固定席背面を利用した吹出方式による大規模屋内スタジアムの空調計画

DESIGN APPROACH OF AIR-CONDITIONING SYSTEM FOR A LARGE INDOOR STADIUM ADOPTING THE AIR DISTRIBUTION SYSTEM USING BACK SURFACE OF STADIUM SEATS

大高一博 ———*1
橋本直樹 ———*2
岩波 洋 ———*3
土井 暁 ———*4

Kazuhiro OTAKA
Naoki HASHIMOTO
Hiroshi IWANAMI
Satoru DOI

Design approach of air-conditioning system is described for a large indoor stadium project. Displacement ventilation using task air supply system is adopted to minimize air conditioning space which is expected to contribute energy savings. Back surface of the fixed seats is used to control air distribution around spectators. Exhaust air is sucked from the roof vent where wind help to make negative pressure by airfoil effect. Full-sized model is used to decide the optimum shape of the seats, and to confirm human comfort conditions of the system. In this paper, we report the study process and results of the experiments.

キーワード：
大空間、局所空調、ディスプレイメント換気、実大実験、快適性

Keywords：
large space, task air-conditioning, displacement ventilation, full-sized model, human comfort

1 はじめに

建築技術の発展に伴いドーム構造による大きな無柱空間が実現し、我が国でもその建設が活発に行われてきている。将来的に様々な需要が見込まれる都市型アミューズメント施設であるが、経済性や省エネルギー性への配慮が重要であることは言うまでもない。

本報では、ある大規模屋内スタジアムを効率的に空調するために採用した吹出方式の考え方と、その性能を検討・確認するために実施した実験について報告する。

2 施設概要

図1、図2に平面図・断面図、を示す。

アリーナの直径は約150m、最高部高さは約70m、最大収容人数は約50,000人である。断面図に示すルーバー状の可動天井による水平分割や可動壁による垂直分割が可能で、様々なイベントにフレキシブルに対応できることが建築計画上の大きな特徴である。屋根頂部の直径約76m部分は半透明とし（ポリカーボネート製）、自然光をとり入れるが、可動天井を利用して遮光することも可能である。

図1 平面図

図2 断面図

*1 日建設計 大阪本社設備部 副部長
*2 日建設計 大阪本社監理部
*3 大林組 東京本社エンジニアリング本部 課長
*4 大林組 技術研究所

*1 NIKKEN SEKKEI, Osaka Office, Chief M. Engineer
*2 NIKKEN SEKKEI, Osaka Office, M. Engineer
*3 Obayashi Corporation, Tokyo Head Office, Manager
*4 Obayashi Corporation, Technical Research Institute, Research Engineer

3 アリーナの空調計画

(1) 居住域空調から局所空調へ

本スタジアムの最大の特徴は容積 1200 000 m³ の大空間を分割して利用できることであり、効率的な部分空調が省エネルギー上不可欠である。一方、従来のスタジアム型大空間では、全体利用時の居住域空調を目的に、図 3 に示すような吹出・吸込方式が多く用いられてきた^{1),2)}。こうした大空間においてすべての座席に様に観客が在席するケースは少なく、分布にむらがある場合や、利用が客席の一部に限定されることも多い。このような場合、従来の方式では部分的に空調をしても空調域と非空調域の空気が容易に混合してしまい省エネルギー効果が出にくい。また、観客数に応じて外気を導入しても、供給は空間に一律に行われるため、観客密度の差により場所によっては過不足が生じる可能性がある。そこで本計画では観客席から分散して空調空気を吹き出し、送風温度と外気量を約 30 のゾーンごとに制御することで、負荷処理と外気供給の局所性を高める方法を採用した(図 4)。これによって局所空調による省エネルギー効果が高まると共に、観客席単位での外気供給が確保できる。

図 5 に示すように、空調空気はスタンド背面に設けた空調機から中空の PC 段床に送り、段床立上り部の円形吹出口(直径 50 mm)から 45° 上方に 1 席当たり 33 CMH を吹き出す。この気流を固定席背面の幅 200 mm、深さ 30 mm の溝(気流ガイド)に添って上昇させ居住域に拡散させる計画とした。

(2) ディスプレイスメント換気による熱溜りの排出

室内空気の排気はドーム屋根に設けた換気口から外部風の吸引効果を利用して行う。スタジアム空調では空調空気に占める外気割合が 70% 以上と大きいため、約 4 500 m² の巨大なトップライト下部に生じる熱溜りを空調排気と共に排出することは、屋根面からの放射環境を緩和する上でも効果的である。アリーナの満席時の換気回数は約 1.4 回/h あり、室内はディスプレイスメント換気となる。

4 座席空調の実験

(1) 実験の目的

以上のような空調計画を実現する上で技術的課題となるのが居住域の吹出方式であり、従来からいくつかの方式^{3),4)}が考案されている。室内で飲食を行うことを考慮すると、床面への吹出口の取付はメンテナンス上好ましくない。そこで固定席背面に設けた溝(気流ガイド)に沿わせて空調空気を吹き上げ、吹出口付近の速い気流が直接人体に触れにくい方法を採用し、以下の設計諸元を決定するため、実物大の模型を作って実験を行った。

① 段床吹出口の形状・吹出角度

② 固定席背面気流ガイドの形状

また、懸念される人体へのドラフト感に関しては、決定したシステムについて気流の可視化実験や実際に座って試みるの体感実験に基づき機能確認を行った。

(2) 実験装置

3 席×4 段の段床の実大模型を制作し、実験を行った(図 6)。

段床吹出口と椅子背面の気流ガイドは比較検討のため取り替え可能とした。建築設計上、段床は上段と下段で段差が違うので(上段：約 500 mm、下段：約 300 mm)実験装置でもそれを再現した。固定

図 3 一般的屋内スタジアムの空調方式

図 4 本スタジアムの空調方式

図 5 段床を利用した吹出方式

図 6 実験装置

	上段 段差:500mm	下段 段差:300mm
内野席		
外野席		

図 7 固定席のパターン

席には内野用・外野用の 2 種類があり、それぞれが上段・下段にあるため実験ケースは合計 4 パターンとなる(図 7)。

段床模型は前室で囲い込む形で設置し、段床からの吹出温度は設計値で一定(22℃)とした。座席上には人体として 50 Kcal/h の発熱を設け、段床模型を設置した室が 28℃ となるように前室の気温を

制御した。吹出口の構造上、冷気の上昇が課題であるため、実験では冷房時のみを想定した。

(3) 段床吹出口に関する実験結果

吹出風量は、熱負荷計算の他に粉塵濃度に関する法的指導にも対応し、 $33 \text{ m}^3/\text{h}$ とした。吹出口は $\phi 100 \text{ mm}$ のルーバーに穴あきの厚紙をあてて径を変えた。実大模型の椅子背面に平板を取り付け、風速や角度を変えた時の平板上の風速・温度分布を検討した。その結果吹出口の風切り音とルーバー開口率の限界から、吹出風速 4.7 m/s (直径 50 mm)、吹出角度 45° 上向を採用した。

(4) 気流ガイドに関する実験結果

気流ガイドの形状を変えた背板をプラスチック板で作成し、形状ごとに風速・温度分布を測定し、採用分を決定した。段床吹出口は先の実験で求めたものを使用した。

図8は背板が平板の場合と、最終的に採用した気流ガイド (200 W×30 D) を設けた場合の風速分布である。気流ガイドを設けた方が冷風の拡散を防ぐため、平板での到達高さ (750 mm) と比較して明らかに高くまで (900~1050 mm) 到達している。

また気流ガイドによって冷風が人体頭部の高さまで上昇することから、上下温度分布も平板の約 4°C から気流ガイド付きでは約 3°C に緩和されている (図9)。

5 座席空調の可視化

決定した段床吹出口と気流ガイドを実大模型に取り付け、気流の可視化実験を行った。温度条件・風量等は前記の実験に等しくし、トレーサーとして白色蒸気を使用した。

図7に示す4パターンのうち、前席の背もたれが最も高くまであり冷風が上昇しやすい内野席の段差 300 mm では、心配された膝へのドラフトも避けられており、良好な結果となっている (図10)。

外野席の段差 500 mm の部分は、前席の背もたれが後席の観客の脚元までしかないため、気流は吹き出し後早い段階で拡散し始め、膝に達している。その影響が懸念されたため、体感実験で確認することとした。

6 体感実験による快適性の確認

(1) 実験概要

図11に実験装置の概要を示す。前出の実大模型を利用し、床面からの高さが $300, 600, 900, 1400 \text{ mm}$ の各段床にそれぞれ3脚、全12脚の気流ガイドを設けた座席を配置した。段床吹出口からは 22°C の空気を 45° 斜め上方に $33 \text{ m}^3/\text{h}$ 吹き出し、吸込口での温度が 28°C 、湿度が $50\sim 60\% \text{ RH}$ になるように実験室内を制御した。

被験者は1ケース4名とし、各段中央の座席にそれぞれ1名ずつ着席し、前方の大型テレビでスポーツビデオを鑑賞させた。その他の座席には人形を配置し人体の平均発熱量 ($50 \text{ kcal/h}\cdot\text{人}$) を発生させた。被験者は12名 (男性8名：女性4名) であり、年齢、体形とも幅を持たせ、実験中の着衣は男女別に統一した。実験時間は1ケース2時間とし、被験者には20分ごとに温冷感を申告させた。

実験装置各部48箇所の雰囲気温度を熱電対により1分間隔で測定し、被験者の皮膚表面温度 (8箇所：頭部、胸部、腹部、背中部、腰部、腕部、大腿部、下腿部) をサーモカップルシートを用いて連続記録 (サンプリングインターバル：1分) した。

図8 固定席まわりの風速分布

図9 固定席まわりの温度分布

座席形状の違い（内野席，外野席），段差の違い（上段：段差 500 mm，下段：段差 300 mm）を考慮し，状態 1（段差 300 mm 外野席，段差 500 mm 内野席）および状態 2（段差 300 mm 内野席，段差 500 mm 外野席）の 2 形態について被験者をランダムに抽出し，4 ケースずつ合計 8 ケースの体感実験を行った。

(2) 実験結果

図 12 に快適性の申告平均値の推移を示す。快適性に関しては，前席背面の気流ガイドを通しての吹出気流がない 1 段目の値より，吹出気流がある 2 段目以降の方が常に快適側である。

表 1 に申告値を実験開始時および終了時についてまとめたが，快適性に関しては普通から比較的快適に移行し，部位別温冷感では手足を除き比較的暖かいから普通に移行している。全身温冷感も同様の推移である。しかし，部位別に見ると下腿部は普通から比較的涼しいに移行している。

気流分布からは冷気流の接触による下腿部の皮膚温度の低下が懸念されたが，実測では 2 時間で約 1～3℃低下しているのを確認した（図 13）。しかし，下腿部に直接冷気流が接触することがない最前列（1 段目）の被験者にも同様の傾向が見られることから，各被験者の下腿部の皮膚温度の低下の原因は気流の接触が全てではないと考えられる。その他の部位に関しては特に温度低下は見られなかった。

被験者の意見の中には上半身の暖かさおよび下半身の涼しさを感じているという意見があった。また，気流を感じ快適であるという意見もあった（PMV 値は作業強度 1.1 met，着衣量 0.3～0.4 clo とすると 0.6～0.7 であるが，前傾姿勢により 0.2 m/s の気流を受けると 0.3～0.5 に減少する）。以上を総合的にみると，下腿部の体表面温度の低下は若干認められるものの，被験者による申告結果からは全身温冷感，快適性とも比較的良好であり，温度と気流に関してはスタジアムの空調として支障はないと考えられる。

7 おわりに

この報告ではある大規模屋内スタジアムの概要と，大空間に偏在する負荷に効率よく対応するために採用した局所空調の考え方を述べた。また，局所空調のために取り入れた固定席背面を利用する吹出方式について，実大実験により設計諸元を求め，体感実験により快適性を確認した過程を説明した。本計画のポイントは，負荷と必要外気量に平面的な偏りのある大空間の効率的な空調である。この空調システムの効果や空調時の空間全体の温度分布などについては，実測により今後明かにしていく予定である。

なお，本論文を発表するにあたり，(株)大阪シティドームのご協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 半澤久，松縄堅：大規模空気膜構造の屋内環境に関する検討（その 2）東京ドームにおける室内温熱環境実測結果，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，1989.10
- 2) 高井啓明：福岡ドームの空調設備と雨水利用，建築設備技術者協会編
- 3) 崔棟皓，村上周三，加藤信介，北村規明，丹羽勝巳，小林光：座席吹出空調に関する研究（その 1）実験装置と可視化実験，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，1992.10
- 4) 樋口祥明，長澤佳明，土井章弘：ホールにおける居住域空調方式に関する研究，座席の背を利用した床吹出空調，日本建築学会大

図 10 吹出気流の可視化

図 11 体感実験の概略図

図 12 快適性の経時変化

表 1 申告平均値の変化

	快適性	全身 温冷感	頭部	胸部	腹部	背中部
開始時	普通	比較的 暖か	比較的 暖か	比較的 暖か	比較的 暖か	比較的 暖か
終了時	比較的 快適	普通	普通	普通	普通	普通

	腰部	腕部	大腿部	下腿部	輻射	湿気	気流
開始時	比較的 暖か	普通	普通	普通	感じない	普通	少し 感じる
終了時	普通	普通	普通	比較的 涼し	感じない	普通	少し 感じる

図 13 下腿部の皮膚温度変化

会学術講演梗概集，1993.9

[1995 年 6 月 30 日原稿受理 1995 年 8 月 25 日採用決定]