保水性セラミック建材の 熱環境改善に関する一実験

A field test on the contribution of water-retentive ceramic tile
to the reduction of environment heat accumulation

尾崎哲二¹・鈴木義則²・羽田野袈裟義³・吉越 恆⁴
吉村孝信⁵・迫口輝美⁶・野口隆⁷・田中稔⁸

Tetsuji Ozaki, Yoshinori Suzuki, Kesayoshi Hadano, Hisashi Yoshikoshi,
Takanobu Yoshimura, Terumi Sakoguchi, Takashi Noguchi, Minoru Tanaka

¹正会員 工修 株式会社青木建設 研究所 (〒300-2622 茨城県つくば市大字要36-1)

²農博 九州大学 農学部 (〒812-8581 福岡県福岡市箱崎6丁目10-1)

³正会員 工博 山口大学 工学部 (〒950-8611 山口県宇部市常盤台2557)

⁴農修 九州大学 農学部 (〒812-8581 福岡県福岡市箱崎6丁目10-1)

^{5,7}株式会社青木建設 研究所 (〒300-2622 茨城県つくば市大字要36-1)

⁶株式会社香蘭社 研究開発部 (〒844 佐賀県西松浦郡有田町幸平1-3-8)

⁸工修 株式会社青木建設 研究所 (〒300-2622 茨城県つくば市大字要36-1)

It was pointed out that a prefabricated classroom building for school children which had been constructed before summer turned out to create a very hot environment in summer. The galvanized sheet iron roof of the building was covered with a water-retentive ceramic tile and water was sprayed on the tile in an attempt to cool the classroom by evaporative cooling. Because of evaporating cooling, the surface temperature of the wetted covering tile was 15℃ lower than that of the original roof under similar meteorological conditions, and the room temperature was lowered by 2 to 3℃.

Key Words : *water-retentive ceramic tile, environmental heat accumulation, water, evaporation, latent heat fluxes, prefabricated building*

1. はじめに

現代の都市空間は、主にコンクリートやアスファルトなどの人工材料によって覆われており、そのため夏期においてこれらの材料は昼間高熱化し、ヒートアイランド現象などをはじめとする熱環境悪化の一因と言われている。

既報¹⁾で、上記問題の一解決方法として保水性セラミック建材（以下、保水性建材）を開発したことを述べた。そこでは、保水性建材の温度上昇抑制効果の実験を地表に敷設された舗装面などで実施し、表面温度や直上の気温が低下する結果を報告した。これは、その大きな保水量と高い水分供給能力によ

り、蒸発が長時間継続することによるものであった。

夏期においては、コンクリートなどを材料とする建物の屋根や壁は昼間には熱せられて建物内部を昇温化させ、夜間には蓄積された熱を外部へ放出する。このことがエアコンの更なる使用につながって、それがまた外気の昇温を招くといった悪循環を示してエネルギー需要を増加させ、地球温暖化の原因ともなっている。このような建物の表面に保水性建材を敷設し、水を含ませて気化冷却を図れば、熱環境の改善が可能であると思われる。

本研究では、簡単なプレハブ構造である学童保育教室のトタン屋根に保水性建材を敷設し、それらの熱環境改善効果について実験した結果を報告する。

2. 実験方法²⁾

(1) 保水性建材

使用した保水性建材の物性値を表-1に、水分特性曲線を図-1に示す。表-1より保水性建材は空隙量が大きく比較的軽量であることがわかる。また飽和透水係数が砂と同等の値を示す。図-1より保水性建材は体積含水率がpF2近くまでほとんど減少せず、pF2より急激に減少する。これは含まれる水のマトリックスポテンシャルがpF2程になるような空隙径が支配的であり、pF2近くまでの不飽和透水係数は飽和透水係数に比べ大きく減少しないことを示唆する。

表-1 保水性建材の物性値

測定項目		測定値	測定方法
含水比	w (%)	21.7 ¹⁾	JISA1203
湿潤密度	ρ_s (g/cm ³)	1.936 ¹⁾	JSFT191
乾燥密度	ρ_d (g/cm ³)	1.591	〃
飽和透水係数	k_{15} (cm/sec)	3.19×10^{-4}	JISA1218

1) 毛管飽和時

図-1 水分特性曲線 (JSTFT151, 脱水過程)

(2) 実験方法

実験は保水性建材を敷設した学童保育教室のトタン屋根に水を撒き、各材料の温度、室内環境および周辺気象の観測などをおこなったものである。

a) 実験に使用した建造物

実験を実施した学童保育教室は、小学校に隣接する1階プレハブ構造（7.4m×4.5m×3.3h）の建屋である。その屋根の頂部はほぼ南北を向く。屋根や壁はトタンと合板により、床は合板のみの簡単な構造である。朝早い時間と夕方遅い時間をのぞけば建屋への日射を遮るものはない。

建屋の部材および保水性建材の熱的性質を表-2に示す。使用した保水性建材は1枚500cm×500cm×2.5cmの大きさであり、これを屋根の頂部と軒先をのぞくトタン屋根に直接敷設した。敷設面積は27.7m²

表-2 建屋部材および保水性建材の熱的性質

材料	厚さ mm	比熱 kcal/kg℃	熱伝導率 (含水率) kcal/mh℃ (%)
トタン (鉄板)	0.27	0.105 ¹⁾	31~40 ¹⁾
合板	2.1	0.50 ²⁾	0.11 ³⁾
保水性建材	25	0.7572 ⁴⁾	0.5861 (0.0) ⁵⁾ 0.8308 (5.0) 0.9305 (9.6) 1.0397 (16.1)

1) 日新製鋼 (株) 資料, 2) 表5-3, P1-154, 空調調和衛生工学便覧, 3) 第3・12, P27, 空気調和設備の実務の知識, 4) レーザーフラッシュ法, 5) ホットワイヤー法

であり、屋根全体の面積39.5m²の70%である。

b) 気象観測および建物内部の環境計測法

建屋南側の観測用ポール（高さ4.2m）の頂部に風向・風速計（YOUNG製05103-16B），下部の1カ所（地上30cm）に温湿度計を設置した。温度計はサーミスタ，湿度計は高分子抵抗変化型湿度センサを用いた。西南側のポンプ小屋の平らなコンクリートの屋根（高さ2.6m）に日射計（小糸工業製IKS-35）を設置した。

建屋の東側および西側の屋根に敷設した保水性建材の各1枚の裏面に温度計として測温抵抗体を取り付けた。方法は裏面に幅5mm，長さ3cmほどの溝をつくりそこにセンサーを埋め込んだ。また屋根の頂部のトタン表面に1カ所，測温抵抗体をガムテープにて取り付けた。

室内には、中央部の天井裏面より床面まで鉛直に10点の温度計を設置した。上から順に天井裏（3点，中央部，東側，西側），梁，空中（4点），床上および床面であった。天井裏の東西の2点に測温抵抗体を取り付けたほかはサーミスタを使用した。

c) 蒸発量、純放射量および表面温度の測定

8月27日の実験では、保水性建材からの蒸発量の測定をおこなった。方法は、一枚の保水性建材の底面と側面にくまなくガムテープを張り水を十分含ませる。これを屋根の頂部に水平に設置して30分毎に重量を測定した。重量の測定は電子天秤にて行った。

同時に東側の屋根面に平行な面の純放射量を放射収支計（EKO CN-11型）により、各材料の表面温度をサーモレーサー（6T62型）により測定した。

d) 実験期間と水撒き

実験期間は1998年8月17日～28日までの12日間であった。17日に時々強い雨が、24日の朝に雨がかった他は晴れの日であった。屋根への水撒きは20日，21日および27日におこなった。水撒きは水道水を用い、人力によりホースにて撒水した。

3. 実験結果と考察

(1) 8月20日と21日の実験結果

8月20日は快晴であった。水撒きを14時20分から50分までの30分間実施した。水温は28℃、その量は保水性建材が飽和状態になるまでとし、約300ℓを使用した。21日も快晴であった。この日は9時24分から41分までの17分間と13時50分から14時13分の23分間の計2回の水撒きを実施した。

両日の日射量（全天日射量）および平均風速（10分間の平均値）ならびに積算日射量を図-2に示し、室外の気温および湿度（地上30cm）の結果を図-3に示す。図-2より両日の日射量と平均風速（10分間の平均値）はほぼ同じような形で推移し、日積算日射量も20日が20.7MJ/m²、21日が19.8MJ/m²と近い値を示した。図-3より気温および湿度についても18時以降を除けばほぼ同じ変化を示した。以上より両日はほぼ同じ気象条件であったと考えてよい。

両日の屋根等の温度を図-4に、室内温度およびその鉛直分布の結果をそれぞれ図-5、6に示す。

図-2 日射量および平均風速

図-4の20日の結果において、保水性建材の敷設作業が終了した12時30分から水撒き開始時14時20分までの時間は、頂部のトタンおよび東西の保水性建材は乾燥状態すなわち水の無い状態であった。この時トタンと東面の保水性建材の温度は51～54℃で推移し西面の保水性建材はやや高く54～56℃の温度であった。この結果はトタンと乾燥状態の保水性建材が

図-3 室外の気温および湿度

図-4 屋根等の温度

ほぼ同じ温度になることを示している。水撒きにより頂部トタンおよび東面の保水性建材の温度は52℃から、西面の保水性建材は55℃からそれぞれ40℃近くまで低下した。これは水温や気化冷却のほか、この時の日射量の低下によるものと判断される。

21日の結果では、頂部トタンの温度は9時頃まで20日と同じ温度を示し、保水性建材の2点はトタンの温度に比べ10℃以上低い。これは保水性建材に残った水の気化冷却によるものと思われる。第1回目（9：24～41）の水撒きにより3点の温度は一時的に低下したが直ぐに上昇し、頂部トタンでは11時過ぎには50℃を、13時前後には53℃を記録した。一方保水性建材の温度は東西面ともゆっくりと上昇し11時過ぎに36～37℃となり、トタンで最高温度53℃を示した13時前後において西面の保水性建材では38℃の温度を持続した。この温度はトタンに比べ15℃低い。20日

図-5 室内温度

の測定では同じ保水性建材が乾燥状態で13～14時の間55℃を示し、トタンは52℃を示している。トタン温度は両日の午後は水撒き直後以外では同程度である。したがって21日の水撒き後と20日の同じ時間帯の保水性建材の温度差は気化冷却の直接効果を示す目安であるといつてよい。この温度差は17℃である。

第2回目の水撒き（13：50～14：13）の後、頂部トタンの温度が10数度低下した。これは主に水温によるものである。その後トタンの温度は42℃までしか上昇せず、保水性建材もトタンより6℃程の低下にとどまった。日射量の低下がその原因と思われる。

室内温度に関しては、図-5より20日では9時30分以降は室内の3点とも気温より高い値を示したが、21日では天井中央の温度は気温より高いものの、13時過ぎまでは床上43cmの温度がほぼ同じ、床面の温度は2～3度低い値を示した。また、天井中央の温度が40℃を越える時間は20日が12時～15時までの3時間であるのに対し、21日は12時から14時過ぎまでの2時間であった。図-6からは、両日とも朝の7時には天井から床面までの温度分布は20～21℃の範囲にあったが、20日の9時には天井中央は34℃に達し、21日では同時刻30℃にとどまった。この結果は、トタンと気化冷却にある保水性建材の違いによる室内温度差を示す。全体の推移においても、21日の方が20日に比べ2～3℃低い温度であった。両日の日射量に大差はないから、以上の結果は天井の温度の低下に伴うもので、屋根の冷却が室内にも及ぶことがわかる。

図-6 室内温度鉛直分布

(2) 8月27日の実験結果

この日までの天候は8月24日の午前中10mmを越える降雨があったが、25日、26日と晴れの日が続いた。このため27日の朝には保水性建材の含水量はかなり少なかったものと推測される。水撒きは11時53分から12時26分までの33分間実施した。

日射量、平均風速および積算日射量ならびに室外の気温および湿度（地上30cm）の結果を図-7に示す。

この日は曇りがちで、図-7より日射量も12～13時にかけ1000W/m²を越える強い日差しがあったものの、全般的には15時までの積算日射量が14.2MJ/m²と21日の17.2MJ/m²に比べ弱かった。気温も21日より最高気温で2～3℃低い35℃であった。屋根等の温度および室内温度の鉛直分布を図-8、9にそれぞれ示す。

図-8より、水撒き直前にはトタンでは42℃、保水性建材では東西面とも37℃まで上昇した。これらの温度は21日に比べ10℃程低い。水撒き後、トタンの温度は一端下がってすぐに42℃へ戻るものの、保水性建材は東西面とも34～35℃まで低下した。その後14時頃から16時頃までトタンでは40℃前後で、東面の保水性建材は27～28℃、西面では30℃前後で推移した。保水性建材とトタンでは約10℃の差が生じた。その後日射量が小さくなり、これらの温度差は2℃程度となった。このように、27日は21日に比べやや日差しの弱い日であったが、水撒き後には保水性建材の温度上昇が抑制されており、気化冷却による効果が確かめられた。

図-7 日射量および平均風速，室外の気温および湿度

室内温度では，図-9より水撒き後の13時以降において温度上昇が進まず，天井温度では37℃，部屋の気温では36℃が最高温度であった。日射量がやや減じたものの，これらの低温化は屋根の冷却によるものと判断される。

サーモトレーサーによる材料別の表面温度の時間推移を図-10に示す。図-10から，水撒き前には草地より2～3℃高かった保水性建材の温度が，水撒き後には逆に2～3℃低くなった。また水撒き前にはトタンの温度はコンクリートに対し，日射量が少ない時間帯をのぞけば同温以上であったが，水撒き後は5℃以上も低くなった。これは保水性建材の冷却により裏地のトタンが冷やされて伝導したことで，また直上の空気が冷やされて，このトタンを冷やしたことが原因として考えられる。

蒸発量の測定結果を図-11に示す。潜熱エネルギーフラックス密度は蒸発量より算出したもので，その換算量として577cal/g (35℃時)を使用した。図-11から日射量，純放射量および蒸発量は連動し，純放射量は日射量のほぼ半分の値を示す。蒸発量は12時50分に最高値0.83mm/hを記録した。この値を潜熱エネルギーフラックス密度に換算すれば553W/m²であり，その時の日射量980W/m²の56%，純放射量458W/m²の121%であった。オアシス効果のあったことを示した。潜熱エネルギーフラックス密度はほとんどの測定期間，純放射量を上回る値を示した。保水性建材へ実質入力する熱量をキャンセルし，昇温抑制に効果のあったことがわかる。蒸発量は12時

図-8 屋根等の温度

図-9 室内温度鉛直分布

図-10 材料別表面温度

から17時までの5時間で2.6mmであった。当初降水量換算で6.0mmだった保水量が3.4mmとなった。

次に水撒き後の各材料の放射フラックスをステファン・ボルツマンの式により求め，人間の体のそれとの放射収支を求めた³⁾。結果を表-3に示す。

表-3より，人体に対するコンクリート屋根とトタン屋根の放射収支はプラスであるのに対し，水撒き後の保水性建材と室内の天井とはいずれもマイナスとなる。ここで放射収支のプラスとは人間にとって熱ストレスがかかり，マイナスは涼感が得られることを示すもので，天井との放射収支においてマイナスを示したのは放射環境においても改善されたことを示す。

図-11 日射量および蒸発量など

表-3 各場所の放射フラックスと人体との放射収支(8/27)

場所	温度 (°C) ¹⁾	A (W/m ²) ²⁾	B (W/m ²) ³⁾
トタン屋根	49.7	616.04	+98.09
保水性建材	33.5	501.39	-16.56
コンクリート屋根	53.5	645.56	+127.61
天井西	32.6	495.53	-17.08
天井東	32.7	496.18	-21.77
天井中央	35.2	512.61	-5.34
人体	36.0	517.95	+0

1) 13時15分～20分, 2) 放射フラックス, 3) 人間の体との放射フラックスの差 $B=A-517.95$

4. 水の気化冷却の有利性⁴⁾

現在ではプレハブ建屋に限らず建物の冷却は、電気エネルギーを用いたエアコンにより行われている。そこで水を冷却のための資源としてとらえ、水の気化冷却と水力発電による電気エネルギーとを使用する水量にポイントをおき簡単な試算により比較する。

前章で示した保水性建材からの潜熱エネルギーフラックス密度は最高時553W/m²であった。これは0.23g/m²/secの蒸発量に相当する。全体では面積が27.7m²であるから気化冷却は15.3KWと算出され、蒸発量は6.371g/secとなる。

次に上記の仕事率15.3KWを水力発電で得る場合を考える。水力発電における理論水力の式⁵⁾において、仕事率を15.3KW、落差を100mすれば、この仕事率を得るための必要な流量は0.0156m³/secすなわち15600g/secと算出される。前期の保水性建材の蒸発量(水使用量)6.371g/secとこの15600g/secとを比較すれば、1:2449の比となる。これは大きな差である。

ただし、この比較は蒸発による潜熱エネルギーフラックス密度の熱量とそれと同じ熱量を生み出す水力発電とを、必要とする水量により比較したものであって、プレハブ内部の空気の冷却を比較の対象とした場合には、両者とも多くの条件のもとに検討す

る必要がある。ここではこれを省略する。

しかし、そのような検討を抜きにしても前記の1:2449という比率は節水に関するポテンシャルの比とみなすことができる。したがって冷却を目的とした水資源の利用という観点からすれば、水の気化冷却による方法は水力発電の場合に比べ、はるかに有利であると考えられる。

5. おわりに

水の気化冷却により、トタン屋根に敷設した保水性建材をはじめ室内の天井や空気が冷やされることを確認することができた。地球温暖化問題が議論される今、再生可能である水のこの大きな気化冷却の属性(機能)⁶⁾をもう一度見直し、これを生活空間にうまく利用すれば電気エネルギーの代替として大いに役立つものと思われる。本保水性建材は、これを発揮させる有効な材料と考える。

謝辞：今回の実験は佐賀県山内町の永尾光義町長をはじめとする関係者各位ならびに山内西小学校の草場宗男校長のご支援なしには実現できなかったものである。(株)香蘭社本社の諸岡課長、東京支社の岸川支社長および黒川主任、(株)青木建設九州支店の久原課長、(株)イシゲの高橋主任、九州大学大学院生の小野島英治君には実験に協力していただいた。皆様に心より感謝申し上げます。

最後に、この実験は保水性建材研究会の合意のもとに進められたことを記し、感謝申し上げます。

参考文献

- 1)尾崎哲二・鈴木義則：保水性セラミックタイルの熱環境改善に関する研究，水工学論文集，第42巻，pp61～66，1998
- 2)Yoshinori SUZUKI,TurMUHAMMED,Tetsuji OZAKI: EXPERIMENTAL STUDY ON THE THERMAL RELAXATION EFFECT OF HYDRATED CERAMIC PLATE,INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MONITORING AND MANAGEMENT OF URBAN HEAT ISLAND, 1998
- 3)鈴木義則・トゥールムハメット・尾崎哲二ほか：屋根面敷設保水性セラミックタイルによる夏期暑熱環境の改善，農気・九州支部大会講演要旨，1997
- 4)羽田野袈裟義：保水性建材の話，ニューズレター Vol.10，土木学会中国支部，1998
- 5)椿東一郎，荒木正夫：水理学演習上巻，p169
- 6)榎根勇：自然地理学講座，3水文学，2.5地球の熱収支とエントロピー，大明堂

(1998. 9.30受付)