反射量、放射収支量、蒸発量、湿球温度、乾球温度、黒球温度、気温、湿度、雨量、風向、風速を測定するとともに、施工時に舗装内に設置した熱電対により路面温度及び熱流板により熱流量を測定した。調査は、2002年9月17日～2002年10月16日までの1ヶ月間継続調査を行った。

#### 1) 路面温度の計測 (実大規模 : 九州, 土研)

図-27 は、九州技術事務所構内で施工された保水性舗装 (30m×30m) と排水性舗装 (30m×30m) の表面温度差 10℃以上が観測された日の温度測定結果を表したグラフである。排水性舗装の最高表面温度は 43～52℃、保水性舗装の最高表面温度は 33～41℃程度となり保水性舗装の路面温度低減効果が確認された。

図-28 は各日における舗装表面温度差 10℃以上が観測された時の放射収支量を平均値で表したものである。保水性舗装の放射収支量が排水性舗装に比べ 3～10%程度低くなる傾向がみられるが、散水を行った日については排水性舗装が 10%程度低くなった。これは散水により排水性舗装の放射収支量が小さくなったと考えられる。

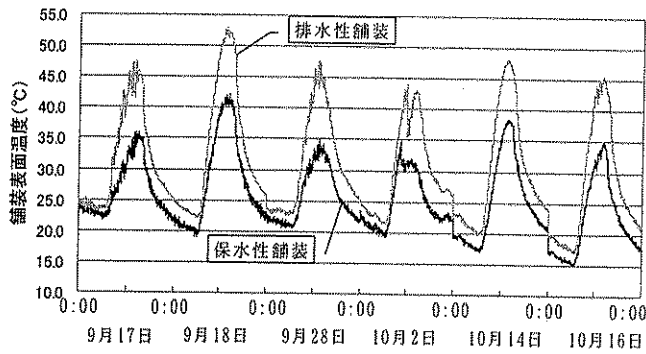


図-27 舗装表面温度測定結果

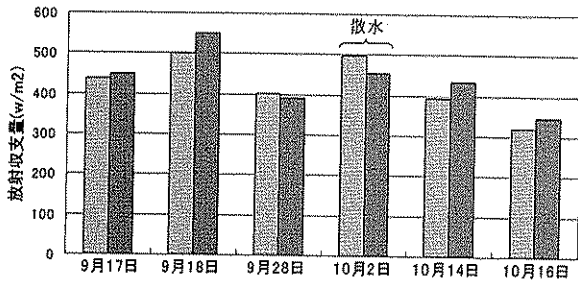


図-28 放射収支量測定結果

①気象観測測定結果

図-29 に平均気温差が最も大きくなった9月18日における舗装表面温度及びその路面上における気温差の変化を示す。

前日の午前3時まで合計154.5mmの降雨があり、排水性舗装の最高表面温度は52℃、保水性舗装の表面温度は41℃となり、11℃の低減効果が確認された。路面上1.0mの気温については、平均温度差1.1℃、最高温度差1.3℃、最低温度差0.7℃の結果となった。また、一日を通して1.0mの気温差が最も大きくなる傾向が見られた。

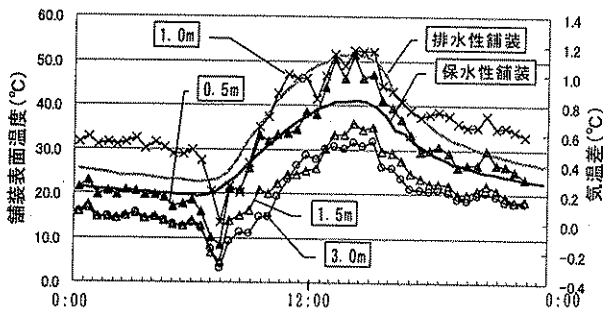


図-29 舗装表面温度と気温差 (9月18日)

図-30 に、路面温度差10℃以上が観測されたときの気温差、湿球黒球温度差、路面温度の平均値を日毎に示す。

各日とも路面上1.0mの気温差が最も高くなる傾向がみられ、気温差は、0.4℃～1.1℃程度となった。

また、1.5m、3.0mについては気温差が少なくなる傾向がみられた。

なお、10月2日の湿球黒球温度が極端に低いのは散水による影響と考えられる。

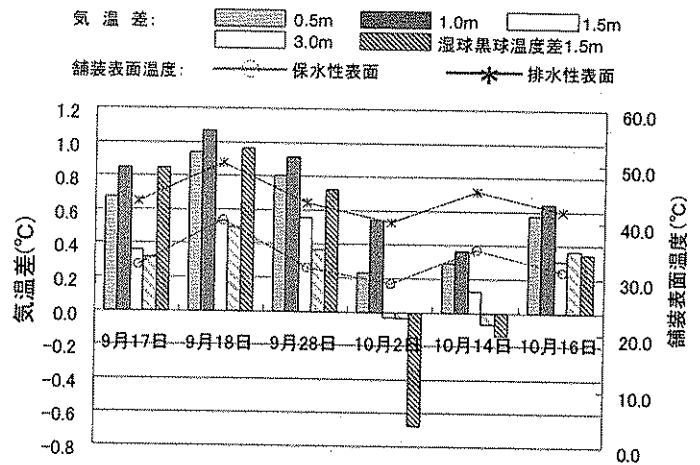


図-30 舗装表面温度と気温差

②平均値での検討

表-11 に、路面温度差10℃以上が観測された日の温度差が路面上0.5m、1.0m、1.5m、3.0mにおける気温、1.5mにおける湿球黒球温度、舗装表面温度の平均値を示す。なお、このときの平均的な風は、南南西～南東の風1～2m/s程度であり保水性舗装側から排水性舗装側へ吹く風であった。

保水性舗装上と排水性舗装上の気温差は、路面上0.5mで0.6℃、1.0mで0.8℃となっており気温低減効果がみられた。

また、人体の熱収支に係わる環境因子(気温、湿度、輻射熱、気流)のうち、特に影響の大きい湿度(湿球温度)、気温(乾球温度)、輻射熱(黒球温度)の3つを取り入れた指標である湿球黒球温度(WBGT)による検討も行った。路面上1.5mの高さにおける湿球温度、乾球温度、黒球温度から計算式( $WBGT = 0.7 \times \text{湿球温度} + 0.2 \times \text{黒球温度} + 0.1 \times \text{乾球温度}$ )により湿球黒球温度を算出し、湿球黒球温度差の平均値を算出した。平均値でみた場合、1.5mの高さで0.5℃の差があった。

表-11 表面温度差10℃以上の場合の気温及び気温差

	0.5m	1.0m	1.5m	3.0m	湿球黒球温度	舗装表面温度
保水性舗装 (°C)	26.4	26.0	26.3	26.1	23.1	33.4
排水性舗装 (°C)	27.0	26.8	26.6	26.4	23.6	44.2
温度差 (°C)	0.6	0.8	0.3	0.3	0.5	10.8

## 6.2 熱環境改善効果対象の考え方

図-31は熱環境改善効果の概念を表した図である。舗装の路面温度低減による熱環境改善効果の評価方法として気象観測装置による実測調査がある。実測調査は外的要因の少ないシンプルな空間での評価では可能であるが、都市や道路沿道では、自動車、建物などからの廃熱など、舗装以外から発生する複雑な熱的要因が混在する。このため、道路沿道での気象観測装置による実測調査は困難である。

そのため、熱環境の改善を評価する場合、シミュレーションによる解析方法が有効と考えられる。シミュレーションによる解析の得失として、複雑な外的要因は排除され、純粋に舗装の路面温度の影響を評価することが可能となる。しかし、解析された結果が実際と合っているかどうか確認するための検証の課題が残されている。

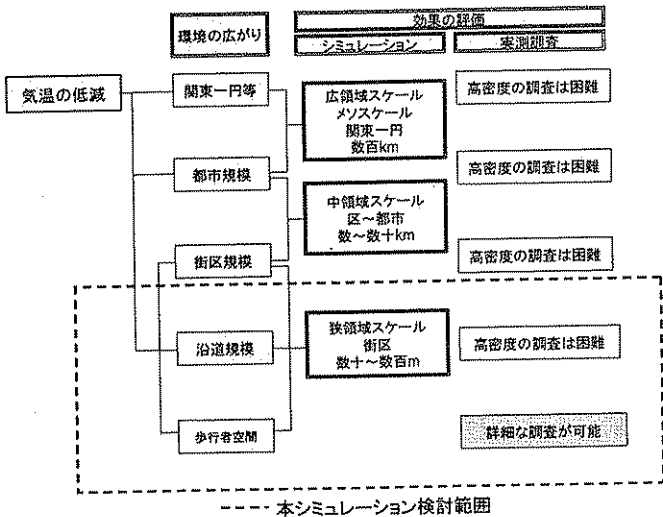


図-31 熱環境改善効果の概念図

## 6.3 街区レベルにおけるシミュレーション

### 1) シミュレーションによる算定

①梅干野らの開発した熱収支数値シミュレーション<sup>1) 2)</sup>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-12、13に解析に用いた物性値を示す。

表-12 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 <sup>3</sup> 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-13 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 <sup>3</sup> k)		$C_p = 4.190 \times \phi + 1.665$
含水比 $\phi$	気乾状態	0.010
	圃場容量時 <sup>*</sup>	0.100
備考	<sup>*</sup> 降雨もしくは洒水後、重力による水の下降が、ほとんどなくなった状態	

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。

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

$F_n$ :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、このシミュレーション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、基本となる道路空間モデル、基本モデルの歩道に街路樹を設置したケース、基本モデルの歩道及び中央分離帯に街路樹を設置したケースの設定を行い、それぞれのモデルについて密粒度舗装、保水性舗装(降雨直後の保水状態)、遮熱性舗装のケースについて解析を行った。

表-14に各モデルケースの詳細を示す。

### 3) 環境改善効果の評価(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-32の各点で算定した。

図-33は道より2.0m入った歩道上における高さ1.5mに

表-14 各シミュレーションモデルケース

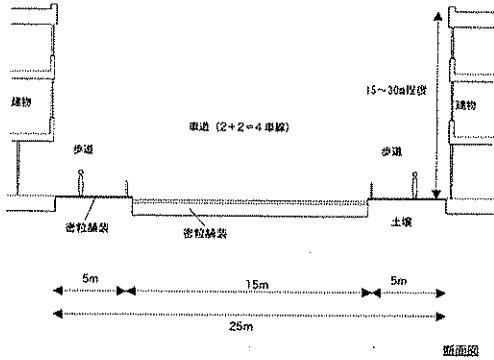
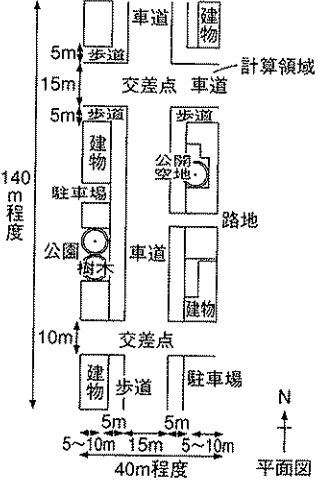
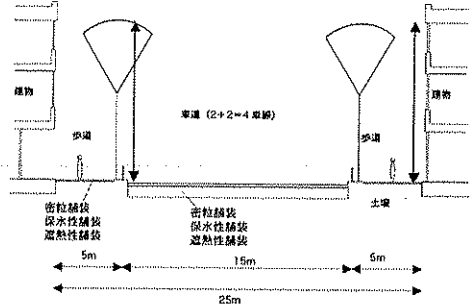
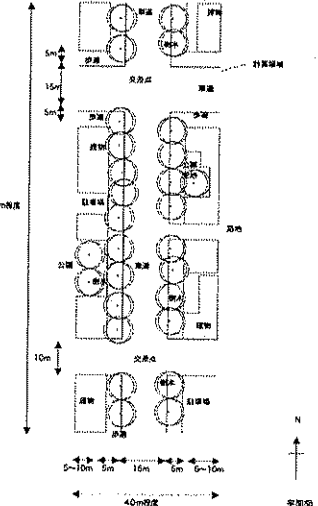
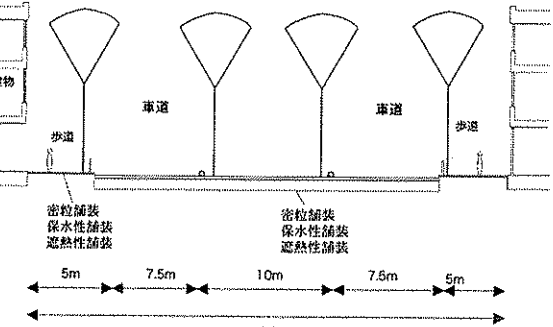
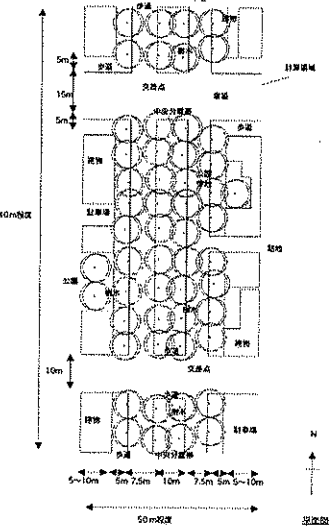
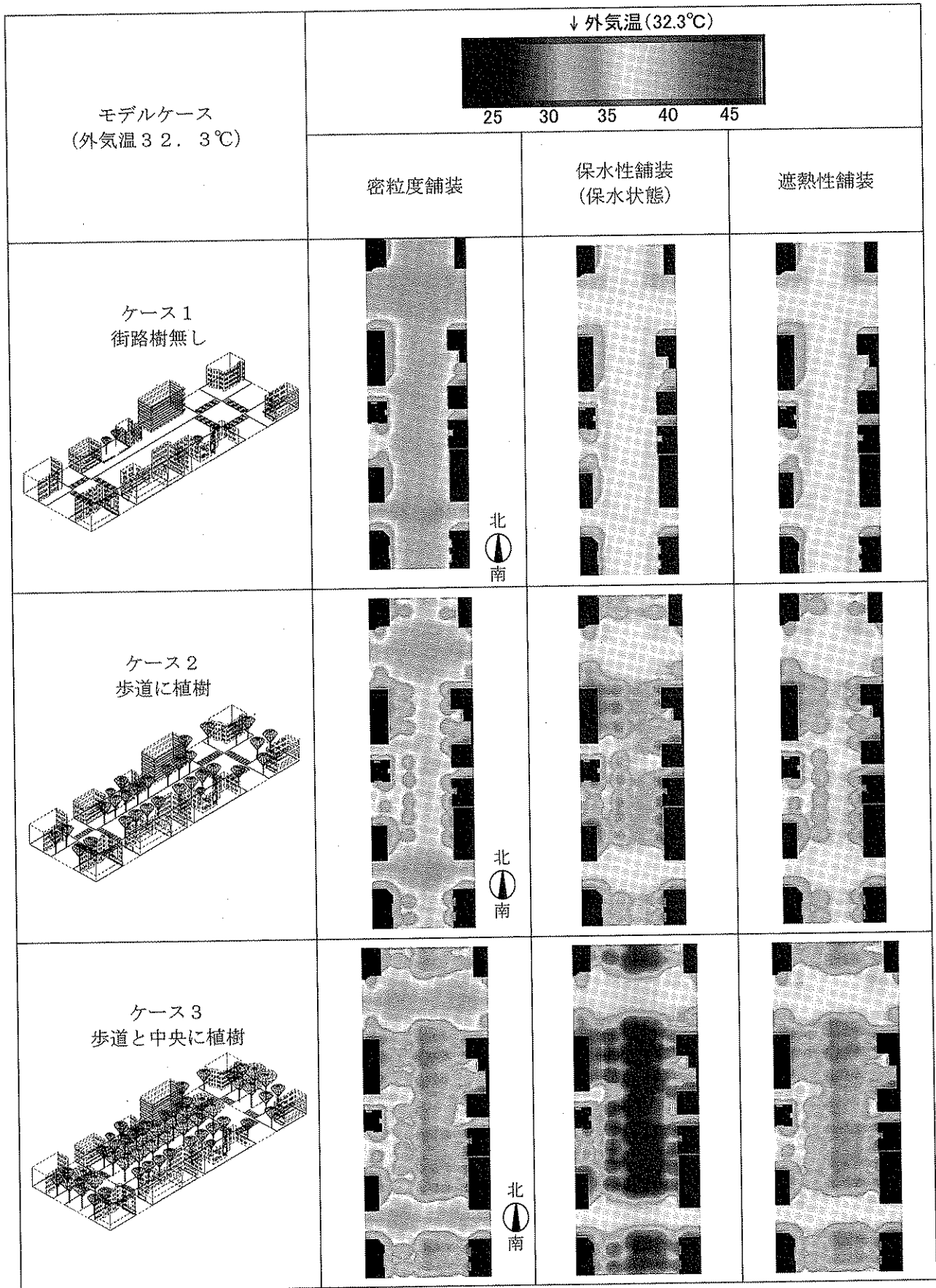
モデルケース 基本ケース	平面図・断面図	
<p>ケース1</p>	 <p>断面図</p>	 <p>平面図</p>
<p>歩道の上に街路樹を設置したケース</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・街路樹の高さは10m程度、</li> <li>・樹冠直径5~10m程度</li> <li>・日射透過率10%</li> <li>・街路樹を植えた周辺50cm程度は裸地とする。</li> </ul>  <p>断面図</p>	 <p>平面図</p>
<p>歩道及び中央分離帯に街路樹を設置したケース</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上記ケースに中央分離帯(植樹帯)を想定する場合の幅は10m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。</li> </ul>  <p>断面図</p>	 <p>平面図</p>

表-15 地上1.5m高さのMRT分布 (13:00)



おけるMRTの日平均変化の結果を表したグラフである。舗装材料を変更した場合には舗装種によってMRTが変化し、車道より2~3m程度まで放射熱環境改善の効果が及ぶ結果となった。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。

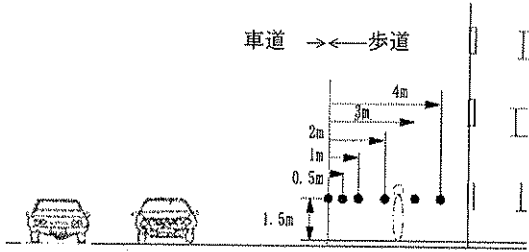


図-32 MRT 評価着目点

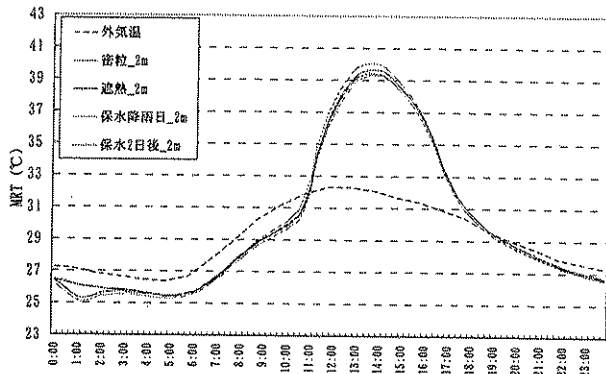


図-33 車道より 2.0m 入った歩道上における高さ 1.5m MRT 日平均の変化

表-15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 $\leq$ 遮熱性舗装 $<$ 密粒度舗装の順となっている。しかし、MRT $>$ 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車道のほとんどがMRT $<$ 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 $\leq$ 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MRT $<$ 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街路樹との組み合わせにより、単体で施工する場合よりも、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考えられる。

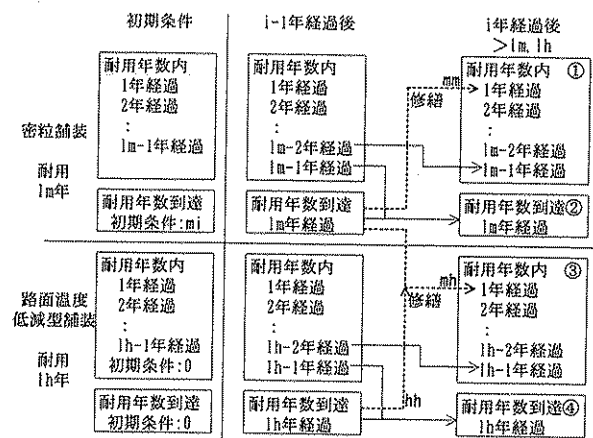
## 7. 事業の可能性の検討

### 7.1 試算の前提

東京 23 区の道路を全て路面温度低減型舗装として維持する場合について図-34 に示すフローに従い計算を行い、将来の普及率推移及び費用について検討を行った。

検討を行うにあたり、下記の2ケースを想定した。

- ①年間全道路面積の5%で修繕を行うケース  
(東京都の現状の修繕実態を踏まえたケース)
  - ②年間全道路面積の20%で修繕を行うケース  
(全道路面積を機能させるケース)
- ①②とも修繕面積に占める路面温度低減型舗装の割合として、10%, 50%, 100%のケースで検討を行った。



mi, mm, mh, hh: 全舗装面積に対する比率 (0~1)  
mm, mh: 一定値  
hh:  $i \leq 1h$  の期間は 0

i年後における各面積比率算定式	各取支項の積分期間
① = $mm * (1-m-i)$	...a $i > 1m$ で一定
② = $m$	...b $i = 0$
+ $(1-m-i) * (1-m-i) / (1-m-i)$	...c $i \leq i \leq 1m-1$
+ $mm * (i - (1-m-i))$	...d $1m \leq i$
- $mm * i$	...e $i \leq i$
- $mh * 1h$	...f $i \leq i \leq 1h$
- $(mh-hh) * (i-1h)$	...g $1h+1 \leq i$
③ = $mh * (1h-i)$	...h $i > 1h$ で一定
④ = 0	...i $i = 0$
+ $0 * (1h-1)$	...j $i \leq i \leq 1h-1$
+ $mh$	...k $i = 1h$
- $(mh-hh) * (i-1h)$	...l $1h+1 \leq i$

↑ 後頁の説明図参照

図-34 計算手法フロー

なお、計算は以下の条件による。

①仮定条件

・初期状態では路面温度低減型舗装は未設置とし、密粒度舗装が年間 5%及び 20%で施工されてきたものとする。

・舗装全面積 (114km<sup>2</sup>) は一定とする。

②設定条件

・密粒舗装の耐用年数は 10 年とする。  
 ・修繕は表層の切削オーバーレイとする。  
 ・路面温度低減型舗装の耐用(機能維持)年数は 5 年と仮定し、路面温度低減機能は毎年 1/5 ずつ効果が低下していくと仮定する。

・5 年以降については路面温度低減型舗装を 1/2、通常舗装を 1/2 修繕すると仮定する。

③工事単価

全て切削オーバーレイ工事費単価とし、単価は以下による。(切削廃材の処分費を含む)

- ・密粒度舗装 (ストアス) : 2,400 円/m<sup>2</sup>
- ・排水性舗装 : 4,100 円/m<sup>2</sup>
- ・保水性舗装 : 8,600 円/m<sup>2</sup>
- ・遮熱性舗装 : 11,400 円/m<sup>2</sup>

7.2 試算結果

1) 必要な事業量

①年間全道路面積の 5%で修繕を行うケース  
 (東京都の現状の修繕実態を踏まえたケース)

図-35 は路面温度低減型舗装と従来型舗装について舗装設置面積率の推移を表したグラフである。修繕面積率 5%に対して路面温度低減型舗装率が 100%行った場合、35 年後に設置面積率が 100%となる。

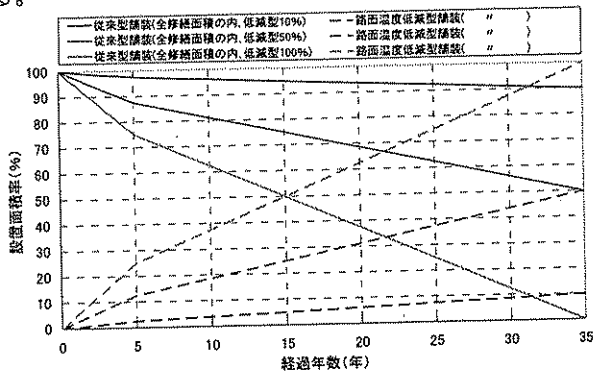


図-35 各舗装設置面積率の推移

図-36 は路面温度低減型舗装の耐用年数内の面積率を表したグラフである。修繕面積率 5%に対して路面温度低減型舗装率が 100%に達した場合でも、経年とともに多くの舗装では機能が低下しており、路面温度低減効果が毎年 1/5 ずつ低減したと仮定した場合、効果が期待できるのは全道路面積の 12%で

ある。

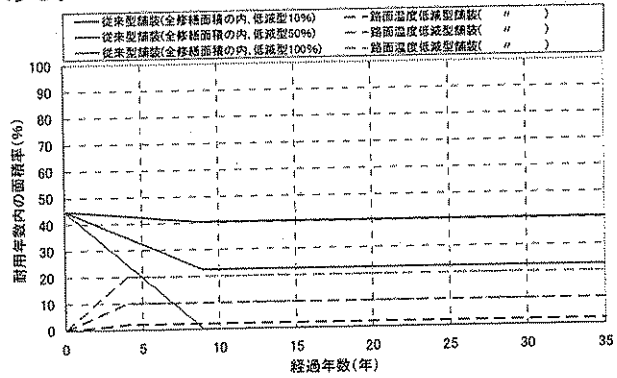


図-36 各舗装耐用年数内面積率の推移

②年間全道路面積の 20%で修繕を行うケース  
 (全道路面積を機能させるケース)

図-37 は路面温度低減型舗装と従来型舗装について舗装設置面積率の推移を表したグラフである。修繕面積率 20%に対して路面温度低減型舗装率が 100%行った場合、5 年後に設置面積率が 100%となる。

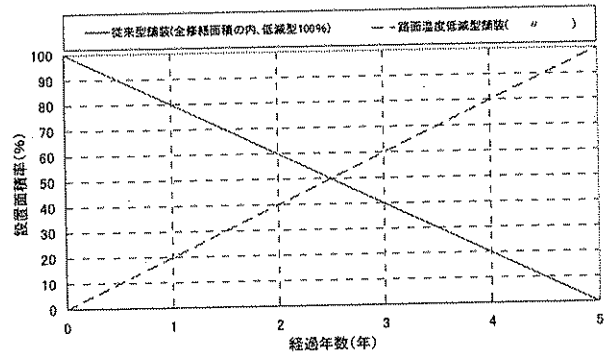


図-37 各舗装設置面積率の推移

図-38 は路面温度低減型舗装の耐用年数内の面積率を表したグラフである。修繕面積率 20%に対して路面温度低減型舗装率が 100%に達した場合でも、経年とともに多くの舗装では機能が低下しており、路面温度低減効果が毎年 1/5 ずつ低減したと仮定した場合、効果が期待できるのは全道路面積の 60%である。

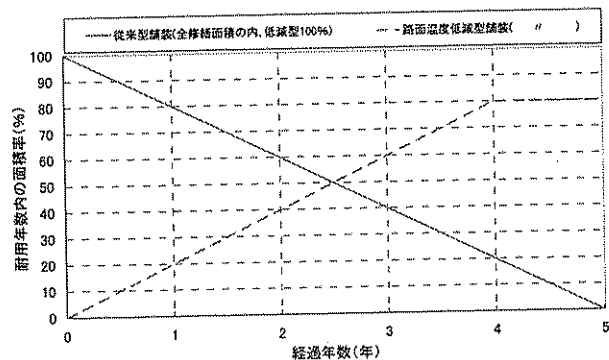


図-38 各舗装耐用年数内面積率の推移

## 2) 実態に照らしたフィジビリティ

修繕面積に占める路面温度低減型舗装の割合として、ケース別に年間の修繕費用を検討した結果を表-16に示す。

全道路面積について路面温度低減機能を維持させるため20%/年で修繕を行った場合、遮熱性舗装で2599.2億円/年、保水性舗装で1960.8億円/年の費用となる。参考として、平成16年度の東京都の路面補修事業費は約164億円である。

表-16 各ケースにおける修繕費用

ケース	路面温度低減型舗装	割合(%)	従来型舗装	割合(%)	修繕費用(億円/年)	
5%/年で修繕を行った場合	ケース1	遮熱性舗装	100	-	0	649.80
	ケース2	保水性舗装	100	-	0	490.20
	ケース3	遮熱性舗装	50	排水性舗装	50	441.75
	ケース4			密粒度舗装	50	393.30
	ケース5	保水性舗装	50	排水性舗装	50	361.95
	ケース6			密粒度舗装	50	313.50
	ケース7	遮熱性舗装	10	排水性舗装	90	275.31
	ケース8			密粒度舗装	90	188.10
	ケース9	保水性舗装	10	排水性舗装	90	259.35
	ケース10			密粒度舗装	90	172.14
20%/年で修繕を行った場合	ケース11	遮熱性舗装	100	-	0	2,599.20
	ケース12	保水性舗装	100	-	0	1,960.80

以上の点から温暖化抑制、ヒートアイランド現象緩和等の広域環境を対象とするよりも、歩行者の熱環境改善といった局所的な効果を対象とし、対策を行っていくことが現実的であると考えられる。

## 8. まとめ

- 1) 遮熱性舗装、保水性舗装、明色化舗装は路面温度低減効果が認められた。また、保水性舗装の舗装本来の耐久性は確認された。しかし、遮熱性舗装、保水性舗装、明色化舗装の路面温度低減性能の耐久性については把握されていない。なお、遮熱性舗装、明色化舗装の明度と色調については今後の検討課題である。
- 2) 車両の走行により温度低減型舗装の効果は徐々に低下していく。今後は、効果がより高い材料の検討や効果の持続性の高い材料の検討により、さらなる機能向上が期待できる。
- 3) 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。また、測定条件を決定し夏季以外の屋外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き、さらに適用範囲の広い予測式を導くことができた。
- 4) 保水性舗装の表面温度が、排水性舗装の表面温

度より10℃程度低くなった場合、900m<sup>2</sup>の試験施工では、1mの高さにおいて1℃程度の気温低減効果が確認された。シミュレーションにより、保水性舗装と街路樹による対策の効果の有効性が算出された。

- 5) シミュレーションにより、路面温度低減型舗装は街路樹との組み合わせにより、単体で施工する場合よりも、効果的になると算出された。
- 6) シミュレーションにより、舗装材料を変更した場合は舗装種によって熱環境が変化し、車道より2~3m程度まで舗装種による差異が表れると算出された。
- 7) 東京23区の道路舗装面積約114km<sup>2</sup>に対して、5%/年で舗装修繕を行い、全てを路面温度低減型舗装とした場合、設置面積率が100%となる35年後に効果が期待される面積は12%程度という試算結果となった。また、全道路面積を機能させるケースとして、20%/年で舗装修繕を行った場合、設置面積率が100%となる5年後に効果が期待される面積は60%程度という試算結果となった。
- 8) 路面温度低減型舗装の適用として、温暖化抑制、ヒートアイランド現象緩和等の広域環境を対象とするよりも、歩行者の熱環境改善といった局所的な効果を対象とし、対策を行っていくことが現実的であると考えられる。

## 【参考文献】

- 1) 「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、梅干野晃、浅輪貴史、高田真人、円井基史
- 2) 「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、山村真司、梅干野晃、浅輪貴史
- 3) 気象庁観測データ 平成16年
- 4) 福田萬大、浅枝隆、藤野毅：気象観測データを用いた舗装表面放出熱量の推定に関する研究、土木学会舗装工学論文集、第4巻、pp165-172、1999