

膜構造建築に用いる四フッ化エチレン樹脂膜の汚れと経年変化に関する実験研究

EXPERIMENTAL STUDY ON DIRT AND CHANGES OVER TIME OF POLYTETRA FLUORINE ETHYLENE MEMBRANE USED FOR MEMBRANE STRUCTURES

山口 温, 佐野 武仁
Haru YAMAGUCHI and Takehito SANO

This is a study on dirt and changes over time of Polytetra fluorine ethylene (PTFE) membranes used for membrane structures. Using an electron microscope, the physical states of membrane material surfaces which were exposed for about 6 years to sunshine are shown.

Keywords : membrane structure, Polytetra fluorine ethylene (PTFE) membrane, electron microscope, luminous characteristics · thermal characteristics, dirt
膜構造建築、四フッ化エチレン樹脂膜、電子顕微鏡、光特性・熱特性、汚れ

1. 研究の目的

現在、膜構造建築物などに用いられている四フッ化エチレン樹脂膜（以降フッ素樹脂膜という）は耐候性、防火性に優れ、軽量で強度があるので、耐久性のあるステンレス鋼板などと比べても遜色はなく大空間建築の外皮に適している。これまでの研究¹⁾では有彩色や透明の塩ビ膜、フッ素樹脂膜について光特性としての可視光透過率や反射率、熱特性としての日射熱取得率や大気への放射の割合などについて明らかにした。本報では恒久膜構造建築に用いられるPTFE（四フッ化エチレン樹脂）膜に的を絞って、1990年から1996年の6年間にわたり膜材を太陽放射に曝露し、その光特性と熱特性について実験を行い、曝露開始後6年間の膜材の汚れと経年変化について明らかにした。また、6年経過時の実験用膜材の汚れ、勾配などが違う各部位12カ所の膜データからその光特性、熱特性について明らかにした。

2. 曝露実験用膜材および実験装置

実験で使用した膜材を図1、表1²⁾に示す。基布のガラスウールの厚さは500~600 μ m、その上部を100~150 μ m厚程度の四フッ化エチレン樹脂でコーティングした膜材で、無曝露時の膜厚は700~800 μ mである。実験装置は昭和女子大学1号館屋上に設置し、1990年7月3日から1996年7月13日の6年間にわたり曝露実験を行った。実験装置を写真1に示したが、その寸法は1m \times 1mの試験膜材とこれを固定する曝露台(2440 \times 1220 \times 950h)からなる。実験装置の左側は供試体

膜材を曝露台の上部に張ったものである。また、右側の実験用ボックスに張った膜材は水平面全天反射日射量および透過日射量を計測するもので、その詳細は前報¹⁾を参照されたい。写真2、図3に示した実験装置の左側は新品のフッ素樹脂膜を太陽放射に曝露し経過日数ごとに膜データを採集した。膜データは無曝露のもの、1日目から7日目までは毎日1回、2週間目から1ヶ月目までは週1回、以降1年間は月1回、2年目から3年目までは半年に1回データを採集した。また、曝露開始後6年経過した膜材から図3の1~12に示す勾配の異なる部分、一部水たまりなどにより汚れの多い部分など12ヶ所から2枚ずつ膜データを採集した。



図1 実験用膜材

表1 実験に用いた膜材

項目	フッ素樹脂膜
基布 (繊維織物)	ガラス繊維 (FG)
コーティング 材料	四フッ化エチレン樹脂 (PTFE) (防炎1級)
膜の厚さ	0.8mm
商品記号	FGT-800

3. 実験方法と膜材の汚れの評価

新品の膜材を太陽放射に曝露し、6年間に渡って採集し、風や埃などによる膜材表面の性状変化と汚れによる色彩の変化を明らかにする。また、性状変化に伴う膜材の光特性と熱特性の経年変化について実験する。さらに曝露6年経過時の膜材各部位の汚れ率を評価する。

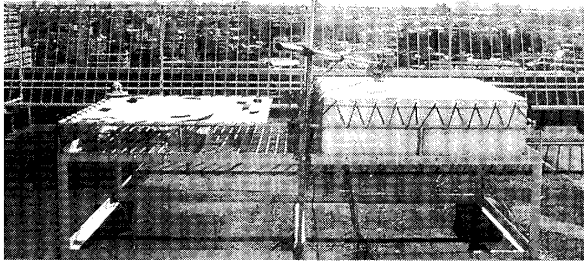
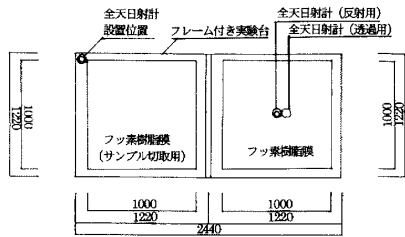
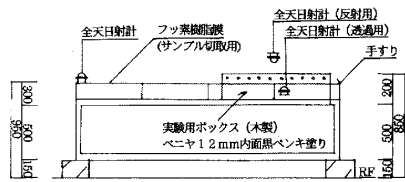


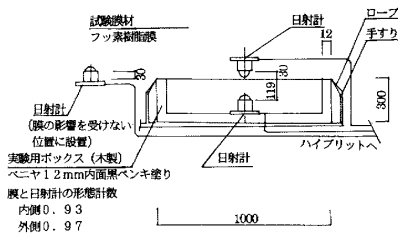
写真1 フッ素樹脂膜曝露実験装置



a) 実験装置平面図



b) 実験装置立面図



c) 実験用ボックス詳細図

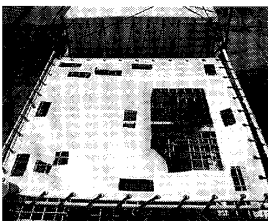


写真2 膜データ採集位置

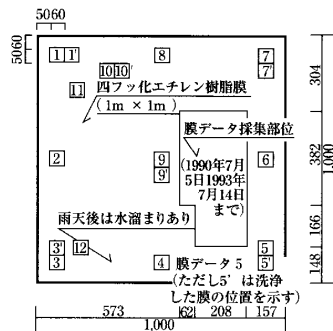


図3 採集位置平面図

3. 1 膜材の汚れと色彩の経年変化に関する実験

各経過日数ごとに採集した2枚の膜データのうち、1枚は曝露したままの状態、もう1枚は亀の甲タワシで水洗いをし、膜材の汚れと色彩の経年変化について多光源分光測色計を用い実験する。その計算方法については前報¹⁾で示した物体色の刺激値X, Y, Zから色度x, yを求める。また、6年経過時の各部位の膜材についても1カ所あたり2枚のデータを取り、同様の方法で実験する。

3. 2 電子顕微鏡を用いた膜材の汚れと経年変化に関する実験

太陽放射に曝露して6年の間に膜材の断面や表面が物理的にどの程度変化するかを確かめるため、走査型電子顕微鏡 (JSM-531-LV SCANNING MICROSCOPE) を用いて計測し、その結果について考察する。また、6年経過時の各部位の性状についても同様に明らかにする。

3. 3 膜材の光特性・熱特性の経年変化に関する実験

太陽放射に曝露した膜材がその時間経過によって可視光透過率や日射熱取得率などの光特性・熱特性がどの程度変化するか明らかにするため、分光光度計を用いて採集した膜データについて測定する。各種の計算式は前報¹⁾の塩ビ膜、フッ素樹脂膜で用いた式に準じた。

3. 4 曝露6年目の膜材各部位の汚れ率

膜構造建築の竣工後、太陽放射や気温および大気塵などの影響を受けて、経過年月によって膜材各部位の汚れが変わると考えられるので、実験結果を用いて膜材各部位の汚れの差を求めた。その方法は各波長ごとの可視光分光反射率および可視光分光透過率から各分光分布ごとの汚れ率とした。そこで、膜構造建築物を外側からみた場合の汚れ率を可視光分光反射汚れ率 ρ_d とし、式(1)から求めた。また、膜材を室内側からみた場合の汚れ率を可視光分光透過汚れ率 τ_d とし、式(2)から求めた。

$$\rho_d = \left(1 - \frac{L_{\rho 0}}{L_{\rho 1}} \right) \times 100 \quad \dots (1)$$

$$\tau_d = \left(1 - \frac{L_{\tau 0}}{L_{\tau 1}} \right) \times 100 \quad \dots (2)$$

ρ_d : 可視光分光反射汚れ率

τ_d : 可視光分光透過汚れ率

$L_{\rho 0}$: 洗浄なしの膜の可視光分光反射率

$L_{\tau 0}$: 洗浄なしの膜の可視光分光透過率

$L_{\rho 1}$: 洗浄ありの膜の可視光分光反射率

$L_{\tau 1}$: 洗浄ありの膜の可視光分光透過率

$L_{\rho 0}$, $L_{\tau 0}$, $L_{\rho 1}$, $L_{\tau 1}$ は380~780nmの分光透過率に重畳係数をかけて求めた。また、可視光全波長域における反射汚れ率 ρ 、透過汚れ率 τ は式(3)、(4)とする。

$$\rho = \sum_{n=1}^n \left\{ \left(1 - \frac{L_{\rho 0}}{L_{\rho 1}} \right) \times 100 \right\} / n \quad \dots (3)$$

$$\tau = \sum_{n=1}^n \left\{ \left(1 - \frac{L_{\tau 0}}{L_{\tau 1}} \right) \times 100 \right\} / n \quad \dots (4)$$

ただし、nは10nmごとの分光巾を1と数え、n=41とした。

4. 実験結果および考察

4.1 膜の色彩 xy色度の経年変化

洗浄ありと洗浄なし膜材の色彩の経年変化について図4に示す。このとき膜の表面を反射光色、膜の裏面を透過光色とした。新品膜材の反射光色は(x, y)=(0.345, 0.355)で白色点に近い値であるが、曝露6年目になると多少白色点から離れる。また、新品膜材の透過光色は(x, y)=(0.508, 0.43)のページ色であるが、曝露半年目で白色点に近づき、曝露3年目の膜は(x, y)=(0.337, 0.36)の値を示した。その後大きな変化はないが、大気汚染などによる汚れのため曝露6年目の膜は多少白色点から離れることがわかった。

4.2 曝露6年目の各部位xy色度図

この項では膜構造建築物に用いる膜材の部位が変わったとき、各部位の汚れがどの程度異なるかについて実験を行ったものである。この状態を再現するため、曝露台で太陽放射に曝露した膜材の汚れの激しい部分とそうではない部分12カ所の膜データを取りこれを元に解析したものである。表2に曝露6年目の膜データ各部位の色彩をマンセル値で示す。全体に洗浄すると明度が上がることがわかる。各部位の膜データについてxy色度図を用いて図5に示した。膜データNo1, 3, 5, 7, 9, 10の6カ所の部位の膜を洗浄し、この膜について色度を測ったがいずれの膜も白色点に近い(x, y)=(0.315, 0.332)に集中している。各部位が異なっても洗浄するといずれの膜もほとんど同じ色彩を示し、白色点に近づくことが判った。洗浄なし・表は膜データによって値にばらつきが見られる。また、図4で同様に透過光色は反射光色に比べて色度の変化が大きいことが判った。これは膜材を太陽放射に曝露したとき、反射光色は降雨による洗浄などによって、ある程度白色点に近づくと考えられるが、膜材の内側となる雨のあたらない透過光色は塵埃などの汚れにより白色点から離れていると考えられる。

4.3 電子顕微鏡を用いた膜材の汚れと経年変化

この項では太陽放射や大気汚染によって膜材がどの程度劣化するか、または塵埃などによる影響について電子顕微鏡を用いて膜材表面の性状について実験したものである。表3に電子顕微鏡で計測した膜データの採集日および曝露6年目の採集部位について示す。

1) 膜材の断面性状の経年変化

写真3に無曝露時と曝露6年目の膜材の断面を示す。その断面の形は基布によって占められる面積が大きく、フッ素樹脂膜の強度は基布によって保持されており、フッ素樹脂は太陽放射や大気塵、有害物質から基布を保護する働きをしていると考えられる。6年を経過すると膜厚は650~700μm程度になるが、これは膜材にテンションがかかっているため、基布層の空気が抜けるために起こる現象と考えられる。また、太陽放射や有害物質の浸食によって、膜材の部位が異なればその劣化状況に変化をきたすことが明らかになった。

2) 膜材表面の汚れと経年変化

写真4に膜材表面の経年変化を示す。膜材表面は10μm程度の凹凸がある。無曝露の新品膜はほとんど汚れはない。曝露開始後膜材の溝の部分に塵がたまり汚れの原因になるが、曝露3年目

表2 膜データの色彩 (曝露6年目)

膜データ	洗浄なし・表	洗浄あり・表	洗浄なし・裏	洗浄あり・裏
No1	2.68GY 7.84/1.24	9.34GY 9.09/0.86	0.00GY 2.36/1.29	2.53GY 3.02/1.12
No2	5.24GY 8.49/1.15		9.86Y 2.49/1.23	
No3	4.29GY 8.29/1.18	9.39GY 9.15/0.81	0.10GY 2.45/1.32	2.64GY 3.07/1.10
No4	5.26GY 8.53/1.15		9.90Y 2.62/1.19	
No5	5.24GY 8.48/1.14	9.02GY 9.16/0.79	0.20GY 2.66/1.23	2.15GY 2.94/1.16
No6	4.90GY 8.34/1.16		9.85Y 2.52/1.26	
No7	0.17XP 8.45/1.16	9.01GY 9.20/0.75	9.96Y 2.55/1.27	2.53GY 3.94/1.10
No8	3.31GY 8.20/1.24		9.87Y 2.47/1.43	
No9	4.41GY 8.29/1.21	7.39GY 9.11/0.99	9.88Y 2.45/1.29	1.58GY 2.92/1.20
No10	0.07GY 6.91/1.34	5.05GY 8.94/0.99	9.08Y 2.07/1.36	1.88GY 2.90/1.19
No11	0.49GY 7.54/1.38		8.46Y 2.25/1.35	
No12	2.42GY 7.62/1.24		9.25Y 2.23/1.23	

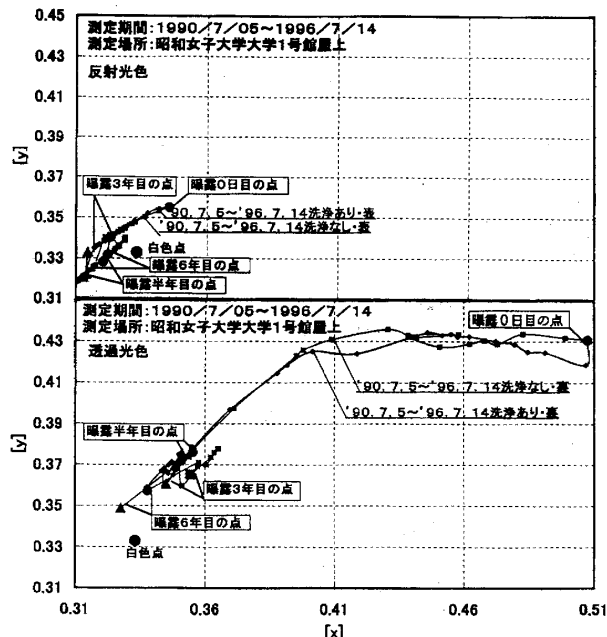


図4 xy色度図の時系列変化

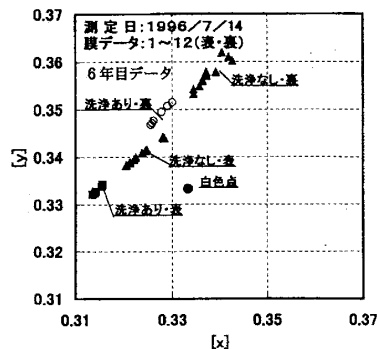


図5 曝露6年目xy色度図

表3 膜データ採集日および曝露経過6年目の採集部位

	No	膜データ採集日	太陽放射に曝露した経過日数	備考
断面	a)	'90.7.5	0日	新品膜 断面
	b)	'96.7.3	2190日	6年膜 断面
表面	a)	'90.7.5	0日	無曝露の新品膜
	b)	'93.8.14	1136日	3年
	c)	'96.7.3	2190日	6年膜データ10
	d)	'96.7.11	2198日	6年洗浄あり10
	e)	'96.7.3	2190日	6年膜データ2
	f)	'96.7.11	2198日	6年洗浄あり2

註) 写真3の断面は倍率70倍、写真4の表面は245倍で撮影

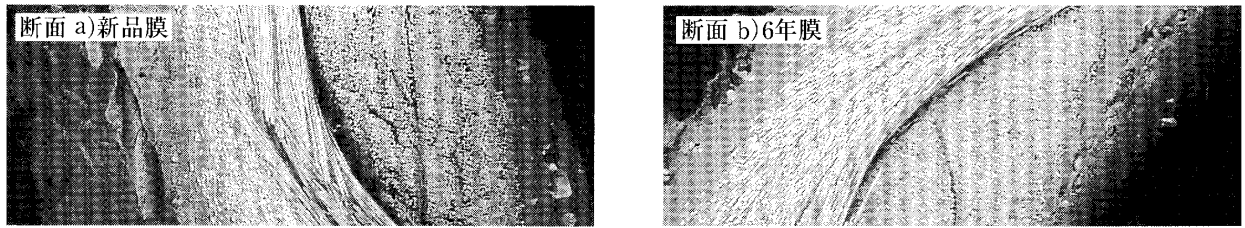


写真3 膜材の断面性状の経年変化 (70倍)

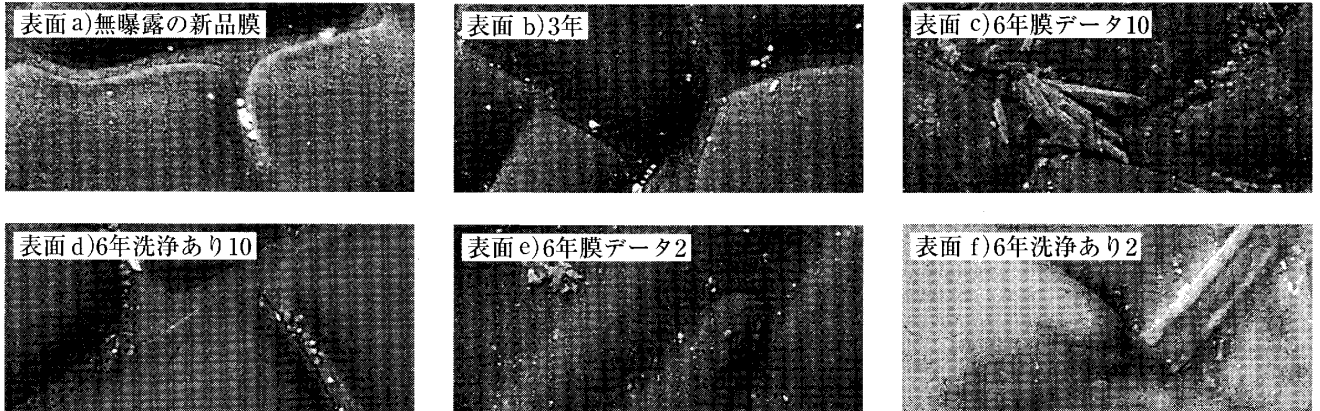


写真4 膜材表面の汚れと経年変化 (245倍)

になると膜材の風化などにより溝が浅くなり、塵は風雨により除去されるため、あまり粒径の大きいごみは見られなくなっている。次に曝露6年目の部位の異なるデータを2例示した。写真から一番汚れがひどい膜データ10は塵がこびりついていたものの凹凸は確認できた。これを洗浄するとほとんど無曝露の新品膜に近い状態まで回復した。この部位は水がたまるところであったため、劣化を免れたと考えられる。膜データ2ではそれまで見られた凹凸がなくなり、汚れは塵がこびりついている状態になった。この塵やこびりついた汚れは国道246号線に近いことからSPM(浮遊粒子状物質)³⁾によるところが大きいと考えられる。また、膜データ2は膜材表面に凹凸が5~10 μ m程度減少し、洗浄しても凹凸はほとんど見られない状態となった。膜材表面は3年目くらいから溝が浅くなり、6年目になると凹凸自体が見られないほど劣化されるところもあることが判った。

4. 4 フッ素樹脂膜の光特性・熱特性の経年変化

膜の性状変化はどの程度太陽放射の影響を受けているかについて3年間太陽放射に曝露した膜材について波長別水平面日射量、光特性、熱特性、放射・対流・日射熱取得率を求めた。

1) 波長別水平面日射量

図6に1990年7月5日から1996年7月14日までの6年間の測定結果について示す。6年間の全受熱量22.522Gj/m²、年平均受熱量3753Mj/m²・year、日平均受熱量10.28Mj/m²・dayであった。このうち紫外線年平均受熱量は5%、可視光受熱量は56%、赤外線受熱量は39%であった。6年間の全日射量Is(Mj/m²)および紫外線UV(Mj/m²)、可視光VI(Mj/m²)、赤外線IR(Mj/m²)と経過日数x(day)との関係は次式(5)~(8)を用いて求めることができる。

$$Is = 0.0087x + 1.2039 \quad \dots(5)$$

$$UV = 0.0004x + 0.1268 \quad \dots(6)$$

$$VI = 0.005x + 0.4055 \quad \dots(7)$$

$$IR = 0.0033x + 0.6716 \quad \dots(8)$$

また、色彩との関係を見ると、積算紫外線受熱量が表面では30Mj/m²、裏面では100Mj/m²を越えたところから色度xyは安定しはじめ、6年経過し積算受熱量が1157Mj/m²に達すると、反射光色と透過光色の値は近づいてくることがわかった。

2) 光特性—可視光分光透過率・反射率

図7に示した通り3年間の経年変化をみると、洗浄なしの膜は採集部位および経過日数による差がみられたが、膜を洗浄すると可視光分光透過率は2~3%、可視光分光反射率は20~30%回復し、表面および裏面とも差はほとんどないことが判明した。

3) 熱特性—日射透過率・反射率

図8に示した通り3年間の経年変化をみると、日射透過率は3~6%で安定している。洗浄した膜の日射反射率は50~60%であるが、洗浄しない膜は30~50%と変化が大きい。これらは紫外域、可視光域で変化があり、赤外域ではほとんど変化はな

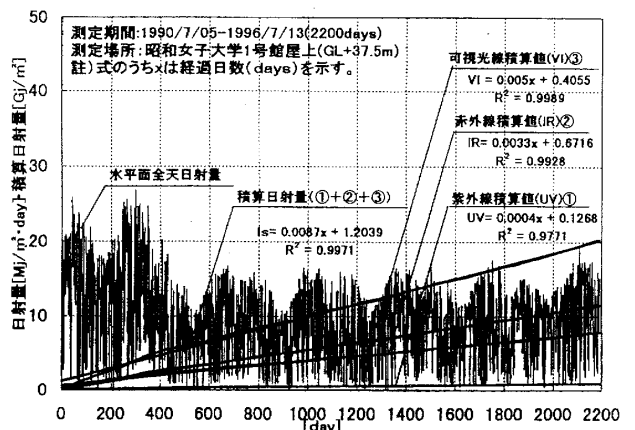


図6 波長別水平面日射量

い。室内への熱負荷は経年変化や汚れによる影響をあまり受けず6年経過しても大きな変動はない。

4) 放射・対流・日射熱取得率

図9に示した通り洗浄の有無にかかわらず熱負荷は水平面全日射量の13~14%、対流成分は4~6%で安定している。室内の熱負荷に相当する日射熱取得率は洗浄ありで17~18%程度、大気への放散熱量は洗浄の有無にかかわらずほぼ80%前後である。熱負荷に対して3年間の経年変化はほとんど安定している。室内への熱負荷は経年変化や汚れによる影響をあまり受けず、3年経過しても大きな変動はない。

4.5 曝露6年目のフッ素樹脂膜各部位の可視分光反射汚れ率および可視分光透過汚れ率

洗浄しない膜の汚れは採集部位ごとにかなりの差がみられた。膜面が汚れると反射率が低下し吸収率が増加する。その結果、室内の光環境に対して影響を与える。このとき熱負荷はほとんど変化しない。また膜材表面の汚れを洗浄すると、その度合いに関係なく室内照度が改善されることがわかった。そこで、曝露6年目の洗浄した膜(洗浄あり)と洗浄しない膜(洗浄なし)各部位の汚れの関係について可視分光反射汚れ率および透過汚れ率を用いて評価を行った。

可視分光反射汚れ率および透過汚れ率は、図10に示した通り膜データ12カ所のうち膜データNo.3、4、8、10、11を代表点とした。可視分光透過汚れ率は波長ごとに値にばらつきがあるので、それぞれ回帰式を求め汚れを比較した。膜データ12ヶ所の全体的な傾向としては反射汚れ率、透過汚れ率ともに780nmに比べ、波長の短い380nmの方が汚れ率の値が高い。どの部位も反射汚れ率に比べて透過汚れ率は20%前後高い値となっている。膜データNo10、11は汚れ率が高く、No10は380nmで80%、780nmで50%、No11は380nmで60%、780nmで40%であることが明らかになった。

5. まとめ

本稿では太陽放射に膜材を6年間曝露し、経過日数ごとの膜材の色彩の変化と塵埃などの汚れによる膜材の性状変化について電子顕微鏡を用いて実験を行った。また、膜材の光環境および熱環境の経年変化についても実験を行った。これに引き続き、曝露6年経過時の膜材各部位について汚れ率を評価した。その結果以下のことが明らかになった。

- 1) 透過色は反射色に比べて色度の変化が大きい。これは膜材を太陽放射に曝露したとき、反射色は膜材基布のすべりを良くするため使用されているコンスターチが製造過程において茶色に変色し、紫外線に曝露すると膜材の外部側から内部側に向かって徐々に漂白される。したがって外部側は数日で白色点に近づくと、内部側はなかなか漂白されないため白色点から離れていると考えられる。積算紫外線量が100MJ/m²を超えると、色度はxyとも0.35前後で安定する。
- 2) 電子顕微鏡で膜材表面をみると、無曝露の新品膜はほとんど汚れがない。曝露開始後膜材の溝の部分に塵がたまり汚れの原因になるが、膜材表面は曝露3年目くらいから溝が浅くなり、6年目になると凹凸自体がみられないほど劣化されると

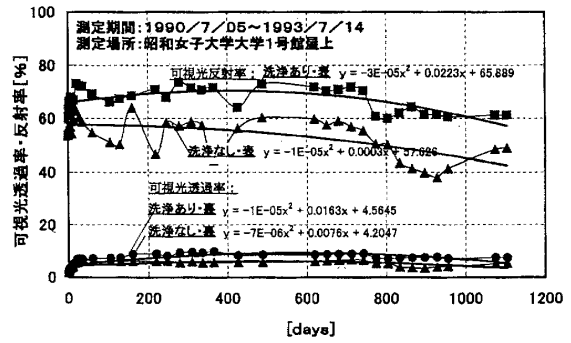


図7 可視分光透過率・反射率・吸収率

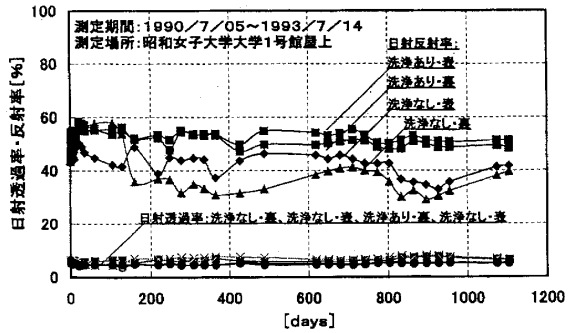


図8 日射透過率・反射率・吸収率

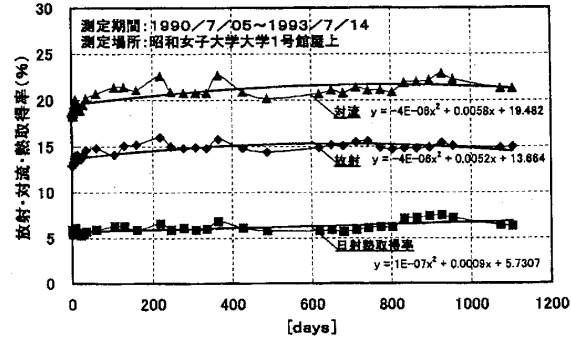


図9 放射・対流・日射熱取得率

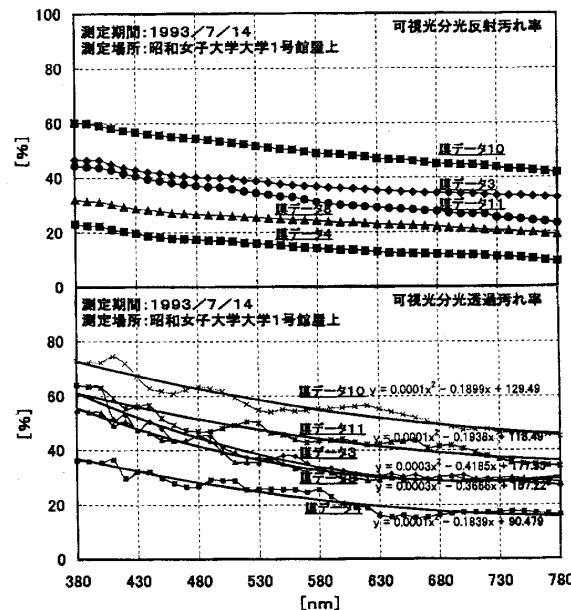


図10 可視分光反射汚れ率および可視分光透過汚れ率

ころもある。しかし、膜材を洗浄すると、部位によっては6年経過したものでほとんど新品膜と同じ状態まで回復する。

- 3) 膜材を6年間曝露すると、可視分光透過率、反射率、吸収率は汚れの度合いにより差が生じるが、洗浄を行うと透過率、反射率とも回復し、ほぼ元の状態に戻る。
- 4) 日射熱取得率は経年変化や汚れにも大きな影響は受けず、熱負荷は6年を通じて安定している。
- 5) 膜材表面の汚れは水洗いで十分落ちるので、5～6年に1度の洗浄で光特性は回復する。また、熱特性は曝露しても室内の熱負荷は変わらない。
- 6) 可視分光反射汚れ率と可視分光透過汚れ率は分光分布の値が大きくなるにつれて減少する。
- 7) 反射側の汚れ率に比べ透過側の汚れ率が高い。これは室内側から見た膜材の汚れが外側から見た場合よりも顕著であることを意味する。

6年間に渡り、フッ素樹脂膜を太陽放射に曝露した場合の膜材の汚れと光環境、熱環境の関係について明らかにした。これに引き続き実際に建設された膜構造建築物の膜材が経年変化に対して光環境、熱環境がどの程度変化するかについては以降の研究として残されている。

<謝辞>本研究にあたっては小川テント株式会社から膜材等の提供を受けた。また、実際の建物の見学等ご協力をいただきました。あわせて感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 佐野武仁：膜構造建築に用いる塩ビ膜とフッ素樹脂膜の光特性と熱特性に関する実験研究，日本建築学会計画系論文報告集，第451号，1993.9.
- 2) 岸谷孝一：建築材料ハンドブック，技報堂出版，1987.11.
- 3) 世田谷区環境部環境公害課：世田谷区と大気汚染，1996.10
- 4) 佐野武仁，稲岡英子：膜材料の温熱環境に関する実験研究 膜構造物の温熱環境に関する研究(第1報)，昭和女子大学紀要「学苑」，pp.82-93，第601号，1989年12月
- 5) 佐野武仁，稲岡英子：膜材料の温熱環境に関する研究，大空間膜構造物の最適システムに関する研究(第2報)，昭和女子大学紀要「学苑」，pp.52-64，第608号，1990年7月
- 6) 佐野武仁，稲岡英子，大串美帆，佐野三重子：テフロン膜の動特性に関する基礎的研究(その3)，膜構造物の温熱環境に関する研究(第4報)，昭和女子大学紀要「学苑」，pp.105-113，第621号，1991年7月
- 7) 佐野武仁，堀内永子，小川晴代：テフロン膜の採光および熱負荷特性に関する基礎的研究(その4)，膜構造物の温熱環境に関する研究(第6報)，昭和女子大学紀要「学苑」，pp.76-84，第633号，1992年7月
- 8) 佐野武仁：膜構造建築物に用いる塩ビ膜とフッ素樹脂膜の光特性と熱特性，膜構造物の温熱環境に関する研究(第7報)，昭和女子大学紀要「学苑」，pp.61-74，第637号，1992年12月
- 9) 佐野武仁：四フッ化エチレン樹脂膜の光特性と熱特性の経年変化に関する実験研究，膜構造建築の温熱環境に関する研究(第15報)，昭和女子大学紀要「学苑」，pp.96-108，第682号，1996年12月
- 10) 中村悦子，山口温，佐野武仁：四フッ化エチレン樹脂膜の耐候性と光特性・熱特性に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，1997.9
- 11) 山口温，中村悦子，佐野武仁：電子顕微鏡を用いた四フッ化エチレン樹脂膜表面の汚れと経年変化に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，1997.9
- 12) 山口温，佐野武仁：四フッ化エチレン樹脂膜の可視分光透過率と汚れに関する実験研究，空気調和衛生工学会学術講演会梗概集，1998.8
- 13) 山口温，佐野武仁：四フッ化エチレン樹脂膜の可視分光反射率と汚れに関する実験研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，1998.9