

いのち動的平衡館の構造設計

The Structural Design of the Dynamic Equilibrium of Life Pavilion

金子 寛明*1、大平 直子*2、花岡 光*3

1. はじめに

2025年日本国際博覧会（略称：大阪・関西万博）が2025年4月より「いのち輝く未来社会のデザイン」をテーマに開催されている。各プロデューサーが「いのち輝くとはどういうことなのか？」を深掘りし表現したシグネチャーパビリオンのひとつが生物学者の福岡伸一氏がプロデュースする『いのち動的平衡館』である。自由な3次元曲線のリング状の鉄骨が膜屋根を支えるサスペンション膜構造が特徴的な建築物（仮設）である。

2. 設計コンセプト

生命が「動的平衡」を保ちながら移ろいゆく流れの中

で、ひととき自律的な秩序を表す姿を体現し、通常の建築物とは異なり常に変化（変形）することを前提とした「うつろう建築」を実現している。

ジェットコースターのように隆起する地上リングと格子状に張られたケーブルの上に膜を掛けたふわりと浮かんだ大きな屋根が特徴的で、基礎フレーム・地上リング・ケーブルの3つの要素が調和的に作用し、25m超の無柱の大空間を構築した絶妙な平衡状態を保つ非常に難易度の高いサスペンション膜構造である。一般的なケーブル・ネット構造とは異なり、ケーブルに張力が加えられると比較的柔な鉄骨屋根リングが変形し、ケーブルの張力と鉄骨の変形が密接に関係し、外力と釣り合うことで絶妙なバランスで本建築物を成立させている。

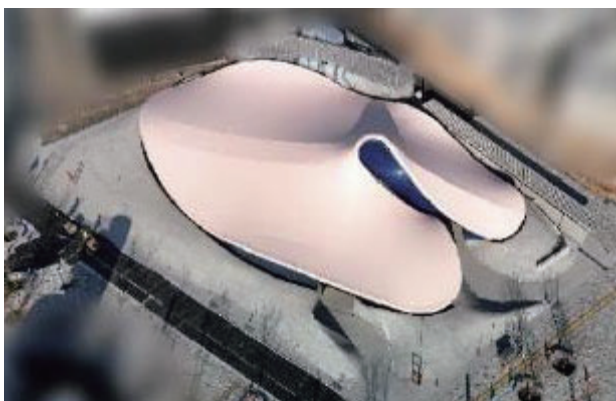


写真-1 シグネチャーパビリオン「いのち動的平衡館」
(提供：2025年日本国際博覧会協会、Photo：©エスエス)

表-1 2025年日本国際博覧会『いのち動的平衡館』の概要

名称	: 2025年日本国際博覧会 シグネチャーパビリオン「いのち動的平衡館」
場所	: 大阪府大阪市此花区夢洲中1丁目
プロデューサー	: 福岡伸一
基本設計者	: NHA(Naoki Hashimoto Architects) Arup (構造・設備)
実施設計者	: 鹿島建設・NHAグループ
施工者	: 鹿島建設
敷地面積	: 1,635.51㎡
延床面積	: 984.51㎡
規模	: 地上1階、建物高さ8.83m
構造	: 鉄骨造/サスペンション膜構造
工期	: 2023年11月～2025年2月

*1 KANEKO Hiroaki : 鹿島建設株式会社 建築設計本部 構造設計統括グループ アシスタントチーフ

*2 OHIRA Naoko : 鹿島建設株式会社 関西支店 建築設計部 担当部長

*3 HANAOKA Hikari : 鹿島建設株式会社 関西支店 建築設計部 設計主査

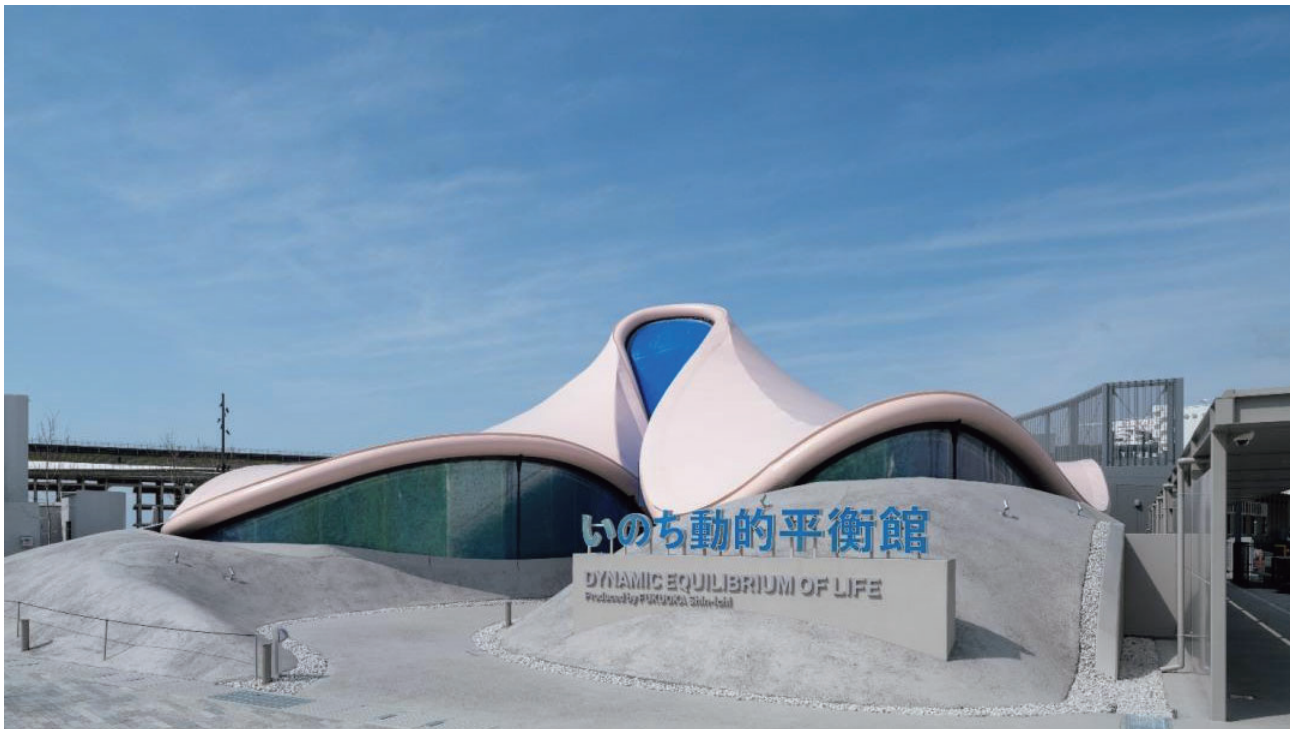


写真-2 シグネチャーパビリオン「いのち動的平衡館」
(提供：2025年日本国際博覧会協会、Photo：Masao Nishikawa)

3. 構造コンセプト

上部架構の構造コンセプトは、背面のケーブルが頂部付近の屋根リングを引き下げようとする力（水色）に対して、前面のリッジケーブルが前面側に引っ張る力（ピンク色）と柱のように機能する屋根リングが押し上げる力（緑色）が抵抗する架構となっている。また、屋根面の吹上荷重に抵抗する要素として、各柱間に3本ずつタイダウンを配置し、引っ張り力（橙色）で基礎梁に伝達する架構としている。（図-1）

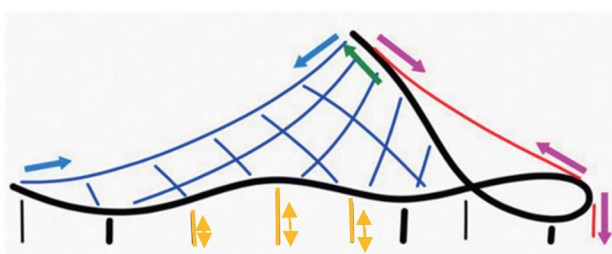


図-1 架構概念図

4. 設計概要

4.1 概要

本建築物は、地上1階建ての展示用途のパビリオンであり、一筆書きの鉄骨屋根リングとその間に架けられた

サスペンション膜構造で構成された屋根で覆っている。図-2及び図-3に伏図、図-4及び図-5に軸組図を示す。

平面形状は長半径方向43.4m、短半径方向25.0mの楕円を基準とした形状となっている。建物高さは最高高さ8.80m、最低高さ1.43mである。塔状比（最高高さ／短辺長さ）は、 $8.80/25.0 = 0.35$ となっている。また、構造種別はS造で、架構形式は長辺、短辺方向ともラーメン構造である。本建築物の形状は長期荷重時の自重＋ケーブル張力と鉄骨屋根リングの剛性との釣り合いから決定している。屋根材はB種膜、外壁材は膜構造用フィルムを使用している。

基礎形式は、設計GL-1.0m付近の盛土（砂質）層を支持層とする直接基礎である。地盤の平均支持力は設計GL-6.5m付近の盛土（シルト）層の低いN値に対して設定し、荷重の偏心を考慮する際は、基礎底面の地盤に対して設定した支持力を用いて設計した。

屋外側、室内側共に盛土で起伏を意匠的に表現しているが、基礎上についてはEPSを用いて重量を削減し、接地圧および地盤沈下に配慮した計画とした。設計地下水位は柱状図からは設計GL-4.5m付近となるが、WW（ウォーターワールド）に隣接していることから表面水位を考慮して設計GL-1.8mと設定した。

表-2 2025年日本国際博覧会『いのち動平衡館』の構造概要

上部構造
構造種別：鉄骨造
架構形式：純ラーメン/サスペンション膜構造屋根
床構造：土間コンクリート
外 壁：膜構造用フィルム
下部構造
構造種別：鉄骨造（基礎梁）
：鉄筋コンクリート造（基礎）
基礎形式：直接基礎（布基礎）

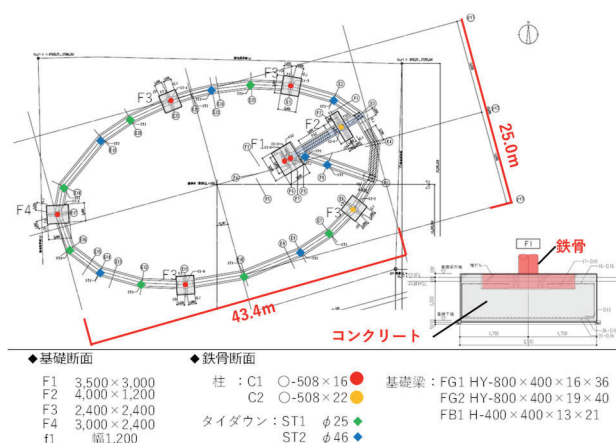


図-2 基礎・基礎梁伏図

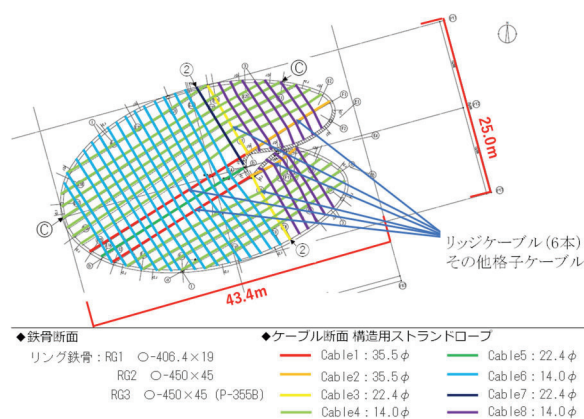


図-3 屋根伏図

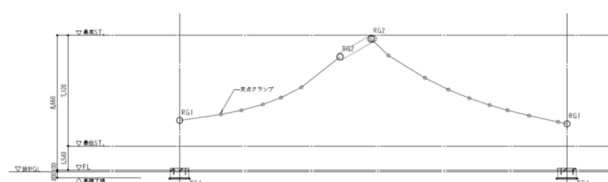


図-4 ②通り軸組図

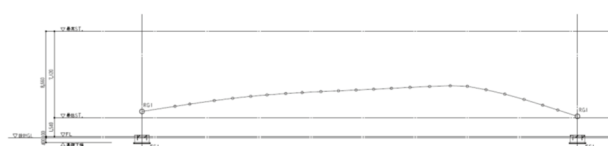


図-5 ③通り軸組図

4.2 設計方針

本建築物は強度指向型の建築物であり、各部材が許容応力度以下となるように部材を設計するルート1相当の静的設計を行った。

4.2.1 地震力

地震力は「2025大阪・関西万博 期限付き建物の設計荷重について（日本建築総合試験所）」¹⁾に準拠し、稀に発生する地震動は $C0=0.12$ 、極めて稀に発生する地震動は $C0=1.0$ と設定して算出する。なお、極めて稀に発生する地震動算出の際に用いる構造特性係数 Ds は0.50を採用した。

4.2.2 風荷重

風荷重は建築基準法施行令第87条第2項の規定に基づき、地表面粗度区分はⅢとし、設計用風荷重は「2025大阪・関西万博 期限付き建物の設計荷重について（日本建築総合試験所）」に準拠し、稀に発生する暴風時の風速を26m/s、極めて稀に発生する暴風時の風速を31m/sと設定して算出した。また、屋根面及び壁面に作用する風圧係数は風洞実験結果を用いた。

4.2.3 積雪荷重

積雪荷重は、竣工から解体までの期間での越冬回数が1回であること、外膜保護のため大雪時には雪下ろしをすることを考慮し、建築基準法施行令第86条および平成12年建設省告示第1455号に準拠し、稀に発生する積雪荷重を算定した。

表-3 荷重ケース

長期荷重
自重+ケーブル張力
短期荷重
風荷重（レベル2： $V0=31\text{m/s}$ ）
Case1 全面負圧 $Ci=0.0$
Case2 全面正圧 $Ci=-0.2$
Case3 正負反転 $Ci=0.0$
Case4 正負反転 $Ci=-0.2$
積雪荷重（レベル1：21cm）
地震荷重（レベル2： $CB=0.5$ ）

4.2.4 設計クライテリア

長期荷重に対して、各部の応力が長期許容応力以内であることにより、損傷が生じないことを確認した。

極めて稀に発生する荷重（地震力、風圧力）及び稀に発生する荷重（積雪）に対して、各部の応力が短期許容応力以内であり、かつ柱直下の基礎に浮き上がりが生じないことにより、倒壊、崩壊が生じないことを確認する。稀に発生する荷重（地震力、風圧力）に対して損傷が生

しないことは、上記により明らかであるため検証を省略した。

長期荷重に対して導入したケーブルの張力が、各荷重時に消失しないことを確認した。

4.3 風力係数の設定

本建築物の屋根面・壁面における風力係数は、風洞実験に拠るものとしている。図-6に屋根全体に作用する風力の軸の定義を示す。まず、 $C_{pi}=0.0, -0.2$ のそれぞれのケースで、鉛直方向の反力が最大・最小になる風向角 θ を図-7,8より求めた。次に、正圧・負圧が入替った（偏在した）場合のケースを想定して、Case1,2の 180° 反対方向からの風荷重をCase3,4として設定した。

各荷重ケースにおいて図-9~12に示す風力係数のコンター図を作成し、分布の傾向からエリアを設定する。各エリアの最大・最小の風力係数をそのエリアの風力係数として採用した。

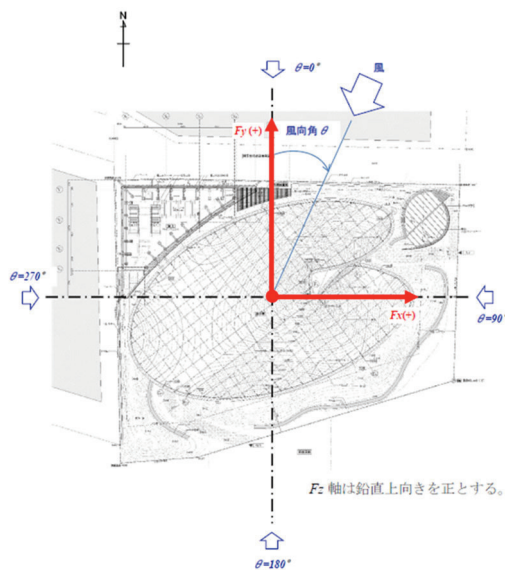


図-6 屋根全体に作用する風力の軸の定義

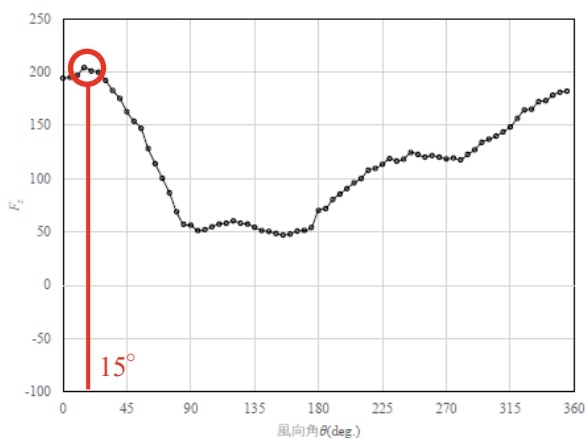


図-7 屋根全体の構造骨組み設計用風荷重
(レベル2・ $C_{pi}=0.0$) (単位: kN)

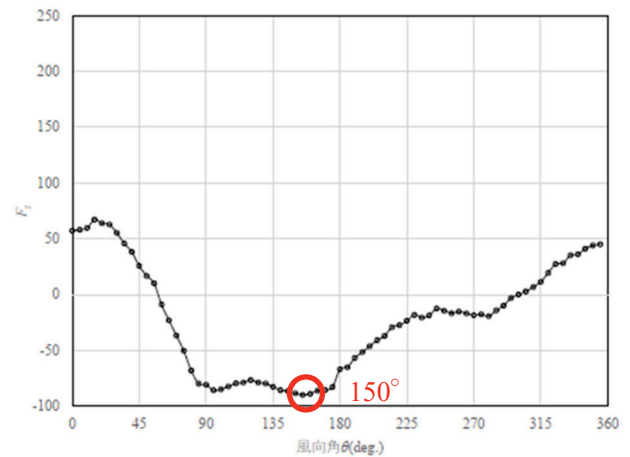


図-8 屋根全体の構造骨組み設計用風荷重
(レベル2・ $C_{pi}=-0.2$) (単位: kN)

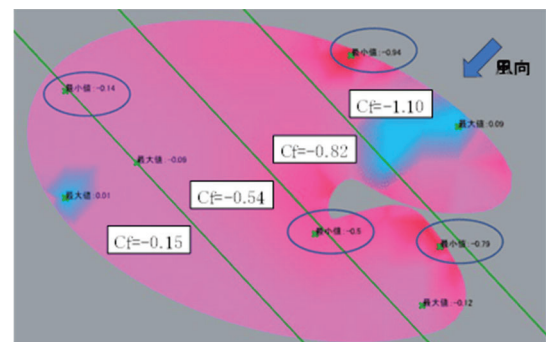


図-9 Case1: 全面負圧 $C_i=0.0$

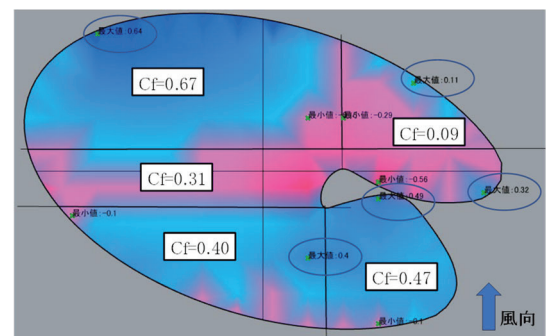


図-10 Case2: 全面正圧 $C_i=-0.2$

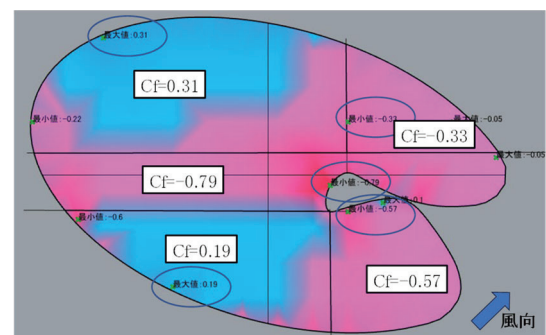


図-11 Case3: 正負反転 $C_i=0.0$

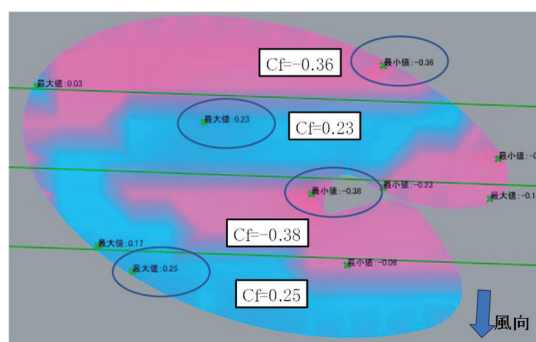
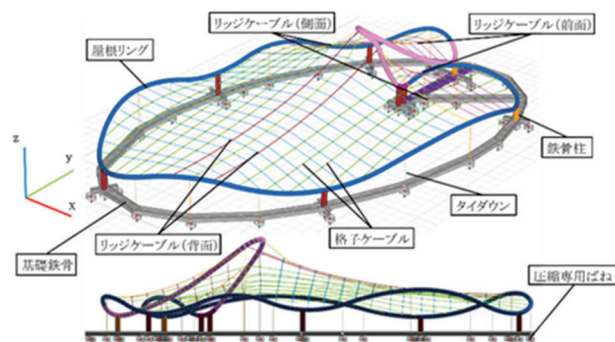
図-12 Case4：正負反転 $C_i=-0.2$ 

図-14 解析モデル (上：パース 下：立面)

4.4 構造解析

実行する解析は、幾何学的非線形解析と固有値解析である。幾何学的非線形解析によって、長期荷重及び短期荷重が作用する場合に本建築物に生じる応力を求める。また固有値解析によって、地震力の算定のための水平方向の固有周期の検討を行った。また、ケーブルの固有モード及び鉛直方向の固有周期も確認した。

4.4.1 幾何学的非線形解析

モデル化の対象は基礎梁より上部の鉄骨・ケーブル部分であり、梁要素、タイ要素(引張専用)でモデル化する。基礎は別途計算する。なお、膜自重及び膜を介して入力される風荷重および積雪荷重は、節点荷重として鉄骨・ケーブルに直接入力した。

4.4.2 固有値解析

解析モデルは弾性解析のものと同じである。固有値解析は250次まで算出した。Z方向はケーブルのモードが卓越していると考えた。固有値解析結果を表-4に示す。

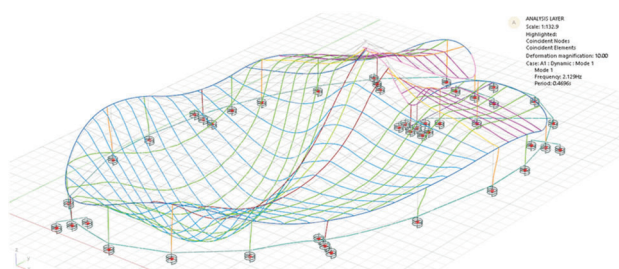


図-13 固有値解析 Z並進 全体モード次数1 (ケーブル)

表-4 固有周期解析結果

方向	モードNo	固有周期[s]	有効質量比[%]
X並進	8	0.26	7.45
Y並進	8	0.26	2.56
Z並進	1	0.47	1.37

4.5 各部材設計

幾何学的非線形解析の結果により得られた応力によって、各部材の設計を行った。検討の結果、各部材断面を決定している主要因はケーブルの初期張力による長期荷重時の応力であり、ケーブルの初期張力を決定している荷重ケースは風荷重のCase1全面吹上時となった。また、リング鉄骨の長期最大検定比0.91に対する曲げ応力成分/軸力成分は0.85/0.06となった。

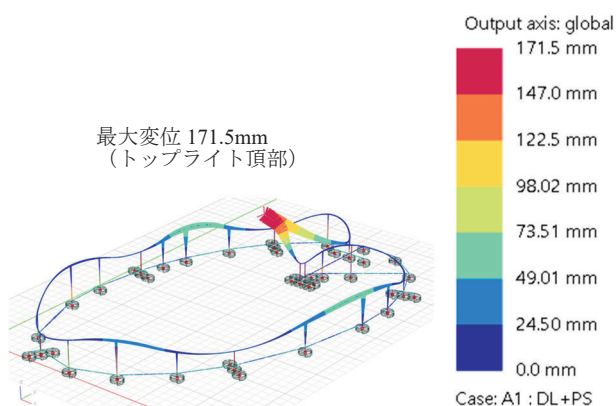


図-15 長期変形図 (ケーブル以外)

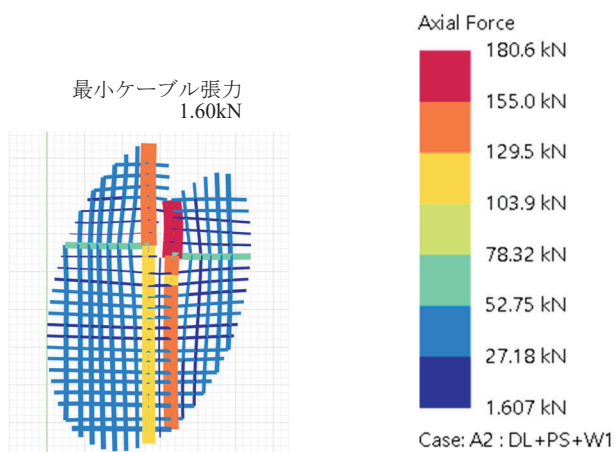


図-16 Case1全面吹上時 ケーブル張力図

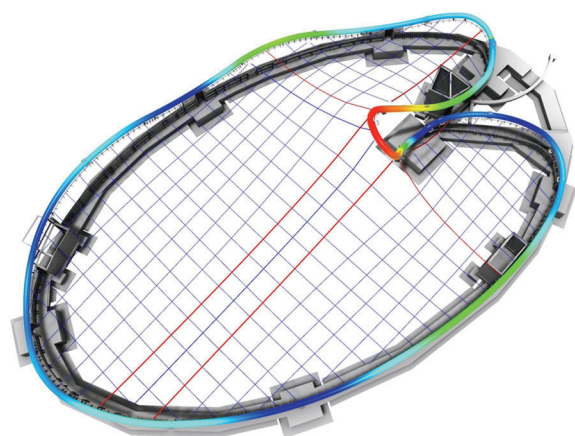


図-21 長期荷重時変形イメージ (BIM)

6. 鉄骨製作

6.1 鉄骨製作線形・工作図作成

本建築物は、意匠設計者がデザインした鋼管の自由曲線を限りなく忠実に実現しつつ、実際に製作可能な線形に置換する必要があった。今回は曲げ方向や曲げ半径の異なる一方向曲げ部材を組み合わせて複雑な二方向曲げ架構を再現した。線形置換にはRhinoCerosにGrasshopperをプラグインしたものを使用した。線形置換時の制約条件は、意匠性を考慮して芯線のずれ量やコストや輸送性を考慮して分割数や部材長さをパラメータに設定した。

本建築物の曲げ鋼管に取付く膜受け鉄骨は、三次元的な形状故に鋼管との関係性や膜受けパイプ同士の位置関係やそれに取付くPL形状が全て異なるという特徴があった。BIMでの工作図作成を早期化するために、膜受けパイプについても同様に、膜受け材用の制約条件を設け製作可能な線形に置換を行った。それに取付くPLはBIM (Tekla Structures) に独自のプラグインを活用することで、自動配置を行った。

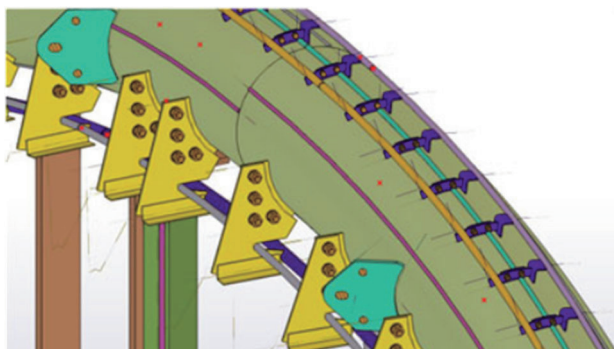


図-22 長自動配置後の膜受けPL (BIM)

6.2 TMCP鋼管高周波曲げ加工・機械試験

鋼管には一部TMCP鋼を使用した。高周波曲げ加工後の降伏点の低下が、万博の開催期間中に安全であることを考慮して、短期許容応力度に問題がないことを引張試験により確認した(表-6)。試験片形状はJIS Z3111 A2号引張試験片を高周波曲げ加工した鋼管の内R(曲げ圧縮側)側と外R(曲げ引張側)側からそれぞれ3体ずつ採取した。試験結果より、曲げ圧縮側の降伏点が鋼材規格下限値に近い値となった(表-7)。曲げ圧縮側と引張側との高周波加熱部からの距離の差からくる冷却速度の差が影響したと考える。この結果を踏まえて本製作では、高周波曲げ時の加熱温度を機械試験時より高く設定することで降伏点の上昇を図った。

表-6 引張試験対象部材

対象部材	材質	外径	板厚	曲率半径
		mm	mm	mm
	TMCP355B	450	45.0	1776

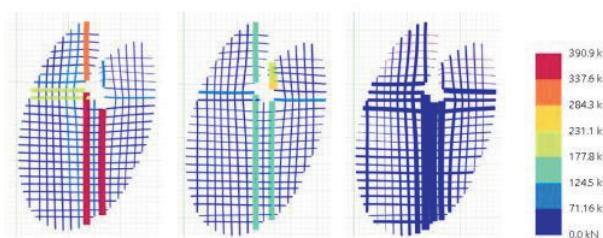
表-7 引張試験結果と高周波曲げ本製作架構設定条件

	TMCP355B	
	機械試験用	本製作用
高周波加工前ミルシート降伏点 (N/mm ²)	499	500
加熱温度 (℃)	980±30	1000±30
試験結果 降伏点(ETの平均) (N/mm ²)	386	393 (狙い値)
試験結果 降伏点(ITの平均) (N/mm ²)	356	373 (狙い値)

7. ケーブル・膜の製作

7.1 ケーブル

本建築物は、外周のみに柱を配置し、屋根面はケーブルネットと膜面のみで構成される。ケーブルの初期張力によって外周リングは比較的大きな変形を示すため、ケーブルはこの変形を考慮した長さで製作する必要があった。したがって、外荷重時にケーブル張力の消失がないことを指標とし、外周リングの変形を加味した製作用の境界剛張力を設定した。なお、製作及び施工による各所の公差を吸収するため、ケーブル端末には±100mmの調整代(一部除く)を設けている。



(a)初期張力 (b)鉄骨変形後 (c)自重時張力

図-23 ケーブル張力

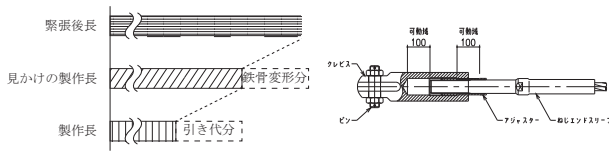


図-24 製作長の概略

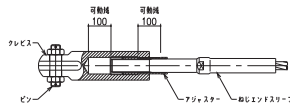


図-25 ケーブル端末仕様

難易度の高い建物を実現させるために、設計・施工チームが英知を結集し、様々な検証を重ねて挑んだ。有期限である万博という実験場でしか実現できない建築物となっているため、展示だけではなく、建物自体の面白さも楽しんでいただければ幸いである。

【謝辞】

本原稿の執筆に際して、橋本尚樹氏（株式会社NHA：Naoki Hashimoto Architects）、富岡良太氏（Arup）、栗田具尚氏（日鉄エンジニアリング株式会社）、古谷宗一郎氏（太陽工業株式会社）にご協力いただいた。記して感謝を申し上げます。

【参考文献】

- 1) (一財) 日本建築総合試験所、2025 大阪・関西万博 期限付き建築物の設計荷重について (改定) 2022.9.30
https://www.gbrc.or.jp/assets/documents/center/kozo_osaka2025.pdf

【執筆者】

*1 金子 寛明
(KANEKO Hiroaki)*2 大平 直子
(OHIRA Naoko)*3 花岡 光
(HANAOKA Hikari)

7.2 膜

屋根面にはマックスバスター（B種膜材）を使用し、自社ソフトを用いて裁断展開を行った。屋根短手方向がタテ糸方向であるため、一般部は短手方向のケーブル直上に反付（溶着）ラインを設定しているが、トップライト付近は曲率の小さな面を持つことから、部分的にパーツを細かく分け、設計曲面の再現を図った。

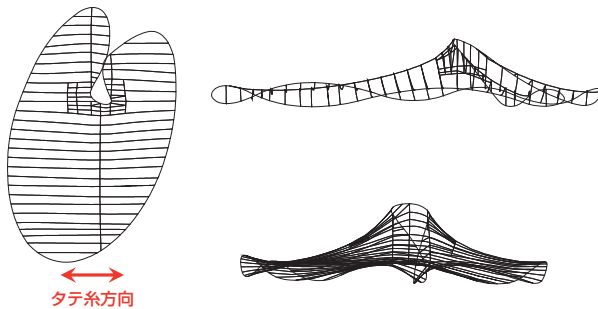


図-26 裁断展開形状

8. おわりに

延べ床面積984㎡と小さな建築物ではあるが、非常に

当施設の確認検査及び建築技術安全審査は、(一財) 日本建築総合試験所が実施しました。



写真-3 シグネチャーパビリオン「いのち動的平衡館」ケーブル緊張時
 (提供：2025年日本国際博覧会協会、Photo：Masao Nishikawa)