

# 体育館向け空調システムの開発と実証

## —天井面への遮熱シート設置による温熱環境改善—※

木村健太郎・スレスタミサン  
平原美博\*1・大内修一\*2

### Development and Demonstration of Air Conditioning System for Gymnasiums - Improvement of Thermal Environment in Gymnasium by Installing Thermal Barrier Sheet on Ceiling -

Kentaro Kimura・Mishan Shrestha  
Yoshihiro Hirahara・Syuuichi Oouchi

災害時に防災拠点となる学校や文化施設等の体育館は、避難所での生活環境を改善するため、国庫補助による空調整備が加速化している。2024年度より10年間の限定措置で開始された文部科学省の空調設備整備臨時特例交付金では、断熱/遮熱工事が交付金補助の要件となっており、多くの既存小中学校体育館で対応が必要となっている。本政策では、具体的な断熱/遮熱性能は求められていないものの、授業等への影響を考慮した短工期化に加え、自治体の財政負担を最小限に留める安価な断熱/遮熱工法が要望されている。

我々は、包括連携協定を結ぶ茨城県つくばみらい市の小学校体育館（以下本体育館と称す）にて、熱中症や防寒、感染症対策を兼ね備えた体育館向け空調システムの実証試験を2022年より開始した。初年度の検証では、冷房時と暖房時共に概ね良好な結果が示されたが<sup>1),2),3)</sup>、2023年以降の夏期では、外調機の設計外気温（33℃）を超える酷暑日が続き、外調機の給気温度上昇と外皮負荷増大の影響によりアリーナの温熱環境悪化が散見された<sup>4)</sup>。

本報では、夏の日射による天井高温化や冬の放射冷却による天井低温化に対し、天井からの放射熱伝達の遮蔽による室内環境改善を目的とし、天井面の遮熱シート面積を可変させたときの夏期実測結果、および遮熱シート設置有無による冬期実測結果を示す。

## 1. 体育館の課題と対策

2023年7月28日の本体育館の天井部と床部のサーモグラフィを写真1、本体育館最寄りの気象庁観測データである茨城県つくば市館野の外気温と日照率（太陽が地表を照らす時間の割合）の経時変化を図1に示す。外気温33.7℃、日照率1.0の晴天下において、天井表面温度は平均41.4℃、床表面温度は平均38.3℃となった。2019年に開校した本体育館は、標準的な断熱性能（天井熱通過率2.1 W/(m<sup>2</sup>・K)）にて設計された施設であるが、天井からの放射熱伝達により床温度が上昇し、過大な空調負荷となっている。空調の消費電力低減と体育館内の快適性を向上させるためには、効率の良い空調方式の導入に加え、外皮負荷を低減させることが重要となる。体育館の断熱対策としては、屋根の遮熱塗料や天井部の断熱材設置、外壁面には窓への日射遮蔽フィルム貼りや遮光カーテンなどが提案されている。特に置換空調の環境下では、居住域温度に直結する床温度を低下させることが重要で、形態係数の大きい天井面からの放射量を抑

※ 本論文は、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2025.9.3～5（高松））を加筆修正したものである。

\*1 事業戦略統括部付（日本ピーマック株式会社出向）、\*2 文化シャッター株式会社

えることが有効となる。そこで、中空層を設けて屋内天井に遮熱シートを設置する工法に着目した。この工法は、天井方向への高反射により日射で高温となる天井からの放射熱伝達を抑えながら、床方向への放射熱伝達量の低減を図れる。さらに屋内設置のため紫外線による経年劣化を抑えられ、既存体育館に対し安価で長期間断熱性能を確保できる有用な断熱工法となる。

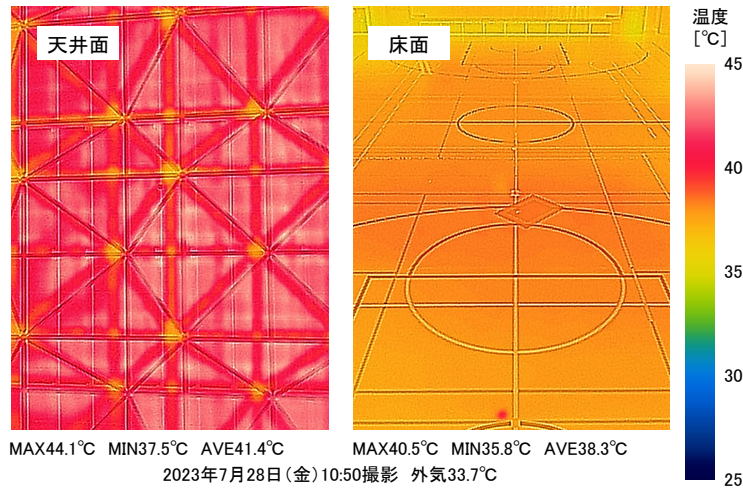


写真1 体育館天井部と床部のサーモグラフィ

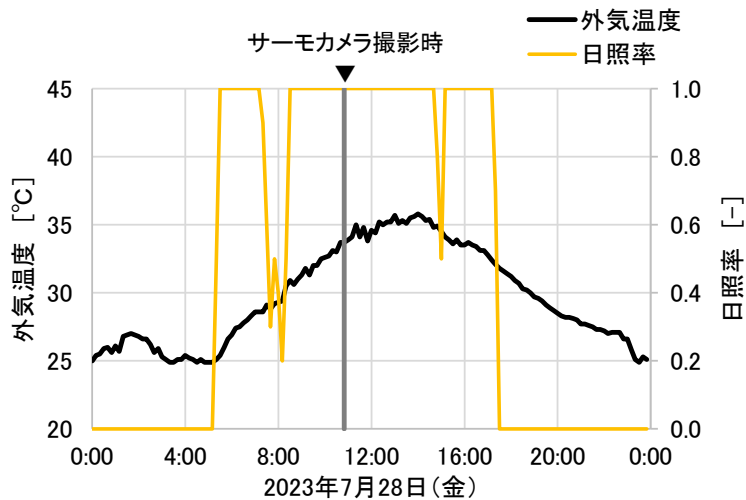


図1 外気温度と日照率の経時変化

## 2. 夏期検証

### 2.1 遮熱シート設置状況

図2に遮熱シートの設置位置、写真2に遮熱シートの設置状況を示す。遮熱シートは、厚さ5mmの気泡緩衝材の両面にアルミ箔をラミネートされたシートを利用した。設置方法は、トラス幅2.7mに合わせた25mの長尺遮熱シートを製作し、天井面から約2m下部に位置する水平トラスパイプの端部よりロープと長尺棒で横にスライドさせ、シートのだわみが少なくなるよう両端部からロープで引っ張り固定した。照明装置の下部には、夜間の照度確保のため600mm角の開口を設けた。

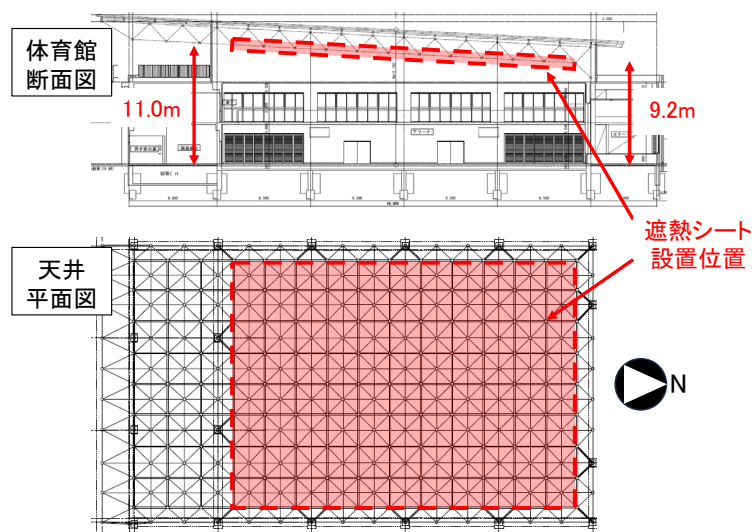


図2 遮熱シート設置位置

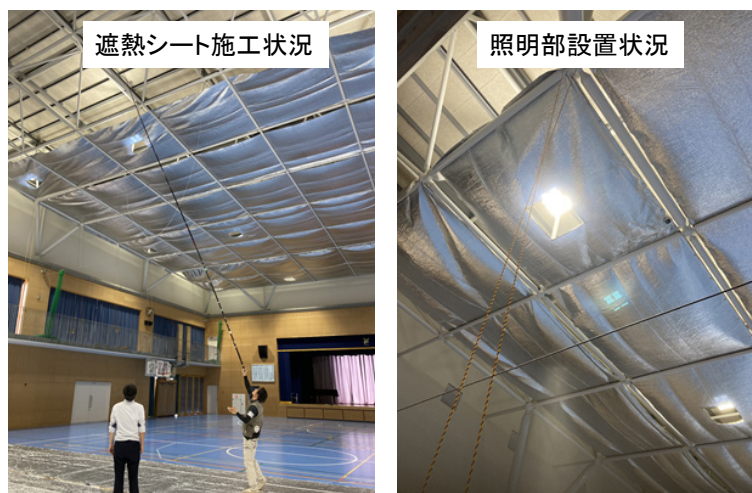


写真2 遮熱シート設置状況

## 2.2 測定概要

図3に測定ケースを示す。実測は2024年8月6日～8日に実施し、遮熱シートの設置面積による効果を比較した(ケース①③④)。給気は20℃とし、直達日射の影響を無くすため照明を全点灯し、窓カーテンは遮蔽した。また、室上部の高温空気を排気することによる室内環境のさらなる改善を期待し、遮熱シートとほぼ同じ高さに設置されている有圧扇の稼働/停止による影響を比較した(ケース①②)。図4に体育館内測定点を示す。FL+1mの平面温湿度を12か所、室中央2か所(地点A、B)ではFL+5mまで1mピッチにて垂直温湿度を測定し、それぞれ1分間隔の瞬時値を記録した。

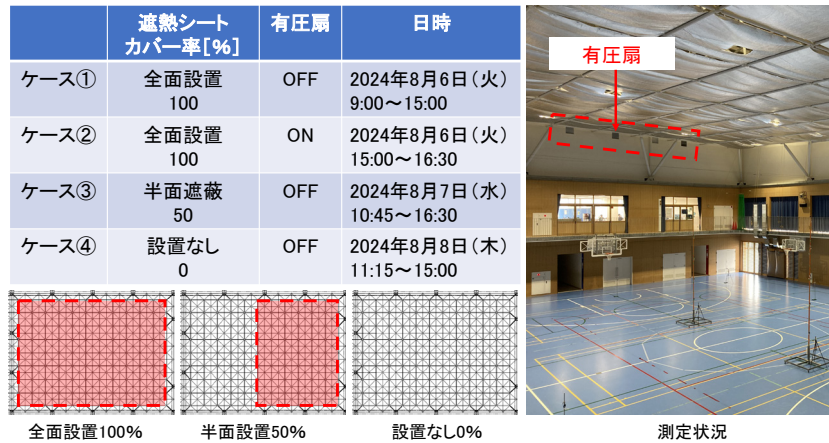


図3 測定ケース

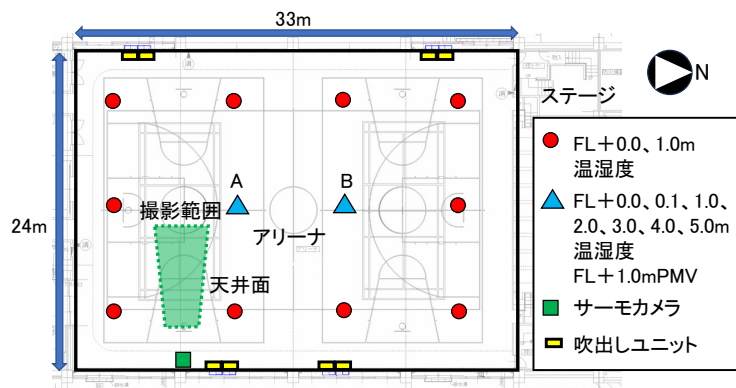


図4 体育館内測定点

### 2.3 実測結果

図5に実測期間中の外気温度、遮熱シート上下面に設置した温度、日照率の経時変化を示す。実測期間中は、日照率に差は見られるものの全ケースで外気温度が32℃を超える真夏日となった。FL+10mの高さに設置した遮熱シートの上下温度差は、南中となる正午付近にピークとなり、最大で3.5℃となった。

写真3に各ケースの室内サーモグラフィを示す。遮熱シートの設置場所は、天井からの放射熱伝達が軽減できている。図6にFL+1.0m平面温度分布を各ケースで比較して示す。各ケースで日照時間や風速などの条件が異なるため、ここでは外気温度が31℃±0.2以内となった時の瞬時値にて比較する。

遮熱シートの設置面積比較(ケース①③④)では、遮熱シートの設置面積が大きいほど室内温度が低下し、全面設置(ケース①)と設置なし(ケース④)の比較では、FL+1m平均で2.4℃低下する結果となった。アリーナの北側半面に遮熱シートを設置したケース③では、半面の遮熱でもFL+1mの温度低下は見られたものの、南北のゾーン平均で有意な温度差は見られなかった。これは冷気が密度差により拡がっていく置換空調の効果に加え、天井と床の離隔距離が10m以上あり、遮熱シートを設置していない天井部から遮熱シート設置下部の床に放射熱伝達された影響により平面温度のばらつきが少なくなったと考えられる。

図7に地点A、Bの平均垂直温度と絶対湿度分布を各ケースで比較して示す。遮熱シートの設置面積に応じてアリーナ全体の温度帯が変化する結果となった。遮熱シート設置なし(ケース④)の絶対湿度が高い理由は、空調負荷の増加により室上部から吸いこむ還気温度が上昇したことで空調機コイルの除湿量が減少した影響である。また、有圧扇を稼働したケース②は、遮熱シートを全面設置しているにも拘わらず室温が上昇する結果となった。これは、室上部の絶対湿度が上昇していることから、有圧扇の稼働でアリーナが負圧となり、高温多湿の外気がアリーナへ流入したためと推察される。

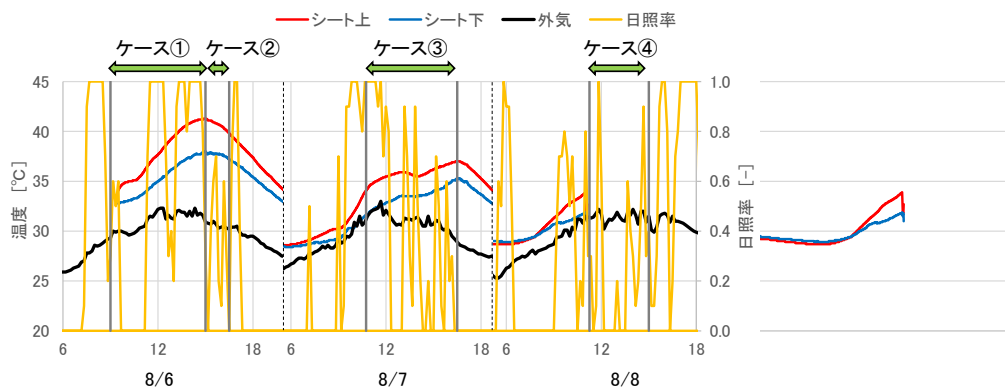
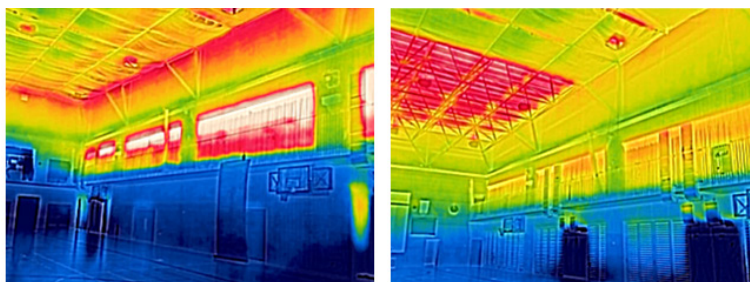
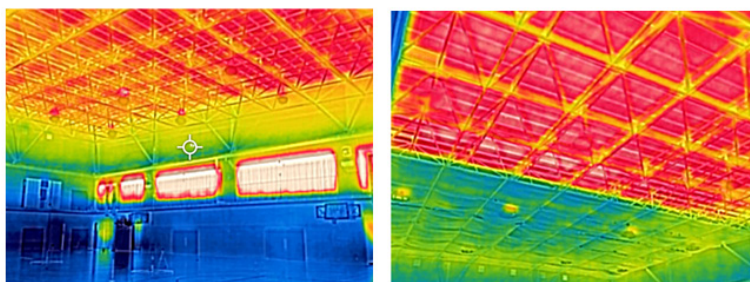


図5 外気温度・シート上下温度・日照率の経時変化



ケース①遮熱シート全面設置

ケース③遮熱シート半面設置



ケース④遮熱シート設置なし

ケース③遮熱シート半面設置

写真3 各ケースの室内サーモグラフィ



図6 各ケースの床上1.0m平面温度分布

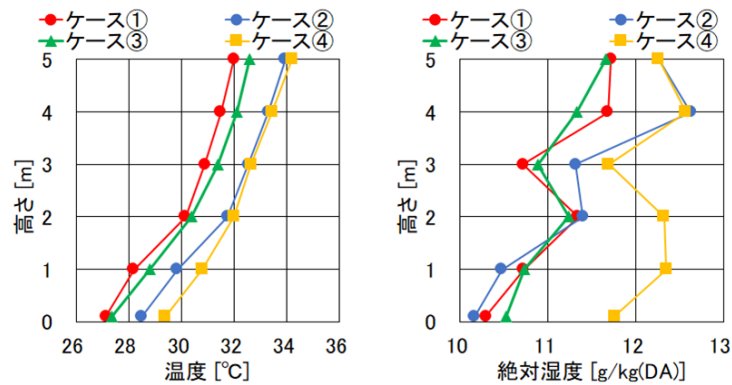


図7 地点A,Bの平均垂直温度と絶対湿度分布

### 3. 冬期検証

#### 3.1 遮熱シート設置状況

写真4に遮熱シートの設置状況を示す。本設利用として採用した不燃材で両面アルミ箔の遮熱シートは、厚さ0.24mm、熱伝導率0.19W/(m・K)、重量270g/m<sup>2</sup>と軽量な仕様となっており、固定治具の重量を含めても耐荷重で問題無いことを確認したのち、天井面の木毛セメント版から120~430mm下部に位置するH型钢フランジやトラスパイプに遮熱シートを固定した。



写真4 遮熱シート設置状況

#### 3.2 測定概要

実測は、遮熱シート設置前となる2025年2月5日~7日と設置後の12日~14日に実施した。表1に測定ケースを示す。冬期検証では、避難利用時を想定し日射が無く外気温度が低下する夜間を対象とし、遮熱シートの設置有無と空調稼働/非稼働をパラメータとして比較した。給気は45°Cとし、照明は全消灯、窓カーテンとステージ緞帳は遮蔽した。

写真5にサーモカメラによる天井表面温度の測定状況とサーモグラフィの一例を示す。夏期検証時の測定に加え、床表面温度(FL+0m)、地点A、BのPMVを測定した。また遮熱シートによる効果を確認するため、サーモカメラを天井面に向けて10分のインターバル撮影し、図中エリアの平均値を天井表面の代表温度とした。

表 1 測定ケース

	遮熱シート カバー率[%]	空調	日時
ケース⑤	設置なし 0	OFF	2025年2月 5日(水)20:00 ～ 6日(木)08:10
ケース⑥	設置なし 0	ON	2025年2月 6日(木)21:07 ～ 7日(金)08:05
ケース⑦	全面設置 100	OFF	2025年2月12日(水)19:45 ～13日(木)07:55
ケース⑧	全面設置 100	ON	2025年2月13日(木)21:12 ～14日(金)08:00

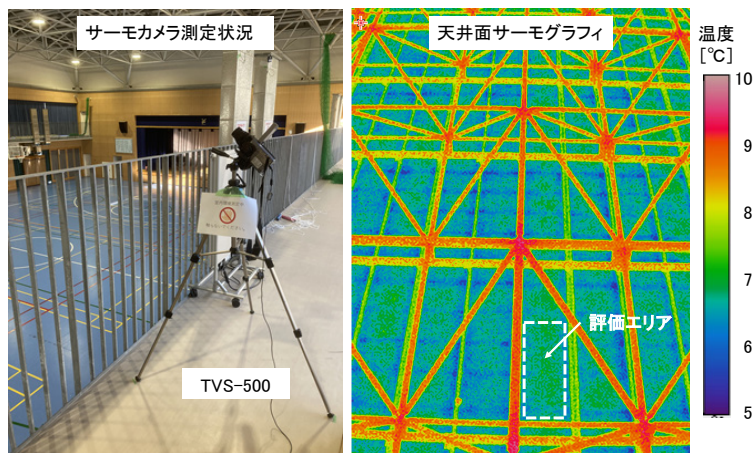


写真 5 サーマカメラ測定状況

### 3.3 実測結果

図 8 に実測期間中の外気温度と天井表面温度、地点 A、B の PMV 平均値の経時変化を示す。実測期間中は、全日共に日最低気温が 0°C未満となる冬日であった。PMV による快適性評価（計測器測定範囲-3～+3）は不快な値となったが、遮熱シートの設置により、天井表面温度とともに PMV 値も変化する結果が得られた。

図 9 に FL+1.0m 平面温度分布を各ケースで比較して示す。外部風速などの条件が異なるため、ここでは外気温度が 0°C±0.6 以内となった時の瞬時値にて比較する。遮熱シートの設置比較では、遮熱シートの設置により非空調時では FL+1m 平均値で 2.1°C、空調時は 0.8°C上昇する結果となり、空調の稼働／非稼働時共に良好な結果を示した。

図 10 に地点 A、B の平均垂直温度分布を各ケースで比較して示す。遮熱シートの設置により、室全体の温度帯が上昇する結果となった。この 2°C程度の温度上昇は、天井面の遮熱シートにより、天井からの冷放射の影響を遮ることができたためと考察される。

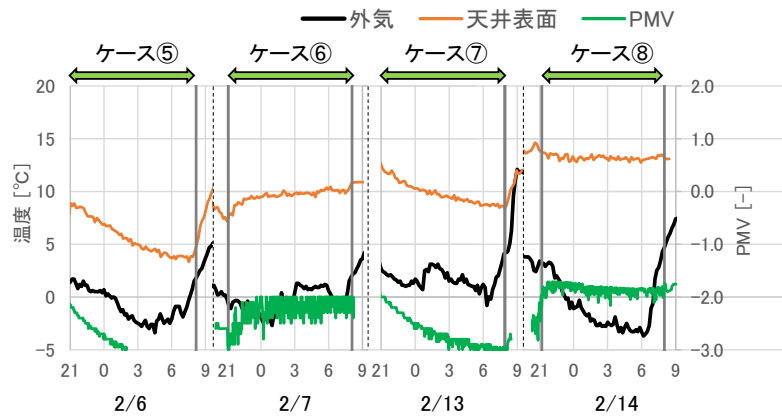


図8 外気温度・天井表面温度・PMVの経時変化



図9 各ケースの床上1.0m平面温度分布

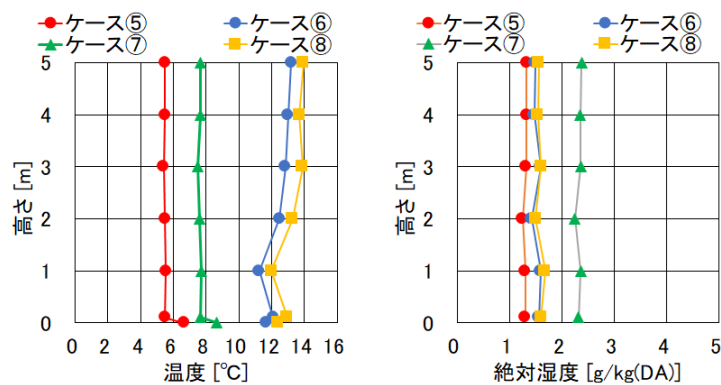


図10 地点ABの平均垂直温度と絶対湿度分布

#### 4. おわりに

天井面の遮熱シート設置は、冷暖房時だけでなく非空調時にも室内環境の改善に有効なことを確認した。PMV値は、厳冬期の夜間という条件もあり低い結果を示したが、避難所利用時は人体潜熱や加湿器等の利

用によりさらなる環境改善は見込まれる。また、屋内のサーモグラフィでは、冷暖共に天井を除く外壁面からの負荷流入も大きいことが確認され、天井遮熱だけでなく、他の断熱工法との併用が推奨される。本検証を通じて、負圧環境が室内環境に悪影響することが確認されたため、今後は第 2 種換気方式による検証を行い、さらなる環境改善を図っていきたい。

## 謝 辞

本研究は、つくばみらい市や富士見ヶ丘小学校の関係各位に多大な協力を頂きました。ここに謝意を表します。

## 文 献

- 1) 小山ら：体育館向け空調システムの開発と実証，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.217-220，2023.
- 2) 木村：体育館向け換気機能付き空調機「フレッシュクール」，建築設備と配管工事 6 月号，pp.25-29，2024.
- 3) 木村：体育館向け空調システムの開発と実証，建築設備 6 月号，2025.
- 4) 木村ら：体育館向け空調システムの開発と実証，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，（第 2 報）暖房効率改善と吹出し配置の影響，pp.449-452，2024.

## ABSTRACT

We have developed an air conditioning system for gymnasiums that combines measures for heat, cold, and infection control. Previous reports have shown the effectiveness of this air conditioning system for gymnasiums. However, as the outdoor air temperature increased and the indoor environment become worse, we focused on the use of thermal barrier sheets on indoor ceiling surface to reduce the air conditioning load. This report presents a comparison of the indoor environment in summer with varying thermal barrier areas on the ceiling and in winter with and without the installation of thermal barrier sheets.

---