

# 高炉スラグを用いた保水材「ロードクール<sup>®</sup>」による 路面温度上昇抑制効果

## Road Temperature Mitigation Effect of Water-Retentive Material, “Road Cool,” Using Blast Furnace Slag

高橋 克則 TAKAHASHI Katsunori JFE スチール スチール研究所 スラグ・耐火物研究部 主任研究員(課長)・博士(工学)  
 藪田 和哉 YABUTA Kazuya JFE スチール スチール研究所 スラグ・耐火物研究部長・工博

### 要旨

JFE スチールでは、ヒートアイランド現象の抑制技術の一つである保水性舗装用材料として高炉スラグを原料とした保水材を開発し、長期耐久性などを改善した「ロードクール<sup>®</sup>」として実用化した。ロードクールの吸水性能は、60℃促進養生試験後においても初期状態からほとんど低下せず、実施工した舗装の3夏目の温度上昇抑制効果は、施工直後に近いことを確認した。ロードクールを使用した保水性舗装を10 cm厚で施工した場合、一降雨で1週間程度の路面温度低減効果が持続することがシミュレーション計算および実測値から分かった。

### Abstract:

JFE Steel developed water-retentive material using blast furnace slag for water-retentive pavement, which is applied for mitigating urban heat-island phenomenon, and commercialized with improved durability of temperature reducing effect. Water absorbing properties are maintained at a high level after the accelerated aging test. Mitigation effect of pavements' temperature of the third summer season is almost the same as that of initial stage. Both simulation and observation indicate that “Road Cool” pavements with 10 cm thickness keep its surface temperature low for almost a week after a single rainfall.

## 1. はじめに

近年の都市化の進行にともない、都市型の環境問題が顕在化しており、その典型例として、ヒートアイランド現象が注目されている。ヒートアイランドとは、都心域の気温が郊外に比べて高くなる現象であり、19世紀からすでに知られていたが、近年の都市化の急激な進展にともないその影響も加速度的に増大している<sup>1)</sup>。国際連合の定義に基づけば、2005年の都市部の人口は全人口の約50%であり<sup>2)</sup>、都市型にとどまらず、全世界的な環境問題として考える必要がある。

ヒートアイランド現象の原因としては、地表面の改変、エネルギーの集中消費と排熱、大気汚染との複合効果などがあげられている。特に、緑地や裸地などがアスファルト舗装やコンクリート構造物に置き換わることは、保水能力の著しい低下とともに、熱容量が大きい材料への蓄熱が進

行することとなるため、温度上昇の主要因の一つとなっている。対策技術としては屋上緑化をはじめさまざまな角度から取り組まれており、道路舗装においては保水性舗装が代表的な技術として適用されつつある。保水性舗装は、開粒度のアスファルト舗装の空隙部に保水性をもつ材料を注入することで、舗装内に水を保つことを可能にした舗装であり、人工的な舗装の利点を生かしつつ、水の蒸発散による潜熱冷却を実現するものである。

保水材として要求される特性は、(1)晴天時の温度抑制能、(2)一降雨後の温度抑制効果の持続性、(3)長期的に供用したときの性能低下が少ないことの3点があげられる。JFE スチールでは、高炉スラグを原料とする保水材を開発し<sup>3)</sup>、耐久面を改善した保水材「ロードクール<sup>®</sup>」を上市している<sup>4)</sup>。本報では、保水材「ロードクール」の促進養生による保水材の吸水挙動変化の調査結果、および実際の駐車場で3年間使用中の舗装部における温度上昇抑制性能を測定した結果を報告する。合わせて、一降雨の温度上昇抑制効果持続性のシミュレーション計算結果についても報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 保水材「ロードクール」の基本特性

ロードクールは、高炉プロセスで発生し、セメントなどの混和材として使用されている高炉スラグ微粉末を主原料の一つとして使用している。

ロードクールの基本特性を表1に、固化後の微構造写真を写真1に示す。ロードクールは、保水能力を優先した高保水型と強度をやや高めた高強度型の2種類があるが、いずれも体積吸水率で65%以上を持っている。固化をした際に微細粒の間に空隙が残存していることが観察され、その空隙に水を保っていると推定される。主な気孔径は2 $\mu$ m

表1 ロードクールの材料特性  
Table 1 Material properties of Road Cool

	High-water retentive type	High-strength type
Raw material	Blast furnace slag, Cement, Admixture	
Water/Powder (%)	100	
Slurry density	1.45	
7 days compressive strength (MPa)	1.6	2.7
10 cm-high suction time (min)	66	75
Water absorption (volume%)	min. 70	min. 65

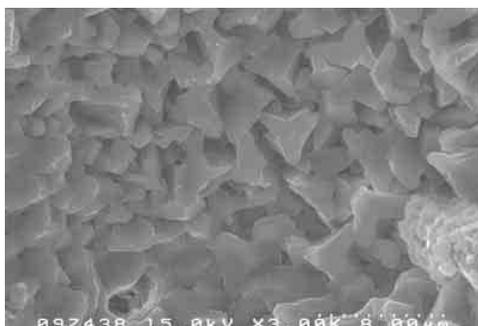


写真1 ロードクール固化体の微構造写真

Photo 1 SEM image of Road Cool after solidification

表2 保水材の溶出試験結果

Table 2 Result of reaching test of Road Cool

Element	Leaching value (mg/l)	Element	Leaching value (mg/l)
Cr (IV)	N. D.	As	N. D.
Hg	N. D.	CN <sup>-</sup>	N. D.
Cd	N. D.	F	0.34
Pb	N. D.	B	N. D.
Se	N. D.	—	—

N. D.: Not detectable

程度になるよう設計されており<sup>4)</sup>、これによって安定的な水の吸放出と体積安定性を確保している。

表2に環境省告示46号法による溶出試験結果を示す。溶出試験は、保水材単体の固化物を全量2mmアンダーに破碎した上で溶出試験に供し、すべての元素で定量下限以下であることを確認している。

### 2.2 促進試験による保水材の吸水特性変化

保水材の促進養生試験は、道路の実用上の最高温度相当である60℃の温水に浸漬し、反応を進行させた後に吸水試験を行うことにより評価した。保水材は、水粉体比100で混合し、10cm $\phi$ ×20cmに成型し、20℃封緘状態で1週間養生したものをを用いた。得られた養生サンプルは、60℃温水中に1~7日間浸漬し、これを40℃の空气中で乾燥させた後に、吸水試験に供した。吸水試験の模式図を図1に示す。吸水試験は、保水性舗装技術研究会が提案した方式<sup>5)</sup>に基づき、乾燥後常温に戻したサンプルの底部5mmを流水中に浸け、水の吸い上げ量を計測して評価した。試験材は、ロードクールと、比較材として、常温養生後の吸水速度がほぼ同等で結合成分が多いテスト材を用いた。

### 2.3 長期供用した保水性舗装の性能変化

ロードクールを用いた保水性舗装について、JFEスチール研究所駐車場に施工し、初年度から3年経過後まで舗装体温度を調査した。図2に施工した現地概要図を示す。測

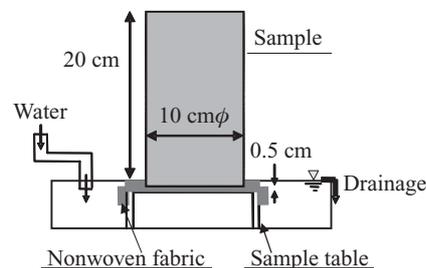


図1 吸水性試験方法

Fig. 1 Schematic diagram of water absorbing test

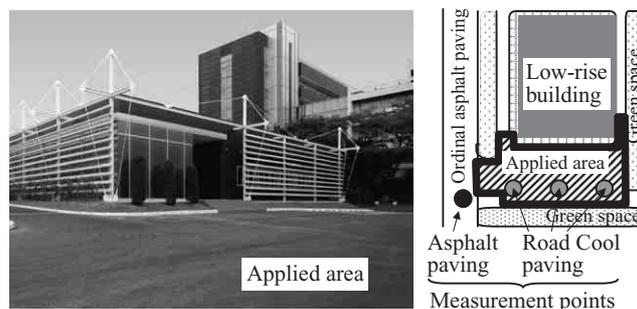


図2 ロードクールを使用した保水性舗装の測定概要

Fig. 2 Schematic overview of temperature measurement of water retentive pavement using Road Cool

温は、舗装表面から 15 mm に埋設した K 熱電対により実施した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 保水材の吸水特性

図3に養生条件を変えた場合の保水材の吸水挙動を示す。今回開発、適用したロードクールは、20℃エージング時は4時間未満で20 cm 高さを吸い上げ終わっていたのに対し、60℃でエージングした場合、初期の吸水速度は同等であり、20 cm 到達時間は2時間程度遅くなっているものの、十分な吸水性能が維持されている。これに対して、結合材の量を増やした場合、常温の吸水速度はほぼ同等にもかかわらず、60℃養生後に吸水速度の大幅な低下が観察された。

図4に養生時間を変えたときの24時間吸水量の変化を示す。ロードクールは、60℃温水で1週間養生した後も、初期の吸水量が維持されていることが確認される。一方、結合材が多い比較材の場合には、温水養生時間が伸びるに従い、吸水量が大きく低下していることが分かる。

以上の結果から養生条件によって保水特性が変化することが示唆されており、実使用環境での材料性能を追跡することが重要である。また、ロードクールは保水能力の経年

劣化は小さい材料であると推定される。

#### 3.2 長期供用した保水性舗装の性能変化

ロードクールを用いた保水性舗装を実際の駐車場として3夏季使用し、路面温度上昇の抑制効果を調べた。図5に3夏目の保水性舗装と密粒度アスファルト舗装の日中温度推移例を示す。3夏目においても保水性舗装の冷却効果が確認され、図5の場合では、最高温度の差は約14℃である。

図6に、降雨から2日目までにおける密粒度アスファルト舗装温度に対する、保水性舗装と密粒度アスファルト舗装の温度差の関係を示す。密粒度アスファルトの温度が高い時ほどその温度差が明確に現れ、その温度差の傾向は1年目と3年目ではほぼ同等であった。したがって、3夏経過時の保水性舗装としての特性劣化はほとんどないと判断される。

10℃以上の温度差は、密粒度アスファルト面が50℃を越えるような場合に認められるが、温度差のばらつきも同時に認められる。これは、前日の降雨量や日照条件、大気中の湿度などによる蒸発効率の変化のためと推定される。

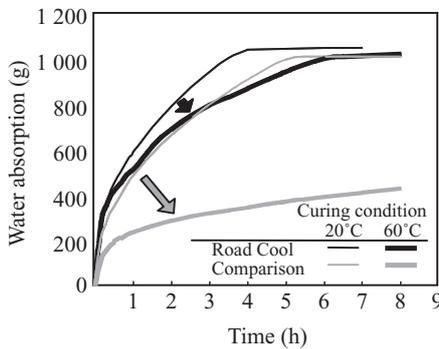


図3 養生条件を変えたときの吸水挙動の変化

Fig.3 Water absorption of water retentive materials after 20°C and 60°C during curing

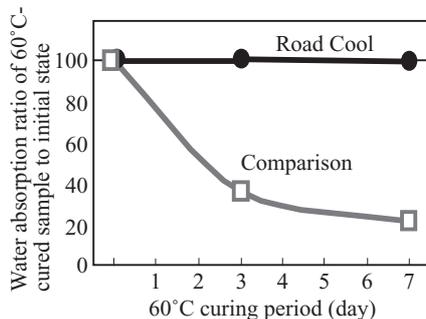


図4 養生時間を変えたときの24時間吸水量の変化

Fig.4 24-hour water absorption of 60°C-cured water retentive materials after various curing period

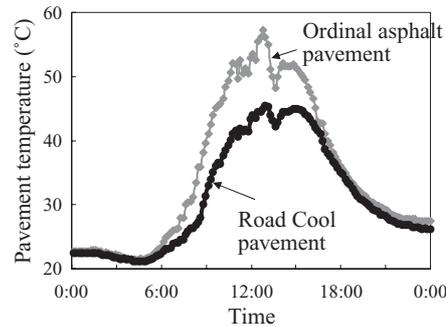


図5 ロードクールを使用した保水性舗装と密粒度アスファルト舗装の3夏目の温度測定例

Fig.5 Typical results of surface temperature of Road Cool pavement and ordinal asphalt pavement at third summer

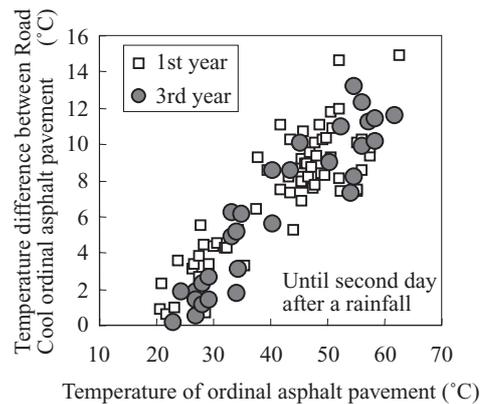


図6 密粒度アスファルト舗装と保水性舗装の温度差

Fig.6 Temperature difference between Road Cool pavement and ordinal asphalt pavement

#### 4. 路面冷却効果のシミュレート

##### 4.1 計算条件

ロードクールを用いた保水性舗装の路面冷却効果とその持続性について、鉛直一次元熱収支モデルにより検討した。地下の熱の収支は、以下の熱伝導方程式で表現される。

$$\frac{\partial(c_g(z)\rho_g(z)T(z))}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda \frac{\partial T(z)}{\partial z} \right] + Q_{\text{surf}} - Q_W \dots (1)$$

$$Q_{\text{surf}} = R_n^\downarrow - Q_H - Q_E \dots (2)$$

ここで、 $c_g(z)$ : 深さ  $z$  の地盤の比熱、 $\rho_g(z)$ : 深さ  $z$  の地盤の密度、 $T(z)$ : 深さ  $z$  の温度、 $Q_{\text{surf}}$ : 地表面における熱収支の総和、 $Q_W$ : 給水によって奪う熱量、 $R_n^\downarrow$ : 正味放射量、 $Q_H$ : 顕熱輸送量、 $Q_E$ : 潜熱輸送量である。これらのうち、 $Q_{\text{surf}}$  は表面のみに与え、 $Q_W$  は今回の計算では夜間に路面温度と同温度で飽水させたとして、0とした。

保水性舗装からの蒸発量は、マクロ解析では舗装表面の湿度と飽和湿度とによるバルク式が用いられることが一般的であるが<sup>6)</sup>、個別解析では保水層の含水量の影響を考慮する必要がある。谷本らは、土壌の湿り具合を考慮した蒸発量予測モデルを提案し、重量含水率と飽和重量含水率との比を一次係数として導入している<sup>7)</sup>。ラボでの蒸発試験においても、乾燥が進むにつれて蒸発量が小さくなることを確認しており<sup>8)</sup>、今回は飽水状態にある保水性舗装について、各時間帯での蒸発量を測定し、それが周辺温度、物質移動係数、湿度の影響などの複合した結果とみなした。これに含水量を乗じることによって、単位時間あたりの蒸発量  $E$  を決定した。

$$E = (k_c \cdot I_{\text{DR}} + C) \cdot \frac{W}{W_F} \dots (3)$$

ここで、 $k_c$ : 入射量と蒸発量の比例定数 ( $6.5 \times 10^{-7} \text{ kg/J}$ )、 $C$ : 夜間蒸発相当量 ( $2.0 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2\text{s}$ )、 $W$ : 保水材中の含水量、 $W_F$ : 保水材の最大含水量である。保水材中の保水量は、計算初日の0時に完全飽水とし、表面からの蒸発のみで減少して周囲との水の授受はないものとした。熱容量、比重などの物性値も含水量に応じて計算したものをを用いた。

蒸発以外の地表面の計算は、気象庁の日射量データを基にした受熱量、およびユルゲスの式で求めた対流熱伝達率を用いて空気との顕熱輸送量を求めた。

##### 4.2 計算結果

図7に飽水当日の保水性舗装と密粒度アスファルト舗装

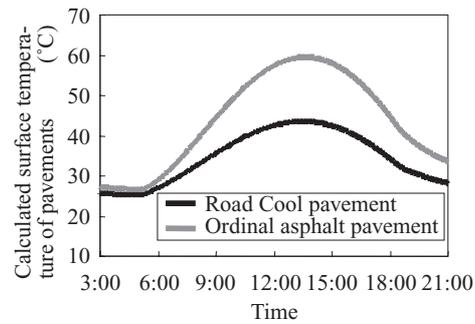


図7 ロードクールを使用した舗装と密粒度アスファルト舗装の表面温度計算結果

Fig.7 Calculated surface temperature of Road Cool pavement and ordinal asphalt pavement

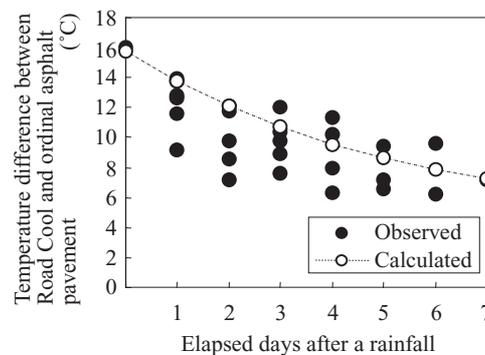


図8 降雨後日数と表面温度差の関係

Fig.8 Relationship between elapsed days after a single rainfall and reduced surface temperature by using Road Cool

の表面温度の計算結果を示す。路面温度の差は約14°Cであり、実測結果とよく対応している。10 cm 舗装の計算では夜間の温度差が明確に発現しており、蓄熱量が大きいアスファルト舗装に比べて熱帯夜緩和にも役立つと示唆される。

図8に、10 cm の保水性舗装における降雨後の温度冷却効果の実測値と計算値を示す。実測値は降水量、前日の蒸発状況、日射条件などによってバラツキがあるが、計算結果はほぼ対応している。保水性舗装の冷却効果は保水材からの水分蒸発と日射反射の2つの効果が大きく、前者は降雨後日数とともに低下する。今回の計算で保水量 = 0とした時の密粒度アスファルト舗装との温度差は6°C程度であり、10 cm 舗装の場合で1週間程度の舗装温度抑制効果の持続が期待できることが確認された。

#### 5. おわりに

スラグを原料とした保水性材料であるロードクールは、ヒートアイランド現象抑制のために利用されており、現在までに国道、都道、市道、各種駐車場、公園などで使用されている。その路面温度上昇の抑制性能について、長期耐久

性および一降雨後の温度抑制とその持続性の観点から評価した。

- (1) 吸水特性について 60℃ 促進養生により評価した結果、初期特性が同等でも促進養生後の特性が大きく異なる場合があることが分かった。
- (2) ロードクールは促進養生後の吸水特性の変化が小さく、実施工体の 3 夏経過後の温度上昇抑制効果は施工直後に近いことが確認された。
- (3) 温度抑制の効果は水分蒸発と日射反射の複合効果であり、蒸発冷却の効果は、実測および計算から、10 cm 舗装の場合で 1 週間程度の持続が期待できる。

#### 参考文献

- 1) 梅干野見. 緑の読本. 2001, no. 57, p. 337-344.
- 2) World Urbanization Prospects. The 2005 Revision Population Database. United Nations. 2006.
- 3) 高橋克則, 高木正人, 佐藤喜久. 第 24 回日本道路会議論文集. 2001,

p. 274.

- 4) 長谷川和弘, 高橋克則. 環境浄化技術. 2006, vol. 5, no. 4, p. 19.
- 5) 保水性舗装技術研究会. 建設マネジメント技術. 2005, no. 7, p. 35.
- 6) たとえば, 木村建一, 長沢和善, 杉浦正二, 大場孝一. 日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学. 2007, p. 875.
- 7) 谷本潤, 林徹夫, 片山忠久. 日本建築学会計画系論文集. 1997, no. 492, p. 23.
- 8) 山崎元也, 宮脇年彦, 佐藤喜久, 坂田廣介, 高橋克則. 土木学会論文集. submitted.



高橋 克則



藪田 和哉