生命工学に基づく生活・居住環境づくりと共生に関する研究グループ

ＲＣ構造物の緑化に関する研究

湯浅 昇（建築工学科）　梅干野 晁（東京工業大学）

1. はじめに

本研究は、生命工学、建築材料学の見地から、都市のヒートアイランド現象について多面的な評価・検証を行い、鉄筋コンクリート（ＲＣ）構造物の緑化の効果を検証すると共に、コンクリートの組織、細孔の性質を制御したコンクリート緑化技術を開発することを目的としている。また、コンクリート表層を含めた地表面被覆、つまりは都市・建築の外皮において、植物や土壌が持つ蒸発冷却効果の利用といった生命工学的な観点に着目し、環境負荷が少なく快適な居住環境づくりのための建築材料の開発、ならびに、その材料を適用した都市空間の創出に取り組んでいる。

その中で本年度は、1）コンクリートの水セメント比が植物の付着に及ぼす影響、2）コンクリートの品質とコケ植物の付着・生育、3）緑化および断熱材がコンクリートスラブの温度上昇・蓄熱に及ぼす影響、4）蒸発冷却舗装システムにおける保水量と表面濡れ率に着目した熱・水収支モデルの開発、の 4 テーマについて研究を進めた。それぞれの研究経過および成果を報告する。

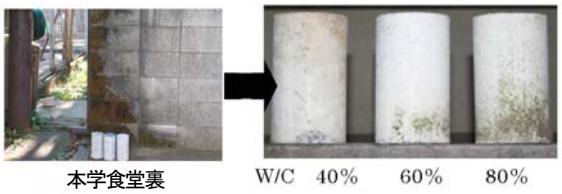


図１　暴露状況と観察結果の例（習志野）

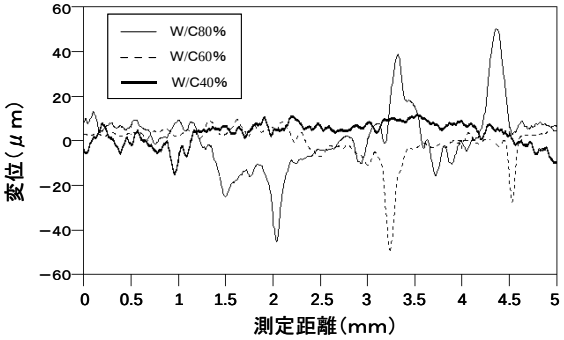


図２　表面形状(凹凸度)の測定結果（上尾）

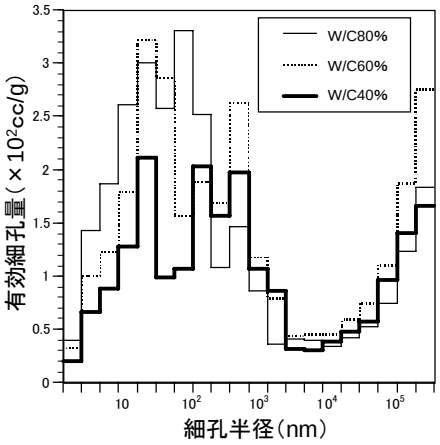


図３　細孔径分布測定結果（八王子）

2. コンクリートの水セメント比が植物の付着に及ぼす影響

2-1. 研究の概要

都市緑化の研究は数多く行われているが、コンクリートを素地とした緑化手法についての研究例は少なく、コンクリートと緑の融和が図られているとは言えない [1)]。本研究は、藻類をはじめとした植物がコンクリートに自然に付着・生育する様子を調査し、植物が付着・生育可能なコンクリートの品質を検討することを目的としている。ここ

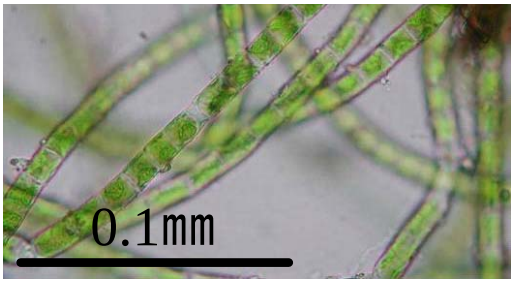


図４　付着した植物の実体顕微鏡写真
（クレブソルミディウム）（習志野）

では、水セメント比の異なるコンクリート試験体について、藻類や蘚苔類がすでに繁殖している場所に約1年間暴露した結果について報告する。

2-2. 研究経過および成果

水セメント比（以下 W/C）80%、60%、40%のコンクリート試験体（打設日：2006 年 7 月 4 日）をそれぞれ 1 体ずつ、①東京都八王子市、②埼玉県上尾市、③本学構内（千葉県習志野市）の異なる 2 箇所、④日大軽井沢研修所（長野県軽井沢町）の 4 地点、計 5 箇所において、2006 年 9 月上旬より暴露を開始した。場所の選定は、実際の植物の生育状況を見て、藻類等の自然発生が期待できる場所とした。

図 1 に暴露状況と観察結果の一例を示す。全ての地域において、W/C80%、60%、40%の順に藻類等の緑色植物が多く付着していた。暴露を開始して約 15 ヵ月後の 2007 年 12 月に暴露した試験体を回収し、表面の硬度 [2]、形状（凹凸度）（図 2）、表面近傍 10 mm部分の細孔径分布 [3]（図 3）、そして中性化深さを調査した。水セメント比が大きいほど、表面の硬度が小さく、凹凸度が大きく、表面近傍の組織が粗く（細孔量が多く）、中性化が進んでいることが確認された。本学構内の試験体において、最も多く確認された植物は、藻類のクレブソルミディウムであった（図 4）。その他にもクロレラ、クロオコックスといった藻類が確認された。

3. コンクリートの品質とコケ植物の付着・生育

3-1. 研究の概要

本研究は、「侘び」・「寂」といった日本が培ってきた芸術性を踏まえ、これまで芸術の表現素材とならなかったコンクリートの同素材化を図ることに取り組んでいる。コンクリート表面にコケが（直接的に）付着し生育が可能なコケ緑化コンクリートがその一つである。

昨年度は、人工被覆面に付着するコケについて、その場所の空間形態に着目して生育条件を考察すると同時に、コケ植物の熱・水収支および植物種について調査した [4]。今年度は、水セメント比やセメント種類、表面仕上げ、コケ種類等の異なるコンクリート試験体を用いて屋外実験を行い、コ

表 1　コケ付着実験における試験体の一覧

No.	試験体略称	変更パラメータ	コンクリートの調合	その他試験条件
1	標準	－	普通ポルトランドセメント、大井川産川砂・砂利を使用。1mm格子網戸により表面加工。中性化促進、下地材なし。スナゴケを採用。暴露環境は日陰。	
2	W/C60%	水セメント比		
3	W/C100%			
4	高炉50%	セメント種	No.1（標準）のセメント重量50%分を高炉スラグ微粉末で置換	No.1（標準）と同じ
5	高炉70%		No.1（標準）のセメント重量70%分を高炉スラグ微粉末で置換	
6	フライ20%		No.1（標準）のセメント重量20%分をフライアッシュ（Ⅰ種）で置換	
7	フライ50%		No.1（標準）のセメント重量50%分をフライアッシュ（Ⅰ種）で置換	
8	ゼオライト	添加物	No.1（標準）のセメント重量20%分の人工ゼオライトを添加	
9	液肥		No.1（標準）の全容積0.15%分の液肥を添加	
10	中性化1週	中性化促進	No.1（標準）と同じ	中性化促進装置に1週間
11	中性化4週			中性化促進装置に4週間
12	表面加工なし	表面加工		表面加工なし
13	酸漬け			表面加工なしの試験体の表面10mmを塩酸10%希釈溶液に80時間浸漬
14	網＋酸			表面網目加工の試験体の表面10mmを塩酸10%希釈溶液に80時間浸漬
15	下地材あり	下地材		コンクリートとコケの間に10mmの土（樹皮培養土）を設置
16	アオギヌ・ハネヒツジ	コケ種		アオギヌゴケ、ハネヒツジゴケを使用
17	ハマキゴケ			ハマキゴケを使用
18	ハイゴケ			ハイゴケを使用
19	日向	暴露環境		半日向となる場所に暴露

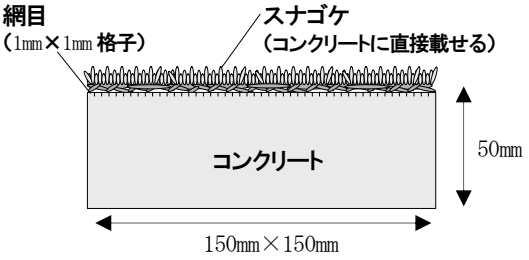


図 5　基本とした標準試験体（No.1）の断面図

表 2　測定項目・方法

測定項目	測定方法
pH（アルカリ度）	コケの付着したコンクリート表面の一角を測定箇所に固定し、測定時はコケを持ち上げ、純水を滴下し、pH試験紙（Whatman社製）で測定（No.16の下地材ありの試験体では下地材（土壌）表面のpHを測定）
根付き強さ	手でコケに水平方向に軽い力をかけ、動くか判定。根付き強さとして、動く（弱）、一部動く（中）、動かない（強）の3段階で評価
生育状況	目視および写真撮影による判読
代表気象条件（日射量、気温、相対湿度、風向・風速、雨量）	試験体を設置した場所（建物北側）の脇の建物（4階建て）屋上に気象観測装置を設置し、5分間隔で自動計測（試験体と気象観測装置を設置した場所の環境が異なる点を、データ取り扱い時に考慮する必要あり）

表 3　全試験体の pH の推移

（コンクリート打設日は 7 月 3 日）（コケは（中性化促進させた試験体を除いて）7 月 10 日に載せた）

試験体No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	標準	W/C 60	W/C 100	高炉 50	高炉 70	フライ 20	フライ 50	ゼオライト	液肥	中性化 1週	中性化 4週	表面加工なし	酸浸け	網＋酸	下地材あり	アオギヌ･ハネ	ハマキ	ハイゴケ	日向
パラメータ	－	水セメント比		セメント種				添加物		中性化促進		表面加工			下地材	コケ種			暴露環境
7月10日	10	10	10	10	10	10	10	10	10	ー	ー	10	6	6	6	10	10	10	10
7月12日	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	11	ー	ー	10	5	5	6	11	10.5	9.5	11.5
7月17日	9.4	9.4	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	10	ー	ー	10	6	6	6	9.7	9.7	9.7	11
7月20日	8	9.7	9	7	9.4	9.4	8	8	8.2	ー	ー	9	8.2	7	6	8	7	9.1	8.5
7月24日	7	8.6	8	7	7.5	8	7	8	7	9.5	ー	7	6.5	7	6.5	7	7.5	8	7.5
7月31日	7.5	7.5	7.5	7.5	7	7.5	7.5	7.5	7.5	7	ー	7	6.5	6	6.5	6.5	6.5	6.5	7
8月6日	6.5	7	6.5	6.5	7	7.5	7.5	7	7	7	ー	6.5	6.5	6.5	6.5	7	7	7	6.5
8月13日	6	6.5	6.5	6	6	6.5	6.5	6.5	6	6	6.5	6	6	6	6	6.5	6	6.5	6.5
8月21日	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
8月28日	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
9月4日	6.5	7	6.5	6.5	6.5	7.5	6	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6	6	6	6	6.5	6.5	6.5
9月11日	7	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6	6.5	6.5	6	6.5	6.5	6	6	6	6	6	6	6
9月18日	6.5	6	6.5	6	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6	6	6	6	6	6	6	6	6.5
9月25日	6.5	6	6.5	6	6.5	6.5	6	6.5	6	6.5	6	6.5	6	6	6	6	6	6.5	6
10月2日	6	6	6	6	6	6	6	6.5	6.5	6	6.5	6	6	6	6	6	6	6.5	6
10月9日	7	7	7	7	6	7	7	7.5	6.5	7.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7	6.5	6.5	6.5	7
10月16日	6.5	6.5	7	6.5	6	6.5	6.5	6.5	7	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7
10月23日	6.5	6.5	6.5	6.5	6	6.5	6.5	7	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7	6.5	6.5	6.5	6.5

ケの付着、生育状況の調査を行った。

3-2. 研究経過および成果

試験体一覧を表 1 に示す。基本とした標準試験体（No.1）（図 5）は、アルカリ性低減、高空隙率の観点より、水セメント比は一般的には高めの 80%とし、型枠に 1㎜×1㎜ 格子の網を設置し、コケを載せる表面に網目を付けた。コケは緑化材としての生産性の高さ、景観性の観点からスナゴケを基本とし、暴露環境は風の弱い日陰（本学構内 32 号館北側脇）とした。測定項目・方法を表 2 に示す。コンクリートの打設は 2007 年 7 月 3 日、コケを載せて暴露を開始したのは 7 月 10 日である。本実験で得られた結果・知見を以下にまとめる。

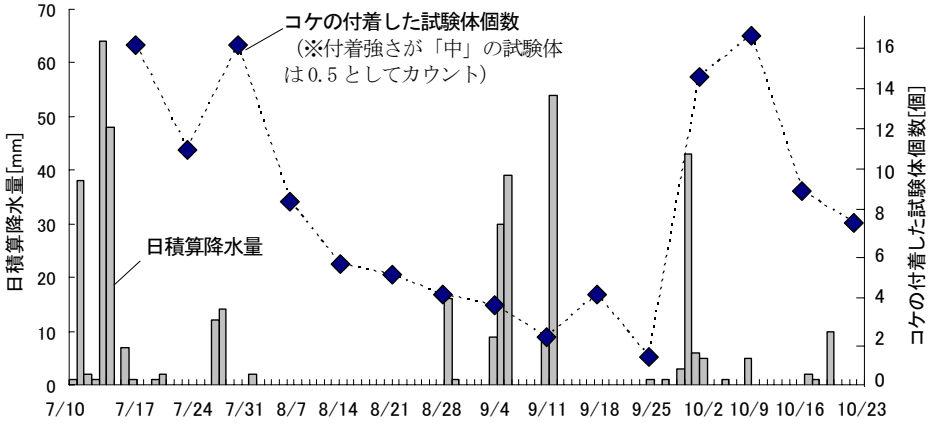


図 6　日積算降水量とコケの付着した試験体個数の推移

（2007 年 7 月 10 日～10 月 23 日）

1）コケを載せたコンクリート表面において、2～3 週間程度で pH の低下がみられた（表 3）。

2）降雨が連続した期間では多くの試験体でコケの付着が確認された（図 6）。

3）コケの付着が長期間確認された試験体は、水セメント比 80%、100%、および、液体肥料を混入させた試験体（すべて普通ポルトランドセメントを使用、コケ種はスナゴケ）であった。

4. 緑化および断熱材がコンクリートスラブの温度上昇・蓄熱に及ぼす影響

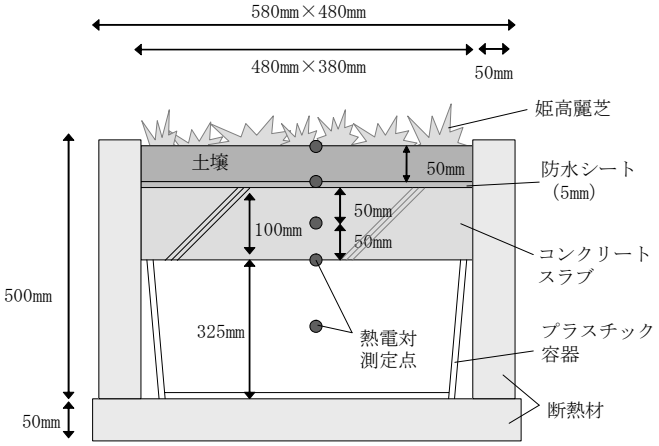
4-1. 研究の概要

緑化や断熱材は、建築外皮として外界の気象変化に対する緩衝体となり、表面そして躯体内部温度の高温化（あるいは低温化）を防ぎ、躯体の保護（高耐久化）そして室内の空調負荷低減の効果が期待される点で共通している。その効果の程度は、緑化の種類や断熱の工法により異なると考えられるが、これまでの研究でその点を明らかにし

たものはない。本研究では、緑化として芝、セダム、コケによる植栽、断熱として外断熱、内断熱を施したコンクリートスラブ試験体を用いて屋外実験を行い、緑化種類や断熱工法の違いがコンクリートの温度変化に及ぼす影響について検討した。

4-2. 研究経過および成果

試験体の概要を図 7 に示す。実験場所は周辺建物の陰にならないよう考慮して本学 32 号館（4 階建て）屋上とし、測定は 2007 年 7 月中旬より開始した。得られた結果・知見を以下に示す。

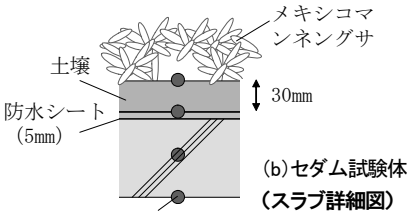


(a)芝試験体（試験体断面図）

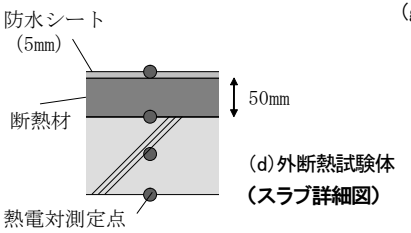
	学名	日射反射率[-]	備考(生育状況など)
姫高麗芝	Zoysia matrella	0.14～0.30程度※	8月上旬より一部枯れ始め、8月下旬には大部分が枯れた
メキシコマンネングサ	Sedum mexicanum	0.15程度※	7月中旬の葉丈(鉛直高さ)は40mm程度、その後徐々に成長が見られ、9月上旬には70mm程度
スナゴケ	Racomitrium canescens (Hedw.) Bird.	0.15～0.20程度※	降雨がないとカラカラに乾燥するも、降雨後1～2日は保水し色も鮮やかとなる
断熱材	—	—	熱伝導率は0.020[W/m・K]、厚さは標準的な仕様として50mmとした
防水シート	—	0.25	—

※今後測定予定(数値は既往研究での値)

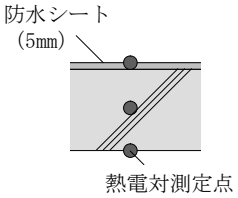
(g)使用材料の概要



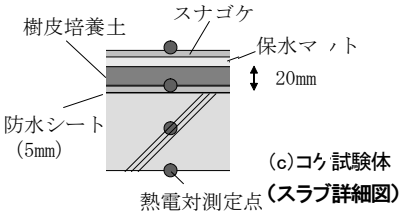
(b)セダム試験体
（スラブ詳細図）



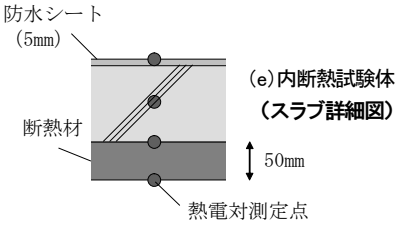
(d)外断熱試験体
（スラブ詳細図）



(f)無対策試験体
（スラブ詳細図）



(c)コケ試験体
（スラブ詳細図）



(e)内断熱試験体
（スラブ詳細図）

図 7　緑化・断熱実験における試験体の概要

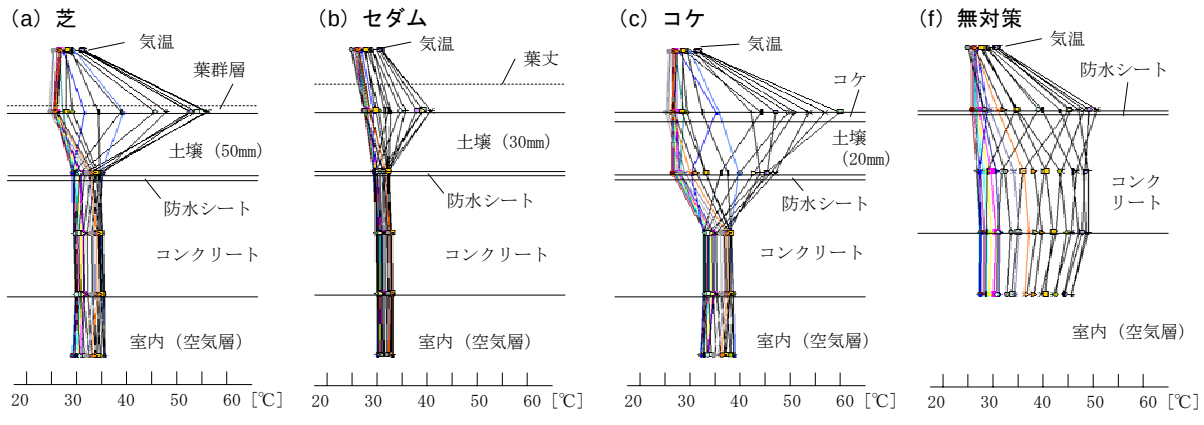


図 8　緑化された試験体における断面温度分布の日変化の例(2007 年 8 月 5 日)(1 時間毎)

1）夏季晴天日において、緑化または外断熱を行った試験体のコンクリート温度は、無対策および内断熱の試験体に比べて昼夜の温度変化幅が小さく、また日平均温度も低く抑えられることが確認された（図8、9）。

2）コンクリート屋根スラブに緑化を施した場合、植栽が十分な保水状態にあれば、緑化層の蒸発冷却効果、低熱伝導率性により表面温度ならびにコンクリート温度が低くなることが確認された。外断熱工法においては、蒸発冷却効果は見込めないものの、コンクリートの高温化抑制という点では、緑化と比較してもある程度の効果があることが認められた。

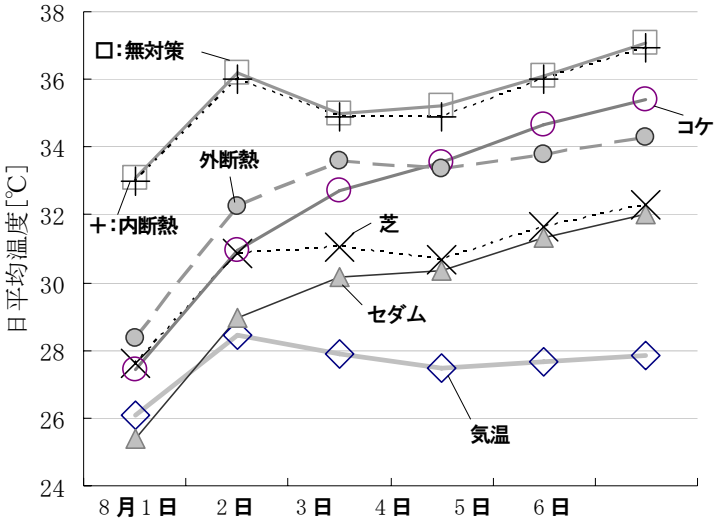
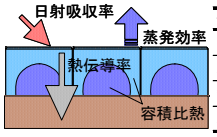


図9 コンクリートスラブ中央温度の日平均値の推移
（2007年8月1日～6日）



モデル化のパラメータ	対応する部分	値の決定要因
日射吸収率 ［－］	舗装ブロック表面	舗装表面の水分量（表面濡れ率）
蒸発効率 ［－］		
熱伝導率 ［W/m･K］	舗装ブロック本体および空隙	舗装システムの水分量（空隙保水量･含水率）
容積比熱 ［kJ/m³･℃］		

図10 ブロック吸水アーチ型試験体の断面構成とモデル化すべき物性パラメータ

5. 蒸発冷却舗装システムにおける保水量と表面濡れ率に着目した熱・水収支モデルの開発

5-1. 研究の概要

筆者らはこれまで、雨水貯留と舗装体の毛細管現象に着目した「蒸発冷却舗装システム」を提案し、その性能を夏季屋外実験により確認してきた[5)]。本研究では、そこでの実測データを用いて、蒸発冷却性能を予測・評価するための熱・水収支モデルの開発を行った。具体的には、下層に中空部分を持ち、毛管吸水能力の優れたブロックを用いた蒸発冷却舗装システム（図10）を対象に、乾燥過程における保水量変化を考慮した上で、日射吸収率、蒸発効率、熱伝導率、および容積比熱についてモデル式を作成した。

5-2. 研究経過および成果

乾燥過程における舗装システム

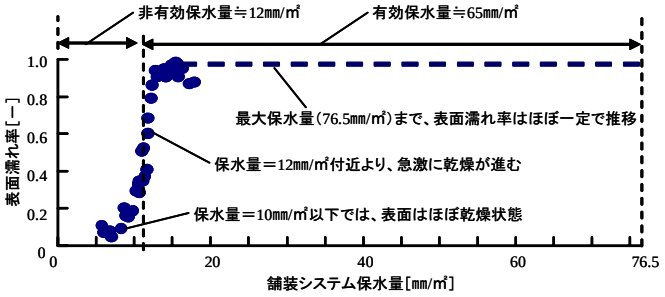
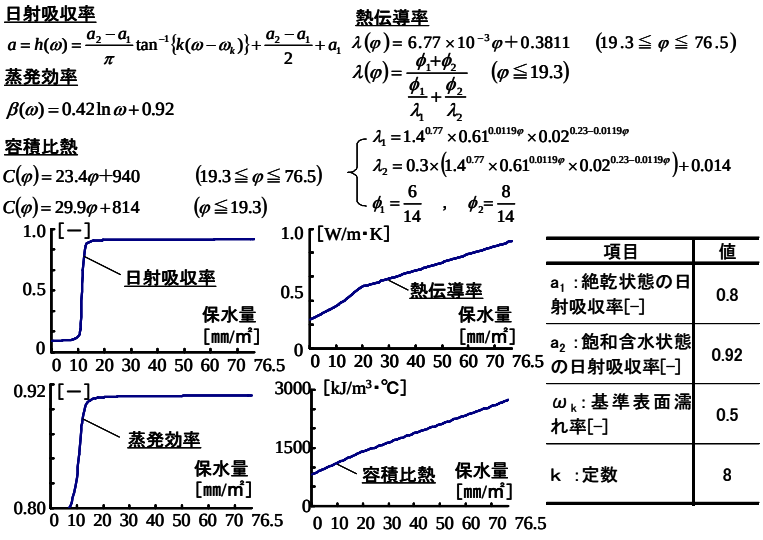


図11 乾燥過程における保水量と表面濡れ率の関係（実測結果）



項目	値
a_1 ：絶乾状態の日射吸収率[－]	0.8
a_2 ：飽和含水状態の日射吸収率[－]	0.92
ω_k ：基準表面濡れ率[－]	0.5
k ：定数	8

図12 各物性パラメータの定式化

内の保水量と表面濡れ率[5]の関係を把握するため実測を行った。その結果（図 11）より、夜間におけるブロック表面の濡れ戻り現象（ブロック内部の鉛直含水率分布の均一化と表面での吸湿による表面濡れ率の上昇分）については体積含水率と相対湿度に影響されることを踏まえた上で、表面濡れ率を保水量の関数としてモデル化した。さらにその結果を踏まえ、日射吸収率、蒸発効率、熱伝導率、容積比熱を図 12 に示すように、舗装システム内保水量の関数として定式化した。

モデル式による表面温度の計算結果と屋外実験での実測値を比較し、熱・水収支モデルの妥当性を検討した（図 13）。日中の最高表面温度における両者の差は１℃以内であった。モデル化において夜間の濡れ戻り現象を考慮したことにより、考慮しないモデルに比べ、夜間の計算値がより実測値に近づくことが確認された。

6. まとめ

得られた結果、知見を以下にまとめる。

(1) 水セメント比の異なるコンクリート試験体を用いて約 1 年間の暴露試験を行った結果、水セメント比が大きいほど植物の付着が見られた。本学構内（千葉県習志野市）において最も多く確認された植物は、藻類のクレブソルミディウムであった。その他にもクロレラ、クロオコックス等の藻類が確認された。

(2) 品質の異なるコンクリートにコケを載せた試験体を用いて、コケの付着・生育状況の調査を行った結果、降雨が連続した期間では多くの試験体でコケの付着が見られた。コケの付着が長期間確認された試験体は、水セメント比 80%、100%、および、液体肥料を混入させた試験体（すべて普通ポルトランドセメントを使用、コケ種はスナゴケ）であった。

(3) 被覆の異なるコンクリート試験体を用いて、夏季屋外実験を行った結果、コンクリートスラブ

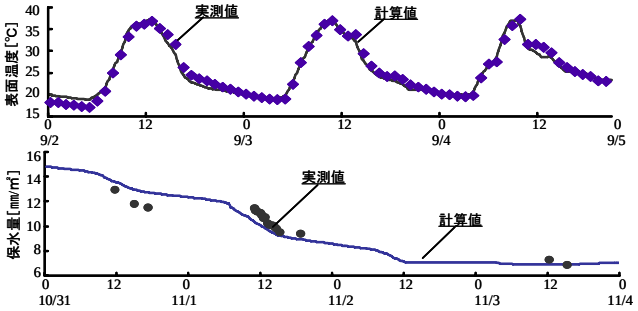


図 13　熱収支シミュレーションにおける計算値と実測値の比較

に緑化を施した場合、植栽が十分な保水状態にあれば、緑化層の蒸発冷却効果、低熱伝導率性により表面温度ならびにコンクリート温度が低く保たれることが確認された。外断熱工法については、蒸発冷却効果は見込めないものの、コンクリートの高温化抑制という点では、緑化と比較してもある程度の効果があることが認められた。

(4) 下層に中空部分を持ち、毛管吸水能力の優れたブロックを用いた蒸発冷却舗装システムを対象に、乾燥過程における保水量変化を考慮した熱・水収支モデル（熱収支シミュレーション用の伝熱モデル）の開発を行った。また、計算値を実測結果と比較し、その妥当性を確認した。

謝辞

「蒸発冷却舗装システムにおける保水量と表面濡れ率に着目した熱・水収支モデルの開発」の研究テーマは、東京工業大学大学院生の松本明広氏の修士論文として行われたものである。ここに記し、深謝の意を表す。

参考文献

1)　柴田彩子、湯浅昇、大島明、松井勇：竣工後 33 年を経過した打ち放しコンクリート外壁に付着した生物、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 325-326、2005. 9

2)　湯浅昇、笠井芳夫、松井勇、篠崎幸代：引っかき傷によるコンクリートの強度試験方法の提案、シンポジウム：コンクリート構造物の非破壊検査への期待　論文集（Vol. 1)、pp. 115-122、2003. 7

3)　湯浅昇、笠井芳夫、松井勇：乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率、細孔構造の不均質性、日本建築学会構造系論文集、No. 509、pp. 9-16、1998. 7

4)　円井基史、湯浅昇、梅干野晃：人工被覆面に付着・生育するコケ植物の実態調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1、pp. 649-650、2007. 8

5)　松本明広、梅干野晃、浅輪貴史、円井基史：蒸発冷却舗装システムにおける舗装体の材質と形状に関する検討　毛管吸水に着目した雨水利用型の蒸発冷却舗装システムの開発 その 1、日本建築学会大会学術講演梗概集　環境工学Ⅱ、pp. 665-666、2006. 9