

国内初の ETFE クッション構造膜による新しい「空」のデザイン

■建築概要

東京国際（羽田）空港は、地区全体をまとまりのある風景として計画してきた。第1ターミナル（国内線）は「陸」、第2ターミナル（国内線）は「海」、第3ターミナル（国際線）は「空」というコンセプトで計画されている。今回計画した第2ターミナル国際線施設は、既存の第2ターミナル（国内線）に隣接した位置に既存一体増築として計画した。国際線施設であることから、コンセプトは、第3ターミナルとあわせ、「移り変わる日本の四季の空模様」や「未来感」を加味した、快適で開放的な新しい「空」としている。ETFE 膜屋根は「雲海」に見立て、「空」と「海」を繋ぐ新しいランドマークとして計画した。

- 鉄骨造 増築部 / 地下1階地上5階
- 高さ：32.050m
- 建築面積：増築部 17,667.12m²
- 延床面積：増築部 66,154.08m²
- 所在地：東京都大田区

■構造的な「軽やかさ」への挑戦～ダイナミックなフレーム案

まず最初に「ロビー屋根フレームの軽量化」に取り組んだ。これは、「供用中の既存第2ターミナルの上部利用」「既存杭や既存建物の構造的な制約」といった計画条件を踏まえ、「増築側からの片持ちの構造フレーム」と「屋根の軽量化」が必須であると判断したためである。そこで、ダイナミックな三次元フレームで「大きく全体を包む空間」を計画・設計し、約55m×約110mのロビーを構造的に「軽やかに」見せるように工夫した。

上記の計画・設計段階では、いくつものスケッチを作成した。たどりついたのが5つのサークル状の三次元フレームを重ね合わせ、さらに折り曲げることで、屋根と外装を一体的に成立させる構造フレーム案である。

この構造フレーム（以下「サークルトラス」）は、鉄骨量を通常より抑えており、鉄骨トン数的にも「軽やかさ」を実現している。

■仕上の「軽やかさ」への挑戦～軽く、内外一体で使用可能な素材

次に、チェックインロビー屋根素材、つまり仕上の「軽やかさ」の検討を行った。仕上の「軽やかさ」は構造的な「軽やかさ」同様「屋根の軽量化」には必要な設計と件であった。

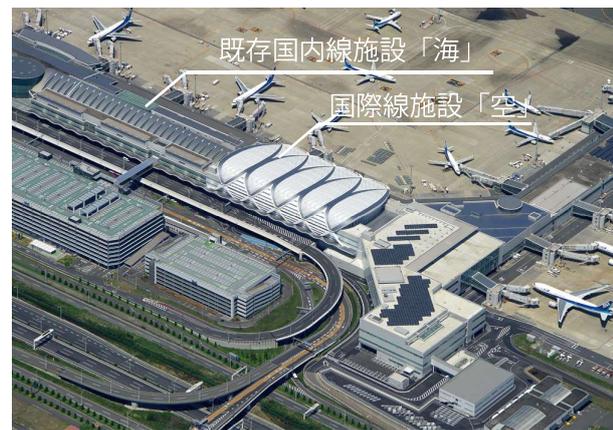
できる限り仕上および仕上下地を削減することは、落下危険物からの安全確保にも効果がある。また、下地工事費等のコスト縮減効果も期待できる。

その思いで、従来材料にこだわらず、空港以外の分野も視野に「軽くて、内外一体で使用可能な素材」を探ることから始めた。

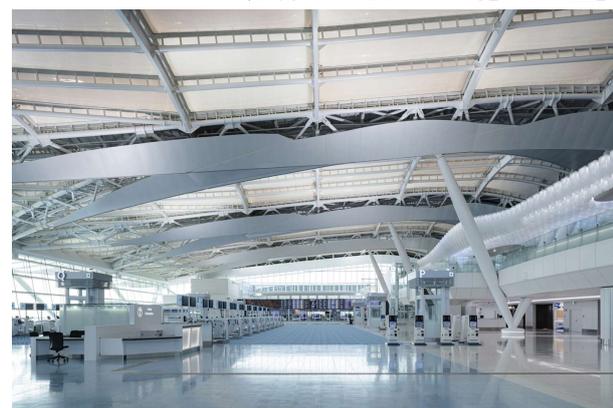
■重量的な「軽さ」×「自己消化性」→ETFE 膜屋根の可能性の検討

「やわらかく、軽い」素材を探す中で「ETFE 膜」を見つけた。膜素材は近年鉄道のプラットフォーム屋根等、目にする機会が増えている。しかし、その多くが「半屋外的な空間」での採用であった。また、単に膜を張るだけでは、屋内空間に求められる「屋根性能」を確保できない。

こうしたなか、「ETFE 膜」は仕上重量的な観点で「軽やかさ」に適合していた。そのうえ「自己消火性」=ETFE 膜に飛び火しても「燃え広がらずに鎮火する」という特性は災害時の安全対策の観点からも魅力的な特性と考えた。そこで、ETFE 膜の屋根材としての活用に向けた技術的な課題の抽出、対応策の検討を急ぎ開始した。



建物コンセプト「海」と「空」



「屋根」機能を確保した

ETFE クッション構造膜屋根

■課題1：屋根耐火への対応の必要性

「自己消火性」により ETFE 膜自体の燃えカスは床面に落下しないが、ETFE 膜に当たった火種は鎮火せず、そのまま床面に落下する可能性があった。そこで、「屋根」機能として「屋根耐火」という法的要件の対応策が必要条件となった。

■課題2：屋根断熱対策

羽田空港では従来、ロビー等の大空間の屋根には金属屋根を採用し屋根断熱の性能を確保してきた。そこで、ETFE 膜の活用においても、従来の金属屋根同等程度の断熱性能の確保が必要条件となった。

ETFE 膜屋根の外観

■国内初の ETFE クッション構造膜による「新しい屋根システム」

「国内に ETFE 膜を公共施設の屋内屋根として採用した事例がない」このため、ETFE 膜に詳しい関係者の皆様に技術的及び法的な観点から何度も相談にのっていただいた。結果、その性能確認と証明方法を整理し、第三者機関による性能確認の実施までこぎつけることができた。ETFE 膜の屋根への活用を提案して以降、最も困難なフェーズとなった。

性能確認においては、建材試験センター試験用のサンプル作成、実物大のモックアップ製作を経て、何度となく実証実験を行い、性能をひとつずつデータ化していく作業を行った。

第三者機関による確認では、日本膜構造協会による技術審査を実施していただいた。国内事例がないために、審査に必要なデータの収集やできる限り審査期間を確保していただいたおかげで、屋根機能として「ETFE 膜屋根」を具現化することができた。

具体的には、3層の膜と2層の空気層からなる「クッション構造膜」を採用し、設計と併せて「屋根耐火」と「屋根断熱」の性能を確保している。

■機能からデザインへ 「明るく」「開放的な」ロビー空間

屋根断熱性能の確保のため採用した反射塗装がメタリックグレー系であるため、ETFE 膜がグレー色に見え、空間が重たく感じるデメリットがあった。そこで、全体的に白いイメージで統一し、屋根を感じさせない「軽やかさ」の演出の工夫を行った。具体的には、外部の ETFE 膜と反射塗装との間に白塗装を挟み込むといった「塗装の重ね合わせ」技術を採用した。結果、外部からは反射塗装が目立たず、さらに「外光反射によるまぶしさ防止」といった管制塔へ見え方配慮の観点からも、ある一定の効果を目視で確認することができた。

また、反射塗装技術で日射をコントロールによるロビー空間の空調負荷の低減にも寄与している。

一方で、屋根全面で自然光を柔らかく取り込むことで、昼間照明が不要となっている。このように、当初の「安全・安心」に加え、省エネといった「環境面」にも配慮した「新しい屋根システム」の構築まで実現することができている。



ダイナミックなフレーム「サークルトラス」



チェックインロビーの内観

屋根としての ETFE 膜の可能性

■空間全体の明るさ感を与える ETFE 膜屋根

ETFE クッション構造膜の採用に伴い、天井仕上側にも ETFE 膜が表出している。これは当初の「内外仕上の一体化」「仕上下地削減による軽量化」の見込み通りである一方、金属パネルやボード仕上材と異なり、自然光を幾分か透過する ETFE 膜により空間全体に「明るさ感」を与える設計となっている。

■「ETFE 膜への特殊印刷」技術を活用した日射コントロール

透明な ETFE 膜単独では遮熱性を確保することはできない。また、ロビー空間の快適性の確保のため、従来羽田空港で多用してきた金属屋根と同等の日射遮蔽率を確保する必要があると考えた。

そこで、外光を反射する塗装技術を外部側 ETFE 膜の内側に行うことで、目標値の日射遮蔽率の確保に成功している。このように、快適性確保のため、「明るさ感」に加え「日射遮蔽率」といった定量的な観点からも設計を行っている。

ETFE 膜の「麻の葉」プリント

■伝統文様との融合 スキマのデザインモチーフは「麻の葉」文様

一様に明るいロビー空間の実現のため、ETFE 膜塗装を白基調としている。しかし実際、100%白塗装に塗り上げることは「色むら」発生観点から技術的に難しい。

前述した金属屋根同等以上の日射遮蔽係数を確保のため、3層の膜での熱工学性能の検証結果も加味し、ETFE 膜を「90～96%白塗装」で調整した。このため、残り4%～10%の非塗装部分を膜全体で均一に見せる工夫が必要となった。そこで、日本の伝統文様である「麻の葉」をモチーフに非塗装部分をデザインしている。

麻はまっすぐに伸び、生命力がととも強く、「すくすく育てほしい」といった未来へ向けた想いを込めて、昔から赤ちゃんの産着などに「麻の葉」文様が多用されている。

新しい国際線施設を軸に、将来にわたる羽田空港と全ての空港利用者の方へ、同じような想いを重ね、この文様を採用している。いくつかデザインをする中で、交差する線が均一な白とならないため、少し手を加えている。さらに、外部と内部の ETFE 膜は、それぞれ必要とされる性能が違うため見せ方も変える工夫を行った。具体的には、外部 ETFE 膜の白い「麻の葉」文様のラインはわずか 0.7 mm の反射塗装ラインで構成した。一方、内部 ETFE 膜は同じ白い「麻の葉」文様であるが、0.7 mm のラインは塗装せず ETFE の素材の透明度を利用している。

ETFE 膜面の輝き

■日本伝統の技術継承への取組

この内外 ETFE 膜の「麻の葉」文様の見せ方を変えることで、チェックインロビーから天井を見上げて歩くと ETFE 膜面に、少し輝きをみてとることができる。これは、東京手書友禅、伝統工芸士の先生にお話しを伺ってヒントを得た見せ方でもある。着物の染の技術、色の遊び方の技術、四十八茶百鼠のような工夫、日本ならではの粋な演出をこの ETFE 膜へ「麻の葉」文様のデザインとして取り込むことは、日本伝統の技術継承にもつながると考えている。



建物の夜景

大屋根架構「サークルトラス」の構造計画



施工時状況写真

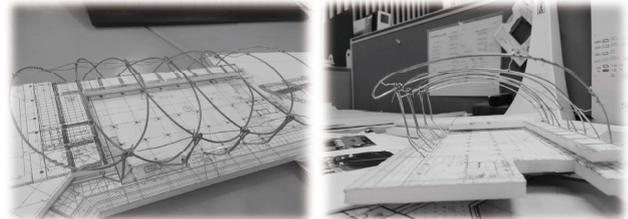


3D プリンター模型

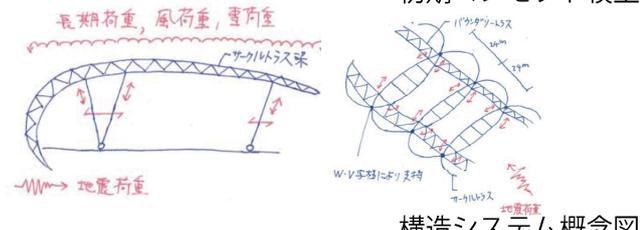
■大屋根架構の構造計画

大屋根架構は既存建物に一体増築されている。一部既存建物上に長辺 120m、短辺 62m の空間を覆う屋根として計画された。既存建物に影響の少ない構造計画とした。屋根材は軽量の ETFE 膜を使用し、既存建物上部の柱脚の接合をピン接合とし既存柱に曲げモーメントを伝達しない方針とした。また片持ち形式を意図し、大屋根架構の長期重量は新設建物側で 6 割以上を負担する計画とした。

針金で作られた模型が「サークルトラス案」の原型である。ETFE 膜の特徴である下地鉄骨を長尺方向にスパンを飛ばせるという点を利用し、下地鉄骨のないフレームで大空間を覆う計画とした。



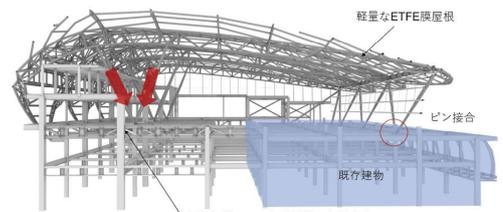
初期コンセプト模型



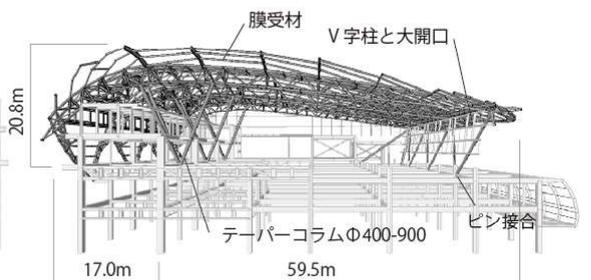
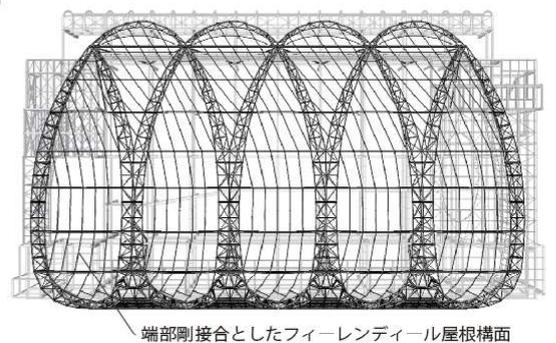
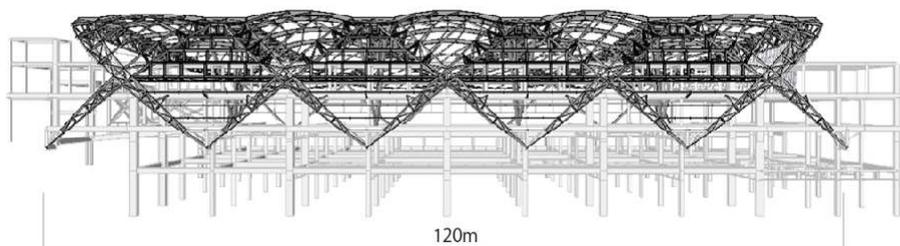
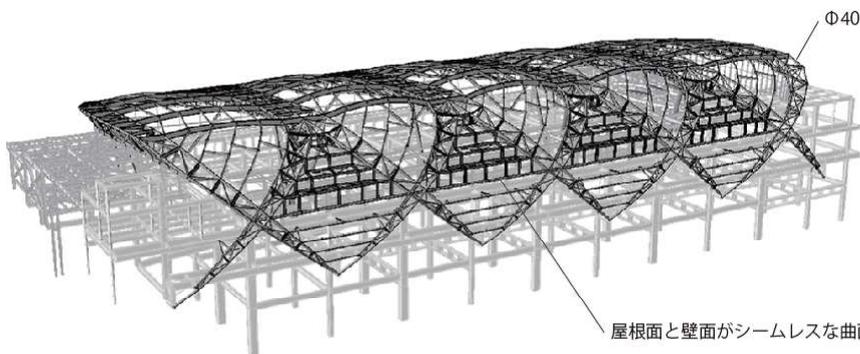
構造システム概念図



施工時状況写真



既存一体増築の考え方



構造モデル

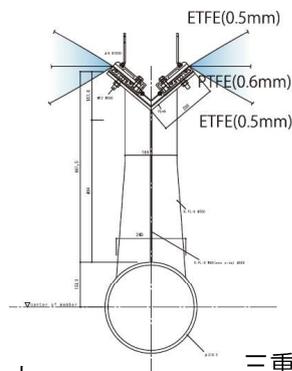
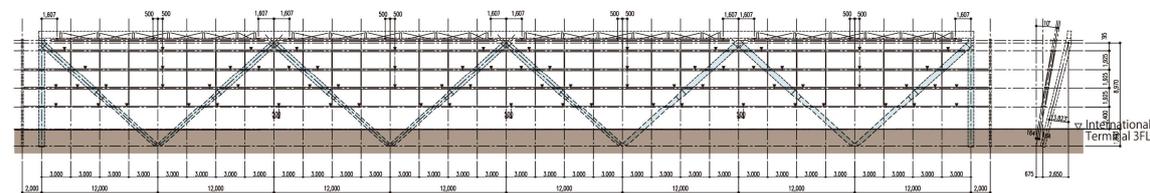
サークルトラスのディテールと大開口部と ETFE 膜

■3次元フレーム「サークルトラス」

サークルトラスは平面上に 24m スパンの円を半スパンずらして、高さ方向で折り曲げ、屋根面と壁面が一体となる曲面で構成している。円は上弦材 2つ、下弦材 1つの曲線上の立体トラスで構成している。上下弦材はφ400mm の鋼管 (STKR490 材) を用いている。膜受け材により、それぞれの円が一体となるように構成した。水平力に対して V 字柱により抵抗する計画としていた。円弧トラスにより強固な面内及び面外剛性で、地震動に対して屋根面加速度が 1200gal 程度である。柱はφ900~400mm のテーパ鋼管を採用し、応力に応じて先端を絞った形状を採用した。柱脚は球座形状の鋳鋼とした。トラスの接合部は内装材が取付くこと、製作・施工性の向上性を図り、リングプレート形式とした。膜下地材は膜反力による捩れモーメントに対し、その端部を剛接合とし、フィレンディール架構として面内剛性を確保している。



ETFE 膜施工写真



三重膜構造

大開口部のディテール

Compression

Tension

リングプレート

■大開口の構造計画

大開口部はボックス断面の耐風梁にガラスを取り付ける形式とした。鉛直材を床レベルまで下さないことで、視線が妨げられないように計画した。耐風梁は最大で 18m あり、吊材を設置している。吊り材は圧縮材; ■-60x60、引張材; φ-25 とした。屋根架構が変形してもガラスが破損しないように上下方向に 75mm のクリアランスを設けている。

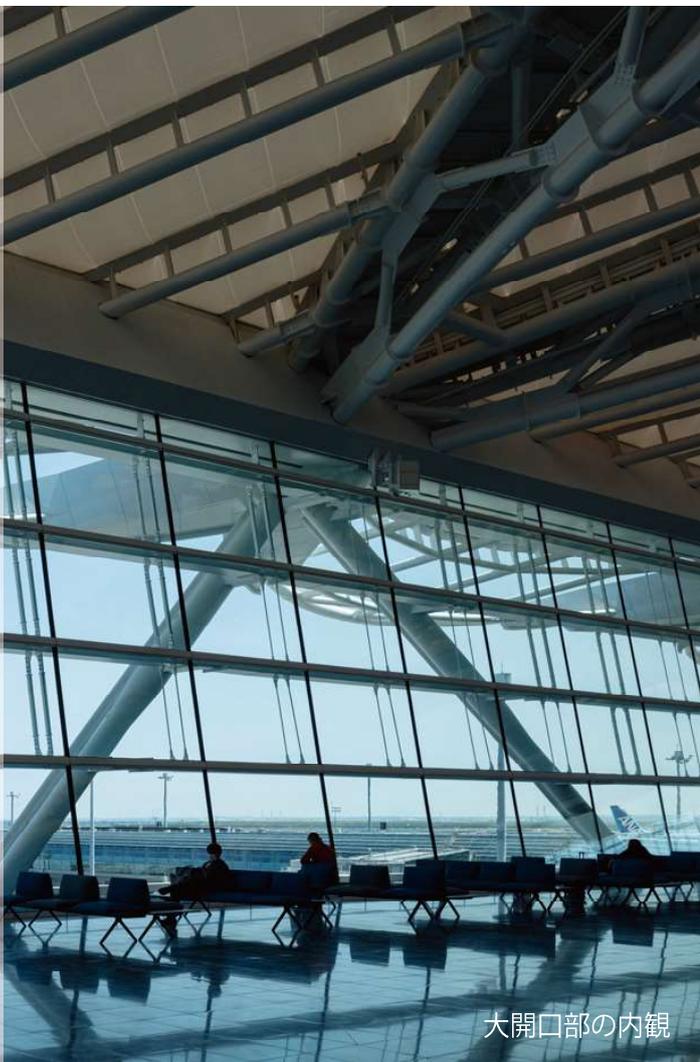
■三重膜構造

ETFE 膜は耐火性能を満足させるために内外 ETFE 膜に不燃膜を加えた三重膜構造とした。デフレート時のポンディング時に倒壊しないことや耐火時の鉄骨骨組みの安全性を確認している。

■今後の展開

ETFE 膜がもつ「自己消火性」に着目し、非常時だけでなく平時から「利用者の安全と安心を確保」した新しいロビー空間を構築した。また、既存一体増築における厳しい荷重条件下で ETFE 膜の軽量性を生かした計画など、ETFE 膜の特性を最大限活用し、本計画を実現している。

多様化かつ激甚化する大規模地震がいつ発生してもおかしくない昨今において「公衆の安全・安心」を最優先課題と設定し設計に取り組むことで、機能面では ETFE 膜を活用した新しい「災害に強い空港設計手法」の提案と、自然光の取り入れ、均一な明るさ感の確保といった「環境面配慮」につなげることができた。また、意匠面では、日本伝統文様と ETFE 膜への塗装技術を掛け合わせることで「日本伝統の技術継承」にも効果があったと考えている。これらが、「しなやかさ」「軽やかさ」をもった「持続可能な空間」を実現につながることを期待しています。以上



大開口部の内観