

# 論文 カキ殻粉入りモルタルを活用した遮熱性舗装の研究

石黒 覚<sup>\*1</sup>・山中 正善<sup>\*2</sup>

**要旨:** カキ殻粉を細骨材の代替として利用したセメントモルタルを開粒度アスファルト舗装に充填し、遮熱性の機能を付与した遮熱性舗装について研究した。本研究では、まず、カキ殻粉の物性、充填モルタルとしてのカキ殻粉入りセメントモルタルのフロー値や強度特性などを実験的に調べた。つぎに、この遮熱性舗装について室内照射試験および試験舗装による路面温度の測定を行った。これらの測定結果から、カキ殻粉入りセメントモルタルを開粒度アスファルト舗装に充填した場合、密粒度アスファルト舗装に比べて夏季の路面の最高温度を 10℃以上低減できることがわかった。

**キーワード:** カキ殻粉, 充填モルタル, 遮熱性舗装, 路面温度, 室内照射試験, 分光反射率

## 1. はじめに

アスファルト舗装やビルの輻射熱、冷房機や自動車による排気熱などによって都市部では熱収支が変化し、周辺地域に比べて気温が高くなる。等温線を描くと都市部が島の形に似ていることからヒートアイランド現象と呼ばれる。夏季のヒートアイランド現象は、熱帯夜の増加といった住環境の問題にとどまらず、都市部に局地的な集中豪雨を誘発するともいわれている。わが国でも、近年、地球温暖化とともにヒートアイランド現象の対策が急務となっている<sup>1)</sup>。

アスファルト舗装は、その色や材質から昼間の太陽光線を多く吸収して舗装深部まで高温となる。また、夜間には蓄積された熱が大気中に放出されるため、ヒートアイランド現象の大きな原因の一つになっている。このため、夏季におけるアスファルト舗装の路面温度を低減することは、ヒートアイランド現象の抑制対策の一つとして非常に有効である。

アスファルト舗装の夏季の路面温度を低減する方法として、近年、保水性舗装や遮熱性舗装などが研究開発されている<sup>2)</sup>。遮熱性舗装は表面に近赤外線を高反射する遮熱塗料を塗布するのが一般的である。本研究では、カキ養殖の副産物であるカキ殻を有効活用し、カキ殻粉を細骨材の代替として用いたセメントモルタルを開粒度アスファルト舗装に充填し、遮熱性と保水性を付与することにより、夏季の路面温度を低減することを目的としている。本論文では、カキ殻粉入りセメントモルタルの特性、室内照射試験および試験舗装による路面温度の低減効果について報告する。

## 2. カキ殻粉入りモルタルの特性

### 2.1 カキ殻粉の特性

使用したカキ殻は、三重県鳥羽市のカキ養殖場から排出されたものである。このカキ殻を粒径 2mm 以下に粉砕した製品が市販されており、本研究ではこのカキ殻粉

を活用することにした。細骨材のふるい分け試験にしたがってカキ殻粉の粒度分布を求めた結果を図-1 に示す。図中の実線で示すように、0.15mm 以下の細かい粒子の含有率が約 15%であった。なお、点線は細骨材の粒度の標準を表す。また、細骨材の密度試験にしたがってカキ殻粉の密度を求めた結果、その値は 2.29g/cm<sup>3</sup>であった。

電子顕微鏡による粒子形状と空隙の観察結果の一例を図-2 に示す。カキ殻粉の粒子形状は扁平あるいは細

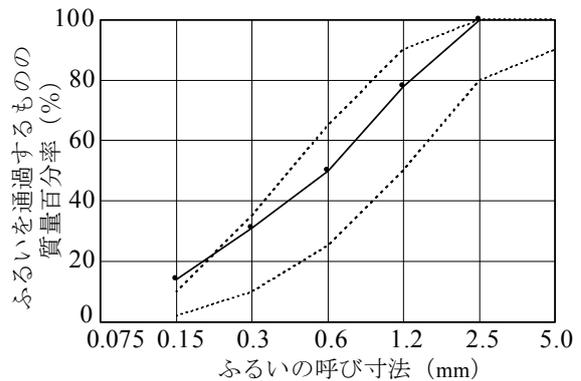


図-1 カキ殻粉の粒度曲線

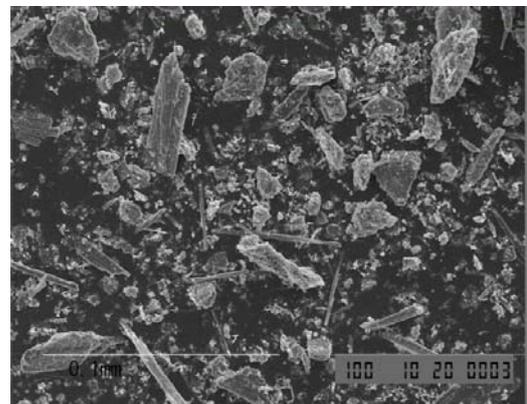


図-2 カキ殻粉の電子顕微鏡写真

\*1 三重大学 生物資源学研究科教授 農博 (正会員)

\*2 朝日土木 (株) 伊勢営業所所長

長い形状を呈し、コンクリート用の細骨材とは異なっている。また、高倍率の観察結果によると、カキ殻粒子には空隙はみられなかったが、粒子表面において層状になっている状況がみられた。

ここで使用したカキ殻粉の主な化学成分は、製品表示によると炭酸カルシウム 92.6%、ケイ酸 0.48%である。

## 2.2 フレッシュモルタルの性状

充填モルタルとして適切な軟らかさの配合を決めるため、ここでは表-1 に示すように、カキ殻粉、セメント、水の配合比率を変化させてモルタルを作製し、フロー値を測定した。フロー値の測定では内径 8cm、高さ 8cm のシリンダー容器にモルタルを詰め、容器を上げたときのモルタルの広がり直径を 2 方向で測定し、その平均をフロー値 (mm) とした。また、密度 (単位容積質量) は内径 8cm、高さ 9.5cm のモルタル容器を用いて測定した。練混ぜにはモルタルミキサーを用い、セメントに水を加えてから 30 秒、カキ殻粉を加えてから 1 分 30 秒、その後、パドルなどに付着したモルタルをさじでかき落としてから 30 秒、合計 2 分 30 秒練混ぜた。なお、セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。

表-1 および図-3 の結果から、セメントに対するカキ殻粉の混入比率を大きくするほど、同じ軟らかさのモルタルを得るための水セメント比は極めて大きくなるのがわかった。カキ殻粉は、コンクリート用の細骨材に比べて粒子形状が複雑であり、微粒子が多いことが一因と考えられる。また、高性能減水剤を使用した場合、同じ軟らかさのモルタルを得るための水量は少なくてきたが、空気量の増加により密度が小さくなる傾向が認められた。これらの試験結果において、フロー値の大きい場合にはモルタルから水分が分離する傾向が見られたので、モルタルのフロー値は 180mm 程度が適切と判定した。フロー値 140~226mm のモルタルの状況を図-4 に示す。

## 2.3 硬化したモルタルの強度特性

硬化したモルタルの強度を調べるため、曲げ強度試験

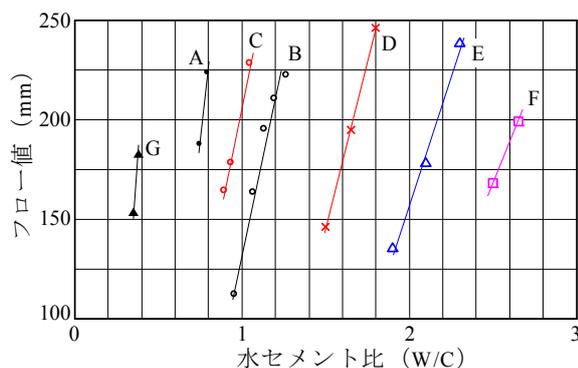


図-3 モルタルのフロー値と水セメント比の関係

と圧縮強度試験を実施した。曲げ強度試験は、4×4×16cm の角柱供試体を使用し、セメントの強さ試験方法に準じて行った。試験機にはミハエリス二重てこ形曲げ強さ試験機を用いた。また、圧縮強度試験は、φ5×10cm の円柱供試体を使用し、モルタルの圧縮強度試験方法に準じ、アンボンドキャッピングにより行った。試験材齢は 3 日、7 日および 28 日とした。

表-1 フロー試験におけるモルタルの配合

種類 (S:C)	カキ殻粉 S (g)	セメント C (g)	水 W (g)	W/C	フロー値 (mm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
A (1:1)	1200	1200	900	0.75	187	1.75
	1200	1200	960	0.80	223	1.76
B (2:1)	1200	600	573	0.96	112	1.72
	1200	600	639	1.07	163	1.66
	1200	600	687	1.14	195	1.66
	1200	600	720	1.20	210	1.67
C*	1200	600	760	1.27	222	1.67
	1200	600	534	0.90	164	1.57
	1200	600	564	0.94	178	1.60
D (3:1)	1200	600	624	1.05	228	1.68
	1500	500	750	1.50	146	1.62
	1500	500	825	1.65	195	1.63
E (4:1)	1500	500	900	1.80	246	1.63
	1600	400	760	1.90	135	1.58
	1600	400	840	2.10	178	1.61
F (5:1)	1600	400	920	2.30	238	1.60
	1700	340	850	2.50	168	1.59
	1700	340	901	2.65	199	1.59
G**	-	2000	705	0.35	153	2.02
	-	2000	760	0.38	182	1.99

\*: 高性能減水剤をセメント質量の 1% 添加

\*\* : セメントペースト



(a) フロー値 226mm

(b) フロー値 177mm



(c) フロー値 170mm

(d) フロー値 140mm

図-4 フロー試験の状況

強度試験に用いたモルタルの配合を表-2に示す。強度試験では、フレッシュモルタルのフロー値が180mm程度になるような水セメント比のものを対象とした。また、配合GとHに示すように高炉スラグ微粉末4000を混和材としたモルタルについても試験した。配合GとHでは、結合材の半分をスラグに置き換えたが、セメントのみの場合に比べてフロー値はほぼ同じであった。

モルタルの圧縮強度および曲げ強度の試験結果をそれぞれ図-5および図-6に示す。これらの試験結果から、モルタルの軟らかさを同じ程度にした場合、セメントに対するカキ殻粉の比率が多いほど強度は小さくなった。これは、カキ殻粉の混入比率が大きいほど水セメント比が大きくなり、かつ、セメント量が少なくなることが原因と考えられる。

モルタルの圧縮強度と曲げ強度の材齢経過に伴う強度発現はほぼ同じ傾向を示した。曲げ強度と圧縮強度の比率は材齢28日で1/1.6~1/3.7となり比較的大きくなった。圧縮試験時の観察によると、円柱供試体の上端面付近で破壊するものが多くあり、水セメント比が大きい場合には打設上面付近に弱い部分が生じやすく、このため圧縮強度を小さく評価していることが考えられる。モルタル供試体の作製および試験時には供試体端面の処理に気をつける必要があると思われる。

高炉スラグ微粉末を混入したGとHの場合には、材齢3日、7日の初期強度はセメントのみの場合に比べて低下したが、材齢28日の強度の伸びは大きくなった。高炉スラグ微粉末の混入は、モルタルの長期強度の増進に有効と考えられる。

#### 2.4 硬化したモルタルの吸水性

硬化したモルタルの吸水性を調べるため、曲げ強度試験供試体(4×4×16cmの角柱供試体)の折片を用いて吸水率試験を行った。材齢28日の曲げ試験終了後、供試体を実験室内に放置して一定質量になるまで乾燥させ、その後、破断面を上に向けて折片を4cm深さまで水中に浸漬し、吸水による質量変化を測定した。

モルタルの吸水率の試験結果を図-7に示す。吸水率(%)は、(浸漬後の供試体質量-浸漬前の供試体質量)÷浸漬前の供試体質量×100により求めた。この試験結果から、セメントに対するカキ殻粉の比率が多いほど吸水率は大きくなった。S:Cが2:1のモルタルBの吸水率は24時間で16%程度であった。また、S:Cが2:1の減水剤を使用したモルタルCの吸水率は、使用しない場合に比べて6%程度小さくなった。セメントペースト(W/C=0.38)の吸水率については図示していないが、浸漬時間24時間で2.8%程度と最も小さかった。

表-2 強度試験におけるモルタルの配合

種類	カキ殻粉 S (g)	セメント C (g)	水 W (g)	W/C or W/(C+B)	混和材 B**	S:C or S:(C+B)
A	1200	1200	900	0.75	-	1:1
B	1200	600	660	1.1	-	2:1
C*	1200	600	564	0.94	-	2:1
D	1500	500	800	1.6	-	3:1
E	1600	400	840	2.1	-	4:1
F	1700	340	867	2.55	-	5:1
G	1200	300	690	1.15	300	2:1
H	1500	250	800	1.6	250	3:1

\*: 高性能減水剤をセメント質量の1%添加

\*\* : 高炉スラグ微粉末4000を使用

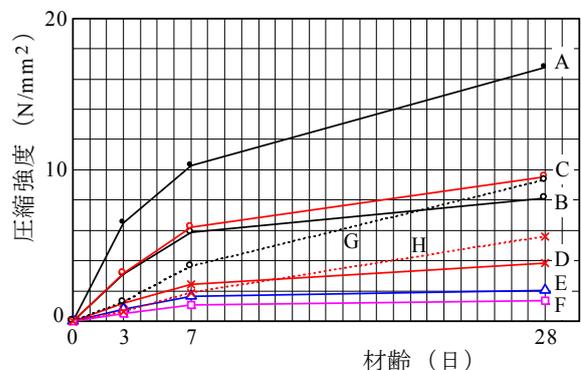


図-5 圧縮強度と材齢の関係

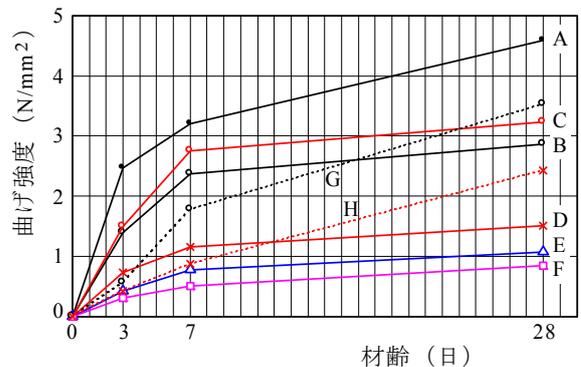


図-6 曲げ強度と材齢の関係

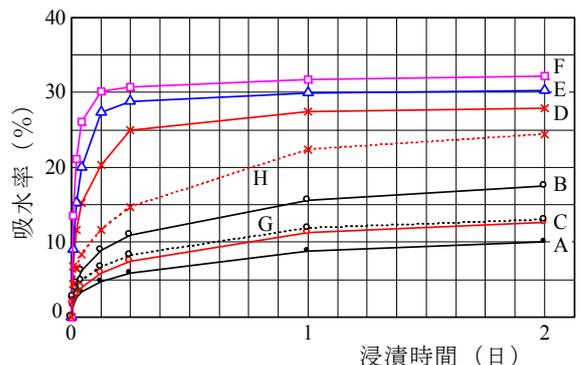


図-7 吸水率と浸漬時間の関係

### 3. 供試体による照射試験

#### 3.1 室内照射試験

フレッシュモルタルの性状や強度試験の結果から、充填モルタルとしてカキ殻粉とセメントの比率が 2 : 1 および 3 : 1、フロー値 180mm 程度が適切と判断した。比率が 1 : 1 ではセメント量が多くなり、4 : 1 では強度発現が小さいと考えたためである。これらのカキ殻粉入りモルタルを用いて室内照射試験の供試体を作製した。

充填モルタルの配合を表-3に示す。ここでは、カキ殻粉入りモルタル(A および B)以外に、セメントペースト(C)および沖縄産のサンゴ砂 (2.5mm フルイを通過したもの) を用いたモルタル(D)も比較用として作製した。

照射試験供試体の作製手順は、まず、開粒度アスファルト舗装供試体 (30×30×5cm) の表面中央に熱電対を固定し、その後充填モルタルを上面に敷きならす。つぎに、供試体を振動台に乗せ、振動を与えながらモルタルを空隙に充填させた。供試体は、28 日経過後に表面を研磨し (研ぎ出し)、その後、厚さ 5cm の発泡スチロールで供試体の底面と側面を覆って断熱処理を施した。また、比較用の供試体として密粒度アスファルト供試体 (30×30×5cm) を 1 個作製した。この供試体には表面中央に熱電対を接着剤により取り付けた。

室内照射試験の概要を図-8に示す。使用したランプの種類はビームランプ散光型 (110V 150W)、供試体表面からランプまでの距離 66cm、室温 27~28℃、照射時間 3 時間の条件で試験を行った。計測時間は照射開始から 10 時間とした。

#### 3.2 室内照射試験の結果

室内照射試験の結果を図-9に示す。この結果から、供試体の最高表面温度は、密粒度アスファルト供試体 54.9℃、セメントペースト充填供試体 47.6℃、カキ殻粉入りモルタル (A) 充填供試体 42.5℃、カキ殻粉入りモルタル (B) 充填供試体 41.5℃、サンゴ砂モルタル充填供試体 43.9℃のようになった。つまり、カキ殻粉入りモルタルを充填した場合、密粒度アスファルト舗装に比べて最高温度が約 13℃低下した。したがって、これらは遮熱性舗装として十分機能している。

#### 3.3 屋外照射試験

8月下旬に室内照射試験用の供試体を屋外の地面上に設置し、昼間の太陽光線による温度上昇を測定した。屋外照射試験の結果を図-10に示す。この結果から、温度上昇の大小関係は室内照射試験の傾向と同じであった。また、カキ殻粉入りモルタルを充填した場合、密粒度アスファルト舗装に比べて最高温度が約 14℃低下した。さらに、セメントペーストに比べても最高温度が約 6℃低下した。したがって、本試験結果においても遮熱性舗装として十分機能していることが確認できた。

表-3 充填モルタルの配合

種類	カキ殻粉 S (g)	セメント C (g)	水 W (g)	W/C	砂 (g)	S:C
A	1200	600	660	1.1	-	2:1
B	1500	500	800	1.6	-	3:1
C	-	2000	760	0.38	-	-
D*	-	900	522	0.58	1800	-

\* : サンゴ砂を使用

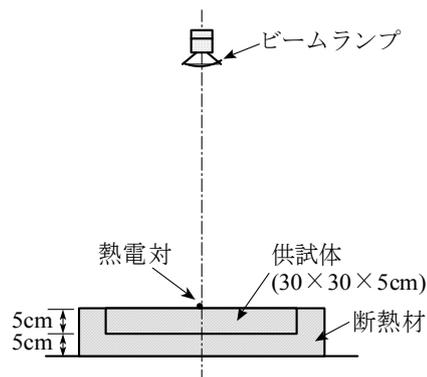


図-8 室内照射試験の概要

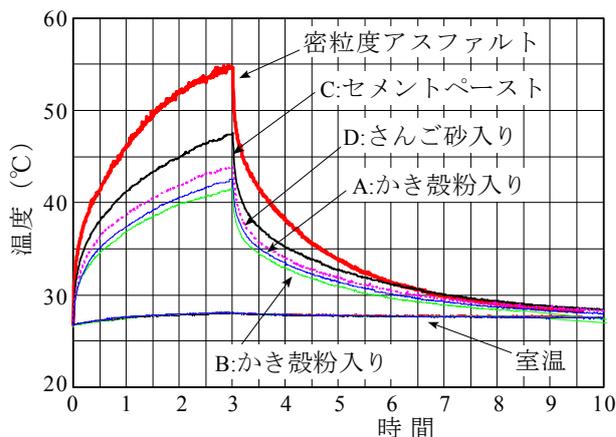


図-9 室内照射試験の結果

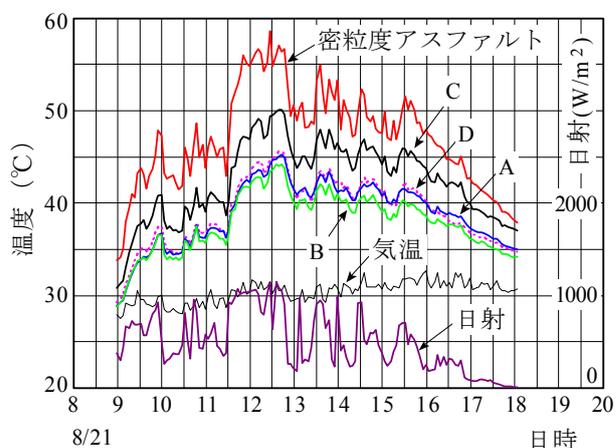


図-10 屋外照射試験の結果

#### 4. 試験舗装による路面温度の低減効果の測定

##### 4.1 試験舗装の概要

舗装施工会社による試験舗装を実施した。試験舗装の平面図を図-11に示す。試験舗装は、幅3m、長さ30mの開粒度アスファルト区間（骨材最大粒径20mm）の周囲に幅1.5mの密粒度アスファルト区間を設けている。舗装の厚さは5cmである。既設のアスファルト舗装を処理した上に試験舗装を行った。また、施工中に図中の温度測定位置において、深さ2.5cm、5cmの位置に温度測定用の熱電対を埋設した。

充填モルタルとしてカキ殻粉とセメントおよび水の比率が2:1:1.1のものを現地で練混ぜ、それらを開粒度アスファルト舗装区間に敷きならしたのち、振動ローラーで転圧してモルタルを充填させた。セメントには早強ポルトランドセメントを使用した。このとき、モルタルの圧縮強度は普通ポルトランドセメント使用時に比べて大きくなり、材齢1日、3日、7日において、それぞれ5.22、8.68、9.67 N/mm<sup>2</sup>となった。

遮熱性舗装区間においては、充填モルタルの表面の研磨処理方法として、図-11に示すようにウォーターショット、ショットブラストおよび研ぎ出しの3つの方法を用いた。なお、無処理区間は研磨処理を行っていない区間である。

##### 4.2 路面温度の測定結果

路面温度の測定は、図-11に示すように研ぎ出し区間と密粒度アスファルト区間において行った。温度測定位置は、舗装表面、深さ2.5cmおよび5cmである。表面温度は熱電対を接着剤で舗装表面に直接に張り付けて測定した。測定にはデータロガーを用い、路面温度、気温、相対湿度、日射を5分間隔で測定した。また、風速はカップ式風速計を用いて1時間間隔で測定した。

今回の温度測定は8月中旬の晴天日に実施した。舗装表面の温度測定結果を図-12に示す。この結果によると、遮熱性舗装区間の昼間の最高表面温度は、密粒度アスファルト区間に比べて約12℃低下した。また、夜間においても表面温度は2~4℃低下した。

舗装表面から2.5cmおよび5cm深さの温度測定結果を図-13に示す。遮熱性舗装区間の内部の最高温度は、密粒度アスファルト区間に比べて約10℃低下した。また、夜間においても2~4℃低下し、表面温度と同様の温度低減傾向となっている。

これらの温度測定結果から、カキ殻粉入りモルタルを充填した遮熱性舗装は、密粒度アスファルト舗装に比べて表面および内部の温度低減効果の大きいことがわかった。測定日の気象条件における相対湿度は、昼間では50%前後の値を示し、夜間では85%程度まで上昇した。また、昼間の風速は1.2~2.8m/sec程度であった。

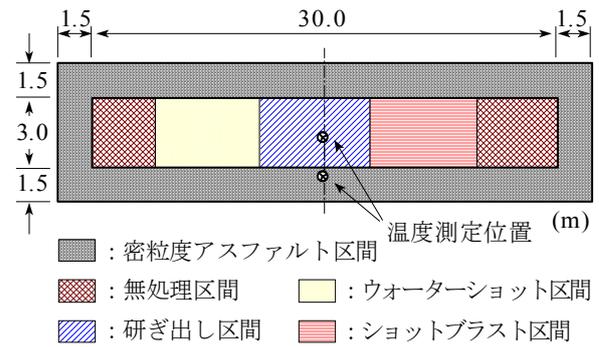


図-11 試験舗装の平面図

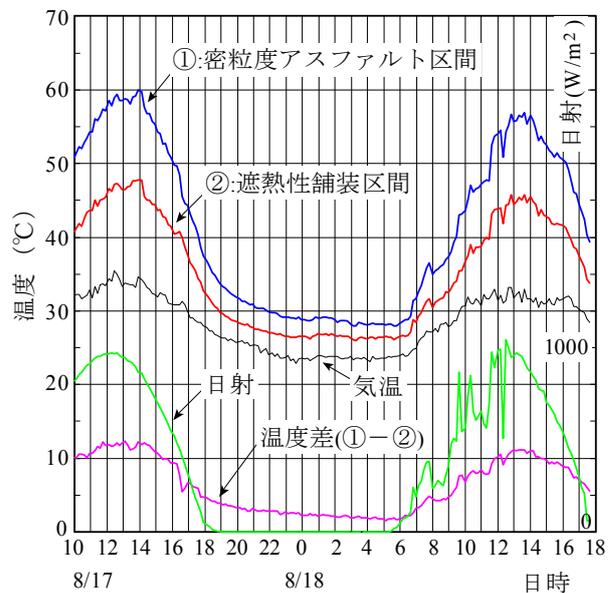


図-12 温度測定結果（表面温度）

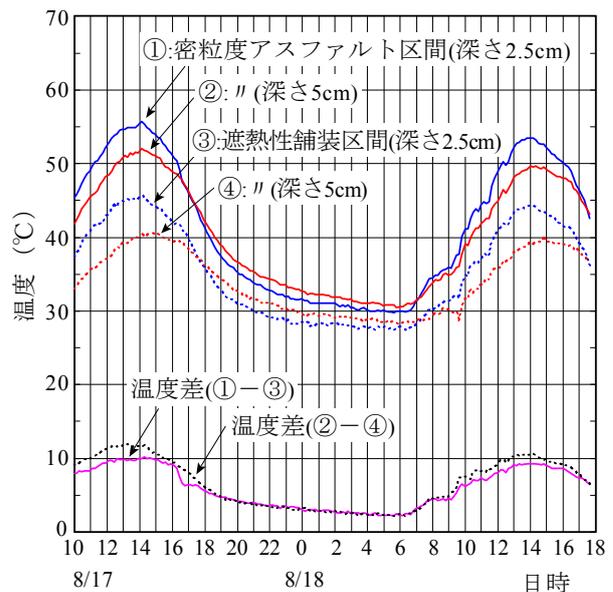


図-13 温度測定結果（内部温度）

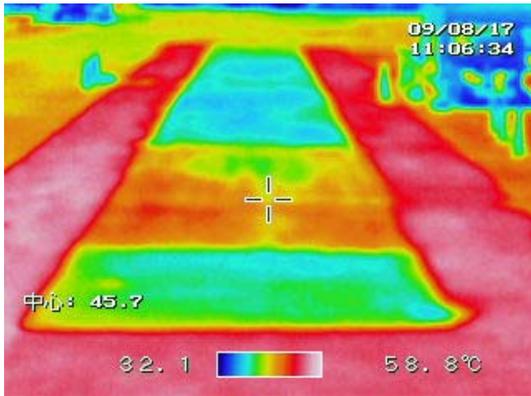


図-1 4 舗装表面の熱画像（上）と可視画像（下）

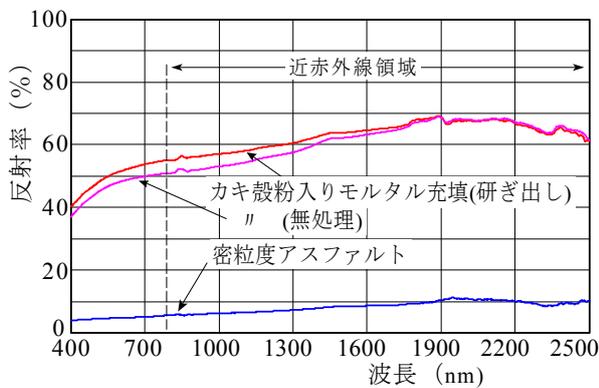


図-1 5 舗装の分光反射率の測定結果

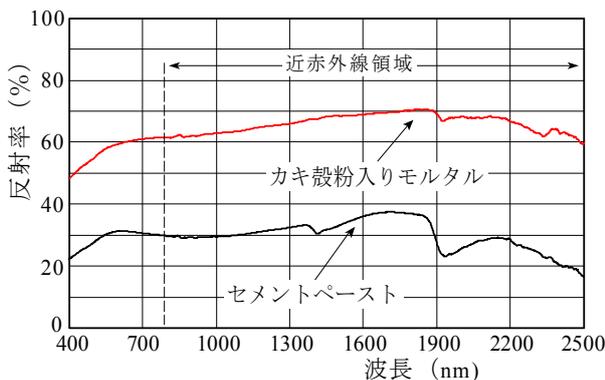


図-1 6 ペーストおよびモルタルの分光反射率

試験舗装表面の熱画像および可視画像を図-1 4に示す。これらは8月17日の11時頃に撮影したもので、図-1 1の平面図の左側から右側に向かって撮影したものである。密粒度アスファルト区間で温度が高く、遮熱性舗装の区間で温度が低くなっている状況が把握できる。また、遮熱性舗装のウォーターショット区間では充填モルタルが飛散した部分があるため、表面温度が他に比べて高くなっている状況がうかがえる。

#### 4.3 分光反射率の測定

密粒度アスファルト舗装、カキ殻粉入りモルタルを充填した舗装（研ぎ出し処理をしたもの、および無処理のもの）のそれぞれの供試体について、分光反射率を測定した。供試体は、予備的に作製した舗装部分から30×30mm、厚さ20mmの大きさに切りだしたものを使用した。供試体数は2個とした。

分光光度計による反射率の測定結果を図-1 5に示す。カキ殻粉入りモルタルを充填した場合、近赤外線（780-2500nm）の分光反射率は、密粒度アスファルトに比べて高く、遮熱効果は大きいといえる。これは温度低減効果が大きいことを裏付けている。また、可視域の分光反射率も大きく、これは白い色を呈していることから推察できる。

図-1 6は、硬化したセメントペーストならびに充填用のカキ殻粉入りモルタルについて、それぞれ単体の分光反射率を示している。セメントペーストに比べてカキ殻粉入りモルタルの反射率が大きくなっており、カキ殻粉を混入することにより反射率が大きくなり、路面温度の低減に効果のあることを示している。

#### 5. まとめ

本研究では、カキ殻を遮熱性舗装の材料として有効活用するため、まず、カキ殻粉を細骨材の代替として利用したセメントモルタルのフロー試験や強度試験などの結果から、遮熱性舗装の充填モルタルとしての適用性を検討した。つぎに、このカキ殻粉入りセメントモルタルを開粒度アスファルト舗装に充填し、遮熱性機能の付与ならびに路面温度の低減効果を検証した。室内照射試験および試験舗装による温度測定の結果から、カキ殻粉入りセメントモルタルを開粒度アスファルト舗装に充填した場合、密粒度アスファルト舗装に比べて夏季の路面の最高温度を10℃以上低減できることが確認できた。

#### 参考文献

- 1) 空気調和・衛生工学会：ヒートアイランド対策，オーム社，2009.4
- 2) 土木学会 舗装工学委員会：環境負荷軽減舗装の評価技術，土木学会，2007.2