

膜構造用ETFEフィルムの展開

Expansion of application for the membrane structure using ETFE film

有賀広志
Hirosi Aruga

ETFE（エチレン-テトラフルオロエチレン共重合体）フィルムを使用した膜構造物がスポーツ施設を中心に、世界中で建設されている。ETFEフィルムは透明性・耐候性・引裂き伝播強度に優れた材料であり、日本においても2014年10月に、日本の建築基準法第37条の指定建築材料に、「膜構造用フィルム」の категорияが設けられた。

膜構造用フィルムは、単なる雨を遮る屋根ではない。「音響や熱・光特性を制御した、快適な空間を提供する」ことが、この材料が広く用いられていく必須条件であると考えている。本稿では材料の性能基準、試験方法について解説すると共に、快適な空間という課題に対する取り組みについて述べる。

The membrane structures using the ETFE film are applied for many kinds of construction around as sport facilities all over the world. ETFE film has superior transparency, weatherability, and tearing strength. The category of "the film for membrane structure" was established to construction materials of Japanese Building Standard Act Article 37 in Japan in October, 2014. The ETFE structural film is not just a roof shielding rain. AGC believes that "To provide the comfortable space by controlling sound, heat, and light properties." is indispensable prerequisites of widely applications.

In this report, the performance criterion of the material, test methods, and the AGC efforts for providing comfortable space are explained.

はじめに

膜構造用フィルムが、官報により日本の建築基準法第37条の建築材料の指定を受けたのは、2014年10月28日である。具体的には、膜構造用フィルムの具備すべき性能評価項目が書き加えられた改正告示第1446号が施行された。膜構造用フィルムは、ガラスクロスやポリエステル繊維を基材とする膜材料に比較して、光の透過率が高く、耐候性が良いなどの特異な特徴がある。海外においては既にスポーツ施設等に用いられていたが、日本においても屋根・壁材料として使用可能となるための第一歩を踏み出した。スポーツ施設や倉庫などに自由に使用出来るためには、防火上支障のない外壁及び屋根の構造を定めた告示第1443号や、膜構造の建築物の構造方法に関する技術的基準を定めた告示第666号にETFE（エチレン-テトラフルオロエチレン共重合体）フィルムに関する項目が記載される必要がある。改正告示第1443号は2014年10月にパブリックコメントの募集があり、旭硝子はETFEフィルムの厚みに関する基準を、0.8mmではなく、1.5mmに緩和するパブリックコメントを提出した。日本膜構造協会も、独自で実施した厚いETFEフィルムを用いた飛び火試験の試験結果を国交省に報告しており、改正告示第1443号は、5月29日、1.5mmを超えない範囲でETFEの使用が許可される内容となった。告示第666号は、膜構造物の実際の建築にあたって構造計算や施工方法を定めたものであるが、この告示は建物の安全性に大きく係る。この改正告示は、まさに議論されている状況であり、改正告示第666号が施行されるまでは、具体的な個々の建物に対しての、防災・構造の評価が行われる。構造設計の適切さや、火災の際の屋根の耐性などについて問題がないかを実験により検証する作業である。これらの基礎データの提出に、旭硝子もフィルムメーカーとして協力している。建築材料に使用出来る建築基準法第37条の仲間入りは果たしたものの、それを「どこで」、「どのように」使えば安全なのか?の法律整備がまさに現在進行形で動いている。

日本において、長くETFEフィルムを屋根に使用することの妨げとなっていた、燃え抜けの問題については、「不燃性の物品を保管する倉庫」に関する告示（第1434号）の改正がなされた。従来不燃性の物品を保管する倉庫の屋根は、「燃え広がらなければ燃え抜けても良い」こととなっていたが、その倉庫に「観覧場」が新たに加わることが、5月29日官報にて報告された。これにより、競技場の屋根は不燃性の座席を用いれば、ETFEが使える環境となった。

旭硝子は、自社のETFEフィルムからなる「Fluon ETFE FILM」4品種が、改正告示第1446号を満たした膜構造用フィルムであることを、10月末に国交省の指定性能評価機関である（一社）日本膜構造協会（以下、膜構造協会という。）に申請した。

そして翌年3月5日国交省大臣よりこのカテゴリにおける最初の大臣認定を取得した。

本報告書では、（1）膜構造フィルムが持つべき特性について定めた国交省の改正第1446号告示、及びそれを更に補填した膜構造協会の試験方法・合格値、（2）膜構造フィルムの強度に関する考察、（3）膜構造フィルムに要求されるその他の性能について報告する。

1. 膜構造の構造形式

膜構造は、骨組膜構造、サスペンション膜構造、空気膜構造の構造形式に分類される。

骨組膜構造とは、鉄骨などの架構に膜材料を張ったもので、パネルの大きい場合にはフレームや補強ケーブルなど小割にする場合がある。サスペンション膜構造には構造安定化の主部材にケーブルやロッドなどの張力材が用いられている。また空気膜構造とは、膜で覆われた内部の空間に空気を送り込み膜材料に張力を与え、外荷重に抵抗したものである。

実際にはFig.1のように、中間的な構造も存在する。構造用フィルム膜（ETFE）は、空気膜構造と考えられがちであるが、骨組膜構造に分類される。ETFEのクッション方式は空気を用いているが、全体架構が空気に依存しない（空気が抜けても架構が自立）ためである。

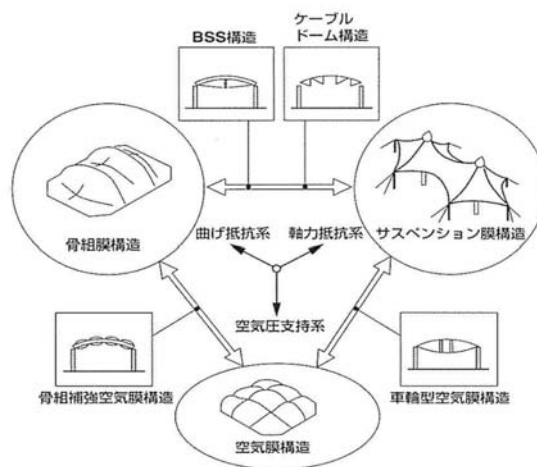


Fig.1 Structure classification of membrane structure

2. 膜構造フィルムが持つべき特性について定めた国交省の改正告示第1446号

建築基準法第37条では、建築物の基礎主要構造部その他安全上、防火上又は衛生上重要である部分に使用する建築材料を指定している。その18項の、従来の膜材料、テント倉庫用膜材料に、膜構造用フィルムが追加された。膜構造用フィルムは、世界的にはETFEフィルムが使用されているが、今後、ETFEを超える材料の出現も期待されていることから、改定告示第1446号にはETFEとは明記されていない。

18項に該当する材料の概要をTable 1に示す。

膜材料A種の材料構成は、ガラス繊維の基布とフッ

素樹脂（おもにPTFE）のコーティングからなり、不燃性、高強度、耐久性、高強度、防汚性などが特徴である。溶融状態から微細な直径（3.3~4.05 μm ）に引き出されたガラス繊維を束ねて、撚りをかけた糸同志をさらに撚り糸として、タテ糸とヨコ糸に織り込んだ基布に、フッ素樹脂をコーティング（おもにディッピング法）、焼成し、この操作を数回繰り返すことにより製造する。材料認定はH12年建設省告示第1446号に規定されている試験（10項目）および使用環境条件に関連する品質基準に対する材料性能評価にもとづき、大臣認定を受けている。また、「発熱性試験・評価方法」による性能評価が行なわれ、不燃材料の認定を受けている。国内においては、1984年より30年（海外では40年）の実績がある。当初は、耐候性などに不確定な要因もあり、旧38条のもと、建物付近での暴露試験体を付帯条件として設置していたが、材料経年劣化は当初の予想よりも良好であることが確認されている。東京ドーム以降、ドームやスタジアムをはじめとするスポーツ施設から商業施設、近年では駅舎や駅前広場など多岐にわたる実績がある。

Table 1 Classification of article 37 Clause 18 (membrane materials , tent warehouses , film)

項目	膜材料A種		膜材料B種	膜材料C種	テント倉庫用	膜構造用フィルム
	A1, A2	A3				
質量	$\geq 550 \text{ g/m}^2$	$\geq 500 \text{ g/m}^2$	$\geq 500 \text{ g/m}^2$	$\geq 400 \text{ g/m}^2$	$\geq 160 \text{ g/m}^2$	
基布質量	$\geq 150 \text{ g/m}^2$		$\geq 100 \text{ g/m}^2$			—
厚さ	$\geq 0.5 \text{ mm}$			$\geq 0.45 \text{ mm}$	$\geq 0.09 \text{ mm}$	
織物素材	ガラス繊維		合成繊維	指定なし	—	
代表樹脂	PTFE	PVC	PVC	指定なし	ETFE等	
防火性能	燃え広がらず燃え抜けない	燃え広がらず燃え抜ける	燃え広がらず燃え抜ける	指定なし	燃え広がらず燃え抜ける	

膜構造用フィルムの大きな特徴は、一般的な膜材料の基布とコーティングからなる構成でなく、単一素材のフィルムであることである。樹脂組成は限定されていない。よって、後述するTable 2及びTable 3を満たす材料であれば、どんな樹脂であっても認可される可能性がある。その中で代表的な樹脂はETFEである。このETFE樹脂を樹脂成分としては100%使用し、溶融押出にてETFEフィルムを成型する。ETFEの場合、透明、カラー、印刷、梨地などの種類があり、透過率、遮光率、デザイン性をお客様ニーズに合わせる事が可能である。また厚みも設計上の要望に応じ可変で有り、最大500 μm である。ETFE膜を使用した構造物は1980年代から欧州にて動物園、植物園で採用開始された。2006年にドイツワールドカップ用のスタジアム（2件）に採用されて以降、世界的スポーツイベントに採用されている（2014年ソチ五輪 開会式メインスタジアム等）。難燃性としては、JIS A 1322防炎1級/DIN4102 Class B1/DIN EN13501

B-s1,d0 として認定されている。

告示第1446号は、国交省が材料としての最低行うべき試験項目と試験方法を定めたものであり、その基準値は、指定性能評価機関である膜構造協会により定められている。その試験項目をTable 2に示した。また、告示に追加すべき項目として、膜構造協会が独自に定めた13項目の試験及びその合格値をTable 3に示した。材料認定は2段階で進み、最初は全項目の試験に関する基準値の審査が膜構造協会で行われる。そこで合格した材料は、Table 2に示した告示の項目に加え、Table 3の中で申請者が特に大臣認定に加えたい項目を選択して国交省に申請する。大臣認定されるのは、各試験に関する基準値だけではなく、工程検査の項目、原料の製造場所、フィルムの製造場所、製造工程、検査設備、品質管理体系等、品質が維持されるための仕組みも対象となっている。

Table 2 Quality item of the film for membrane structure (1446 Notification of Ministry of Land, Infrastructure and Transport , and the pass level of Membrane Structures Association of Japan.)

品質項目	単位	膜協品質基準
単位質量	g/m^2	160以上
厚さ	mm	0.09以上
引張強さ	N/mm^2	35以上
伸び率	%	200以上
伸び率10パーセント時の応力	N/mm^2	15.0以上
引張強さ	N/mm	130以上
引張クリープによる伸び率	*室温 $\times 1/2$ 荷重 $\times 24$ 時間	% 15以下 破断しないこと
	**150 $^{\circ}\text{C} \times 1/10$ 荷重 $\times 6$ 時間	% 15以下 破断しないこと
		—
引張りの繰り返し荷重を受ける場合の引張強さ及びその保持率	N/mm^2	— 70以上
折り曲げの繰り返し荷重を受ける場合の引張強さ及びその保持率	N/mm^2	— 70以上
外観	—	傷、ひび割れ、破れ及び折れじわ等の耐力上の欠点がないこと

*1/2荷重とは伸び率10%時の応力の1/2 **1/10荷重とは伸び率10%時の応力の1/10

Table 3 Quality item and pass level of the film for membrane Structure film determined by Membrane Structures Association of Japan.

品質項目	単位	膜協品質基準
耐摩耗性	—	剥がれ、ひび割れその他異常のないこと
	mg	10以下
耐候性	破断引張強さ	N/mm^2 —
	初期に対する保持率	% 70以上
	破断伸び率	% —
	初期に対する保持率	% 70以上
耐水性	—	出水なきこと
耐寒性	—	異常なきこと
耐薬品性	—	異常なきこと
150 $^{\circ}\text{C}$ における引張強さ及び室温の値に対する保持率	N/mm^2 %	— 20以上
加熱寸法変化 (150 $^{\circ}\text{C} \times 10$ 分)	%	伸縮率の変動幅が ± 10 以下
接合部引張強さ及び伸び率10パーセント時応力に対する保持率	N/mm^2 倍	— 伸び率10%時応力の1.25倍以上
接合部耐剥離強さ	N/cm N/cm	— 初期引張強さ \times 厚み $\times 0.2$ 以上
150 $^{\circ}\text{C}$ の接合部引張強さ及び室温の値に対する保持率	N/mm^2 %	— 接合部初期引張強さの20%以上
接合部引張クリープによる伸び率	*室温 $\times 1/2$ 荷重 $\times 24$ 時間	% 15以下 破断しないこと
	**150 $^{\circ}\text{C} \times 1/10$ 荷重 $\times 6$ 時間	% 15以下 破断しないこと
		—
接合部耐候性	破断引張強さ	N/mm^2 —
	初期に対する保持率	% 70以上
伸び率2.5パーセント時の応力	N/mm^2	10.0以上

3. 改正告示第1446号に関する考え方

改正告示第1446号のTable 2及び、膜構造協会独自の追加性能試験Table 3には、膜材料としての特徴的な試験項目がいくつかある。Table 2では、10%伸び時応力、室温において伸び率10%時の応力の1/2を24時間載荷した際の伸び率、150℃において伸び率10%時の応力の1/10を6時間載荷した際の伸び率等のクリープ、引張りの繰り返し荷重30万回後の引張り強さ、折曲げの繰り返し荷重1000回後の引張り強さが挙げられ、Table 3では、耐候性試験、接合部引張り強さが挙げられる。また、膜材料のB種やC種は80℃における試験項目が多いのに対し、膜構造フィルムは高い耐熱性を有していることから、高温試験の温度はA種膜材料と150℃となっている。従って、PVF（ポリフッ化ビニル）、PVdF（ポリフッ化ビニリデン）、THV（テトラフルオロエチレン-ヘキサフルオロエチレン-フッ化ビニリデン共重合体）、あるいは一部の低融点タイプのETFEフィルムといったフィルム等、融点が240℃以下のフィルムは使用できないと思われる。

次に、膜構造フィルムに要求される機械的性質を理解する上で、最初にETFEフィルムの設置方法について述べる。

3.1 ETFEフィルムの設置方法

ETFEフィルムの設置方法としては、テンション方式と、クッション方式がある⁽¹⁾⁽²⁾ (Fig.2)。前者は、空気供給設備不要であることが特徴であり、後者はスパンが広いこと、また断熱性が良好であることが特徴である。

断熱性については、空気層の効果が大きく、断熱性評価の指標である熱貫流率を比較した場合、外側熱伝達係数を $21 \text{ (W} \cdot \text{k}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$ 、内側熱伝達係数を $9 \text{ (W} \cdot \text{k}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$ 、中空層熱抵抗を $0.125 \text{ (m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}\text{)}$ として計算し、 $250 \mu\text{m}$ の単膜の熱貫流率は $6.3 \text{ (W} \cdot \text{k}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$ であり、2層膜では、 $3.5 \text{ (W} \cdot \text{k}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$ 、3層膜は $2.4 \text{ (W} \cdot \text{k}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$ となる。フィルムの厚みの寄与分は0.1程度であり、 $100 \mu\text{m} \sim 500 \mu\text{m}$ の範囲で大きな違いは生じない。実際に、ラボレベルで熱伝導率計を使用し、フィルム材料の違いや空気層の有無による熱貫流率の測定を行なったが、空気層の効果は極めて大きい⁽³⁾。

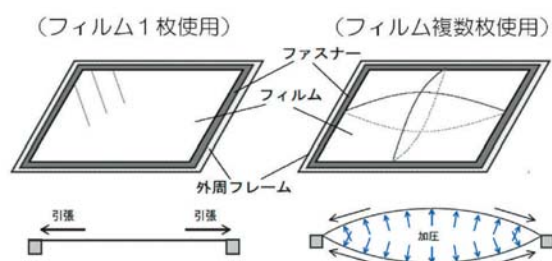


Fig.2 Tension type and cushion type

3.2 テンション方式の耐力

Fig.3は $250 \mu\text{m}$ ETFEフィルムのStress Strain (SS) カーブであり、伸び率25%までの伸び率と応力を拡大して示した。なお、グラフ内の小さなグラフは、破断までのSSカーブを示している。尚、このグラフから得られる値などは、旭硝子のフィルムを使用した場合の一例であり、その値はETFEフィルムメーカーにより異なること、また、統計学的に求めた平均値ではないことを最初に明記する。

金属材料のように、材料の破断を材料の耐力として考えればETFEフィルムの破断時の応力は60MPaであるが、その際には450%も材料として伸びているために、建物の外観が著しく変形していることは明らかである。テンション方式（単層膜）として使用する場合には、フィルムが伸びてもまた元に戻る弾性域（1次降伏強度）以下で設計すべきである。Fig.3では接線同士が交わる約16MPaがそれにあたる。ETFEフィルムの弾性域（1次降伏強度）は、伸び率で言えば、1.5%~2.5%程度の所にあり、この領域以上に延ばされてしまったフィルムは元の形に戻ることはない。一度大きな荷重を受けて伸びてしまったフィルムは弛んでしまい、その窪みに雨や雪がたまっていくために、加速度的にフィルムの変形を生じ、最後にはフィルムの破断もしくは、骨材の変形を生ずるからである。1次降伏強度と応力には

$$1 \text{ 次降伏強度} \approx \text{伸び率} 2.5\% \text{ 時の応力} \quad (1)$$

の関係があるが、1次降伏強度は、接線の引き方により伸び率2.5%時の応力よりも小さい値になることがある。膜構造協会の独自の性能評価項目にも、2.5%伸び時の応力は規定されており、この値は、この材料をテンション方式として使用した場合の、許容応力のパラメータになると考えられる。

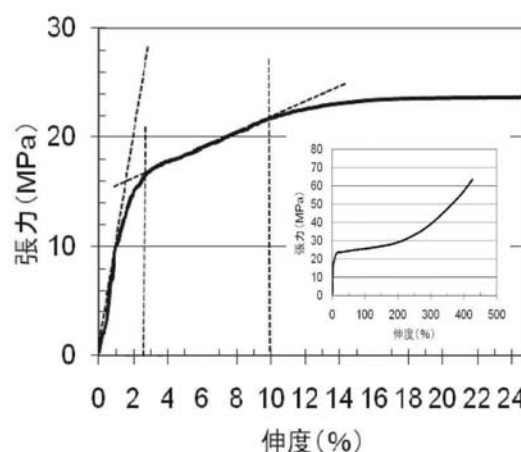


Fig.3 SS curve of $250 \mu\text{m}$ of ETFE film

実用上更に安全サイドに立てば、この16MPaという値はフィルムの一般的な引張り試験である引張り速度 200 mm/分 で変形させた場合の値である。膜構造では積雪などで一定荷重で長時間応力が発生していることを考えれば、クリープ伸びを考慮する必要がある。

り、更に耐力は小さな値となる。Fig.4に示したように、12MPaの荷重をかけた際には、短時間で8%程フィルムは伸び、更に伸び続ける様子がわかる。1次降伏強度の約半分の8MPa程度であればクリープ伸びは一定の所で止まることが分かる。実際に長時間の応力がかかるのは積雪荷重であり、この際は0℃付近の温度であるから、この0℃の際の2.5%伸び強度は20MPa以上、クリープ伸びが止まるのは10MPa以上である。膜構造協会は10%伸び時の応力の半分の荷重で24時間载荷した場合、伸び率が15%以内であることを合格としたクリープ伸びの基準値等を定めているが、これは、この材料がクリープ伸びという性質を有しているからである。

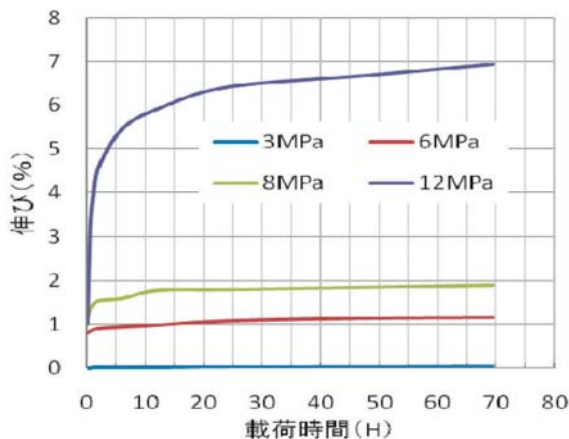


Fig.4 Creep test (23 °C)

参考までに、農業用ハウスなどのフィルムは、テンション方式である。日本においては、支柱と支柱の間隔（スパン）は50cmか60cmとなっている。ここに強い風が吹いた時を考えれば、このスパンが狭いほどフィルムの変形が少ないことが想像出来るが、このスパンが短ければ、ハウスは骨材だらけになってしまうハウス内に光が入りにくくなる。仮に30m/秒の強い風が吹いている場合を考えた場合、速度圧は（Pa）は、風速の二乗に比例し、次式で示される。

$$0.0625 \times (\text{風速})^2 \times 9.8 \quad (2)$$

フィルムは、551Paの圧力で延ばされることとなる。この際に発生するフィルムの応力は、次式で示される。ここにおいてtは、フィルムの厚みである。フィルムにかかる応力は、次式で示される。

$$\text{応力 } \sigma \text{ (N/mm}^2\text{)} = w \text{ (圧力: N/mm}^2\text{)} \times R \text{ (曲率半径: mm)} / t \text{ (mm)} \quad (3)$$

Fig.5にスパン50cm、フィルム厚み100 μ m時の、風速とその際にフィルムにかかる応力についてまとめた。風圧を受けた場合は、フィルムは弧状に変形する。Fig.5に示したように、100 μ mのフィルムが、ライズ4cmまで変形した場合（ライズ比4/50=8%）、曲率半径Rは1.60m、フィルムの伸びは1.64%）のフィルムの応力は8.82MPaであり、ライズ5cmまで変形

した場合（ライズ比5/50=10%）、曲率半径Rは1.30m、フィルムの伸びは2.5%）のフィルムの応力は7.16MPaである。フィルムは、伸びて丸く変形する（曲率半径が小さくなる）ことにより応力が小さくなるが、23℃における長期クリープによって求められた応力上限を、Fig.4に照らし合わせて仮に8MPaとした場合、フィルムは約2%程度の伸びで止まり、大きく変形することはない。風が取まれば、元の形状に戻ることが可能である。

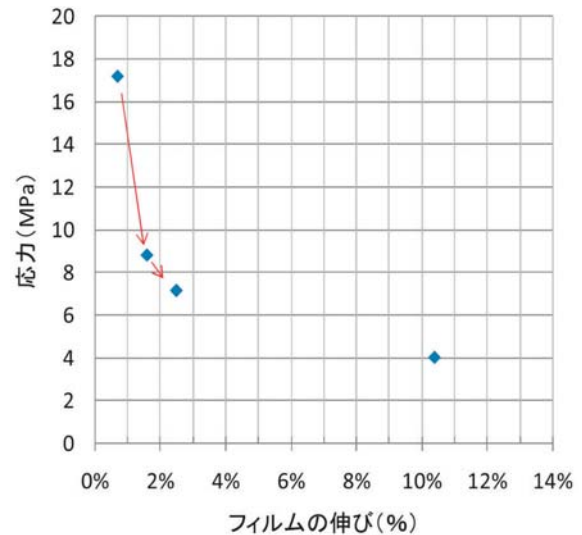


Fig.5 Calculation of resistance to wind pressure in green house

また、フィルムの変形という面では、フィルムの線膨張係数を考慮する必要がある。ETFEフィルムの場合、約 1.3×10^{-4} 程度の線膨張係数を持つため、0℃→80℃では、1%程フィルムは膨張する。たわみが無いように張ったフィルムも、フィルム温度の上昇に伴いたわみが発生する。よって、高温時の弛みの防止、あるいは、応力発生時のフィルムの変形の低減のために、展張時に張力を導入し、1%程度以上伸ばした状態で展張するのが好ましい。

3.3 クッション方式の応力

膜構造物の強度を考える場合、クリープの現象は重要である。しかし、内部に空気を導入する二層膜においては、弾性域を超えて積雪荷重や風圧がかかってもそれを押し返す空気を注入出来れば構造物としての形態を取ることが可能である。もちろん、フィルムは伸ばされているので初期の形とは異なり、より丸みを持った形状になる。

大きな張力をうけて伸びたフィルムは、延伸されたことになり、その伸びた点を始点として、また弾性域を形成するため、許容される応力はより高くなる。伸びた分だけ空気を導入すれば良いことになる。改定告示第1446号に伸び率10%時の応力が試験項目に導入されたことから考えて、クッションタイプの許容される応力は、伸び率10%時の応力まで拡大されると予想される。これは、この領域までは新たな弾性域が形

成されることが確認されている領域だからである。伸び率10%時の応力は2次降伏強度より2MPaほど低い値であり、Fig.3のグラフでは、伸び率10%時の応力は22MPaである。

旭硝子のフィルムが採用されたドイツのアリアンツアリーナやブラジルのレシフェスタジアムなどは、フィルムが2枚あり、その中に空気を注入するクッション方式である。これらはテンション膜での限界として考えられる8MPaの計算では考えられないほど広いスパンを採っている。

3.4 引裂き強度

フィルムに求められる機械的な性能は4つある。降伏強度が高いこと、クリープ耐力が高いこと、引裂き強度が高いことであり、4つ目は接合部の強度が高いことである。降伏強度やクリープ耐力が高ければ、より大きな積雪や強風に対しても変形しない。また、その接合部の強度の信頼性（接合部破断強度）も高い方が好ましい。

引裂き強度というのは、フィルムが一部裂けた場合の、その引裂き伝播強度を指している。万が一、飛来物、投石や鳥などによってフィルムに穴が開いた時、その穴が広がってしまうのかその穴のまま広がらずに留まるのかは大きな違いである。小さな穴で留まれば、補修テープにて穴を塞ぐという応急処置での対応も可能である。その後は、定期点検における継続的な観察などが必要となる。Fig.6は、2000Paの空気を注入した200 μ mのETFE膜に、カッターにより2cm程の傷を入れた際のフィルムの傷の広がりを示したものである。ETFEフィルムは傷が広がらないという優れた特性を有していることが分かる。



Fig.6 Cutter scratch and its spread

Table 4に種々のフィルムの引裂き強度の値と1次降伏強度を示した。引裂き強度には、直角引裂き強度と引裂き伝播強度（エルメンドルフ引裂き強度）がある。PETフィルムは双方の引裂き試験で強度が弱い、電に対する耐性が強く、穴があく可能性が比較的低いため日本では農業ハウスの被覆資材として用いられている。また、PVdF系の材料は、1次降伏強度が高く耐風圧や耐積雪性に優れた材料であるが、引裂き強度が低い、農業フィルムや膜構造フィルムには用いられていない。展張時のフィルム固定のためのビス孔がきっかけで、フィルムに亀裂が入り、それが大きく拡大するからである。

国交省の改定告示第1446においても、この引裂き強度が、試験項目に取り上げられている。試験方法は、直角引裂き法と言われる試験方法であり、JIS K7128・3（プラスチックフィルム及びシートの引裂き強さ試験方法—第三部：直角形引裂法）に準拠し、130N/mm以上が合格値である。ほとんどのフッ素系材料は合格する。この方法は、農業被覆資材で用いられている引裂き伝播強度（エルメンドルフ引裂き強度）とは異なる方法である。飛来物、あるいは投石、鳥のいたずらにより発生した穴（裂け）の広がりをみるには、伝播の止まり具合を測定する、エルメンドルフ引裂き強度試験の方が実態に合っている。

Table 4 Primary surrender strength and tear spread strength

ETFE, PVdF系 (100 μ m)	破断 強度	破断 伸度	直角 引裂 強度	引裂 伝播 強度	1次 降伏 強度	引張 り弾 性率
単位	MPa	%	N/mm	N	MPa	MPa
ETFE	67	470	197	24	14	746
kynar 760	98	487	337	1.9	46	1501
kynar760 + PMA20wt%	69	441	256	3.3	33	937
kynar760 + PMA30wt%	64	430	198	4.3	28	1333
kynar760 + MMA40wt%	58	400	175	4.9	23	1144
Kynar2850 (HF共重合)	83	500	301	3	33	846
農業PET (150 μ m)	230	81	58	1	99	4000
農業PO (150 μ m)	35	600	19	10	5	205

3.5 接合部の破断強度

先述したように、膜構造用フィルムは、フィルムの本原反がそのまま使用されることはなく、設計した寸法に裁断されてからヒートシール（熱圧着）により接合し、更に端部にロープで挟み込み骨材に固定される。Fig.7は、旭硝子の鹿島工場の新工務棟に用いた膜構造物であり、大きな六角形枠（対角長さ約2.4m）がフィルムのヒートシールにより構成されていることが分かる。また、Fig.8はその六角形のフィルムユニットの製造工程を示したものである。

接合部破断強度については、テンション方式にしてもクッション方式にしても以下の（4）式の関係が成立している必要がある。この伸び率10%時の応力というのは、クッション方式の際に、設計上安全と考えられるフィルムの最大応力となり得る値であり、この応力よりも接合部の強度が高くないと、接合部から膜が破断することとなる。

$$\text{フィルムの伸び率10\%時の応力} < \text{接合部破断強度} \quad (4)$$

接合部はわずか10mm程度であり、フィルムユニット占める面積割合は5%にも満たないが、この部分のクリープ伸びが極端に大きければ、建物の形状が変わ



Fig.7 AGC Kashima plant new engineering building and the landscape as seen from the inside



Fig.8 Processing step of the film for the cushion

ってしまう。接合部は、ガラス繊維補強のPTFE膜では、FEPフィルムを挟みガラス繊維補強PTFE膜を両側から熱圧着している。よって、ガラス繊維補強のPTFE膜の膜構造における接合部の強度は、FEPフィルムとガラス繊維PTFE膜との密着強度を示している。一方ETFEフィルムの場合は、ETFEフィルム同士の熱圧着である。ETFEの場合、圧着幅による密着強度の違いは少なく、2mm幅～20mm幅において、ほぼ材料の50～70%の破断強度を有している。具体的には30MPa～35MPa程度である。国交省の改定告示第1446号は、材料認定の項目であるため、その接合部に関する取り決めはないが、膜構造協会においてはJIS K7127（プラスチック—引張特性の試験方法—第3部：フィルム及びシートの試験条件）に定められた方法により測定した破断強度が、フィルムの伸び率10%時の応力の1.25倍以上が合格基準となっている。また、この接合部に対してもフィルム単体と同様に、クリープ試験や、耐候性試験が必要である。

3.6 繰り返し荷重30万回後の破断強度

国交省の改定告示第1446号においては、繰り返し荷重を受ける場合の引張強さの基準値が要求されている。膜構造協会では、試験前の破断強度の70%以上を保持することが合格の条件である。試験方法は、最大荷重を伸び率10%時応力の80%以上、最小荷重を一平方ミリメートルあたり2ニュートン以下とし、繰り返し引張疲労試験をロール方向及びロールの直交方向にそれぞれについて30万回実施することとなっている。この30万回は、A種膜と同じであるが、これはA種膜と同等の耐用年数を考えてのことである。伸び率10%時の応力を20MPaとした場合は、2MPaと16MPa間を1秒間に1往復する繰り返しを行うこととなる。伸び率10%時の応力の80%値は、弾性領域を超えた荷重であるため試験中にフィルムが4～7%程伸びてくる。フィルムの厚みによる差はなく、通常は試験後の破断強度は90%程度維持される。

3.7 折曲げの繰り返し荷重を受ける場合の引張強さ

国交省の改定告示第1446号においては、折曲げの繰り返し荷重を受ける場合の引張強さの基準値が要求されている。膜構造協会では、試験前の破断強度の70%以上を保持することが合格の条件となっている。試験方法は、JIS P8115（紙及び板紙—耐折強さ試験方法—MIT試験機法）に定める方法（折り曲げ面は、1ミリメートルの曲率半径とする。）により行い、試験片を1000回往復して折曲げ、その試験片の破断強度を測定するものである。荷重は1平方ミリメートルあたり10N（10MPa）である。通常のA種膜やB種膜は、0.5mm～1.0mm程度の厚みであり、曲率半径3mmで試験する。このMIT試験は、破断に至る回数を求めるのが普通である。

実際のETFEを使用した建築物の固定部の曲率半径は、試験条件の1mmよりも大きい値で設計されている。曲率半径が小さいほど、また試験片が厚いほど、フィルムの折り曲げ度が大きくなり、破断が起きやすくなるが、1000回程度であれば破断を生じることはなく、通常、試験後の破断強度は試験前の90%程度を維持する。

3.8 耐候性

耐候性については、国交省の改定告示第1446号においては具体的に触れられていないが、膜構造協会では、フィルムに対し実暴露10年、あるいは10年相当の紫外線を照射した耐候性促進試験後の、破断強度或いは破断伸び率が初期の70%以上を保持することが合格の条件となっている。また、先述したように接合部にも同様の耐候性試験後の強度保持率を要求している。促進耐候性試験においては、10年相当の紫外線強度として、1350MJ/m²以上の照射であることを膜構造協会では規定しているが、これは一般的なカーボンアーク型促進耐候性試験（S.W.M.）では、5000時間の暴露に相当する値である。試験装置及び暴露温度に関する規定はなく、促進耐候性試験には、S.W.M.に加え、キセノンランプも使用することができ、旭硝子ではS.W.M.とメタルハライドランプを使用している。農業用の100 μ m ETFEフィルムの寿命は15年以上であり、通常の膜構造用フィルムでは200 μ m以上のものが使用されるため、20年以上の寿命が期待されている。旭硝子の実験では、S.W.M.16000時間の促進暴露及び、メタルハライドランプによる10000MJ/m²の紫外線照射後でも90%以上の破断強度、破断伸び度を維持している。

PVFやPVdFなどの材料に促進耐候性試験（紫外線4838MJ/m²）を実施した結果をTable 5に示す。25 μ mのフィルムであり、膜構造用途ではないが、ポリマーの性能を評価する目安になる。PVFやPVdFは、破断伸び度が低下していることが分かる。PVdF系では、HFPを共重合したタイプは伸び度の低下が抑えられているがフィルムの光学特性が変化し、ヘーズの高い白っぽいフィルムに変化している。ETFEは、非常に高い耐候性を有している。

Table 5 The result of the weatherability test of PVF and PVdF

25 μ mクリアフィルム	可視光線透過率及び (ヘーズ) (%)		機械物性維持率 (%) (試験後 ÷ 試験前)		
	初期	試験後	破断強度	破断伸度	1次降伏強度
kynar760	94.3(15.3)	95.1(16.4)	78	49	108
kynar760 + PMMA30wt%	93.8(9.8)	95.1(9.4)	111	63	120
kynar760 + PMMA40wt%	93.8(8.4)	94.6(7.1)	95	43	118
*Kynar2850 (共重合)	94.7(10.6)	88.3(30.8)	88	103	109
ETFE	95.2(3.5)	95.4(3.2)	98	98	110
PVF(市販品)	93.7(7.4)	93.3(10.0)	63	60	100

旭硝子のETFEフィルムが屋外用途に展開されたのは、日本カーバイド社が長期展張型の農業用被覆資材として「自然光エフクリーン」の名称で、1987年販売したのが最初である。既に28年経過している。厚みは60 μ mであり、2015年現在も愛知県の農家において使用されている。展張から22年経過時の光学特性をFig.9に、SSカーブ等をFig.10、Fig.11に示す。

暴露中に砂・小石などの摩擦によりヘーズ（曇度）が4%上昇しているが、可視光線透過率、日射透過率、破断強度、破断伸度、10%伸び応力などはほとんど変化していない。Fig.11を詳細に見れば、特に重要な弾性域（1次降伏強度）も変化も変化していないことが分かる。膜構造に使用する厚い200 μ mのフィルムは、2004年から高知に、2006年からフロリダに屋外暴露を進めているがほとんど変化を生じていない。

屋外耐候性試験の結果で、ETFEフィルムの機械物性が劣化する例は少ないが、カラーリングのために使用した酸化チタン入りフィルムで劣化した例が存在する。これは耐候性の悪い酸化チタンを内部に含有するカラーフィルムであり、実暴露試験においてもわずか12年で破断強度保持率が80%以下に低下した。その写真をFig.12に示す。展張前のフィルムも写真内に示した。赤色のフィルムは色が抜けて透明になっている。また、緑色と青色のフィルムは、遮光性を向上させるために、ごくわずかであるが酸化チタンを含有させたため、暴露後のフィルム外観は白くなっているのがわかる。Table 6の緑と赤のフィルムの例より、ETFE樹脂に対するTiO₂の光活性による悪影響は、フィルムの強度低下と可視光線透過率の低下であり、白化はフィルムの機械強度を低下させていることが分かる。これはTiO₂が周りのETFE樹脂を分解し、分散状態にあったTiO₂がフィルム中で凝集してミクロン単位の凝集粒子に成長し、表層に移動するためである。TiO₂に限らず、光活性を有するフィラーの光活性を低下させるためにはシリカ被覆が有効である。

また、Table 6では、UVカットフィルターとして酸化亜鉛を用いたUVカットフィルム（UVA60 μ m）は、UVカット率の減少という光学特性の変化が見られるが、機械物性は低下していない。この酸化亜鉛系UVカットフィルムは、フッ素樹脂から発生するフッ酸に

より酸化亜鉛が分解されて水溶性無機化合物となり、フィルム外に排出されてやや透明化が進む⁽⁴⁾。赤の有機顔料を使用したものは、太陽からの紫外線により顔料が光分解されフィルム外に排出されて透明化が進む。これらの材料が消失したことにより、フィルムの一部は空洞化が進むはずであるが、ETFEフィルムとしての機械物性は、色が大きく変化した赤色でやや低下が見られるものの、高い値が維持されている。よって、ETFEフィルムについて機械強度の維持という面から注意しなければならない材料は、光活性を有する材料ということが出来る。

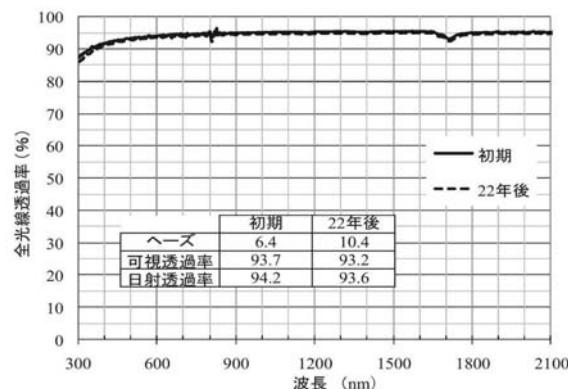


Fig.9 Optical properties of 60 μ m of ETFE film after 22years outdoor exposure

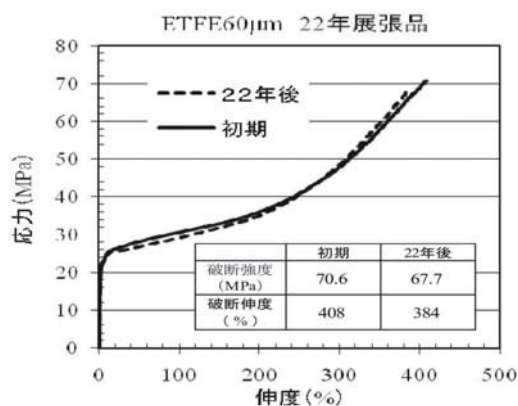


Fig.10 SS curve of 60 μ m of ETFE film after 22 years outdoor exposure 1

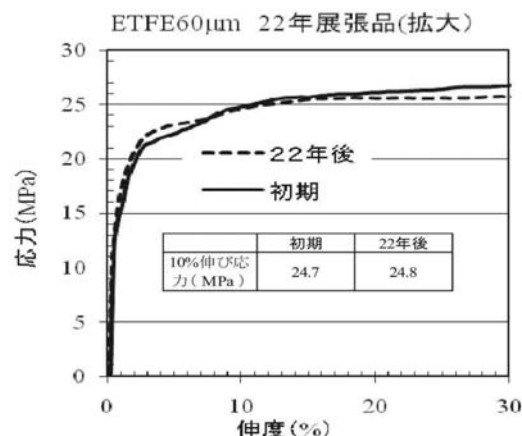


Fig.11 SS curve of 60 μ m of ETFE film after 22 years outdoor exposure 2

この現象は、紫外線強度の強いメタルハライドランプを使用し、水スプレーを実施しながら、約1000時間暴露した場合 (Table 6のSUV:1000H UV光約5000MJ/m²)にも観察される。屋外暴露12年暴露よりも激しい白化 (可視光線透過率の低下) と、機械物性の低下が、緑及び青フィルムで観察されている。

よって、促進耐候性試験においては、フィルムの外観変化に着目し、特に不透明化が進んだ場合には、機械特性の劣化を調査する必要が生ずると考えられる。

なお、Table 6において、クリアフィルム以外のフィルムの1次降伏強度は、10mm幅の短冊型試験片を、速度10mm/分という低速度で実施した引っ張り試験結果であるため、値はやや低い。



Fig.12 Colored ETFE film after 12 years outdoor exposure

Table 6 The result of the weatherability test of ETFE

フィルム種類	暴露場所	経過年数	機械物性				光学特性			フィルム外観変化
			破断強度	破断伸び度	1次降伏強度	伸び率10%時の応力	エルメンドルフ引き裂き	可視光線透過率	ヘイズ	
単位	-	年	MPa	%	MPa	MPa	N	%	%	-
ｸﾞﾗﾌ 愛知		0	70.6	408	-	24.7	-	93.7	6.4	
60μm		22	67.7	384	-	24.8	-	93.2	10.4	なし
		(率)	96%	94%	-	100%	-			
GR 高知		0	66.2	412	*13.7	16.8	13.2	93.0	5.6	
60μm		17	66.7	401	*14.0	18.1	14.6	93.0	7.0	なし
		(UVカット)	(率)	101%	97%	102%	108%	110%		
GR80 高知		0	66.5	400	*13.9	15.1	13.0	91.9	8.7	
60μm		17	64.2	372	*13.9	16.4	14.0	92.6	10.2	なし
		(UVカット)	(率)	97%	93%	100%	109%	108%		
UVA 高知		0	65.3	434	*15.1	19.1	16.5	92.6	22.9	
60μm		15	68.0	416	*14.8	18.0	18.4	92.5	22.2	UVカット
		(UVカット)	(率)	104%	96%	98%	94%	111%	-	抜け
赤 福島		0	71.5	464	*15.1	18.5	14.6	19.0	80.2	
60μm		12	61.0	403	*16.6	20.1	14.8	18.8	80.0	色抜け
		(カラー)	(率)	85%	87%	110%	109%	101%	-	-
		SUV 1000H	57.6	429	-	-	14.7	21.9	79.5	色抜け
		暴露	(率)	81%	92%	-	-	101%	-	-
緑 福島		0	68.9	443	*14.7	17.3	14.9	42.1	74.3	
60μm		12	53.7	400	*14.2	17.3	13.8	37.0	79.1	白化
		(カラー)	(率)	78%	90%	96%	100%	92%	-	-
		SUV 1000H	35.1	376	-	-	5.1	29.6	92.0	白化
		暴露	(率)	51%	85%	-	-	35%	-	-
青 福島		0	70.2	448	*15.4	18.9	14.1	26.7	51.4	
60μm		12	51.2	409	*14.9	18.5	17.1	4.6	87.3	白化
		(カラー)	(率)	73%	91%	97%	98%	122%	-	-
		SUV 1000H	41.9	384	-	-	14.2	16.9	92.2	白化
		暴露	(率)	60%	86%	-	-	101%	-	-

*1cm幅 短冊試験片 引っ張り速度 10mm/分

4. その他の特性

4.1 音響特性

競技場においては、競技はいつも開催されているわ

けではなく、サッカー、アメリカンフットボール、水泳にはシーズンオフがあり、その間の有効利用としてコンサートなどが考えられる。その際に問題となるのが騒音と反響の問題である。遮音性の試験方法の写真 (Fig.13) と、A種PTFE膜との遮音性の比較 (Fig.14) を以下に示す。

透過損失は主として250Hz~4000Hzの間を評価するが、ETFEフィルム250μm 4枚の平行膜 (計1000μm)、250μmの2枚のフィルムを片面とする合計4枚からなるクッション方式 (計1000μm) は、従来この用途に使用されてきている800μmのガラスクロス補強PTFE (A種膜; FGT800) と同等の遮音性能を示す。尚、このA種膜の測定値は、製造メーカーから提供された代表値である。反響特性は吸音率で評価されるが、ガラスクロス補強PTFE (A種膜) も、ETFEフィルムも吸音率は低いことから、吸音膜を別途用意する必要がある。屋外用途に使用される吸音膜は、主として250μmの厚みのガラスクロスPTFE膜の多孔体膜であり、屋根材下に配置されるのが一般的である。この吸音膜は、光線透過率が30%程度と低いものの、吸音特性は高い。ETFE膜は、その高い可視光線透過率が評価されているが、この吸音膜を使用すればその高光線透過率の魅力は半減することから、透明材料を利用した吸音膜、可能であれば、ETFEを使用した吸音膜の開発が望まれている。



Fig.13 Sound insulation test of the ETFE film

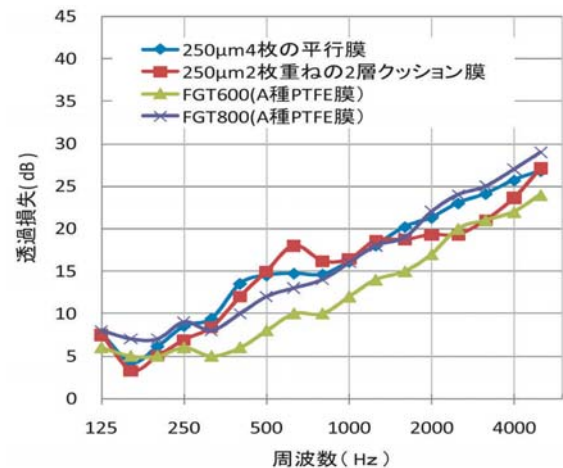


Fig.14 Comparison of the sound insulation properties between ETFE and the glass cross reinforcement PTFE

4.2 熱・光特性

快適な空間とは、暑い／寒いの温度、眩しい／暗いの照度、日焼けする／しないなどのUVコントロール等、光・熱特性が制御された空間である。もちろん、良いデザインや落ち着いた色も、人を和ませる働きがある。

光・熱特性についてはいくつかの評価指標がある。光については可視光線透過率、日射透過率、日射反射率などがあり、熱については、日射熱取得率、熱貫流率などがある。ガラスでは、熱線反射ガラス、LOW-Eガラスなど、金属薄膜をスパッタリングして光を通すが、熱を遮断する機能性ガラスが開発されてきている。しかし、フィルムが熱による伸び縮みを生じ、かつ雪が降った時、風が強い時などにその膨らみを変えて対応するようなETFE膜構造用フィルムにおいては、スパッタ膜の検討は行われてきているものの、まだ実用化は進んでいない。これは、伸縮に耐えられるスパッタ膜や、水に対する耐性の高いスパッタ膜が開発されていないことによる。よって、現在はカラーリングと、印刷による日射調整が主である。

4.2.1 カラーフィルム

旭硝子のカラーフィルムは、半透明白(WT)と、透明青(TB)が主力である。それぞれ代表的な建築物は、WTではアリアンツアリーナ、ユニクロ心齋橋店等であり、TBは北京の水泳競技場である。



Fig.15 Allianz arena stadium



Fig.16 UNIQLO Osaka Shinsaibashi

フィルム選定の際には、ETFE樹脂との相互作用、具体的には、無機フィルターの光触媒によりETFE樹脂が分解される作用と、その逆のETFE樹脂が無機フィ

ラーを変質させる作用の、双方の作用がないように工夫する必要がある。

半透明白には、耐候性の良い酸化チタンを疎水化表面処理した後にフィルムに練り込んでいる。酸化チタンは、その光活性を抑制させるために、その表面をシリカ(SiO₂)やジルコニア(ZrO₂)等で被覆したタイプや、CeO₂で被覆したタイプなど、樹脂とTiO₂表面が直接に触れない方法が考案されている⁽⁵⁾。しかし、そのような酸化チタンであっても、100%被覆出来ているかどうかは疑わしく、旭硝子では更に光活性を抑制させる工夫を行っている。白色の場合、可視光線透過率が高い程、言い換えれば酸化チタンの濃度が薄いほど、フィルムの外表面ではなく、フィルム内部に配置された酸化チタンにもUV光が当たるため、光活性の悪影響はすぐに発現する。

光活性の悪影響を受けた場合は、Table 6に示すように、機械的な物性面では、破断強度や引裂き強度が低下する場合があるものの、伸び率10%時の応力の値は変化しないために、強度的な問題は少ないと考えられる。しかし、可視光線透過率が変化するため、LEDを使用した演出においては、初期との色変わりを生ずる。

旭硝子の250WT(可視光線透過率35%の半透明白色フィルム)の耐候性促進試験の結果をTable 7に示す。

Table 7 The result of the weatherability test of 250WT

	透過率(%)		反射率(%)		破断強度(MPa)	破断伸度(%)	伸び率10%時応力(MPa)
	可視	日射	可視	日射			
初期	35.2	45.3	64.0	51.5	67.3	443	20.5
SWM	35.3	45.6	64.0	51.3	65.6	440	21.0
SUV	34.8	45.1	64.5	51.8	66.2	420	21.2

SWM : 10000H SUV : 10000MJ/m2

白色フィルムは、Fig.17に示すように目に見える可視光線透過率の調整だけでなく、日射エネルギー、すなわち熱の調整も行っていることが分かる。日射熱取得率は0.46であり、太陽光の熱エネルギーを54%カットすることが分かる。この中でETFEフィルム中に吸収されるエネルギーの再放射の割合であるが、これは

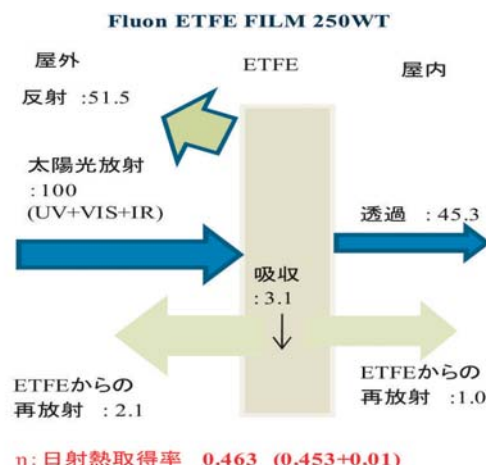


Fig.17 Solar heat gain coefficient of 250WT

外側と内側に21：9の割合で分配されると仮定している（外側熱伝達抵抗と内側熱伝達抵抗の割合は、9：21）。この値を用いて日射熱取得率を求める方法が一般的であるが、例えば、屋外が無風であったり、屋内の温度の方が低い場合は再放射の割合は変化する。よって、確実に日射熱取得率を下げた涼しい空間を設計する場合には、日射反射率が高いフィルムを採用する必要がある。

また、透明青（TB）の顔料については、シアニンブルーではなく、表面処理した金属酸化物を使用している。シアニンブルーは、有機顔料の中では最も良い耐候性と耐熱性を有しているが、低濃度の薄い青フィルムを作成した場合には、色抜けが大きい。また、青色金属酸化物の中には、成型条件によってはフッ素樹脂を分解するものもある。色の好みであるが、ビビッドな青より、無機顔料の落ち着いた青の方が好ましいと考えている（Fig.18）

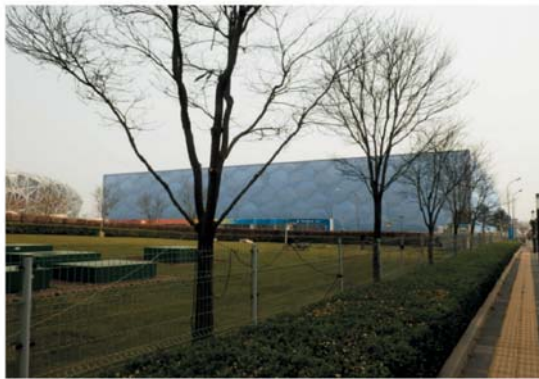


Fig.18 Swimming pool in Beijing

旭硝子では2種類の促進耐候性試験、降雨時間を標準より2倍長くしたS.W.M.10000時間と、5000～10000MJ/m²のUV光を照射したメタルハライドランプ（結露モードを含む）の双方の試験で評価している。色のラインナップについては、ほとんどのカラーで耐候性が良いフィルムが開発出来ているが、透過性の高い鮮やかな赤色は出来ていない。

白・青に続くカラーは、ゴールドか、あるいはシルバーであると思われる。この光輝性顔料は、いずれも酸化チタンコーティングマイカを基原料としていることから、光活性を抑制したフィラーの新規開発と、光活性を抑制する成型上の工夫が必要である。

4.2.2 印刷

カラーフィルムによる光・熱制御の発展した形が印刷である。

旭硝子では、以下の3パターンを標準的な印刷柄としている（Fig.19）。ETFEフィルムに放電処理し、濡れ指数を高めた後にグラビア印刷によりプリントする。通常のシルバーインキの場合、印刷部分の日射透過率は30%～45%、日射反射率は40～50%である。印刷部部分の面積は、左から46%、63%、80%である。色はシルバー色が主力である。

印刷インキの厚みは2μm程度であり、通常はクッション方式内側に配置される。このクッション方式は、藻などの発生を抑えるために絶えず乾燥空気が流れており耐湿性や耐塩水性などを考慮する必要はない。耐候性評価では、反射率と密着性が維持されているのが評価項目となる。Fig.20の左図は、Fig.18の建物を内部から撮影したものがあるが、16mmドット印刷されフィルムが使用されているのが分かる。一方、Fig.20の右図は、1枚のテンション方式の屋根であり、このシルバー色は4mmドット印刷で出している。

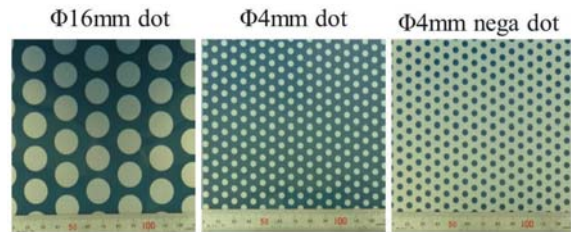


Fig.19 Print pattern

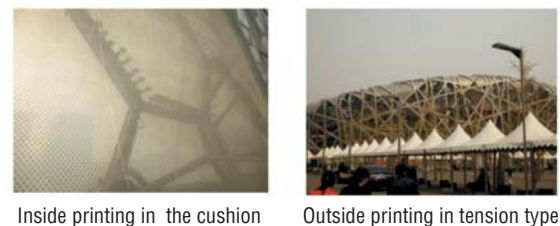


Fig.20 Example of the printed ETFE film

テンション方式は、印刷面に直接に雨や雪が当たることがないように配置されているが（バック暴露）、当然外気の湿度の悪影響を受けやすく、場合によっては雨が吹き込んで濡れる場合もある。

Fig.20の右の建物で使用した印刷品の耐候性試験（S.W.M.）の結果をFig.21に、また、同品を高知県において実暴露試験（バック暴露）した結果をFig.22に示す。促進耐候性試験におけるバック暴露とは、光と水が印刷面の反対側の面から当たる暴露形式であり、トップ暴露とは水と光が印刷面に直接当たる暴露形式を指している。トップ暴露の場合、Fig.21に示したように、5000時間経過後から急速に反射率の低下を生じるが、バック暴露では、S.W.M.10000時間を超えても80%以上の反射率を維持している。高知県における実暴露試験は単層のバック暴露であるが、徐々に反射率が低下し、9年経過して反射率の維持率は約83%程度である。その後インキを改良し、実暴露試験8年で95%以上の保持率を有するインキに変更しているが、更なる改良が必要であると考えている。

また、デザイン性においては、Fig.23に示すような紅葉柄も可能である。この柄では印刷ドットの大きさを変えて、1枚のフィルムに3種類の濃さの異なる紅葉を配列している。

印刷層は、フィルムの強度等に全く影響を与えない

が、光・熱特性や建物のイメージに大きな影響を与える。よって、フィルムと同じくらいの耐候性をインキに付与する技術と、意匠性の双方の面からの検討を継続して行っていく必要がある。

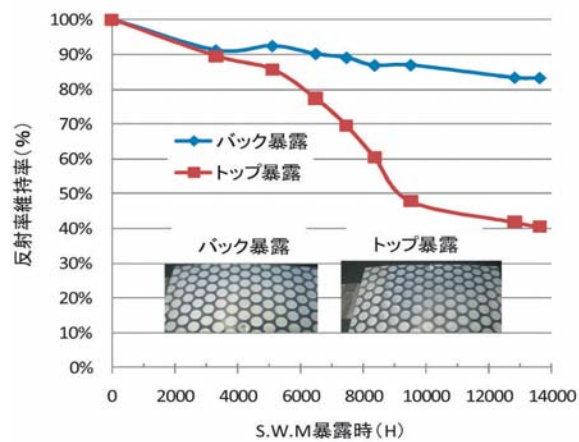


Fig.21 The result of weatherability test (S.W.M) about printed film

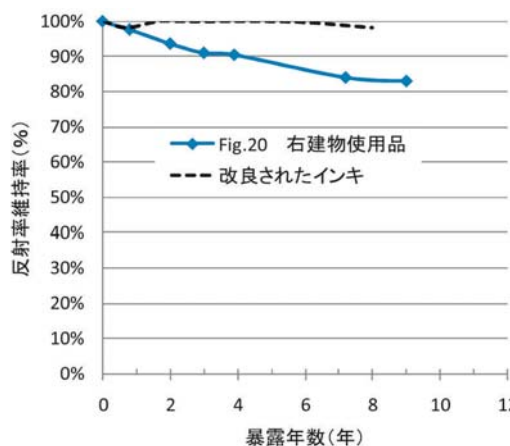


Fig.22 The result of outdoor exposure test about printed film in Kochi.



Fig.23 Print pattern (Maple)

5. まとめ

膜構造フィルムが世の中で注目されたのは、今から10年ほど前のアリアンツアリーナ（2005年 正式名称：フースバル・アリーナ・ミュンヘン）からである。しかし、遡ること1987年に、ETFEフィルムの透明性と引裂き強度の強さに着目し、日本カーバイド社が農業ハウスの被覆資材として「屋外用途」に世界で初めて展開した。その際には、旭硝子のETFEフィルム

が使用され、その後、旭硝子は、光・熱特性を付与したETFEフィルムを農業界に20年近くも投入し続けてきている。

膜構造用途は、耐候性、耐汚れ性、耐引裂き性、耐熱性などETFEフィルムの持つ優れた機能が、20年以上活かされる用途であり、農業被覆資材に求められる特性に極めて近い。

しかしながら、まだまだ世界的に見てもETFEを使用した建築物は少ない。このETFEの使用を決意した設計者、施主、工事関係者の期待を裏切らない、新しい技術を絶えず開発していくこと、これがETFEフィルムメーカーである旭硝子の使命である。

謝辞

ETFE膜構造物の強度計算等にあたり、横浜国立大学工学部 河端昌也准教授、太陽工業株式会社研究開発本部 齊藤嘉仁技師に、助言と御指導を頂きました。厚く御礼申し上げます。

—参考文献—

- (1) 膜構造の建築物・膜材料等の技術基準及び同解説. 膜構造の建築物・膜材料等の技術基準及び同解説編集委員会編、2003年8月.
- (2) 岡田 章・大矢賢史. 膜のジョイント. 建築材料, 2015年12月号, 141-143
- (3) 有賀広志・小田康一・西村安代・福元康文. 熱伝導率測定装置を用いた簡便な農業用被覆資材の断熱性評価方法の検討. 植物環境工学, Vol. 27 (2015) No. 1, 14-23
- (4) 有賀広志・西村安代・福元康文. 耐候性農業用UVカットETFEフィルムの開発. 農業施設, 44 (4):174-183. (2013)
- (5) 内田忠敏・坂本正志・浅野清 (1976). 二酸化チタン顔料組成物及びその製法, 特願昭, 51-27368.