

# 恒久膜構造の黎明

## 二つの空気膜構造建築

2016年6月3日

丹野 吉雄

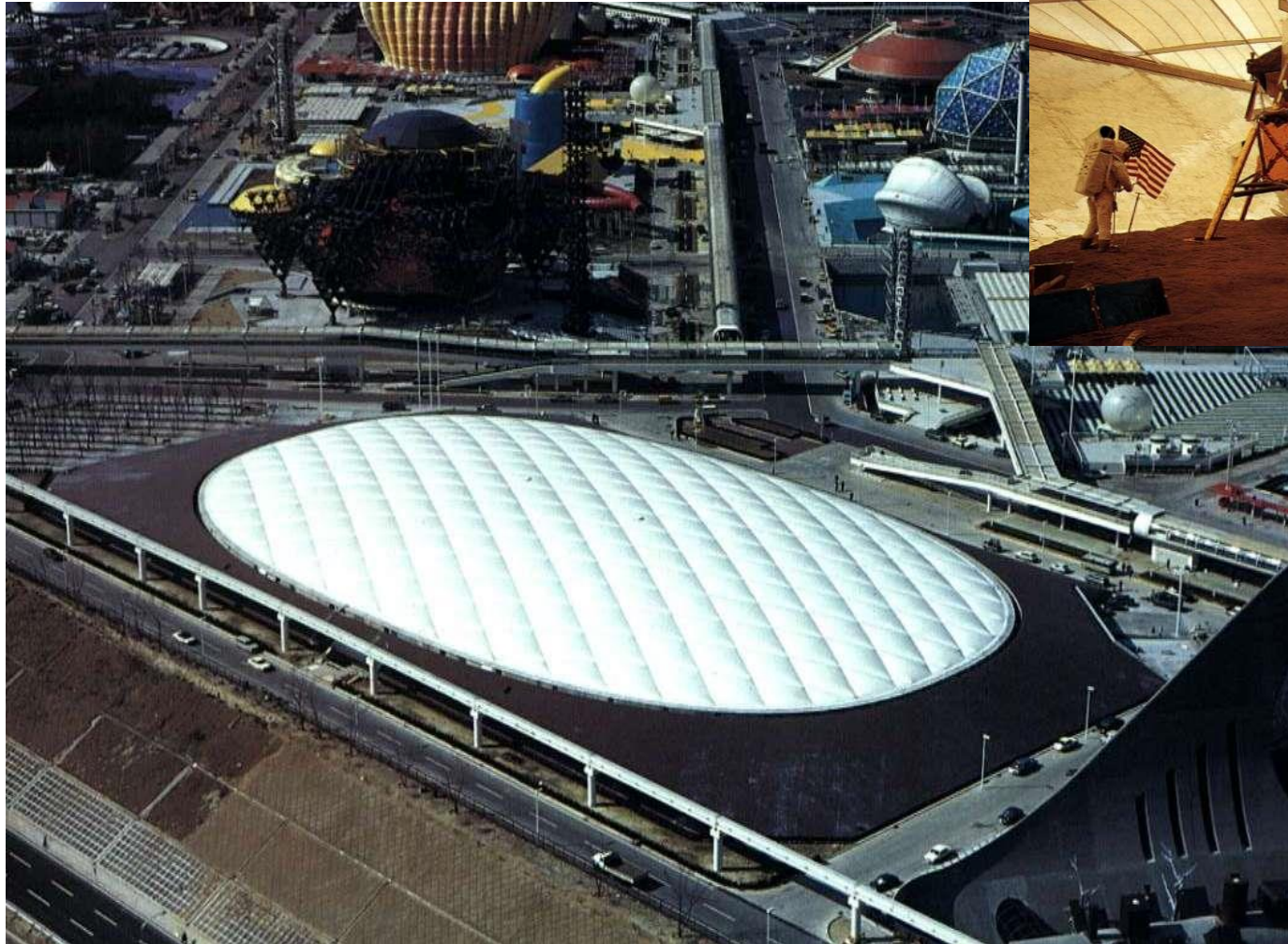
## 目 次

I. 空気膜構造の技術開発と霊友会弥勒山エアードーム	P. 3
II. 東京ドーム 主要構成技術と実現のプロセス	P.12
III. 東京ドーム 空気膜構造の概要	P.28
IV. 東京ドーム インフレーションの課題と実施	P.41
V. 東京ドーム 空気膜構造の内圧管理	P.67
VI. 空気膜構造建築の長期維持保全	P.76

# I . 空気膜構造の技術開発と 霊友会弥勒山エアードーム

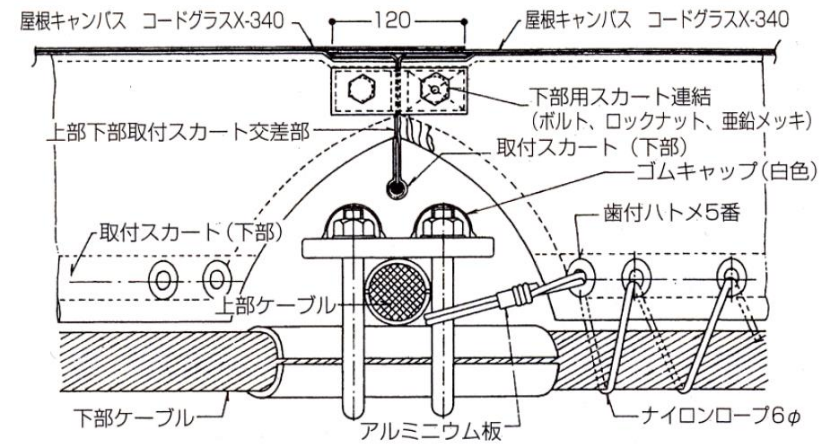
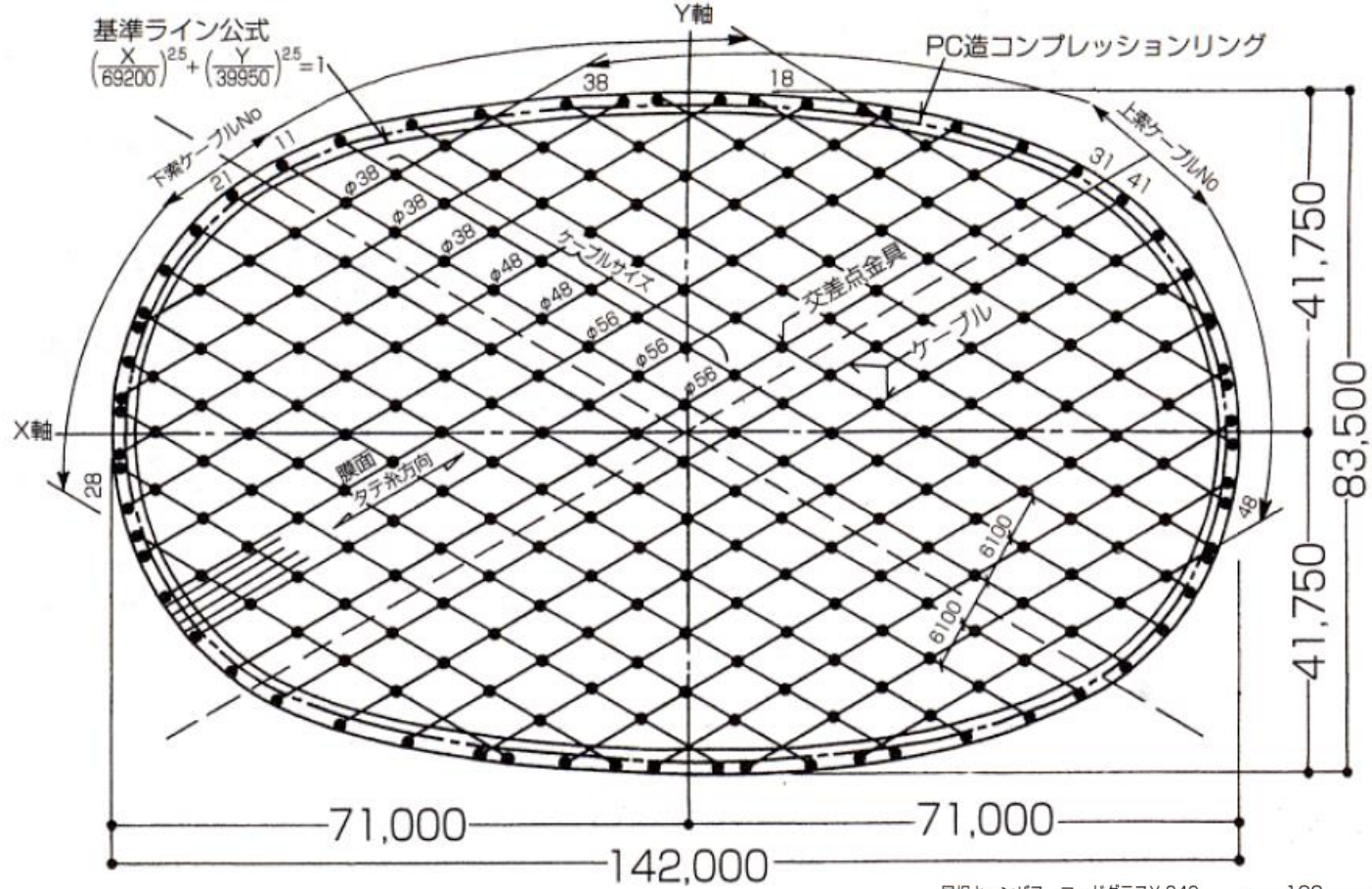
# 大阪万国博 1970 アメリカ館

設計：デビス、プロデイ、チャーマイエフ、  
          ガイスマー&デ・ハラク アソシエイツ  
構造：デイビット H.ガイガー  
施工：大林組





# 大阪万国博 1970 アメリカ館

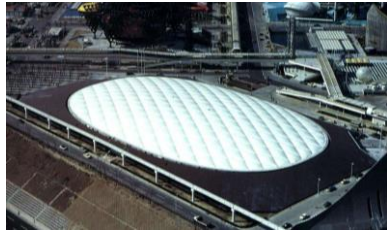


【出典】石井一夫編著「日本の膜構造 作品選集」  
 エス・ピー・エス出版、1993

# 北米のドーム建築の流れ

1960年代後半～1980年代中頃

## 空気膜構造系



大阪万博アメリカ館  
1970



シルバードーム  
1975



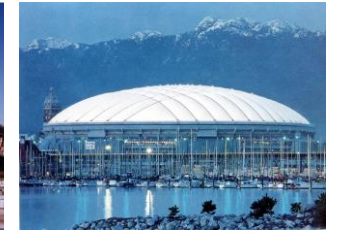
キャリアドーム  
1980



フージャードーム  
1984



メトロドーム  
1982



BCプレイス  
1983

1965

1970

1975

1980

1985



1965

アストロドーム (s)



1975

スーパードーム (s)



1976

キングドーム (RC)

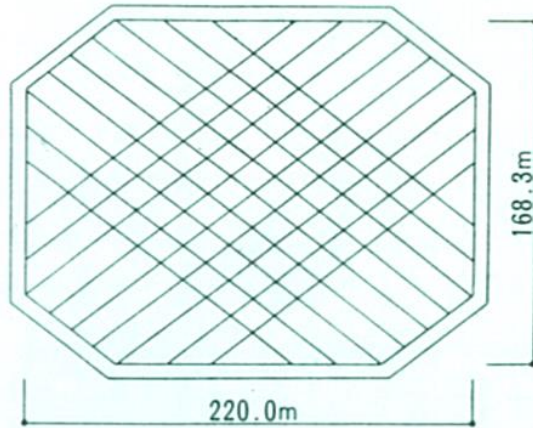


## 鉄骨・RC構造系



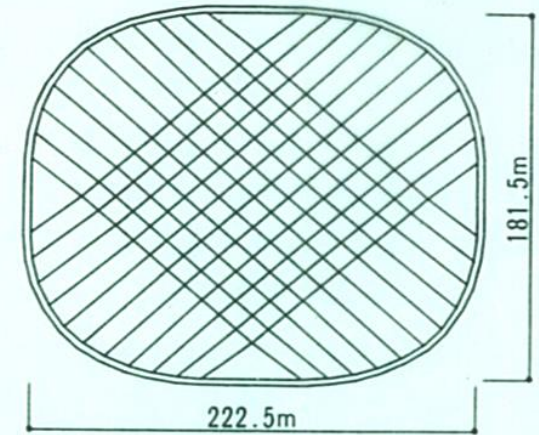
# 北米の大規模空気膜構造との屋根の規模比較

■ ポンティアック シルバードーム (1975)



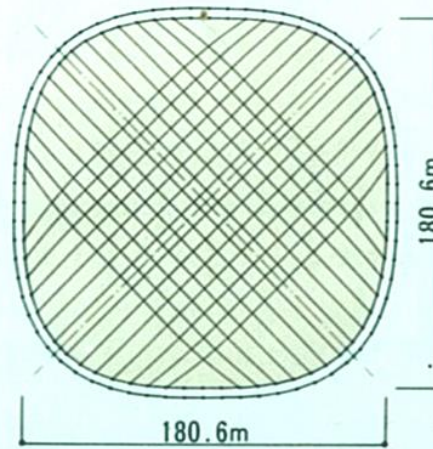
屋根面投影面積 33600 m<sup>2</sup>  
最長ケーブル投影長 220m

■ バンクーバー スタジアム (1983)



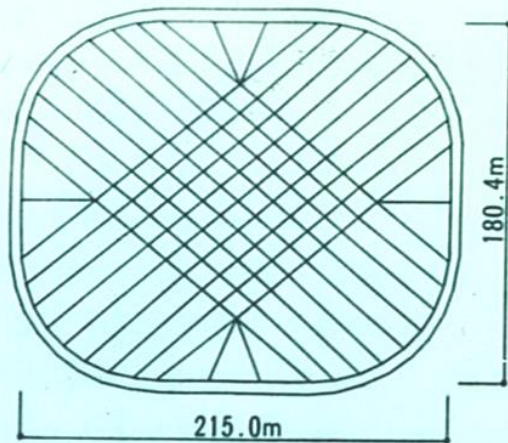
屋根面投影面積 35309 m<sup>2</sup>  
最長ケーブル投影長 224m

■ 後樂園ドーム



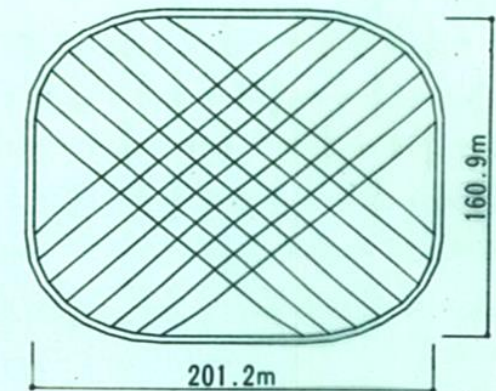
屋根面投影面積 28592 m<sup>2</sup>  
最長ケーブル投影長 201m

■ メトロドーム (1982)



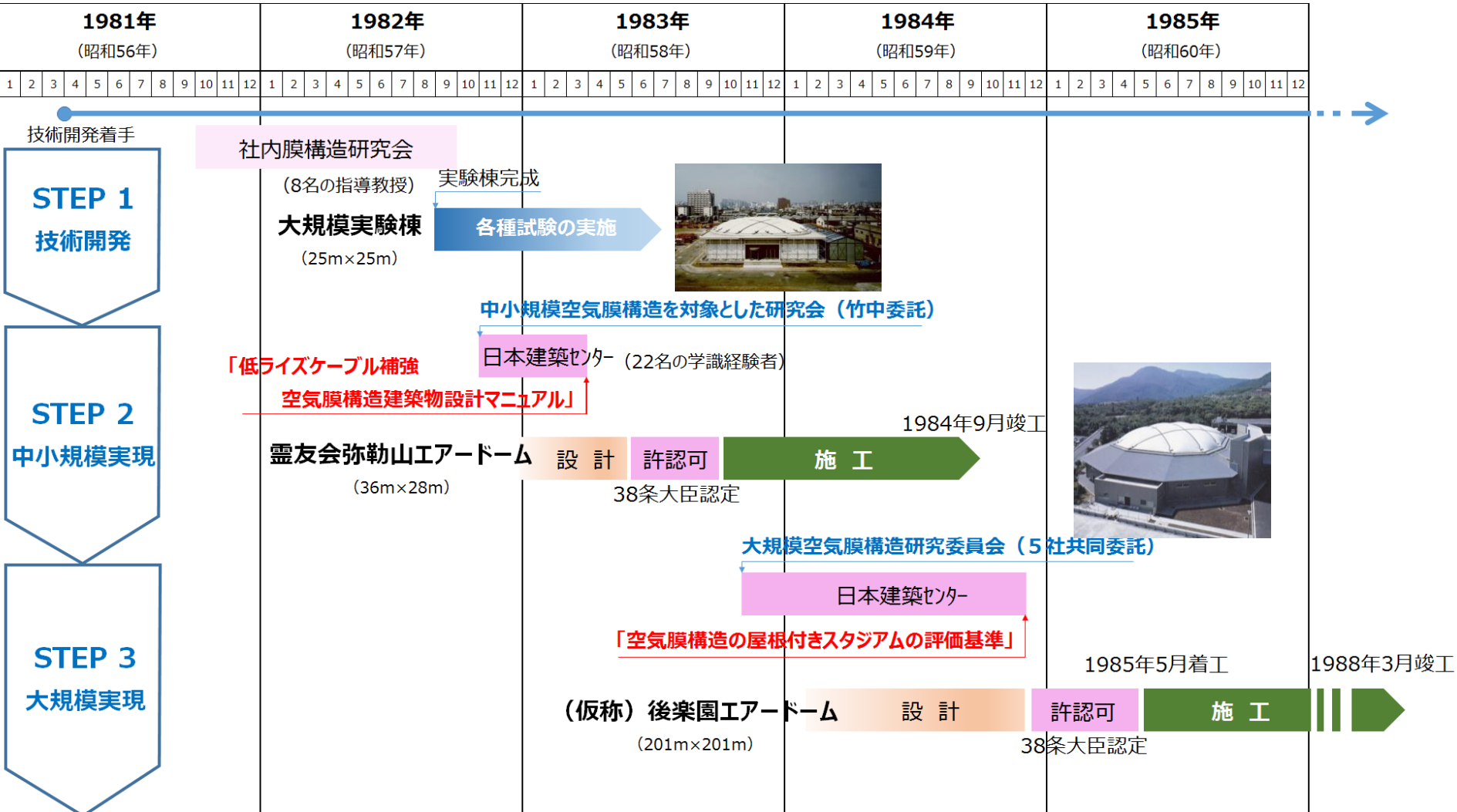
屋根面投影面積 35087 m<sup>2</sup>  
最長ケーブル投影長 234m

■ インディアナポリス スタジアム (1984)



屋根面投影面積 29486 m<sup>2</sup>  
最長ケーブル投影長 208m

# 我が国での実現への経緯



日本膜構造協会の動き

(昭和60年1月)

(昭和59年1月)

- 膜構造建築物研究準備委員会 (昭和58年7月)

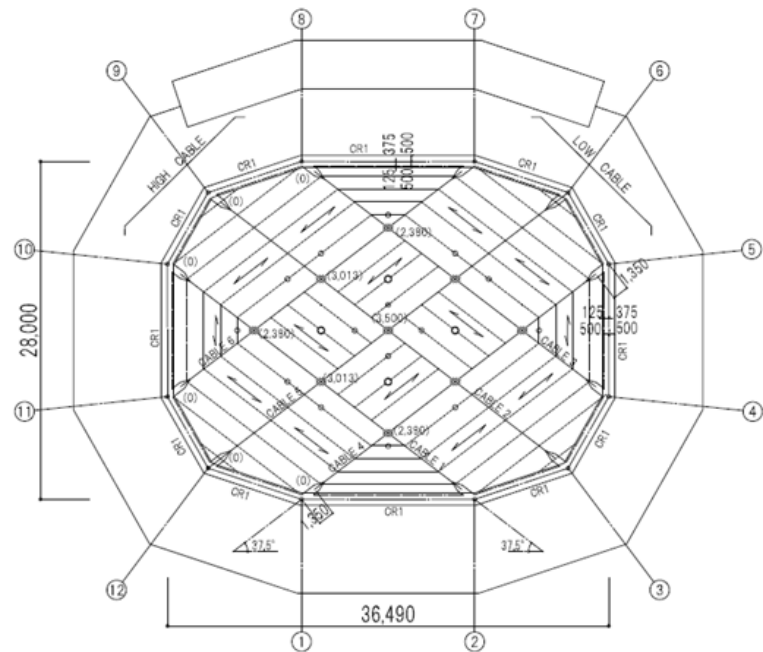
- 膜構造建築物研究委員会発足

- 「中小規模膜構造建築物の設計評価基準」(案)

【一般認定】

- ★ 「中小規模膜構造建築物技術基準」(昭和62年11月)
- ★ 「特定膜構造建築物技術基準」(昭和62年11月)

# 霊友会弥勒山エアードーム



## ■ 建築の概要

建築主	霊友会
建築地	静岡県賀茂郡東伊豆町大川字本野
建物用途	体育館
設計者	株式会社 竹中工務店
施工者	株式会社 竹中工務店
工期	1983年9月～1984年10月
建築面積	1,924㎡
延べ床面積	2,029㎡
軒高	7.6m
階数	地上2階
構造種別	主体構造 RC造
屋根構造	低ライズケーブル補強空気膜構造
屋根スパン	36.49m×28.00m

解体 2013年5月 (建設後29年目)

## ■ 屋根構造の設計概要

- ①設計荷重
  - 屋根自重 約8kg/㎡
  - 風荷重 設計用速度圧
  - $q=60 \cdot H^{1/2}=220 \text{ kg/㎡}$
  - 風圧係数 風洞実験に基づき設定
  - 積雪荷重 最大積雪深 60 cm、  
120 kg/㎡の均等分布荷重を設定
- ②解析手法 膜材とケーブル材のリンクリング及び  
膜材の異方性を考慮した幾何学的非線形解析

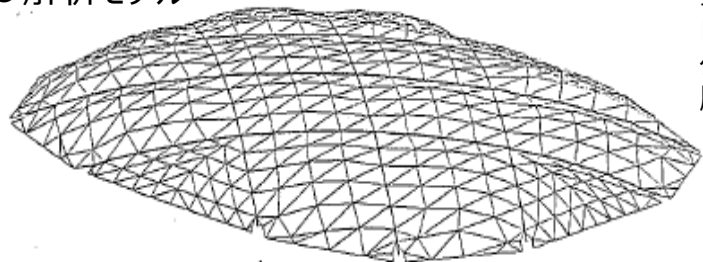
## ■ 内圧設定値

- ①平常時 25 mmAq
- ②強風時 (平均風速が15m/秒を越える場合) 60 mmAq
- ③積雪時 (降雪を感知した場合) 60 mmAq
  - (積雪が約17cmを超えた場合) 100 mmAq
  - (積雪が約30cmを超えた場合) 145 mmAq



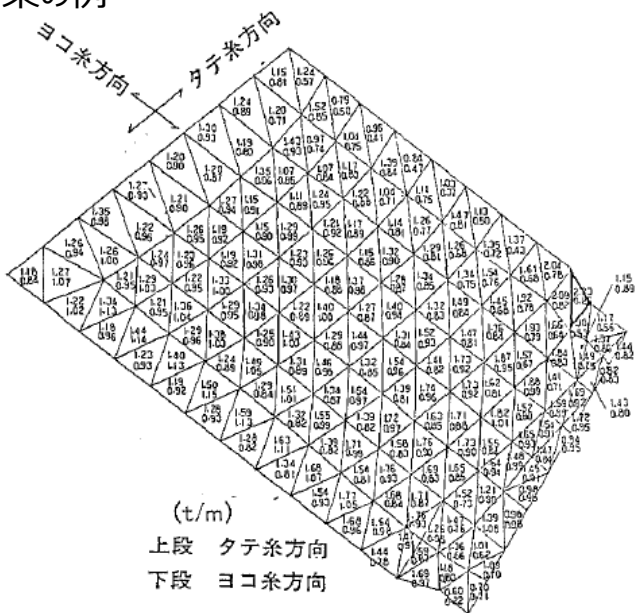
# ■ 設計時の解析モデルと解析結果

## ● 解析モデル



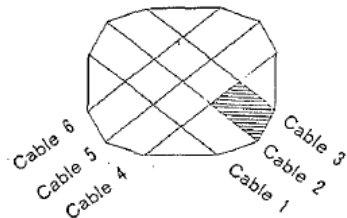
全節点数 437  
 自由節点数 321  
 ケーブル要素数 116  
 膜要素数 732

## ● 解析結果の例



タテ糸方向最大張力  $\sigma_{max} = 2.23t/m$

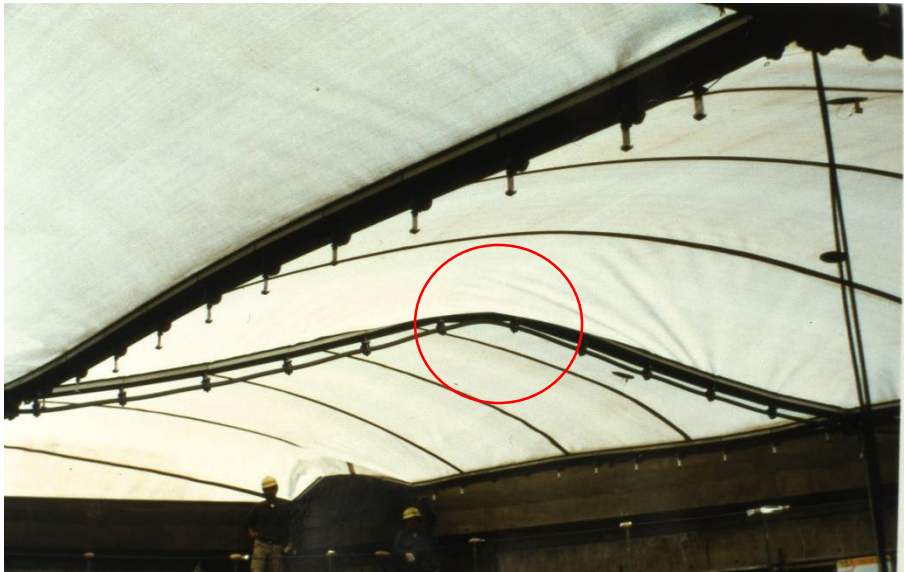
ヨコ糸方向最大張力  $\sigma_{max} = 1.28t/m$



# ■ インフレート形状



# ■ インフレート時の課題 (霊友会弥勒山エアードーム)

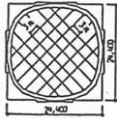


## Ⅱ．東京ドーム 主要構成技術と実現のプロセス

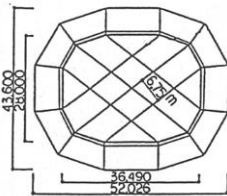




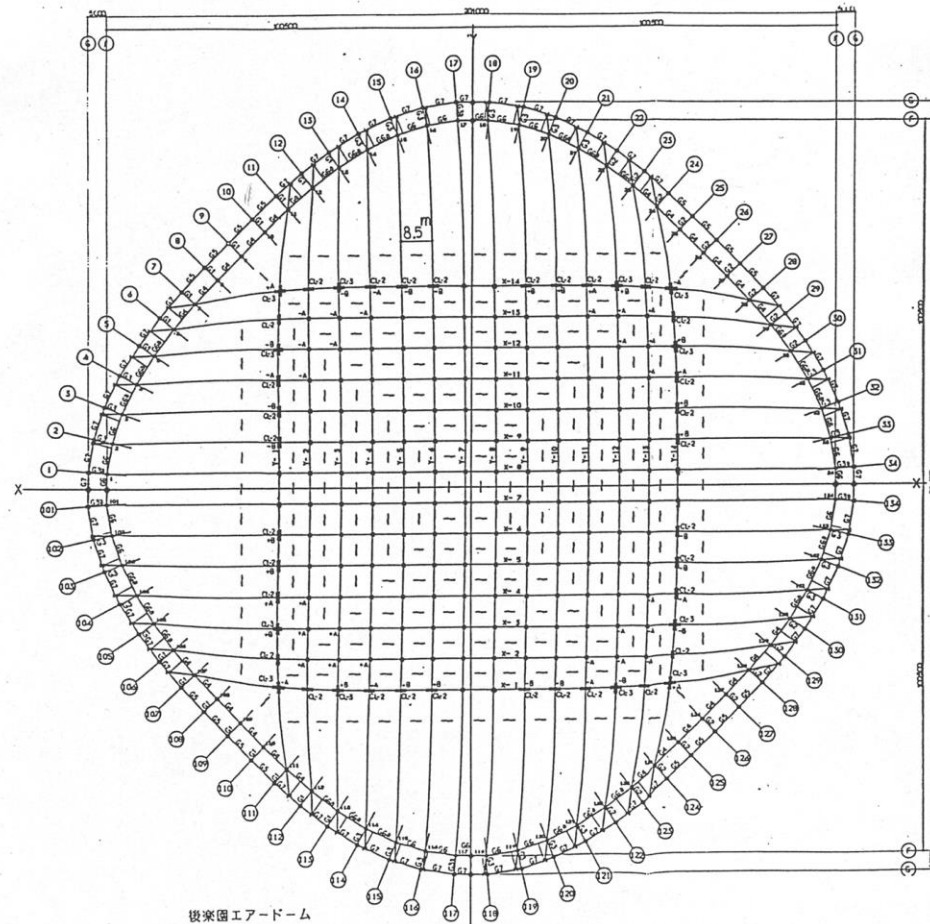
# 屋根のスケール比較



- 大型実験棟 ( 472 m<sup>2</sup> )



- 霊友会弥勒山エアードーム  
( 907 m<sup>2</sup> )



- 東京ドーム ( 28,593 m<sup>2</sup> )



# 東京ドーム 一般事項

## ■ 建物概要

建物名称：東京ドーム

建築場所：東京都文京区後楽1丁目3-6

用途：(主) 野球場 (従) 多目的競技場

建築主：(株) 後楽園スタジアム

設計：KAD共同設計室 日建設計  
竹中工務店

施工：竹中工務店

竣工：1988年3月18日

敷地面積：117,790m<sup>2</sup>

建築面積：45,173m<sup>2</sup>

延べ面積：106,491m<sup>2</sup>

階数：地下2階、地上4階、塔屋2階

高さ：軒高 GL+16.45~36.45m  
最高部 GL+56.5m (屋根)

## ■ 構造種別

基礎地業：RC造独立基礎 (2重スラブ)  
場所打ちコンクリート杭

架構地下：RC造 (一部SRC造)

地上：SRC造 (一部RC造)

境界構造：コンプレッションリング SRC造  
リング支持架構 S造

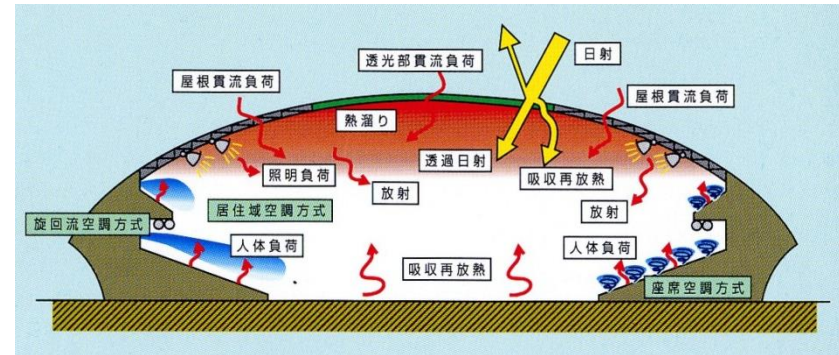
屋根構造：低ライズケーブル補強空気膜構造



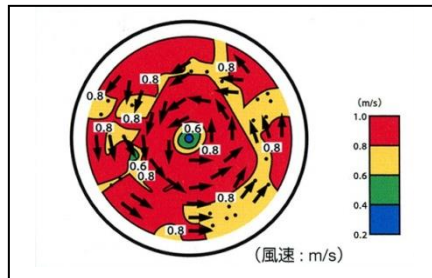
# 大空間構造を構成する主要技術

## ■ 空調関連技術

大空間の空調システムは、建物形状、日射、人体発生熱、利用目的など、種々の条件を考慮します。居住域空調方式、旋回流空調方式、座席空調方式などの多彩な空調方式と、自然換気制御方式、体感温度制御方式などの制御方式を組合せ、最適な空調システムを構築します。



### ● 旋回流空調方式の気流シミュレーション



旋回流によって作られたそよ風が体感温度を下げ、冷房時の快適性を向上させます。

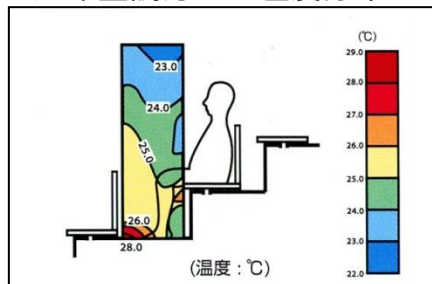


旋回流の可視化実験



風速センサーと輻射温度計

### ● 座席空調方式の温度分布シミュレーション



段床部から空調する方法は、暖房時に非常に効率的です。



旋回流ファン



座席空調

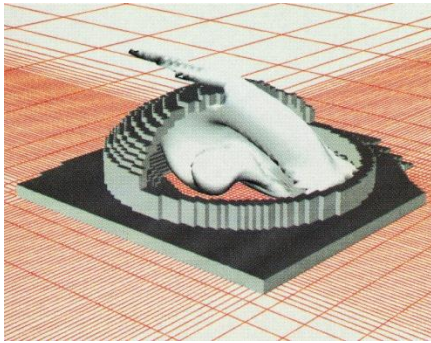


# 大空間構造を構成する主要技術

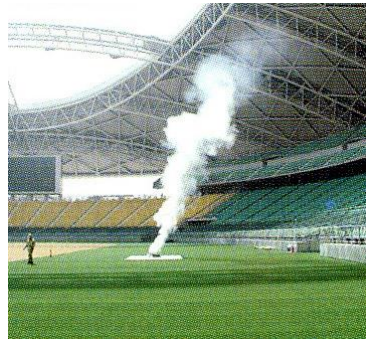
## ■ 防災関連技術

### ● 3次元煙流動シミュレーション

大空間建物は火災時の安全性確保が重要な設計要件の一つとなっていますが、火災時の安全性を検討するためには煙が空間内をどのように流れるかを詳細に予測することが必要となります。このシステムは、立体的な煙の流れを流体解析手法を用いて詳細に予測し、その結果をビジュアルに表現して安全性の評価を行うシステムです。煙流動状況を詳細に予測することによって、安全で合理的な空間を実現します。



解析結果



煙流動実験

### ● 消火システム



放水砲

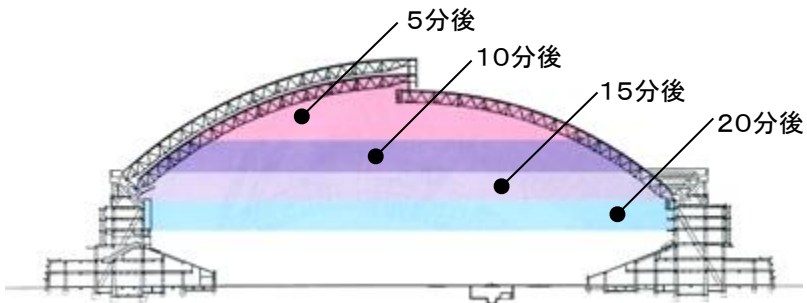


防災センター



自動火災感知装置

### ● 蓄煙システム



蓄煙シミュレーション



放水実験



# 大空間構造を構成する主要技術

## ■ 音響関連技術

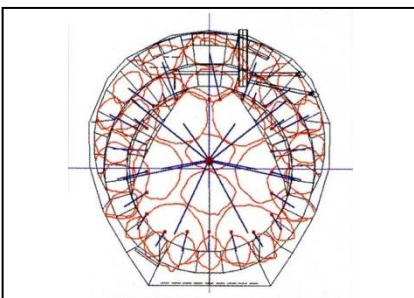
ドームのような大空間では、残響時間やロングスパンエコーそして不均一な音源分布が原因で、音響障害が occu r やすくなります。明瞭に聞こえる環境を実現するために、コンピュータシミュレーションと実音試験を重ねながら、建築音響と電気音響を融合させ設計します。

### ● 実音視聴試験



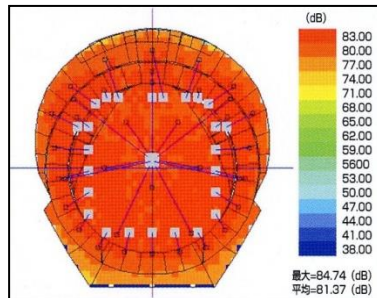
ドーム内観を見ながら設計時点で明瞭度の評価ができます。

### ● カバーエリアシミュレーション



スピーカーシステムの適正な配置、仕様と台数を決定します。

### ● 音圧分布シミュレーション



フィールドや観客席で均一な音圧が確保できるか確認します。

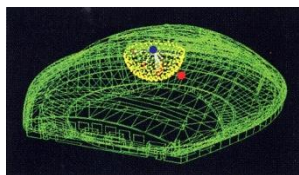


札幌ドームでは屋根全面に吸音ルーバーなどの吸音材で残響時間を短くしています。

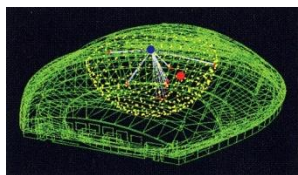
### ● 波頭面のシミュレーション

常設スピーカーから放射された音の時間的な広がりや反射音の経路がビジュアルに確認できます。

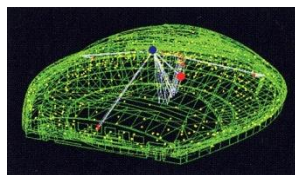
- メインスピーカー位置
- 受音点



時刻: 70[msec]  
周波数: 500[Hz]



時刻: 150[msec]



時刻: 300[msec]



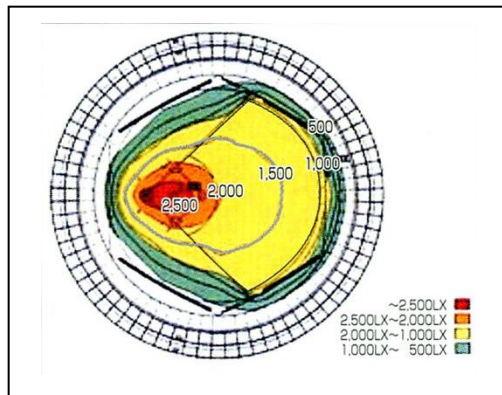
シミュレーションに基づき集中分散方式によるメインスピーカー及びサテライトスピーカーが配置されています。遅延時間や温室をコントロールすることにより各種イベントに最適な音声空間を設定できます。

# 大空間構造を構成する主要技術

## ■ 照明関連技術

ドームなどの大空間構造物では、設計の初期段階で昼光(自然光)利用の効果を予測し、これを実際の建物に反映させることが重要です。自然光の利用率はランニングコストに直結します。一方、イベントに対応した人工照明は、配置、光源、出力等について十分なシミュレーションが行なわれます。

### ● 照度分布シミュレーション



### ● 球の見え方の確認模型試験



### ● 中空照明



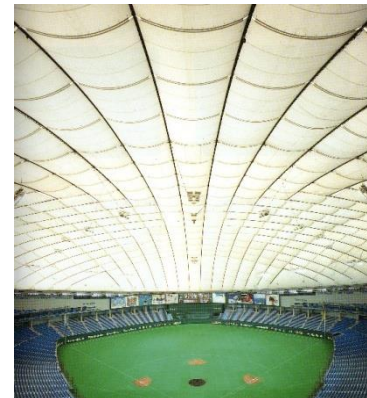
野球の照明は選手の目に入らない場所でグラウンドを照らすことは当然ですが、フライを取り易くするためにボールの下面を照らす中空照明も重要な設備になります。

### ● 用途に応じた最適照度のシミュレーション



多目的ドームの照明設備は様々なイベントに適したものとする必要があります。たとえば野球時には内野部分中心の明るさが必要であり、サッカー時にはグラウンド全体の均一な明るさが望まれます。

### ● 膜屋根の均一な光環境



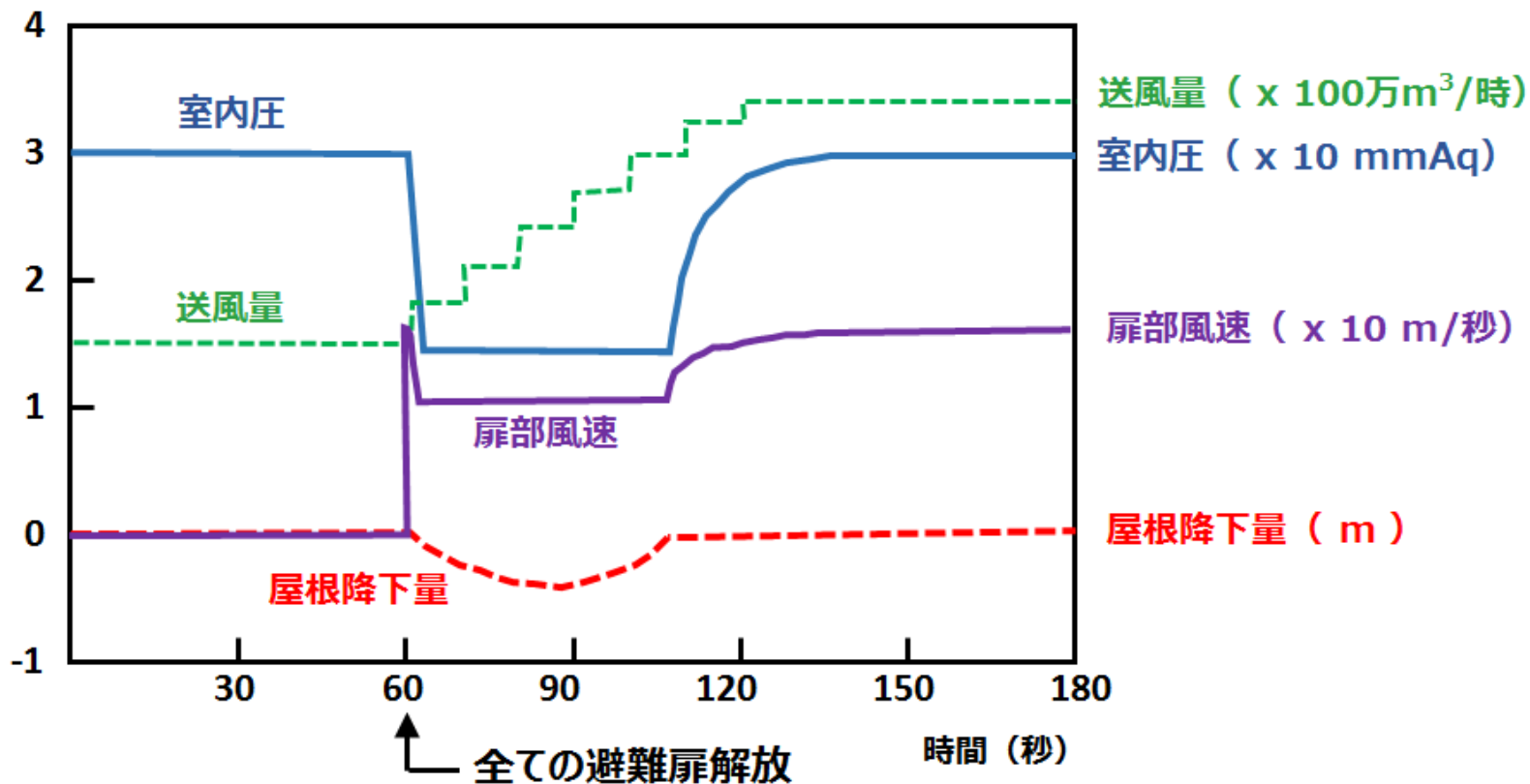
### ● トップライトによる光環境演出



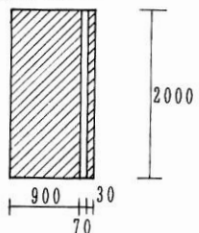


# 空気膜構造と火災避難の複合した課題

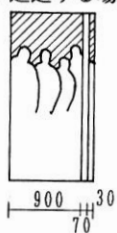
## ■ 避難扉解放時の内圧、送風量、扉部風速、屋根高さの過渡的变化



人がいない場合

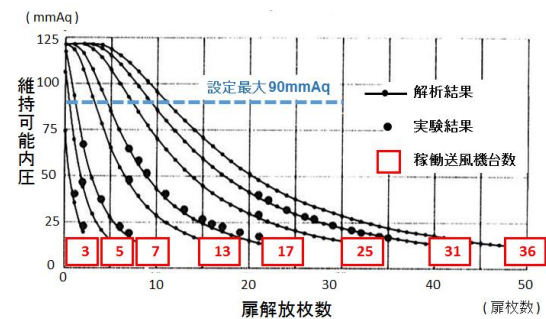


人が通過する場合

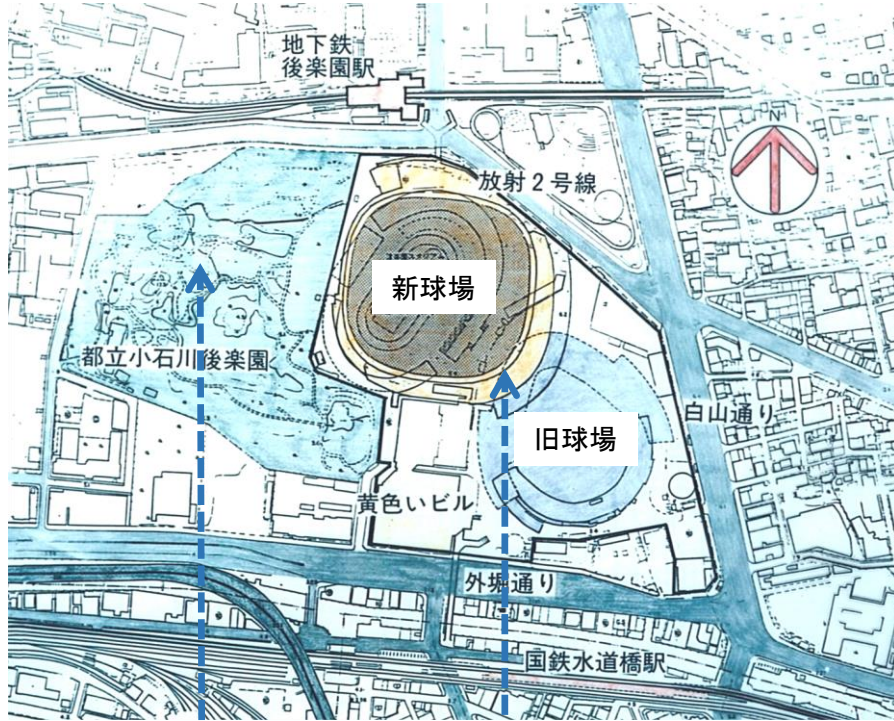


避難扉での漏気量計測状況

図-5 バランス扉における人の通過



# 東京ドーム固有の制約条件



旧球場との平面的な重なり

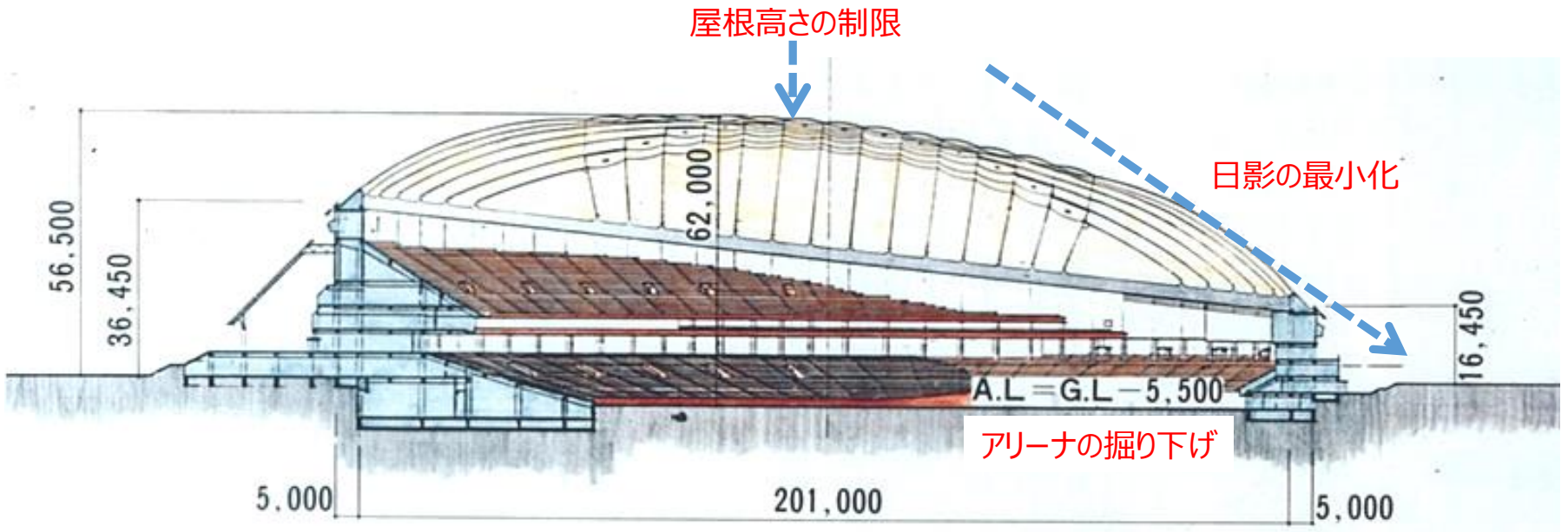
西側庭園への日影上の配慮



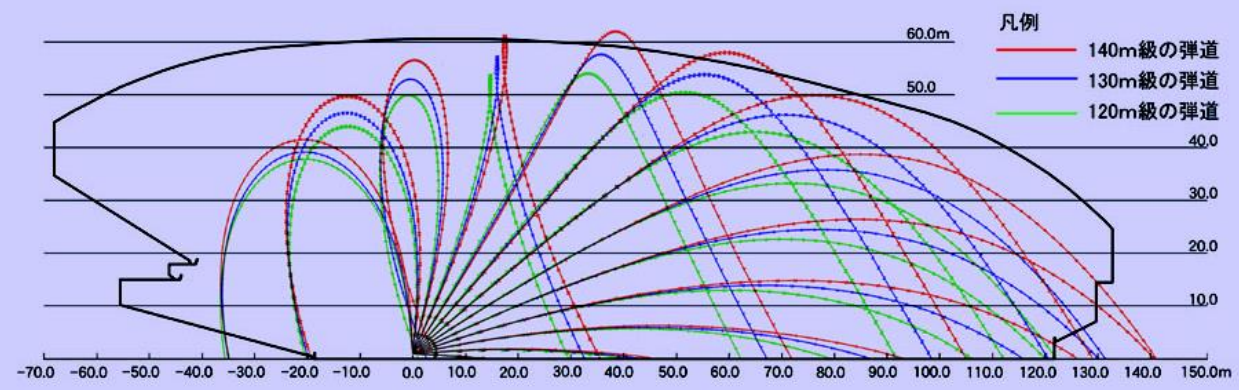
旧球場と平面的に一部ラップして建設されている新球場



# 日影条件に対する解決策 屋根全体を1/10勾配で傾斜

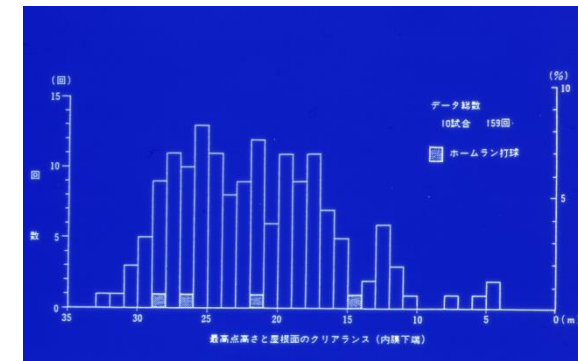
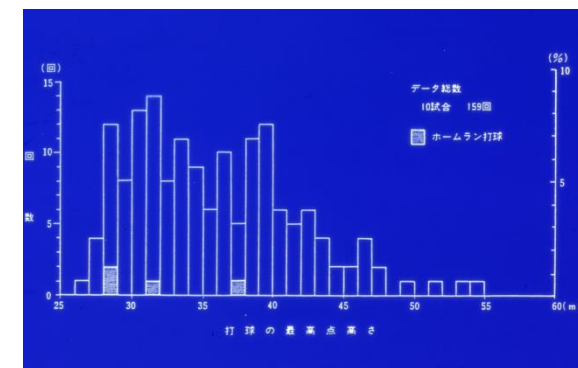
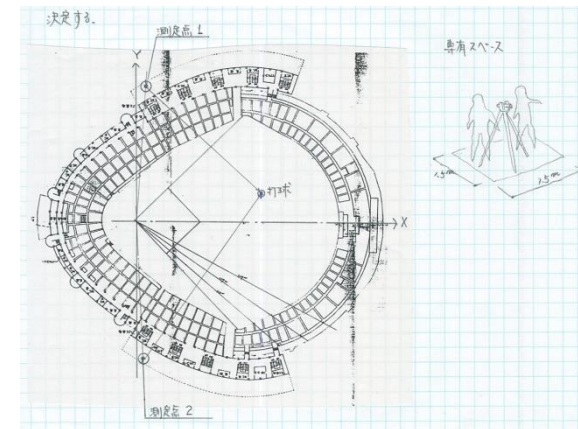
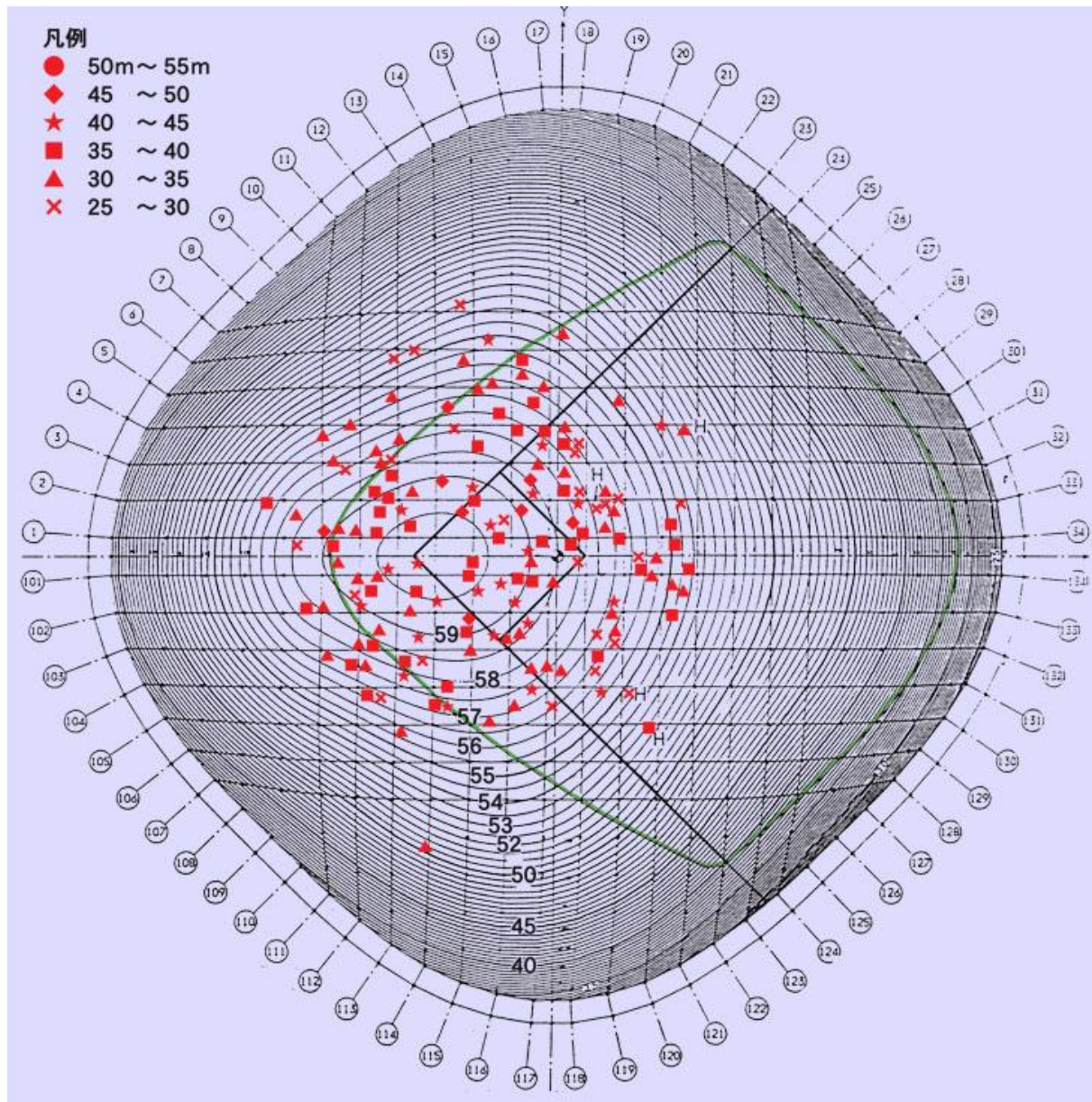


### 屋根高さの最小化と打球との関係



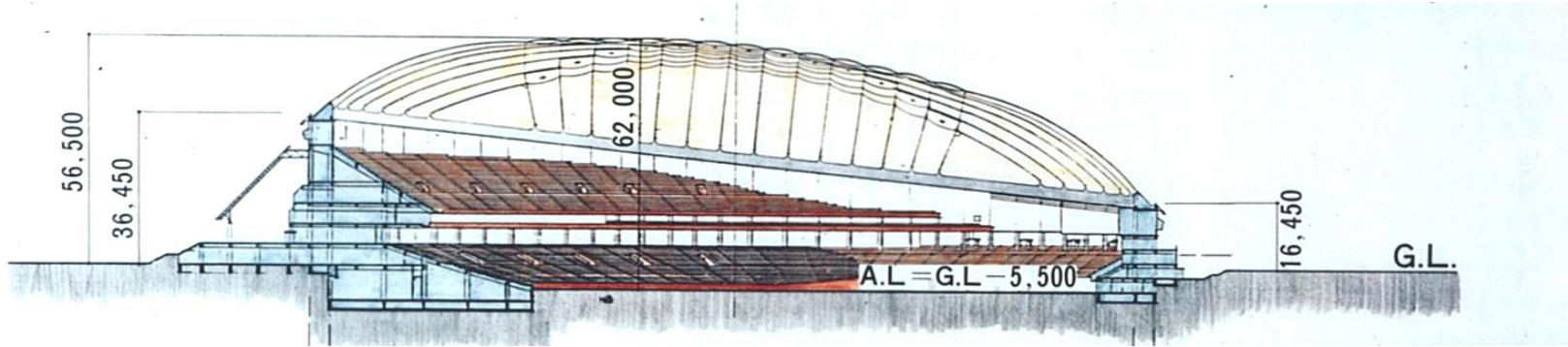


# 打球の実測による屋根形状の妥当性確認

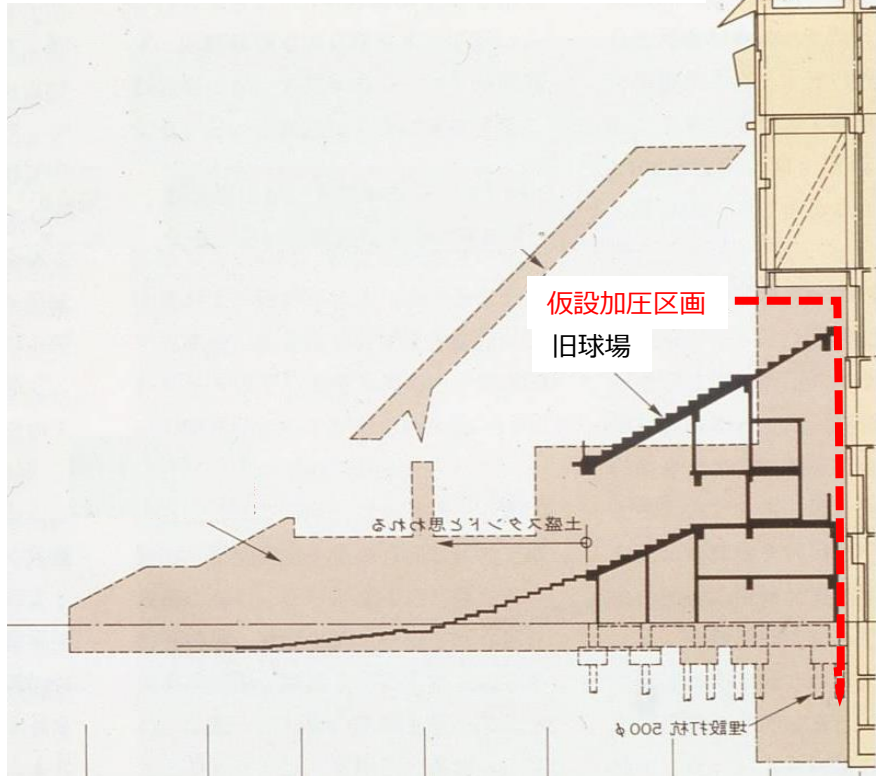




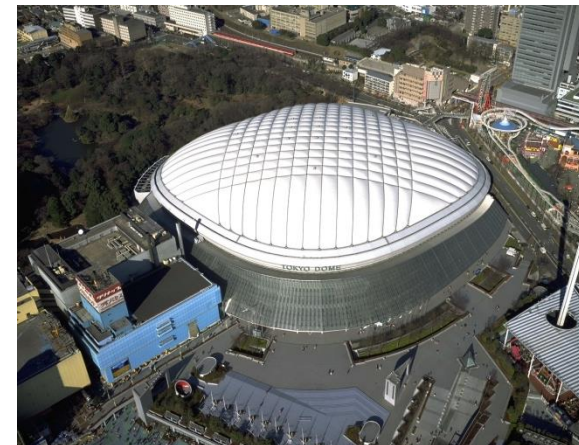
# 旧球場との平面的な重なりに対する対応



旧球場の解体及び新球場の躯体を含む建設を、僅か5か月で実施する必要があった

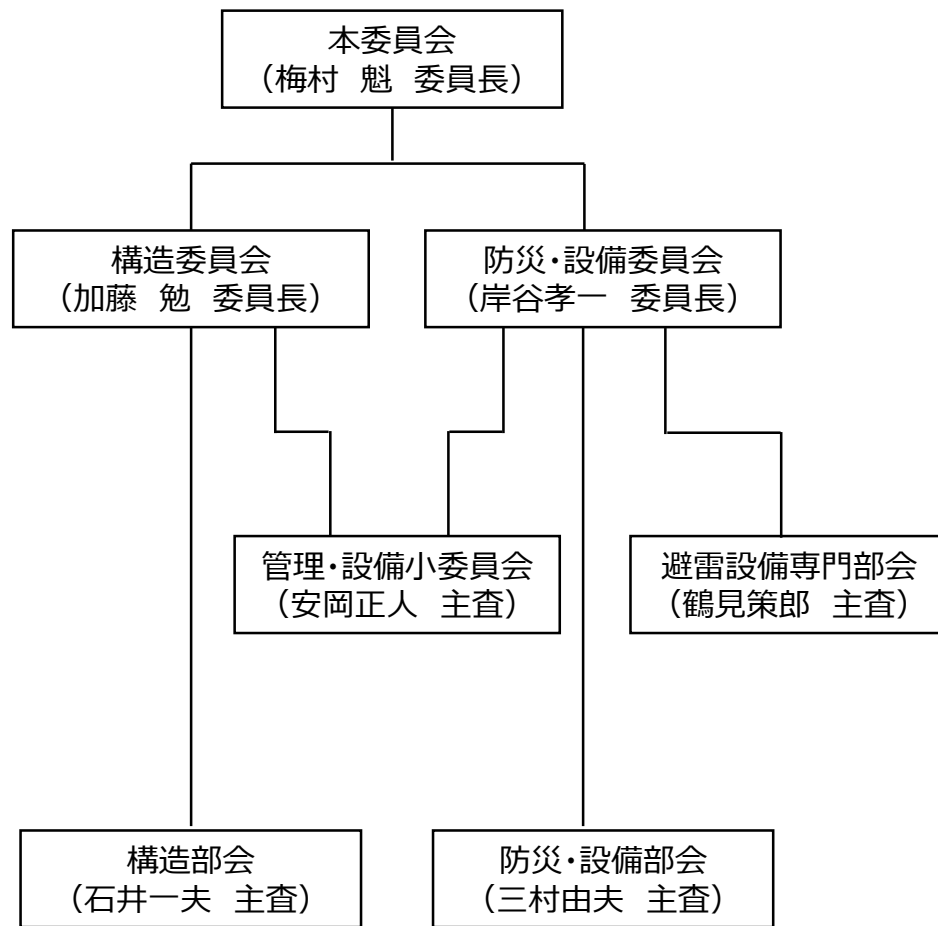


約5ヶ月の工期





# 「(仮)後楽園エアードーム」評定委員会と委員会記録

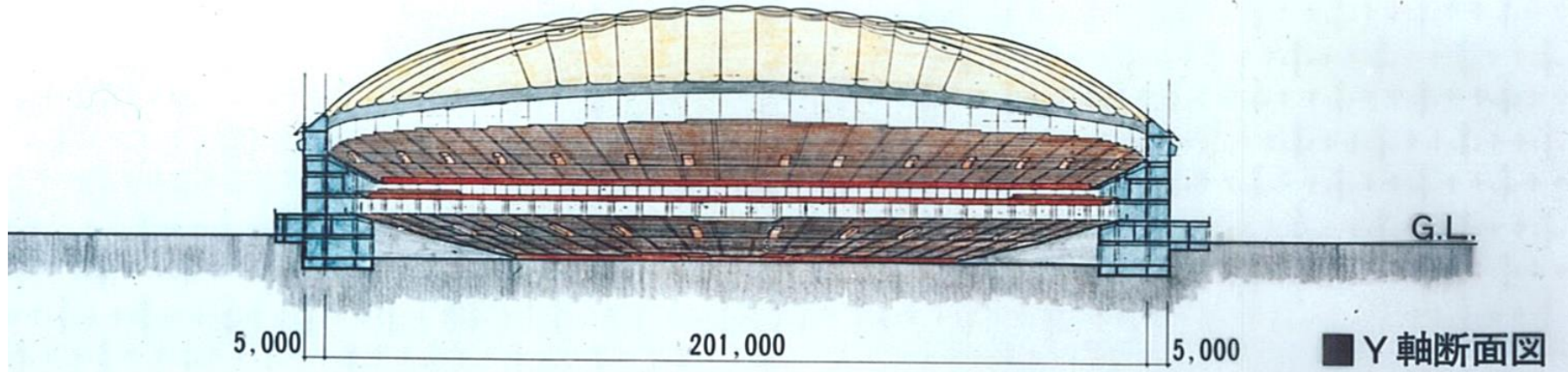
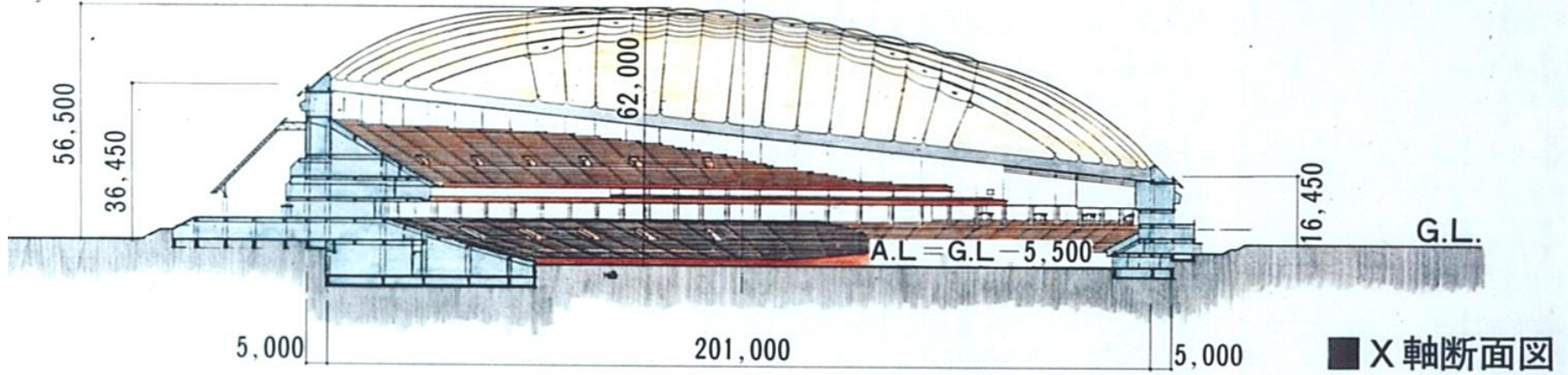


委員：35名  
協力委員：13名

		本委員会	構造委員会	防災・設備委員会	管理・設備小委員会	避雷設備専門部会	構造部会	防災・設備部会
昭和 59年	12月	●12/25 第1回 本委員会	●12/25 第1回 委員会	●12/25 第1回 委員会		●12/20 第1回部会		
	1月					●1/18 第2回部会 (実験立会) ●1/25 第3回部会	●1/17 第1回部会 ●1/22 第2回部会	●1/18 第1回部会 ●1/29 第2回部会
						●1/30 第1回 小委員会		
昭和 60年	2月		●2/13 第2回 委員会	●2/15 第2回 委員会	●2/13 第2回 小委員会		●2/5 第3回部会	●2/8 第3回部会
						●2/18 第4回部会	●2/25 第4回部会	
	3月	●3/7 第2回 本委員会		●2/28 第3回 委員会	●2/28 第3回 小委員会			

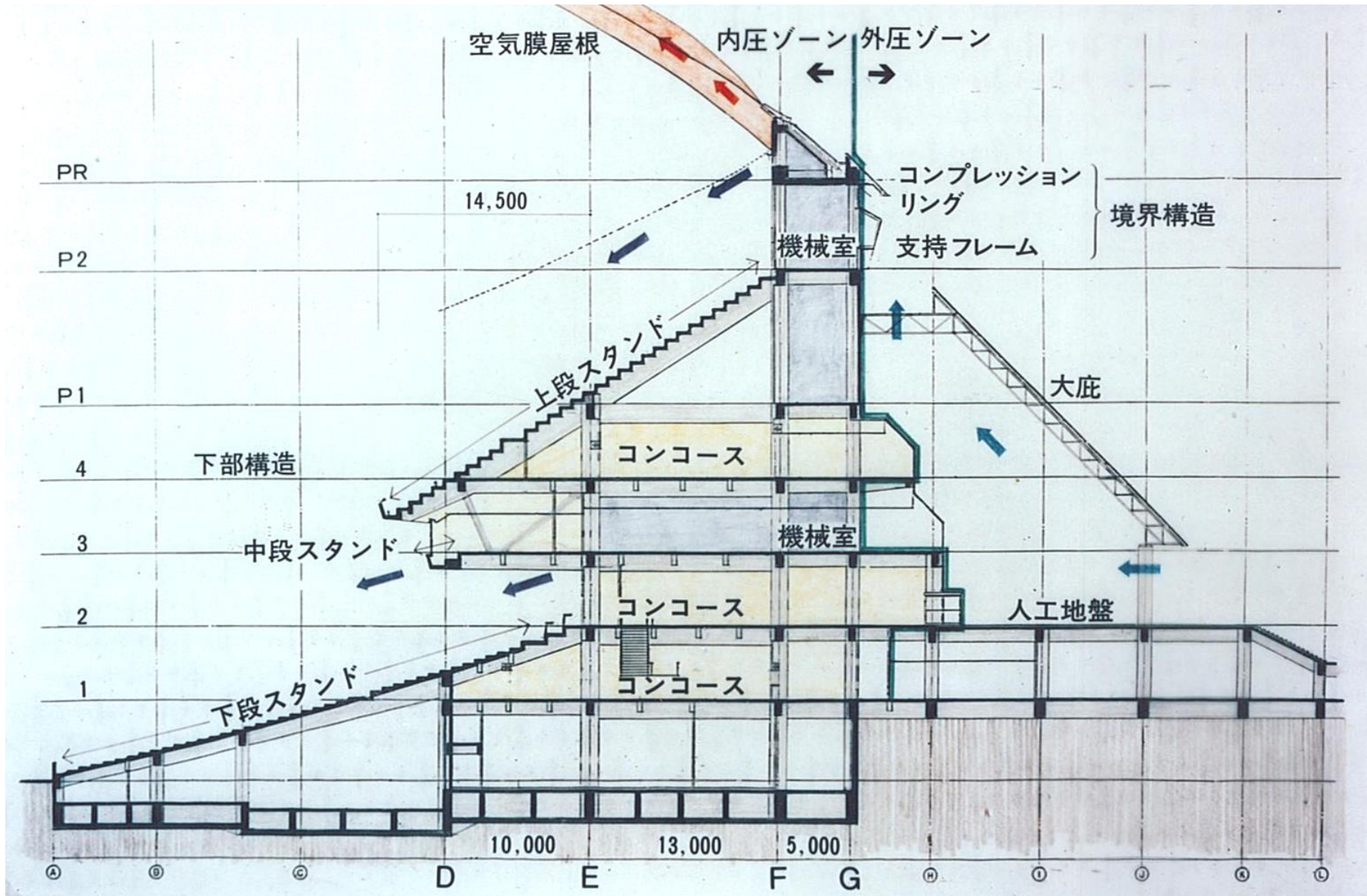
84年12月20日～85年3月7日の期間に、延べ21回の委員会と部会

# 全体断面図





# 内野部分 断面図

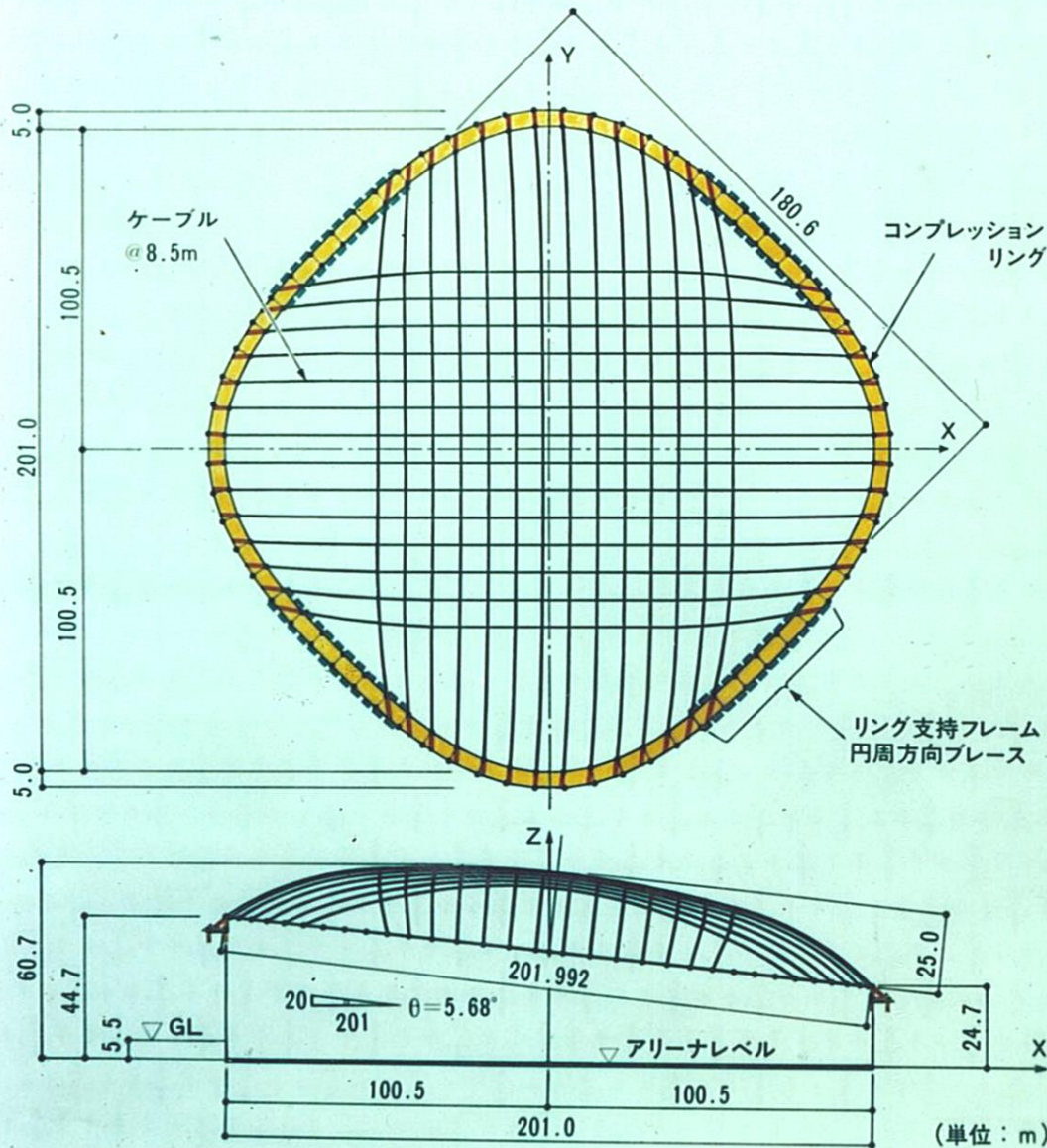


# Ⅲ. 東京ドーム 空気膜構造の概要



# 屋根の概要

## ■ 屋根構造



### 低ライズケーブル補強空気膜構造

平面形 : 対角スパン201m×201mの超楕円形

コンプレッションリングの傾き : 1/10 (5.68°)

スパンライズ比 : リング傾斜面に対し  $25/202 \approx 0.124$

ケーブル間隔 : 8.5m

ケーブル材料 : 構造用スパイラルロープ 1×169 A級2種

直径 80mm 断面積 39 cm<sup>2</sup>

切断荷重 554ton ヤング係数 1600t/cm<sup>2</sup>

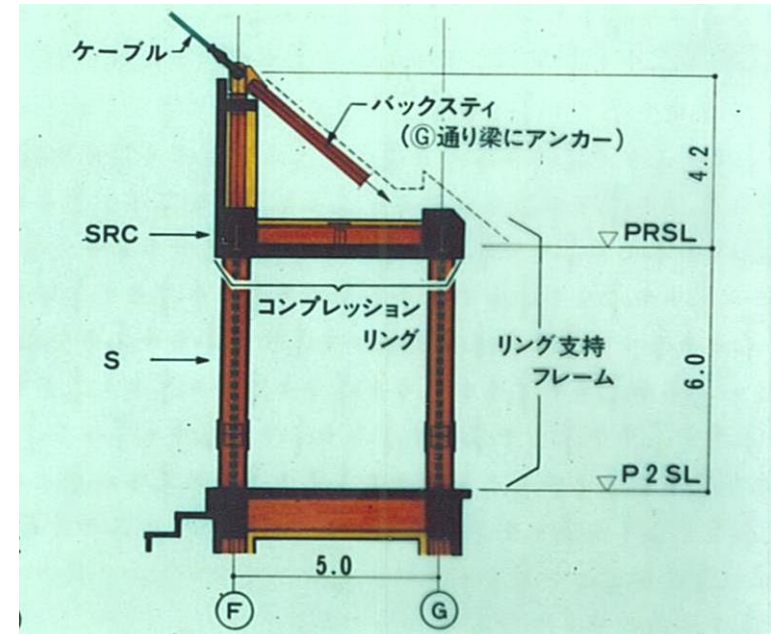
膜材料 : 構造用四フッ化エチレン樹脂コーティング

ガラス繊維布 厚さ 0.8mm

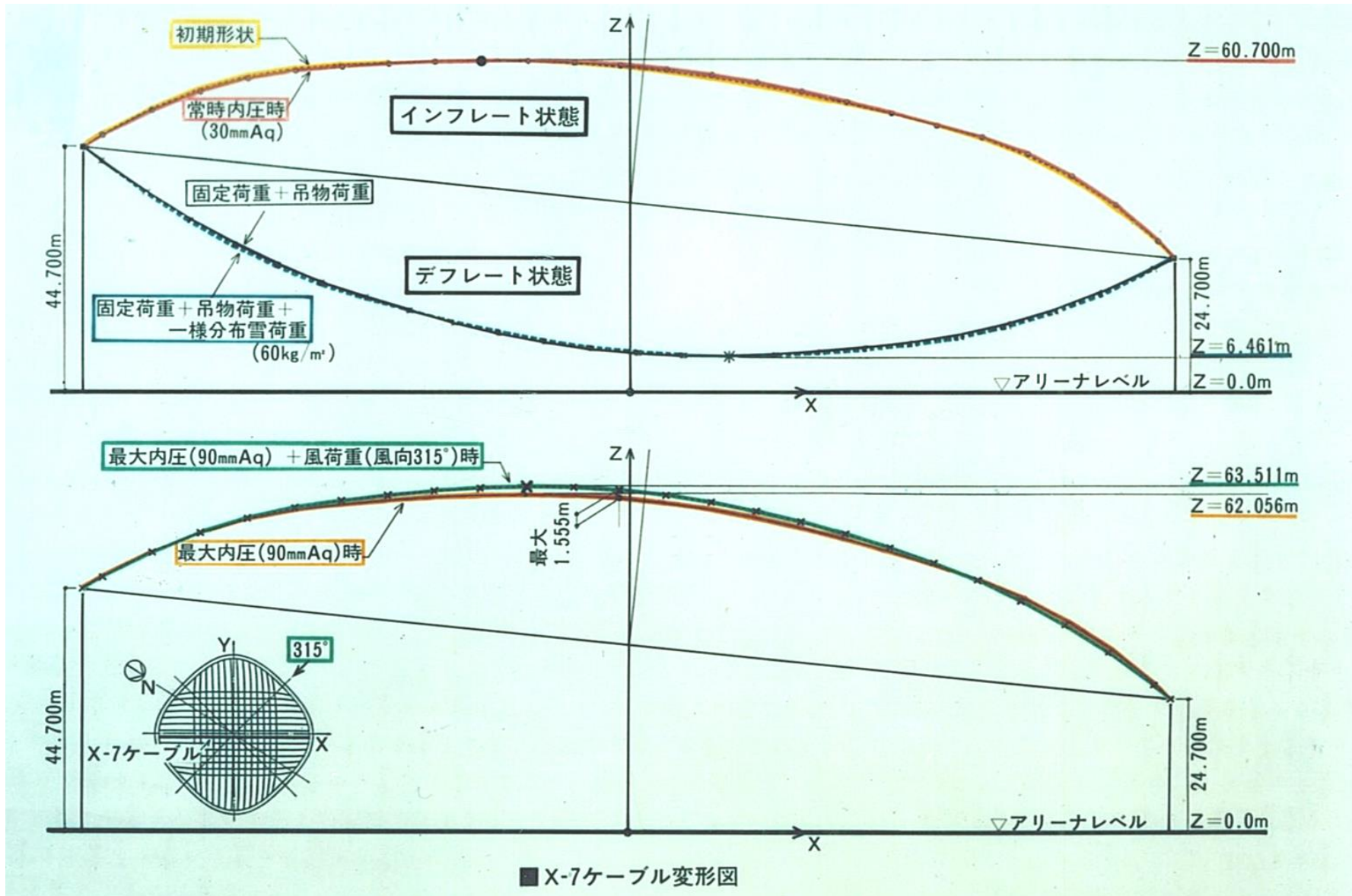
引張耐力 タテ糸方向 15 t/m = 150 Kg/cm

ヨコ糸方向 12 t/m = 120 Kg/cm

## ■ 境界構造



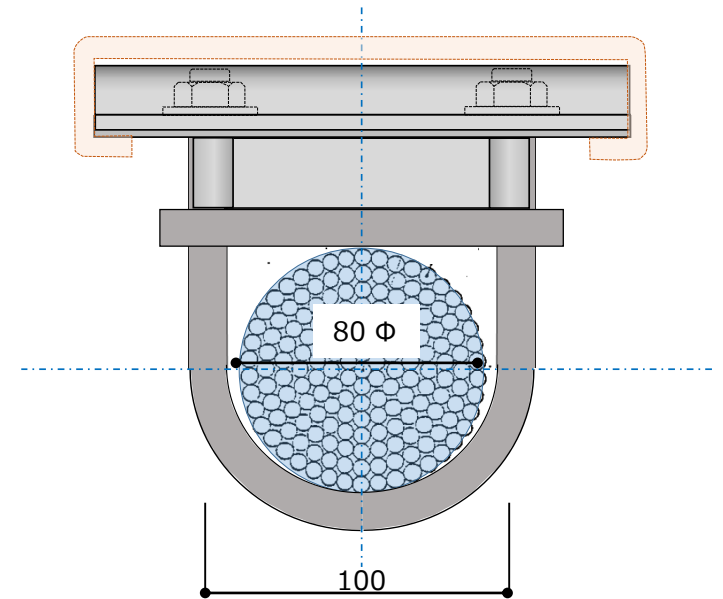
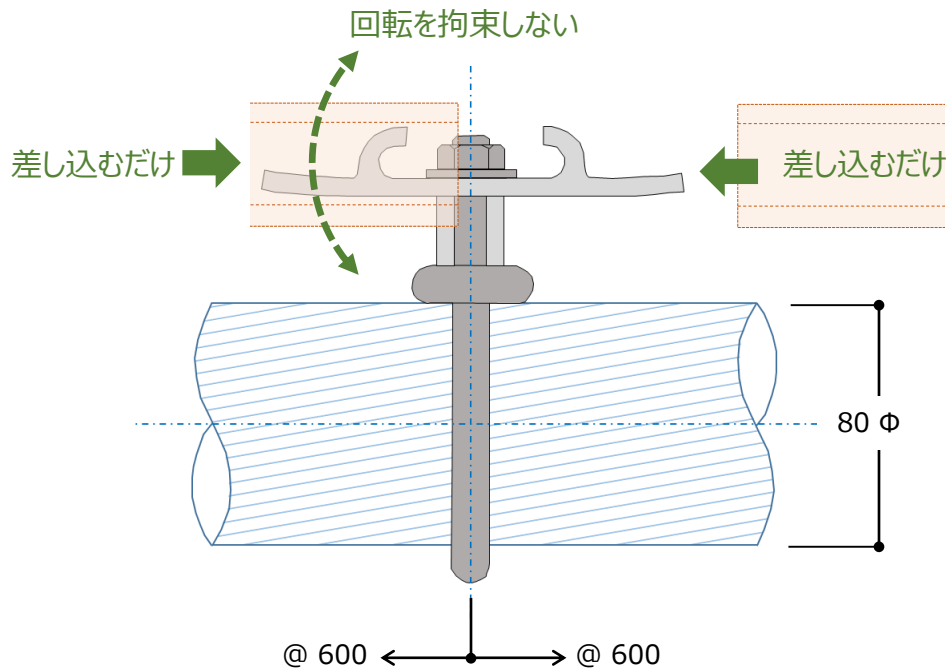
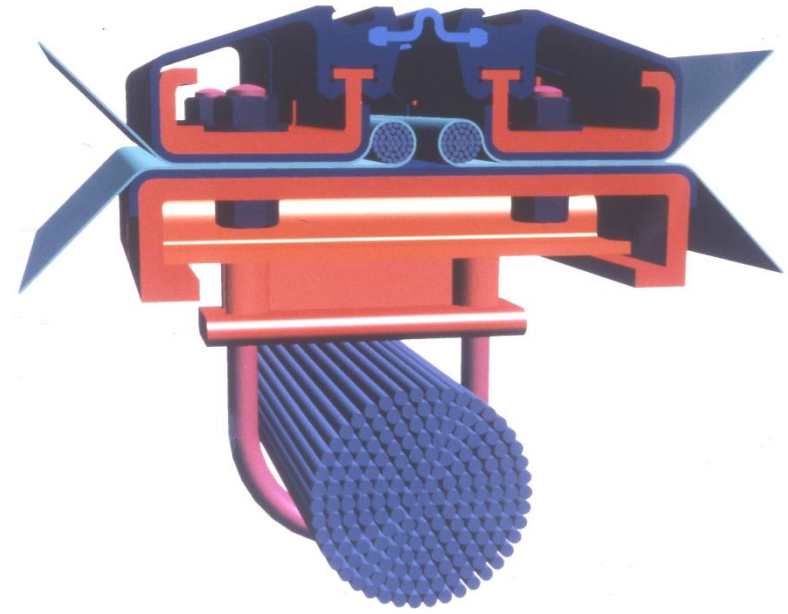
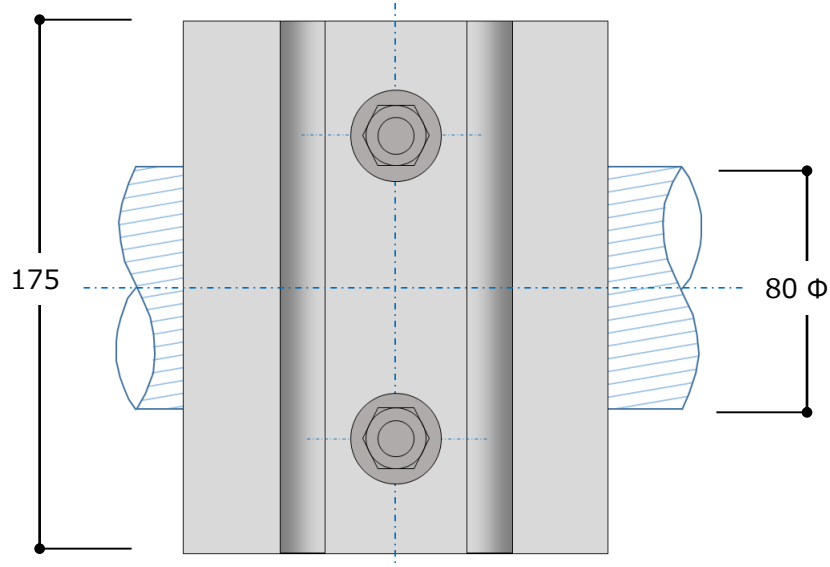
# 屋根の形状と変形





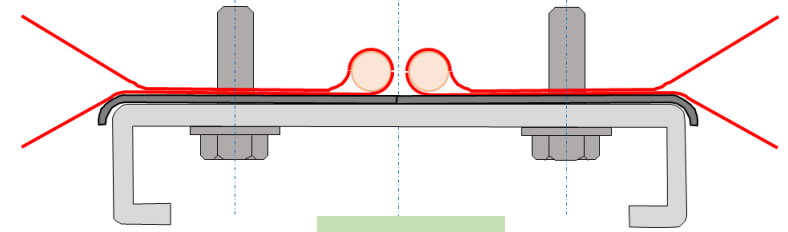
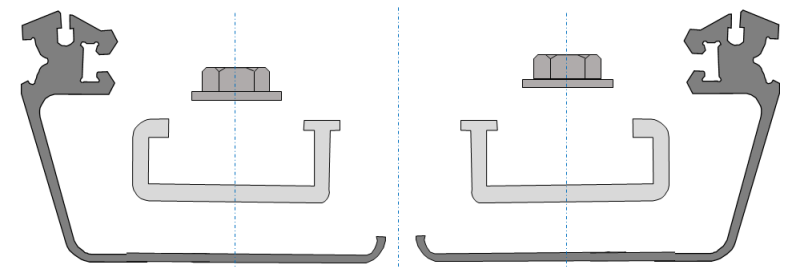
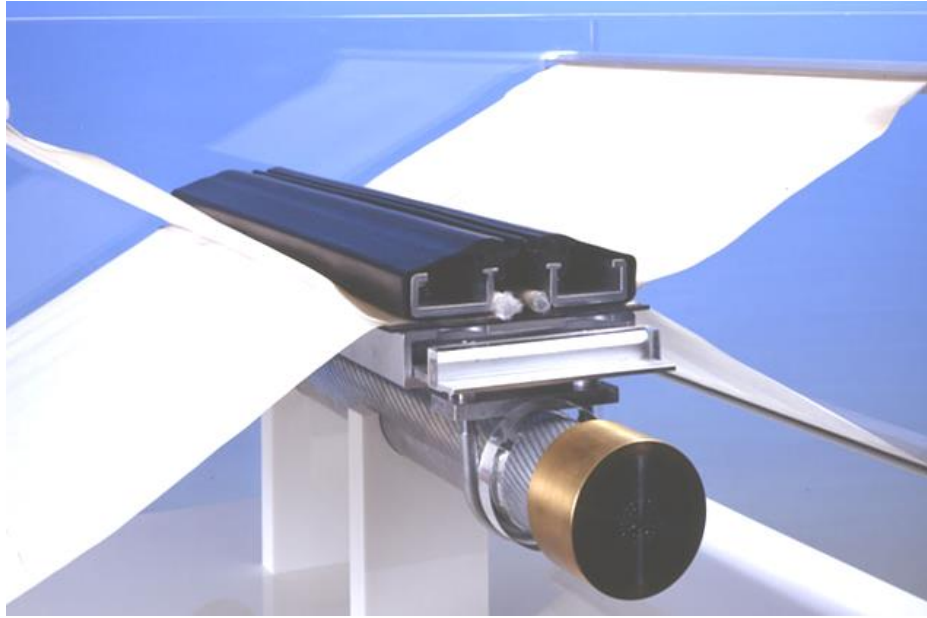


# ケーブルと金物のDetail

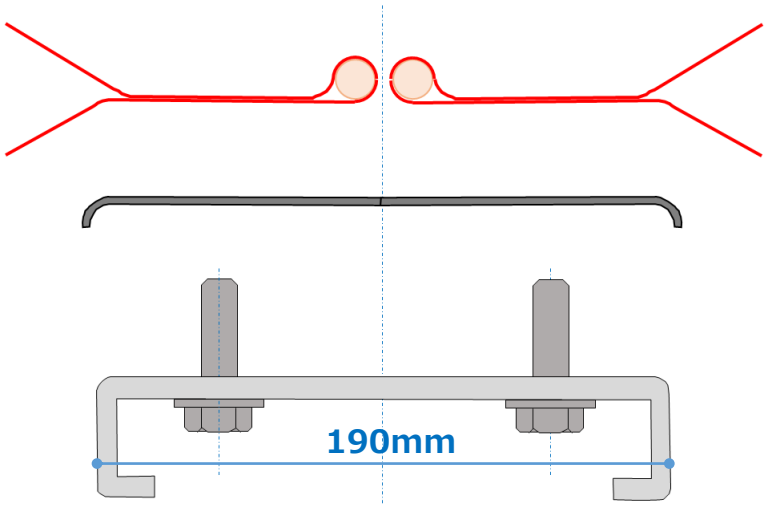




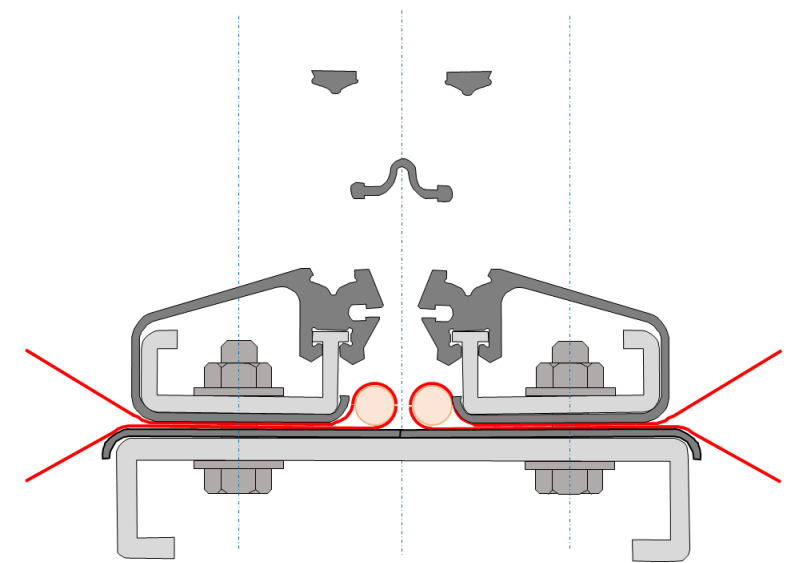
# 膜端部のDetail



STEP 2



STEP 1

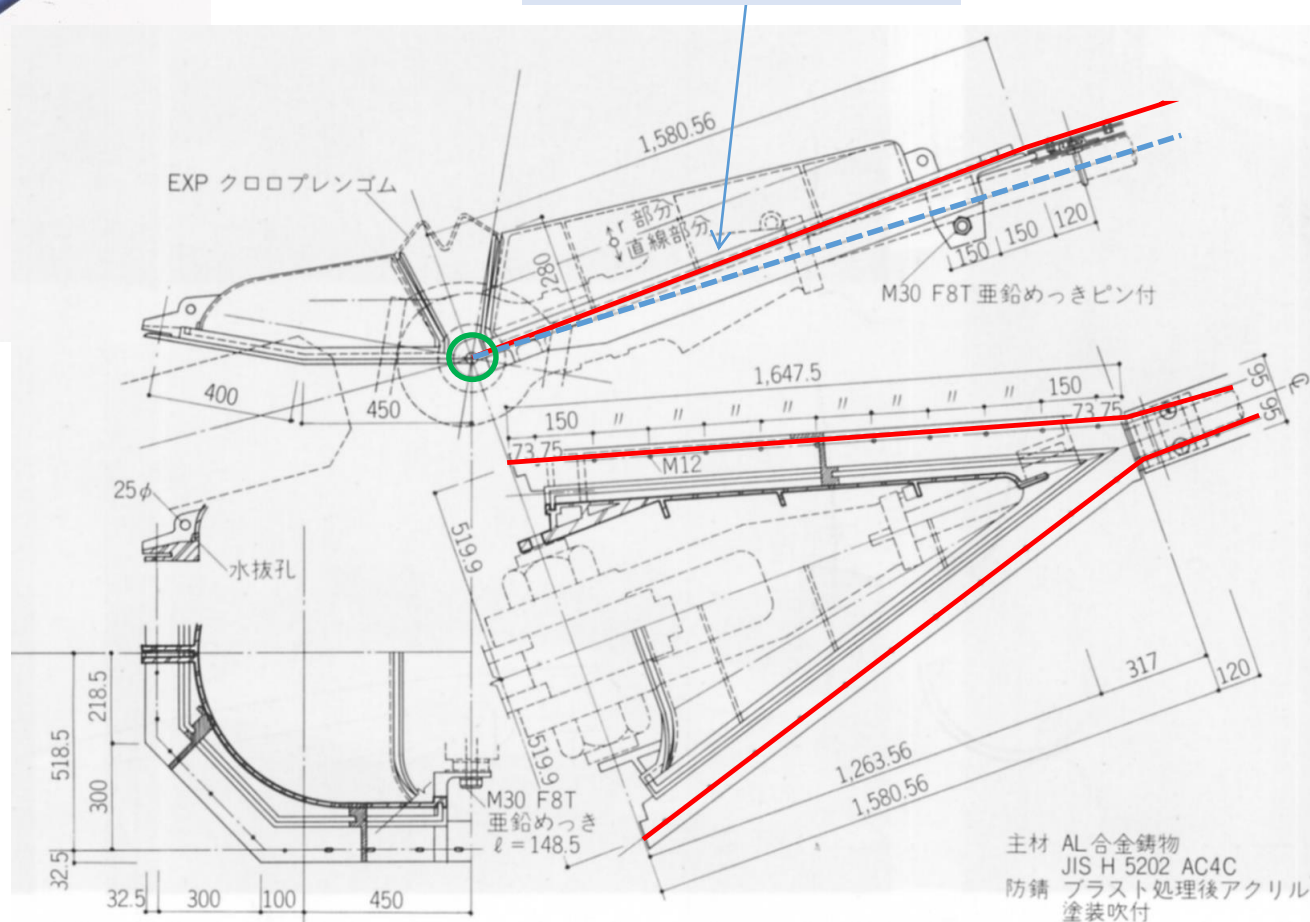


STEP 3

# ケーブル端部の取付け部Detail

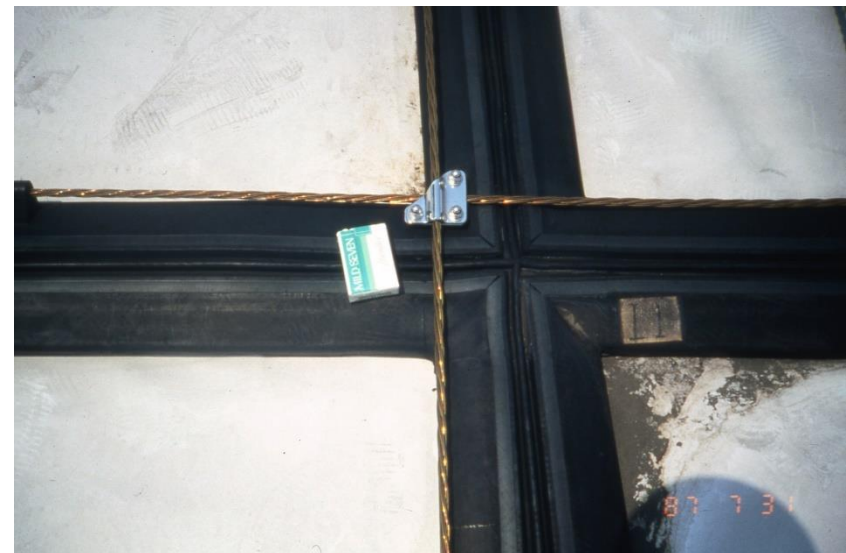
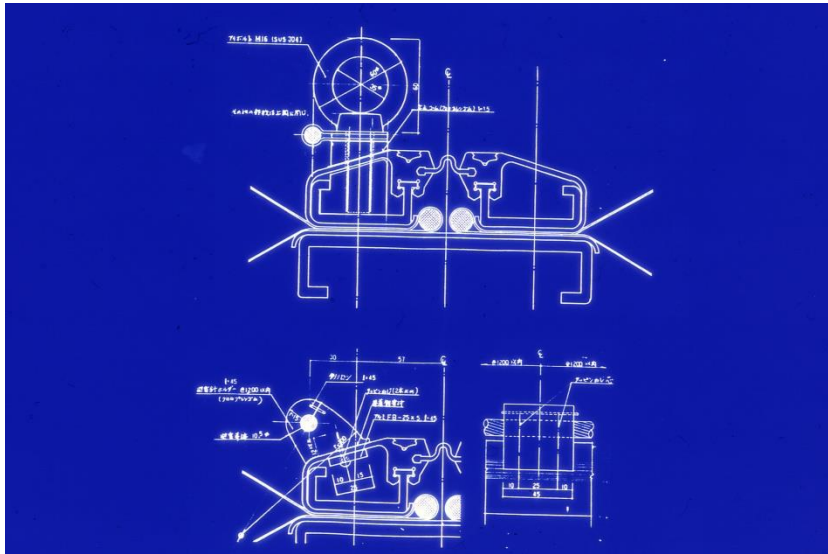
- ・デフレートからインフレート間の大きな回転に追従
- ・膜の取付けレベルを回転の中心に一致させる

## 膜の取付けレベル

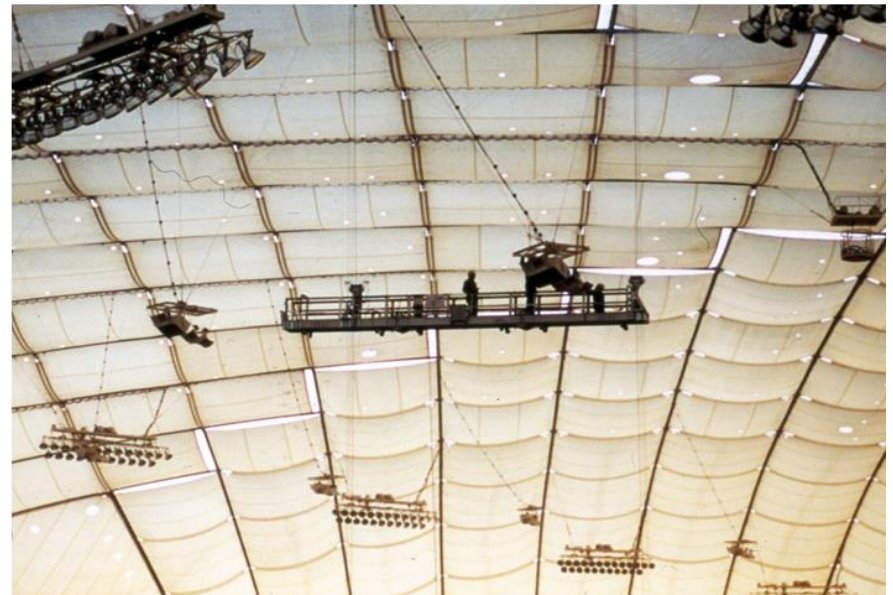
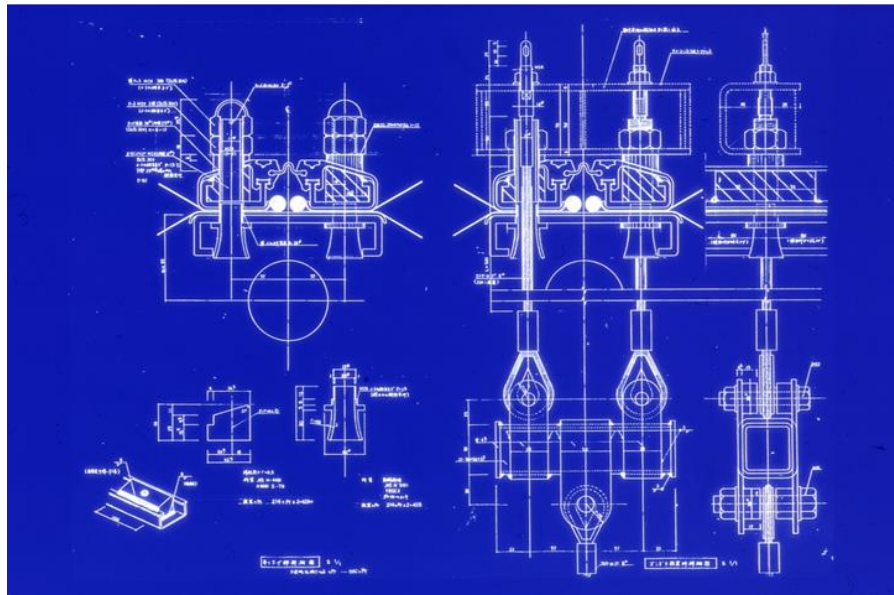
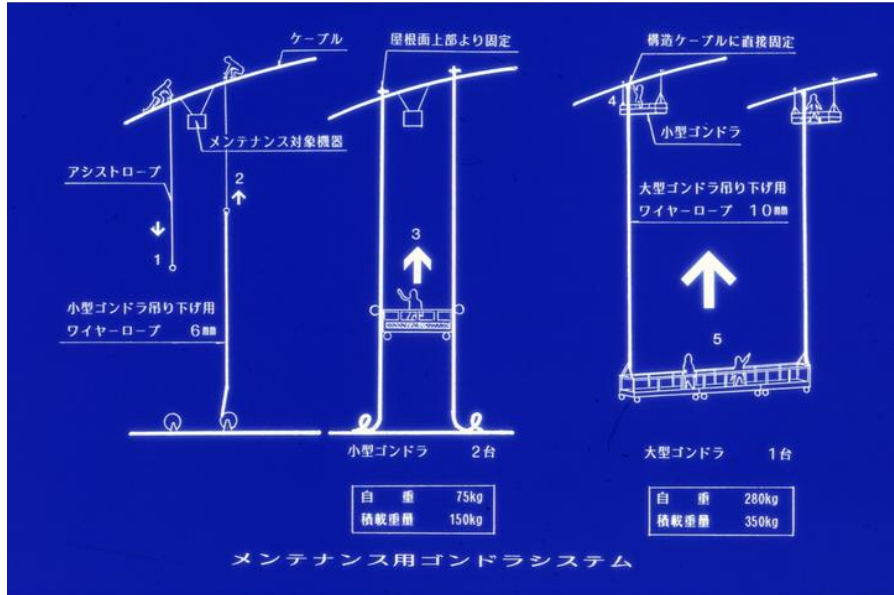




# 屋根面の避雷設備・メンテ丸環



# メンテ用ゴンドラの吊元





# 屋根の重さと内圧

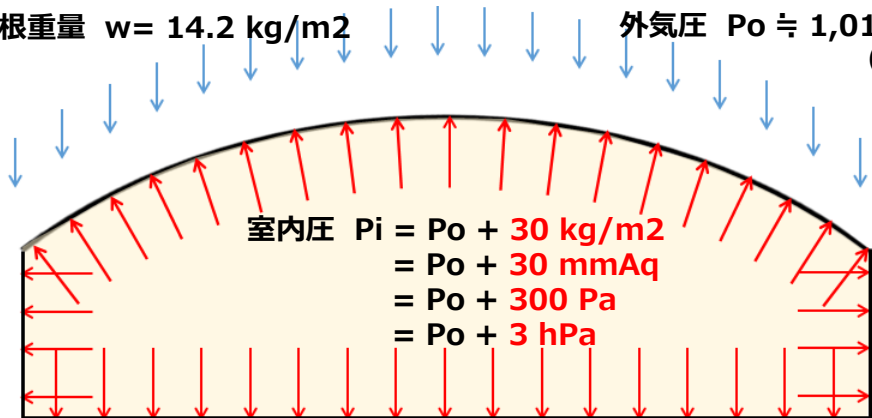
## ● 屋根の重さ

屋根の水平投影面積 AP= 28,592 m<sup>2</sup>  
 屋根膜曲面の表面積 AF= 31,450 m<sup>2</sup>

区分	項目	重量 (kg)	水平投影面積 の平均重量 ( kg/m <sup>2</sup> )	構成比 ( % )
固定荷重	膜材 (外膜+内膜)	66,050	2.3	16%
	ケーブル及び金物など	278,410	9.7	68%
	ケーブル交点クランプ	13,720	0.5	3%
	<b>小計</b>	<b>358,180</b>	<b>12.5</b>	<b>88%</b>
吊物及び 設備荷重	照明設備	27,200	1.0	7%
	音響設備	9,450	0.3	2%
	膜面ダンパー	4,455	0.2	1%
	外部避雷設備	7,480	0.3	2%
<b>小計</b>	<b>48,585</b>	<b>1.7</b>	<b>12%</b>	
<b>合計</b>	<b>406,765</b>	<b>14.2</b>	<b>100%</b>	

## ● 常時の内圧

屋根重量  $w = 14.2 \text{ kg/m}^2$       外気圧  $P_o \approx 1,013 \text{ hPa}$   
 (標準)



## ● 圧力差と出入口での風速

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad \text{より}$$

内圧 ( mmAq )	最大風速 ( m/s )
30	21.9
35	23.7
40	25.3
45	26.8
60	31.0
90	37.9

注) ① 出入口部に、全く抵抗の無い状態の場合

参考①：一般の気象下での気圧の変動範囲

- ・高気圧  $\approx 1,030 \text{ hPa}$
- ・台風時  $\approx 950 \text{ hPa}$

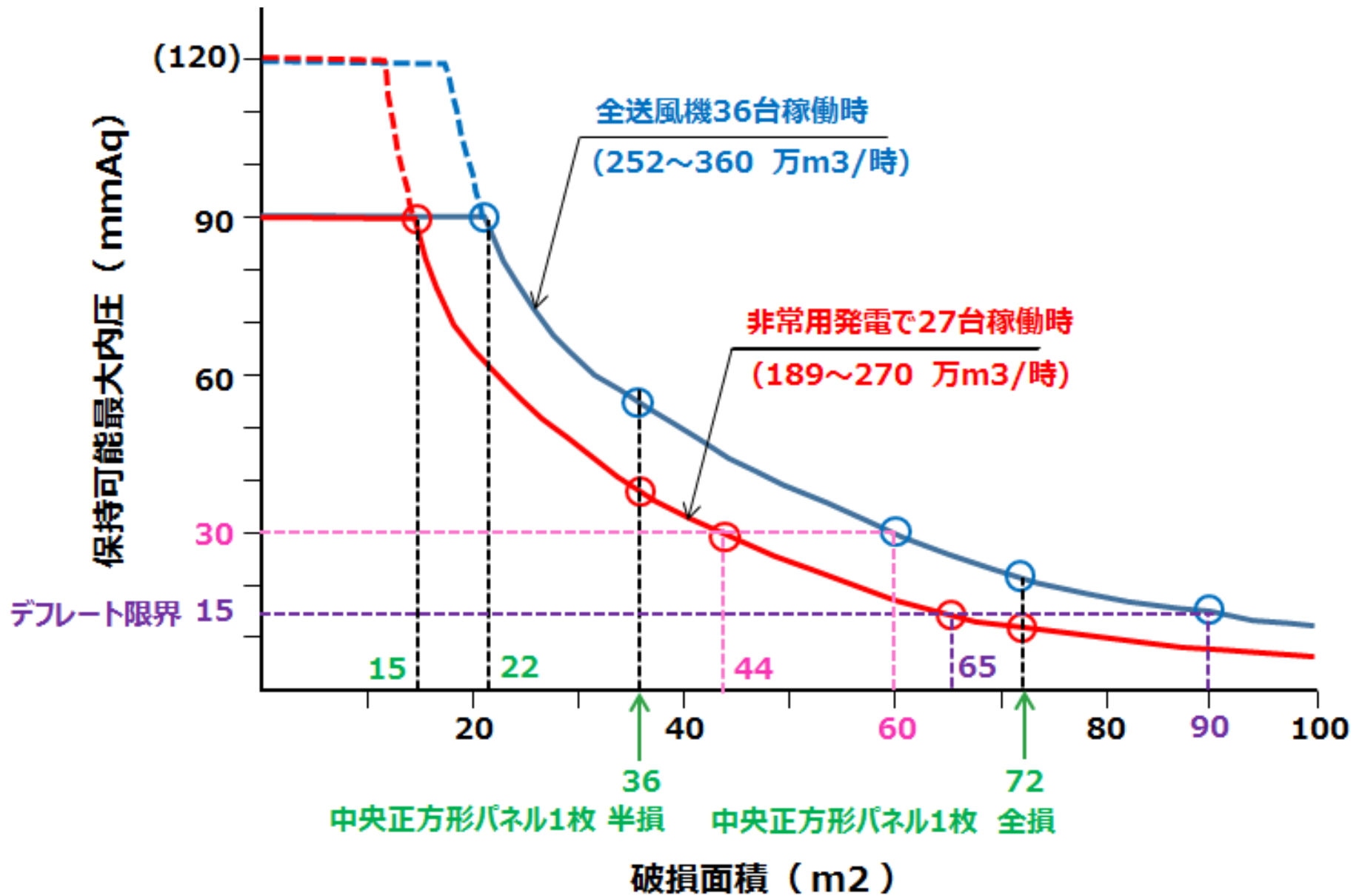
80 hPa の気圧変動下で日常生活をしている

参考②：地表付近での高さと気圧の変化

- ・標高10m毎に約 1 hPa 低下

3 hPa 圧力差は 高さ30mの気圧変化に等しい

# 屋根の破損面積と保持可能内圧





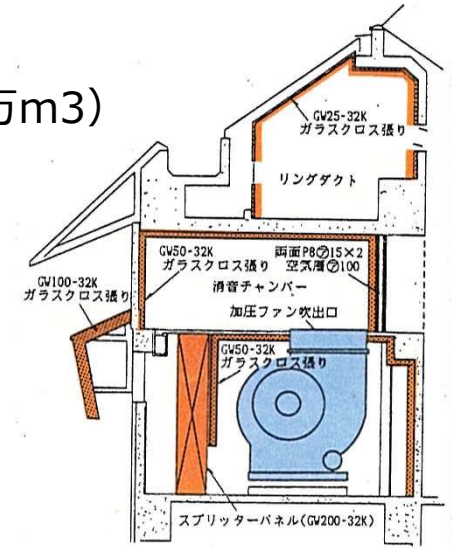
# 加圧送風のランニングコスト

## ■ 送風能力と閉館時の自然漏気量

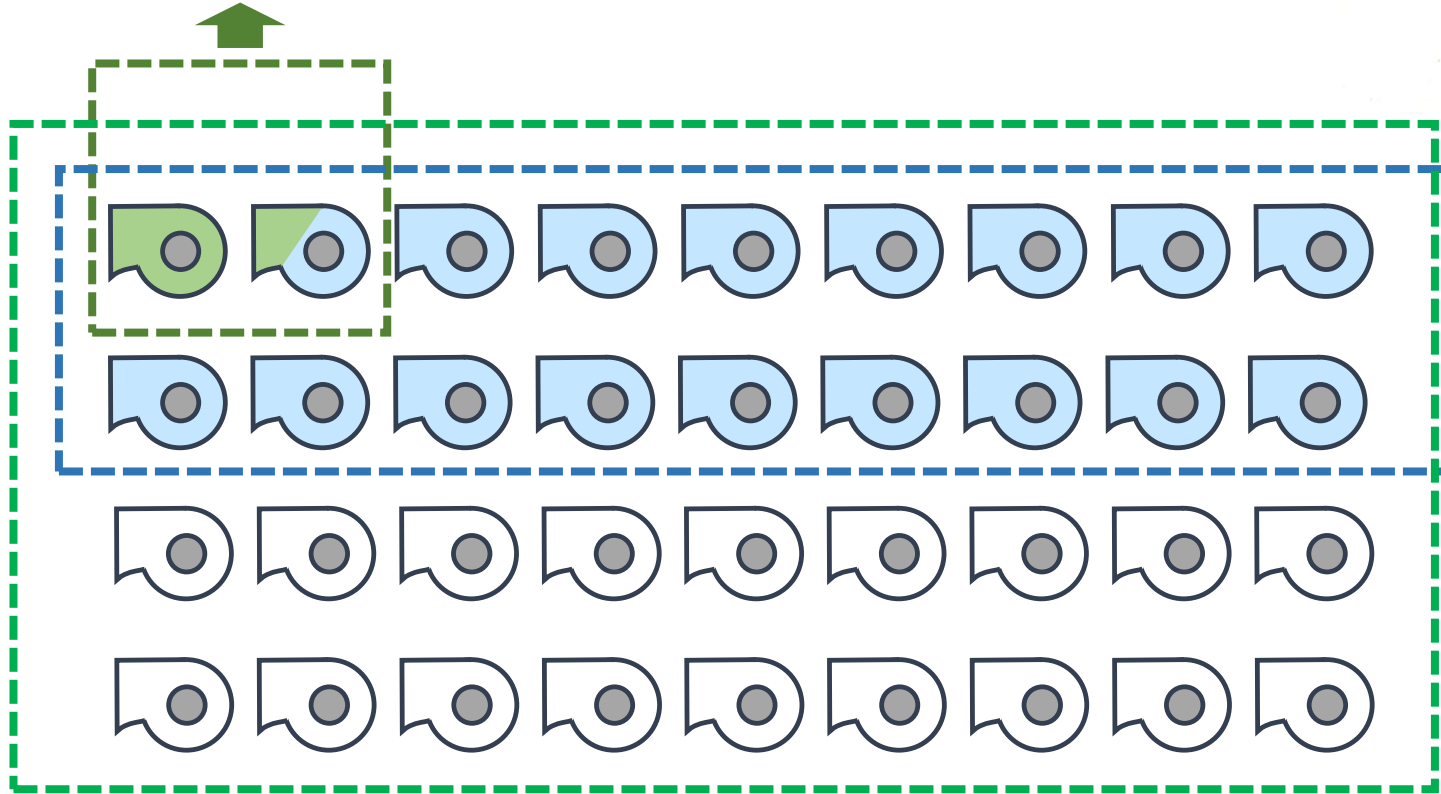
- 10万m<sup>3</sup>/時/台 × 36 台 = 360万m<sup>3</sup>/時 (加圧空間容積 : 126万m<sup>3</sup>)
- 閉館時の自然漏気量 ≒ 15万m<sup>3</sup>/時 (加圧容積の約1/9~1/8)

## ■ 常時の送風ランニングコスト

- 1.5台 / 時 × 27KWH × 24時 × 365 日 ≒ 35.5 万 KWH / 年
- **ドーム全体の年間エネルギーコストの約 3% と僅かである**



閉館時自然漏気 1.5台

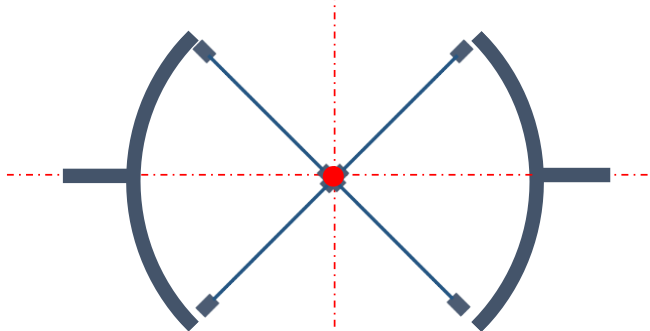


5万人収容時  
換気・空調  
18台

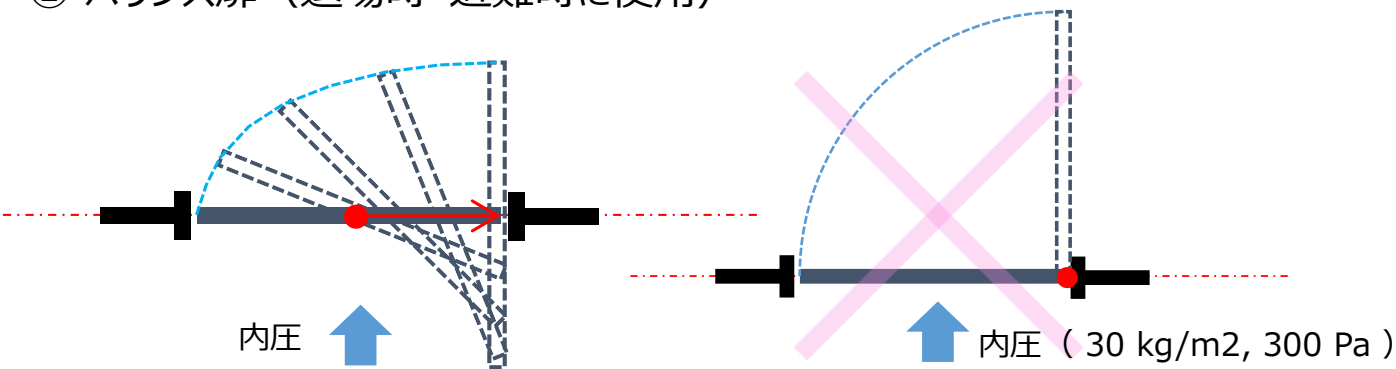
最大積雪時+  
火災避難  
36台

# 加圧空間維持の工夫

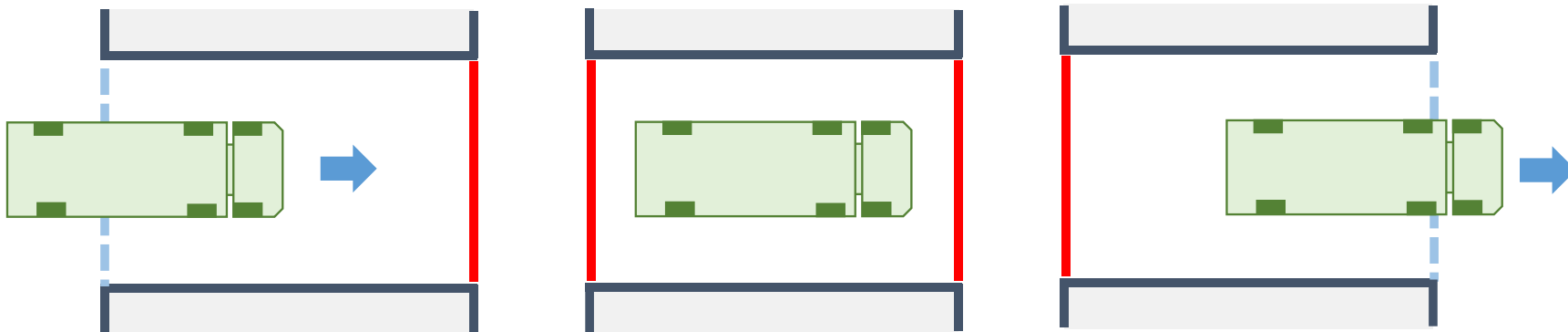
## ① 回転扉 (常時使用)



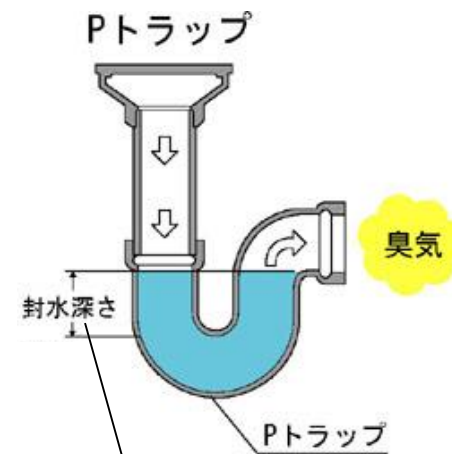
## ② バランス扉 (退場時・避難時に使用)



## ③ インターロック二重扉 (大型車両などの搬出入)



## ④ 排水部の封水トラップ

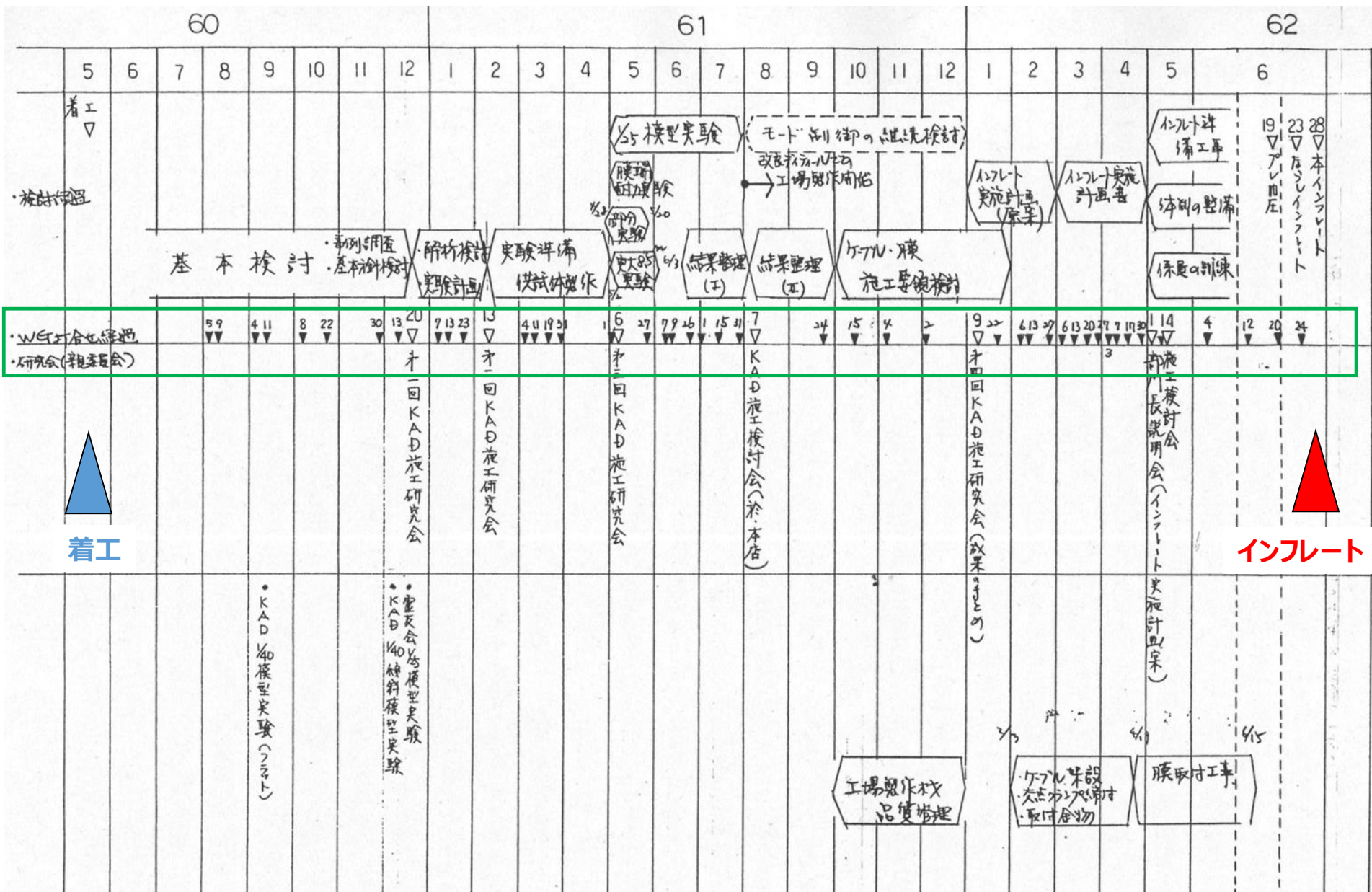


最大内圧90mmAqでも封水が切れない深さが必要



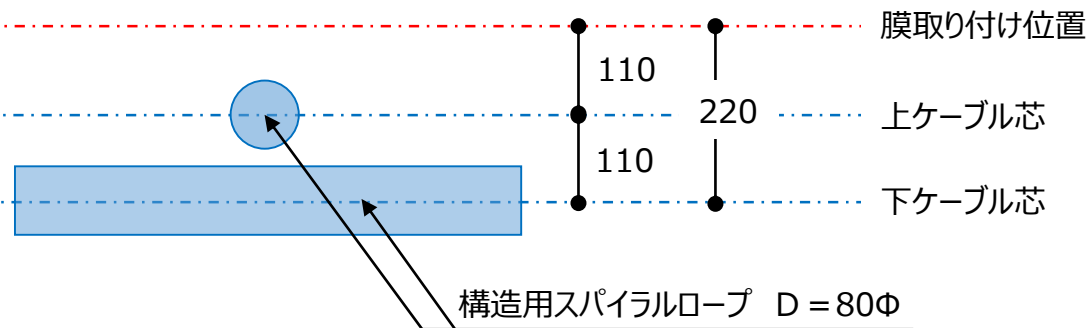
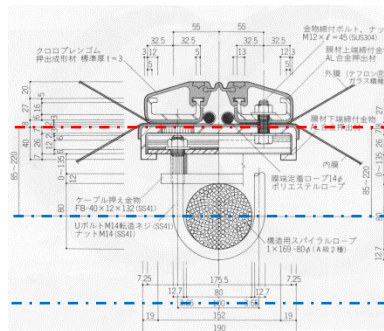
# IV. 東京ドーム インフレーションの課題と実施

# インフレート検討の経緯 WGの活動記録

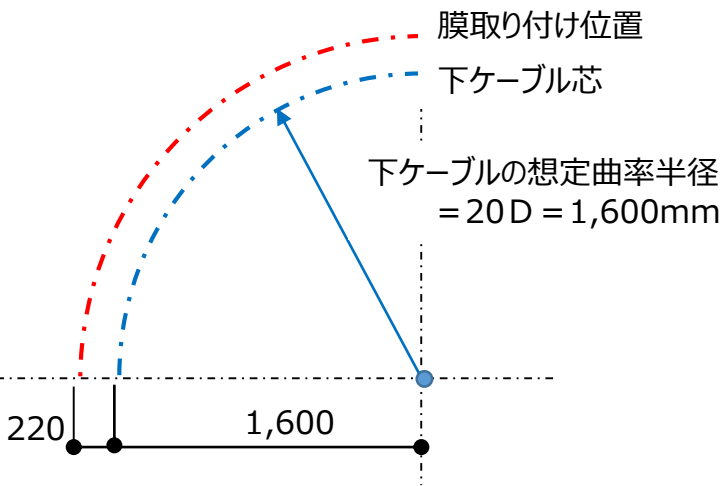




# インフレートで何が問題となるか ケーブルと膜の偏心距離

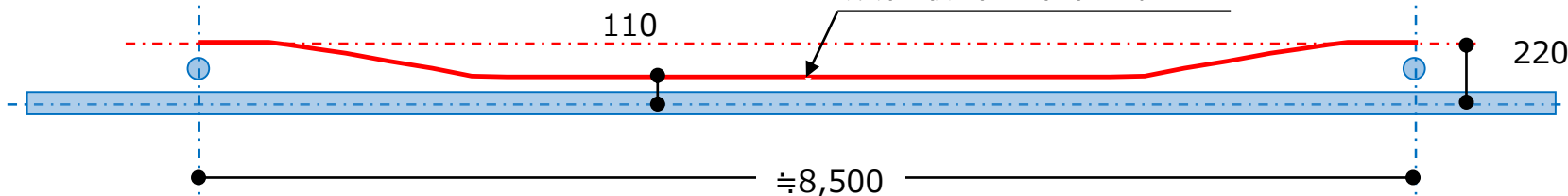


構造用スパイラルロープ D = 80φ



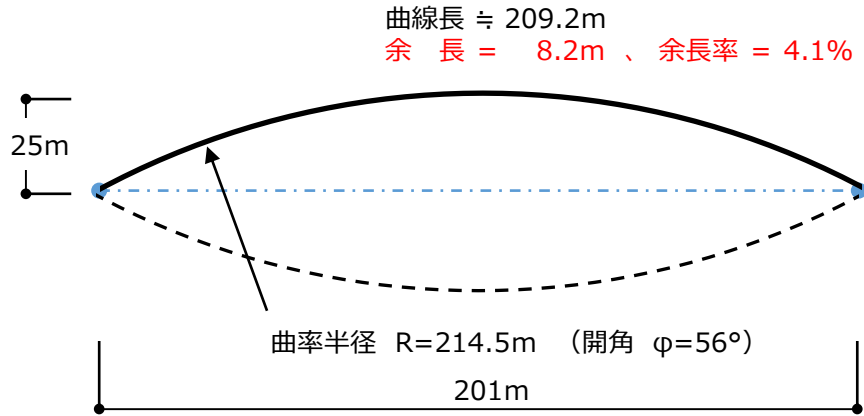
ケーブルの曲率半径		膜材の伸び		膜材破断時の伸び			
				規格値		実績値	
		e = 110 mm	e = 220 mm	タテ糸方向	ヨコ糸方向	タテ糸方向	ヨコ糸方向
15 D	1,200 mm	9%	18%	3~10%	6~15%	7.6%	13.8%
20 D	1,600 mm	7%	14%				
25 D	2,000 mm	6%	11%				

膜材取り付け位置の調整

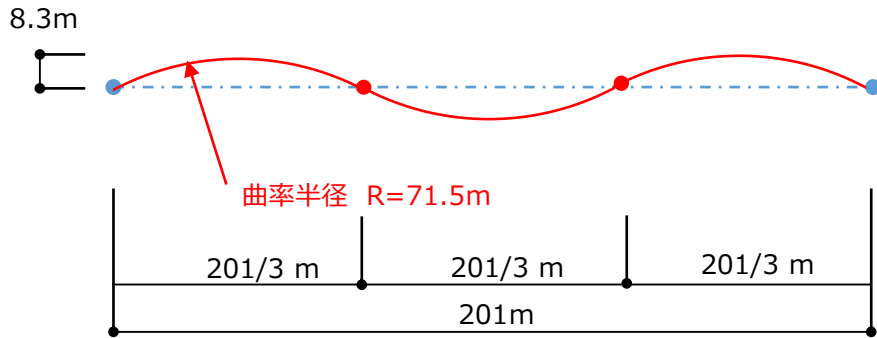


# インフレートで何が問題となるか ケーブルの曲がりの程度

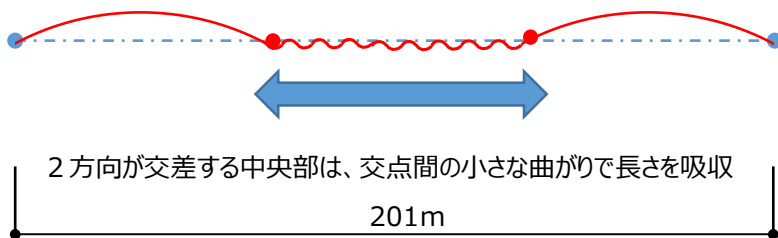
## ① スパンとケーブル長さとの関係 (ライスが等しい単円弧を仮定)



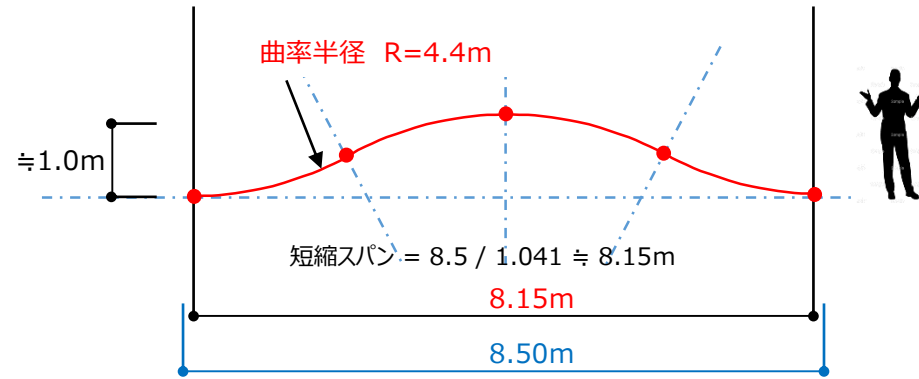
## ② 3円弧で長さを吸収する場合



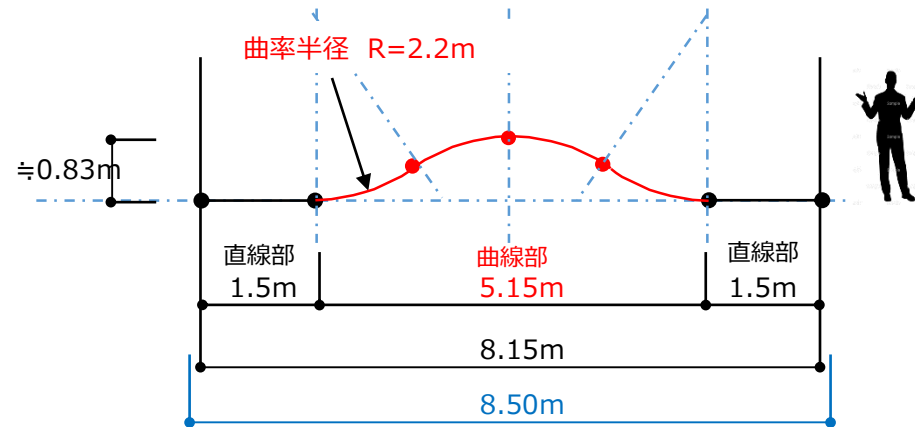
## ③ 想定される中央部の変形



## ④ ケーブル交点間での余長吸収 (8.15m全長を4円弧近似)

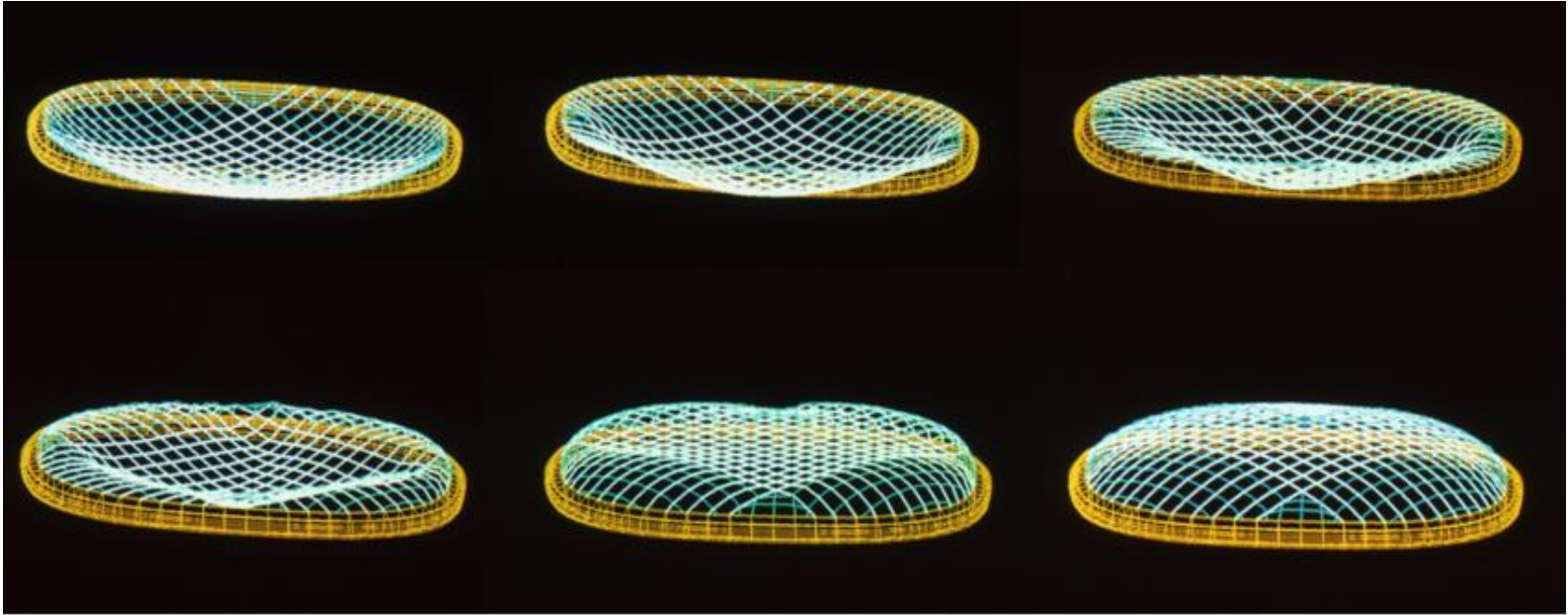


## ⑤ ケーブル交点間での余長吸収 (中央5.15mを4円弧近似)

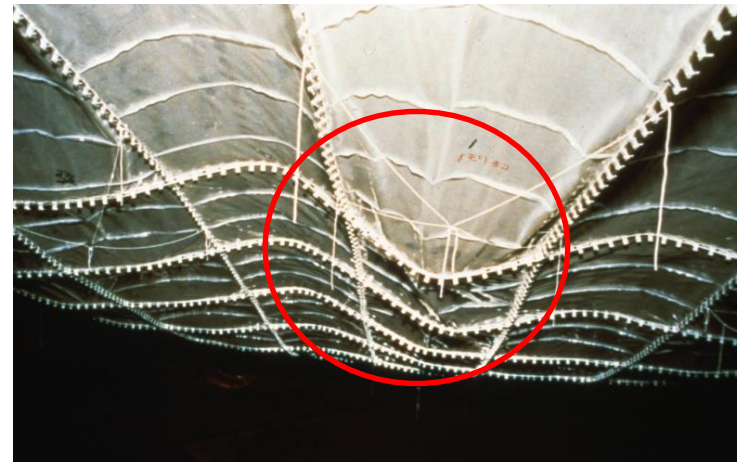
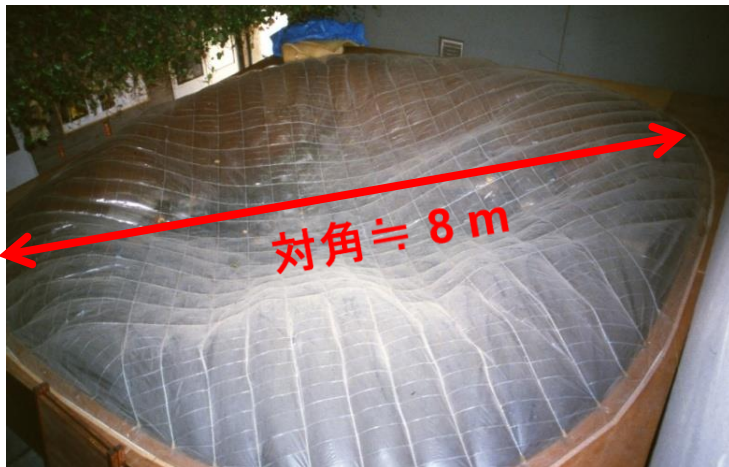


# インフレート形状の把握

## ■ 解析によるインフレート全体モードの把握



## ■ 1/25 模型実験による局所的な曲率の把握





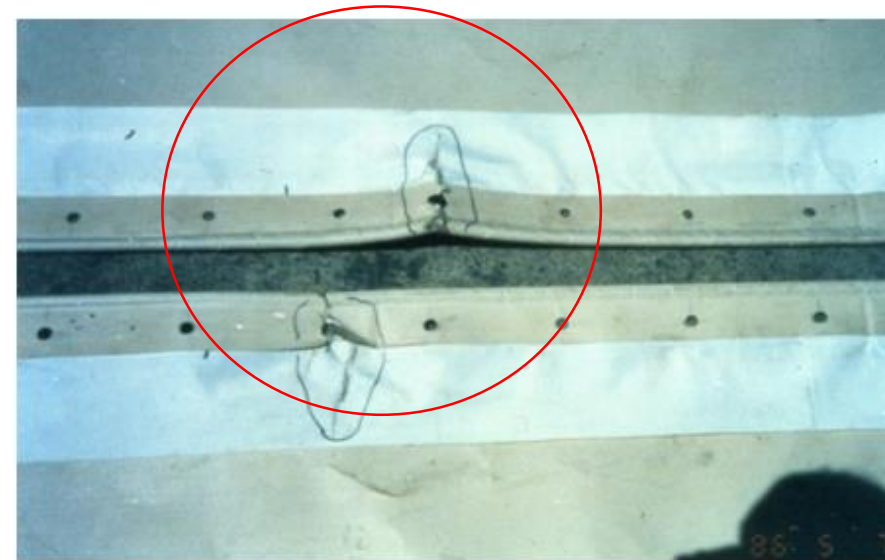
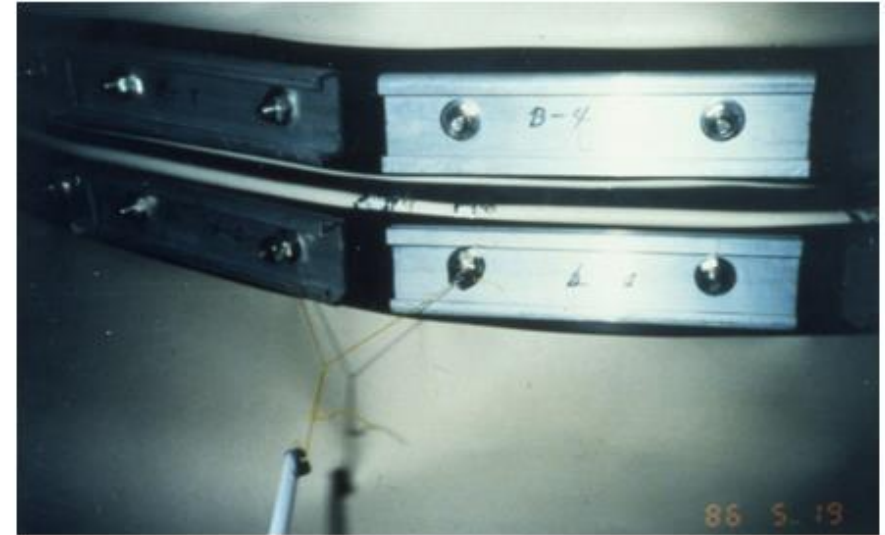
# ケーブルの曲りに追従できるディテールの検討

## ■ 8.5m 実大実験による変形追従性の確認



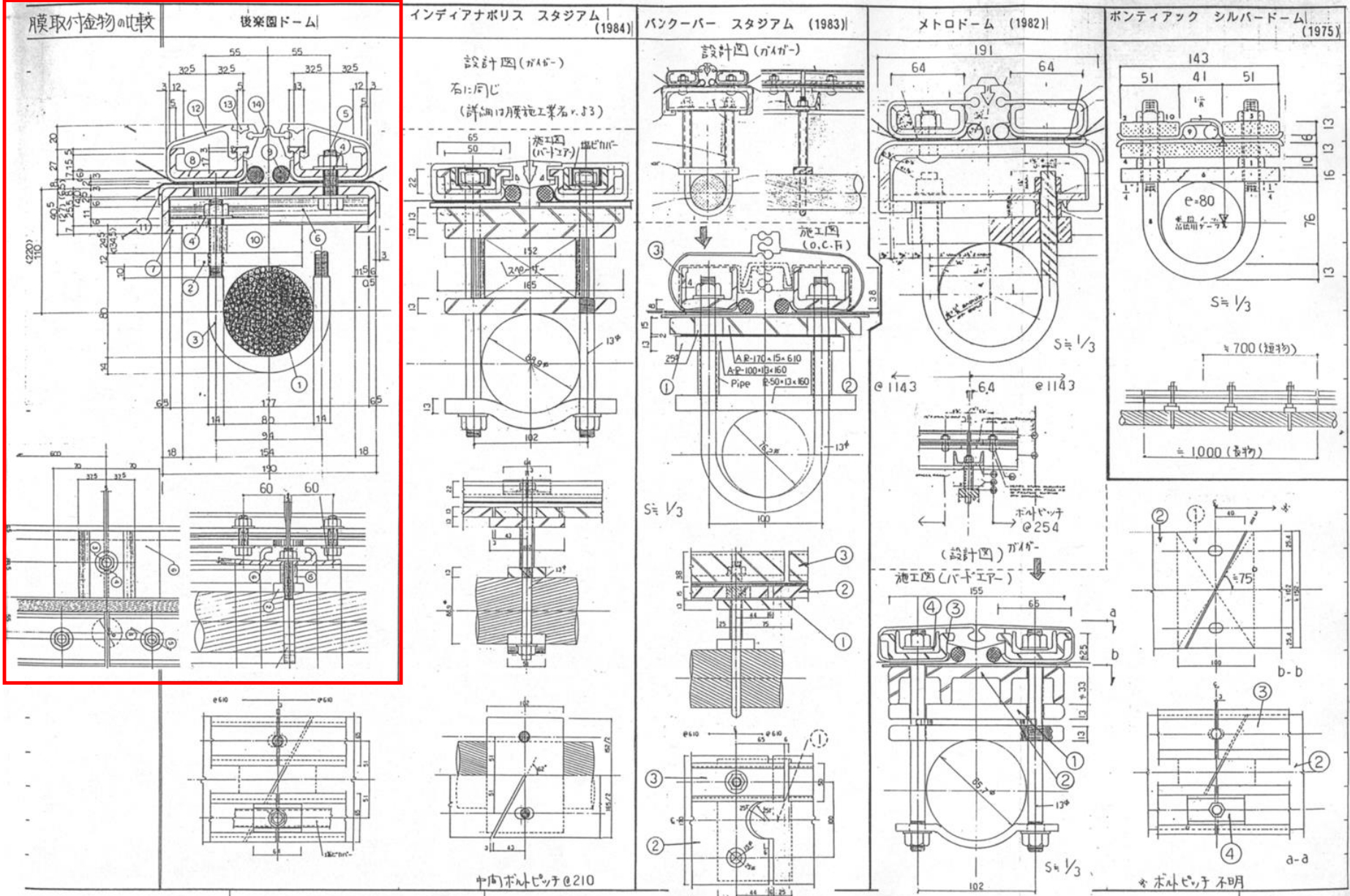
# ケーブルの曲りに追従できるディテールの検討

## ■ 8.5m 実大実験による変形追従性の確認





# ケーブルの曲りに追従できるディテールの検討



後楽園ドーム新築工事

**KAD** 共同設計室 (株) 日建設 (株) 竹中工務店

中間ボルトピッチ@ 210

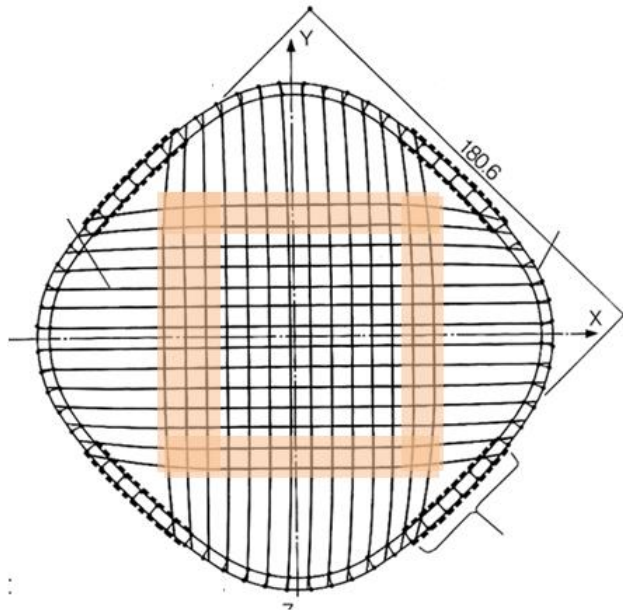
\* ボルトピッチ 不明

//

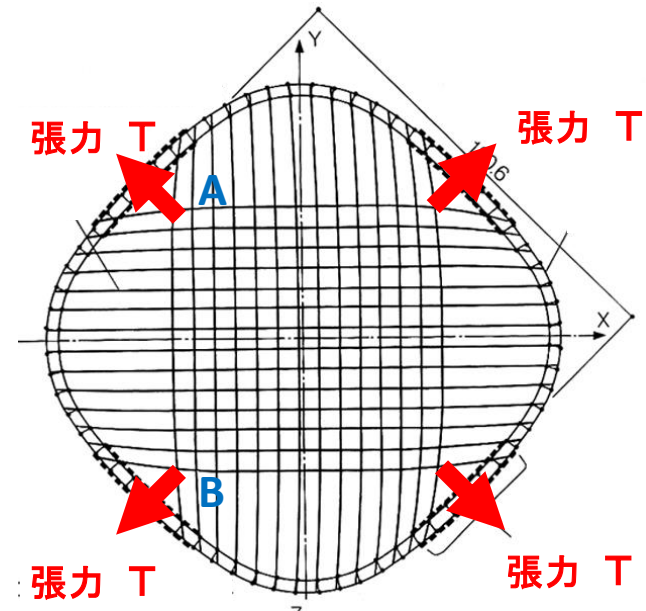


# 付加的モード矯正法の検討

## ■ 大きな曲率が発生する可能性の有る範囲



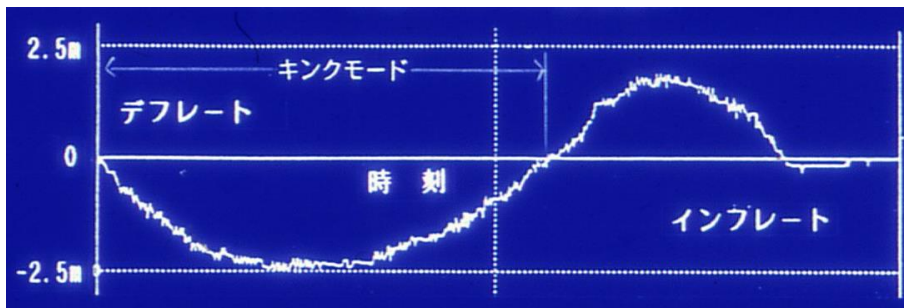
## ■ インフレート時のモード矯正方法（三角交点緊張）



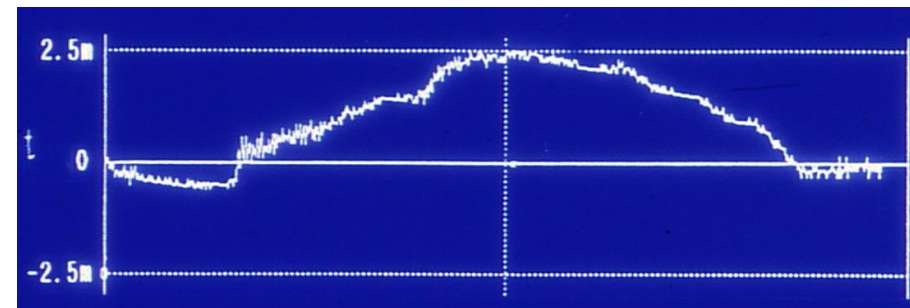
## ■ 1/25模型実験によるモード矯正の効果 インフレート過程でのA-B間の距離の変化

● インフレート過程でのA-B間の距離の変化

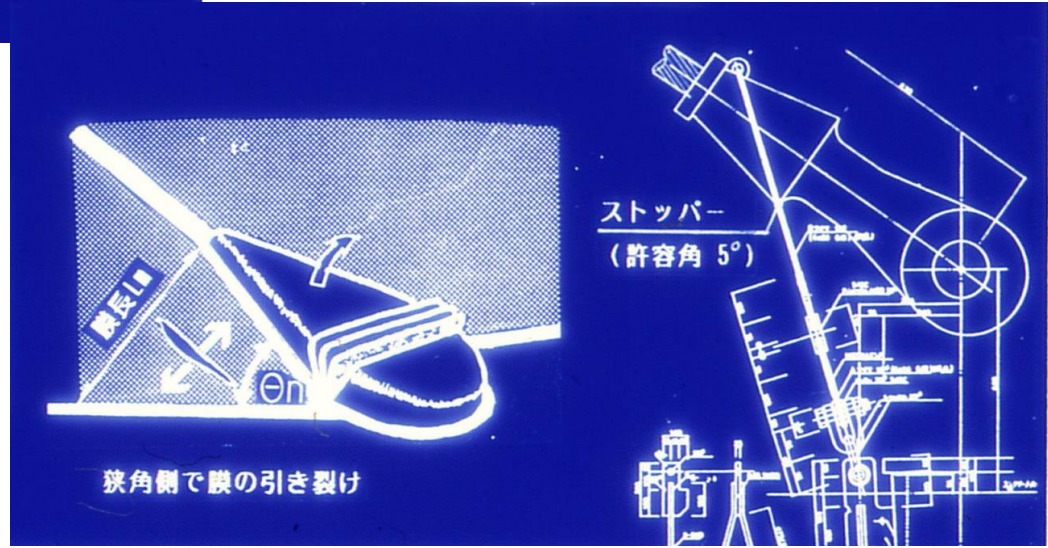
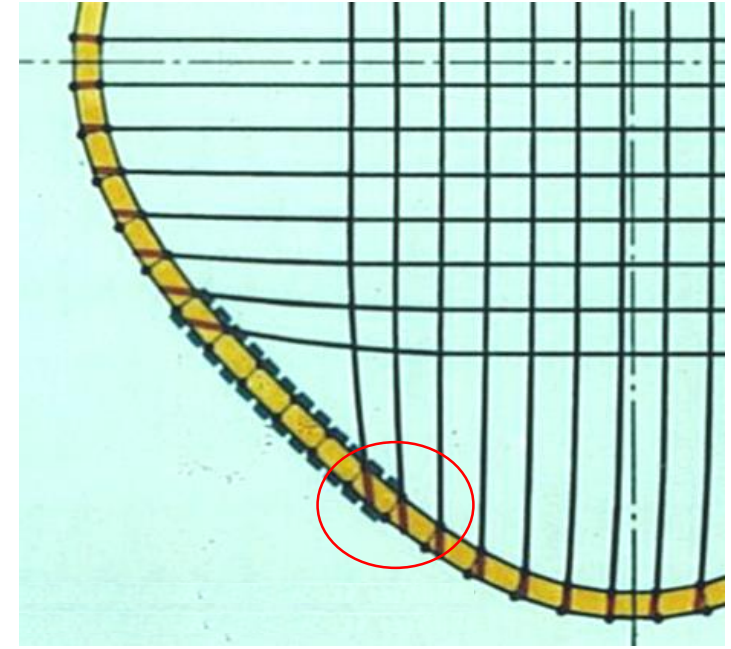
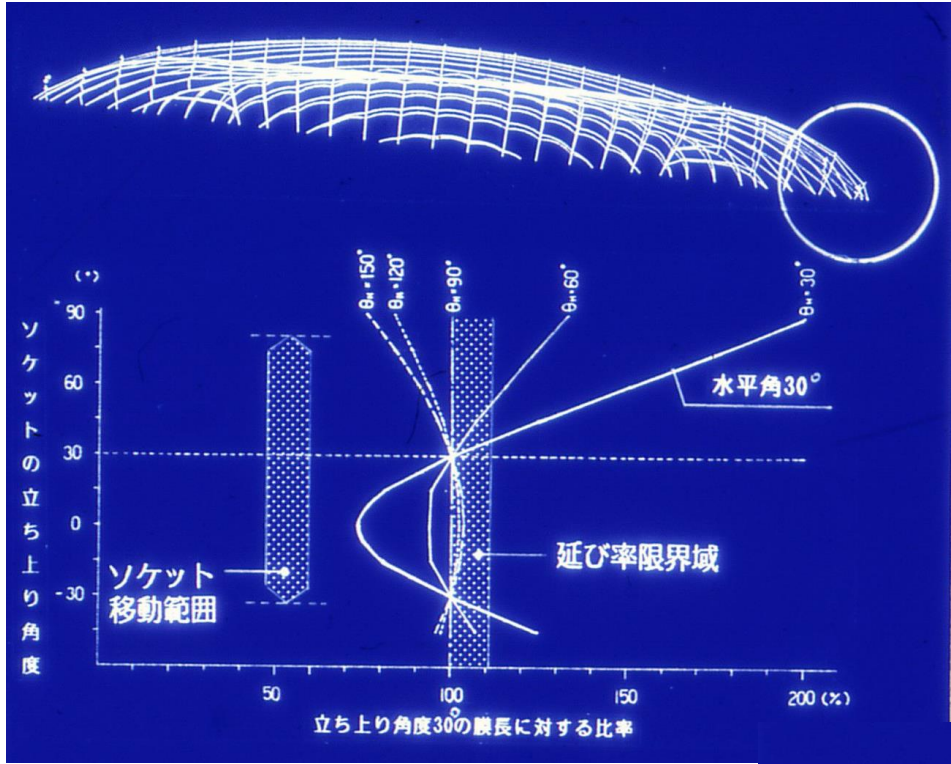
張力  $T=0$  (モード矯正無し)



張力  $T=18 \text{ ton}$  相当



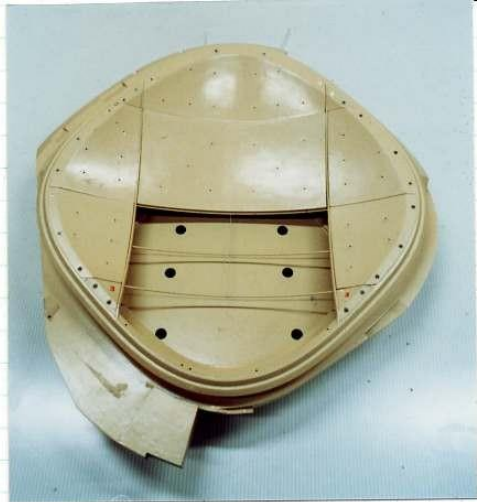
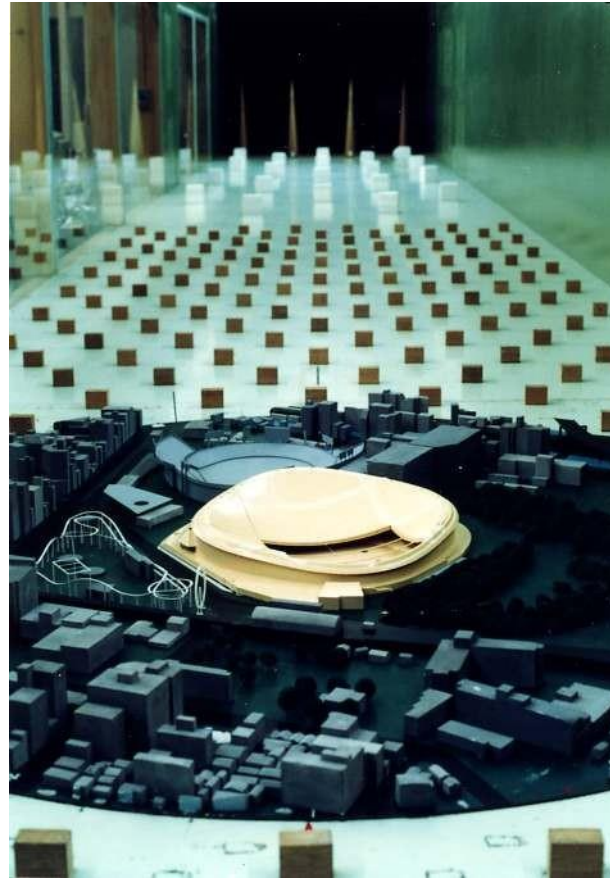
# ケーブル端部の過大な立ち上がりの防止





# 膜工事施工時の課題 (風対策)

- 施工の各段階の風洞実験を実施し、各施工状況での風による影響を評価し、対策を講じる

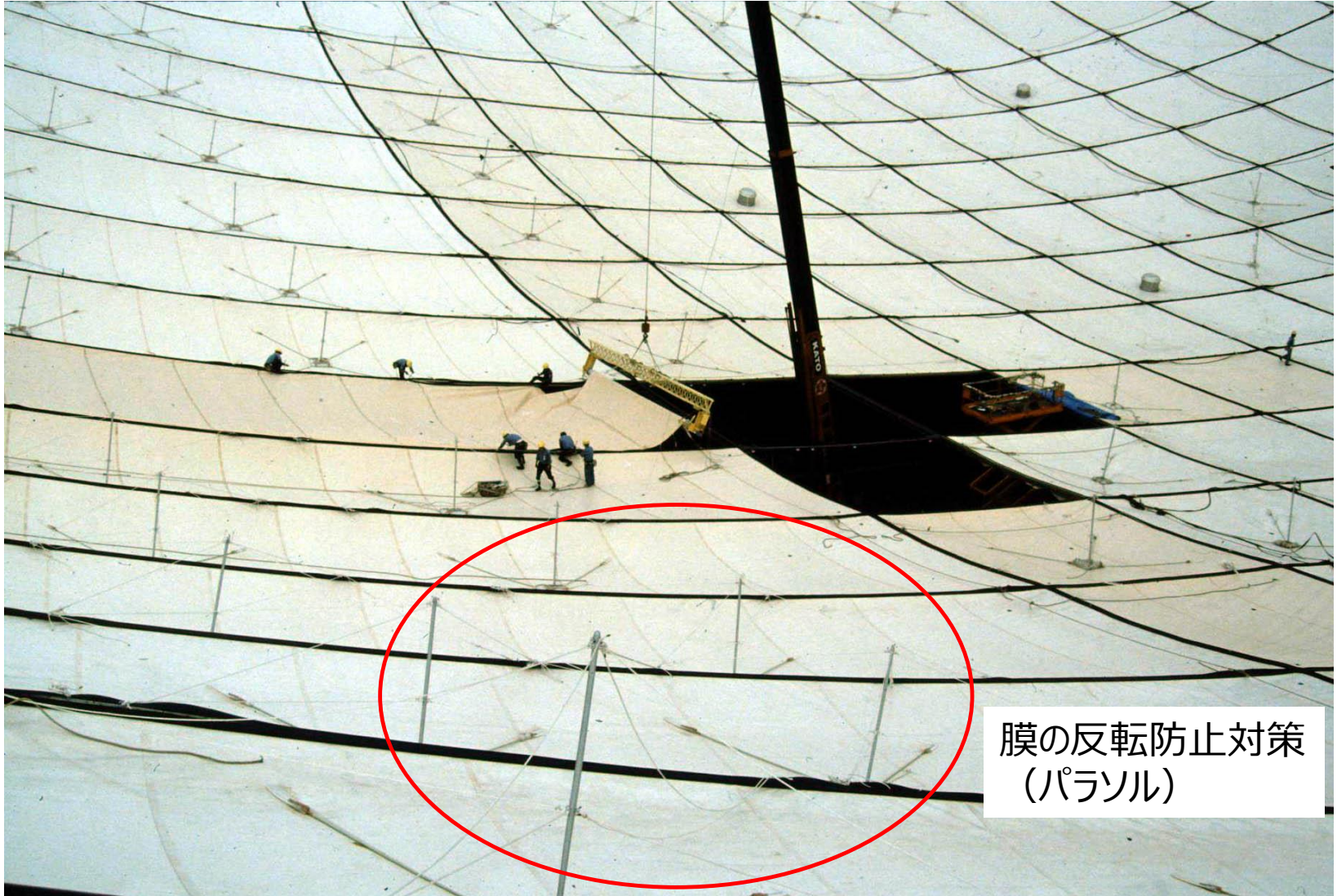


風洞実験状況と各施工ステップの模型



# 膜工事施工時の課題（風対策）

- 施工時の安全性確保のために、軽量の膜材の風による反転を防止

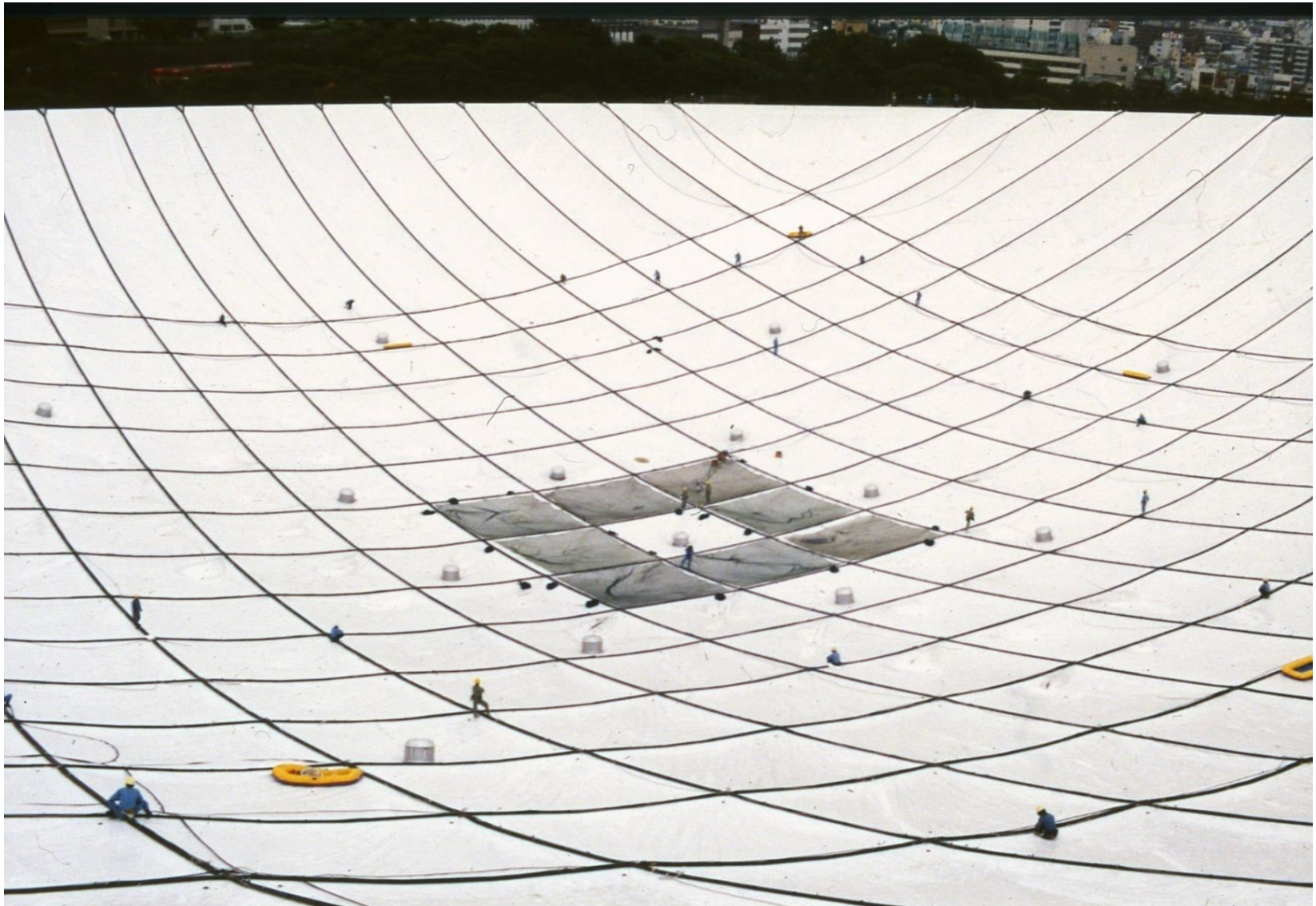




# 膜工事施工時の課題（雨対策）

- 雨水の滞水及び中央への流入を防止する必要がある

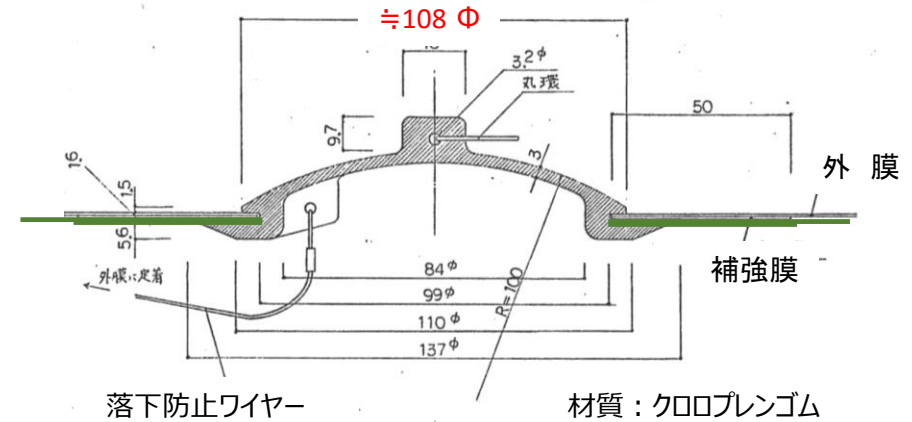
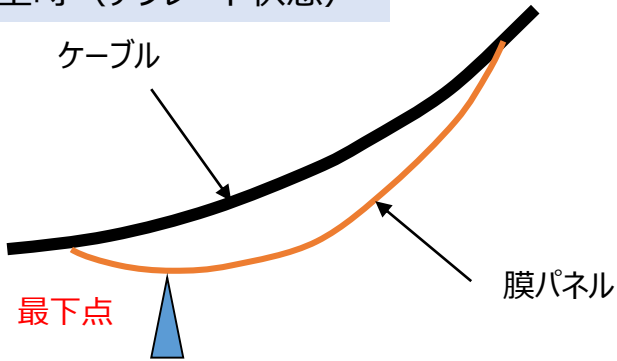
屋根の水平投影面積  $AP = 28,592 \text{ m}^2$ 、10mmの降雨で総量が286ton



# 膜工事施工時の課題 (雨対策)

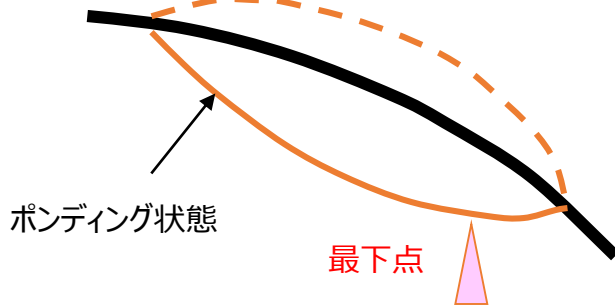
■ 225枚の各膜パネルに2か所に設けられる排水ドレイン、トレインプラグ (竣工後もそのまま残す)

施工時 (デフレート状態)

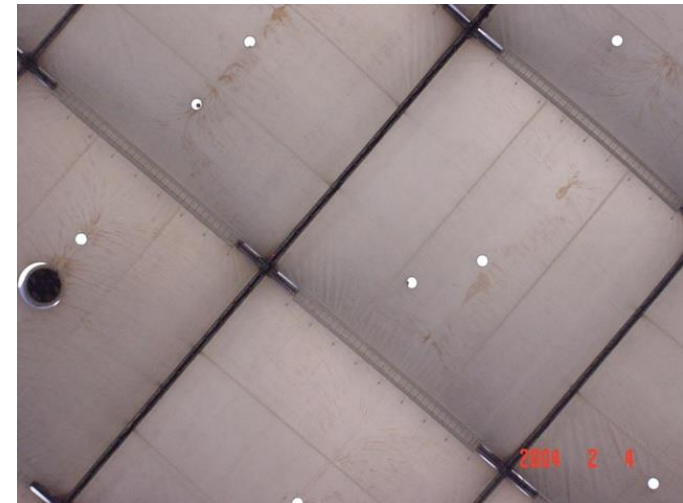


外膜に取り付けられるドレインプラグ  
(水深300mmで自然脱落)

完成後 (インフレート状態)



外膜のドレインプラグ

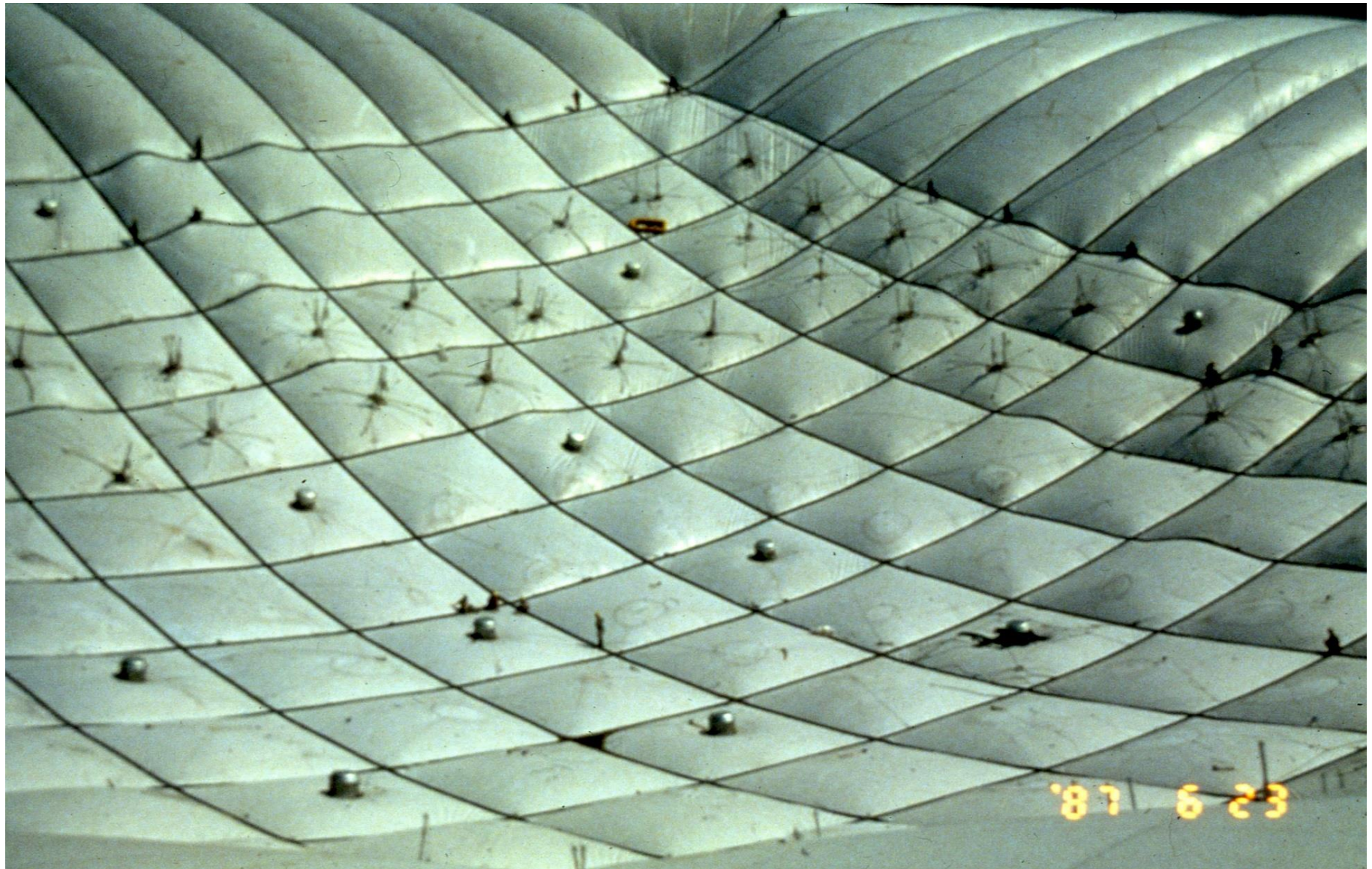


ドレイン位置に合わせた内膜の開口



# インフレーションの準備 (1987年6月23日)

## ■慣らしインフレーション





# インフレーションの記録 (1987年6月28日)

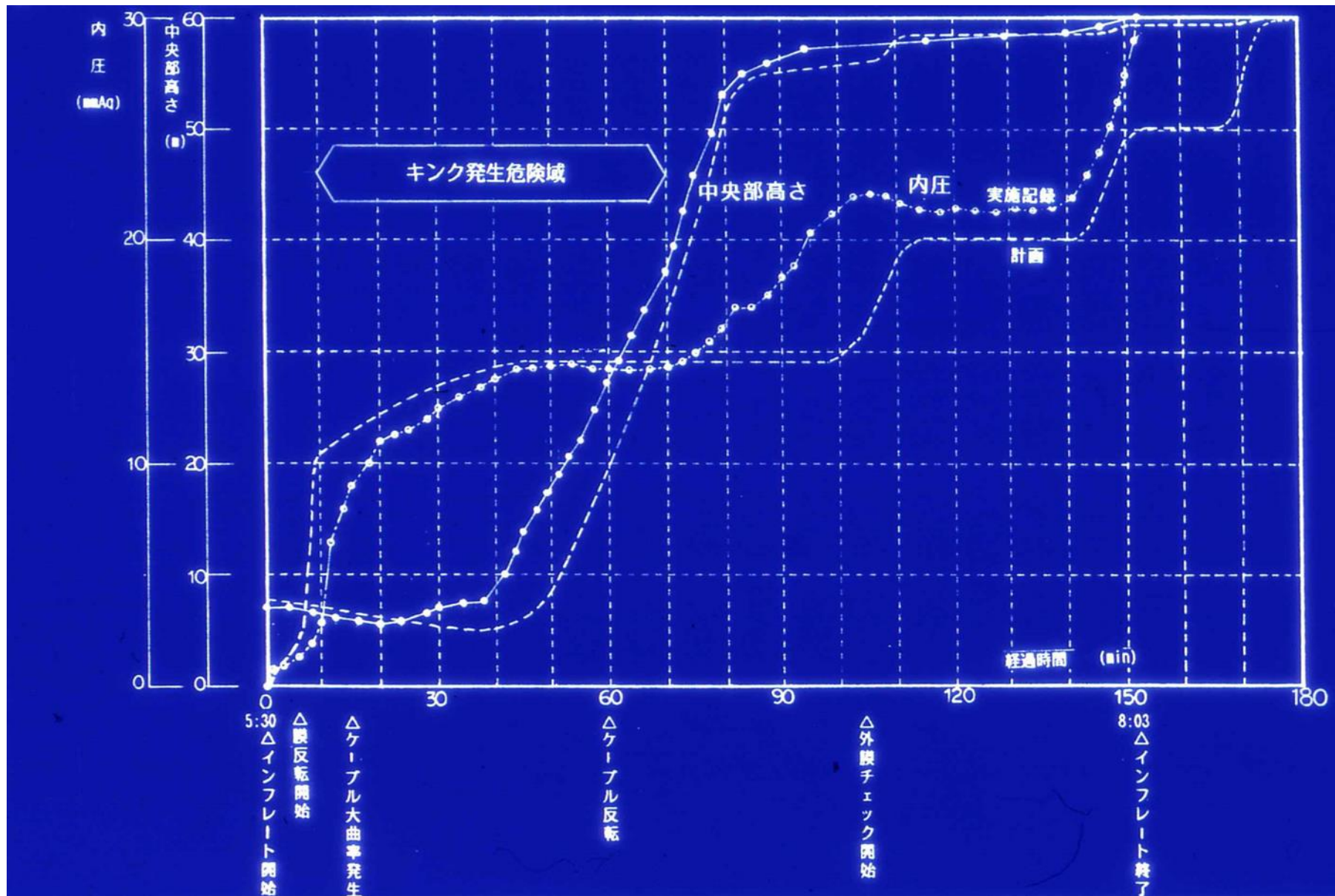
## ■ フィールド内の指令所





## インフレーションの記録 (1987年6月28日)

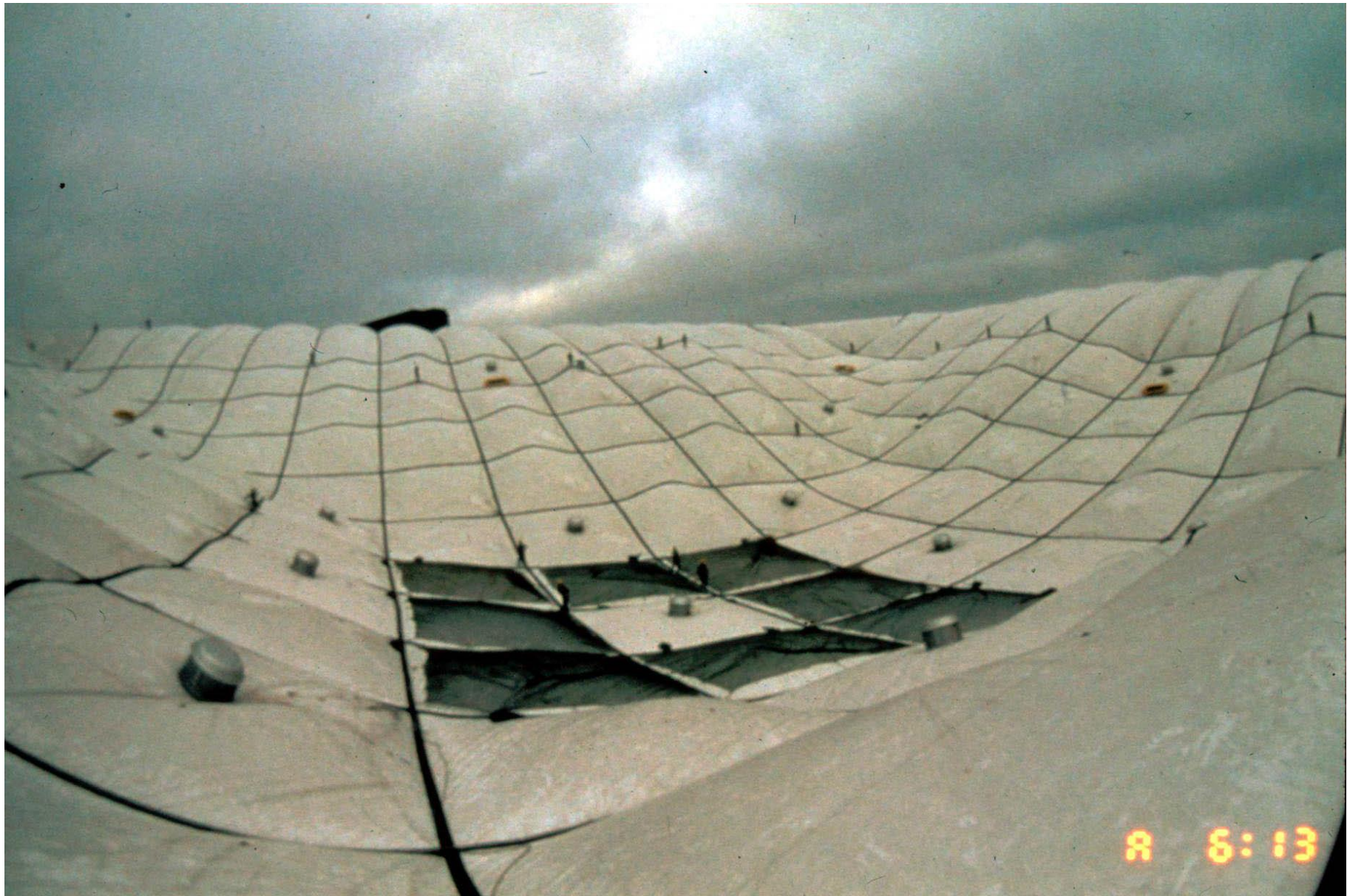
## ■ 内圧と中央部高さの経時記録





# インフレーションの記録 (1987年6月28日)

## ■ 屋根上の状況写真 (1)





# インフレーションの記録 (1987年6月28日)

## ■ 屋根上の状況写真 (2)





# インフレーションの記録 (1987年6月28日)

## ■ 屋根上の状況写真 (3)





# インフレーションの記録 (1987年6月28日)

## ■ 屋根上の状況写真 (4)



# インフレーションの記録 (1987年6月28日)

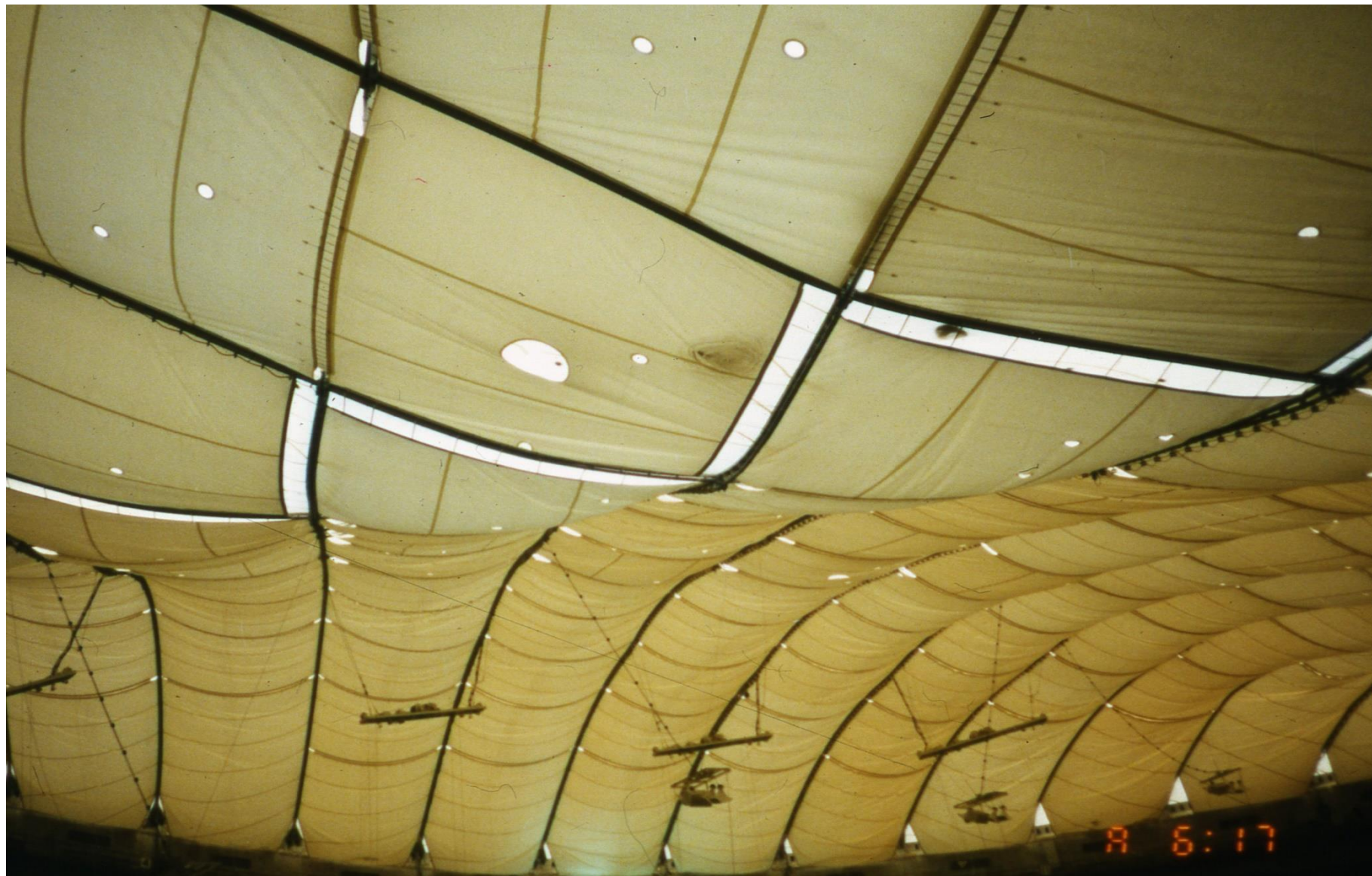
## ■ 屋根上の状況写真 (5)





# インフレーションの記録 (1987年6月28日)

## ■ 内部の状況写真 (1)





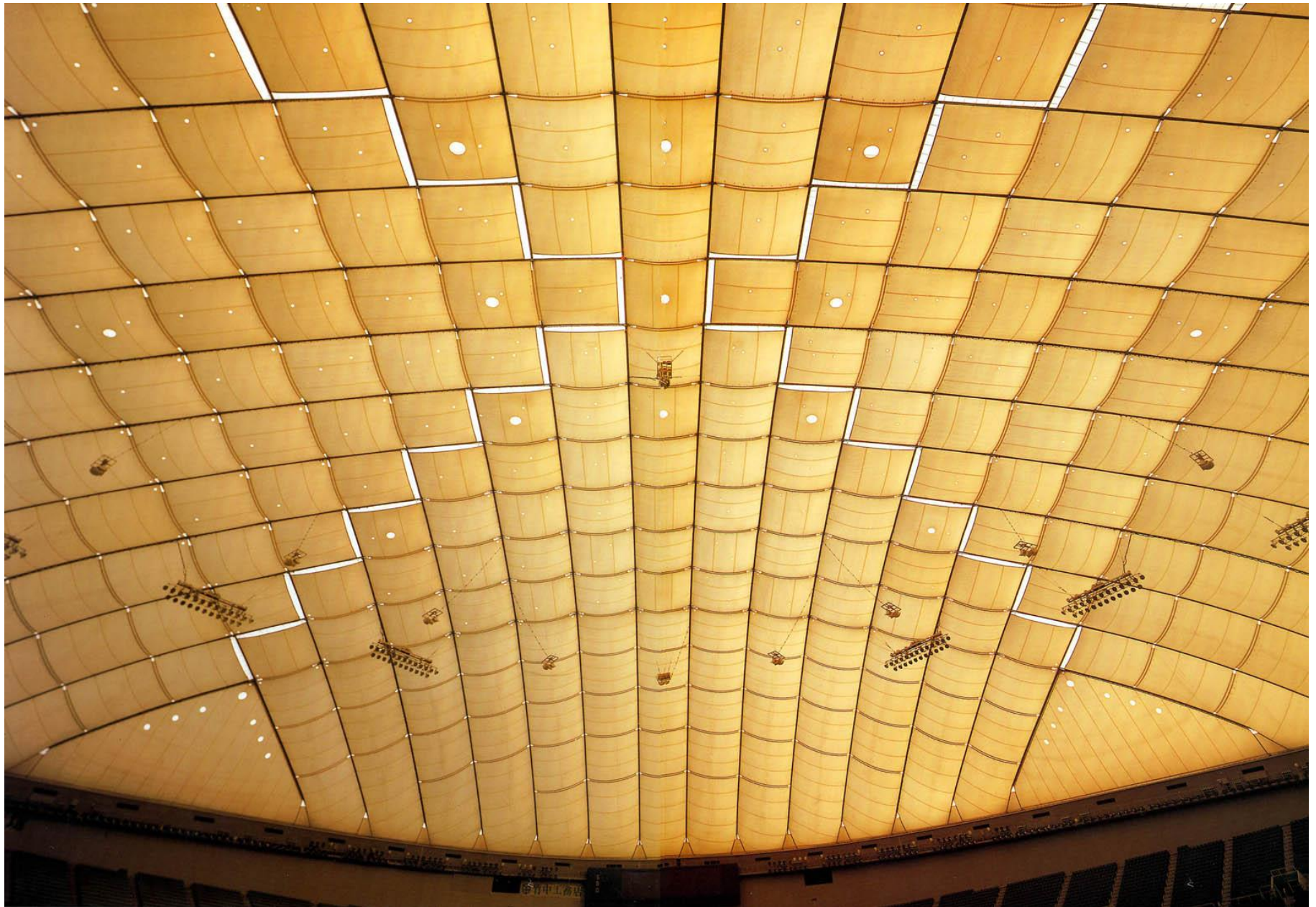
# インフレーションの記録 (1987年6月28日)

## ■内部の状況写真 (2)



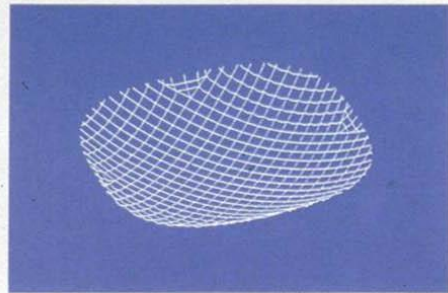


# インフレート完了後の内観

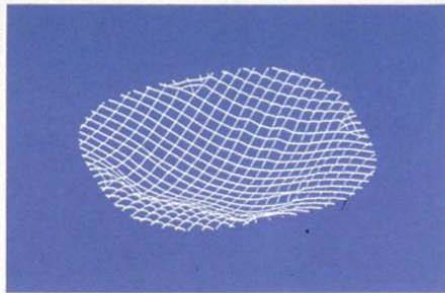




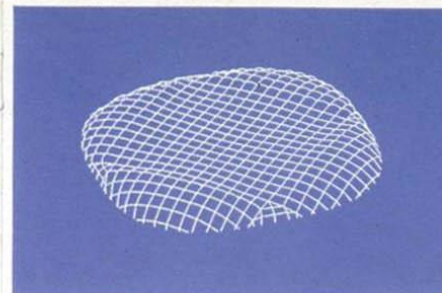
# インフレート状況の整理



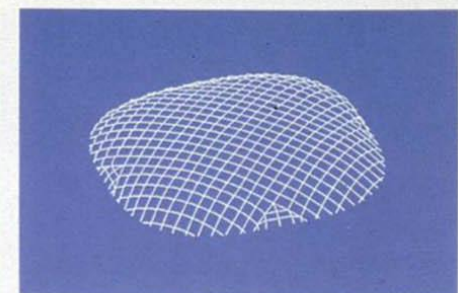
午前5時30分 インフレート開始



午前6時10分 内圧13.5mmAq



午前6時25分 内圧14.5mmAq



午前8時03分 内圧30mmAq インフレート完了



5.30 a.m. Inflation begins.



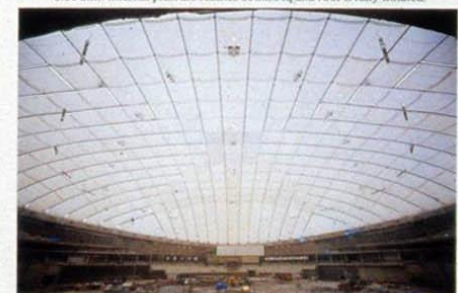
6.10 a.m. Internal pressure reaches 13.5mmAq



6.25 a.m. Internal pressure reaches 14.5mmAq



8.30 a.m. Internal pressure reaches 30mmAq and roof is fully inflated.



所要時間 2 時間 33 分

送風開始 午前 5 時 30分

インフレート完了 午前 8 時 03分

1987年 6月 28日



# V. 東京ドーム 空気膜構造の内圧管理

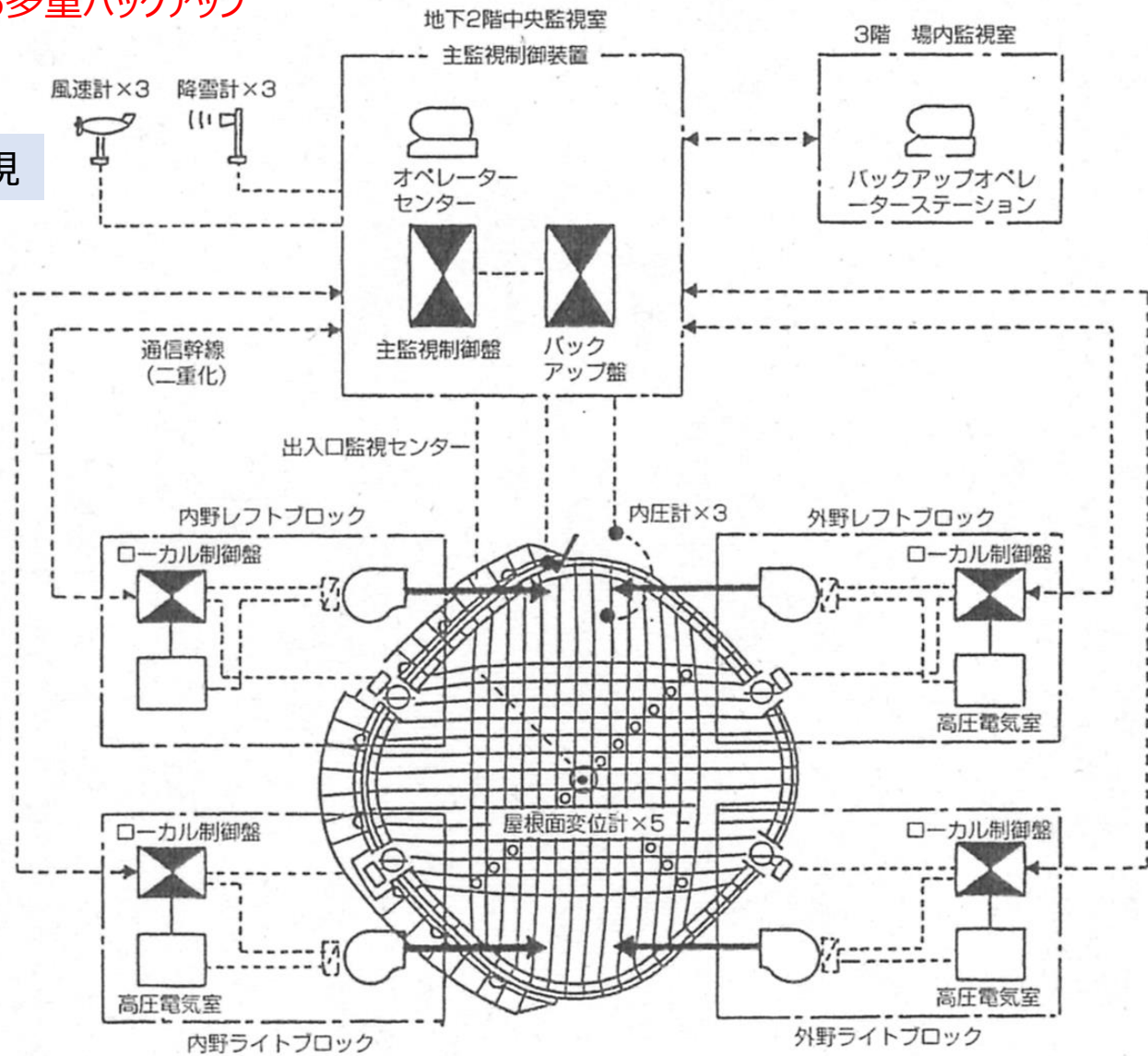
# 加圧制御システム (全体システム構成)

- ・ヒューマンエラーを排する自動制御システム
- ・万が一の故障に対応できる多重バックアップ

①各種センサーによる状況監視

②完全な自動制御システム

③4ブロック化と各ブロックの自動ローカル制御





# 常時の内圧設定と管理

・大気圧（外気圧）より僅か、0.3 % 内部の圧力を高め屋根を支える

## ●屋根の重量

自重：  $12.5 \text{ kg} / \text{m}^2$

設備荷重：  $1.7 \text{ kg} / \text{m}^2$

合計重量：  $14.2 \text{ kg} / \text{m}^2$

## ●常時内圧

常時内圧：  $30 \text{ mmAq}$

=  $30 \text{ kg} / \text{m}^2$

=  $300 \text{ N} / \text{m}^2$

=  $300 \text{ Pa}$

=  $3 \text{ hPa}$

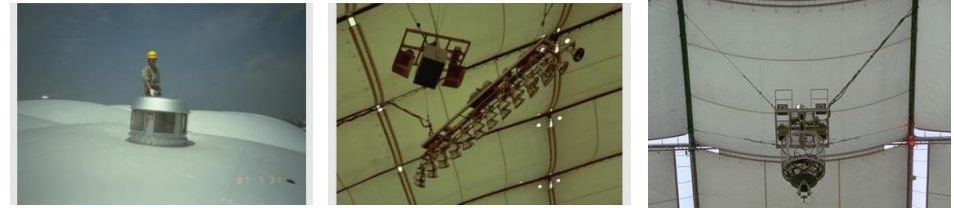
大気圧の僅か  $3 / 1000$

## ●退場時内圧

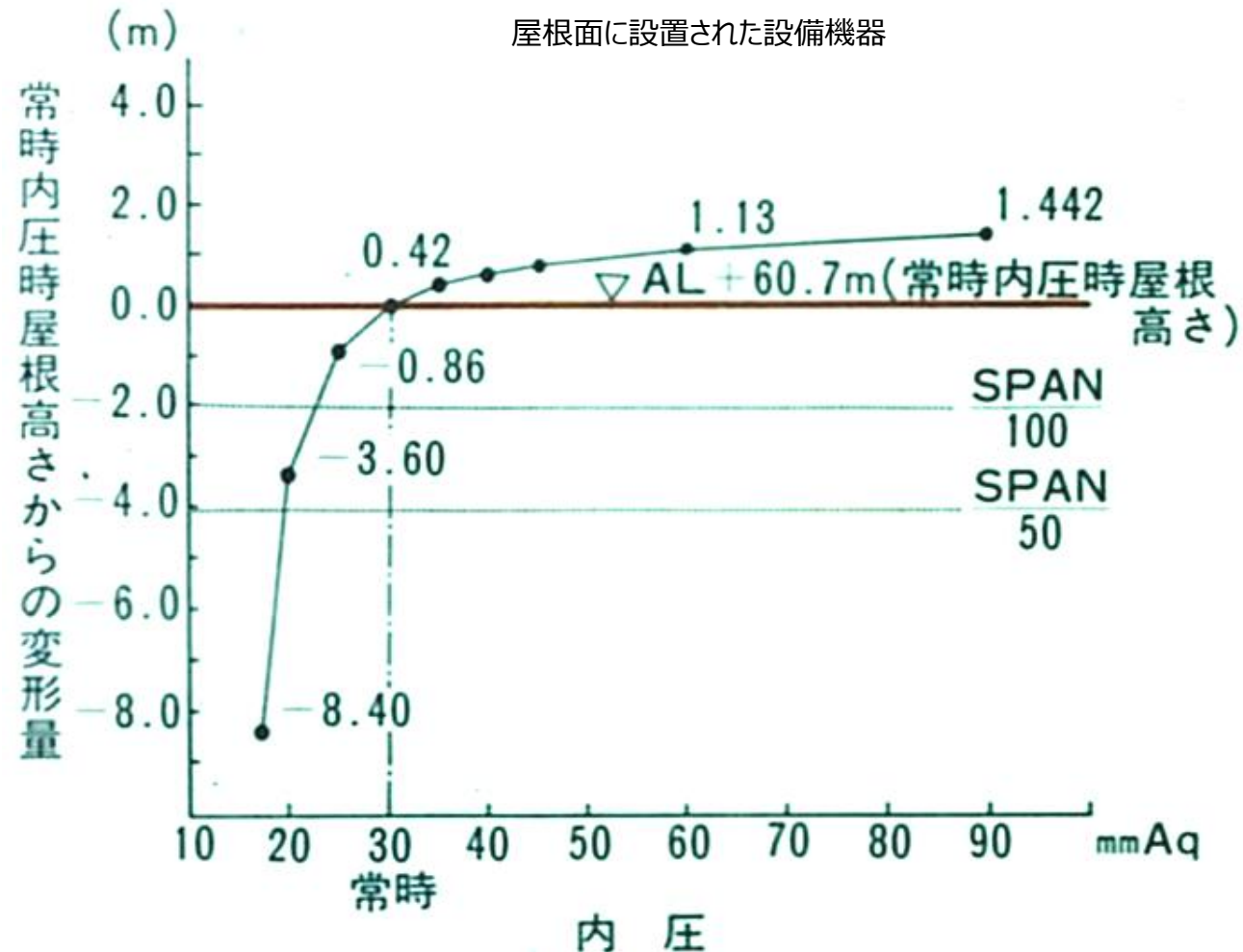
常時と同じ内圧とする

## ●火災等の避難時内圧

屋根の形状を維持し、蓄煙能力を確保するため常時と同じ  $30 \text{ mmAq}$  の維持を基本とする



屋根面に設置された設備機器



# 強風時の内圧設定と管理

・風の強い時には、屋根面の揺れを抑え、安定を保つために風速に応じ順次内圧を上昇させる

屋根の固有周期

設定内圧 Po(mmAq)	平均風速 V(m/s)	等価内圧* Pe(mmAq)	固有周期(秒)		
			1次	2次	3次
30	0.0	30.0	4.15	3.64	3.56
30	11.5	32.9	3.72	3.32	3.24
40	18.5	47.5	2.65	2.49	2.38
60	32.0	82.5	1.80	1.74	1.65
90	43.0	130.6	1.37	1.34	1.27

● 正圧に対する膜の反転防止

$$P_i \geq C \cdot q + 5 \quad (\text{mmAq})$$

P<sub>i</sub> : 必要内圧

C : 正の風圧係数

q : 軒高風速に対する速度圧

● 屋根全体の変形・振動防止

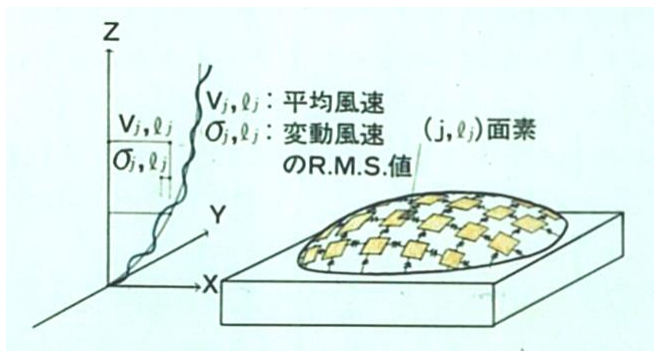
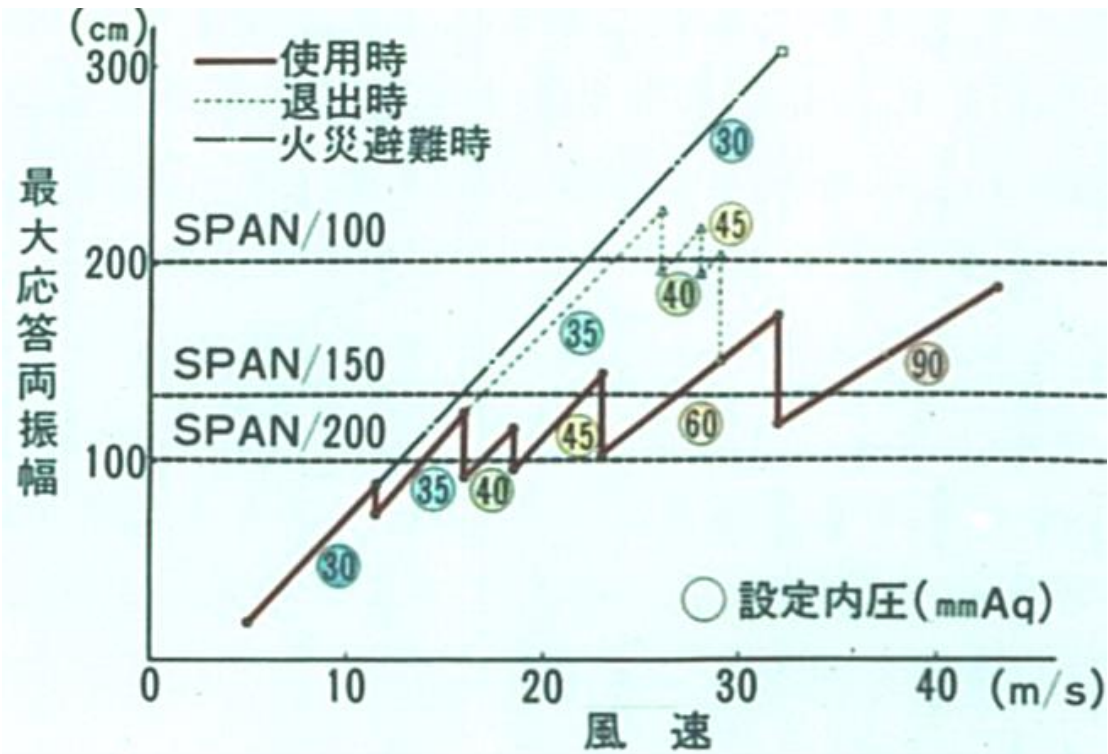
・比較的発生頻度の高い風速時

$$w\Delta_{\text{max}} \leq \text{SPAN}/150 \approx 1.4\text{m}$$

・比較的発生頻度の低い風速時 (強風)

$$w\Delta_{\text{max}} \leq \text{SPAN}/100 \approx 2.0\text{m}$$

wΔ<sub>max</sub> : 風荷重時の許容応答振幅

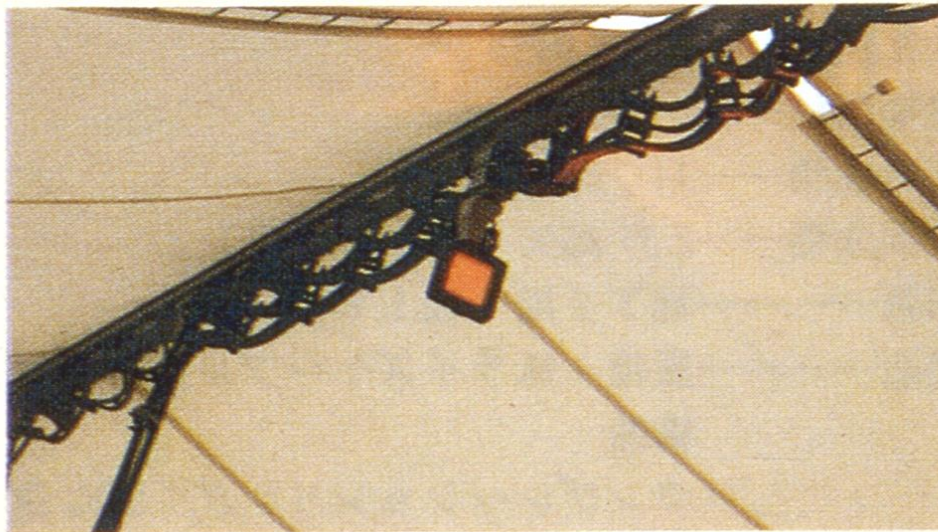




# 風荷重時の動的大変形の計測システム

## ● ITV センサー

風による揺れを瞬時にキャッチする装置。膜屋根の6カ所にセットされた真っ赤な発光ダイオードの光をエアドームの下部構造に固定された一定の輝度を追従するITVカメラが拾い、膜が上下するとその振幅がモニターテレビに映し出される仕組み。このセンサーが膜の揺れを確認すると、内圧が少し高められ、揺れを減らす。このセンサーのおかげで膜材の疲労を防ぎ、館内にいる人の不安感を抑えることができる。



# 降・積雪時の内圧設定と管理

- ・雪が積もった場合には雪の重さ分、内圧を高める
- ・それでも屋根面は約 2m 程下がる

## ● 融雪システムの稼働

屋根中央部で、  
重量換算値で 1.0 Kg/m<sup>2</sup>/hr  
積雪深で 0.5 cm/m<sup>2</sup>/hr  
の融雪能力を保持

## ● 最大内圧

最大 90mmAq まで昇圧可能

常時内圧 30mmAq +  
設計積雪荷重 60kg/m<sup>2</sup>を加算

## ● 屋根全体の管理変形量

- ・使用時及び通常時

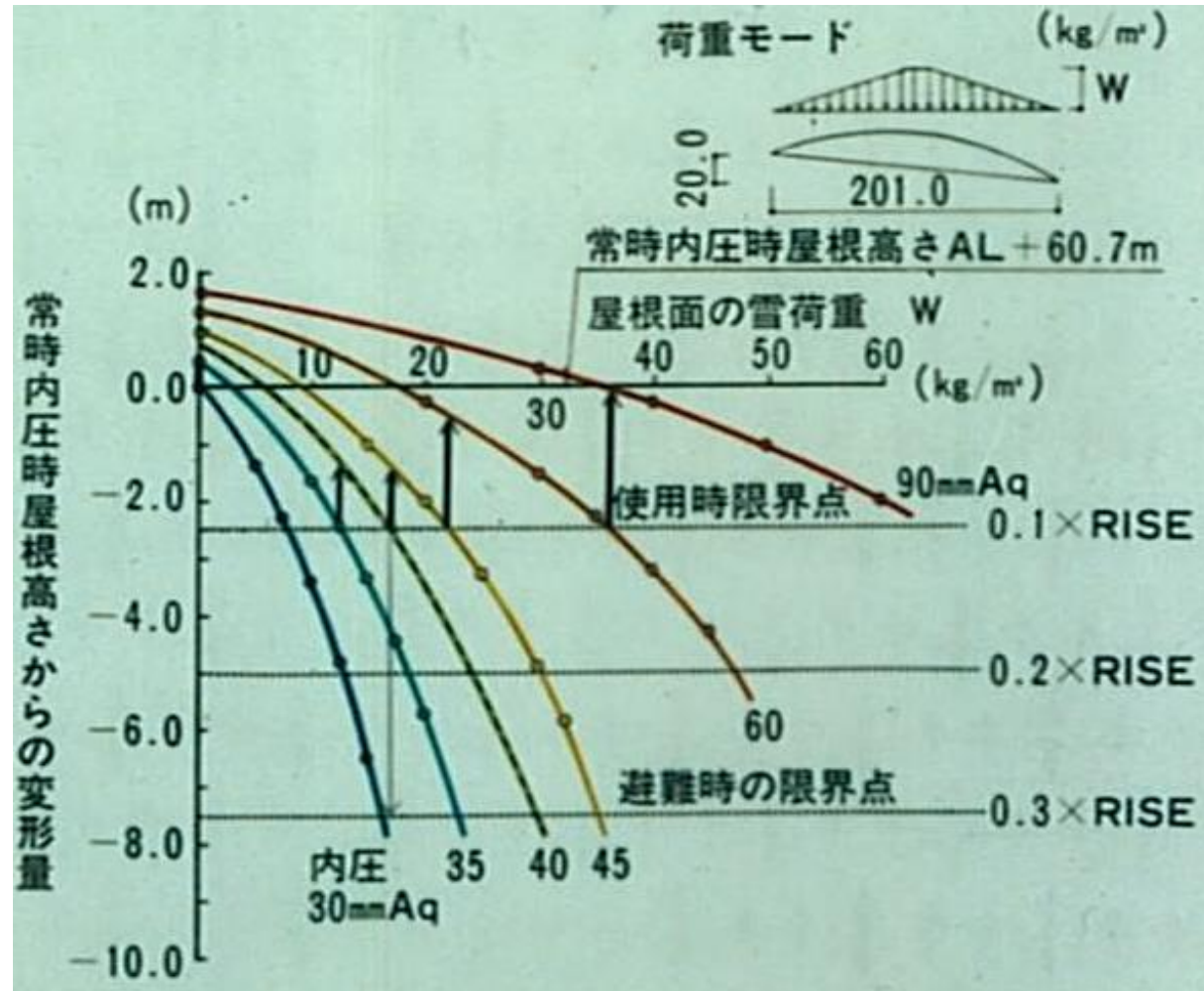
$$s\Delta_{\max} \leq 0.1 \times \text{RISE} \approx 2.5\text{m}$$

- ・火災などの避難時

$$s\Delta_{\max} \leq 0.3 \times \text{RISE} \approx 7.5\text{m}$$

ここで

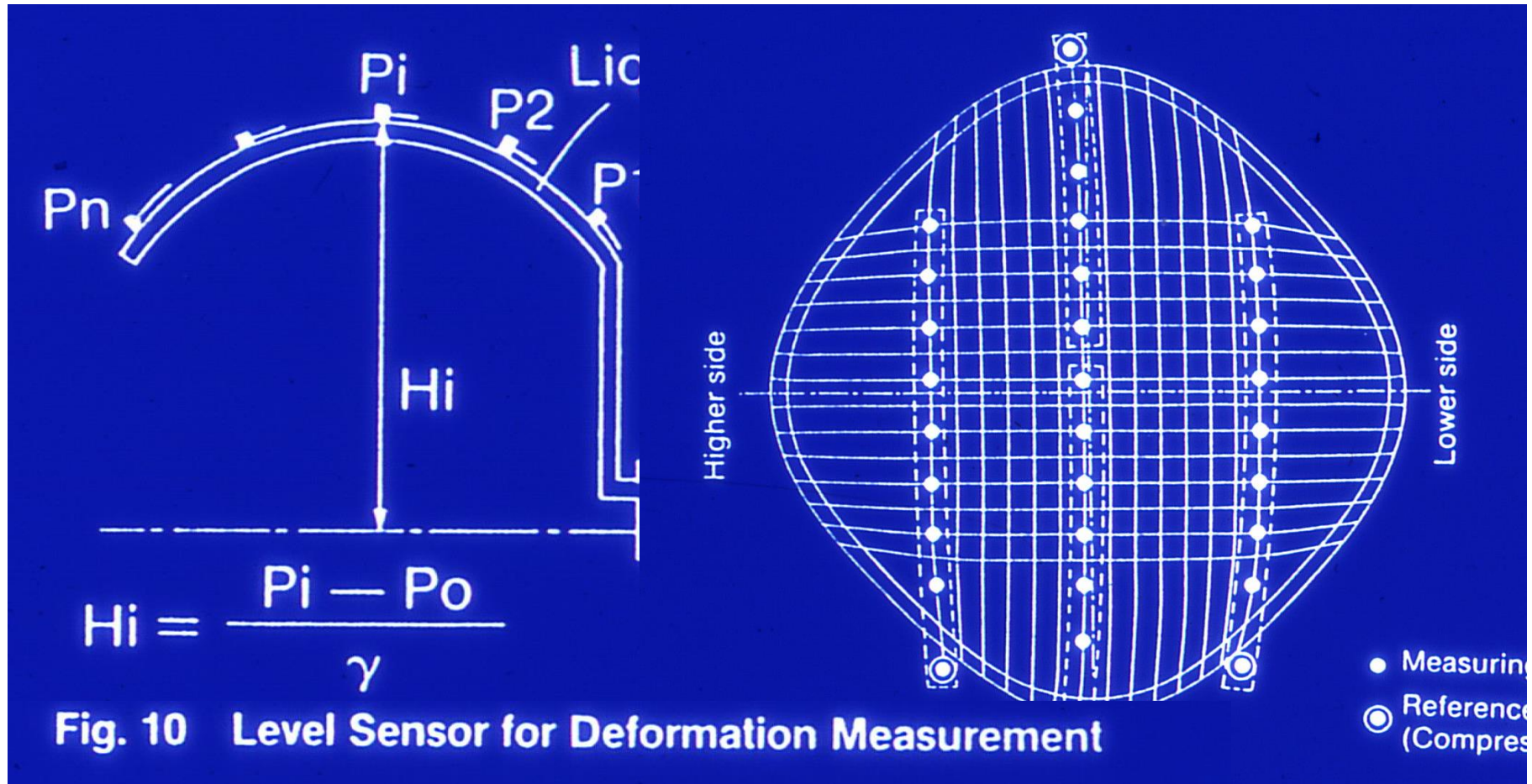
$s\Delta_{\max}$  : 積雪時の管理変形量





# 屋根変形状況のモニタリング

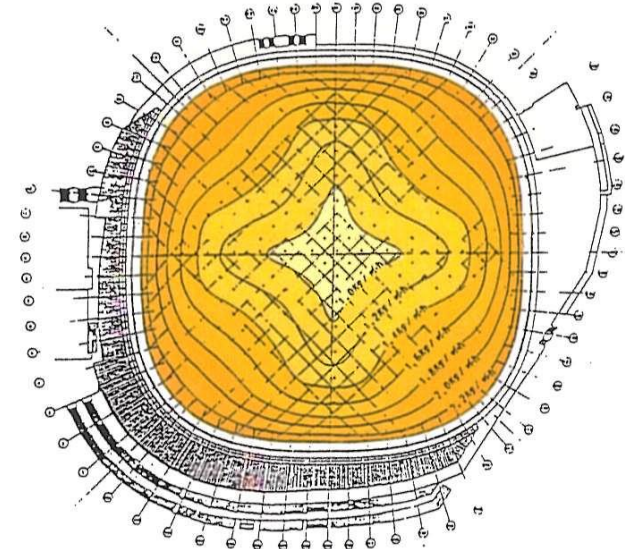
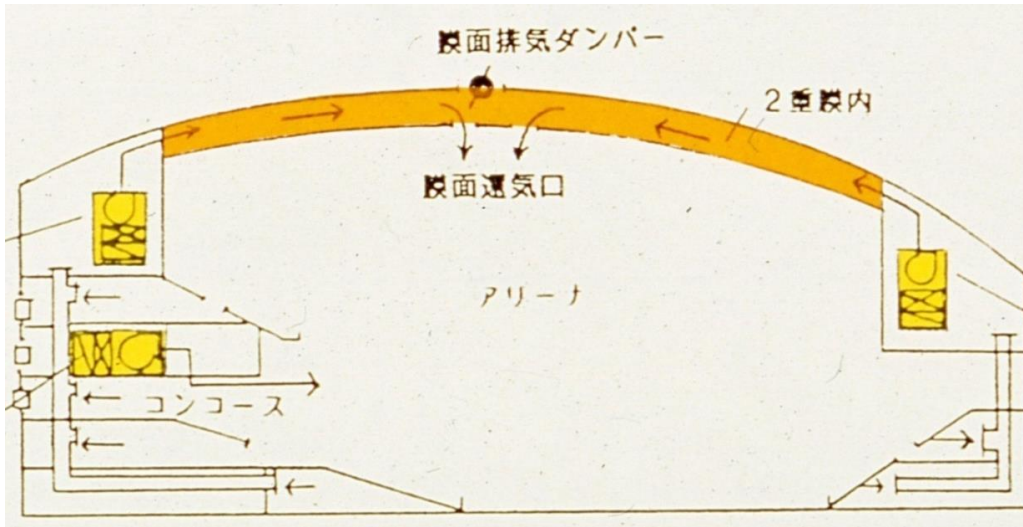
## ・静的な大変形を監視するレベルセンサーの構成



雪荷重による屋根面全体の静的な変形量をモニタリングする

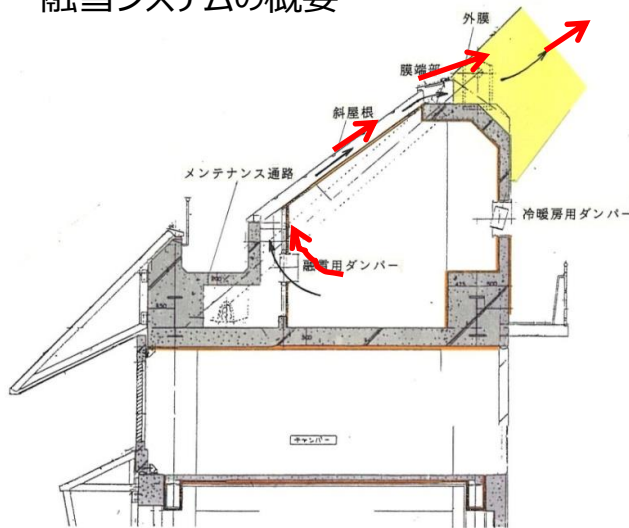
# 融雪システムの概要

・外膜と内膜の間に温風を送り、雪を溶かし「滑雪を促す」

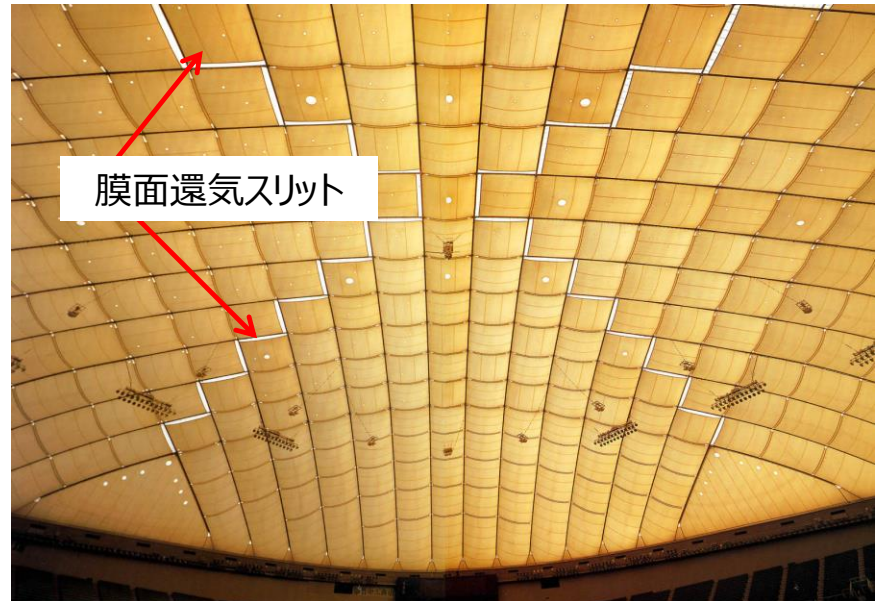


融雪能力線図

## 融雪システムの概要

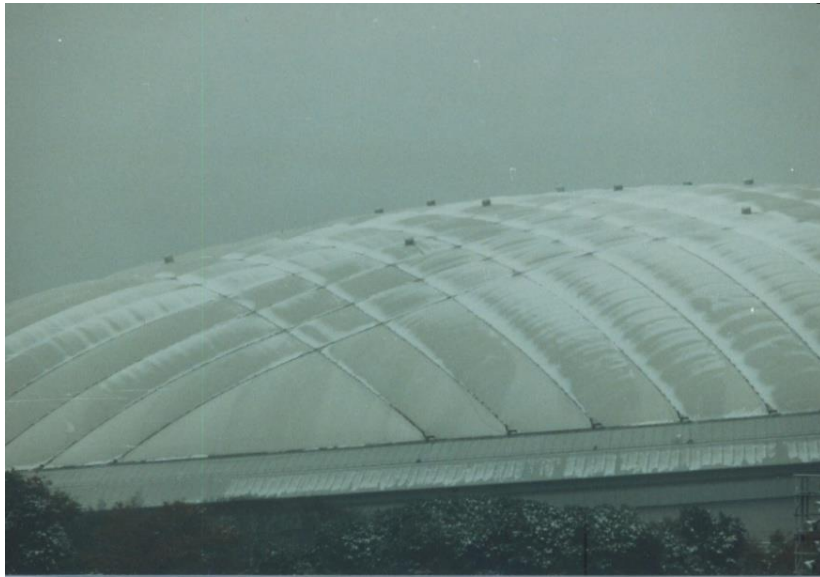


外周リング部からの温風供給

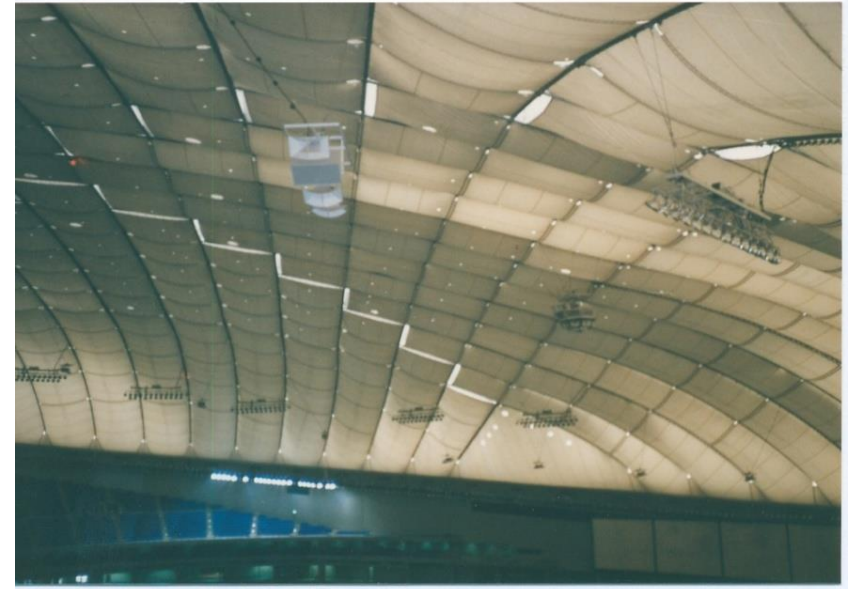




# 積雪時の屋根面の状況



積雪時の屋根外部の状況



積雪時の屋根内部の状況

# VI. 空気膜構造建築の 長期維持保全



## ■ 国内の空気膜構造の維持保全状況

建物名称	竣工年	膜屋根面積	現況
霊友会弥勒山エアードーム	1984年	≒900m <sup>2</sup>	2013年5月解体(約29年)
芝浦工業大学 中学・高校プール棟	1985年	≒600m <sup>2</sup>	現存供用中
東武動物公園	1986年	≒710m <sup>2</sup>	現在供用中
フジタドルフィンクラブ	1986年	≒650m <sup>2</sup>	2006年解体(約20年)
東京ドーム	1988年	≒28,000m <sup>2</sup>	現存供用中
パークドーム熊本	1997年	≒9,000m <sup>2</sup>	現存供用中(二重膜構造、直径107m)

## ■ 霊友会弥勒山エアードーム解体に伴う確認試験 (2013年5月実施)

- ①膜屋根面の劣化・損傷に関する目視調査
- ②ケーブル材の耐久性調査
- ③カバーゴム材の耐久性調査
- ④膜材の耐久性調査
- ⑤膜屋根材損傷時の応急処置に関する実験
- ⑥デフレート及びインフレート過程の検証

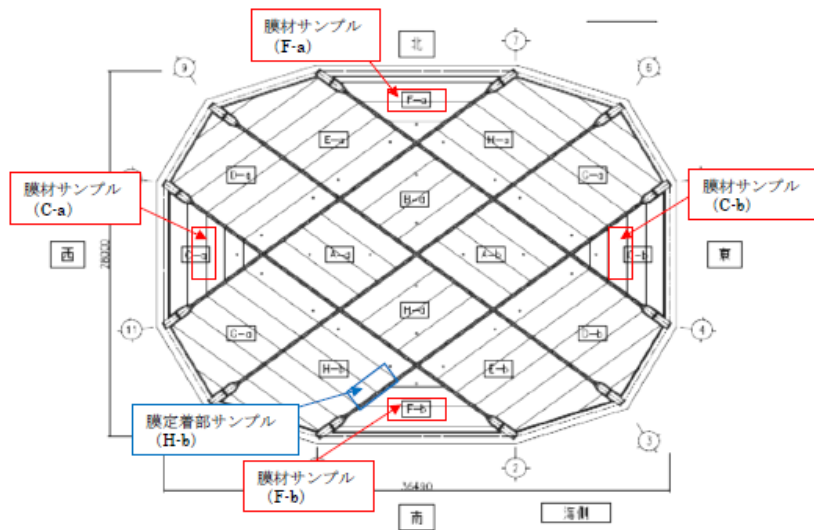
### 【実施会社】

- ・(株) 竹中工務店
- ・太陽工業(株)
- ・中興化成工業(株)
- ・神鋼鋼線工業(株)
- ・(株) タケチ

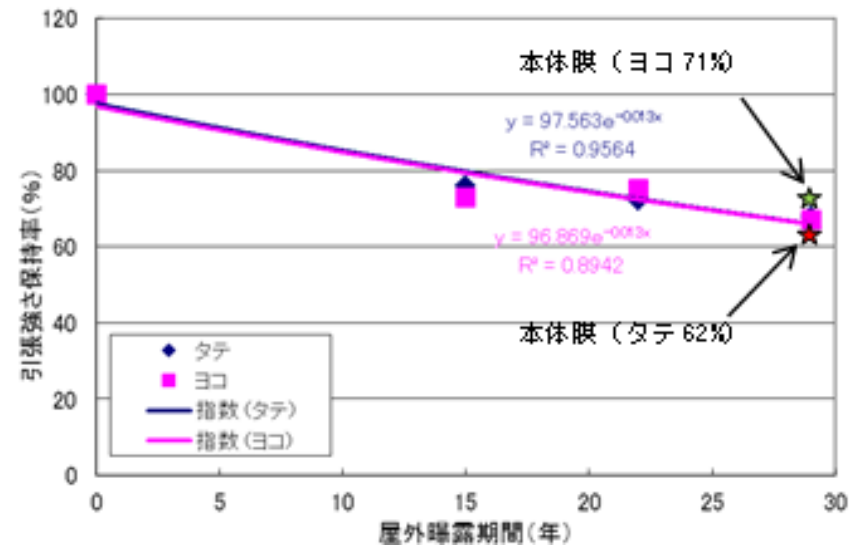


詳細は本協会「膜構造研究論文集 第29号, 43-77, 2015年」【第2編 報告・概説】に掲載

# 霊友会外膜材の耐久性調査結果 (一軸引張強度)



本体膜のサンプリング採取位置



曝露試験台の経年劣化曲線と本体膜強度保持率



曝露試験台の設置状況

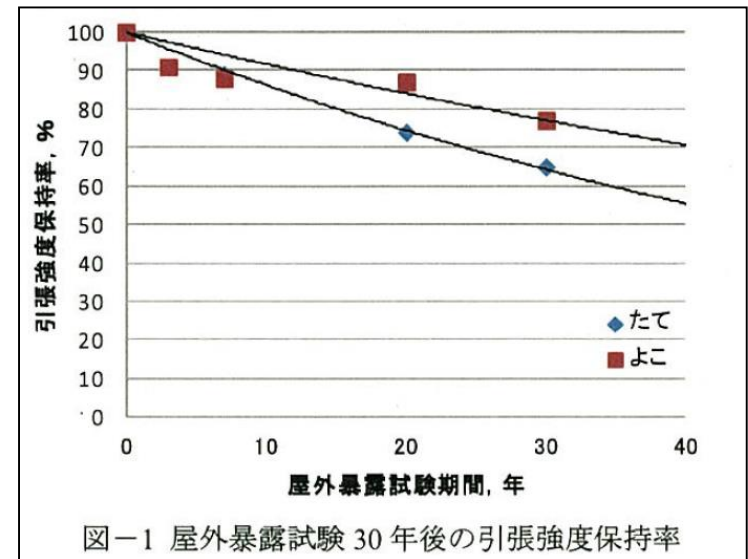


図-1 屋外曝露試験 30年後の引張強度保持率

関連文献資料

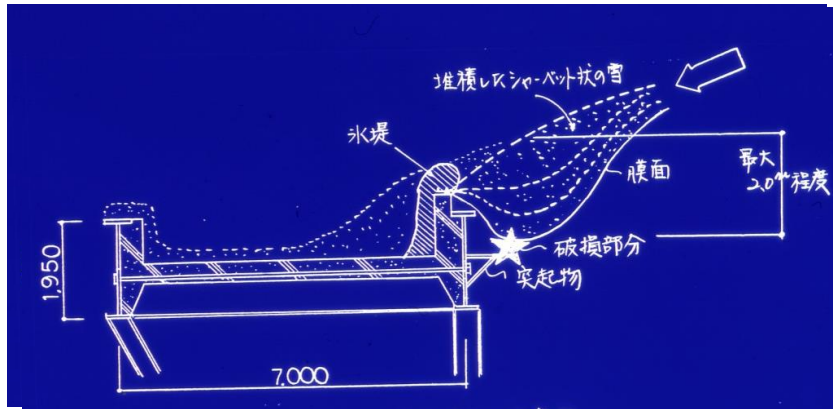


# 大規模エアードームの現況と展望 (デフレート事故)

## ■ シルバードームのデフレート事故

1985年3月4日最初の事故が発生

### 事故の原因



- ① 外周部に滑落した氷雪が堆積
- ② 外周部で再凍結しポンドイングが進行
- ③ 重みで垂れ下がった膜に、室内の突起物が接触し、膜が破損
- ④ 内圧を維持できずデフレート
- ⑤ 強風と吹雪に煽られ、膜の破損が全面進展

シルバードームは2013年1月 閉鎖



Free Press Photo by DAYMON J. HARTLEY

By Tuesday afternoon, more than 50 of the Silverdome's 100 roof panels were down or damaged.

## Damage threatens playoffs at Dome

By LONA O'CONNOR  
Free Press Staff Writer

Winds gusting more than 50 m.p.h. Tuesday left half of the Silverdome roof destroyed and further jeopardized the Detroit Pistons' chances of playing National Basketball Association playoff games at the Pontiac stadium.

The winds dislodged or shredded another 23 fabric roof panels, and another 1,000 stadium seats were damaged by falling ice, snow and water, Silverdome officials said.

Silverdome officials would not estimate damages Tuesday, but it appeared that repairs would cost

more than \$9 million. Officials have said that replacing each panel could cost \$135,000 to \$200,000. As of Tuesday evening, 52 of the 100 Teflon-coated fiberglass panels that make up the inflatable roof required replacement, and more than 3,000 seats were damaged.

Although Silverdome officials said the roof still could be repaired by the first week of April, they must assure the Pistons by next Wednesday that the stadium will be ready to host NBA playoff games, said James Clarkson, chairman of the

See SILVERDOME, Page 14A



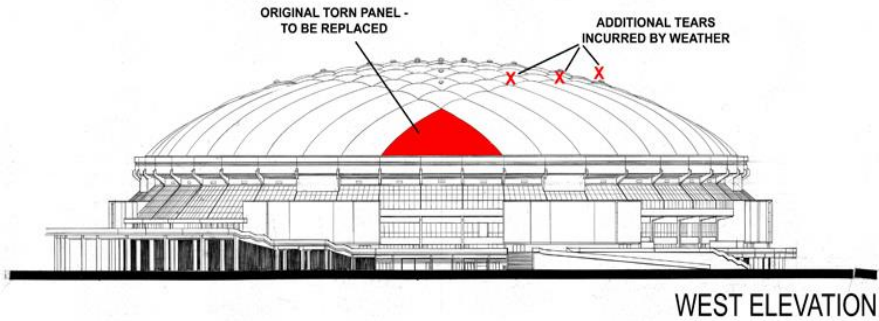
MARCH 5: More than 20 were ruined.



MARCH 4: Seven torn in first storm.

# 大規模エアードームの現況と展望 (デフレート事故)

## ■ BC PLACE の膜損傷事故 2007年1月発生



## ■ メトロドームの雪による破損事故 2010年12月発生



メトロドームでは過去 5 回のデフレート事故が発生している

メトロドームは2014年1月に新スタジアム建設のため解体

BC PLACEは2011年に空気膜構造から開閉式の膜構造の屋根に改修済



2008年解体

1999年膜の張替え更新

# 北米の大規模ドーム 保全の現況

## 空気膜構造系



キャリアドーム  
1980



フージャードーム  
1984



2013年 使用中止 (解体?)

シルバードーム  
1975



2014年解体

メトロドーム  
1982



2011年開閉式膜構造に更新

BCプレイス  
1983

1965

1970

1975

1980

1985

1965

アストロドーム (s)



2008年 老朽化のため閉鎖

1975

スーパードーム (s)



2005年ハリケーンで損傷、2006年改修

1976

キングドーム (RC)

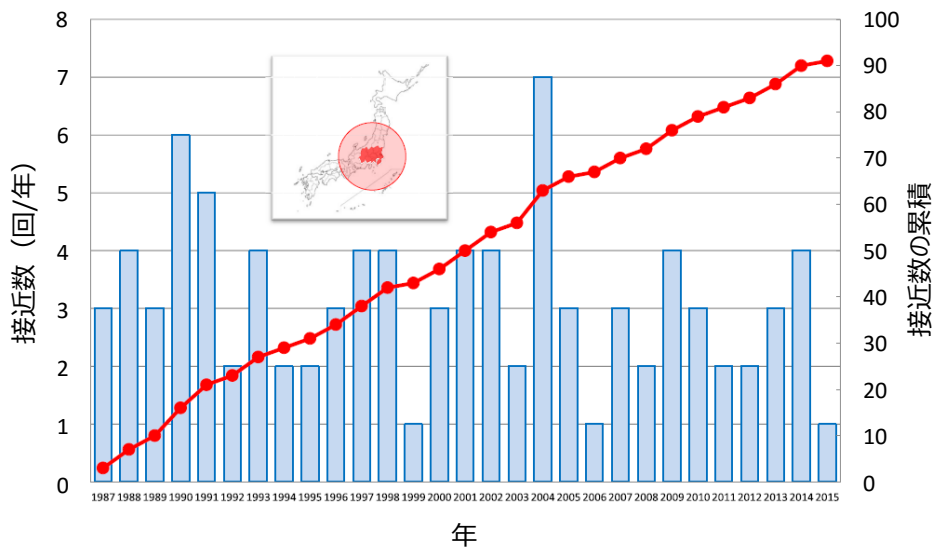


2000年 老朽化のため解体

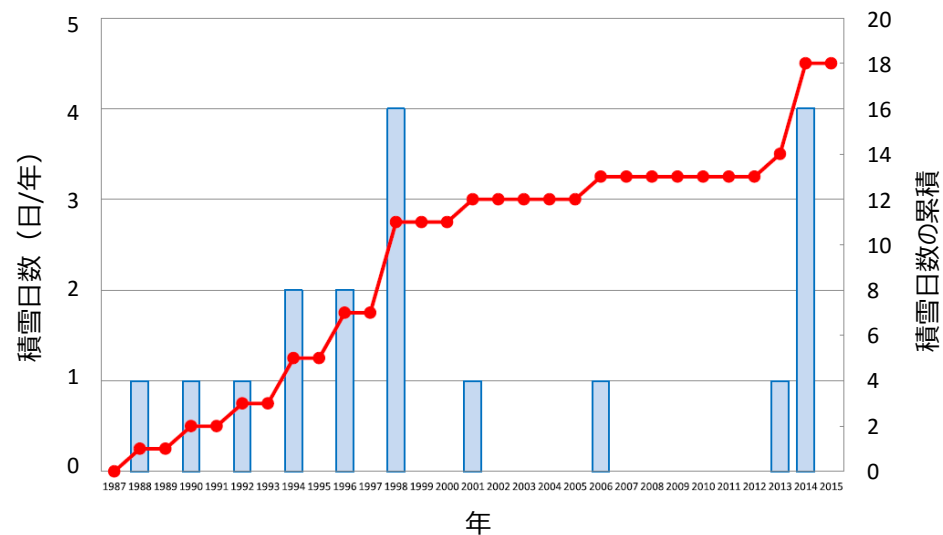
## 鉄骨・RC構造系

# 東京ドームの経験した強風と降積雪 (1987-2015)

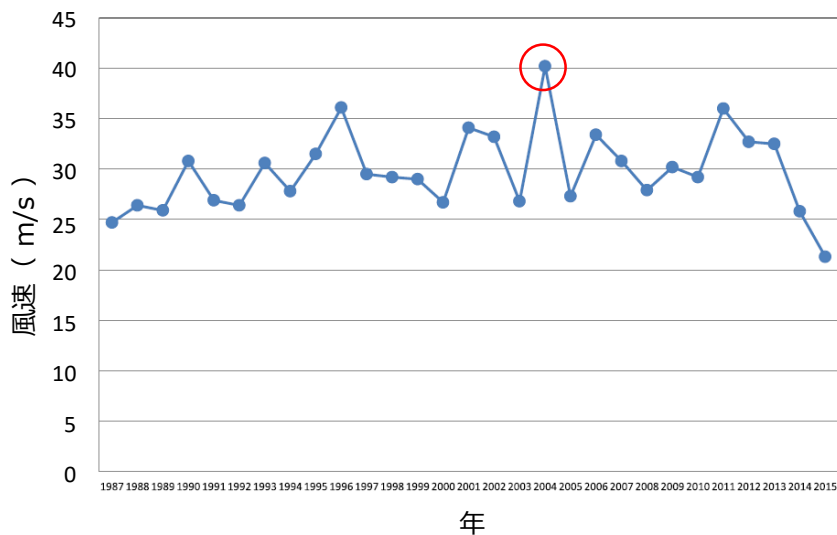
台風の気象庁関東甲信越地方気象官署への接近数 (300 km以内)



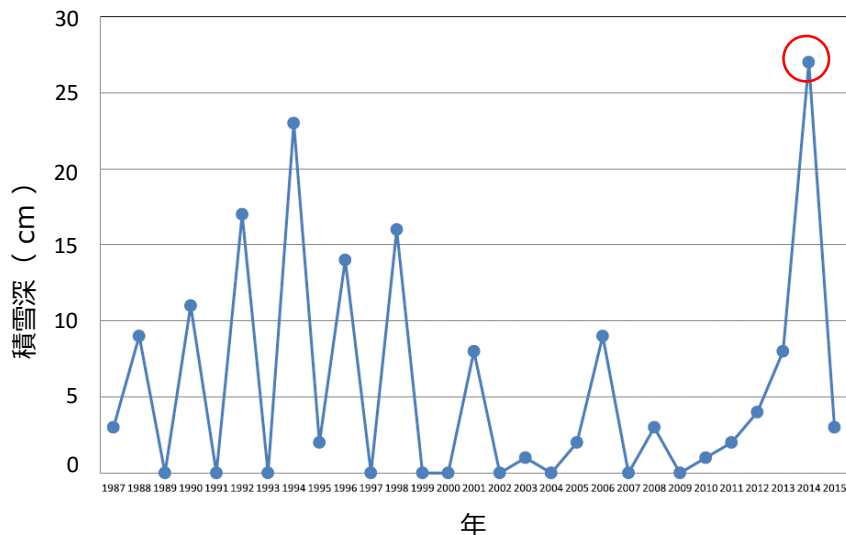
気象庁・東京観測所の年5cm以上の積雪日数



気象庁・東京観測所の年最大瞬間風速



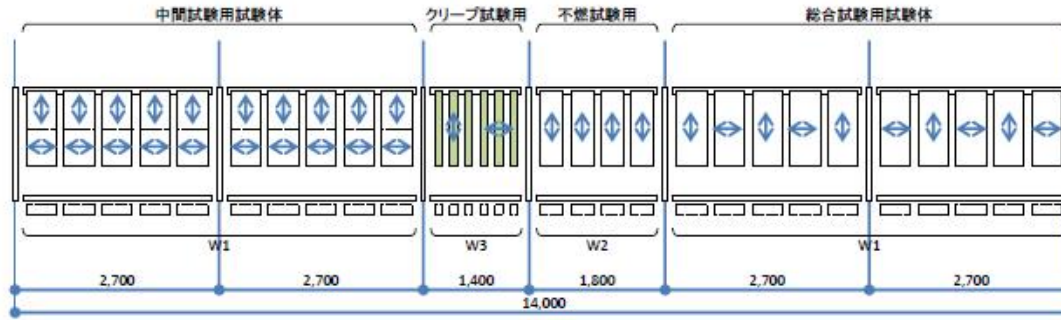
気象庁・東京観測所の年最大積雪深 (cm)





# 東京ドームの膜材の強度管理 (暴露試験体)

設置時  
(1987/07/28)\*



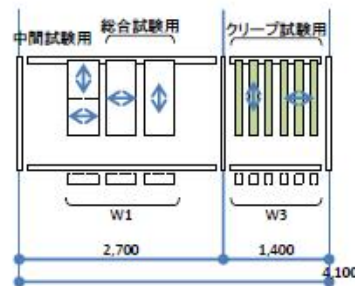
\* ・インフレート(1987/06/28)の1ヶ月後に設置  
・竣工は1988年3月

試験架台伏図



暴露状況写真

現状  
(2015/07/23)

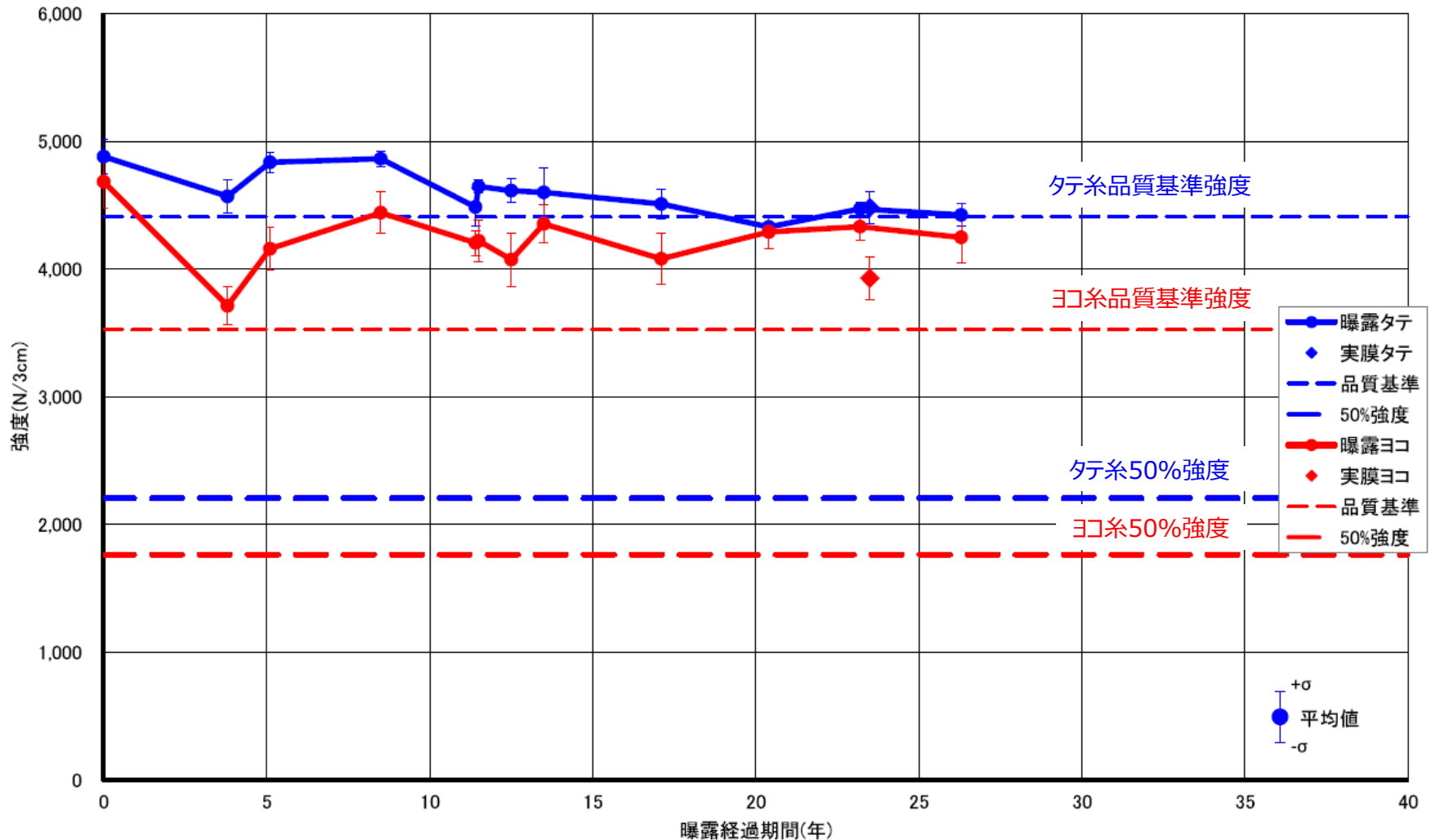


試験架台伏図



暴露状況写真

## 母材一軸引張強度試験の経年推移









# END

