

# きらら元気ドーム

日本設計  
人見泰義



同  
中川 進



## 1. はじめに

きらら元気ドームは、スポーツを通じて総合的な交流を図ることが可能な施設で、スポーツ以外にも、展示会や各種催事など、施設の多目的利用、広域利用による活発な交流促進に寄与できる多目的ドームです。

本建物は、直径約150mのドーム屋根の支承に、鉛プラグ入り積層ゴム支承を用い、免震ドームとして設計されています。

## 2. 建築計画概要

建設地は、山口宇部空港と山陽新幹線小郡駅との中間にある瀬戸内海に面した阿知須干拓地（約286ha）に整備された山口県立きららスポーツ交流公園です。

柔らかな曲面形状の膜屋根を持つ大小2つのドームを、底状のバウンダリーフで一体化することにより、周辺環境とも適合した浮遊感ただよう外観が特徴です。膜屋根の頂部にはオクルスと呼ぶガラスのトップライト、側面にはポリカーボネイドのサッシュと、非常に開放感のある建物となっています。

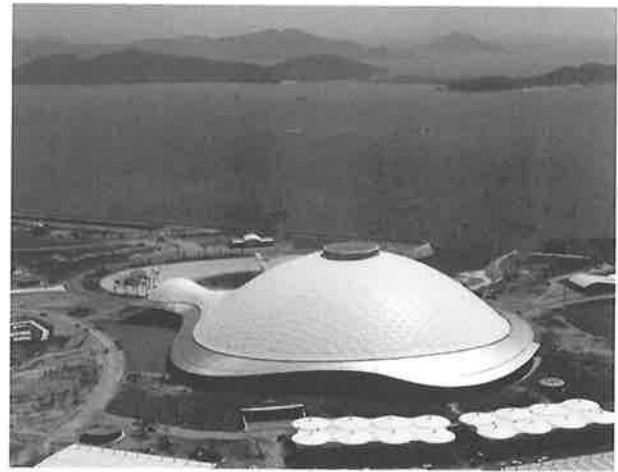


写真-1 建物外観

(撮影：ナカサアンドパートナーズ)

建物名称：山口県立きららスポーツ交流公園多目的ドーム  
 建設地：山口県吉敷郡阿知須町きらら浜  
 建築面積：27,667㎡  
 床面積：22,500㎡（法定床面積32,250㎡）  
 建物高さ：約53.5m  
 フィールド：13,300㎡  
 観客席：2,038席  
 構造：鉄筋コンクリート造  
 （ドーム部）鉄骨造 骨組膜構造

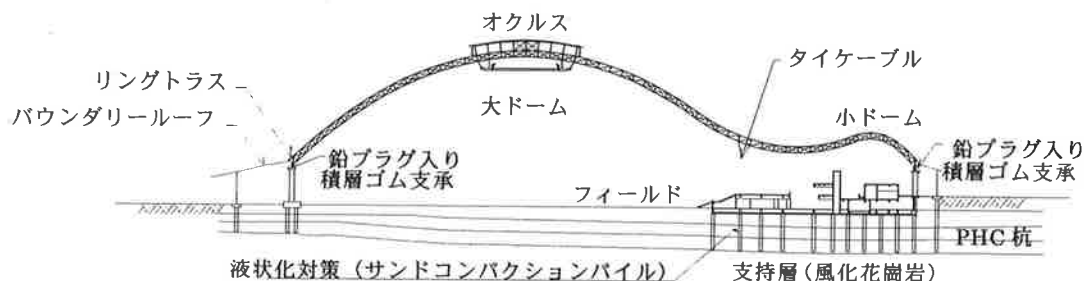


図-1 構造説明図

### 3. 構造計画概要

本建物の屋根は、大ドームと小ドームが構造的にも一体となった空間を形成しています。

屋根構造は、恒久膜（四フッ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布）とテンセグリックトラスによる骨組み膜構造です。

下部構造は鉄筋コンクリート造（一部、プレストレスト鉄筋コンクリート造）、基礎構造は、PHC杭基礎（中掘り拡大根固め工法）で、サンドコンパクションパイルによる液状化対策を行なっています。

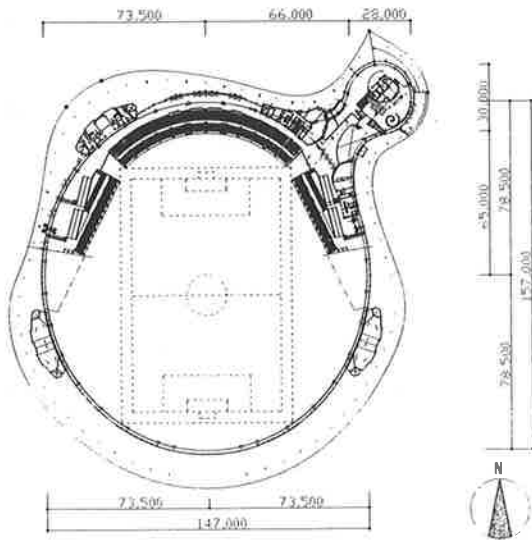


図-2 1階平面図

#### 3.1 テンセグリックトラスドーム (Tensegric Truss Dome)

屋根構造は、格子状の上下弦材をテンション材により繋いだ、テンセグリックトラスを採用しました。

この架構はいままでに事例のない方式で、システムトラス部材により作られたグリッド4m、トラスせい2mの上下弦材に、ハイテンションロッドの斜材を立体的に設け、初期張力（50kN）を導入することで、全体架構の安定性を確保しています。

ドームの形状はパラボラ曲線を基本とし、ライズを高く取ることで、鉄骨量を低減し（見付面積当り35kg/m<sup>2</sup>）、軽快感と透明感を演出しています。

設計荷重時には、圧縮側のロッドを無視しても全体架構が不安定にならないことを確認し、ロッドの張力が抜けることを許容した設計としています。

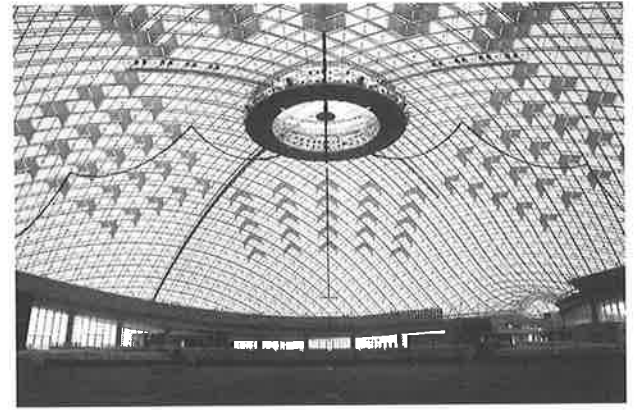


写真-2 ドーム内観

#### 3.2 ばねストラット式張力膜構造 (Tensile Membrane Structure with Spring-Strut System)

継ぎ目のない約4m×4mの一重膜を1ユニットとし、ユニット中央にあるストラット機構で、平張りされた膜面の中央を約18cm突き上げ、膜面の安定性を確保しています。

ストラット機構には、ばねが仕込まれ、クリープにより膜材が伸びるとストラットが伸び、膜の再張力導入が自動的に行われます。

そのため、膜JOINT部は再張力導入の仕組みを必要としないため、簡素化されたディテールとなります。



写真-3 テンセグリックトラス

### 3.3 免震ドーム

屋根構造は、大小ドーム屋根の外周に沿ってラスト力対抗するリングトラスを回し、くびれ部分にタイケーブルを配置することで、自己完結型の構造としています。この屋根架構を38基の鉛プラグ入り積層ゴム支承で支えています。

免震ドームとすることで、以下に示す3つの効果をあげています。

- ・温度変化による変形を吸収し、屋根架構および下部構造に生じる温度応力を低減する。
- ・免震効果により水平および上下方向の地震時応力を低減する。
- ・下部構造の剛性偏心による応力集中を防止する。

鉛プラグ入り積層ゴム支承の直径は500mm、鉛プラグ径100mm、二次形状係数3.5で、最大長期面圧5.4N/mm<sup>2</sup>において20cm以上の性能保証変形を確保しています。

ゴム1層の厚さを1cmとすることにより、リングトラスの強制変形により支承上部が回転変形しても、追従できる構造としています。

屋根構造と下部構造の間は、地震時に大きな変形差を生じるため、20cmのエキスパンションジョイントを設けています。



写真-4 積層ゴム支承とリングトラス



写真-5 独立柱と積層ゴム支承

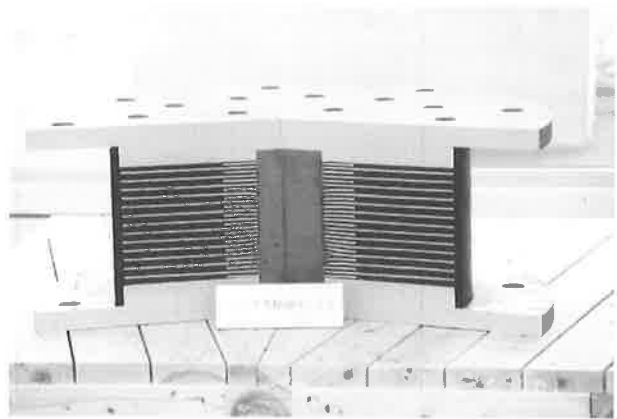


写真-6 鉛プラグ入り積層ゴム支承切断面

## 4. 設計クライテリア

### 4.1 風荷重

風荷重は、風洞実験により再現期待値100年の風速 ( $V_{25} = 39.8\text{m/s}$ ) により求め、16風向について短期荷重として考慮しました。屋根部分の最大正圧は $1130\text{N/m}^2$ 、最大負圧は $2230\text{N/m}^2$ です

### 4.2 積雪荷重

積雪深度は30cmとし、積雪荷重 $600\text{N/m}^2$ にて検討しました。全面、頂部偏在、北西側偏在の3ケースを短期荷重として考慮しました。

### 4.3 温度荷重

±30度の温度変化を長期荷重として考慮しました。

### 4.4 地震荷重

建築基準法に定められた地震荷重を採用し、8方向を短期荷重として考慮しました。予備応答解析により、屋根の水平震度は $K_h = 0.24$ 、鉛直震度は $K_h = 0.36$ としました。下部構造には、重要度係数(1.25)を考慮しました。

表一 設計クライテリア

		耐風設計	耐震設計
荷重レベル		再現期間100年相当	レベル2地震動
屋根 架構	鉛直変形	スパンの1/300以下	
	部材の状態	各部材に発生する応力が許容応力度以下	
	ハイテンションロッド	圧縮側のハイテンションロッドを無視しても、過大な変形が生じない	
	タイケーブル	短期許容引張り力以下で、常に引張り力を受ける	
積層 ゴム	水平変形	安定変形(7cm)以下	性能保証変形(20cm)以下
	最大面圧	10N/mm <sup>2</sup> (100kgf/cm <sup>2</sup> )以下	
	引張面圧	1N/mm <sup>2</sup> (10kgf/cm <sup>2</sup> )以下	
下部 構造	層間変形角	1/1000以下	1/500以下
	部材の状態	各部材に発生する応力が許容応力度以下	ヒンジを生じるが、架構の復元力特性はほぼ弾性とみなせる範囲内
基礎	部材の状態	杭に生じる応力が許容応力度以下	全ての杭が、終局耐力に達せず剛性を有する
スパンジョイント クリアランス		可動幅20cmで、仕上げ材が損傷しない 可動幅30cmで、躯体同士がぶつからない	
設備配管 可動範囲		可動幅20cmで、配線・配管が追従する	

## 5. 時刻歴解析による検証

### 5.1 振動モデル

振動応答解析モデルは、簡略化のため実際の3×3グリッドを1質点としたシングルレイヤモデル(質点数332、部材数868)としました。免震支承は、MSS(Multi Shear Spring)モデル、減衰は屋根の上下1次振動( $\omega=7.85\text{rad/s}$ )に対して、減衰定数2%の剛性比例型としました。

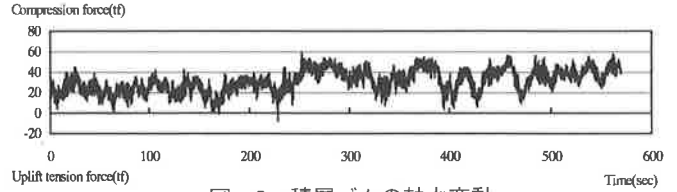
応答解析は、(株)日本設計所有のNASCA-FEMにより行い、積分は、Newmark- $\beta$ 法( $\beta=1/4$ )としました。

### 5.2 風による振動解析

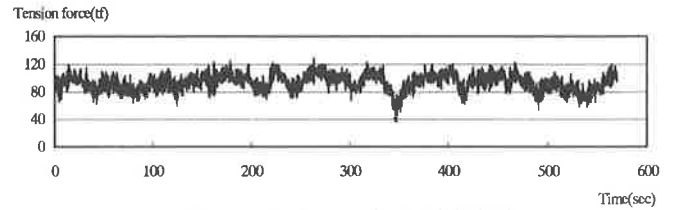
検討用の変動風力係数波形は、風洞実験で得られた動的な風圧変動を再現期間100年の風にスケールリングし、北、北東、南東、南西の4風向に対して各々3ケース、計算刻みは0.04秒としました。

解析の結果、積層ゴム支承の変形は、安定変形以下となっていることを確認しました。

また、タイケーブルの引張軸力は破断荷重の約4%にあたる350kN(36tf)まで低下しますが、強風時においても安定していることを確認しました。



図一 積層ゴムの軸力変動



図二 タイケーブルの軸力変動

### 5.3 地震による振動解析

EL CENTRO 1940 NS, TAFT 1952 EW波の水平動を、1階床位置で最大速度40cm/sに基準化し、上下動も考慮した振動解析を行いました。

解析の結果、水平動による積層ゴム支承の水平変形は模擬地震動が最大で16.6cmでした。

屋根面の加速度は、非免震の場合水平、上下とも1Gを超える加速度を生じますが、免震効果により水平、上下とも約1/3以下に低減されています。積層ゴム支承は $K_v=0.32$ 程度の軸力変動で、引抜き力は生じません。

柱に生じる曲げモーメントも約1/3となり、柱断面を小さくすることができました。

表一 免震・非免震の比較  
(EL CENTRO 1940 NS)

	免震	非免震
水平加速度 (屋根)	509gal	1769gal
上下加速度 (屋根)	475gal	2302gal
水平加速度 (リングPC梁)	970gal	1040gal
柱 せん断力	850kN	3040 k N
柱曲げ モーメント	4820 k Nm	13340 k Nm

## 6. ドームの施工

ドームの架設によるスラスト力およびタイケープルへの張力導入により、建方中に積層ゴム支承部が水平に移動します。このため、積層ゴムの下フランジ下部にすべり材を挟み込み、建方時の変形を逃がすことで、積層ゴムに初期変形を与えない施工を可能としました。

ドームの施工にはブロック工法を採用しサポートの個所数を極力少なくしましたが、周辺部材の架設はグリッド毎に支持する必要があるため、仮支持点の数は735ヶ所にのぼりました。

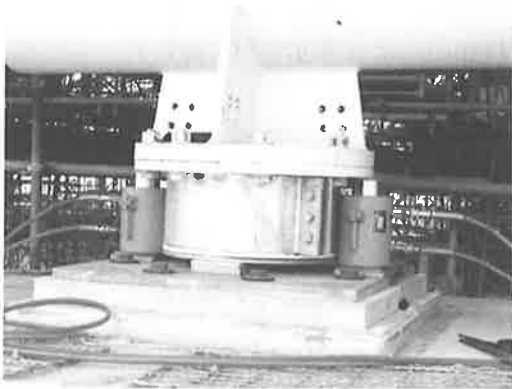


写真-7 ジャッキアップ状況

そのため、38箇所の免震支承部でドーム全体をジャッキアップしサポートを浮かせて除去した後、ジャッキダウンを行い屋根の荷重を免震支承に移行させる「ジャッキアップダウン工法」を採用しました。

ジャッキアップする重量はドームの鉄骨自重に吊足場（想定20kgf/m<sup>2</sup>）を加えた計21,000kNで、支承1箇所当りの最大反力は1200kNでした。解析とほぼ同じ70mmのジャッキアップにてドームが完全に自立しました。

ジャッキダウン後、積層ゴムのフランジを、ベースプレートに溶接固定しました。

## 7. おわりに

免震ドーム等の新技術を取り入れた「きらら元気ドーム」の設計においては、時刻歴解析による検証で、地震および強風時の性能を確認しました。

テンセグリックトラス、ばねストラット式張力膜構造とあいまって、超軽量のドームとすることができました。

### 謝辞

本建物は、施主である山口県の方々をはじめ、本建物に携わった施工者並びに関係者の皆様に、多大な御協力をいただきました。

また、斎藤公男日本大学教授には、屋根の構造について貴重なご指導を賜りました。この場を借りて感謝の意を表します。

### 参考文献

- (1) Y. Hitomi, Structural Design of The YAMAGUCHI DOME, Proc. IASS Nagoya, pp.346-347, 2001
- (2) 人見泰義他、：山口県立スポーツ交流公園（仮称）多目的ドーム,ビルディングレター, No.401,1999・12