

# 空気膜構造による多雪地域の冬期運動 施設建設に関する研究

大阪市立大学 木内 龍彦  
(共同研究者) 同 越智 建一

## Proposal on Design and Construction for Winter Athletic Space by Pneumatic Structure

by

Tatsuhiko Kiuchi and Kenichi Ochi  
*Department of Architecture and Building Engineering,  
Osaka City University*

### ABSTRACT

Pneumatic structures have been planned for a multipurpose hall and a pavilion. However, the design principle of this structure has not been established reasonably because of the remaining unexplained problems of membrane characteristics and the nature of wind.

In this research, some experiments were carried out to make a design principle for the construction of the pneumatic structure in a snowfall region, which covers a small part of an athletic ground with an air supported membrane. Based on the experimental results, wind pressure distribution acting on rigid model and the behavior of membrane of flexible model were investigated. Moreover, a small scale model of prototype was used to measure the structural characteristics of this air supported structure and the behavior of the roof. Lastly, proposed design planning was presented by use of these experimental results.

### 要 旨

わが国の多雪地域においては、冬期は広い運動場がほとんど使用できず、また屋内運動施設も十

分とは言えないため、各種のスポーツ振興が非常に制約を受けている。そこで本研究は、このような多雪地域の学校校庭に、冬期間だけ運動空間を確保し得る施設を高ライズ一重空気膜構造により

建設するための設計方針をまとめたものである。

空気膜構造は設計上の支配的外力が風力であり、風荷重をいかに合理的に評価するかが構造設計を行なう上で重要になってくる。ここでは、対象を高ライズ空気膜構造に限定し、剛模型や柔模型による風洞実験および小規模な実物供試体による実測により構造物に加わる風圧力の性状、構造特性および構造物屋根膜面の風による挙動を調べ、それらの結果を参考にして試設計案を提示している。

### 緒 言

外圧より水頭差で 20mm ないしは 30mm 程度高い内圧をかけて構造を保持する一重空気膜構造は、最近では全天候型野球場や多目的ホール等のような大空間を構成する架構として計画、設計され、その一部は建設されている。本構造で大規模なものは、わが国では1970年の大阪万国博アメリカ館として建設されたのが最初で、その際には構造や施工等の分野で各種の実験が行なわれた<sup>1)</sup>。また、中小規模のものはアイススケート場やテニスコート等の上屋として設計、建設されている。しかしながら、膜材料の性質や、支配的外力である風力に関して未解明の事項も多く残されていたため<sup>2,3)</sup>、合理的な設計方針が確立されていた訳ではない。

一方、わが国の降雪地域では冬期は広い運動場がほとんど使用できず、また屋内運動施設も十分ではなく、手狭なため、各種のスポーツの振興、発展という面では非常に制約を受けていると思われる。そこで本研究では数年来よりの空気膜構造の耐風性に関する研究<sup>4,5)</sup>の成果を踏まえ、冬期に小規模な運動空間を確保するための設計指針作成を目的として風圧力の性状や膜面の变形および振動性状を実験的に調べている。

## 1. 研究方法

空気膜構造はいくつかの構造方式があり、それぞれに特徴があるが、ここではピッチング練習や簡単な体力トレーニングができる程度の空間を確保する目的で、高ライズ一重空気膜構造を対象としている。本形式の構造物では風により風上側に正圧を受ける領域が生じ、屋根のほぼ全面が負圧となる低ライズ形式の構造物よりも空気力学的な挙動が複雑である。本研究では風荷重を合理的に評価するために剛模型による風洞実験を行ない、次にほぼ形状が同一な柔模型を製作し、風による変形や膜面の振動性状を調べている。また、風洞実験の相似則についても未解明の点が残されているので、ここでは実際に使用される膜材料を用いた小規模な供試体（以下では中間供試体と称す）を設置して実測を行なった。以下にその方法について述べる。

### 1. 1 剛模型による風洞実験

空気膜構造物は風による変形が比較的大きく、変形に伴う風圧力の変化も考慮されねばならない。しかしながら、第1次構造設計用風荷重を決定するには、現状のところ剛模型を用いた風洞実験によるのが合理的であると考えられる。ここでは空気膜構造に用いられることの多い基本的形状を有する模型（図1, 2）による実験を行なった。実験は大阪市立大学工学部所属の乱流境界層型風洞内で行なったものである。図3に風洞装置の概要を示す。実験に用いた風洞気流はべき指数約 $1/8$

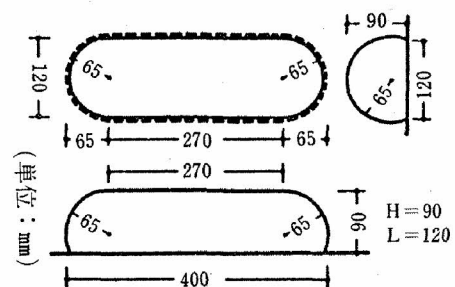


図1 高ライズ円筒状剛模型形状

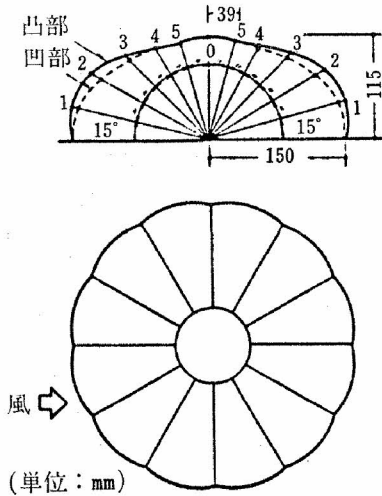


図2 ロープ併用半球状剛模型形状

程度の勾配流である。また風圧測定には差動トランス型圧力変換器を用いた。

### 1.2 柔模型による実験

空気膜構造においては、風荷重作用時に機能上あるいは構造上定められた範囲内で変形を許容し、必要かつ合理的な内圧値とそれに対応する強度を有する膜材を選定することになる。従って各内圧時の変形および膜面の動的性状に関する検討が必要となってくる。ここでは剛模型とほぼ同じ初期形状を有する柔模型による風洞実験を行なっ

た。模型は厚さ 0.01mm のポリエチレンシートを用いて製作した。膜面の変位測定には 8 ミリカメラや非接触型変位計オプトフォローを用いている。

### 1.3 中間供試体による実測

自然風と風洞流の相似則についていまだ未解決の問題が残っており、また空気膜構造においては膜材料特性や構造特性について十分な模型化が困難なこともあるので、大阪南港地区に小規模な供試体を設置して自然風の下で実測を行なってきた。図4に高ライズ円筒状中間供試体の形状を示す。この供試体を用いて構造特性および膜面の風による挙動等を調べた。測定には I.D.S 型変位計や差動トランス型圧力変換器を用いた。

## 2. 実験結果と考察

### 2.1 剛模型実験結果

図5はスパン(L)に対する屋根ライズ(h)の比であるライズ比(h/L)が約0.75の高ライズ円筒状模型の平均風圧係数の分布である。係数の値は模型頂部相当高さの速度圧をもとに算定している。この高ライズの形状の場合には、風上側に

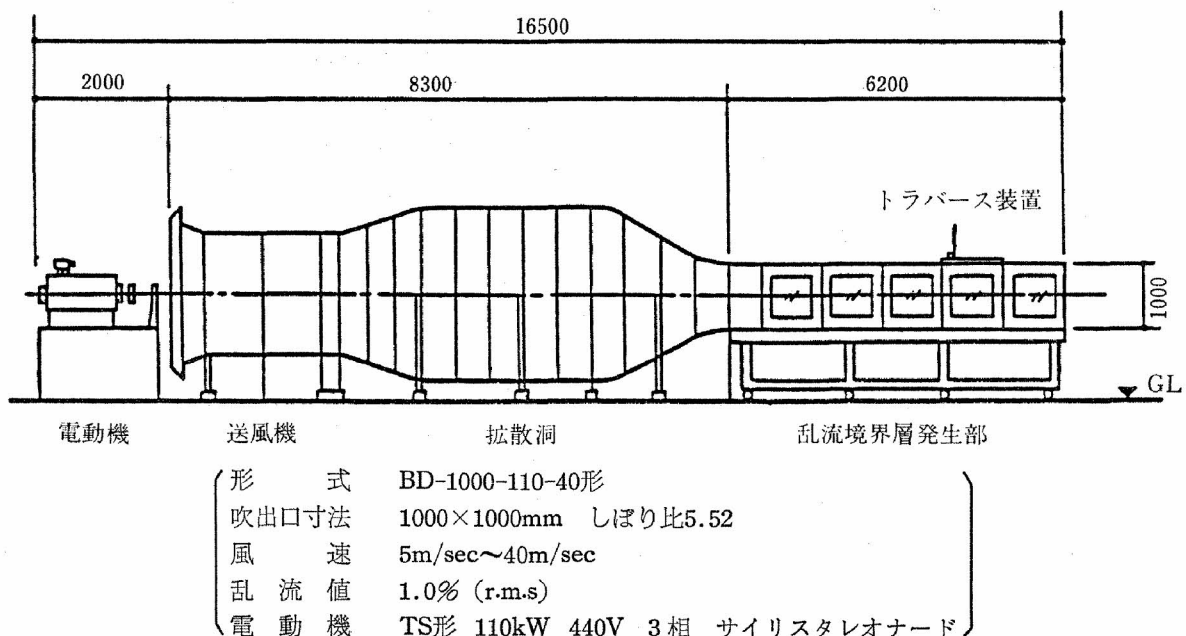


図3 風洞装置概要

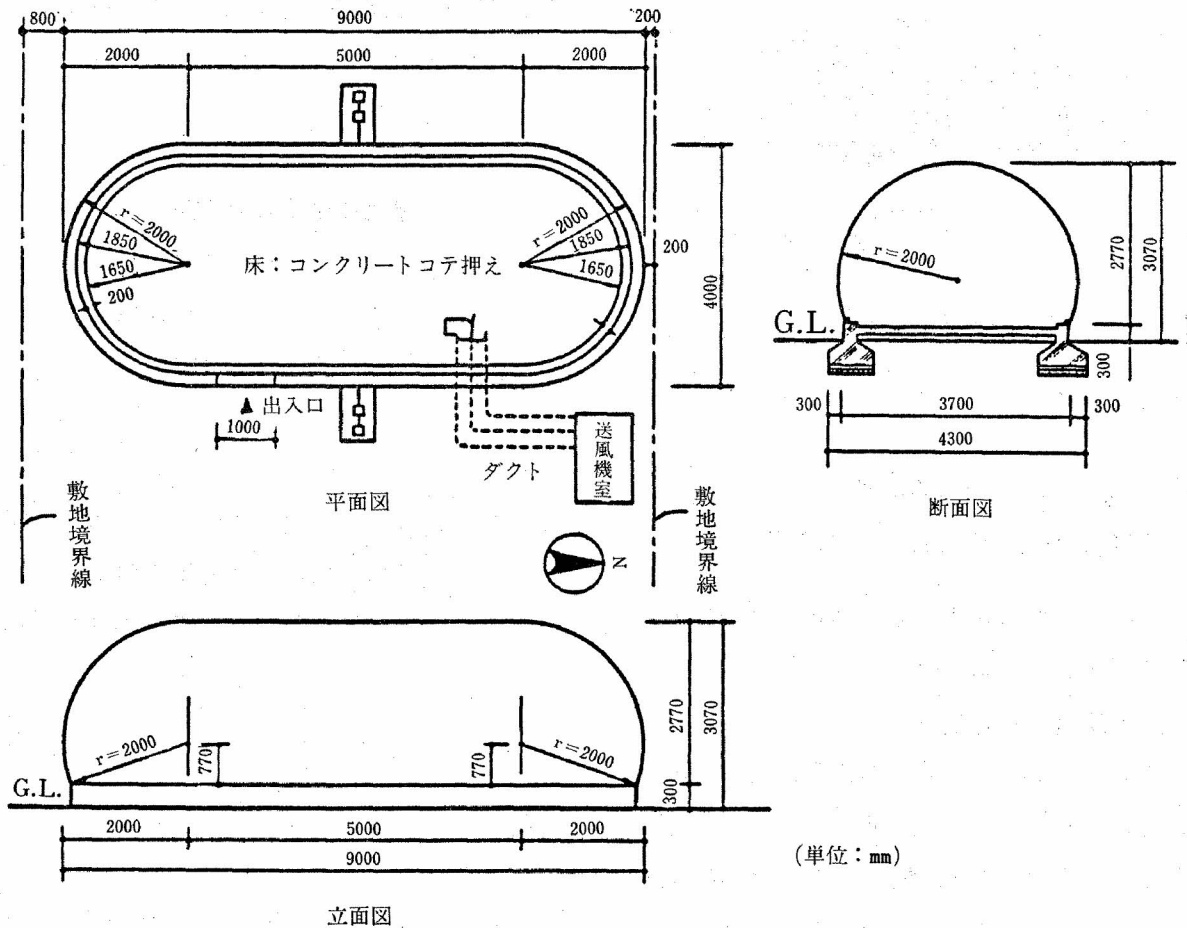


図4 高ライズ中間供試体の形状

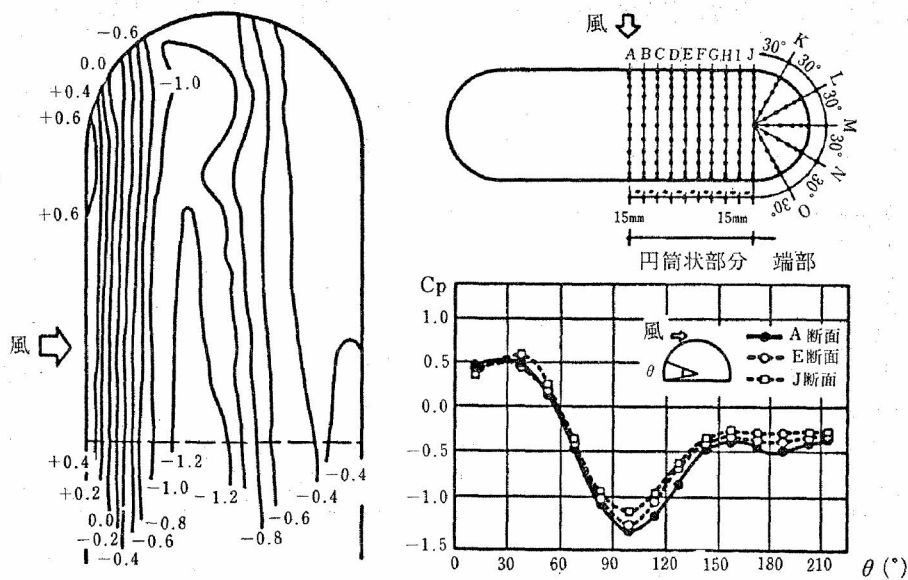


図5 平均風圧分布 (高ライズ円筒状模型)

正圧部分が生じ、頂部付近では比較的大きな負圧、風下側にはほぼ一様な負圧が働いている。空

気膜構造では屋根補強用としてロープを使用することも多いが、ロープによって屋根面に凹凸がで

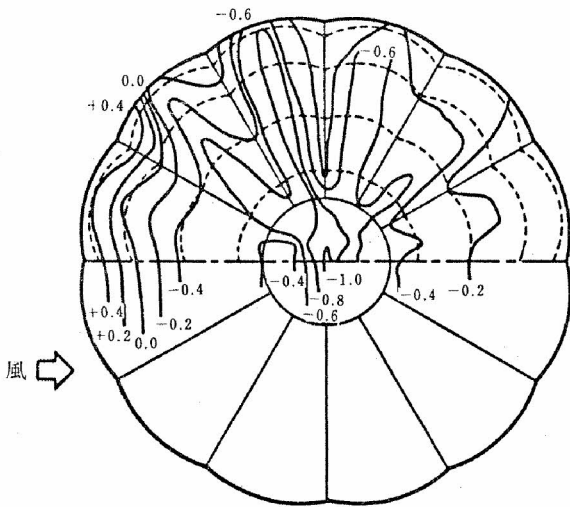


図6 平均風圧分布（ロープ併用半球状模型）

きる場合の風圧分布を図6に示す。この場合も風上側膜面には正圧が働き、頂部付近では負圧の絶対値が大きくなっている。また風圧分布もロープによる形状の特徴が表われている。

変動風圧力の性状については紙面の都合で詳述できないが、剛模型に加わる変動風圧の記録をもとに統計解析を行ない変動風圧係数やパワースペクトルの性状を調べた。

### 2.2 柔模型風洞実験結果

前述した高ライズ円筒状模型の風による膜面の平均変位比 ( $|d|/r$   $d$ : 変位,  $r$ : 模型半径) と内圧比 ( $P_i/q$ ,  $P_i$ : 内圧,  $q$ : 頂部相当高さの速度圧) の関係および頂部の風向方向水平変位の最大振幅 ( $a$ ) の半径に対する比と頂部相当高さの平均風速との関係をそれぞれ図7と図8に示す。平均変位比は内圧比が減少するに伴い大きくなっている。また風上側で正圧を受ける部分の変位が最も大きく、頂部、風下側の順に小さくなっている。頂部の水平方向の振幅は内圧  $2\text{mmAq}$  の場合を除き風速増加とともにほぼ同じ傾向で単調に増加している。内圧  $2\text{mmAq}$  の場合は、風速がある値より大きくなると振幅は急激に増大している。また図9は高ライズ円筒状模型の風による膜面の変動変位のスペクトルとその時の内圧変動のスペクトルを内圧  $2\text{mmAq}$  と内圧  $10\text{mmAq}$  の場

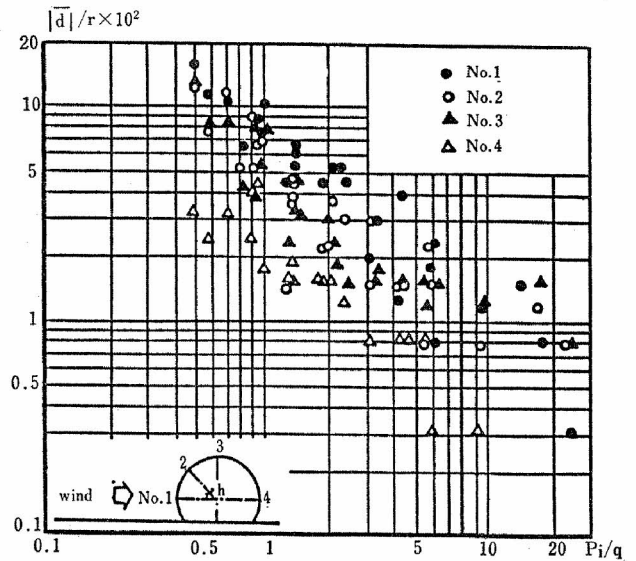


図7 変位比と内圧比（高ライズ円筒状模型）

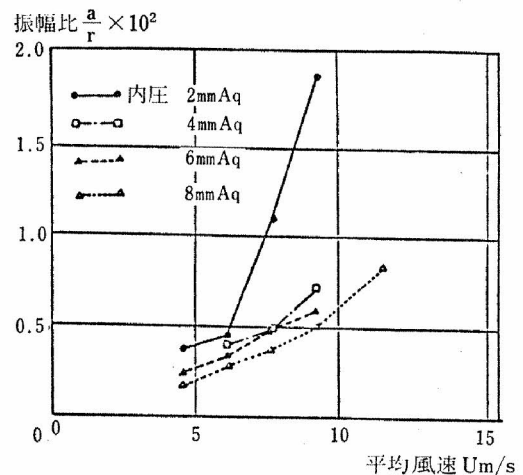


図8 頂部の水平方向最大振幅と平均風速（高ライズ円筒状模型）

合について調べた結果である。図中の破線は風洞流の変動風速のスペクトルを示す。内圧が小さい場合、内圧変動、すなわち主として膜体内部の体積変化のスペクトルと応答のスペクトルがほぼ同じ周波数でスペクトルピークをもつ。内圧が大きい場合はこの対応は明確ではない。また、内圧が小さい場合には、風速変動のスペクトルピークと応答のスペクトルピークも特定の周波数でほぼ一致している。このことは流れのもつ変動成分が頂部の変位振幅に寄与しているとも考えられるが、振幅の値は構造物の規模、動特性および流れのもつ乱れの性状とによって決まるので、今後とも検討したい。

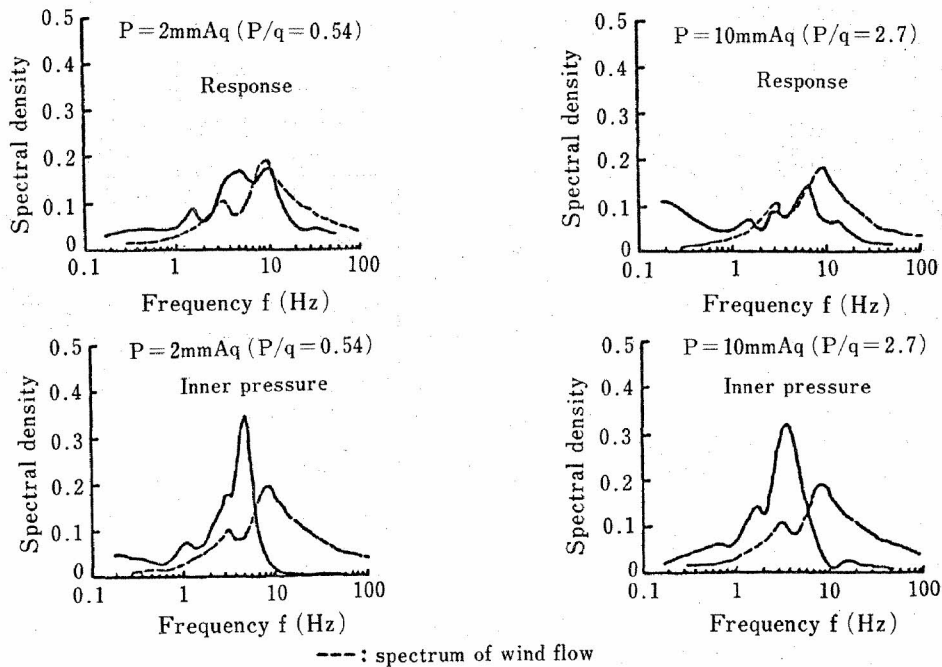


図9 内圧変動と応答のパワースペクトル (高ライズ円筒状模型)

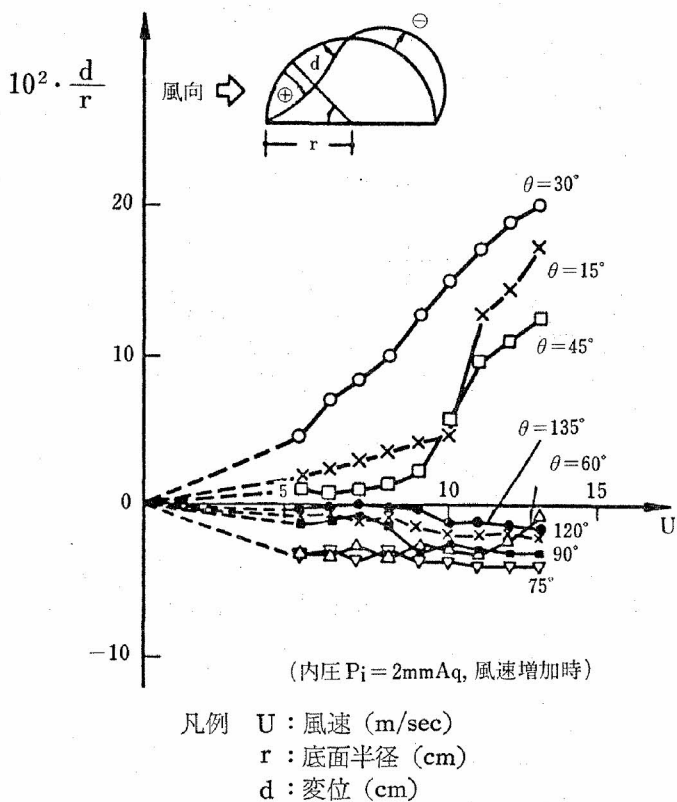


図10 風速と変位比 (ロープ併用半球状模型)

図10は膜面がロープと網とでおおわれた半球状模型の風による変形を調べたものである。この場合は膜面の変形がロープおよび網で拘束されるため頂部や風下側の変位は比較的小さい。この半球

状模型の風による膜面の振動性状は以下のである。模型内圧を一定として風速を増加させていくと、まず風上側膜面に微小変形、すなわち局部的なリンクリングが発生する。次にその近傍で微小振動が現われ、さらに風速が増加するとその部分の変形が大きくなる。そして風下側膜面にも微

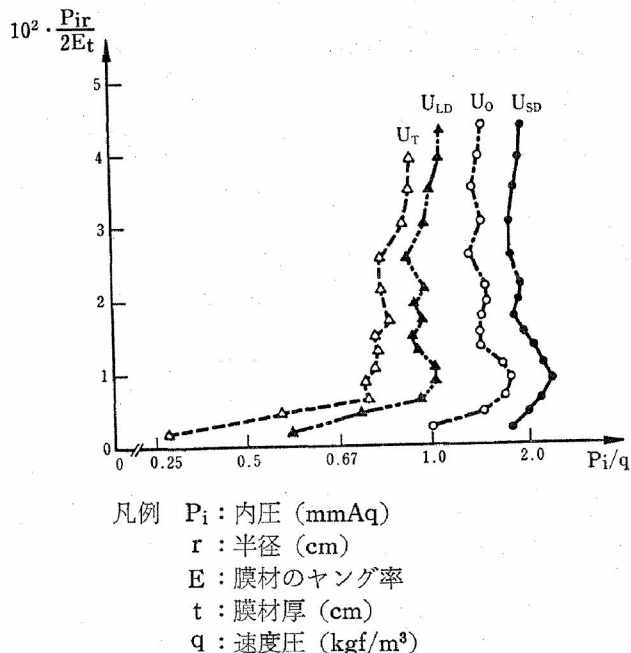


図11 各種限界風速における膜面歪と内圧比 (ロープ併用半球状模型)

- 凡例  $P_i$  : 内圧 (mmAq)  
 $r$  : 半径 (cm)  
 $E$  : 膜材のヤング率  
 $t$  : 膜材厚 (cm)  
 $q$  : 速度圧 ( $\text{kgf/m}^2$ )

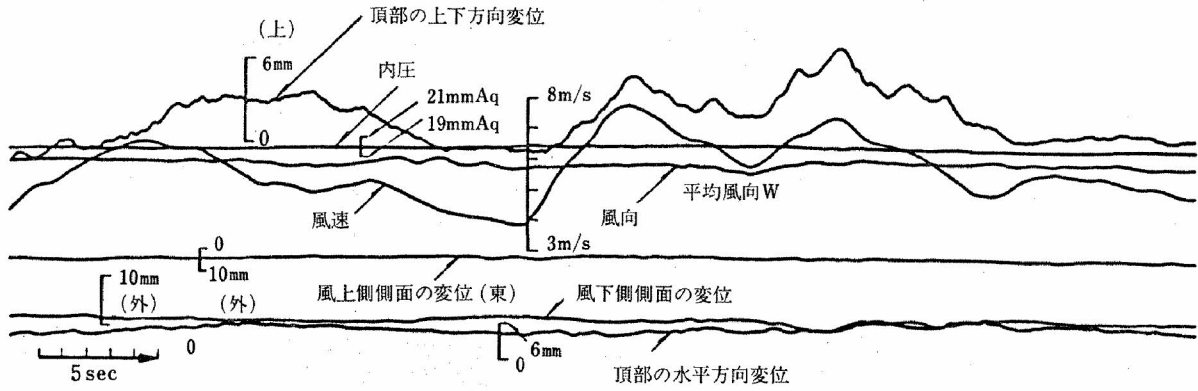


図12 膜面の振動記録の一例（内圧 20mmAq の場合）

小振動が出現し、遂には膜面全体がロープと網とで支えられる状態となる。これらの状態における限界風速と内圧の値から膜面歪と内圧比の関係を示したものが、図11である。局所的なリンクリング発生時の膜面歪は、内圧比がほぼ一定のところでは生じている。さらにその他の現象に対応する限界風速もまたこれと類似した傾向を示している。

### 2.3 中間供試体による実測結果

大阪南港風力観測所で行なってきた実測結果を以下に述べる。図12は膜面の風による振動記録の一例である。このような記録を整理して得られた各測定点の変位比と内圧比の関係を図13に、平均風速と振幅比の関係を図14に示す。この結果とは

ほぼ同じ形状の模型による風洞実験の結果（図7）とを比較すると、測定時の内圧比の範囲が異なることや、中間供試体での実測値にバラツキは大きいものの、風下側の測定点を除きほぼ同じ傾向を示す。風下側の変位については風洞実験結果の方が実測結果より大きくなっている。これは風洞実験と実測の場合で、乱れのスケールと模型あるいは供試体の代表長さとの比がやや異なっているためでもあると考えられる。

振幅については、測定された風速の範囲内では風速が低い場合には微小振動は余り生じず、風速がある値より大きくなると振幅も徐々に増大している。

先の記録例からもわかるように、風を受けた時の膜面の振動は単なる定常波ではなく、種々の周期成分を有し、かつ風上側から風下側へ、あるいはその逆の伝播波も含まれている。この伝播波の基本的性状を調べるために無風時において膜面の加振実験を行なった。その結果を図15および図16に示す。図15は膜面の伝播波の周期と内圧の関係であり、図16は伝播波の速度と内圧の関係である。内圧が高くなる程周期は短かく、伝播速度は大きくなっている。

### 3. 設計への適用

本項では、上に述べた高ライズ空気膜構造の風による挙動をもとに耐風設計の基本方針について

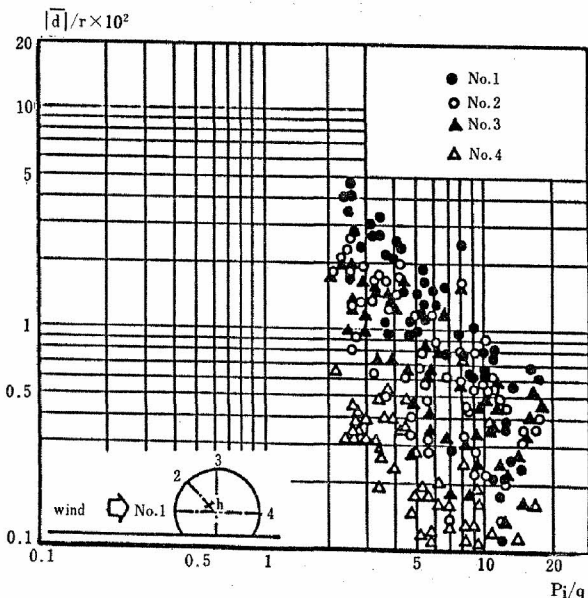


図13 変位比と内圧比（高ライズ円筒状中間供試体）

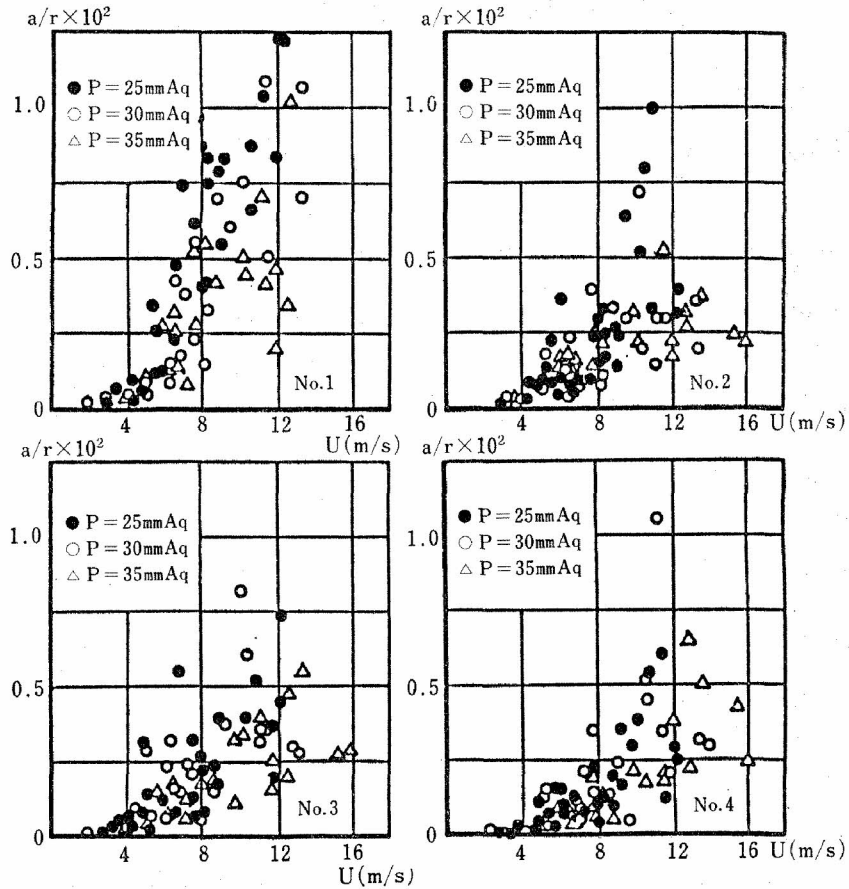


図14 平均風速と振幅比 (高ライズ円筒状中間供試体)

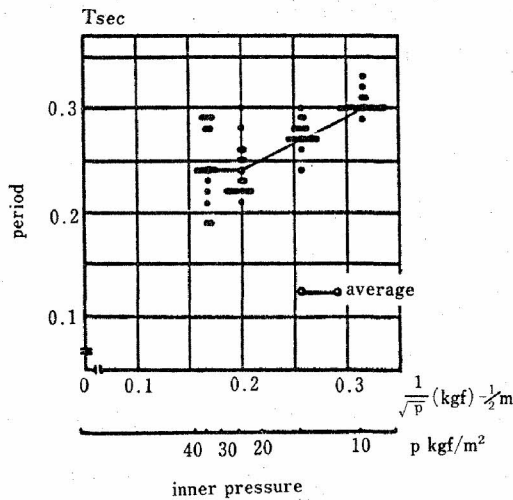


図15 伝播波の周期と内圧の関係

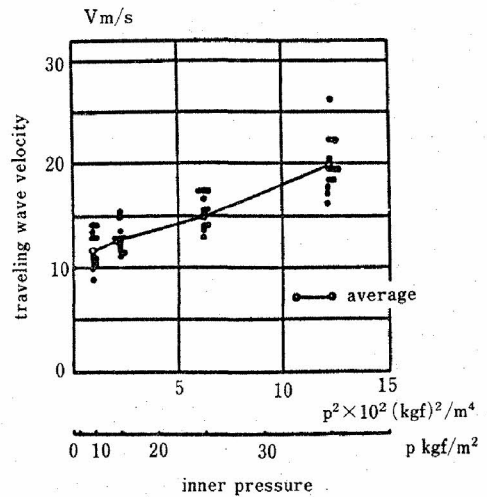


図16 伝播速度と内圧の関係

述べる。

### 3.1 第1次 (静的) 構造設計

第1次設計用風荷重としては剛模型による風洞実験結果, 例えば図5, 6に示したような値を外周風圧係数として用いる。また内圧の初期値とし

ては主としてライズ比によって経験的に使用されている値<sup>6)</sup>を用いて第1次構造設計を行なうことが現状では合理的でかつ妥当な方法であろう。

### 3.2 第2次動的検討

上述した方針に従えば, 第1次の静力学的な風



荷重評価は可能である。しかしながら、第1次の設計段階では剛模型による風洞実験の結果にもとづいているので、空気膜構造特有の性質に伴う風との相互作用が考慮されていない。ここではすでに述べた実験結果に従い第2次動的検討を行なう。

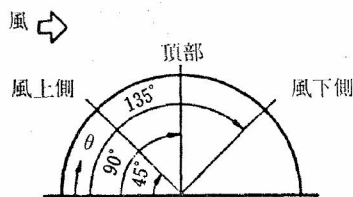
i) 変形に対する検討

膜面の変形の許容値から内圧比を表1あるいは表2のように設定する。

表1 変形の許容値と内圧比  
(半円筒形構造物の場合)

対象領域	変形の許容値 d/r (%)	設定内圧比 P <sub>i</sub> /q
頂部 θ = 90°	10程度	0.7
	8	1.0
	4	1.2
	3	4.0
	2	7.0
風上側 θ = 45°	8程度	0.7
	6	1.0
	4	1.5
	2	4.0
風下側 θ = 135°	4程度	0.4
	3	1.5
	2	4.0

(θは下図による)



ii) 振動性状に関する検討 (ライズ比2%の半球状, ロープ併用の場合)

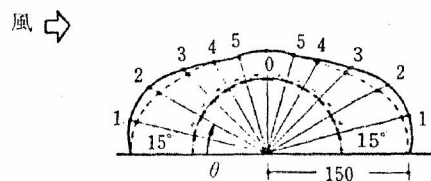
膜材の疲労や変形の許容値から下記の内圧比を参考にする。ただし P<sub>i</sub>: 内圧, q: 頂部相当高さの速度圧である。

- a) 風上側膜面に微小変形が起きない  
.....P<sub>i</sub>/q > 2
- b) 風上側膜面に微小振動が起きない  
.....P<sub>i</sub>/q > 1.7
- c) 風上側膜面に大変形が起きない

表2 変形の許容値と内圧比  
(ロープ併用半球状構造物の場合)

対象領域	変形の許容値 d/r (%)	設定内圧比 P <sub>i</sub> /q
風上側 θ = 15°	10	0.6
	8	0.8
	4	1.0
風上側 θ = 30°	8	0.5
	6	0.6
	3	0.8
	2	1.0
風上側 θ = 45°	4	0.4
	3	0.8
	2	2.0
風上側 θ = 75°	5	0.6
	4	2.0
	2	2.3

(θは下図による)



.....P<sub>i</sub>/q > 1.4

- d) 風下側膜面に微小振動が起きない  
.....P<sub>i</sub>/q > 0.9

iii) 波動伝播速度に対する検討

構造物の内圧, 膜材料および構造形式等によって定まる, 発現しやすかつ設計上望ましくない動的な変形(モード)に対応する膜面の伝播速度が外界の風速や構造物の形状, 規模等に依存する膜面近傍の風速よりも大きくなるように内圧を設定することが望ましく, その内圧値であれば空気力学的不安定振動は生じにくいと考えられる。

4. 試設計

以上述べてきた設計方針をもとに, ピッチング練習や簡単な体力トレーニングができる程度の長さ30m, スパン10mの高ライズ円筒状空気膜構造を設計する。概要は以下の通りである。

- i) 冬期だけの仮設構造物とし, 夏期には膜体

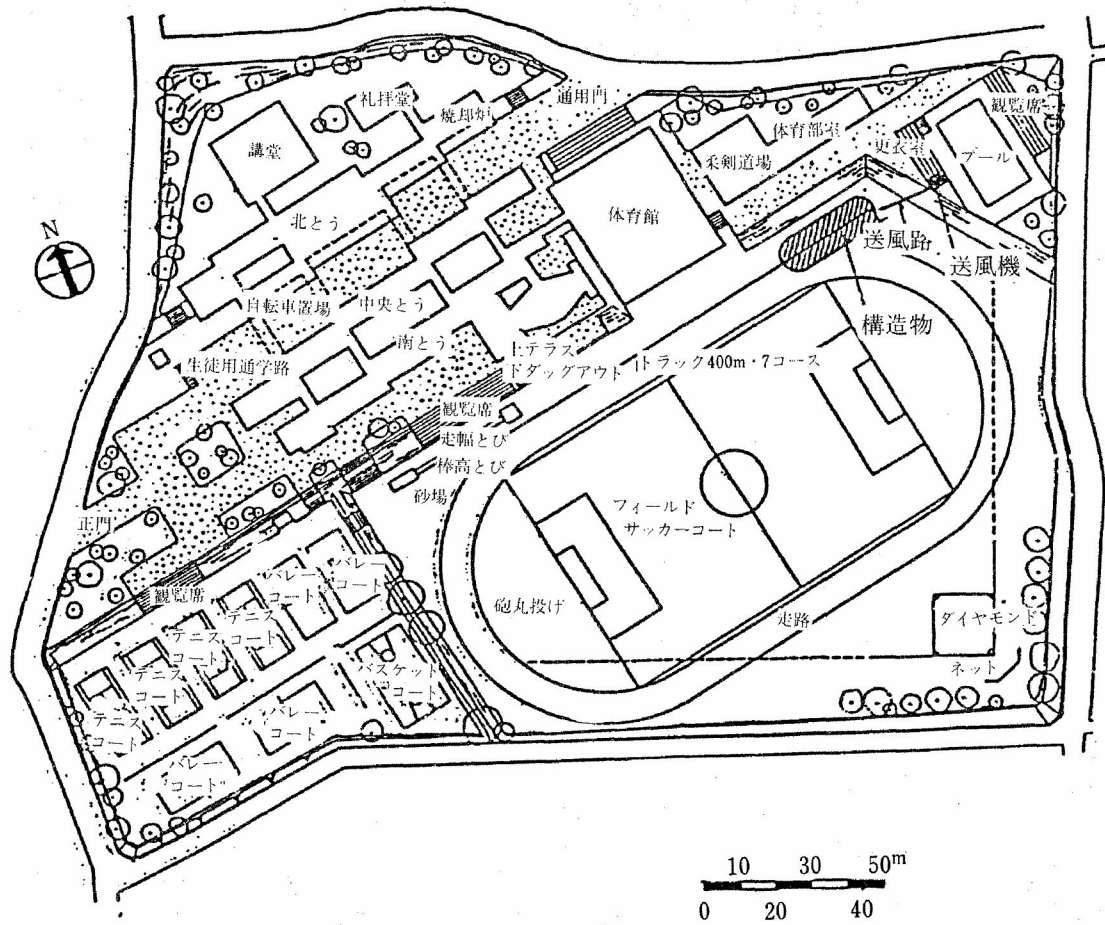


図17 配置図<sup>7)</sup>

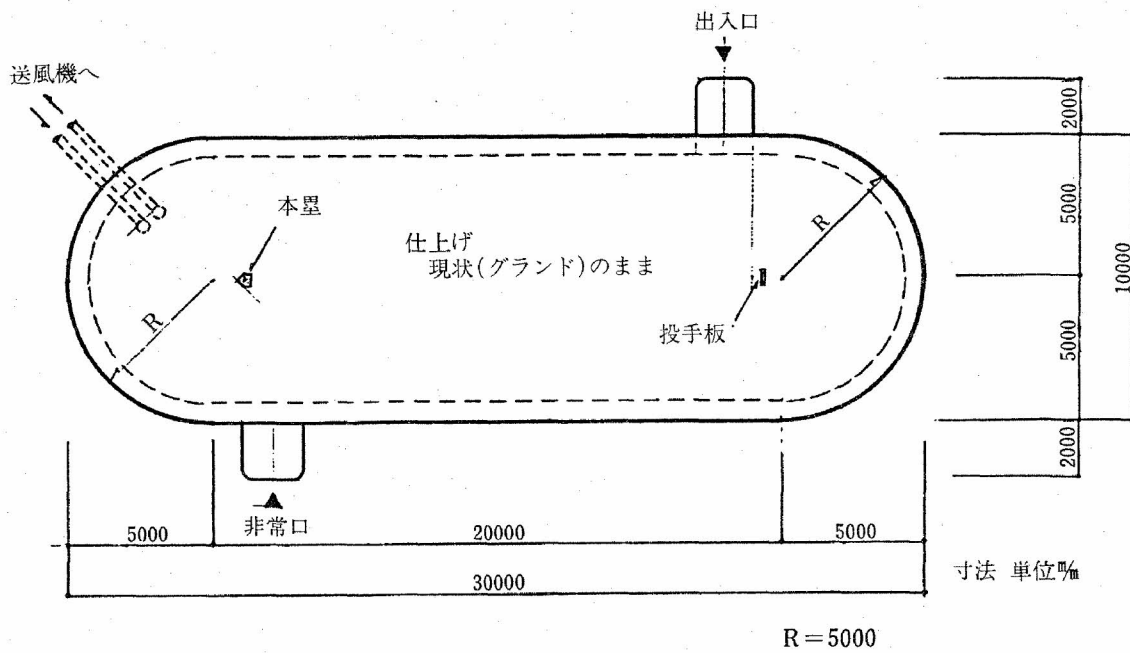


図18 平面図

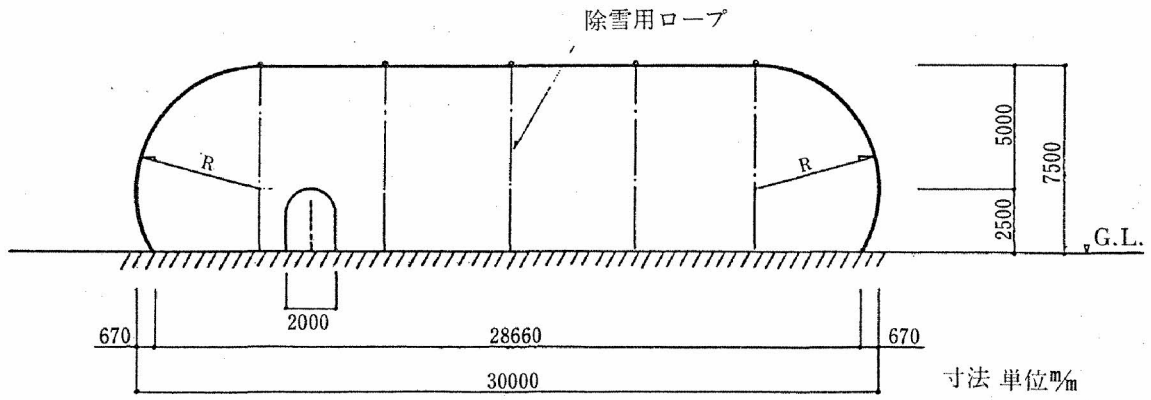


図19 立面図

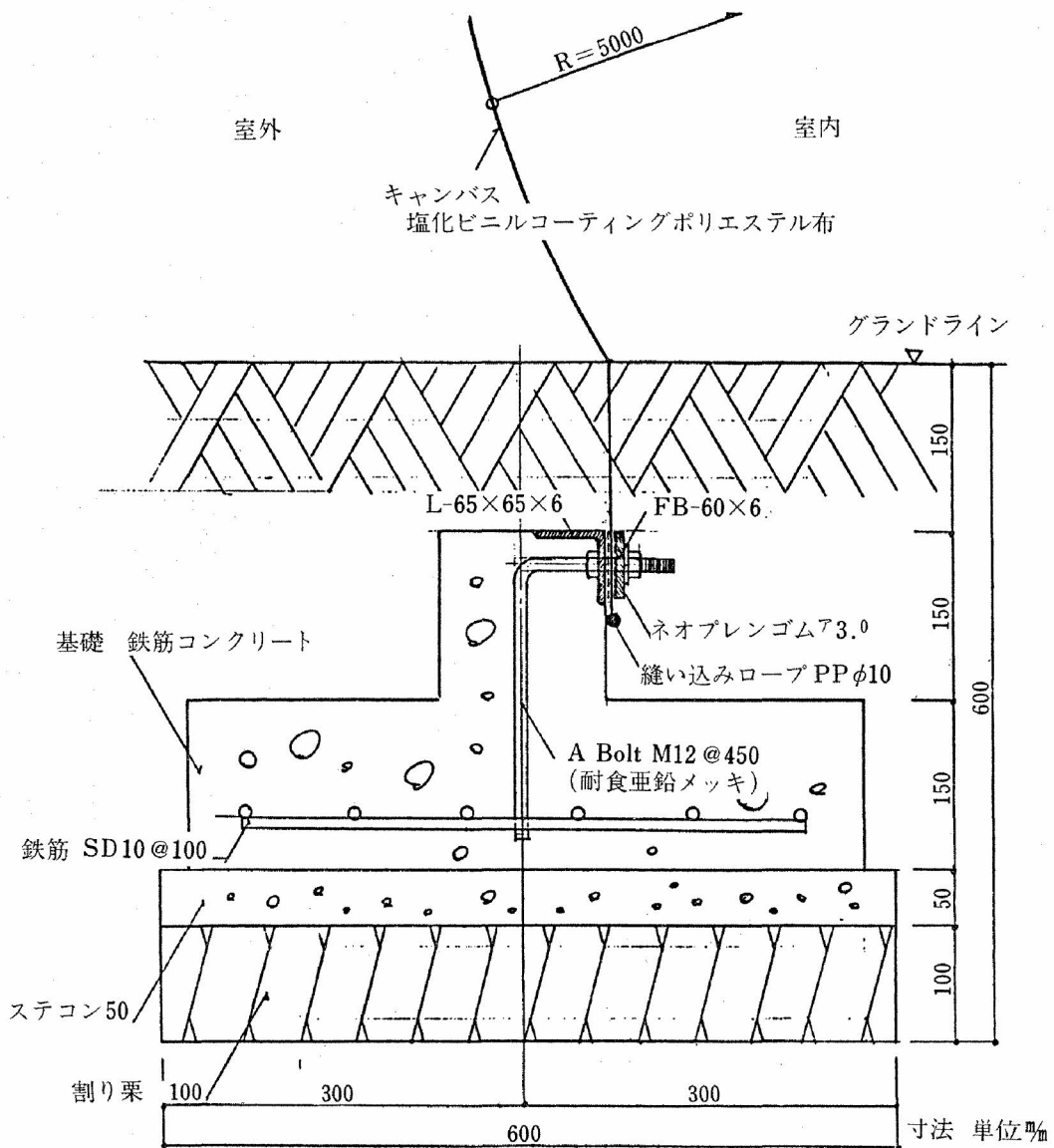


図21 冬期基礎廻り詳細図

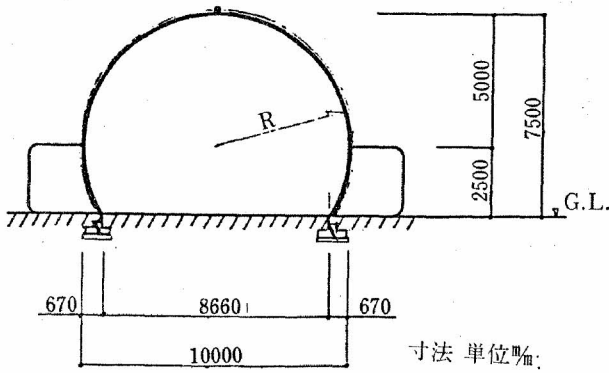


図20 断面図

を収納してグラウンドとして使用する。

ii) 常時内圧は 30mmAq とし、強風時あるいは降雪時には 40~50mmAq 程度まで内圧を上げる。

iii) 屋根積雪量は滑落のため小さいと考えられるが、ポンディングが発生しない様除雪ロープで除雪する。隔雪装置は使用しない。

このようにして設計した空気膜構造の各図面を

図17~22に示す。

### 5. 結 語

空気膜構造の設計指針作成のための資料を風洞実験や中間供試体による実測によりまとめた。またその指針を参考にして試設計を提示した。しかしながら、ここで述べてきた方法は現状では合理的でかつ比較的簡便であると考えられているものの、模型化についての相似則がまだ確立されているとは言えず、実現象の方がより複雑であると思われる。従って今後は実物の自然風の下での測定等を通してより完全な指針を提案していきたい。

**謝辞** 本研究を進めるにあたり懇切な御指導をいただきました大阪市立大学工学部教授川村純夫先生に深謝致します。また設計図面の製作にあた

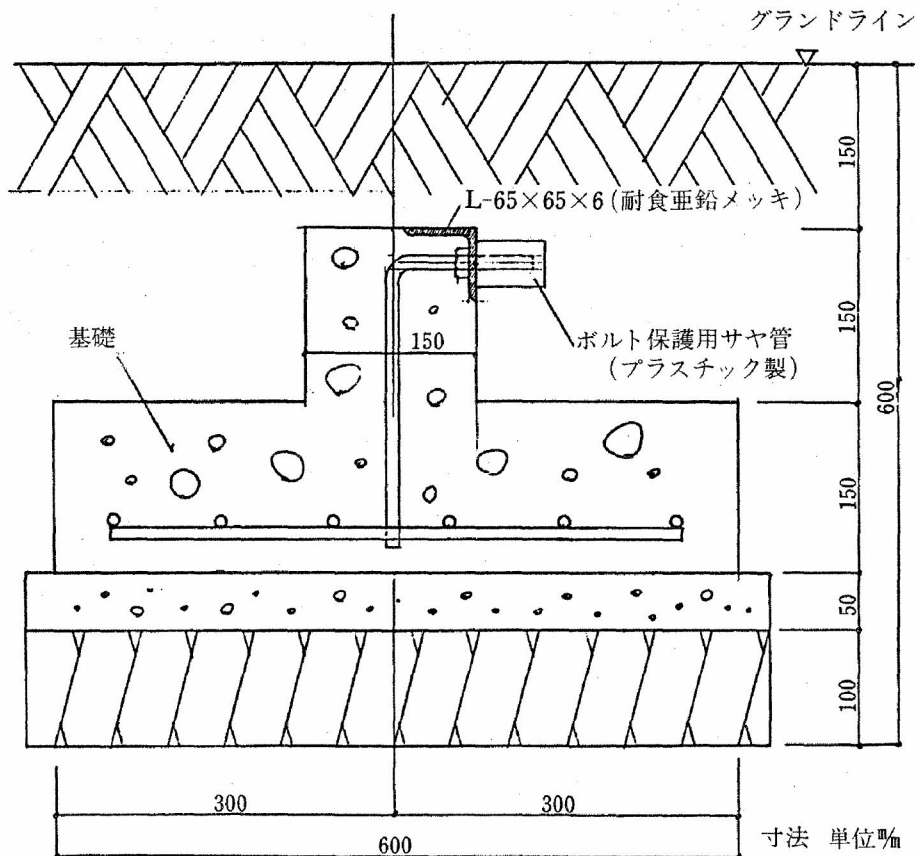


図22 夏期基礎廻り詳細図

っては、太陽工業俵珠玖義樹氏の助力を得ている。ここに記して謝意を表します。終りになりましたが、本研究に対し助成下さいました財団法人トスポーツ科学振興財団に対し厚く御礼申し上げます。

#### 文 献

- 1) 川村 他；空気膜構造の実験報告 V (EXPO-'70 アメリカ館—振動性状と耐風安定性)，日本建築学会大会梗概集，昭和45年。
- 2) 南 他；コーティング平織物の剪断特性，日本複合材料学会誌，第9巻第4号，1983。
- 3) 石崎 他；空気膜構造の自然風中における振動性状に関する実験，京都大学防災研究所年報，第28号B-1，昭和60年。
- 4) S. Kawamura and T. Kiuchi; An Experimental Study for One-membrane Type Pneumatic Structure-Wind Load and Response, Proc. 6th Colloquium on Industrial Aerodynamics, 1985, Part 1.
- 5) S. Kawamura and T. Kiuchi; Wind Design Method of Air Supported Structures, Int. Sympo. on Membrane Structures and Space Frames, 1986, Vol. 2.
- 6) Y. Isono; Review of Design Standards for Air-supported Structures in the World, I.A.S.S. Research Report—The Working Group of Pneumatic Structures, 1978.
- 7) 日本建築学会編；建築設計資料集成Aより抜粋した。