

## 大空間の室内気候に関する模型実験

Model Experiment on Indoor Climate of Large-Scale Room

村上 周三\*・加藤 信介\*\*・中川 浩之\*\*\*

Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO and Hiroyuki NAKAGAWA

屋内野球場、ホール等の大空間の室内環境計画は、空間の巨大さに比べ、熱負荷や空調が局所的になりがちで、予期しない温度分布、気流分布の不均一さを招くことがある。したがって、大空間内を自然換気や空調により室内気候の調整を行う場合、環境をあらかじめ、建築設計計画段階に予測することが特に求められる。

本解説ではこの有効な予測手法の一つとされる模型実験に関して、室内気候調整方法ごとに異なる相似則の考え方について述べ、おのおのの模型実験事例を紹介する。

## は じ め に

建築架構技術の発達とともに、スポーツホール、アトリウム、劇場、工場などの多様な大空間建築は、近年増加の傾向にある。それらの大空間建築は、利用目的の違いにより、空間形状、負荷形態などが異なり、要求される室内環境も多岐にわたっている。これらのニーズに対して空間特性を生かした風力・温度差による自然換気や、各種省エネ手法を採り入れた空調などの室内気候調整が行われている。しかし、一般に大空間では、その空間特性により、冷房時のコールドドラフト、暖房時の上下温度分布、ダウンドラフトなどの問題が生じやすく、計画時における室内環境の予測が重要となる。縮尺模型を用いる実験手法は、最も有効な予測手法の一つとして、実用性が認められ、過去に数多くの実験事例が報告されている<sup>1)~13)</sup>。

本報では、始めに室内気候調整方法を以下のように

- a) 空調が行われている場合
- b) 風力換気が行われている場合
- c) 温度差換気が行われている場合
- d) 風力換気と温度差換気が併用されている場合

4つに分類し、各模型実験における相似則の考え方を述べ、次におのおのの具体的な実験事例について紹介する。

## I 相 似 条 件

実物と模型の相似条件は、1. 空間内部の流れ場・温度場に関するものと、2. 境界条件に関するものがある。前者は流体の基礎方程式を代表値で無次元化することで得

られるパラメータを実物と模型で一致させることであり、後者は、同じく無次元化された境界条件を実物と模型で一致させることである<sup>1)~3)</sup>。

## 1. 流れ場の相似

建築環境工学の分野では流れ場は一般に乱流であり、必要とされる流れ場の情報は、多くの場合平均流のそれである。平均の乱流場を支配する方程式（連続式(1)、

## 記 号 表

$U_0$ : 代表風速	m/s
$u$ : 変動速度	m/s
$\Delta\theta_0$ : 代表温度差	°C
$L_0$ : 代表長さ	m
$\ell_0$ : 乱れの長さスケール	m
$\nu$ : 分子動粘性係数	m <sup>2</sup> /s
$a$ : 分子温度拡散係数	m <sup>2</sup> /s
$\nu_t$ : 渦動粘性係数	m <sup>2</sup> /s
$a_t$ : 渦温度拡散係数	m <sup>2</sup> /s
$Pr$ : プラントル数	$Pr = \nu/a$
$Pr_t$ : 乱流プラントル数	$Pr_t = \nu_t/a_t$
$Re$ : レイノルズ数	$Re = U_0 L_0 / \nu$
$Re_t$ : 乱流レイノルズ数	$Re_t = U_0 \ell_0 / \nu_t$
$Ar$ : アルキメデス数	$Ar = g\beta\Delta\theta_0 L_0 / U_0^2$
$g$ : 重力加速度	m/s <sup>2</sup>
$\beta$ : 体膨張係数 (空気)	1/°C
$Q$ : 発熱量または損失熱量	kcal/h
$n$ : 縮率 (模型/実物)	
添字 $\ell$ : 長さ	$Q$ : 発熱量または損失熱量
$\theta$ : 温度差	$f$ : full scale
$u$ : 風速	$m$ : model

\*東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

\*\*東京大学生産技術研究所 第5部

\*\*\*(株)間組 (元受託研究員)

Reynolds方程式(2), エネルギー方程式(3))から, 5つの無次元数(4)~(8)が与えられる.

$$\frac{\partial U_i^*}{\partial x_i^*} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i^*}{\partial t^*} + \frac{\partial U_i^* U_j^*}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial x_i^*} + \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left\{ \left( \frac{1}{Re_t} + \frac{1}{Re} \right) \left( \frac{\partial U_i^*}{\partial x_j^*} + \frac{\partial U_j^*}{\partial x_i^*} \right) \right\} - Ar \Delta \theta^* \delta_{i3} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Delta \theta^*}{\partial t^*} + \frac{\partial U_j^* \Delta \theta^*}{\partial x_j^*} = \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left\{ \left( \frac{1}{Re_t Pr_t} + \frac{1}{Re Pr} \right) \frac{\partial \Delta \theta^*}{\partial x_j^*} \right\} \quad (3)$$

$$Re = \frac{U_0 L_0}{\nu} \quad (4)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (5)$$

$$Re_t = \frac{U_0 L_0}{\nu_t} \quad (6)$$

$$Pr_t = \frac{\nu_t}{a_t} \quad (7)$$

$$Ar = \frac{g \beta \Delta \theta L_0}{U_0^2} \quad (8)$$

これらの無次元数の模型と実物での一致が模型実験において, 流れ場の相似を与えるための主なる条件となる.

空気を用いて模型実験を行う場合, (5)の一致は自明である. また, 模型においてReynolds効果を無視できる程度に大きな $Re$ 数で実験を行えば, (4)の一致の条件も必要とされない. 逆に言えば,  $Re$ 数が無視できるほど大きいことが大切な実験条件の一つとなる.

次に $Re_t$ 数と $Pr_t$ 数に関しては以下のように考える.

次元解析より $\nu_t$ は次のように表現するのが妥当である.

$$\nu_t \propto \sqrt{u^2} \cdot \ell_0 \quad (9)$$

一般に乱流場では次の関係は自明のことである.

$$\sqrt{u^2} \propto U_0 \quad (10)$$

$$\ell_0 \propto L_0 \quad (11)$$

$$\text{したがって } \nu_t \propto U_0 L_0 \quad (12)$$

すなわち, 周知のように幾何学的に相似な流れ場では(6), (12)より $Re_t$ の一致は自動的に保証されることになる.  $a_t$ ,  $Pr_t$ に関しても同様の考え方が可能である. 幾何学形状は(10), (11)に示される関係の比例定数に反映されることになる.

(8)式で示される $Ar$ 数の一致は, 模型実験における最も重要な相似条件となる. ただし,  $Ar$ 数の一致に関しては実験条件により取り扱いが異なるため, 以降は各実験条件ごとに $Ar$ 数を中心とした相似条件について示す.

a) 空調が行われている場合の相似条件<sup>3), 12)</sup>

代表値 $L_0$ ,  $U_0$ ,  $\Delta \theta_0$ は通常それぞれ空間の天井高さ, 吹出風速, 吹出温度差(吹出温度と室内平均温度(もしくは

は排気温度)の差)が選ばれる. 図1参照.  $Re$ 数の一致は困難であるが実用的には, Reynolds効果を無視できるほど大きな $Re$ 数で実験を行うこと(小縮尺模型の使用)が必要である.  $Re$ 数については, 幾何学的相似を満足させれば室内気流のうち壁面近傍のごく薄い境界層を除く大部分では, 前述のように自動的に一致する. したがって実物と模型の $Ar$ 数の一致のみを考慮する.

$$\left( \frac{g \beta \Delta \theta_0 L_0}{U_0^2} \right)_{\text{model}} = \left( \frac{g \beta \Delta \theta_0 L_0}{U_0^2} \right)_{\text{prototype}} \quad (13)$$

b) 風力換気が行われている大空間の相似条件

接地境界層の中に大空間が立地している状況を想定する. この場合の流れ場は開口からの流出入によって形成される等温の流れ場である. 図2において内部発熱ゼロに対応する唯一つの相似条件は $Re_t$ の一致であるが, これは前述のように流れ場が乱れている限り自動的に保証される. したがって閉空間内の流れ場に対して注意すべきことは, (4)の $Re$ 効果が無視できるくらい大きな $Re$ 数を模型内で確保することである. ただし, これに関しては, 非等温場の実験も含めて必ずしも十分に保証されていないことが多いようである.

なお, 風力換気の大小は, 一般に換気回数 $N$ で表現される. この量は(1/時間)の次元を持つので,  $N$ の縮率は周知のように $U_0/L_0$ で表現される.

c) 温度差換気が卓越している大空間の相似条件<sup>10)</sup>

この場合の流れ場は何らかの熱源に基づく熱対流により形成される非等温の乱流場である. 図2において各部の風速がゼロに対応する相似条件は $Re_t$ と $Ar$ である. 前

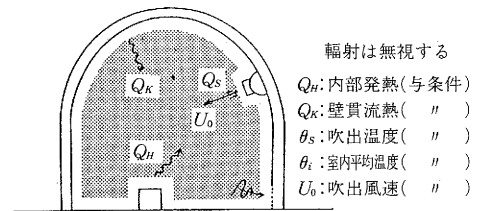


図1 相似条件を室内の物理量のみにより限定できる場合

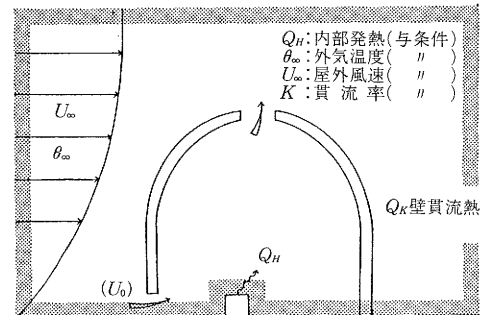


図2 相似条件が室内外の物理量により定められる場合

述のように  $Re_l$  の一致は自動的に保証されている。

この流れ場では独立な変数は  $\Delta\theta$  と  $L_0$  であり、流速  $U_0$  は従属変数となる。次元解析より、

$$U_0 \propto (g\beta\Delta\theta L_0)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

である。したがって (8), (14) より  $Ar$  の一致も自動的に満足されることになり、特別な相似条件は必要とされない。

この実験は、無風状態で温度差換気のみによりどれだけの換気量が得られるか等の予測に用いられることが多い。

d) 風力換気と温度差換気が共存する大空間の相似条件 前節 c) と同じく接地境界層の中に大空間が立地している状況を想定する。図 2 参照。前述してきたように必要とされる相似条件は  $Ar$  のみである。この場合、発熱量  $Q$  と代表温度差  $\Delta\theta$  の間に次の関数を仮定して差支えない。

$$\Delta\theta \propto \frac{Q}{U_0 L_0^{\frac{1}{2}}} \quad (15)$$

(8) と (15) より発熱量  $Q$  を用いた  $Ar$  の表示は次のようになる。

$$Ar \propto \frac{g\beta \cdot Q}{U_0^{\frac{1}{2}} L_0} \quad (16)$$

この条件を模型と実物の比で示せば次のようになる。

$$n_Q = n_u^3 \cdot n_\theta \quad (17)$$

## 2. 境界条件の相似

壁面近傍のごく薄い境界層を除いては、形状が相似であれば気流に関する境界条件は自動的に相似となる。

ここでは、幾何学的な相似はいずれの場合にも前提条件として満足されているものとする。

### a) 空調されている場合

温度と熱流に関する境界条件の相似は、室内空気に対する熱のやりとりを実物と模型で相似にすることが基本となる。図 1 参照。

熱流の保存により、吹出口からの空調投入熱量は内部負荷と貫流熱量の合計に等しいと考えると次式が成り立つ。

$$1 = \frac{L_0^2(\theta_o - \theta_R)/R}{C_P \gamma L_i^2 U_0(\theta_R - \theta_s)} + \frac{W_H}{C_P \gamma L_i^2 U_0(\theta_R - \theta_s)} \quad (18)$$

模型実験と実物でこの比を同一とすることにより、次式を得る。

$$\frac{W_{H_{\text{model}}}}{W_{H_{\text{prototype}}}} = \frac{\{C_P \gamma L_i^2 \cdot U_0(\theta_R - \theta_s)\}_{\text{model}}}{\{C_P \gamma L_i^2 \cdot U_0(\theta_R - \theta_s)\}_{\text{prototype}}} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\{L_0^2(\theta_o - \theta_R)/R\}_{\text{model}}}{\{L_0^2(\theta_o - \theta_R)/R\}_{\text{prototype}}} \\ &= \frac{\{C_P \gamma L_i^2 \cdot U_0(\theta_R - \theta_s)\}_{\text{model}}}{\{C_P \gamma L_i^2 \cdot U_0(\theta_R - \theta_s)\}_{\text{prototype}}} \quad (20) \end{aligned}$$

(13), (19), (20) の関係より実物と模型の相似条件は、幾何縮尺  $n_\theta$ 、速度の縮率  $n_u$ 、温度差の縮率  $n_\theta$  ( $n_\theta$ : 吹出温と室内平均温度差の縮率,  $n_\theta$ : 室内平均温と外気温度差の縮率) を用いて次式のように書き下せる。

$$n_u^2 = n_{\theta_i} \cdot n_\theta \quad (21)$$

$$n_{w_H} = n_u^2 \cdot n_\theta \cdot n_\theta \quad (22)$$

$$n_{\theta_i} = n_{\theta_i} \cdot n_R \cdot n_u \quad (23)$$

与条件 (実物の室内温度  $\theta_R$  を既知とするか否か) により (21), (22) 式の 2 式または (21), (22), (23) 式の 3 式を連立させて模型実験を行う。

### b) 風力換気の場合

この種の問題に関する模型実験は、一般に風洞内で行われる。風洞内の流れ場は閉空間に対する境界条件となるが、これに関する相似条件が必要になる。図 2 参照。

これに関しては風工学の分野で多大の蓄積がある。要約すれば Approaching wind における平均風速  $U_0$ 、乱れ  $\sqrt{u^2}$  のそれぞれの分布の相似、さらには乱れスケールの相似等が必要な条件として指摘される。

### c) 温度差換気の場合

まず外皮における熱流の境界条件として閉空間の全熱損失に対する換気、貫流、輻射の割合を模型と実物で一致させることが必要である。ただしこの種の大空間では換気が大量であることが多く、この場合近似的に換気損失を全体熱損失とみなせる。すなわち

$$Q \propto U_0 \Delta\theta L_0^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

となる。

次に、内部熱源に関しても外皮の場合と同様に対流による熱伝達と輻射による分の割合等を模型と実物で一致させることが必要である。これらの詳細については文献 12) 等を参照されたい。

(14) と (24) はいずれも相似条件ではなく自然対流の卓越した空間において  $U_0$ ,  $\Delta\theta$ ,  $L_0$  等の関係を表す式であり、これより各種の換算式が得られる。

(14) と (24) を模型と実物の比で表現すれば

$$n_u^2 = n_\theta n_\theta \quad (25)$$

$$n_Q = n_u n_\theta n_\theta^2 \quad (26)$$

(25) と (26) より、 $n_\theta$ ,  $n_u$  の換算率として次式が与えられる。

$$n_\theta = \left(\frac{n_Q^2}{n_u^5}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (27)$$

$$n_u = \left(\frac{n_Q}{n_\theta}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (28)$$

### d) 風力換気と温度差換気の共存する場合

風洞内の Approaching wind に関する相似条件は風力換気の場合と同じである。外皮や発熱源周囲における熱流の境界条件は前節 c) の温度差換気の場合と同様である。さらに厳密に言えば、この場合大空間とその周辺の境界層を含む、流れ場全体の外周における熱流の境界条件の相似も必要になるが、これを模型実験で実現することは容易ではない。実際に模型実験を行う場合、熱流の境界条件に関しては、前節 c) の場合も含めて何らかの緩和を施すことは避けられないことであろう。図 2 参照。

## II 模型実験の実例

本稿では、各種の実験例の概要について紹介する。詳細についてはおのおのの文献を参照されたい。

### 1. 空調により環境調整の行われる大空間の模型実験例

#### 1.1 ノズル吹出により空調される

##### 大規模スポーツホールの場合<sup>3)</sup>

#### (1) 実験対象建物

図3に示す15,000人の収容可能な大規模スポーツホール<sup>3)</sup>(大阪城国際文化スポーツホール:竣工)を対象とし、冷暖房時の室内温熱空気環境を検討する。

図4に冷房時の空調システムを示す。

#### (2) 模型

室内全体の1/50模型を黄銅板により作成。写真1に模型室内を示す。模型内における内部発熱(人体発熱・照明発熱)のシミュレートは、ヒーターにより行う。模型各部位はヒーターのある部位の外部を十分断熱したほか、実物で想定される各部位の熱流の比が模型でも同一となるよう断熱性能を調節した。温度はT型熱電対、風速は温度補償付サーミスター風速計を使用して測定。

#### (3) 実験結果: 冷房(最大負荷時)

模型実験結果はすべて実物の値に換算して示す。ここでは、冷房(夏期冷房)時の結果のみ示す。

図4に示す夏期冷房条件をシミュレートして得られた模型実験結果を図5に示す。図6には、対応する冷房時の実測結果を示す。模型実験では、客席後部から客席沿いの下降流が観察される。これは客席中段、前部等で間欠的に天井に向かって上昇し、天井面に沿って客席後部に向かう。下降流の一部はそのまま下降してアリーナ床面に達する。室内温は、アリーナ、客席前部、後部の順に低い。またコーナ部客席後部は、特に低い温度を示す。この傾向は実測でもこの部分の風量を絞る等の対策を行ったものの同様に観察され、良い対応を示す。

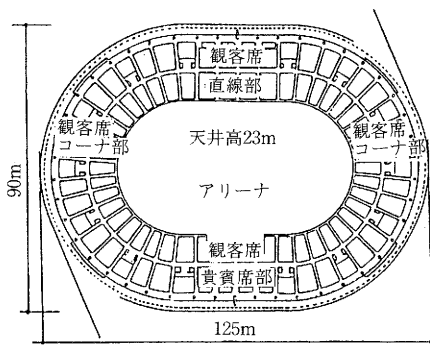


図3 スポーツホール平面図

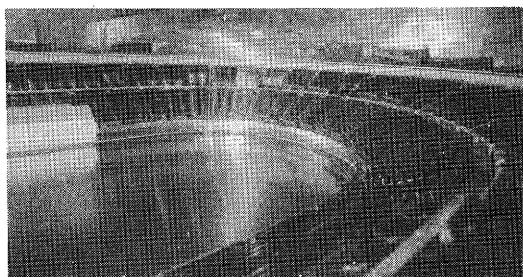


写真1 スポーツホール室内模型(1/50)(一部天井をはずす)

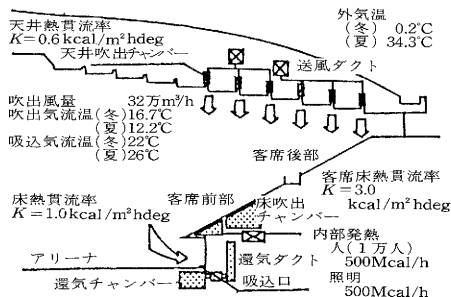


図4 冷房時の空調設定条件

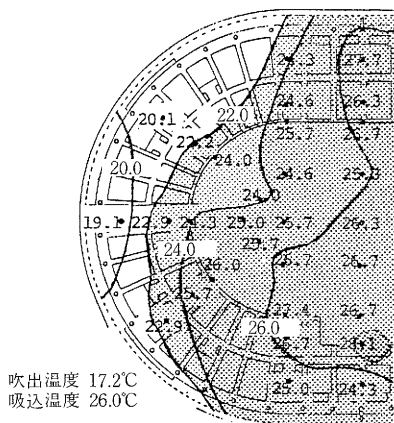


図5 模型実験冷房時水平温度分布(床上1m)

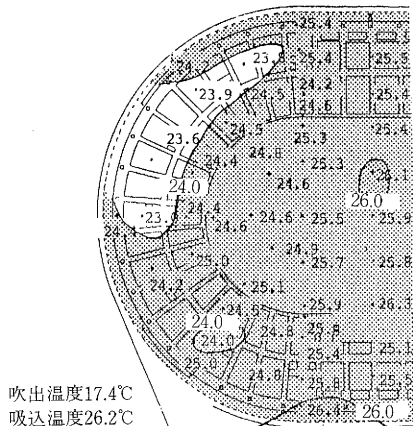


図6 実測冷房時水平温度分布(床上1m)

## (4) まとめ

大空間の温熱空気環境を模型実験によりシミュレートし実測と比較した。模型実験と実測とで設定条件が多少異なるが、室内温熱環境の全般的傾向は十分対応する結果を得た。

## 1.2 スロット吹出により空調される

大規模スポーツホールの場合<sup>(4)</sup>

## (1) 実験対象建物 (図 7)

直径が約110mの円形体育館 (東京体育館：建設中) で天井高は最高部 (アリーナ) で約29mあり、1・3階の固定観客席アリーナで計10,000人の観客を収容できる。

## (2) 模型

本建物ではペリメータの貫流熱が別途空調で賄われており、南北の負荷は対称とみなすことができる。吹出風量も同量であり室内環境もほぼ対称になるものと想定される。このため模型化範囲を北半分 (図 7) のみとし、縮尺を1/30にしている (写真 2)。

空調システムを図 8 に示す。実験では実物での壁熱貫流を既知、空調時の室内平均温度 (排気温度) を既知としている。内部発熱は模型各内部に設置された電気ヒータの発熱で再現しており、貫流熱の再現は模型外皮熱抵抗を保温材熱抵抗で代表させ各部の保温材厚さを設定し模型と実験室との温度差の制御で行った。

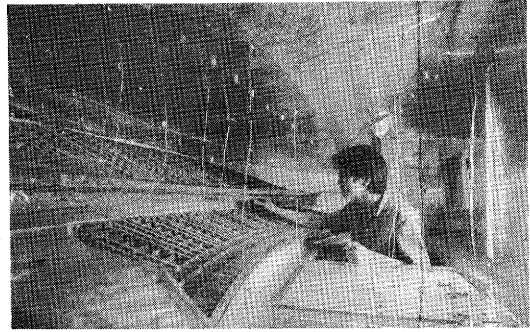


写真 2 模型内部 (西側エントラスよりの内観)

表 1 冷暖房最大負荷時の実験条件 (実物値)

	case 1	case 2	case 1	case 2
	冷房最大負荷	暖房最大負荷	1500	1500
人体発熱	500Mcal/h	0Mcal/h	1500	1500
照明発熱	158Mcal/h	0Mcal/h	4000	4000
空調条件	風量 (m³/h)	温度 (°C)	風量 (m³/h)	温度 (°C)
スロット吹出	① 1F 31,000	17.0	31,000	30.0
スロット吹出	② 3F 53,000	17.0	38,000	30.0
スロット吹出	③ 天井 38,000	17.0	38,000	20.0
床吹出	④ 3F 20,000	27.0	20,000	30.0
床吹出	⑤ 1F 20,000	27.0	20,000	30.0
吸込	⑥ アリーナ 82,000	27.0	87,000	20.0
吸込	⑦ 2F 60,000		60,000	
吸込	⑧ 天井 20,000			

\* 照明発熱は天井裏への排熱分60%を含まない数値

\* 人体発熱は50kcal/h・人で計算、風量は北側半分の数値

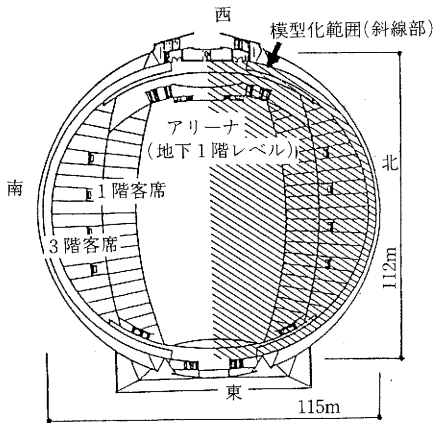


図 7 実験対象建物

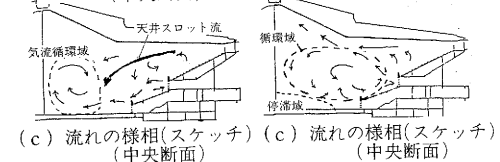
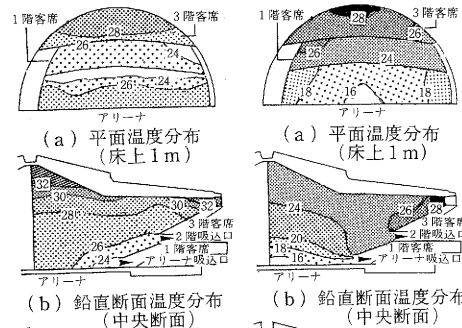


図 9 冷房最大負荷 (case 1) 図10 暖房最大負荷 (case 2)

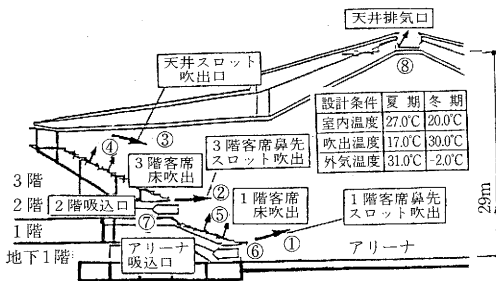


図 8 空調吹出・吸込系統概略



写真 3 気流の可視化 (冷房最大負荷)



写真 4 気流の可視化 (暖房最大負荷)

## (3) 実験結果

実験は、空調風量および吹出・吸込の配分を建物の使用形態（熱負荷分布）に応じて設定し数多くのケースについて行っている。ここでは冷房最大負荷時および暖房最大負荷時の結果について示す。

## ① 冷房時最大負荷

アリーナを含めて10,000人を収容した場合（表1、図9、写真3参照）。天井スロット吹出気流は頂部の排気にも影響されて天井面付着噴流となる傾向を示し、3階・1階客席を越えアリーナにまで到達する（自由噴流の計算では3階客席に降下する）。この流れが空間で支配的であり、アリーナ床面レベルにまで達すると1階鼻先スロット気流と干渉し合いながらアリーナ中央部あたりで大きな循環流を形成する（図9(c)）。このため、温度分布（図9(a)）ではアリーナのうち中央部ではほぼ設定温度であるが、アリーナ床面の吸込口に近づくほど、低い温度(24℃)を示している。一方3階観客席は気流が巡りにくく全域でやや高めの温度となっている。

## ② 暖房時最大負荷

暖房立ち上がり（ウォーミングアップ）時で内部発熱は無い（表1、図10、写真4参照）。天井スロット気流は天井に沿いながら天井中央部にまで達するが、1・3階鼻先スロット流は自らの浮力に加え観客席に沿う上昇流によっても大きく押し上げられ、アリーナ床面に気流は到達しない（図10(c)）。このためアリーナ床面（床1m）では、全域で温度が低く（20℃以下）、3階客席は高く（27℃）になっている（図10(a)）。鉛直断面内の温度勾

配も著しい（図10(b)）。

## (4) まとめ

スロット吹出を用いた体育館の空調では空間の形状、吹出・吸込口の配置状況、風量配分等により自由噴流では想定し難い気流性状を示す。今回の実験では冷房時の天井スロット吹出気流の天井付着傾向、吸込気流や循環流の影響による鼻先スロット吹出気流のショートカット、暖房時の局所的気流停滞、温風の上方散逸等の特徴的な流れを捉えた。

## 2. 風力換気により環境調整の行われる

## 大空間の模型実験例

2.1 東京大田市場の場合<sup>5,6)</sup>

東京大田市場（建設中）の基本計画時において、モニターによる風力換気の性状を調べた実験の概要を述べる。巨大な建物であるので1/600と1/100の2種類のモデルを用いて実験を行った。

## (1) 2種類のモデル

①縮尺1/600の全体模型を用いた風洞実験では、周辺建物を含め、建物全体としての換気性状を把握し、②縮尺1/100の部分模型を用いた風洞実験では、モニターの寸法形状の差による換気効率の違いを調べた。

## (2) 対象建物

図11に対象建物の配置を示す。主たる検討の対象とした青果棟は、長さが約400m（水産棟まで含めると約600m）、幅約180m、モニター頂部までの高さ27mである。モニターは屋根頂部の棟の位置に設置され、南北方向にのびる2次元的なもので、3個平行に並んでいる。

## (3) 1/600の全体模型を用いた実験について

壁面開口条件：南・北壁面の開口面積を大小2種類とする。「小」の場合（図12の□のみ開）の開口面積は南壁面387m<sup>2</sup>（実物）、北壁面481m<sup>2</sup>である。「大」の場合（図12の□と■が開）は、南壁面787m<sup>2</sup>、北壁面881m<sup>2</sup>である。なお、東壁面の開口面積は463m<sup>2</sup>、西壁面は113m<sup>2</sup>で一定とする。

実験結果：換気回数の測定結果を図13に示す。①風向が変化した場合 南・北壁面の開口が小、モニター頂部

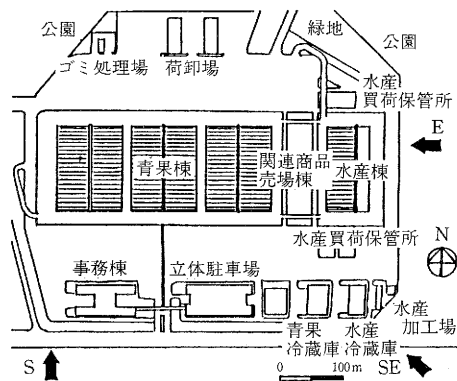
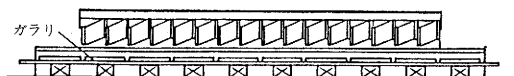
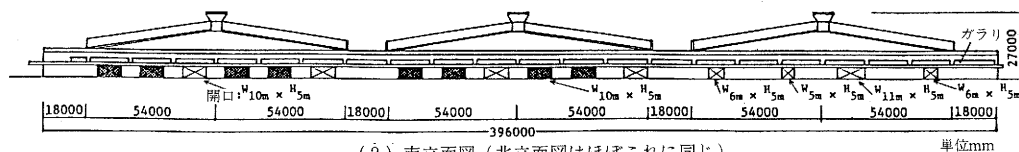


図11 建物配置と実験風向

(1) 東立面図 開口:  $U_8 \times H_5$ 

(2) 南立面図 (北立面図はほぼこれと同じ)

図12 青果棟の立面図

の風速が 4 m/s のとき、換気回数は風向 S の場合が最も小さく 3.2 回/h (実物換算値)、風向 SE の場合 4.2 回/h、風向 E の場合 4.6 回/h となる。風向 S のときの値が小さいのは、風上の事務棟などの影響によるものと判断される。

②南・北壁面の開口面積が変化した場合 風向 S、風速 4 m/s のとき、開口面積が大の場合に 5.9 回/h となり、小の場合の約 2 倍になる。同様に風向 SE の時 6.1 回/h となり、開口面積が小の場合の約 1.5 倍となる。南・北壁面の開口面積を大きくした効果は極めて大きいと言える。また、風向による差が少なくなる。

#### (4) 1/100 模型を用いた実験について

続いて 1/100 の部分模型を製作し、モニターの形状を種々変更して、その性能を詳しく調べた。結果の紹介は省略するが、この実験に際して最も留意した点は、1/100 模型における内外圧力差の条件を 1/600 模型の実験結果を参考にして決めたことである。写真 5 はモニターの詳細である。

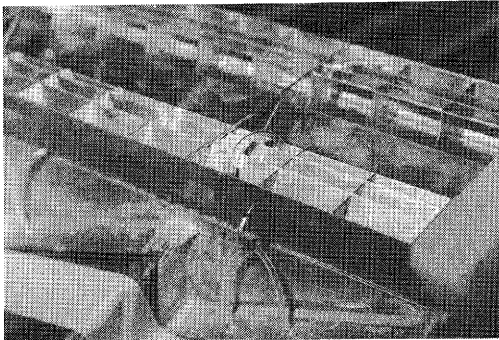


写真5 モニター (1/100模型) (東京大田市場)

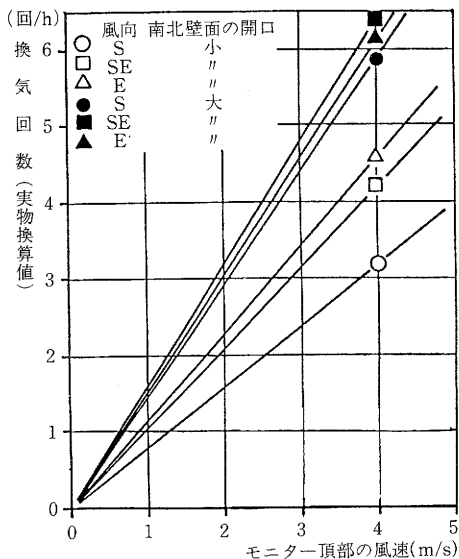


図13 換気回数測定結果 (実物換算値, 1/600実験)

## 2.2 大阪南港多目的集会場の場合<sup>7,8)</sup>

いまだ着工に至っていない大阪南港多目的集会場 (計画案) の例である。モニターの効果と屋根に開口を設けることの是非を検討した。結果の概要について説明する。

(1) 実験対象建物

図14, 写真6が大型ドームの概要である。図15が検討した各種モニターである。モニターを放射状に配置した点に特色がある。

#### (2) 実験結果

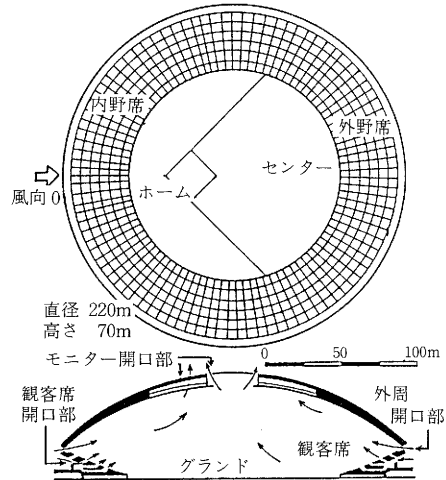


図14 大型ドームの概要 (寸法は実物について)

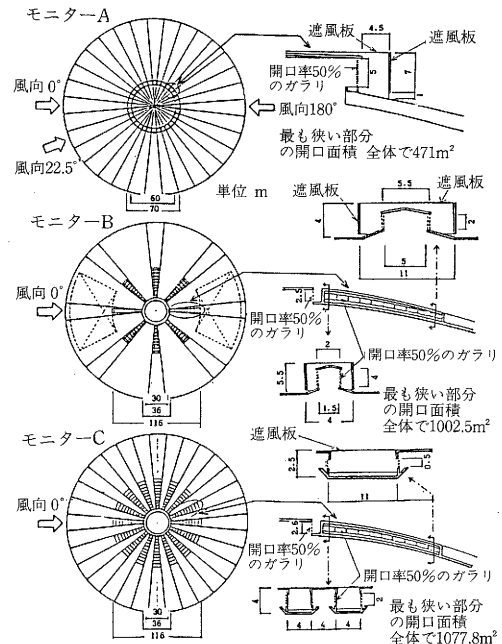


図15 実験に使用したモニター状況と実験風向 (寸法は実物について)

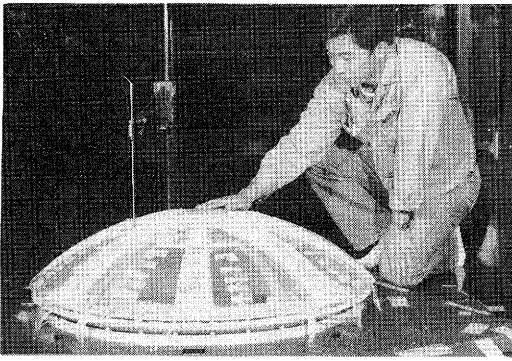


写真6 模型の設置状況 (大阪南港多目的集会場)

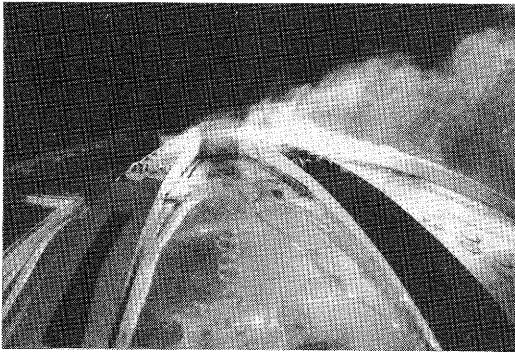


写真7 モニターから排出される煙

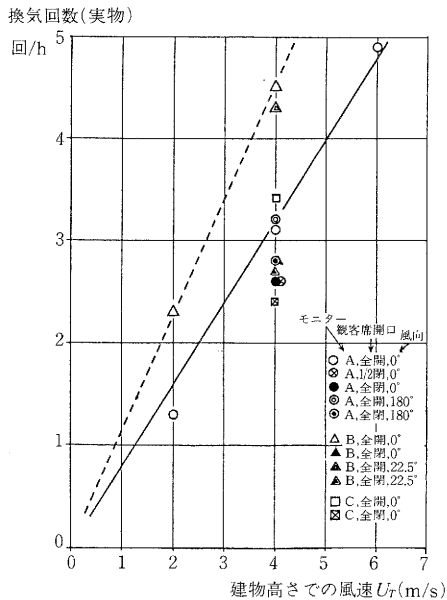


図16 換気回数と風速の関係

図16が実験結果であり、モニターBが最もよい結果を示しており、頂部風速4 m/sで4回以上の換気回数が得られている。モニターから排出される煙の状況を可視化

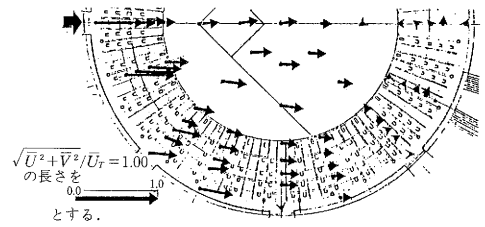


図17 屋根開口部が閉  
〔観客席およびグランド上2mにおける  
風速 ( $\sqrt{U^2 + V^2}/U_r$ ) 分布, 風向0°の場合〕

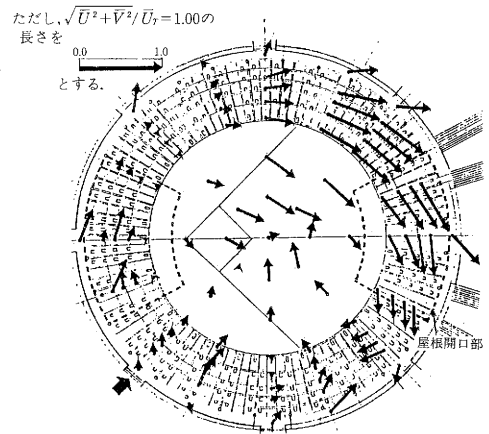


図18 屋根開口部が開  
〔観客席およびグランド上2mにおける  
風速 ( $\sqrt{U^2 + V^2}/U_r$ ) 分布, 風向45°の場合〕

により写真7に示す。

この計画では、屋根の一部を開放することが検討された。屋根開口を設ける場合と設けない場合の風速ベクトルをそれぞれ図17、図18に示す。開口を設けた場合、図18に示すように球場内に複雑な旋回流に似た強風の発生することがわかり、この案は直ちに取りやめに至った。

### 3. 温度差換気の卓越した大空間の模型実験例

#### 3.1 ノリタケドーム (計画案) の場合<sup>9,10)</sup>

対象建物は昭和55年当時、名古屋で計画されていた通称ノリタケドームである。諸般の事情により、関係各位の努力も空しく残念ながら実現には至らなかった。

(1) 模型 縮率1/100. 外観を写真8、平面、断面を図19、20に示す。

(2) 発生熱 内部発熱 $Q_m$ は人体と照明、 $Q_f = 2.7 \times 10^6$  (kcal/h). 発熱はニクロム線による。夜間を想定して日射は考えない。ヒーター裏面は断熱、発熱体表面はアルミ輝面仕上げ。

(3) 実験結果

①温度上昇 $\Delta\theta_m$ の測定 (図21) 図21の左半分は模型実験の測定値 $\Delta\theta_m$ そのもの、右半分が換算された実物の値



$\Delta\theta_f = \Delta\theta_m/n_v$ . 左側の 4 段の数字の組は、発熱量  $Q$  の縮率と長さ  $l$  の縮率との比  $\xi (n_v/n_e = \xi)$  の値の変化に対応する実験結果であり、模型実験において  $\xi$  の値が種々変わっても実物に換算された  $\Delta\theta_f$  はほぼ同じ値を示す。

②風速  $U_m$  の測定 (図22) 測定場所はモニター通過部。図23の②の位置。  $\xi = 1 \times 10^{-3}$  の場合は、 $n_v = 0.1$  で  $U_m$  が極端に小さな値になるので除外した。換算された  $U_f$  は良い一致を示す。  $\Delta\theta$ ,  $U$  について  $\xi$  を任意に選んでも、換算された実物の値に差のないことが確認された。

③換気回数の推定 図22の頂部風速  $U_f$  から実物の換気量を推定すれば、 $V_f = U_f \times (\text{モニター開口}) \times 3600 = 2.5 \times 10^6 (\text{m}^3/\text{h})$ . 一方実物の内容積は  $1.2 \times 10^6 \text{m}^3$ . したがって換気回数は約 2 回と推定される。

#### 4. 通風と循環気流用ファンを利用した 大空間の環境調整に関する模型実験

##### 4.1 パルセロナ体育館の場合<sup>(1)</sup>

###### (1) 環境計画の基本

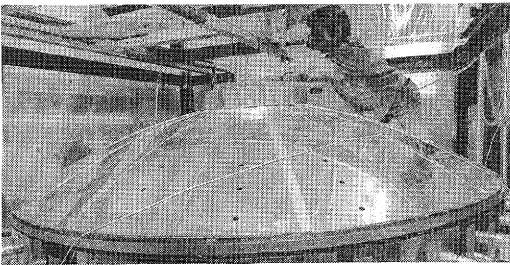


写真 8 模型外観 (縮尺1/100) (ノリタケドーム)

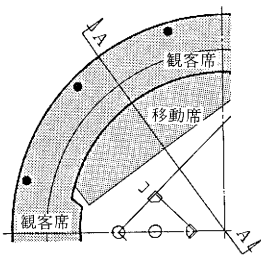


図19 平面図 (円形であるから1/4のみを示す)

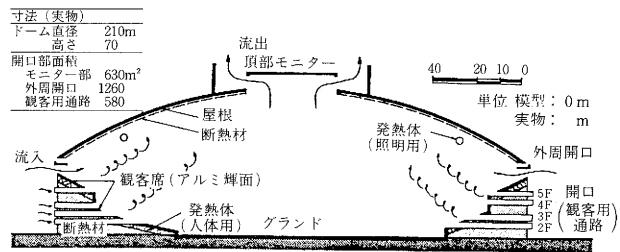


図20 A-A断面図

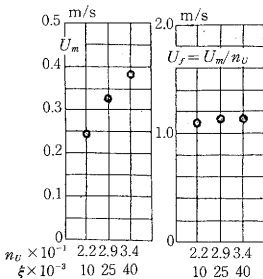


図22  $\xi$  の変化による  $U$  の変化

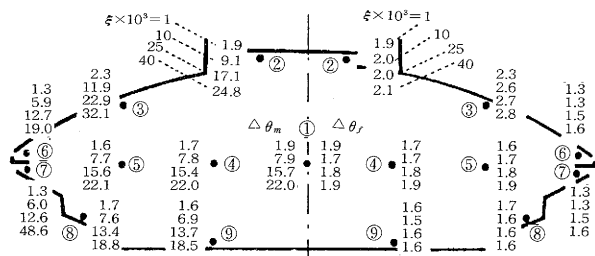


図21  $\Delta\theta$  の分布 左: 測定値  $\Delta\theta_m$  右: 換算値  $\Delta\theta_f$

1992年に開催予定のパルセロナオリンピックのための体育館の計画であり、建築設計は磯崎新アトリエ、設備、環境の設計は早稲田大学尾島研究室である。

ここでは、1/100の模型を利用した簡易風洞実験により、通風および天井に設置した循環気流用ファンによる屋内の気流分布を明らかにし、このような通風・気流循環環境調整手法の有効性を検討する。

###### (2) 対象建物

図23に対象建物の概要を示す。東西方向112m、南北方向134m、高さ48mの屋内総合体育館であり、収容人員は最大17,000人である。3階客席の外周に沿って通風の窓開口が設置されている。また、コーナーの4ヶ所に循環流を生じさせる天井吊下型の大型軸流ファン(1ヶ所につき口径1.5mのファンが2台、吹出風量は2台で100,000m<sup>3</sup>/h)が設置されている。

###### (3) 模型

1/100のスケールの模型を使用する。風洞内に模型を設置した状況を写真9に示す。

###### (4) 実験結果

###### ①循環気流用ファン吹出高さの風速

図24に示すように循環気流用ファンから吹き出された気流は3階客席に沿って循環しており、3階客席の風速はかなり高く十分な可感気流が得られている。3階客席以外のところでは風速が非常に遅い。このことは循環気流用ファンが3階客席の空気環境の改善に非常に効果的であることを示している。また、通風を併用した場合に、多くの測定点で風速が遅くなる。

## ②可視化による屋内の風速分布

循環気流用ファンのみを運転した場合の風速分布について可視化実験を行った。その結果を図23に示す。循環気流用ファンによって3階客席部分に大きな循環流が生じている様子が観察され、循環気流用ファンを運転することは3階客席部分に可感気流をあたえ、温熱空気環境の改善に効果的であると考えられる。



写真9 風洞内部に設置された模型  
(バルセロナオリンピックドーム)

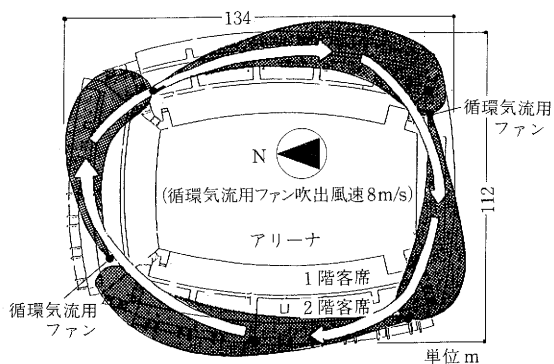


図23 循環気流用ファン吹出噴流と循環流の性状

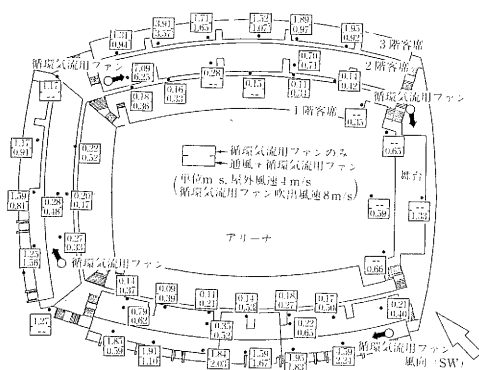


図24 循環気流用ファン吹出高さの風速

## III ま と め

大空間の室内気候に関する模型実験における相似則について解説し、実験例を紹介した。室内環境形成にあずかる代表的な物理量は、室内気候の調整方法の違いにより、実物において既知となるか未知となるかが異なってくる。実験では、必要とされる相似条件を既知である物理量を用いて、無次元数としていかに設定するかが、物理現象の再現のうえで重要となる。しかし、相似条件は必ずしもすべてが満足されるわけではない。そこにある程度の緩和が施されることは免れない<sup>12,13)</sup>。実験の実施、および結果の解釈に際しては、誤った判断に陥ることのないよう相似条件の設定と緩和の及ぼす意味を明確にしておくことが重要である。

一方、大空間の計画、実施例が増えて実験例が蓄積される反面、実物における検証はいまだ不十分で、模型実験精度の確認例は数少なく、実験手法に関する進展が見られないのが実情である。

乱流数値シミュレーションによる予測手法が実用化レベルに近づきつつある現在、その検証データを提供し、相互の技術向上を望む意味でも、実験手法に関する工学的に有効な緩和方法の開発が望まれる。

(1988年9月22日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 勝田, 土屋「室内空気分布の模型実験法に関する研究」, 空気調和・衛生学会論文集, No. 17, 1981. 10
- 2) 前田, 石黒「強制換気のある室の熱対流の近似相似則」, 日本建築学会論文報告集, 第63号, 昭34
- 3) 村上, 加藤「大空間の温熱空気環境に関する模型実験と実物実測の比較」生産研究, 第39巻, 第9号
- 4) 村上, 加藤, 中川, 孔「スロット吹出空調による屋内体育館の温熱空気環境に関する模型実験(その1, 2)」日本建築学会大会学術講演, 昭62
- 5) 村上, 加藤, 高橋, 大和田「大空間の自然換気に関する研究(その1, 2)」, 日本建築学会関東支部研究報告集, 昭61
- 6) 村上, 加藤, 高橋, 大和田「大空間の自然換気に関する研究(その3, 4)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭61
- 7) 村上, 高橋「多目的集会場(屋根付野球場)の屋内空気環境に関する風洞模型実験(その1, 2)」, 日本建築学会関東支部研究報告集, 昭56
- 8) 高橋, 村上「大型ドーム内部の換気回数に関する風洞模型実験」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭56
- 9) 高橋, 村上, 田中「屋根付野球場の温熱空気環境に関する模型実験」, 日本建築学会関東支部研究報告集, 昭56
- 10) 村上, 高橋「熱対流による自然換気に関する模型実験」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭55
- 11) 村上, 赤林「通風と循環気流用ファンを利用した屋内体育館の環境調整方法に関する風洞模型実験」, 日本建築学会関東支部研究報告集, 昭60
- 12) 村上, 加藤, 孔, 中川「大架構建築内の温熱・空気環境に関する研究」生産研究, 第39巻, 第9号
- 13) S. KATO, S. MURAKAMI, C.N. KONG AND H. NAKAGAWA「MODEL EXPERIMENT ON INDOOR CLIMATE AND SPACE AIR DISTRIBUTION IN LARGE SCALE ROOM」INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SCALE MODELING 1988