

# 膜構造建築の計画および環境設計

日本における空気膜構造の始まりと「環境計画・設備設計」など実証的検証に関する研究

佐野 武仁\*

## 概要

我が国の膜構造建築の始まりは、1970年に開催された「日本万国博覧会」で村田豊先生が設計した「芙蓉グループパビリオン」、「電気事業連合会水上劇場」、大林組施工の「アメリカ館」などにある。また、万博最大のイベント会場である図1「お祭り広場」には、幅330m×奥行110mの巨大な大屋根があり、この屋根は10.8m角の空気膜をモジュール化したもので、この空気膜を2次的に配列すると大屋根が出来上がる。また、空気膜は上膜8層、下膜5層の透明フィルムで構成されたものである。そのうち上層の1枚はコバルトブルーの透明膜で、晴天の日には空の青さが一段と冴える配慮がなされている。このようにして膜構造建築はその始まりを見せるわけであるが、日本のアメリカ館の技術は東京ドームをはじめとする施設として開花し、大規模な体育館や野球場、イベント会場などの恒久施設として普及していった。また、芙蓉グループパビリオンや電気事業連合会のパビリオンである水上劇場などは、博覧会場や展示場などの仮設施設として、全国各地でいろいろな催し物の会場として利用されてきた。

## はじめに

筆者は、「蘭博」、「青函博」や「なら・シルクロード博」、その他多数の空気膜構造の環境計画や環境設計に参画した。仮設建築物のエアドームは、夏の花火のように美しく短命であるが、人の心に「ノスタルジア」として記憶に残るものでもある。

本稿では、仮設ドームとしての膜構造建築の防災と安全性、加圧装置と冷房装置、火災時の蓄煙などの技術について長年の研究を集成したもので、①ドーム内垂直方向への温度成層（給気ダクトあり）をテーマとした、「蘭第12回世界会議展示部門会場エアドーム」、②エアドームのブローアップをテーマとした、「青函トンネル開通記念博覧会テーマ館」、③ドーム内垂直方向への温度分布（給気ダクトなし）をテーマとした「なら・シルクロード博企業出展館」について、その時代の技術的な考案や発見、実学として体得した技術についてトピックス的に解説する。

また、この技術が後世の仮設エアドームの技術的資料になれば幸いである。

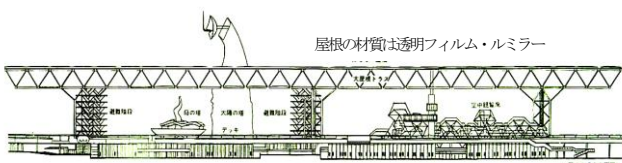


図1 万博お祭り広場大屋根（材質は透明フィルム・ルミラー）

## 1. 膜構造建築の発達史

膜構造建築を大きく分類すると、数十年から場合によってはそれ以上のライフ（耐久性）がある恒久膜構造建築と博覧会、展示会などの施設、遊戯施設など使用期間は短期間ではあるが、仮設建物として計画される仮設膜構造建築がある。

恒久膜構造施設は、最大5～6万人程度の観客が入場できる野球場や、それほどの規模ではないが数千人程度の観客を要する体育館やプール、音楽関係のライブ、花の博覧会展示会場、その他多くのイベントなどに使用される。一方、短期間のイベントなどを目的とした仮設の膜構造施設は、イベントや展示場の仮設建物として使用される。また現在、膜構造建築を構造的に区分するとつぎの方式がある。

①マスト等を地上から立ててケーブルを張り、膜材料を上方から吊り下げるという構造で、博覧会の広場や鉄道駅の屋根、競技場のスタンドなどに用いる吊り構造(suspension 構造)がある。この構法は設営が用意であるので、テントに近い仮設倉庫やイベント会場などにも用いられる。また、フライオットの「ミュンヘンオリンピックの競技場」や、丹下健三設計の「国立代々木競技場」、通称代々木オリンピックプールの上屋などにもこの構法は用いられている。

②2つ目は骨組み膜構造で、鉄骨造・木造などの骨組を作って膜を張る方法で、北京オリンピック（Games of the XXIX Olympiad）の水泳競技用スタジアム「北京国家水泳センター」もこれに属し、鋼製のフレームに半透明の膜を張って膨らませ、外観から見ると、LEDの照明技術を巧みに利用した膜構造で、水泡に包まれたよう

な空間を表現したものもある。また、簡易な骨組に膜を張った鉄道の駅舎 上屋や競技場のキャノピーなどとしても用いられている。

③3つ目は空気膜構造 (air-supported) 構造、ニューマチック (pneumatic) 構造ともいう。膜材は引張に働く材料で、膜単独では構造材として成立しないので、膜に柱や骨組、空気などを用いて形状を維持する。この構法は、膜材料および補強ケーブルを用いて屋根を形作り、エアドーム室内を外部より20~30mmAq程度高くし形状を維持する方法である。また、室内外の圧力を一定にし、展示会などでは人の出入りを潤滑にする2重膜構造もあるが、建設費が高いため実施例は余りない。これら3つの方式以外に複合的にこれらの構造のいずれかを組み合わせた複合膜構造も存在する。

このような状況の中で、筆者在席した井上宇市研究室では、村田豊先生の依頼を受けて、1970年大阪万博の「電気事業連合会水上劇場」の建築設備設計を担当したのが膜構造建築との係わりの始まりである。この劇場は水深40cm程度の池に浮かんだ膜構造の劇場で、乗船した入場者が15分程度の映画やイベントを見ている間に、水面に浮かんでいる劇場が劇場のセンター軸を中心に回転し、降り口が対岸に接岸して乗降客を下す。入場者が下船すると劇場は水面を反転して元の乗船口に接岸し、次の乗客を乗船させ、同様の動作を繰り返す。博覧会で多数の入場者を効率的に捌く導線計画によって優れた能力を発揮する劇場となっている。

### 1. 1. 日本における膜構造建築の始まり

日本で最初のアエドーム (空気膜構造) を手がけた設計者は、村田豊先生である。その第1号は、1970年に開催された日本万国博覧会の「芙蓉パビリオン」図1. 1で直径4mφ以上の馬蹄形のエアチューブを左右に連結して室内空間を作りこのスペースを展示場に利用した。

外観は馬の鞍型を想像させる壮大なエアドームで、エアチューブを赤と橙の縞模様で彩色したもので、このチューブ内に高圧空気を送風して、鞍型エアドームの形状を維持した。大阪万博で建設されたエアドームは、これ以外にアメリカ館 (施工: 竹中工務店)、電気事業連合会パビリオン (設計: 村田豊)、いろいろの休憩施設などが膜構造として作られた。以降、東京ドーム (施工: 大林組) は1988年にオープンした日本最初の全天候型恒久エアドームで、年間を通じ、野球を始め各種スポーツ、コンサート、コンベンションなど多彩なイベントが行われている。建築面積は、4万6千775㎡、収容人数は55000人、「東京ドームツアー」や「野球体育博物館」なども併設している。これを機に、日本における膜構造建築は博覧会などの仮設建築や野球場・体育館などの恒久施設として全国に広がっていった。



図1. 1 芙蓉グループパビリオン (村田豊先生設計)

### 1. 2. 膜構造建築の計画と環境設計への係わり

前述の水上劇場に続き、2つ目も同氏の設計で、神戸ポートピアアイランド博覧会 (1981年) のエアドーム「芙蓉パビリオン」であった。この建物は、2重膜構造で、最も内側の展示スペースは鉄骨で造られたスペースで、その外側は0.1mm厚の透明塩ビフィルムで覆われている。この塩ビフィルムの外側に鉄骨に沿って吸水性マットを敷きクレソンを栽培し、成長したクレソンは入場者に配付した。このクレソン栽培スペースの外側に、透明塩ビ製エアドームがあり、小型ファンで加圧し形状を保っていた。それゆえ、一番内部の展示室は大気圧と同圧になり、入退場者の出入りはスムーズで大量の観客を捌くことができた。

井上研究室では、皆様からのご指名をいただき、多数の膜構造建築の設計に関与することができ、「膜構造建築の計画および環境設計」に関する新技術の開発と検証などを行うことができた。

このような膜構造建築 (エアドーム) の建築計画に対して、井上研究室では環境設計や設備設計に初めて参加することになった。環境・設備計画に当たって、まず膜構造建築に関する資料の収集、空気膜構造の形態と内圧の関係、38条申請の資料作成に対す技術的参考資料の収集、初めての試みとしての蓄煙方式、その他膜構造建築に関するなるべく多くの資料を収集し研究を重ねた。特に参考となったことは、村田先生と弟子の道瀬さんの膜構造に対する経験をお聞かせいただいたことであった。村田先生のお話では、膜構造建築の構造・構法系の第一人者が横浜国大の石井一夫先生であることも良く聞かされた。

あれから20年近くが経過した今日、膜構造建築に偉大な軌跡を残したのは、村田豊先生 (意匠) と、現膜構造協会会長の石井一夫先生 (構造・構法)、構造の川口衛研究室、設備の井上宇市研究室であり、膜構造にかけた足跡は大きい。

ここに紹介する膜構造建築3例は、技術と快適性、省エネルギーに関する初期のものであり、垂直温度分布から判断する高さ方向と熱負荷 (蘭博)、エアドームのプロローアップの方法 (青函博)、送風ダクトの有無とドーム内の垂直温度分布、高さ方向と熱負荷 (シルクロード博) などは、筆者らが開発した新しい技術であり、膜構造の性能を良く捉えた開発となっているので参考にされたい。

### 2. 給気ダクトを設けたドーム内の垂直方向への温度分布 「蘭第12回世界会議展示部門会場エアドーム」

最近では、東京ドームなどで開催されている「世界蘭博覧会」が、日本での最初の開催は、1987年5月末に開催された「第12回蘭世界博覧会」図2. 1~3である。場所は小田急線の多摩川を渡った向ヶ丘遊園地内に建設された。「世界蘭博覧会」は、膜構造材として厚さ0.1mmの塩化ビニール透明フィルムを用いた。また「蘭博」の展示品は蘭であるので、太陽放射から紫外線や熱放射を遮断するため、エアドーム膜表面積の65~70%を遮光膜・日射遮へい膜として遮光率90%の銀膜をビニール膜の外側に設けた。

環境的、設備的には、垂直方向への温度分布がどのようになるかを調べ、膜材を通して出入りする熱負荷が、地上のどの程度の高さで居住環境に影響するかについて研究したものである。吹き出

し口の高さ的な位置関係によるが、夏期は地上5m～7m前後までの膜材の熱負荷が居住域に影響することが判った。

施設計画・設計のプロデューサーは村田豊先生である。井上研究室では、エアドームの環境制御や設備設計の分野で計画・設計に参加した。環境計画・建築設備を担当して体験したエピソードや施設概要などについて下記に示す。



図2. 1 エアドーム全景 第1ドーム(右)と第2ドーム(左)

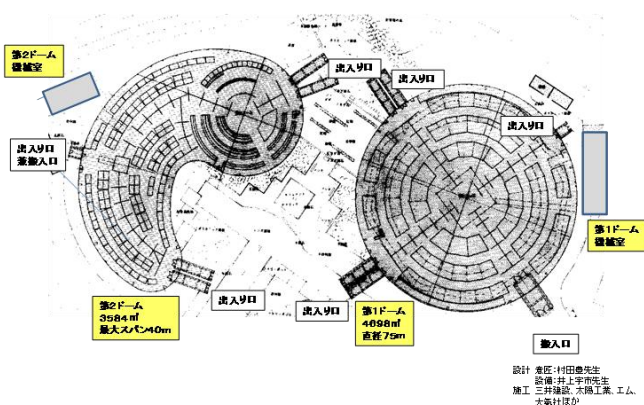


図2. 2 第1エアドーム(右)、第2エアドーム平面図(左)



第1ドーム内観

ダクトを設けると上下空気の攪拌は少なく温度成層をなす。



第2ドーム内観

図2. 3 第1ドーム、第2ドーム内観

工事が竣工し、ブローアップを明日に控えた夕方、村田先生から、報道関係の人も沢山参加して、ブローアップは明朝午前6時スタートという話があった。翌日定刻に現場に着くと5月末の朝の冷気が緊張感と同時に肌身に伝わり、空は快晴、風は静穏で無風状態に近く、村田先生の話では絶好のブローアップ日よりだとのこと、ブローアップがはじめての小生にとっては、加圧送風機が無事運転を続けてくれることを願うのみであった。翌朝は快晴で静穏状態、ブローアップに成功し難無きを得たが、ブローアップは、夜の「陸風」から昼の「海風」に切り替わる午前7～8時頃の無風状態をねらって実施することを体験した。

建築概要、設備概要について下記に解説する。

## 2. 1 建築概要、設備概要

### 2. 1. 1 建築概要

建築物名称：蘭第12回世界会議展示部門会場エアドーム

施 主：小田急電鉄株式会社

設 計 管 理：建築 村田豊建築事務所

構 造 川口衛構造設計事務所

設備 早稲田大学井上研究室  
 施 工：三井建設、太陽工業、エム、大気社（空調衛生）、  
 山陽電気工事（電気）

建 築 場 所：神奈川県川崎市多摩区長尾2丁目8番1号 他、  
 小田急向ヶ丘遊園内  
 用途地域・地区：住宅地域、第1種住宅専用地域、第2種住居専  
 用地域  
 主 要 用 途：仮設展示場  
 構 造 種 別：ケーブル補強空気膜構造（大臣認定「建設省神住  
 指発第60号」）  
 階 数：地上1階  
 工 事 期 間：1986年9月1日～1987年3月10日  
 敷 地 面 積：292,373.32 m<sup>2</sup>

建 物 概 要：主要構造材 ワイヤークーブル+防災加工テトロ  
 ネット+防災2級塩化ビニールフィルム  
 ・外部仕上げ：屋根・外壁 ワイヤークーブル+防災加工テトロ  
 ネット+防災2級塩化ビニールフィルム  
 ・外部建具：スチール製気密ドア（二重扉）

・第1ドーム・第2ドーム 建築概要

	第1ドーム	第2ドーム
床面積：	4698.0m <sup>2</sup>	3584.0m <sup>2</sup>
直 径：	75.0m	最大スパン 40.0m
最高の高さ：	19.5m	19.5m
膜表面積：	5890.0m <sup>2</sup>	5780.0m <sup>2</sup>
室 容 積：	47000.0m <sup>3</sup>	43800.0m <sup>3</sup>
膜の材料：厚さ0.1mm 塩化ビニール透明フィルム、(第1ドーム、 第2ドームとも)		
・遮光率90%の銀膜（膜表面積の65～70%）		

2.1.2 設備概要

博覧会の開催期間は、5月末の1週間程度であったので、建築設  
 備として加圧ファンが2台あるので、うち1台の予備ファンを運  
 転して内圧を保ち、館内には冷凍機などの冷房設備は設けず、もう1  
 台のファンを用いて外気冷房とエアワッシャーを組み合わせた新しい  
 空調システムを開発した。

なお空調方式は、展示品が蘭であることに配慮し室温10度以上、  
 湿度60%程度を保てるよう、外部に独立機械室を設け、エアワッ  
 シャーを設備し、ドーム内の環境制御を行った。

2.1.3 第1ドーム加圧送風装置系統図

ここでは第1ドーム図2.4のシステムについて解説する。

第1ドームは、直径75m、高さ19.5mの1重膜構造で、  
 室延べ床面積は5,625m<sup>2</sup>の巨大なエアドームである。高さを19.  
 5mに押さえたのは、20mを越えると避雷針または避雷導体の設  
 置が必要であるので、膜構造にかかる重量や費用の面から設置しな  
 いことにした。また、冷房換気設備は、開催期間が5月末の1週間  
 程度であったので、冷房・暖房設備は設けず、エアワッシャーを用

いた自然換気によって対応することにした。室内の条件は、最低気

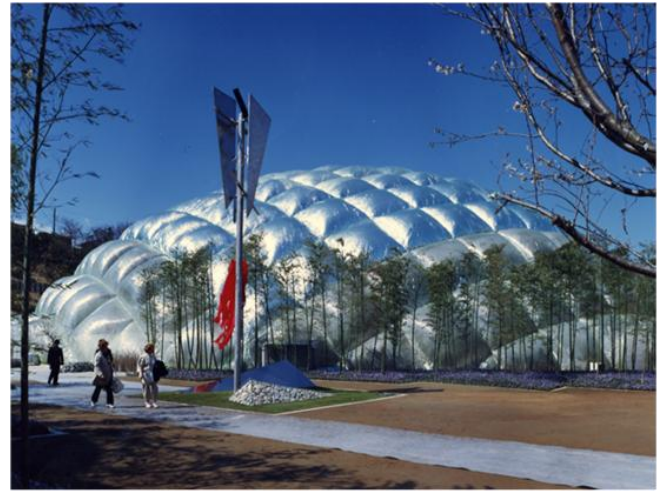


図2.4 第1ドーム外観

温10℃、湿度60%を、最高気温は30℃以下にできるようにドーム  
 膜面に遮光率90%程度の銀膜を65～70%程度設けた。  
 その他の特徴として排煙設備は、蓄煙式とした。エアドームの加  
 圧装置は、8万m<sup>3</sup> / h × 2台を設けたが、1台・1時間運転でブ  
 ローアップが可能な容量とした。膜面からのエアリーク量もこの1  
 台で賄えるが、他の1台は、ドーム内で万が一火災が発生したとき  
 や台風時の加圧ファン、故障時のバックアップ用として設置した。  
 その他、については、左頁の建築概要・設備概要を参照して下さい。  
 第2ドームもシステムは同じ方法を採用した。

2.2 防災設備と安全・安心に配慮した設備概要

この施設は不特定多数の観客が入場する施設であり、火災や台風、  
 地震時などに対して、安全・安心であることが要求される。膜面に  
 穴が空いた場合のブルームの性状図2.5、第1ドーム加圧送風装  
 置の系統図 図2.6、自動制御計装図 図2.7、などを以下に  
 示す。

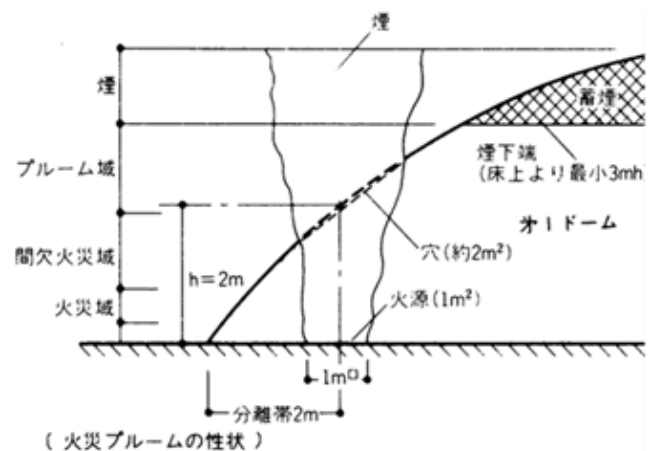


図2.5 火災時ブルームの性状  
 (なら・シルクロード博38 条申請資料より)

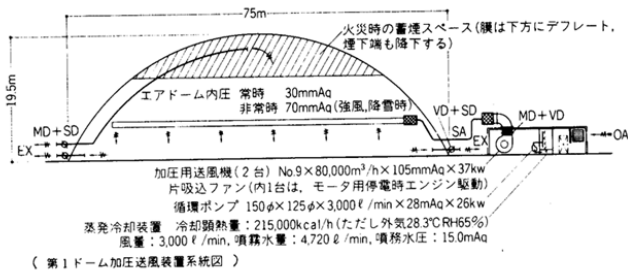


図2. 6 第1ドーム加圧送風装置系統図

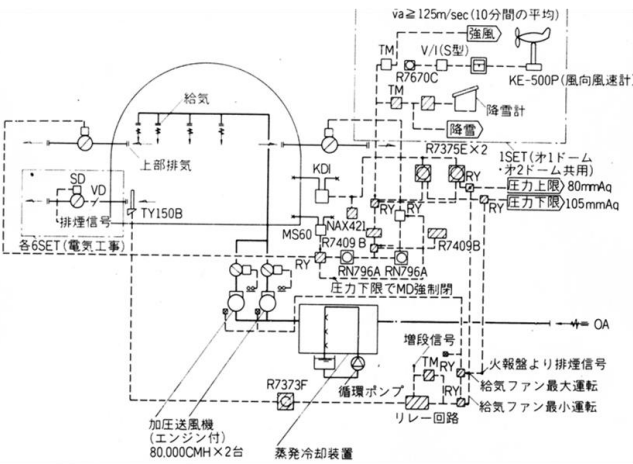


図2. 7 自動制御計装置

### 2. 3 蘭の生育条件

博覧会は5月の短期間であったが、設備設計を行う場合は、蘭の生育条件を知ることが大切である。まず日当たりは、ある程度当たらないと蘭は育たない。蘭の葉に損傷が無いような状態で日当たりを良くすることが必要である。しかし蘭には種類によって、赤外線や紫外線量に対して種類ごとに適量があるので、葉の温度を上げる赤外線、葉を痛める紫外線などの適量について知識を得ることが大切である。

①胡蝶蘭などは弱光線に適した種類であるので、日射遮へいに配慮した室内環境に設定することも重要である。

②冬期や中間期の夜などは最低室温は10℃以上、省エネルギーに配慮して、最高室温を20度程度に押さえるほか、遮光も重要な制御対象である。

③水やりは、蘭の種類によってその量を替えるが、詳しくはガイドブックを見るのがよい。また、夏の最高気温が28℃以下という蘭もあるので温度制御も必要である。

エアドームの内圧は、常時300Pa (30mmAq)とした。また強風、があるので、もう1台の予備ファンを運転して内圧を保ち、その間に館内降雪、地震時など非常時には、内圧を700Paまで制御できる装置となっている。火災時には、膜に穴が空きエアドームがデフレートするおそれがあるので、もう1台の予備ファンを運転して内圧を保ち、その間に館内にいる観客を出入り口や非常口から外部に避難させる。

### 2. 4 エアドームの環境実測

本エアドームは、東京ドームより1年前に竣工した建物である。それゆえ、エアドームとしては日本で初めて環境実測を行った建物となる。ここでは、1987年5月29日に実測したデータの、「火災時の火源によりエアドームに穴が空いたときの避難時間と煙下端」、「日射量と垂直温度分布」、「日射量と膜内表面温度」、「エアドーム内外の温度と相対湿度」、「膜内表面温度のシミュレーション結果」、「エアドーム内温度のシミュレーション結果」、「膜表面の散水とエアドーム各部温度シミュレーション結果」、38条申請に用いた計算結果など図2. 8～図2. 14のデータを示す。また、この実測データは三井建設の協力を得て竣工時に作成したものである。

#### 1) 火災と蓄煙 (38条申請の1例)

建築基準法第35条、同施行令第3章及び同第126条の2に抵触する場合は、建築基準法第38条の規定に基づく認定の申請が必要となる。一般にはこれに関する申請を「38条」申請と言っている。申請に当たって提出する書類は、下記の通りである。

- ① 認定申請理由、②防災計画書、③構造概要書、④送風機関係、⑤建築物維持保全計画書

建物種別や使用用途、構造等が変われば、日本建築センターの指導方針も変わってくるので、計画に当たってはセンターとの打ち合わせを事前に綿密に行うことが望まれる。

ここでは、博覧会でエアドームを計画したが、その蓄煙設備の実施例の1例を示す。

室内外を分離する建築部材、ここでは膜構造建築の膜材がこの対象となり、分離帯から2mの点図2. 5の点で火災が発生したとして発生する排煙量を計算する。火源を1㎡とし300kcal/s (348W/S㎡)の発熱があるとする。膜には地上2mの位置で2㎡の穴が空いたとする。ドーム内の煙の下端を床さ3mとする。火災時の火源によりエアドームに穴があいたときの避難時間と煙下端高さについて図2. 8に示す。また、加圧用送風機性能曲線を図2. 9に示す。図2. 5が火災ブルームの1例である。

施設の使用目的、内容などが変わると、火源等の初期条件が変わることがあるので、関係官庁との事前打ち合わせが必要である。

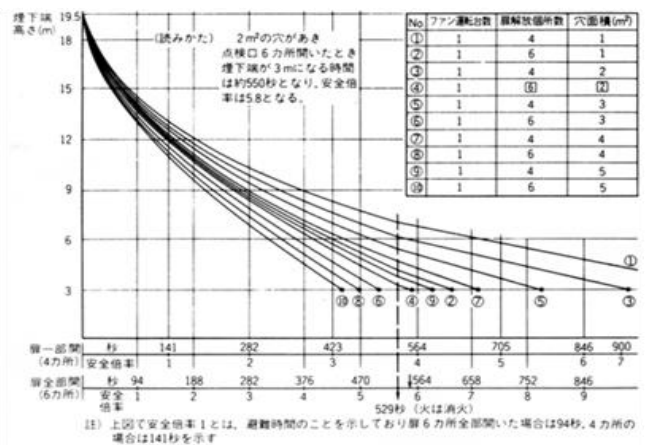


図2. 8 火源により穴があいたときの避難時間と煙下端

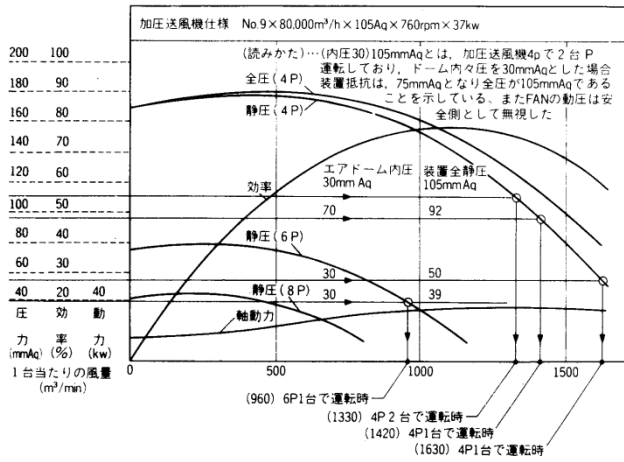


図2. 9 加圧用送風機性能曲線

またここではドーム内上部、下部の空気温度を推定したが、ある程度の精度で推定することができた。

1) 日射量と垂直温度分布 図2. 10

晴天日の床上0.1mの終日の温度は、最低12℃、最高24℃程度であった。また、地表面と床上3mの居住域の温度差は、終日2~3℃程度であった。また、ドーム内は温度成層をなしているため、冷房を行う場合は室内の暖かい空気を上部にため、重い冷風をなるべく地上付近に供給することによって省エネルギーが可能になることが判った。加圧用外気の吹き出しは、なるべく上部で吹き出し、温度成層を作った方がエネルギー消費量が減ると考えられる。

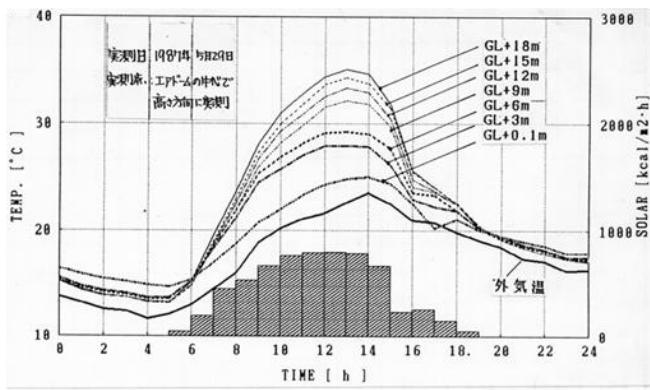


図2. 10 日射量と垂直温度分布

2) 日射量と膜内表面温度 図-2. 11

夜間は何れの方角も温度差はあまりないが、ドーム外表面に銀幕を張っていても、日中の温度は30℃~45℃程度になる。地上部分の環境は、蘭および人間にとっても快適であることが判った。

3) エアドーム内外の温度と相対湿度 図-2. 12

実測は、ダクト最遠部温度、外気取り入れ口温度、エアワッシャー出口温度を実測した。湿度は、エアワッシャー出口、外気取り入れ口、エアドームの中心の湿度を実測した。

エアワッシャーを運転すると室内の温度は7~8℃程度低下する。反対に湿度はエアワッシャー内で、40%から80%程度に上昇する。

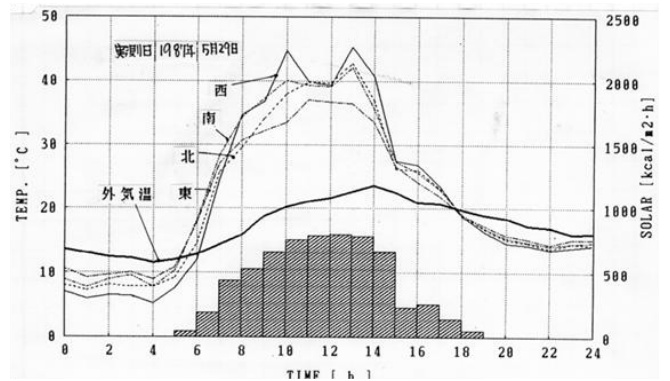


図2. 11 日射量と膜内表面温度

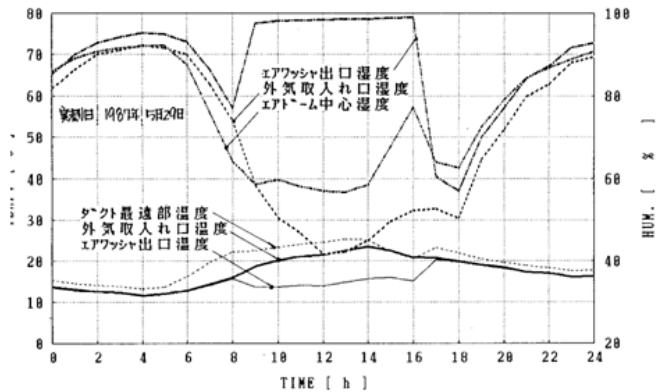


図2. 12 エアドーム内外の温度と相対湿度

4) 膜内表面温度のシュミレーション結果 図-2. 13

膜表面温度は、東西南北4点の膜内表面温度の平均値の実測値と計算値を比較したものである。薄膜を用いたエアドームの室温に対する太陽放射の影響は、タイムラグとして数分程度あるが、ほぼ同時に太陽放射の電磁波が膜表面温度に反映することが判った。

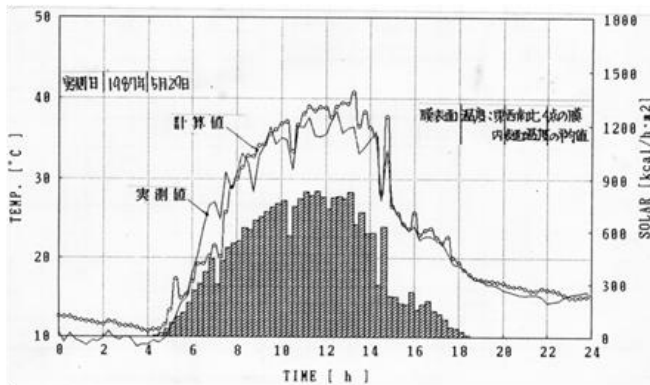
5) エアドームに散水しない場合の各部温度 図-2. 14

日射があると、12正午では、膜表面温度は正午に53℃程度になっているが、膜に当たった短波長の太陽放射が長波長(熱)になるためであることが判った。また、上部空間は44℃、下部空間は39℃程度、地表面は39℃程度、地中10cmは30℃程度であった。散水すると膜表面温度は40℃程度、地表温度は35℃程度まで下がる。膜表面温度は13℃、地表温度は4℃程度下がる。

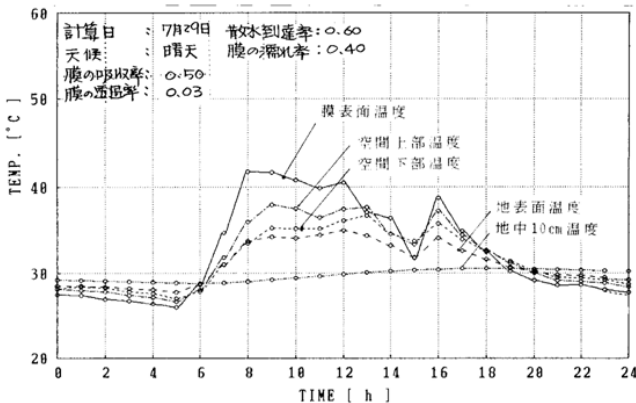
6) エアドームの散水効果

晴天日に散水を行うと膜表面温度は15℃程度下がることが判った。散水をする、と瞬時に膜温度が下がるが、散水と同時に、室温も瞬時に10℃前後下がることが判った。その理由として、空気の温度が瞬時に下がるのではなく、散水することによって膜面温度が瞬時に下がり、熱放射も瞬時に減少するので、あたかも空気温度が

低下したかに見える。環境測定で用いるグローブ温度計もこの原理を利用したものである。



膜表面温度：東西南北4点の膜内表面温度の平均値  
図2. 1.3 膜内温度のシミュレーション結果



b) エアドームに散水（濡れ率40%）した場合の各部の温度  
図2. 1.4 エアドームの散水効果

### 3. エアドームのプロアーアップ 「青函トンネル開通記念博覧会テーマ館」

北海道と本州をつなぐ青函トンネルの開通を記念した「青函トンネル記念博覧会」が、1999年7月9日から、9月18日までの約2ヶ月間に渡って、青森市安方の青森県観光物産館（ASPM）周辺の会場で開催された。本エアドーム図3. 1、図3. 2は、この博覧会最大の建物で、会場の東端のテーマゾーンに建設された。施設計画のプロデュースは電通が行い、テーマ館（エアドーム）の計画・設計・施工は電通のもとで小川テック（現小川テック）が行った。

井上研究室では、エアドームの環境制御や設備設計の分野で計画・設計に参加した。環境計画・建築設備を担当して体験したエピソード、施設概要などを以下に示す。

なおこの建物の設備的なメインテーマは、世界最大の長さを持つエアドームを送風機側から、短時間で問題なくプロアーアップができるからであった。

その方法は、地上で組み立てられた膜表面に30から50mm厚

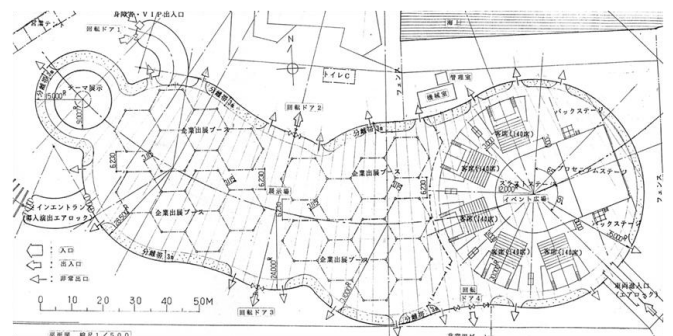
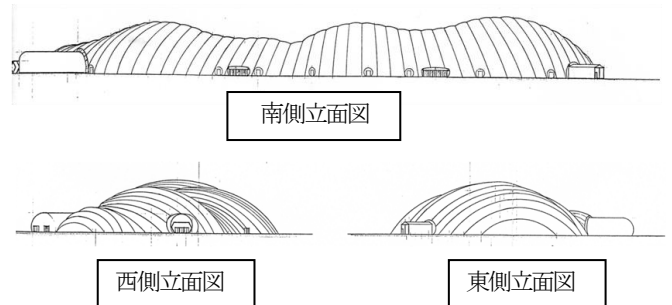
の水で覆い、送風機を運転すると送風機側からプロアーアップが始まり、問題なくプロアーアップが完了できるかが、研究課題であった。この技術は小川テックで開発されたもので、もの見事に成功した。

テーマ館として作られたエアドームの長さは約204m、最大幅は80m、高さは19.5mで、これまでに建設されたエアドームとして、当時の時点で長さは世界最長であると言われていたが、21世紀に入った現在（2008年7月）も、その位置は不動である。

また、何れの仮設ドームも最大高さが19.5m以下であるのは、20mを越えると国内法である建築基準法上避雷針が必要になるので、膜にかかる重量やコストの低廉に配慮して20m以下とする施設が多い。



資料: 青函トンネル博覧会実行委員会公式記録  
図3. 1 青函博覧会 エアドーム長さ204m、アスパム(右/物産館、手前左下は八甲田丸)



b) エアドーム平面図  
図3. 2 青函博覧会エアドーム立面図、平面図

竣工時のブローアップは午前7時10分開始9時5分終了、1時間55分を要したが無事ブローアップが完了した。ブローアップに当たって、風のあるなしが最も気を使うところであるが、形状の調整、散水の効果、ロープのジョイント金物に外力がかからないなどが職人技であると感心した。  
「青函トンネル」が開通し、80年の歳月の経つ「八甲田丸」も大役が終わった。



a) 加圧送風気室

用途地域：無指定：防火地域 無指定、その他の指定：なし  
主要用途：展示場  
敷地面積：85358 m<sup>2</sup>  
建築面積：10847.8 m<sup>2</sup>  
延べ面積：10847.8 m<sup>2</sup>  
容積対象床面積：10847.8 m<sup>2</sup>  
体積：109569.6 m<sup>3</sup>  
表面積：16559.7 m<sup>2</sup>  
階数：地上1階  
最高高さ：19.5m

構造形式：ケーブル補強一重空気膜構造  
膜材料：防火2級 ワイヤークーフル+キャンパス  
使用膜材：ポリエステル生織にPVCコーティングをした防火2級キャンパステフロン膜と比較しても3kg/m<sup>2</sup>程度の重量があるが、火炎などによって膜に穴が空いても自重による膜の降下時間はそれ程変わらない。  
収容人数：展示場2,800人 イベント広場700人 計3,500人

避難計画：膜の降下と天井に貯めた煙の降下に対して、十分な余裕をもって退出できるような計画とした。展示ブース等の内装は、軽量鉄骨軸組、フレキシブルボード等の難燃性以上の防火性能を持つ材料を採用した。また、建築基準法の38条申請をしている。

1988/5/14  
膜構造のブローアップ

時間	運転状況	F-1 %	F-2 %	F-3 %
7時15分	送風開始	50		
8時00分	送風Keep	50		
8時15分	2側回転ドアまでエア達する	80		
8時30分		80	50	20
8時33分		80	50	50
8時37分		80	80	80
8時50分	送風機室開口部追加	80	80	80
8時57分	車両搬入口テント仮止め開始	80	80	80
8時59分		90	90	90
9時05分	車両搬入口メインエントランス一部フェルダ剥離、内圧30mmAq	80	80	80
9時10分	内圧10Aq	連続運転		

注)①膜構造のデザイン 仙田満 設備 井上市市  
②施工 基礎部分 鹿島建設東北支店  
地上テント部分 小川テント(現小川テック)  
③体積 109569.6m<sup>3</sup> 加圧送風機 49200m<sup>3</sup>×91mmAq×3台

b) 加圧ファンの運転状況

図3.3 加圧送風機室とブローアップファンの運転状況

### 3.1 建築および設備概要

#### 3.1.1 建築概要

建築物名称：青函トンネル開通記念博覧会テーマ館  
施主：青函トンネル開通記念博覧会実行委員会  
設計者：電通 小川テント(現小川テック)  
構造：川口衛構造設計事務所  
設備：早稲田大学井上研究室  
施工：小川テント(現小川テック)  
敷地の地名番地：青森市安方1-1-40

#### 3.1.2 設備概要

##### 1) 電気設備

①受変電設備、②非常電源設備、③照明設備、④放送設備、⑤報知・通報・誘導設備

##### 2) 加圧送風設備

①屋外にある機械室に設置されている送風機からダクトを用いて外気を送り込む。送風量は、室内設定内圧に対する漏気量以上とし、ドームからの排気量をダンパーによって自動調節を行って内圧を自動調整する。

##### ②内圧設定

常時：25mmAq 10分間の平均風速 0~15m/sec

③送風機50mmAq 10分間の平均風速15~25m/sec

##### ④送風機

F-1、2、3 820cmm×91mmAq×3φ×200V×18.5kW

F-4 1690cmm×86mmAq×3φ×200V×45kW

⑤内圧制御、送風機台数制御、排気ダクトのモーターダンパー開度調節による自動制御

##### ⑥非常時の避難

ドーム内で火災が起きた場合、暖かい煙をドーム頂部にため、煙が降下してくる短時間の間に観客は出入り口や非常口から避難する。

##### ⑦蓄煙設備

関係法規に準拠し、蓄煙設備を設ける。避難対象人員は2,800人である。



この建物も前述の蘭博と同様、建築基準法38条申請をしているが、内容については蘭博とほぼ同じであるので、ここでは省略する。

### 3) 空調および換気設備

#### ①空調設備

会期が7月9日～9月18日までであるので、冷房設備のみとし、暖房は行わない。冷房方式は、室内に水冷式小型パッケージ(20馬力、直吹きタイプ50台)を設置し冷房する。

### 4) 給排水衛生設備

①給水設備 給水設備は設けない。エアドーム内には、便所、洗面所等の設備は一切無い。

②排水・通気設備 雨水排水

③消火設備 消火器具 屋外消火栓を7箇所に設置する(非常発電機、起動装置付き消火ポンプ)。

④非常照明装置、自動火災報知設備、非常放送設備、避難口誘導灯20箇所、通路誘導標識、煙り感知器連動ダンパー、などあり

⑤ガス設備 エアドーム内ではガスは使用しない。

### 5) エアドーム関係

①エアドームのブローアップは、早朝で風の流れが静穏域のときに開始する。

②青函博エアドームでは、ブローアップの前に膜材を地上で組み立てるが、組立が終わりブローアップの直前、膜の上に30～50mmの水をホースで散水する。左側の奥に加圧送風機室があるが、午後7時10分水の押さえで送風機のまわりから上手くブローアップを始める。

#### ③ブローアップの観察

ここではブローアップの状況をなるべく克明に報告する。また、ブローアップには構造の権威、石井一夫先生も参加していた。我々技術者にとって青函博最大のイベントは、施工時のエアドームが超大型の送風機を運転して、無事にブローアップが完了することであった。青函博エアドームの最初の頁(73頁左下)に掲載した写真は、青函博会場の全景である。左側に白く横たわって見える建物がメイン会場の展示であるエアドームであった。現地での関係者の方々によると、204mと言う長さは世界最長であると言っていたのを今でも鮮明に覚えている。

ドームの右側の三角形の建物が14階建ての青森県観光物産館・「アスパム」である。この14階から取った写真が74頁に示す「エアドームのブローアップ」の写真である。この写真の撮影方法は、エレベータで地上に降りてはエアドームのブローアップの状況を確認し、数十分おきにアスパムに上がって、決めておいた「定点」から撮ったものである。

午前7時5分静穏の中、4台の加圧ファンのうちF-1～F-3の送風量の少ないファン、1台当たり820CMM(49200m<sup>3</sup>/h)の運転が開始された。

このファンの送風量 図3.3は、約49200m<sup>3</sup>/h台 であるので、送風機を3台運転した送風量の最大時には、1時間当たり1.3回程度の換気量を持つ。最も大きいF-4のファンはブローアップ時には用いず、火災などで膜に穴が開いたときに用いる非常用フ

ァンである。

8時の写真は、7時5分や15分の写真と比べると、経過時間に比例してあまり膨らんでいないのは、最初は徐々に形状を調整しながら給気しているため、形状の状態によって手動でON、OFF運転を行い調整しているからである。8時の状態でも、ファン側からブローアップは整然と行われているのは、膜面上に散水した30～50mm深の表面水が重石の働きをしているからである。

8時以降9時5分まで1時間5分をかけてブローアップは終了する。計画時の計算では1時間でブローアップ図3.4が完了することになっていたが、これだけの巨大なドームになると、ファン能力は1時間で完了できる能力を持っていても、膜裾や膜面の形状を調整しながら、安全で安心できる状態でブローアップする方法として特に問題は無かったと評価する。



■AM7:10 送風機運転

■AM7:15

■AM8:00



■AM8:30

■AM8:55

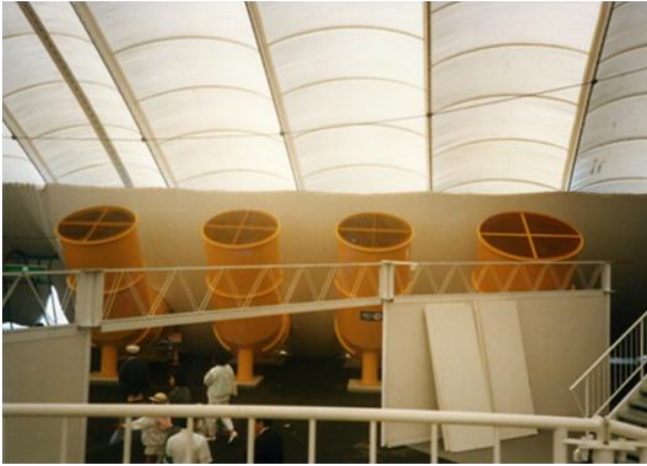
■AM9:05 (終了)

図3.4 エアドームのブローアップ AM9時5分終了

図3.5は、上段からブローアップが完了した状態で、中央部分は2重膜とし、その頂部からダクトで排気を取り、必要に応じて地上の床から外部に排気している。膜の下端から3m程度は半透明の膜を用い、心理的に安心感を得るため、外部が見える環境を造った。中段の写真はドーム内への吹出し口4個の写真である。下段は博覧会中に環境実測を行った筆者と学生達である。



a) エアドーム内観 /天井部分は2重膜、しゃ熱効果は大



b) エアドーム加圧ファンの吹出し口

(吹き出し口はF1~F3、F4 に対応) ファンの容量は、F1~F3 全開1時間でブローアップができる容量



c) 実測に参加した学生(早稲田大学・昭和女子大学の院生学部生)

図3. 5 花ひらく膜構造建築

響しないことが判った。

下記に施設の敷地周辺写真、平面図、立面図、加圧送風機と吹出し口を示した。

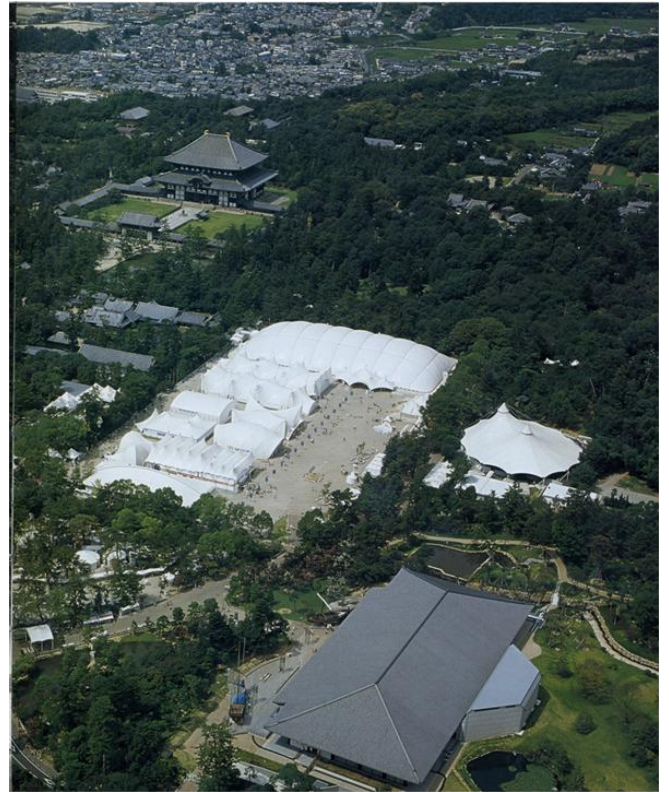


図4. 1 春日野会場：中央にある博覧会施設の一番奥のエアドーム /出展：なら・シルクロード博公式記録

**4. 給気ダクを設けないドーム内の垂直方向への温度分布、  
「なら・シルクロード博企業出展館」**

奈良県100年・奈良市制90周年事業として、「民族の英知とロマン」をメインテーマとして開催された「なら・シルクロード博」図4. 1~図4. 3は、国の内外から682万人が参加し成功裏に終了した。

本会場は、感動と発見のゾーン「登大路会場」、ふれあいと交流のゾーン「春日の会場」、遊びと体験のゾーン「飛火野会場」、出会いと出発のゾーン「平城宮跡会場」の4会場によって構成されている。会場全体のプロデューサーとして菊竹清訓先生が担当した。建物の用途は、多数の企業が出展する企業出展館としてのエアドームである。環境および建築設備の計画・設計は、菊竹先生からの依頼を受け、施設全体に渡って井上市研究室が担当した。

この建物の設備的な研究テーマは、蘭博ではエアワッシャーから供給される給気にビニールダクトを地上3m高の位置に設置したが、今回のシルクロード博では、加圧ファンの吹出しダクトを中止し建設費の軽減をはかった。実測の結果、吹出し口の位置を地上5m程度とし吹出し方向を上部空間へ吹出せば、冷房負荷にはそれほど影

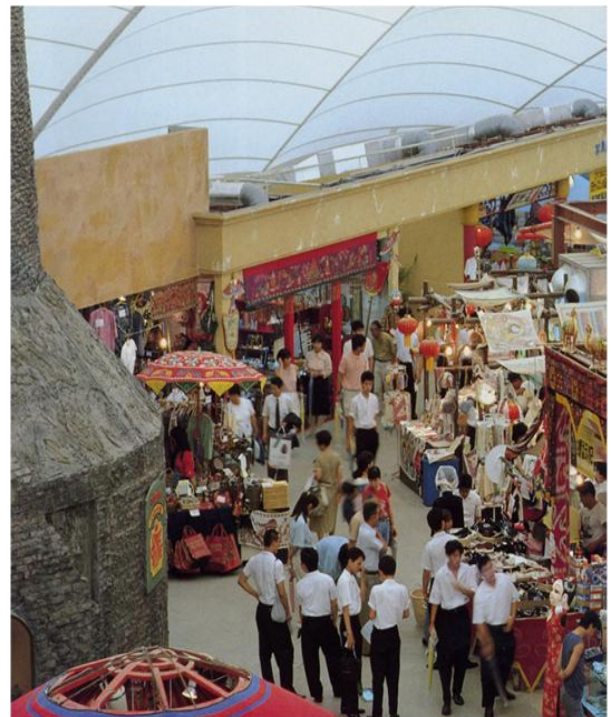


図4. 2 エアドームの内観



出展：なら・シルクロード博公式記録

図4. 3 なら・シルクロード博企業出展館、一番奥に見えるエアドームが「オアシス館」

#### 4. 1 建築および設備概要

##### 4. 1. 1 建築概要

評定番号：BCJ-M029

評定年月日：昭和62年2月12日

建築物名称：「なら・シルクロード博」企業出展館

設計者：菊竹清訓建築設計事務所

- ・構造 松井源吾+ORS事務
- ・設備 早稲田大学井上宇市研究室

建築場所：奈良市春日野町 地域・地区

- ・指定 無し

敷地面積：140,000 m<sup>2</sup> 建築面積 4,925 m<sup>2</sup>

延べ面積：4,925 m<sup>2</sup>

用途：展示場 地上1階 最高高さ 15m

この建物は、建築基準法第35条及び同施行例第3章の規定に抵触するため建築基準法第38条の規定に基づく認定を申請した。

空間容積：51,000m<sup>3</sup> 居住域容積 14,800m<sup>3</sup>

膜表面積：6,120 m<sup>2</sup> 床面積 4,295 m<sup>2</sup>

最大収容数：2,500人

膜材 塩ビ膜：0.5mm厚

構造上の特色：ケーブル補強の空気膜構造 気圧により印フレート状態を保つ

骨組形式の種類：ケーブル補強の空気膜構造

膜屋根部分材料：PVCコーティングポリエステル繊維織布と構造用スパイラルロープ

床の構造：土間コンクリート 基礎の構造：連続基礎、地番の長期地耐力 5 t/m<sup>2</sup>

##### 4. 1. 2 設備概要

###### 1) 環境・設備計画

①電気設備 受変電設備、屋外キュービクル、発電機設備なし

②空調設備 水冷冷房専用パッケージによる単一ダクト方式 comp 7.5kW×51台

③換気設備 第2種換気 加圧送風機50,000m<sup>3</sup>/h×3台

平常時1台、台風など非常時3台まで運転可能

常時換気回数 0.98回/h

給気口2,400×1,800 給気量50,000m<sup>3</sup>/h、

上部排気口 790φ×2

上部排気量 18,700m<sup>3</sup>/h

エアリーク量 31,300m<sup>3</sup>/h

排煙設備 蓄煙方式

給排水 直圧給水設備、雑排水・雨水排水設備 屋外消火栓設備(水槽14m<sup>3</sup>)

給湯設備、厨房設備 無し

運転管理用実測点 ①水平面全点日射量 ②外気温湿度 ③屋外地中温度

④室内地中温度、⑤室内垂直温度、膜面温度(計10点) ⑥室内湿度(床上1.5mh) ⑦透過日射量

奈良シルクロード博のシンボリック建物が、テーマ館としての「ロードサットオアシス館」平面図、立面図、加圧送風機吹き出し口周り断面図 図4.4である。

建物の使用用途は各テナントの展示場である。

建物は幅100m×奥行50m×高さ19.5mの大きさで、0.5mm厚の塩ビ製である。

エアドームの加圧装置は、50,000m<sup>3</sup>/h×3台のファンを常時は10から30mmAqに加圧し、台風や強風時などの非常時には内圧を50mmAq程度に加圧して建物の形状を維持した。また、エアドームの裾部分、膜材の縫い目や膜材間の縫い目からのエアリーク量を計算して加圧送風機の容量を算定した。この計算で行くと、常時0.98回/h程度の換気回数になっているが、加圧送風機の風量は、非常時を対象に1回/h程度を見込めばよいことが分かった。

また、この施設は、4月から10月、春から秋の期間限定の使用であるので、冷房設備のみを設けた。全冷房容量は、10馬力の水冷パッケージ51台を設備した。延べ床面積は5000m<sup>2</sup>であるので、1m<sup>2</sup>あたり0.102冷凍トン/m<sup>2</sup>、約330W/m<sup>2</sup>となる。

この負荷計算では、冷風は重いので、冷房範囲を床上5m程度とし、その上部は、非冷房域とした。また、天井面には熱だまりが生

じるので、排気ダクトを計画したが、室内に設置した垂直温度分布の計測データによって、排気の可否を決めることにした。

ドームの加圧方式は、第2種換気であるので、排気系統にはダンパーがなく、排気ガラの調整のみによって排気量が調節できる装置になっている。また、ダンパーからのエアリークを少なくするため、排気ダンパーには対交流型ノーリークダンパー(排煙ダンパー)を設備した。

エアドームのコンクリート基礎部分の膜裾および膜と膜との接続用ミシン目などからのエアリーク量を計算すると、エアドームの内圧を30mmAqとすると31,300m<sup>3</sup>/hであった。膜面基礎部分の周長が300mであるので、単位長さ当たりのエアリーク量は約100m<sup>3</sup>/(hm)程度となる。風のない平常時は、建物頂部の相関変位から考え内圧を15mmAq程度にまで落とせそうであるので、構造設計者の意見を聞くことが重要である。

一般の大規模事務所ビルの冷房負荷と比較しても熱負荷が大きい。冷房負荷として大きいのは、観客の発熱、照明器具の発熱、展示照明や室内発熱機器、建物のエアリーク量を減らすなど、省エネルギー

一化が望まれるが、照明はLEDについて検討するなど今後の技術に期待したい。

## 2) 膜構造エアドームの熱負荷計算、実測値とシミュレーション結果の比較

本施設は、日本における膜構造建築の初期のもので、夏季の熱負荷計算は下記の1)～3)の方法によって行うことにした。また、実測結果を4)に示す。

1) 非定常熱負荷計算式を構築。建物の熱負荷シミュレーションプログラムを策定し熱負荷計算値図4.5とした。

2) 水冷式冷却塔から排出するエネルギー量図4.6を実測・計算し、エアドームから排出するエネルギー量の実測値とした。地中埋設や空気中の冷却水配管から逃げる熱量図4.7、図4.8も計算した。

3) 計算値と実測値を比較図4.9。整合性があるので、1)の計算値を膜構造熱負荷計算の一般解とした。

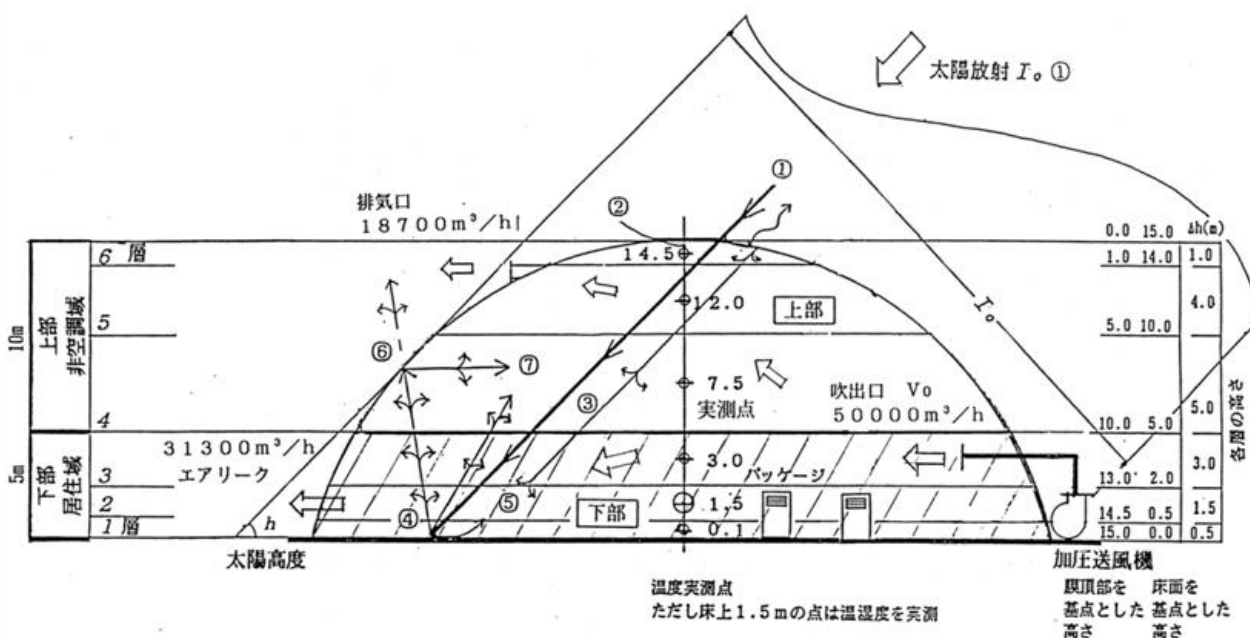


図4.5 エアドームの夏季の熱負荷計算プログラム

## 4) 実測結果

この施設は博覧会施設であるので、夏季のエアドーム内の温度や湿度、居住域と非居住域を分ける垂直方向への温度分布が研究の対象となる。

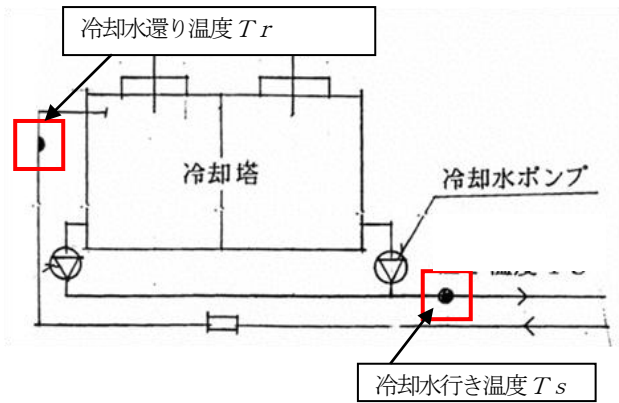
2番目は設計時の計算方法がはたして正しいかを検証するため、設計時の計算式に実測値の値を用いて求めたシミュレーション値と、実測によって得られた実測値を比較し、膜構造エアドームの熱負荷計算に対する一般解を求めた研究である。「エアドームの夏季の熱負荷計算プログラム」の図の通りである。膜面からの熱負荷は、膜材が0.8mm厚の薄膜であるので、膜面の熱容量は小さく定常計算でも問題はないと考えた。地面は熱容量が大きく、非定常計算が良いと考えレスポンスファクター法を用いて計算した。

「居住域と非居住域」の境界は、加圧送風機の気流が浸透する範囲とした。

実測値から求めた境界の垂直方向への位置は、図4.7のb)によって床上5m程度にあると読める。

「加圧送風機と吹出し口」の断面図からも判るが、エアドームのエアリーク量を賄うため、吹出し口から吹出した温度の高い空気(外気)は7m以上に溜まり、5m以下は冷房域であることが判る。

熱負荷の推定は、負荷計算値と冷却塔からの除去熱量を比較し精度良く合ったので計算式は「一般解」が得られたとした。



冷却水量L PACへ  
4 2 0 m<sup>3</sup>/h (配管は建物内外とも地中配管)

図4. 6 冷却塔周りの実測点

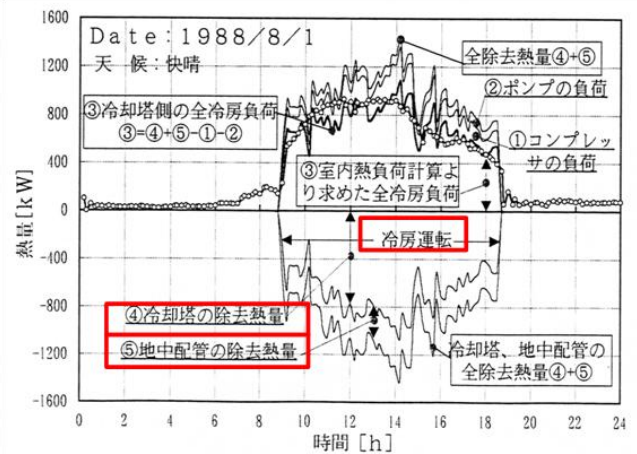
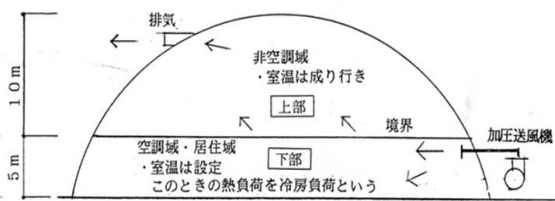
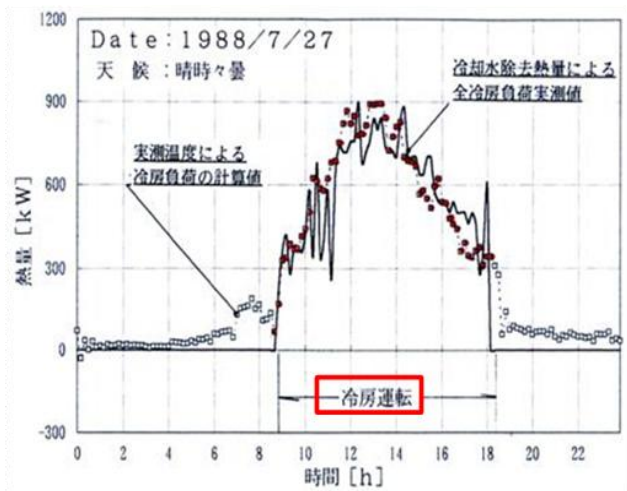


図4. 8 熱負荷の計算値と冷却塔での実測値との比較

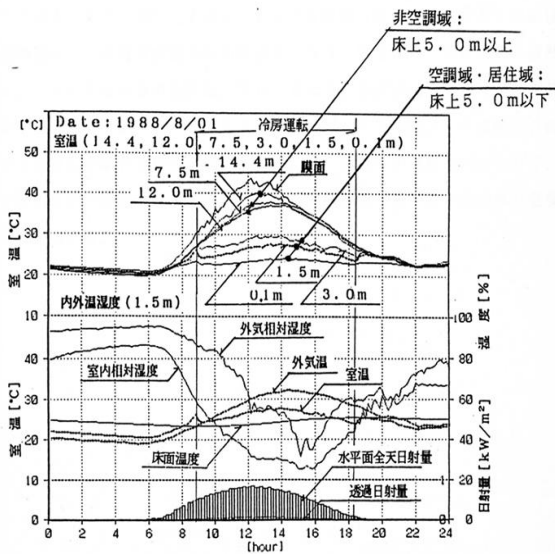


a) 居住域 (下部) と非居住域 (上部)



実測値から求めた熱負荷実測値④+⑤

図4. 9 エアドーム熱負荷の計算値と実測値



b) 実測値から求めた居住域と非居住域の境界

図4. 7 居住域と非居住域

## 5. 全体のまとめ

a) 居住域 (下部) と非居住域 (上部)

日本に本格的な膜構造建築が到来するのは、「日本万国博覧会」における「電気事業連合会パビリオン」、「アメリカ館」透明フィルムを用いた「万博お祭り広場の大屋根」などがある。アメリカ館を除く

いずれの建物も構造は川口研究室、設備は井上研究室が担当し、それぞれの専門分野で膜構造建築の礎をなした。また、これらの設計・計画に関与してきた弟子の一人として、この技術が膜構造建築界の発展に末永く伝承していくことを願ってやまない。

b) 実測値から求めた居住域と非居住域の境界

吹き出口の位置も関係するが、居住域、非居住域の境界は、大規模ドームの場合、地上5～7mの高さにある。居住域が地上3～5m程度と考えると、冷房時の膜面からの熱負荷は、地上5～7m程度で良いことが判った。

## 参考文献

1. なら・シルクロード博公式記録、財団法人 なら・シルクロード博協会
2. なら・シルクロード博 企業出展館、建築基準法第38条の規定に基づく認定申請添付書類 奈良県知事 上田繁潔、なら・シルクロード博協会、菊竹清訓建築設計事務所

3. 構造建築に用いる塩ビ膜とフッ素樹脂膜の光特性と熱特性に関する実験研究、日本建築学会計画系論文報告集第 451 号 19～27 頁、1993
4. 佐野武仁：大空間エアドームの夏期、中間期における垂直温度分布の実測と推定に関する研究、日本建築学会計画系論文報告集第 472 号 21～29 頁、1995
5. 大空間エアドームの夏期の熱負荷の推定に関する研究、日本建築学会計画系論文報告集第 489 号 37～46 頁、1996
6. 佐野武仁、ほか：膜構造建築に用いる四フッ化エチレン樹脂膜の汚れと経年変化に関する実験研究、日本建築学会計画系論文報告集第 546 号 23～29 頁、2001
7. 佐野武仁：半透明膜材を用いた大空間エアドームの熱特性に関する研究」1996. 10、博士論文（早稲田大学で学位取得）
8. 青函トンネル開通記念博覧会、青森 EXPO' 88 公式記録
9. 青函トンネル開通記念博覧会テーマ館（仮施設）設計図書、1994

10. 蘭博、青函博に関する建築基準法第 38 条の規定に基づく認定申請添付書類

註) この論文は、早稲田大学稲門建築会の中に、「退職された先生方のライブラリー A1 版」を作成し、在学生や卒業生、その他一般の方々が容易に先生方の足跡が見られ、在学生にとっては教育の一環となることが可能としたものであります。最初は建築系の先生方、続いて構造系の先生、その次が設備系の先生と言うことになり、今年度は井上宇市先生のライブラリーを作成することになりました。ライブラリーの内容は、先生の業績、研究論文、著書、作品集、その他によって構成されています。

す。その中で筆者が計画・設計に携わった「膜構造建築の環境計画および設計」のうち代表的な作品について執筆致しました。ここでは膜構造建築に従事または関係している方々に、わが国における空気膜構造（エアドーム）の「環境計画および設計」の発展がどのようなものであったかについてご報告致しました。

---

## Environmental planning and design of membrane structures architecture

key words: membrane structures    modular air-inflated membranes    habitation zone (lower part) and non-habitation zone (upper part)  
thermal load

Takehito Sano \*)

### SYNOPSIS

The beginnings of membrane structure architecture in Japan include a number of structures from Expo '70 in Osaka: the Fuyo Group Pavilion designed by Yutaka Murata, the Federation of Electric Power Companies of Japan's "Electrium" floating theater, and the U.S. Pavilion built by the Obayashi Corporation. The Festival Plaza was the largest event site at the Expo, and had a huge 330m wide by 110m deep roof. This roof was comprised of 10.8m by 10.8m modular air-inflated membranes, and the large roof was created by arraying these air-inflated membranes in two dimensions. The air-inflated membranes were comprised of 8 upper layers and 5 lower layers of transparent film. One of the upper layers was a cobalt blue transparent film, to make the blue sky on fair days even more vivid.

Such was the beginning of membrane structures architecture in Japan. Eventually the technology of the U.S. Pavilion in Japan blossomed into facilities like the Tokyo Dome, and came into wide use in permanent facilities, including large-scale gymnasiums, baseball stadiums and event sites. Structures such as the Fuyo Group Pavilion and the "Electrium" floating theater (Electric Power Pavilion) were used as temporary exhibition facilities at various events throughout the country.

The author has participated in environmental planning and environmental design of air supported membrane structures for the "Orchid Expo," "Seikan Expo," "Nara Silk Road Expo," and many other events. Air domes for temporary buildings are beautiful and short-lived, like summer fireworks displays, but people remember them for a long time with a sense of nostalgia.

This paper provides a comprehensive survey of many years of research on technologies for membrane structures architecture used as temporary domes. These technologies include accident prevention and safety, pressurization and heating/cooling equipment, and smoke filling in case of fire. The paper gives a topic by topic explanation of the technological innovations and discoveries, and the technologies mastered at the practical level, in each era. The explanation focuses on: (1) the Exhibition Hall Air Dome for the Twelfth World Orchid Conference, whose theme was vertical temperature stratification inside the dome (with air supply ducts), (2) the Theme Pavilion for the Seikan Tunnel Opening Commemorative Expo, whose theme was blowing-up an air dome, and (3) the Corporate Pavilion at the Nara Silk Road Expo whose theme was vertical temperature distribution inside a dome (without air supply ducts).

This research clarified the following points regarding air supported membrane structures.

a) Habitation zone (lower part) and non-habitation zone (upper part)

Genuine membrane structures architecture arrived in Japan with structures like the Electric Power Pavilion, U.S. Pavilion, and the transparent film large roof of the Expo Festival Plaza at Expo '70 in Osaka. For all of these buildings, the Kawaguchi Laboratory was in charge of structure, and the Inoue Laboratory was in charge of equipment. These structures laid the foundations of membrane structure architecture in various specialized fields. As one apprentice involved in the design and planning of these structures, I hope that this technology will be handed down for a long time to continue progress in the field of membrane structures architecture.

b) Boundary between the habitation zone and non-habitation zone found from actual measurements

This issue also involves the positions of blow-off openings, but the boundary between the habitation zone and non-habitation zone lies at a height of 5–7m above ground in the case of a large-scale dome. By taking into account that the habitation zone is about 3–5m above ground, it was determined that a height of 5–7m above ground is satisfactory in terms of the thermal load from the membrane surface during heating/cooling.

I also hope that this technology can serve as a technical reference for future air domes.

---

\*) Prof.,Dr.Eng. at Showa Women's University, Graduate School of Practical Science,  
Dept. of Architecture , Environmental Design.