大規模折板屋根建物を使った保水性コンクリートによる屋上熱遮蔽実証実験と解析

山田 宏之¹・田中 明則²・小山 博之³・羽田 雄一³

¹ 大阪府立大学大学院教授 生命環境科学研究所 (〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1-1)
E-mail: yamada@envi.osakafu-u.ac.jp

² 株式会社森生テクノ (〒540-0012 大阪市中央区谷町2-7-5)
E-mail: sinsei_tecno@yahoo.co.jp

³ 関西電力株式会社電力技術研究所環境技術研究センター (〒619-0237 京都府相楽郡精華町光台1-7)
E-mail: koyama.hiroyuki@b5.kepco.co.jp, hada.yuuichi@b3.kepco.co.jp

本研究は、新しく開発した建築用保水性コンクリート板を用いて、工場の大規模折板屋根を対象に、屋根面からの熱流入の軽減と室内高温環境改善効果の実測と解析を行い、室内暑熱環境改善資材としての有効性を検証することを目的として実施した。2011年夏季の7～9月の実測結果から、折板表面温度の低減効果は保水板区で顕著に現れ、対照とした露出折板屋根区と比べて、夏季晴天日の日中平均値で21.8℃の温度差を生じた。保水板区と対照区の室内環境を比較した結果、天井面温度は平均12.6℃、室温は平均5.7℃保水板区の方が低く、前年まで見られたコンプレッサーの停止事故を防止することに成功した。冬季は日射遮蔽に伴って僅かに室温が低下したが、熱貫流率相当値から考えて、乾燥状態では保温効果を有することが示唆され、夏冬通じて一定の効果があることから実用化の可能性は高いと判断した。

Key Words : temperature, heat insulation, thermal environment, folded-plate roof, water contain board

1. はじめに

現在、東京都や大阪府など大都市を中心に、さまざまなヒートアイランド対策が取られるようになってきている¹⁰⁾。そのような対策の一つに道路面の透水性、保水化があり、現在までに多数の舗装用資材が開発され効果が解析されてきている³⁰⁾。建築物においては、屋上緑化⁵⁾や高反射塗料等の研究・開発が進められているが⁶⁰⁾、保水性資材を建物表面に設置するような事例はまだ数少ない。

現在作られている透水性、保水性のブロックは歩道面などの舗装用に開発されているものがほとんどであり、耐久性には優れるが、建築物屋上や壁面に設置するには重過ぎる上に、適切な固定方法に乏しいという問題点があげられる。そこで我々研究グループでは、建築物表面に設置するのに適する軽量性と加工性の良さ、高い含水率を同時に実現する新しい保水性コンクリート板の開発を行い、研究を重ねてきた⁸⁹⁾¹⁰¹⁾。

本研究では、この保水板を用いて、実際に操作を行っている静岡県湖西市の工場建物を対象に、ガルバリウム鋼板折板屋根面からの熱流入量の軽減効果と室内高温

環境改善効果の実測と解析を行い、室内暑熱環境改善資材としての有効性を検証することを目的とした。

実験を行った工場では、夏季にコンプレッサー室内が非常に高温化し、屋内作業が困難になるばかりでなく、高温が原因であると考えられている運転停止事故が度々起きている。コンプレッサーの停止は、工場の生産ラインを停止させ、非常に大きな経済的損失を生む可能性があり、何らかの対策を行うことが急務となっている。

折板屋根を対象とした入射熱軽減に関する実証研究は過去に多数行われているが、塗料の塗布¹²⁾¹³⁾、断熱材の敷設¹⁴⁾、屋根散水¹⁵⁾などが主であり、積載荷重や固定方法の問題がある保水性資材を、屋根面に設置した大規模な実証実験は行われていない。また、小型のコンテナハウスなどを使った実証試験が多く¹²⁾、実際の建物に適用した場合の長期的な効果が、客観的に評価されていないものと考えられる。

現実に使われている建物を使って実物大実験を行うことは、測定条件の統一性の確保など難しい問題が多く、あまり実施されていないのが現状である。シミュレーションやモデルハウス実験では、対象とする被覆面以外か

らの熱の影響、屋内発熱の影響などを十分に配慮できないことが多く¹⁰⁾、実際の建物に適用した場合に齟齬が生じる可能性もあり、本論のように実物建物を使った検証実験は、実用化を目指す段階においては重要であると考えられる。

2. 研究方法

(1) 測定対象地の概要

本研究は、静岡県湖西市のA工場のコンプレッサー室およびボイラー室の2室を使って実験を行った。2室は建物2階にあり、それぞれ床面積が異なるが、単純な直方体の形状であるため、単位天井面積当たりの屋内体積は同一であり、屋根面からの熱流の影響は、基本的に等価に現れるものと考えられる。それぞれ北側壁面のみが外気に接しているが、壁面は断熱されており、壁面を通じた外部からの熱の移動は少ないと考えられる。また、それぞれの部屋に窓は無く、開口部は出入り口が東西2か所に付けられているのみである。各部屋には、始業時および終業時に担当職員が短時間出入りするのみであり、その際に自然通風による換気が行われている。従って、本研究における解析結果は、このような半密閉状態の室における熱環境に関して記述するものであり、一般的な居室には、直接的には適用できないと考えられる。

A工場では、主に自動車用に使われる様々な成形部品を製造しており、熱源と圧縮空気は全てこの2室から供給されている。コンプレッサー室には水冷式の大型コンプレッサーが4台設置されており、ボイラー室にはボイラーが1基設置されている。それぞれの機器の発熱量は異なり、機器の仕様等から考えて、ボイラー室の方が発熱量は大きい。また、稼働状況によって1日の発熱量は大きく変化する。そのため機器が稼働している期間は、屋内熱環境の正確な直接比較は出来ないと考えられる。そこで、工場の休業日のデータを中心に解析を行うこととした。

屋根は0.8mm厚のガルバリウム鋼板を使った折板屋根であり、室内側に5mm厚のガラス繊維断熱材 ($\lambda = 0.037\text{W/m}\cdot\text{K}$) が接着されている。この屋根上に保水板設置枠を設けて、25mm厚の保水板を設置した。屋根面の断面構成は図-1に示すとおりである。

コンプレッサー室の平面構成は図-2のようになっており、内寸は幅17.589m、奥行6.919m、天井面(折板下端部)までの高さ4.026mである。ボイラー室の内寸は幅8.570m、奥行6.919m、天井面までの高さ4.026mである。

(2) 実験方法

コンプレッサー室の屋上に保水板設置枠を設け、保

水板を全面に敷設した(写真-1)。実験に使用した保水板は数種類の鉱物性の原料とモルタルで作られている。乾燥時の密度は $0.8\sim 1.0\text{g/cm}^3$ 、最大体積含水率は約40%の軽量で高保水性の資材である¹⁰⁾。日射計を用いて実測した湿潤時の反射率は約40%である。熱伝導率は、乾燥状態で $0.138\text{W/m}\cdot\text{K}$ 、水分飽和状態で $0.598\text{W/m}\cdot\text{K}$ である。比熱は、乾燥状態で $0.86\text{J/g}\cdot\text{K}$ 、水分飽和状態で $2.61\text{J/g}\cdot\text{K}$ である。

図-1 調査対象建物の屋根断面構成概略図

図-2 調査対象建物の概略平面図

敷設範囲はコンプレッサー室を覆う全面であり、面積は 130m^2 、敷設した保水板($300\times 300\times 25\text{mm}$)は約1500枚である。保水板は設置枠に強固に固定されており、建築用屋根材として十分な強度を持つように設計されている。実験期間中に台風の直撃を受けたが破損等は無かった。保水板間の隙間はシールド等は行っていないため、気密ではないが、隙間は極めて小さく、下層空気層に顕著な空気移動は発生しないものと考えられる。

保水板敷設後に散水用スプリンクラーを5基設置し、実験期間中は1日1回、4時から5時まで60分間の散水を行い、1日に約5880L放水した(写真-2)。過去の実験結果から考えて⁹⁾⁾、保水板1枚当たり必要な散水量は1.2L/日程度(実際の蒸発量は0.5L/日以下)であるが、この建物の立地が風の強い場所にあり、かつ建物内部からの排気ダクトも屋根周辺に設置されているため、今回用いたような高く水を噴き上げるスプリンクラー方式では散水ムラが大きくなり、全体に水を行き渡らせるためには大量の散水が必要になることが分かり、事前に何度か実験を行って最終的な散水量を決定した。染み出し漏水パイプ等を用いた方式であれば、これほど大量の散水は不要になるものと考えられ、過去の実験結果⁹⁾⁾から推定される必要散水量は1日に1800L程度である。なお、散水には

工場で使われている工業用水を用いた。

(3) 測定項目

a) 日射量

屋上に日射計（EKO：MS-601）と自記電圧計（日置電機：DATA-mini3645）を設置し、10分間隔で日射量の測定を行った。

b) 外気温、湿度、屋上面温度

屋上に日射遮蔽筒を付けた自記温湿度計（日置電機：DATA-mini3641）を屋上面上1.5m地点に設置し、気温、相対湿度を10分間隔で測定した。この温度計は屋上排気塔支柱を用いて、直接日射の当たらない位置に設置した。また、外部センサー付き自記温度計（日置電機：DATA-mini3633）を4台設置し、保水板設置区では保水板表面温度、保水板下面温度、折板面温度を、対照区では折板面温度をそれぞれ10分間隔で測定した（図-2）。外部センサーとしては、金属被覆型のラグセンサーを用い、保水板表面では保水板を削り、感温部を半分埋め込むような形で設置した。折板面には感温部を密着させ、粘着テープで固定した。

写真-1 保水板の設置状況

写真-2 スプリンクラーによる散水

また、外部センサー付き自記温度計（日置電機：DATA-mini3633）を4台設置し、保水板設置区では保水板表面温度、保水板下面温度、折板面温度を、対照区では折板面温度をそれぞれ10分間隔で測定した（図-2）。外部センサーとしては、金属被覆型のラグセンサーを用い、保水板表面では保水板を削り、感温部を半分埋め込むような形で設置した。折板面には感温部を密着させ、粘着テープで固定した。

c) 室温

保水板設置区の室内に4個、対照区の室内に1個の自記温度計を設置し、室内温度変化を10分間隔で測定した。測定点は、保水板設置区では床面上1.5m、2.9m、3.5m、3.8mの地点、対照区では床面上1.5mの地点に設けた。

d) 天井面熱流

保水板設置区、対照区それぞれの部屋中央付近の天井（折板下部）に熱流板（HUKSEFLUX：Heat Flux Plate）と自記電圧計を設置し、天井面熱流を10分間隔で測定した。

e) 天井面温度

保水板設置区、対照区それぞれの天井1箇所に自記温度計と温度センサを設置し、天井面温度を10分間隔で測定した。測定位置は室温測定点の直上である。

(4) 測定期間

測定は2011年6月11日から9月7日まで（夏季調査）と、2011年12月27日から2012年2月2日まで（冬季調査）を行った。そのうち、6月11日から6月21日までは、保水板を設置していない状態で測定を行った。6月22日から9月7日までは保水板を設置し、散水を行った状態で測定を行った。

2011年12月27日から2012年2月2日までの期間は、冬季の断熱性を確認するための調査として行い、保水板を設置し散水を止めた状態で測定を行った。

夏季調査期間においては、2011年の電力使用制限令の影響もあり、工場の操業が変則的に行われた。通常は土日が休業日であるが、2011年に限り、7月12～15日と、それ以降の木曜日、金曜日が休業日となった。解析には主にこれら休業日のデータを使用した。

冬季の調査に関しては、年度末進行のため休業日が少なく、解析には12月29日～1月3日の正月休み期間中のデータを主に使用した。

なお、降水量に関しては、最寄りのアメダス観測点である三ヶ日のデータを参考に用いた。

3. 結果および考察

(1) 測定期間中の気象条件等

保水板を設置していない2011年6月11日から6月21日までは雨天日、曇天日が多く、安定した晴天であったのは6月13～15日のみであった。工場の休業日は11日、12日、18日、19日である。

保水板設置後は晴天が続き、外気温も高くなった。夏季の調査期間中で晴天かつ工場が休業であったのは、7月12～15日、8月11～18日である。日射量の測定値および屋根上の気温の測定値から見て、最も暑熱環境が厳しかったと考えられるのは7月12～15日であり、本論ではこの間のデータを主に用いて解析を進める。

冬季の測定期間中で、晴天かつ工場が休業であったのは、12月29日～1月3日である。当該地域では12月4日から降雨が無く、12月29日～1月3日の期間は、保水板は極めて良く乾燥した状態にあったものと考えられる。その後、1月19～21日にまとまった降雨があり、湿潤時のデータとして1月22日以降のデータも一部使用して比較を行った。

(2) 保水板設置前の室温比較

6月11～17日までの保水板設置区（以下、C室）、対照区（以下、B室）それぞれの天井面温度の変化を図-3に、室温（床面上1.5m）の変化を図-4にそれぞれ示す。この間、11日、12日が休業日であり、コンプレッサー、ボイラー共に作動していない。11日、12日、13日、16日、17日には降雨があり、晴天日は14日、15日のみである。ただし13日の日中は晴天となり最大日射量も1000W/m²を超えた。

天井面温度を比較すると、16日、17日以外は、ボイラーやコンプレッサーの作動の有無に関わらず、天井面温度には大きな差が生じていないことが分かる。特に日中晴天であった13～15日には、ほとんど温度差が無くなっている。日射の少ない16日、17日にB室の天井面温度が高くなったのは、コンプレッサーよりもボイラーからの発熱の影響が大きいことを示していると考えられる。このように、日射が弱い条件下では室内側の発熱量の違いが天井面温度に大きな影響を与えているが、日射が強い条件下では、それが打ち消されてしまっており、屋根面から侵入する熱の影響の方が、屋内側の発熱量の差による影響よりも格段に大きいことが示唆される。晴天かつ工場が稼働していた13～15日の平均値で比較すると、C室の天井面温度は31.3℃、B室は32.6℃となり、1.3℃の差となった。

室温についても、ほぼ同様の傾向であり、日射が強い条件下では両室の室温は差が小さく、日射の弱い条件

下ではB室の高温化が顕著である。晴天かつ工場が稼働していた13～15日の平均値で比較すると、C室の室温は29.0℃、B室は29.7℃となり、0.7℃の差となった。また、6月上旬であるにもかかわらず、晴天時にB室、C室とも最高気温が35℃を超えている。これは過酷な作業環境であり、長時間滞在して作業を行うことは難しい温熱環境となっている。

図-3 2011年6月11日から17日までの天井面温度

図-4 2011年6月11日から17日までの室温

(3) 保水板設置後の室温比較

保水板を設置した直後の、6月23～29日までのC室、B室それぞれの天井面温度の変化を図-5に、室温の変化を図-6に示す。この間、25日、26日が休業日であり、コンプレッサー、ボイラー共に作動していない。27日には1mmの降雨（AMEDAS三ヶ日）があったが、日中は日射が強く、全体を通じて晴天日が大部分であった。

天井面温度を比較すると、7日間全てにおいてC室、B室の温度差が生じていることが分かる。晴天かつ工場が稼働していた27～29日の平均値で比較すると、C室の天井面温度は31.4℃、B室は38.4℃となり、7.0℃の差となった。ボイラー、コンプレッサーが作動していない25日、26日においては、他の操業日より天井面温度は共に低くなる傾向があるものの、2室の温度差は大きく残

ったままである。

このように、保水板を設置した条件下では、天候条件等によって温度差は異なるものの、C室の天井面温度が大幅に低減されることが確認された。

室温についても、ほぼ同様の傾向であり、日射の強弱や機器の作動状況に関わらず、C室の室温は大幅に低下しており、保水板の設置効果は明らかである。この間のB室の最高室温は6月29日14時40分に記録された44.7℃である。同時刻のC室の室温は38.9℃であり、5.8℃の差が生じている。特にB室は、一般的には人が中に入って作業できる環境とは言えず、極めて厳しい暑熱状態であると考えられる。

図-5 2011年6月23日から29日までの天井面温度

図-6 2011年6月23日から29日までの室温

このC室とB室の差は、夏季の計測期間中ほぼ同じ傾向で現れた。晴天日には天井面温度差、室温差ともに大きくなり、日射の弱い曇天、雨天の際には、発熱量の大きなボイラー室の温度が高くなった。

次に、夏季の測定期間中の休業日で、最も天候が安定し高温となった7月13日の折板屋根面と保水板面の表面温度の変化を図-7に、天井面および室温の変化を図-8に示す。

ガルバリウム鋼板は表面反射率が高く、一般的な塗装鋼板屋根と比べて表面温度が上昇しにくいはずであるが、図-7のように、夏季の晴天時には65℃近い高温となる。それに対して保水板の表面温度は気温と同等か、やや高い程度である。夏季においては、日中の温度低下効果が最も重要であると考え、工場の就業時間帯である8時から17時の間の平均値で比較すると、気温の平均値33.4℃に対して、無処理の折板屋根面は53.4℃（+20.0℃）、保水板表面は32.7℃（-0.7℃）、保水板下の折板屋根面は31.0℃（-2.4℃）となり、日中は気温と同等あるいはそれ以下にまで平均的な表面温度を下げる事が可能であることが分かった。

図-8のように、天井面温度についても大きな差が現れ、8時から17時の間の平均値で比較すると、無処理のB室は44.3℃、C室は31.3℃となり、平均して13.0℃の表面温度低減効果があることになる。最大の温度差は11時20分および12時40分に生じ、16.0℃の差となった。

室温について8時から17時の間の平均値で比較すると、無処理のB室は37.8℃、C室は31.6℃となり、平均して6.2℃の室温差となった。最大の温度差は12時50分前後に生じ、8.0℃の差となった。

天候が安定していた7月14日、15日についても同様に解析し、3日間の平均値を求めた結果、日中（8～17時）に折板屋根面温度を21.8℃低下させ、天井面温度は12.6℃、室温は5.7℃低下させることが出来るという結論を得た。

同じく、7月13日のC室内外の温度鉛直プロフィールの経時変化を示したものが図-9である。日中はほとんど室内の温度勾配が無く、室内の温度分布が上下均一に近いことが分かる。これは屋根面からの熱の侵入量が極めて小さいことを示している。夕方から夜半にかけて、天井付近の気温よりも天井面の温度が低くなっており、天井面から吸熱されていることが温度分布からも分かる。

保水板設置前のデータを用いて同様な解析を行うと、8時頃から天井面および天井付近の温度が急激に上昇し、日中は室内上下方向の温度差が非常に大きくなるプロフィールが得られ、その差異は大きい。

(4) 保水板設置による天井面熱流低減効果

6月11～17日までのC室、B室の天井面熱流の変化を図-10に、6月23～29日までのC室、B室の天井面熱流の変化を図-11に、それぞれ示す。図では、下向き熱流（屋根面から室内へ向かう方向）をプラスで表している。保水板設置前の6月11～17日では、C室、B室共に日中は下向きの熱流、夜間は上向きの熱流が主に生じている。B室では工場操業期間中は午前中に大きなマイナスの値を示し、午後にはプラスに転じるような日変化を示す。

図-7 2011年7月13日の屋根面温度

図-8 2011年7月13日の天井面温度と室温

図-9 2011年7月13日のC室内外の気温鉛直プロフィール
(縦軸高さは床面からの高さを示す)

これは、午前中は操業と共に稼働するボイラーの排熱により、天井付近の空気が急激に暖められて上向きの熱流を生じるが、その後、日射が強まるにつれて屋根面

からの熱流が卓越するように変化するためであると考えられる。C室では、日射が強まるに従って下向きの熱流が増加し、13日の正午前後には $100\text{W}/\text{m}^2$ を超えるような大きな熱流が観測されている。これは、B室のような室内側からの加熱量が少なく、日中の天井付近の気温も比較的低いために生じる現象であると考えられる。

保水板設置後の6月23～29日では、B室の熱流は保水板設置前と大きな変化は無いものの、C室においては、熱流の日較差が小さくなり、ほとんど1日中マイナスの値を示すようになった。これは、日中においても太陽熱由来の下向き熱流があまり生じず、むしろ室内外の温度差に伴い、外部への放熱が卓越する状態になっていることを示している。

図-10 2011年6月11日から17日までの天井面熱流

6月23日から29日までの天井面熱流

次に、7月13日の天井面熱流を比較した結果が図-12である。天井面温度差が大きく現れたのと同様に、天井面熱流にも大きな違いが現れた。C室で熱流が下向きになったのは1日のうち20分間だけであり、他の測定値は全てマイナスの値を示した。最大値は12時前後に生じており、夜間は $-5\sim-7\text{W}/\text{m}^2$ 程度の値で安定している。4時から5時にかけて急激な変化をするのは散水の影響である

と考えられる。

8時から17時までの熱流値を積算した熱量で比較すると図-13のようになる。C室、B室の差は746.7kJ/m²となり、過去に研究を行ってきたRC建物と比べると大きな差となっている⁹⁾。これは折板屋根とRC造屋根の断熱性の違いによって生じた差であると考えられる。

図-12 2011年7月13日の天井面熱流

図-13 2011年7月13日（8：00～17：00）の天井面熱流量

(5) 冬季の室温比較

2011年12月29日から2012年1月3日までのC室、B室それぞれの天井面温度の変化を図-14に、室温の変化を図-15にそれぞれ示す。この間は正月休みの休業日であり、コンプレッサー、ボイラー共に作動していない。また、散水は行っておらず保水板は乾いた状態である。この間、1月1日には僅かに雲があったが、他の5日間はほぼ1日中快晴の天候条件であった。

天井面温度を比較すると、12月29日の僅かな時間帯を除いて、C室の方が日中、夜間ともに低温を示した。6日間の平均値で比較すると、C室は7.1℃、B室は8.7℃となり、保水板設置により、天井面温度は平均1.6℃低下するという結果になった。このように、保水板を設置した条件下では、冬季晴天日にC室の天井面温度が低下するが、夏季と比べてその温度差は非常に小さい。

室温についても、ほぼ同様の傾向であり、僅かな時間帯を除いてC室の方が日中、夜間ともに低温を示した。6日間の平均値で比較すると、C室は7.1℃、B室は7.8℃となり、保水板設置により、室温は平均0.7℃低下するという結果になった。僅かに低温化する傾向であるが、夏季の大きな温度差と比較すると、その影響は小さいものと考えられる。

図-14 2011年12月29日から2012年1月3日の天井面温度

図-15 2011年12月29日から2012年1月3日の室温

図-16 2011年12月29日から2012年1月3日の天井面熱流

(6) 冬季の天井面熱流および熱貫流率

2011年12月29日から2012年1月3日までのC室、B室の天井面熱流の変化を図-16に、6日間の全測定値から計算した平均日積算熱量を比較した結果を図-17に示す。昼夜の熱流差はB室の方が大きく、下向き熱流となる時間帯もB室の方が長い。夜間の放熱量はC室の方が大きくなり、積算値で比較しても、C室の放熱量が大きい結果となった。ただし、その差は夏季と比べて非常に小さいため、屋内温熱環境に与える影響も小さいと考えられる。

図-17 2011年12月29日から2012年1月3日の天井面熱流量
(平均日積算値)

なお、1月22日以降の保水板が湿潤状態の期間に関しては、コンプレッサー、ボイラー共に休止していた休業日が存在しなかったため、湿潤状態での室温や熱流の日変化の検討は行えなかった。

次に、保水板被覆屋根断面全体での等価熱貫流率を実測値ベースで検討するために、屋外、屋内ともに短時間での温度変化が少なく、全体として単純な温度低下もしくは温度上昇傾向の時間帯であり、室内の発熱源が作動しておらず、かつ天候の安定した時間帯のデータを検索した結果、乾燥状態下では2011年12月28日20時から29日7時まで、湿潤状態下では2012年1月23日17時から24日6時までのデータが抽出された。それらのデータのうち、C室では保水板表面温度と天井面温度、B室では折板表面温度と天井面温度を用いて、天井面熱流の値から熱貫流率 k ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) を計算した結果が図-18、19である。温度差の安定した実験室内で測定したものではないこと、部材の蓄熱の影響が含まれるため、変動は大きいですが、概ねの傾向は把握できたものと考えられる。なお、湿潤状態においては、保水板からの蒸発潜熱の影響により、保水板面において熱損失が生じる。本来、このような熱損失が生じる素材において熱貫流率を求めるという方法は正しくない。ここでは、冬季における断熱性の比較のための指標として、あえて熱損失がある状態のままで熱貫

流率を計算している。そのため、本論においては、計算で求めた値は熱貫流率相当値と記し、一般的な熱貫流率とは区別している。

無処理の折板屋根面の、乾燥時と湿潤時の熱貫流率相当値の差は10%以下しかなく、概ね同一と見なせるが、保水板を設置した屋根面では、湿潤時には乾燥時の2倍以上の値を示した。これは、工業試験場で常法により計測した保水板の乾燥時と湿潤時の熱伝導率 $0.138\text{W/m}\cdot\text{K}$ 、および $0.598\text{W/m}\cdot\text{K}$ の値、また、蒸発潜熱の影響等を考慮すれば妥当な結果であるといえる。

これらの結果が示すように、乾燥状態においては、保水板設置屋根の熱貫流率相当値は無処理の折板屋根よりも低下し、保温性の向上が見込まれる。休業日において天井面温度や室温は保水板設置によって僅かに低下したが、これは日射による屋根面発熱の伝導量差が影響を与えたものと考えられ、操業時で内部発熱がある場合には、内部の保温性は向上するものと考えられる。一方、湿潤状態においては、保水板設置によって熱貫流率相当値が増加し、保温性は低下する可能性が高い。折板部分での熱貫流率にはほとんど変化は無いはずであるが、保水板とその下の空隙部の低温化が、トータルとして熱の移動量を増加させるために、このような結果となると考えられる。

図-18 乾燥時の屋根断面熱貫流率相当値
(2011年12月28-29日)

図-19 湿潤時の屋根断面熱貫流率相当値
(2012年1月23-24日)

4. 総合考察

夏季の解析結果から考えて、本研究で用いた保水板の折板屋根面への設置は、屋内高温環境の改善のためには大きな効果があるものと考えられる。夏季晴天日の日中（8～17時）においては、折板屋根面温度を平均21.8℃低下させ、天井面温度は平均12.6℃、室温は平均5.7℃低下させることが出来るという結果であった。コンプレッサーやボイラーが稼働した状態であっても、ほぼ同様な効果が得られた。これは、従来研究を行ってきたRC造の建物⁹¹¹と比べ、非常に大きな効果となっている。過去にRC建物において実験された屋上緑化や屋根散水の効果¹⁷と比べても大きい。また、類似した折板屋根建物において調査された屋根散水の効果¹⁵や、屋根緑化の効果¹⁸と比べても大きな値となっている。屋根散水時の天井面温度は、本研究の測定結果と近い値を示しているが¹⁵、散水の継続時間が短いため、室温に与える影響は、本研究の測定結果よりも小さい。

今回のような屋根被覆構造を取った場合、保水板の下面には空気層が生じ、今回測定された熱遮蔽効果は、保水板による冷却効果以外に、屋根面への日射遮蔽効果、空気層による断熱効果が相乗された形で現れたものであると言える。しかし、例えば図-7, 8で示されるように、日中、保水板下の折板面や天井面は気温よりもはるかに低温化している。また、紙面スペースの関係でデータを示すことが出来なかったが、保水板下面の温度は保水板下折板面よりも更に低温である。

折板屋根上に厚い断熱材を敷設し、かつ空気層を設けた実験¹⁹によれば、天井面温度が3～15℃低減したものの、これは外気温よりも18～20℃高温であった。このように、日射遮蔽板や断熱材のみでは、日中の屋根面温度や天井面温度を気温以下に下げることが難しい。

これらの結果から、本工法においては、単なる日射の遮蔽効果や空気層による断熱効果だけでは得られない大きな温度低減効果が、保水板を用いることによって得られたものであると考えられる。

この温度低減の効果によって、前年度まで夏季に発生していたコンプレッサーの停止事故は一度も生じず、工場の操業実績において格段の改善が図れた。また、コンプレッサー調整時の作業員の作業負荷も大幅に改善されたと工場の労務管理者から評価されており、折板屋根工場における熱遮蔽対策としては十分に高い効果が発揮されたものと考えられる。

冬季における測定結果からは、保水板敷設に伴う日射エネルギーの遮蔽によって、晴天日に天井面温度は平均1.6℃低下し、室温は平均0.7℃低下するという結果になった。一方で、温度と熱流の実測データから計算した屋根断面の熱貫流率相当値は、保水板が乾燥した状態であれば低下し、保温性の向上効果があることが分かった。そのため、冬季に乾燥状態を保つことが出来れば、保水板敷設によって保温性の向上効果が期待できることになる。

ただし、湿潤状態では逆に熱貫流率相当値が増加し、保温性を損なう可能性が高い。屋根の覆い等を用いない限り、冬季においても降雨や降雪に伴い湿潤化する期間は存在するため、これらの期間における熱損失が、工場の操業に対してどのような影響を与えるのかについては別途検討する必要がある。本研究で対象とした機械室のように、内部発熱量の大きな場所においては、このような保温性の低下によるマイナスの影響は、ほとんど生じないと考えられるが、人間が常時作業を行っているような場所においては、暖房エネルギーの増大といった悪影響が現れる可能性がある。

今回の調査においては、冬季湿潤時の屋内温度変化を把握するためのデータが十分に取得できなかったため、冬季の1シーズンを通じてどのような影響があるのかについては考察を行うことが出来なかった。これに関しては今後の課題としたい。

謝辞：本研究を遂行するに当たって、工場建物の使用を許可していただいたA工場関係者の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 東京都環境局：ヒートアイランド対策ガイドライン, pp11-20, 2005.
- 2) 環境省：ヒートアイランド対策 : http://www.env.go.jp/air/life/heat_island/index.html
- 3) 萩原伸治他：保水性建材の蒸発性能に関する実験：日本建築

- 学会学術講演梗概集 D-1, pp.637-638, 2005.
- 4) 三坂育正, 成田健一: 保水性舗装による都市暑熱環境緩和に関する研究—その2—: 日本建築学会学術講演梗概集 D-1, pp.639-640, 2005.
 - 5) 唐沢明彦, 土田 保: 建築物の熱環境に及ぼす軽量ポーラスコンクリート屋上緑化システムの効果: 日本緑化工学会誌 27 (1) , pp.205-208, 2001.
 - 6) 福田淳他: 屋上緑化が集合住宅最上階に与える熱的影響: 日本緑化工学会誌 Vol27-1, pp.209-210, 2001.
 - 7) 近藤靖史, 長澤康弘, 入交麻衣子: 高反射塗料による日射熱負荷軽減とヒートアイランド現象の緩和に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集 Vol78, pp.15-24, 2000.
 - 8) 山田宏之他: 軽量高保水性外装資材を用いた建物遮熱性の実証的研究: 環境システム研究論文集 Vol.34, pp.479-485, 2006.
 - 9) 山田宏之他: 高保水性外装資材による省エネルギー効果の実物大建物実験と解析, 環境システム研究論文集 Vol.36, pp.419-425, 2008.
 - 10) 山田宏之他: 高保水性コンクリートパネルを用いた屋外輻射冷房実験と解析: 環境システム研究論文集 Vol.37, pp.125-134, 2009.
 - 11) 山田宏之他: 小学校校舎建物を使った保水性コンクリートによる屋上熱遮蔽実証実験と解析: 環境システム研究論文集 Vol.39, pp.339-349, 2011.
 - 12) 山田大智他: 折板屋根用遮熱シートに関する調査研究: その2 夏期の遮熱効果および冬期の結露防止効果の検証: 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp.1047-1048, 2008.
 - 13) 村田泰孝他: 金属折板屋根の高反射化による室内温熱環境への影響に関する研究 その1 北九州市にある事務所用途建物における温熱環境評価: 太陽/風力エネルギー講演論文集 2010, pp.71-74, 2010.
 - 14) 吉田伸治他: 実測による折板屋根の断熱化による熱負荷削減効果に関する研究: 日本建築学会北陸支部研究報告集 (53), pp.271-274, 2010.
 - 15) 島田 潔他: 屋根散水システムによる暑熱環境改善効果: 三井住友建設技術研究所報告 Vol.1, pp.143-148, 2003.
 - 16) 石野久彌, 一ノ瀬雅之, 野村明子: 屋上緑化の実測及びシミュレーション評価: 太陽エネルギー Vol.31, No.2, pp.21-26, 2005.
 - 17) 周 南他: 断熱を施した建物における屋根散水と緑化の熱的效果に関する検証研究: 日本建築学会技術報告集 Vol.19, pp.215-220, 2004.
 - 18) 関西電力 (株) : RELATION, 2003-9, pp.8, 1995.
 - 19) 白石太助他: 既存折板屋根及びスレート屋根の断熱性向上を付加した超速硬化ウレタン防水工法の開発: 日本建築士学会 2006 年大会学術講演集, pp.251-254, 2006.

(2012. 8. 9 受付)

PROVING EXPERIMENTS AND ANALYSIS OF ROOFTOP HEAT SHIELD EXPERIMENT WITH WATER CONTAIN CONCRETE BOARD THAT USES FOLDED-PLATE ROOF BUILDING

Hiroyuki YAMADA, Akinori TANAKA, Hiroyuki KOYAMA and Yuuichi HADA

In this study, the experiment that covered the large-scale folded-plate roof of the factory building was done by using a water contain concrete board for the construction use. In the factory building, the measurement of the heat inflow on the roof side and the indoor temperature has done and analyse the mitigating effect. The analytical result during the July-September of summer of 2011 is as follows. The effect of the decrease of the roof surface temperature appeared remarkably, and became the temperatures fluctuate of 21.8°C by the mean value by using the water contain concrete board compared with the folded-plate roof area assumed to be a comparison in daytime of a fine day in summer. The ceiling side temperature decreases at 12.6°C in average because it compares the water contain concrete board district and the comparison district, and the room temperature has decreased at 5.7°C in average. As a result, it succeeded in the prevention of the stop accident of the compressor to stay up until the previous year. The room temperature has decreased a little by the insolation cover in winter. However, the value of the coefficient of heat transmission shows that the effect of heat insulation is possessed if the board dried. The industrial method that set up the water contain concrete board on the roof was judged that the possibility of practical use was high from these results.