

促進耐候性試験法

Introduction to Accelerated Weathering Test Methods



分析センター
第2部
飯田真司
Sinji
Iida



分析センター
第2部
高柳弘道
Hiromichi
Takayanagi



分析センター
第1部
矢部政実
Masami
Yabe

1. はじめに

塗料はさまざまな材料や製品、部品の表面に、通常は数ミクロンから数百ミクロン程度の膜厚で塗られて、それらの保護（長寿命化）のほか、それぞれの用途に応じてそれらの表面に色合いや風合い、つやや光輝感を持たせるようにすることでその機能を発揮している。

塗膜は常に何らかの形で外界と接触した状態に晒されており、光（主に紫外線）や水（降雨・結露など）、酸素、熱、薬品などによる攻撃（化学的、物理的、光学的）を受ける状態に置かれている。塗膜の性能はこれらの外的な環境因子のさまざまな攻撃や刺激に対して、どれだけ耐えることができるかで決定されることになる。

このため、「耐候性」を評価するための試験は自動車、土木用機械類、橋梁や備蓄タンクなどの大型鋼構造物、ビルや体育館などの大型公共建築物など屋外で使用されるあらゆる機械や構造物の総合的性能を評価する上で最も重要な試験のひとつである。

耐候性試験は「屋外ばくろ試験」が最も標準的な試験となるが、近年、耐候性が大幅に向上している各種塗料の性能を見極めるためには最低でも数年以上を要するため、評価の目的や塗膜の用途、得ようとするデータに合わせて、さまざまな促進耐候性試験が行なわれるようになってきている。

これら促進耐候性試験は屋外実用時の塗膜劣化との対比の中で「促進性」、「相関性」あるいは「再現性」を求められているが、塗膜の劣化は先述のいくつかの外的劣化因子が塗膜の表面や内部のさまざまな部位や場所でそれぞれに化学的反応や物理的変化を引き起こし、それらが同時にそして相互に何らかの影響を及ぼしながら進んでゆくため^{1)~5)}、これらの外的劣化因子の影響を厳密にコントロールしない限り、効果的な「促進性」や適正な「相関性」、「再現性」を得ることはかなり難しいと言うことになる。

現状の促進耐候性試験においては、「促進性」についてはある程度の効果を得ているが、「相関性」、「再現性」という点では、残念ながら十分に満足できるものは多く見られない。

塗料の設計、開発や塗膜の性能評価にあたってはこれら

の促進耐候性試験の特性、メリット、データを得る上での課題などを正しく理解し、これらをより効果的に活用して、目的とするデータを短期間により正確に、より再現性良く得ることが肝要である。

ここでは、現在広く利用されている塗膜評価のための促進耐候性試験用の機器について解説する。紙面の都合上、本号では従来から多く使用され現在も中心的な促進耐候性試験として使用されている

1. サンシャイン カーボンアーク灯式耐候性試験機
2. デューサイクル耐候性試験機
3. 紫外線カーボンアーク灯式耐候性試験機
4. キセノンアークランプ式耐候性試験機

について解説することにし、次号で比較的新しい促進耐候性試験や最新の試験法などを紹介することにした。

これらの試験機器や試験法のより目的に合った効果的な利用が大いに進んでゆくことを切望するものである。

2. サンシャイン カーボンアーク灯式耐候性試験機 (SWOM)

日本ではこの試験機を通常、「サンシャインウェザー（オメーター）」と呼ぶことが多い。この名称は必ずしも正式のものではなく、試験機メーカーの商品名がそのまま使われているものである。ちなみに、この試験機の国内の有力メーカーであるスガ試験機では「サンシャインウェザーメーター（Sunshine Weather Meter）⁶⁾」と表示しているが、米国のアトラス社では「サンシャインカーボンアークウェザーオメーター（Sunshine Carbon Arc Weather-Ometer）」⁷⁾の表示を使用している。上記の表題は誤解を避けるため、あえてJIS B 7753 (1993) の名称となっているものを使用した。しかし、名称としては凡長であり、使用しにくいところがあるので、本稿では略して「SWOM」で表すこととする。なお、国際的には「オープンフレームカーボンアーク灯式耐候性試験機（Open Flame Carbon Arc Weathering Instrument）」という名称が一般的である。

このSWOMの原型は1930年代末に米国で開発されているが、カーボンアークの制御技術が確立されてようやく実用

に供されるようになったのは1950年代の後半になってからである。その後、それまで使用されていた紫外線カーボンアーク灯式の耐候性試験機の改良型として広く使用されるようになる。オープンな大気中で直接カーボンアークを発光させ、連続した強い紫外線を放射させることで促進性が向上したことや波長分布が広く、長波長域にも放射光帯を有して太陽光放射により近づいたことで再現性、相関性が改良されたこと、4対のロングカーボンロッドの燃焼で長時間連続試験が可能となり、装置の大型化と相俟って、試験効率が飛躍的に向上した。管理・運転面においては、カーボンの燃焼に伴うススや銅カスの除去やフィルターの清掃管理をしっかり行なうことなどが必要であり、この点で比較的手間のかかる試験法でもある。(写真1,2参照)

て、比較的早い時期にプラスチック関係分野での規格化が進んだこともあり、工業用塗料や汎用塗料をはじめとするあらゆる分野での塗料工業の飛躍的發展を背景に膨大な量のデータの蓄積がなされてきている。このような事情から新しい耐候性試験機が数多く開発された現在でも、これまでの蓄積データとの対比の関係上、この試験でのデータの取得は半ば避けられないところがあり、根強く使用され続けている。

しかし、国際的には後述のキセノンアークランプ式耐候性試験機への移行が進んでおり、国内においてもJISのISO整合化への流れの中で塗料関係規格から外れるようになってきている。

図1は一般的なSWOMの概念図⁶⁾である。また、図2にSWOMの試験槽の配置図⁸⁾を示した。



写真1 サンシャイン カーボンアーク灯式耐候性試験機

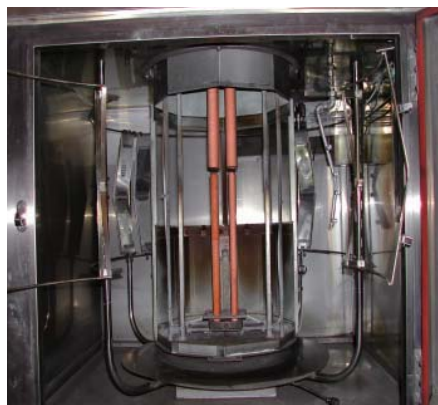


写真2 内部の様子とカーボンの取り付け状態

SWOMの耐候性試験における促進倍率は試験対象となる塗膜の種類や組成などにもよるが、屋外ばくろに比べて数倍~10数倍ほどと考えてよい。

有効な促進耐候性試験法がほかにあまり多くなかったことや試験機メーカーの市場戦略などの事情も手伝って、わが国では、1960年代以降自動車やPCMなどの工業用塗料分野での耐候性評価に盛んに使用され、今日に到っている。この間、JIS Z 0239「サビ止め油加速風化試験法」(1960)やJIS D 0202「自動車部品の塗膜通則」(1966)をはじめとし

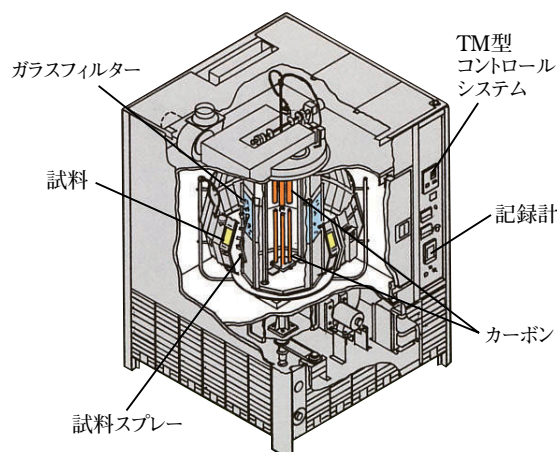


図1 サンシャイン カーボンアーク灯式耐候性試験機の概念図

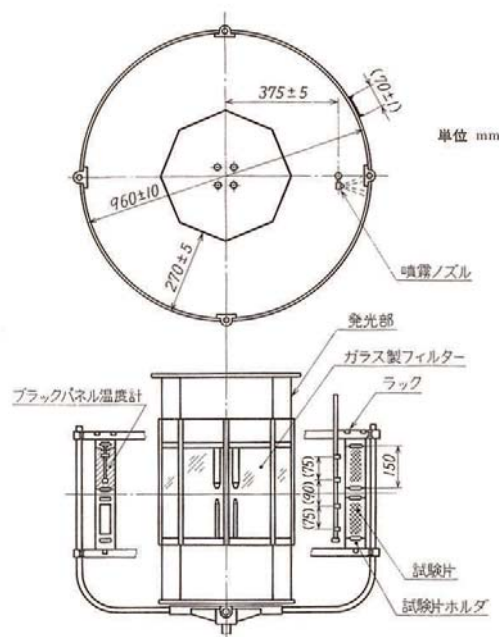


図2 試験槽の配置図

2.1 分光分布

SWOMの分光分布を図3⁶⁾に示した。この分光分布で400nm以下の波長のものを通常、紫外線 (Ultra Violet ; UV) と称している。紫外線とそのスペクトル範囲について具体的な定義は特にないが、CIE (国際照明委員会) では表1のような分類で紫外線を表している。⁷⁾

図3⁶⁾の分光分布にあるように、紫外線のうち地表には到達しない280nm以下のUV-Cはカットされ、一部わずかながら観測される280~315nmのUV-Bが若干含まれているが、塗膜の劣化に大きな影響を及ぼす315~400nmのUV-Aが太陽光の数倍の放射照度を示していることが特徴である。

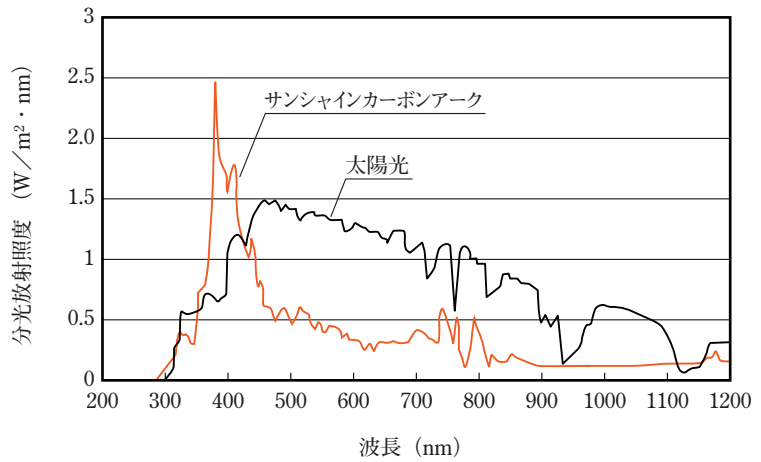


図3 サンシャイン カーボンアークの分光分布

表1 CIE (国際照明委員会)による紫外線の分類

	波長範囲	
UV-A (紫外線A)	315 ~ 400 nm	地表に到達している紫外線で塗膜や生物組織などの有機物の劣化に影響を及ぼしている。(低エネルギーレベル)
UV-B (紫外線B)	280 ~ 315 nm	より高エネルギーレベルの紫外線であるが、295~315nmで地表への照射はごくわずかで全太陽光の0.数%以下である。
UV-C (紫外線C)	~ 280 nm	高エネルギーレベルで塗膜劣化への促進性がかなり高いが、成層圏オゾンによる吸収や散乱で地表への到達はない。

SWOMはこの強烈な紫外外部光による高い劣化促進性を有していることや一部ではあるが短波長のUV-B紫外線の照射などがある。このことが塗料組成や塗膜構造、樹脂の種類や構造によっては、実環境のばくろ条件での劣化モードと大きく異なる要因ともなっており、その相関性、再現性の保証に欠ける場合が出てくる。

紫外線による樹脂骨格の破壊 (アルキル鎖の開裂、加水分解) が特に促進されることとなり、他の要因に基づく劣化とのバランスを崩して実際の屋外での塗膜劣化と異なる塗膜状態を呈することとなる。図4~6にアクリルメラミン樹脂系クリアーの塗膜表面について、試験初期、屋外ばくろ6年とSWOM1500時間後のIRチャートを示したが、それぞれに樹脂酸化 (アルキル鎖の減少、パーエステルの生成) や加水分解 (メラミンの減少など) の程度が異なっていることが判る。写真3は別のアクリルメラミン樹脂系クリアーについて屋外ばくろ2年とSWOM2000時間後の塗膜の表面状態を観察したSEM写真である。屋外ばくろでは塗膜表面に巣穴状の侵食が生じているが、SWOMでは表層樹脂の比較的均一な肉やせに止まっており、明らかに異なった劣化形態を示していることが判る。また、図7,8に光

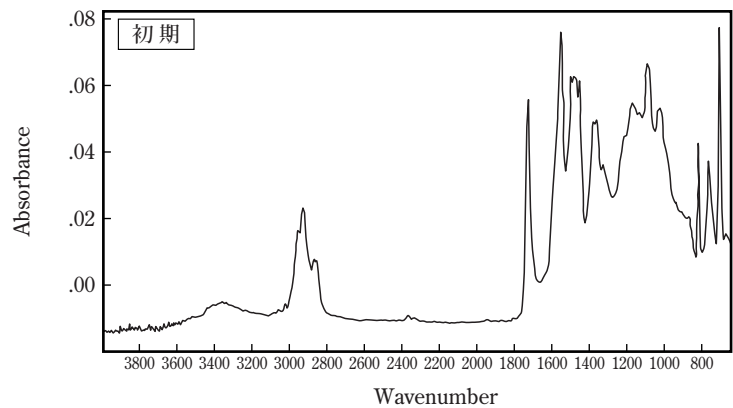


図4 アクリルメラミン樹脂クリアー塗膜のIRチャート (初期)

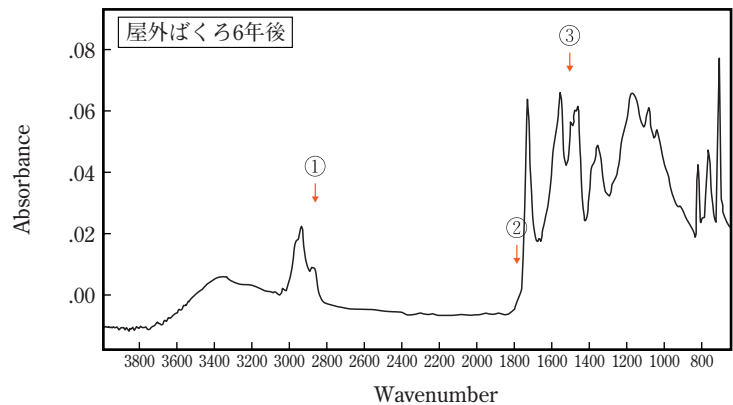


図5 アクリルメラミン樹脂クリアー塗膜のIRチャート (屋外ばくろ6年)

沢保持性と色差について屋外ばくろ試験との相関性を評価した結果を示したが、光沢保持性などではあまり良好な相関性は得られていない。

紫外線による樹脂骨格の破壊作用は芳香族系の樹脂構造を有するものではその傾向が強く現われる。反対に脂肪族系の樹脂構造が主体のものでは促進性がそれほど強調されないため、実際の屋外ばくろではほぼ同程度の耐候性を有するこれらふたつの樹脂塗料をSWOMで試験すると、芳香族系のものの耐水性（この場合、光沢保持性）がより悪く評価されることが往々にしてある。（表2参照）

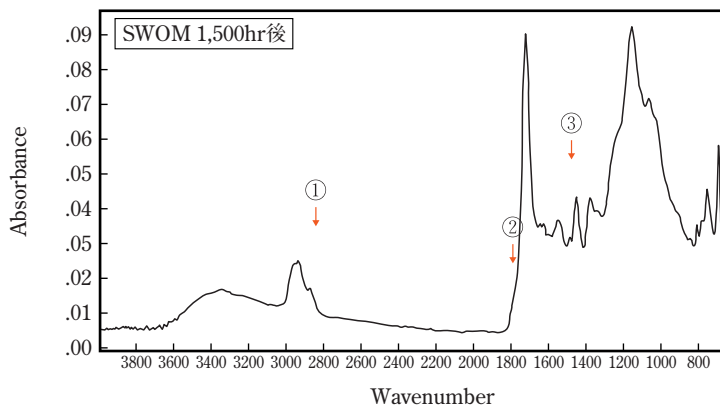


図6 アクリルメラミン樹脂クリア塗膜のIRチャート (SWOM1,500hr)

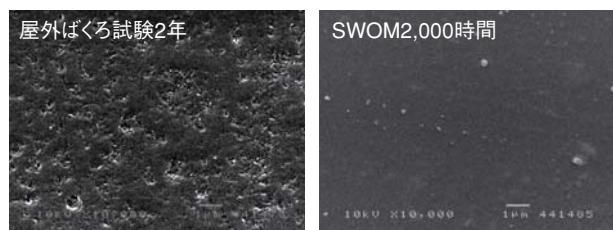


写真3 耐候性試験塗膜の表面の状態 (アクリルメラミン樹脂塗料、倍率;10,000倍)

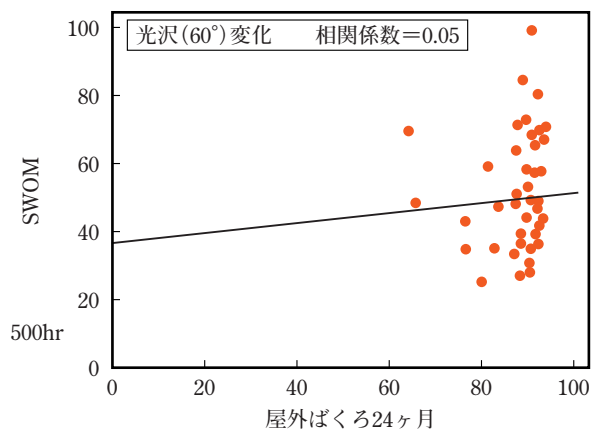


図7 屋外ばくろとSWOMの試験結果 (60°光沢) の相関性

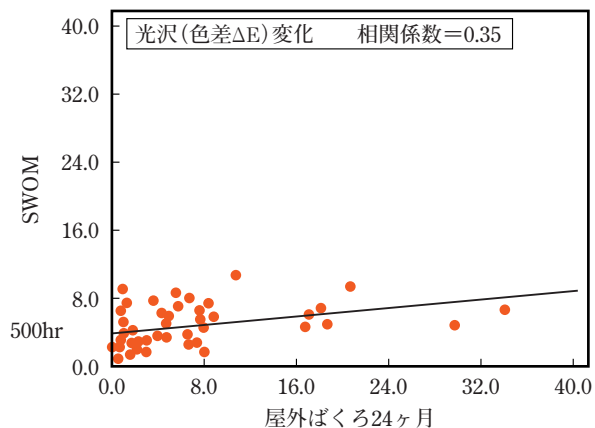


図8 屋外ばくろとSWOMの試験結果 (色差) の相関性

表2 芳香族系ポリウレタンと脂肪族系ポリウレタンの耐候性比較

	光沢保持率 (60°)	
	千倉ばくろ2年	SWOM1,000hr
ポリエステル樹脂系 ポリウレタン樹脂塗料 (白) [芳香族系]	82%	74%
アクリル樹脂系 ポリウレタン樹脂塗料 (白) [脂肪族系]	80%	83%

これらを改善するためにフィルターを選んで短波長UV成分をカットするなどの提案⁹⁾もあるが、反対に「促進性」が押さえられてしまうことやSWOMとしての他のデータとの整合性の課題などがあり、本格的な改善や標準化を進めるところまでは到っていない。

2.2 試験条件

SWOMの一般的な試験 (運転) 条件を表3にまとめた。ここには代表的なふたつの条件を示しているが、降雨条件として純水 (脱イオン水) の噴霧時間と間隔が大きく異なっている。JIS K 5400はASTMやISOなどの規格を参考とし、一般汎用塗料を標準的に想定した塗料規格と考えてよいが、JIS D 0205は自動車または自動車用部品向け塗料を標準的に想定した塗料規格であり、日本の多雨な気象条件を加味して降雨や水分の影響度をより大きく考慮している。

機種やカーボン種にもよるが、一般に48~78時間程度の連続運転が可能である。最新のものでは、カーボンの自動交換で300時間まで運転可能な機種も登場している。⁶⁾

その他、回転ラックの直径を標準サイズの70%に縮めて照射強度を約2倍にした強エネルギー型などの試験機もある⁶⁾が、前項でも指摘しているように単純に紫外線の強度を高めることが促進性と相関性、再現性のバランスの面で望ましい試験法なのか議論の残るところである。

表3 SWOMの標準的な試験(運転)条件

項目		JIS K 5400 規程条件 ^{注)}	JIS D 0205 規程条件
放電電圧		50±2V	50±2V
放電電流		60±2A	60±2A
ガラス製 フィルター	種類	A (屋外ばくろ用) (255nm;1%>、302nm;71~86%、360nm以上;91%<)	A (屋外ばくろ用) (250nm;1%>、302nm;68%<、375~700nm以上;90%<)
	使用時間	2,000時間以内	2,000時間以内
ブラックパネル温度		63±3℃	63±3℃ or 83±3℃
水の噴射条件	圧力	0.08~0.13MPa	0.08~0.13MPa
	水量	2100±100ml/分	2100±100ml/分
	噴射時間	18分/120分照射	12分/60分照射
	水質	pH6.0~8.0、導電率200 μ s/cm以下	pH5.8~8.6、導電率200~250 μ s/cm以下
	水温	16±5℃	16±5℃
相対湿度		50±5%	50±5%
試料回転 ラック	直径	960±10mm	960±10mm
	回転数	1rpm	1rpm
試料面放射照度		255W/m ² (300~400nm) 連続照射	255±10W/m ² (300~700nm) 連続照射

注) JIS K 5400では電圧、電流、フィルターの使用時間、水の噴射条件を規程している。
 その他はJIS B 7753に準拠している。

2.3 水質管理

JISなどの公的規格ではあまり厳密に規定されていないが、SWOMのような降雨条件を想定した促進耐候性試験では試験に供する噴霧用の水の水質管理が極めて重要である。

表2にあるように、JIS規格においても導電率などを規定して水中のイオン濃度に制限を加えているが、実際の耐候性試験において試験初期から塗膜表面に著しい水痕が沈着するようなことが発生し、塗膜の耐候性評価に著しい影響を及ぼすことがある。これはカルシウム、マグネシウムなどのアルカリ土類系の塩やシリカ系の溶解物が塗膜表面に付着し、不溶解物に変化して析出することが主な原因であり、これらを防止するためには金属イオン類やシリカ(SiO₂)についてより厳しい水質基準を設け、噴霧水中のシリカの含有量を徹底的に抑えることが必要である。

当社では超純水レベルの導電率の管理、ppbオーダーでのシリカ含有量管理の基準を設けてこれらの水質維持に万全を期した管理を行っている。(写真4参照)

当社での純水製造工程の概略を図9に示した。

なお、これらの水質管理は後述のキセノンアークランプ式耐候性試験機でも同じ要領に基づいて実施している。



写真4 純水製造装置の外観

2.4 排気処理浄化装置

先にも述べているが、SWOMにおいてはカーボンアークの燃焼ガスは試験装置中に滞留することを防止するため強制的に排気されるが、この排気中にはススや銅カスなどのアッシュ類が含まれている。

それらをそのまま大気中に放出することは周囲の環境負荷増大に繋がることから、浄化処理が必要となる。当社

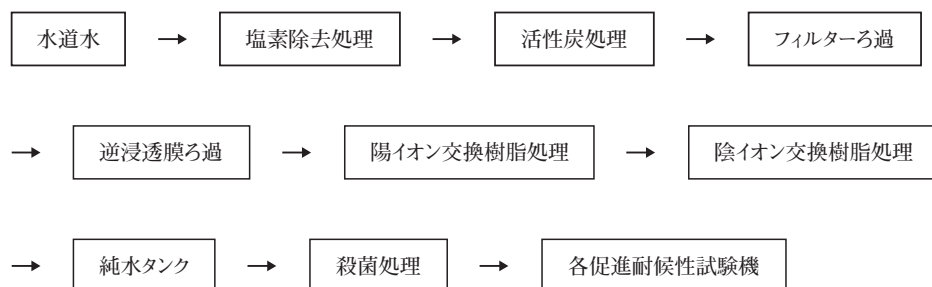


図9 純水製造工程の概略

では、すべてのSWOMの排気を大型ろ過集塵機を通して、ススやアッシュ、その他の微細粉塵を除去し、清浄化処理をした上で屋外大気中に還元させている。

図10にこのろ過集塵機の基本構造図を示した。また、写真5はろ過集塵機の本体である。

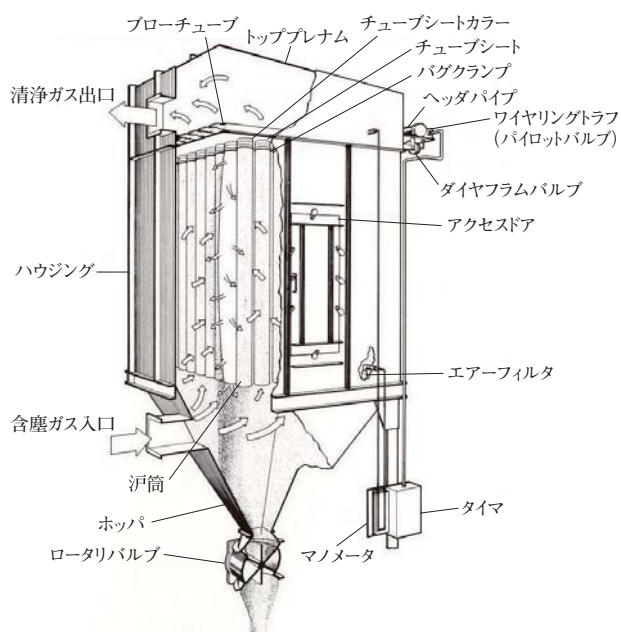


図10 ろ過集塵装置の構造図

2.5 関連規格⁸⁾

SWOM関係の規格には表4のようなものがあるが、長い実績と広い用途を反映しているためか、他の促進耐候性試験に比べるとかなりよく整備されている。

JIS B 7753-1993サンシャインカーボンアーク灯式耐光性及び耐候性試験機はこの試験法に関して主に機器のハード面を詳細に規定した規格であるが、ここで「耐光性試験機」は水の噴霧がない、紫外線照射のみの試験法を指している。この種の試験機を「フェードメーター (Fade Meter)」と呼ぶことがあるが、この名称は試験機メーカーの商品名がそのまま使われているものである。一方、「耐候性試験機」は水の噴霧を伴う試験法を指している。この試験機を「ウェザー (オ) メーター」と呼ぶが、先述のようにこれも試験機メーカーの商品名がそのまま使われているものである。



写真5 ろ過集塵装置の外観

3. デューサイクル耐候性試験機^{8,10)}

この試験機は前項のSWOMと同じものを使用し、ガラスフィルターを通さずにエネルギーレベルの高い短波長成分を多量に含む紫外線の照射と消灯による暗黒高湿度結露のサイクル設定によって、より劣化促進性を高めた耐候性試験に使われる。この照射～暗黒のサイクル条件はJIS D 0205自動車部品の耐候性試験方法¹⁰⁾では60分/60分のサイクルや消灯暗黒時試験槽の温度 $50 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度98%以上などが規定されている。

この試験法ではエネルギーの高い短波長紫外線と結露水の影響による劣化促進性が高められているが、米国のNational Coil Coaters Associationの標準規格となっている

関係からPCM用塗料などの工業用塗料分野で使われることが比較的多い。通常のSWOMに比べて、約10倍の促進性があると言われているが、対象となる塗料の種類や樹脂種によっては、必ずしも屋外ばくろ試験に対して相関性、再現性が優れているとは言えない面が多く(図11,12参照)あり、試験条件の設定にあたっては十分な検討が必要である。このような背景から、最近の試験実績はあまり多くなっている。

参考までに、JIS D 0205自動車部品の耐候性試験方法¹⁰⁾に記載されている試験条件が一般的であり、それらを表5にまとめた。但し、この試験条件は特に定まったものではなく、その試験目的や評価する塗膜の種類によって個別に設定することも可能である。

表4 SWOMの関連規格

規格No.	名称または内容
JIS関係	
JIS A 1415-1999	高分子系建築材料の実験室光源による暴露試験方法
JIS K 5101-1991	顔料試験方法
JIS K 5400-1990	塗料一般試験方法
JIS B 7753-1993	サンシャインカーボンアーク灯式耐光性及び耐候性試験機
JIS D 0205-1987	自動車部品の耐候性試験方法
JIS H 8685-1-1999	アルミニウム及びアルミニウム合金の着色陽極酸化皮膜の光堅ろう度促進試験方法
JIS K 6266-1996	加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの耐候性試験方法
JIS K 7102-1981	着色プラスチック材料のカーボンアーク燈光に対する色堅ろう度試験方法
JIS K 7350-1995	プラスチック実験室光源による暴露試験方法
JIS K 6021-2000	建築用塗膜防水剤
JIS K 5981-2003	合成樹脂粉体塗装製品の塗膜
JIS Z 2381-2001	大気暴露試験方法通則
JIS E 4037-2001	鉄道車輛—構成部品—耐候性試験方法
JIS Z 9107-1998	安全標識板
ISO関係	
ISO 4892-4 1994	Plastics-Methods of exposure to laboratory light sources- Part4:Open-flame carbon-arc lamp
ISO 2135-1984	Anodizing of aluminium and its alloys-Accelerated test of light fastness of coloured anodic oxide coatings using artificial light
ISO 3917-1992	Road Vehicles-Safety glazing materials
ASTM関係	
G 152-2000	Standard Practice for Operating Open Flame Carbon Arc Light Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials
D 750-95	Test Method for Rubber Deterioration in Carbon-Arc-Weathering Apparatus
D 822-2001	Standard Practice for Filtered Open-flame Carbon-Arc Exposures of Paint and Related Coatings
D 3361-2001	Standard Practice for Unfiltered Open-flame Carbon-Arc Exposures of Paint and Related Coatings
D 1499-92	Operating Light-and-Water-Exposure Apparatus (Carbon-Arc-Type) for Exposure of Plastics
Federal Standard関係	
Test method STD No.141C-93	Paint, Varnish, Lacquer and Related Materials, Method of Inspection Method 6151
Fed.Res.FMVSS No.209	Seat Belt Assemblies-Passenger Cars, Multipurpose Passenger Vehicles, Trucks and Buses
MIL関係	
810F-2000	Environmental Test Methods-Method 505.2 Solar Radiation
P-21600A-1998	Paint System, Fluorescent, Removable, for Aircraft Application
AATCCL関係	
Test Method 111-1996	Weather Resistance of Textiles-Sunshine Carbon Arc Apparatus

4.紫外線カーボンアーク灯式耐候性試験機^{11),12)}

この試験機はすでに過去のものとなっているが、まだ繊維、紙などの耐候性評価に使われているところがあるので、参考までに簡単に解説しておく。試験機の規格としてはJIS B 7751紫外線カーボンアーク灯式耐光試験機とJIS B 7752紫外線カーボンアーク灯式耐候性試験機が制定されており、前者が1灯式のパイレックスガラスグローブの中で紫外線を連続照射するもので後者が2灯式でさらに水の噴霧(18分/120分or12分/60分)を伴うものである。

促進耐候性試験機としては最も初期のものであるが、ドイツで染色した繊維の耐候性の評価にこのカーボンアーク灯が使用されたのが始まりである。本格的な試験機として1910年代末に米国で開発されているが、1950年代頃から繊維、包装材料などを中心に促進試験法として広まってゆき、

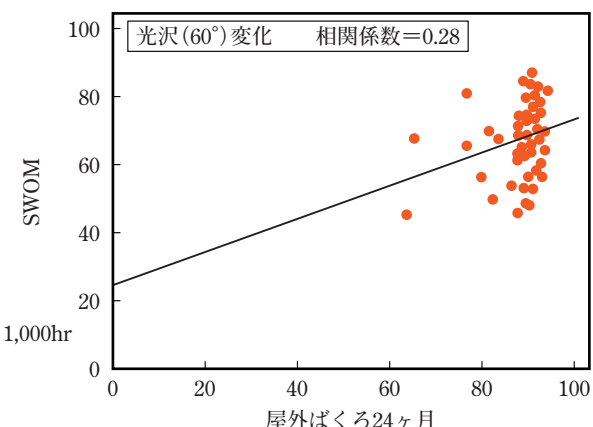


図11 屋外ばくろとSWOMの試験結果(60°光沢)の相関性

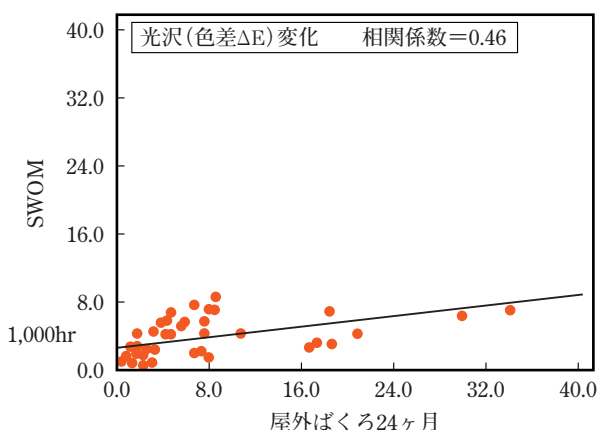


図12 屋外ばくろとSWOMの試験結果(色差)の相関性

表5 デューサイクル耐候性試験(運転)条件

項目		JIS D 0205 規程条件
運転条件		照射/暗黒: 60分/60分
放電電圧		50±2V
放電電流		60±2A
ガラス製フィルター		使用しない
ブラックパネル温度		63±3°C or 83±3°C
水の噴射		なし
相対湿度	照射時	50±5%
	暗黒時	50±2°C、98%以上
暗黒時試料冷却		試料裏面に約7°C冷水噴霧
試料回転ラック	直径	960±10mm
	回転数	1rpm
試料面放射照度		285±10W/m ² (300~700nm)

表6 紫外線カーボンアーク灯式耐候性試験機の関連規格

規格No.	名称または内容
JIS関係	
JIS K 5400-1990	塗料一般試験方法
JIS B 7751-1974	紫外線カーボンアーク灯式耐光試験機
JIS B 7752-1980	紫外線カーボンアーク灯式耐候性試験機
JIS K 7102-1981	着色プラスチック材料のカーボンアーク燈光に対する色堅ろう度試験方法
JIS L 0842-1999	カーボンアーク灯光に対する染色堅ろう度試験方法
JIS L 0824-1999	染色堅ろう度試験用カーボンアーク灯形耐光試験機
JIS H 8685-1-1999	アルミニウム及びアルミニウム合金の着色陽極酸化皮膜の光堅ろう度促進試験方法
JIS D 0205-1987	自動車部品の耐候性試験方法
ASTM関係	
G 23-98	Operating Light Exposure Apparatus (Carbon-Arc-Type) With and Without Water for Exposure of Nonmetallic Materials
AATCCL関係	
Test Method 16	Colorfastness to Light

工業用塗料分野や汎用塗料分野でも広く使われるようになり、規格化も進んだ。(表6参照)

しかし、図13に示したように主に386nmを、さらには358と415nmをピークとする紫外線域に極端に偏った分光放射のため、太陽光放射とは全く異なる分光分布となっており、促進耐候性試験としては屋外ばくろ試験との相関性、再現性の点で不十分なところがある。

このため、1960年代以降は先に紹介したSWOMの登場によって促進耐候性試験法としての主役を奪われ、20世紀末にはJIS K 5600など塗料関係の規格の改訂によって試験法としての使命を終えている。

従来からの試験データの対比の上でこの試験でのデータを必要とすることもあり、繊維、紙関係などでは1灯式で紫外線を連続照射するタイプ(いわゆるフェードメーターと呼ばれるタイプ)のものは現在でも使われている。

図14は一般的なカーボンアーク式耐光試験機(1灯式)の概念図¹³⁾である。また、図15にカーボンアーク式耐候性試験機(2灯式、水噴霧型)の試験槽の配置図¹²⁾を示した。

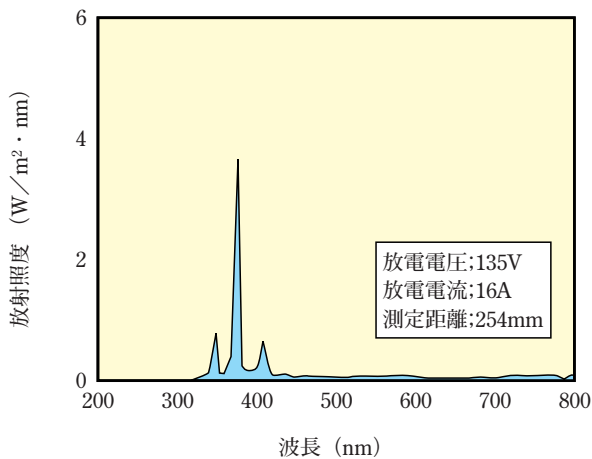


図13 紫外線カーボンアークの分光分布

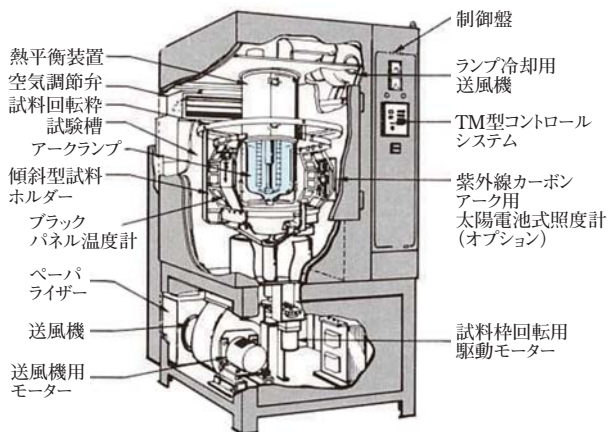


図14 紫外線カーボンアーク式耐候性促進試験機概念図

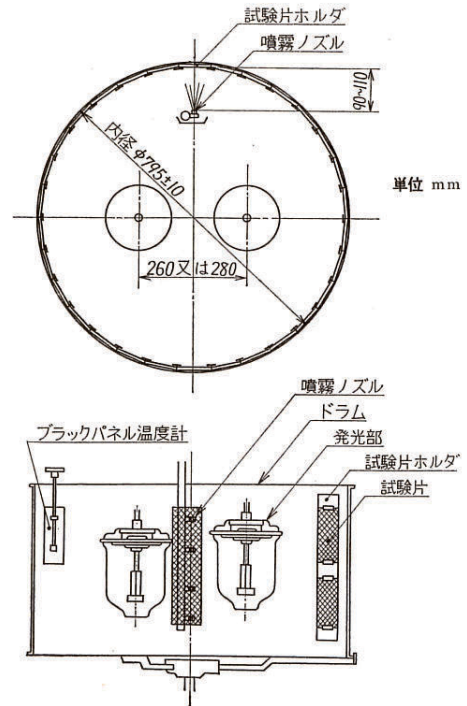


図15 試験槽の配置図

5. キセノンアークランプ式耐候性試験機 (XWOM)

サンシャインカーボンアーク灯式耐候性試験機の場合と同じくこの試験機を通常、「キセノンウェザー(オ)メーター」と呼ぶことが多い。これらについても試験機メーカーの商品名がそのまま使われている。ここではJIS B 7754(1991)その他の公的規格^{10),14),15)}の名称となっているものを使用した。本稿では略して「XWOM」で表すこととする。ISOやASTMなどの国際規格においては「Xenon Arc Weathering Instrument」という名称が多く使われている。

XWOMは希ガスであるキセノンガス中でアーク放電させ、励起されたガスが基底状態に戻る時に発光する光が地表上での太陽光に近似していることを利用したものである。他の多くの促進耐候性試験では紫外線の強度が異常に高い光源を使用して、試験片の劣化を特に促進させることに設計の主眼が置かれていることに比べると、自然の劣化条件の再現性を相当意識した試験法となっている。

他の試験法では、カーボンの組成や品質、メタルハライドガスの組成や品質、蛍光管のガス組成や蛍光体の組成、さらにはメーカー間の差などで光の分光分布や強度にバラツキを生じる危険性や可能性があり、現在でもこれらの管理には相当神経を使うことが多いが、XWOMの光源はピュアなキセノンガスを使用していることから、光の分光分布や強度はほとんどその純度と使用するフィルターで決定されてしまうため、試験用の光源としてはかなり安定したものである。この点では促進耐候性試験法として「再現性」を確保しやすい試験法と考えられる。

イギリスの科学者ラムゼイはキセノンを発見(1898年)し、

アーク放電で発する光が白色であることを見出した。この発見で彼は1904年のノーベル化学賞を受賞する。そして、キセノンランプが開発されるが白色昼光に近いため、現在では映写機や様々な照明の光源として広く使われるようになっていく。このランプを使った耐候性試験機は1950年代中ごろようやく開発されるが、太陽光に近似した光源ではあっても劣化促進性が今ひとつ高くないことから、日本では耐候性試験機としての認識度は比較的低かった。1970年代ころからランプの高照度化が進められたことやヨーロッパを中心にISOへの規格化が進んだことなどから各種材料の耐候性評価に使われるようになった。

その後、強エネルギー型の試験法が考案され、さらに高照度のランプが開発されたことなどから耐候性試験法としての「促進性」が向上した。また、欧米を中心にした海外では促進耐候性試験での主流となっていたことなどから、1990年にはJIS K 5400塗料一般試験法に採用され、今日のJIS K 5600塗料一般試験法の耐候性試験法に到っている。屋外ばくろ試験との近似性、再現性が比較的に優れていることから、日本においても塗料のほか、プラスチック、ゴムその他の各種材料の促進耐候性試験の主流になりつつある。(写真6参照)



写真6 キセノンアークランプ式耐候性試験機

カーボンアーク灯式のようなススや燃えカス、銅カスの発生がなく、運転時の管理が容易であるが、後述の分光分布で明らかのように塗膜の劣化にはあまり寄与しない赤外線領域でのエネルギー照度が大きい。従って、試験槽の温度管理にはそのほとんどを熱として強制的に除去する必要があり、耐候性試験法としてはかなり効率が悪く、エネルギー消費型の試験法であることが難点である。

XWOMでは照度でコントロールしているが、標準型では300~400nmで60W/m²と規定されている。この照度は地表での自然昼光最高値(マイアミ、春分正午の垂直入射)の66.2W/m²(300~400nm)にほぼ相当する。また、太陽光の分光組成(標準自然昼光最高値)に関するCIE(国際照明

委員会)の1985年の報告¹⁶⁾では、300~400nmで74.6W/m²となっている。

標準条件でのXWOMの耐候性試験における促進倍率は試験対象となる塗膜の種類や組成などにもよるが、屋外ばくろに比べて数倍ほどと考えてよい。

強エネルギー型では300~400nmで180W/m²と規定され、試験板の距離やランプ照度の調整でコントロールするようになっており、自動車関係の耐候性試験で多く使われている。

図16は一般的なXWOMの概念図¹⁷⁾である。また、図17にキセノンアークランプ(空冷式・水冷式)の構造図¹⁵⁾を示した。

また、最近では少数試験板用の小型の試験機も市販されるようになってきている。この試験機の場合、試験板は固定された状態で試験される。

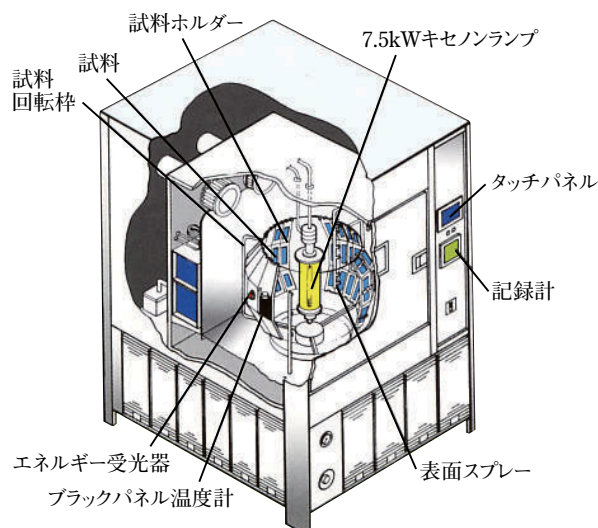


図16 キセノンアークランプ式耐候性試験機の詳細な概念図

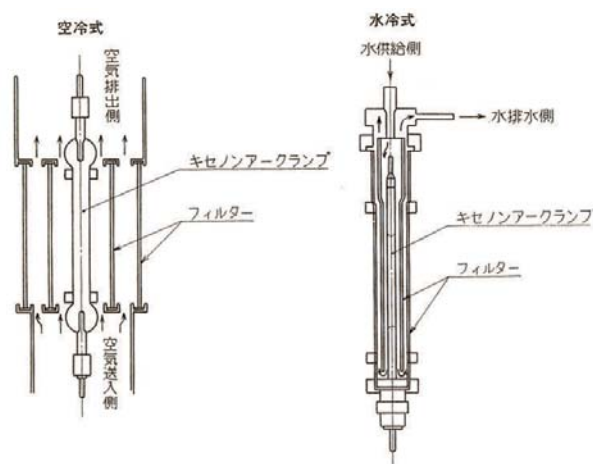


図17 キセノンアークランプの構造図

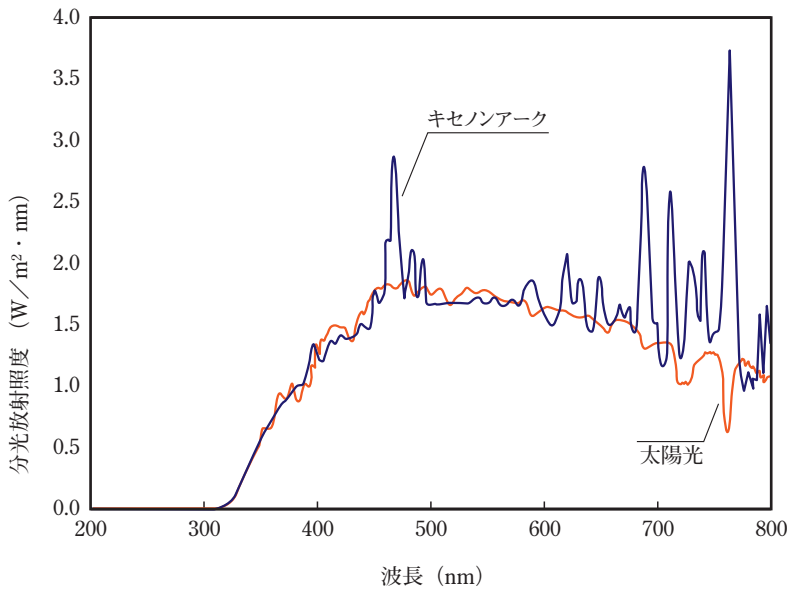


図18 キセノンアークランプの分光分布

5.1 分光分布

XWOMの分光分布を図18に示した。太陽光のそれに近似した分光分布を有していることが判るが、UV-Bでは290nm以下はほとんどカットされ、290～313nmの範囲が若干含まれている。315～400nmのUV-Aについてもほぼ太陽光のそれと近いレベルにある放射照度を示していることが特徴である。

下の表はISO11341、JIS5600-7-7に規定されている分光放射照度分布¹⁵⁾である。屋外でのばくろを想定した一般的な促進耐候性試験では、個別の照度分布をユーザーが指定する

場合を除いて、基本的にこの照度分布を前提に試験条件を設定することとなる。

(表7)

いずれにしてもXWOMではほぼ太陽光に近似した分光特性から、実環境のばくろ条件に近い劣化モードで塗膜の劣化を進める可能性が高く、相関性、再現性に優れた試験結果を得ることが期待できる。但し、照度に大きな差がないことから、高い促進性はあまり期待できない。この点で強エネルギー型は促進性が向上しているが、実際の促進率はせいぜい2倍程度に留まっている。実際の塗膜の劣化は単に紫外線照度にだけ支配されているのではなく、温度や水の効果が光と複合・連動して作用していることによるものであることが判る。

その分光特性の面から考えるとXWOMはバランスの良い試験法であると言える。この点で特に樹脂や顔料などの組成や特性などに制限されることが少なく、ポリウレタン、アクリル、メラミン、アルキド、油性系など幅広い種類の塗料に適用することが可能である。屋外ばくろ試験との相関性を評価した時の例を図19,20に示した。但し、促進性の点で不足する場合があります。高耐候性塗料の評価ではかなりの試験時間を要するような場合もある。また、赤外線域の放射強度が相対的に大きいため、試験片の温度管理によっては色相劣化に影響が出ることがあるので注意を要する。

表7 デーライトフィルターを通したキセノンアークランプに要求される分光放射照度分布

波長, λ nm	最小値 a,b %	CIE No.85:1989, 表 4 c,d %	最大値 a,b %
λ ≤ 290			0.15
290 < λ ≤ 320	2.6	5.4	7.9
320 < λ ≤ 360	28.2	38.2	38.6
360 < λ ≤ 400	55.8	56.4	67.5

注 a) この表の最小値及び最大値は、異なる製造ロット及び各種経時変化したデーライトフィルターを通した、製造者の推奨する水冷及び空冷のキセノンアークランプでの測定数113の分光放射照度を元としている。最小値と最大値は、全ての測定値の平均値から少なくとも3σ以内である。

b) 最小値及び最大値の欄は、測定値の最少と最大を記載しているため、必ずしも100%にならない。個々の分光放射照度の値は、この表の波長域で計算すると百分率の合計は100%になる。個々のデーライトフィルターを通したキセノンランプは、各々の波長域における百分率は指定の最小値と最大値の間にはいること。許容範囲と異なる分光放射照度のキセノンアーク装置での試験結果は、異なることが予想される。用いたキセノンアークランプ及びフィルターの分光放射照度のデータについてはキセノンアーク装置の製造者に相談すること。

c) CIE No.85:1989の表4の水平面全天放射照度の値を附属書Bに示す。これらの値は、デーライトフィルターを通したキセノンアークランプの目標値である。

d) CIE No.85:1989の表4の(附属書B参照)に代表される太陽光について、290nmから800nmまでの総放射照度との百分率で示すと、紫外放射照度(290nm-400nm)は11%で、可視放射照度(400nm-800nm)は89%である。キセノンアーク装置内で実際に試験片を暴露する紫外放射及び可視放射の百分率は、暴露する試験片の数量及びそれらの反射特性で異なるかもしれない。

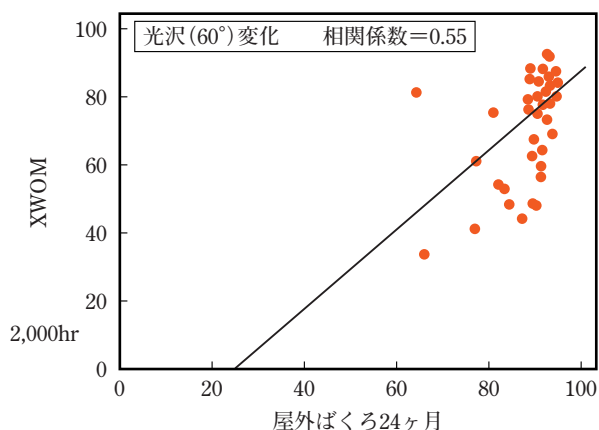


図19 屋外ばくろとXWOMの試験結果(60°光沢)の相関性

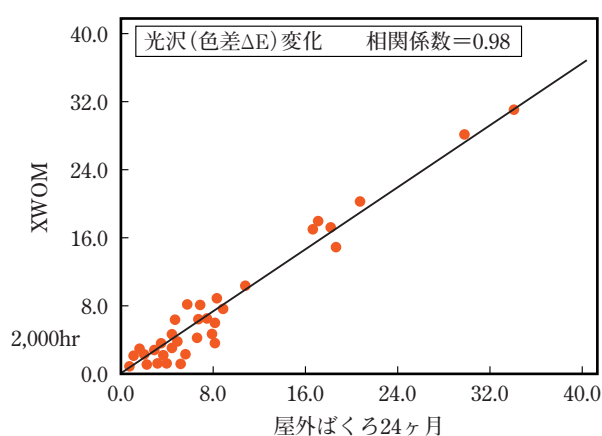


図20 屋外ばくろとXWOMの試験結果(色差)の相関性

5.2 キセノンランプとフィルター

XWOMではキセノンランプの出力(W)とフィルター、試験片距離の組み合わせでさまざまな照度を得ることができ、これが公的規格で試験条件を細かく定めにくい背景のひとつになっているようでもある。参考までにその組み合わせ事例を表8.に示した。¹⁷⁾

5.3 試験条件

XWOMの一般的な試験(運転)条件を表9にまとめた。

XWOMの場合、ランプの種類や定格、フィルターの種類や組み合わせで様々な試験条件が設定できることになるが、ここでは塗膜の耐候性評価で使われる代表的な試験条件を示した。

JIS^{14),15)}やISO¹⁸⁾などでは水冷式ランプの冷却水の水質や噴霧用の水の水質などを細かく規定しているが、試験を行なう上で最も重要なランプの定格、種類や照度、分光分布、フィルターの種類、ブラックパネルの種類などについては、細かな規定が示されていない。これはXWOMが比較的新しい試験法であり、試験機メーカーのスペックが必ずしも統一されたものではないこと、ユーザー側でも各社ごとと業界ごとに試験条件が統一されていないことなどが反映されており、今後の課題となっている。

表8 ランプ出力と照射距離およびフィルターの組み合わせによる放射照度の例¹⁷⁾

(放射照度単位;W/m²)

フィルター		250	300	400	700
インナー	アウター	300nm	400nm	700nm	3000nm
石英	硼珪酸ガラス #275	0.6	60	374	565
		1.6	180	1090	1629
石英	硼珪酸ガラス #295	0.3	59	381	588
		0.7	165	1083	1670
石英	硼珪酸ガラス #320	0	48	360	590
			162	1214	1721
石英	赤外カット フィルター	0.1	44	317	93
		0.4	126	915	269
石英	石英	19	78	391	599
		51	220	1133	1738
太陽光 [都内南面45° 5月]		50 (280~400nm)		423	488
CIE全天空		74.6 (280~400nm)		486	530 ^注

注:700~2450nm

【参考】

キセノンランプの出力 7500W
ランプ中心からの距離 290mm
アウターフィルターはスガ試験機の硼珪酸ガラスの設定番号「275」は275nm以下をカット、「295」は295nm以下をカット、「320」は320nm以下をカット
石英ガラス:ほぼ純度100%の石英
硼珪酸ガラス:主な組成として、Si80%、B12%、Al12%、その他6%で構成されている。

一般的にはランプ出力とフィルターで調整してそれぞれのユーザーズペックに合わせて、60W/m²と180W/m²の照度で運転している。具体的には照度計にランプ出力を連動させ、ランプ出力を自動調整して照度管理している。

表9 XWOM(水冷式)の標準的な試験(運転)条件

項目		試験(運転)条件 ^{注1)}
放電電圧		50±2V
放電電流		60±2A
フィルター	インナー	石英ガラス
	アウター	硼珪酸ガラス(#295,#275) 注2)
ブラックパネル温度		63±3°C
水の噴射条件	圧力	0.08~0.13MPa
	水量	660±60ml/分
	噴射時間	12分/60分照射
	水質	pH6.0~8.0、導電率5μs/cm以下
水温		16±5°C
相対湿度		50±5%
試料回転ラック	直径	960±6mm
	回転数	1rpm
試料面放射照度		60±3W/m ² (300~400nm) 180±3W/m ² (300~400nm) 連続照射

注1) JIS D 0205やJIS K 5600では上記と異なった数値となっている項目もある。
水冷用水の水質についてはJIS B 7754に準拠している。

注2) スガ試験機の設定番号、#295は295nm以下をカット、#275は275nm以下をカット

5.4 温度管理

キセノンランプは太陽光放射分光分布に近似しているが、赤外線域での大量の放射があり試験板や試験槽の温度コントロールに注意する必要がある。キセノンランプを直接水で冷却する水冷式ではインナーとアウターの2重のフィルター間に純水を通してランプの冷却とともに赤外線を吸収する効果もあり、この方式が多く採用されている。その他赤外線フィルターを組み合わせる方式などがあり、規格によってはこれらの設定を前提にしたものもある。

試験槽の冷却には大型の冷却装置による冷却のほかブローア、ダンパーによる均一な空気流の制御などを行なえるよう設計がされている。

ランプ出力で制御する強エネルギー条件では、熱の放射がさらに高まるため、試験槽の温度管理はより厳しいものとなる。温度管理のノウハウや方式は現在のところ、メーカー間での統一が進んでおらず、このことによる強エネルギー条件での試験槽内の温度管理にバラツキが生じやすい原因にもなっている。一昨年行なわれた日塗工での試験機メーカーごとの耐候性試験結果の比較では強エネルギー条件で試験機メーカーによって光沢保持性に大きな差が生じた結果の報告¹⁹もあり、注意が必要である。

試験板の表面温度は従来からブラックパネル温度計（BPT）が一般に使用され、JISなどの規格にも規定されてきた。このBPTは図21に示すような構造をしており、黒色塗装したステンレス製パネルに温度センサーが取り付けられている。このセンサーによって表面温度が63℃になるようコントロールされるシステムとなっている。

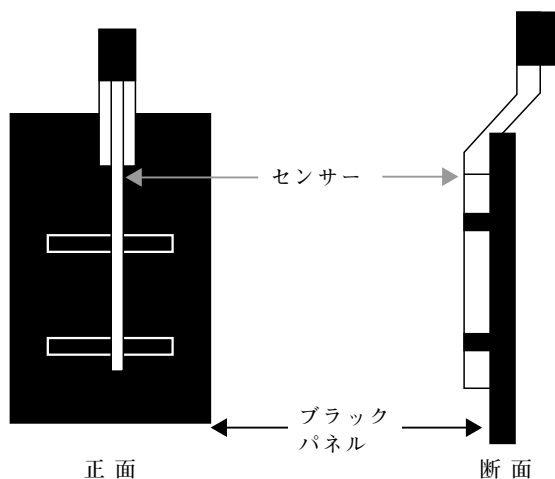


図21 ブラックパネル温度計の基本構造図

このBPTのほかにブラックスタンダード温度計（BST）があり、ヨーロッパを中心に採用されてきた経緯がある。BSTは黒色塗装したステンレス製パネルの裏にポリふっ化ビニリデンの樹脂板を貼りつけてあり、この樹脂板に温度センサーが埋め込まれた構造になっている。（図22参照）

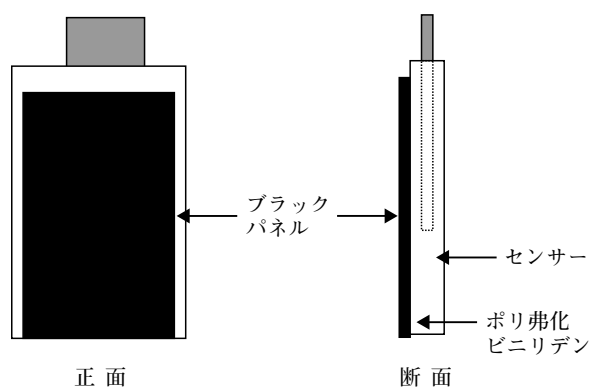


図22 ブラックスタンダード温度計の基本構造図

BPTとBSTではBSTで表示される温度はBPTよりも幾分高い値を表示する傾向があり、どちらの測定方式で試験されたデータであるかを明確しておく必要がある。

その他、試験槽の湿度は放射光の当たっていない部分での相対湿度を規定しているが、放射強度180W/m²（強エネルギー型）、BPT63℃の条件では槽内温度は約30℃程度であり、この温度での相対湿度で管理することになる。

5.5 関連規格

XWOM関係の規格には表10のようなものがある。これまでは主にヨーロッパを中心に広まってきた背景があり、ISOやDIN規格などで比較的良好に整備されている。

日本国内でも近年JISのISO化が急速に進められていることなどから、この10年近くの間改訂や新設などでXWOM関係の規格制定が進んでいる。

しかしながら、先に触れたようにXWOMのハード面での多様性から、試験機メーカーのスペックの不統一、ユーザーごと業界ごとのスペックの不統一などがあり、規格としては試験法としてのごく基本的な部分に限定されている傾向が強く、実用性に多少欠けるところがあるものが多い。

5.6 集中管理システム

一般に促進試験においては試験塗膜に付加する各劣化因子の強度を極端に高めているため、試験条件や試験槽の環境条件の変動がそのまま試験結果の変動に結びついてしまう。このため、SWOMやXWOMのような促進耐候性試験では紫外線照射量、試験温湿度や水の噴霧状態などの稼動状況について機種間や時間で些少のバラツキも許されないことになる。

促進耐候性試験を実施する場合、常に厳密な試験条件の維持と管理が求められ、それらを技術的に保証してゆく必要がある。

関西ペイントではこれら促進耐候性試験の維持管理において、全社的に同じレベルで、リアルタイムな試験条件の維持と管理を行なうため、インターネット技術を活用した集中

表10 XWOMの関連規格

規格No.	名称または内容
JIS関係	
JIS K 5600-1999	塗料一般試験方法
JIS B 7754-1991	キセノンアークランプ式耐光性及び耐候性試験機
JIS D 0205-1987	自動車部品の耐候性試験方法
JIS H 8685-1-1999	アルミニウム及びアルミニウム合金の着色陽極酸化皮膜の光堅ろう度促進試験方法
JIS K 6266-1996	加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの耐候性試験方法
JIS K 7102-1981	着色プラスチック材料のカーボンアーク燈光に対する色堅ろう度試験方法
JIS K 7350-1-1995	プラスチック実験室光源による暴露試験方法
JASO関係	
M 346-1993	自動車用内装部品のキセノンアークランプによる促進耐光性試験方法
M 351-1998	自動車部品—外装部品のキセノンアークランプによる促進耐候性試験方法
ISO関係	
ISO 4892-1-1994	Plastics-Methods of exposure to laboratory light sources- Part1:General guidance
ISO 4892-2-1994	Plastics-Methods of exposure to laboratory light sources- Part2:Xenon arc sources
11341-1994	Paints and varnishes-Artificial weathering and exposure to artificial radiation-Exposure to filtered xenon arc radiation
11431-1993	Building construction-Sealants-Determination of adhesion/cohesion properties after exposure to artificial light through glass
105/B-1992	Textiles-Tests for colour fastness-Part B02(1994):Xenon arc fading lamp test
4665-1998	Rubber,vulcanized and thermoplastic-Resistance to weathering
ISO 2135-1984	Anodizing of aluminium and its alloys-Accelerated test of light fastness of coloured anodic oxide coatings using artificial light
ISO 3917-1992	Road Vehicles-Safety glazing materials
ASTM関係	
G 26-1996	Standard Practice for Operating Light-Exposure Apparatus(Xenon Arc Type) with and without Water for Exposure of Nonmetallic Materials
G 155-1998	Standard Practice for Operating Xenon Arc Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials
ANSI関係	
ANSI/SAE Z26.1-1996	American National Standard for Safety Glazing Materials for Glazing Motor Vehicles and Motor Vehicle Equipment Operating on Land Highways-Safety Standard
SAE関係	
J1885-1992	Accelerated Exposure of Automotive Interior Trim Component Using a Controlled Irradiance Water Cooled Xenon Arc Apparatus
J1960-1989	Accelerated Exposure of Automotive Exterior Materials Using a Controlled Irradiance Water Cooled Xenon Arc Apparatus
AATCCL関係	
Test Method 16-1990	Colourfastness to Light
Test Method 169-1990	Weather Resistance to Textiles:Xenon Lamp Exposure
DIN関係	
54071-1985	Testing of colourfastness of textiles, determination of colourfastness of dyeings and prints to weathering:Xenon Arc
75202-1998	Determination of colourfastness of interior materials in motor vehicles:xenon arc lamp test

管理システムを開発し、全社で実施している促進耐候性試験の稼動状態の管理を行なっている。²⁰⁾

このシステムによってSWOMの放射照度のバラツキ（機器間、時間）を抑えることや、XWOMのランプ交換時期を的確に把握すること、異常稼動時の即時停止などを全社レベル

で一括して管理している。また、これら試験機器の運転状況は連続したデータとして記録、保存している。

図23～25に本システムの概略図とサーバー構成、データフローなどを示した。

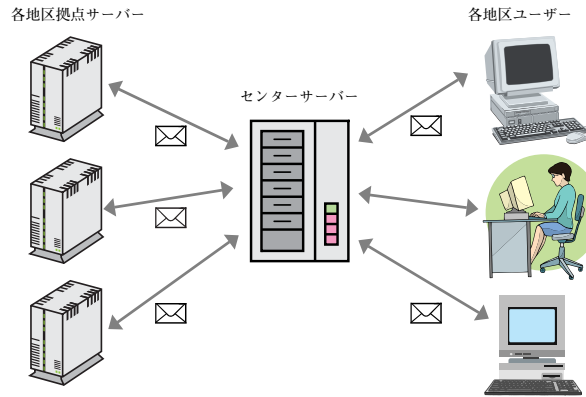


図23 集中管理システムの概念図

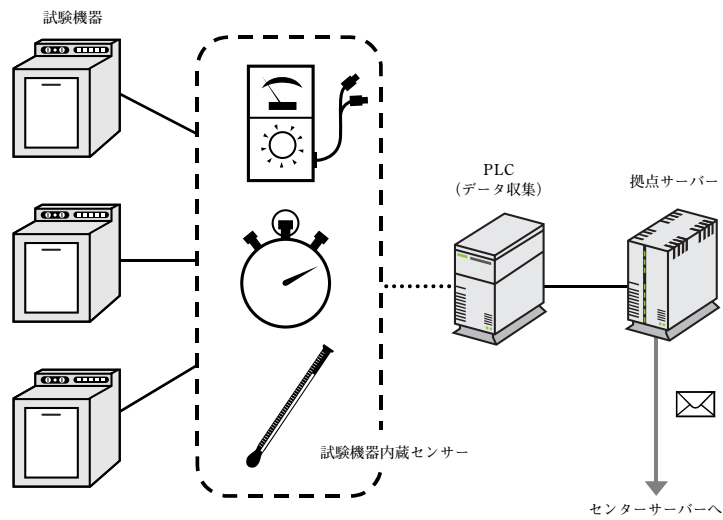


図24 集中管理システムのサーバー構成

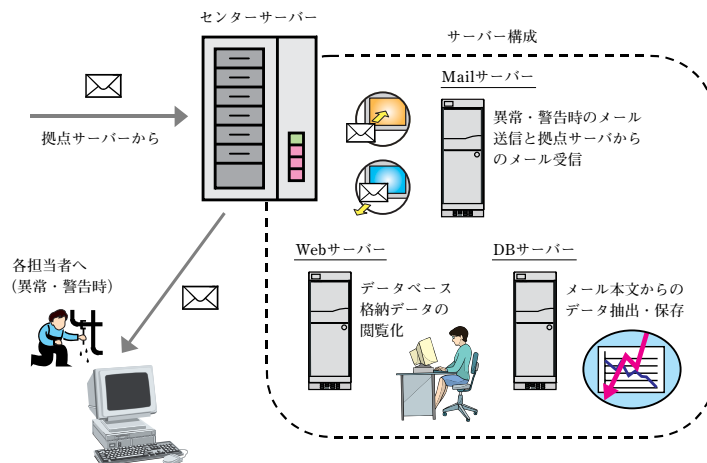


図25 集中管理システムのデータフロー

総説・解説

6. おわりに

本報では従来から多く使用され現在も中心的な促進耐候性試験とその機器について解説したが、次号ではその高い促進性が注目されているメタルハライドランプ式耐候性試験機など最近広く普及し始めてきている促進耐候性試験とその機器を中心に解説する予定である。

また、過酸化水素負荷型の試験法やリモート酸素プラズマを利用した試験法など塗膜の劣化モードに着目し、それを効果的に再現して「高い促進性」、「優れた再現性」、「高い相関性」を実現しようとする試みについても触れてゆきたい。

7. 参考文献

- 1) 竹島鋭機、川野敏範、高村久雄：色材、55[12]、715 (1982)
- 2) 竹島鋭機、川野敏範、高村久雄：色材、55[12]、872 (1982)
- 3) 竹島鋭機、川野敏範、高村久雄：色材、56 [1]、9 (1983)
- 4) 土居依男：塗料の研究、No.121、8 (1992)
- 5) 江崎泰雄：色材、78[10]、473 (2005)
- 6) スガ試験機株式会社「サンシャインウェザーメーター」カタログ (2003)
- 7) ATLAS社「Weathering Testing Guidebook」(2001)
- 8) JIS B 7753 サンシャインカーボンアーク灯式耐光性及び耐候性試験機 (1993)
- 9) 武田一宏、小林正雄、沖永毅：塗料の研究、No.123、20 (1994)
- 10) JIS D 0205 自動車部品の耐候性試験方法 (1987)
- 11) JIS B 7751 紫外線カーボンアーク燈式耐光試験機 (1974)
- 12) JIS B 7752 紫外線カーボンアーク燈式耐候性試験機 (1980)
- 13) スガ試験機株式会社「紫外線カーボンアーク式耐光試験機」カタログ (2003)
- 14) JIS K 5600 塗料一般試験方法 (1999)
- 15) JIS B 7754 キセノンアークランプ式耐光性及び耐候性試験機 (1991)
- 16) CIE Technical Report “Solar Spectral Irradiance” Pub No.85 (1989)
- 17) スガ試験機株式会社「キセノンウェザーメーター」カタログ (2003)
- 18) ISO 11341 Paints and varnishes-Artificial weathering and exposure to artificial radiation-Exposure to filtered xenon arc radiation (2004)
- 19) 日本塗料工業会 技術委員会 耐候性部会：各種耐候試験機の調査研究、4月 (2002)
- 20) 信藤健一、高柳弘道、鈴野純：塗料の研究、No.141、44、(2003)
- 21) 吉田洋一、沖永毅：塗料の研究、No.135、56、(2000)