

体育館向け空調システムの開発と実証

－暖房効率改善と吹出し配置の影響－※

木村 健太郎・スレスタミサン
小山 尚人・平原 美博*1

Development and Demonstration of Air Conditioning System for Gymnasiums -Improvement of Heating Efficiency and Impact of Air Outlet Arrangement -

Kentaro Kimura・Mishan Shrestha
Naoto Koyama・Yoshihiro Hirahara

被災時の防災拠点施設として計画される学校体育館は、通常利用時だけでなく避難所利用時への対応も要求される。我々は、これまでに取得した大空間空調の知見を生かし、運動時に衝突してもケガを防止する吹出しユニット仕様に加え、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開発を目指しており、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にて試作機の実証試験を 2022 年より開始した。

前報^{1,2)}では、本システムの概要と実証結果を示し、体育館に有効な空調システムであることを示した。本報では、実証試験や利用者アンケートにより得られた知見や課題を踏まえ、本システムの吹出しユニットや外調機の改良を実施し、更なる暖房性能の向上や設置制約緩和を目指した実証結果について示す。

1. 実証試験による課題抽出と改良

1.1 吹出しユニット

図 1 に改良したビニール風船型の吹出しユニットを示す。アリーナ壁面に設置する吹出しユニットは、低速給気のため吹出し面積を確保しつつ薄型化を図るため半楕円形断面とし、保護マットによる衝撃吸収構造として競技時の安全性を確保している。冷房時は、有孔ビニール（3mmΦ、開口率約 5%）から急拡大で吹出すことにより拡散され残風速を抑えつつ、奥行き寸法を上部 200mm から底部 50mm に減少させることで上下方向にも均一な低速吹出しを実現している。実用初号機（改良前）では、冷暖房の切り替えは、吹出し口下部に設置したファスナー開閉による仕組みを採用し、暖房時はファスナーを開けることで床面への高速給気を実現していた。しかし、暖房時は全給気量の 1/3 程度が冷房用の有孔ビニールから染み出され、暖房効率の向上には更なる改良が求められた。そこで、暖房時は保護マット背部に設けた奥行 110mm の流路を通り、乱流を防止するガイドベーンを経て 50mm 高さの開口より床面と平行に高速給気する構造に変更した。冷房と暖房の切り替えは、リモコンスイッチ操作に加え、給気チャンバの側面からレバーで風路を切り替える構造に変更したことで、冷暖切り替えの容易さに加え、柱等へ隣接設置する際の吹出し口の設置制約を軽減させる仕様とした。

※ 本論文は、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2024.9.11～13（佐賀））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）

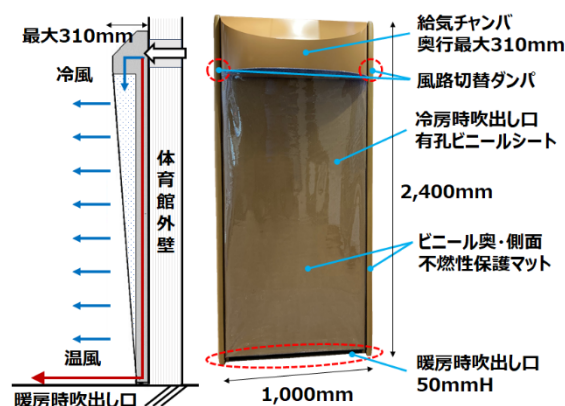


図1 ビニール風船型吹出しユニット

1.2 室外機一体型空気熱源ヒートポンプ外調機

図2に室外機一体型空気熱源ヒートポンプ外調機の外観と機器仕様を示す。実用初号機では、給気風量を冷房時 1,000 m³/h、暖房時 1,500 m³/h としていたが、特に外気温度が氷点下となる厳冬期において、給気温度が 20℃程度までしか上昇せず、室内環境の改善には更に高い温度での給気が望まれた。また、搬送動力低減による省エネ化に加え、静穏環境が求められる卒業式等の式典での活用を想定し、暖房時も冷房時と同風量の 1,000 m³/h とすることで、冷暖房の処理能力を変えずに給気温度を上昇させる仕様に変更した。

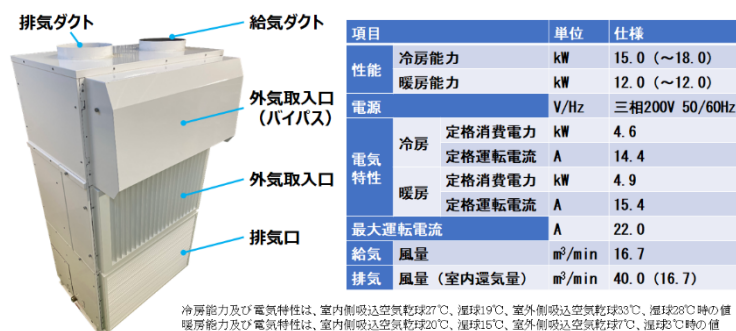


図2 室外機一体型空気熱源ヒートポンプ外調機の外観と機器仕様

2. 改良前後の性能比較

2.1 測定概要

改良効果を確認するため、実証試験中のつくばみらい市立富士見ヶ丘小学校体育館に設置された吹出し口 8 台を全数改良型の吹出し口に交換した。また、外調機 8 台は、全台に対し処理能力は変えずに給気風量を変更する基板改造を行い、諸性能を比較検証した。

図3に体育館内の測定点、写真1に測定状況を可視画像とサーモグラフィにより示す。改良前後の比較検証試験は、課題となっていた冬期に実施し、改良前は 2022 年 12 月 26～27 日、改良後は 2023 年 12 月 25～27 日の実測データを用いて比較した。測定点は両年共に同一箇所とし、高さ 1m の温湿度センサを 10 か所、室中央 2 か所の鉛直測定では、5m 高さを 1m ピッチで温湿度センサを設置し、1 分間隔の瞬時値を記録した。また、平面の風速測定と騒音値測定は、無指向性微風速計と小型普通騒音計を用い、全測定点（床上 0.1m・0.5m・1.0m）の移動測定（10 秒平均値）を行なった。また、避難利用時を想定し 2 名用の避難所テント（2.1mW×2.1mD×1.5mH）を実際の利用状況を模擬して 49 張配置した。

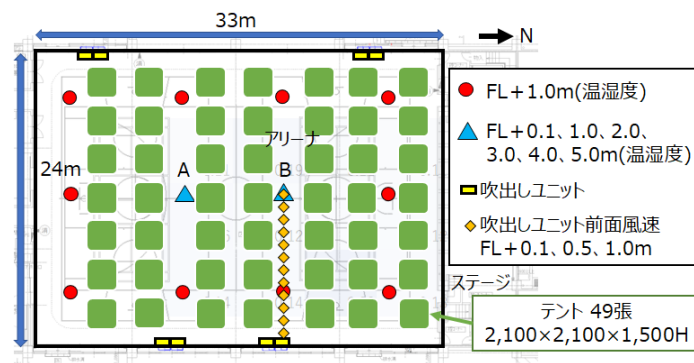


図3 体育館内測定点

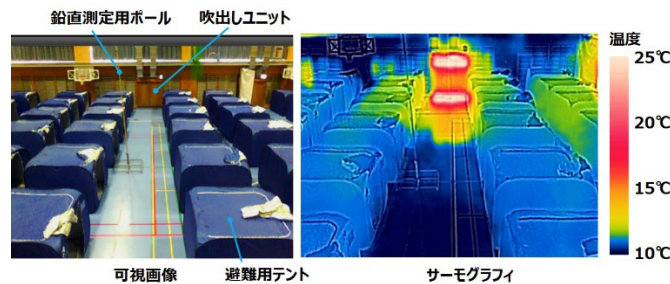


写真1 測定状況

2.2 吹出し風速

図4に吹出しユニット正面における鉛直断面風速分布を改良前後で比較して示す。改良後の床面に沿った吹出し気流は、周囲の空気を誘引しながら徐々に低下し、吹出し面からの離隔距離が6～8mほどで浮力により上昇する流れ場となっている。改良後の風速は、改良前と比較し給気風量は2/3に減少し、給気と周囲の温度差が大きい条件であったが、離隔距離は2mほど延伸する結果となった。これは、吹出し近傍（離隔距離3m内、FL+0.5mと1.0m）の風速が減少していることから、有孔ビニールからの暖気流出が抑えられたことに加え、吹出しユニット内部のガイドベーンにより吹出し気流の整流化が進み、床面のコアンダ効果が強まった影響と考えられる。

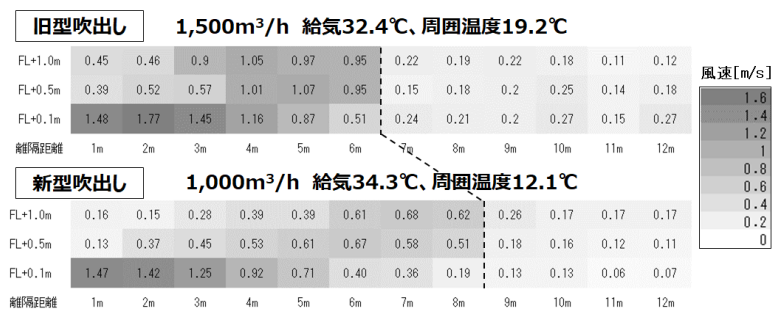


図4 吹出しユニット正面の鉛直断面風速分布

2.3 平面温度分布

図5に暖房時の床上1.0m平面温度分布を改良前後で比較して示す。改良前と比較し、改良後は室内の温度ばらつきが小さく、室中央部でも良好な環境が形成されている。改良前後で外皮負荷が異なるため、外気と室内との温度差で比較したところ、改良前の $\Delta t=3.8^{\circ}\text{C}$ に対し、改良後は $\Delta t=6.2^{\circ}\text{C}$ となり暖房効率が向上した。外気と給気条件により試算した空調機処理負荷は、改良前で約86.9kW、改良後で約87.5kWと

ほぼ同等であることから、暖房効率向上は吹出し口の改良により暖気をコアンダ効果で室中央まで到達させた影響が大きいことが主因と想定される。

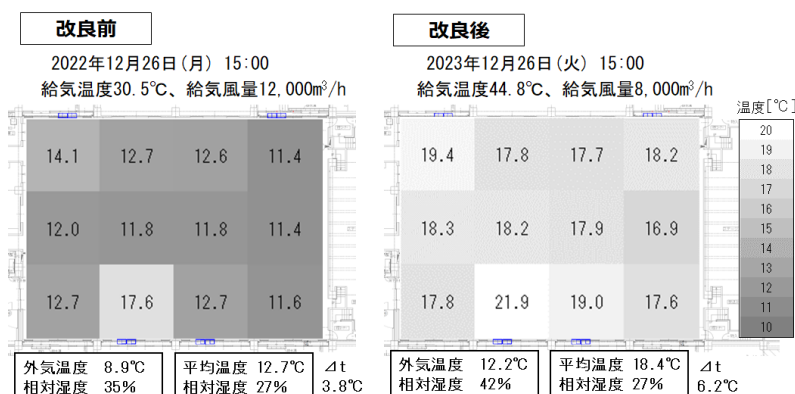


図5 床上1.0m平面温度分布

2.4 室内騒音値

図6に外調機8台運転時の室内騒音値を改良前後で比較して示す。騒音値測定は、図3に示す平面12点（FL+1.0m）の平均値で評価し、暗騒音に加え、天井付近に設置された24時間換気用有圧扇稼働時を参考に示す。改良後の吹出し口は、有圧扇と比較し高周波数帯で若干高いものの、給気風量が2/3に減少したことで改良前よりも5dBほど低下する結果となった。騒音値は、外壁ガラスと防護サッシ間の屋内に吹出し口一体型の外調機を設置した結果となるが、外調機を屋外設置することで更に騒音値は低下する。また、製品版では、高周波数帯で大きな騒音発生源となっていた基板用冷却ファンを無くし、還気チャンバ内に移設し冷却する仕様としており更なる省エネ化と騒音値低下が期待できる。

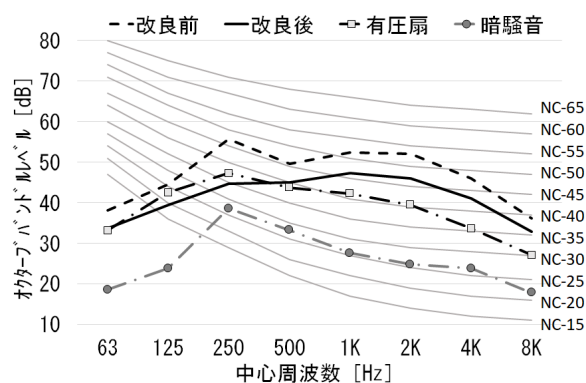


図6 改良前後のNC値比較

2.5 室内清浄度

体育館の被災利用時には、プライバシー確保のためパーティションやテントを設置する行政は増えていますが、区画されたプライベート空間においても暑熱環境に加え、空気質環境の確保が要求される。そこで、置換空調を採用している冷房運転よりも換気効率の悪化が懸念される暖房運転時について、テント内の清浄度をパーティクルカウンターにて確認した。

写真2に清浄度測定状況を示す。測定点は、室中央付近のテントを選定し、テントの入口と天井は開放した。避難者の模擬負荷としてサーマルマネキンを1体着座にて設置し、FL+0.2mの粒子数を定点測定した。図7に冬期実測期間中の浮遊粒子数の経時変化を粒子サイズ別に示す。0.5μmの粒子数は、測定開始時で外気と近い15万個/ft³程度であったが、徐々に外調機内の中性能フィルタで清浄な給気に置換され、

空調稼働から約 5 時間後に 5 万個/ft³程度まで減少した。暖房運転であってもtent内の換気効率が高いことを確認し、本システムは感染症拡大防止に有効であることが示された。

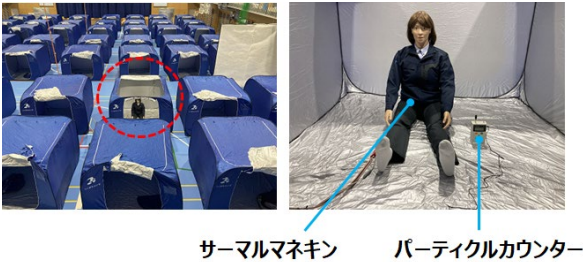


写真 2 清浄度測定状況

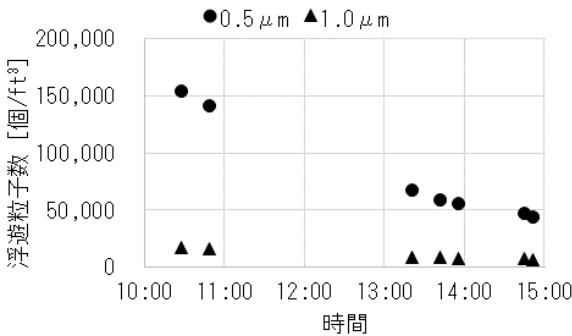


図 7 浮遊粒子数の経時変化

3. 吹出しユニットの配置影響

3.1 比較条件

本システムは、外調機を屋外設置し、外壁の貫通ダクトを介してアリーナ側の吹出しユニットへ接続するのが基本構成となる。また、吹出しユニットは、置換空調を採用しているものの室内環境の均一化を図るためには極力均等配置が望ましい。このため、本システムを導入する際には、多くの体育館で建屋長手方向の外壁 2 面に吹出しユニットを対向配置することが基本となるが、校舎と一体構造となっている体育館など吹出しユニットに設置制約のある物件では、ダクト延長による消費エネルギー増加や空調能力の低下を避けるため、壁 1 面のみに吹出しユニットを配置する状況が想定された。そこで、吹出しユニットの配置影響について実験検証した。

図 8 に吹出しユニットの配置条件を示す。実測は小学校の夏期休暇期間となる 2023 年 8 月 2 日～3 日に実施し、冬期と同様に図 3 に示す測定点に温湿度センサを設置し、tent未設置の条件で比較検証した。条件設定は、通常配置を想定したケース①（基準 8 台）に対し、基準に近いケース②（千鳥 4 台）、各方位の壁面のみ吹出しユニットを配置するケース③～⑤の計 5 ケースにて比較した。



図 8 吹出しユニットの配置条件

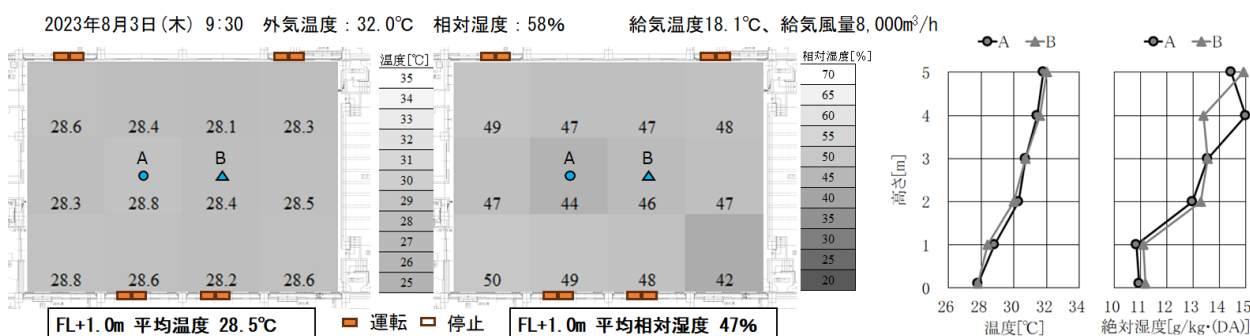


図9 ケース①(基準8台)の平面・鉛直温湿度分布

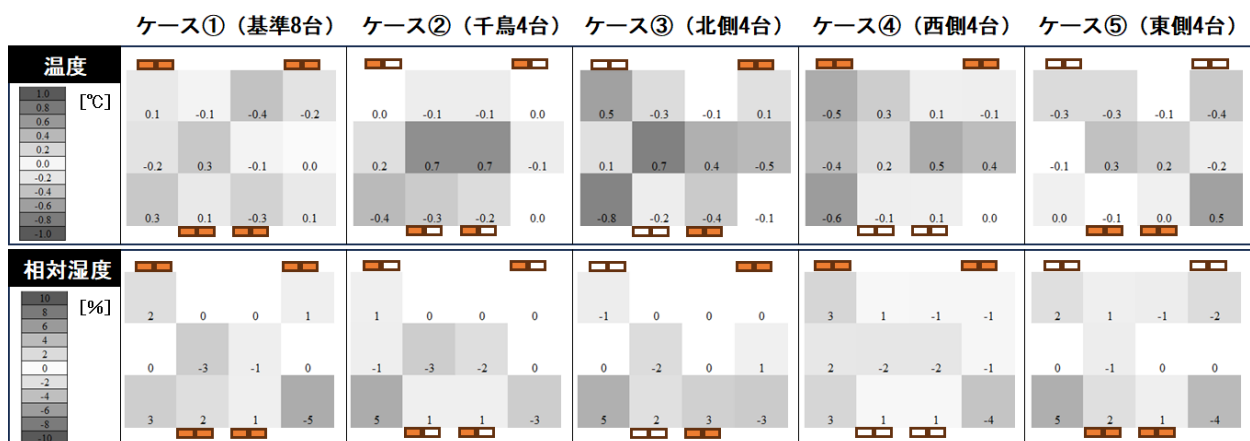


図10 各配置条件の平面温度・相対湿度分布

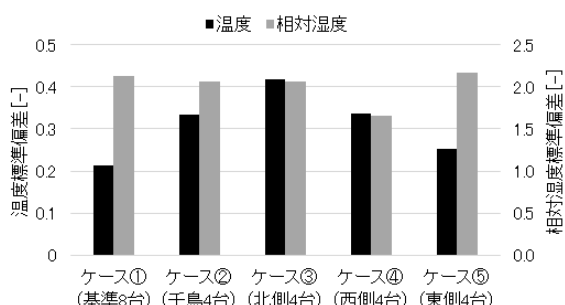


図11 各配置条件の標準偏差

3.2 実験結果

図9にケース①(基準8台)の平面・鉛直温湿度分布を示す。8台運転時は、温湿度共に平面ばらつきは少なく、垂直分布勾配から居住域を効率よく冷却除湿されている。ここで、ケース毎で外気負荷が異なることに加え、ケース②～⑤の4台運転時では、ケース①(基準8台)よりも給気風量が半減するため、平均値との偏差にて比較評価した。図10に平面温度分布と平面相対湿度分布の偏差を各ケース別に比較して示す。温度分布では、室内中央付近で若干高い傾向が見られたが、全ケースにおいて、平均温度は $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ 以内、相対湿度では $\pm 5\%$ 以内と比較的良好な結果が得られた。

図11に各ケースの標準偏差を温度と相対湿度に分けて示す。各ケースで大きな違いが見られない相対湿度に対し、温度の標準偏差は、ケース①(基準8台)が最も小さく、ケース③(北側4台)が最も大きい値となった。これは、吹出しユニットの配置が非対称で、かつ全ケースの中で給気の到達距離が最も大きいことが主因と推察される。一方、建屋長手方向の片側給気となるケース④(西側4台)とケース⑤(東側4台)は、温度の標準偏差が比較的小さいことが確認された。

側 4 台) では、両側給気のケース② (千鳥 4 台) よりも標準偏差が小さくなったことから、建屋長手方向 1 面での吹出し配置の影響は小さい傾向が示された。

4. おわりに

本報では、体育館空調の導入検証で得られた課題を基にシステム改良を図り、その効果や吹出しユニットの配置影響について示した。本システムは、暑熱や空気質環境の改善に有効であるが、非常時に長時間空調稼働させるためには更なる消費エネルギーの削減が求められる。今後は、本システムの普及展開に向け、外皮負荷削減や再エネ活用なども並行して検討を進めていきたい。

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，pp217-220，2023
- 2) 木村ら：体育館向け空調システムの開発と実証（第 2 報）暖房効率改善と吹出し配置の影響，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp449-452，2024

ABSTRACT

We have developed an air conditioning system for gymnasiums that has specifications for air vents that prevent injury even in collisions during exercise, as well as providing measures against heat stroke, cold protection, and infection control. In the previous report, we presented an overview of this system and its demonstration results, showing that it is an effective air conditioning system for gymnasiums. In this report, based on the findings and issues from the demonstration tests and user questionnaires, air outlets and external air conditioner systems have been improved, aiming for further enhancement of heating performance and reducing installation constraints.