



## 動く建築構造物

油川 真広・石川 善弘

本年日韓共同で開催されるワールドカップの開催会場となる建物では、機能や快適性を向上し稼働率を向上させるため「動く建築構造物」が種々建設されている。ここでは、世界初の札幌ドームの「エア浮上+車輪駆動方式」により重量のほとんどを空気圧で支持し、車輪で駆動する重量約8,300tの可動サッカーフィールド「ホヴァリングステージ」と、大分スポーツ公園総合競技場のワイヤトラクション方式により1,300t×2枚の可動屋根が球形の固定屋根に沿って「眼」のように開閉する「球面上を昇降する開閉屋根」についてその概要を説明する。

キーワード：ドーム、可動サッカーフィールド、エア浮上、開閉屋根、ワイヤトラクション

### 1. 札幌ドーム「ホヴァリングステージ」

#### (1) ホヴァリングステージの概要

1997年2月に札幌市が実施した「札幌ドーム（仮称）設計・技術提案競技」において、原広司グループ（原広司、アトリエファイ、アトリエブク、竹中工務店、大成建設、シャルボビスイंक）が最優秀案に選出された。この札幌ドームは卵型屋根のドーム（屋内アリーナ）と屋外アリーナが一体となったデュアルアリーナ及び天然芝サッカーフィールド可動システム「ホヴァリングステージ」が大きな特徴である（写真-1参照）。ホヴァリングステージは微小な空気圧（約900mmAq、大気圧の約9%）でステージ全体をわずかに（約75mm）浮上させ、ステージ外周に配置した車輪を駆動させて移動する「エア浮上+車輪駆動方式」の世界で初めての方式である。

(a) ホヴァリングステージの特徴（図-1参照）

① 天然芝フィールドは重量分布がほぼ均一なため、その重量を空気圧で直接支持すること



写真-1 札幌ドーム全景

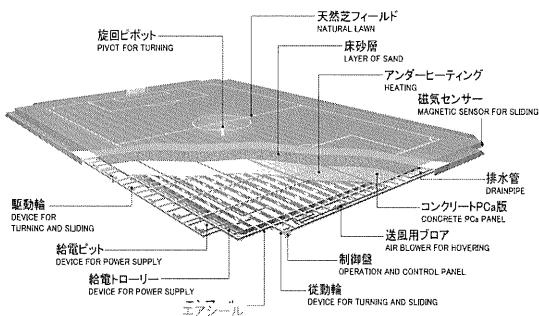


図-1 ホヴァリングステージの構成

で、全重量を車輪で支持する方式に比べて構造部材・駆動装置を小さくできる。

- ② 重量のほとんどを空気圧で支持し、車輪には駆動力に必要な重量のみを負担させるため鋼製レールが不要となり、建築計画上、運営上の制約を極めて小さくすることができる。また車輪を旋回ピボットに対し直角方向に回転することにより旋回も可能となる。
- ③ ステージ使用時は、鉄骨大梁を直接コンクリートに設置させてステージを支持するため、サッカー競技に必要な床剛性を確保できる。
- ④ 装置類はステージ外周に配置され、機器点数も少なく、保守・点検が容易である。

#### (b) ステージの仕様

- ・平面寸法：約 85×120 m
- ・移動重量：約 8,300 t

#### (c) 移動（直進走行及び定位置旋回）

- ・直進走行：走行距離約 190 m，速度 4 m/min
- ・旋回：ドーム内及び屋外定位置旋回（90°）

#### (d) 操作・制御の概要（図-2 参照）

- ・ステージ使用時は車輪を構造体内部に引上げておき、床面に設置している大梁で支える。
- ・ステージ下面に内圧をかけた後、油圧機構で車輪を 75 mm 押し下げステージを浮上させる。その際ステージ下部の内圧は自重より若干高めに設定し、ステージを上へ凸状に変形させている。この変形による体積増を、可動席レール溝等を通過する時の漏気に対するバッファ効果として働かせ、制御の時間遅れに対応している。このとき全重量の 90%以上が空気圧で支持され、その残りを駆動力を伝達する面圧として車輪が負担している。
- ・浮上空気圧は外周に設置した 8 台のプロアで発生させ、可変ダンパーにより送風量を制御する。可変ダンパの制御はステージの変位及び圧力データに基づき行っている。
- ・直進走向時は、走行路面に埋込んだ磁性体とのずれを磁気センサで検知し、左右の駆動輪の回転速度を制御することにより直進性を確保する。旋回時は、旋回中心にピボットピンを差込み、車輪の角度を変えて、ピボットピ

ンを中心に回転する。

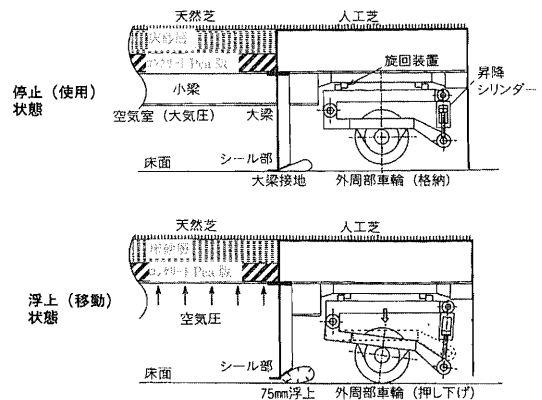


図-2 浮上、移動のしくみ

## (2) 技術開発、実証試験の概要

世界で初めての移動システムであるホヴァリングステージの実現には数多くの解析的検証及び実験での確認を行う必要があった。以下にその概要を示す。

### (a) 要素実験

空気室と外部を仕切るシール構造は、路面の凹凸に対する追従性を考慮しバグタイプとした。シール材料について 6 種類の材料を選定し、摩耗特性、耐寒性、耐薬品性、接着性、密着性試験を行い、シール本体には加工性に優れたクロロプレンゴムを、摺動面には摩擦係数が小さく摩耗特性に優れた PTFE を用い、シール本体に加硫接着している。選定したシール構造・材料を用いて写真-2 に示す 1/2 モデルでの試験を行い、シールからの空気漏洩量、シール摩擦力の確認を行った。また、車輪についても実大車輪を用いてグ

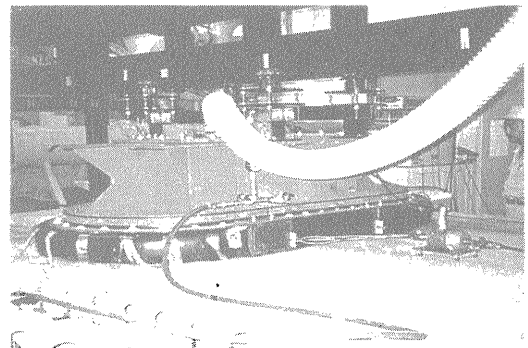


写真-2 シール性能試験状況

リップ係数、転がり抵抗等の試験を行った。

### (b) シミュレーション解析

#### ① 走行シミュレーション解析

路面状態（乾燥、湿潤）による摩擦係数の違いや、横風、偏荷重、シール抵抗アンバランス等の外乱に対し、左右駆動輪の速度差制御により、横ずれが許容範囲内（±10 cm）に納まり直進制御が可能であることを確認している。

#### ② 空圧制御シミュレーション解析

サッカーから野球への全工程において、シール部からの空気漏洩量はレール溝、排水溝、各塁ベース通過時等の外乱により変動する。この時浮上しているステージの梁がフィールドに接触することがないことを、排気ダンパーの開閉の時間遅れを考慮したシミュレーション解析により確認した（図-3参照）。ブロー容量 $1,600 \text{ m}^3/\text{min}$ の場合は想定される外乱に対して十分制御可能であることがわかる。さらに、ブローが1台故障し、 $1,400 \text{ m}^3/\text{min}$ の能力になった場合も制御可能であることを確認している。

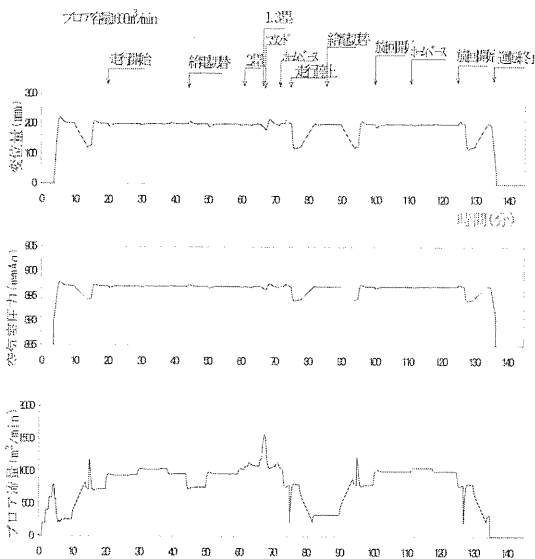


図-3 運転モードでの空圧制御シミュレーション結果

### (c) 実証試験

単位面積当たりの重量と内部空気圧を実機にあわせた試験機を製作し、シール性能（漏気量、摩擦係数）、空圧制御特性、直進走行制御特性の検証を行うと共にシミュレーション解析の妥当性の確認を行った。試験機は平面の大きさが $9.2 \times 13.6$

m（実機の約1/10）、総重量約100tのカットモデルであり、車輪・シールは原寸のものを使用している。この結果、実証試験機（写真-3参照）は極めて安定した挙動を示し、滑らかに走行することが確認された。

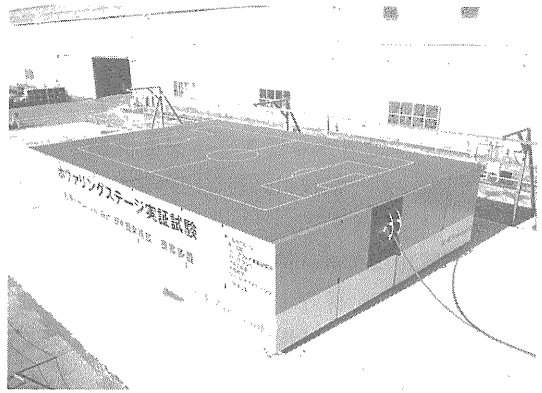


写真-3 実証試験機試験状況

### (3) ホヴァリングステージの機器構成

#### (a) 機器全体配置

図-1に示したようにホヴァリングステージの構成機器としては駆動輪、従動輪、シール、空気室加圧ブロー、シール内加圧ブロー、油圧装置、回転ピボット、排気ダンパなどがあり、回転走行用のピボット受けを除いてすべてステージ外周に配置されている。

#### (b) 駆動装置

車輪はウレタン車輪でウレタン厚35mm、車輪径 $\phi 650 \times 450$ 、車輪面圧は平均 $82 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ となっている。また、旋回にあわせた角度調整が可能であり、各車輪には走行時に75mm押し下げるための油圧シリンダが装備されている。駆動輪はステージ長辺に26輪配置され（写真-4参照）、駆動モータ容量は3.7kWである。従動輪はステージ短辺に8輪設置されている。

#### (c) 空圧装置

空気室加圧用ブロー8台、シール加圧用ブロー2台が設置されている。空気圧加圧用はモータ容量55kWで、圧力 $1,050 \text{ mmAq}$ 、風量 $200 \text{ m}^3/\text{min}$ である（写真-5参照）。

#### (d) 給電装置

直進走向時のステージへの給電は、は路面内に設置された集電子からステージ片側長辺方向に設

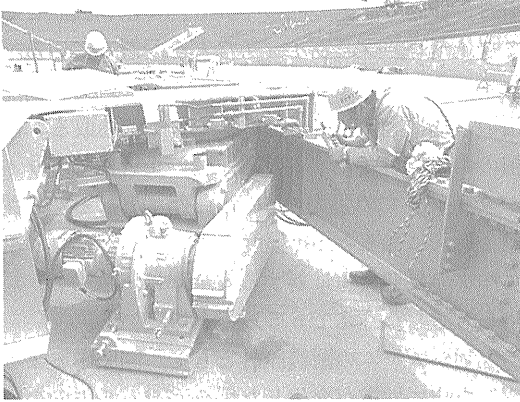


写真-4 駆動車輪

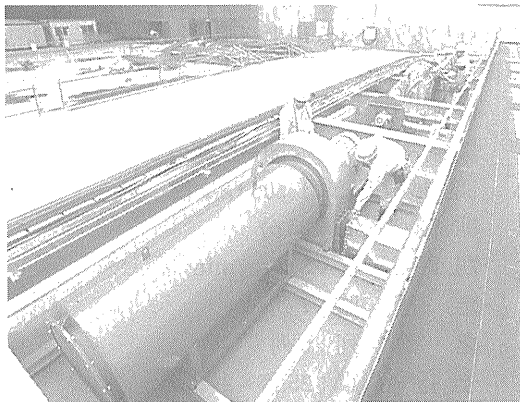


写真-5 空気室加圧用プロア

置された給電トロリに、また巡回走行時の給電は巡回用ピボット及びピボット受けに設置された集電子により行う。

#### (4) まとめ

総重量 8,300 t に及ぶ天然芝サッカーフィールドを空気圧で浮上させ屋内外を移動するホヴァリングステージは、世界初の動くサッカー場である。札幌ドームは竣工後サッカー、野球、イベント等多目的に利用されており、ホヴァリングステージの可動転換はトラブルもなく行われている。2002年ワールドカップで大きな注目を浴び、日本の技術力を広く世界にアピールすることができるかと確信している。

なお、ホヴァリングステージの開発は竹中工務店、大成建設、川崎重工業 3 社が共同開発契約を締結して行っており、特許を共同で 3 件出願している。

## 2. 大分スポーツ公園総合競技場（愛称「ビッグアイ」）

— 球面上を昇降する開閉屋根 —

### (1) ビッグアイの概要

ビッグアイは大分スポーツ公園（面積 255 ha）の中心施設として、1995年3月に実施された「大分スポーツ公園総合競技場提案競技」において、KTグループ（黒川紀章建築都市設計事務所、竹中工務店、さとうベネック、高山総合）が最優秀案に選出された。

このビッグアイはワールドクラスのサッカー、総合競技（第1種公認陸上競技場）が開催できる収容人員 43,000 人の大規模競技場である。競技場本体は球体の一部を切り出した形態で、上部に大きく開いた楕円の開口部は、芝生への日照を最大限確保することを考慮し、この幾何学的造形は可動屋根が開いている時も、閉じている時も変わらず、一体感のあるシルエットをかもし出している（写真-6 参照）。

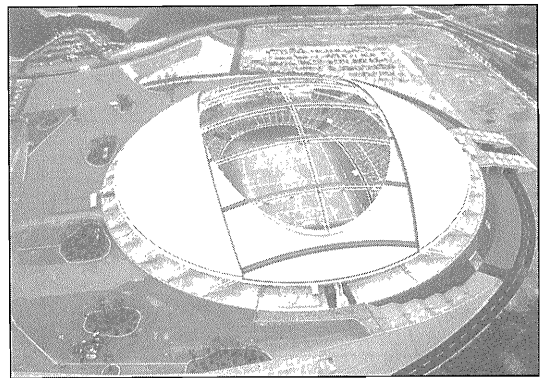


写真-6 ビッグアイ全景

#### (a) 開閉屋根の特徴

単層で球体に沿って移動する世界初の開閉方式の屋根は、常に勾配に起因する重力が作用するため水平面上を移動する従来の安定した開閉方式とは異なり、

- ① 可動屋根はライズの低い半月状球シェルとなり走行台車、レール（走行路）等に大きな水平力が作用する。
- ② レール勾配が常に変化し、開閉駆動力（牽引力）が大きく変動する。
- ③ レールスパンが約 40 m と大きく、走行路

の剛性が低く、走行レール個々の変形が大きい。

などの課題があり、実現に向けて多種多様な解析的検討及び実験での検証、確認を行い、可動屋根と走行台車との間に滑り支承、ばね機構、ダンパを設けた減衰機構付き走行台車の開発を行った。

## (2) 開閉屋根

### (a) 屋根の構造概要

競技場の屋根は、直径 408 m の球体の一部を切出した球面状の 2 層構造で、上層は高透光性膜材を用いた半月状の屋根 2 枚で、鋼管による一辺 10 m の三角形格子で構成された可動屋根、下層は直径 600 mm の鋼管で構成された剣道の防具面のような立体アーチ架構と一辺 10 m の三角形格子鉄骨を組合わせた固定屋根で成り立っている。

屋根の開閉は、直径 274 m で最高高さ 53.8 m のドーム上の固定屋根中央部に設けた 130 m × 210 m の楕円の開口部上を、2 枚の半月状の可動屋根が移動するワイヤトラクション方式である(図-4 参照)。

### (b) 駆動装置(図-5 参照)

可動屋根は固定屋根に配置した 7 列のレールに

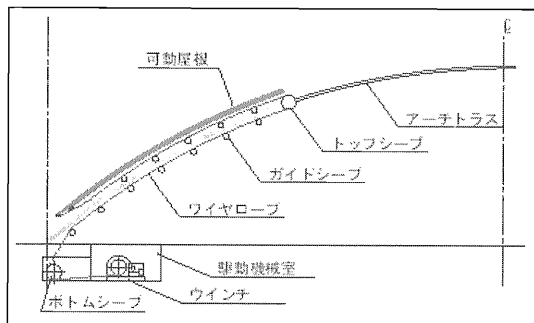


図-4 開閉駆動方式

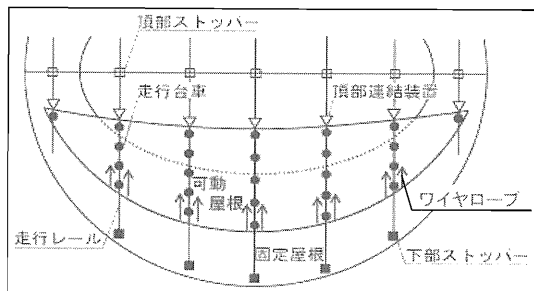


図-5 駆動装置の配置図

沿って移動し、その内の中央 5 列に駆動装置としてワイヤロープ、ウインチなどを配置している。ワイヤロープは 1 列に 2 本配置し、これを可動屋根の下端に固定し、1 台のウインチで巻取る。屋根の傾斜角が変化するため、開停止近傍でのワイヤロープ 2 本の張力の和は約 125 t となるが、閉停止近傍になると 50t 程度まで減少する。ワイヤロープの長期荷重に対する安全率は、諸法令、規格を考慮したうえで 5.5 以上としている。

駆動システムの耐震設計として、開閉中および閉停止時に地震が発生した場合、レール方向の振動に対してはワイヤロープの張力で抵抗させる。この時のロープの安全率はレベル 2 の地震時(震度 6 強程度)で 3.3 以上を確保している。

### ・開閉駆動仕様

開閉頻度：75 回/年

開閉モード：全開・全閉の 2 パターン

開閉屋根重量：1,300 t × 2 枚

開閉時間：25 分

開閉速度：3.2 m/min

走行路：7 列

駆動列：5 列

走行台車：25 台 × 2

ワイヤロープ：IWRC × 6 WS(41)B 種 75φ

ウインチ能力：(198 t × 3.2 m/min × 5 台)

× 2

電動機：(110 kW × 5 台) × 2

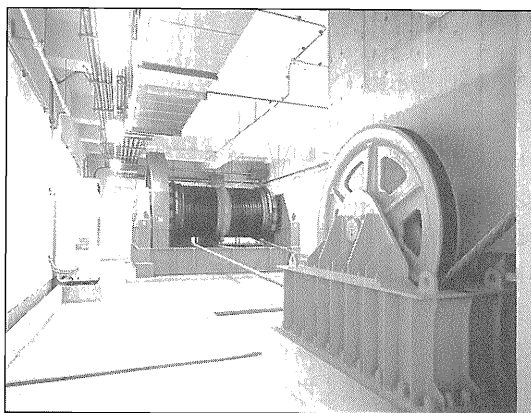


写真-7 ウインチ

### (c) 走行装置

走行装置はレール、走行台車、ばね機構、ダンパ、滑り支承で構成されている。レール直交方向

の支持部分には、可動屋根から発生する水平力を低減するためにばね機構と滑り支承を設置している。ばね機構は正負共有効な機構で、ばね定数は10 t/cm、5 t/cmである。また、ばね機構のみでは地震時の応答が過大になるので減衰機構として油圧ダンパを併用し安全性を高めている。

走行台車は台車フレーム、鉛直車輪、水平車輪、浮上がり防止ブラケット、ダブルヒンジで構成されている。ダブルヒンジは可動屋根の極小的な変形、レールの不整（水平、鉛直、スパン）に対して車輪に均等に荷重がかかるように考慮したものである。走行装置を図-6、写真-8に示す。

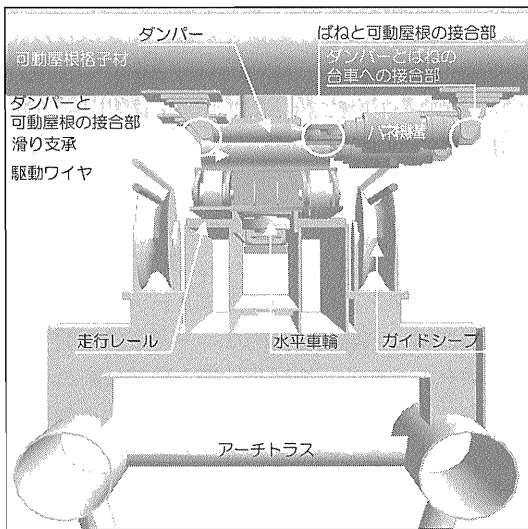


図-6 走行装置



写真-8 走行装置

ばね機構の水平低減効果を、レール直交方向の支持条件を固定した場合とばね支持とした場合の比較を示す。ばね機構を用いることによって全水平力は半分に、開閉に伴う水平力の変動量は30%

に減少しており、反力低減効果が大きいことが分かる（表-1、表-2参照）。

表-1 走行台車に作用する全水平力の比較 (t)

荷重状態		固定支持 (A)	ばね支持 (B)	比率 (B/A)
長期	開状態	570.2	295.4	0.518
	閉状態	616.0	303.3	0.492
温度差	開状態	866.0	396.2	0.458
	閉状態	574.6	250.2	0.435
レベル2	開状態	897.6	578.2	0.644
	閉状態	1313.7	546.8	0.416

表-2 開閉に伴う水平力変動の比較 (t)

荷重状態	固定支持 (A)	ばね支持 (B)	比率 (B/A)
長期	20.7	6.3	0.304

① ダンパとばね機構の地震力負担割合

解析モデルは鉄骨架構の立体振動モデルとし、可動屋根とアーチ架構の間にはばね要素と減衰要素を定義し、ダンパをパラメータとしてダンパとばね機構の負担割合を算出した（表-3参照）。この際、ダンパは全走行台車25台のうち端部の2列2台を除く23台に設置し、表中、負担力は各々のばね、ダンパの最大応答値を単純に累加した可動屋根1枚の総和として求めた数値である。開状態、閉状態ともダンパの負担割合はほぼ同じとなっており、建築計画上の配慮とダンパの減衰力、ばね反力とも30 t程度以下にするため、減衰係数50 t・sec/mを採用した。

表-3 地震力の負担割合 (可動屋根1枚当り)

減衰係数	状態	ダンパ	ばね機構
50.0 (t・sec/m)	開	181.3 (26.3%)	508.1 (73.7%)
	閉	143.3 (27.0%)	388.0 (73.0%)
100.0 (t・sec/m)	開	292.3 (42.4%)	397.4 (57.6%)
	閉	237.3 (41.7%)	332.1 (58.3%)

また台車1台の負担割合は、開状態では各台車が比較的均等に水平力を負担しているが、閉状態では主に外周端の台車が水平力を負担する。これらの解析結果に基づいて外周端の台車には減衰力大きい油圧ダンパ（減衰力30 t）を設置した。

(d) 固定装置

固定装置は頂部連結装置、頂部ストップ、下部ストップからなる。頂部連結装置は2枚の可動屋根を閉鎖端でピン結合させる装置で、レール7列に設置している（写真-9参照）。

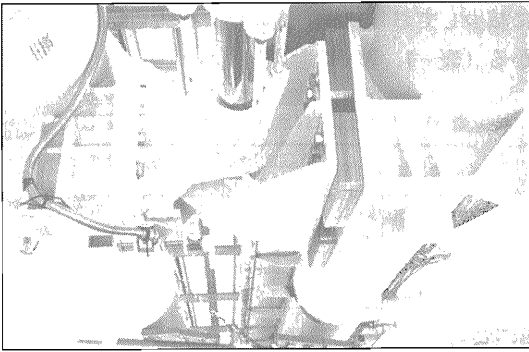


写真-9 頂部連結装置

頂部ストップはオーバーラン防止のためのフェールセーフ的役割を持つだけである。

下部ストップは可動屋根の開放位置での保持と、可動屋根と固定屋根との温度差による走行直交方向への動きを拘束しないよう滑り面を持った受台あり、駆動列の5列に設置している。

### (3) まとめ

世界初の球面上を昇降する開閉屋根に、採用した滑り支承、ばね機構などを設けた新しい減衰機構付き走行台車は、走行安定性の向上は勿論、下部構造に作用する力の半減を達成し、駆動装置、可動屋根、固定屋根の合理的設計を通して全体の経済設計に大きく貢献した(写真-10、写真-11

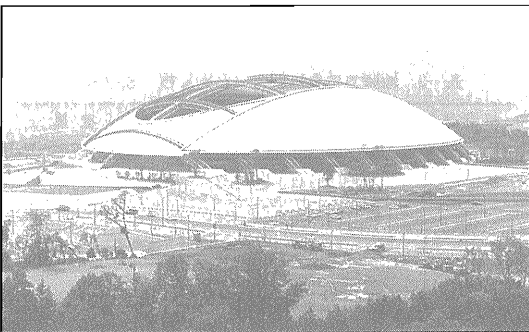


写真-10 ビッグアイ (開)

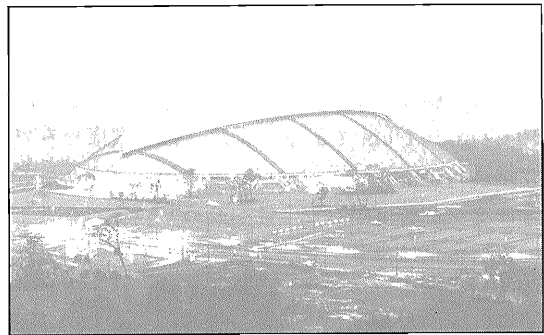


写真-11 ビッグアイ (閉)

参照)。

本開閉屋根を開発するに当たり、カヤバ工業、南星、東芝をはじめ、数多くの分野で多数の方々にご協力を頂き、ここに心から謝意を表します。

### 3. おわりに

空気圧利用の東京ドームを始め、開閉屋根の福岡ドーム、オーシャンドーム、天井可変の大阪ドーム、スタンド可動の埼玉アリーナなど、動く建築構造物の出現は社会的なニーズと技術開発の良き結合と言える。機械化技術と建築技術の更なる融合は、近未来、新しい動く建築構造の創造へと発展するものと期待される。

本論文が異分野の技術の融合に役立てれば幸いです。

#### 【筆者紹介】

油川 真広 (あぶらかわ まさひろ)  
株式会社竹中工務店  
マーケティング本部  
商品開発担当副部長

石川 善弘 (いしかわ よしひろ)  
株式会社竹中工務店  
ニューフロンティアエンジニアリング本部  
技術開発課長