

# 空気膜構造棟に関する実験・研究（その4）

——室内温熱環境特性——

宮川 保之 真藤 利孝  
田中 辰明

## Experimental Studies on an Existing Air Supported Structure (Part 4)

——Characteristics of Thermal Environments——

Yasuyuki Miyakawa Toshitaka Shindo  
Tatsuaki Tanaka

### Abstract

Heat environments in membrane structures vary because of solar heat transmittance and low heat resistance of membrane materials unless heating and cooling equipment is installed. This report describes the results of annual measurements in the air-supported building at the Ohbayashi Corporation Technical Research Institute for temperature distribution of room air, mean radiant temperature, distribution of transmitted solar heat, and heat stored in the floor. Furthermore, simplified calculation methods based on the data obtained from a series of measurements are proposed.

### 概 要

膜構造物においては膜材の日射透過性と比較的小さな断熱性のため冷暖房設備がない場合には室内温熱環境が時間的に大きく変動する。この研究では当技術研究所の空気膜構造棟において室温分布、平均ふく射温度、日射到達率分布、床面での蓄放熱量を年間にわたって測定した。またこれらの測定データを基にして温熱環境の簡易的な予測シミュレーション方法を提示した。

#### 1. はじめに

膜構造物においては膜材の日射透過率が14~15%程度あるため昼光利用、冬期の温室効果などの利点はあるものの、夏期において換気が十分に行なわれない場合には室内は相当に暑くなる可能性がある。また膜材自体、熱的に非常に薄い材料であるため室内は外界の変動の影響を受けやすい傾向にある。

この報告においては当技術研究所内の空気膜構造棟における室温分布、平均ふく射温度、床面での蓄・放熱量、日射到達率分布などの年間の測定結果を示すとともに、これらの測定データを基にした膜構造物の室内温熱環境の簡便な予測シミュレーション方法を示した。

#### 2. 空気膜構造棟の概要

当技術研究所の空気膜構造棟の概要を写真-1, 2,

図-1, 2, 表-1 に示す。当建物の室容積は約 6,000 m<sup>3</sup> であり漏気量は内圧 25 mmAq の時で約 1,800 m<sup>3</sup>/h (換気回数で0.3回/h) 程度である。

#### 3. 測定方法および測定項目

各項目の測定方法は次のとおりである。

##### ・室温分布

建物中央部において床より天井面まで 1 m 間隔で熱電対を設置した。なお水平方向にはほぼ均一な室温分布が得られることがこれまでの数多くの大空間での実測から知られているため測定位置は建物中央の1箇所に限定した。熱電対の受感部は透過日射の影響を除くためアルミのカバーでおおった。

##### ・天井面（屋根内表面）温度

建物中央部、北東部、南西部の3箇所に熱電対をブチルゴムで接着した。

・平均ふく射温度

グローブ温度計を建物中央の床上 1.5 m の位置に設置した。

・透過日射量分布

ネオ日射計による。

・床面での蓄放熱量

熱流板のほか補助的に床面温度、近傍室温測定のため熱電対を設置した。

4. 測定結果

4.1. 室内温度分布

夏期、冬期における代表日の室温分布の変動を快晴日と曇天日に分けて図-3～図-6に示す。夏期の快晴日においては日射透過の影響が大きく14時では天井面付近で43.4℃、床上 1.5 m で40.4℃を記録した。また夜間から明け方にかけては膜面での大気放射冷却により膜面の温度は外気温よりも3~4℃も低くなっている。この影響で室温も下がり6時では外気温よりも3℃程度も低くなっている(図-3)。一方、夏期の曇天日での室温は外気温にほぼ追従した値を示している(図-4)。冬期の快晴日では昼間の室温はそれほど上昇していない。夜間における放射冷却は夏期よりも大きい、この日は冬期としてはそれほど大きくないため室温は6時で2~2.5℃程度であった(図-5)。

また透過日射が床面に吸熱されるため全般的に上下の室温分布は小さく、快晴日でも3~4℃程度である。図-7に室温の季節的な変動を示す。

4.2. 室内平均ふく射温度

平均ふく射温度とは室内のふく射環境を表わす指標であり通常はグローブ温度計(直径 15 cm の黒色中空銅球)を用いて計測する。一般に人間の快適性に影響を与える因子は多く複雑であるが、よく用いられる指標としては次の作用温度  $\theta_0$  がある。

$$\theta_0 = (\text{室温} + \text{平均ふく射温度}) / 2$$

図-8～図-11に夏期、冬期における平均ふく射温度の

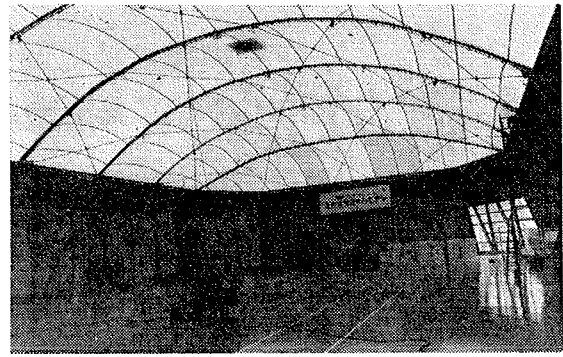


写真-2 室内状況

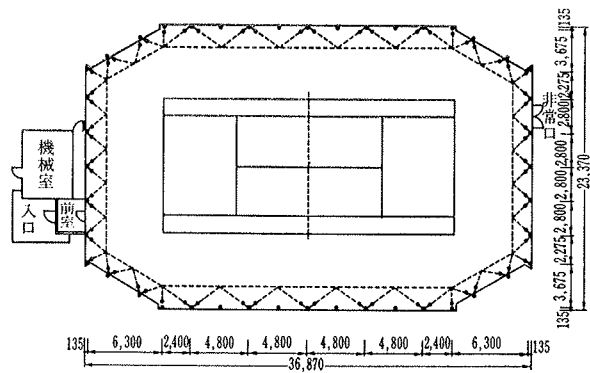


図-1 空気膜構造棟の平面

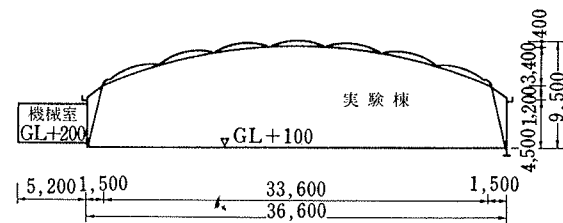


図-2 空気膜構造棟の断面

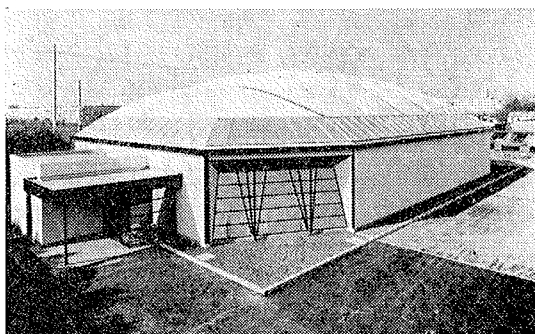


写真-1 空気膜構造棟の外観

・床面積	840m <sup>2</sup>
・室内容積	6,000m <sup>3</sup>
・最高部高さ	9.5m
・建物各部材料	屋根：テフロン膜 斜壁：2枚のステンレス板の間にウレタンを発泡させたサンドイッチパネル 壁：押出し成形セメント板 50mm厚
・内圧	常時 25mmAq, 積雪時 85mmAq
・送風機	6,000m <sup>3</sup> /h×(60~145mmAq)×5.5kW (可変速モーター常用) 6,000m <sup>3</sup> /h×145mmAq×5.5kW(非常用)

表-1 空気膜構造棟建物および設備機器概要

時間的な変動を示す。夏期においては快晴日、曇天日とも室温と平均ふく射温度とはほぼ同じ程度の値を示している。一方、冬期においては快晴日の昼間では平均ふく射温度が室温よりも最高で3.5°C程度高くなっている。この理由は透過した日射がグローブ温度計に吸収される一方、床面温度が室温とそれほど変わらないために床面に対してふく射で放散される量が少ないためである。

4.3. 床面での蓄・放熱量

図-12に床面での蓄放熱量の時間的な変動を示す。また図-13に床表面温度の季節的な変動を示す。春から夏にかけては床面への吸熱が大きいため床面温度は上昇を続けるが、夏の終り頃からは逆に放熱が大きくなるため床面温度は下降を続ける。

4.4. 日射到達率分布

この建物で使用している膜材の日射透過率は通常14~15%程度であるが当構造棟のように屋根全体が曲率を持ち、また山と谷とが交互にあるような場合には床面に実際に到達する日射量は減少することが予想される。図-14に比較的太陽高度の低い時期における床面への到達日射量、日射到達率の分布を示す。各測定ポイントにお

ける日射量に面積重みを乗じてこの建物の平均到達率をもとめると床面の場合で7.0%、壁面へ到達する日射量までを含めると11.9%程度となり、大幅に到達率が減少していることがわかる。

5. 室内温熱環境の簡易的な予測シミュレーション法

膜構造物の設計段階において、室温、平均ふく射温度などを予測し、室内温熱環境のグレードを判定することが必要である。非定常の熱負荷計算法を用いればこれらの温度はより正確にもとめるが半無限体である床地盤を含むため、計算はぼう大なものとなり実用的ではなくなる。このため多少、精度は落ちてでも設計者が比較的簡単に計算可能な簡便な予測法が必要となる。ここでは実験棟における測定データを基にした簡易的な予測シミュレーション法を示す。

室内における熱平衡式は

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで

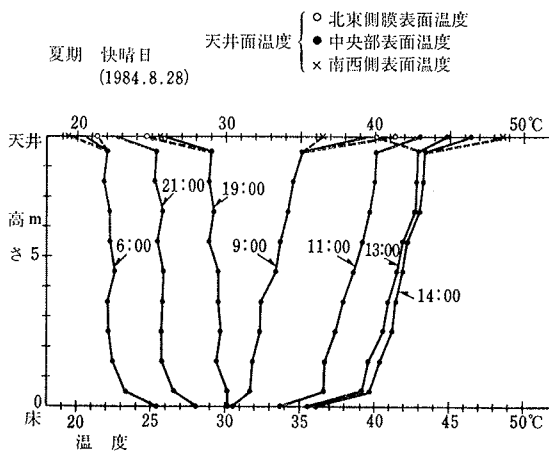


図-3 室温分布の時間的な変動 (夏期, 快晴日)

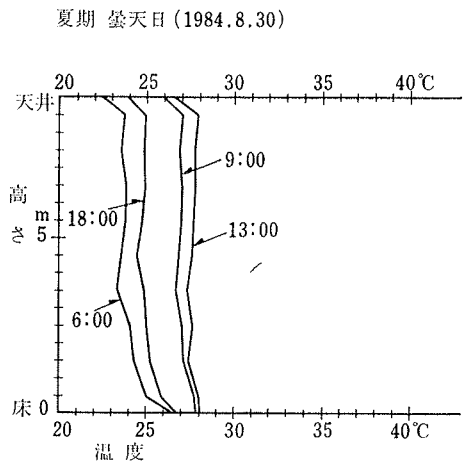


図-4 室温分布の時間的な変動 (夏期, 曇天日)

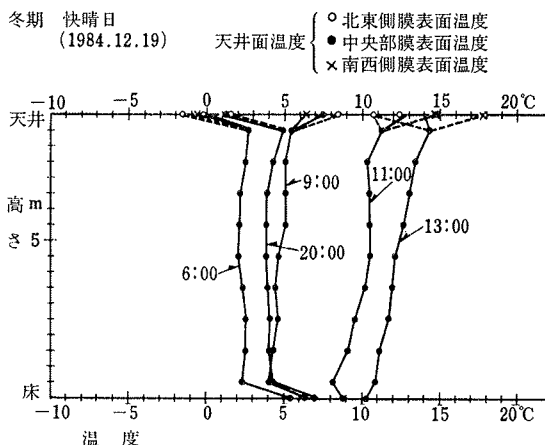


図-5 室温分布の時間的な変動 (冬期, 快晴日)

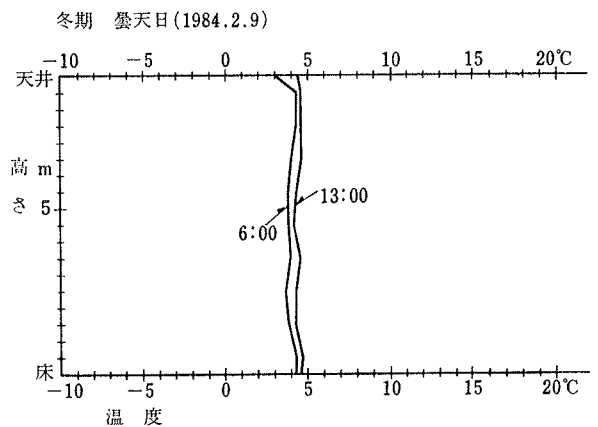


図-6 室温分布の時間的な変動 (冬期, 曇天日)

- q<sub>1</sub>: 膜面からの伝達熱量 (kcal/h)
- q<sub>2</sub>: 壁面からの伝達熱量 (kcal/h)
- q<sub>3</sub>: 床面からの伝達熱量 (kcal/h)
- q<sub>4</sub>: 換気による熱取得量 (kcal/h)

また

$$q_1 = \alpha_1 \left( \frac{a_1 \cdot I + \alpha_1 \cdot \theta_r + \alpha_0 \cdot \theta_a}{\alpha_1 + \alpha_0} - \theta_r \right) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$q_2 = \sum \alpha_i \left( \frac{a_2 \cdot I + \alpha_1 \cdot \theta_r + K' \cdot \theta_a}{\alpha_1 + K'} - \theta_r \right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$q_4 = C_p \cdot \gamma \cdot Q \cdot (\theta_a - \theta_r) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで q<sub>3</sub> の算定は床面が半無限体であることから簡易

的に算定することが困難である。それ故、q<sub>3</sub> の値としては図-12に示される値を採用することとする。なお曇天日では q<sub>3</sub>=0 としてよい。(1)式を解くことにより室温 θ<sub>r</sub> を求めることができる。

次に平均ふく射温度 θ<sub>mrt</sub> は通常次式で表わせる。

$$\theta_{mrt} = \frac{\sum_{i=1}^n B_{0,i} \cdot \theta_{s,i}}{\sum_{i=1}^n B_{0,i}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

あるいは

$$\theta_{mrt} = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i \cdot P_{0,i} \cdot \theta_{s,i}}{\sum_{i=1}^n \epsilon_i \cdot P_{0,i}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

簡易的には図-8～図-11を参考にすればよい。つまり

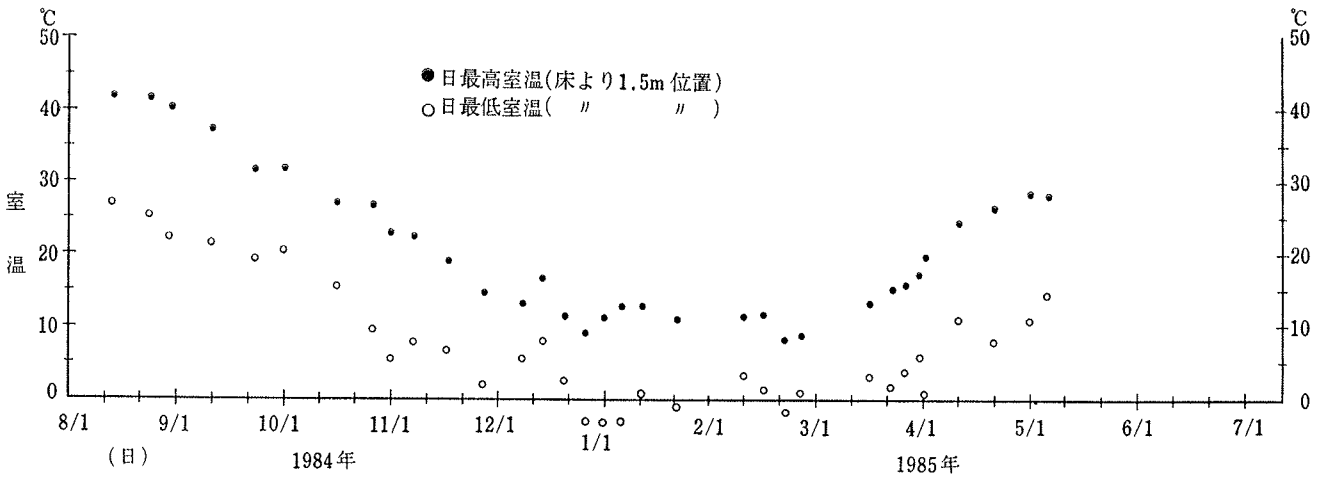


図-7 室温の季節的変動

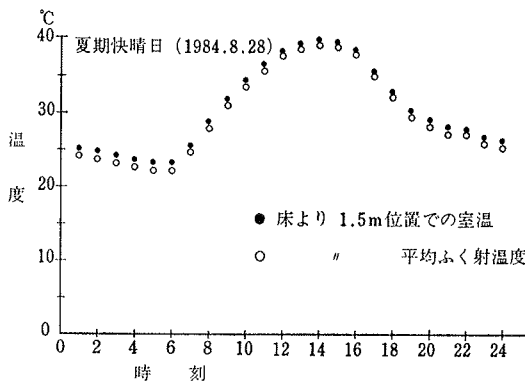


図-8 平均ふく射温度の時間的変動 (夏期, 快晴日)

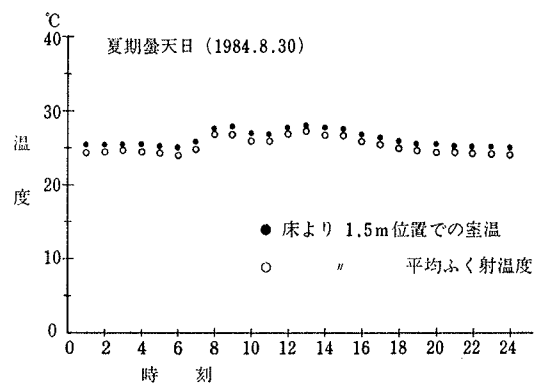


図-9 平均ふく射温度の時間的変動 (夏期, 曇天日)

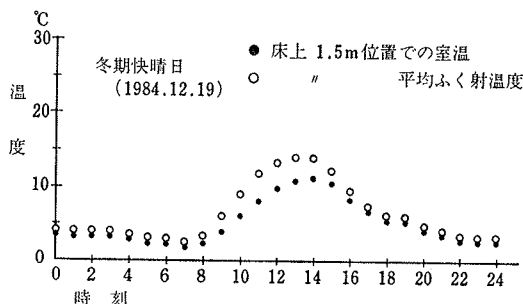


図-10 平均ふく射温度の時間的変動 (冬期, 快晴日)

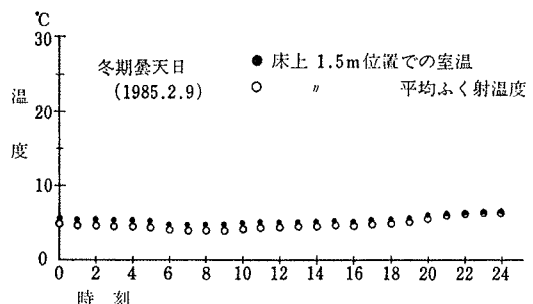
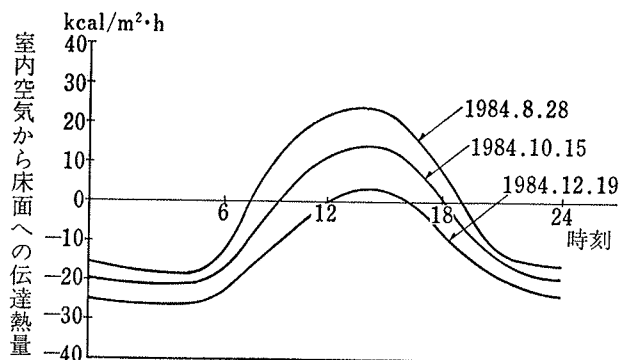


図-11 平均ふく射温度の時間的変動 (冬期, 曇天日)

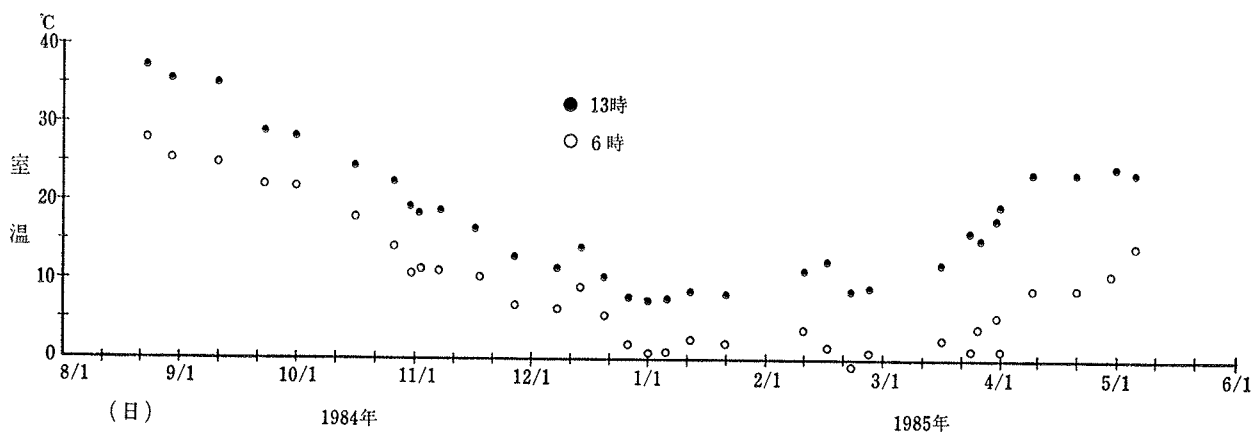
冬期の快晴日の昼間を除けば平均ふく射温度は室温にほぼ等しくなる。

### 6. おわりに

今回の一連の測定より膜構造物は外界の影響を敏感に受ける建物であることが判明した。建物の用途に伴い室内温熱環境に高いグレードが要求される場合には、換気量の増大、冷暖房設備による熱供給・熱除去などにより対応していかなければならない。

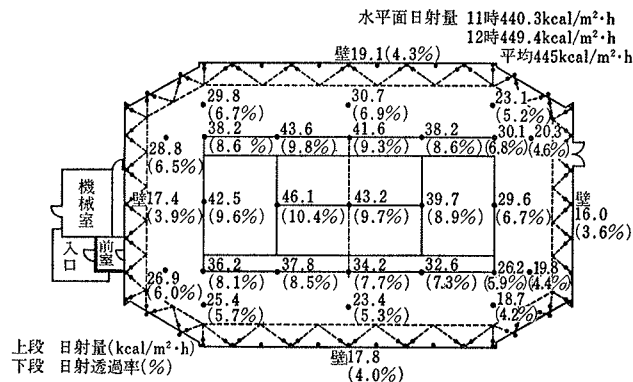


図一12 床面での蓄放熱量の時間的変動（快晴日）



図一13 床表面温度の季節的変動

- $\alpha_i$  : 室内側総合熱伝達率 ( $8 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ )
- $\alpha_o$  : 外気側総合熱伝達率 ( $20 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ )
- $I$  : 水平面全日射量 ( $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ )
- $a_1, a_2$  : 膜材および壁面日射吸収率 (0.15, 0.9)
- $\theta_r$  : 室温
- $\theta_a$  : 外気温
- $\theta_{mrt}$  : 平均ふく射温度
- $K'$  : 壁内表面から外気までの熱コンダクタンス ( $\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ )
- $C_p, \gamma$  : 空気の比熱、比重量 ( $\text{kcal/kg} \cdot \text{°C}, \text{kg/m}^3$ )
- $Q$  : 室内の換気量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
- $\theta_s$  : 壁内表面温度
- $B_{o,i}$  : 小球と壁面との間のGebhartの吸収係数
- $P_{o,i}$  : 小球の壁面に対する形態係数



図一14 床面、壁面への到達日射量および日射到達率 (1985.11.15, 11~12時, 快晴)

表一2 記号表