

連続的に蒸発を行うセメント系保水性舗装材における白華現象 屋外実験における白華進行と蒸発冷却性能低下および X 線回折による白華厚さの把握 Efflorescence on Cementitious Water-retentive Pavement Material Which Keeps Continuous Evaporation

Understanding of the efflorescence progression and the evaporative cooling performance degradation in outdoor experiments and the efflorescence thickness using X-ray diffraction

円井 基史*1 野呂 純二*2
Motofumi Marui Junji Noro

*1 金沢工業大学 Kanazawa Institute of Technology
*2 株式会社 日産アーク Nissan Arc Ltd.

Corresponding author: Motofumi Marui, mmarui@neptune.kanazawa-it.ac.jp

ABSTRACT

Through outdoor experiments using cementitious water-retentive paving block which keeps continuous absorption and evaporation, the progression of efflorescence, the effect on evaporative cooling performance, and the thickness of efflorescence (calcium carbonate) were investigated in this paper. The findings are as follows. 1) In the two outdoor experiments conducted under different climatic conditions, almost all of the pavement surface stained white (efflorescence) after about 9 to 10 months of exposure (integral amount of insolation was about 3000 MJ/m²). After efflorescence, it was confirmed that amount of evaporation decreased to 20 to 25% and the evaporative cooling performance was reduced compared to before efflorescence. 2) Through micro X-ray diffraction analysis, it was confirmed that the peak intensity indicating calcium carbonate was found to be larger and closer to the block surface as the exposure progressed at 4, 26, and 78 weeks. At 78 weeks of exposure, the thickness of calcium carbonate precipitated on the surface was estimated to be about 1.3 mm.

キーワード: 蒸発冷却, 保水性舗装, 白華, X 線回折, 炭酸カルシウム

Key Words : Evaporative cooling, Water-retentive pavement, Efflorescence, X-ray diffraction, Calcium carbonate

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

ヒートアイランド対策の一つとして、雨水を保水し、蒸発冷却効果により夏季の暑熱環境を緩和する保水性舗装が注目され、研究・開発が進行している^{(1)~(6)}。しかし、ほとんどの保水性舗装において保水容量が十分でなく、蒸発冷却の持続期間が短いことが課題に挙げられる。それに対し、これまで円井らは、歩道や広場等を対象として、雨水を面的に貯留し、舗装材の毛管現象により吸水・蒸発を長期間持続させる「蒸発冷却舗装システム」を提案し、屋外実験を通して実用化に向けた研究を進めてきた^{(7)~(10)}。しかしその中で、セメント系保水性舗装ブロック表面に白華（エフロレッセンス）と考えられる白い物質が析出し、ブロック自体は保水しているのにも関わらず蒸発冷却（表面温度低減）性能が低下する現象が確認された。

白華は主に、セメントに含まれる水酸化カルシウム

(Ca(OH)₂) がセメント硬化体の内部に浸入した水に溶出し、それが水分の乾燥に伴い表面に移行し、空気中の二酸化炭素と触れることで炭酸カルシウム (CaCO₃) として表面に析出する現象で知られる。セメントやコンクリートの分野で、白華は主に美観を損ねるものとして問題視され、多くの研究が行われてきた^{(11)~(17)}。保水性舗装など水分蒸発による表面温度低下を目的とする舗装であれば、白華は蒸発を妨げる大きな問題になり得る。しかし保水性舗装の白華に関する研究⁽⁶⁾はまだ少なく、白華の進行による蒸発冷却性能への影響や舗装体内部における白華の構造（厚さなど）に関する調査事例はほとんど見られない。

本報では、蒸発冷却舗装システムの屋外実験で見られた舗装ブロック表面での白華について、その影響の把握や厚さに関する分析を行う。具体的には以下の内容を行う。1) セメント系保水性舗装ブロックを用いた、連続的に吸水・蒸発を行う貯水型試験体の屋外実験（暴露試験）での白華の進行および蒸発冷却効果への影響を、白華の面積率、蒸

発量、表面温度等により把握する。2) 屋外実験において暴露期間の異なる舗装ブロックをサンプリングし、細孔径分布測定を行うとともに、X線回折分析を行い白華の厚さを推定する。

1.2 連続的に蒸発する貯水型舗装システムにおける白華の考え方

(1) 白華の分類

セメント硬化体の表面に発生する白華について、その発生機構や防止法に関する研究は主に1950年代より見られる^{(11)~(17)}。成型後から施工後数日間にかけて練混ぜ水の余剰水等により発生する白華は一次白華、施工後に雨水や地下水など外部から侵入した水により発生するものは二次白華とされる。白華の成分としては、先述した炭酸カルシウムが最もよく知られるが、その他に炭酸ナトリウム(Na_2CO_3)や炭酸カリウム(K_2CO_3)も挙げられる。炭酸ナトリウムと炭酸カリウムは水への溶出度が高く、発生しても洗い流せる一方で、炭酸カルシウムは水への溶出度が低く、ブロック表面に発生すると除去が困難とされる。既報^{(7),(8)}より行なっている蒸発冷却舗装システムにおける屋外実験で見られた白華は、これらの特徴から二次白華で

表1 実験で用いた舗装ブロック(未暴露)の概要データ

項目	数値	備考
ブロック単体の寸法	200×100×60mm	一般的なインターロッキングブロックと同様
水セメント比	32%	保水・吸上げ性能を高めるよう製造。骨材は細骨材のみで粗骨材は使用していない
細孔容積	0.11ml/g	ブロック中央部分より5mm角試料を切り出し、冷凍乾燥機にて乾燥させ、水銀圧入法ポロシメータ(micromeritics製、AUTOPORE2 9220)により測定
細孔比表面積	3.4m ² /g	
密度	2.0g/cm ³	
空隙率	22%	
飽和含水状態の体積含水率	24%	ブロックを24時間水没させた後周囲の水を拭き取った状態と絶乾状態との重量差とブロック体積より算出
吸水速度	15mm/min	ブロック単体を薄く水を張った容器に置き、表面が完全に濡れるまでの時間を計測し算出
絶乾状態の日射吸収率	80%	分光放射計 (Analytical Spectral Devices, Inc.製、FieldSpec Pro FR) (入射角45°)にて測定
飽和含水状態の日射吸収率	92%	

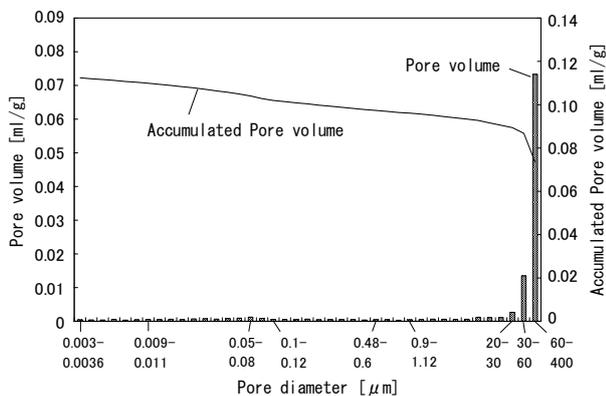


図1 対象舗装ブロック(未暴露)の細孔径分布 (測定方法は表1参照)

あり、成分は炭酸カルシウムだと推測される。

(2) 貯水の影響

現状で普及している保水性舗装のほとんどは、降雨(散水)時、舗装体に保水しきれない水はその下のクラッシュラン(砕石)および地盤に透水するようになっている。一方、円井らが提案している蒸発冷却舗装システム^{(7)~(10)}は、大きな保水容量を確保し蒸発冷却を長期間持続させるため、舗装体(舗装ブロックおよびサンドクッション)の底面と側面を止水し、雨水を貯留する構造となっている。

先述したように白華は主にセメントに含まれる水酸化カルシウム等が水に溶出し、乾燥時に炭酸カルシウム等として表面に析出する現象である。蒸発冷却舗装システムのような貯水型の舗装の場合、水に溶出したカルシウムイオンは、溢流して排出される以外はその舗装システム内に留まり続ける。そのカルシウムイオンは乾燥・蒸発時に毛管現象で運ばれ、長期間連続的に舗装表面で炭酸カルシウムとして析出することになる。貯水型の舗装システムではこのような機構で、一般の舗装に比べて白華の発生が促進されると考えられる。現に既往の白華促進試験法の多くは、本舗装システムと同様に試験体を浸水させた状態で行われている⁽¹⁶⁾。本報で対象とするのは連続的に吸水・蒸発を行う貯水型のセメント系舗装システムであり、以上のことを踏まえた上で分析・考察を行う。

2. 屋外実験における白華進行と蒸発冷却性能への影響

2.1 屋外実験の方法

表2 屋外実験の概要

	実験1	実験2
目的	蒸発冷却舗装システムの基本構成における冷却性能の確認(既報(7)で実験開始)	白華の進行度合いや成分分析
実験場所(期間)	神奈川県横浜市(2004年7月末~2005年7月)	石川県野々市市(2008年7月下旬~)、その後同県白山市に移動(2009年4月~2011年1月)
試験体舗装面積(ブロック個数)	600×600mm(18個)	600×500mm(15個)
基本的な断面構成	上から、舗装ブロック60mm、サンドクッション10mm、砕石+赤土80mm	上から、舗装ブロック60mm、サンドクッション10mm
目地を砂で充填	あり	なし
給水方法	自動給水装置にて1日1回(20時)十分に給水	
満水時の水位	舗装表面より50mm程度下	舗装表面より10mm程度下
測定項目	気象条件(日射量、降水量、気温、相対湿度、風向・風速)、表面温度、蒸発量、表面濡れ率、白華面積率など	主に白華面積率(途中サンプリングしたブロック以外で)
ブロックをサンプリングしての分析	(暴露1年のブロックにて)細孔径分布	(暴露4, 26, 78週のブロックにて)光学顕微鏡観察、紫外線励起-蛍光像観察、電子線マイクロ分析、マイクロX線回折分析

蒸発冷却の基本性能を確認するために既報⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾で行なった屋外実験(実験1とする)に加え、白華の過程を分析するための新たな屋外実験(実験2)を開始した。対象としたセメント系保水性舗装ブロックの概要を表1に、細孔径分布を図1に示す^{注1)}。また実験概要を表2、試験体概要を図2、実験1における測定項目を表3に示す。実験場所は年間を通して日陰になりやすく、また1日1回自動的に給水する装置により舗装ブロックは常に湿潤に保たれる。実験1は神奈川県横浜市にて2004年7月末~2005年7月に実施した。実験2は2008年7月下旬より石川県野々市市で開始し、2009年4月からは石川県白山市に場所を変えて、2011年1月まで暴露試験を行なった^{注2)}。白華が蒸発冷却性能へ及ぼす影響は主に実験1で確認する。実験2では、実験1とは気象条件等が異なる中で白華進行の確認と、次章のイメージング分析で用いる試料採取を行なう。

2.2 結果(白華の進行と蒸発冷却性能への影響)

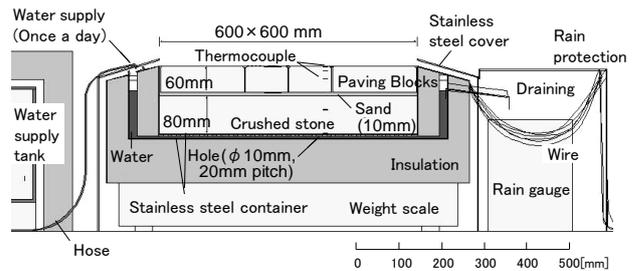
実験1における白華の進行の様子を図3に、1年間の蒸発量、表面濡れ率および、表面温度と気温との差の推移を図4に、さらに、実験開始直後とその約1年後の表面温度を図5に示す。図3のように、対象の舗装ブロックは保水すると濃い灰色となるが、白華すると目視で判別できる白色(明るい灰色)となる^{注3)}。暴露開始の約5週間後の9月

上旬に一部白華が確認された。個々のブロックにおける白華の出方(出る場所、速度)は多少異なるが、試験体全体の白華面積率としては、暴露21週(5ヶ月)ほどで約4割、暴露35週(8ヶ月)ほどで約9割となり、暴露約9ヶ月でほぼ全面が白華した。

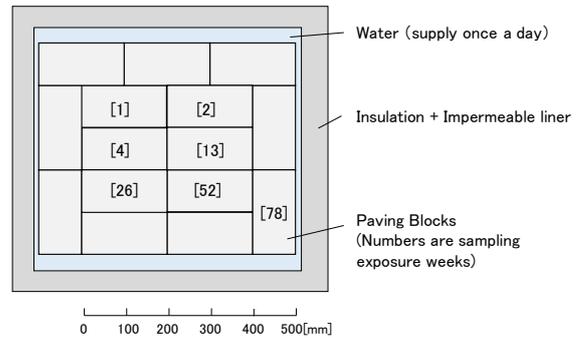
図4(a)より、表面濡れ率(非降水時における表面の濡れ状態について、近赤外水分計を用いて絶対乾燥状態を0、湿潤状態を1として定量化したもの)^(7, 注4)について、実験開始直後は0.9~1であったが、暴露6ヶ月で0.5、暴露9ヶ月で0.25程度まで落ち込むことがわかる。日積算蒸発量について、暴露の経過に伴い減少する傾向が確認できる。2005年1月頃までは日射量の減少に伴う表面温度と飽和水蒸気圧の低下、および白華に伴う表面濡れ率の低下の双方の影響だと考えられるが、それ以降の期間で蒸発量が少ないのは白華の影響が大きいと考えられる^{注5)}。2004年8月(表面濡れ率は0.9~1)と2005年7月(表面濡れ率は0.25程度)に着目すると、晴天日における日積算蒸発量は、2004年8月では5~8kg/m²・day、2005年7月では1~2kg/m²・

表3 実験1における測定項目

区分	測定項目	測定装置	備考	測定期間	測定間隔
舗装システムの熱・水収支	表面温度	φ0.1mmT熱電対	ブロック表面に接着剤で固定	全期間	1分
	表面温度分布	放射温度計(感度波長帯: 8~14μm)	試験体中央部上方2.5m高さ(測定範囲: 250mm円内)に設置		
	蒸発量	重量計(ロードセル式、秤量300kg、分解能2g、秤量皿600×800mm)	風圧、降雨、給水、排水等の影響を考慮して導出	全期間	1分
	排水量	転倒弁式簡易雨量計(分解能: 0.2mm)			
気象条件等	表面の濡れ状態	近赤外水分計	定点5点で手動測定	全期間	1分
	白華面積率	デジタルカメラ	表面の濡れ/乾きによる色の濃淡を撮影 画像処理ソフトで二値化し導出		
	水平面全天日射量	サーモバイロ式日射計(測定波長: 0.3~2.8μm)	周囲に遮蔽物のない場所に設置		
	降水量	転倒弁式雨量計(分解能: 0.5mm)			
気象条件等	気温	通風筒付乾湿球温度計 φ0.1mmT熱電対	試験体近傍、設置高さ0.5m 通風筒付乾湿球温度計の通風筒内に設置	全期間	1分
	相対湿度	通風筒付乾湿球温度計 電子式高分子湿度センサー	乾球温度と湿球温度より算定 通風筒付乾湿球温度計の通風筒内に設置		
	風向・風速	プロベラ式風向風速計(起動風速: 0.3m/s)	周囲に遮蔽物のない場所、設置高さ1m		



(a) 実験1の試験体断面図



(b) 実験2の試験体平面図

図2 試験体の概要

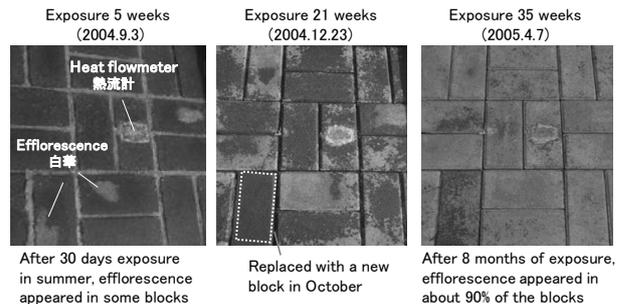


図3 舗装ブロック表面における白華の進行(実験1)

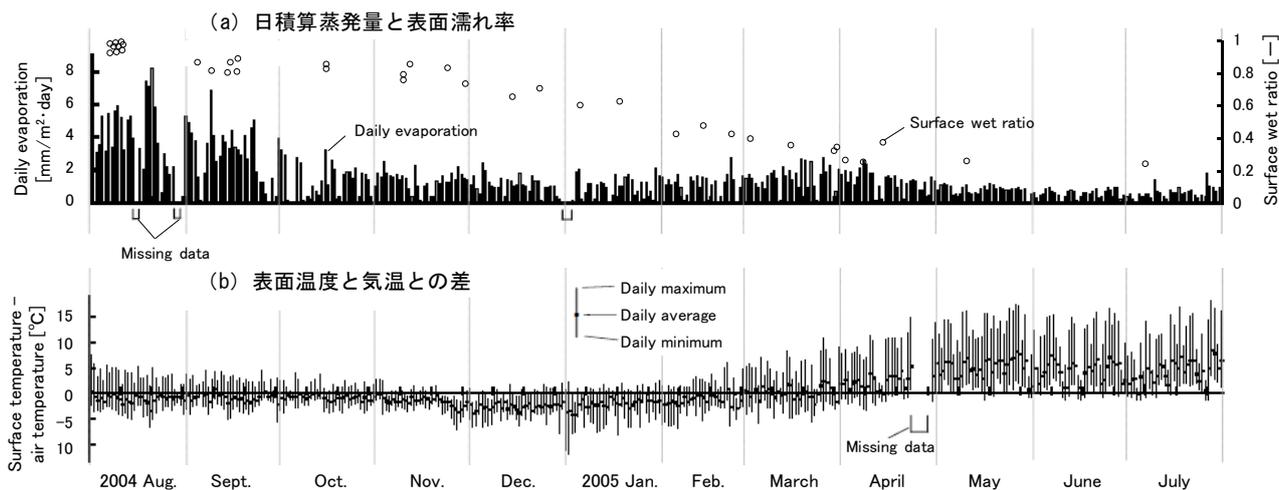


図4 1年間の蒸発量，表面濡れ率，表面温度と気温との差の推移（実験1）

day であり，日射量が同程度でも蒸発量で4～5倍の差があることが確認できる。

表面温度について，白華がそれほど進行していない2004年8月では，日中でも概ね気温+5℃以内であり，夜間では気温より3～4℃低くなることが図4(b)，図5より確認できる。2005年5月（暴露9ヶ月）以降では，表面温度は夜間でも気温を上回り，日最高表面温度は気温+15℃程度まで上昇している。つまり実験1において対象の舗装ブロックでは，暴露9ヶ月でほぼ全面が白華すること，また白華後（2005年7月）は白華前（2004年8月）と比べて同様の気象条件下でも蒸発量は20～25%程度に減少し，蒸発冷却性能も大きく低下することが確認された。

一方実験2では，暴露3週間で白華が部分的に確認され始め，白華面積率は，暴露7ヶ月ほどで約6割，暴露8ヶ月ほどで約9割となり，暴露10ヶ月強でほぼ全面が白華した。気象条件が異なる実験1・2について，図6のように，積算日射量と白華面積率の関係を比較した^{注6)}。実験2（石川県）の積算日射量1700-2000MJ/m²あたりでデータがばらついてるのは，この部分が冬期で，日本海側気候により降水が多く，一時的な回復が生じたものと考えられる。実験1・2において，気象，目地，水位等の条件は異なるものの，積算日射量の増加に伴い白華が進行する傾向は近似しており，暴露開始から積算日射量3000MJ/m²程度でほぼ全面白華に至った^{注7)}。

3. 白華の構造・厚さに関する分析

3.1 細孔径分布

実験1で用いた舗装ブロックについて，未暴露のもの，1年間暴露し白華したものについて，細孔構造に変化があるか確認するため，水銀圧入法（島津製作所製 AutoPore 9505）により細孔径分布を測定した。測定用試料は，ブロック中央の表面より0～1cm（上層），2.5～3.5cm（中層），5～6cm（下層）の部分より採取し，2.5～5mmの粒度に調

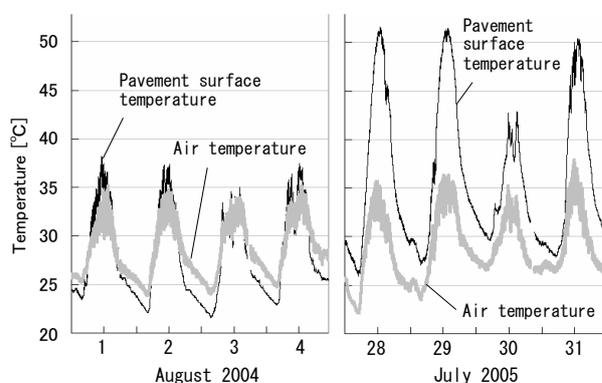


図5 白華の有無における舗装ブロック表面温度の比較（実験1）（2004年8月3日午前中と2005年7月30日は曇りで，それ以外は晴れ）

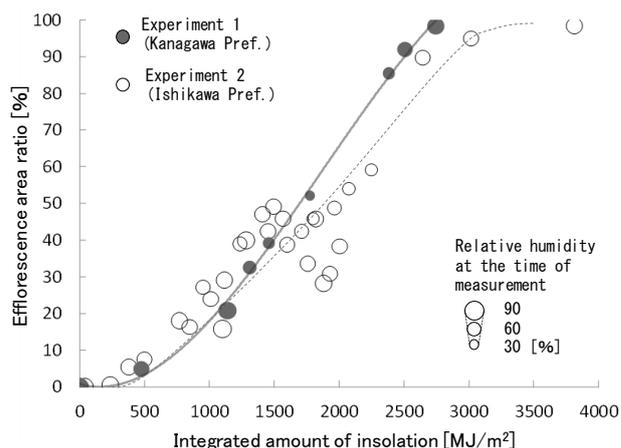


図6 積算日射量と白華面積率との関係^{注6)}

整後，アセトン処理とD-dry処理を行って作製した。測定結果を図7に示す^{注8)}。なおケルビン式から直径0.05μm程度以下の細孔における水は吸湿水（毛管凝縮により吸着される水）と考えられ，また土壌分野では直径数十μm以上の細孔の水を重力水（重力により自由に動く水）とされる

ことから、直径 0.05～数十 μm 程度の細孔の水は毛管水(界面張力により保持された水)と考えられる。

図 7 より暴露 1 年後のブロックでは、直径 10 μm 以上の細孔容積が減り、直径 10 μm 未満の細孔容積が増える結果となった。この傾向は下, 中, 上層の順に顕著である。これはセメントの水和反応の進行による影響があるものと考えられる。暴露 1 年のブロックにおける毛管水に影響する直径 0.1～10 μm の細孔に着目すると、上層が最も細孔量が少ない。白華による影響も考えられるが、今回の試料の厚さは 1cm であり、後述の分析で明らかになる数 mm と考えられる白華の影響を詳細に把握するには至らなかった。

3.2 白華のイメージング分析

舗装ブロック表面での白華厚さを把握するため、変色の観察や炭酸カルシウムの成分検出などのイメージング分析を行う。実験 2 における暴露 4 週, 26 週 (6ヶ月), 78 週 (1 年半) 後のブロックの中央表面より 1cm 角の立方体を切り出し測定試料とした。観察・測定は、光学顕微鏡観察法、紫外線励起-蛍光像観察法、電子線マイクロ分析法、およびマイクロ X 線回折分析法で行なった (表 4) 注 9)。

まず、26 週間暴露した試料の断面を光学顕微鏡により観察した。その結果、試料表面が内部と比較して白くなっている様子がわずかに観察されることが判明したが (図 8)、白華の進行度合いを定量的に把握するには至らなかった。

次に、試料断面を紫外線励起-蛍光像観察法により観察した。本手法は、紫外線の照射により励起し発光する物質を確認するものである。炭酸カルシウムは本手法によりわずかに励起をして発光をすることが確認されたが、本試料に含まれる他の成分で同様に励起されるものもあり、詳細な分析は困難であった。

さらに電子線マイクロ分析法により、炭酸カルシウムに含まれる炭素をはじめとする各元素の面分析を試みた。しかし本手法を行うに際し、試料断面の研磨が必要となり、その際に使用する樹脂の影響を受けてしまうことにより、精密な分析ができなかった。

最後に、試料断面中の炭酸カルシウムをマイクロ X 線回折により面分析を行う方法を試みた。ブロック表面近傍の断面 15mm×3mm に対して 0.5mm ピッチの計 145 ヶ所 (未暴露のみ 12mm×3mm, 115 ヶ所) で X 線回折分析を行なった。結果を図 9 に示す。未暴露の試料では炭酸カルシウム (104 回折) を示すピークはほとんど検出されていないが、暴露 4 週では試料上面 (ブロック表面近傍) 5mm 内の部分でピークが弱いものの検出された。暴露 26 週では、表面近傍 1.5mm 内でピーク強度 (炭酸カルシウム) がより強く確認された。これは、暴露 26 週程度では舗装表面に炭酸カルシウムが析出し始め、それに伴い表面濡れ率と蒸発量が低下したことを裏付けるものといえる。暴露 78 週では、表面近傍 1.3mm 程度に強いピーク強度が顕著に集中し、それより内部 (下部) ではピーク強度はほぼ確認されなかった。これより暴露 78 週では炭酸カルシウムが表面近傍

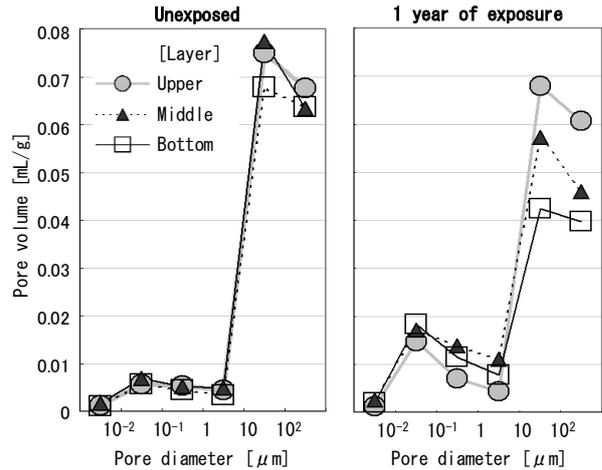


図 7 未暴露と暴露 1 年のブロックの細孔径分布^{注 8)}

表 4 白華のイメージング分析法

分析法	使用機材	概要
光学顕微鏡観察法	光学顕微鏡 (Nikon 製) ECLIPUS L-300	実際の色の変化について反射明視野を観察
紫外線励起-蛍光像観察法	特殊マクロ観察装置 (日産アーク製)	紫外線の照射により励起し発光する物質を確認。可視光域蛍光を結像光学系で画像化。励起波長 (中心波長) : $\lambda = 365\text{nm}$
電子線マイクロ分析法	電子線マイクロ分析装置 (島津製作所製) EPMA-1600	炭素の面分析
マイクロ X 線回折分析法	BRUKER-AXS GADDS with DISCOVER / VANTEC200型	炭酸カルシウムの面分析。ブロック表面近傍の断面 15×3mm において 0.5mm ピッチの計 145 ヶ所で X 線回折分析

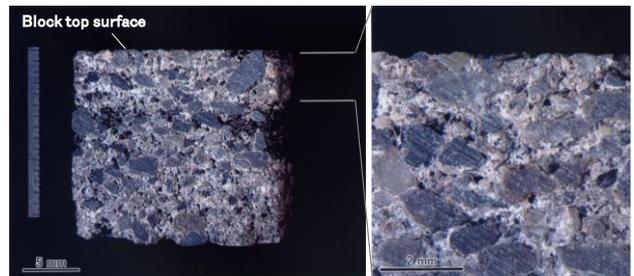


図 8 光学顕微鏡による観察結果 (暴露 26 週)

1.3mm 程度に集中的に析出していたことが推測される。

4. まとめ

連続的に吸水・蒸発を行うセメント系保水性舗装ブロックにおける白華の進行と蒸発冷却性能への影響について、屋外実験 (暴露試験) を通して把握した。また暴露したブロックをサンプリングし、細孔構造の変化を確認するとともに、マイクロ X 線回折分析により表面近傍の白華 (炭酸カルシウム) の厚さを把握した。今回対象としたのは毛管吸水性能に優れたセメント系保水性舗装材 1 種類のみであるが、その中で得られた結果・知見を以下に示す。

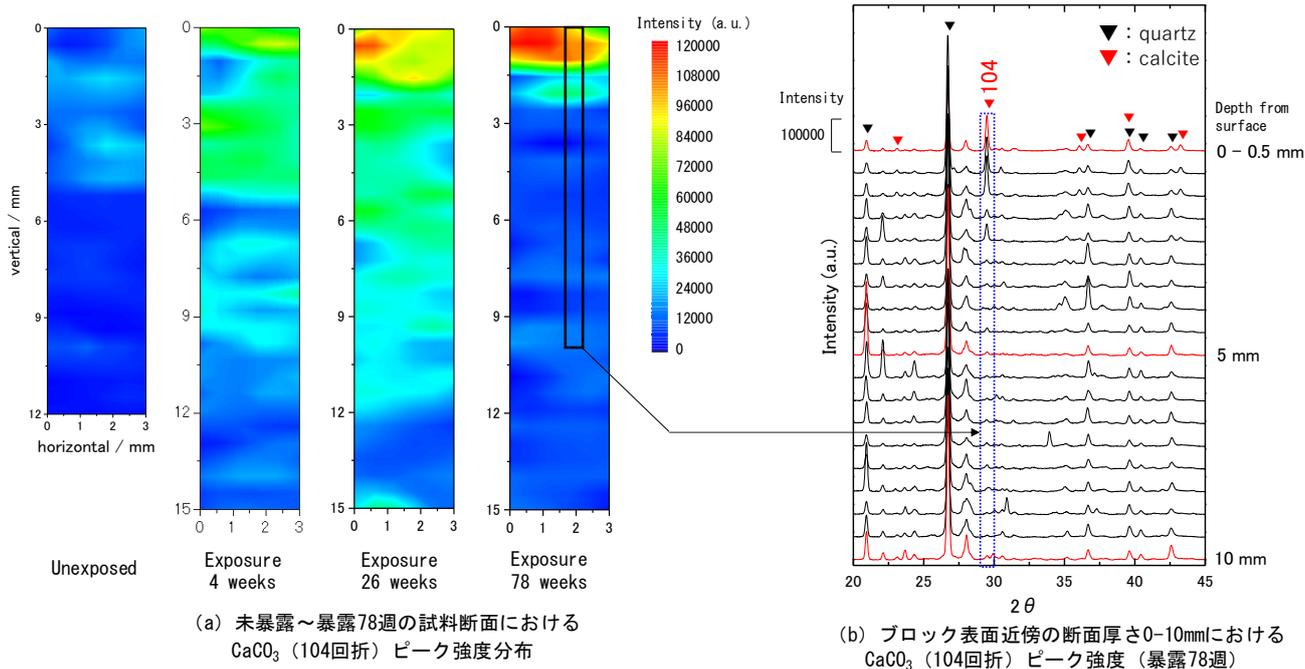


図9 マイクロ X 線回折分析の結果

1) 異なる気象条件下で行なった2つの屋外実験において、ともに積算日射量 3000MJ/m²程度(暴露期間 9~10ヶ月)ではほぼ全面が白華した。白華していない実験開始直後の夏季晴天日では、舗装ブロックの表面濡れ率は0.9~1, 日積算蒸発量は5~8kg/m²・day, 表面温度は日中で概ね気温+5℃以内, 夜間で気温-3~4℃であったが、白華した翌年の夏季晴天日では、表面濡れ率は0.25程度, 日積算蒸発量は1~2kg/m²・day, 表面温度は夜間でも気温を上回り, 日最高表面温度は気温+15℃程度まで上昇した。つまり対象の舗装ブロックでは、暴露9~10ヶ月ではほぼ全面が白華し、白華前と比べて蒸発量は20~25%程度に減少し、蒸発冷却性能が大きく低下することが確認された。

2) 白華(炭酸カルシウム)の厚さを把握するため、細孔径分布測定, 光学顕微鏡観察, 紫外線励起-蛍光像観察, 電子線マイクロ分析, およびマイクロ X 線回折分析を行なった結果、マイクロ X 線回折分析において炭酸カルシウムの定量的な検出に成功した。暴露4週, 26週(6ヶ月), 78週(1年半)と経過するに従い、より表面近傍で炭酸カルシウムを示すピーク強度が強確認された。暴露78週の試料では、炭酸カルシウム成分が表面近傍の厚さ(深さ)1.3mm程度に集中的に析出していた。今後は、この炭酸カルシウムが集中的に析出した部分の細孔構造を把握することが望まれる。

円井らが提案する雨水貯留と毛管吸水に着目した蒸発冷却舗装システムにおける冷却性能について、ブロック表面での白華析出により、数ヶ月程度以上の長期の持続性に課題があることが確認された。セメント系舗装材の白華の機構に関しては、製造ロット, 材令, 養生方法, 外界気象, 目地・サンドクッション, 水位等の諸条件を整理し、暴露

試験データを蓄積した上で、さらなる分析が望まれる。本研究の展開としては、高炉スラグ等を配合したセメント系舗装材および、カルシウム成分を含まないセラミック系舗装材での白華出現および長期的な蒸発冷却性能に関する実験結果について今後報告したい。

謝辞

屋外実験の立ち上げに際して梅干野晃東京工業大学名誉教授と浅輪貴史東京工業大学准教授に、細孔径分布測定に際して湯浅昇日本大学教授に指導・助言を受けた。本研究の一部は、文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業「生命工学を応用した資源循環型社会の構築に関する研究」の一環として行われた。ここに記し、深謝の意を表す。

注

注1) 表1, 図1の測定で対象とした舗装ブロックは、実験1・2で用いたものと同種だが、必ずしも製造ロットは同一でない。また、本研究で用いたブロックの材令や養生方法は管理されていない。これら製造ロット, 材令, 養生方法等により、細孔径分布や揚水性能, 白華の出現の程度に多少の差異が生じる可能性がある。

注2) 実験場所が異なるのは、筆者の異動と研究環境によるものである。

注3) 降水時および降水後数時間は、白華した部分でも濡れて濃い灰色となる。白華面積率や表面濡れ率の測定・分析において、それらの時間は対象外としている。

注4) 表面濡れ率は次式で導出した。

$$\omega = (x - Ld) / (Lw - Ld)$$

ここで、 ω : 表面濡れ率[-], x : 任意の含水状態における近赤

外水分計の指示値[-], L_w : 飽和含水状態における近赤外水分計の指示値[-], L_d : 絶乾状態における近赤外水分計の指示値[-]. なお既報⁹⁾において, 表面濡れ率と蒸発効率との間に一定の関係性を確認している. 今回, 表面濡れ率は定点5点で測定したが, 白華のばらつきを吸収するにはやや少ないため, この点は今後の課題としたい.

注5) ここでの表面濡れ率と蒸発量の低下について, 冬期の凍結によるブロック細孔の破壊に伴う毛管水みちの断裂や, 黄砂, 粉塵, サンドクッションに含まれる粘土等の影響の可能性も考えられる. ただし, 既報⁹⁾における本報と同種ブロックを用いた従来型の保水性舗装における越冬後の蒸発量, および, 本報後に行なった別の舗装材を対象とした暴露試験結果等を踏まえると, 上記の凍結, 黄砂, 粘土等の影響は限定的だと考えられる.

注6) 実験2では試験体近傍での気象条件を測定していないため, 日射量については近隣(輪島, 富山, 福井)のアメダスデータの平均値を, 相対湿度は金沢のアメダスデータを用いた.

注7) 実験1, 2は, 実験場所, 試験体の面積, 断面構成, 目地の砂, 満水時の水位等が異なっている. これらの異なった条件下では白華出現の程度に差が生じる可能性も考えられる. 筆者らは本報の実験後, 10種類程度の異なる保水性舗装材を対象に白華に関する暴露試験を数回(種)行なっている. その中で, 白華の大きな要因は, 上述した条件よりも, 「舗装材がセメントを含む」「降水が舗装システム内に貯水される」「舗装表面で連続的に蒸発が継続する」ことであると考察している.

注8) 未暴露の中層については表1, 図1と同様の測定となるが, 測定の時期や装置は異なる.

注9) 暴露26週または78週の試料をサンプリング後に分析を開始した. 採取試料は分析までの間, 室内にて気乾状態で保管した. 保管中の試料について, 水和反応の進行等は考えられるが, 気乾状態であり白華の進行はないものと考えられる.

参考文献

- (1) ヴタンカ, 浅枝隆, ユスフ ムハマド アブ: 地中水分の分散を利用した夏季の舗装表面の温度緩和-保水性舗装の利用一, 水工学論文集, 第40巻(1996-2), pp.449-454.
- (2) 福田萬大, 越川喜孝, 辻井豪, 浅枝隆, 藤野毅: 夏季に給・散水した保水性舗装の熱環境緩和特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.613/V-42(1999-2), pp.225-236.
- (3) 赤川宏幸, 小宮英孝: 表面を連続的に湿潤できる舗装体に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, 第530号(2000-4), pp.79-85.
- (4) 国土交通省関東地方整備局: 報道記者発表資料「環境舗装東京プロジェクト」(2004-5).
- (5) 陳偉嬌, 水谷章夫, 大澤徹夫: 日射を受けた常時濡れ面での蒸発冷却効果及び蒸発性能の劣化-吸水機能を有する透水性アスファルト舗装材の蒸発冷却効果に関する研究(その2), 日本建築学会環境系論文集, 第610号(2006-12), pp.27-34.
- (6) 足永靖信, 武田仁: 保水性建材を設置した建物の表面温度及び熱負荷に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, 第701号

(2014-7), pp.615-621.

- (7) 円井基史, 梅干野晃, 浅輪貴史, 板津佳恵: 蒸発冷却舗装システムの基本性能に関する夏季屋外実験-都市熱環境改善に向けた蒸発冷却舗装システムとその予測評価手法の開発 その1, 日本建築学会環境系論文集, 第600号(2006-2), pp.51-58.
- (8) 円井基史, 梅干野晃, 浅輪貴史, 板津佳恵: 蒸発冷却効果を有する舗装体の表面濡れ状態に着目した熱・水収支特性の把握-都市熱環境改善に向けた蒸発冷却舗装システムとその予測評価手法の開発 その2, 日本建築学会環境系論文集, 第610号(2006-12), pp.75-82.
- (9) 円井基史, 梅干野晃, 浅輪貴史: 毛管吸水性能を有する保水性舗装の含水状態と表面濡れ状態を考慮した熱・水収支モデルの開発, 都市熱環境改善に向けた蒸発冷却舗装システムとその予測評価手法の開発 その3, 日本建築学会環境系論文集, 第653号(2010-7), pp.577-584.
- (10) 梅干野晃, 円井基史, 松本明広, 浅輪貴史: 雨水貯留と毛管吸水に着目した蒸発冷却舗装システムにおける夏季屋外実験による舗装体の形状と断面構成の検討, 日本ヒートアイランド学会論文集, Vol.6(2011-11), pp.30-38.
- (11) Report of building research: Bond with report of director of building research(1927).
- (12) 小坂賢二, 平野英作: 鉄筋コンクリート造建物の耐久性増進に関する研究-地上壁体の防水とエフロレッセンスの防止について, 日本建築学会研究報告, 第27号(1954-5), pp.29-30.
- (13) 竹本国博, 高橋秀夫, 東海林正, 牧野弘志: セメント製品の白華発生に関する基礎的研究, セメント・コンクリート, 第191号(1963-1), pp.15-25.
- (14) 斎藤鶴義, 石井四郎: エフロレッセンスを防ぐには-セメント製品の白華とその防止法, 建築技術, 第209号(1969-1), pp.73-84.
- (15) 寶旦晏: エフロレッセンス, セメント・コンクリート, 第409号(1981-3), pp.48-52.
- (16) 真野孝次, 飛坂基夫, 熊原進: セメント系材料の白華試験方法の検討 その1. モルタル試験体を用いた場合の諸条件の検討, 日本建築学会関東支部研究報告集(1982-7), pp.317-320.
- (17) 松尾隆士, 田中享二, 石崎武志: 鉄筋コンクリート補強された歴史的煉瓦造建造物に生じる白華現象のメカニズム: 煉瓦中の含水量が白華現象に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第587号(2005-1), pp.23-29.

(Received October 25, 2021, Accepted April 15, 2022)