

東京国際空港第2ターミナル国際線施設

ETFE フィルムと PTFE 膜材を組合わせたクッション方式膜屋根

丁 乙 碩 *1

膜構造建築物の事例として、2020年3月29日に新たに開業した東京国際空港第2ターミナルの国際線施設を以下に紹介する。本物件は、ETFE フィルムと PTFE 膜材を組合わせたクッション方式の膜屋根を採用しており、クッション方式膜構造の中でも稀な事例である。

■ 建築概要

- ・名称：東京国際空港第2ターミナル国際線施設建設工事
- ・所在地：東京都大田区羽田空港 3-4-2
- ・主要用途：空港旅客ターミナルビル
- ・建主：日本空港ビルデング株式会社
- ・敷地面積：943,664.36 m² (既存国内線地区)
- ・建築面積：17,667.12 m² (既存改修部除く)
- ・延床面積：66,154.08 m²
- ・階数：地上5階
- ・構造：鉄骨造、一部鉄骨鉄筋コンクリート造
- ・設計・監理：梓・安井・PCPJ・東京国際空港第2ターミナル国際線施設設計監理共同企業体
- ・施工：大成建設株式会社

東京国際空港第2ターミナルは主に国内線専用の施設として使われていたが、国際線の増便と旅客の増加に対応するために大規模増築工事が行われ、2020年3月29日より既存の国内線と国際線の共用ターミナルとしての運用が開始された。

本件は地下1階・地上5階の規模で、既存の第2ターミナルビルの南側に新たに増築された事例である。

設計コンセプトは「空 + 未来感」の新しい国際線施設、災害に強い安全で安心な空港施設、既存ターミナルに隣接した片持ち構造のしなやかな鉄骨フレームそして軽量で内外一体で使用可能な ETFE クッション膜構造による屋根としている。

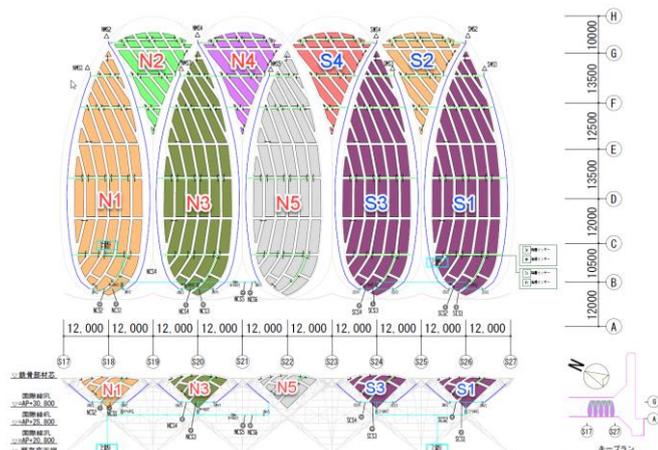


東京国際空港第2ターミナル増築部の鳥瞰図 (出典：梓設計より)

*1 協立工業株式会社 リサーチエンジニア・工博

Ⅰ 膜屋根概要

- ・構造形式：クッション方式(3層)の膜構造
 - ①アウターレイヤー(ETFE フィルム、500 μm)
 - ②ミドルレイヤー(PTFE 膜材、0.6mm)
 - ③インナーレイヤー(ETFE フィルム、500 μm)
- ・屋根面積：6,474 m^2
- ・ユニット数：318 パネル



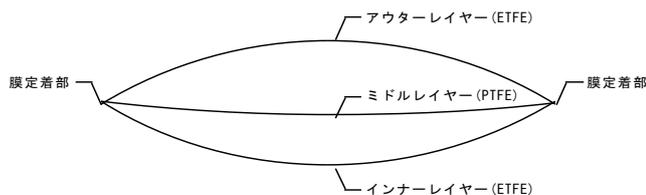
膜屋根の概要図

膜屋根は約 6,474 m^2 の面積であり、主構造のスチールフレーム (120m (長さ) × 80m (幅)) の上に 318 ユニットのクッションパネルで構成されている。屋根全体の形状は N5 エリアを基準に左右対称となっている。

膜屋根の構造形式は ①アウターレイヤー (ETFE フィルム、500 μm 、白色+高反射シルバー印刷、AGC 製)、②ミドルレイヤー (PTFE 膜材、0.6mm、サンゴバン製) そして ③インナーレイヤー (ETFE フィルム、500 μm 、白色印刷、AGC 製) からなる 3 層のクッション方式を採用している。

ETFE フィルムと PTFE 膜材を組み合わせたクッション方式の膜屋根が採用された理由としては、軽量で開放的な明るい空間の実現、クッション方式による屋根耐火・屋根断熱、そして ETFE フィルム特殊印刷による日射遮蔽が挙げられる。

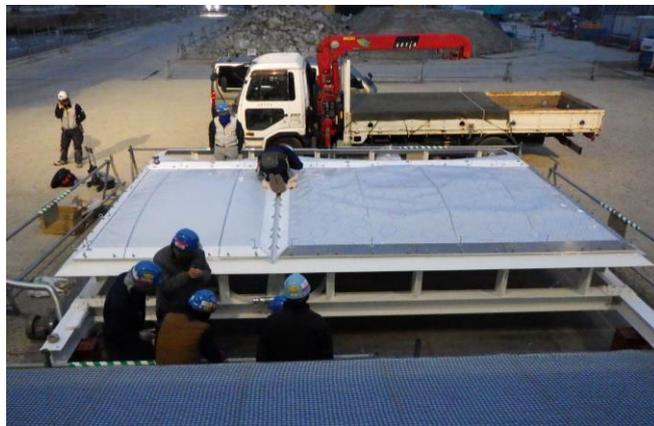
また、クッションパネルのライズは各ユニットのサイズがそれぞれ異なるため、全体の屋根外形を設計意図通りにするためにライズ比を約 10%~13%程度に設けている。



クッションパネルの構成

モックアップ実験

本件の ETFE フィルムと PTFE 膜材を組合わせたクッション方式については、日本国内だけではなく先事例が多い海外でも事例が無かったため、モックアップ実験を通じて問題点を解決しながらクッションパネルの意匠性、安全性、施工性そして加圧状況などの確認を行った。



クッションパネルのモックアップ(加圧前)



クッションパネルのモックアップ(加圧後)



クッションパネルの安全性の確認

また、各クッションパネルのアウター及びインナーレイヤーには明るくて快適な室内空間が実現できるように、モックアップ試験体を空中に吊り上げ、設計時に意図したデザイン

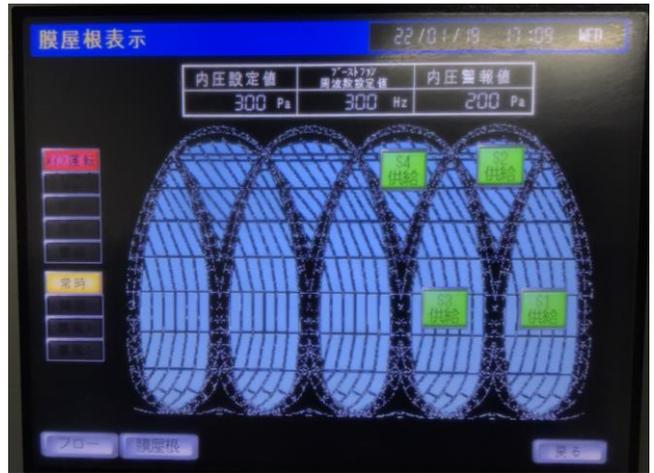
並びにイメージが演出できることを確認した。さらに、ETFE フィルムの表面に日本の伝統文様の一つである「麻の葉」模様の白色印刷を施し、その結果、日射角度や時間等によって、多様な色の屋根が演出できるようになった。



クッションパネルの膜面色の見上げ様子

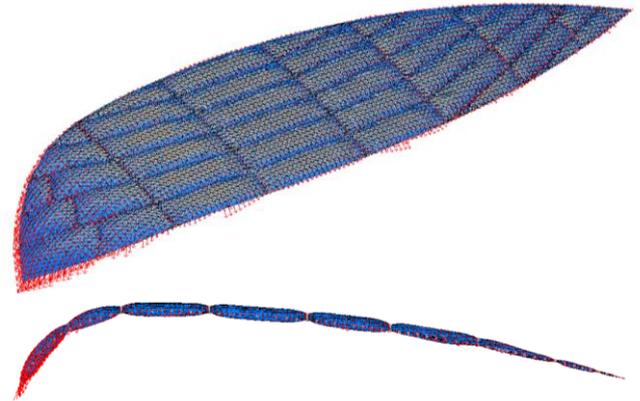
内圧制御システムと排水計画

各クッションパネルには、構造上必要な内圧を維持する為、膜屋根の北エリア(N1～N5)と南エリア(S1～S4)に分けて、内圧制御システムを設けている。クッションパネルの常時内圧は300Paに設定しており、内圧の制御は自動制御となっている。なお、膜屋根・南側の隣接建物の屋上に降雪センサーと風センサーを設置し、降雪時と強風時に対しそれぞれ1100Paと600Paの設定内圧の自動制御ができるようにした。クッションパネルは工場での製作時にETFEフィルムとPTFE膜材を接合して一体化したものを現場で取付けるため、空気の漏気量は非常に少なく、また送風機は常時作動しているが、PID制御・インバーター・可変風量調節バルブによる信頼性の高い余裕を持った仕様に設計した。

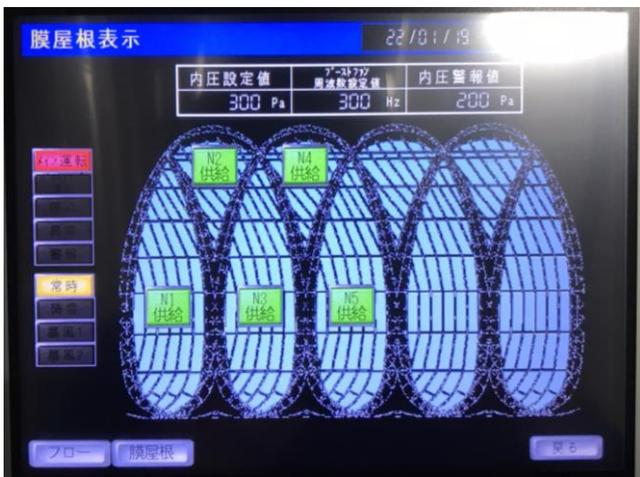


【南側】
送風及び内圧制御システム

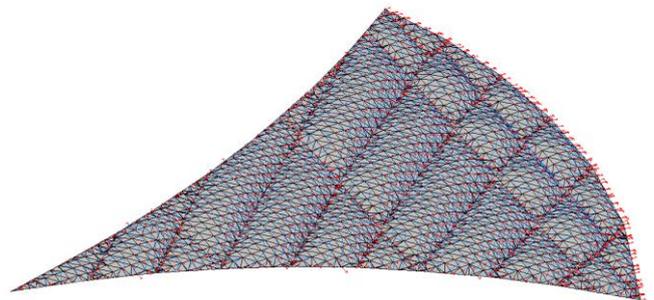
膜屋根の排水検討については、荷重条件のうち、最も厳しい条件と考えられる積雪荷重時を想定して検討を行った。屋根頂部の場合、積雪により上面膜に若干のたわみが生じるものの、水勾配が確保できるようにした。



膜屋根の排水検討 (N1, N3, N5, S1, S3 エリア、積雪荷重時)



【北側】

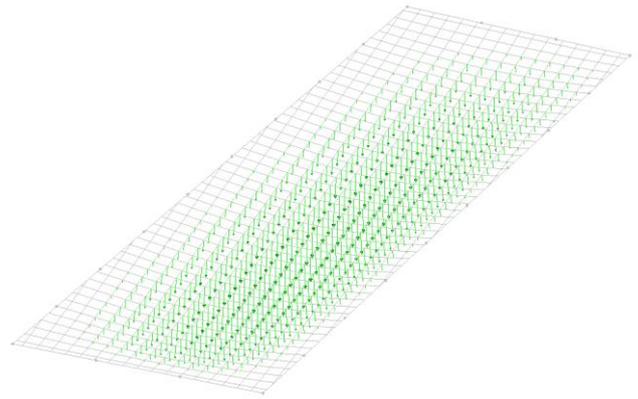


膜屋根の排水検討 (N2, N4, S2, S4 エリア、積雪荷重時)

また、各クッションパネル間には下図のように“Y”字型の下地鉄骨が設けられ、クッションパネルの定着と樋の役割を兼ねるようにした。



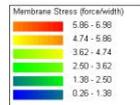
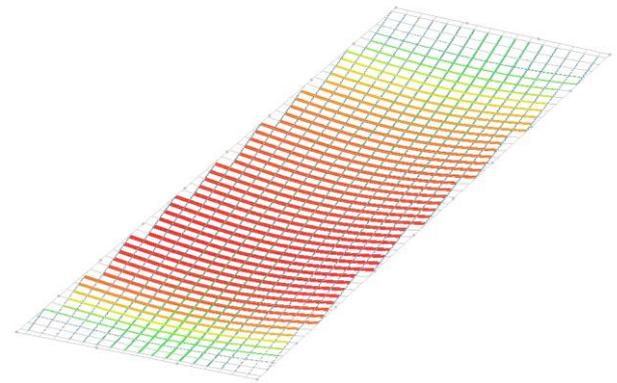
クッションパネルの定着及び樋部の様子



想定荷重(水荷重)

フェイルセーフの検討

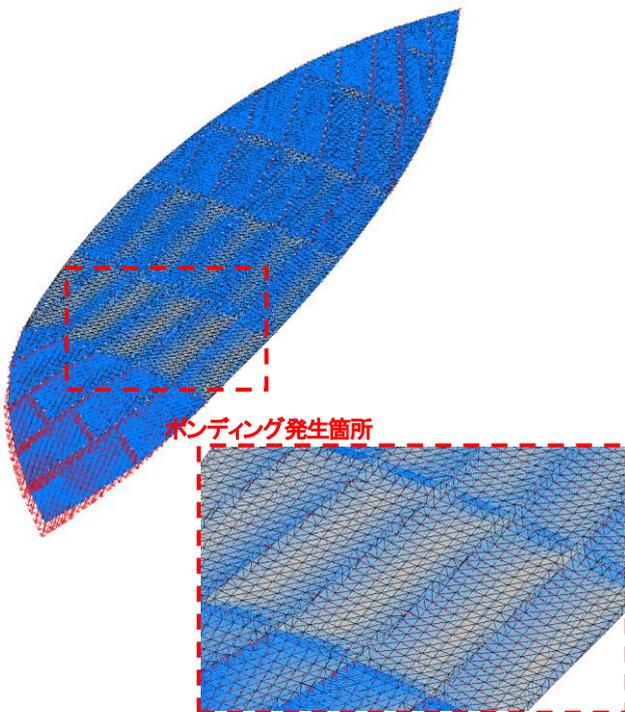
本件は 365 日に運用され、不特定多数の人々が利用する空港施設という、重要度が高い施設であるため、膜屋根については、設計時に外部環境の影響を受けて施設運用に支障を来さない様に ETFE クッションパネルのデフレート状態を想定し、安全性を検討した。デフレートの条件は ①内圧制御システムに起因する場合(加圧送風装置が 2 系統とも停止又は ETFE クッション膜が飛来物等によって損傷)、②ETFE フィルムの破損に起因する場合(アウターレイヤーが損傷し、さらにミドルレイヤーからインナーレイヤーに浸水)の 2 ケースが想定できるが、このような想定条件についてもミドル及びインナーレイヤーが崩壊せずに耐えられるよう安全性の検討を行った。



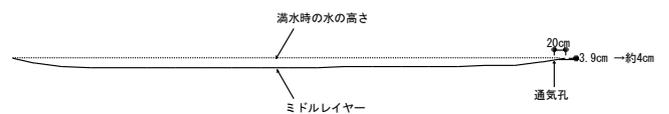
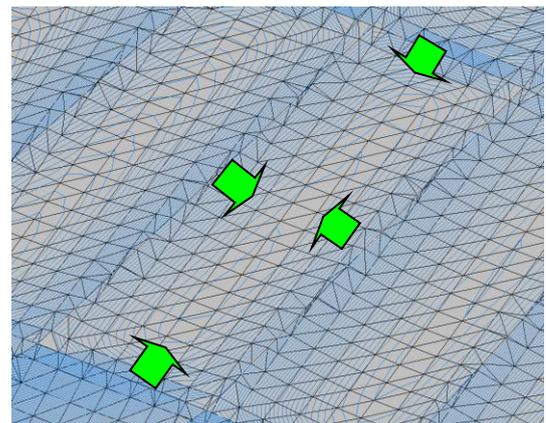
Max. Stress : 6.98kN/m < 24.48kN/m

膜面応力の検討結果

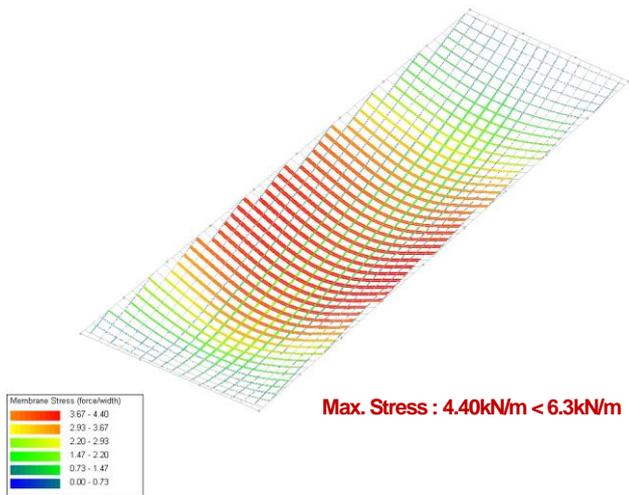
デフレート時のミドルレイヤーの安全検討【ケース①】



デフレート時の想定 (N1, N3, N5, S1, S3 エリア、積雪荷重時)



想定条件(ミドルレイヤー浸水後、通気孔よりインナーレイヤー浸水)

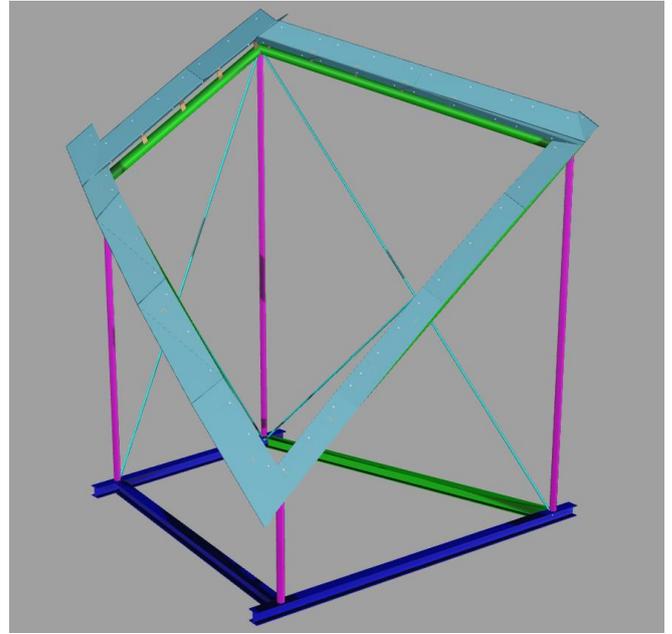


膜面応力の検討結果(8時間経過)

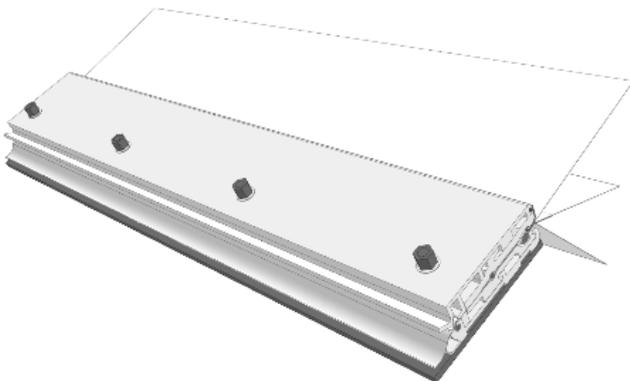
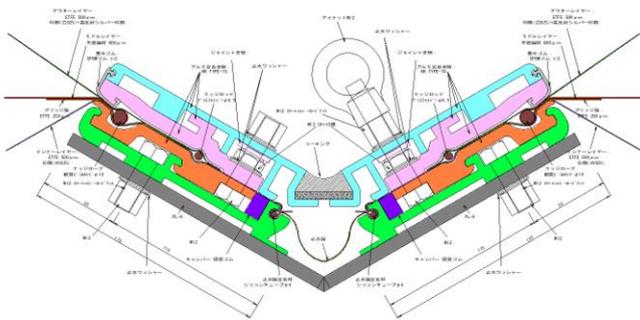
デフレート時のインナーレイヤーの安全検討【ケース②】

実大モックアップ試験

本件の大きな特徴の一つとしては、アウター及びインナーレイヤーの ETFE フィルムの上に PTFE 膜材を挟んだ 3 層のクッションパネルが挙げられる。しかし、ETFE フィルムと PTFE 膜材の場合、熱溶着により一体化することは難しいため、クッションパネルの気密性及び固定金物としての強度が確保できるよう新たに開発したアルミ製膜固定金物を適用した。



実大モックアップ試験体の 3D モデル



アルミ製膜固定金物のディテール



クッションパネルの取付様子

クッションパネルの取付後、膜面の変形や安定性を確認するために、内圧による膜面の形状や気密性などを確認し、パネルの製作寸法及び気密性に問題無いかなどの検証を行った。



クッションパネルの加圧様子(480Pa)



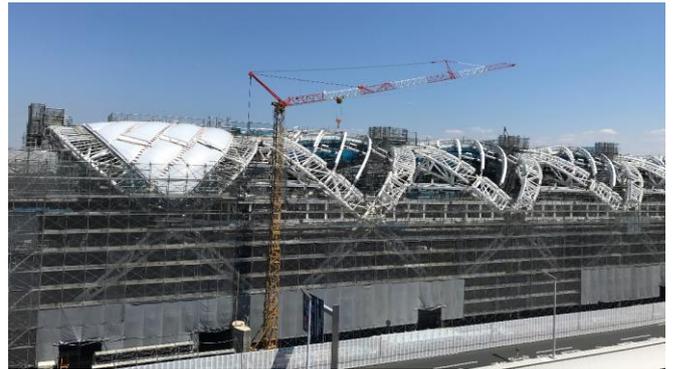
クッションパネルの気密性の確認

膜屋根の施工状況

クッション方式膜屋根の現場施工状況を以下に表す。クッションパネルは現場での取付時間の短縮及び作業がスムーズに行われるように、工場でETFEフィルムとPTFE膜材を一体化したものにアルミ金物を予め結合し、ユニットとして一体化させ、各パネルごとに現場まで搬入し、取付けるようにした。



②クッションパネルの現場取付様子



③クッションパネルの現場取付様子(N1エリア)



④クッションパネルの現場取付様子(全体エリア)



①クッションパネルの現場搬入



⑤膜屋根の仕上げ様子(全体エリア)

新たなクッション方式膜屋根の実現

ETFE フィルムは、耐久性・耐候性に優れたフッ素樹脂の材料であり、日本国内においては、2017年に「平成14年国土交通省告示第666号」に「膜構造用フィルム」として位置付けられたことから、今後 ETFE フィルム採用の可能性が期待される材料である。

東京国際空港第2ターミナル増築部の膜屋根は ETFE フィルムと PTFE 膜材を組合せたクッション方式膜屋根を実現させた物件であり、膜屋根の明るさ、意匠性そして安全性を最大限生かした物件とも言える。最後に、今後 ETFE フィルムが日本国内において多様な建築物に幅広く適用されることを希望する。



東京国際空港第2ターミナル増築部の外観(カーブサイド)



東京国際空港第2ターミナル増築部の外観(エアサイド)



東京国際空港第2ターミナル増築部の内観