

屋根散水システムによる暑熱環境改善効果

Thermal Environment Improvement of the Roof Spray Cooling System

島田 潔 KIYOSHI SHIMADA

紺野 康彦 YASUHIKO KONNO

屋根散水システムを施工した4種類の建物について、建物概要と実測結果を示した。屋根散水の暑熱環境改善効果は、日射取得熱の削減で非常に高く、放射温度、室温、作用温度も低減された。特に、建物の天井高さや散水面の形態係数に因っては、さらに高い効果を確認した。

キーワード：屋根散水システム、蒸発冷却、暑熱対策、省エネルギー

In this paper, the thermal environment improvement effects that has been investigated on four types of building with the roof spray cooling system are reported. Thermal environment of the rooms were certainly improved in drastic reduction of solar heat gain by roof spraying. It was confirmed that the room temperature, radiant and operative one were also reduced, and the effects depended on height of the room and its angle factor of sparing roof.

Key Words: Roof spray cooling system, Evaporative cooling, Reducing heat stress, Energy conservation

1. はじめに

屋根散水は、打ち水などに見られるような昔から広く使われてきた技術を応用したものであるが、社会的認知度は決して高くない。しかし、2003年8月25日には、『大江戸打ち水大作戦』というイベントもあり、気化熱の直接利用に注目が集まっている。

既報では、技術の開発段階として完成度の向上を目指して行った様々な実験・検討についての報告を行ってきた。まず、散水器具の特性と濡れ面の形成状態とその変化について、実験を行い確認し、同時に順次散水式システムのモデル化と運転制御システムの開発を行い、当社実験施設での実測結果を報告した¹⁾。続報では、壁の無い開放空間での実測結果の報告と循環型と非循環型の比較を行った²⁾。そして、シミュレーションによる屋根散水効果の予測技術の開発とその精度の向上に関する補足技術の検討を行った³⁾。

これまでの開発の結果、当技術はすでに実施段階に入り、ここ数年実施物件も増え、システムだけでなく、設計・施工方法などにおいても完成度の高いものになりつつある。

既報でもいくつかの適用事例について、その都度報告を行ってきた。しかし、それらは単体としての評価に

留まり、建物ごとの比較を行ってはいない。

そこで本報では、実施物件における熱的効果の比較に主眼を置き、近年施工した4物件の暑熱環境改善効果について報告する。

2. 屋根散水システムの概要

屋根散水システムは、循環型順次散水式*を標準としている(図-1)。循環型とは、散水した水が蒸発しなかった分を回収し、再使用するシステムであり、順次散水式とは、散水を屋根全面に対して一度で行わず、系統(エリア)分けして切り替えながら行う方式で、共に環境負荷を少なくすることが目的であり、省水量化が図られる。

散水ユニットは、メンテナンス性を重視した目詰まり防止型ノズルを用いており、散水半径は、2m程度である。

*既報では、循環型を回収式、順次散水式を間欠散水、逐次散水等の表現を用いてきたが、本報の表現で統一するものとする。

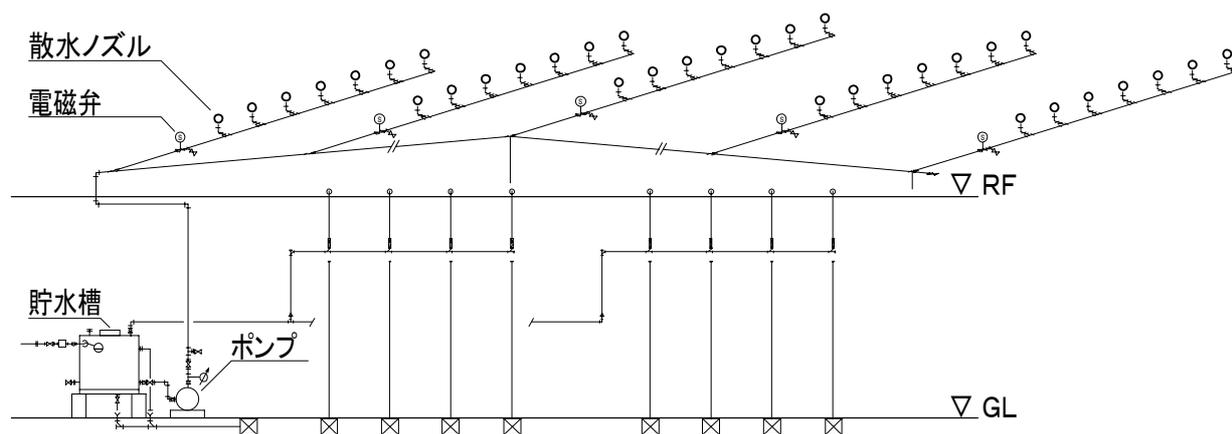


図-1 屋根散水システム概略系統図

表-1 測定対象概要

略称	物件 1	物件 2	物件 3	物件 4
物件名	A 菓子メーカー	B 触媒メーカー	C リース会社	D 自動車メーカー
	物流倉庫	製造棟	倉庫	更衣棟
所在地	奈良県大和郡山市	茨城県岩井市	東京都江戸川区	神奈川県平塚市
施工時期	2001.7	2002.8	2002.8	2003.7
散水面積[m ²]	1,350	430	640	850
目的	商品の保護	作業環境改善	作業環境改善	作業環境改善
屋根構造 K[W/(m ² ・K)]	折板 5.88	折板 1.85	折板 5.88	デッキプレートスラブ 3.98
屋根色	白	グレー	クリーム	グレー
壁構造	折板	ALC	ALC	ブロック
平均天井高[m]	4	5	9.5	2.9
形態係数*	0.98	0.93	0.78	0.99
散水方式	順次散水	間欠散水	順次散水	順次散水
	循環	非循環	循環	循環
使用水	井水	水道水	雨水	工業用水
概要説明	下階は倉庫であり、室内は、ダンボール（商品入り）が山積である。	室内に機器等は入っていない、下階も同様である。散水方式が全面一斉散水する間欠式である。	平屋建て。天井高が他に比べて高く、屋根の形態係数が比較的小さい。室内は、大型工作機器等があるものの、稼動はしていない。	室内には、ロッカーが多数あり、下階も同様の更衣室である。屋根構造が他と異なり、天井高が低く、形態係数が非常に大きい。

*室中心、FL+1500 における屋根の形態係数を指す



写真 1-1 物件 1

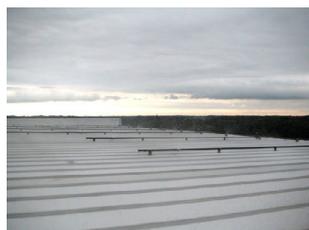


写真 1-2 物件 2



写真 1-3 物件 3



写真 1-4 物件 4



写真 2-1 物件 1



写真 2-2 物件 2



写真 2-4 物件 4



写真 3-1 物件 1



写真 3-3 物件 3



写真 3-4 物件 4

3. 測定概要

(1) 建物の概要

測定対象の概要を表-1 に示す。構造は、すべて鉄骨造であり、物件 1,3 は、一般的な折板屋根同様、屋根に断熱はほとんどなく 4mm 程度である。物件 4 については、屋根がデッキプレートスラブであるものの、ほとんど断熱がない。また、天井等もなく、屋根の熱抵抗は非常に小さい。建物内にも特に発熱機器等はなく、空調も無いのが特徴である。

それぞれ散水方式や使用水が異なるが、使用水量が変わるだけで、効果への影響がほとんどないことは既報²⁾で示した。また、屋根の色に関しては、近赤外線域が評価されないものの、日射吸収率の参考として記載した。

また、すべての物件において、導入前にシミュレーション³⁾を行い、ある程度の効果が望めることを検討している。

(2) 測定概要

測定には、おんどとり (TR-72S, TR-52: ティアンドディ) を用い、室温、外気温、屋根等の表面温度を 10 分間隔で測定した。なお、室温は、室形状に応じて、平面・垂直方向の分布を適宜測定した。

測定は、同時測定における比較が望ましいが、内部は連続空間であり、屋根の半分を散水し、他の半分を非散水することでの比較は難しい。また、その際は、同一気象条件での比較が望ましいが、測定可能期間の制限もあり、そのような偶然に期待した測定は難しかった。

そこで基本は全面散水とした上で、部分的な非散水部分を設け、各屋根外表面温度を基本として検討を行うこととした。ただし、物件 4 に関しては、屋根の熱容量

の点から、上記手法での検討は行わず、同様の気象条件時を抽出し、検討する手法を用いた。また、一部、同日に途中から散水し、比較する方法も用いている。

4. 測定結果及び考察

(1) 測定結果

測定対象とした 4 物件の中から例として、物件 2 と 3 の屋根外表面温度、日射取得熱量、放射温度、外気条件の変動を図-2, 3 (1 時間平均) に示す。また、それぞれの項目における熱的効果の最大値を他の 2 物件を含めて表-2 にまとめた。物件 4 に関しては、他の物件と異なり、屋根の熱容量が大きいため、散水時と非散水時のピークが大きすぎており、屋根内表面温度がピークの時の値を用いて検討した。

a) 屋根外表面温度低減効果

物件 2 では、8/22 14:00 に非散水面で 56.4℃、散水面で 32.0℃あり、24.4℃低減された。8/25 11:00 では、強風であったため、屋根表面温度が低くなり、非散水面で 50.7℃、散水面で 33.9℃と 16.8℃低減された (図-2)。物件 3 では、同様にして 17.0℃から 17.8℃に低減されている (図-3)。また、散水により屋根表面温度がほぼ外気温レベルとなり、日射熱が気化熱により相殺されていることが既報と同様に確認できる。図に示していない他の物件についても、同様に散水時には、外気温レベルまで下がっている。

物件 2 と 3 を比較した場合、屋根の日射吸収率が高いと思われる物件 2 のほうが非散水時の屋根表面温度は 10℃以上高いが、散水時の表面温度は、湿球温度程度となるため、2℃程度しか変わらない。

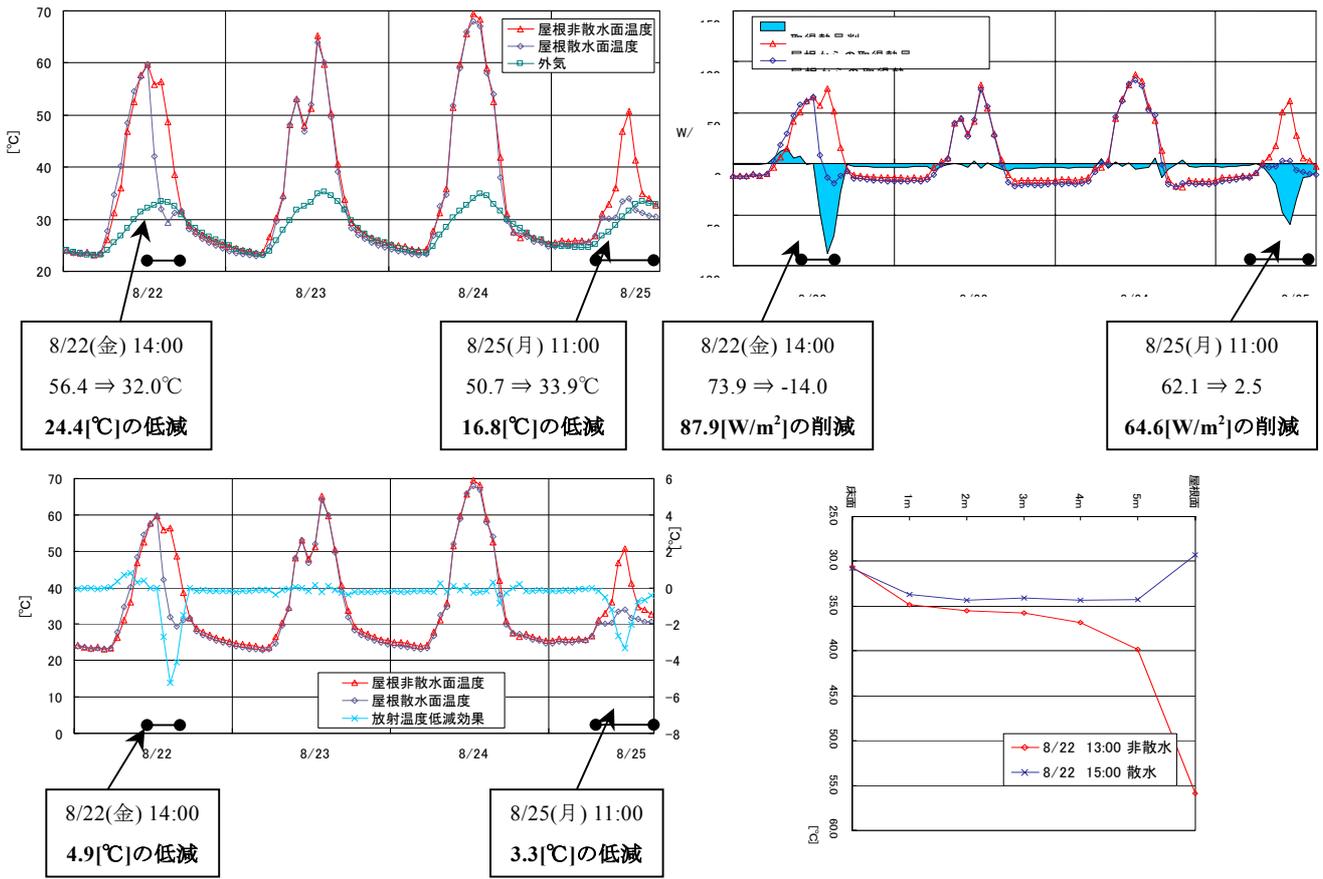


図-2 屋根外表面温度 (左上), 日射取得熱量 (右上), 放射熱低減効果 (左下), 垂直温度分布 (右下) (物件 2)

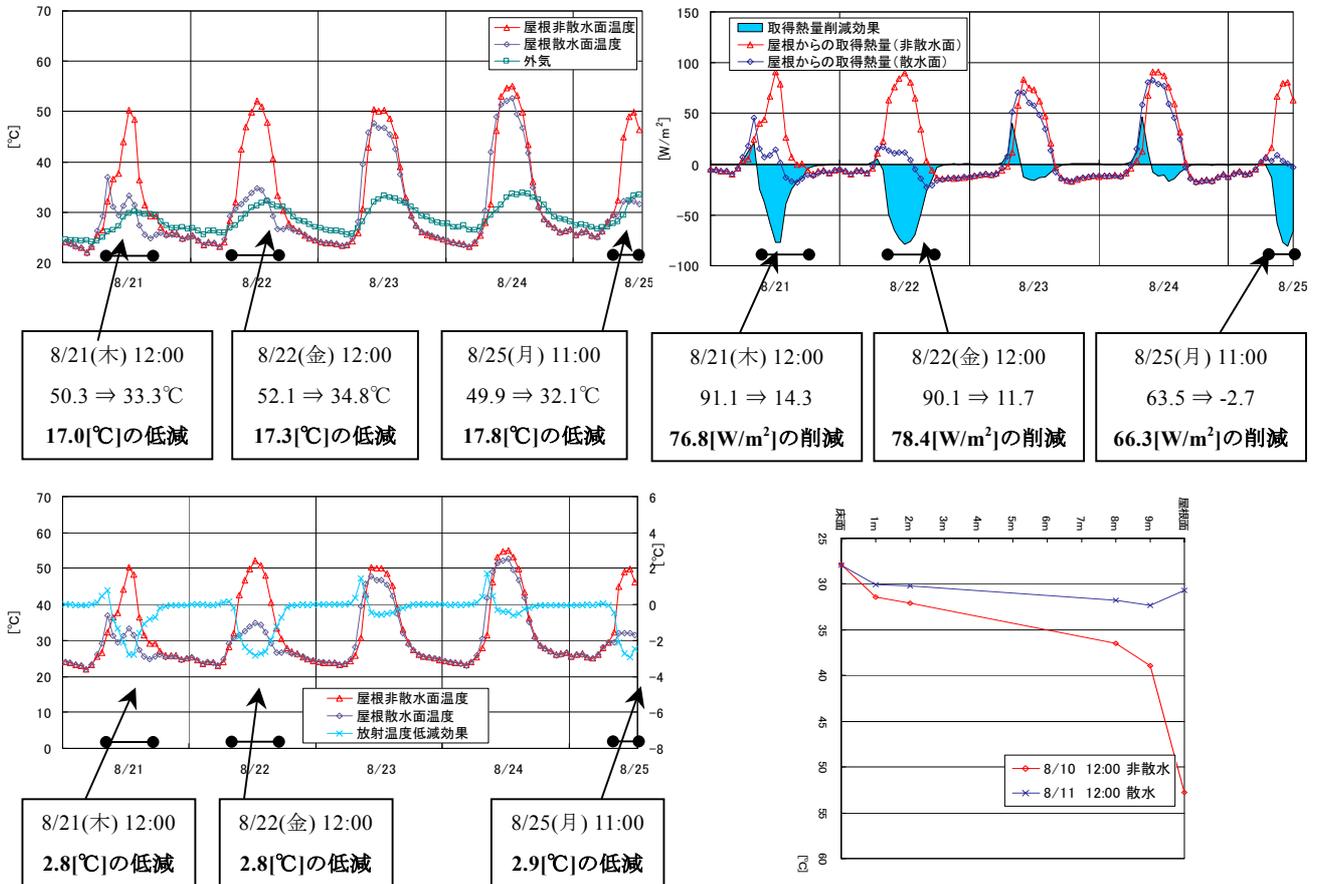


図-3 屋根外表面温度 (左上), 日射取得熱量 (右上), 放射熱低減効果 (左下), 垂直温度分布 (右下) (物件 3)

b) 日射取得熱の削減効果

屋根散水による屋根からの日射取得熱の削減効果を算定した。それぞれ、散水面と非散水面の屋根外表面温度と室温から取得熱量を算出し、その差を削減効果とした。

なお、物件 1 から 3 については、屋根の凹凸形状を考慮し、熱コンダクタンスに形状補正係数として 1.4 を乗じたものを用いた⁴⁾。物件 4 については、屋根内表面温度を測定しており、その値を直接用いた。

$$Q = 1 / (1 / \alpha_i + 1 / C) (T_s - T_i)$$

$$\alpha_i = \begin{cases} 7 & T_s > T_i \\ 9 & T_s \leq T_i \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta Q = Q_w - Q_d$$

物件 2 では、8/22 14:00 に非散水面で 73.9[W/m²]、散水面で -14.0[W/m²]あり、87.9[W/m²]の日射取得熱が削減された。屋根散水では、日射取得熱を削減するだけでなく、時として放熱側に回ることが知られているが、本件ではまさにその結果が得られた。

物件 3 でも、同様にして 90.0[W/m²]から 11.7[W/m²]となり 78.3[W/m²]削減されている。

すべての物件について、ほぼ 75 から 90[W/m²]程度の日射取得熱が削減されており、屋根散水の日射取得熱削減効果の目安になると考えられる。

c) 放射温度低減効果

屋根内表面温度の低減による放射温度の低減効果を算定した。それぞれ、散水面と非散水面の屋根内表面温度と FL+1500 における屋根の形態係数を用いて屋根からの放射温度の差を概算した。

$$\Delta T_r = \varphi / 2 \cdot (T_{sw} - T_{sid}) \quad (2)$$

物件 2 では、最大時で屋根内表面温度が 13.7°C 低減されており、形態係数も大きいので、放射温度は 4.9°C 低減されている。しかし、物件 3 については、屋根内表面温度が 7.3°C の低減に留まり、形態係数も小さいため (表-1)、2.8°C の低減効果となった。他の物件に関しても、物件 1 で 6.3°C、物件 4 で 5.9°C となり、形態係数の大きさが重要な要素といえる。

d) 室温低減効果

室内温度低減効果に関しては、近い気象条件での比較で検討し、垂直温度分布を図に示した。物件 3 に関しては、設置条件の関係上、測定点が 1,2,8,9m 点となっており、物件 4 は、高さが低いため、垂直温度分布の計測をしていない。また、物件 1 に関しては、比較検討できるデータを得ることができなかつた。なお、作業域室温とは、高さ 1.2m の平均室温である。

平均室温で比較すると物件 2 では -2.4°C、物件 3 では、

-3.6°C となり、作業領域の室温では、物件 2 が -1.2°C、物件 3 が -1.7°C となった。物件 4 は、天井高さが低いため、屋根内表面温度の影響を受け易く、平均室温の低減効果が -3.7°C となった。

e) 作用温度低減効果

厳密に快適性を検証するのであれば、PMV や SET* を用いるところであるが、パラメーターが多く、建物用途が異なるため、あえて簡便に作用温度を用いることとした。

物件 2 では、室温の低減効果が小さく、物件 3 では、放射温度の低減効果が小さいため、作用温度はそれぞれ -3.1°C、-2.0°C の低減効果となったが、物件 4 では、室温、放射温度共に効果が大きく、-4.8°C の低減効果となった。物件 1 については、室温のデータがないものの、放射温度の低減効果が最も大きいため、作用温度についても大きな効果があったのではないかと考えられる。

5. まとめ

本報では、近年施工した 4 物件において、屋根散水システムによる熱的效果を実測により調べ、比較検討を行った。日射取得熱削減効果では、すべての物件で 70.0[W/m²]を超え、非常に高い効果が確認できた。既報¹⁾でも確認したように、屋根散水では放射環境の改善効果が大きく、室温では -1.2~-3.7°C であったが、放射温度では、-2.8~-6.3°C の効果があり、非常に高い効果を確認できるものもあった。

屋根散水の熱的效果の特徴として、パッシブクーリングシステムであるため、気象条件、特に日射量によって効果の差があり、同時に建物の熱性能、特に屋根の日射吸収率が大きく関係してくる。さらに、快適性を考える場合には、形態係数や天井高さなども大きく関係してくる。特に今回のように発熱のない建物では、室温や放射温度の効果に対して、高い効果を期待する場合、天井高さや形態係数の要因が大きいと言える。

本報では、熱的效果に主眼を置き報告した。屋根散水システムの涼房、省エネルギー効果を考える際には、水使用量についても比較検討の必要があるが、次報以降とする。

表-2 屋根散水の熱的効果一覧

測定時期	物件 1		物件 2		物件 3		物件 4	
	2001/9/15 12:00		2003/8/22 14:00		2003/8/22 12:00		2003/8/24 17:00	2003/8/25 15:00
外気温[°C]	33.4		32.2		31.3		31.8	32.6
日射量[W/m ²] (日中)	716		558		778		33 (768)	472 (842)
	非散水面	散水面	非散水面	散水面	非散水面	散水面	散水時	非散水時
屋根外表面 温度[°C]	45.4	31.0	56.4	32.0	52.2	34.8	-	
	-14.4		-24.4		-17.4			
屋根内表面 温度[°C]	44.1	31.2	44.3	33.8	40.6	33.3	44.6	32.7
	-12.9		-13.7		-7.3		-11.9	
日射取得熱 削減効果 [W/m ²]	86.7	-3.8	73.9	-14.0	90.0	11.7	92.1	18.6
	-90.5		-87.9		-78.3		-73.5	
放射温度 低減効果[°C]	-6.3		-4.9		-2.8		-5.9	
測定時期	-		2003/8/22 13:00	2003/8/22 15:00	2003/8/10 12:00	2003/8/11 12:00	2003/8/24 17:00	2003/8/25 15:00
平均室内温度 低減効果[°C]	-		-2.4		-3.6		-	
作業域室温 低減効果[°C]	-		-1.2		-1.7		-3.7	
作業域 作用温度 低減効果[°C]	-		-3.1		-2.0		-4.8	

記号

- K : 熱貫流率[W/(m²·K)]
- C : 熱コンダクタンス[W/(m²·K)]
- α_i : 室内側総合熱伝達率[W/(m²·K)]
- T_s : 屋根外表面温度[°C]
- T_{sid} : 非散水面屋根内表面温度[°C]
- T_{siw} : 散水面屋根内表面温度[°C]
- T_i : 平均室温[°C]
- T_r : 放射温度[°C]
- φ : 形態係数[-]
- Q : 日射取得熱[W/m²]
- Q_w : 散水面日射取得熱[W/m²]
- Q_d : 非散水面日射取得熱[W/m²]

房の基礎特性と適用, 住友建設技術研究所所報 2000 (No. 27)

- 2) 紺野康彦, 長谷川智久: 金属製屋根を有する大規模建築の温熱環境改善手法 (その 2) 開放空間の屋根への散水適用と散水回収システム及び散水時の水温・空気温度性状, 住友建設技術研究所所報 2001 (No. 28)
- 3) 紺野康彦, 島田 潔: 工場などにおける屋根散水の効果予測技術の開発, 住友建設技術研究所所報 2002 (No. 29)
- 4) 紺野康彦, 島田 潔: 折板屋根大規模建築の温熱環境改善に関する研究 その 8, 日本建築学会学術講演梗概集 2003
- 5) 石川幸雄, 木村健一: 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 第 334 号

参考文献

- 1) 紺野康彦, 長谷川智久: 金属製屋根を有する大規模建築の温熱環境改善手法 屋根散水と置換換気・冷