

栃木県総合運動公園陸上競技場

2種類の膜材を組合わせた栃木新スタジアムの膜屋根

丁 乙碩 *1

栃木県総合運動公園陸上競技場（以下、栃木新スタジアム）は、2022年に開催された第77回国民体育大会「いちご一会とちぎ大会」及び第22回全国障害者スポーツ大会「いちご一会とちぎ大会」の総合開・閉会式や陸上競技場として使用するために建設された約25,000人収容のスタジアムであり、又Jリーグのサッカー競技場としても利用される陸上競技場兼サッカー競技場である。本稿では、栃木新スタジアムの膜屋根の設計・施工内容について以下に紹介する。

Ⅰ 建築概要

- ・名称：栃木県総合運動公園陸上競技場
- ・所在地：栃木県宇都宮市西川田 4-1-1
- ・主要用途：陸上競技場及びサッカー競技場
- ・建築主：栃木県
- ・敷地面積：545,803.74 m²
- ・建築面積：19,910.82 m²
- ・延床面積：42,037.52 m²
- ・階数：地上4階
- ・構造：鉄筋コンクリート造、鉄骨鉄筋コンクリート造（スタンド部）、鉄骨造（屋根部）
- ・設計・監理：久米・AIS・本澤特定建築設計業務共同企業体
- ・施工：鹿島・増淵・渡辺・那須土木・磯部・浜屋特定建設工事共同企業体

Ⅱ 膜屋根の概要

栃木新スタジアムの完成様子を図1に示す。屋根は、客席全面を覆う計画とし、軽量で開放的な明るい空間を実現するためPTFE膜材(A種膜材料)を用いた膜屋根を採用している。

膜屋根の概要図を図2に示す。膜屋根の規模は195m(短辺、東西軸(Y軸通り))×236m(長辺、南北軸(X軸通り))の大きさで、約16,000 m²の面積である。構造形式は鉄骨の主構造の上に最大10m×39mサイズ(1ユニット当たり)の膜パネルを全部で66枚取付けた骨組膜構造としている。

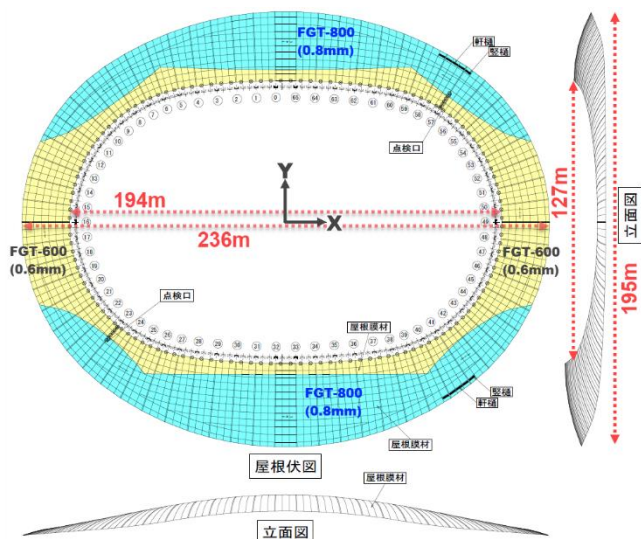
膜屋根の形状は、全体的には中央部のY軸を基準に南・北対称の楕円形で、緩やかな勾配の曲面を持つ形状としている。さらに、膜屋根においては、設計意図である6枚の「栃の葉」を重ねたイメージを実現するために、厚みが異なるPTFE膜材(FGT-600(0.6 mm)とFGT-800(0.8 mm)、中興化成製)を利用



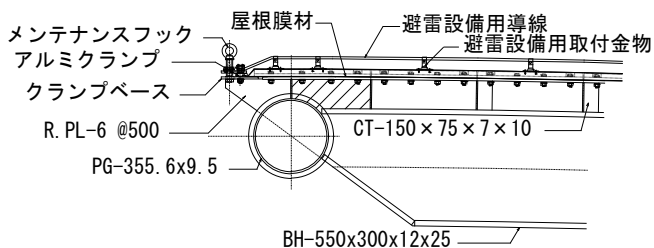
図1 栃木県総合運動公園陸上競技場(出典：下野新聞社)

*1 協立工業株式会社 リサーチエンジニア・博士 (工学)

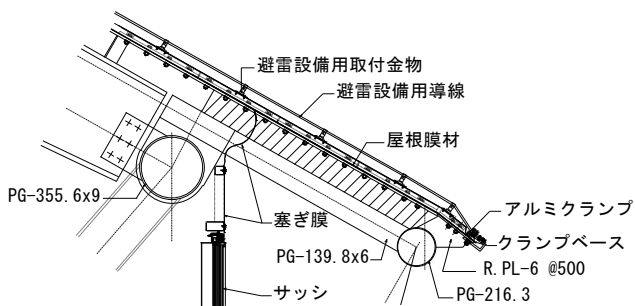
し、透光性の違いによりその重なりを表現し、さらに膜材同士の接合部は金物を使用しておらず、図3のようにシンプルでかつ、滑らかな膜面を実現している。



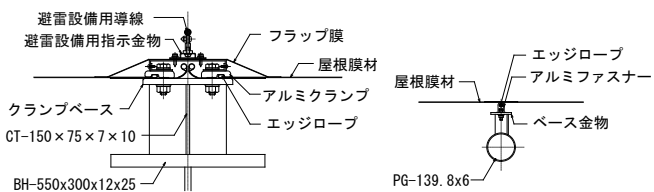
(a) 屋根伏図・立面図



(b) 断面詳細図(膜屋根先端部)



(c) 断面詳細図(膜屋根外周部)



(d) 断面詳細図(分割部・中間定着部)

図2 膜屋根の概要図



図3 膜材の透光性を用いた演出

膜屋根の設計検討

膜屋根の検討モデルを図4に示す。南北対称形状のため検討モデルは全体の1/2を対象とした。

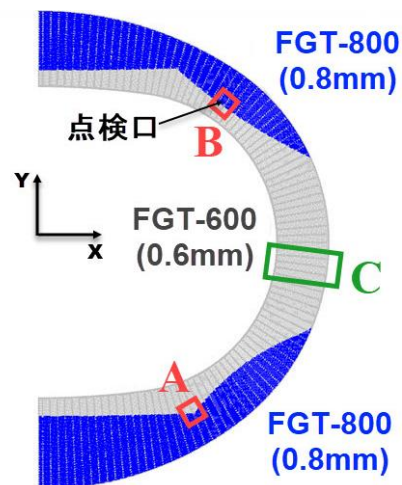


図4 検討モデル(全体モデルの1/2)

設計荷重は、①固定荷重(0.02kN/m²)、②積雪荷重:0.68kN/m²、③風荷重時(-3.173kN/m²、500年再現期間の値を基に50年再現期間の値を算出)、④膜変形検討用荷重(積雪荷重(0.68kN/m²)、風荷重/2(-1.587kN/m²))と設定した。

表1 材料物性値と許容応力度

■ FGT-600					
材料名	糸方向	引張剛性 (kN/m)	基準強度 (N/cm)	許容応力度(kN/m)	
				長期	短期
FGT-600 (0.6mm)	タテ糸	1370.9	1227	15.34	30.68
	ヨコ糸	800.5	980	12.25	24.50
■ FGT-800					
材料名	糸方向	引張剛性 (kN/m)	基準強度 (N/cm)	許容応力度(kN/m)	
				長期	短期
FGT-800 (0.8mm)	タテ糸	1210.8	1470	18.38	36.76
	ヨコ糸	930.6	1176	14.70	29.40

膜材の物性値と許容応力度は「平成14年国土交通省告示第666号」に従い、表1の値を用いた。膜面解析は、応力密度

法(FDM)を解析手法とするテンション構造専用の汎用プログラムである EASY(Ver. 2017, Technet GmbH 製)を用い、形状解析、応力 - 変形解析、裁断解析といった一連の検討を行った。

【膜面の構造検討】

設計荷重に対する検討結果の内、支配的な荷重である風荷重時の膜応力図と膜変位図を図 5 に示す。膜面最大応力が許容応力の範囲内、膜面の最大変形量が支点間距離の 1/15(積雪)と 1/20 以下(風荷重)になるようにした。

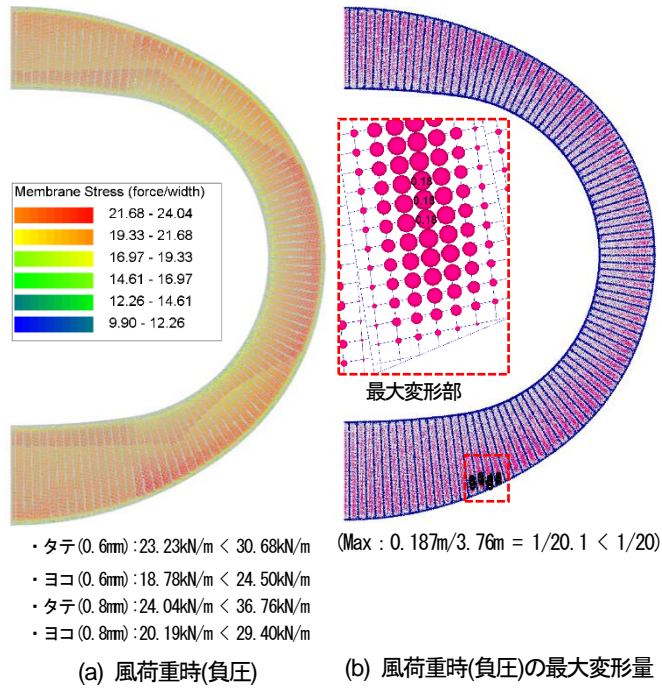


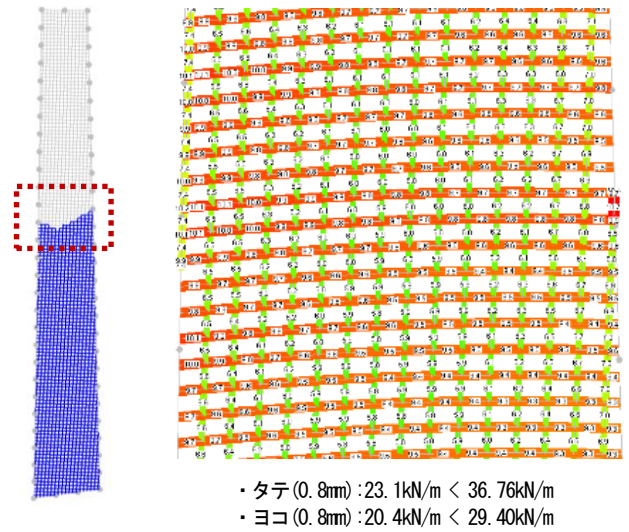
図 5 膜面の解析結果(最大応力&最大変形)

【応力集中の検討】

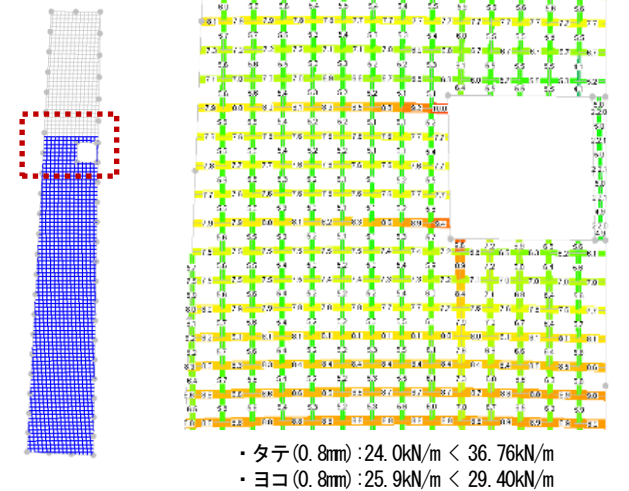
厚みが異なる膜材を使うことにより、力の流れが周囲に比べて急激に変わる境界部(接合部)とその付近(図 4、A 部分)、点検口(図 4、B 部分)付近では応力集中が生じやすくなるため、懸念される箇所について予め膜応力分布の検討を行った(図 6)。その結果、膜面の応力分布は全ての荷重条件に対して許容応力内で収まることを確認した。特に、点検口付近では応力集中の現象が見られるものの、応力分布は許容応力以下になることを確認した。

【緩勾配屋根面の水の流れの検討】

本件の膜屋根は緩やかな勾配を有することが特徴として挙げられるが、低い勾配による膜面ポンドリング現象への懸念も考えられた。特に、積雪荷重によって凹んだ膜面に溶けた水がたまり、ポンドリング現象が起きないように、検討モデルに対して膜面全体の高低関係、ポンドリング現象の発生有・無などを把握し、雨水の流れがスムーズになることを検討した(図 7)。

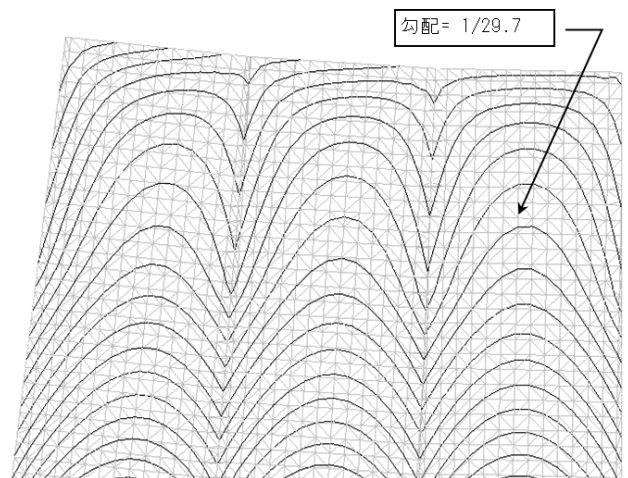


(a) A 部分

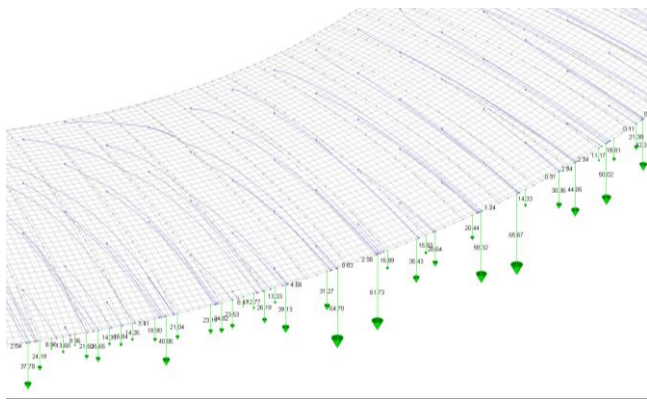


(b) B 部分

図 6 境界部(接合部)とその周辺の応力分布(図 4 内)



(a) 等高線



(b) 雨水量&雨水の流れ

図7 膜面の勾配及び雨水流れの検討(図4-C部分)

I 膜材接合部の耐久性及び再張力導入方法の検討

栃木新スタジアムの膜屋根は、シンプルで滑らかな膜面が一つの特徴になり、それを実現させるために厚みが異なる膜材同士の溶着部(接合部)付近の張力分布状態やシワ発生の有・無などについてモックアップ実験を通じて検証を行った。

さらに、大規模な膜構造物の場合、初期張力導入後の時間経過によってクリープや応力弛緩が生じることから、再張力を導入することが望ましいが、本件では再張力導入方法を極力シンプルにすることとし、その有効性も確認した。

【モックアップ実験】

試験体の概要を図8に示す。試験モデルは、図4に表したA部分を対象とし、試験体の寸法は実際当該部分のサイズ(3.25m(幅)×4.25m(長さ))に合わせて、3m(幅)×4m(長さ)のサイズと設定した。また、膜面張力の測定箇所は異なる膜材の接合部(II)とその周辺部(I、III)とし、膜面の張力分布を調べた。なお、外周固定部の2カ所(タテ・ヨコ糸方向)にロードセルを設置し、設計張力との比較を行った。

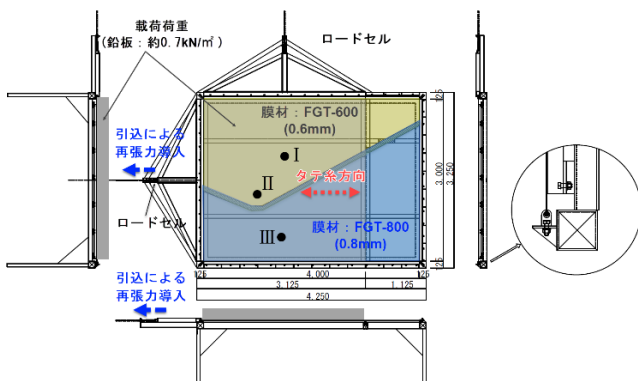


図8 モックアップ実験の概要

実験の流れは、以下のように設定し、各ステップごとに膜面応力状態とシワ発生有・無などを検討した。

- ・Step 1: 初期張力(縮小率設定)を導入してから1週間放後、膜面張力の測定(図9)



図9 初期張力導入の様子【Step 1】

- ・Step 2: 設計荷重(積雪荷重(0.68kN/m²))を想定し、約0.7kN/m²相当の荷重を載荷(5日間、その後除荷(2日間) → 載荷・除荷を6回(経年時を想定)繰り返し(図10)



図10 載荷実験の様子【Step 2】

- ・Step 3: 【Step 2】より、1週間放置後、膜面張力を測定、設定の張力を再導入(図11)



(a) 再張力導入前

(b) 初期張力導入後

図11 再張力導入の様子【Step 3】

・ Step 4 : 再張力導入後、膜面張力の変化を測定(図 12)

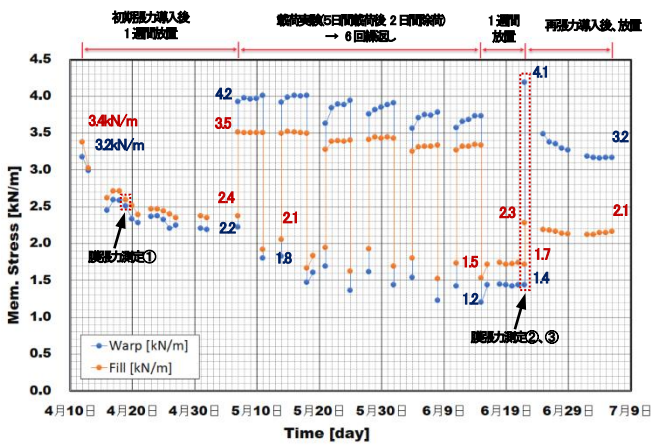


図 12 時間経過による膜張力の変化

【再張力導入システムの概要】

本件では、再張力導入機構をシンプルにするために当社独自のアルミクランプを用いて、図 13 のような再張力導入方法を適用した。再張力導入の考え方としては、本体膜に初期張力を導入するために、使用した引込膜をそのまま残し、経年後、所定の位置に引込む際に再度それを利用することで、再張力導入を容易にすることができると考えられる。つまり、膜張力低下時にタテ糸直交方向のアルミクランプを狭幅のアルミクランプに交換することで、タテ糸方向に対して張力を導入することができ、膜材のクランプ交換現象によってヨコ糸にも張力が加わることが期待できる。

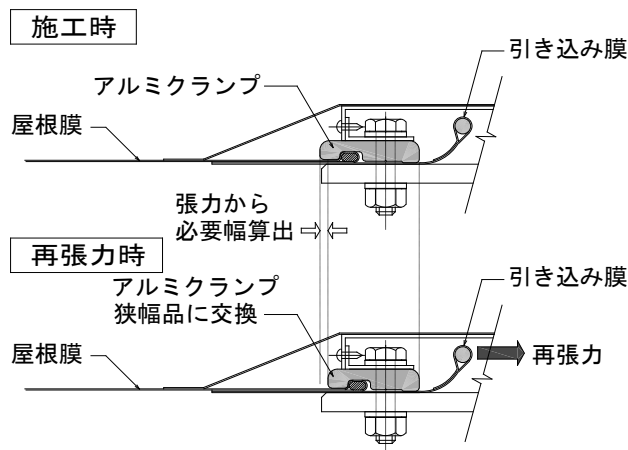


図 13 再張力導入方法の概要

Ⅰ 膜屋根の施工から完成まで

栃木新スタジアムの膜屋根の施工状況を図 15 から図 19 に示す。通常膜屋根の取付工事は、ジャッキダウンも含めて屋根鉄骨建方が完了した後に行うことが一般的であるが、本件では施工合理化の観点から、ジャッキダウンの影響が少ないサイドスタンド部分について変形量の検討を行い、屋根鉄骨建方と膜取付工事を一部ラップさせて行った。サイドスタンドについてアーチトラスのジャッキダウン前に膜施工を先行し、施工合理化と共に工期短縮を実現した。なお、膜の先行施工範囲(図 14)については、中間定着部のボルト本締めや止水フラップ膜取付けをジャッキダウン後に行うなど、膜屋根の全エリアについてもスムーズに取付け作業を行うことができた。

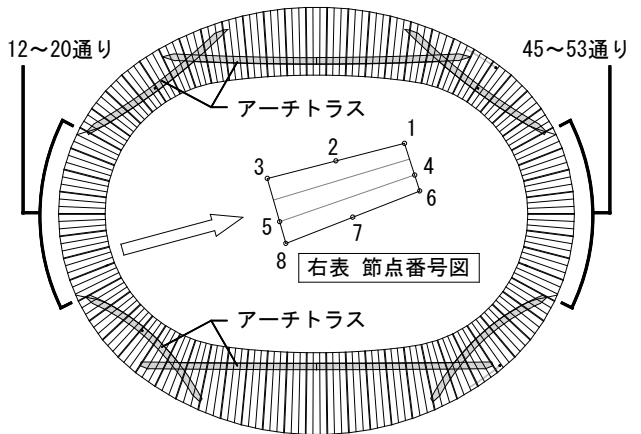


図 14 屋根鉄骨ジャッキダウン前の膜施工先行範囲

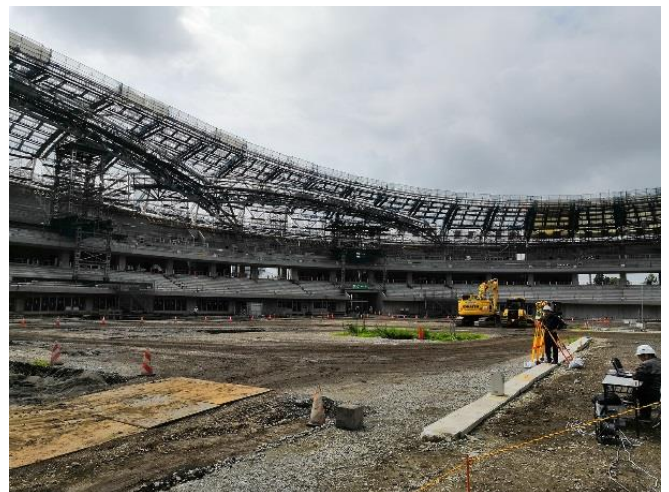


図 15 ジャッキダウン前の膜施工状況(サイドスタンド側)

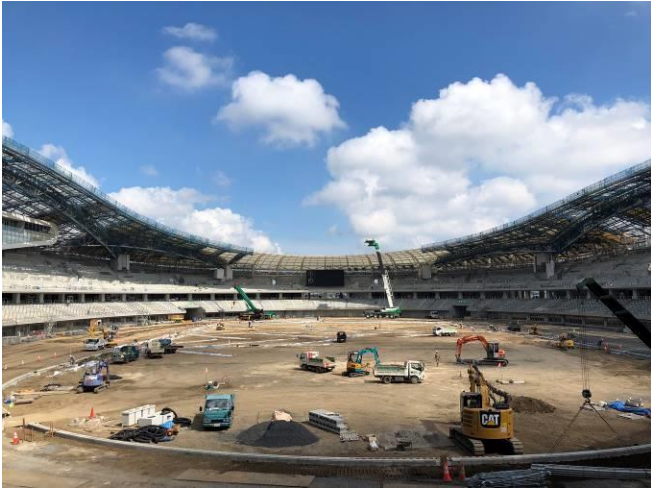


図 16 ジャッキダウン後の膜施工状況(サイドスタンド側)



図 18 膜屋根の施工状況 (全体エリア)

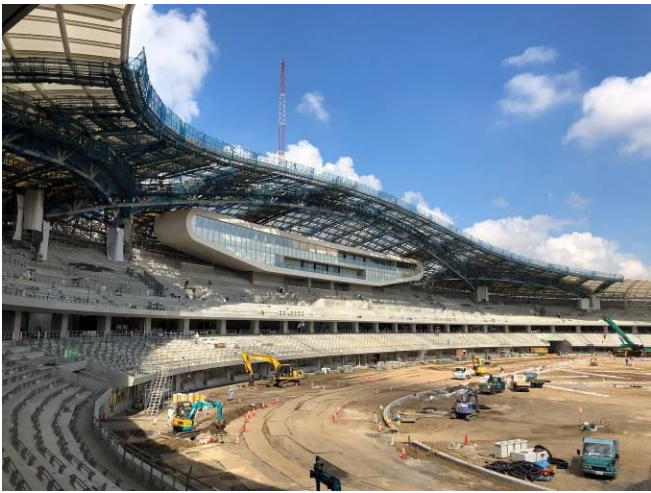


図 17 膜屋根の施工状況 (アーチトラス側)



図 19 膜屋根の施工完了

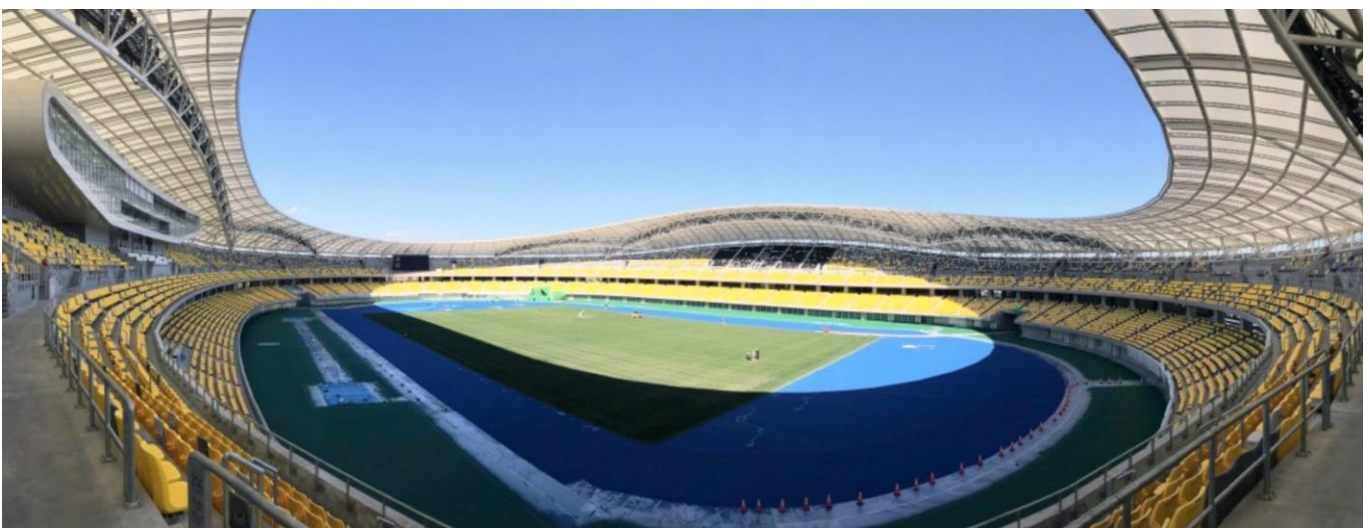


図 20 栃木新スタジアムの膜屋根の全景