

大阪・関西万博における膜構造

平郡 竜志*1

2025年日本国際博覧会（略称「大阪・関西万博」）は、日本で開催される6回目の万博である。2025年4/13～10/13まで、大阪市夢洲を会場に開催され、158か国・地域、7国際機関が参加した。[1]未来に向けての実験場となる万博には、著名な建築家も参加しており、特殊な素材や複雑な形状の案件が計画されるなど、様々なチャレンジが行われている。本稿では、日本で開催されてきた5回の国際博覧会における膜構造技術の紹介を行うとともに、大阪・関西万博で採用された膜構造のうち、太陽工業株式会社が施工した膜構造事例を幾つか報告する。

1. 過去の国際博覧会

これまで、日本では国際博覧会が5回開催されてきた。[2]1970年日本万国博覧会（大阪万博）、1975年沖縄国際海洋博覧会（海洋博）、1985年国際科学技術博覧会（科学万博）、1990年国際花と緑の博覧会（花博）、2005年日本国際博覧会（愛・地球博）である。とりわけ膜構造技術においては、期間限定の仮設建築物という特性を活かし、新規の構造技術や将来性のある材料の実用化検証を行い、その後の技術発展の礎となる知見を蓄積してきた。

本章では、日本で開催されてきた5回の国際博覧会における膜構造技術の展開を概観する。

1.1 日本万国博覧会（大阪万博）（1970年）

「人類の進歩と調和」をテーマに大阪府で開催された本博覧会は、会場面積約350haの規模であり、総合プロデューサーを建築家の丹下健三が務めた。会場内では多数の膜構造が採用され、その後の技術発展に大きな影響を与えた。

富士グループ館 空気膨張構造を採用した本施設は、幌馬車を想起させる外観となっており、最高高さは31.5mに達している。直径4m、長さ78m、質量約4tのチューブ状膜体16本を現地で組み立てし、空気圧により構造体として機能させている。膨らませるときの高圧力にも耐えられるよう、ビニロン織布にポリ塩化ビニールとゴム素材をコーティングした生地はコンベヤー用のベルト並みの厚さ4mmにもなっている（写真1）。[3,4,5]



写真1：富士グループ館



写真2：アメリカ館

アメリカ館 空気支持構造を採用した本施設は、当時世界最大規模のエアードームであった。長径142m、短径83.5mの楕円形平面に10,000㎡超の膜屋根が取り付けられている。柱の代わりに空気を圧縮材として利用することで、柱と影のない内部空間を実現し、外観はほのかに蛍光を発するデザインとなっている（写真2）。[4,5]

1.2 沖縄国際海洋博覧会（沖縄海洋博）（1975年）

「海 - その望ましい未来」をテーマに、沖縄本土復帰記念事業として開催された本博覧会は、会場面積約100ha（陸地75ha、海域25ha）の規模であり、総合プロデューサーは建築家の山下和正が務めた。

南ゲートシェルター サスペンション膜構造を採用した本施設は、来場者誘導のための灯台機能と待合スペースとしての屋根機能を併せ持つ構造物として建設された。

本施設は、形状解析および応力変形解析を有限要素法により実施した国内初の事例である。平面形状は正五角形を基本とした左右対称であり、頂部は本体外側に設置された主柱により吊り上げられる構造となっている。屋根膜材は濃いオレンジ色が採用され、沖縄の青い空や海とのコントラストが意図された。

仮設建築物ではあるが、設計荷重の低減は適用されず、当時の沖縄における風圧力 $q=90\sqrt{h}$ kgf/m²（当時基準、h：地盤面からの高さ(m)）、本土の1.5倍に相当する風荷重で設計された（写真3）。[3,4,6]



写真3：南ゲート

*1 太陽工業株式会社

1.3 国際科学技術博覧会（つくば博）（1985年）

「人間・居住・環境と科学技術」をテーマに茨城県で開催された本博覧会は、会場面積約102haの規模であり、総合プロデューサーを建築家の黒川紀章が務めた。

エキスポプラザ 屋根形状は中心角55度の扇形平面を持つHPシェル（双曲放物面）であり、弦方向にアーチ作用、半径方向に梁作用を発現する複層立体トラス曲面版として構成されている。構造体は三角錐を基本単位とし、1つの屋根ユニットは、支点間距離60.4m、54mの3点により支持されている。全体で5,600m²にもなる屋根は蝶が羽根を広げた姿を想起させる優美な曲面形態を実現している（写真4）。

サントリー館 カテナリー型張弦梁構造を連続配置することで曲面を構成する平面骨組タイプの構造システムが採用された。形状は丘陵を想起させる自然的な曲面として計画され、風速60m/sの風荷重に対しても構造安全性を確保する設計とされている。膜材は母屋材上に配置された約1,600箇所支持点で固定されており、外観に見られる規則的な点列がこれらの支持点位置を示している（写真5）。^[3,4,7,8]

いずれの施設も複雑な曲面形状に対する短期間での設計を可能にした要因として、当時の計算機技術の発展が挙げられる。形状決定および構造解析において、コンピュータによる数値計算が活用され、科学技術の進歩が構造設計の効率化に寄与した事例といえる。

1.4 国際花と緑の博覧会（花博）（1990年）

「自然と人間との共生」をテーマに大阪府で開催された本博覧会は、約140ha規模であり、総合プロデューサーは建築家の磯崎新が務め、「ソフトアーキテクチャー」という建築理念のもとで計画された。自然素材である木材が積極的に使用されるとともに、透光性や造形自由度といった特性を有する膜材も多数採用された。

中央ゲート 木の形状を抽象化したシルエットを書割状に配列し、その下部に膜屋根を組み合わせた構成となっている。



写真4：エキスポプラザ

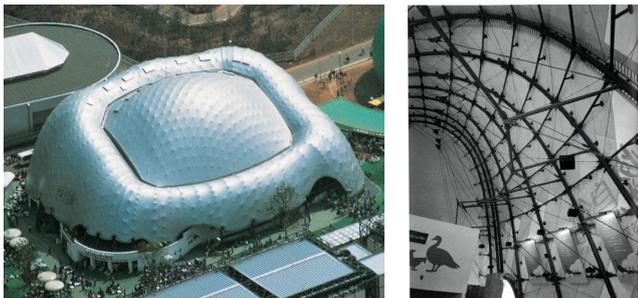


写真5：サントリー館

建築と自然環境との連続性を意図した形状を実現するために、サスペンション膜構造が採用されている。膜面をホルン形状に湾曲させることで軽快で流動的な外観を実現しつつ、ランドマーク性のある景観を創出している（写真6）。^[9]

三菱未来館 「大地から大空へと伸びる植物の芽」をモチーフとした施設。高さ39mあり、印刷によるメタリック塗装を施したPVC膜を採用し、意匠表現として、上昇感を表現する緑色のバーコード状パターンが水平ライン上に配置されている。フォルムの平滑性を強化するため余剰排気を利用した、空気圧の併用による工法が採用された（写真7）。^[3,10]



写真6：中央ゲート^[9]

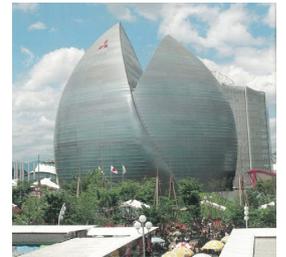


写真7：三菱未来館

1.5 2005年日本国際博覧会（愛・地球博）（2005年）

「自然の叡智」をテーマに愛知県で開催された本博覧会は、会場面積約175haの規模であり、環境負荷を最小限に抑える「環境万博」の具現化が目指された。総合プロデューサーを建築家の菊竹清訓が務めた。

グローバル・ループ 会場内の各エリアを結ぶ全長約2.6kmの空中デッキに設置された日除けシェルターでは、環境配慮の観点から、ケナフ繊維とポリエステル繊維を用いた混織布に非ハロゲン系樹脂をコーティングした新素材であるケナフ膜（ケナファイ）が採用された。シェルター形状は三角形を基本パターンとし、各頂点を金物で固定したシンプルな構成であるが、総パネル数は321枚に及んでいる。なお、使用されたケナフ膜は博覧会終了後、紙製品としてリサイクルされている（写真8）。^[11]

夢見る山 日本を代表する富士山の景観をモチーフとした施設。日中は太陽光に照らされる白色の大屋根が雪化粧を纏った富士山を想起させ、夜間には内部照明によるライトアップにより屋根全体が赤色に発光する演出が施されている。外周梁を立体トラス、中心のメインポールから外周に向けてケーブルを配置するサスペンション膜構造を採用している。さらに、外周梁をケーブルで支持することにより、鉄骨構造とした場合と比較して、資材使用量の大幅な削減を達成している（写真9）。^[11]



写真8：グローバルループ



写真9：夢見る山

2. 2025年日本国際博覧会（大阪・関西万博）

2.1 博覧会概要

本博覧会は、2025年4月13日から10月13日までの184日間にわたり、大阪湾の人工島「夢洲（ゆめしま）」にて開催された国際博覧会である。会場面積は約155haであり、「いのち輝く未来社会のデザイン」をテーマとして、158か国・地域、7国際機関が参加した。主催者は公益社団法人2025年日本国際博覧会協会であり、会場デザインプロデューサーを建築家の藤本壮介が務めた。

会場全体は、外周の直径が約675m、内径が約615m、全長2kmに及ぶ木造の大屋根が円環状に配置された「大屋根リング」と、その内外に配置される多数のパビリオンから構成された（写真10）。[12]

2.2 パビリオンタイプ

大阪・関西万博において、博覧会協会が公式文書（出展参加要領、海外パビリオン出展ガイド等）で定めた建設タイプは、以下の4類型である。これらは、準備期間に限られる中で多数の国・地域の参加を確保するため、参加国や参加企業の設計・施工能力の差やスケジュール調整の難しさを踏まえ、主催者側が建設の一部を担うことで、全体工程とリスクを管理できる仕組みとして導入された。膜構造の多くはタイプAで設計された。[1]

タイプA（敷地渡し型） 主催者は敷地のみを提供。出展者が建築設計・構造設計・施工・展示までを一貫して実施する方式であり、建設方法の自由度が最も高く、各国の建築技術の特徴が最も顕在化する類型であった。

タイプB（建物条件付き型） 主催者が構造・設備などの基本条件を定めた建築物を建設し、出展者はその条件下で外装・一部構成・展示を設計した。

タイプC（共同館型） 主催者が一つの建築物を建設し、複数の国・地域が共同利用した。出展者は割り当てられた内部区画のみを使用した。

タイプX（建物渡し型） 主催者が標準建築物を建設し、出展者は内装・展示のみを実施した。

2.3 建築基準法および大阪・関西万博における構造関係規定

建築物の構造耐力に関する基本原則を定めた条文として、建築基準法第20条があり、仮設建築物に関する条文は第85条がある。同法施行令第147条に基づく緩和措置により、第三章第8節の構造計算に関する規定が緩和され、確認申請において構造計算関連の書類提出が不要となる。ただし建築確認申請とは別に、特定行政庁に対して仮設許可を受ける必要があるため、設計者と建築主事が協議を行い、恒久建築物の設計ルートに準じた設計とするか、または仮設建築物としての合理化（設計荷重の低減など）を適用するかを判断する。

なお、設計荷重の低減を行う場合は、設定した荷重を超える過荷重に対する事前予防措置を示す必要がある。具体的な予防措置としては、暴風時における臨時ブレースの設置、または安全確保を目的とした部分的な入場制限や施設閉鎖などが挙げられる。

今回の大阪・関西万博では、博覧会協会から仮設建築物に対する統一的な設計荷重は提示されなかった。そのため、多くの案件において恒久建築物と同等の設計条件を前提とした構造設計が行われた。一方で、構造規模、使用期間、用途等を総合的に勘案し、審査機関および行政との協議を経て、限定的な設計荷重の低減が認められた事例もある。一般財団法人日本建築総合試験所は独自に「2025大阪・関西万博期限付き建築物の設計荷重について（改訂）」を提示し、大阪地域における2年間の限定使用を前提とした合理的な設計荷重を提案していた。[13,14] このように各案件で設計条件および審査内容が個別に設定される運用となっていた。

なお、膜構造関係規定の告示666号にも膜材料の構成や変形制限などについての仮設緩和措置が謳われている。2024年6月に告示第666号が改正され、膜面の投影面積制限、変形制限、ならびに接合部の引張強度に関する規定の合理化が行われた。しかし、博覧会案件の設計時期は主として2021～2023年に集中していたため、多くの案件は改正前の告示内容に基づいて設計されている。

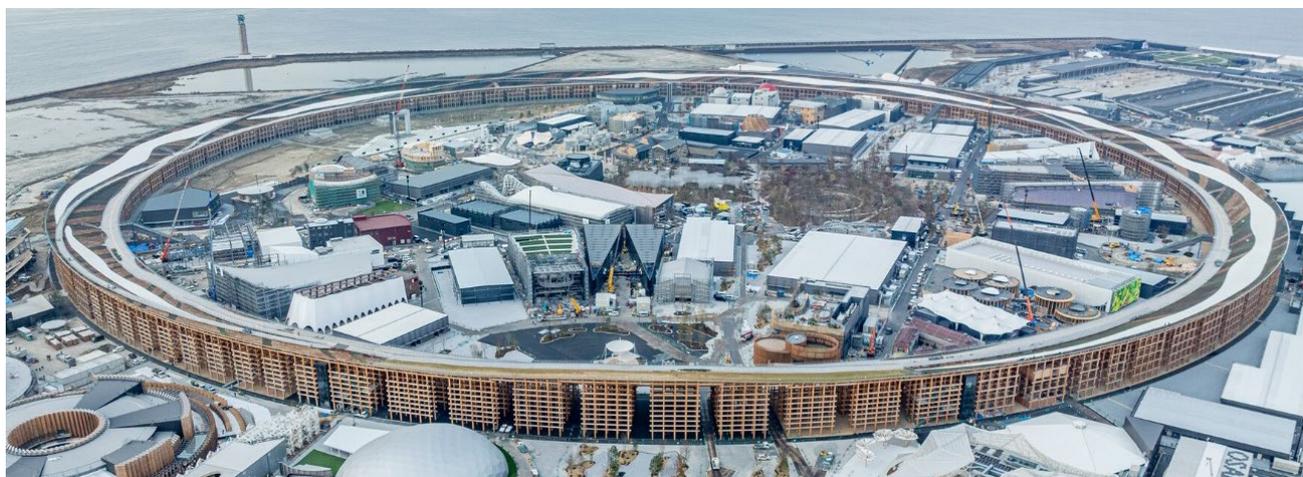


写真10 大阪・関西万博会場全景（引用元：<https://www.obayashi.co.jp/expo2025/>）

3. 2025年大阪・関西万博における膜構造

今回の万博会場において建設された膜構造のうち、当社(太陽工業)が担当した主な案件を表1、図1にまとめる。

膜材料については、耐用年数と使用期間を考慮しB種およびC種膜が多く採用された。これらはPVC(ポリ塩化ビニール)をコーティング材としているため、配合調整により透光率の制御が可能である。各案件において、展示内容や空間演出の要求に応じた透光率の調整、表裏で異なる色による意匠表現など、膜材料の特性を活かした設計が行われた。[15,16]

本博覧会では、従来膜材の適用に加え、新規開発された膜材料も採用された。これは近年、材料試験や劣化予測手法の技術が発展し、材料性能の定量的評価が可能となったことで、使用期間に応じた性能設定および、材料開発が可能となったことが背景にあると考えられる。[17,18]

3.1 骨組膜構造、立体トラスの活用

骨組膜構造は、骨組自体が主要な耐力要素となるため、力の流れが明確であり、構造的に安定した架構を形成しやすい特徴を持つ。膜面形状の自由度は制限されるものの、鉄骨構造などの延長線上で計画できるため、設計者にとっても応力伝達の把握や構造計算の枠組みが比較的明快である。このような背景から、設計および審査期間が限られていた今回の万博においては、骨組膜構造が多く採用されたと考えられる。また、会期終了後の原状回復を前提とする仮設建築物では、基礎の設置自体が計画上の制約となる。今回は会場が沿岸部、海上・埋立地に位置することから、地盤条件や施工条件に制約があり、重量の大きい上部構造や大規模な直接基礎・杭基礎の採用は合理的ではない。一方で、内部展示のスペースを

確保するために、支持点を減らしつつ大スパンを確保する必要があることから、構造重量の低減と高い剛性の確保を同時に満たす構造形式が求められた。これらの合理的な解として、木質構造や立体トラスを主要構造部とし、膜構造を母屋材に準じた二次部材の要素として扱う構成が採用されている事例が見られる(写真11、写真12)。[18,19]



写真11(a)：大屋根リング外観



写真11(b)：大屋根リング内観

表1 大阪・関西万博2025における膜構造(太陽工業実績)

※ ■ は日本初採用、■ は開発素材

	B種膜：不燃材料 (PVCコーテッドガラス繊維布)	C種膜：防災材料 (PVCコーテッドポリエステル繊維布)	ETFE膜：防災材料 (フィルム材を含む)
骨組膜構造	①大屋根リング ②いのちの未来 ⑦関西パビリオン ⑪飯田グループ ×大阪公立大学共同出展館 ⑨電力館 可能性のタマゴたち ⑩ガスパビリオンおぼけワンダーランド (SCM-300G) ⑬フューチャーライフヴィレッジ	⑮カタールパビリオン ②いのちの未来 (i-Mesh) ⑪飯田グループ ×大阪公立大学共同出展館 (西陣織膜) ⑯ポップアップステージ(東内) ⑰ポップアップステージ(東外)	④null2 (ミラー膜) ⑳万博サウナ (太陽のつぼみ)
サスペンション 膜構造	⑤いのちの動的平衡館	⑳fukufuku休憩所1	
空気膜構造		⑲レスポンスストラクチャー トイレ3	
システムトラス + 骨組膜構造	③いのちの遊び場クラゲ館 ⑫BLUE OCEAN DOME (U-CLEAR SHEET TG1500) ⑭PASONA NATUREVERSE ⑬よしもとwaraii myraii館 ⑥未来の都市	⑥未来の都市 (Purify Mesh 30)	⑧大阪ヘルスケア パビリオン Nest for Reborn



大屋根リングやカタル館では、膜材料の光を通す性質を活かし、外の様子を人が目で感じ取れる空間としている。日差しを通して雲の流れや木々の揺れが膜面に映り、その変化を来場者が直接見ることができる。こうした視覚的な体験は、膜構造ならではの特徴である。

大阪ヘルスケアパビリオンでは、ETFE膜を採用し、その高い透明性を活かした設計が行われた。膜面に水を流すことで、水の動きや光の反射が視覚的な演出となり、屋間はやわらかな光の変化を生み、夜間は屋根全体が発光して浮かび上がる構成となっている。全体形状や部材配置については、意匠設計者と繰り返し協議を行い、見た目の軽快さと構造的な合理性を両立させている。また、構造の軽量化を目的として、膜面の中間定着部にはケーブルを用いた支持方式を採用し、全体重量の低減と視覚的な透明感の向上を実現している。



写真 12(a) : 大阪ヘルスケア PV、TM トラス施工時



写真 12(b) : 大阪ヘルスケア PV、ETFE 膜施工時



写真 12(c) : 大阪ヘルスケア PV、夜景

3.2 サスペンション膜構造

サスペンション膜構造は、膜やケーブルに大きな引張力が生じ、その反力として支持点に大きな引抜き力が作用する。さらに、本構造は形状と張力のバランスによって成立するため、膜張力やケーブル張力の設定には設計・施工の双方で技術的な工夫と慎重な現場管理が求められる。

いのち動的平衡館では、有機的かつ非対称な屋根形状をケーブルネットで支持し、その上部を 1 枚の膜材で覆う構成となっている (図 2)。外周リング梁は 8 本の柱および基礎梁によって支持され、ケーブル張力を自碇形式でバランスさせている。外周リング梁は比較的柔な境界条件として扱われており、自重及びケーブル張力導入時に変形を伴うことを前提として設計されている。短期荷重時にケーブル張力の消失がないことを設計上の指標とし、変形を見込んだ部材製作長さや調整代が設定されている。[20]

リッジケーブルには、施工完了時に最大約 40tf の張力が導入されている。ケーブルネットおよび格子ケーブルとの形状整合を確保するため、ジャッキダウン解析、ケーブル緊張手順およびフレーム変形履歴が事前に検証された。実際の施工現場ではリアルタイムでケーブル張力を計測し、設計値との偏差を随時調整している。本施設は、軟弱地盤という制約の中で、構造合理性と意匠性を高度に両立させた事例である (写真 13)。

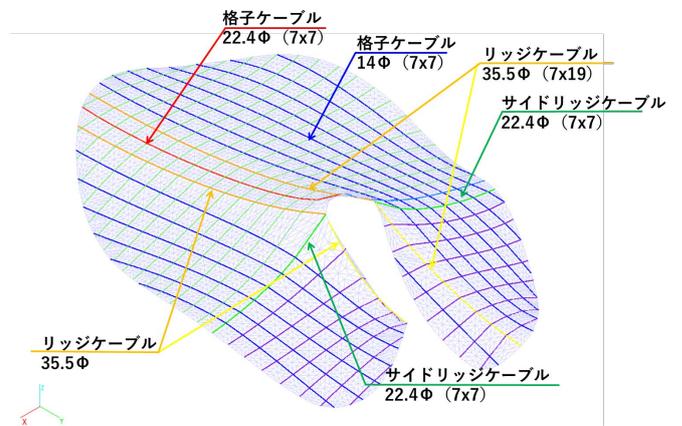


図 2 いのち動的平衡館 ケーブルネット配置



写真 13 : いのち動的平衡館 膜施工時

3.3 空気膜構造

空気膜構造に分類される施設は、レスポンスストラクチャー（トイレ3）の1件のみであった（写真14）。膜材単体での断熱性能や蓄熱性能は十分とは言えず、閉鎖空間に適用する場合には温熱環境の制御が課題となることが多い。本施設で空気膜構造が採用された背景には、この弱点を克服しつつ、膜構造の特性を積極的に活用しようとする設計的思想がある。

屋根に空気膨張方式を採用し、屋根上に水を一時的に滞留させる機構を組み込むことで、温熱環境の調整を図っている。気温が高い日には水を保持して日射取得を抑制し、膜内部の温度上昇を低減する。この効果は膜屋根下の空間温度低減にも影響する。その後、内圧を高めて水を排出する仕組みとすることで、空気圧と水荷重のバランスを利用した能動的な環境制御を実現している。[17]

一般的に建築物の外皮は固定されているため、光や熱といった外部環境の変化に対して受動的である。一方、本施設では膜材が内圧変化により膨張・収縮し、さらには表面に水を保持するなど、外部環境に応答する挙動を行う。温熱性能に不利とされがちな膜構造に対し、構造形式そのものを制御装置として活用することで性能改善を試みた点に意義があると考えられる。

このような環境応答型の建築は、1970年の大阪万博で様々な実験がなされた空気膜構造の実験的試みを継承しつつ、制御技術の進展によって再構成されたものと位置付けられる。

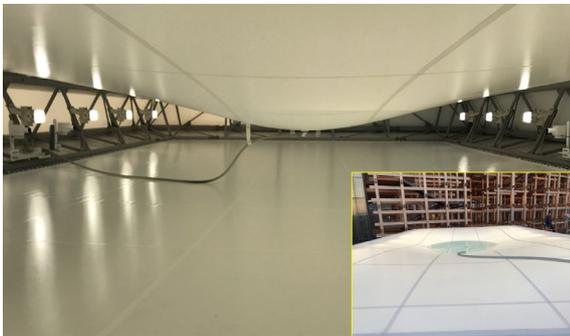


写真14(a)：トイレ3 空気膜内部（ポンドイング状態）

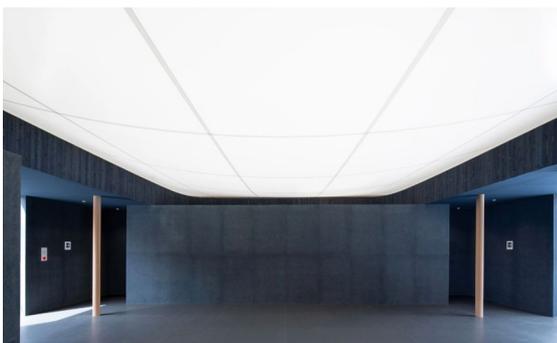


写真14(b)：トイレ3 膜屋根下の空間

3.4 特殊な膜面形状

膜面形状は、膜面内に生じる張力と境界条件との力学的つり合いによって決定される。膜構造の初期形状を設定する際には、膜面全体に均一な張力が作用する等張力状態を基準とすることが一般的である。この力学条件に対応する理論形状は、与えられた境界条件のもとで表面積が極小となる曲面であり、数学的には極小曲面と定義される。すなわち、等張力状態のもとで得られる形状と極小曲面には対応関係がある。実務においては、この対応関係を利用して数値解析により初期曲面を求める。ただし、極小曲面は任意の境界条件下で常に存在するとは限らず、解が得られない場合もある（図3）。

「null²」では、ホルン形状に対して膜面を等張力と仮定する条件では意図した形状の連続性を実現できないという課題に直面した。そこで、放射方向と円周方向で異なる張力比（非等張力）を設定し、膜面内の張力分布を制御している。このような条件では極小曲面を求める数値解析が適用できないため、形状導出には応力密度法（Force Density Method）を採用した。この手法は、各要素の応力密度を既知量として与え、節点の力の釣り合い式を線形化して解くことで、非等張力状態に対応した膜面形状を導出する解析手法である。

一方で、物理的にはシワが発生し得る条件となることや、縮小率の設定、製作誤差や施工誤差、現場における施工手順を踏まえたディテールの検討など、数値解析のみでは評価できない課題もあった。そのため、実物大モックアップによる検証を繰り返し実施し、設計から製作・施工に至るまで、各段階でデジタル技術と実物による検証を併用することで、最終的に特異な膜面形状を実現した（写真15）。[19]

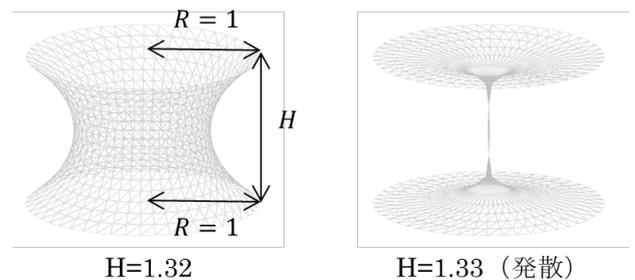


図3：等張力曲面の成立条件（臨界高さの比較）



写真15：モックアップでの形状検証

3.5 新規開発の膜材料、日本初採用の膜材料

飯田グループ×大阪公立大学共同出展館では、京都で1200年以上の伝統を誇る織物「西陣織」を全面に用いる挑戦が行われた。太陽工業はこの西陣織を外装材として使用するための技術開発に初めて取り組み「西陣織膜」を実現した。これまでも、プリント加工により表面に絵柄を表現した事例はあったが、今回は色付きの糸そのものを織り込み、織りの構成によって絵柄を表現している点が本質的に異なる(図4a)。

設計にあたっては、プロジェクションマッピングの技術を応用し、2次元の柄を3次元モデル上に投影して検証を行った。曲面上で生じる柄の歪みを事前に解析し、その結果を反映した平面展開図を作成して西陣織を織り、コーティング加工を行っている。このプロセスを経ることで、施工後に意図した柄が立体形状上で正確に再現されている。[18,19]

ガスバリアオンおぼけワンダーランドでは、「SCM-300G」が採用された。こちらは、SPACECOOL INC.と材料メーカーが共同開発した環境配慮型の膜材料である。放射冷却の原理を応用しており、太陽光のうち可視光や近赤外域を高い反射率で反射すると同時に、吸収した熱を大気窓領域を通じて宇宙空間へ放射する。これにより、表面温度の上昇を抑制することが可能となっている。結果として、屋根面からの熱吸収し、室内温度の上昇を抑えることで空調負荷を低減することができる。エネルギー消費の削減に寄与するだけでなく、建築分野における脱炭素化に向けた新たな材料的アプローチとして位置付けられる(図4b)。[19]

null²に使用された「ミラー膜」も注目の素材である。金属のような高い反射性と滑らかな質感を持ちながら、柔軟な曲面形成が可能なフィルム材であり、反射率98%という数値を実現している。外装材としては、暴風時に生じる荷重に対して安定した面外剛性を確保する必要がある。一方で、本案件ではロボットアームにより膜面を可動させ、映り込みを意図的に歪ませるといった演出的要素も求められた。そのため、外力に対しては過度に変形しない剛性でありながらも、制御さ

れた変位には追従できる柔軟性を有する材料特性が必要となった。これら相反する要求に対し、基材構成、厚さの設定を検証し、適切な剛性と伸び率のバランスを調整している。[19]

また、長期的な性能低下を抑制するため、紫外線による劣化を防ぐ保護層や材料選定も行われている。さらに、高い反射率から高い遮熱性能を備えていることが分かり、一般建築への応用も期待される(図4c)。

Blue Ocean Dome では屋根の一部に「U-CLEAR SHEET TG1500」が採用された。通常、不燃性能を満たすためには、融点の高い繊維を基材とする必要があるが、それにより可視光の透過性が損なわれ、透明性の確保が困難とされてきた。この膜材料は、繊維構成および表面コーティング技術の工夫により、不燃性と透明性の両立を実現している新たな素材である(図4d)。

「i-mesh」や「Purify Mesh30」といった国内での認定を取得していない海外製のメッシュ状の生地もある。これまで恒久建築における使用実績はなかったが、用途を外装材として位置づけることで適用を可能とした。設計においては、材料の透過性、重なり、環境応答を組み合わせることで、軽量かつ視覚的効果を有するファサードを構成している。

未来の都市では、膜材を多層配置することで生じるモアレ現象を活用し、視覚的な奥行きと揺らぎを生み出す外装表現を行っている。また、いのちの未来では、表面に水を流すことで、静的な外皮に時間経過や建物の表情に動きを感じさせる表現を行っている。(図4e,f)。[16,19,21]

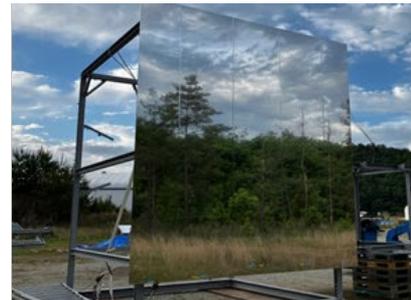
これらの新規開発の膜材料はいずれも、使用期間が限定された条件を前提に設計されたものである。そのため、長期耐候性や維持管理といった観点については、今後あらためて検証と改良を重ねていく必要がある。一方で、短期利用を前提とした実装とはいえ、材料構成や機能付与は従来の膜材料の延長ではなく、新たな性能軸を提示している。これらの取り組みは、次世代の膜材料開発に向けた実験とも位置づけられ、今後の技術進化の指標の一つになると考えられる。



図 4(a) : 西陣織膜



(b) : SCM-300G スペースクール



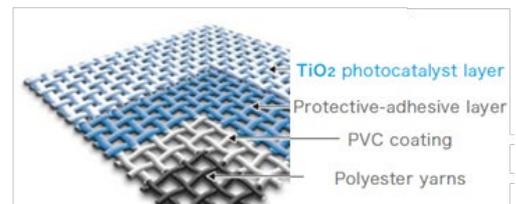
(c) : ミラー膜



図 4(d) : U-CLEAR SHEET TG1500



(e) : i-mesh



(f) : Purify Mesh 30

3.6 BIMとコンピューショナルデザイン

近年、BIMやコンピューショナルデザインの高度化、さらにデジタルファブリケーションとの統合により、建築の設計手法は大きく変化している。[22,23]

従来は形状決定、構造解析、図面作成が段階的に進められていたが、現在では3次元モデル上で幾何情報、構造性能、製作情報を統合し、形状や荷重条件に加えて加工性・施工性までを設計初期段階から同時に検証できる環境が整備されている。これにより、意匠的に複雑な曲面形状であっても、実現可能性を高い精度で評価しながら設計解を探索することが可能となっている。

さらに、切板加工データ等と連携することで、設計モデルを製作情報へ直接接続でき、部材精度の向上、加工ロスの低減などが実現されている。本博覧会のように設計・施工期間が限られ、多様な形態が求められるプロジェクトにおいては、この統合的デジタルプロセスが有効に機能したと考えられる。複雑な膜面形状や鉄骨架構、立体トラス架構を短期間で実現できた背景には、形状生成、構造解析、施工シミュレーションを横断的に接続するデータ連携基盤の存在があった。

膜構造とデジタル技術の親和性は高い。今日の計算環境と統合的データ基盤は、生産性を高めるだけでなく、従来手法では到達が困難であった設計解を導ける可能性がある。設計・製作・施工を横断的に結びつけることで、その可能性は今後さらに拡大していくと考えられる。

現代の計算技術があれば、富士グループパビリオンの応力状態やインフレーション挙動を詳細に検証することも可能である(図5)。しかし、電卓さえ普及していなかった1970年においても、同パビリオンは設計・施工されている。つまり、建築の実現や挑戦的試みにおいて、デジタル技術は強力な手段ではあるが、必須条件ではない。本質は技術者の創意工夫と挑戦にある。だからこそ、現代の技術者は現在のデジタル技術を前提としたとき、この建築をどのように設計するのか。技術の本質はどこにあるのかをよく考える必要がある。ツールとしてのデジタル技術と人間の構想力の双方が相補的に機能することで、膜構造は今後一層高度な展開を示すことが期待される。[24]

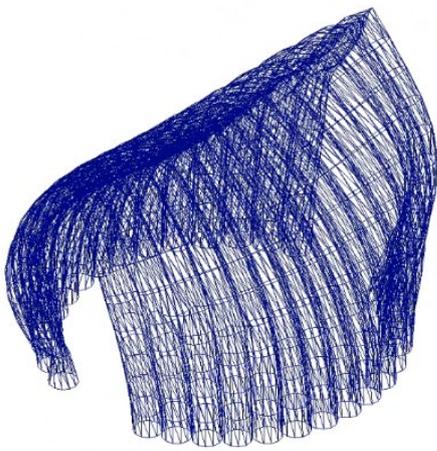


図5：富士グループパビリオンの再現モデル

4. まとめ

1970年の大阪万博当時、日本には耐久性や防災性能の低いPVC膜しか存在せず、膜構造は主に仮設的な用途に限られていた。しかし、万博を契機として膜構造に関するさまざまな技術開発が行われ、その成果は後の恒久建築へとつながっていった。1990年前後には、PTFE膜が実用化され、東京ドームのような大規模な恒久施設に採用されるなど、膜構造の社会的認知と信頼性が大きく向上した。その後、約20年を経て、より高い透過性を有するETFE膜の採用が可能となり、膜構造建築はさらに多様な展開を見せるようになった。

2025年大阪・関西万博では、既存技術の組み合わせに加え、特殊な表面処理を施した新素材の開発が進められた。さらにはBIMなどのデジタル設計手法の導入など、最新技術の活用は、膜構造の設計と施工に新たな可能性に繋がると考えられる。

膜材単体では一部の性能に制約もあるが、複層化、空気圧の活用、他材料とのハイブリッド化などの工夫を行い、これらの性能を補完・向上することが可能である。さらに今後は、循環型社会への対応を前提とした技術開発が重要となる。[25]軽量さは製造時の材料使用量削減や運搬時のエネルギー低減といった利点を有しており、環境負荷低減の観点からも有効である。軽さや薄さという特性は制約であると同時に可能性でもある。

万博という実験的な舞台を経て、膜構造は時代に求められるように姿を変えながら進化を続けてきた。今後も、まだ見ぬ膜構造の魅力を探っていききたい。

5. 謝辞

本報告の作成にあたり、資料提供ならびに技術的知見の共有にご協力いただいた太陽工業株式会社の池本氏、柳谷氏、古谷氏、斎藤氏、鈴木氏、喜多村氏、川上氏に厚く御礼申し上げます。

また、膜材料および膜構造技術の発展に長年尽力されてきた諸先輩方の研究成果と実践の蓄積が、本稿の基盤となっていることを付記する。

本報告の対象となった2025年大阪・関西万博は、多くの来場者を迎え、盛況のうちに会期を終えた。本万博の成功に向けて尽力された主催者、設計者、施工者、製作者、研究者ならびに関係各位に対し、ここに深く謝意を表す。

本稿は、IASS 2025に投稿した英文論文を原稿とし、その内容を日本語に翻訳のうえ一部再編集したものである。[26,27]

参考文献

- [1] EXPO 2025 大阪・関西万博公式 Web サイト
<https://www.expo2025.or.jp/>
- [2] 外務省 HP,日本における国際博覧会
<https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/hakurankai/banpakunihon.html>
- [3] 日本の膜構造・作品選集, 石井一夫: 編著,SPS 出版, 1993
- [4] Membrane Structures in Japan,Ishi Kazuo, SPS 出版,1995
- [5] 世界の膜構造デザイン,新建築社,1999
- [6] 沖縄国際海洋博覧会,公式報告集,新技術編,財団法人 沖縄国際博覧会協会,1976
- [7] EXPO'85 ARCHITECTURE [科学万博つくば85]建築の記録,社団法人日本建築学会,株式会社新建築社,1985
- [8] 梅澤宣雄,浅利徳雄: EXPO'85 サントリイ館鉄骨工事,川田技法,pp.88~91, Vol.5,1986.1,
- [9] 坂倉建築研究所
<https://www.sakakura.co.jp>
- [10] 国際花と緑の博覧会 90,太陽工業株式会社,1990
- [11] ホームページ | EXPO 2005 AICHI,JAPAN
<http://www.expo2005.or.jp/jp/C0/C3/C3.3/C3.3.1/index.html>
- [12] 大阪・関西万博の最新動向: 経済産業省,内閣官房,2025.3
https://www.meti.go.jp/policy/exhibition/top_picture/sais hinnodoukou03.pdf
- [13] (一般財団法人) 日本建築総合試験所 (GBRC) : 2025 大阪・関西万博 期限付き建築物の設計荷重について (改訂) ,2022.9.30
https://www.gbrc.or.jp/assets/documents/center/kozo_osaka_2025.pdf
- [14] 野村、大田ら: パビリオンの構造審査,日本建築学会近畿支部 2024 年度鉄骨構造部会第 2 回研究会資料集・構造力学講究第 73 号,2025 年 3 月
- [15] 関西大改造 2030 万博を機に変わる大阪・京都・兵庫,日経クロステック、日経アーキテクチャ 編,日経 BP,2024
- [16] 大阪関西万博建築的観光ガイド, 日経クロステック、日経アーキテクチャ 編,日経 BP,2025.4
- [17] 齊藤ら: 膜構造で変わる日本の建築—万博と告示改正: 日本建築学会大会 (九州) 構造部門 (シェル・空間構造) パネルディスカッション,2025.9
- [18] 鉄構技術編集部,第 38 巻,通巻 448 号,鋼構造出版,鉄構技術 2025.8 月号
- [19] 鉄構技術編集部,第 39 巻,通巻 449 号,鋼構造出版,鉄構技術 2025.9 月号
- [20] 金子ら: 複雑曲面を形成する特殊ケーブルネットの設計と施工~2025 年日本国際博覧会『いのち動的平衡館』の構造計画~その 1、2、3,日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州) ,pp.937~942, 2025.9

- [21] 菅原ら: いのちの未来,大阪関西万博 シグネチャーパビリオン: 日本建築学会大会建築デザイン発表梗概集 (九州) ,pp.118~119, 2025.9
- [22] 建築雑誌 2025 年 11 月号特集: デジタルが拓く建築のかたち - コンピュータショナルデザインの現在地と可能性 -
- [23] 「EXPO 2025 大阪・関西万博」を振り返る, JSCA_structre No.177 号,2026.1
- [24] JA113 号, 2019 年春号,新建築社, reprint edition Expo '70
- [25] 木村ら: 建築構造部材のリユースの実情を見る: 日本建築学会大会 (九州) 構造部門 (仮設構造) パネルディスカッション,2025.9
- [26] Tatsushi Heguri, “Spatial structures (especially membrane structures) at the 2025 Japan World Exposition (Osaka-Kansai expo) “,Mexico, IASS2025,no.413
- [27] Kanako Ikemoto, Tatsushi Heguri, Ryota Yanagiya and Shin Takamatsu, “The Ideas and Processes of Membrane Structure Utilizing “Nishijin Textile” as an Exterior Material”, Mexico, IASS2025,no.427
- [28] 新建築,2025 年大阪・関西万博,新建築社,2025 年 12 月
- [29] 万博サウナ「太陽のつぼみ」最新情報を公開 | 太陽工業株式会社
<https://www.taiyokogyo.co.jp/news/66300/>

プロジェクトデータ (新建築 2025. 12 より) [28]

大屋根リング

会場デザインプロデューサー 藤本壮介

基本設計 東畑・梓設計共同企業体

実施設計・管理 大林組大阪本店一級建築士事務所 (大屋根リング全体統括管理、PW 北東工区)、清水建設 (PW 南東工区)、竹中工務店 (PW 西工区)

施工 大林組・大鉄工業・TSUCHIYA 共同企業体 (会場全体統括管理、PW 北東工区)

清水建設・東急建設・村本建設・青木あすなろ建設共同企業体 (PW 南東工区)

竹中工務店・南海辰村建設・竹中土木共同企業体 (PW 西工区)

いのちの未来

プロデューサー 石黒浩

設計 石本建築事務所

施工 長谷工コーポレーション

いのちの遊び場クラゲ館

プロデューサー 中島さち子

設計 建築: 小堀哲夫建築設計事務所 (基本計画・基本設計) + 大和ハウス工業 (基本設計) フジタ (実施設計) 総企画設計

構造: Arup、フジタ

施工: フジタ+フジタ・デザインアーク特定建設共同企業体

いのち動的平衡館
プロデューサー 福岡伸一
設計 建築 NHA Naoki Hashimoto Architects
構造 Arup
施工 鹿島建設

null²
プロデューサー 落合陽一
設計 NOIZ
構造 Arup
施工 フジタ・大和リース特定建設工事共同企業体

ブルーオーシャン・ドーム
建主 ZERI JAPAN
設計 建築・管理 坂茂建築設計
構造 Arup
施工 大和ハウス工業

大阪ヘルスケアパビリオン Nest for Reborn
設計 建築：東畑建築事務所
施工 竹中工務店

ガスパビリオンおぼけワンダーランド
発注者 一般社団法人日本ガス協会（JGA）
設計 日本設計、奥村組
施工 奥村組

よしもと waraii myraii 館
建主 吉本興業ホールディングス
設計 設計・管理 大成建設一級建築士事務所、TSP 太陽一級建築士事務所
施工 大成建設関西支店

飯田グループホールディングス×大阪公立大学共同出展館
設計 高松伸建築設計事務所、清水建設
施工 清水建設

電力館 可能性のタマゴたち
設計 電通ライブ、日建設計、大和ハウス工業
施工 大和ハウス工業

関西パビリオン
設計・施工 太陽工業

PASONA NATUREVERSE
設計 the design labo、前田建設工業
施工 前田建設工業

Ring Pavillion 2025 ポップコーンステージ東外
設計 建築 萬代基介建築設計事務所
構造 佐藤淳構造設計事務所
施工 建築：岡部

雲の屋根ポップアップステージ東内
設計 建築 KIRI ARCHITECTS
構造 DN-Archi
施工 長村組

レスポンシブ・ストラクチャー トイレ3
設計 建築 new building office
構造 EQSD
施工 日本土木建設

fuku fuku 休憩所 1
設計 建築：大西麻貴＋百田有希/o+h
構造：平岩構造計画
施工：住建トレーディング・加藤建設工事共同企業体

フューチャーライフヴィレッジ
設計 建築・管理 KOMPAS
構造 Graph Studio
施工 三田工務店
カタール館
建物デザイン 隈研吾建築都市設計事務所
設計・施工 前田建設工業株式会社

未来の都市
基本設計 電通、電通ライブ、太陽工業、SD ASSOCIATES
実施設計 SD ASSOCIATES
施工 太陽工業

万博サウナ「太陽のつぼみ」[29]
設計：KOMPAS、TSP 太陽株式会社、太陽工業株式会社
施工：TSP 太陽株式会社、太陽工業株式会社

会場全体写真

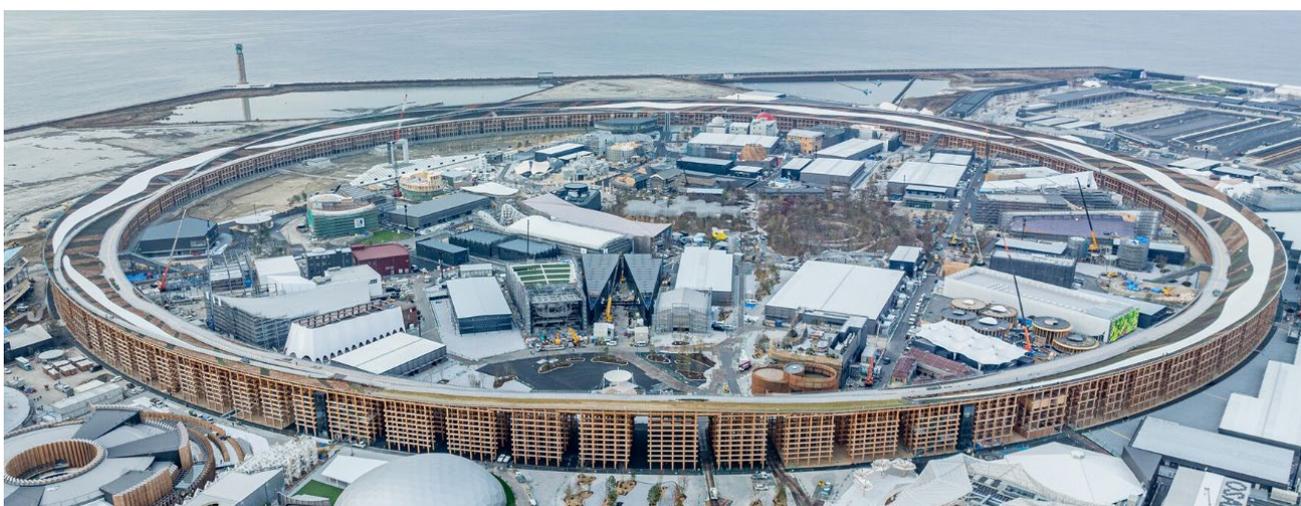
(引用元：<https://www.obayashi.co.jp/expo2025/>)



2023年5月



2023年12月



2025年2月