

〔特別寄稿〕

空気膜構造の計画および環境設計の実証的検証 に関する一連の研究

日本における空気膜構造の環境計画・設備設計の始まり

佐野 武 仁

はじめに

1970年代、空気膜構造に端を発した膜構造建築は、十年遅れて、1980年以降、膜材そのものと熱負荷特性などが近いガラス建築へと発達する。本稿では膜構造建築に的をしぼり報告する。なお本研究は、社団法人 日本膜構造協会 2008年度「特別論文賞」を標記タイトルで受賞した。

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」(以下、大阪万博) 図 1.1 にある。コルビジエに師事し帰国後間もない村田豊先生が設計された「富士グループ(現:芙蓉グループ)・パビリオン」(施工 大成建設 以下、芙蓉パビリオン)と電気事業連合会「電力館 別館水上劇場」(施工 竹中工務店 以下、水上劇場)、そしてデービス・プロディー・チャーマイエフ・ガイズマー・デハラック・アソシエーツ設計の「アメリカ館」(施工 大林組)などである。また大阪万博最大のイベント会場「太陽の塔」および「お祭り広場」図 1.2 は、幅 330 m×奥行 110 m の巨大な大屋根で覆われていた。10.8 m 角の空気膜をモジュール化し二次元的に配列した大屋根で、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。上膜 8 層のうち上層の 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た。その後、大阪万博での空気膜構造の技術は、「東京ドーム」「秋田スカイドーム」をはじめとする恒久施設として開花し、全国各地のいろいろな催し物の仮設施設の会場などとしても利用され、普及してきた。

筆者は、これまで多くの博覧会や、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、半世紀以上に亘る研究を集大成したもので、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・シルクロード博覧会企業出展館」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。

1. 膜構造建築の発達史

膜構造建築は、数十年から百年程度またはそれ以上のライフ(耐久性)がある恒久膜構造建築(最大 5~6 万人から数千人程度の観客が入場できる野球場や体育館やプールなど)と、短期間の仮設建物として計画される仮設膜構造建築(博覧会や遊戯施設など)とに、大きく分類できる。

構造的に区分すると 3 つの方式がある。

- 1) マスト等を地上から立てケーブルを張り膜材料を上方から吊り下げる構造 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)である。この構法は設営が容易であるので、テントに近い



図 1.1 大阪万博会場(部分)

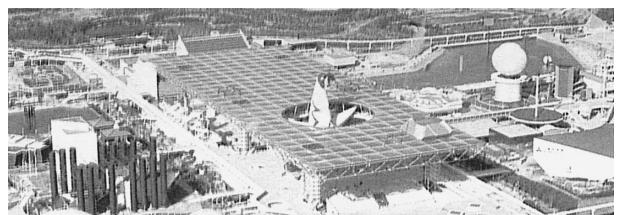


図 1.2 「太陽の塔」および「お祭り広場」

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・オッターの「ミュンヘンオリンピック競技場」や、丹下健三設計の「国立代々木競技場」室内水泳場、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。

- 2) **鉄骨造・木造等の骨組をつかって膜を張る骨組膜構造** 北京オリンピックの水泳競技用スタジアム「国家水泳センター」はこの構法で、鋼製のフレームに半透明の膜を張って膨らませ、外観はLEDの照明技術を巧みに利用し水泡に包まれたような空間を表現した膜構造である。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。
- 3) **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。これは、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 20~30 mmAq 程度高くし形状を維持する構法である。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二重膜構造もあるが、建設費が高むので実施例はあまりない。

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、筆者が在席した早稲田大学 井上宇市研究室が、村田豊先生の依頼を受けて、「水上劇場」の建築設備設計を担当したのが、筆者と膜構造建築との係わりの始まりである。これは水深 40 cm 程度の池に浮かんだ膜構造の劇場である。入場者がスクリーンの映画などを見ている間 (15分程度) にセンター軸を中心に劇場が回転し、降口に接岸して入場者を下ろすと、劇場は水面を反転して入口に接岸し、次の入場者を乗せるという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動線計画によって優れた能力を発揮する劇場となっていた。

1.1 日本における膜構造建築の始まり

日本で最初のエアドーム (空気膜構造) を手がけた設計者は、上述のように村田豊先生である。その第1号は、大阪万博の「芙蓉パビリオン」**図 1.3** で直径 4 mφ 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つく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、赤と橙の縞模様で彩色したエアチューブ内に高压空気を送風して、形状を維持した。大阪万博では、休憩施設なども膜構造としてつくられた。

東京ドーム (施工 竹中工務店) 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、46,775 m²、収容人数は 55,000 人、「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仮設建築や恒久施設として全国に広がっていった。



図 1.3 大阪万博「芙蓉パビリオン」

1.2 膜構造建築の計画と環境設計への係わり

前述の大阪万博に続き、神戸ポートアイランド博覧会 (1981 年) のエアドーム「芙蓉グループパビリオン」も村田豊先生の設計であった。この建物は二重膜構造で、内側の展示スペースは鉄骨でつくられたスペースで、外側は 0.1 mm 厚の透明塩化ビニルフィルム (以下、透明塩ビフィルム) で覆われている。この透明塩ビフィルムの外側の鉄骨に沿って吸水性マットを敷きクレソンを栽培し、収穫したクレソンは入場者に配布した。このクレソン栽培スペースの外側に、透明塩ビフィルム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。

井上研究室は、膜構造建築 (エアドーム) の建築計画に際し、環境設計や設備設計など多方面から受注があり多数の膜構造建築に関与でき、「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を行うことができた。環境・設備計画に当たっては、空気膜構造の形態と内圧の関係、38 条申請、世界初の試みとしての蓄煙方式など、膜構造建築に関する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徹雄氏から膜構造建築の経験をお聞かせいただいたことであった。村田先生は、膜構造建築の構造・構法系の第一人者は横浜国立大学の石井一夫先生であるとよくおっしゃっていた。

あれから二十年近くが経過した今日、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)、構造の川口衛構造設計事務所、設備の井上宇市研究室が膜構造建築にのこした足跡は大きい。

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、膜構造の性能をよく捉えた新しい技術であるので、次代の空気膜構造（エアドーム）の技術的資料になれば幸いである。

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「世界らん展」の、日本での最初の開催は、1987年5月末の「蘭第12回世界会議」（以下、蘭博）図2.1～3である。エアドームは小田急線の多摩川を渡った向ヶ丘遊園内に建設された。「蘭博」は、膜構造材として厚さ0.1mmの透明塩ビフィルムを用いた。「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。吹出し口の高さの位置関係によるが、夏期は地上5～7m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以下に示す。

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、「報道関係の人も多数参加し、ブローアップ。明朝午前6時現地集合」という話があった。翌日の現場は、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かった。村田先生の話では「絶好のブローアップ日和」とのことで、ブローアップが初めての筆者は、加圧送風機が無事に運転を続けてくれることを願うのみであった。快晴で静穏状態が続き、ブローアップに成功した。ここで筆者は、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という体験をした。建築概要、設備概要について下記に解説する。



図2.1 エアドーム全景 第1ドーム(右)・第2ドーム(左)



図2.3 エアドーム内観
第1ドーム(上)・第2ドーム(下)
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1・第2ドームとも)

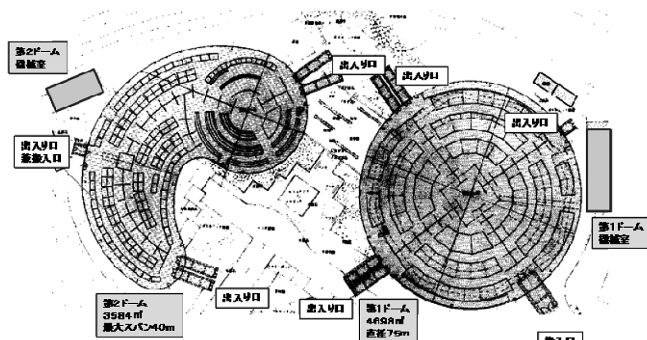


図2.2 エアドーム平面図 第1ドーム(右)・第2ドーム(左)

設計 藤野・村田豊先生
設備 井上研究室
施工 三井建設、次臨工業、エム、大氣社ほか

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		
設計監理・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(井上宇市, 佐野武仁)		
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 ²		
建物概要:	主要構造材 ワイヤークーブル+防災加工テロンネット+防災2級塩化ビニルフィルム 外部仕上げ 屋根・外壁 ワイヤークーブル+防災加工テロンネット+防災2級塩化ビニルフィルム 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
床面積:	4,698.0 m ²	床面積:	3,584.0 m ²
直径:	75.0 m	最大スパン:	40.0 m
最高の高さ:	19.5 m	最高の高さ:	19.5 m
膜表面積:	5,890.0 m ²	膜表面積:	5,780.0 m ²
室容積:	47,000.0 m ³	室容積:	43,800.0 m ³
膜の材料(第1ドーム, 第2ドームも同一仕様):	厚さ0.1mm 塩化ビニル透明フィルム, 遮光率90%の銀膜(膜表面積の65~70%)		
付属建物:	第1, 第2機械室, その他		

2.1.2 設備概要

開催期間は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, 予備のファンを1台運転して内圧を保ち, 展示品の蘭に配慮し最低室温10℃最高室温30℃・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, 自然換気に対応した。外気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

第1ドーム, 第2ドームとも同一方法を採用したので, 本項では第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の一重膜構造で, 室延べ床面積は5,625m²の巨大なエアドームである。国内の建築基準法上, 20mを越えると避雷針または避雷導体の設置が必要となるので, 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, 高さは19.5mに抑えた。空調換気設備は, 2.1.2に上述した。室内の温・湿度を保てるようドーム膜面に遮光率90%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, 80,000m³/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。



図2.4 第1ドーム外観

2.2 防災設備と安全・安心に配慮した設備概要

「蘭博」は不特定多数の観客が入場する施設なので、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。そこで、膜面に穴があいた場合のプルームの性状図 2.5、第1ドーム加圧送風装置系統図 2.6、自動制御計装図 2.7、などを以下に示す。

エアドームの内圧は、常時 300 Pa (30 mmAq) とした。強風の場合、もう 1 台の予備ファンを運転して内圧を保ち、豪雨や地震などの非常時には、内圧を 700 Pa まで制御できる装置となっている。火災時には、膜に穴があきエアドームがデフレートするおそれがあるので、同様に予備ファンを運転して内圧を保ち、その間に観客を出入り口や非常口から外部に避難させる。

2.3 蘭の生育条件

「蘭博」は5月末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。日当たりがある程度ないと蘭は育たないので、蘭の葉に損傷がないような状態で日当たりをよくすることが必要である。しかし蘭は種

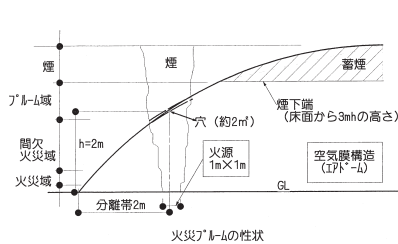


図 2.5 火災時プルームの性状

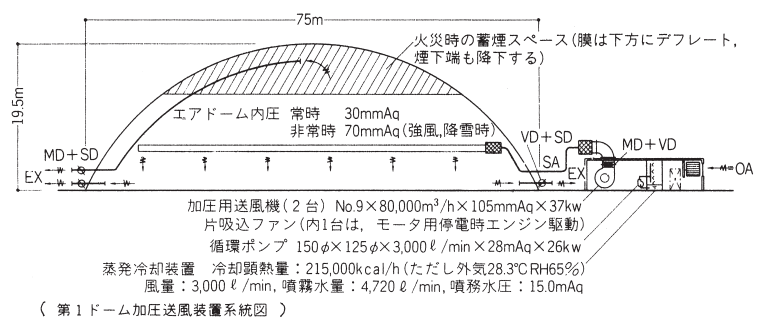


図 2.6 第1ドーム加圧送風装置系統図

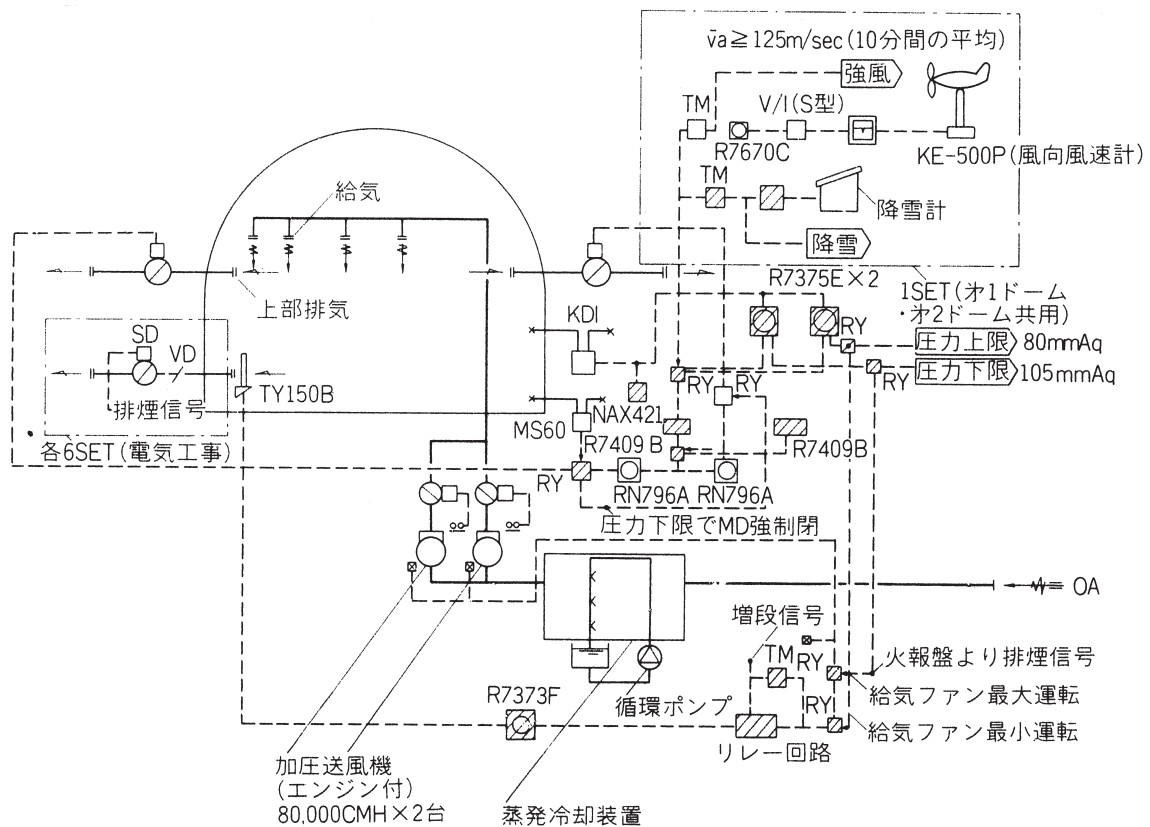


図 2.7 自動制御計装図

類が多く、赤外線や紫外線量に対して品種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℃程度に抑えるほか、遮光も重要な制御対象である。最高室温が28℃以下という蘭もあるので温度制御も必要である。
- 3) 水やりは、蘭の種類によって量が異なるので、詳しくはガイドブックを参照して把握する。

2.4 エアドームの環境実測

これは、東京ドームより1年前に竣工した。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38条申請に用いた計算結果データの、「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」、「加圧送風機性能曲線」、「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」図2.8～図2.14を示す。また、この実測等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。

2.4.1 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。

本項では、「蘭博」で計画したエアドーム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1m²とし300 kcal/s (348 W/Sm²)の発熱があるとす。膜には、地上2mの位置で2m²の穴があいたとする。ドーム内の煙の下端を床上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、加圧送風機性能曲線を図2.9に示す。図2.5が火災プルームの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、関係官庁との事前の打ち合わせが必要である。

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。

2.4.2 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。ドーム内は温度成層をなしているの、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

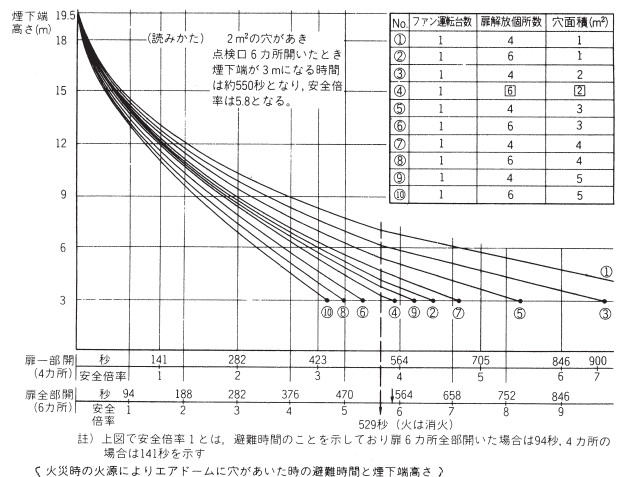


図2.8 火源により穴があいたときの避難時間と煙下端

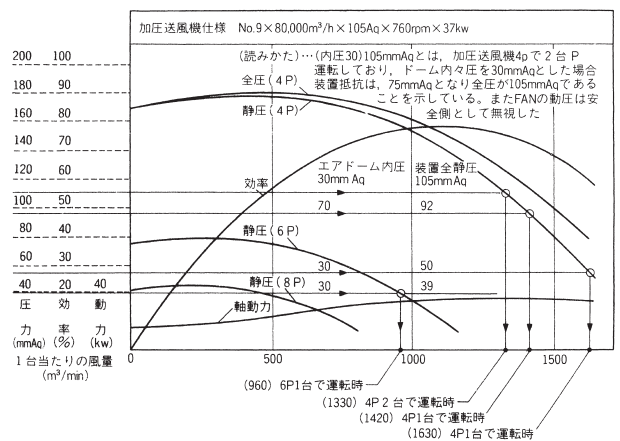


図2.9 加圧送風機性能曲線

エネルギーが可能になることが判った。加圧用外気の吹出しは、なるべく上部で吹出し、温度成層をつくった方がエネルギー消費量が減と考えられる。

2.4.3 日射量と膜内表面温度 図 2.11

夜間はいずれの方位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。

2.4.4 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、40~80%程度に上昇する。

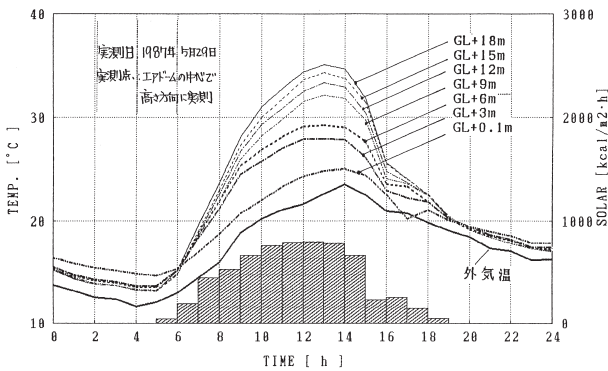


図 2.10 日射量と垂直温度分布

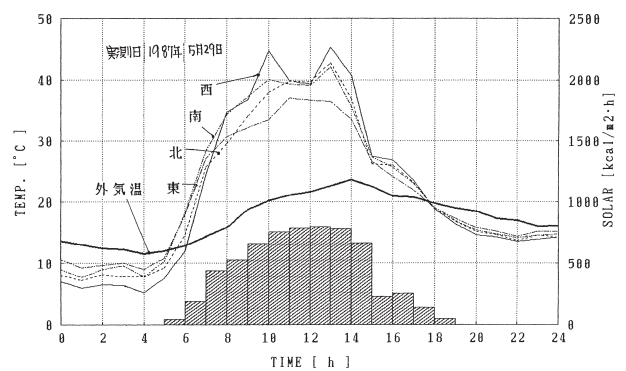


図 2.11 日射量と膜内表面温度

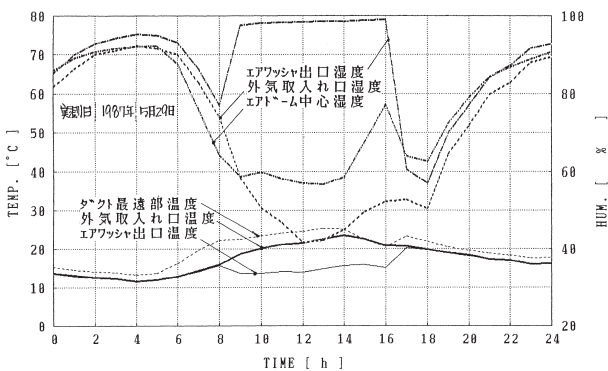


図 2.12 エアドーム内外の温度と相対湿度

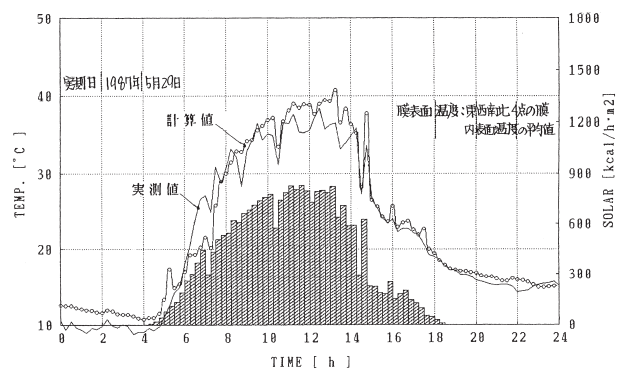
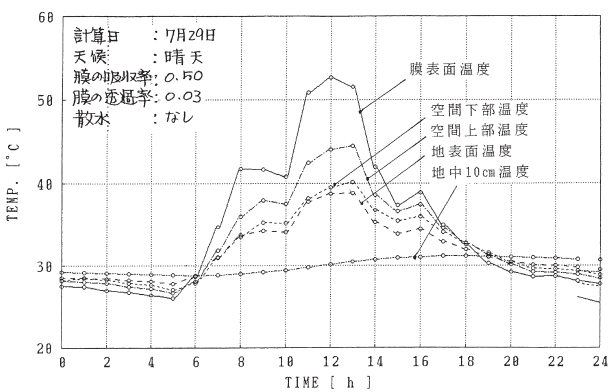
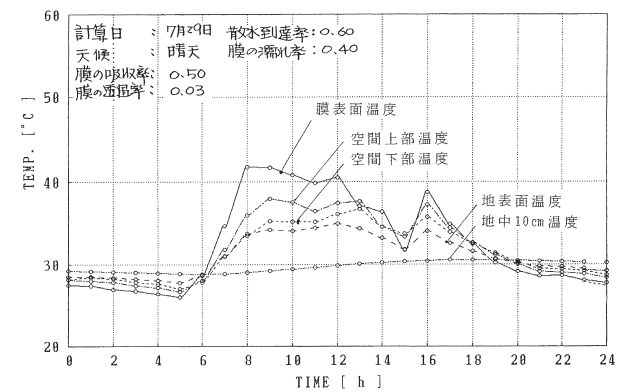


図 2.13 膜内表面温度のシミュレーション結果



a) エアドームに散水しない場合の各部温度



b) エアドームに散水(濡れ率40%)した場合の各部温度

図 2.14 エアドームの散水効果

2.4.5 膜内表面温度のシミュレーション結果 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。

2.4.6 エアドームに散水しない場合と散水した場合の各部温度 図 2.14 a), b)

日射があると、膜表面温度は正午に53℃程度にもなるが、これは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℃、地表面温度は4℃程度下がる。

2.4.7 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瞬時に15℃程度下がることが判った。それと同時に室温も瞬時に10℃前後下がることが判った。その理由は、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瞬時に膜面温度が下がり熱放射も減少するので、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。

3. エアドームのブローアップ「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「青函トンネル開通記念博覧会」が、1988年7月9日から、9月18日までの約2カ月間に亘って、青森市安方の青森県観光物産館(ASPAM 以下、アスパム)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ント(現: 株式会社小川テック)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。以下に施設概要、体験エピソードなどを示す。

テーマ館としてつくられたエアドームの長さは、約204m、最大幅は80m、高さは19.5m。これまでに建設されたエアドームとして、1988年当時、長さは世界最長であるといわれていたが、21世紀に入った現在(2008年7月)もその位置は不動である。本施設も「蘭博」のドームと同様、最大高さが19.5mであるのは、上述したように、20mを越えると避雷針などが必要になるので、膜にかかる重量やコストの低廉に配慮したためである。

本施設の設備的な研究課題は、短時間で送風機側から世界最長のエアドームのブローアップが完了できるかであった。その方法は、小川テントで開発された技術で、地上で組立てた膜の表面に散水し30~50mm厚の水で覆い、送風機を運転すると送風機側からブローアップが始まるというものである。



図 3.1 青函博会場
エアドーム(左) アスパム(右) 八甲田丸(左下)

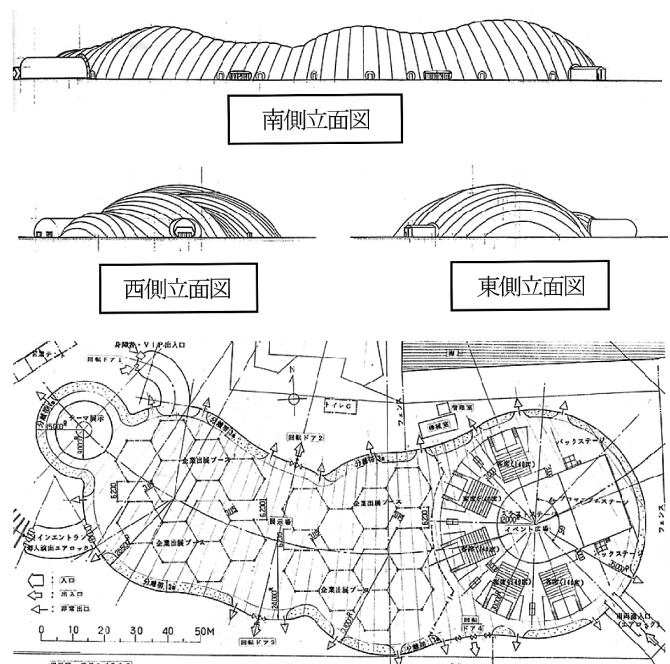


図 3.2 青函博エアドーム 立面図(上), 平面図(下)

竣工時のブローアップは午前7時10分に開始し午前9時5分終了と、1時間55分を要したが無事完了した。ブローアップに当たっては、風の有無が最も気を使うところであるが、ドームの形状の調整、散水量の調節、ロープのジョイント金物部分に外力がかからないようにする工夫などが、職人技であると感心した。

「青函トンネル」が開通し、八十年の歳月をもつ「八甲田丸」も大役を終えた。

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: 株式会社小川テック)
構造: 川口衛構造設計事務所
設備: 早稲田大学井上研究室 (井上宇市, 佐野武仁)
施工: 小川テント (現: 株式会社小川テック)
敷地の地名番地: 青森市安方1-1-40
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: 85,358 m²
建築面積: 10,847.8 m²
延べ面積: 10,847.8 m²
容積対象床面積: 10,847.8 m²
体積: 109,569.6 m³
表面積: 16,559.7 m²
階数: 地上1階
最高高さ: 19.5 m
構造形式: ケーブル補強一重空気膜構造
膜材料: 防煙2級 ワイヤークーブル+キャンバス
使用膜材: ポリエステルの生織にPVCコーティングをした防煙2級キャンバステフロン膜と比較してかなり軽量 (3kg/m²) であるので、火災などによって膜に穴があいても自重による膜の降下時間は長くなる。
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: 膜の降下と天井にた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もつ材料を採用した。また、建築基準法の38条申請をしている。

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: 25 mmAq 10分間の平均風速 0~15 m/sec

③送風機 50 mmAq 10分間の平均風速 15~25 m/sec

④送風機 F-1, 2, 3 820 cm×91 mmAq×3φ×200 V×18.5 kW

F-4 1690 cm×86 mmAq×3φ×200 V×45 kW

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様であるので、ここ

では省略する。

3) 空調および換気設備

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ない。
- 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カ所に設置〈非常発電機、起動装置付き消火ポンプ〉）
- ④非常照明装置設置，自動火災報知機設備，非常放送設備，避難口誘導灯 20カ所設置，通路誘導標識，煙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本エアドームは膜材を地上で組立て、ブローアップの直前、水を膜材の上30～50 mmhになるようホースで散水する。左側の奥に加圧送風機室があり、午前7時10分ファンON、水の押さえで送風機のまわりからブローアップを始める。
- ③ブローアップの観察 ブローアップの状況をなるべく克明に報告する。ブローアップ当日は構造の権威、石井一夫先生も参加していた。我々技術者にとっての青函博最大のイベントは、竣工時に超大型の送風機を運転してエアドームのブローアップが無事に完了することであった。図3.1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。関係者の方々の「204 m という長さは世界最長である」という話を今でも鮮明に覚えている。

午前7時10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820 m³/min（49,200 m³/h）の運転が開始された。このファンの送風量図3.3は、約49,200 m³/h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回程度の換気量をもつ。

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あいたときに用いる非常用である。

ドームの右側の三角形の建物は14階建てのアスパムである。「エアドームのブローアップ」図3.4はこの14階の「定点」からの写真で、地上と14階とを幾度も往復し、ブローアップの状況を確認しながら筆者が撮ったものである。

8時の写真は、7時40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。これは、形状を調整しながら手でON/OFF運転を行い徐々に給気しているため、この状態でもファン側からブローアップが整然と行われているのは、膜面上に散水した30～50 mmhの表面水が重石の働きをしているからである。

それから午前9時5分まで、ファンONから1時間55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が完了することになっていたが、長さ204 mもの巨大なドームになると、これほどのファン能力をもっていても、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ことを第一に考えたので、計画とは相違しても特に問題はなかったと評価する。

図3.5 a)は、ブローアップが完了した状態で、中央の天井部分は二重膜とし、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3 m程度は半透明の膜を用い、心理的な安心感をもたらすため、外部が見える環境をつくった。図3.5 b)はドーム内への吹出し口4個（F1～F4）である。図3.5 c)は竣工時の委員会風景、図3.5 d)は博覧会中に環境実測を行った筆者と学生達である。

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

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1988年4月23日から10月23日まで、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「春日野会場」、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



a) 加圧送風機室

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10分	送風開始	50		
8時00分	送風Keep	50		
8時15分	2個同時起動までエア達する	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	送風機室閉口部追加	80	80	80
8時57分	車両搬入ロケット仮止の開始	80	80	80
8時59分		90	90	90
9時00分	車両搬入ロケットメインランス一部ウェルター剥離、内圧30mmAq	80	80	80
9時10分	内圧10Aq			

注) ①膜構造のデザイン 仙田満 設備 井上宇市 ・佐野武仁
 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(掛川リテック)
 ③体積 105569.6m³ 加圧送風機 45200m³×91mmAq×3台

b) 加圧ファンの運転状況



■AM 7:10 送風機 ON

■AM 7:15

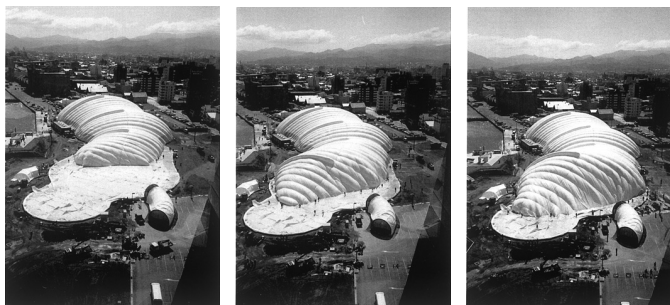
■AM 7:40



■AM 8:00

■AM 8:30

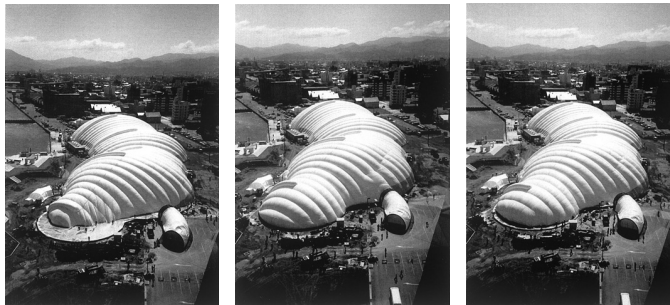
■AM 8:45



■AM 8:50

■AM 8:55

■AM 9:00



■AM 9:03

■AM 9:04

■AM 9:05 (終了)

図 3.4 エアドームのブローアップ

図 3.3 加圧送風機室とブローアップファンの運転状況



a) エアドーム内観/天井部分は二重膜、遮熱効果は大



b) エアドーム加圧ファンの吹出口 (吹出口は右側の F1~F3, 左端の F4 (予備・停止) 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) 竣工時の委員会風景



d) 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

備の計画・設計は、菊竹先生からの依頼を受け、施設全体に亘って井上研究室が担当した。

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、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程度とし方向を上部空間へ吹出せば、冷房負荷にはそれほど影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。

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」ロードサットオアシス物語館

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: 早稲田大学井上研究室(井上宇市, 佐野武仁)

建 築 場 所: 奈良市春日野町 地域・地区・指定 なし

敷 地 面 積: 140,000 m² 建築面積 4,925 m²

延 べ 面 積: 4,925 m²

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: 51,000 m³ 居住域容積 14,800 m³

膜 表 面 積: 6,120 m² 床面積 4,295 m²

最 大 収 容 数: 2,500 人

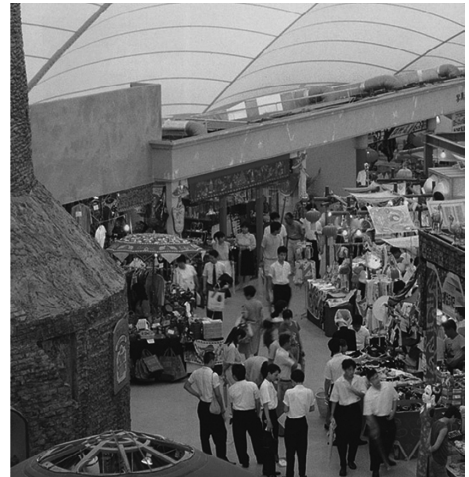


図 4.2 エアドームの内観



図 4.1 春日野会場 博覧会施設(中央)のエアドーム(奥)



図 4.3 奥が「ロードサットオアシス物語館」

膜材: 塩ビ膜 0.5 mm 厚

構造上の特色: ケーブル補強の空気膜構造 気圧によりイン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/m²

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 7.5 kW×51 台

③換気設備 第2種換気 加圧送風機 50,000 m³/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 50,000 m³/h,

上部排気口 790φ×2

上部排気量 18,700 m³/h

エアリーク量 31,300 m³/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 14 m³)

給湯設備, 厨房設備 なし

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 1.5 mh) ⑦透過日射量

なら・シルクロード博のシンボリックの建物が, テーマ館としての「ロードサットオアシス物語館」平面図, 立面図, 加圧送風機吹出し口周り断面図, 概要図 4.4 である。

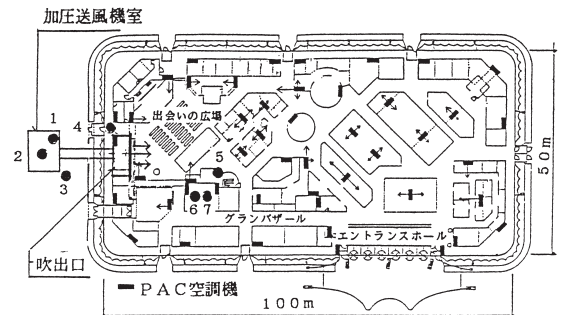
建物の使用用途は各テナントの展示場である。

建物は幅 100 m×奥行 50 m×高さ 15 m の大きさで, 0.5 mm 厚の塩ビ製である。

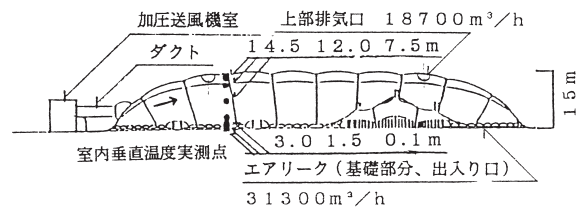
エアドームの加圧装置は, 50,000 m³/h×3 台のファンを常時は 10~30 mmAq に加圧し, 台風や強風時などの非常時には内圧を 50 mmAq 程度に加圧して建物の形状を維持した。また, エアドームの裾部分, 膜材の縫い目や膜材間の縫い目からのエアリーク量を計算して加圧送風機の容量を算定した。この計算でいくと, 常時 0.98 回/h 程度の換気回数になっているが, 加圧送風機の風量は, 非常時を対象に 1 回/h 程度を見込めばよいことが判った。

また, この施設は, 4 月から 10 月という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 5,000 m² であるので, 1 m² あたり 0.102 冷凍トン, 約 330 W/m² となる。

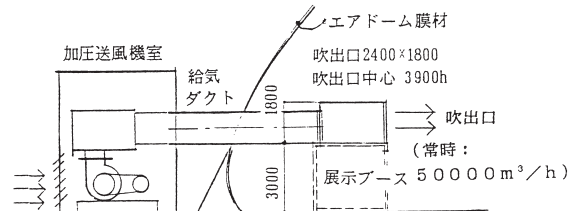
この負荷計算では, 冷風は重いので, 冷房範囲を床上 5 mh 程度とし, その上部は, 非冷房域とした。また, 天井面には熱だまりが生じるので, 排気ダクトを計画したが, 室内に設置した垂直温度分布の計測データによって, 排気の可否を決めることにした。



a) Nドーム平面図



b) 立面図



c) 加圧送風機と吹出し口

・実測点 1: 水平面全日射量 (計30点)	5: 室内垂直温度、膜面温度 (計10点)
2: 外気温湿度	6: 室内湿度 (床上1.5m)
3: 屋外地中温度	7: 透過日射量
4: 室内地中温度	
・空間容積: 51000 m ³	・加圧送風機: 50000 m ³ /h, 3台
・居住域容積: 14800 m ³	平常時1台: 50000 m ³ /h
・膜表面積: 6120 m ²	非常時3台: 144000 m ³ /h
・床面積: 4295 m ²	・常時換気回数: 0.98回/h
・最大収容数: 2500人/h	・給気口: 2400×1800
・膜材: 塩ビ膜 0.5mm厚	給気量: 50000 m ³ /h
・冷房設備: 水冷パッケージ Comp 7.5 kW×51台	・上部排気口: 790φ×2
	上部排気量: 18700 m ³ /h
	・下部排気量、エアリーク量: 31300 m ³ /h

d) 概要

図 4.4 エアドーム

平面図 (a), 立面図 (b), 加圧送風機と吹出し口周り断面図 (c), 概要 (d)

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30 mmAqとすると31,300 m³/hであった。膜面基礎部分の周長が300 mであるので、エアドーム下部膜面の単位長さ当たりのエアリーク量は、1 m当たり約100 m³/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15 mmAq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、夏期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3)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。

3) 実測結果

この施設は博覧会施設であるので、研究対象は①夏期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、②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ものでもある。「エアドームの夏期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0.8 mm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、非定常計算がよ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影響する範囲とした。

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

「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7 m以上にたまり、5 m以下は冷房域であることが判る。

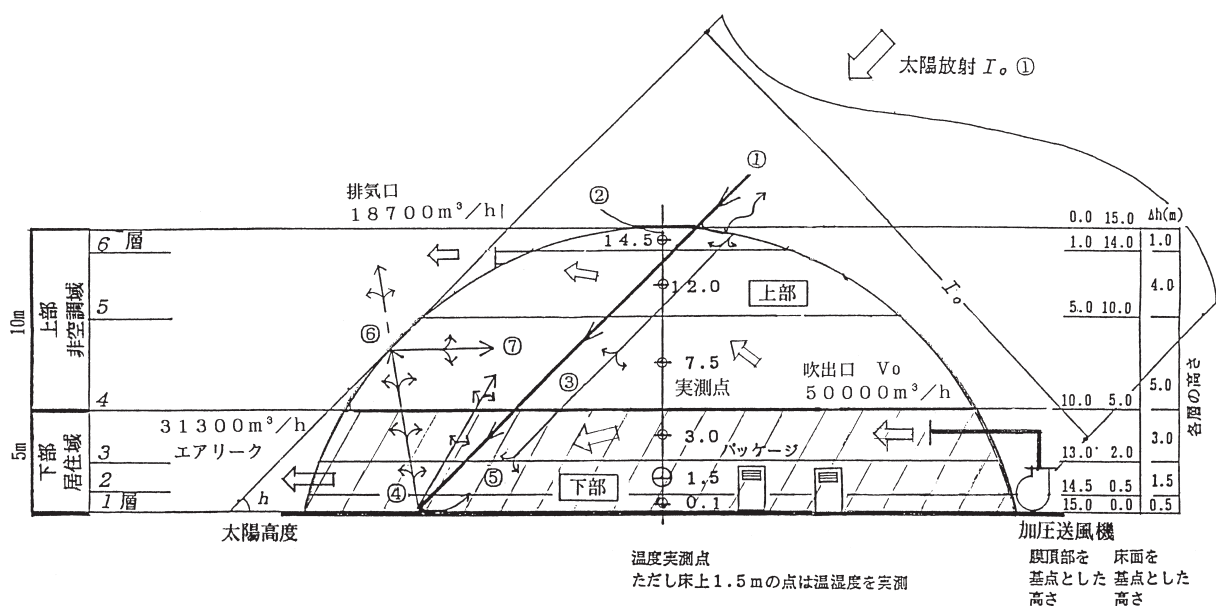


図4.5 エアドームの夏期の熱負荷計算プログラム

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、計算値と実測値が精度よく合ったので計算式は「一般解」が得られたとした。

図 4.10 に、エアドームの内観 2 として、図 4.2 と反対方向からみた、人のいないエアドームを示した。

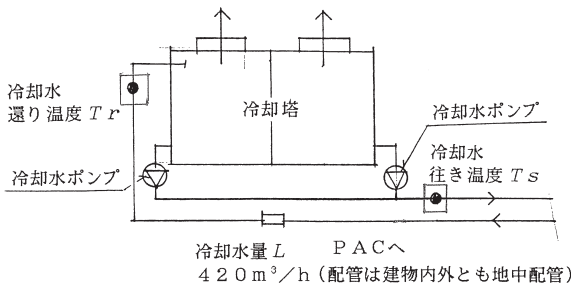


図 4.6 冷却塔周りの実測点

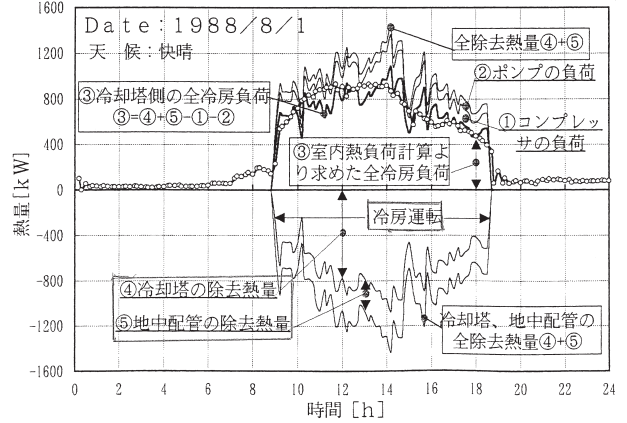
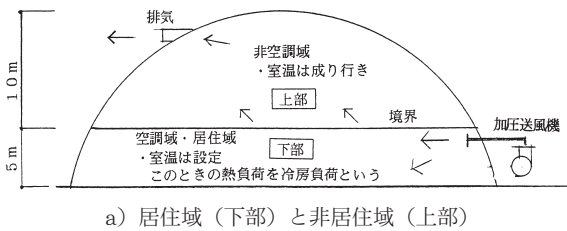


図 4.8 熱負荷の計算値と冷却塔での実測値との比較



a) 居住域 (下部) と非居住域 (上部)

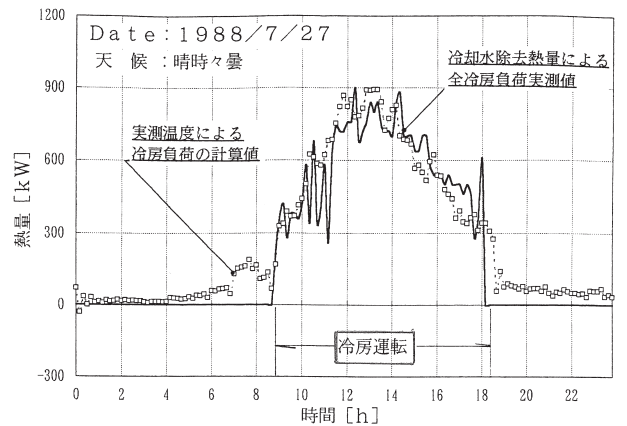
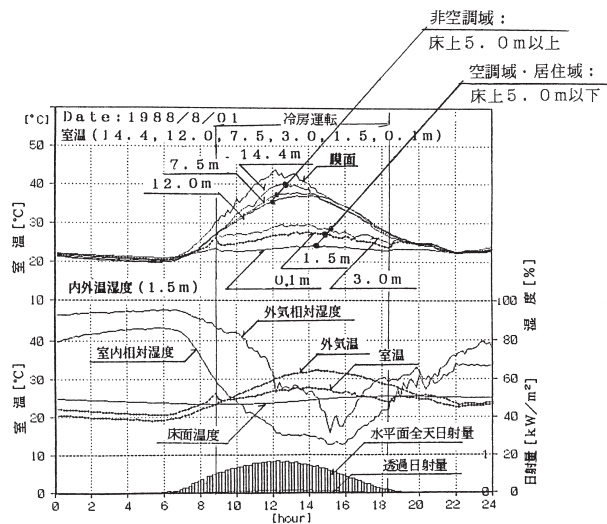


図 4.9 エアドーム熱負荷の計算値と実測値



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



図 4.10 エアドーム内観 2

5. 全体のまとめ

5.1 実測値から求めた居住域と非居住域の境界

吹出し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程度でよいことが判った。

5.2 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、大阪万博の「水上劇場」や透明フィルムを用いた「お祭り広場大屋根」などからである。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。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永く伝承していくことを願ってやまない。

図の出典

- 図1.1および図1.3 磯部梅三編集: 人類の進歩と調和 EXPO '70 カラー写真入 STAMP COLLECTION 日之出紙業
図1.2 制作 電通: 日本万国博覧会公式記録写真集 日本万国博覧会記念協会 昭和46年10月
図2.1～図2.4 蘭第12回世界会議展示部門会場設営工事 竣工写真 昭和62年3月
図2.5 なら・シルクロード博協会ほか: 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、防災計画書追加資料 追1～7, 昭62.1.28
図2.6～図2.9 井上宇市, 佐野武仁: 蘭第12回世界会議展示部門会場エアドーム設備設計図, 1987.3
図2.10～図2.14 早稲田大学 井上宇市・佐野武仁, 三井建設: 蘭第12回世界会議展示部門会場エアドーム設備竣工時の実測データ, 1987.3
図3.1～図3.2 電通・小川テント
図3.3 b) プローアップ時, 現地での小川テントの実測速報値
図4.1～図4.3 なら・シルクロード博協会 なら・シルクロード博公式記録 平成元年3月
図4.4～図4.9 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 早稲田大学博士論文 1996.10
上記以外は、筆者撮影

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 平成元年3月
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, 1987.3
3. 佐野武仁: 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. 佐野武仁: 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(仮設施設)設計図書, 1994
10. 蘭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, 1987
11. 電通・小川テント, 青函トンネル開通記念博覧会テーマ館(仮設施設)設計図書, 1987.6
12. 水野宏道, 木内俊明, 中島康孝, 曾原厚之助, 佐藤光男, 渋谷英嗣, 佐野武仁, 古谷誠章, 長谷見雄二ほか: 図面ライブラリー第17輯, 2008.10 井上宇市: 稲門建築会, 冊子寸法は新聞見開き大, 冊子数は2冊, 2008.10, 本誌は稲門建築会で閲覧可能。

(さの たけひと 環境デザイン学科)