

大空間建築の気流分布

宮川保之

概要

最近における大空間建築の空調は、居住域のみを空調することにより空調設備の経済化をはかる方法が一般的となっている。ところで大空間建築の気流分布、温度分布を推定する方法として模型実験による解析がある。この際、基にしているのは模型と実物の吹出口におけるアルキメデス数を合わせることによって、室内空気分布を相似にさせる模型則理論である。しかし過去において模型実験による結果と実物がどの程度合致しているかを比較検討したデータは少なく模型実験の精度に関しては未知であった。幸い万博某パビリオン、某屋内競技場の模型実験と実物実測の機会にめぐまれ、これらの模型実験と実物実測との結果がどの程度合致しているかの検討を行なうと同時に、設備の経済化をはかるための居住域のみの冷暖房が満足すべき結果になっているかについて検討を行なった。

1. 模型則理論について

等温吹出実験を行なう際には、レイノルズ数（以下 R_e 数）を合わせ、模型と実物を幾何学的に相似にさえすれば吹出速度によらず、空気速度分布は相似になる。

非等温吹出の模型実験を行なう際の相似則理論については次のような理論が以前から知られている。

非等温吹出において模型の気流分布を相似にさせるためには、浮力と慣性力と重力との関係であるアルキメデス数（以下 A_r 数）を考えなければならない。この A_r 数は重力と慣性力の関係であるフルード数（以下 F_r 数）を拡大したものであり、それぞれ次式で示される。

$$R_e = u \cdot l / \nu \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$F_r = g \cdot l / u^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$A_r = g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l / u^2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに

u ; 空気速度 (m/s)

l ; 長さ (m)

ν ; 動粘性係数 (m²/s)

g ; 重力加速度 (m/s²)

Δt ; 吹出温度差 (°C)

β ; 体膨張係数 (=1/273+t) (1/°C)

いま添字を実物に対してはN、模型に対してはMとさすれば実物と模型において A_r 数を合わせなければならないので次式が成り立つ。

$$A_{rN} = A_{rM}$$

ここで長さの比 l_N/l_M を m とおくと次式が成り立つ。

$$\text{速度} \quad u_N = u_M \cdot m^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\Delta t_N}{\Delta t_M} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{T_M}{T_N} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{換気量} \quad L_N = L_M \cdot m^{\frac{5}{2}} \cdot \left(\frac{\Delta t_N}{\Delta t_M} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{T_M}{T_N} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{供給熱量} \quad Q_N = Q_M \cdot m^{\frac{5}{2}} \cdot \left(\frac{\Delta t_N}{\Delta t_M} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{T_M}{T_N} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{r_N}{r_M} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{単位の供給熱量} \quad q_N = q_M \cdot m^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\Delta t_N}{\Delta t_M} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{T_M}{T_N} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{r_N}{r_M} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{換気回数} \quad n_N = n_M \cdot \left(\frac{1}{m} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{q_N}{q_M} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{T_M}{T_N} \right)^{\frac{1}{3}}$$

絶対温度の状況 T_M/T_N と比重量 r_N/r_M は多くの場合、およそ1とみなすことができるので前式は次のようになる¹⁾。

$$u_N = u_M \cdot m^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\Delta t_N}{\Delta t_M} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$L_N = L_M \cdot m^{\frac{5}{2}} \cdot \left(\frac{\Delta t_N}{\Delta t_M} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$Q_N = Q_M \cdot m^{\frac{5}{2}} \cdot \left(\frac{\Delta t_N}{\Delta t_M} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$q_N = q_M \cdot m^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\Delta t_N}{\Delta t_M} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$n_N = n_M \cdot \left(\frac{1}{m} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{q_N}{q_M} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

以上に述べた理論は Baturin 氏によって実験によっても証明されている。東大生研教授、勝田高司氏と建研土屋喬雄氏はこの理論を拡大し実際の模型実験に適用できるように次のように報告している²⁾。

非等温吹出の場合、吹出口の A_r 数さえ合わせれば、壁面付近の境界層以外では、室内空気分布は相似になる。いま模型の数値の実物のそれに対する縮率を n とするなら前出の m との関係は $n=1/m$ となり A_r 数

一定では最終的には次のようになる。

$$n_{\Delta t} \cdot n_i / n_{u0}^2 = 1 \quad \dots\dots\dots(9)$$

u_0 ; 吹出空気速度(m/s)

模型で得られる空気分布に速度では $1/n_{u0}$ 倍、温度では $1/n_{\Delta t}$ 倍することによって実物の空気分布を推定できる。ただし温度としては吹出温度を基準として考えなければならない。

以上に述べた諸氏の研究をふまえたうえで、模型則理論によって模型実験を行なう場合次の2つの方法が考えられる。

① 空調器の吹出温度が決定して、この吹出温度で吹き出した場合、建物内の各部の温度はどのようになるか。

したがって吹出温度差は実験を行なってはじめて知ることとなるので、模型と実物における吹出温度差を等しくすることによって、(4)式から(7)式における吹出温度差の項をなくさなければならない。また日射、外気温等外界条件の影響によって建物内に侵入する熱負荷まで相似にさせなければならない。

この方法で模型実験を行なった場合、測定値は絶対的なものとなり、模型実験だけで建物の冷暖房負荷が決定できる。

② あらかじめ負荷計算を行ない空調器の吹出温度差(吹出温度と居住域代表点との温度差)を決定して、この吹出温度差で吹き出し、居住域のある代表点が室内設計温度になったとき、建物内各部の温度分布はどのようになるか。

この場合においては模型における吹出速度を、できるだけ大きくとるため、(9)式から吹出温度差も大きくとることが可能となる。

すなわち吹出温度は任意にとり、模型における吹出温度差があらかじめ決定した値になるように冷房時の実験においては模型外部からの加熱量を制御する。暖房時においては冷却量を制御する。また外部からの加熱、冷却量を一定とし吹出温度差があらかじめ決定した値となるように吹出温度を調整してもよい。

このようにして冷房時においては模型外部からの供給熱と内部発熱が、模型内に吹き出された冷風とバランスして定常になるよう、暖房時においては模型外部への流出熱が、内部発熱、温風とバランスして定常になるように調整する。

この方法で実験を行なった場合、測定値は相対的なものであるから、得られた温度分布は、きめられた吹出温度差で室内居住域代表点がある温度になった場合の相関的な分布の意味しかもたないことになる。しかしながら居住域の均一な温度分布が得られる理想的な

吹出口配列、吹出口形状を決定するうえでは、この実験方法で十分である。空気速度分布に関しては得られた測定値を n_{u0} 倍すればその値は絶対的なものとなる。

以上に述べたように2通りの実験方法があるが、今回、模型実験を行なった2つの建物においては、負荷計算がすでに終わって、吹出口の最良の配列、形状を決定することが目的であったこと、吹出速度を可能なかぎり大きくとることによって精度の高い実験を行なうためには吹出温度差が大きくとれる②の方法のほうが有利である、などの理由によって今回の2つの模型実験の大筋は②の方法にそって行なうこととした。

2. 模型実験

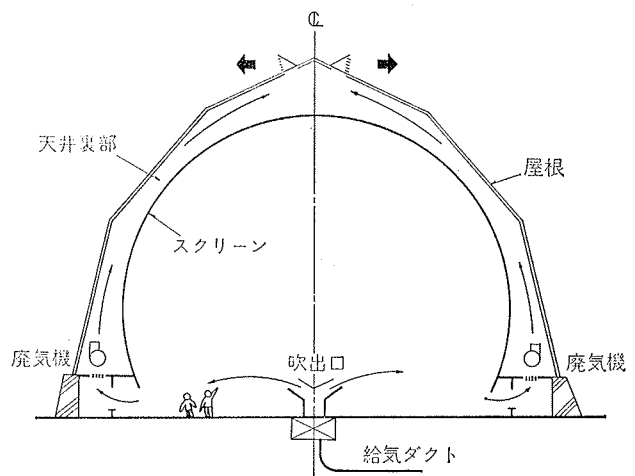
2.1. 万博某パビリオンの場合

2.1.1. 空調設備の概要 パビリオンの空調系統図を図一1に示す。このパビリオンはドームの内側に半球上のスクリーンを設けたものである。

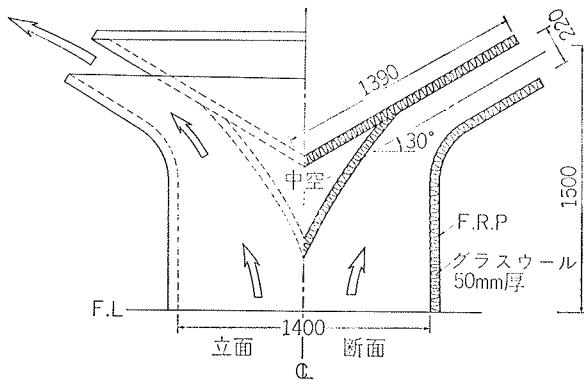
吹出口は床面円心部に大型ふく流型吹出口が設置されており、居住域のみを冷房することにより設備の経済化がはかられている。

吸込口はドーム周辺に設置されており、ここから吸い込まれた室内空気は映写室を通り天井裏空間を通過して頂部のガラリから外に廃気される間に、屋根から侵入する外気温および日射熱による熱負荷を除去するしくみになっている。円心部に設置されている吹出口の形状は以下の模型実験によって決定したものであり図一2に示す。

2.1.2. 実験計画 n_i を大きく、 n_{u0} を大きくするほど実験精度は高まり、その成果は大きい実験室の大きさ、模型制作費用などの制約を受ける。本実験



図一1 某パビリオン空調系統図



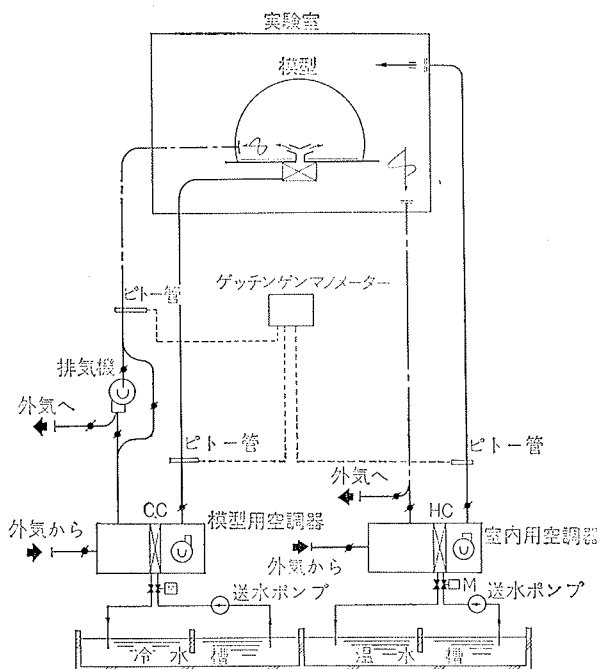
図一 大型ふく流型吹出口の形状

では n_l を 1/10, n_{dt} を 1.65 とするならば (9) 式より n_{u0} は 0.406 となり適当であると判明した。すなわち実際の建物において吹出温度差 10°C , 吹出速度を 4m/s とするならば模型においては吹出温度差 16.5°C , 吹出速度 1.63m/s となる。{(4)式参照}

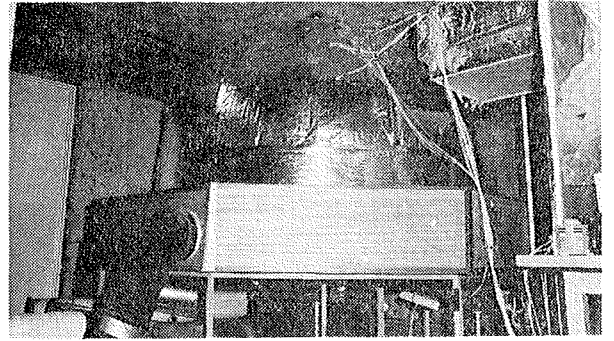
本実験の目的は模型ドーム内床面円心部に各種吹出口を設け最適な室内空気分布が得られる吹出口形状をきめることにある。

模型実験系統図を図一 3 に, 模型外観を図一 4 に示す。

模型内部の温度および空気速度の測定は, 吹出口, 吸入口とも点対称に設置されているのでドーム内の中心を通る一断面の半分のみを測定した。温度は 0.3mm 銅コンスタンタン熱電対によって電子管式指示



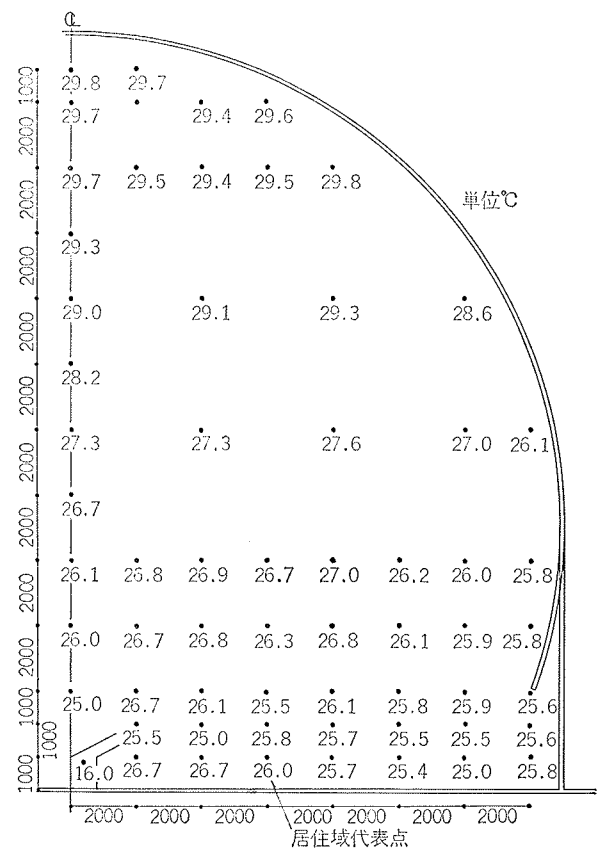
図一 3 模型実験系統図



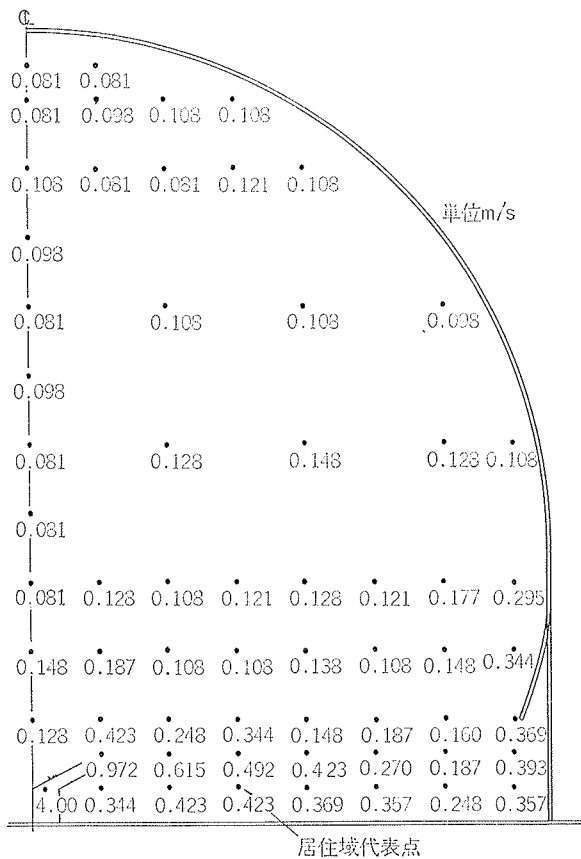
図一 4 模型外観

記録計で自記記録させた。ドーム内空気速度は温度測定点と同じ点を熱線風速計により測定した。また人間, 照明等の内部発熱は (6) 式で再現した。この再現手段としては面発熱体として有効な電導抵抗紙を使用した。

2.1.3. 実験結果 各種吹出口について実験を行った結果, 単純ふく流型吹出口 (図一 2 参照) の場合が居住域での温度, 空気速度の均一化が最もはかられており, また居住域のみの冷房が可能となることが判明した。この実験結果から推定した実物のドーム内の温度分布を図一 5 に空気速度分布を図一 6 に示す。実験により決定した吹出角度は 30° である。



図一 5 模型実験によるドーム内温度分布



図一六 模型実験によるドーム内空気速度分布

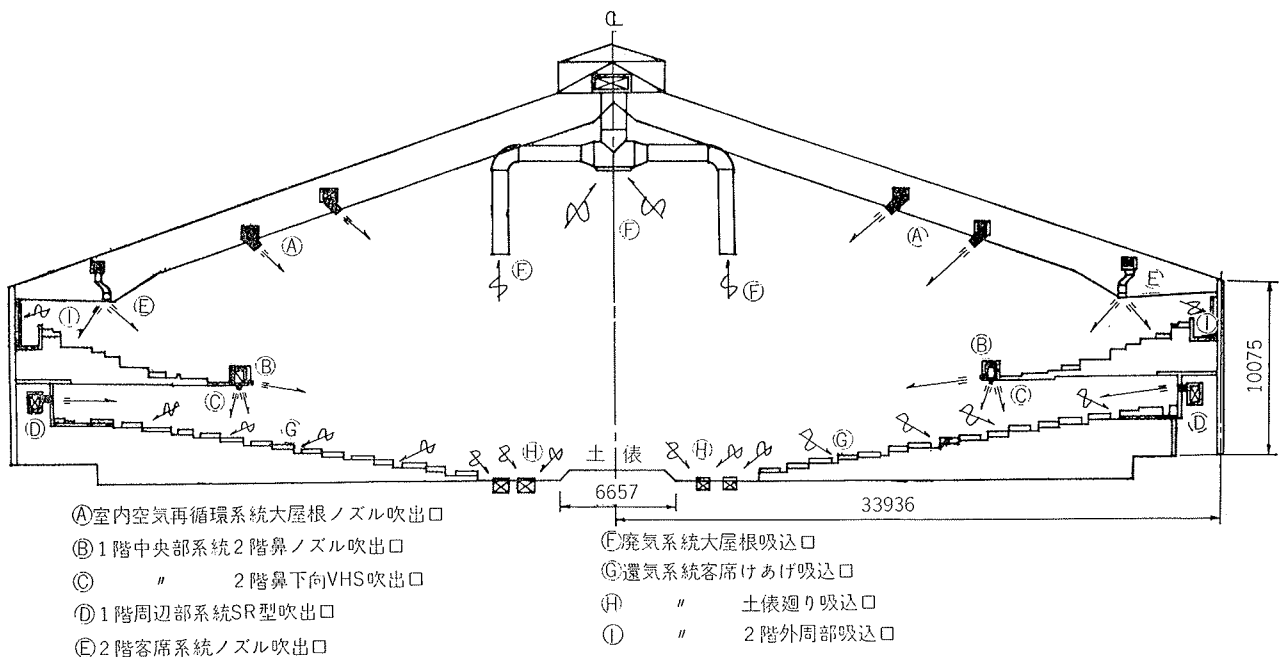
2.2. 某屋内競技場の場合

2.2.1. 空調設備の概要 某屋内競技場の空調もまた客席等の居住域のみを冷暖房することによって設備の経済化をはかることに特色がある。空調方式は各系統別のセントラルダクト方式であり、大天井には換気系統のノズルがあり室内空気を再循環させることにより屋根からの負荷をとり調和空気が上昇するのを防ぐエアーカーテンの役割をなしている。図一七に吹出、吸込系統図を示す。

2.2.2. 実験計画 吹出口および吸込口は東と西、および南と北でほぼ対称に配置されているので建物の中心に位置する土俵にて建物を4分割した場合、どの部分の空気分布もほぼ同じになる。そこで平面全体の4分の1について実験を行えば十分であり模型の縮率 n_t も大きくとれる。しかしながら4分の1では土俵も4分の1となり、最もたいせつな土俵付近の建物中心部が境界層の影響を大きく受けることになる。そこで今回は縮率 n_t を1/12にて全体の4分の1より多少大きめの土俵全体がはいる模型を製作した。

模型は9mm厚ベニヤで製作し実際の建物には存在せず模型において存在する壁面(図一八において太い線で示したもの)からは侵入熱量がないように40mm厚のグラスウールで完全に断熱した。

模型における吹出口配置図を図一八に、大屋根ノズ



図一七 某屋内競技場吹出・吸込系統図

ル（室内空気再循環系統），還氣系統吸入口，大屋根
 廃氣系統吸入口の配置図を図-9に示す。

図-8においてA-A'およびB-B'の位置が温度
 測定断面であり，この代表2断面によって館内の気流
 分布を推定した。A-A'における模型断面図を図-10
 に，B-B'における断面図を図-11に示す。

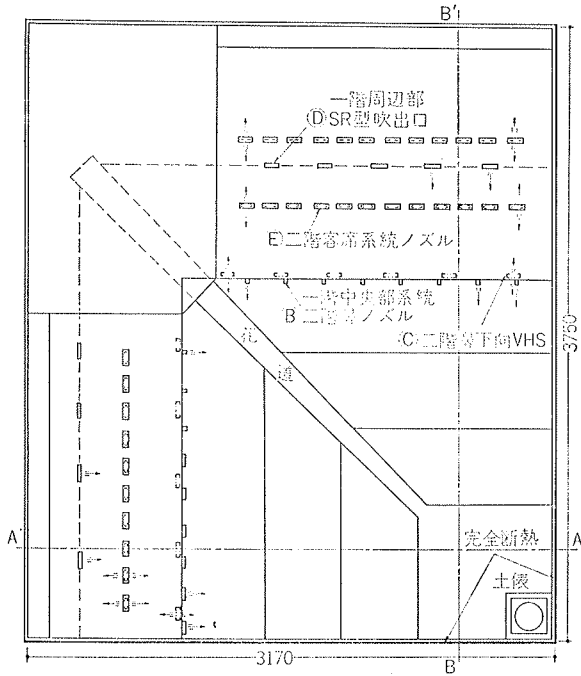


図-8 模型における吹出口配置図

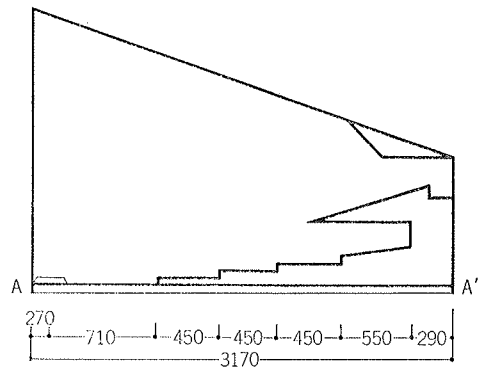


図-10 A-A'断面

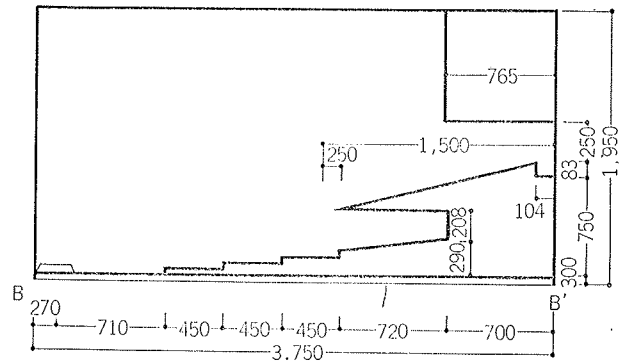


図-11 B-B'断面

実際の建物では冷房時においては室内設計温度 26°C ，
 吹出温度差は平均 7.7°C であるので模型においては
 $n_{dt}=3.0$ ，すなわち 23.1°C とした。暖房時においては
 室内設計温度 20°C ，吹出温度差は暖房開始時において
 はかなり大きい，観客が増大するに従って小さくなる。
 これを 4°C とするならば模型では， $n_{dt}=3.0$ す
 なわち 12°C とした。室内居住域代表点は1階席中央部
 とした。人間，照明などによる内部発熱は(6)式にて
 再現し，模型においては 0.3mm 銅線を床面および照
 明器具の位置にはりめぐらし，これに電流を流すこと
 によって発熱させた。温度は銅コンスタンタン熱電対
 により電子管式指示記録計によって測定した。吹出，
 吸込風量のチェックは丸ダクトの直管部にピトー管を
 さし込み，ゲッチングマンノメータによって行なった。
 図-12に模型内部を示す。

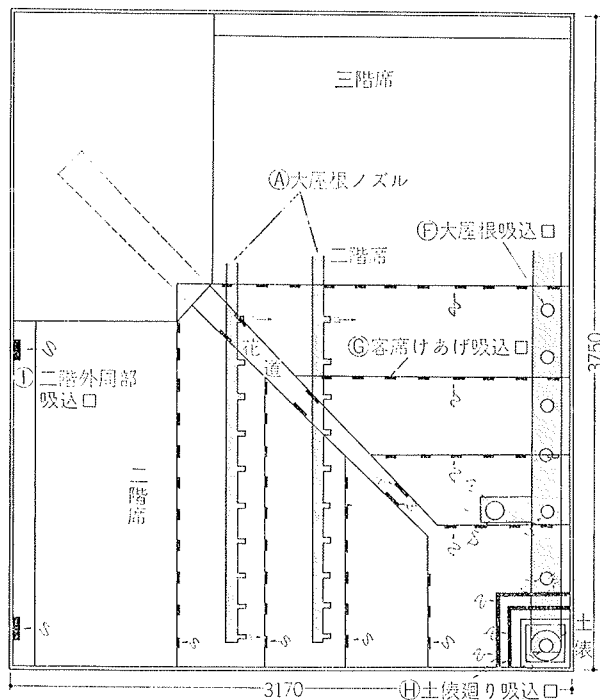


図-9 模型における大屋根ノズル，還氣系統およ
 び廃氣系統吸入口配置図

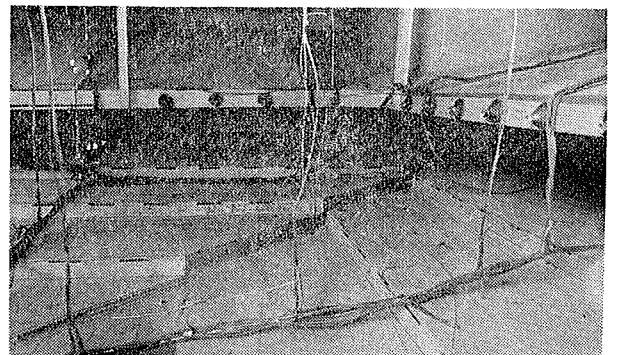


図-12 某屋内競技場模型内部

2.2.3. 実験結果 実験結果のうち冷房時の温度分布を図-13に、暖房時の温度分布を図-14に示す。いずれの場合も2階鼻ノズルの角度は気流の上昇を極力

押えるため水平面に対して50°下向とした。2階鼻ノズルの吹出速度は実物では7.8m/sであるが、模型では(4)式から3.9m/sとなった。

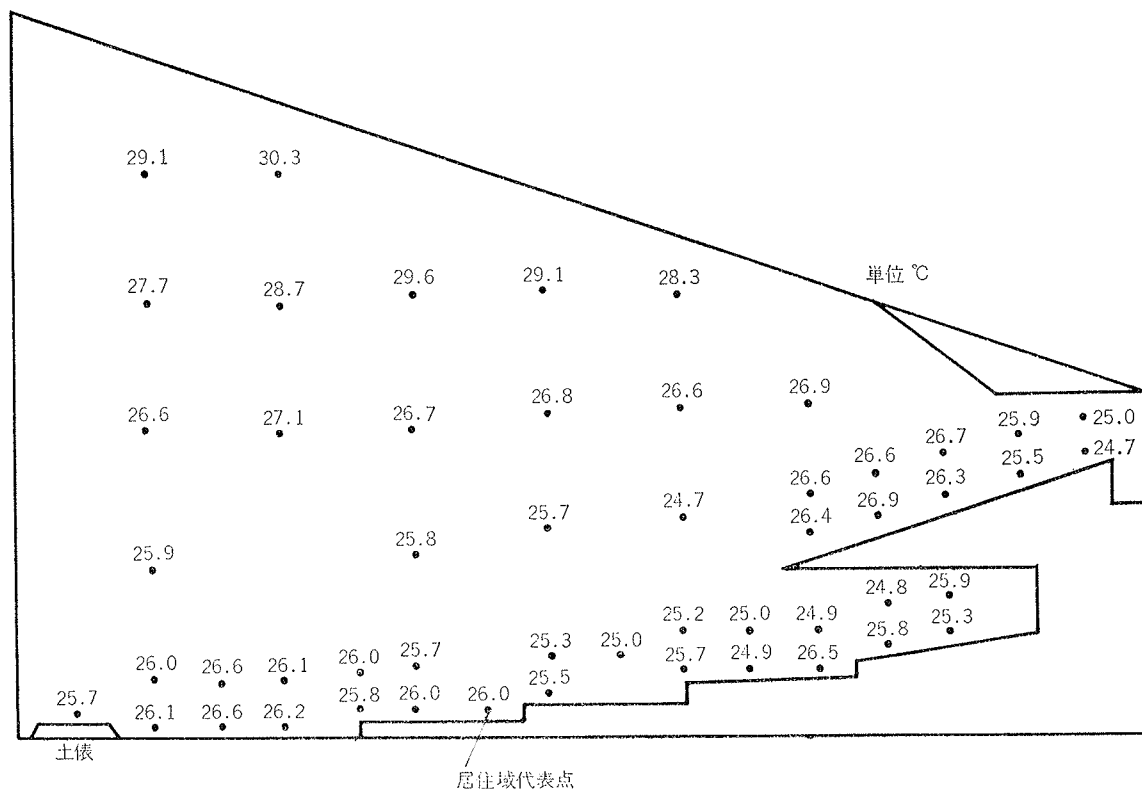


図-13 模型実験から推定した館内温度分布 (冷房時)

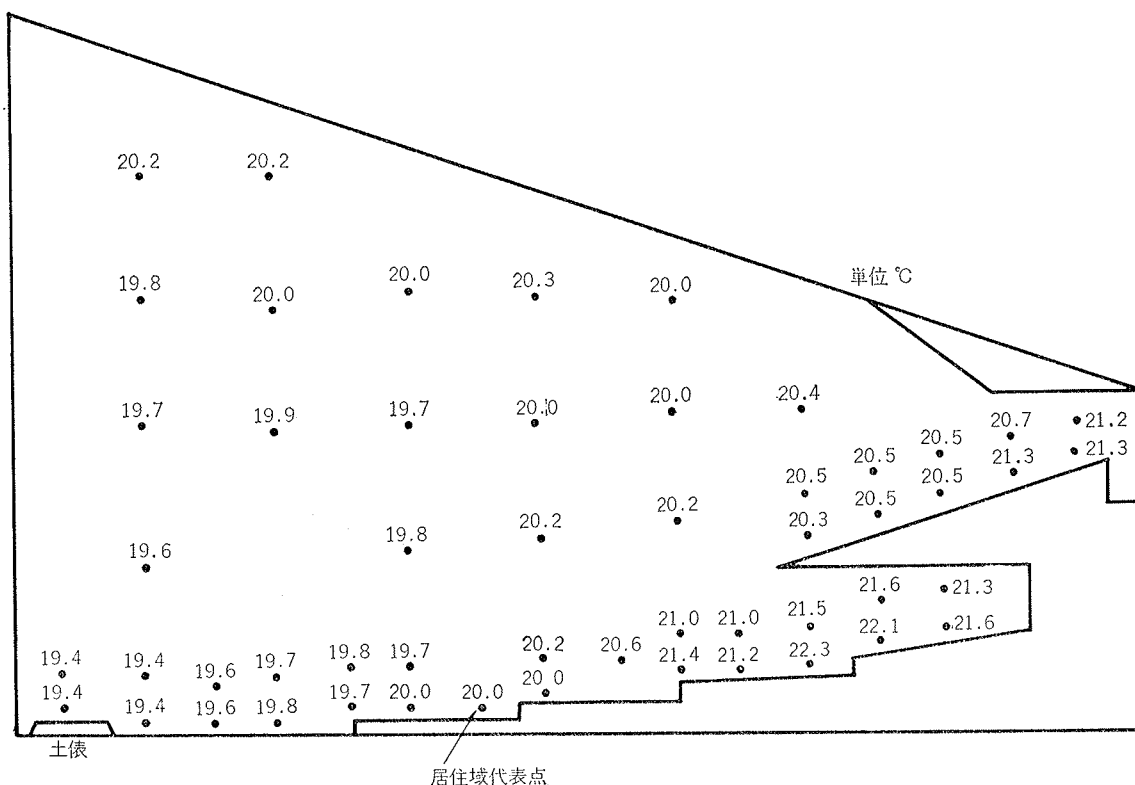


図-14 模型実験から推定した館内温度分布 (暖房時)

冷房時の実験結果についてみれば、図中矢印で示した居住域代表点が26°Cになったとき、他の居住域においてもほぼ均一な温度分布となっている。また大空間の温度が居住域の温度に比べて3°C程度高くなっていることから居住域のみの冷房が成功していることがわかる。

暖房時の実験結果においても図中矢印で示した居住域代表点が20°Cになったときの他の居住域の温度分布はほぼ均一になっている。吹出温度差が4°Cと小さく、また吹出風量の2割を大屋根で廃気しているため館内の垂直温度分布もほぼ均一になってしまった。いずれにしても居住域のみの暖房を完全に行なうことは困難と思われる。

3. 実物実測 (模型実験結果との比較検討)

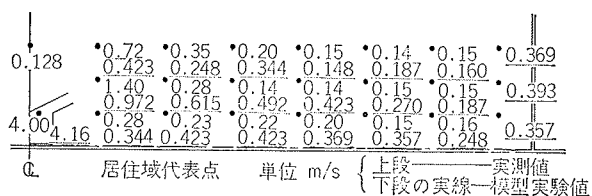
3.1. 万博某パビリオンの場合

模型実験で得られた結果が実物とどの程度合致しているかの比較検討を行なうため、実物の冷房負荷特性が実験時とほぼ同条件となった昭和45年7月29日においてドーム内温度分布、空気速度分布を中心に実測を行なった。温度測定は熱電対にて実験時における測定点と同じ場所を行なった。空気速度測定は床面から3mまでの居住域の同じ測定点を熱線風速計によって行なった。

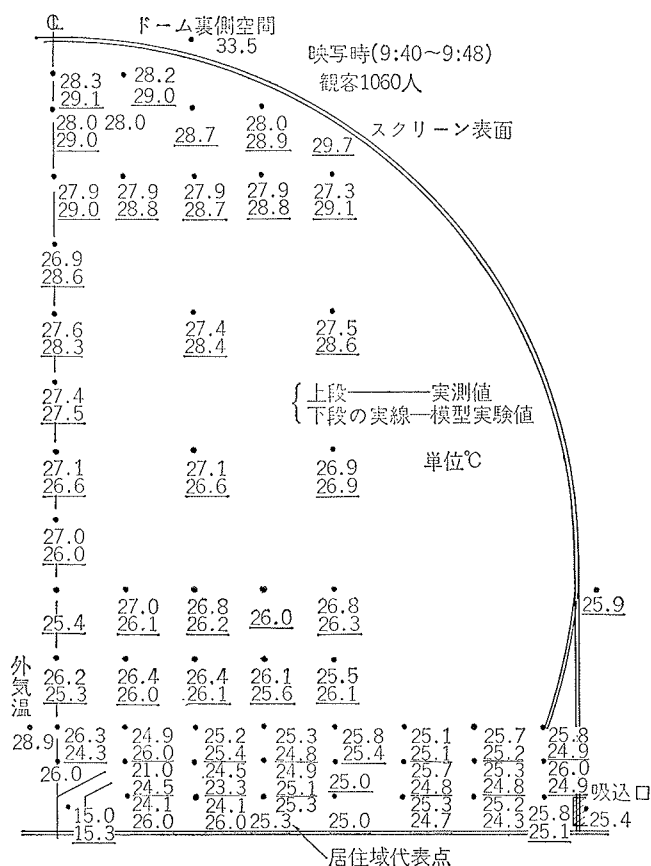
測定結果のうち空気速度分布の結果を図一15に、温度分布の結果を図一16と図一17に模型実験の結果と比較して示した。

図中各測定点につき温度が二重に示されているが、上段が実測値であり下段の実線を引いて示したものが模型実験の値である。温度測定は吹出温度差が模型実験時と同じ10°Cとなった時点で行なった。比較の方法は居住域代表点の温度が実物と模型実験とで一致するように模型実験の値を全体的にある温度ずつ上下した。模型実験で得られた温度は相対的なものであるからこのような操作ができるのである。

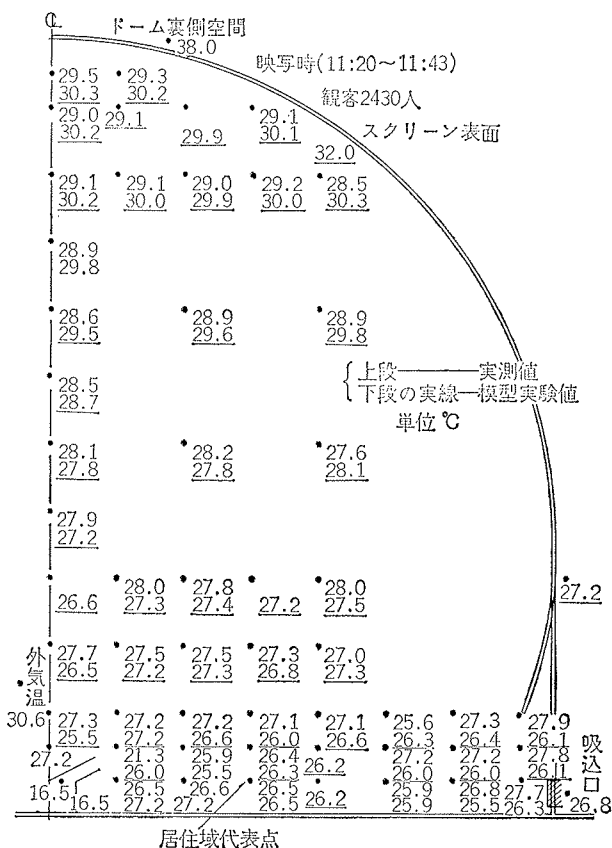
図から明らかなように温度分布は部分的に違う場所はあるが、吹出口付近の温度は模型実験ではかなり高くなっているが、これは模型を鉄で製作したので熱電対の受感部が吹き出された冷



図一15 実物と模型における空気速度分布の比較



図一16 実物と模型における温度分布の比較



図一17 実物と模型における温度分布の比較

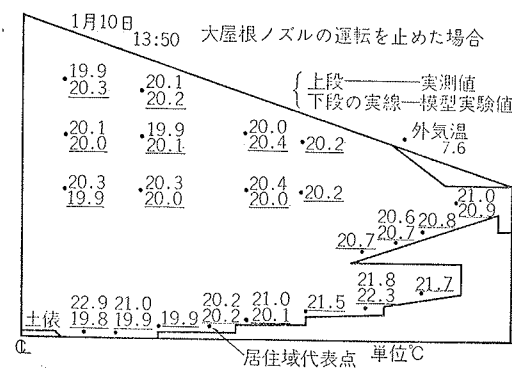
風よりも周囲フレームの高温の壁のふく射による影響を強く受けたと思われる。空気速度分布においては実測値のほうが全体的に小さくなっている。これによって空気速度分布は合致していないと断定するのは危険であり、むしろこの差異は、微風速計自身の精度に帰されるとも考えられる。

3.2. 某屋内競技場の場合

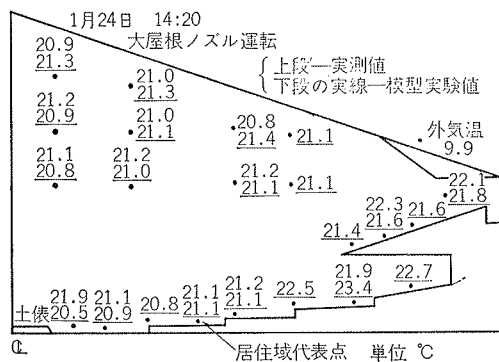
昭昭46年1月中旬において館内で競技が行なわれ実験時とほぼ同じ1万人程度の観客が在館して暖房を行なったときに実物の温度分布の実測を行なった。温度測定は吹出温度差が実験時と同じ4°Cになったときに行ない、測定点は実験時と同じ場所である。

実測結果を実験結果と比較して図一18、図一19に示す。上段が実測値であり下段の実線を引いて示したものが模型実験値である。3.1.に述べた方法で居住域代表点を同じ温度にそろえて比較した。

温度分布に関してはたいへんよく一致していることがわかる。土俵付近の温度は実物のほうが高くなっているが、これは実物においては土俵付近はパネルヒーティングが行なわれているが、ふく射熱であるため模型実験では再現できなかったためと思われる。



図一18 実物と模型における温度分布の比較



図一19 実物と模型における温度分布の比較

4. 結論

(1) 今回の2つの大空間建築における実物と模型実験の結果が特に温度分布に関してたいへんよく一致していることが判明した。このことから従来その精度が不明であったAr数を合わせる模型の相似則理論はかなり信頼性があると考えられる。

(2) 設備容量の経済化をはかるために居住域のみを冷房する方法は今回の実測により十分に満足すべき結果が得られていることが判明した。居住域のみの暖房に関しては今後さらに検討していくつもりである。

(3) 今後の模型実験は1章の①の方法による温度に関して絶対的な数値が求められる実験が望ましく、今後この実験方法を確立していくつもりである。

5. おわりに

本報告のうち、万博某パビリオンの実験は本社設備部後藤達雄職員が行なったものであり、実物の実測に際して駿河台工事事務所の飯塚敏信主任、金子浩一職員の御援助があった。また東海大学田中俊六講師、本社設備部の小川隆三、伊藤信三職員の御助力があった。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Baturin: Lüftungsanlagen Für Industriebauten
- 2) 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第38回論文集