

大阪ドームの風圧特性と内部環境に関する研究 (その2)

——屋内における空気分布と換気の特徴——

諏訪 好英 表 佑太郎
岩波 洋 土井 暁
(本社 エンジニアリング
本部)

A Study on Wind Pressure and Interior Environment for Osaka Dome (Part 2)

——Characteristics of Indoor Air Distribution and Ventilation——

Yoshihide Suwa Yutaro Omote
Hiroshi Iwanami Satoru Doi

Abstract

This paper reviews the concept of air-ventilation and air-conditioning systems of Osaka Dome. This dome is now under construction and will be completed in spring of 1997. Two peculiar systems were adopted for Osaka Dome. One is a natural ventilation system which is driven by wind force, the other is an air-conditioning system using the stairs and the back-side of the seats. Details of the system design were obtained by computer simulations and full-size model experiments.

概 要

本論文は1997年春竣工予定の大阪ドームについて、換気・空調計画の概要と、システム設計諸元の選定を目的として実施した数値解析および実大模型実験の内容を報告するものである。本ドームでは、外部気流を利用したエアムーバによる自然換気と、段床および観客席椅子の背面板を利用した座席空調を大きな特徴としている。数値解析の結果、エアムーバの採用によりドーム内には十分な自然換気が得られ、換気・空調エネルギーの削減が可能となったことがわかった。また座席空調に関しては実大模型実験により吹き出し条件と椅子の背面板形状とを検討し、効果的な空調状態を得るための設計諸元を求めた。

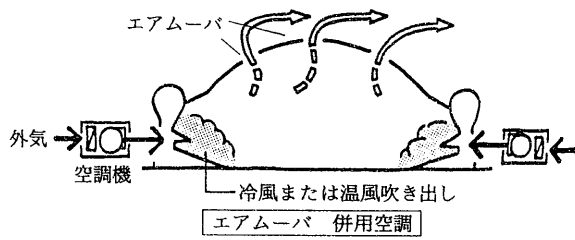
1. はじめに

スポーツや展示会、コンサートなど各種イベントに対応した大型の多目的ドームが、近年、各地で盛んに建設されるようになった。これらのいわゆる大空間構造物では、内部気積や天井高が大きいこと、居住域と非居住域とが混在することなどに起因して、一般の建築物とは大きく異なる屋内環境特性を示す。また大容量の換気・空調を必要とする大空間構造物では、屋内の居住性確保とともに経済性や外部環境への影響についても十分な配慮が必要となる。

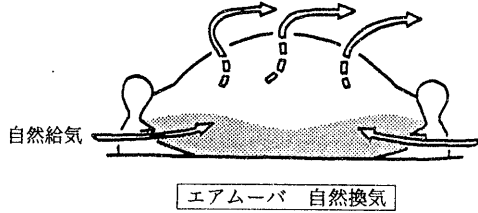
本報では1997年春に竣工予定の大阪ドームに関する換気・空調計画の概要と、その設計諸元を決定するにあたり実施した実験および数値解析について報告する。

2. 大阪ドームの換気・空調計画

大阪ドームのアリーナ直径は約150m、最高部天井高さは約70mであり、気積は120万 m^3 に達する。屋内の換気には、空調機による送風と併用して外部風を利用した自然換気が行えるようドームの屋根部分に総開口面積約450 m^2 の排気口(以下エアムーバと呼ぶ)を設けている。図-1に示すように屋内空調にエアムーバからの自然排気を併用するとドーム内の熱気を上部から効率的に除去できる。また中間期には通常自然排煙窓として使用しているドーム外周部の開口を空気取り入れ口として利用し、ファン動力なしで自然換気を行うことも可能である。いずれもドーム屋根面での風圧が外部風に起因して負圧となることを利用したものである。



空調機で居住域空調を行い、エアムーバからの自然排気を併用する。



ドーム外周の開口部を給気口、エアムーバを排気口としてファン動力なしで自然換気を行う。

図-1 エアムーバによる換気システム

居住域高さを3mと仮定すると、居住域の気積はたかだか10万 m^3 であり、ドーム全体の気積の1割に満たないことがわかる。居住域を効率的に空調し、かつ全体の空調消費エネルギーを低く抑えるためには、居住域と非居住域との熱的な遮断性を高める必要がある。大阪ドームでは観客席の椅子背面を利用した座席空調システムを提案し、観客の近傍に直接空調空気を送り込む方式を採用した。本物件で採用した空調システムを図-2に示す。ドームの5階、6階に設置された空調機から送り込まれた空調空気は段床を利用したダクトを経て、各客席の足元に設けた吹き出し口（以下段床吹き出し口とよぶ）から居住域へ供給される。空調吹き出し気流は椅子の背面に沿って上昇流を形成し、観客席の周辺に拡散する仕組みとなっている。

3. 数値解析によるドーム内換気特性の検討

エアムーバからの自然排気によってどの程度の換気回数が見込まれるのかを予測するため、数値解析による換気特性の検討を行った。また外部の気象条件を考慮した解析を行い、自然換気を併用した場合のドーム内温熱特性について考察した。

3.1 数値解析の概要

一般曲線座標系を用いて図-3に示すようなモデルを作成し、ドーム外部の周辺気流と屋内気流とを同時に数値解析した。解析領域全体の格子節点数は122×84×64である。

開口部については、全体の解析領域との相対的なスケールの違いから実形状をそのまま模擬することは困難である。ここではそれぞれの開口部に流量係数を設定し、実際の開口面積との違いを考慮して流量収支と抵抗値とが一致するよう通風特性をモデル化した¹⁾。開口部の流量係数 α の値は外周部の排煙窓について $\alpha=0.65$ 、エア

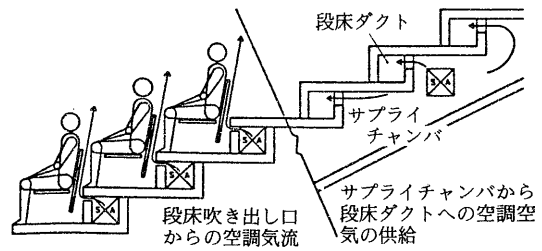


図-2 座席空調システム

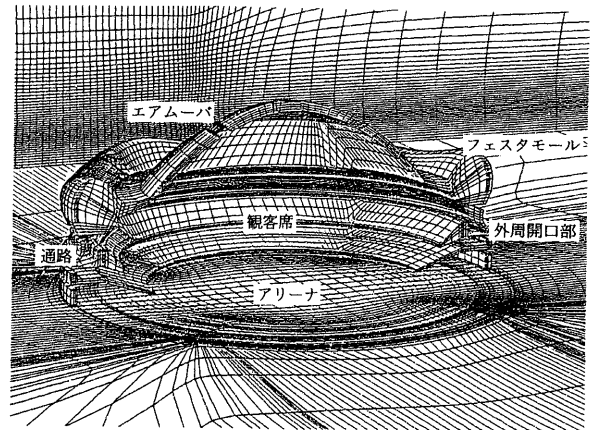


図-3 数値解析に用いたモデルと計算格子

表-1 夏季についての解析条件

利用形態	大型イベント、スポーツ観戦 観客数：5万人
気象条件	夏季、晴天時 外気温度：35.8°C、日射量：604.7 kcal/m ² h 西風、基準点風速 0.5～5 m/s (1/4乗則プロファイルを仮定)
内部発熱	照明負荷：1,500,000 kcal/h 人体発熱：2,500,000 kcal/h 直達日射：120 kcal/m ² h
空調条件	吹き出し温度：22°C 風量：1,454,400 CMH (座席空調を仮定)
開口条件	エアムーバ： $\alpha=0.27$ 、開口率 0.25～0.5 外周部開口： $\alpha=0.65$ 、開口率 0.12～0.2

ムーバについては風洞実験の結果から $\alpha=0.27$ とした。解析条件としては中間期から夏季にかけて5万人の観客を収容した場合を想定しており、日射や人体負荷による熱対流の影響を考慮する必要から流体の運動量方程式と熱伝導方程式とを連成し、SIMPLE法²⁾による定常解析を行った。なお乱流補正には標準k- ϵ モデル³⁾を用いた。基本ケースとして設定した解析条件を表-1に示す。

3.2 エアムーバによる自然換気の特長

数値解析によって求めたドーム内外の気流状態を図-

4に示す。屋外のドーム周辺気流はフェスタモールの谷部、ドーム頂部から風下側の領域で剥離を生じており、またドーム後流では大きな逆流領域が発達している。ドーム外周部の排煙窓からは風上側、風下側ともに外気の流入が認められ、流入した気流はアリーナの中央付近で緩やかな上昇流に転じた後、天井のエアムーバから効果的に排気されている。

上空30mにおける風速を基準点風速として変化させた場合の換気回数を図-5に示す。外周部の排気窓を全開とすると、風速3m/sの場合でも換気回数4.5回程度が得られ、ある程度風のある日にはファン動力なしで十分な換気が行えることがわかった。なお収容人員ひとりあたりの放出量を200ml/min、外気濃度300ppmとして居住域における二酸化炭素濃度を計算すると、5万人収容時の平均濃度は約312ppmであり、ビル管理法の空気汚れ指標(1,000ppm以下)を十分満足することを確認した。

3.3 自然換気併用によるドーム内温熱特性

外気の取り込みによる自然換気は、温熱環境制御の上ではエネルギー消費量の削減に寄与するとは限らない。外部の気象条件に合わせた外気取り込み量の制御を行うため、中間期から夏季にかけてのドーム内温熱環境特性を数値解析により考察した。

想定した外部気象条件を表-2に示す。なお日射量については、建設予定地を北緯34°4′、東経135°3′として算出した午後1時の太陽高度と屋根面、壁面の方位角、傾斜角を考慮して相当外気温度に換算し⁴⁾、解析に用いた。解析結果は、ドーム内を垂直方向7層に分割した各層の平均温度としてまとめ、ドーム内の垂直温度分布を比較した。観客席とアリーナのある居住域は床面から26mまでの領域である。

4月から10月までの条件で解析した結果を図-6に示す。設定条件として1,445,400CMHの座席空調を併用した場合を想定し、外部気流は基準点風速で2m/sとした。なお、空調吹出し温度は8月を22°C、7月、9月を

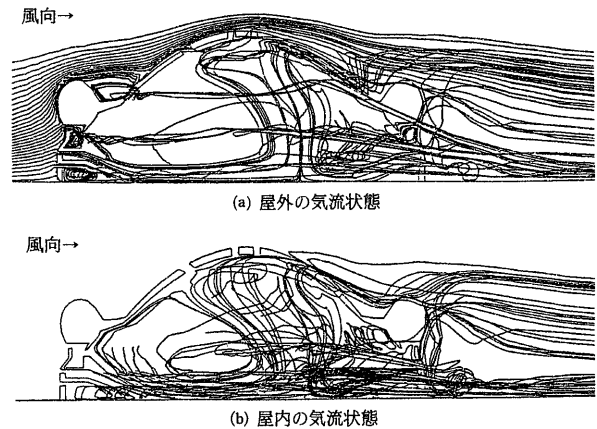


図-4 ドーム内外の気流の解析結果

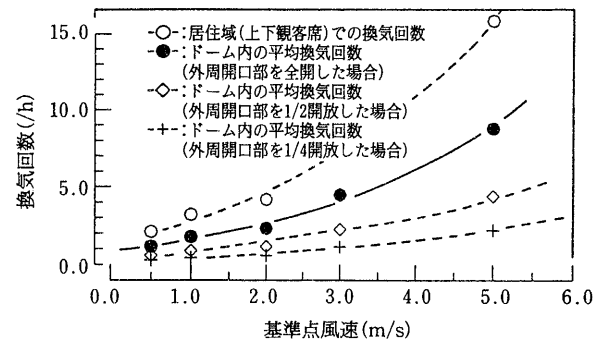


図-5 基準点風速に対する換気回数の違い

表-2 想定した外部気象条件

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
外気温度 (°C)	19.5	21.3	25.5	31.4	35.2	31.5	22.5
日射量 (kcal/m ² h)	689	714	428	739	682	427	264

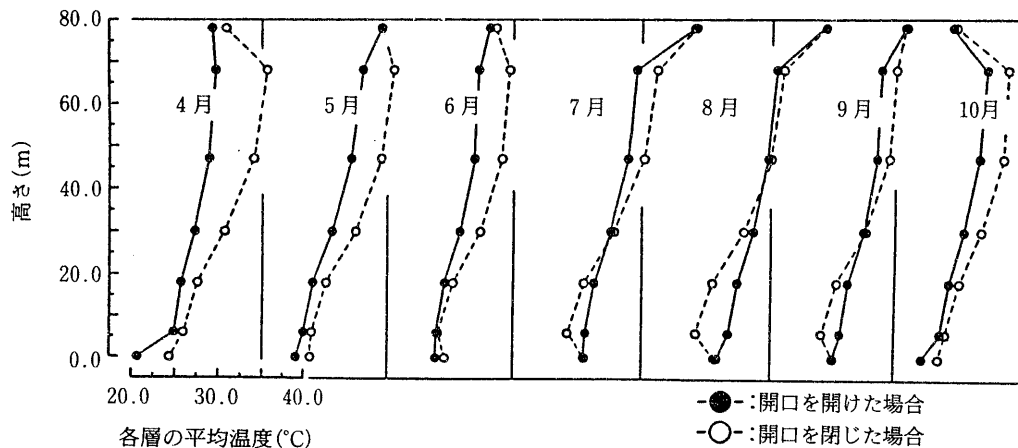


図-6 4月から10月にかけてのドーム内垂直温度分布の解析結果

24°C, 他の月は26°Cとした。開口を閉じた場合には, いずれの場合も温度成層の発達によりドーム内の上方に熱だまりを生じるが, 開口を開けて外気を取り込んだ場合には屋内の温熱特性が季節によって大きく変化することがわかる。7~9月にかけては外気温度が高いため外気導入により居住域温度が上昇するが, 4~6月, 10月には自然換気によって熱だまりが効果的に除去されている。数値解析の結果, エアムバによる自然換気は中間期における空調消費エネルギーの削減にも有効なことがわかった。

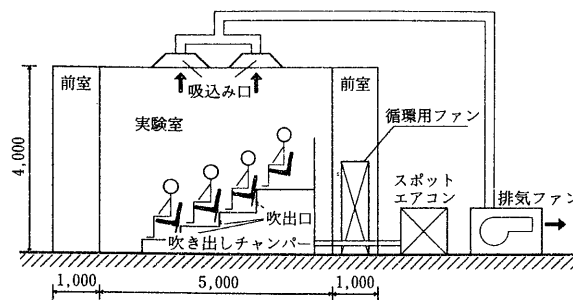


図-7 座席空調システムの実大模型実験装置

4. 座席空調システムに関する実験的検討

本物件では居住域の空調方式として座席空調を採用したが, 椅子背面を利用する吹き出し方式はこれまであまり例がない。そこで実大模型による実験を行い, 吹き出し条件, 椅子背面の形状について設計諸元を求めた。

4.1 実大模型および実験の概要

居住域高さを3mと仮定し, 図-7に示すような実大模型を作成した。模型室内には4段の段床を設け, 各段に3席ずつの椅子を設置した。なお上下観客席の段床の段差が異なるため模型の1~2段目段差を300mm, 3~4段目段差を500mmとした。模型室の周囲には前室を設け, 室温を28°Cに保つよう温度制御した。

実験には12体の人体模型を用い, それぞれ50 kcal/hの発熱を行った。なお椅子の形状は内野席と外野席とで異なるため2種類の椅子を用意し, 段差の違いとの組み合わせにより実験条件を変化させた。なお段床吹き出し口からの空調気流到達高さに関しては, 暖房時には浮力効果による上昇が期待できるので問題とはならない。本実験では冷房時を想定し, いずれの場合も吹き出し温度を22°Cに設定した。

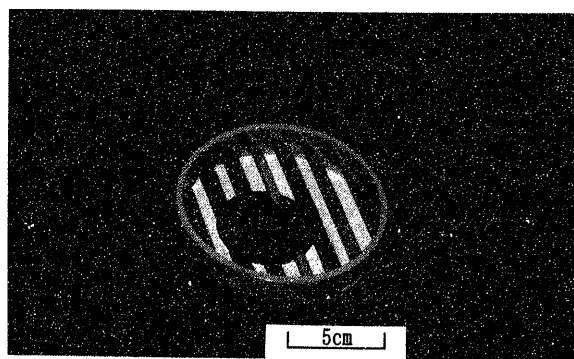


写真-1 実験に用いた段床吹き出し口のルーバ

4.2 段床吹き出し条件と椅子背面形状の選定

冷房吹き出し気流の到達高さを測定し, 段床吹き出し口の直径を選定した。実験には写真-1に示すような直径100mmのルーバを使用し, 穴あきの厚紙で周辺部を遮蔽することによりルーバ径を変化させた。実験の結果, 吹き出し口1カ所あたりの流量を33 CMH, ルーバ径を50mmとしたときに最も気流の到達距離が大きくなることがわかった。なお本条件では風切り音も小さく, 段床吹き出し条件として妥当なものと判断した。吹き出し角度はルーバの開口率との関係から45°上向きとした。

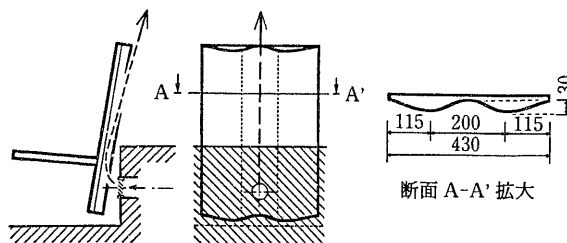


図-8 採用した背面板のオープングクト形状

本システムでは, 段床吹き出し口からの気流を椅子の背面に沿わせて上昇させる。背面板を平板とした場合には気流が拡散して吹き上がりが弱くなる上, 左右へのふれが大きくなって観客の脚部に直接冷気が接触しやすくなることがわかった。そこで, 背面板を曲面構造として気流を誘導する溝(以下オープングクトと呼ぶ)を設けることとし, その形状を検討した。プラスチック板を用いて背面板形状を変化させ, 座席周辺での気流の速度分布を測定した結果から, 図-8に示すような形状を採用した。図-9, 図-10に背面板に平板を用いた場合とオ

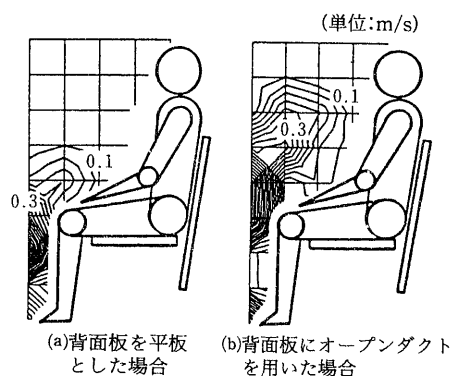


図-9 背面板の形状による気流分布の違い

ープングクトを用いた場合の気流分布, 温度分布の測定結果を示す。オープングクトを使用した場合には気流が観客の頭部まで到達し, 座席周辺での上下温度差が緩和されている。気流の到達高さは平板の場合750mm, オープングクトの場合900~1,050mmであった。

4.3 椅子の形状、段差の違いによる影響

前述したように椅子の形状は内野席と外野席とで異なるものを使用する。また段床の段差も上段、下段の観客席で異なっている。4.2節の実験により選定した設定条件を用いて椅子の形状、段差が異なる場合について比較した。座席周辺における温度分布の測定結果を図-11に示す。いずれの場合もオープングクトに沿って冷気が上昇しており、期待した分布状態が得られている。椅子の形状、段差の違いによって各条件での温度分布には若干の違いが認められる。比較した4種類の条件では段床吹き出し口から背面板上端までの距離が異なるため、オープングクトに沿った流路長さもそれぞれ異なる。温度分布の違いは、流路長さの違いによって吹き出し気流の制御効果が異なるためと考えられる。

4.4 気流状態の可視化

選定した設定条件の妥当性を視覚的に確認するため座席周辺の気流状態を可視化した。可視化には白色蒸気によるトレーサ法(直接注入法)を用いた。トレーサ蒸気にはオンジナオイル15を、蒸気発生器はみずほ製作所製Smoke Supply 500MkIIを使用した。段差300mmの段床に内野席用の椅子を設置した場合の可視化の連続写真を写真-2に示す。段床吹き出し口から供給された空調気流が椅子の背面に沿って上昇しながら拡散し、観客の頭部上方まで到達する様子が確認できる。写真-3は下段内野席と上段外野席の気流状態を可視化した結果である。椅子の形状と段差の違いにより、気流の到達高さが異なることがわかる。

5. まとめ

大阪ドームの屋内外気流状態について数値解析を行い、エアムバを用いた自然換気が換気量の確保と中間期の空調消費エネルギー削減に効果的であることを確認した。またオープングクトを用いた座席空調システムを提案し、実大模型実験により吹き出し条件、椅子背面板形状など

効果的な空調状態を得るための設計諸元を求めた。

今後も多目的イベント施設としてこのような大空間構造物の建設が予想される。本研究の成果を踏まえ、これら大空間構造物に対する効果的な換気・空調設計手法を確立していきたいと考えている。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、(株)大阪シティドーム建設部 南嶋兆司課長、花登庄平課長および日建設計(株)大阪環境事務所 大高一博主管、同 大阪管理工事事務所 橋本直樹氏から資料の提供、貴重な助言など多大なご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

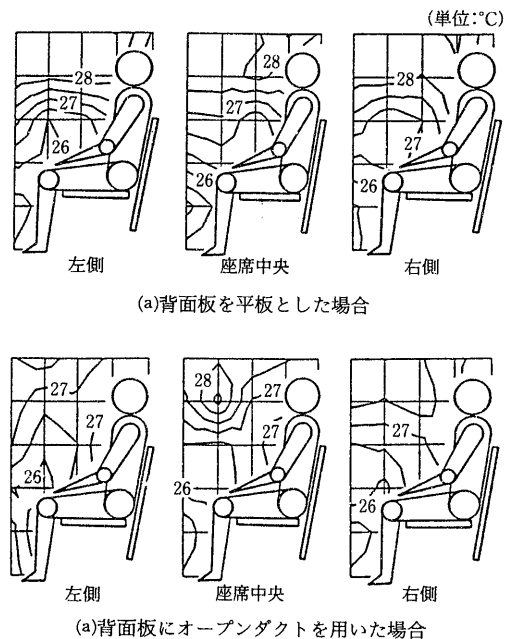


図-10 背面板の形状による座席周辺の温度分布の違い

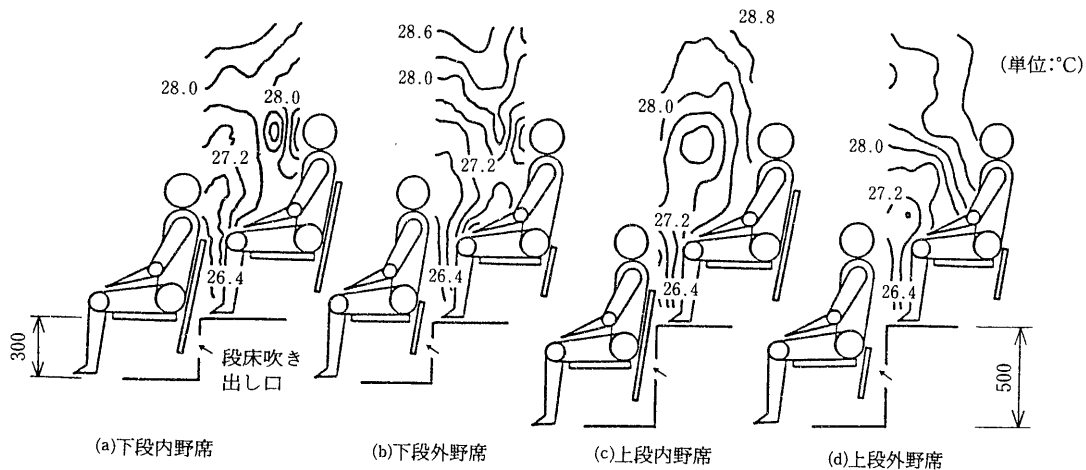


図-11 椅子の形状、段差が異なる場合の温度分布の測定結果

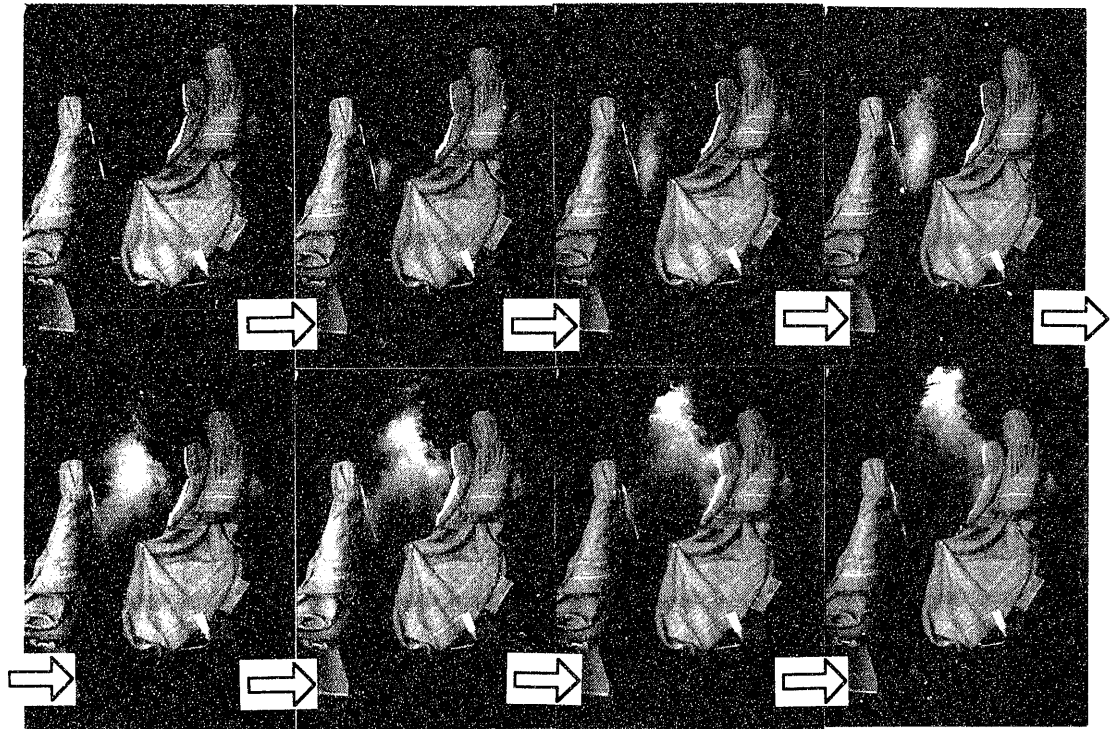
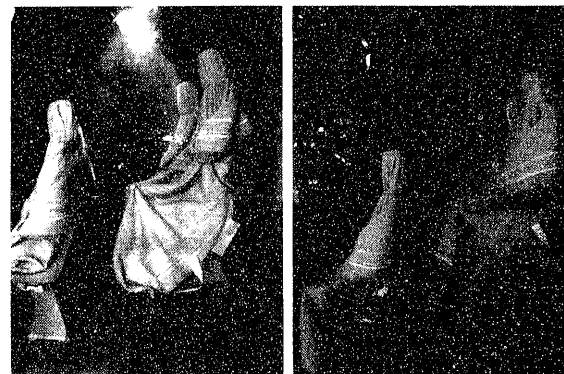


写真-2 気流可視化結果の連続写真

参考文献

- 1) 諏訪, 表: 大空間構造物に関する屋内/屋外気流の同時解析, 日本数値流体力学学会第8回数値流体力学シンポジウム講演論文集, p. 213~216, (1994)
- 2) Patankar, S.V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp., (1980)
- 3) Launder, B.E. and Spalding, D.B.: Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, (1972)
- 4) 宇田川: パソコンによる空気調和計算法, オーム社, (1986)



内野席 (段差300mm)

外野席 (段差500mm)

写真-3 椅子の形状, 段差が異なる場合の可視化結果