

蒸発冷却利用の環境親和型クラディングのための 基礎実験と予測計算

Basic Experiments and Simulation for Symbiotic Evaporative Cooling Cladding

吉浦 温雅*¹ 奥山 博康*¹
Atsumasa Yoshiura Hiroyasu Okuyama

*¹ 神奈川大学 Kanagawa University

Corresponding author: Atsumasa Yoshiura, yoshiura@kanagawa-u.ac.jp

ABSTRACT

In this study, basic experiments and predictive calculations using a terracotta wine-cooling pot were performed to develop a cladding for evaporative cooling by internal water and to build a calculation model for predicting the performance. A terracotta panel with hollows for external wall cladding is already found in the market and possible development can be expected after some modification. Experiments on pots that accumulate water showed that the surface temperature was lower than ambient temperature by about 5 °C in a room with ambient temperature 20 °C and absolute humidity of 0.0044kg/kg'. The wetted area ratio of the outer surface of the pot filled with water was estimated to be 0.55 when the surface convective transfer coefficient of vertical wind velocity was 0.3 m/s. The results from the calculation model for predicting the evaporative cooling effect of the pot were consistent with the experimental results.

キーワード: 蒸発冷却, クラディング, 基礎実験, シミュレーション

Key Words : Evaporative cooling, Cladding, Basic Experiments, Simulation

1. はじめに

ヒートアイランドの対策の一つとして、壁面を構成する部位に水を吸収させて蒸発冷却効果により壁面を冷却する方法が注目され、研究開発が進められている^{(1)~(12)}。これらの方法は、蒸発冷却を生じさせる部位として、壁体自体^{(1)~(7)}のカルーバー⁽⁸⁾⁽⁹⁾または外装材^{(10)~(12)}を選択するものの三種類に分けられる。そのうち、外装材に水を吸収させて蒸発冷却効果を得る方法は耐震性が高く、大きな面積で蒸発冷却効果が得られる方法として位置づけられる。こうした外装材から蒸発冷却効果を得る方法については、吸水・保水性だけでなく強度や軽量性に優れた、新たな材料の開発が必要となり、イニシャルコストの増大に繋がっているが、経済性を考慮した方法の提案研究はみられない。そのため、安全かつ高性能な外装材から蒸発冷却効果を得る方法の普及を図る上では、既存の材料から製造された外装材を利用した、壁面の冷却方法の開発も重要な課題である。

そこで著者らは、既製品の素焼き外装材⁽¹³⁾の内部の空洞を貫通させて、導水空洞として利用する乾式外断熱工法の壁面の冷却方法を考えた。本研究では、この素焼きで内部に導水空洞を持つ外装材を「蒸発冷却利用の環境親和型クラディング」と呼ぶ。本蒸発冷却利用クラディングを用い

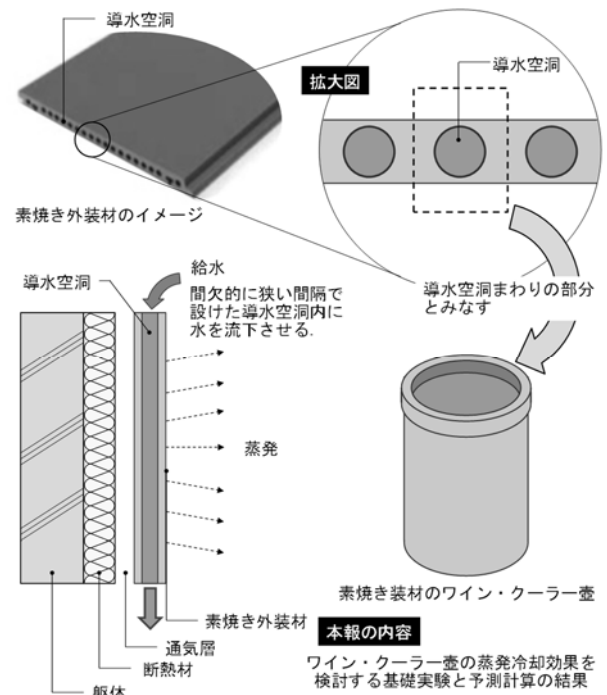


図1 蒸発冷却利用の環境親和型クラディングを用いた壁面の冷却方法の概要

た壁面の冷却方法の概要を図1に示す。導水空洞には間欠的に水を流下させて外装材に吸水させ、外装材の表面に滲出した水が蒸発することで、壁面の冷却効果を得る。十分に外装材に水が含まれた後は給水を停止し、外装材に含まれる水が蒸発することで、壁面の冷却効果を得る。外装材が乾いた後は給水を再開する。この方法の特徴は、1)外装材の内部に狭い間隔で設けられた空洞を導水空洞として利用することにより、壁面の全面において蒸発冷却効果が得られること、2)市販されている外装材を転用することから、十分な強度を保つことができ、3)新たな技術開発の必要がないため、イニシャルコストを抑えることができる点が挙げられる。本研究では、1)本蒸発冷却利用クラディングを用いて壁面を冷却する方法の開発とその性能評価、および2)本蒸発冷却利用クラディングにより得られる蒸発冷却効果を予測できる計算モデルの開発を試みる。

本報では、素焼素材のワイン・クーラー壺を環境親和型クラディングの導水空洞まわりの部分とみなして実施した、水を入れたワイン・クーラー壺の蒸発冷却効果を検討する基礎実験の結果と、その効果を予測する計算モデルの再現精度を検証した結果について報告する。

2. 素焼きの壺を用いた蒸発冷却効果の実験

2.1 実験の概要

実験は神奈川大学横浜キャンパスの実験室内で行った。実験に使用した素焼きのワイン・クーラー壺⁽¹⁴⁾の内径φは120mm、高さは175mmである。この壺でワインを冷やす手順は、まず壺全体を水に浸して、壺の中の水を捨てる。次にワインが入った瓶を壺の中に入れ、蒸発しきった頃にワインは適度に冷えるというものである。

図2には、実験時の様子を示している。実験には壺を3

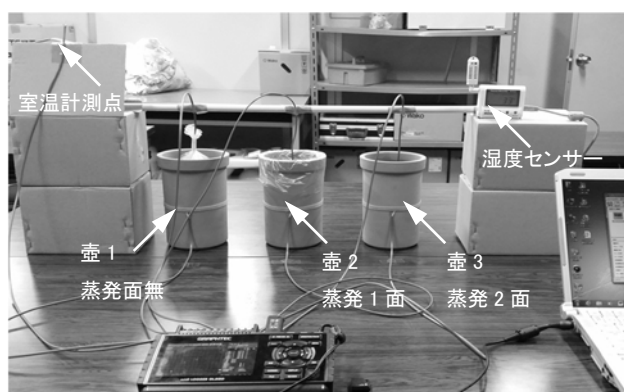


図2 実験時の様子

表1 測定項目と測定機器

測定項目	測定機器	測定間隔
室温	T型熱電対	1分
壺外表面温度 壺水温		
湿度(室内)	高分子膜抵抗式湿度センサー	

つ用意した。1 つめ壺は水を入れたポリエチレンの袋を密閉し、水面からの蒸発も起こらないようにしたもの(以下壺1と呼ぶ)、2つめは水をポリエチレンの袋に入れた状態で壺に入れることにより、壺外表面からの蒸発冷却は起きず、壺の水面だけから蒸発するもの(以下壺2と呼ぶ)、3つめの壺は水を入れ蒸発冷却するもの(以下壺3と呼ぶ)である。それぞれの壺には水を1L入れた。表1には測定項目と測定機器を示している。壺外表面温度、壺内水温、室内温度の測定はT型熱電対を用い、室内湿度は高分子膜抵抗式の湿度センサーを用いて測定した。測定間隔は1分間隔として、測定期間を2015年12月18日0:00から12月21日0:00までの3日間とした。尚、本報では水温の実験値が安定した12月19日0:00からの実験データを中心に実

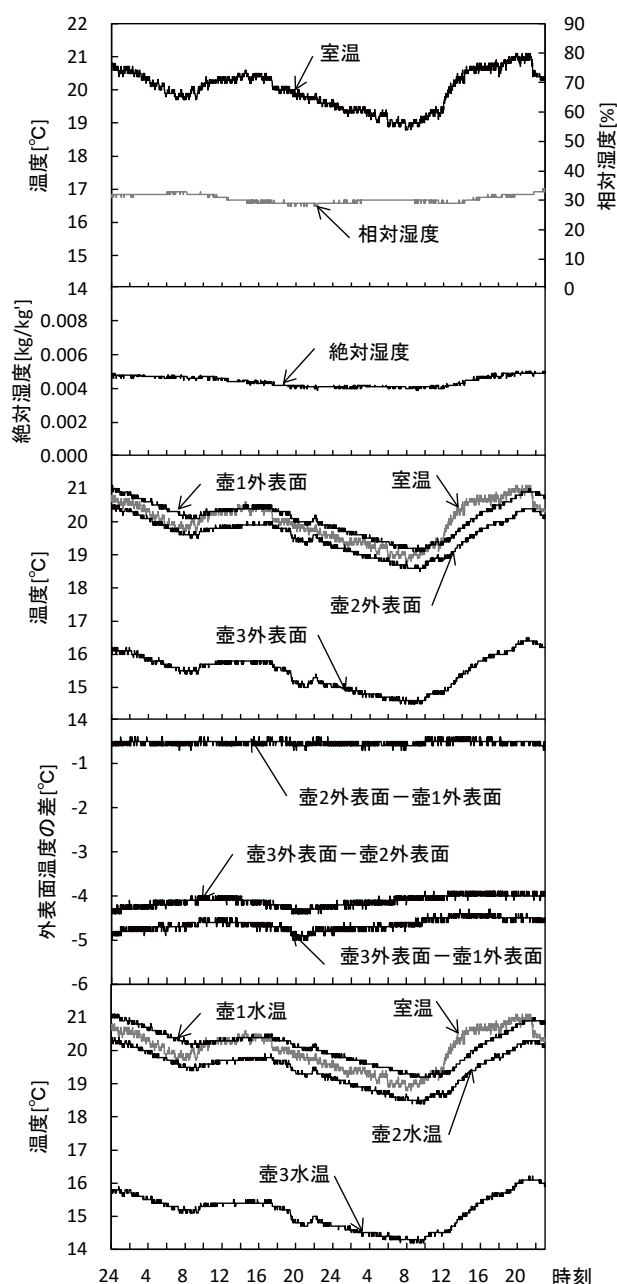


図3 壺外表面温度と水温等の時間変化

験結果を報告する。

2.2 実験の結果

図3には壺1, 2と3の実験結果を示している。測定期間の室内の相対湿度は30%程度、室内温度は20°C程度で保たれている。また室内の絶対湿度を見ると0.0044kg/kg程度に保たれていることが分かる。壺1の外表面温度は、室温と同程度で推移している。壺2の外表面温度は壺1の外表面温度をわずかに下回って変動し、最低で19°C程度まで低下している。壺3の外表面温度は3つの壺のうち最も低くなり、最低で15°C程度まで低下しており、蒸発冷却効果の大きさが示される。実験期間中の壺3外表面の濡れ具合は、全体が液相の水に覆われてはならず、乾いた状態から少し色が濃く見える程度に濡れていた。

次に、測定期間中の各壺の外表面温度の差を見ると、壺2の外表面温度は、壺1と比較して0.5°C程度低下しており、壺の水面からも蒸発冷却が生じていることが分かる。壺3の外表面温度は、壺2と比較して4°C程度低下していることから、壺の内部の水が外表面に浸透することによって生じる蒸発冷却効果が認められる。壺3の外表面温度は、水面と外表面から蒸発冷却が生じることにより、壺1と比較して5°C程度低くなっている。

次に壺内の水温を見ると、壺1の水温は外表面温度と同様に20°C程度で推移している。壺2と壺3の水温とも、夫々の外表面温度と比較して、わずかに低く推移する傾向が見られる。壺2の水温は壺1と比較して0.7°C程度低い状態で推移しており、壺2の水面からの蒸発冷却が水温の低下に影響を及ぼしていることがうかがえる。

3. 蒸発冷却効果の予測計算

3.1 予測計算のモデル

汎用数学モデル⁽¹⁵⁾を用いることにより、熱と水蒸気の移動の構造を、回路網モデルとして自由に組み、蒸発冷却も考慮できる予測計算プログラムNETSを用いて簡単なモデルを構築した。伝熱の構造すなわち熱流収支の連立方程式の構造は回路網モデル図にあらわされている。数学モデルは対象物にかかわらず常に同じである。本章では実験値と計算値の比較を行い、本モデルによる蒸発冷却効果の再現精度を検討する。

作成した三つの壺の熱・水蒸気回路網を図4と5に示す。熱回路網の黒丸は熱容量を持つ節点、白丸は熱容量を持たない節点を表す。二重丸は境界条件である室内温度を与える節点である。これらの節点間には一般化熱コンダクタン

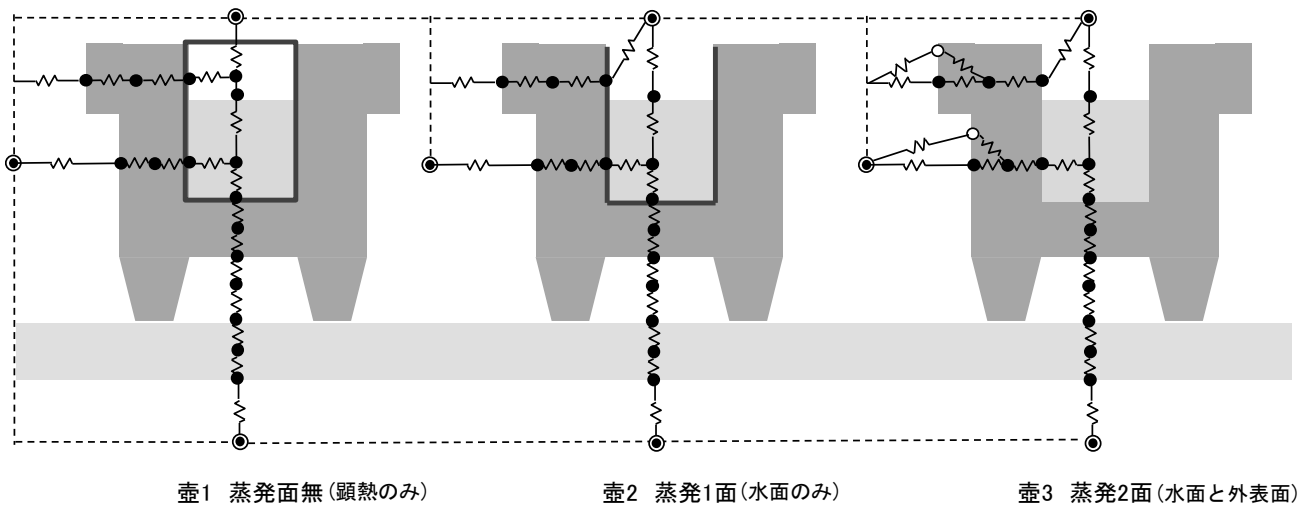


図4 計算プログラムNETSの熱回路網

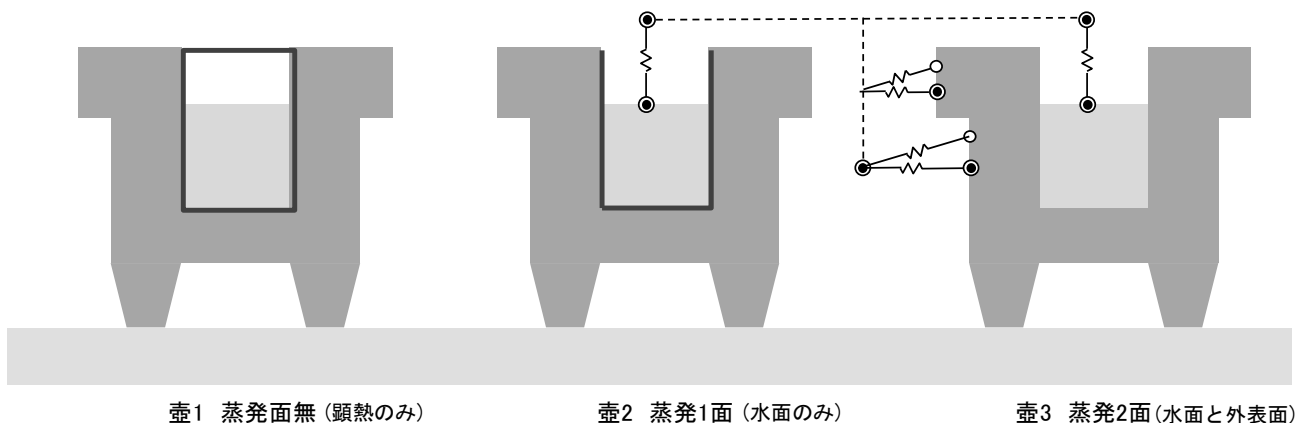


図5 計算プログラムNETSの水蒸気回路網

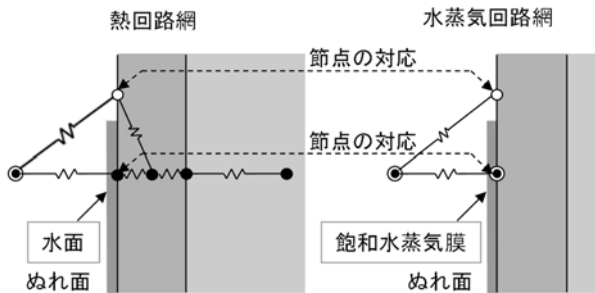


図6 熱・水蒸気回路網の詳細

表2 計算条件

壺の熱伝導率	0.6395W/m・K
壺の容積比熱	1423kJ/m ³ ・K
室内側熱伝達率	9.3W/m ² ・K
壺内側熱伝達率	132W/m ² ・K
室内温・湿度	測定値

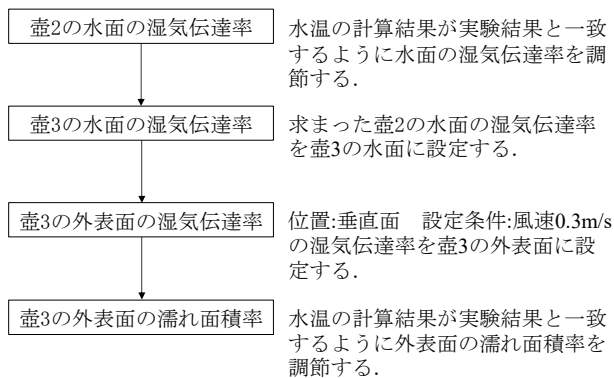


図7 湿気伝達率と濡れ面積率を推定した手順

表3 計算に用いた湿気伝達率と濡れ面積率

位置	水蒸気圧系	絶対湿度系
	[kg/m ² ・s・Pa]	[kg/m ² ・s・(kg/kg ['])]
水面	7.81×10^{-9}	1.25×10^{-3}
壺3 外表面	34.7×10^{-9}	5.55×10^{-3}
濡れ面積率	0.55	

スを与える。室内温度を与える節点に対応する水蒸気回路網の二重丸は、室内絶対湿度を与える節点である。壺3の外表面については、濡れ面と乾き面が斑に混成している様子を考慮して、モデル化を行った。壺3の外表面の熱と水蒸気移動の回路網モデル其々について、拡大して描いたものを図6に示す。水蒸気回路網の濡れ面の節点は、対応する熱回路網の節点の温度における飽和水蒸気膜を表す。白丸は湿気容量を持たない節点であり、本モデルでの乾き面を表す。水蒸気回路網の濡れ面の節点と雰囲気中の空気節点間には、外表面の面積の内に濡れ面の面積が占める割合である濡れ面積率と外表面積および湿気伝達率を乗じて得られる一般化湿気コンダクタンスを与える。

表2には、計算条件を示す。壺内側熱伝達率は、文献(16)

に示される対流熱伝達率を無次元数のべきの積の形で表す公式から、水温を20°C、代表長さを壺の高さ0.175mとして求めたものを設定した。室内の温・湿度の境界条件は測定値を与えた。室温の平均は20.0°Cで、計算条件として湿度は絶対湿度を与え、絶対湿度の平均は0.0044 kg/kg'である。また室内の湿球温度は平均で11.0°Cとなる。不確かな湿気伝達率と濡れ面積率は、図7に示す手順に従って推定した。尚、NETSでは湿気伝達率などの単位に絶対湿度系を用いる。

まず、壺2の水温の計算結果が実験結果と一致するように水面の湿気伝達率を調整して、 $1.25 \times 10^{-3} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kg/kg}')$ と推定した。次に、壺3の水面にも同じ湿気伝達率を設定した。そして、壺3の外表面の濡れ面には、文献(17)の風速0.3m/sでの垂直面における湿気伝達率 $34.7 \times 10^{-9} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ を $16.7 \text{g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ と単位換算したうえで、 $1.20^{(18)}$ を乗じて絶対湿度系の $20.0 \text{g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot (\text{g/kg})$ と変換し、単位換算を行い得られた $5.55 \times 10^{-3} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kg/kg}')$ を設定した。最後に、水温の計算結果が実験値と合うように濡れ面積率を調整し、これを0.55とした。この濡れ面積率は、素焼素材の壺と同等の透水性を有す、室内条件下の本蒸発冷却利用クラディングにおいて適用できると考えられる。これらの計算に用いた湿気伝達率と濡れ面積率を表3に示す。

NETS内では、伝熱、換気、水蒸気(ガス)移動の各回路網モデルの節点番号の対応配列を持つことで、これら三つの系の連成を可能にしている。ただし同時的連成ではなく計算時間間隔 Δt の遅れを伴う連成となる。水蒸気回路網の蒸発面節点は、対応する熱回路網節点の温度における飽和絶対湿度を持つ。この雰囲気中の空気絶対湿度との差に湿気一般化コンダクタンスを乗じて蒸発量が計算される。蒸発潜熱は、蒸発面温度を θ として、 $(2501.1 + 1.846 \theta) \text{kJ/kg}$ を乗じて冷却量を計算する⁽¹⁹⁾。冷却量は熱回路網に与えられて温度が計算される。これらの相互影響の計算は、二者の系で Δt の遅れを持って考慮され、非定常の計算を進めていく。もし定常計算をする場合には、両者の節点容量は0にセットされ、二者の系の繰り返し収束計算が行われる。

3.2 予測計算の結果

非定常の予測計算は、実態と異なる初期温度から始めなければならないので、実験値との比較には2日目以降の計算結果を用いる。図8に示す様に、各壺の表面温度の計算値の変動は実験値とよく一致しており、予測計算プログラムNETSを用いた本モデルは、単純なモデルながらも十分な再現精度を有していることが認められる。

次に壺内の水温の実験値と計算値を見ると、壺1と壺2では実験値と計算値との差異は0.1°C程度と計算値と実験値はよく一致している。しかし、壺3の水温の実験値と計算値とでは0.4°C程度の差異が生じている。これは、実験時に壺3では他の壺と比較して大きな冷却が起こったことにより、壺内の水温に大きな上下分布が生じ、測定点の水温が壺内の平均的な水温よりも低くなり、壺内の平均的な

水温を表す計算値と差異が生じたためと考えられる。尚、本蒸発冷却利用クラディングの場合には、導水空洞内に水を流下させるため、導水空洞内に水温の上下分布は生じないと推測される。

また壺1では、実験値で見られる室温変化に対する壺表面と水の温度変化の時間遅れが、予測計算モデルでも再現できていることから、予測計算モデルに設定した壺の材料の比熱と密度と熱伝導率等が適切であったことが示される。

4. まとめ

本報では、蒸発冷却利用の環境親和型クラディングの内部にある導水空洞まわりの部分とみなした、素焼素材のワイン・クーラー壺の蒸発冷却効果を検討する実験を実施した。そして、その効果を予測する計算モデルの再現精度について検証を行い、以下の知見を得た。

- 1)室温が 20°C、絶対湿度が 0.0044kg/kg'の実験室内で、水面と外表面から蒸発が生じる壺3の外表面温度は 15°C程度まで低下していた。また、外表面が乾いた状態の色と比べ少し濃くなる程度に濡れた壺3の外表面温度は、壺の外表面から蒸発が生じない壺2の場合と比較して 4°C程度低く、浸透した水の蒸発による冷却効果が認められた。
- 2)実験値と計算値との比較検討を行った結果、水面と外表面から蒸発が生じる壺3の外表面の濡れ面積率は、湿気伝達率を風速 0.3m/s の条件下の垂直面における文献値 $34.7 \times 10^{-9} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ を用いた場合で 0.55 と推定された。
- 3)壺の外表面温度と水温の計算値は実験値とよく一致しており、汎用数学モデルを用いる予測計算プログラム NETS により構築された本計算モデルは、十分な再現精度を有していることが確認された。

以上から、本研究で開発を試みる素焼き素材の外装材の内部に狭い間隔で設けた導水空洞内に水を間欠的に流下させる方法は、壁面を冷却する有効な方法になると期待される。また、本報で示した予測計算のモデルは、十分な再現精度が認められたことから、モデル化の対象を導水空洞まわりの部分から実大の外装材の範囲に拡張することにより、環境親和型クラディングが發揮する蒸発冷却効果を予測することが可能であると考えられる。

今後は、給水停止時の本蒸発冷却利用クラディングの蒸発冷却効果を予測する計算モデルを構築し、給水時と給水停止時とをモード変化させた計算を行い、本蒸発冷却利用クラディングを用いた壁面の冷却効果を検討する。そして、試験壁体を対象として屋外実験を行い、適切な導水空洞内に流す水量および素焼き外装材の透水性を確認する。さらに、屋外実験の結果から取得した湿気伝達特性のデータを用いて、本蒸発冷却利用クラディングの蒸発冷却効果を予測する計算モデルについて検討を行う。

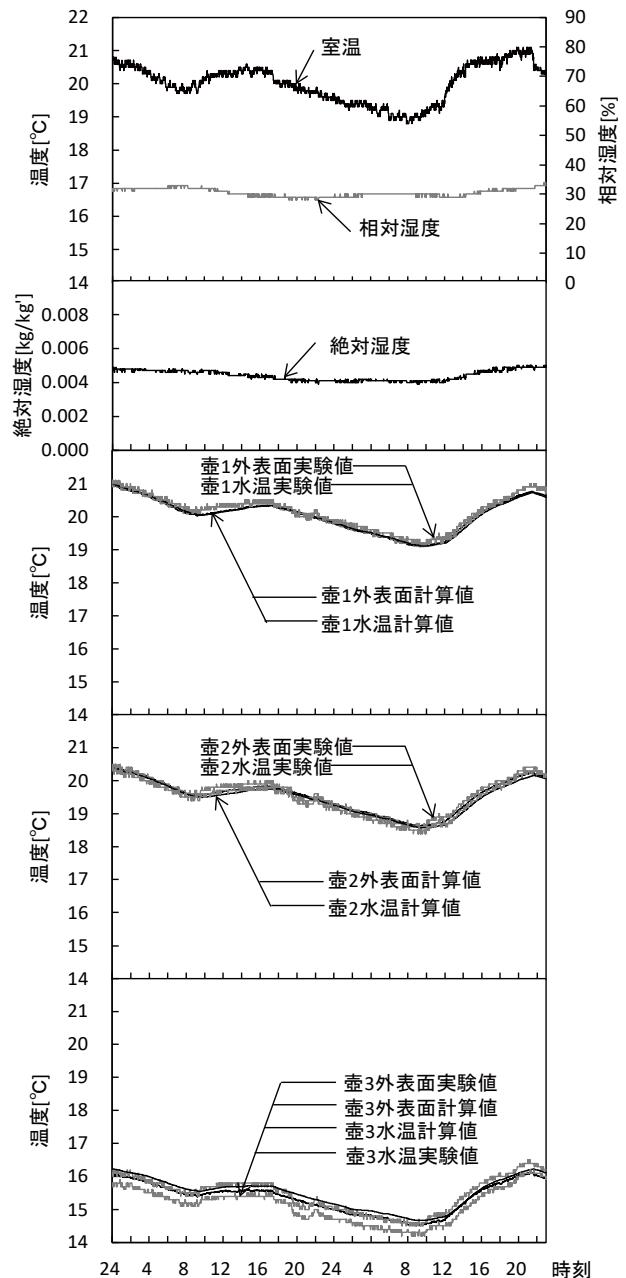


図8 表面温度と水温の実験値と計算値との比較

謝辞

本報の実験と予測計算は、神奈川大学 2015 年度の卒業研究として、渡辺慎により行われました。

参考文献

- (1) 白井一義・梅干野晃・堀口剛, 透水性孔あきレンガを用いた蒸発冷却壁体の開発, 日本建築学会計画系論文集, 487(1996), pp.61-68.
- (2) 白井一義・梅干野晃・永田達也・小栗健, 透水性孔あきレンガの通気孔形状と通気・冷却性能の関係 透水性の孔あき壁体を利用した蒸発冷却による屋外・半屋外快適空間の形成 その1, 日本建築学会計画系論文集, 509(1998), pp.9-14.
- (3) 白井一義・梅干野晃・小栗健・永田達也, パッシブクーリング

- ウォールの半屋外空間における微気候形成効果 透水性の孔あき壁体を利用した蒸発冷却による屋外・半屋外快適空間の形成 その2, 日本建築学会計画系論文集, 527(2000), pp.21-27.
- (4) 小栗健・梅干野晁・白井一義・奥田知康, 蒸発冷却機能を持つ孔あきレンガ壁体により形成される微気候の予測に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 532(2000), pp.101-108.
- (5) 白井一義・梅干野晁・小栗健, パッシブクーリングウォールにより構成された空間における涼しさの評価 透水性の孔あき壁体を利用した蒸発冷却による屋外・半屋外快適空間の形成 その3, 日本建築学会計画系論文集, 552(2002), pp.15-20.
- (6) 梅干野晁・何江・小川俊輔・安藤純一・山村真司・赤川宏幸・中島古史郎・岡田清・倉田泰輔, 高揚水性セラミック材を用いた蒸発冷却壁体システムの開発 製作したセラミック材の基本性能と試験壁体の冷却効果等の把握実験, 日本建築学会環境系論文集, 641(2009), pp.775-782.
- (7) 平山由佳理・浅輪貴史・梅干野晁, 親水・吸水性塗膜を施した表面濡れ性が高いパッシブクーリングルーバーシステムの開発と屋外実験による基本性能の把握, 日本ヒートアイランド学会論文集, 10(2015), pp.64-71.
- (8) 平山由佳理・太田勇・梅干野晁, CFD 解析結果の重ね合わせによる風向変化を考慮した冷気の空間分布予測—蒸発冷却壁体を用いた半囲み空間への適用—, 日本ヒートアイランド学会論文集, 10(2015), pp.24-34.
- (9) 山梨知彦・鳥羽達也・川島範久, 高保水性陶器を用いた都市も冷やす外装システムの開発 バイオスキン, 建設の施工企画, 9(2011), pp.40-44.
- (10) 梅田和彦・長瀬公一・森直樹・村田勤・大黒雅之, 水分気化熱を利用した屋外暑熱環境緩和技術の検討 保水性壁体による暑熱緩和, 大成建設技術センター報, 40(2007), pp.38-1-38-6.
- (11) 株式会社竹中工務店・株式会社興人・日東紡績株式会社・石川幸雄, 蒸発冷却機能を有する構造物外装用建材, 公開特許公報(A)(2007).
- (12) 株式会社竹中工務店・株式会社興人・石川幸雄・岡洋, 水分蒸発冷却屋根・壁体構造, 公開特許公報(A)(2008).
- (13) 例えば, Leiyuan Building Material Co., Ltd. : Red Natural Clay Terracotta Panel, <http://leiyuan.en.made-in-china.com/>, 2016年5月13日閲覧
- (14) 日豪産業有限公司 : キッチン・ギフトコレクション, <http://www.hi-ho.ne.jp/nichigo/hwp7-1.htm>, 2016年5月13日閲覧
- (15) 奥山博康, 建築物の熱回路網モデルに関する理論的研究, 早稲田大学学位論文(1987).
- (16) 木村建一, 建築設備基礎, 国際人間環境研究所, pp.49-52
- (17) 田中俊六 他, 最新建築環境工学 改訂4版, 株式会社井上書院, p.246
- (18) 木村建一, 前掲文献, pp.28-29
- (19) 田中俊六 他, 前掲文献, p.251

(Received October 30, 2017, Accepted July 4, 2018)