光触媒外装材散水システムによる戸建住宅の冷房負荷低減効果に関する研究

STUDY ON HOW EFFECTIVE IT IS IN REDUCING COOLING LOAD IN DETACHED HOUSE TO SPRAY WATER ON PHOTOCATALYST-BASED EXTERIOR MATERIALS

武田 仁^{*1}, 井上 賢治^{*2}

Hitoshi TAKEDA and Kenji INOUE

It was found that spraying water on an experimental unit on the roof led to decreases in the surface temperature of the roof by about twenty degrees centigrade and falls in the inside temperature of the equipment by about ten degrees centigrade in the daytime of summer. The test results show the standard mass-transfer coefficient based on absolute humidity was $0.0113[\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kg}/\text{kg}')]]$. Based on the dynamic thermal load calculation program ,LESCOM-vapor, a heat load simulation was conducted on how spraying water on photocatalyst-based exterior materials at standard detached show houses in major cities across the nation was effective in reducing the cooling load. It was found that the cooling load was lower by about twenty percent in temperate regions when water was sprayed on all the roof, windows and outer walls than when there was no water spraying, and that spraying water on windows was specifically effective.

Keywords: Photocatalyst, Hydrophily, Water Spraying, Mass Transfer Coefficient, Cooling Load

光触媒、親水性、散水、物質移動係数、冷房負荷

1. はじめに

建物の快適空間を創造しながら、省エネルギーを図るのは我々の目標である。この目標のために先端技術の導入を考え、今回、日本が世界に先駆けて研究開発している光触媒に注目した。

光触媒作用とは物体の表面に酸化チタン (TiO_2) を塗膜し、日光 (紫外線) に当てると特異な反応を示すことをいう。この特異な反応とは汚れの分解、脱臭、殺菌、親水性などが生じることである。ここで用いるのは超親水性で、建物の外装材に無色透明の酸化チタンを塗膜することにより、撥水性のある水滴が一樣に拡がり薄い水の膜となり、水の接触角が零近くになることである。この原理は文献¹⁾で発表されている。この親水性のある外装材に日射が当たり、蒸発冷却が促進されることになる。このようにして、建物外表面温度を下げ、夏期の室温上昇の抑制、冷房負荷の軽減を図ることができる。また、外表面の散水はヒートアイランドにも効果があり、室温低下は電力等の消費抑制になる。蒸発冷却の研究は、石川らは屋根散水²⁾、高橋らは雨水利用屋根散水³⁾、馬らは屋根散水と天井放射冷房⁷⁾の実験を行っているが、光触媒を用いていない。また、渡辺は放射冷却と蒸発冷却の原理⁵⁾を解いている。光触媒を用いているのは長沼らであるがパネルの実験¹¹⁾である。宮道らは光触媒のオフィスビルを想定した実証実験棟の実験結果⁹⁾を示している。武田らは建物に光触媒外付けスクリーンに散水し、蒸発冷却効果¹²⁾を実測している。物質移動係数の研究は水平水膜の場合、Lewisの研究²⁾があり、垂直部位は荒井らが実験⁸⁾を行っている。

ここでは戸建住宅を想定した小屋裏実験装置を作製し、実験を行うとともに蒸発冷却理論を組み込んだ多数室非定常熱負荷計算プログラム LESCOM-vapor の検証を行った。また、仲野らの戸建実験住宅の実測結果¹⁰⁾を参照し、同様に検証した。

その結果、LESCOM-vapor が十分信頼できることが判明し、建築学会戸建住宅標準モデルと全国主要都市の標準気象データで光触媒散水の有無の熱負荷シミュレーションを行った。これらが定量的に把握できたので報告する。

2. 実験概要

東京理科大学野田キャンパス内に散水あり・なし、2つの傾斜屋根実験箱 (縦 1.8m×横 1.8m×高さ 1.0m) を作製し (写真 1)、2005 年 7 月 20 日～10 月 3 日までの夏期約 2 ヶ月半の期間で実験を行った。なおここでは便宜上、散水ありの実験箱を BOX1、散水なしの実験箱を BOX2 と称する。

写真 1 傾斜屋根実験装置外観

実験箱は四方が厚さ 100mm のスタイロフォームで断熱されており、その上部に南面に向けて傾斜角 30° の傾斜台を設置し、この傾斜面に光触媒が塗装された屋根用スレート板 (表面色: 黒) を取り付け (図 1)。

^{*1} 東京理科大学理工学部建築学科 教授・工博

^{*2} 東京理科大学理工学研究科建築学専攻 修士課程

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science, Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science

BOX1には屋根上部より流量 300ml/min・m²で24時間連続して散水を行い、屋根表面に水の薄膜を形成した。また、BOX2 については散水を行わずにBOX1 との比較を行った。

散水システムを図2に示す。補給水は毎朝10時に手で水道水を散水タンクに補給する。散水はポンプを用いて水を散水パイプへ圧送し、屋根面に散水して、還り水は樋で受け、再びタンクへと戻る。タンクには磁歪式水位計を設置し、循環を何度も繰り返すことで生じる蒸発量を計測する。

計測項目を表1に示す。測定は1分間隔で24時間連続で行った。傾斜屋根実験装置の計測点は、2つの実験箱ともに屋根表面温度、屋根裏面温度、コンパネ裏面温度各4点ずつ、箱内空気温度2点、熱流1点である。なおBOX1については、これらに往き水温、還り水温、タンク水温、水位の4点加わる。外部環境は外気温度2点、屋根表面に当たる傾斜面日射量、放射収支量をそれぞれ1点ずつ測定した。また別途、風向・風速、外気相対湿度、水平面全日射量、水平面放射収支量については近傍で測定を行った。

表1 計測項目

計測項目	測定点数		測定機器
■実験装置	散水有	散水無	
表面温度	4	4	T型熱電対
裏面温度	4	4	
コンパネ裏面	4	4	
空間温度	2	2	
往き水温	1	0	
還り水温	1	0	
タンク水温	1	0	MF-180M(英弘精機)
熱流	1	1	
水位	1	0	MS200S(ノーケン)
■外部環境			
外気温度	2	0	T型熱電対
傾斜面日射量	1	0	MS-601(英弘精機)
傾斜面放射収支計	1	0	MF-11(英弘精機)
合計	23	15

図1 傾斜屋根実験装置

図2 散水システム

3. 実験結果・考察

3.1 各部温度比較

天候に恵まれた2005年8月3日の気象条件（外気温度、外気相対湿度、傾斜面日射量、風速）を図3、4、散水あり、なしそれぞれの屋根表面温度、実験箱内空気温度を図5、6、散水タンクの水位を図7に示す。なお、散水ありの屋根表面には高温と強度の日射により多少の乾きは見られるものの、光触媒の超親水性によりほぼ全面に渡って水膜が広がっていることを確認した。

10:00～17:00の平均外気温度は30.6℃、平均外気湿度65.5%、平均傾斜面日射量494W/m²、平均風速は0.88m/sである。

屋根表面温度は12:00～14:00に、散水ありで約40℃、散水なしで約60℃と20℃程度の差が見られる。高温で傾斜面日射量が大きい日中に、散水による蒸発冷却効果が現れ、温度低下が生じていることがわかる。

実験箱内空気温度も屋根表面温度と同様の傾向が見られ、日中に散水ありで約35℃、散水なしで約45℃と10℃程度の差が見られる。散水タンクの水位は傾斜面日射量が大きくなり始める10:00頃から、夜間・早朝よりも減少速度が大きくなっている。このことから傾斜面日射量が大きくなると蒸発量が多くなる相関性が見られる。

図3 気象条件（外気温度、外気相対湿度）

図4 気象条件（風速、傾斜面日射量）

図5 屋根表面温度比較

図6 実験箱内空気温度比較

図7 散水タンク水位

3.2 物質移動係数の算出

実験部材の物質移動係数 k_x は下式を用いて算出した。

$$M = k_x (x_s - x_a) \cdots (1)$$

ただし M : 物質移動量 (蒸発量) [kg/m²・s]

k_x : 物質移動係数 [kg/m²・s・(kg/kg)]

x_s : 素材表面飽和絶対湿度 [kg/kg]

x_a : 外気絶対湿度 [kg/kg]

比較的值が安定している晴天日の 10:00~17:00 までの 1 分間平均値を採用し、 $k_x = 0.0113$ [kg/m²・s・(kg/kg)] と算出した。この数値はパイプ散水システムによる実用物質移動係数とも呼べるものである。実験時間中の平均風速は 0.88m/s、最大 1.69m/s、最小 0.07m/s であり、風速との相関性は見られなかった。図 8 は 10:00~17:00 の 1 分毎の物質移動係数である。多少のばらつきはあるが、この要因としては実験に用いた磁歪式水位計 (MS200S) の精度が考えられる。水位計の最小測定範囲は 0.1mm であり、水位が 0.1mm 変動したとき、物質移動係数は約 0.0060 [kg/m²・s・(kg/kg)] 影響を受ける。グラフの標準偏差は 0.0069 であり、概ね水位計の精度により影響を受ける物質移動係数に一致する。

図8 物質移動係数

4. 熱負荷計算プログラム LESCOM-vapor を用いたシミュレーション

4.1 傾斜屋根実験装置の実測値と計算値の比較

(1) 概要

実験より算出した物質移動係数を蒸発冷却を組み込んだ多数室

非定常熱負荷計算プログラム LESCOM-vapor にインプットする。これにより傾斜面実験装置に光触媒塗装屋根材を設置し、散水を行った場合の蒸発冷却による屋根表面温度、実験箱内空気温度低下を再現し、それぞれの実測値との比較を行う。

(2) LESCOM に追加した蒸発冷却理論の考え方

外表面熱流に絶対湿度基準物質移動係数を用いた式(1)に蒸発潜熱をかけた熱量の負の値を加え、熱平衡式を作成する。この熱平衡式を表面温度で整理し、前時刻の表面温度を初期値として収束計算を行う。表面温度より飽和絶対湿度は Goff-Gratch の式で求める。また、表面温度の誤差が 0.05℃ 以下で計算を終了する。なお、今回は循環式散水方法であるので散水に伴う顕熱変化は無視できる。

図9 箱内空気温度比較(散水なし)

図10 箱内空気温度比較(散水あり)

図11 屋根表面温度比較(散水なし)

図12 屋根表面温度比較(散水あり)

(3) 結果・考察

実験結果と同じく、2005 年 8 月 3 日のデータで比較を行う。図

9、10、11、12に散水なし、ありの実験箱内空気温度、屋根表面温度の実測値と計算値の比較を示す。計算はいずれも予備計算日を4日間とり、5日目の計算結果を示している。

屋根表面温度、実験箱内空気温度は散水あり、なしともに温度変動傾向を捉え、よく一致していると言える。実測値と計算値の日平均誤差は実験箱内空気温度（散水あり）で約1.1℃、実験箱内空気温度（散水なし）で約0.6℃、屋根表面温度（散水あり）、屋根表面温度（散水なし）ともに約0.8℃である。特に日射の影響を受ける屋根表面温度で温度変動傾向を捉え、なおかつ誤差が小さいことは使用した熱負荷計算プログラムや理論式の信頼性を裏付けている。

4.2 東京大学戸建実験住宅の実測値と計算値の比較

(1)概要

東京理科大学構内傾斜屋根実験装置と合わせて、東京大学戸建実験住宅（東京都目黒区、写真2）において1、2階室内空気温度の実測値と計算値との比較を行う。実験住宅平面図、立面図を図13、14に示す。

1階外壁は住宅用窯業系外壁、2階外壁は住宅用金属系外壁（アルミ）、開口部は複層ガラス、屋根には屋根用スレート板を使用しており、それぞれの部材表面には表3のように光触媒塗装がされている。1、2階外壁および開口部の複層ガラスについては、文献⁸⁾と同様な方法で実験を行い、物質移動係数がすでに判明している。それらの結果を表2に示す。屋根用スレート板は本研究の実験において使用した部材である。散水は、屋根、外壁、開口部の上部に散水パイプを設置して、流量100ml/min・m²で行った。散水時間は7:00～18:00である。

また、この実験住宅では2階屋根面の断熱仕様が通常の天井断熱とは異なり、屋根断熱となっている（図15）。近年、住宅設計において意匠性を高め、さらには天井を無くすことにより、開放感を高めるために小屋裏がない住宅が増加している。そのような社会的背景と共に、小屋裏の有無に関わらず屋根散水のみによる室温低減効果を把握するためにこのような仕様とした。

図14 実験住宅立面図

図15 実験住宅2階屋根面断熱仕様

表2 使用部材の熱物性値と物質移動係数

部位	部材	物質移動係数 [kg/m ² ・s・kg/kg]	熱容量 [kJ/m ² ・K]	熱伝導率 [W/m・K]
外壁	1階:住宅用窯業系外壁	0.00519	1659	0.17
	2階:住宅用金属系外壁	0.00344	215.9	0.035
開口部	複層ガラス	0.00654	11.3	2.5

表3 部材別光触媒仕様

	西	南	東
屋根(屋根用スレート板)	塗装あり	—	塗装あり
2F外壁(住宅用金属系外壁(アルミ))	塗装あり	塗装あり	塗装なし
1F外壁(住宅用窯業系外壁)	塗装あり	塗装あり	塗装なし
2F開口部(複層ガラス)	塗装あり	塗装あり	塗装なし
1F開口部(複層ガラス)	塗装あり	塗装あり	塗装なし

図16 1階室内空気温度比較(散水なし)

図17 2階室内空気温度比較(散水なし)

図18 1階室内空気温度比較(散水あり)

写真2 東京大学戸建実験住宅

図13 実験住宅平面図

図 19 2 階室内空気温度比較(散水あり)

(2)結果・考察

図 16、17、18、19 に散水なし、ありそれぞれの 1、2 階室内空気温度の実測値と計算値の比較を示す。なお、ここでいう散水ありとは屋根、外壁、開口部の全面にわたって散水を行ったものである。散水なしは 2005 年 8 月 15 日、散水ありは 2005 年 6 月 28 日の実測データを使用した。

散水なしの日平均誤差は 1 階が約 0.7℃、2 階が約 1.3℃、散水ありはそれぞれ約 0.8℃、約 1.1℃となっており、1 階よりも 2 階の方が誤差は大きく、再現がやや困難であると言えるが、傾斜面実験装置と同様に温度変動傾向をよく捉え、誤差も小さいことがわかる。

4.3 戸建標準住宅モデルを用いた年間シミュレーション

(1)概要

実測値と計算値の比較により使用した熱負荷計算プログラムと理論式の正当性が裏付けられた。本研究ではさらに日本建築学会が提案した戸建標準住宅モデル⁴⁾(木造、延床面積 125.86 m²) (図 20) を使用して、地点別また散水パターン別の冷房負荷低減効果を検討する。標準住宅モデルについては外壁、屋根、開口部の断面仕様、使用部材を東京大学実験住宅と同一にしてシミュレーションを行い、冷房負荷低減効果を算出する。建物の熱損失係数は 1.50 W/m²・K で寒冷地仕様である。今回冷房のみを対象としたので、地域別の熱損失係数は考慮しなかった。

空調条件は、室内の設定温湿度はそれぞれ 26℃、50%の間欠空調であり、期間は 6 月 1 日～9 月 30 日の夏期 4 ヶ月間である。対象地点は地域性、人口等を考慮して、旭川、札幌、仙台、新潟、東京、名古屋、大阪、広島、松山、福岡、鹿児島、那覇の 12 地点とした。使用気象データは SDP 気象データに基づき作成した各地点の標準気象データ¹³⁾である。

散水時間は東京大学構内戸建実験住宅同様に 7:00～18:00 で、流量は 100ml/min・m²で行った。北面には散水を行わない。散水パターンは外壁散水、開口部散水、屋根散水、全面散水(屋根+開口部+外壁)の全 4 パターンであり、散水なしの場合と比較して、それぞれのパターンでの冷房負荷低減効果、また部位別評価を行うため、それぞれの部位で単位面積あたりの冷房負荷低減量を算出した。

(2)結果・考察

図 21 は各地点で散水なしのパターンにおいて冷房負荷計算を行った結果であり、標準住宅モデル一戸全体での冷房負荷量を示している。那覇は約 25GJ、福岡、松山、広島、大阪 20GJ 程度である。また、旭川、札幌、仙台は約 10～13GJ であり、那覇の 40～50% 程度の冷房負荷量である。

図 22 は各地点で建物に全面散水を行った場合の冷房負荷低減効

果である。全国で 20%程度の冷房負荷低減効果があることがわかるが、那覇 15.1%、旭川 23.8%、札幌 22.6%と、気候が寒冷な都市が温暖な都市よりも低減効果が大いことという傾向がある。この原因としては負荷の絶対量の違いが考えられる。旭川、札幌、仙台などは夏期でも冷房を必要としない日が何日もあり、冷房負荷が小さいのに対して、ほぼ毎日冷房を必要とする那覇では、冷房負荷が非常に大きい。このため負荷低減量が全体に占める割合が大きくなったということが考えられる。

図 23 は東京においての各散水パターンでの冷房負荷量であり、これを基に算出したのが、図 24 の単位面積あたりの冷房負荷低減量である。屋根、外壁、開口部での冷房負荷低減量をそれぞれの散水部位の総面積で割り、算出した。開口部が屋根、外壁の 3、4 倍程度の低減量であり、断熱材を有している屋根、外壁よりも、開口部への散水が冷房負荷低減に有効であることがわかる。

図 20 日本建築学会標準住宅モデル(木造)

図 21 全国 12 地点夏期 4 ヶ月冷房負荷量(散水なし)

図 22 全国 12 地点冷房負荷低減率(全面散水)

図 23 散水パターン別冷房負荷量(東京)

図 24 単位面積あたり冷房負荷低減量(東京)

5. まとめ

本研究では傾斜屋根実験装置を作製し、実験により光触媒加工屋根の絶対湿度基準物質移動係数を算出した。その値および蒸発冷却理論を組み込んだ多数室非定常熱負荷計算プログラム LESCOM-vapor を用いてシミュレーションを行い、傾斜屋根実験装置の温熱を再現するとよく一致した。引き続き東京大学構内の実験住宅でも蒸発冷却のシミュレーションを行うと比較的よく一致し、温度変動を捉えることができた。このプログラムが検証できたと考え、日本建築学会の戸建住宅標準モデルを用いて、光触媒散水システムによる省エネルギー効果を全国主要都市で算出し、以下の知見を得た。

- (1) 夏期の日中において、傾斜屋根実験装置で光触媒塗装部材に散水を行うと、散水を行わない場合に比べて、屋根表面温度は約 20℃、箱内空気温度では約 10℃の温度低下が見られた。
- (2) 光触媒塗装屋根用スレート板の実用的な物質移動係数 $k_x = 0.0113 \text{ [kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kg/kg})]$ である。
- (3) シミュレーション結果では建物全面に散水を行った場合の冷房負荷低減効果は温暖地において、20%程度である。
- (4) 冷房負荷低減効果としては、気候が寒冷な都市が温暖な都市よりも比率は大きい。しかし、低減された冷房負荷の絶対量としては温暖な都市の方が大きい。
- (5) 断熱材を有する屋根、外壁よりも、貫流率の大きい開口部に散水を行うことがより冷房負荷低減に有効である。

謝辞

本研究は NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）および建材メーカー5社（松下電工、泉、東陶機器、日本板硝子、YKK AP）の委託によるものである。東京大学戸建実験住宅では松下電工の仲野章生氏また、傾斜屋根実験箱の実験に際して、本学大学院生の安藤邦明氏、宮道智嗣氏、卒研生の若松義昭氏、岩井規泰氏、吉田太郎氏、西原猛氏、杉浦直隆氏には大変お世話になりました。感謝の意を表します。

注

LESCOM (Life Energy Saving Computer Method) はレスポンス・ファクタ法による多数室非定常熱負荷計算法を用いたプログラムである。1960 年代後半、Stepheson らのレスポンス・ファクタ法が日本でも紹介され、筆者は当時出始めたばかりの大型計算機で試算してみたが、結果は芳しくなかった。そのため日本で独自に開発された多層壁のレスポンス・ファクタの理論とプログラムをもとに、間欠空調の蓄熱負荷計算、多数室室温変動計算へと発展させたプログラムを開発した。同時にオフィスビル等の実測も行い、実測

値と理論値の比較・検証の結果、実用に十分耐えることを確認した。本研究ではこの LESCOM に蒸発冷却の理論を追加し、LESCOM-vapor と称してシミュレーションに用いた。

参考文献

- 1) Rong Wang, Kazuhiro Hashimoto, Akira Fujishima et al.: Light-induced amphiphilic surfaces, NATURE Vol.388, pp.431-432, 1997.7
- 2) W.K.Lewis: The Evaporation of A Liquid into A Gas: A Correction, Mechanical Engineering, Vol.55, pp.567-573, 1933
- 3) 石川幸雄、木村建一：湿相当外気温度に基づく屋根散水の熱的効果に関する研究, 日本建築学会論文報告集, No.334, pp.89-100, 1983.12
- 4) 宇田川光弘：伝熱解析の現状と課題, 日本建築学会環境工学委員会第 15 回熱シンポジウム pp.23-24, 1985.9
- 5) 渡辺俊行：放射冷却・蒸発冷却, 日本建築学会環境工学委員会第 18 回熱シンポジウム pp.63-70, 1988.9
- 6) 高橋達、黒岩哲彦：雨水の蒸発を利用した二重屋根採冷システムの開発と室内温熱環境の実測, 日本建築学会環境系論文集, No.573, pp.55-61, 2003.11
- 7) 馬景輝、須永修通：屋根流水を用いた天井放射冷房の熱性能に関する実験研究、屋根流水放射冷房システムに関する研究 その 1, 日本建築学会環境系論文集, No.590, pp.29-35, 2005.4
- 8) 荒井和人、武田仁、浅田秀男：光触媒外装材を用いた壁面散水システムの蒸発冷却効果に関する研究 その 3 部位実験装置の実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.647-648, 2005.9
- 9) 宮道智嗣、武田仁：光触媒の親水性を利用した蒸発冷却効果に関する研究－光触媒外装材を用いたオフィスビル実験棟の散水システムによる蒸発冷却効果－空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 I, pp.661-664, 2005.8
- 10) 仲野章生：建物散水による放射冷却に関する研究～光触媒外装材への散水が建物の熱負荷に及ぼす影響～, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2 pp.269-270, 2005.9
- 11) 長沼宏、岡建雄、首藤治久、佐藤和君：超親水性光触媒を施した外壁表面の水膜形成による冷却効果に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, No.596, pp.109-115, 2005.10
- 12) 武田仁、胡震洪：光触媒利用外付け日除けスクリーンによる建物温熱評価、日本建築学会技術報告集 第 22 号, pp.285-289, 2005.12
- 13) 武田仁、稲沼實、吉澤望、磯崎恭一郎：標準気象データと熱負荷計算プログラム LESCOM, 井上書院, 2005.3

(2006年1月10日原稿受理, 2006年4月26日採用決定)