

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

—15,000人収容可能なスポーツホールに関するケーススタディ—

Comparison between model Experiment and Field Measurement Concerning Indoor Climate in Large Space

—Case Study of 15,000 seating capacity Sport Hall—

村上 周三*・加藤 信介*

Shuzo MURAKAMI and Shinsuke KATO

1. はじめに

15,000人の収容可能な大規模スポーツホール¹⁾を対象とし、冷暖房時の室内温熱空気環境を模型実験により検討する。⁴⁾また、建物完成後に測定された室内温熱環境実測結果²⁾と、模型実験結果の対応を検討する。

2. スポーツホール

図-1に実験対象空間を示す。10,000人収容の固定観客席のほか、アリーナ部にも約5,000人収容できる。図-2、図-3に暖房時、冷房時の空調システムを示す。空調は、客席天井の吹出口(直径250φのノズル)から冷温風を、前部客席床の吹出口から温風を供給して行く。還気はアリーナ床外縁の吸込口より行く。

3. 模型実験概要

3.1 相似則

実物と模型実験との対応は、速度、長さ、温度差のそれぞれの代表量($U_0, L_0, \Delta T_0$)で無次元化した平均流の運動方程式およびエネルギー方程式((1)~(3)式、テンソル表示)で記述される無次元速度および温度が、実物と模型で同一であれば良い。

$$\partial U_i^*/\partial x_j^* = 0 \quad (1)$$

$$\partial U_i^*/\partial t^* + U_j^* \partial U_i^*/\partial x_j^* = -\partial p^*/\partial x_i^* + \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left\{ \frac{1}{Ret} \left(\frac{\partial U_i^*}{\partial x_j^*} + \frac{\partial U_j^*}{\partial x_i^*} \right) \right\} - Ar \cdot \Delta T^* \delta_{i3} \quad (2)$$

$$\partial \Delta T^*/\partial t^* + U_j^* \partial \Delta T^*/\partial x_j^* = \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left(\frac{1}{Ret} \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \Delta T^*}{\partial x_j^*} \right) \quad (3)$$

ただし*は無次元量を表す($U^* = U/U_0$ 等々)。

$$Ar = \Delta T_0 g \beta L_0 / U_0^2 \quad (\text{アルキメデス数})$$

$$Ret = U_0 L_0 / \nu_i \quad (\text{乱流レイノルズ数})$$

このためには①(1)~(3)式中の Ar, Ret のパラメーターが実物と模型で一致し、②各境界条件が実物と模型で一致することが必要となる。 Ret, σ は実物、模型とも十分発達した乱流であれば、自動的に一致すると考えられる^{1)~3)}、模型実験では、 Ar 数の一致のみを考慮する。

* 東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

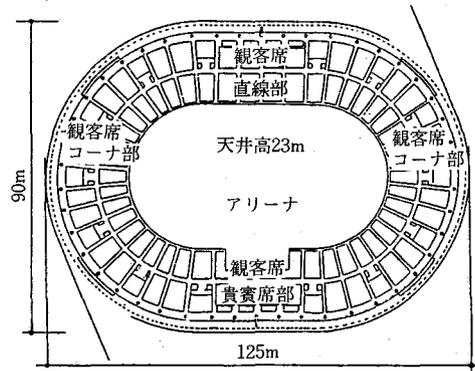


図1 スポーツホール平面図

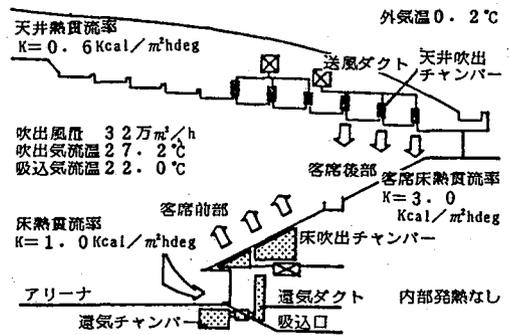


図2 暖房時の空調設定条件

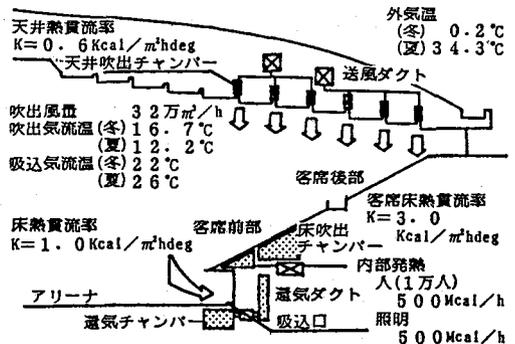


図3 冷房時の空調設定条件



写真1 スポーツホール室内模型(1/50) (一部天井をはずす)



写真2 気流の可視化 (コーナ部暖房時)

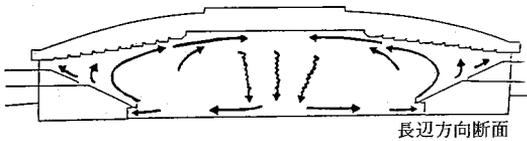


図5 模型実験暖房時の気流循環スケッチ

$$\left(\frac{g\beta\Delta T_0 L_0}{U_0^2}\right)_{\text{model}} = \left(\frac{g\beta\Delta T_0 L_0}{U_0^2}\right)_{\text{prototype}} \quad (4)$$

速度境界条件は、模型と実物の幾何学的相似により自動的に一致し、温度と熱流の境界条件のみを考慮する。

$$1 = \frac{L_0^3(\theta_0 - \theta_R)/R}{C_{PY}L_0^3 U_0(\theta_R - \theta_S)} + \frac{W_H}{C_{PY}L_0^3 U_0(\theta_R - \theta_S)} \quad (5)$$

(5)式は熱流の保存から、吹出口からの空調投入熱量 $(C_{PY}L_0^3 U_0(\theta_R - \theta_S))$ が、内部負荷 (W_H) と貫流熱量の $(L_0^3(\theta_0 - \theta_R)/R)$ 合計と等しいことを意味する。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。

$$\frac{W_H \text{ model}}{W_H \text{ prototype}} = \frac{\{C_{PY}L_0^3 \cdot U_0(\theta_R - \theta_S)\} \text{ model}}{\{C_{PY}L_0^3 \cdot U_0(\theta_R - \theta_S)\} \text{ prototype}} \quad (6)$$

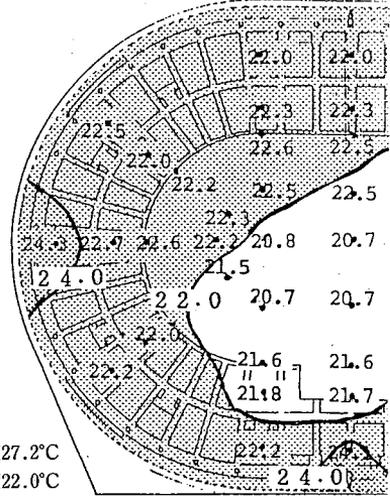
$$\frac{\{L_0^3(\theta_0 - \theta_R)/R\} \text{ model}}{\{L_0^3(\theta_0 - \theta_R)/R\} \text{ prototype}} = \frac{\{C_{PY}L_0^3 \cdot U_0(\theta_R - \theta_S)\} \text{ model}}{\{C_{PY}L_0^3 \cdot U_0(\theta_R - \theta_S)\} \text{ prototype}} \quad (7)$$

(4), (6), (7)の関係より実物と模型の相似条件は、幾何縮尺 n_L 、速度の縮率 n_v 、温度差の縮率 n_θ (n_{θ_1} : 吹出温と室内平均温度差の縮率, n_{θ_2} : 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。

$$n_u^2 = n_\theta \cdot n_L \quad (8)$$

$$n_{W_H} = n_\theta^2 \cdot n_u \cdot n_{\theta_1} \quad (9)$$

$$n_{\theta_2} = n_\theta \cdot n_R \cdot n_u \quad (10)$$



吹出温度27.2°C
吸込温度22.0°C

図4 模型実験暖房時水平温度分布 (床上1m)

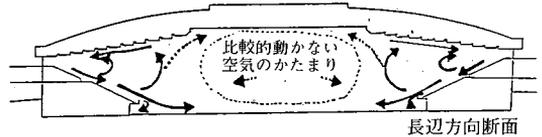


図6 模型実験冷房時の気流循環スケッチ

与条件 (実物の室内温度 θ_R を既知とするか否か) により (8), (9) 式の 2 式または (8), (9), (10) 式の 3 式を連立させて模型実験を行う。

3.2 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のシミュレートは、人体発熱に関し観客席床面に設置したヒーターにより、照明発熱に関し天井面近くに設置した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。

3.3 測 定

実験は、実物の室内平均温度 (実際には吸込気流温) を想定し、その室内温度分布を求めることを主目的とし、相似条件 (8), (9) 式を満足するよう行った。^{※3)} ただし、今回の模型実験では、吹出気流の Re 数は小さく必ずしも室内は十分乱れていない実験となっている。

温度は T 熱電対 (C-C) を用いて測定。また、煙トレーサーにより室内全体の流れを可視化観察した。

4. 実 測 概 要^{※2)}

建物竣工後、冷房、暖房時の室内温度分布を測定。ただし、観客による内部発熱はない。また、気象条件も、模型実験で想定した最大負荷を与える条件とは異なる。

研 究 速 報

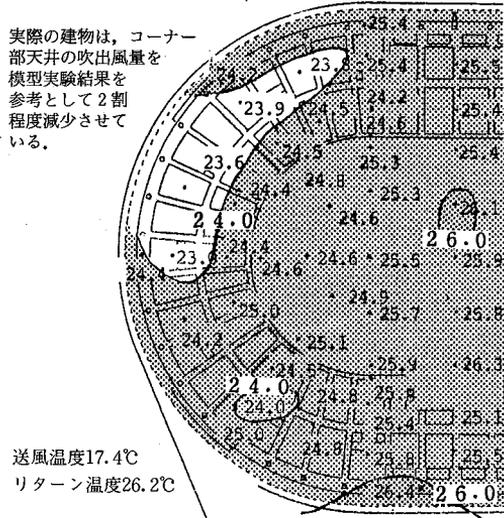


図7 実測冷房時水平温度分布 (床土1m)^{注2)}

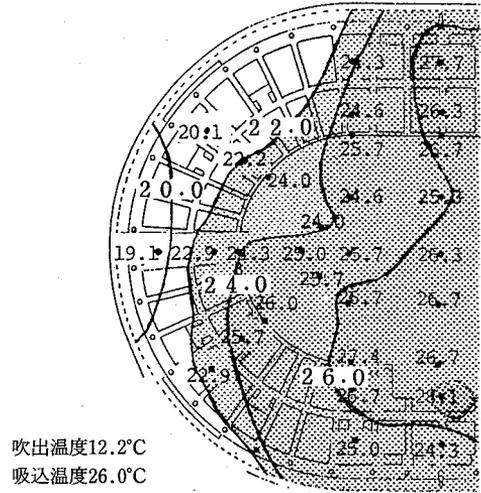


図8 模型実験冷房時水平温度分布 (床土1m)

5. 実測および模型実験結果

模型実験結果はすべて実物の値に換算して示す。ただし、模型実験結果は室内気流が十分乱れていない可能性があること、および実測値は模型実験で想定した条件とは多少異なること等のため、模型実験結果と実測値との直接的な比較よりは、全般的傾向を比較する。

5.1 暖 房

図-2に示す暖房条件をシミュレートして得られた模型実験結果を図-4に示す。写真-2には、室内気流の可視化の例を、図-5にはこうした可視化により観察した室内気流の循環の様子を示す。暖房時、客席前部から吹き出された温風は客席に沿って客席後部まで上昇し、向きを変え天井面に沿ってアリーナ中央に向かう。アリーナ中央部では、ゆるやかな下降流が観察される。これに対応し室内温は、アリーナ、客席前部、後部の順に温度が高くなっており客席後部が効率良く暖房される。本模型実験に直接対応する実測はないが、床吹出あるいは天井吹出のみで暖房を行った実測結果は、いずれも、この順に温度が高くなる傾向を示す。

5.2 冷 房 (夏期冷房)

図-3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-6、図-8に示す。図-7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対策を行ったもの

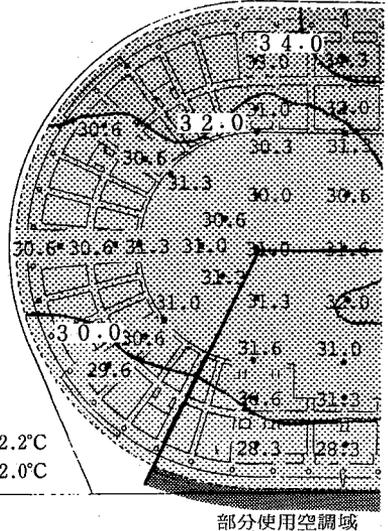


図9 模型実験部分冷房時 (貴賓席部) の水平温度分布 (床土1m)

同様に観察され、良い対応を示す。^{注2)}

5.3 部分冷房 (夏期冷房)

左コーナ部、あるいは直線部 (貴賓席部) のみを部分冷房した場合の模型実験結果、実測結果を図-9～図-11に示す。なお模型実験では実物の室内平均温度を想定することが難しいため簡便のため以下の手順で換算を行う。①全館使用の条件で実験を行う。②各縮率を同一として部分使用の条件に切換え実験を行う。③全体使用の条件により実物換算する。

部分使用時は、全体の1/4部分しか空調しないため、空調域、非空調域ともに温度が上昇する。また、貴賓席

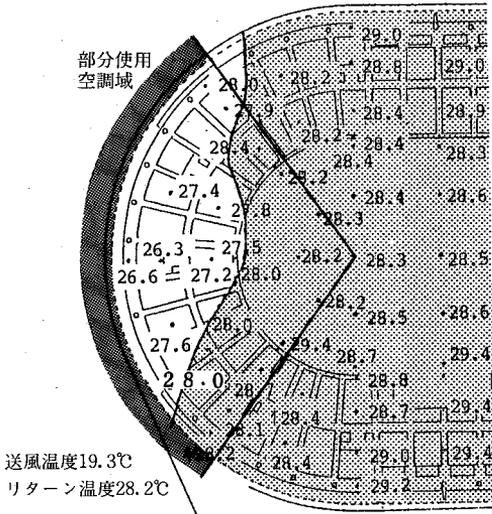


図10 実測部分冷房時(左コーナー部)の水平温度分布(床上1m)

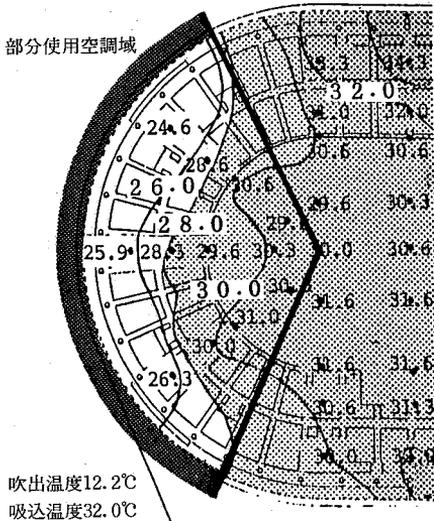


図11 模型実験部分冷房時(左コーナー部)の水平温度分布(床上1m)

部の1/4使用に比べコーナー部使用の場合の方が効果的に冷房される傾向を示す。この傾向は、模型実験のみならず実測でも観察され極めて良い対応を示す。

6. 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。

記 号 表

- U_j^* : j 方向の無次元風速 $U_j^* = U_j / U_0$
- U_0 : 代表風速 (ここでは吹出口風速) (m/s)
- ΔT^* : 無次元温度差 $\Delta T^* = \Delta T / \Delta T_0$
- ΔT_0 : 代表温度差 (ここでは吹出口温度と室内平均温度(吸込口温度で代用)の差)
- L_0 : 代表長さ (ここでは室内の天井高) (m)
- σ : 乱流プラントル数
- ν_t : 渦動粘性係数 (m²/s)
- Ret : 乱流レイノルズ数 $Ret = U_0 L_0 / \nu_t$
- Ar : アルキメデス数 $Ar = \Delta T_0 g \beta L_0 / U_0^2$
- g, β : 重力加速度 (m/s²), 空気膨張率 (1/°C)
- γ, C_p : 空気密度 (kg/m³), 空気比熱 (kcal/kg)
- $\theta_s, \theta_R, \theta_0$: それぞれ吹出, 室内平均, 外気温度 (°C)
- R : 建物の熱貫流抵抗 (m²·s·°C/kcal)
- W_H : 内部発熱 (kcal/s)
- n_i, n_o, n_a, n_{wH} : それぞれ長さ, 風速, 温度, 内部発熱に関する模型縮率

謝 辞

模型実験に際し、大阪市開発公社、安井善次氏、大阪日建設計牧英二氏、関伸二氏、大高一博氏、大気社喜岡芳郎氏、斎藤正信氏らのご協力を得た。また、東大生研技官高橋岳生氏、東大大学院生赤林伸一氏のご協力も得ている。なお、関伸二氏、大高一博氏からは、竣工後の実測データの提供をも得ている。記して感謝します。

(1984年7月25日受理)

注1) 大阪城国際文化スポーツホール 昭和58年10月竣工 建築面積14,250m², 延床面積30,679m², ホール内アリーナ面積約3,500m², アリーナ部天井高約23m, ホール気積約115,000m³, 空調調和吹出風量320,000m³/h

注2) 実測は、(株)日建設計が実施。冷房実測期間 昭和58年8月27日~8月29日, 暖房実測期間 昭和59年1月31日~2月1日なお実際の建物は、コーナー部天井の吹出風量を模型実験結果を参考として2割程度減少させている。

注3) 実物の室内平均温度(または吸込気流温度)を未知として実験を行う際は、(10)式も連立させる必要が生ずる。

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, 1, 2, 3, 空調調和衛生工学会論文集 No. 17, 1981, 10
- 2) 勝田, 村上, 小林, 戸河里: 温風暖房時の室内気流変動ならびに温度分布に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) 昭和48年10月
- 3) 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(近畿) 昭和55年9月
- 4) 加藤, 村上: 大規模空間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 昭和58年7月