

某大礼拝堂空気分布に関する模型実験

宮川保之

Model Experiments of Room Air Distribution of a Large Hall

Yasuyuki Miyakawa

Abstract

Scale model experiments would be the most reliable means of predicting room air distributions and warmth conditions in large spaces of complex shapes. In designing the air conditioning system of a large hall (72 m×60 m in plan, maximum ceiling height 23 m), there was an opportunity to carry out model experiments (scale factor: 1/20) in order to obtain detailed data. Useful information was obtained on room air distribution, room temperature distribution, rate of heat removal by exhaust system in ceiling, cold drafts due to open condition of entrance doors during heating, and predictions of thermal loads of the space.

概要

形状複雑な大空間建物内の詳細な空気分布、温熱環境を設計段階で予測するためには種々の方法があるが、現在のところ縮尺模型実験による方法が最も確実である。今回、某大礼拝堂（平面 72 m×60 m；最高天井高さ 23 m）の空調計画にあたり、あらかじめ詳細な設計資料を得るために、1/20の縮尺模型を製作し一連の模型実験を行なった。実験項目としては室内空気分布、室温分布、天井面排気システムによる熱除去率、正面入口開放状態における暖房時の冷気の侵入状況、建物熱負荷の予測等であり、それぞれについて有益な知見が得られた。

1. はじめに

大空間建物の空調設計に際してはいわゆる床から数mまでの居住域の適正な空気分布を保障し空調設備機器容量および運転費の経済化を計るのが一般的である。このためには設計段階で各種の吹出し方式に対する建物内の空気分布、室温分布を把握することにより適正なシステム設計がなされなければならない。また正確な室温分布を基にした冷暖房負荷の算定も必要となる。この熱負荷計算が正確に行なわれない限りは、ともすれば安全を見て過大な設備機器を選定することになる。

建物内の空気分布、室温分布を予測するためにはいくつかの手法が考えられ特に大空間の室温分布の実用的予測法に関しては当社では独自の計算プログラムを保有している。しかしながら形状が複雑である大空間の三次元的な詳細な空気分布、室温分布を予測するためには現在のところ縮尺模型実験による方法が最も確実であると思われる。

今回、某大礼拝堂の空調計画にあたって以上のような観点から 1/20 の縮尺模型を製作し、室内の空気分布、室温分布を中心として各種の検討を行なったので報告する。

2. 室内空気分布模型実験における近似相似則

2.1. 室内 2 点間の相似則

非等温吹出し時における室内は壁面付近の境界層を除けば乱流域とみなすことができる。室内乱流域の場に大きな影響を及ぼす渦動粘性係数 K が室の縮尺に比例すると仮定すれば室内空気の表面付近を除く 2 点間の温度差に対しては相似則が成立することがかなり以前から報告されており、またこの渦動粘性係数 K の性状に関しても $K \propto U \cdot L$ (U : 速度, L : 長さ) なる関係があることが実験的にも確かめられている。室内空気分布の相似条件としては流体の基礎方程式を無次元化して得られる乱れのレイノルズ数 $Re (= UL/K)$, 乱れのペクレ数 $Pe (= U \cdot L/a)$, アルキメデス数 $Ar (= g \cdot \beta \cdot \theta \cdot L/U^2)$ を一致させ

ることになるが前述の関係式 $K \propto U \cdot L$ および $a \propto U \cdot L$ より Re , Pe は一定となりアルキメデス数のみを一致させれば良いことになる。

(a : 渦動温度伝導率, θ : 温度差, g : 重力加速度, β : 体膨張係数)

いま模型の实物に対する縮率を n とするとアルキメデス数の一致の条件から次式が導かれる。

$$n_L \cdot n_\theta / n_U^2 = 1 \quad \dots\dots\dots(1)$$

熱量の相似則に関しては発熱面での熱平衡式より次式が導かれる。ただし Q は発熱量である。

$$n_Q = n_U \cdot n_\theta \cdot n_L^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

2.2. 外気温基準の相似則

前出の室内2点間の相似則を用いる実験においては模型の周壁熱抵抗 (r) の相似条件は特に考慮する必要はないが、外気温基準の模型実験においては当然のことながら模型壁の相似条件が必要となる。勝田, 土屋は模型壁の相似条件として式(3)を提案しているが、 n_α , すなわち模型と実物の熱伝達率 α を正しく推定できないので実際の実験は困難であるとしている。

$$n_r = \frac{n_\alpha}{n_U} \left(\frac{1}{\alpha_M \cdot r_N} + n_\alpha^{-1} \right) - \frac{1}{\alpha_M \cdot r_N} \quad \dots\dots\dots(3)$$

今回の実験においては模型の相似条件に基づく実験法とは異なる外気温基準の新しい模型実験法を検討したので後の4.5.において詳述する。

3. 実験模型

模型は実際の建物の室内側の形状を相似にすることを前提として1/20の縮尺で製作した。ただし模型を設置する実験室の大きさの制約から図-3に示すように3階席

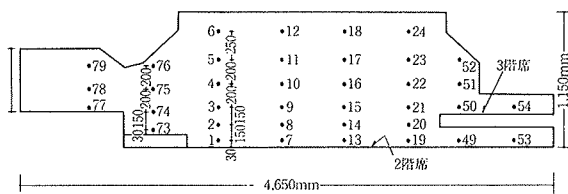


図-1 模型 A-A' 断面および室温測定点

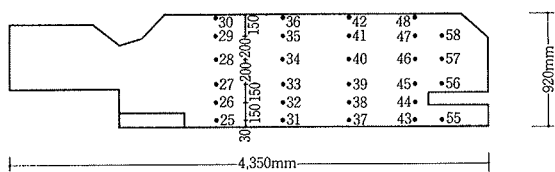


図-2 模型 B-B' 断面および室温測定点

の端部を部分的に割愛した。この程度の省略は大空間の空気分布にはほとんど影響を与えないものと思われる。模型はベニヤで製作し、吹出し口・吸込口とも完全な形で再現した。人間, 照明等の発熱は電気式膜ヒーターで再現するとともに輻射熱移動を防止するためヒーターの上からアルミシートで被覆した。各部の温度測定は熱電対により行なうものとし所定の位置に設置した。模型の断面を図-1, 図-2に, また平面を図-3に示す。室温測定位置も図-1~図-3に示している。また模型の内部状況を写真-1~写真-3に示す。なお空調されている廊下等に接する模型周壁には熱の流入を防止するために完全に断熱した。

4. 実験結果

実験は大津組技術研究所内の気流実験室において行なった。今回の実験のうち4.1.~4.3.に関してはすべて室内2点間の相似則に基づいて行なうこととしたため、得られる室温分布は居住域代表点を設計温度(冷房時26℃, 暖房時20℃)にした場合の相対的な室温分布を表わすことになる。実験時における温度縮率 n_θ は1.0としたため熱量, 空気速度の縮率は次のようになった。

$$\left. \begin{aligned} n_\theta &= n_U \cdot n_L^2 = n_L^{5/2} \\ n_U &= n_L^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(4)$$

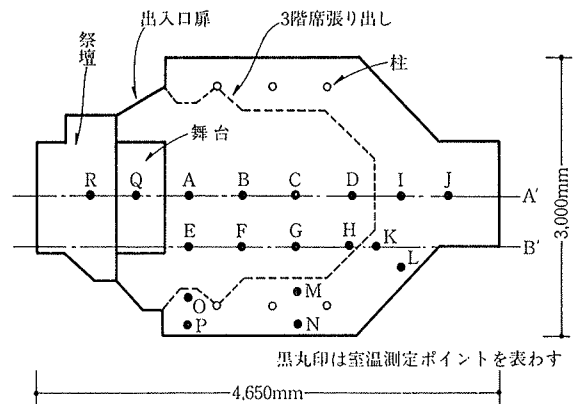


図-3 模型平面および室温測定ポイント

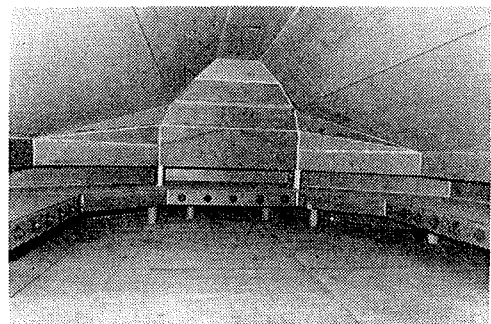


写真-1 模型内部状況(内部木工事完了)

4.1. 室温分布

4.1.1. 冷房時における室温分布 図-4, 図-5に在住人員12,000人の場合において天井頂部の排気がない場合と全吹出風量の10%の排気を行なった場合の室温分布を示す。本建物では天井面が直接外気に接しておらず、また照明発熱も 30 W/m^2 と比較的小さい値に設定されているため上下室温分布はほぼ均一となった。

天井面での発熱が増大すれば図-6に示すように上下の室温差は大きくなる。また水平方向の室温分布もほぼ均一となっており良好な状態が実現されている。2階席周辺部の室温は中央部に比較して低目になっているがこれは熱電対の受感部が吹出噴流中に置かれていたためと思われる。

4.1.2. 暖房時における室温分布 暖房時における室温分布の特性を検討するための次の4ケースについて実験を行なった。

- 人員0, 床パネルヒーティングなし
- 人員0, 床パネルヒーティングあり
- 人員12,000人, 床パネルヒーティングなし
- 人員12,000人, 床パネルヒーティングあり

実験より得られた4ケースの上下室温分布を図-7に示す。また A-A' 断面における室温分布の例を図-8に示す。

4.2. 空気速度分布

空調時における室内空気速度分布を図-9に示す。居住域においてはいずれも 0.5 m/s 以下になっており良好な分布が得られている。

4.3. 2, 3階正面入口開放による暖房時室温の低下

本建物においては入場開始時から入場完了時までは2, 3階正面入口はすべて開放される。このための冬期の暖房時には居住域に冷気が一時的ではあるが侵入する。この冷気の侵入の影響を実験から検討した結果が図-10である。室内 20°C , 外気温 0°C , 外部は無風状態の条件下である。図中の各ポイントは図-3に示したポイントと

同じである。図より入口付近から室内中央部までの床面付近の室温は相当に低下し、大きいところでは 3.5°C も低下している。しかし床面付近の居住域でも室内の中央付近までくると在住する人間の発熱とパネルヒーティングの効果で冷気の侵入はとまり室温の低下もほとんど見られない。このように入場、退場時の入口開放による室内環境の乱れは過度状態であることを考慮すればやむを得ないと思われる。しかしながらこの時間帯でも冷気の侵入を防止する必要がある場合には出入口付近に完全なエアカーテンの設置が望まれる。

4.4. 天井面部分排気システムによる熱除去率

大空間においては上部に停滞する煙、水蒸気を除去する上で天井面で部分排気を行なう必要がある。天井面で排気を行なうと上部空間で発生する熱が拡散する前に一部が短絡して外部に除去される。この場合の熱除去率 ϕ を天井面での発熱量、排気風量を変化させて測定した結果が図-11である。天井面部分排気方式は今回の建物のように天井付近での発熱が照明器具のような内部発熱が主の場合には有利であるが、天井付近での発熱の大部分が外部からの貫流熱である場合には、室温低下により貫流熱自体は増大するため設計に際しては十分な検討が必要である。

4.5. 熱負荷予測のための外気温基準模型実験法の提案

ここで提案する方法は外気温基準の室温分布およびこれに伴う壁体流出入熱量、除去(供給)熱量を計算と模型実験とを併用しながら反復的に収束計算するものであり、従来からの模型壁に関する相似条件を基にした実験法とは異なるものがある。すなわち模型を一種のシミュレータとして用いる実験手法である。

いま居住域代表点の室温を既知とする場合について考える。室内相互輻射は Gebhart の吸収係数等を用いれば容易に計算できる。それ故、実物の各壁面の対流熱伝達率 $\alpha_{c,N}$ を決定した上で未知の室温(例えば非空調の大空間温度) $\theta_{u,N}$ を仮定すれば各壁面での熱平衡式を多

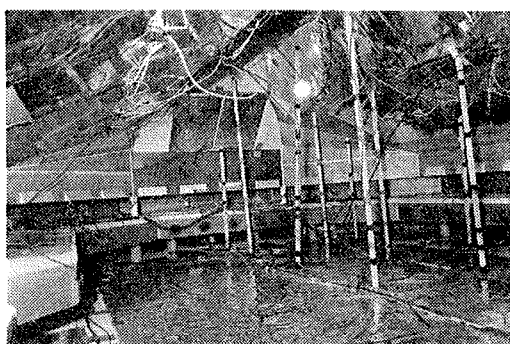


写真-2 模型内部状況(電気膜ヒーターの上からアルミシートを被覆)

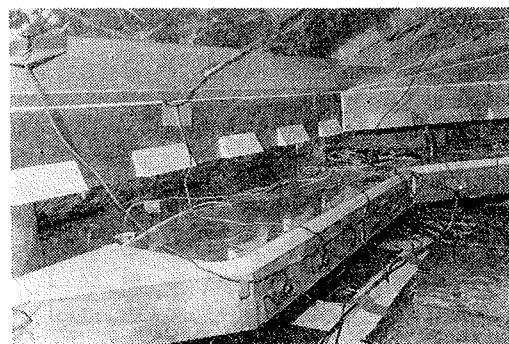


写真-3 模型内部状況(3階席と吹出口詳細)

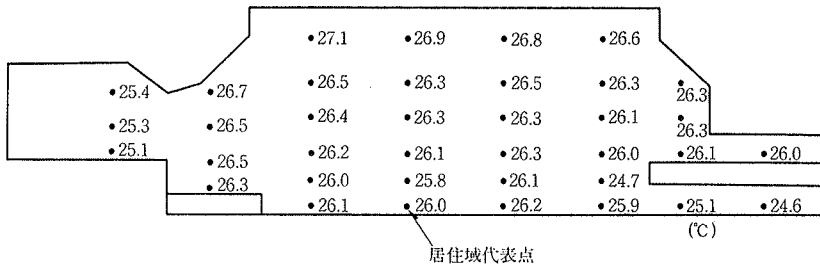


図-4 冷房時室温分布 (在住人員 12,000人, 天井面排気 0%, A-A' 断面)

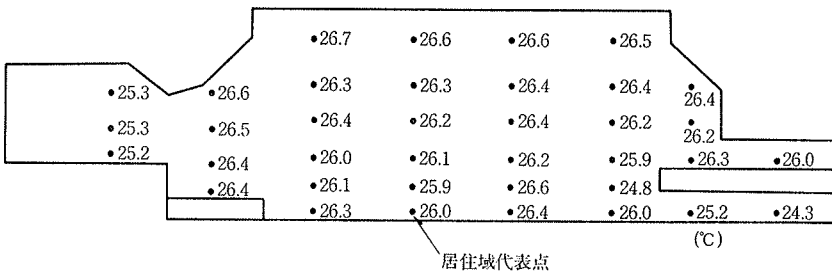


図-5 冷房時室温分布 (在住人員 12,000人, 天井面排気 10%, A-A' 断面)

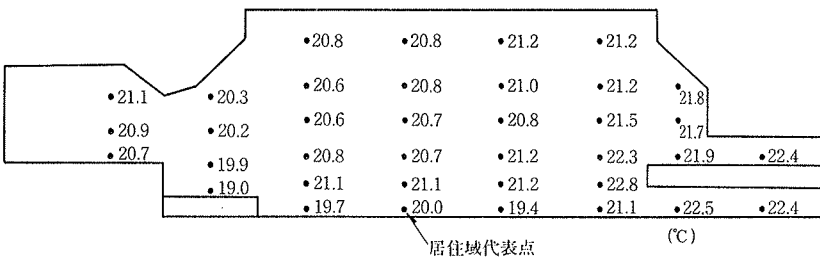


図-8 暖房時室温分布 (在住人員なし, 床パネルヒーティングあり, A-A' 断面)

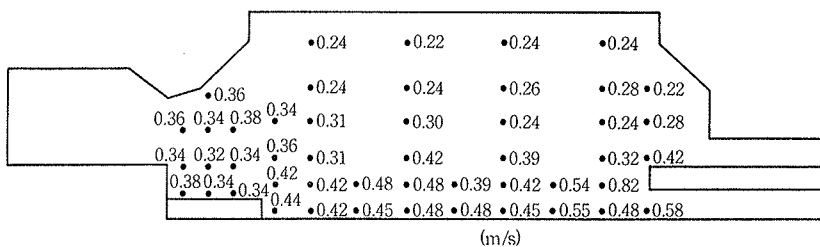


図-9 室内空気速度分布 (冷房時, A-A' 断面)

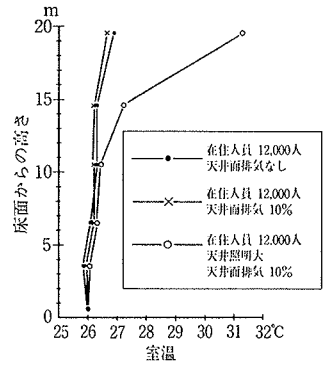


図-6 冷房時各ケースにおける上下室温分布 (測定ポイントB)

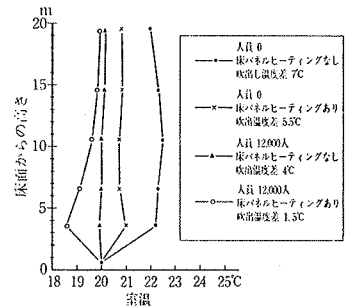


図-7 暖房時各ケースにおける上下室温分布 (測定ポイントB)

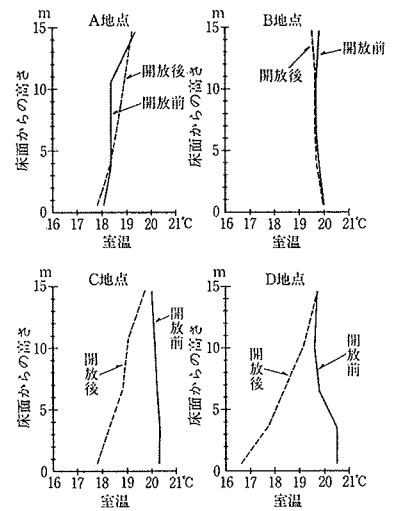


図-10 入口開放による暖房時室温の低下 (室内 20°C, 外気 0°C, 無風状態)

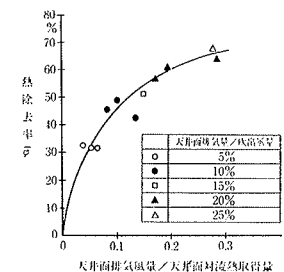


図-11 天井面部分排気システムによる熱除去率 ϕ の測定結果

元連立方程式として解くことにより各壁面と室内との対流伝達熱量 $q_{u,N}$ が計算できる。いま冷房時で $n_\theta = 1.0$ とすれば式(4)より模型壁面で加えるべき発熱量 $q_{u,M}$ が計算できる。この時、模型で測定される $\theta_{u,M}$ を仮定した $\theta_{u,N}$ と比較しつつ図-12のように実験を継続する。 $\theta_{u,M}$ が $\theta_{u,N}$ に一致した時の $\theta_{u,M}$ 、除去熱量 $q_{u,M}$ がもとめる解であり実物値に換算する。本実験では模型での $\alpha_{c,M}$ を仮定する必要がなく、逆に実験から予測することもできる。なお暖房時では外部室温、壁面発熱量を変化させながら模型外部へ流出する熱量を調整すればよい。

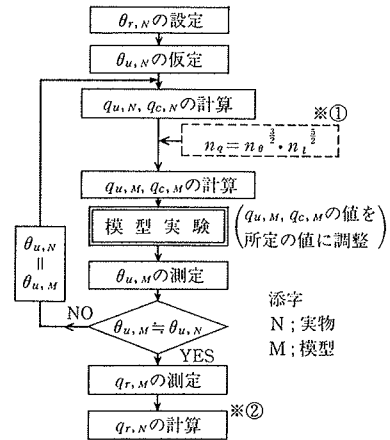
実験として図-1の断面において3階天井面吹出口より上部を非空調域、下部を空調域として上部の室温 θ_u を未知とした場合の冷暖房負荷の予測結果を図-13~図-15に示す。なお建物条件としては屋根面は直接外気に接している場合を想定している。

5. おわりに

本実験は東京本社設備設計部より委託された研究である。模型実験の実現にあたっては設備設計部の富田治課長と尾崎明弘課長の御尽力があった。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 勝田, 土屋: 室内空気分布の模型実験法について, 日本建築学会関東支部学術研究発表会梗概集, 第38回・第4部, (昭和42), pp. 89~92



※① $n_\theta = 1.0$ とする。
 ※② 同様に $n_q = n_\theta^{0.5} \cdot n_L^{0.5}$ ($n_\theta = 1.0$) より計算する。

図-12 熱負荷予測のための外気温基準模型実験法 (θ_r は既知の場合, 室温がすべて未知の場合には $\bar{\theta}_N = (\theta_u - \theta_r)$ を基準として考える)

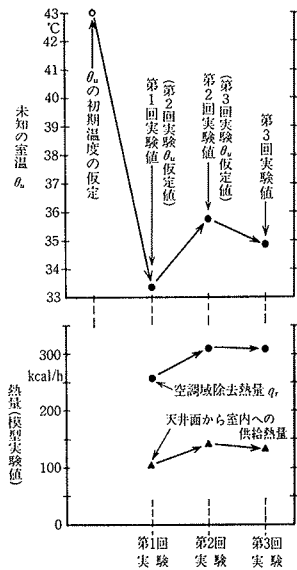


図-13 冷房負荷予測実験例 (相当外気温 68.5 °C, $\theta_r = 26^\circ\text{C}$)

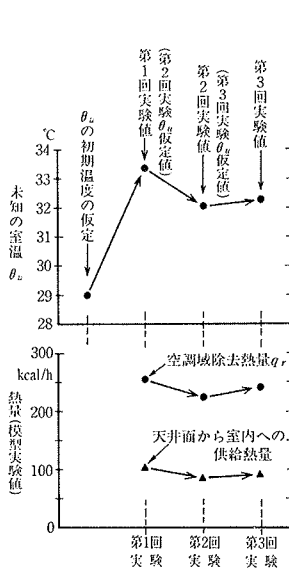


図-14 冷房負荷予測実験例 (相当外気温 55°C, $\theta_r = 26^\circ\text{C}$)

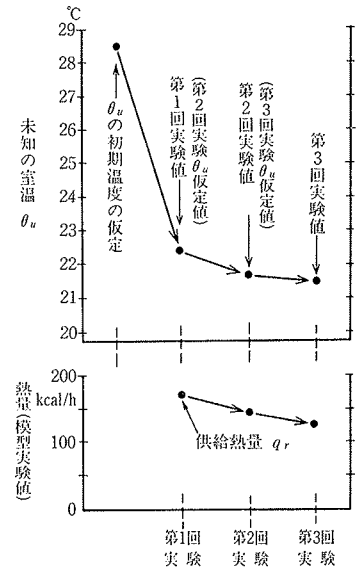


図-15 暖房負荷予測実験例 (外気温 0°C, $\theta_r = 20^\circ\text{C}$)