The Membrane Structures Association of Japan

膜構造研究論文集 2014

Research Report on Membrane Structures 2014

- No. 28 -



一般社团法人 日本膜構造協会



[表紙写真]

物件名:東京駅八重洲ログランルーフ

施主:東日本旅客鉄道株式会社

- 設計:東京駅八重洲開発設計共同企業体(日建設計・ジェイアール東日本建築設 計事務所)
- 施工:東京駅八重洲開発中央部他新築工事共同企業体(鹿島·鉄建)

The Membrane Structures Association of Japan

膜構造研究論文集 2014

Research Report on Membrane Structures 2014

- No. 28-

一般社团法人 日本膜構造協会

建築の一分野として確立してきた膜構造は、近年建設数も増し、日本における研究者の数も増しています。これにともない、研究テーマも 多岐に亙るようになり、発表される論文も多分野に亙り、その数も多くなっています。これらの状況より、社団法人日本膜構造協会において、 膜構造に関する研究成果の発表の場を設定し、「膜構造研究論文集」として、膜構造研究のためのまとまりある資料として、あるいは設計、 建設のための指針として位置付け、年次計画で発行することとしています。

内容は3編に分け、1編では研究論文として査読を行い、質の高いものを選び掲載することとしています。2編では、膜構造に関する査読 は行わない報告、概説を広く扱うことにしています。また3編では、他誌、国際会議等で発表されたその年の膜構造関係の論文のアブストラ クト、または題名を掲載し、研究のための資料とし役立てたいと考えています。このようにして刊行する研究論文集は、広く研究者、研究団 体及び関係各位に積極的に配布し、今後の膜構造の発展に寄与することを目的としています。

膜構造研究論文集2014

Research Report on Membrane Structures 2014

〔目 次〕

第1編研究論文

1.	妻面開放型骨組膜構造建築物の構造骨組用風力係数並びに外装	材用ピーク風力係数	1
		高舘祐貴 (東北大学)	
		植松 康 (東北大学)	
		ガヴァンスキ江梨 (東北大学)	
2.	ETFE フィルムの延伸効果に関する実験及び解析的検討		9
		丁 乙碩 (世明大学校)	
		河端昌也 (横浜国立大学)	
3.	ETFE フィルムを用いた対角アーチ型四角形パネルの延伸後の	耐力に関する研究	17
		古谷宗一郎 (横浜国立大学)	
		河端 昌也 (横浜国立大学)	
4.	透過日射を考慮した膜構造建築物の半屋外空間における熱放射	↓環境の予測手法 ─────	25
	- 膜屋根を有する駅プラットホームの実測値と計算値の比較検	6討-	
		親川昭彦(太陽工業)	
		吉野達矢 (太陽工業)	
		梅干野晁 (放送大学)	
5.	日射透過材料のための二点校正法による透過・反射率の測定法	<u></u>	33
	- 日射透過率推定方法の適用-	吉野 達矢 (太陽工業)	
		親川 昭彦 (太陽工業)	
		中田 貴之 (太陽工業)	
		酒井 孝司 (明治大学)	
6.	可視光応答型光触媒を利用した膜材料の抗菌・抗ウイルス性に	関する研究	39
	- PVC 膜材料に含有された添加剤が抗菌・抗ウイルス性に与え	る影響-	
		塩澤優樹 (太陽工業)	
		齋藤徳良 (太陽工業)	

豊田 宏 (太陽工業)

[第1編 研究論文]

妻面開放型骨組膜構造建築物の構造骨組用風力係数並びに外装材用ピーク風力係数

高舘 祐貴^{*1} 植松 康^{*2} ガヴァンスキ江梨^{*3}

梗 概

切妻屋根をもち、妻面の一方あるいは両方が開放された骨組膜構造建築物の構造骨組用風力係数並び に外装材用ピーク風力係数を、境界層乱流を用いた風洞実験結果に基づき提案した。様々な断面におい て外圧と内圧の同時測定を行い、両者の差から風力係数を算定した。構造骨組用風力係数は荷重効果に 基づく「等価静的風力係数」として表される。平面フレーム解析を基本とし、柱脚を「ピン」あるいは「固定」と 仮定し、荷重効果として基礎部の引き抜き力およびフレーム内のせん断力と最大曲げモーメントに着目し た。全フレーム、全風向中、最大荷重効果を与える条件(フレーム位置と風向)を見出し、その条件に対して フレームに作用する等価静的風力係数分布をLRC(Load Response Correlation)法を用いて求め、それを単 純なモデルで表した。一方、外装材用ピーク風力係数については、各測定点における全風向中の最大・ 最小ピーク風力係数の分布を求め、その結果に基づき、屋根や壁面をいくつかの領域に分け、領域ごと に正負の値を設定した。

1. はじめに

切妻屋根をもつ骨組膜構造建築物は、スポーツ施設のほか、 イベント施設や建設工事現場の仮囲いなどの仮設建築物にもよ く利用される。閉鎖型のほか、片側あるいは両側妻面が開放さ れた形式もよく利用される。閉鎖型建築物については,建設省 告示(1454 号, 1458 号)や日本建築学会建築物荷重指針・同解 説 1) (以下,「荷重指針」)に構造骨組用外圧係数並びに外装材 用ピーク外圧係数が定められているが、開放型建築物について の風力係数は規定されていない。建設省告示には風上側ある いは風下側壁面が開放されている建築物の内圧係数が定めら れおり,閉鎖型建築物の外圧係数と組み合わせることで風力係 数を推定することは可能であるが,そのような荷重評価法の妥 当性を荷重効果の観点から検証した研究例はこれまで為されて いない。さらに、両妻面が開放されている場合には、建築物内 部にも流れが生じるため、内壁面に作用する風圧(以下、「内 圧」)の分布や動的荷重効果は閉鎖型や片側開放型とは大きく 異なる。また、外圧分布も影響を受けると考えられる。より合理的 な風荷重の設定を行うためには, 妻面の開放状態に応じて風力 係数を適切に設定する必要がある。

筆者らは、既往の研究²において、妻面開放型骨組膜構造建 築物の構造骨組用風力係数を風洞実験に基づいて検討した。 建物モデルはこれまで我が国に建設された類似建築物の形状 や構造に基づき設定した。風洞実験では、風向を変化させなが ら、様々な断面内の外圧および内圧を多点同時測定した。フレ ームは梁間方向ラーメン、桁行方向軸組筋かい構造とし、構造 計算では平面フレーム解析を用いた。構造骨組用風力係数を 評価するにあたっては、荷重効果としてフレーム内の最大曲げ モーメントに着目し、柱脚の境界条件はピンと仮定した。この場 合、最大曲げモーメントは風上柱頭に生じるため、荷重効果とし て風上柱頭の曲げモーメントに注目した。構造骨組用風力係数 は、Kasperski³⁾が提案した LRC(Load Response Correlation)法に 基づいて評価した。ここで得られる風力係数は、風力の動的荷 重効果として準静的成分のみを考慮した(共振効果を無視でき る)「等価静的風力係数」である。いずれの妻面開放状態におい ても、最大荷重効果は斜め方向から風が吹いた場合に、妻面よ りやや内側に入ったフレームに生じることが示された。各妻面開 放状態に対し、LRC 法により得られた風力係数分布に基づき, ガスト影響係数法の枠組みで設計用風荷重を評価する構造骨 組用風力係数分布のモデルを提案した。

既往の研究²では荷重効果として柱頭の曲げモーメントにの み着目したが、本研究では基礎部の引き抜き力、フレーム内の せん断力についても検討を行う。さらに、既往の研究ではフレ ームの柱脚を「ピン」と仮定したが、実際の設計では完全に「ピ ン」とみなせることは少なく、「ピン」と「固定」の中間に位置する 「弾性支持」であるのが一般的である。そこで、本研究では柱脚 が「固定」の場合についても検討し、境界条件の影響を考察し、 より妥当な構造骨組用風力係数モデルを提案する。また、各測 定点の最大・最小ピーク風力係数分布に基づき、膜材やその定 着部の設計に利用される外装材用ピーク風力係数を提案する。

^{*1} 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 大学院生 *2 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授 *3 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 助教

2. 対象建物と風洞実験

2.1. 対象建物

本研究で対象とする建物は、既往の研究²と同様、以下に示す 形状を有する切妻屋根をもつ骨組膜構造建築物である。

スパン: B=42m, 肩高さ: h=7m, 屋根勾配: β=17.5° 屋根平均高さ: H=10.3m, 桁行長さ: D=B=42m 構造骨組はこれまでに建てられてきたいくつかの妻面開放型骨 組膜構造物の実例を参考にし,柱と梁がいずれも H 型鋼 (294×200×8×12)の山形ラーメンの平面フレーム構造(フレー ム間隔dは3.5m)とする。また,構造解析における柱脚部の境界 条件はピンあるいは固定と仮定する。

2.2. 風洞実験方法

風洞実験は、東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 のエッフェル型境界層風洞(測定部:1.4m^W×1.0m^H× 6.5m^L)で行った。実験模型は、前節に示した対象建物を幾何学的縮尺率え = 1/200で作製した剛模型である。模型形状と圧力測定孔位置を 図 1 に示す。開放型の場合、外側および内側の風圧(外圧およ び内圧)を同時に測定する必要があるため、模型は厚さ 4mm の サンドイッチ構造になっている。1 ライン上の測定点数は 16 点 (両側で 32 点)である。風向 θ は、図 1(b)のように定義し、0~180[°] の範囲を15[°]ピッチで変化させた。妻面の開放状態は、図2に示 す 3 ケースである。Model3 の場合、 θ = 0[°]は風が開放された妻



鎖型) (b)Model2(両面開放型)(c)Model3(片面開放型)
図2 妻面の開放状態

面に向かう方向(風下妻面が閉鎖している状態)を表している。

実験気流は、平均風速のプロファイルを表すべき指数α が約 0.21 の境界層乱流である。実験風速は、屋根平均高さHで U_H ≈8m/s であり、その高さでの乱れの強さは Iu ≈0.18 である。風 速の縮尺率を $\lambda_{V}=1/4$ と仮定すると、時間の縮尺率は $\lambda_{T}=1/50$ と なる。各圧力測定孔は銅パイプおよびビニールチューブを介し て圧力変換器に接続されている。測定はラインごとに行い、32 点に作用する風圧をサンプリング周波数 500Hz で 12 秒間(実ス ケールで 10 分), 全点同時測定した。使用した導圧管による変 動風圧の歪みは、予め測定された計測システムの周波数応答 関数を用い、周波数領域で補正した。同一条件下で 10 回測定 を行い,風圧・風力並びにそれらを用いて計算される荷重効果 の統計量は、いずれも 10 回の測定・計算結果のアンサンブル 平均で評価する。風圧係数および風力係数は,いずれも屋根 平均高さH での接近流の速度圧 qH で基準化されている。風圧 係数は面を押す方向を正とし,風力係数は外圧係数と内圧係数 の差によって表現した。したがって、風力係数の符号は外圧係 数と同様である。

3. 風洞実験

3.1. 注目する荷重効果

植松ら⁴は中小規模の低層構造物の場合, 平均風力を作用させたときに構造上最もクリティカルとなる応力を荷重効果として着目すれば良いとしている。これはこのような構造物の応答評価において共振成分を考慮せず, 準静的に取り扱うことが可能であるためである。そこで、本研究で対象としている構造物に平均風力を作用させて構造解析を行うことで最も重要な荷重効果を選択する。速度圧を q_{H} 、各圧力測定孔jに単位荷重を作用させた時の応答を表す影響係数を a_j 、圧力測定孔jでの風圧係数を $C_p(t)$ 、その荷重負担面積を A_j とすると、荷重効果 R(t)は次式で与えられる。

$$R(t) = q_H \sum_{j=1}^{16} \alpha_j C_{pj}(t) A_j$$
(1)

なお,外圧と内圧の差で与えられる風力を考える場合は,風 圧係数 Cpの代わりに風力係数 Cpを用いればよい。

ここでは荷重効果として曲げモーメント, せん断力, 軸力の 3 つの応力に着目する。各開放状態に対して, 平均風力係数(閉 鎖型では内圧係数を0と仮定する)を作用させた時, 柱脚がピン あるいは固定の場合, 構造上最もクリティカルな応力は表1のよ うである。なお, ここでの軸力の引張は柱の引抜き力に対応する 応力を表している。

表 1 構造上最もクリティカルとなる応力

荷重	効果	柱脚ピン	柱脚固定
曲げ	モーメント	柱頭部	柱脚部
せん	断力	柱脚部	柱脚部
軸力	1	風上柱(引張)	風上柱(引張)

3.2. 最大荷重効果をもたらす風向・フレームについて

ここでは、図1に示した圧力測定ライン上にフレームがあると 仮定し(以下フレーム番号をライン番号で表す)、式(1)を用いて 表1に示した応力に対する荷重効果の最大ピーク値を求めた。 柱脚がピンおよび固定の場合について、代表的なフレームに おける荷重効果の最大ピーク値の風向による変化を図3(軸力 N)、図4(せん断力Q)、図5(曲げモーメントM)に示す。これらの 図に示す荷重効果は屋根平均高さH、スパンB、フレーム間隔d を用いて以下の式(2a)~(2c)を用いて無次元化されている。

$$N^* = \frac{N}{q_H H d} \tag{2a}$$

$$Q^* = \frac{Q}{q_H H d} \tag{2b}$$

$$M^* = \frac{M}{q_H H B d} \tag{2c}$$

なお、1フレーム目は妻面内のフレームとみなし、荷重負担幅を d/2としている。また、Model1(閉鎖型)については内圧係数を0と 仮定し、外圧係数を風力係数としている。

荷重効果に着目すると、柱軸力(図3)に関しては、妻面に正対 する風向、あるいはやや斜めからの風向の場合に引抜き力が 大きくなる。いずれの妻面開放状態でも妻面に正対する風向θ= 0°の場合に柱の引抜き力の最大ピーク値がもたらされた。これ は、流れの剥離に伴って屋根面風上端部に大きな負圧が作用 するためと考えられる。せん断力(図4)や曲げモーメント(図5)に

OFrame 1 \triangle Frame 2 □Frame 5 ×Frame 8 6 6 xem 4 тах ≿ ž 2 2 0 0 60 90 120 150 180 θ(deg) 0 30 60 90 120 150 180 0 30 $\theta(\text{deg})$ (a) 柱脚ピン(Model 1) (b) 柱脚固定(Model 1) 6 6 xem W xem W ∕ž_2 * 2 0 0 0 30 60 90 120 150 180 0 30 60 90 120 150 180 θ (deg) θ(deg) (c) 柱脚ピン(Model 2) (d) 柱脚固定(Model 2) 6 6 Δ Δ 4* N* max ž 2 0 0 30 60 90 120 150 180 30 60 90 120 150 180 0 0 $\theta(deg)$ θ(deg) (e) 柱脚ピン(Model 3) (f) 柱脚固定(Model 3) 図 3 柱軸力

関しては、建設省告示や荷重指針で風圧分布が定められてい る妻面や桁行面に正対する風向θ=0°や90°では最大値を示さ ず、斜めからの風向で最大となっている。また、せん断力と曲げ モーメントのいずれも同じ風向・フレームで最大値を示す。いず れの開放状態でも風上端部に近いフレームほど最大荷重効果 が大きくなっている。

妻面の開放状態に着目すると、両面開放型では風が建物の 内部にも流れるため、どの荷重効果においても閉鎖型、片面開 放型と比較してその値が低減されている。片面開放型の場合、 風向0°<θ<90°の時は風上側妻面が開放され、内圧が正となる ため、閉鎖型や両面開放型と比較して風上妻面から遠いフレー ムでも最大荷重効果が大きくなる。一方、90°<θ<180°の時は 風下妻面が開放されるため、閉鎖型に類似した傾向を示す。

表2(a)~(c)に最大荷重効果をもたらす風向・フレーム番号,並びに、応答の最大ピーク値と平均値の比で与えられるガスト影響係数 G_f を示す。両面開放型のフレーム1(Framel)では θ =0°の時、外圧と内圧が相殺されて応答の平均値が小さくなるため、ガスト影響係数が非常に大きな値を示す。閉鎖型では G_f =2.22~2.50であり、建設省告示第1454号で定められている地表面粗度区分IIIに対する G_f =2.5に近い値となっている。これは、準定常仮定が成り立つと仮定すると、風速のピークファクター $g_v \approx 3$ に相当する(G_f =(1+ g_v · I_u)²=2.37)。片面開放型の G_f が他のケースに比べて大きいのは、内圧の動的荷重効果が大きくなったことによるものと考えられる。





図 5 曲げモーメント

表 2 最大荷重効果をもたらす風向・フレーム

1 1	١.	1-	1 4	r	
9)不	ΤE	卸田		1
\ CL	11	1.4	PIII		

Madal	柱脚ピン			柱脚固定		
Model	フレーム	風向	Gf	フレーム	風向	Gf
閉鎖型	2	0°	2.46	2	0°	2.50
両面開放型	1	0°	8.90	1	0°	8.90
片面開放型	2	0°	2.67	2	0°	2.70

(b)せん	新力
-------	----

Madal	柱脚ピン			柱脚固定		
Iviodei	フレーム	風向	Gf	フレーム	風向	Gf
閉鎖型	8	165°	2.25	8	135°	2.33
両面開放型	8	135°	2.17	8	135°	2.34
片面開放型	2	15°	2.74	2	15°	2.76

(c)曲げモー	ーメント
---------	------

Madal	柱脚ピン			柱脚固定		
Iviodel	フレーム	風向	Gf	フレーム	風向	Gf
閉鎖型	8	165°	2.22	8	135°	2.25
両面開放型	8	135°	2.52	8	135°	2.43
片面開放型	2	15°	2.85	2	15°	2.93

4. 風力係数分布

4.1. 最大荷重効果をもたらす風力係数分布

表 2 に示した風向およびフレームに対して,各妻面の開放状態に応じた風力係数分布を定める。ここでは空間的にも時間的にも不規則に変動する風力に対して風荷重を合理的に評価する方法として Kasperski が提案した LRC(Load Response Correlation)法³を用いる。この手法は構造物の剛性が比較的高く、変動風力による共振効果を無視することができる場合,着目する荷重効果と風力の相関を考慮し、荷重効果の最大ピーク値の期待値を再現できる等価静的風力係数を評価するものである。 LRC 法による等価静的風圧係数分布は次式で与えられる。

$$C_{pe} = \bar{C}_p + g_r C'_p \rho_{rp} \tag{3}$$

ここで、 \overline{C}_p は平均風圧係数、 C_p は RMS 変動風圧係数、 g_r は 応答(荷重効果)のピークファクター、 ρ_p は応答と荷重の相関係 数を表している。応答のピークファクターは時刻歴解析により得 られた荷重効果の最大ピーク値からその平均値を減じ、標準偏 差で除すことにより得た。なお、式(3)を風力係数分布に適用す る場合は風圧係数 C_p を風力係数 C_f と読み替えればよい。

それぞれの荷重効果に着目したとき、「LRC 法」による風力係数分布($C_{f_{LRC}}$)と風洞実験から得られた風圧の時刻歴データから最大荷重効果をもたらす瞬間的な風力係数分布を求める「条件付きサンプリング」により得られる風力係数分布 ($C_{f_{cord}}$)、さらに平均風力係数 $C_{f_{Men}}$ とガスト影響係数 G_{f} の積(一般的な「ガスト影響係数法」)で与えられる風力係数分布 ($C_{f_{Cord}}$)を比較した結果を図6(柱軸力)、図7(せん断力)、図8(曲 げモーメント)に示す。ここでも、Modell(閉鎖型)では内圧を0として外圧係数を風力係数としている。なお、グラフの縦軸は風力係数 C_{f} (閉鎖型では外圧係数=風力係数)を表し、横軸 s は風上柱脚部を原点(s=0)としたフレームに沿った座標を表し、風下柱脚部での値 s_{max} で基準化されている。

いずれの場合も、 C_{fLRC} と $C_{f cond}$ の分布は全体的によく一致 している。これはLRC 法が最大荷重効果をもたらす風力係数 分布を確率統計的に評価するものであり、最大荷重効果をも たらす瞬間的な風力係数分布を与える「条件付きサンプリン グ」の結果の平均値を近似的に表しているものと解釈できる。 なお、ここで見られる C_{fLRC} と $C_{f cond}$ の分布の差異は、条件 付きサンプリングでは 10 個のデータのアンサンブル平均で 評価しているため、限られたデータからの推定に起因する誤 差によるものと考えられる。荷重効果として柱軸力(引抜き 力)に着目すると、3種類の方法で得られた風力係数分布がほ ぼ同様の傾向を示している。これは、風向が妻面に正対する 場合に最大荷重効果が与えられ、荷重効果の変動が風速変動 にほぼ追随する準定常的な性状を示すことを表している。一 方、曲げモーメントに関して着目するとガスト影響係数法は 荷重を大きめに評価している。これは曲げモーメントが風力 係数の空間的分布に敏感であることによると考えられる。

以上の結果より、本研究では荷重評価としてより合理的で あると考えられる LRC 法による等価静的風力係数分布をも とに設計用の風力係数を提案する。





図 8 等価静的風力係数分布(曲げモーメント)

4.2. 荷重効果の比較

荷重効果としてせん断力Qと曲げモーメントMに着目し、LRC 法による風力係数分布から計算される荷重効果の比較を行った。 結果を表 3 に示す。ここで、荷重効果として曲げモーメントに着 目した場合の等価静的風力係数を C_{f_M} 荷重効果としてせん断 力に着目した場合の等価静的風力係数を C_{f_Q} とし、

Mmax M: CfMを作用させた時の Mの最大ピーク値

 $M_{\max Q}: C_{fQ}$ を作用させたときのMの最大ピーク値

 $Q_{\max_M}: C_{f_M}$ を作用させた時のQの最大ピーク値

*Q*_{max,Q}: *C*_{fQ}を作用させた時の*Q*の最大ピーク値 を計算した。表3によれば、いずれの場合も荷重効果として曲 げモーメントに着目して得られた風力係数分布の方が大きな荷 重効果を与えるので、フレームの応力を検討する際には曲げモ ーメントに着目した風力係数分布を用いればよい。一方、基礎 の設計は引抜き力に基づいて行われるので、荷重効果として引 抜き力に着目するのが合理的である。

表	3	せん断力	」と曲げモー	-メ	ン	トの比
---	---	------	--------	----	---	-----

		柱脚ピン	柱脚固定
Model1	$Q_{\max} Q Q_{\max} M$	0.95	0.98
(閉鎖型)	$M_{\max}M/M_{\max}Q$	1.12	1.01
Model2	$Q_{\max} Q Q_{\max} M$	0.97	0.98
(両面開放型)	$M_{\max}M/M_{\max}Q$	1.13	1.05
Model3	$Q_{\max} Q / Q_{\max} M$	0.94	0.99
(片面開放型)	$M_{\max} M M_{\max} Q$	1.14	1.04

次に荷重効果として引抜き力Nと曲げモーメントMに着目し、 柱脚ピンあるいは固定の場合について、LRC法により得られた 風力係数分布を用いて荷重効果を計算し、境界条件の影響を 検討した。柱脚ピンとして得られる風力係数分布をC_PN、柱脚 固定として得られる風力係数分布をC_PN、柱脚

 $N_{\text{PIN FIX}}: C_{fFIX}$ を柱脚ピンのフレームに作用させた時の N $N_{\text{FIX PIN}}: C_{\text{FPIN}}$ を柱脚固定のフレームに作用させた時のN $N_{\text{PIN PIN}}: C_{fPIN}$ を柱脚ピンのフレームに作用させた時の N $N_{\text{FIX FIX}}: C_{f \text{FIX}}$ を柱脚固定のフレームに作用させた時のNMPIN FIX: Cf FIXを柱脚ピンのフレームに作用させた時の M MFIX PIN: CrPINを柱脚固定のフレームに作用させた時の M MPN PN : Cf PN を柱脚ピンのフレームに作用させた時の M $M_{\text{FIX FIX}}: C_{f \text{FIX}}$ を柱脚固定のフレームに作用させた時のMを計算し、それぞれを比較した(表 4)。これによれば軸力におい ては CrEIX,曲げモーメントにおいては CrEIN で荷重効果を過小 評価する。解析上, 柱脚をピンあるいは固定と仮定することが多 いが,実際には両者の中間である弾性支持であるのが一般的 である。したがって、基礎部の引抜き力に対する設計に関して は柱脚ピンと仮定して得られた風力係数分布(C, PN)を用い,フ レームの曲げモーメントに対する設計においては柱脚固定と仮 定して得られた風力係数分布(Cfrx)を用いることで安全側に評 価することが可能である。

表 4 境界条件の相違による荷重効果の比

N _{PIN_FIX} /N _{PIN_PIN}	0.95~0.99	$M_{\rm PIN_FIX}/M_{\rm PIN_PIN}$	1.04~1.21
N _{FIX_PIN} /N _{FIX_FIX}	1.01~1.03	$M_{\rm FIX_PIN}/M_{\rm FIX_FIX}$	0.81~0.95

4.3. 構造骨組用風力係数

図6~8に示したLRC法による風力係数($C_{f_{LRC}}$)の分布をその まま設計で用いるのは煩雑であるため、構造骨組用風力係数は 基規準と同様、図9に示すように風上壁面(C_{MU})、風上屋根面 (C_{RU})、風下屋根面(C_{RL})および風下壁面(C_{RW})のそれぞれの領 域ごとに一定値で与えることとした。さらに従来のガスト影響係 数法の枠組みで評価できるように、各領域で面平均した風力係 数分布を各荷重効果に基づくガスト影響係数によって除した値 を計算した。結果を表5に示す。これは最大荷重効果を与える 「等価静的風力係数」である。

しかし、C_{f_IRC}分布を各領域に対して面平均して得られる風力 (合力)は必ずしもその領域の重心を通る訳ではないので、それ らを用いて荷重効果を計算した場合、この結果は C_{f_IRC}分布を 直接用いて計算した値とは必ずしも一致しない。そこで、各ケー スについて C_{f_IRC}の風力係数分布から直接計算した荷重効果と、 各領域の面平均値が一様に分布していると仮定して計算した荷 重効果の比を表 6 に示す。これによれば、面平均値をそのまま 用いると、一般に荷重効果を過小評価する傾向が見られる。実 際の最大荷重効果を再現するためには、表5に示した風力係数 値に、上述した着目すべき荷重効果に対応する表6中の値を乗 じたものを構造骨組用風力係数とすればよい。例えば、フレー ムの設計用としては、柱脚固定の場合の曲げモーメントに対す る比を用いればよい。このようにして得られた構造骨組用風力 係数を表7に示す。これらの値に気流の乱れの影響を示すガス ト影響係数を乗じることで設計用の風荷重を算定できる。



図 9 構造骨組用風力係数

表 5 最大荷重効果を与える等価静的風力係数 (各領域の面平均値)

(a)基礎部の設計時

柱脚ピン							
Model	C_{fWU} (C_{peWU})	C_{fRU} (C_{peRU})	C_{fRL} (C_{peRL})	$C_{fWL} \\ (C_{peWL})$			
閉鎖型	-0.53	-0.93	-0.81	-0.55			
両面開放型	-0.24	-0.34	-0.23	-0.16			
片面開放型	-0.90	-1.12	-1.02	-0.85			
	柱	脚固定					
Model	C_{fWU} (C_{peWU})	C_{fRU} (C_{peRU})	C_{fRL} (C_{peRL})	$C_{fWL} \\ (C_{peWL})$			
閉鎖型	-0.55	-0.93	-0.75	-0.51			
両面開放型	-0.26	-0.36	-0.18	-0.11			
片面開放型	-0.91	-1.13	-0.98	-0.80			

(b)フレーム部の設計時

柱脚ピン						
Model	C_{fWU} (C_{peWU})	C_{fRU} (C_{peRU})	C_{fRL} (C_{peRL})	C_{fWL} (C_{peWL})		
閉鎖型	-0.28	-0.84	-1.03	-0.57		
両面開放型	0.50	0.04	-1.15	-1.12		
片面開放型	-0.52	-0.77	-1.36	-1.01		
	柱	脚固定				
Model	C_{fWU} (C_{peWU})	C_{fRU} (C_{peRU})	C_{fRL} (C_{peRL})	C_{fWL} (C_{peWL})		
閉鎖型	0.30	-0.40	-1.29	-0.61		
両面開放型	0.57	0.13	-1.05	-1.02		
片面開放型	-0.41	-0.67	-1.20	-0.95		

表 6 荷重効果の比

妻面の 開放状態	柱脚の 境界条件	引抜き力	曲げモーメント
Model1	ピン	1.01	1.16
(閉鎖型)	固定	1.01	1.25
Model2	ピン	1.03	1.06
(両面開放型)	固定	1.04	1.10
Model3	ピン	1.01	1.06
(片面開放型)	固定	1.01	1.11

表 7 設計時に用いる構造骨組用風力係数

基礎の設計						
Model	C_{fWU} (C_{peWU})	C_{fRU} (C_{peRU})	C_{fRL} (C_{peRL})	C_{fWL} (C_{peWL})		
閉鎖型	-0.54	-0.94	-0.82	-0.56		
両面開放型	-0.25	-0.35	-0.24	-0.16		
片面開放型	-0.91	-1.13	-1.03	-0.86		
	フレー	-ムの設計	-			
Model	C_{fWU} (C_{peWU})	C_{fRU} (C_{peRU})	C_{fRL} (C_{peRL})	C_{fWL} (C_{peWL})		
閉鎖型	0.38	-0.50	-1.61	-0.76		
両面開放型	0.63	0.14	-1.16	-1.12		
片面開放型	-0.46	-0.74	-1.33	-1.05		

5. 外装材用ピーク風力係数

風洞実験で得られた風力係数データの時刻歴から各測定点 におけるピーク風力係数を求めた。ピーク風力係数の評価時間 (平均化時間)は 0.2sec である。妻面の各開放状態に対し,全風 向中の最大・最小ピーク風力係数の分布を図 10 に示す。なお, これらの図は壁面および屋根面を展開して表している。また,片 面開放型(Model3)では,図の上側が閉鎖妻面,下側が開放妻 面である。



正のピーク風力係数を比較すると、閉鎖型および片面開放型 では壁面および屋根面ともにほぼ一定値となっている。これは、 最大ピーク値が桁行面にほぼ正対する風向で生じているためと 考えられる。一方、両面開放型では端部と中央部でピーク値が^{0.21} 大きく異なっている。これは、端部では斜めからの風向で壁面 や屋根面に正の外圧がかかる時に剥離流による大きな負の内 圧が生じ、瞬間的に風力係数が大きくなるためと考えられる。

負のピーク風力係数を比較すると、両面開放型では閉鎖型や 0.22 片面開放型と比較して妻面に近い領域で大きな負圧が生じてい る。これは、外圧の剥離に伴う負のピーク外圧に対して妻面に 近い領域の正の内圧が負の風力を上乗せするように働いたた めと考えられる。中央部についてはピーク風力が低減されてい る領域が大きい。これは、妻面が開放されることにより、外側に のみ流れていた風が内側にも流れるようになったことによる外圧

の低減効果によるものと考えられる。

片面開放型では閉鎖型や両面開放型と異なり、ピーク風力係 数分布が図1に示されているX軸中央断面)について非対称に なっている。これは建物形状が他のモデルと異なり、X軸につ いては対称ではないためである。風下妻面が閉鎖されているこ とにより、内圧が正となるため、閉鎖型および両面開放型と比較 して開放妻面側(図の下側)では負の風力が広範囲に及んでい る。一方、閉鎖妻面側(図の上側)の壁面および屋根面の風力は 閉鎖型と比べて低減されている。片側妻面が開放されている影 響と考えられるが、これについては、ピーク値を与える時の3次 元的な風力分布(特に内圧分布)に基づく検討が必要である。

外装材用ピーク風力係数は現行の建設省告示や荷重指針準 じてモデル化するのが望ましい。荷重指針では屋根面や壁面を 領域分けし、ピーク外圧係数を与えている。本論文ではピーク 風力係数を直接評価しているが、領域分けは荷重指針¹⁾に準じ て行った。正のピーク風力係数および負のピーク風力係数に対 する領域分けは図 11 に示すようである。各領域における値を外 装材用ピーク風力係数として表8(a)、(b)に示す。なお、外装材用 ピーク風力係数は、図 10 に示すコンター図に基づき、1m×1m の正方形領域を各領域内で少しずつ移動させながら面平均し、 領域内での最大値・最小値に基づいて与えた。

荷重指針で規定されている閉鎖型建築物のピーク外圧係数と 本実験で得られた閉鎖型のピーク外圧係数について表 8(a), (b) より比較を行う。まず屋根面の正のピーク外圧係数を見ると,本 実験値は荷重指針値と比較して大きな値となっている。荷重指 針では屋根面における正のピーク外圧係数 \hat{C}_{pe} は次式で与え られている。

$$\hat{C}_{pe} = C_{pe} (1 + 7I_H) \tag{4}$$

$$C_{pe} = 0.014(\theta - 15) \tag{5}$$

ここで, *C_{pe}*は正の外圧係数, *I_H*は屋根平均高さ *H* における乱 れ強さ, θ は屋根勾配を表す。本研究で対象としている建築物 の屋根勾配がθ=17.5°であることから,(5)式より正の外圧係数*C_{pe}* が 0.035 と非常に小さい値となるため,正のピーク外圧係数が小 さくなる。指針の見直しが必要と思われる。一方,壁面の値は荷 重指針値よりやや大きい。

次に,負のピーク外圧係数について見ると,こちらは本実験 値と荷重指針値は比較的よく対応している。



表 8 外装材用ピーク風力係数

(a) 正のピーク風力係数

()			••••	
	Wa	Wb	Ra	R _b
Model 1	2.5	2.5	1.2	1.2
Model 2	4.0	2.8	4.0	2.2
Model 3	2.5	2.5	1.2	1.2
AIJ(2004)	2.0	2.0	0.1	0.1

(b) 負のピーク風力係数

	Wa	W _b	Ra	R _b	R _c	R _d	R _e	R _f	Rg
Model 1	-2.5	-2.2	-2.4	-3.8	-3.7	-4.8	-3.2	-2.7	-3.5
Model 2	-3.2	-2.7	-3.2	-3.5	-4.0	-5.5	-3.0	-1.8	-3.5
Model 3	-3.2	-2.7	-3.2	-4.0	-4.0	-4.6	-3.0	-3.3	-3.5
AIJ(2004)	-3.0	-2.4	-2.7	-3.8	-3.2	-4.9	-3.0	-2.5	-3.8

6. おわりに

本研究では切妻屋根を有する妻面開放型骨組膜構造物を対象とし、風洞実験結果に基づき、構造骨組用風力係数および外装材用ピーク風力係数を提案した。

構造骨組用風力係数については、既往の論文²と一部重複 する部分はあるが、柱脚の境界条件としてピンおよび固定の2 種類について検討し、さらに荷重効果として曲げモーメントだけ でなく柱軸力(引抜き力)やせん断力にも注目した。それらの結 果に基づき、フレームおよび基礎部の設計に用いる等価静的風 力係数分布を提案した。

外装材用ピーク風力係数については、風力係数の最大・最小

ピーク値を風洞実験の時刻歴データから直接評価し、荷重指針 に準じて屋根および壁面を領域分けし、各領域における全風向 中の最大・最小ピーク値に基づき、正および負のピーク風力係 数を提案した。

謝 辞

本研究は(財)能村膜構造技術振興財団の平成24年度助成金 によるものである。ここに記し、感謝の意を表する。

[参考文献]

- 1. 日本建築学会:建築物荷重指針・同解説, 2004.
- 植松 康,高舘祐貴,ガヴァンスキ江梨:妻面開放型骨組 膜構造建築物の設計用風荷重に関する実験的研究, 膜構 造論文集 No.27, pp.15-22, 2013.
- M. Kasperski,: Extreme wind load distributions for linear and non-linear design, *Engineering Structures*, Vol. 14, No. 1, pp. 27-34, 1992.
- 植松 康,織茂俊泰,渡部俊一郎,北村周治,岩谷 賢: 翼型に似た断面形状を持つ鉄骨ハウスの設計用風荷重,第 18回風工学シンポジウム論文集,pp.347-352,2004.
- Y. Uematsu, T. Stathopoulos, E.Iizumi: Wind loads on free-standing canopy roofs: Part2 overall wind forces, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 96, pp. 1029-1042, 2008.

Wind loads on the main resisting systems and cladding of open-type framed membrane structures

Yuki Takadate^{*1} Yasushi Uematsu^{*2} Eri Gavanski^{*3}

SYNOPSIS

Wind force coefficients for designing the main wind force resisting system and cladding of a framed membrane structure of open type are proposed on the basis of a wind tunnel experiment. Two cases of gable-wall opening are investigated; only one gable wall is open in a case, while both gable walls are open in the other case. Closed-type model is also tested for the comparative purpose. For discussing the wind force coefficients for the main wind force resisting system, two column-base conditions, i.e., pinned and clamped, are considered. As for the structural load effect, focus is on the bending moment at windward knee for the pinned base frame and that at the windward base for the fixed base frame. First, the critical condition providing the maximum load effect among all frames and wind directions is detected from the structural analysis of load effects using the time history of wind force coefficients. Then, the LRC (Load Response Correlation) method is employed for evaluating the equivalent static wind force coefficients under this condition. Based on the results, a model of design wind force coefficient is proposed. Finally, the peak wind force coefficients for cladding design are specified based on the distributions of the maximum and minimum peak wind force coefficients several zones and the positive and negative wind force coefficients are specified for each zone.

^{*1} Graduate Student, Department of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Tohoku University

^{*2} Professor, Department of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Tohoku University

^{*3} Assistant Professor, Department of Architecture and Building Science, Graduate School of Engineering, Tohoku University

ETFE フィルムの延伸効果に関する実験及び解析的検討

丁 乙碩^{*} 河端 昌也^{**}

梗 概

ETFE フィルムを用いた構造形式のうち、テンション方式は内圧の維持装置の不要と力の流れにより形成される自然な曲面といった長所を持っている方式として、最近その事例が増え続けている。しかし、フィルムは弾性範囲での許容耐力が低いという問題を持っており、多様な建築物への使用をもっと広げるためにフィルムの高耐力化は重要になる。ETFE フィルムは既存の膜材料に比べ、顕著な伸び能力を持っているため、その長所を活かして塑性域まで延伸することも考えられる。

そこで、本報では、フィルム膜構造の耐力を高めるための方法として、パネル取付け時にフィルムを塑性域まで延伸することを 提案し、その有効性を検討する。まず、延伸成形実験を通じてテンション方式への適用可能性を確認し、フィルムの延伸効果を確 認するために外部荷重を想定した加圧実験を通じてその有効性を検討する。また、延伸成形実験を模擬した解析的検討を行 い、粘性挙動を考慮した弾塑性解析の有効性を検討する。

1. はじめに

近年、大スパン建築の屋根や外壁に ETFE フィルムを用いた 事例が増え続けている。ETFE フィルムは透明性、耐候性そして 材料リサイクル性等に優れる材料として透明から遮蔽まで光線 透過率の幅広いコントロール、紫外線や熱線など特定波長域の 光線の選択的な遮蔽、そして複層化による断熱性確保等のよう な機能性及びデザインの可能性より、今後も多様な建築物への 普及が期待される膜材料である。





(a)構造形式(b) The ARC(2012)図1 ETFE フィルムを用いたクッションの事例



ETFE フィルムを用いた構造形式には、クッションタイプ(空気

* 韓国 世明大学校 建築工学科 博士後研究員 博士(工学)

** 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 建築都市文化専攻 准教授 博士(工学)

膜方式)[図1]とテンションタイプ(張力膜方式)[図2]の2種類が最 も効率的な方法として知られているが、現在までの施工された 実例を見ると、テンションタイプに比べてクッションタイプの事例 がほとんどである。その理由として、ETFE フィルムをテンション タイプに適用するためにはフィルムのクリープやリラクセーショ ンのような材料の粘性挙動を解決しなければならない問題点が 挙げられる。

フィルム膜構造の設計法には、許容応力を第1降伏点までと する弾性設計と、フィルムの延性を考慮した塑性設計の2通りが 考えられる[図3]。小規模なパネルを想定した「ETFE フィルムパ ネル設計・施工指針案^[1]」は前者の考え方を採用したもので、第 1降伏点を許容応力としている。一方、ドーム・スタジアム等に使 用される大型フィルムクッションは実質的に後者の考え方による ものもあり、第2降伏点の15%ひずみに対応する荷重を許容耐 力としていると言われているが、先行事例の多い海外でも明確 な設計手法が示されていないため、塑性範囲における許容可 能な応力レベルや変形状態の明確化が望まれる。



一方、フィルムは弾性範囲での許容耐力が低いという問題を持っているが、既存の膜材料に比べ、顕著な伸び能力を持っているため、その長所を活かして塑性域まで延伸することも考えられる。フィルムの延伸によって、二つの効果が期待される。まず、 巨視的な観点から見ると、延伸により弾性的な安定した応力-ひずみ関係の範囲を拡張することができる。すなわち、塑性域でのひずみ硬化により降伏点が高くなり、耐力を高めることが可能になる。次に、微視的な観点から考えると、延伸により、フィルムの結晶化が進行し、材料性質が変化する。この結晶化はクリー プコンプライアンス、クリープ速度及び応力緩和速度を低め、応力緩和弾性率を高くする効果があるため、フィルムのクリープまたは応力緩和を抑制することができる^[2]。

また、フィルムの延伸による高耐力化(加工硬化)は他の製造分 野では一般的に行われており、包装用ラップや PET フィルムは その代表例である。図4は1軸引張時の ETFE フィルムの工学 ひずみと耐力比(A)、厚さ比(B)、およびこれらの積(C)を示してい る。耐力比は加工硬化後の応力を第1降伏点の応力で除したも のである。厚さ比は体積一定(ポアソン比 0.5)と仮定して求めた1 軸引張時の厚さを初期厚さで除したものである。ひずみ 300~ 400%の範囲は耐力が大きく上昇するため延伸効果が高いが、厚 さ減少や引裂強度、耐衝撃性、耐磨耗性の低下を伴うため建築 用途には適用しにくい。以上を考慮すると、1軸延伸では単位幅 あたりの耐力(C)が極値となる10~20%が効率的といえる。



図4 1軸延伸時のひずみと耐力比、厚さの関係

一方、延伸はパネル取付け時に行うことも可能であると考えられる。特に単純形状のパネルであれば、平面裁断でも取付時の 延伸やクッションの加圧延伸による曲面成形が可能で、低ライズ で高耐力のパネルや、高ライズでも溶着線が少なく滑らかな曲 面を製作することも可能である。しかし、このような取付時の延伸 成形の実例はほとんどない。その理由として、エアクッションは 取付時の初期張力導入を必要としないこと、延伸による局部的 な変形と残留ひずみの懸念があること、2%以上のひずみ領域で は複雑な粘塑性挙動を示し、精度良く評価する解析手法が未確 立であることが挙げられる。

フィルムの延伸成形に関する研究として、森山ら^{国通}はクッショ ン方式フィルム膜構造を対象として加熱加圧延伸による立体成 形実験を行い、その有効性について検討した。なお、加圧によ る2軸延伸を容易に行うことが可能であり、クッション方式におい ての有効性について検討を行ったが、テンション方式を対象と した延伸成形の有効性検討が課題として残されている。

そこで、本報では、フィルム膜構造の耐力を高めるための方法 として、パネル取付け時にフィルムを塑性域まで延伸することを 提案し、延伸によるフィルムの耐力上昇効果を確認するために 外部荷重を想定した加圧実験を通じてその有効性を検討する。 また、延伸成形実験を模擬した解析的検討を行い、フィルムの 弾塑性解析の有効性検討を行う。

2. ETFE フィルムの延伸効果の実験的検討

2.1 実験概要

ETFE フィルムの延伸効果に対する有効性を検討するために 延伸成形実験を行った。試験体の概要を図5に示す。試験体は 2m×2mの正方形フレーム、厚さ200µmのフィルム2枚を重ねて 平面フィルムを製作し、縮小率、エッジケーブルの有無、載荷パ ターンをパラメータとして表1のように8種類とした。



図5 試験体の概要

表1 試験体の種類

試験体名	エッジケーブル	縮小率	載荷パターン
T-00S	×	0%	単調増加加圧
Т-00С	×	0%	繰返漸増加圧
T-05S	×	5%	単調増加加圧
T-05C	×	5%	繰返漸増加圧
T-10S	×	10%	単調増加加圧
T-10C	×	10%	繰返漸増加圧
TE-05C	0	5%	繰返漸増加圧
TE-10C	0	10%	繰返漸増加圧

実験の様子を図6に示す。実験はフィルムをフレームに平張り した後、風荷重を想定して図7のように内圧による載荷実験を行 った。延伸による変形を抑える効果を確認するために、取付後 の2枚のフィルムの間にコンプレッサーの空気を送り込み、圧力 と変形を計測した。その時、中央部の鉛直変位はレーザー変位 計を設置し、加圧によるライズ変化を測定した。また、加圧時に フィルムの変形形状は2枚のフイルムのうち、下面のフィルムに 重り(ワッシャー)を貼付け、載荷中の変形形状を記録した。なお、 フィルムにはあらかじめ格子線を描き、フィルムの取付け直後と フレームから取り外した後の変形及び残留ひずみを計測した。

延伸率 0%と延伸率 5%における繰返漸増加圧実験の風景を 図8に示す。



図6 試験体の様子





(a) T-00C(縮小率:0%、鉛直変位:287mm)



(b) TE-05C(縮小率:5%、鉛直変位:200mm)図8 実験の風景

2.2 実験結果

実験結果を以下に示す。実験では、フィルムの応力を直接測 定できなかったため、フィルムの応力は図9のように変形形状が 円弧となることを仮定し、試験体の中央部の鉛直変位から式(2) を用いて求めた平均応力とした。なお、フィルムの平均ひずみ は式(3)を用いて、試験体の中央部の鉛直変位から同様な関係 により求めた。

まず、実験結果より、加圧方法とケーブル有無に対する内圧と ライズ比の結果を図10に示す。比較結果、加圧方法に対する実 験結果では図10(a)のようにほぼ一致する結果となり、加圧方法 による差異は見られなかった。また、ケーブル有無に対する結 果では図10(b)のように圧力レベルの違いが確認できたが、これ は材料挙動の違いよりケーブルの移動による結果と考えられ る。

$$R = \frac{L^2 + 4h^2}{8h} \tag{1}$$

$$\sigma_m = \frac{PR}{2t} \tag{2}$$

$$\varepsilon_m = \frac{2R\theta - L}{L} \tag{3}$$





次に、表1の8つの試験体のうち、加圧方法とケーブル有無に 対して同一な結果を表す試験体を除外し、試験体 T-00C(延伸 率0%)とT-05C(延伸率5%)の実験結果に対して検討を行う。 まず、T-00Cの場合、繰返漸増加圧における圧力とライズ比の関係を図11(a)に、応力とひずみの関係を図11(b)に示す。図11(a)を見ると、圧力1kPa時はライズ比7%、圧力2kPa時はライズ比17%、圧力2kPa時はライズ比14%の結果となった。延伸率が無い場合は初期剛性が極めて小さいため変形が大きく、ライズ7.5%、圧力1.2kPa付近でフィルムが降伏応力に達し、剛性が低下している。また、図11(b)の応力-ひずみ関係より、除荷後の残留変形を見ると、弾性範囲では除荷した後、ほとんど残留変形が残らずに元に戻るが、塑性域を超えてからは除荷時点から弾性域とほぼ同じ勾配で除荷され、加圧レベルが上がるにつれて残留変形も大きく生じる結果となった。

次に、T-05Cの場合、繰返漸増加圧における圧力とライズ比の 関係を図11(a)に、応力とひずみの関係を図11(b)に示す。 圧力 とライズ比の結果では圧力 1kPa 時にライズ比 4.5%、圧力 2kPa 時にライズ比 7.5%、圧力 3kPa 時にライズ比 10%の結果となって おり、T-00C と比べ、延伸による外圧に対する変形量が小さく抑 えられることが確認できた。また、除荷後の残留変形をみると、 図 11(b)のようにライズ比 5%、7.5%、10%の変形後も除荷した後は ほぼライズ比 0%に戻り、残留変形を生じてないことが確認できた。 また、図 11(a)では、加圧レベルを上げるにつれて剛性が増やし ているのに対して、図 11(b)では降伏応力を超えて「塑性域」に 達した後も応力の極大点と極小点を結ぶ直線の勾配は、弾性範 囲の勾配とほぼ同じになっている。つまり、材料の応力-ひずみ 関係には加工硬化と同様の現象が見られるが、載荷除荷に引 張弾性率は弾性時とほぼ同じであり、フィルムの面外変形に対 する剛性(幾何剛性)の上昇が見られる。



一方、延伸成形の実験時、試験体のうち、T-05S(延伸率 5%)と TE-10C(延伸率 10%)は試験体のコーナー部分でフィルムの引 裂きが生じることが確認されたため、施工時にあまり高い延伸率 を設定することは困難であると考えられる[図 12]。



図12 フィルムの引裂きの様子

3. 延伸成形実験の解析的検討

3.1 解析概要

延伸によるフィルムの応力分布や内圧による構造挙動を検討す るために、実験を模擬した解析を行った。フィルムの応力解析に は汎用プログラムANSYSを用いた。解析モデルを図13に示す。 材料モデルは、フィルムの弾塑性挙動を現すために、Von-Mises 降伏条件を用いたマルチリニア弾塑性モデルを採用し、フィルム の材料定数を図14に示す。解析条件は、延伸成形を想定して外 周部に強制変位を与えた後、実験時の加圧条件に合わせて内圧 条件を設定した。ただし、実験時は負荷と除荷の始点をライズ比 を基準としているのに対し、解析時は内圧(1kPa → 10Pa → 2kPa → 10Pa → 3kPa → 10Pa)を基準とした。



図14 フィルムの材料モデル

3.2 解析結果

外周延伸及び内圧に対する T-00C(延伸率 0%)の相当応力分 布を図 15 に、T-05C(延伸率 5%)の相当応力分布を図 16 に示 す。T-00C の場合、加圧時の相当応力分布は正方形試験体の 中央部で円弧方向に沿って最大応力が分布し、内圧 1kPa の負 荷時は第 1 降伏点(13MPa)を超えずに弾性範囲内での応力分 布を示している。内圧 2kPa と 3kPa の負荷時は第 1 降伏点 (13MPa)を超えて塑性域へ入っているが、第 2 降伏点(23MPa)に は至ってない。一方、T-05C の場合は、T-00C に比べて塑性域 が大きく広がり、内圧 1kPa の負荷時の最大応力は第 1 降伏点を 超えている。また、内圧 2kPa と 3kPa の負荷時の最大応力は第 2 降伏点(23MPa)に達している。





図 16 応力分布(T-05C)

次に、繰返漸増加圧時における実験と解析結果の比較を行う。 T-00C に対する圧力とライズ比の関係を図 17(a)に、応力とひず みの関係を図 17(b)に示す。また、T-05C に対する圧力とライズ 比の関係を図 18(a)に、応力とひずみの関係を図 18(b)に示す。 解析結果に関しては、図 17 と図 18 に示している相当応力値は 円弧仮定より求めた実験値とは異なるため、2.2 節と同様に解析 時の中央部の鉛直変位との関係から求めた平均応力と平均ひ ずみとした。実験と解析の比較結果、圧力とライズ比の関係、応 カとひずみの関係について、解析結果と実験結果とほぼ一致し、 加圧によるフィルムの挙動が再現できた。なお、実験における 繰返漸増加力時の曲線の膨らみは、ETFE フィルム特有の粘性 によるひずみ回復による影響と考えられる。



4. まとめ

本報では、ETFE フィルムの施工時延伸により、降伏応力の上 昇効果の確認と、テンション方式のフィルム構造への適用性を 検討することを目的として、モックアップ実験を実施した結果、得 られた知見を以下に示す。

- フィルムの施工時延伸により、降伏応力が上がって耐力の上 昇効果が得られ、外力による変形後にも緩みを生じにくくな ることが確認された。
- 2) フィルムの延伸範囲については、1 軸延伸では10~20%の延伸 が効率的であることが確認されたが、実験時の2 軸延伸では、 T-05S(延伸率5%)とTE-10C(延伸率10%)の試験体のコーナー 部分で引裂きを生じることが確認されたため、施工時に5%以 上の延伸率を設定することは困難であると考えられる。
- 3) ETFE フィルムの弾塑性モデルを適用して解析的検討を行った結果、実験結果とほぼ一致し、加圧によるフィルムの挙動を弾塑性解析を通じて再現できることが分かった。

謝辞

ETFE フィルムの延伸成形実験を実施するにあたり、太陽工業 (株)、旭硝子(株)のご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表 します。

参考文献

- [1] ETFE フィルムパネル設計・施工指針(案)、(社)日本膜構造 協会、2006
- [2] 日本材料学会編、固体力学の基礎、日刊工業新聞社、 pp.152, pp.176, 1981
- [3] Setsu Gakutei、河端昌也、西川薫、小竹達矢、山内優、 森山史郎:ETFE フィルムパネルの加熱加圧成形に関する 研究(その1)加熱時の挙動と材料定数、日本建築学会大会 学術講演梗概集、pp929-930、2005
- [4] 森山史郎、河端昌也、西川薫、小竹達矢、山内優、Setsu Gakutei:ETFE フィルムパネルの加熱加圧成形に関する 研究(その2)加熱加圧成形における挙動の考察、日本建 築学会大会学術講演梗概集、pp931-932、2005
- [5] 河端昌也、丁乙碩: ETFE フィルムの延伸立体成形に関す る研究-(その1) 延伸立体成形の概要、日本建築学会大会 学術講演梗概集、pp931-932、2008
- [6] 吉野達矢、瀬川信哉、小田憲史:ETFE フィルムの 2 軸引 張特性と弾塑性応力・変形解析、膜構造研究論文集 2004、 No.18、pp31-39、2004
- [7] 河端昌也、森山史郎: ETFE フィルムのひずみ速度依存性 と構造挙動について、膜構造研究論文集 2004、No.18、 pp41-46、2005
- [8] 河端昌也、森山史郎、會田裕昌: ETFE フィルムの粘弾性挙 動について、膜構造研究論文集 2005、No.19、pp1-8、2006

An Experimental and Analytical Study on Stretching Effect of ETFE film

EulSeok JEONG^{*)} Masaya KAWABATA^{**)}

SYNOPSIS

A tension type (tensile membrane structures) using ETFE film is pulled outward from the exterior to introduce tensile stresses. And such structures offer the advantage of a natural shape formed by tensile stress and eliminate the need for blast air. Recently, the number of tension type structures is increasing. But, there is problem of lower allowable strength under elastic range of ETFE film. A high strength of the film is important to spread more use in a variety of buildings. ETFE film has a remarkable stretching capacity compared to existing membrane material. It is contemplated that stretching to plastic region by taking advantage of their strengths.

In this paper, we proposes stretching the film to its plastic region during panel installation as a method of increasing the yield strength of the film membrane structure, and confirms the effectiveness of this approach. First, to investigate the possibility of application on tensile membrane structures, a stretch-fabrication test is carried out, and it is verified that it is possible to increase the yield strength of the film membrane structures. An analytic investigation is also carried out by simulating the experiment, and the effectiveness of the elasto-plastic analysis considering the viscous behavior of the film is investigated.

^{*)} Dr. Eng., Postdoctoral Research Associate, Department of Architectural Engineering, Semyung University, Korea

^{**} Dr. Eng., Associate Prof., Department of Architecture and Urban Culture, Faculty of Urban Innovation, Yokohama National University

ETFE フィルムを用いた対角アーチ型四角形パネルの延伸後の耐力に関する研究

古谷 宗一郎* 河端 昌也**

梗 概

ETFE フィルムを用いた構造形式のうち、テンション方式は内圧維持装置が不要であることや様々な曲面を形成できるため、近年、施工例が増えているが、応力緩和のような粘性挙動に対して未だ課題を有している。

テンション方式を用いた方法として、アーチを押し付けることで曲面を形成する延伸立体成形張力膜構造が提案されており、この方法による ETFE フィルムへの張力導入の有効性が確認されている。

本報では、延伸立体成形張力膜構造の実現可能性向上を目的とし、延伸成形後の粘性挙動と負荷荷重時の挙動を実験と解析の両面から把握する。また、様々なスケールでの解析を行い、延伸後の耐力評価法を提案する。

1. はじめに

フッ素樹脂フィルムは耐候性等の面で優れていることから、 膜構造建築物への使用例が多い。その中でも ETFE フィルム (以下、フィルム)は、高い透光性や耐久性から海外では利用事 例が多く見られる[図 1]。国内においても、2014年10月に国土 交通省告示第1446号の改正により指定建築材料として認めら れており、今後、国内建築物における使用が期待されるが、フ ィルムは織布膜材料とは異なり、大きなクリープひずみや応力 緩和などの粘性挙動を示すため、この点について考慮した上 で設計する必要がある。

実際にフィルムを建築物に使用する場合、クッション方式とテ ンション方式が効率的な構造形式として挙げられる。前者は、 内圧の調整により、立体形状の形成や外力作用時の変形追従、 雨水や積雪によるポンディング現象への対応が比較的容易で ある。一方で、空気圧で形成できる形状はガウス曲率が世の曲 面に限られ、また常時空気の送風を必要とするため、意匠面や 維持管理面等で制約となる。テンション方式は変形追従の点で 前者に劣るが、内圧制御機構が不要であることや、デザイン的 なバリエーションが豊富なことから、最近では施工例が増えて きている。ただし、クッション方式は「弾塑性評価」」及び「粘弾性 評価」の二つの評価方法を用いて、挙動を一通り把握できてい る¹⁾²⁾のに対し、テンション方式は粘性挙動に関する問題につ いて解明しなければならない点を未だ含んでいる。

このテンション方式については、フィルムの顕著な伸び能力 を活かして、立体裁断や外周引き込みによる張力導入を省略 できる方法として、ばねストラット式³⁾や延伸立体成形方式⁴⁾ が提案されている。しかし、両者の設計方法は異なり、前者は フィルムに生じる応力を一次降伏点未満に抑える弾性設計、後 者は二次降伏点まで許容する弾塑性設計が採用されている。

* 横浜国立大学大学院都市イノベーション学府 建築都市文化専攻

** 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院

フィルムの一次降伏応力はひずみ速度 1%/min で約 13MPa、 100%/min で約 16MPaと非常に低く、設計案或いは荷重条件に よっては発生応力を弾性範囲内に収めることが難しい状況が考 えられる。塑性域まで延伸することによる耐力上昇が実証実験 ⁵⁾ [図 2]より明らかにされているため、弾性設計に加え弾塑性設 計に関する研究を進める必要がある。

そこで本報では、既往の研究⁹を更に進めることを目的として、対角アーチを用いた延伸立体成形張力膜構造を取り上げる。この方式の基礎研究として、延伸後の応力緩和の影響とその後の繰返荷重による膜面の挙動を実験と解析から検証し、解析の妥当性を確認した上で延伸後の耐力評価法を提案する。



(a) Allianz Arena (2005) (b) Training Center for Mt.Rescue (2008) 図1ETFE フィルムを用いた海外事例



図2 延伸成形による張力膜構造の実証実験

大学院生 准教授 博士 (工学)

2. 応力緩和及び負荷荷重実験·解析

2.1 実験概要

フィルムを用いた張力膜構造の場合、長時間経過によって応 力緩和が発生し、張力が低下する⁵ことから、対角アーチモデ ルのようなパネルユニットの場合、実際には図3のような流れを 辿ることが考えられる。



既報⁶では、フィルムをアーチに押し付けて曲面を成形する 過程について、実験と解析の両面から確認を行った。本報では、 延伸立体成形後の応力緩和と静的負荷荷重時の挙動の把握を 目的に実験を行う。ここでの負荷荷重は等分布荷重(正圧)とし て、膜張力が増加する条件下で検討する。

試験体概要を図4に示す。試験体はフィルムを定着用フラットバーで取り付けた1.5m角の型枠フレームと対角に渡したアーチからなるパネル型試験体、実験時に型枠フレームを降下させるための全ネジ棒、及び支持部材の鉄骨土台から構成される。フィルムの厚さは100µmと200µm、アーチのライズ比は10%と15%として、これらを組み合わせた4種類について実験を行う。

計測の概要を図5に示す。アーチには頂点部と中間部の側面と下面の各3箇所にひずみゲージを貼付し、この結果からアーチにかかる軸力の推移を考察する。その際、雰囲気温度も計測する。フィルムには、頂点部及び中央部にひずみゲージを貼付し、中央部付近でレーザー変位計を用いて鉛直変位の測定を行った。加えて、予め描いておいた100mm角の格子を用いて、変形及び残留変形を計測した。

フィルム中央部ひずみを横軸、アーチ頂点部軸力を縦軸に とり、以下の①~④の各段階における挙動予想図を図 6(a)、ま たそれに付随する実験の様子を図 6(b)に示す。①初期状態で は、試験体フィルムの上に加圧用フィルムも予め取り付けてお く。このとき、加圧用フィルムは延伸後のアーチに影響が無いよ う十分伸ばしたものを使用する[図 6(c)]。②型枠の四隅に空け た孔に各柱に設置した全ネジ棒を通し、ナット締めにより徐々 に降下させて、フィルムをアーチに押し付けて曲面を形成する。 ③延伸完了後、2 時間放置して応力緩和させる。④荷重の負荷 では、試験体フィルムと加圧用フィルムの間に空気を送り込ん で圧力をかけ、除荷では圧力をゼロに戻す。以下、負荷と除荷 を繰り返し、最大 3.5kPa まで段階的に圧力を加える。





(b) 試験体写真



図6 実験概要

2.2 解析概要

実験時の応力状態等を把握するために解析を行う。フィルムの応力変形解析は汎用構造解析ソフトウェア ANSYS を用いて弾塑性解析を行う。解析では、多軸応力・変形状態を単軸状態へと換算するために、(1)~(5)式に示される相当応力(σ_{eq})及び相当ひずみ(\mathcal{E}_{eq}^{total})の関係を用いており、また、実験におけるフィルムの応力緩和を模擬するために、(6)式で得られる熱ひずみ(\mathcal{E}^{t})を使用している。

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right\}}$$
(1)

$$\varepsilon_{eq}^{total} = \varepsilon^e + \varepsilon_{eq}^p + \varepsilon^t$$

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma_{eq}}{E} \tag{3}$$

$$\varepsilon_{eq}^{p} = \int d\varepsilon_{eq}^{p} \tag{4}$$

$$d\varepsilon_{eq}^{p} = \frac{\sqrt{(d\varepsilon_{x}^{p} - d\varepsilon_{y}^{p})^{2} + (d\varepsilon_{y}^{p} - d\varepsilon_{z}^{p})^{2} + (d\varepsilon_{z}^{p} - d\varepsilon_{x}^{p})^{2}}{+\frac{3}{2}(d\gamma_{xy}^{p}^{2} + d\gamma_{yz}^{p}^{2} + d\gamma_{zx}^{p})}$$
(5)

$$\sigma^t = E\varepsilon^t = Ea\Delta T$$

ε^{e} :弾性ひずみ	σ^t :熱応力	\mathcal{E}^{p}_{eq} :相当塑性ひずみ
$d\varepsilon^p_{eq}$:相当塑性ひずみ増分	E: 剛性	V:ポアソン比
a:線膨脹係数	ΔT :温度変化量	

フィルムの降伏点は、ひずみ速度や引張試験の方法によっ て値が変化する。このため、一軸引張試験(1%/min)と二軸 引張試験(応力比1:1,0.67%/min)の結果を基に、Von-Mises の降伏条件を用いたマルチリニア弾塑性材料モデルを作成 し、本報では表1に示すパラメータを使用する。このモデル から二軸引張試験の再現を行い、その結果を実験結果と比較 する。図7より近い結果を示していることから、作成したモ デルは妥当と言える。



図7 解析モデルによる再現性

表1 フィルムの解析パラメータ

ポアソン比	一次剛性	二次剛性	三次剛性	一次 降伏点	二次 降伏点	線膨張 係数
0.45	800MPa	73MPa	3MPa	1.66% 13.28MPa	15% 23.04MPa	6×10 ⁻⁵

アーチの応力解析には汎用解析プログラム MIDAS Gen を 用いた。モデルは試験体と同断面とし、鋼材のヤング係数 205,000N/mm²を使用する。

図 8 に延伸立体成形実験の解析手順を示す。ここでの仮想 温度は応力緩和を模擬するために用いるもので、適用ステップ の応力とひずみ以外には影響を及ぼさない。



2.3 フィルム用ひずみゲージの補正

実験でフィルムの計測に用いたひずみゲージは、ゲージベ ースのポリイミドがフィルムに比べて剛性が非常に高いため、 計測値は実際のひずみ量よりも小さな値となる。従って、これを 補正する変換係数を決定するため、全体ひずみ制御で繰返一 軸引張試験を行い、両値を比較する。

図9(b)のように負荷側と除荷側で異なる経路の荷重履歴依存 性が確認できたため、それぞれに関して実験結果から近似式 図9(c)を設定した。ただし、計測値1.2~1.7%区間(200µm)、

(2)

(6)

0.6~1.0%区間(100µm)では、チャック間ひずみに対するひず みゲージの感度が鈍く、変換が難しい。



(c) 変換近似式(上:100µm 下:200µm)

ひずみゲージ値	変換近似方程式
$0 \le x < 0.947$	$y=96.9x^{6}-204.1x^{5}+156.3x^{4}-50.1x^{3}+5.2x^{2}+1.9x+0.01$
$0.947 \le x \le 2.62$	$y=0.97x^{5}-7.8x^{4}+26.01x^{3}-46.3x^{2}+48.6x-17.0$
$0 \le x \le 2.62$	$y=2.45x+\alpha$
$0 \ge x \ge 2.02$	αは除荷前のひずみ値に応じて設定する。
ひずみゲージ値	変換近似方程式
$0 \le x < 1.376$	$y=5.65x^4-11.813x^3+7.922x^2-0.375x+0.106$
$1.376 \le x \le 4.729$	$y=-0.082x^{4}+1.158x^{3}-6.087x^{2}+15.372x-8.062$
$0 \le x \le 4.729$	y=1.653x+β
0=11=11/25	βは除荷前のひずみ値に応じて設定する。
	ひずみゲージ値 0 \leq x<0.947 0.947 \leq x \leq 2.62 0 \leq x \leq 2.62 ひずみゲージ値 0 \leq x<1.376 1.376 \leq x \leq 4.729 0 \leq x \leq 4.729



2.4 応力緩和率の推定

仮想温度を用いて応力緩和を模擬する場合、応力の緩和量 の把握が必要となる。膜面の応力を測定するには音波測定機 を用いる方法があるが、対角アーチ試験体は膜面の曲率が大 きく、その方法は適用しづらい。従って、フィルムの応力が反映 されるアーチ軸力を用いて、応力緩和について考察する。

厚さ200µm・ライズ比15%の試験体から得られた、中央部ア ーチ直交方向のフィルムひずみ(変換後)と、アーチ頂点部の 軸力の関係を図10に示す。A点で傾きが変化していることから フィルムが一次降伏点に達したと考えられる。延伸後の2時間 放置によってB点まで軸力が低下しているが、このときの値は A点と一致している。このことから、フィルム中央部では2時間 程度で一次降伏点付近まで応力が緩和すると推定できる。



2.5 実験と解析の比較

フィルム中央部付近での鉛直変位の推移を図 11 に示す。ここでは延伸立体成形後を基点(=0)とし、それ以降の相対変化

量について比較する。負荷側は実験値が解析値より大きな値と なっているが、これは加力中のクリープによる影響と考えられ、 全体的には除荷後の値がほぼ同じであることや、残留変形が 発生するタイミングが同時であるなど概ね近い結果と言える。

次に、各試験体の中央部および頂点部におけるフィルムの ひずみ計測値・解析値、及び格子長さの測定値を図 12 に示す。 全試験体で 2.3 節で示したひずみゲージの感度が鈍い区間を 含んでおり、この区間では差異が大きくなっているが、それ以 外では良好に一致している。







図13にアーチ軸力の比較結果を示す。実験値は、鋼管の中 心を中立軸と仮定し、アーチ側面(図5(a)の頂点部:①③、中間 部:④⑥)の平均ひずみに、アーチ断面積と鋼のヤング係数 205,000N/mm²を乗じて求めている。文献[®]で延伸時の挙動を

確認しているため、ここでは延伸後を基点として考察する。 応力緩和中の値に差異が見受けられる一方で、全試験体で

ホリ版和中の値に定美が完全いちんち、アイズ出3000年で 雰囲気温度に変化が存在している。そのため、ライズ比10%試 験体からフィルムを取り除いたアーチ単体について、温度を変 化させてテストしたところ(20±1.5℃)、約2kN/℃の違いが確認で きた。このことから、その熱ひずみの影響であると考えられる。 これを考慮すると、応力緩和後の負荷荷重時における相対変 化量は非常に比較的良い評価できている。



(a) 厚さ100µm ライズ比10%試験体



(b) 厚さ100µm ライズ比15%試験体



(c) 厚さ200µm ライズ比10%試験体



(d) 厚さ200µm ライズ比15%試験体

図13 軸力比較

3. 延伸後の耐力

3.1 解析概要

図 14 に示すモデルを対象として弾塑性解析を行う。応力 緩和量は、フィルム中央部で一次降伏点まで緩和する短期間 と、フィルム中央部で 50%緩和する長期間の2パターンとす る。



図14 対象モデル

3.2 定義

一般的に建築材料工学の分野で用いられるの「耐力」という用語は、アルミニウム合金のような降伏点が明瞭でない材料において、降伏応力に相当する値のことをいう。ただし、本報では延伸により塑性域に達したフィルムが負担できる荷重の最大値を「延伸後の耐力」と定義する。

前章において、弾塑性解析モデルの妥当性が確認されたため、そのモデルを用いて、応力緩和後の各荷重時の応力状態を再現する。ただし、文献²⁾からテンション方式の場合、長期間経過により約 50%の応力緩和が発生することが分かっているため、本節では緩和率を 50%とする。



図 15 解析による挙動再現(200µm・15%・1500mm モデル)

中央部アーチ直交方向におけるフィルムの相当ひずみと 相当応力の関係を図 15、また図中の(i)~(iv)におけ る応力分布図を図 16 に示す。これより負荷時の応力状態が 延伸直後の応力値を超えない場合、除荷後の応力値は負荷前 と同じ値に戻っていることが分かる。従って、対象モデルが 過去に経験した最大応力に相当する荷重が「延伸後の耐力」 であると言える。このことは、弾塑性挙動における加工硬化 現象と類似している。



3.3 フィルムの熱収縮現象

ポリエチレンは結晶部と非晶部からなる結晶性樹脂であ り、製造中に電子線を照射することで非晶部においてエチレ ン分子同士が繋がった架橋点が形成される。一般的には電子 線照射後に成形のための加熱・冷却加工により、膨張した架 橋ポリエチレンが得られるが、これは結晶部の融点以上の加 熱により結晶が融解して軟化し、架橋点の存在から膨張前の 形状まで熱収縮する[図 17]。

このような形状記憶効果はエチレン分子結合を多く含ん だフィルムでも得られ、実際に図 18 のように温風(約 70°C) をかけることで塑性ひずみが回復する現象が見られる。







(a) 処理前
 (b) 温風(約 70℃)処理後
 図 18 温風によるひずみ回復現象

3.4 延伸後の耐力

応力変化の大きいフィルムの中央部における除荷後の残 留ひずみに着目し、①残留ひずみが増加しない場合と、②残 留ひずみ増加量が 0.5%以内の場合について、延伸後の耐力 を提案する。ただし、②の設定値 0.5%は、熱収縮現象によ り、温風をかけることで残留ひずみを許容できる可能性があ ることから、これを考慮して仮に設定している。

フィルムを固定するフレームの辺長 L をフィルムの厚さt で除した値を横軸にとり、延伸後の耐力を縦軸に示す[図 19]。 **①** 共に横軸が 10 以下になると急激に耐力が上昇する傾向 を示している。ライズ比 10%モデルは 15%よりも全体的に 耐力が低いが、長期間の応力緩和により大幅に向上している ことが見て取れる。また、0.5%の残留ひずみの発生を許容し

た場合、サイズ/厚さ比(==)が小さくなるほど影響が大きくなることが分かった。

Ζ.



(a) 提案①:残留ひずみ増加無し



図19 延伸後の耐力

4. まとめ

本報では、フィルムを用いた対角アーチ型延伸立体成形張力膜構造について、実験及び解析から以下の知見を得た。

- 延伸成形後、時間経過により応力緩和が発生しており、フィルム中央部において二時間程度で一次降伏応力まで緩和 すると考えられる。
- 実験の検証結果から、実験と解析は似た傾向を示しており、 応力緩和を仮想温度で模擬することにより、弾塑性解析が有 効である。
- 3) 弾塑性解析を用いて検証した結果、塑性化したフィルムの 応力緩和後における許容応力はそれまでに材料が経験した 最大応力値と同値であると思われる。
- 4) 複数のモデルについて解析を行った結果、サイズを小さく する、アーチのライズ比を大きくすることで許容荷重が上がる 傾向がある。

今後は、解析の再現性を向上するために粘性を含んだモデ ルを構築する必要がある。

謝辞

ETFE フィルムの延伸立体成形実験を実施するにあたり、太陽工業(株)、旭硝子(株)のご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森山史郎: ETFE フィルム空気膜構造における粘弾性挙動 に関する研究、横浜国立大学大学院博士論文、2006
- 2) 丁乙碩: ETFE フィルムを用いた張力膜構造の粘塑性挙動 と延伸成形に関する研究、横浜国立大学大学院博士論文、 2013
- 3)水野公義、斎藤公男、岡田章、宮里直也: ETFE フィルムの 張力膜構造への適用性に関する基礎的研究 ばねストラッ ト式張力膜構造の提案、日本建築学会大会学術講演梗概 集、pp911-912、2007
- 4)河端昌也、丁乙碩: ETFE フィルムの延伸立体成形に関する研究 (その 1)延伸立体成形の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp931-932、2008
- 5) 河端昌也、丁乙碩、岡村卯吉:外周引込によるテンション 方式フィルム膜構造に関する研究 (その1)施工時延伸と 経年後の張力変動、日本建築学会大会学術講演梗概集、 pp919-920、2012
- 5) 丁乙碩、安武信一、河端昌也: ETFE フィルムを用いた張 力膜構造の延伸成形に関する研究、膜構造論文集 2012、 pp1-12、2013
- 7) 住友電気工業: SEI テクニカルレビュー第 184 号、pp66-70 2014 年 1 月

A Study on Proof Stress after the Stretch Fabrication of Diagonal Arch Square Panel using ETFE Film

Soichiro FURUTANI^{*)} Masaya KAWABATA^{**)}

SYNOPSIS

The tension type is widely being accepted as the structural form in which ETFE film is used, because such structures offer the advantage of various shapes formed by tensile stress and elimination of the need for blast air. Recently, the numbers of tension type structures are increasing, but there are problems of viscosity behavior such as relaxation of ETFE films under long-term stress. In previous works, "Stretch-fabrication of Three-Dimensional Shapes Using ETFE Film" was proposed as a way to form a curved surface by pressing film against an arch, and it was confirmed that such structure has the effectiveness of introducing tension.

In this paper, to raise the possibility of "Stretch-fabrication of Three-Dimensional Shapes Using ETFE Film", we investigate the influences of viscosity and the behavior under additional loads after the stretch fabrication, from both structural experiments and FEM analysis. In addition, we propose the proof stress after the stretch formed by analyzing various scales.

^{*)} Graduate Student, Department of Architecture and Urban Culture, Graduate School of Urban Innovation, Yokohama National University

^{**)} Dr.-Eng. Associate Prof., Faculty of Urban Innovation, Yokohama National University

透過日射を考慮した膜構造建築物の半屋外空間における熱放射環境の予測手法 - 膜屋根を有する駅プラットホームの実測値と計算値の比較検討-

親川昭彦^{*1} 吉野達矢^{*2} 梅干野晁^{*3}

梗 概

著者らは、2008年に膜構造建築物を対象に、屋外に開放的な建築空間に形成される熱環境の実測調 査を行っている。本報では、その実測結果をもとに膜構造建築物の屋根下空間に形成される熱放射環境 を数値シミュレーションにより予測し、その評価方法について述べるものである。本文の前半では、実測 結果をもとに、膜材の透過日射等が膜に覆われている建築空間の熱環境に及ぼす影響の度合について 述べると共に、透過日射を考慮した平均放射温度分布の算出が行える数値モデルの改良を行った。後半 では、本予測ツールを用い、本実測対象の膜構造建築物を計算モデルとして、膜材料の透過日射の違 いによる熱放射環境に及ぼす影響について予測し、評価を行った。

1. はじめに

近年、屋外に開かれた半屋外空間においては、昼光や通風 といった自然エネルギーを活用した明るく涼しい空間が求めら れている。そのような空間を実現するために、透光性のある材料 で構成される膜構造建築物が注目されている¹⁾。このような背景 の中、半屋外空間を有する膜構造建築空間(以下、膜下空間) においては、熱環境を緩和する具体的な設計提案が求められ ている。

数値シミュレーションを用いた屋外の熱放射環境の把握を行う研究は、数多くなされている。山田ら²⁰は、都市形態を再現し、 道路上の人体が受ける短波長放射量と長波長放射量の計算を 行っている。しかし、この数値モデルは半屋外空間を対象とした ものではない。また、膜下空間では佐野により、大空間エアドー ムを対象とした夏期及び中間期の垂直温度分布の推定³⁰、夏期 の冷房負荷の推定⁴⁰が行われている。これらは、膜材料の透光 性という長所が逆に熱負荷の過剰となるような空間、即ち、周囲 が囲まれた閉鎖的な膜構造の建築空間が主な研究対象になっ ており、半屋外空間を対象にしたものではない。

一方, 梅干野ら⁵は, 設計支援を目指した屋外熱環境のシミュ レーションツールの開発を行っている。このツールは **3D-CAD** を用いて建築外部空間を再現し, 空間全表面での熱収支計算

*3 放送大学 教授 工学博士

による表面温度分布を予測するものである。また、実測データを もとに膜下空間に形成される夏季の微気候を明らかにし⁹、計 算モデルを数値シミュレーションに導入し、計算手法を開発して いる⁷⁾。さらに、生活空間における熱的快適性を評価するため、 空間形態や構成部材の違いが評価できるように、長波長放射と 日射を考慮した平均放射温度を評価指標に用いている⁸⁾。ここ では、直達日射と天空日射、反射日射を考慮しているが、膜材 からの透過日射の影響は考慮していない。しかし、膜構造建築 空間を評価する場合、膜材の日射透過率が10~20%程度であ ることから、透過日射による膜下空間の放射環境への影響を考 慮する必要がある。また、膜材の日射反射率が70~80%程度と 高いため、膜下空間における多重反射を考慮する必要がある。

本報では、梅干野らが開発している熱環境シミュレーションツ ールを用いて、膜下空間における熱放射環境を評価するため に、透過日射を考慮した平均放射温度の算出方法を示す。その 際、透過日射と多重反射を導入する。また、著者ら⁹が実測した 膜屋根を有する駅プラットホームを計算モデルとし、熱環境の実 測値と計算値を比較し、膜下空間に形成される熱放射環境の計 算精度を確認する。さらに、本実測対象を計算モデルとして、膜 材料からの透過日射の違いによる膜下空間の熱放射環境に及 ぼす影響について予測し、評価を行う。

^{*1} 太陽工業株式会社 研究開発本部 博士 (工学)

^{*2} 太陽工業株式会社 技術研究所 博士 (工学)

2. 透過日射を考慮した熱環境の計算方法

設計実務において膜下空間の熱環境を設計する際,周辺地 物からの熱的影響を考慮するとともに,膜構造建築物の空間 形態や構成部材を決定する必要がある。その際,パラメトリ ックな提案を前提に,短時間で大まかに熱環境を予測し,評 価する必要がある。本報の熱環境評価は,透過日射を考慮し た平均放射温度(以下,OUT-MRT)を用いるとし,周辺地物から 人体に入射する放射エネルギーの放射量と平均放射温度の計 算式に,膜材からの透過日射の影響が考慮できるよう計算ア ルゴリズムを拡張する。以下に,熱環境の予測手法および OUT-MRT の計算方法について述べる。

2.1 熱環境予測手法の計算方法

熱環境予測手法は、熱環境シミュレーションを実行するための条件設定部分である「1)周辺地物の空間形態と構成部材の再現」と、「2)熱環境の計算」、「3)計算結果の可視化」に分けられる。ここで、熱環境シミュレーションとは、街区における建物や地面等の表面温度を予測するシミュレータである。また、図1に熱環境予測手法の計算フローを示す。

1) 周辺地物の空間形態と構成部材の再現

計算対象となる空間形態(建物や地面,樹木等)や構成部 材に関する情報は、意匠と構造の設計で活用した 3D-CAD モ デルを用いて、3 次元の空間形態を再現した上で、自動的に メッシュモデルを生成する。次に、各メッシュに、法線の向 きや部位、材料特性(日射反射率や熱伝導率など)等の情報 を格納する。ここで、メッシュモデル生成のアルゴリズムは、 既往のツールのモデルと同様に均等メッシュサイズを採用す る¹⁰。

2) 熱環境の計算

熱環境の計算は、対象範囲内の膜構造建築物を含めた周辺 地物の外表面の各メッシュについて熱収支計算(直達日射, 天空日射,反射日射や膜材からの透過日射を含む受熱日射量, 大気放射量,対流熱伝達量,周辺地物からの長波長放射量) と断面方向の一次元非定常熱伝導計算により、表面温度を算 出する。表面温度は一日を通して対象モデルの全ての表面温 度分布として得られる。尚、熱環境の計算は、梅干野らが開 発した膜材の伝熱計算モデルを適用する。ここでは、膜材料 を透過した日射は指向性のない均等拡散としている。また、 膜材からの透過日射の膜下空間内における反射日射は、多重 反射を考慮する。本報では、4回反射とする。

3) 計算結果の可視化

計算結果は、通常の設計作業時に必要となる情報として、 昼光率や天空率等の設計要件や、評価に必要となる表面温度 分布を 3D-CAD モデル上に 3 次元画像で可視化する。また、 全表面温度から対象地域内の OUT-MRT 分布を求め、同様に可 視化を可能にしている。ここで、人体モデルは微小立方体と し、重み付け係数を用いて人体の受ける放射量を算出する。 1)周辺地物の空間形態と構成部材の再現



2)熱環境の計算



図1 熱環境予測手法の計算フロー

$$R_{human(A)} = a_1 \delta_s \left(\frac{A_p}{S_{human}} I_d \delta_{di} + \sum_{i=1}^6 W_i (\varphi_i I_{si} + \sum_{k=1}^S C_{ik} I_{rk} + \delta_{il} \sum_{k=1}^S C_{ik} I_{tk}) \right) + a_2 \sum_{i=1}^6 W_i \left(\sum_{k=1}^S C_{ik} L_{object(k)} + \varphi_i L_{sky(i)} \right)$$
(1)

$$OUT - MRT = \sqrt[4]{\frac{R_{human}}{\sigma}} - 273.15$$
 (2)

S	・・メッシュ面の総数	C_{ik}	:形態係数
<i>i</i> (下付)	:微小立方体面番号	$\pmb{\varphi}_i$:天空率
I_d	:直達日射輝度[W/m]	a_1	:人体の日射吸収率[-]
I _{si}	:天空日射輝度[W/m²]	a_2	:人体の放射率[-]
I _{ri}	:反射日射輝度[W/m]	S _{human}	:人体の表面積[m]
Ι _{τi}	:透過日射輝度[W/m]]	A_p	:人体の有効放射面積[m²]
$L_{object(k)}$:長波長放射輝度[W/m²]	W_{i}	:重み付け係数[-]
L _{sky(i)}	:大気放射輝度[W/m]	σ	:ステファンボルツマン定数[W(m²・K4)]
δ_{di}	:1のとき、直達日射授受	する。00	のとき直達日射授受しない
δ_s	:1のとき、日射を考慮す	る。0の	とき日射を考慮しない
δ_{π}	:1のとき、透過日射を考慮	慮する。	0のとき透過日射を考慮しない

2.2 透過日射を考慮した平均放射温度(OUT-MRT)の算出方法

OUT-MRT の計算方法は、微小立方体が受ける日射を考慮 した放射量を計算し、式(2)により求める。放射量の計算には、 人体が受ける日射量 (直達日射量, 天空日射量, 反射日射量, 透過日射量) の吸収分と放射量 (大気放射量, 地物からの長 波長放射量) の吸収分を合計した値で、式(1)により求める。 また、人体の長波長放射量の放射率は 1.0、日射吸収率は 0.7 とする。ここで、4.4 節で透過日射の違いによる OUT-MRT への影響を比較検討するため、式(1)において $\delta_{s}=0$ 、 $\delta_{ri}=0$ の場合、長波長放射のみの平均放射温度 (以下、MRT) を、 $\delta_{s}=1$ 、 $\delta_{ri}=0$ の場合、透過日射以外の日射を考慮した平均 放射温度 (以下、OUT-MRT(τ 0)) を、 $\delta_{s}=1$ 、 $\delta_{ri}=1$ の場 合、透過日射を含む日射を考慮した平均放射温度 (以下、 OUT-MRT(τ)) を示す。

3. 駅プラットホームの実測

本手法の計算結果を比較検討するため、著者ら⁹が実測調 査を行った駅のプラットホームに着目する。ここでは、実測 概要について述べるとともに、数値シミュレーションの計算 条件と実測結果について述べる。

3.1 実測概要

実測対象は神奈川県川崎市に位置しているK駅の膜屋根 を有するプラットホームである(図2)。測定は外部気象とプ ラットホームに分けられ,外部気象は2008年8月1日から8 月4日に24時間,プラットホームは8月4日の10時から15 時30分連続測定を行った。また,膜下空間の太陽放射領域の 短波長放射と常温域熱放射の長波長放射を中心に夏季の熱放 射環境の特性を把握した。また,K駅はM駅の東北東の方角



約2.3km に位置しており、金属とスレート屋根を有するプラ ットホームである。

3.2 実測期間における気象

ここでは、8月4日の結果をもとに気象条件を設定する。



図3に外気温と相対湿度,水平面全天日射量の結果を示す。 尚,風速については,平均0.5~1.0m/s程度の微風であった。

3.3 実測結果

1) 長波長放射環境

膜屋根の裏面および膜屋根下の床面に着目した熱画像を図 4、図5に示す。この結果から、12時21分における膜の屋根 裏面温度は39~40℃を示し、床面温度も39~40℃であった。 また、屋根なし部の床面温度は膜屋根下に対して、10℃程度 高い値であった(図6)。

膜屋根下の床面から1.2mにおける13時44分の全球熱画像 を図7に示す。ここで、熱画像から算出した平均放射温度 (MRT)は37℃であった。これは、外気温に比べると2℃程度高 い値であった。

2) 表面温度の日変化

図 8 に屋根裏面温度を,図 9 に床面温度の日変化を示す。 屋根裏面は平均で38.3℃,13 時46 分で最大42.2℃であり, 屋根下床面は平均で37.5℃,13 時38 分で最大40.7℃であっ た。また屋根なし床面は平均で44.1℃,13 時38 分で最大 49.7℃であった。

4. 数値シミュレーションによる計算結果と実測結果の比較

上述した実在街区にある駅プラットホームを対象に, 膜材 からの透過日射が膜下空間に形成する熱放射環境への影響を 把握するため検討を行う。まず本予測手法により,多重反射 を考慮した表面温度分布とMRTを計算し,実測結果と比較 する。次に, 膜材の日射透過率の違いによる OUT-MRT(τ) と OUT-MRT(τ 0)を比較し, 膜下空間の熱放射環境への影響 度合いを把握する。ここでは,実測日(8月4日)の気象デ ータ等を用いて膜構造建築物を含む街区全体を計算モデルと する。

4.1 街区形状のモデル化

街区形状の計算モデルと構成部材を図10に示す。計算モデルは図2の実測対象のプラットホームを含む186m×286mの街区全体とする。街区は起伏のある地面に、低層から中層の建物が7種類、その他屋外通路や自転車置き場等のキャノピーがあり、その中央に長さ約200mの2棟の駅プラットホームが並列している。また、構成部材の材料特性を表1に示す。ここで、計算領域において40cmの均等メッシュ分割とし、メッシュ分割数は474,609であった。

ここで、透過日射を考慮した OUT-MRT(τ)を検討する上で、膜下空間への影響を考慮し、日射透過率が0%と15%の2 つのケースについて検討する(表 2)。

4.2 気象条件と建物の室温スケジュールの設定

計算に用いる気象データは、図3の屋根なし部の水平面全 天日射量とK駅の膜下空間の外気温と相対湿度の実測結果を 採用する。ここで、日射量は水平面全天日射量を直達日射成 分と天空日射成分に分散する。直達日射量は Bouguer の式を、 天空日射量は Nagata の式により計算する (図 11)。また、外 周建物の室温スケジュールを図 12 に示す。



図10 計算モデルと構成部材

表1 材料特性

-					
	構成材料	厚さ [nn]	日射反射率	熱貫流率 [W/㎡・K]	熱容量 [kJ/㎡・K]
屋	膜材	1	(表2)	0.1	2
根	鋼板	51	0.3	2.19	71
	アスファルト	227	0.2	0.92	363
	アスファルト2	197	0.4	2.92	362
蠈	タイル	250	0.3	1.99	404
	コンクリート(普通)	195	0.2	1.55	375
	コンクリート(ALC)	330	0.2	1.55	375
	憲業系サイディング	185	0.2	0.42	38
柱	鉄骨	2	0.3	0.45	15
地	アスファルト舗装	130	0.1		
面	アスファルト舗装2	130	0.3		
	コンクリート舗装	70	0.2		
	乾燥裸地	500	0.2		
	緑地	150	0.2		





4.3 表面温度とMRT の計算結果と実測結果の比較

膜下空間を構成する部材の表面温度が最大となる13時45 分に着目し、街区全体と膜下空間の表面温度分布を図13と図 15に示す。まず、周辺地物から膜下空間への放射の影響が大 きい場所として、斜面緑地と建物1,2,および地面に着目す る。斜面緑地と建物の表面温度は37~46℃程度、地面は50 ~70℃程度であった。一方、膜屋根は直達日射が当たってい





る膜面温度は外気温より5℃程度高い40℃前後に上昇してい るが,直達日射が当たらない膜面温度は外気温より2~3℃高 い37℃程度であった。また,床面の表面温度も膜面温度と同 程度の値であった。ここで,本予測による計算結果の妥当性 を確認するため,実測時の評価点(図15のB,C)の膜面温 度と床面温度の計算値と実測値を比較した結果を図16に示 す。計算値は実測値と0.5~2℃以内で一致している。また, 床面から1.2mの高さの全球熱画像による表面温度の計算結 果(図14)と実測結果(図7)から計算したMRTは、37℃ 程度であった。

4.4 透過日射が熱放射環境に与える影響

透過日射を考慮した膜下空間の熱放射環境への影響を確認 するため、13時45分におけるOUT-MRT(τ)分布の計算結 果を示す(図17(C))。膜屋根からの透過日射の影響の大きい F点で49.7℃,建屋の影響を受けるG点で37℃となっている。 一方、日向は75.3℃であった。

この分布の形成要因を示すため、MRT(図17(a))の計算 結果とOUT-MRT(τ 0)(図17(b))の計算結果を比較する。 長波長放射の影響を見ると、MRT が31~38[°]C程度の範囲で 分布しており、膜屋根からの影響の大きいF点で36.8[°]C、建 屋の影響を受けるG点で34.6[°]Cとなっている。また、柱から ホーム端部方向に、1~2[°]C程度上昇しており、温度変化が見 られた。一方、日向で38.6[°]Cであることから、膜屋根の設置 により2[°]C程度の低下がみられた。

日射透過率を0としたときの日射の影響を確認するため, 図 17 (b)の計算結果と比較する。OUT-MRT (τ 0)が 31~66℃ 程度の範囲で分布していることがわかった。ここで, MRT の 影響分を差し引くと、日射の影響により0~28℃程度上昇しており、膜屋根からの影響の大きいF点では46℃(+10)、建屋の影響を受けるG点で36℃(+2)となっている。また、ホームの南から北方向に向かい、6℃程度低下しており、温度変化が確認された。北側のホームでは、柱近辺で4℃程度さらに低下している。一方、日向は75.3℃(+37)であった。

透過日射の影響を確認するため、図 17(C)の計算結果と比較する。OUT-MRT(τ)が 31~68°C程度の範囲で分布していることがわかった。ここから OUT-MRT(τ 0)の影響を差し引くと、透過日射の影響により 1~6°C程度上昇しており、膜屋根からの影響の大きい F 点では 49.7°C(+4)、建屋の影響を受ける G 点で 37°C(+1)となっている。また、ホームの南から北方向に向かい、7°C程度低下しており、温度変化が見られた。

5. 結論

半屋外空間における膜構造建築物の熱放射環境を評価する ため、透過日射を考慮した平均放射温度分布の算出が行える 数値モデルの改良を行った。その際、透過日射と多重反射を 考慮し、実在する駅プラットホームを対象に、膜下空間に形 成される熱放射環境の実測結果と本予測手法による計算結果 を比較し、その精度を確認した。また、本実測対象を計算モ デルとして、膜材料からの透過日射の違いによる膜下空間の 熱放射環境に及ぼす影響について予測し、評価を行った。そ の結果、次のことがわかった。

- 表面温度と MRT の計算精度を確認するため、実測値と 計算値を比較した結果、0.5~2℃以内で一致した。また、 床面から 1.2m の高さにおける全球熱画像の実測結果から算出した MRT と、計算結果から算出した MRT は同程 度の 37℃であった。したがって、本予測手法の表面温度 と MRT の計算値は妥当であることが確認できた。
- 2) 透過日射の違いが膜下空間の熱放射環境に与える影響を 確認するため、長波長放射のみの平均放射温度と、日射 透過率を0としたときの日射を考慮した平均放射温度を 比較することで、その形成要因を分析した。その結果、 長波長放射(MRT)に対し、透過日射を0としたときの OUT-MRT(τ0)は+1~28℃程度の影響があり、そこに 膜材からの透過日射の影響を考慮したときの OUT-MRT (τ)は、さらに1~2℃程度上昇することが分かった。以 上より、透過日射が膜下空間の熱放射環境に与える影響 が確認できた。

今後,熱放射環境に加え,人体の着衣量や温熱感を考慮した評価を行える設計手法を構築し,設計提案につなげて行きたい。

[謝辞]

本研究の一部は 2011 年度能村膜構造技術振興財団からの 研究助成金を受けた成果である。ここに感謝申し上げます。

[参考文献]

- 1)東京駅八重洲ロ「グランルーフ」:東日本旅客鉄道株式会社, 2013.7.2, http://www.jreast.co.jp/press/2013/20130701.pdf
- 2)山田昇, 齋藤武雄, 日射を考慮した都市空間の熱環境評価に 関する研究, 太陽エネルギー, №28, pp.65-70,2002
- 3)佐野武仁:大空間エアドームの夏季,中間期における垂直温 度分布の実測と推定に関する研究,日本建築学会計画系論 文集, No.472, pp.21-29, 1995.06
- 4) 佐野武仁:大空間エアドームの夏期の熱負荷の推定に関する研究、日本建築学会計画系論文集, No.489, pp.37-46, 1996.11
- 5) 梅干野晁, 浅輪貴史, 中大窪千晶: 3D-CAD と屋外熱環境シ ミュレーションを一体化した環境設計ツール, 日本建築学会 技術 学術講演梗概集, p45-p48, 2008-5
- 6) 梅干野晁,何江,小川俊輔,嚴泰潤,吉野達矢,親川昭彦: 膜構造 建築物の半屋外生活空間に形成される夏季の微気候に関す る実測調査,日本建築学会技術報告集 15(30), 505-510, 2009-06
- 7)梅干野晁,何江,中大窪千晶,矢ヶ部信吾,小川俊輔,嚴泰潤:膜 構造建築の生活空間の熱放射環境に関する実測調査と予 測・評価,日本赤外線学会誌,第17巻2号,P40-47,2008.9
- 8)中大窪千晶,梅干野晃:屋外生活空間における空間形態や構成材料の違いを考慮した放射環境の数値解析,日本建築学会環境系論文集 73(630),957-964,2008-08-30
- 9) 吉野達矢,親川昭彦,梅干野晃:駅プラットホームの膜屋根下空間における夏季の熱放射環境に関する実測調査,膜構造研究論文集 2008,第 22 号,2008
- 10)山村真司,梅干野晁,浅輪貴史:建築外部空間デザインの設計 支援を目的とした熱放射環境の予測手法の開発,日本建築 学会計画系論文集(554),85-92,2002.4
- 11) Google Map: https://www.google.co.jp/maps/

Simulation Method for Thermal Environment inside semi-outdoor space of Membrane Structures in consideration of solar transmission

-Comparison and verification of filed measurements and simulated values in the station platform with membrane roofs-

Akihiko OYAKAWA^{*1)} Tatsuya YOSHINO^{*2)} Akira HOYANO^{*3)}

SYNOPSIS

Authors investigated field measurements of thermal environment formed in a membrane structure with a semi-outdoor space in 2008. In this report, thermal radiation environment formed under the roof space of the membrane structure by simulation based on field measurements is predicted and the evaluation method is described.

The first part of the paper describes the following findings from the measurement data: the solar transmission through the membrane material had the greatest impact on the thermal environment in the living space under the membrane during the daytime; the mean radiant temperature at the central part of the living space was higher than the air temperature due to heat retained in the ground and walls of surrounding buildings. The calculation method for the mean radiation temperature distribution in consideration of solar transmission has been improved.

In the second part of the paper, influence to give the membrane structure for field measurements to the thermal radiation environment by the difference of the solar transmission of membrane materials using this predictive tool as a calculation model was predicted and evaluated.

^{*1)} Research & Development Division, Taiyo Kogyo Corporation, Dr. Eng.

^{*2)} Technical Research Center, Taiyo Kogyo Corporation, Dr. Eng.

^{*3)} Professor, The Open University of Japan, Dr. Eng.

日射透過材料のための二点校正法による透過・反射率の測定法

- 日射透過率推定方法の適用-

吉野 達矢^{*1}
 親川 昭彦^{*2}
 中田 貴之^{*3}
 酒井 孝司^{*4}

梗 概

建築物の光熱環境評価を行うために、材料の日射・可視光の透過・反射特性の把握が重要となる。この 特性を把握するためには、一般的に分光光度計が用いられている。しかしながら、測定対象によっては、 分光光度計では測定が困難な場合や、評価が難しい場合がある。

既報では、高反射率塗料が塗布された材料(日射非透過材料)を対象とした日射反射率現場測定法 (二点校正法)を拡張し、日射透過材料を対象とした二点校正法を提案し、日射透過率および日射反射率 の測定を行い、分光光度計で測定した結果との比較から、測定方法の妥当性を示した。

本報では、既報において問題であった標準板を変更し、再度、妥当性を確認する。また、分光光度計で測定が困難な材料について、日射反射率および日射透過率の測定を行った例を示す。

1. はじめに

省エネルギーが注目される中,建築物の外皮の熱性能は重要である。熱性能には、熱貫流率や日射熱取得率がある。ここで,外皮が日射を透過する場合,日射熱取得率を算出するためにはその日射透過率および日射吸収率が必要となる。

日射透過率,日射反射率,日射吸収率は,JIS K 5602¹⁾,JIS R 3106²⁾,JIS Z 8722³⁾などに基づき,分光光度計を用いて測定を行っている。しかし,分光光度計の仕様と光の拡散性を考えると,1)測定可能な厚さには限度があり,2)光束のサイズに対して,表面の凹凸,色,開口などの特性が均質ではない材料については,測定は可能であるものの,その測定結果の評価が難しい。また,3)試験機で計測するためには,切り取った試験片で行う必要があるため,現場での測定は困難である。

日射反射率の現場測定方法として,村田,酒井ら4の研究が ある。これは、高反射率塗料を対象とし、反射率が違う2種類の 平板を用いて測定対象の反射率を推定する日射反射率現場測 定法(以下,二点校正法と呼ぶ)を提案し、妥当性を確認してい る。ここでは、日射透過がないものを測定対象としているため、 日射反射率を測定することにより、日射吸収率を得ることができ る。しかし、ここで提案された方法だけでは、日射透過率を測定 することはできない。

著者らは,分光光度計で光学特性の測定が困難な材料の計

*1	太陽工業株式会社	技術研究所	博士 (工学)
*2	太陽工業株式会社	開発企画部	博士 (工学)
*3	太陽工業株式会社	サービスエン	/ジニアリング室
*4	明治大学 理工学部	7建築学科 博	專士 (工学)

測を目的とし、日射透過材料用に拡張した二点校正法を提案した。。なお、本手法は1)村田、酒井ら4の二点校正法を基本としている。2)日射透過材料を測定対象とする場合、反射特性の違う2種類の裏面板を準備し、裏面板と測定対象を重ねて総合日 射反射率を測定する。裏面板反射率と総合日射反射率を2組み 測定し、日射透過材料の日射反射率と日射透過率を同時に推 定する方法である(以下、拡張された二点校正法と呼ぶ)。

本手法では, 膜, ガラス, プラスチック, 金属, 緑化等, 測定対象の材質は問わない。また, 分光光度計で測定が難しい形状 (厚いものや凹凸, 色, 開口などが均質でないもの等)を対象としている。

既報⁵では,光学特性が既知な材料と測定対象を重ねた総合 日射反射率を二点校正法(図表では 2 point correction method より 2-PCM)により推定し,本手法の妥当性を示した。 ただし,既報で使用した白色の標準板は正反射成分が他の材 料に比べ大きいことがわかった。二点校正法は拡散性の高い材 料を対象としており,正反射成分の高い材料では推定結果に差 異が現れることがわかっている。そのため,推定結果のバラツキ が大きくなったと考える。

そこで、本報では、1)標準板を変更し、拡張された二点校正 法を用いて、測定対象の日射反射率と日射透過率を推定する。 そして、推定結果の妥当性の確認を行う。2)本手法を分光光度



Fig. 1 Membrane (A)



Fig. 2 Membrane (M2) and SB[B]



Fig. 3 Outline of measurement



Fig. 4 Measurement for insolation reflectance

計で測定が困難な材料に適用した例を示す。

具体的には,1) 光学特性がわかっている膜材料(A)と膜材料 (M2)(図表では Membrane (A)と Membrane(M2))を対象とす る(写真を Fig. 1,2 に,特性を Table.1 に示す)。2) 測定対象 (膜材料)の下に標準板(白 2)または標準板(黒)(図表では SB[W2], SB[B]。ここで, Standard Board を SB とする。また, 写真を Fig. 2 に,特性を Table.1 に示す)を重ねて総合日射反 射率[二点](図表では Integrated R[2-PCM])を推定する。この 時の標準板を裏面板 BB[W2], BB[B]と呼ぶ(図表では Backside Board を BB)。3)裏面板付き測定対象の総合日射 反射率[二点],裏面板の日射反射率[分光](図表では R[spm]。 ここで,spmはspectrophotometerを示す),日射透過率[分光] (図表では T[spm])と総合日射反射率の式を用いて,測定対象 の日射反射率[推定]および日射透過率[推定](図表では R[E], T[E]。ここで,E は Estimate を示す)を求める。

2. 拡張された二点校正法

二点校正法と本報で示す拡張された二点校正法の算出手順 を示す。ただし、説明を簡単にするため、測定対象 X,標準板 I, J,裏面板 K, L,裏面板付き測定対象 XK, XL の記号を用いて 説明する。

2.1. 二点校正法

二点校正法の手順は以下の通りである。

- 1. 反射率の小さい標準板Iと、反射率が大きい標準板Jを準備する。どちらも拡散性が高く、日射が透過しないことも条件である。
- 標準板 I, J の日射反射率[分光] ρ₁, ρ₁ を分光光度計で 計測する。
- Fig. 3, 4 に示すように、標準板 I または J を中央において、 標準板および周辺の地物からの反射日射を下向きの日射 量を計る。同時に、上向き日射量を計り、その比から日射 反射率[実測] R₁、 R₁ 求める
- Fig. 5 に示すように、日射反射率[実測] R_i、 R_j と日射反 射率[分光] ρ_i、 ρ_j より校正線を引く(校正線の傾きは形 態係数φの逆数)
- 5. 測定対象 X の日射反射率[実測] R_x と校正線の交点を求 める
- 6. 日射反射率[二点] ρ_x (図表では R[2-PCM])が推定値となる

4)から6)を数式で表すと次式となる。

$$\rho_{X} = \frac{\rho_{J} - \rho_{I}}{R_{J} - R_{I}} R_{X} + \frac{R_{J} \rho_{I} - R_{I} \rho_{J}}{\rho_{J} - R_{I}}$$
(1)

2.2. 拡張された二点校正法

ここでは、総合日射反射率を求める式を用いて、二点校正法 を拡張し、日射反射率と日射透過率を同時に求める。

まずは、総合日射反射率を考える。Fig. 6 に示すように材料 を2枚重ねた時の総合日射反射率 ρ_{12} ⁶(図表ではIntegrated R[measure])は次式から得られる。

$$\rho_{12} = \rho_1 + \frac{\tau_1^2 \rho_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \tag{2}$$

なお, ρ_i, τ_i は i 枚目の材料の反射率, 透過率であり, 1 枚目 は測定対象を, 2 枚目は裏面板を意味する。 拡張された二点校正法の手順は次の通りである。

 反射率および透過率が既知な裏面板 K, Lを準備する。
 測定対象 X の下に裏面板 K を挟んで裏面板 K 付き測定 対象 X の総合日射反射率[実測] ρ_{xx} を, 同様に, 裏面 板 L 付き測定対象 X の総合日射反射率[実測] ρ_{xu} を求め る。

$$\rho_{XK} = \frac{\rho_J - \rho_I}{R_J - R_I} R_{XK} + \frac{R_J \rho_I - R_I \rho_J}{\rho_J - R_I}$$
(3)
$$\rho_{XL} = \frac{\rho_J - \rho_I}{R_J - R_I} R_{XL} + \frac{R_J \rho_I - R_I \rho_J}{\rho_J - R_I}$$

 裏面板付き測定対象の総合日射反射率[二点] ρ_{xk}, ρ_{xL}と裏面板の日射反射率[分光], ρ_k, ρ_Lを次式に代入 し, 連立方程式を解くことにより, 測定対象の日射反射率 [二点] ρ_x および日射透過率[二点] τ_x を求める。

$$\rho_{XK} = \rho_X + \frac{\tau_X^2 \rho_K}{1 - \rho_X \rho_K}$$
(4)

$$\rho_{XL} = \rho_X + \frac{\tau_X^2 \rho_L}{1 - \rho_X \rho_L}$$

3. 測定概要

2012 年 4 月 2 日 11:30~12:35 に,大阪府枚方市(北緯 34.8°,東経135.7°)にて,測定を行った。測定時間帯は太陽 高度が59~60°で,水平面日射量が700~930W/m²の好条件 で測定することができた。

Fig. 3 に測定概略を, Fig. 4 に測定風景を示す。設置場所の 違いの影響を減らすために 3m 角の標準板(黒)を広げ, その中 央部に 1m 角の測定対象を設置した。測定対象の中央から 500mm 上部において, 上下水平面日射量の測定を1分間行う。 この日射量の比の平均値から測定対象の日射反射率[実測](図 表では R[measure])を求める。日射計は英弘精機社製 MS-602を用いた。

標準板と膜材料について,分光光度計で測定した日射反射



Fig. 5 Conceptual figure of 2 Point Correction Method⁴⁾



率[分光], 日射透過率[分光] (図表では R[SPM], T[SPM])を Table 1 に示す。前報で使用した標準板(白)は正反射成分が多 かったため, 本報では, 別の白い材料を標準板(白 2, Fig.5) (SB[W2], Fig.6)として用いている。なお, 重価係数は JIS K 5602⁵⁰を, 分光光度計は日本分光社製V-570を用いた。

4. 膜材料の日射反射率と日射透過率の推定

4.1. 総合日射反射率の推定

まず,標準板(白 2)と標準板(黒)の日射反射率[実測]と裏面板 付き膜材料(A),裏面板付き膜材料(M2)の総合日射反射率[実 測](図表では Integrated R[measure])の測定結果を Table 2 に示す。式(1)を用いて総合日射反射率[二点](図表では Integrated R[2-PCM])を求める。その結果を Table 3に示す。 分光光度計で求めた日射反射率[分光](図表では R[spm])を用 いて求めた総合日射反射率[分光](Integrated R[spm])と比較 する。その結果,推定した値の差は最大でも 1.1 ポイントであり, 十分な精度で得られた。

Table 1 Insolation R[SPM] and Insolation T[SPM]

Target	Insolation R[spm]	Insolation T[spm]
SB[B], BB[B]	4.1%	0.0%
SB[W2], BB[W2]	70.2%	0.0%
Membrane (A)	65.2%	11.4%
Membrane (M2)	77.3%	12.9%

Table 2 Insolation R[measure] and Integrated R[measure]

of membranes with backside board				
	SB[B]	2.1%		
R[measure]	SB[W2]	47.2%		
	Membrane(A) / BB[B]	43.9%		
Integrated	Membrane (A) / BB[W2]	44.3%		
R[measure]	Membrane (M2) / BB[B]	52.7%		
	Membrane (M2) / BB[W2]	54.3%		

Table 3 Integrated R[2-PCM] and Integrated R[spm]

Target	Integrated R[2–PCM]	Integrated R[spm]	diff
Membrane (A) / BB[B]	65.5%	65.3%	0.2%
Membrane (A) / BB[W2]	66.2%	66.9%	-0.7%
Membrane (M2) / BB[B]	78.5%	77.4%	1.1%
Membrane (M2) / BB[W2]	80.9%	79.8%	1.1%

4.2. 膜材料の日射反射率と日射透過率の推定

Table 3 の裏面板付き膜材料の総合日射反射率[二点](図表 では Integrated R[2-PCM]) ρ_{12} と Table 1 の標準板の日射反 射率[分光] (R[spm]) ρ_2 を式(2)に代入し,繰り返し計算により, 膜材料の日射反射率[推定] ρ_1 (図表では R[E])および日射透 過率[推定] τ_1 (図表ではT[E])を求める。その結果を Table 4 に 示す。分光光度計の測定結果と比較すると、日射反射率が大き く、日射透過率が小さい結果となった。最大 4.2 ポイントの差が あるが、十分な精度で推定できた。

5. 適用例

本手法を分光光度計で測定が困難な材料に適用する。対象 材料は装飾ネット(Fig. 7, 8)と太陽電池パネル(Fig. 9)とする。

Table 3 Integrated R[2–PCM] and Integrated R[spm]

Target	Integrated R[2–PCM]	Integrated R[spm]	diff
Membrane (A) / BB[B]	65.5%	65.3%	0.2%
Membrane (A) / BB[W2]	66.2%	66.9%	-0.7%
Membrane (M2) / BB[B]	78.5%	77.4%	1.1%
Membrane (M2) / BB[W2]	80.9%	79.8%	1.1%

Table 4 R[E] and T[E] of membrane

	Membrane (A)	Membrane (M2)
R[E]	65.5%	78.4%
T[E]	7.2%	12.4%
R[spm]	65.2%	77.3%
T[spm]	11.4%	12.9%
Difference of R	0.3%	1.1%
Difference of T	-4.2%	-0.5%

5.1. 装飾ネット

装飾ネットは装飾・目隠し・木陰を目的とした葉っぱを模したもので、色は2種類ある。装飾ネット(緑)と(図表では Decorative net(Green), Fig. 7)と装飾ネット(白)(図表では Decorative net(White), Fig. 8)である。どちらも、布に切れ目があり、面の向きは不規則で、かつ、開口も存在する。なお、装飾ネット(緑)は濃い緑(Dark Green)と薄緑(Light Green)の2種類の色が使われており、表と裏で違う模様となっている。

測定対象の大きさが 1m 角より大きいため,標準板の反射率 測定は Fig. 10 に示すように測定対象の上に乗せて総合日射反 射率の計測を行った。膜材料と同様に、2 種類の裏面板と総合 日射反射率の式を用いて得られた測定結果を Table 6 に示す。

装飾ネット(緑)の日射透過率の推定値は40.9%となった。装飾ネットの水平面積から求めた開口率がおおよそ40%であることから、十分に推定できていると言える。

同様に,装飾ネット(白)の日射透過率の推定値は42.4%であり,装飾ネット(緑)と同様に十分に推定できていると言える。

5.2. 太陽電池

Fig.11 に示すように、太陽電池を設置して、日射反射率を推定した。その結果、日射反射率が19.7%を得た。ここで、Fig.9、11を見ると、鏡面反射成分がこれまで測定に使用した他の材料



Fig. 7 Decorative nets (Green)



Fig. 8 Decorative nets (White)



Fig. 9 Solor panel

に比べて大きい。二点校正法は日射について,拡散反射性の 高い材料を対象とした測定方法であるため,ここで得られた値 の信頼性は低いと考えられる。

太陽電池のような正反射成分が大きい材料を対象とする場合の計測方法が必要となる。

6. まとめ

本報では、分光光度計で測定が困難な材料の光学特性を計 測することを目的に、日射透過材料用に拡張された日射反射率 現場測定法を用いて、日射反射率と日射透過率を推定した。そ の結果、日射条件が良好であれば、十分な精度で、推定するこ とが可能であることが確認できた。また、分光光度計で測定が困 難な材料である装飾ネットおよび太陽電池パネルの測定を行っ た。その結果、装飾ネットのような材料の場合、本手法で推定可 能であることを確認した。一方、太陽電池パネルは測定が可能 であるものの、その測定結果の妥当性については、確認できて いない。

そこで、太陽電池パネルのような鏡面反射特性を有する材料 の測定方法について、今後、検討を行う予定である。



Fig. 10 Measurement for insolation reflectance of decorative nets



Fig. 11 Measurement for insolation reflectance of solar panels

Table 5 R[E] and T[E] of Decorative nets and Solar panel

	R[E]	T[E]
Decorative nets(Green)	9.2%	40.9%
Decorative nets(White)	42.0%	42.4%
Solar panel	19.7%	0.0%

参考文献

- JIS K 5602:2008: 塗膜の日射反射率の求め方,日本工業 標準調査会,2008 年 9 月 20 日
- JIS R 3106:1998:板ガラス類の透過率・反射率・放射率・ 日射熱取得率の試験方法,日本工業標準調査会,1998 年 3月20日
- 3) JIS Z 8722:2009: 色の測定方法 -- 反射及び透過物体色, 日本工業標準調査会, 2009 年 3 月 20 日
- 4) 村田泰孝,酒井孝司他:高反射率塗料施工面の日射反射 現場測定法に関する研究-標準板二点校正法の提案およ び水平面における精度確認-,日本建築学会環境系論文 集,第73巻,第632号,pp.1209-1215,2008年10月

- 5) 吉野達矢,親川昭彦,中田貴之,酒井孝司:日射が透過する材料を対象とした二点校正法による透過・反射率の測定に関する研究日本膜構造協会 膜構造研究論文集 2011, No.25, pp. 65-71, 2012 年3月
- 6) 田中俊六,武田仁,岩田利枝,土屋喬雄,寺尾道仁:最新 建築環境工学[改訂3版], pp.203, 2006年3月

Measurement methods of transmission-reflection coefficient Based on the 2 Point Correction Method

- Applying Insolation transmission index estimation method -

Tatsuya Yoshino ^{*1)} Akihiko Oyakawa ^{*2)} Takayuki Nakata ^{*3)} Koji SAKAI^{*4)}

SYNOPSIS

In order to evaluate thermal and daylight environment of a building, it is important to understand the reflection and transmission properties of the materials and solar radiation and visual light. In general, spectrophotometric method is used for that. However, depending on tested materials, in some situation it is difficult to use spectrophotometer method in measuring which makes evaluation difficult.

In previous paper, "radiation-reflection ratio in location measuring method" (2 Point Correction method) used for materials insolated with high reflection index material (insolation non-transmission material) is expanded, suggesting it for insolation transmission material, carrying measurement of insolation transmission index (coefficient) and reflection transmission index (coefficient), comparison with results measured using spectrophotometer showed the validation of the measurement method.

In this paper, we change the standards, which was a problem for previous paper, and again, we confirm the validation. Also for materials which are difficult to measure using spectrophotometer, examples of insolation reflection coefficient and insolation transmission coefficient are provided.

*1) Technical Research Center, Taiyo Kogyo Corporation, Dr. Eng.

*2) Research & Development Division, Taiyo Kogyo Corporation, Dr. Eng.

^{*3)} Service Engineering Section, Taiyo Kogyo Corporation

^{*4)} Prof., Department of Architecture, Meiji Univ., Dr. Eng.

可視光応答型光触媒を利用した膜材料の抗菌・抗ウイルス性に関する研究

ーPVC 膜材料に含有された添加剤が抗菌・抗ウイルス性へ与える影響ー

塩澤 優樹*1

齋藤 徳良*2

豊田 宏*1

梗 概

抗菌・抗ウイルス性を有する新しい PVC 膜材料を開発するために、可視光応答型光触媒を表面 にコーティングした。PVC 膜材料は様々な添加剤を含んでおり、これらのブリードアウトによって 抗菌・抗ウイルス性が低下することが懸念される。本研究では、PVC 膜材料に含まれる添加剤が抗 菌・抗ウイルス性へ与える影響を調べた。ガラス基材と PVC 基材に可視光応答型光触媒をコーテ ィングし、それを試料とした。試料の抗菌・抗ウイルス性の初期特性、耐湿度試験による性能の持 続性を比較し、また水接触角を測定した。PVC 基材で作製した試料の抗菌性は、ガラス基材よりわ ずかに初期性能が低下し、また耐湿度試験による経時的な低下が認められた。一方、抗ウイルス性 はほとんど低下しなかった。また、光照射時の光触媒の親水化速度が低下した。よって PVC 基材 に含まれる添加剤が、可視光応答型光触媒の活性および抗菌性を低下させることがわかった。

1. はじめに

膜構造建築物やテント倉庫などに使用される膜材料は、 ポリエステル繊維織物に軟質塩化ビニル樹脂(PVC)がコー ティングされているものが多い。このPVCには、安定剤・ 可塑剤・難燃剤などの添加物が含まれる。これらは使用中 に表面にブリードアウトし、汚れ物質を吸着する為に汚れ やすくなる[1-4]。解決策として幾つかの防汚対策が報告さ れている[5, 6]。なかでも豊田らは膜材料の防汚性を向上す る為に、酸化チタン光触媒膜材料を開発し、優れた防汚性 について報告している[7,8]。

酸化チタン光触媒は 380nm 以下の紫外光が照射されると、 有機物に対して酸化・還元反応をもたらし、また超親水化 する[9,10]。そのため、付着した有機物汚れを分解すること ができ、さらに雨水で汚れを洗い流すセルフクリーニング 機能を有するため、屋外用途の外装材などに利用されてい る。

一方、内装材としての膜材料の利用が広がりつつある。 天井材に利用すると、地震等による天井部材の落下防止効 果があるため、需要が増えている。そのため、膜材料へ新 しい機能を付与することを目的に、可視光応答型光触媒に 着目した。酸化チタン光触媒は紫外光にのみ応答するため、 紫外線の少ない室内では酸化チタン光触媒の機能が充分に 発揮できず、室内用途へは広く普及していない。そのため、 可視光でも利用可能な新しい光触媒が求められ続けてきた。 そして NEDO 事業「循環社会構築型光触媒産業創成プロジ ェクト」において、高感度光触媒材料が開発された[11,12]。

我々は、NEDO 事業で開発された抗菌・抗ウイルス性を 有する可視光応答型光触媒をPVC 膜材料の表面にコーティ ングした。これまでに銀系化合物などによる抗菌性を有す る膜材料は存在するが、抗ウイルス性を有する膜材料はな い。

しかしながら、可視光応答型光触媒をコーティングした PVC膜材料はPVC膜材料中の添加剤のブリードアウトの影響を受け、抗菌・抗ウイルス性の低下が懸念される。

そこで本研究では、PVC 膜材料に含まれる添加剤が抗 菌・抗ウイルス性へ与える影響を評価した。基材にはガラ ス板とPVC 膜材料を用い、それぞれに可視光応答型光触媒 をコーティングし、抗菌・抗ウイルス性の初期特性および 耐湿度試験による性能の持続性を評価した。また、光照射 時の水接触角を測定した。

2. 実験試料ならびに試験方法

2.1. 試料

基材には、ガラス板(厚さ2mm)およびPVC 膜材料(基 布:ポリエステル、コーティング材:PVC、厚さ0.5mm)) を用いた。これらの基材表面に可視光応答型光触媒をコー ティングし、100℃で15分間乾燥し、試料とした。可視光 応答型光触媒は、NEDO事業「循環社会構築型光触媒産業 創成プロジェクト」にて開発された銅系化合物修飾酸化チ タン光触媒(Cu/TiO2系光触媒)を用いた[13]。図1に試料の構

^{*1} 太陽工業株式会社 技術研究所

^{*2} 太陽工業株式会社 研究開発本部

成図を示す。なお、基材と光触媒層の接着および、光触媒 作用による基材への損傷を保護するために、基材の上に接 着保護層を設けた[14, 15]。



抗菌性試験

2.2.

JIS R 1752:2013「ファインセラミックス―可視光応答型 光触媒抗菌加工製品の抗菌性試験方法・抗菌効果」に準拠 し、大腸菌および黄色ぶどう球菌に対する抗菌性試験を実 施した。明条件において、光源は白色蛍光灯を用い、UV カ ットフィルター (N-169)を用いて波長 $\lambda \ge 380 \text{ nm}$ とした可 視光を 1000 lx で4 時間照射した。また、暗条件でも4 時間 の試験を行った。

2.3. 抗ウイルス性試験

JIS R 1756:2013「ファインセラミックス―可視光応答型 光触媒材料の抗ウイルス性試験方法―バクテリオファージ Qβを用いる方法」に準拠し、バクテリオファージQβに対 する試験を実施した。明・暗条件の試験条件は2.2.と同様で ある。

2.4. 耐湿度試験

耐湿度試験は、30 ℃、90 %RHの恒温恒湿槽内にて、白 色蛍光灯(全光)を試料表面の照度を1000 lx に設定し照射 し、2週間および4週間経過後に試料を取り出し(以下、耐 湿度 2w、耐湿度 4w と呼ぶ)、その後 2.2 および 2.3 に示す 方法で試験した。

2.5. 水接触角測定

水接触角測定は、20 °C、65 %RH の標準状態にて、白色 蛍光灯(全光)を試料表面の照度を 3000 lx に設定し照射し、 任意の間隔で水接触角を測定した。また、光照射 630 時間 後に白色蛍光灯の電源を OFF にし、暗条件で 500 時間の水 接触角を測定した。試料の大きさは 30 mm×70 mm である。 測定には、水接触角計 CA-X 型(協和界面科学株式会社) を用いた。試料表面に 1.8 μ L の純水を滴下し、その水接触 角を測定した。

3. 結果および考察

3.1. 抗菌、抗ウイルス性

試料のイニシャルおよび耐湿度 2w、4w の抗菌・抗ウイ ルス性を測定した。表1 にそれぞれの不活化度の数値を示 し、表2 にはガラス基材と PVC 基材の不活化度の差を示し た(ガラス基材の不活化度-PVC 基材の不活化度)。また、 図2および3に大腸菌および黄色ぶどう球菌に対する抗菌 性、図4にバクテリオファージQ β に対する抗ウイルス性 を示す。これらの図表に示す不活化度は、生菌数およびウ イルス感染価の減少度 (N/N₀)の一log 値を表す。

図 2 に示す大腸菌に対する抗菌性結果において、ガラス 基材の明条件は、イニシャルの不活化度は4.2 であり、耐湿 度 2w、4w の不活化度はともに 4.3 であった。よって耐湿 度試験後でもイニシャルと同等の抗菌性であった。しかし ながら、暗条件では、イニシャルの不活化度は4.2 であるの に対し、耐湿度 2w、4w の不活化度はそれぞれ 2.7、1.1 で あり、耐湿度試験による経時の抗菌性低下を確認した。

一方 PVC 基材の明条件は、イニシャルの不活化度は 3.6 であるのに対し、耐湿度 2w、4wの不活化度はそれぞれ 1.1、 0.5 であった。また暗条件は、イニシャルの不活化度は 3.0 であるのに対し、耐湿度 2w、4w 後の不活化度はそれぞれ 1.9、0.4 であった。従って PVC 基材は、イニシャルの明・ 暗条件ともにガラス基材より抗菌性が低下しており、更に 耐湿度試験による経時の抗菌性低下を示した。

図3に示す黄色ぶどう球菌に対する抗菌性結果において、 ガラス基材の明条件は、イニシャルの不活化度は42であり、 耐湿度 2w、4wの不活化度はそれぞれ 4.0、4.2 であった。 また暗条件は、イニシャルの不活化度は4.2 であり、耐湿度 2w、4wの不活化度はそれぞれ 3.4、4.2 であった。暗条件に おいて、耐湿度2wはわずかに抗菌性が低下しているが、耐 湿度4wはイニシャルと同等の性能を確認したため、試料お よび測定のばらつきによるものと考えられる。よってガラ ス基材は明・暗条件ともに、耐湿度試験後もイニシャルと 同等の抗菌性を確認した。一方、PVC 基材の明条件では、 イニシャルの不活化度は4.2 であるのに対し、耐湿度2w、 4wの不活化度はそれぞれ1.5、0.8 であった。また暗条件は、 イニシャルの不活化度は3.1 であるのに対し、耐湿度2w、 4wの不活化度はそれぞれ 1.7、0.6 であった。よって PVC 基材は明・暗条件ともに耐湿度試験による経時の抗菌性低 下を示し、また暗条件のイニシャルにおいてもガラス基材 より抗菌性が低いことがわかった。

図4に示すバクテリオファージQβに対する抗ウイルス 性結果において、ガラス基材の明・暗条件ともに、イニシ ャル、耐湿度2w、4wの不活化度はすべて5.0であった。ま た、PVC基材の明・暗条件ともに、イニシャルの不活化度 は5.0であり、耐湿度2w、4wの不活化度は5.0~4.5であっ た。よってガラス基材およびPVC基材は、耐湿度試験後も イニシャルと同等の抗ウイルス性を示し、経時の抗ウイル ス性は低下しなかった。

		÷ •	<u> </u>		•		
			ガラス基材			PVC 基材	
対象	条件	イニシャル	耐湿度 2w	耐湿度4w	イニシャル	耐湿度 2w	耐湿度4w
十唱带	明	4.2	4.3	4.3	3.6	1.1	0.5
八版困	暗	4.2	2.7	1.1	3.0	1.9	0.4
共在 ど じる球帯	明	4.2	4.0	4.2	4.2	1.5	0.8
東巴かとり地困	暗	4.2	3.4	4.2	3.1	1.7	0.6
バクテリオファージ	明	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	4.5
$Q \beta$	暗	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	4.5

表1 菌とウイルスに対する不活化度

*不活化度は生菌数およびウイルス感染価の減少度(N/N0)の-log 値を表す







図 4 バクテリオファージ Qβに対する抗ウイルス性

表 2 ガラス基材と PVC 基材の不活化度の差

対象	条件	イニシャル	耐湿度 2w	耐湿度4w
十明带	明	0.6	3.2	3.8
八肠困	暗	1.2	0.8	0.7
井方がいこで登井	明	0	2.5	3.4
東巴かとり球困	暗	1.1	1.7	3.6
バクテリオファージ	明	0	0	0.5
$\mathbf{Q}eta$	暗	0	0	0.5

表2に示すガラス基材とPVC 基材の不活化度の差におい て、大腸菌対するイニシャルの不活化度の差は、明条件は 0.6、暗条件は1.2 である。耐湿度 2w では、明条件は3.2、 暗条件は0.8、また耐湿度 4w では、明条件は3.8、暗条件は 0.7 であった。同様に、黄色ぶどう球菌およびバクテリオフ ァージQβに対する不活化度の差を算出し、表2に示した。

菌類(大腸菌および黄色ぶどう球菌)に対する不活化度 の差において、イニシャルの明条件では、添加剤による影 響は大腸菌でわずかに認められ、黄色ぶどう球菌では認め られなかった。また、イニシャルの暗条件では、菌の種類 に関わらず添加剤の影響が認められ、菌の種類による程度 の差は生じていない。

一方、耐湿度 2w、4w の明条件において、イニシャルよ りも不活化度の差が増加している。また、黄色ぶどう球菌 よりも大腸菌の方が、不活化度の差が大きかった。同様に、 暗条件でも添加剤の影響は認められるが、明条件よりは少 ない。

これらの結果より、PVC に含まれる添加剤は、抗菌性を 低下させる要因であると思われる。また耐湿度試験を行う ことによって、抗菌性を大きく低下させた。この原因は明 確でないが、次の事が考えられる。

1) 多湿環境にさらされ、Cu/TiO2が加水分解する。

2) 湿度あるいはブリードアウトした添加剤により銅系化合物が変性する。

3) ブリードアウトした添加剤(特に添加量が多く撥水性の 可塑剤)が細菌と光触媒層との接触を阻害している。

一方、どの基材でもバクテリオファージQβに対しては、 添加剤の影響はほとんど認められなかった。



水接触角

3.2.

図5にガラス基材とPVC 基材を用いた試料の光照射時お よび暗条件下における水接触角を示す。ガラス基材は、初 期が約90°、光照射280h後に約20°、光照射340h後は 10°以下まで低下し、超親水性を示す事がわかった。一方 PVC 基材は、初期が約85°で、光照射とともに水接触角は 低下し、光照射 630h 後は45°であった。

また、光照射した試料の暗条件下における水接触角を測 定するために、光照射 630 h 経過後に白色蛍光灯の電源を OFF にした。ガラス基材の水接触角は、光照射で10°以下 まで低下し、その後、暗条件下で 500 h 後も 10°以下を維 持していた。一方、PVC 基材においては、光照射で約45° まで低下したが、暗条件下では徐々に高くなり、500h後に 約55°に上昇した。

この結果より、異なる基材によって、親水化速度が異な るのは、PVC 基材に含まれる添加剤が徐々にブリードアウ トし、光触媒の親水性能が低下していると考えられる。ゆ えに、PVC に含まれる添加剤は光触媒活性を低下させるこ とが認められた。しかし PVC 基材において、光照射を続け ることで徐々に水接触角が低下し続け、また暗条件では水 接触角が徐々に上昇した。そのため光照射時には光触媒の 効果でブリードアウトする添加剤を分解あるいは変性させ る可能性が期待できる。

まとめ 4

本研究では、可視光応答型光触媒を用いた抗菌・抗ウイ ルス性を有する新しいPVC 膜材料を開発するために、PVC 膜材料に含まれる添加剤が抗菌・抗ウイルス性へ与える影 響を調べた。ガラス基材と PVC 基材に可視光応答型光触媒 をコーティングし、抗菌・抗ウイルス性の初期特性、耐湿 度試験による性能の持続性を比較し、また水接触角を測定 した。その結果、PVC 基材で作製したイニシャルの試料は、 ガラス基材で作製した試料よりわずかな抗菌性低下を確認

した。また、耐湿度試験により経時的な抗菌性低下が認め られた。一方、抗ウイルス性はほとんど低下しなかった。 また光照射時における光触媒の親水化速度の低下を確認し た。よって PVC 基材に含まれる添加剤は、可視光応答型光 触媒の活性および抗菌性を低下させることがわかった。

謝辞

本研究の一部は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構の 「循環社会構築型光触媒産業創成プロジェクト」の一環として、東京大学の 橋本研究室との共同研究で行われたものである。関係者の皆様に深く感謝の 意を表します。

参考文献

- 豊田宏、米田順子、PVC 膜材料の汚れ付着に及ぼす色彩的効果---膜構造 1) 用膜材料の汚れ評価に関する研究(その1)---, 膜構造研究論文集,8,119, 1994
- 豊田宏,山本拓也,多賀正,鳥居壮, 膜材料の汚れ評価における地域差お 2) よび防汚処理の影響---膜構造用膜材料の汚れ評価に関する研究(その 2)--, 膜構造研究論文集.8,125,1994
- 豊田宏、山本拓也、 膜材料の汚れに及ぼす暴露角度および構造― 膜構 3) 造用膜材料の汚れ評価に関する研究(その3)--, 膜構造研究論文集,8, 133, 1994
- 豊田宏,鳥居壮, 膜材料の促進汚れ試験の検討―膜構造用膜材料の汚 4) れ評価に関する研究(その4)---, 膜構造研究論文集,10,87,1996
- 豊田宏、鳥居壮、南宏和、 膜構造用材料の防汚性評価について、 日本建築 5) 学会大会学術講演梗概集.10,1985
- H.Toyoda, A Study on dirt-repellent of coated fabric, Proc.1st Cong. RILEM, 6) Versailles, 1444, 1987
- 7) 豊田宏,河村徹,鳥居壮,酸化チタン光触媒を利用した新しい膜材料の 防汚性評価――膜構造用膜材料の汚れ評価に関する研究(その5)―」, 膜 構造研究論文集,11,69,1997
- 豊田宏,鳥居壮,酸化チタン光触媒を用いた膜材料の防汚性及び耐久性 8) 評価――膜構造用膜材料の汚れ評価に関する研究(その6)―」, 膜構造研 究論文集.12.51.1998
- 9) 橋本和仁、「最新光触媒技術と実用化戦略」、ビーケイシー、2002
- 10) 安保正一、「高機能な酸化チタン光触媒」、エヌ・ティー・エス、2004
- 11) 橋本和仁,光触媒の考え方:環境浄化型光触媒と人工光合成型光触媒、 第19回シンポジウム光触媒反応の最近の展開,39,16,2012
- 黒田靖, 高感度光触媒材料の開発-NEDO「循環型社会構築型光触媒 12) 産業創成プロジェクト」成果の実用化---,第19回シンポジウム光触媒 反応の最近の展開,39,18,2012
- 黒田靖,新規可視光応答型光触媒材料,会報光触媒,40,4,2013 13)
- 吉本哲夫、「光触媒の基材表面への固定化法」、工業材料,45,62,1997 14)
- 藤嶋昭、橋本和仁、渡部俊也、「光クリーン革命」、シーエムシー、1997 15)

STUDY ON THE ANTI-BACTERIAL AND ANTI-VIRUS PERFORMANCE OF MEMBRANE MATERIAL COATED WITH VISIBLE-LIGHT-SENSITIVE PHOTOCATALYST -Effect of additives contained in the PVC coating of membrane material on the anti-bacterial and anti-virus-

Yuki Shiozawa^{*1} Tokuyoshi Saito^{*2} Hiroshi Toyoda^{*1}

SYNOPSIS

Visible-light-sensitive photocatalyst was treated onto the surface of PVC membrane material to develop the new material which shows anti-bacterial and anti-virus performance. PVC membrane material contains various additives, and then their bleed-out might cause the degradation of anti-bacterial and anti-virus performance.

In this study, we investigated the effect of additives contained in the PVC coating of membrane material on the anti-bacterial and anti-virus.

Glass plate and PVC membrane material were coated with visible-light-sensitive photocatalyst as samples. And samples were compared by measuring both initial and durability performance by the moist exposure test, and water contact angle. In PVC sample, performance of anti-bacterial was slightly lower than that of glass plate, and decreased with time of the moist exposure test, however, performance of anti-virus did not degrade. And additives slightly inhibited hydrophilicity of the surface. The additives contained in the PVC membrane material caused the degradation of the activity and anti-bacterial of visible-light-sensitive photocatalyst.

*1 Taiyo Kogyo Corporation Technical Research Center

*2 Taiyo Kogyo Corporation Research and Development Division

「膜構造研究論文集 2015」原稿応募規定

- 研究内容: 膜構造に関する学術・技術についての論文・報告とし、未発表のもの。ただし、これまで発表 された論文の展開、追加、詳細等、新しい内容が盛り込まれたものは可とします。
- 研究論文応募方法:応募者に制限はなく、申込み用紙にアブストラクト数行程度を書き、膜構造協会に9月30日 までに申込んでください。申込みのあった方に本論文の執筆要領などを送付します。本論文の 提出締切 2015年12月10日(木)
- 研究論文査読方法:研究論文は協会に設けられた論文審査委員会により査読を行い、採否を決定します。 なお、査読を行わない、報告・記事の枠もありますので、この場合はその旨を明記の上ご応募 ください。
- 論 文 集:発行2016年3月(予定)
- 著 作 権:掲載された論文の著作権は著者の占有としますが、協会は編集出版権を持つものとします。
- 論文集の配布方法 各大学、研究所の他、膜構造に関係のある研究者、設計者及び関係各位に無料配布を行なう他、 希望者にも有料配布します。

連 絡 先 〒105-0001 東京都港区虎ノ門 1-13-5 一般社団法人 日本膜構造協会 論文係 E-mail: ronbun@makukouzou.or.jp Tel (03)3501-3535 Fax (03)3501-3548

一般社団法人日本膜構造協会

[日本膜構造協会出版物]

出版物	発行年	会員価格	非会員価格	消費税
膜構造建築物構造設計の手引き ・計算例集	1989年	3500円	3500円	内税
空気膜構造の設備設計・維持保全指針	1989年	1000円	1000円	内税
膜構造建築物の維持保全指針・同解説"膜体等・鋼製部材編"	1989年	1500円	1500円	内税
膜構造建築物の補修技術指針・同解説 – 膜体等・鋼製部材編 –	1991年	6000円	6000円	内税
膜構造 – その現状と展望 –	1990年	5000円	5000円	内税
富山県膜構造屋根 融滑雪·落雪実験報告書Ⅱ	1990年	2000円	3000円	内税
(社)日本膜構造協会試験法標準「膜材料面内剪断剛性試験方法」	1993年	1000円	2000円	内税
Testing Method for in-Plane Shear Properties of Membrane Materials	1993年	2000円	3000円	内税
(社)日本膜構造協会試験法標準「膜材料弾性定数試験方法」	1995年	1000円	2000円	内税
(社)日本膜構造協会試験法標準「膜材料の品質及び性能試験方法」	2003年	3000円	5000円	内税
TEST METHODS FOR MEMBRANE MATERIALS (COATED FABRICS)-QUALITIES AND PERFORMANCES-	2003年	5000円	7000円	内税
膜構造研究論文集 '8 7	1987年	2000円	2000円	内税
膜構造研究論文集 '8 8 (在庫切れ)	1988年	2000円	2000円	内税
膜構造研究論文集 '8 9 (在庫切れ)	1989年	3000円	5000円	内税
膜構造研究論文集 '9 0	1990年	3000円	5000円	内税
膜構造研究論文集 '9 1	1991年	3000円	5000円	内税
膜構造研究論文集 '9 2 (在庫切れ)	1992年	3000円	5000円	内税
膜構造研究論文集 '93 (在庫切れ)	1993年	3000円	5000円	内税
膜構造研究論文集 '9 4	1994年	3000円	5000円	内税
膜構造研究論文集 '9 5	1995年	3000円	5000円	内税
膜構造研究論文集 '9 6	1996年	3000円	5000円	内税
膜構造研究論文集 '9 7	1997年	3000円	5000円	内税
膜構造研究論文集 '9 8	1998年	3000円	5000円	内税
膜構造研究論文集 '9 9	1999年	3000円	5000円	内税
膜構造研究論文集 '0 0	2000年	3000円	5000円	内税
膜構造研究論文集 '0 1	2001年	3000円	5000円	内税
膜構造研究論文集 '0 2	2002年	3000円	5000円	内税
膜構造研究論文集 '0 3	2003年	3000円	5000円	内税
膜構造研究論文集 '0 4	2004年	3000円	5000円	内税
膜構造研究論文集 '0 5	2005年	4000円	6000円	内税
膜構造研究論文集 '0 6	2006年	4000円	6000円	内税
膜構造研究論文集 '0 7	2007年	4000円	6000円	内税
膜構造研究論文集 '0 8	2008年	4000円	6000円	内税
膜構造研究論文集 '0 9	2009年	4000円	6000円	内税

出版物	発行年	会員価格	非会員価格	消費税
膜構造研究論文集 '1 0	2010年	4000円	6000円	内税
膜構造研究論文集 '1 1	2011年	4000円	6000円	内税
膜構造研究論文集 '1 2	2012年	4000円	6000円	内税
膜構造研究論文集 '1 3	2013年	4000円	6000円	内税
- 開閉屋根を有する膜構造建築―構造設計手引―	1997年	2500円	2500円	内税
- 膜構造による小中(高)学校体育館屋根改修・新築の手引	1999年	3000円	3000円	内税
膜構造:その展開	2000年	2000円	2000円	内税
膜構造研究 レビュー 2 0 0 0	2000年	7000円	9000円	内税
 膜構造の建築物・膜材料等の技術基準及び同解説	2003年	3500円	3500円	内税
	2007年	1500円	1500円	内税
 膜構造建築物の維持保全マニュアル	2008年	8000円	12000円	内税

○在庫切れのものについては、(社)日本膜構造協会にご相談下さい。

膜構造研究論文集 2014
2015年3月発行
編集 一般社団法人 日本膜構造協会
発行 一般社団法人 日本膜構造協会
〒105-0001 東京都港区虎ノ門 1-13-5
電話(03)3501-3535 FAX (03)3501-3548