

# 論文 歩道舗装における夏季温度特性の改善に関する検討

代田 哲朗\*<sup>1</sup>・上野 敦\*<sup>2</sup>・大野 健太郎\*<sup>3</sup>・宇治 公隆\*<sup>4</sup>

**要旨:** 本検討は、歩道ブロックの夏季温度特性を改善することを目的として、ブロックの表面積が温度特性に与える影響について検討したものである。ブロック表面にスリットを施すことで表面積を変化させたセメントコンクリートブロックで2種類の室内照射試験を行い、ブロック内部の昇温、降温時の温度挙動およびエネルギーの挙動を検討した。この結果、表面積の増加に伴い放熱効率が向上すること、放熱に効果的なスリットの条件が明らかとなった。

**キーワード:** 歩道ブロック, 表面積, 温度特性, エネルギー特性

## 1. はじめに

我が国の過密都市においては、夏季日中の気温上昇と夜間の気温低下の鈍化が問題となっている。様々な分野でこの現象の対策が検討されているが、舗装材料の分野においては、高反射性塗料の塗布や保水性舗装などの対策がなされている。現在では遮熱性車道舗装が実際に施工されている一方で、遮熱性歩道ブロックは製品開発が行われているものの、その性能に関しては検討段階にあり、温度低減効果の明確化が望まれている。歩道舗装は、車道に比較して、過密都市部での舗装面積としては小さいが、人体との距離が近い舗装である。そのため、人間の生活環境という面で、影響が大きい舗装であるとも言える。

このようなことから、これまで、塗料の種類、透水性、表面形状の3点に着目し、歩道用舗装ブロックを曝露し、各舗装材料の温度変化の挙動について検討してきた<sup>1)2)</sup>。この結果、遮熱性塗料を塗布したブロックは通常のものよりも最高温度が低くなること、透水性ブロックは非透水性のものよりも降雨時の降温速度が速いことが明らかとなった。また、昇温および降温時の温度挙動を、蓄積または放出されるエネルギーに着目して定量的に表す手法を示した。

本研究では、歩道舗装材料の夏季の温度特性改善を目的として検討を行った。特に、歩道ブロックの表面積が降温速度に及ぼす影響に着目し、表面形状の異なるブロックを対象に室内照射試験を行った。検討は大別すると2つのシリーズに分けられる。はじめに、歩道ブロックの上面から気相への熱移動を対象とした検討を行った。次に、歩道ブロック裏面から接触している砂層への熱移動を対象とした検討を行った。なお、砂層への熱移動を効率とすることは、舗装表面に入力された日射による

エネルギーを、土中に伝達することで、人体に対する悪影響を軽減できると考えたため、検討に加えた。

## 2. 気中放熱室内照射試験

### 2.1 試験概要

#### (1) 表面積と移動熱量の関係

舗装材料表面から舗装材料に接する空気へと移動する熱量は、式(1)で表される。

$$Q = h \times A(T_w - T_a) \quad (1)$$

ここに、 $Q$ : 移動熱量(W),  $h$ : 熱伝達率(W/(m<sup>2</sup>・K)),  $A$ : 伝達面積(m<sup>2</sup>),  $T_w$ : 物体(舗装材料)の表面温度(K),  $T_a$ : 媒体(空気)温度(K)

式(1)から、舗装材料の表面積 $A$ を大きくすると、移動熱量 $Q$ も比例的に大きくなるのがわかる。すなわち、舗装材料の熱移動速度が速く、冷めやすい舗装材料となると考えられる。一方で、日射による入力エネルギーは投影面積に依存すると考えられ、表面積の増加の影響は受けないと考えられる。以上から、舗装材料の表面積が増加した場合、通常の舗装材料と最高温度が同等でも降温速度が速くなると考えられる。そこで、本試験では表面積の異なるブロックを対象に室内照射試験を行い、温度挙動に及ぼす上面の表面積の影響を検討した。

#### (2) 使用供試体

ブロックと気層が接する面積を増加させるため、ブロック表面にスリットを設けることで、ブロックの巨視的な表面形状と表面積を変化させた。使用したブロックは300×300×60mmとし、スリット幅は3mmとした。スリットの本数は5, 15, 25本の3水準、スリット深さを10, 20, 30mmの3水準とした。これら9ケースに比較用の通常のブロックを加えた10種類について試験を行った。本検討ではブロックにスリットを設置するため、表-1の

\*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (学生会員)

\*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域助教 博士(工学) (正会員)

\*4 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域教授 博士(工学) (正会員)

表-1 モルタルの配合

水セメント比 W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )		
	水 W	セメント C	細骨材 S
50	255	510	1532

表-2 使用供試体

ブロック 名称	スリット			表面積 (mm <sup>2</sup> )	質量 (kg)	1枚当たりの 熱容量 (kJ/K・枚)
	本数 (本)	深さ (mm)	幅 (mm)			
0-0	0	0	3	90000	12.5	13.2
5-10	5	10		120000	12.4	13
5-20	5	20		150000	12.3	12.9
5-30	5	30		180000	12.2	12.8
15-10	15	10		180000	12.2	12.8
15-20	15	20		270000	11.9	12.5
15-30	15	30		360000	11.6	12.2
25-10	25	10		240000	12	12.6
25-20	25	20		390000	11.5	12.1
25-30	25	30		540000	11	11.5

配合でモルタルブロックを作製した。セメントには密度 3.16g/cm<sup>3</sup> の普通ポルトランドセメントを、細骨材には密度 2.63 g/cm<sup>3</sup> の砂岩砕砂を用いた。

舗装材料が夜間に周辺空気を温めるのは、日中にエネルギーを蓄えた舗装材料が、夜間に空気へとエネルギーを放出するためと考えられる。このため、周辺環境の改善のためには、舗装材料の温度変化だけでなく、舗装材料に蓄積されるエネルギーを少なくすることが重要であるとされる。特に、本研究で使用したブロックはスリットの本数および深さによってかさ密度が異なるため、単位体積基準の熱容量も異なっている。このため、温度変化量が同じであっても蓄積エネルギーは異なると考えられ、温度特性を比較する際には、かさ密度の違いを考慮する必要がある。そこで、ブロック1枚あたりの熱容量を用いて、ブロックの温度変化をエネルギー変化量に換算して比較することとした。ブロックの蓄積エネルギーは、ブロックの温度とブロック1枚当たりの熱容量の積により計算した。ブロック1枚当たりの熱容量は、コンクリート標準示方書設計編において、単位重量比熱の特性値として与えられる 1.05kJ/kg・K と、ブロックの体積から算出した。ブロックの名称は「スリット本数-スリット深さ(mm)」とし、各ブロックに設けたスリットの本数、深さ、幅および表面積、質量、単位体積基準の熱容量は表-2に示すとおりとなっている。

### (3) 試験方法

降温時の周辺空気の温度を一定とするため、実験は室温 20℃、湿度 60%R.H.の恒温恒湿室にて実施した。ブロックは、7日間の水中養生の後、2週間程度恒温恒湿室で保管したものを使用した。光源には 110V-270W の散光型赤外線ランプを使用した。図-1のように、ブロックはス

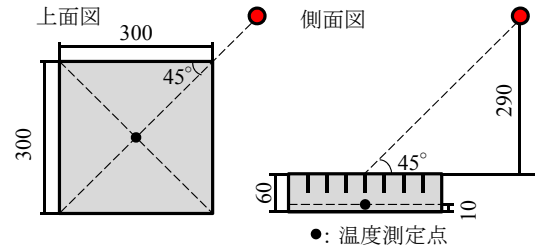


図-1 光源とブロックの位置関係および温度測定点

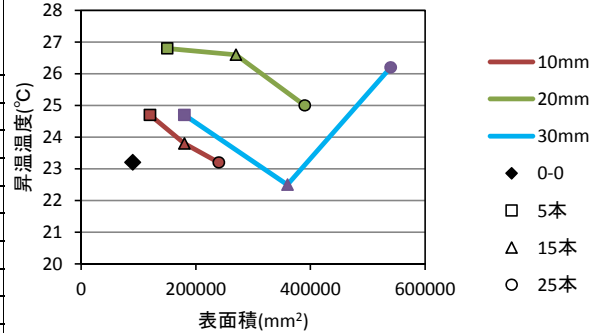


図-2 昇温温度と表面積

リット側を上面にして設置し、光源をブロック中央に対して光軸方向に斜め 45°、高さ 290mm となるよう設置した。また、ブロック上面以外からの熱の移動を制限するため、スチレンフォーム材によりブロックの周囲を断熱した。照射時間は4時間とし、降温はブロックの温度が室温程度となるまで行った。昇温時には、ブロックの昇温を促すためにビニル製の囲いの中でランプを照射し、降温時にはランプを消灯するとともに囲いを撤去した。温度はT熱電対を使用して1分おきに測定した。室温を測定するとともに、ブロックの温度を底面から深さ 10mm で測定を行い、ブロックの温度の代表値として、相対比較することとした。

## 2.2 試験結果

### (1) 昇温時の温度と蓄積エネルギーの変化

ブロック上面の表面積と昇温温度の関係は、図-2のとおりである。スリット深さ 10mm および 20mm において、スリット本数が増加して表面積が大きくなると、昇温温度が低くなることからわかる。これは、スリット本数が多いものは昇温時にも空気中に放熱していることによると考えられる。スリット深さ 30mm の場合で傾向が異なることについては、原因が不明であるが、スリットが深いため、媒体空気との熱交換の機構が異なるためと推察される。各ブロックに蓄積されたエネルギーと表面積の関係は図-3のようになる。スリット深さ 10mm および 20mm において、スリットの本数が増加して表面積が大きくなると、蓄積エネルギーが減少することがわかる。また、スリットの本数が同じ場合には、スリット深さ 20mm のブロックの蓄積エネルギーが最も高いことがわかる。すなわち、投影面積に依存するエネルギー入力だけではなく、ブロックの表面積による媒体との熱交換の

影響を考慮する必要があると考えられる。

(2) 降温時の温度変化と降温時間

ブロックの最高温度を基準とした降温初期の2時間における降温温度と表面積の関係を図-4に示す。降温初期の降温温度は、表面積増加にともない高くなっていることがわかる。また、ブロックの表面と気層の温度差の影響を除外するために、ブロックの温度が44℃から34℃までの10℃降温するために要した時間を図-5に、ブロックの温度が44℃のときの蓄積エネルギーから、ブロック1枚当たり50kJ放出するために要した時間を図-6に示す。一般に、スリット本数が増加すると、降温およびエネルギーの放出に要する時間が短くなることわかる。これらは、スリット本数増加により、ブロックの表面積も大きくなり、ブロックからの移動熱量も増加したものと考えられる。また、スリット深さで比較するために、図-5のスリット本数15本および25本の降温時間に注目すると、スリット深さ10mmと20mmの降温時間の差の方が、深さ20mmと30mmの降温時間の差よりも大きいことがわかる。これは、今回の検討で使用したスリットの幅が狭く、スリット内で空気の移動が起きにくくなり、スリットの深い部分では常に温度が高い状態にあったためと考えられる。これらのことから、舗装版表面のスリット深さを大きくすることは、表面積増加の観点からは舗装版の降温速度を速くすると考えられるが、同時に放熱に有効なスリット深さがあることも考えられる。

3. 地中放熱を模擬した室内照射試験

3.1 試験概要

(1) 舗装版の熱収支

舗装版の熱収支は、図-7および式(2)で表される<sup>3)</sup>。

$$Rn = G + H + \Delta S + iE \quad (2)$$

ここに、 $Rn$ : 正味放射量,  $G$ : 伝導熱流束,  $H$ : 顕熱輸送量,  $\Delta S$ : 蓄熱増分,  $iE$ : 潜熱輸送量

式(2)から、舗装版周辺の空気を温める顕熱輸送量  $H$  を減少させるためには、正味放射量  $Rn$  の減少、伝導熱流束  $G$ 、蓄熱増分  $\Delta S$  および潜熱輸送量  $iE$  の増加が考えられる。 $Rn$  の減少は高反射性塗料を利用することで可能であると考えられ<sup>1)2)</sup>、また、 $iE$  の増加も透水性舗装や保水性舗装を利用することで可能であると考えられる<sup>3)</sup>。このような対策が考案されている一方で、 $G$  および  $\Delta S$  の増加に関しては検討されていない現状にある。そこで、 $G$  に着目し、舗装版裏面の表面形状が、裏面での移動熱量に与える影響を検討することとした。室内照射試験によりブロックを加熱するとともに、ブロックの下部に設置した敷砂内部の温度を計測することで、ブロック裏面からの移動熱量を比較した。

(2) 使用供試体

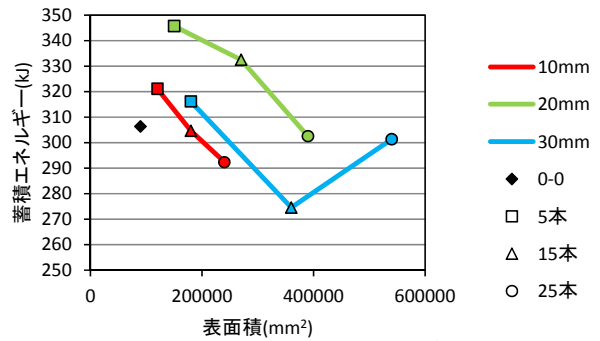


図-3 表面積と蓄積エネルギー

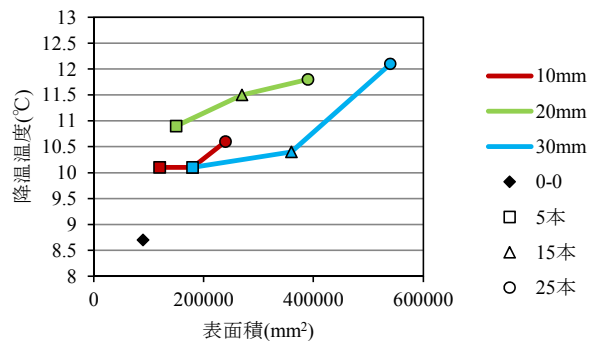


図-4 表面積と降温温度

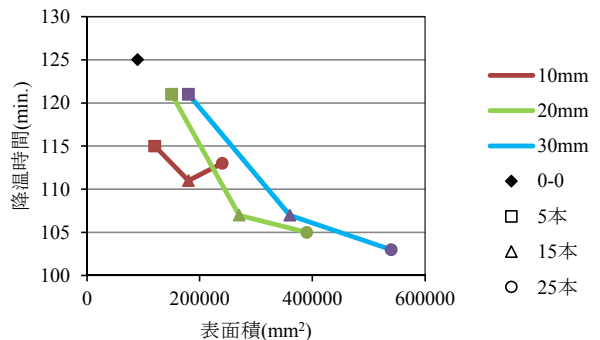


図-5 表面積と10℃降温に要する時間

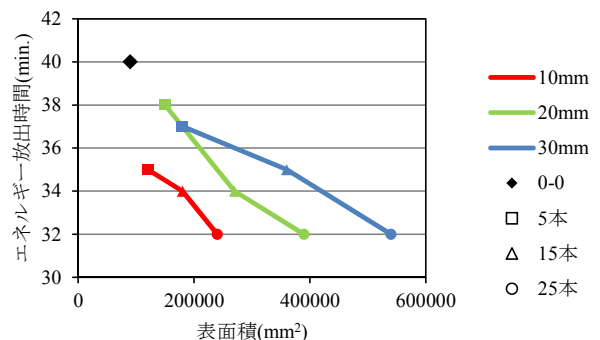


図-6 表面積と50kJ放出に要する時間

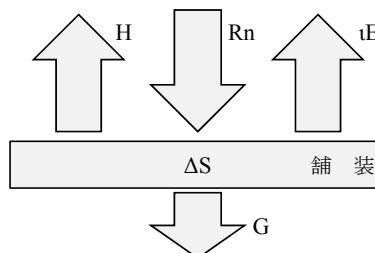


図-7 舗装版熱収支の概念図

表-3 使用供試体

名称	スリット		体積 (mm <sup>3</sup> )	表面積 (mm <sup>2</sup> )	質量 (kg)	1枚当たりの 熱容量 (kJ/K・枚)
	幅 (mm)	本数 (本)				
60-4	60	4	3240000	183600	7.5	7.9
60-3	60	3	3780000	169200	8.8	9.2
60-2	60	2	4320000	154800	10.0	10.5
60-1	60	1	4860000	140400	11.3	11.8
80-3	80	3	3240000	165600	7.5	7.9
80-2	80	2	3960000	152400	9.2	9.6
80-1	80	1	4680000	139200	10.9	11.4
90-2	90	2	3780000	151200	8.8	9.2
90-1	90	1	4590000	138600	10.6	11.2
120-2	120	2	3240000	147600	7.5	7.9
120-1	120	1	4320000	136800	10.0	10.5
3-5	3	5	5265000	197100	12.2	12.8
0-0	0	0	5400000	126000	12.5	13.2

表-4 実積率試験の容器寸法

φ (mm)	h (mm)	L (mm <sup>3</sup> )
3	500	3533
60	80	226080
80	100	502400
90	110	699435
120	150	1695600

本試験では、スリット深さを 30mm の一定とし、スリットの本数と幅を変化させることで、表面積が温度変化に与える影響と、放熱に有効なスリット幅について検討を行った。ブロックの寸法は 300×300×60mm とし、スリット幅は 60, 80, 90, 120mm の 4 水準、スリット本数は 1~4 本とした。また、これらに加えて、気中放熱室内照射試験で使用したスリット幅 3mm、スリット本数 5 本のブロックとスリットを設けていないブロックを使用した。各ブロックの略称は、「スリット幅(mm)-スリット本数」とした。各ブロックの埋設時に敷砂に接する表面積、質量および熱容量は表-3 のようになる。また、配合および使用材料は気中放熱室内照射試験と同じである。

### (3) 試験方法

試験は、周囲の温度を一定とするため、室温 20℃、湿度 60%R.H.の恒温恒湿室で実施した。ブロックは、7 日間の水中養生の後、恒温恒湿室に 2 週間程度保管したものを使用し、光源には前述の赤外線ランプを使用した。敷砂には、絶乾炉にて絶乾にした後、恒温恒湿室で保管した、図-8 のような粒度分布を持つ 6 号珪砂を、約 0.14m<sup>3</sup> 使用した。敷砂をプラスチック製容器に入れた上に、ブロックを深さ 30mm まで埋設するとともに、敷砂上部およびブロックの側面をスチレンフォーム材で断熱した。また、放熱時には、ブロック側面に加えてブロック上面にもスチレンフォーム材を設置して断熱した。図-9 のように、ブロックはスリット側を下面にして設置し、光源をブロック中央に対して光軸方向に斜め 45°、高さ

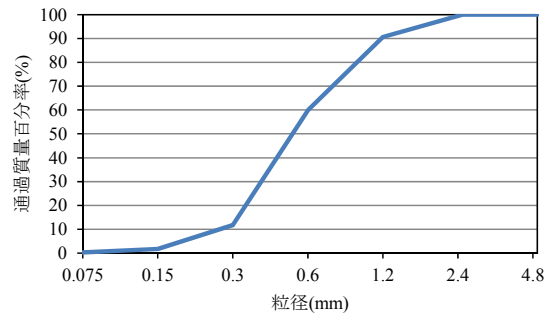


図-8 珪砂の粒度分布

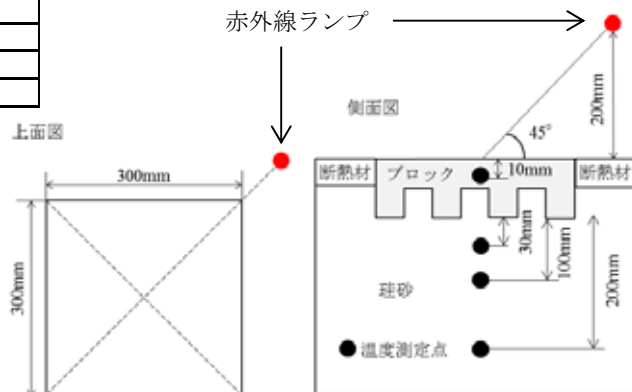


図-9 光源とブロックの位置関係および温度測定点

200mm となるよう設置した。また、温度の測定には T 熱電対を使用し、ブロックの温度は、代表値として表面から深さ 10mm の位置で測定した結果を使用し、相対比較することとした。敷砂内部の温度はブロック裏面から深さ 30, 100, 200mm の 3 点で測定した。測定間隔は 5 分とし、ランプを 4 時間照射後、20 時間放熱した。

### (4) スリット内の敷砂の実積率試験

ブロックから地中へ効果的に熱を伝えるためには、スリット内に敷砂が密に充填されている必要があると考えられる。しかし、スリット幅が異なる場合にはスリット内の敷砂の充填度合いも異なると考えられる。そこで、充填度合いを比較するために、JIS A 1104 に準拠して、骨材の単位容積質量および実積率試験を行った。容器寸法は表-4 に示すとおり、ブロックに設けたスリット幅と同一の内径とした。内径 3mm の容器はアクリル製で、内径 60, 80, 90, 120mm の容器はステンレス製である。試料には、地中放熱を模擬した室内照射試験において敷砂として用いた 6 号珪砂を使用した。また、容器寸法が小さいため、ジッキングにより試料を詰めた。

## 3.2 試験結果

### (1) 実積率試験

容器内径と実積率の関係を図-10 に示す。容器内径が大きいほど実積率が高くなっているが、内径 3mm と 120mm における実積率の差は 1.6%に留まっている。これは、今回の検討では、珪砂の粒径に対して容器の内径が十分に大きかったため、容器の寸法が実積率に与える

影響が小さくなり、大きな差が出なかったと考えられる。

### (2) 昇温時における温度と蓄積エネルギーの変化

ブロックの表面積と昇温温度の関係を図-11 に、昇温時に蓄積されたエネルギーと表面積の関係を図-12 に示す。図-11 から、スリットを設けていない 0-0 の昇温温度が最も低いことがわかる。これは、0-0 はスリットによる体積減少がないため、熱容量が大きくなったためと考えられる。また、同一のスリット本数のブロックで比較しても、スリット幅の変化に伴う昇温温度の違いは顕著となっていない。図-12 では、一般にスリット幅が大きいブロックの方が、スリット幅が小さいブロックよりも蓄積されたエネルギーが少なくなっている。これは、ブロック 1 枚当たりの熱容量の違いによるものと考えられる。また、スリット幅 3mm のブロックでは、蓄積エネルギーが増加していることがわかる。これは、スリット幅 3mm のブロックは、スリット幅が狭く、設置作業が困難であったため、実積率が同程度であっても、スリット内を十分に敷砂で充填できなかった可能性が考えられる。

スリット本数で比較をすると、図-11 から、スリット幅 60, 90, 120mm において、スリット本数の増加にともない、昇温温度は同等または減少することがわかる。また、図-12 から、スリット本数が増え、表面積が増加するにしたがって、蓄積エネルギーが減少していることがわかる。これらは、表面積が増加することで地中への移動熱量が増加するため、エネルギーが増加しにくくなるためと考えられる。これは、ブロックの表面積と敷砂の深さ 30mm における温度変化を示した図-13 において、スリット幅 60, 120mm の場合、ブロックのスリット本数増加にともない、敷砂の昇温温度が高くなっていることから推察される。

### (3) 降温時における温度と放出エネルギーの変化

ブロックの表面積と降温初期 2 時間での温度変化量を図-14 に示す。スリット幅 60, 90, 120mm において、スリット本数が増加した場合には、降温温度が小さくなっていることがわかる。これは、スリット本数が多いブロックの敷砂の温度が高い傾向にあったことから、ブロックと敷砂の温度差が小さくなり、降温温度も小さくなったと考えられる。また、スリット本数が 2 本から 3 本へと増加する際に、降温温度が大きくなっていることがわかる。これは、スリットと温度測定点の位置関係によるものと考えられる。図-15 に示すように、スリット本数が奇数のものは温度測定点の直下にスリットが配置されている。そのため、温度測定点と敷砂の距離も近くなり、測定点周辺の温度が低下しやすい状態となったと考えられる。ブロックの表面積と降温初期 2 時間の放出エネルギーの関係を図-16 に示す。スリット幅 60, 90, 120mm

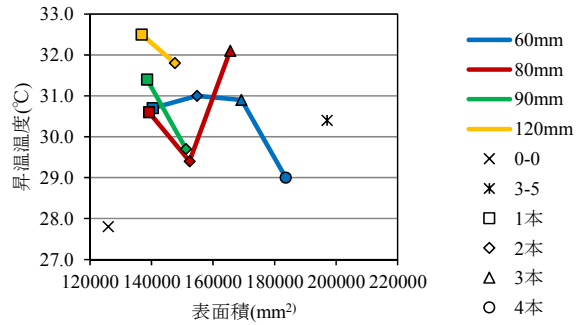
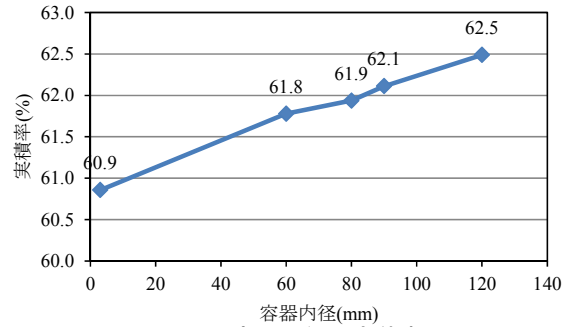


図-11 表面積とブロックの昇温温度

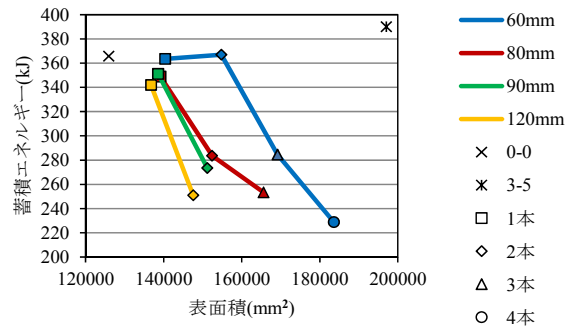


図-12 表面積と蓄積エネルギー

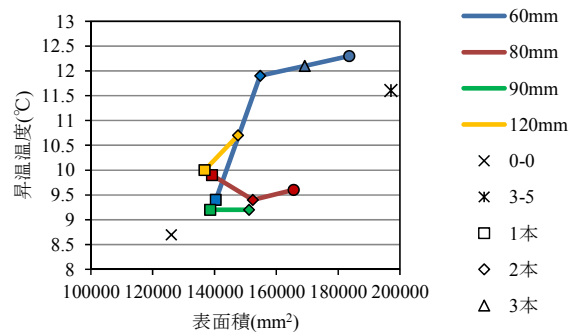


図-13 深さ 30mm における敷砂の昇温温度

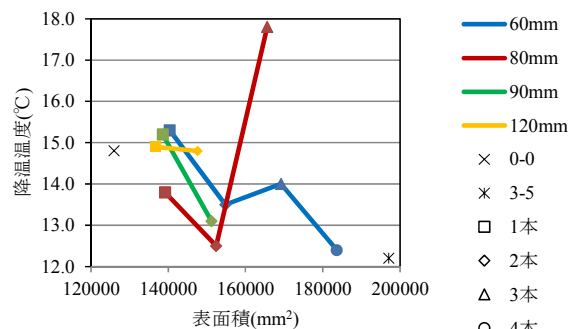


図-14 表面積と降温温度

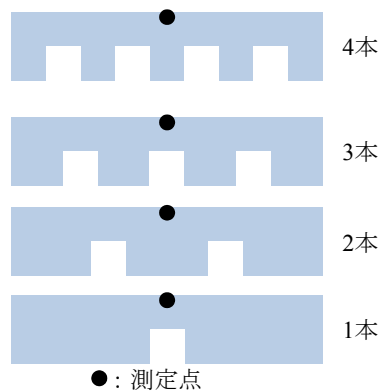


図-15 スリットの配置と温度測定点

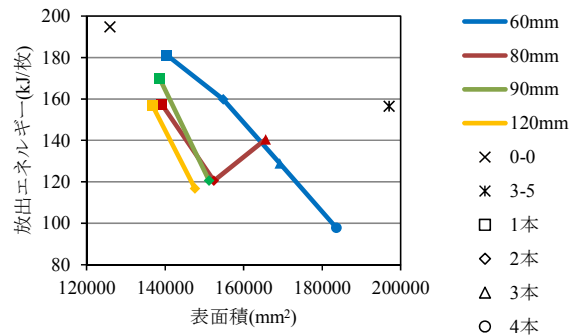


図-16 表面積と放出エネルギー

において、スリット本数の増加にともなって、放出エネルギーが少なくなることがわかる。これは、スリット本数増加にともない、降温温度が小さくなったことに加え、体積が減少した影響を受けていると考えられる。

#### 4. まとめ

##### 4.1 気中放熱室内照射試験

スリットの深さと本数を変数とした 10 種類のブロックで室内照射試験を実施し、ブロックの温度変化の挙動を比較した。本試験で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 気相と接する表面積を増加させることで、昇温時には、ブロックの昇温温度および蓄積エネルギーを減少させることが可能である。また、降温時には、ブロックの降温初期 2 時間の降温温度を増加させ、44℃から 34℃までの間で、ブロックの温度が 10℃低下する際に要する時間も短くなる。
- (2) スリット深さ 20mm のブロックは、他のスリット深さのブロックに比べて、昇温温度、蓄積エネルギーおよび、降温温度が大きくなった。

##### 4.2 地中放熱を模擬した室内照射試験

スリット幅とスリット本数を変数とした 13 種類のブロックで、地中への放熱を模擬した室内照射試験を実施し、ブロックおよび敷砂の温度変化の挙動を比較した。また、スリット内の充填度合いを比較するため、スリット幅と同一の内径をもつ容器で実積率試験を行った。本試験で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) ブロック裏面のスリット幅が、ブロックの昇温温度へおよぼす影響は明確とならなかった。蓄積エネルギーの面では、熱容量の影響を受け、スリット幅の増加によりブロックの蓄積エネルギーが減少した。

- (2) スリット本数が増加すると、昇温および降温温度、蓄積および放出エネルギーが減少する。これは、昇温時にも放熱をしているためであると考えられる。
- (3) 実積率は、容器内径が大きいほど高くなる。しかし、試料の粒径に比べて容器内径が十分に大きいため、実積率の差は 1.6%に留まった。
- (4) 地中放熱を模擬した室内照射試験の結果、体積減少により、スリットを有するブロックの蓄積エネルギーが減少する可能性が示唆された。しかし、スリット幅が狭く、設置が困難なブロックでは、蓄積エネルギーが増加する可能性がある。

#### 謝辞

本研究において、材料の提供を頂いた太平洋プレコン株式会社の関係各位、並びに、実験に協力頂いた星野佑介君に深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 代田哲朗, 上野敦, 宇治公隆, 大野健太郎: 歩道舗装における遮熱性舗装材料の夏季温度低減に関する検討, 第 66 回土木学会年次講演, V-373, pp.745-746, 2011.8
- 2) 代田哲朗, 上野敦, 大野健太郎, 宇治公隆: 遮熱性歩道ブロックの夏季温度低減に関する基礎検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1474-1479, 2012.7
- 3) 山下要裕, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 三木信博, 津郷俊二: 保水性舗装材の熱的性能変化に関する研究~材料内水分量変化の屋外実験~, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, Vol.32, pp.127-130, 2003