

大阪ドームの省エネルギー計画

Design Approach for Energy Savings in OSAKA-DOME

大高一博*・橋本直樹**

Kazuhiro Ohtaka Naoki Hashimoto

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、我が国でも都市部を中心にその建設が活発に行われてきている。大きな屋内空間の持つ開放的な雰囲気や人々の期待、集客力の高さなどを背景に、スポーツ以外にコンサートや展示会などへの需要が拡大しているため、フレキシブルな空間利用や光・音環境の改善など様々な付加機能が重要になってきている。商業施設であるから、「売れる空間にすること」と「省エネルギー的に安く使える空間にすること」との両立が計画の基本にあることは言うまでもない。

ここでは、1997年春に開業した大阪ドームについて、アリーナ大空間を効率的に空調するためのシステムの考え方と、実測を通して確認したその有効性について報告する。

2. 施設概要

図-1・2に平面図・断面図、表1に建築・設備概要を示す。アリーナの直径は約150m、最高部高さは約72m、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（スーパーリング）による水平分割や可動壁（ウォールカーテン）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としてあげられる。屋根頂部の直径約76mの部分は半透明（ポリカーボネート板）とし、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。

空調熱源は、地域冷暖房プラントからの冷水と温水を利用している。冷水蓄熱槽を設け、イベント時の急峻なピーク負荷をカットすることで、熱利用の経済性を増すとともに、DHCプラント側の熱源への負担を

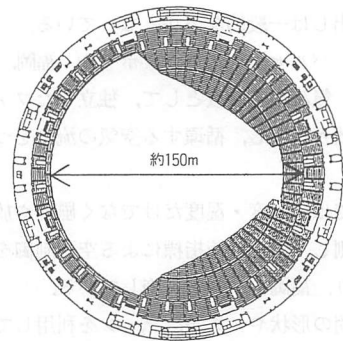


図-1 平面図

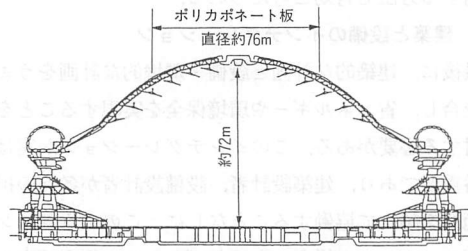


図-2 断面図

軽減している。

3. アリーナ大空間空調の考え方

大阪ドームは、スーパーリングによる水平分割とウォールカーテンによる平面分割を利用して、アリーナで様々なイベントができる建築計画となっている。変化の多い空間利用に対して、快適な空気環境を提供するのももちろん、商業施設であるため、省エネルギー性や経済性にも充分配慮した空調計画が必要である。

ここでは、こうした条件を満たすべく、本計画で採用したアリーナの空調方式と、ドームの高さと大阪湾からの海風を利用した自然換気の考え方について説明する。

* (株)日建設計 設備設計室長

** " " 設備設計室

表1 建築・設備概要

建物概要		空調設備	
主用途	観覧場、店舗、事務所、駐車場	熱源設備	地域冷暖房 (DHC) 受け入れ 冷水 往 7℃ 返 14℃ 温水 往 80℃ 返 65℃
敷地面積	34,600 m ²	アリーナ空調設備	2次ポンプ無しDHC直送方式 (ピークカット用冷水蓄熱槽 5,000 m ³ 併用) セントラルダクト方式×29系統 客席利用居住域空調方式 一般席：客席背面吹出 特別席：パーソナル吹出 フィールド：プースターファン吹出 排気：屋根面エアムーバーによる 第2種換気
建築面積	33,800 m ²	諸室空調設備	空調機+ファインコイルユニット (2管式, 4管式) アリーナ：蓄煙・自然排煙 3F-9F：自然排煙 B1F-2F：機械排煙
延床面積	156,400 m ²	排煙設備	機能分散型DDC方式 赤外線カメラ利用外気量制御 エアムーバー制御 最適給気温度制御など
建築構造	SRC造, RC造, S造	自動制御設備	
建築規模	地上9階, 地下1階, 塔屋1階	衛生設備	給水設備 2系統加圧給水 (上水・雑用水) (上水) (雑用水) 大阪市水道本管より引込 屋根面の雨水を貯留後、 便所洗浄水、屋外散水に利用 DHC熱源によるセントラル給湯 給湯設備 排水設備 汚水・雑排水合流方式 (厨房排水は分流・除害処理) ガス設備 中圧・低圧 ゴミ貯留設備 各階ゴミシュート収集、 ロケットドラム貯留方式
収容人員	55,000人	防災設備	監視設備 総合監視盤を防災センターに設置 避難誘導システム 総合監視盤、映像表示設備、非常放送、 誘導灯によるブロック防災システム アリーナ防災設備 赤外線カメラによる火災検知、放水銃・ 側壁型スプリンクラー 一般防災設備 蓄煙及び温度上昇後排煙 自動火災報知設備、誘導灯非常照明、 非常放送設備、非常電話、無線通信補助設備、 消火器、屋内消火栓、屋外消火栓、 スプリンクラー (閉鎖型、開放型)、泡消火、 二酸化炭素消火、連結送水管、排煙、採水口
駐車台数	1,250台	床インフラ設備	6m×6m 展示モジュール対応 単相電源：15kVA×33 三相電源：80kVA×2 120kVA×2 音楽用：照明 750kVA スポット20kVA×12 音響 500kVA 動力 300kVA
最高高さ	83m	メディア設備	報道対応設備 映像設備 テレビ・ラジオ中継用 大型映像設備 8.6m×33m 移動型大型映像設備 2面 サブスコアボード設備 40インチ12面マルチビジョン設備 館内自主放送CATV設備 屋外LED映像設備 液晶モニターパーソナルTV設備 収録・中継設備 主調、副調整室設備、 実況中継設備
アリーナ	最高天井高さ 72m 容積 120万m ³ 野球時 両翼 100m 中堅 122m 人工芝、積載荷重 11t車対応 直径 166.5m 鉄骨トラスドーム 総重量 約6600t ステンレスパネル仕上げ 自然採光 頂部ポリカーボネート屋根 直径 76m 約 4,500m ² 透過率 20%		
屋根	自然換気 屋根面エアムーバー 450m ² SRC造、円周方向36分割ベアコラム 場所打コンクリート杭支持		
スタンド			
アリーナ特殊設備			
スーパーリング装置 (可変天井)	リング数 7枚 (内6枚昇降) 可変天井高さ 36m, 48m, 60m, 72m (内36mと60mは、完全遮光)		
イベント用吊り荷重	スーパーリング 100t グリッドトラス 130t		
パネル有孔アルミスバンドレル (GW充填)			
ウォールカーテン装置	台車式収納装置 ガラス繊維+フッ素・シリコンコーティングクロス		
大型人工芝巻取り装置	65m×117m, 人工芝撤去時間 90分 大型巻取りドラム、圧縮空気併用		
昇降式ピッチャーマウンド	直径 6.8m		
水平回転可動席	2分割三日月型 レール駆動		
着脱式バックネット	ウインチ 3台		
電気設備			
特高受変電設備	3回線スポットネットワーク 油入 T, 4,500kVA×3		
高圧受変電設備	電気室16ヶ所 地下4ヶ所 油入変圧器 地上12ヶ所 ガス変圧器		
発電機設備	ディーゼルエンジン 2,750kVA ガスエンジン 625kVA×2		
アリーナ照明設備	メタルハライド 2kW投光器 一部シャッター付5段階調光 照度水平面 2,600ルクス (内野) 1,800ルクス (外野) 鉛直面 1,000ルクス		
アリーナ音響設備	集中・分散併用方式 フィールド用センタークラスター スタンド用サテライトスピーカー×12		
昇降機設備	乗用EV (一般・シースルー) 非常用・人荷用EV エスカレーター		
駐車場設備	機械式駐車場・自走式駐車場 最大収容 1250台		

3.1 居住域空調から局所空調へ

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として、図-3に示すような吹出方式が多く用いられてきた。一方、大阪ドームの最大の特徴は、容積120万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必要であった。

ところでこうした大空間においてすべての座席に一樣に観客が在席するケースは案外少ない。むしろ分布

にむらがある場合や、利用が客席の一部分に限定されることの方がはるかに多い。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、部分空調の効果が出にくい。また、観客数に応じて外気を導入しても、空気の供給は空間に一樣に行われるため、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。

そこで大阪ドームでは、観客席から分散して空調空

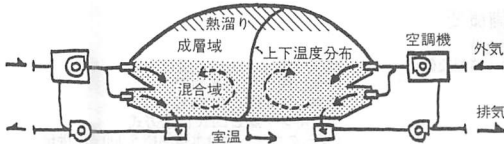


図-3 一般的屋内スタジアムの空調方式

気を吹き出し、屋根の換気口（エアムーバ）から風力を利用して排気する置換換気方式をとり、同時に送風温度と外気量を29のゾーン毎に制御することで、熱負荷の処理と外気供給の局所性を同時に高める方法を採用した。（図-4）

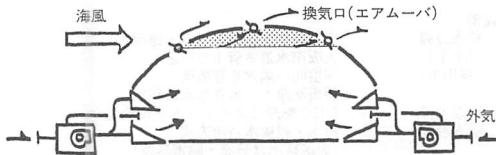


図-4 大阪ドームの空調方式

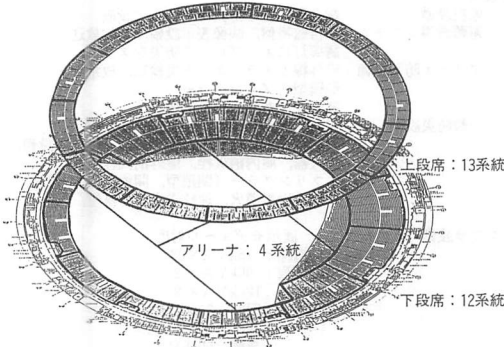


図-5 空調系統の細分化

空調ゾーンはアリーナの分割利用やイベントごとの使用パターンに配慮して、上段席13系統、下段席12系統、アリーナ4系統の合計29系統に細分化した（図-5）。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。

3.2 椅子の背もたれを利用した空調吹出

図-6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（プレキャストコンクリート）板製の段床に送り、段床立上り部の円形吹出口（直径50mm）から45°上方に1席当たり33CMHを吹き出す。この気流を固定席背面の幅200mm、深さ30mm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。（図-7）

気流ガイドの形状や吹出角度については、入念な実

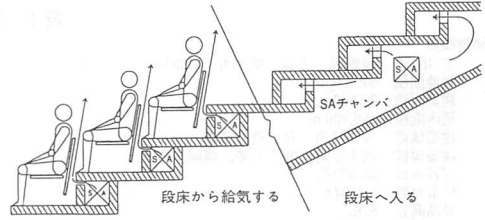


図-6 段床を利用した吹出方式

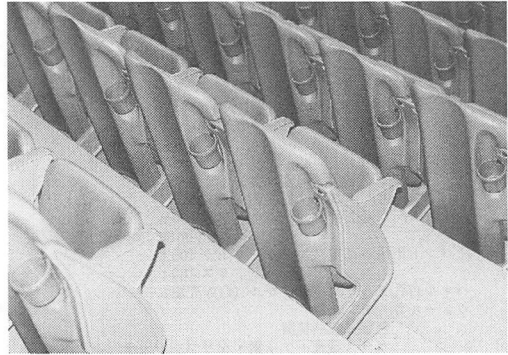


図-7 アリーナ一般席（気流ガイドつき）

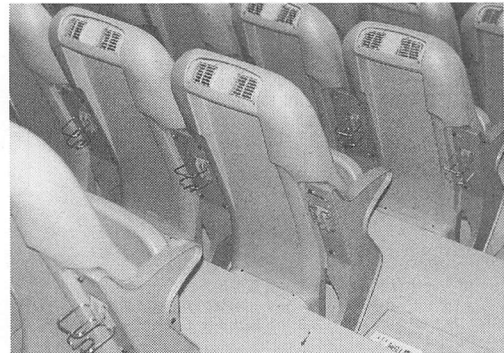


図-8 アリーナ特別席（吹出口つき）

験をとおして決定し、また実物大の実験装置にモニターとして十数人の観客に座ってもらい快適感の申告をってもらうアンケート実験も平行して行った。一方、特別席（約2,300席）は、少しグレードを高め空調にパーソナル性を持たせるため、椅子の背もたれの中空層に直接空調空気を送り、先端部から吹き出す方式とした。（図-8）先端部の吹出口は、左右一組で、観客の好みで風向を操作することができる。

3.3 段床の構造と施工

この吹出方式は、スタンドを構成するPC板の段床そのものが風道を形成することによって、約30,000の観客席ごとに吹出口を設けることが可能になっている。

アリーナ全域の段床にこうした機能を持たせるため、コストや施工面に配慮した、簡潔なPC板構造と、風道としての気密性を確保しておく必要があった。

大阪ドームでは図-9に示すように、PC板段床の断面をZ字形とし、段床同士の接触部分にはガスケット(シリコンゴム製)をあらかじめ接着しておくことにより、PC板段床を積み重ねるだけで風道を形成し、気密性も確保できるようにした。ガスケットによる気密性は、実験によりあらかじめ確認しておいた。

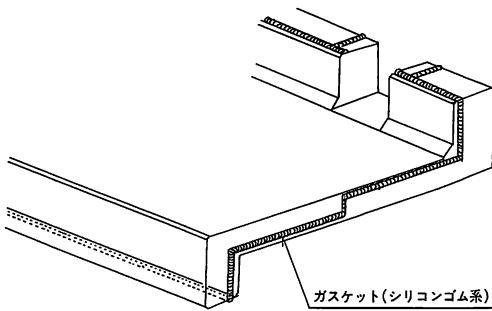


図-9 PC板段床

実際の施工では、段床のわずかなずれにより、特にガスケットのコーナー同士の突き合わせ部分でエア漏れが発生した。吹出口用の開口を閉鎖し、仮設ファンを用いて加圧しながら発煙筒の煙を風道に入れて漏洩箇所を確認し、コーキング材により隙間を充填する作業を全ての段床で行い、気密性を確保した。

3.4 吹出口の構造と施工

PC板の段床に取り付けた吹出口の詳細図を図-10に示す。風向調整用の「はね」の他に、風道内への異物混入を防止するための金網(4メッシュ)と、風量調整用のリングを設けた。取り付けは、吹出口にクッション材としてビニールテープを巻き、段床の開口に挿入して固定した。風量調整用のリングは大(開口径33

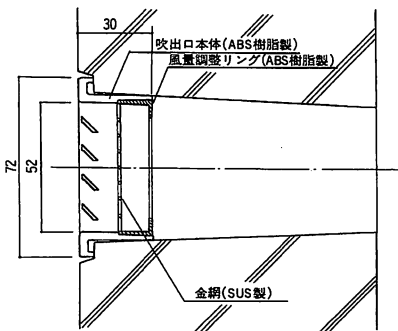


図-10 吹出口の詳細図

mm)と小(開口径31mm)の2種類を用意した。

PC板段床の風道を経由して給気する場合、風道の根元付近の吹出口と端部の吹出口では風道内の静圧が異なるため、吹出風量にむらが生じやすい。そこで大小2種類の風量調整リングを用意してむらを小さくすることとした。吹出口を製作するにあたり、前もって大小のタイプ別に数量を決定するため、図-11に示すように静圧の違いを段床開口面積の違いに置き換えて吹出口サイズを決定することにした。大小の風量調整リングを使い分けることにより、吹出口なしでは風量のばらつきが平均値の75~150%であったものが、±20%程度まで緩和できた。

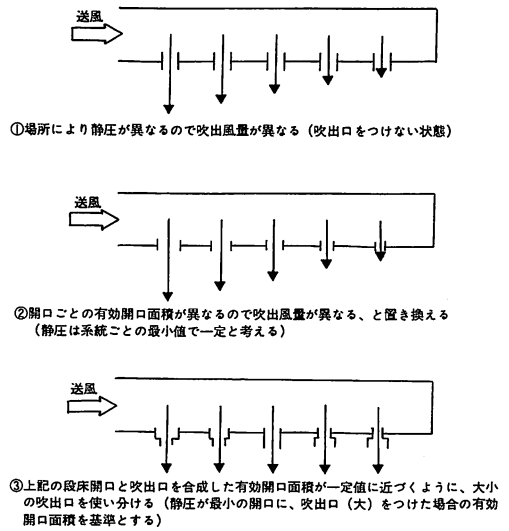


図-11 吹出口の使い分け

観客席の取り付けは工期の最終段階に行われたが、PC板段床の製作は工期の前半に終了する。プレキャストコンクリートという部材の性質上、製作後に穴を開け直すことはできないため、大阪ドームの吹出方式では、施工当初に座席配置を確定し、建築計画と設備計画を徹底して摺り合わせておくことが最大の課題であった。

3.5 アリーナ平場の空調支援

一般に中央にアリーナを持つ大空間では、周囲の観客席を中心に冷房すると、吹出気流の流下と混合によってアリーナ平場も同時に冷やされる効果がある。しかし局所性を高めた今回の空調方式では、アリーナ平場の空調をすべてこの効果に頼るのは無理があるため、直接アリーナに吹き出すことを考えた。

具体的には、4台の大型空調機(B1階設置)の空

調空気をアリーナ床下のコンクリートダクトに送り、この空気をマンホール給気口を介してブースターファンユニットで取り出し、必要箇所に供給する方式とした。このブースターファンユニットは、可動席の下に36台、外野壁面に4台、牽引型が4台あり、アリーナ上での様々な催しに応じて運転を行う。牽引型の4台は、特にステージや、ステージ周りの照明による放射熱を緩和するため、スポット冷房的に利用することを意図した。(図-12)

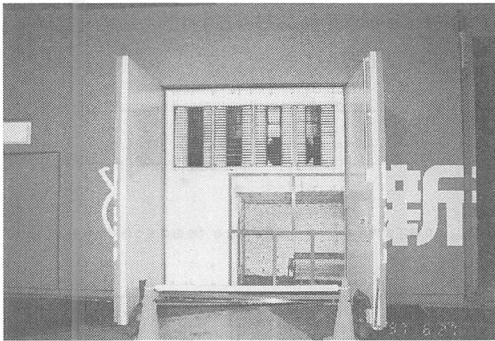


図-12 外野壁面のブースターファンユニット

3.6 海陸風とエアムバ換気口

大阪は元々海陸風が比較的是っきりと気象データに現れる地域である。特に大阪ドームの立地する岩崎橋は、大阪湾から5 kmの河口部で、川沿いに海風が卓越して吹くことが予想される。そこでドームの高さと風を利用した自然換気を空調方式と併せて計画することとした。

ドームの屋根には頂部、中間部、下部の3箇所に分けて、合計約450m²の自然換気口(以後エアムバと呼ぶ)があり、各開口部は空気圧ピストン駆動のダンパーによって遠隔開閉制御している。アリーナ内の空調排気は、エアムバから外部風の吸引効果を利用して行うこととし、排気ファンを設けていない。

一方、自然換気で利用する時は、ドーム外周部のコ

ンコースの自然排煙口(約100m²)をエアムバと同時に遠隔開放し、コンコースからアリーナを経て屋根のエアムバに抜ける換気流路を構成する。シミュレーションでは、外部風速3 m/sにおいて1.0回/hの換気回数が予測されている。

3.7 ディスプレイメント換気と熱溜まりの排出

アリーナ満席時の空調換気回数は約1.4回/hである。客席を利用して供給された新鮮空気は、人体や呼吸、アリーナ照明などにより昇温・汚染された後上昇し、トップライトの熱気を奪って屋根から自然の力で排出される。スタジアム空調では空調空気に占める外気の割合が70%以上と大きいため、結果としてディスプレイメント(置換)換気に近い換気性状となる。

また、約4,500m²の巨大なトップライト下部にはかなりの熱溜りを生じると考えられるので、これ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。

4. 特徴的な自動制御項目

4.1 内外差圧によるエアムバ制御

温度差や風圧によっておきるドーム内と外との圧力差は、特に冬の暖房時に内外温度差が大きいため顕著で、コンコース入口での冷気の吹き込みや、扉の開閉障害などを引き起こすおそれがある。そこで空調機の外気取り入れ量や外気温・室温・風速・風向データを元にエアムバの開口面積を制御し、コンコース部での差圧が過大にならないようコントロールを行っている。(図-13)

4.2 赤外線カメラによる外気量制御

ドームの空調負荷に占める外気負荷の割合は非常に大きい。一方、本方式のような全外気に近いディスプレイメント型の局所空調では、観客数に見合った外気量を室内の炭酸ガス濃度を計測して制御することは困難である。そこで防災用に設けられた赤外線カメラを用いて観客数の概数を把握し、29の空調ゾーン別に

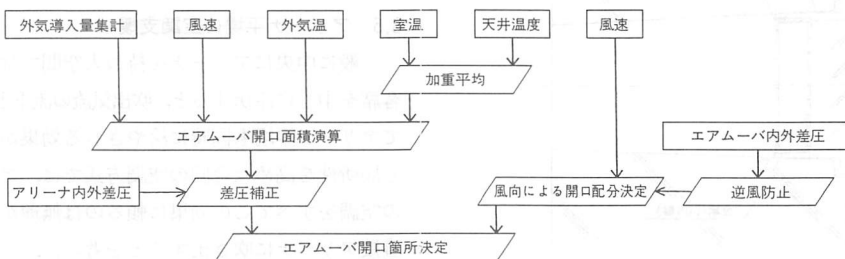
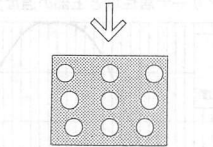
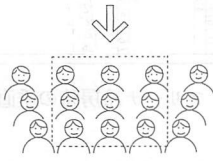
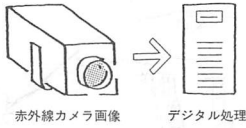
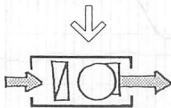


図-13 エアムバの制御フロー



滞在人員の顔面積より人数カウント



アリーナ空調外気量制御

図-14 外気量の制御フロー

供給する外気量をコントロールする方式とした。これによって観客一人一人へ外気を確実に供給できると共に、省エネルギー性を高めることができる。(図-14)

4.3 空調環境のコントロール

多様な利用形態に応じて最適な空調環境を得るために、アリーナの空調制御は29の空調ゾーンごとに、快適指標による評価をもとに行っている。そのため、室内温湿度・放射温度センサーを各ゾーンごとに設けている。室内風速は吹出方式に応じた固定値として設定し、観客の活動量や着衣量はアリーナの状況や季節などにより異なるため、イベントごとに入力している。

5. 実測による省エネルギー効果の検証

5.1 アリーナ内気流の可視化

前述したように、大阪ドームでは空調の局所性を増すため、居住域内に少風量の吹出口を客席ごとに設けている。アリーナ完成後に観客席を空調し、気流を可視化して本システムの有効性を確認した。

図-15に冷房時の観客席からアリーナへの下降気流の可視化写真を示す。施設運営上撮影は夜間に行い、観客はいない状態で可視化したため、主な室内冷房負荷は照明負荷のみである。スモークマシン(トリエチレングリコール・プロピレングリコール・1.3-ブタンジオール・水の混合液を蒸発させエアロゾルを発生させる装置)を用いて気流を可視化し、撮影した。



図-15 アリーナ空調気流の可視化

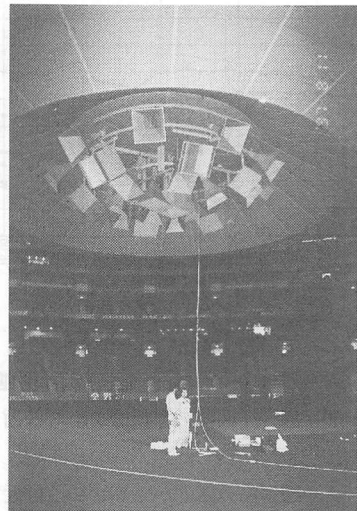


図-16 垂直温度計測の設置風景

空調気流が円周方向へ拡散してしまうと、他の空調ゾーンの気流と混合し、空調の局所性は失われる。可視化により、空調気流の円周方向への拡散は小さく、局所的な負荷処理が効率よく行われていることが確認できた。

5.2 アリーナの上下温度分布の実測

居住域とその上部の温度分布を把握するため、アリーナ中央部と観客席(下段席)上部の垂直温度分布を測定した。アリーナ中央部の温度分布は、スーパーリングを昇降させ、小型温度記録計を取り付けたワイヤーを吊り下げて測定した(図-16)。客席上部の温度分布は同様のワイヤーを屋根点検用キャットウォークから吊り下げて測定した。

図-17・18にアリーナ中央と観客席上部の高さごとの温度変化をそれぞれ示す。(測定条件:晴天日、アリーナ観客なし、照明点灯、スーパーリングは遮光モ-

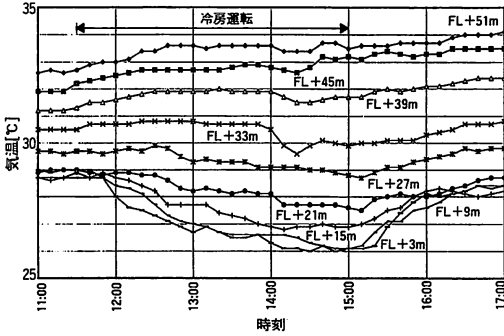


図-17 アリーナ中央の気温変動

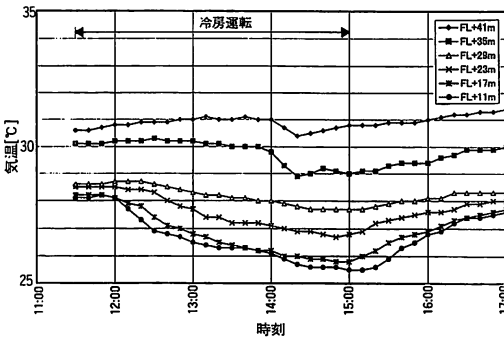


図-18 観客席上部の気温変動

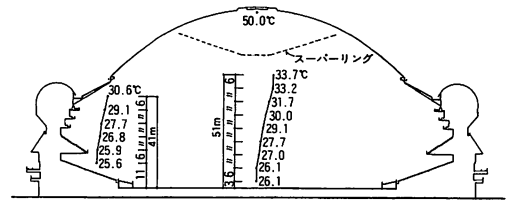


図-19 アリーナ冷房時の垂直温度分布

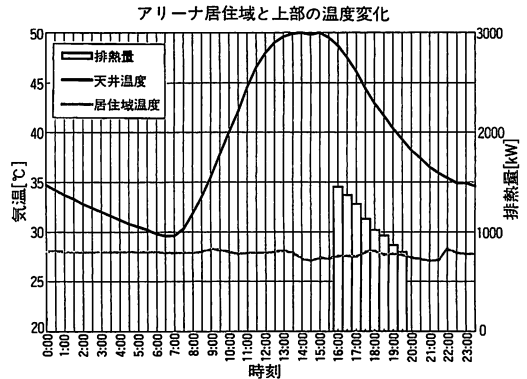


図-20 イベント時のアリーナの気温とエアムーブからの排熱量

ド、エアムーブは中段計17m²を開放) 冷房運転は11:30~15:00に観客席系統の空調機を全て稼働し、その他の時刻は空調なしとした。

アリーナや観客席の床面から高さ10m付近までの気温は空調機の発停に敏感に反応しているが、それより上では時間遅れを伴って気温が変化している。

図-17・18の冷房停止直前(14時45分)の垂直温度分布を図-19に示す。高さおよそ10m以下では気温はほぼ一定で、それより上部では高さ方向に一定の温度勾配を保っている。スーパーリングより上部では熱がこもり、気温は急激に上昇している。

以上より、冷房時の空調空気は、高さ10m以下の居住域で混合状態にあり、それ以上はディスプレイメント空調に見られる典型的な温度成層をつくっていることがわかる。大阪ドームでは、居住域内に吹出口を設けたことにより、垂直方向にも局所性の高い空調を実現できていることを確認できた。

5.3 エアムーブからの排気熱量の試算

大阪ドームでは、屋根に排気口(エアムーブ)を設け、アリーナ上部の熱だまりを効果的に排出できるようにした。排気温度の実測データと排気風量から、熱だまりを使った排熱量を計算した。

図-20はイベント時(8月24日(日))プロ野球16:00~20:00の居住域とアリーナ上部(FL+76m)の温度変化である。空調機によるアリーナへの外気供給量から、コンコースにある便所や売店の排気量を引いた値をエアムーブからの排気量として、排熱量(顕熱)を計算した結果をあわせて示す。排熱量はイベント時の外気負荷を除くアリーナ冷房負荷約3,000kW(実測値)のおよそ40%にあたり、熱だまりの排熱の有効性を確認できた。

6. おわりに

本稿では、局所空調を中心に、大阪ドームのアリーナ空調システムの効率的な運用のための考え方や、技術的に配慮した点について説明した。また、完成した施設の夏期実測結果を用いて、計画通りの効果が出ていることを確認した。

今後、中間期・冬期の実測や年間運転実績を通して、システムの有効性を確認していく予定である。

末筆ながら、本文を発表するにあたり、(株)大阪シールドーム様の多大なる協力を得ました。ここに感謝の意を表します。