

# 促進耐候性試験 (その2)

Introduction to Accelerated Weathering Test Methods (No.2)



分析センター  
第2部  
飯田真司  
Shinji  
Iida



分析センター  
第2部  
高柳弘道  
Hiromichi  
Takayangi

## 1. はじめに

前報において、塗膜の耐候性試験とその機器を中心に解説した。それらの試験法は長い歴史を持ち、機器の操作・管理の技法が確立され、豊富にデータの蓄積があり促進耐候性試験法として一定の評価ができるものである。

しかしながら、1960年代以降の石油合成化学の発展に伴い、樹脂合成や高分子化学の研究が進むに連れて、より耐候性・耐久性の優れた素材が開発されるようになったことや技術開発競争の激化などから、従来の試験法よりもさらに促進性の高い試験法が求められるようになった。これらの要求に対して試験環境の電子制御等の開発のみならず、光源体についてもさまざまな種類の放電式ランプが開発され、紫外線の照射波長や強度をうまく制御できるようになり、コスト面での制約も小さくなることで、目的とする波長範囲と強度を持った高促進性の耐候性試験法と機器が開発され、幅広い分野で使用されるようになった。

本号ではこのような促進性が極めて高く、有効な波長範囲の紫外線に限定した優れた効率性を特徴とした促進耐候性試験法である「メタルハライドランプ式耐候性試験」および「紫外線蛍光ランプ式耐候性試験」について解説する。その他、「水銀灯式耐光性試験」および自然光を利用した促進耐候性試験としての「太陽追跡式集光ばくろ試験 (EMMAQUA)」についても紹介する。

これらの試験法は促進性、効率性において際立った特徴を有しているが、その特徴をうまく生かすためには、使用に当たってこれらの機器の特性や留意点を十分に理解し、試験の目的にあった形で使用することが重要である。本号がこれら試験法の効果的な利用に少しでも参考になれば幸いである。

## 2. メタルハライドランプ式耐候性試験機 (メタハラ)

「メタルハライドランプ式耐候性試験機」との名称を使用した。この種の促進耐候性試験機はユーザー、メーカーそれぞれでさまざまな名称が使用されており、一般に認証さ

れているものはない。この種の促進耐候性試験機が1980年代の後半に日本で独自に開発されたことから、他の試験機に比べて耐候性試験機としての歴史が比較的浅いことや国際的な認知度が未だ十分ではないことなどが影響しているようである。ここでは日本試験機工業会の自主規格として制定されているJTM-G01:2000「メタルハライドランプ方式試験機」<sup>1)</sup>の名称を参考にして首記の名称で表すこととした。なお、(社)日本塗料工業会の報告書「各種耐候試験機の調査研究」(技術委員会 耐候性部会)<sup>2)</sup>では「メタハラ」と略して表現されていることもあり、本報でも以後は「メタハラ」で表すこととする。その他の呼び名としては開発当初使われていた「スーパーUV (SUV)」などがある。

メタハラの光源はキセノンランプなどと同じ高圧放電灯 (HIDランプ; High Intensity Discharge Lamp) で、水銀と各種金属のハロゲン化物を含む蒸気中でアーク放電させる水銀ランプの一種である。発光原理は励起されたそれぞれの原子が基底状態に戻る時に発光する強力な紫外線を利用したものである。ここで使用される金属としては、水銀、ナトリウム、タリウム、インジウム、スカンジウム、錫などがある。これらの組成は各種金属のヨウ化物の単体あるいは混合物であり、各メーカーのノウハウによってさまざまである。そのため発光スペクトルも異なった波長分布を有している。

メタハラは、プラスチック加工メーカーのある技術者が従来の促進耐候性試験機が抱えているさまざまな問題点に注目し、ユーザーの視点から促進性と効率性の高い試験装置の開発を進められたことから生まれたもので、その意味では従来の耐候性試験装置に比べて際立った特徴を持っている<sup>3-10)</sup>。それらを整理してみると、

1. 促進性が桁違いに高い。
  2. 照射光が材料の劣化に有効な紫外線と可視光線成分に集約されている。
  3. 太陽光には含まれていない295nm以下の波長の紫外線 (UV-Cおよび一部のUV-B) をフィルターによってほぼカットしている。
  4. 熱線成分である赤外線はほとんど含まれていないので、過剰な熱による影響が小さい。
- など、塗膜や材料の注目している劣化現象を高い促進性

表1 メタルハライドランプ式耐候性試験装置の仕様

項目	ダイプラ・ウインタス	岩崎電気	スガ試験機	スガ試験機	スガ試験機
装置の名称	ダイプラ メタル・ウェザー	アイスーパー UVテスター	水平回転式メタリング ウェザーメーター	試料固定式メタリング ウェザーメーター	垂直回転式メタリング パーチカルウェザーメーター
型式名	KU-R5A	SUV-W151	M6R	M6T	MV3000
光源ランプ	メタルハライドランプ (水冷式)	メタルハライドランプ (水冷式)	メタルハライドランプ (水冷・空冷併用式)	メタルハライドランプ (水冷・空冷併用式)	メタルハライドランプ (空冷式)
光源の定格(KW)	6.0	4.0	6.0	6.0	3.0
試料面放射照度 (W/m <sup>2</sup> :300~400nm)	650	1000	530~640	650~2000	600~1000 (300~600)
光源と試料間の 距離(mm)	240	240	φ508	350	φ340 (φ400)
フィルター	燐酸系ガラス	軟質珪酸系ガラス	珪酸系ガラス	珪酸系ガラス	珪酸系ガラス
試料設置方式	固定式(20°)	固定式(20°)	水平回転式	固定式(20°)	垂直回転式
照度制御方式	電子安定器	電子安定器	放電電力自動制御	放電電力自動制御	放電電力自動制御
照度測定方式	ハンデタイプUV照度計	自動紫外線制御	光学フィルター・ シリコン光電池	光学フィルター・ シリコン光電池	光学フィルター・ シリコン光電池
温度制御方式	密閉循環方式	可変ブローア +ダンパー	ヒーター+空調弁 (外気導入)	ヒーター+空調弁 (外気導入)	ヒーター+空調弁 (外気導入)
温度測定方式	BPT (ブラックパネル温度計)	BPT (ブラックパネル温度計)	BPT (ブラックパネル温度計)	BPT (ブラックパネル温度計)	BPT (ブラックパネル温度計)
湿度制御方式	PID	蒸気加湿方式	蒸気加湿方式	蒸気加湿方式	蒸気加湿方式
湿度測定方式	高分子薄膜・ 静電容量方式	静電容量方式	乾湿球方式	乾湿球方式	乾湿球方式
照度計の型式	紫外線照度計 UIT-101	紫外線照度計 UVP-365	紫外線照度計 RAM34	紫外線照度計 RAM34	紫外線照度計 RAM34

注：本表には降雨条件が伴わないいわゆる「ウェザーメーター」方式の試験機をまとめたが、これらのほかに紫外線照射のみのいわゆる「フェードメーター」方式の試験機もラインアップされている。9~11

で再現させようとするものである。

但し、開発されてから20年ほど経過しているものの、他の試験法に比べるとその利用の歴史が浅いこともあってメーカーごとに仕様が異なっており、同じ種類の試験法、試験装置として扱えない部分が多い。表1に各メーカーの試験装置の仕様をまとめたが、照射方式、光源の出力、試料面での放射照度などメーカー差や型式の差などが大きいことが分かる。

メーカーではこのような現状から先の業界自主規格<sup>1)</sup>を制定しているが、具体的な規程などはあまりなく、各社の製品総覧的な内容に留まっている。

写真1~3はそれぞれの外観である。また、図1<sup>1)</sup>および図2<sup>8,9)</sup>に標準的なメタハラとその光源部の構造図を示した。

上述の特徴でも最初に列記しているが、メタハラはその他の耐候性試験機に比べて格段に優れた促進性を持っている。紫外線照度の比較<sup>8)</sup>について表2に示したが、太陽光に

対して約50倍、SWOMに比べて30倍程度の大きな紫外線照度を有している。また、屋外ばくろ1年に相当する照射エネルギー量の比較<sup>2)</sup>について表3にまとめているが、極めて強力なエネルギーの試験法であることが判る。

図3、4はポリウレタン塗膜(青色エナメル)での試験例<sup>2)</sup>であるが、メタハラの促進性は極



写真1 メタルハライドランプ式  
耐候性試験機 (D社製)



写真2 メタルハライドランプ式  
耐候性試験機 (I社製)



写真3 メタルハライドランプ式  
耐候性試験機 (S社製縦型)

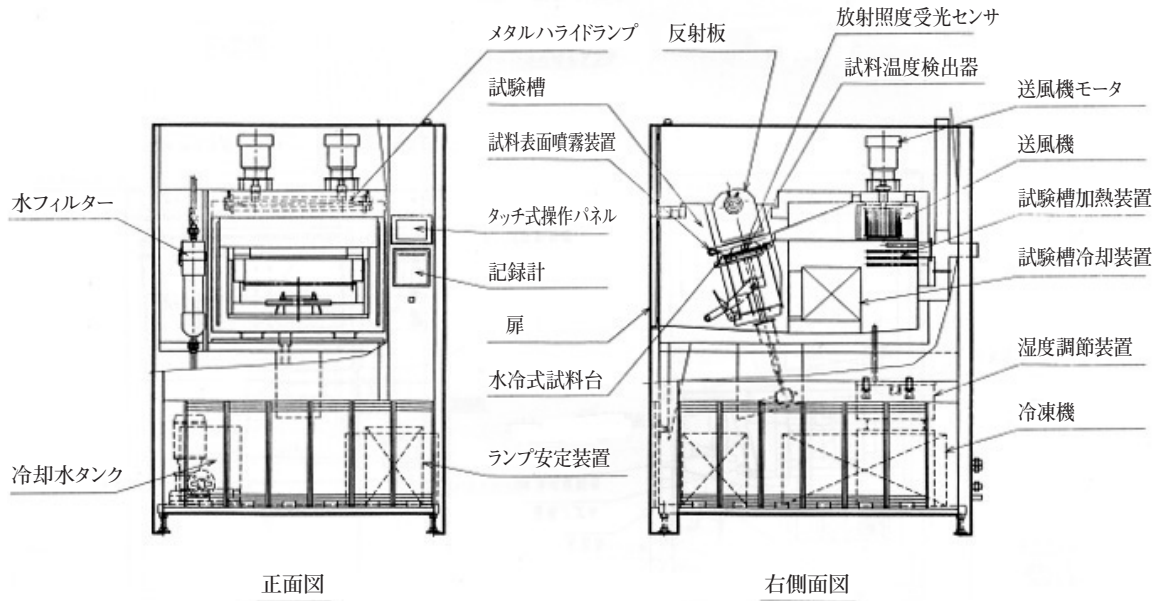


図1 メタルハライドランプ式耐候性試験機の構造図<sup>1</sup>

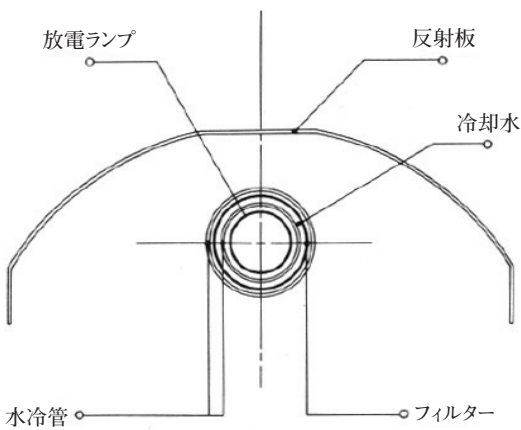


図2 メタルハライドランプの構造図<sup>8,9</sup>

表3 各種耐候性試験における紫外線照射エネルギーの比較<sup>2</sup>

	時間	倍率
メタハラ [850W/m <sup>2</sup> ]	97.5	1
SWOM [78.5W/m <sup>2</sup> ]	1055.9	12
XWOM [60W/m <sup>2</sup> ]	1381.5	16
XWOM [180W/m <sup>2</sup> ]	460.5	5
UVランプ [30W/m <sup>2</sup> ]	2763	32
屋外ばくろ (国内)*	8760	100

\*:鹿児島、東京、北海道の試算平均値

表2 各種耐候性試験機光源の紫外線照度の比較<sup>8</sup>

	300~400nm	310~320nm	330~340nm	360~370nm	380~390nm
メタルハライドランプ	100	100	100	100	100
紫外線カーボンアーク	12~16	0.9~1.3	2.6~3.0	1.1~1.5	48~52
サンシャインカーボンアーク	2.3~2.7	1.6~2.0	2.2~2.6	1.1~1.5	4.6~5.0
紫外線蛍光ランプ	0.6~1.0	2.6~3.0	1.8~2.0	0.1~0.3	0.05~0.15
太陽光	1.7~2.1	0.9~1.3	4.7~5.1	1.3~1.7	1.0~1.4

めて高い。但し、これらの試験結果は塗膜の種類(樹脂種、顔料種やこれらの比率)、硬化条件、評価項目などによって変動する。従って、特に注意すべきはそれぞれの耐候性試験の有している劣化因子やその強度とこれに対応する試験サンプルの組成や構造などによって劣化モードが変化してゆくことから、結果として劣化の速度や形態がそれぞれで異なってくることである。

### 2.1 分光分布

メタハラとその他耐候性試験機の分光分布の比較を図5<sup>2)</sup>に示した。メタハラの場合、他の試験機の分光分布に比して全般にわたって大きな照射強度を持ち、紫外線部に大きく集中した分布を持っていることが分かる。メタハラは塗膜やプラスチックなどの劣化の超促進性効果を狙って開発されたものであり、地表面には届かない295nm以下の紫外

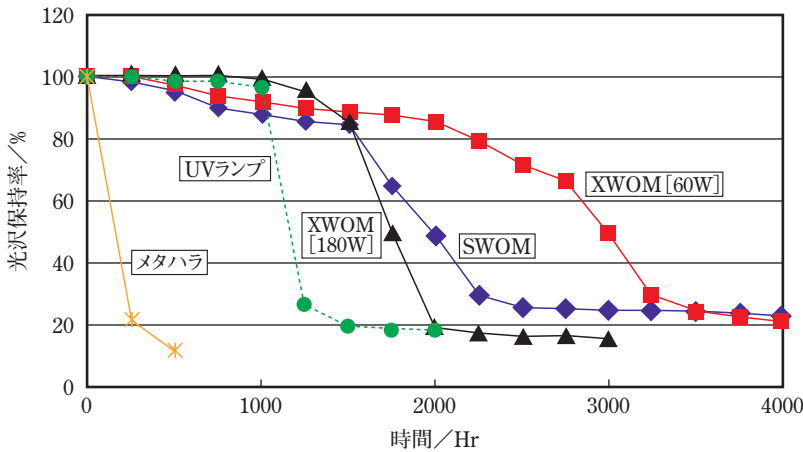


図3 各種促進耐候性試験の促進性比較 (光沢保持率)<sup>2</sup>  
 供試塗膜;ポリウレタン樹脂塗膜 (青)

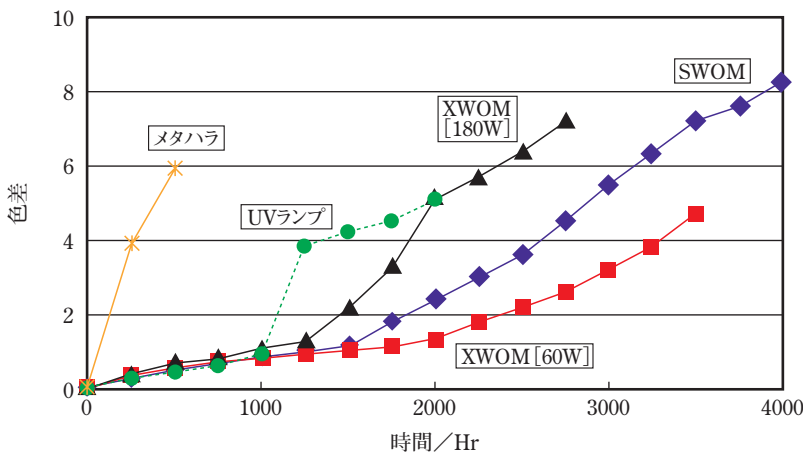


図4 各種促進耐候性試験の促進性比較 (色差)<sup>2</sup>  
 供試塗膜;ポリウレタン樹脂塗膜 (青)

線や過剰な熱エネルギーとなる赤外線部の放射が小さく、塗膜の耐候性劣化に不必要なエネルギー負荷がないところに最も特長がある。先の日本試験機工業会の規格<sup>1)</sup>では、メタルハライドランプとしては250nmから波長が立ち上がることを規定しており、実際の試験ではフィルターで波長分布の調整を行なうようにしている。

メーカー3社の光源スペクトルをまとめて比較してみると図6<sup>2)</sup>のようであり、それぞれにかなり異なった分光分布となっている。紫外線による樹脂構造の破断を集中的に進めることで塗膜劣化を最も効果的に促進させることを目的とした試験では、その光源の波長分布は試験結果に大きな影響をおよぼすはずであり、これらを同一の試験法、試験機として扱うことは避けるのが賢明であろう。

メタハラでは一部のメーカーを除いて、ランプに対して試料を固定して照射するのが標準となっており、紫外線照射の均斉度が問題となる。このため、図2に示したように光源に反射板が取り付けられて、各部位に対して満遍無く照射されるよう設計されている。メーカーでは試料面への紫外線強度分布をその均斉度で表示し、カタログで均斉度90%以上を保証しているが、試料設置面の周辺部は中心部に対して数%程度紫外線強度が低下している(図7<sup>8)</sup>)。

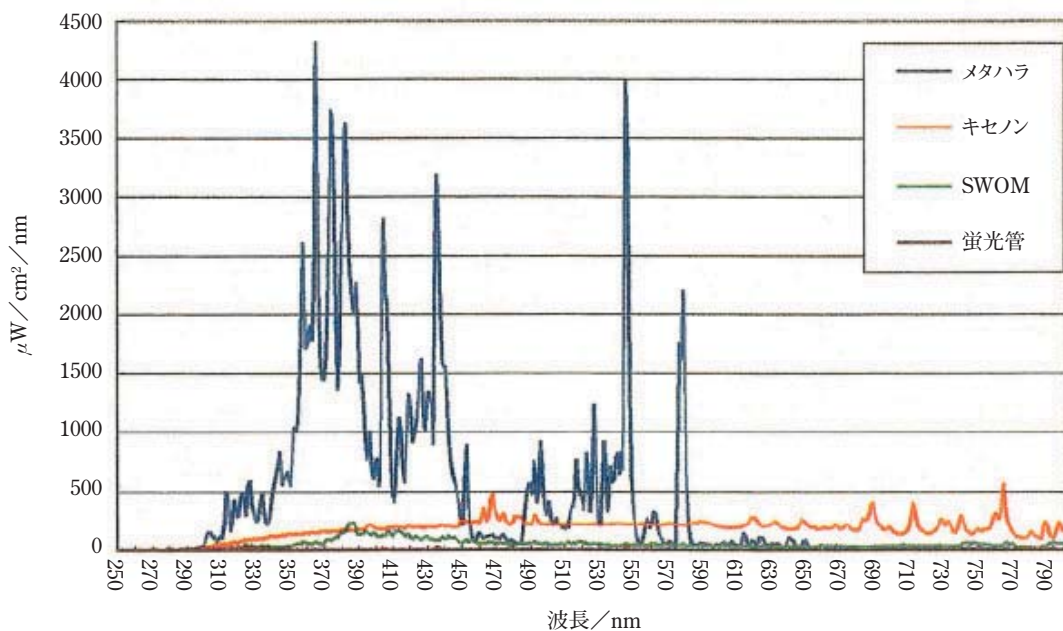


図5 各種促進耐候性試験機の光源スペクトル<sup>2</sup>

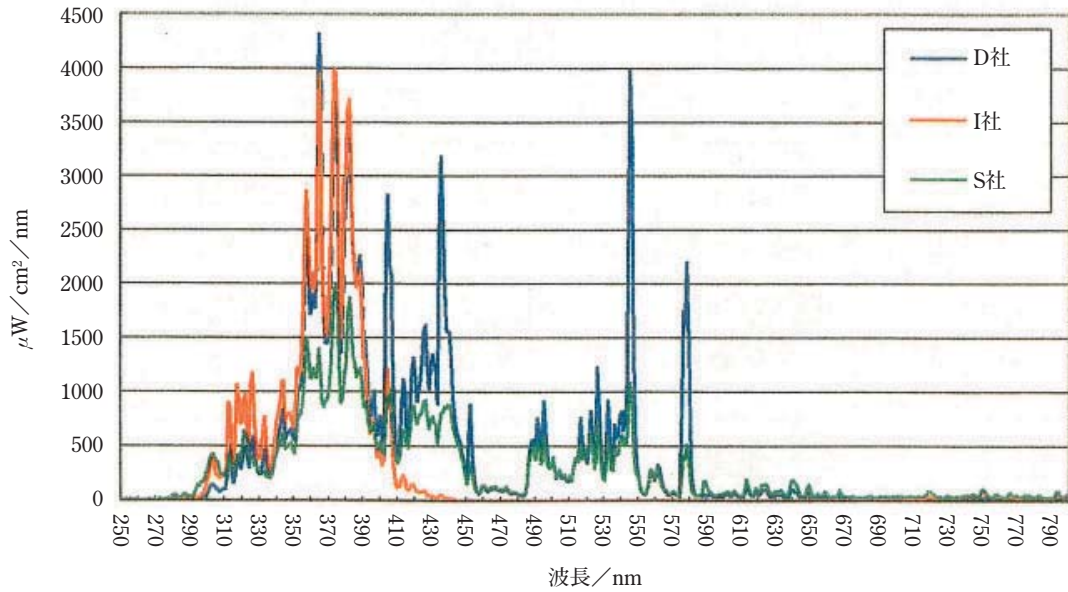


図6 メーカー3社メタルハライドランプの光源スペクトルの比較<sup>2</sup>

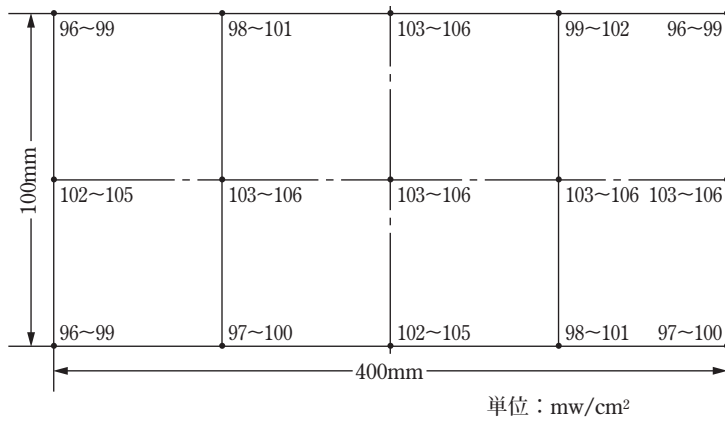


図7 試料面への紫外線強度分布の例<sup>8</sup>

元々紫外線照度の高い試験法であるため、小さな差でも絶対的なエネルギーとすると必ずしも無視できなくなる。試験サイクルごとの試験板のローテーションなどを計画的に行なって、これらの影響をできるだけ小さくすることも必要である。

### 2.2 フィルター

メタハラでは実際の太陽光にはほとんど含まれていない295nm以下の紫外線をカットしているが、このためにはフィルターの選定と設計にそれぞれのメーカーで工夫がされている。表4に日本試験機工業会の規格<sup>1)</sup>で定めているフィルターの分光透過率を示した。

表4 フィルターの主な分光透過率<sup>1)</sup>

フィルタの種類	分光透過率(%)					
	275nm	300nm	320nm	400nm	700nm	1000nm
石英ガラス	90以上	90以上	90以上	90以上	90以上	90以上
紫外線透過フィルター(A)	0	15以上	60以上	50以上	40以上	60以下
紫外線・可視光線透過フィルター(B)	0	35以上	75以上	90以上	90以上	90以上
紫外線・可視光線透過赤外線遮断フィルター(C)	0	5以上	35以上	90以上	50以下	25以下

ランプは石英ガラス製でありこれ自体でフィルターとなるが、その外側に純水や空気による冷却層を設けて上記の規格で規定された分光透過率のフィルターを備えている。フィルターには燐酸系ガラス、硼珪酸系ガラスなどがあり、これらを組み合わせて分光分布を設定できるようにしているメーカーもある。

いずれにしても経時での特性劣化が伴うので定期的な交換が必要である。メーカーによってはランプの寿命に合わせてランプと一括で交換するようにしているところもある。

前項の分光分布はランプとこれらのフィルターの特性でほぼ決定されるが、これらの標準化が進み高促進性に特徴のある耐候性試験法として広く認められるようになることを望みたい。

### 2.3 試験条件

ランプ照射時の温度は他の促進耐候性試験にならってブラックパネル温度(BPT)63℃での設定が一般的であるが、紫外線照射時50~80℃、暗黒・結露時35~75℃の範囲で設定できる。メタハラの場合、照射強度、シャワー条件、暗黒・結露条件などについて時間、温湿度を自由に設定できるようになっており、それぞれのユーザーで試験目的によって様々な試験条件が設定されノウハウとなっている。

ちなみに紫外線照射→シャワー(短時間)→暗黒・結露→停止のサイクルが6~12時間で設定されていることが多く、これらを数~数10サイクル繰り返す試験法が一般的で比較的短時間で試験結果が得られるようになっている。

この試験法の特徴である「高促進性」から長期耐久性の予測のため数1000時間単位で試験が行なわれるような場合もしばしばある。ひとつの活用法ではあるが、メタハラはある意味では試験条件が偏った試験法でもあることから、長時間・多サイクル条件で試験を行なうような場合ではこれらの偏りの影響について未知数の部分が残っており、今ひとつ信頼性に欠けるところがある。

なお、メタハラに於いても降雨条件としてのシャワー噴霧が設定されているが、ここで一般の上水を使用した場合、カルシウム、マグネシウムなどのアルカリ土類金属系の塩やシリカ系の溶解物が塗膜表面に付着し、不溶化して析出することによる塗膜への汚染があるため、SWOMやXWOMなどと同様に高純度の純水の供給が必須となっている。

### 2.4 関連規格

公的規格と言われるものでは日本試験機工業会「JTM-

G01:2000メタルハライドランプ方式試験機」(2000)<sup>1)</sup>があるが、ランプとフィルターの基本的な規定に留まっている。

現状、メーカーや型式によって試験条件の違いが小さいことが原因しているようで、一つの試験法として細かく統一化された内容にはなっておらず、試験法や試験装置の解説書として捉えた方がよい。

自動車メーカーや建材メーカーなどを中心にして試験規格の改訂や新設などが進んでいるが、いずれも個別の社内規格に留まっている。これらはランプの照射条件のほか、シャワーや暗黒時の温湿度やサイクル条件などそれぞれのユーザーの試験法に対する考え方、求めるデータの多様性などからそれぞれに全く異なっている。

SWOMやXWOMのように光源が特定されており、その他の試験因子の負荷条件もシャワーなどに限定されている試験法では、ユーザー側での試験条件設定に技術的制約があることから試験条件が単一化されやすいが、メタハラでは試験因子、試験条件についてユーザー側で比較的自由に設定できるため、この種の試験法をひとつの固定された規格にまとめるためには、試験法・試験条件に関する研究やそれらのデータの蓄積を待つ必要がある。

(社)日本塗料工業会では、「各種耐候試験機の調査研究」(技術委員会 耐候性部会)<sup>2)</sup>でメタハラの試験条件を指定してこれを今後の標準規格とすることを提案しているが、ここでも厳密な統一はできていない。(表5参照)

### 2.5 使用にあたっての留意点

メタハラの使用にあたっての留意点を以下にまとめた。

- ① メタルハライドランプはメーカーごとにその金属組成が異なっており、これらが固有のノウハウとなっているため、異なるメーカーの試験機でのデータ比較は避けた方がよい。
- ② 照度管理によってランプに関する変動因子を少なくすることはある程度可能であるが、現状は各社ともこれらのコントロール手法について統一された基準がなく、この点でも同じ試験法として扱いにくいところがある。
- ③ メタルハライドランプの金属組成は比較的複雑であり、同じメーカーのランプでもその品質的バラツキはある程度避けられないところがある。ランプの照射強度はもとも極めて高いため、これらのバラツキが試験結果の再現性に影響を及ぼすことがある。これらに対しては、照射強度や分光分布などについて一定の管理基準を設けて、個別に管理する必要がある。

表5 (社)日本塗料工業会の指定サイクル試験条件

メーカー	試験条件	放射照度 (W/m <sup>2</sup> )	照射時間 (hr)	結露・暗黒 (hr)	噴霧 (sec/min)	フィルター	使用機種
D社		850	4	4	5/15	KF-1	KU-R5型
I社		1000	4	4	5/18	#500	MV3000型
S社		1240	4	4	5/18	ブルーフィルター	M6T型

- ④ これまでのところ、実際のはくろ試験との相関性に関してはあまり良好でないとの評価が多く<sup>2,12)</sup>、この試験法の結果だけで材料の耐候性の優劣を議論することはあまり得策ではなく、他の試験法の結果も参考にしながら進めて行くことを推奨する。
- ⑤ 本試験法は「促進性に優れている」ことを特徴としており、特定の劣化現象を早期に再現することなどに活かすようにするのがよい。

### 2.6 当面の課題と今後の可能性

2.4で述べているが、今のところメタハラの規格化はあまり進んでいない。この種の試験を行なうような場合や試験データの考察を行なう場合などでは、どのメーカーのどの型式によるメタルハライドランプ式耐候性試験かを予め規定しておく必要がある。また、異なった機種、型式での試験データを相互に比較する時は、これらに十分留意しておくことが肝要である。

これは他の促進耐候性試験に比べると未だ普及度が比較的低いことから、試験機メーカーのスペックの不統一、ユーザーごとと業界ごとのスペックの不統一など、メーカー・ユーザーの双方に定着したノウハウが十分確立されていないことなどが影響している。

一方、このようなメタハラの試験法としての自由度の大きさを活かすことも大切である。試験・評価の目的を明確にし、対象となる材料の用途や特徴をしっかりと吟味した上で、これらランプの波長の分布、放電特性や型式・形状などをよく考慮し、温度や水分の負荷条件(シャワーや結露などの時間設定ほか)をうまく設定することによって、目的とする材料の劣化を短期に効果的に再現させることが可能となる。

メタハラはこれからの試験機(法)であり、メーカー、ユーザーそれぞれでの使用法の研究や検討が進められ、一層のノウハウの蓄積と改良が重ねられることが望まれるところである。

## 3. 水銀ランプ式耐光性試験機<sup>13)</sup>

この試験は塗膜や材料の退色(やけ)の評価方法として用いられており、現在はJIS K5572「フタル酸樹脂エナメル」の中で「耐光性」の試験法として規定されている。この規格では、 $BPT57 \pm 3^{\circ}C$ とし照射時間100時間で塗膜の退色(やけ)の程度を評価し、これを「耐光性」としているが、フタル酸エナメルの屋内用途での退色(やけ)の程度を評価判定するための試験法となっている。

水銀ランプは水銀を含む不活性ガス中でアーク放電させて紫外線を含む光を発光させる。現在ではごく限定された材料や用途で使われているが、メタハラの母体となった耐候性試験でもある。ランプは図8、表6のような構造と特性で、このランプを装置の中心に設置して周りのドラム(半径300mm)に試験板を取り付けて光を照射させる。ランプとドラムのどちらかを回転させる設計で、各試験板への均一な照射

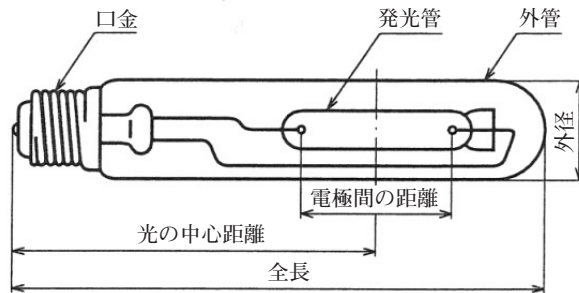
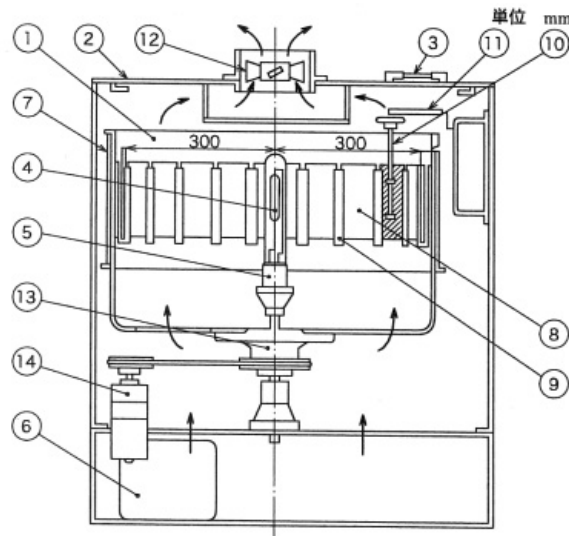


図8 JIS K5572の退色試験用水銀ランプの例<sup>13)</sup>

表6 退色試験用水銀ランプの仕様と電気特性

ランプの形状	全長(mm)	280±5
	外径(mm)	50±2
	内径(mm)	約18
	光の中心距離	130±2
	電極間の距離	70±2
電気特性	放電開始電圧	180V以下
	ランプ電圧	130±10V
	ランプ電流	3.3±0.4A
	有効寿命	1000hr以上



- ① 試験室
- ② 上ぶた
- ③ のぞき窓
- ④ 退色試験用水銀ランプ
- ⑤ ソケット
- ⑥ 水銀ランプ点灯装置
- ⑦ ドラム
- ⑧ 試験片
- ⑨ 試験片取付け枠
- ⑩ ブラックパネル温度計
- ⑪ 温度調節器感温部
- ⑫ 排風機
- ⑬ ドラム回転装置
- ⑭ モータ

図9 JIS K5572の耐光性試験 水銀ランプ照射装置の例<sup>13)</sup>

が確保されるようになっている。(図9参照)

水銀ランプの分光分布は図10のようで、UV-Aを主とした紫外線であるが、UV-B域の紫外線も含んでいる。

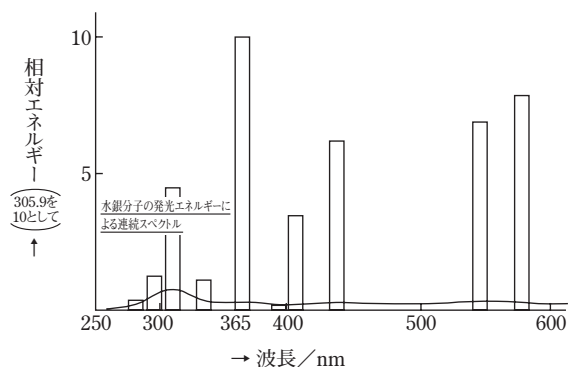


図10 JIS K5572の退色試験用水銀ランプの分光分布<sup>13</sup>

#### 4. 紫外線蛍光ランプ式耐候性試験機(蛍光管)

紫外線蛍光ランプは基本的には通常の「蛍光灯」と同じものである。このランプの蛍光体が発光する波長分布は可視光や赤外線などの長波長部をほとんど含まず、塗膜や材料の劣化を効果的に進行させるよう紫外線部を中心としたものに設計されている。現在でもいわゆる「殺菌灯」と称される紫外線ランプを使って、浸漬・結露などの水負荷条件を組み合わせたサイクルで塗膜の割れや変色などの促進試験が行われているが、米国のQ-Panel社がこのような素朴な試験法をひとつのコンパクトなサイクル試験機として開発したことを契機として、促進耐候性試験として広く認識されるようになった。表2や表3からも分かるように他の耐候性試験機に比べて光源の照射強度は大きくはないが、使用電力が少なく取り扱いやすい。また、この試験機では照射～暗黒(結露)のサイクルや温湿度などを比較的自由に組み合わせることができるので、試験対象となる塗膜や材料の組成、構造や目的とする劣化現象などをよく吟味して試験条件をうまく設定できれば、かなり効果的な促進耐候性試験として利用できる可能性がある。

この試験機の場合、定着した一般名称は特になく、それぞれのメーカーごとの装置名をそのまま使っていることが多い。(社)日本塗料工業会の報告書「各種耐候試験機の調査研究」(技術委員会耐候性部会)<sup>2)</sup>では「蛍光管」と略して表現されていることもあり、本報でも「蛍光管」と略して表記する。

表7 紫外線蛍光ランプの相対分光放射照度<sup>14,15</sup>

波長 (nm)	タイプ1 UVB (313)	タイプ2 UVA (340)	タイプ3 UVA (351)
$\lambda \leq 270$	0	0	0
$270 < \lambda \leq 280$	$0.3 \pm 0.03$	0	0
$280 < \lambda \leq 300$	$16.2 \pm 1.6$	0	0
$300 < \lambda \leq 320$	$41.6 \pm 4.2$	$7.8 \pm 0.8$	$2.1 \pm 0.2$
$320 < \lambda \leq 340$	$29.4 \pm 2.9$	$29.6 \pm 3.0$	$19.4 \pm 1.9$
$340 < \lambda \leq 360$	$9.1 \pm 0.9$	$34.4 \pm 3.4$	$43.4 \pm 4.3$
$360 < \lambda \leq 380$	$3.0 \pm 0.3$	$20.9 \pm 2.1$	$28.2 \pm 2.8$
$380 < \lambda \leq 400$	$0.4 \pm 0.04$	$7.3 \pm 0.7$	$6.3 \pm 0.7$

270~400nm間の分光放射照度を100%と定義する。 単位:(%)

紫外線蛍光ランプは現在3種類(表7<sup>14,15</sup>)、図11<sup>16,17</sup>参照)がラインアップされ、JIS K5600-7-8「促進耐候性(紫外線蛍光ランプ法)」にも規定されている。基本的に紫外線に偏った波長分布であることから、この試験法も塗膜や材料の劣化に効果的な促進性を持っていると言える。一方、塗膜や材料の劣化促進には可視光や赤外線による温度効果などの影響も大きいことから光と熱による劣化試験としては今ひとつバランスに欠けるところもある。

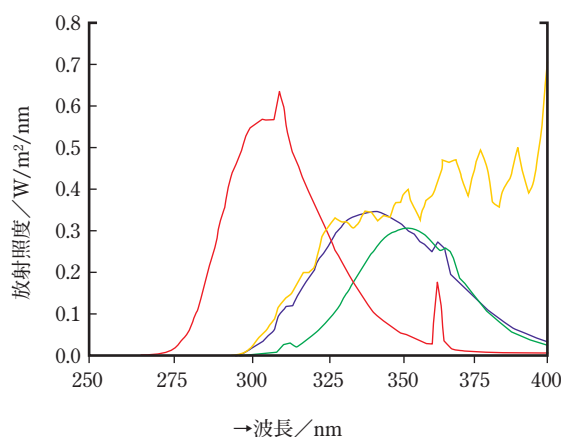


図11 紫外線蛍光ランプの波長分布<sup>16,17</sup>

- マイアミの平均太陽光全分光放射、南面26°
- UVA340nm ● UVA351nm ● UVB313nm

蛍光管では装置の構造や構成が比較的単純であることや早い時期から規格化が進んでいたことなどから、耐候性試験機としての性能は比較的安定している。現在、国内では3社の試験機メーカーから入手可能であるが、いずれのものでも差のない試験性能が得られると考えて良い。

この促進耐候性試験機の特徴を整理してみる。

1. 光源が蛍光ランプであり、発熱量が少なく試験効率が高い。(低コスト)
  2. 複数の線光源による照射であり、照射の均一性を確保しやすく安定性が高い。
  3. 蛍光ランプの性能や品質が安定しており、試験の再現性が比較的優れている。
  4. 蛍光ランプの種類を変えることで試験波長を選ぶこともできる。
  5. 暗黒(結露)の条件やサイクル、温湿度を自由に設定でき、目的に合わせて最適な試験条件を選ぶことができる。
  6. 装置がコンパクトで取り扱いも簡単である。
- 表8<sup>2)</sup>に各メーカーの試験装置の仕様をまとめた。写真4、5は装置の外観である。また、図12<sup>16,17</sup>に試験槽の標準的な構造概念図を示した。



表8 紫外線蛍光ランプ式耐候性試験装置の仕様<sup>2</sup>

項目	Q-Panel社 (USA)	Atlas社 (USA)	スガ試験機
装置の名称	QUV	UVCON	デュオパネル光コントロールウェザーメーター
装置の型式	QUV/SE	UC-1	FDP
光源ランプ	FS40 UVB313	UVB313	UVB313
光源の定格(W)	40	40	40
試料面放射照度(W/m <sup>2</sup> )	31	25~30(使用時間で異なる)	25
光源と試料間の距離(mm)	50	50	50
照度制御方式	Solar Eye Controllerによる出力自動制御	—	放電電力自動制御
照度測定方式	UV照度計	—	光学フィルター・シリコン光電池
温度制御方式	コントローラーによるヒーター、プロア自動制御	マイクロコンピューターによるヒーター自動制御	ヒーター+空調弁(外気導入)
温度測定方式	BPT(ブラックパネル温度計)	BPT(ブラックパネル温度計)	BPT(ブラックパネル温度計)
湿度制御方式	蒸気加湿方式	蒸気加湿方式	蒸気加湿方式
湿度測定方式	—	—	乾湿球方式
照度計の型式	CR-10	—	エネルギーチェッカー



写真4 紫外線蛍光ランプ式耐候性試験機 (Q社製)



写真5 紫外線蛍光ランプ式耐候性試験機 (S社製)

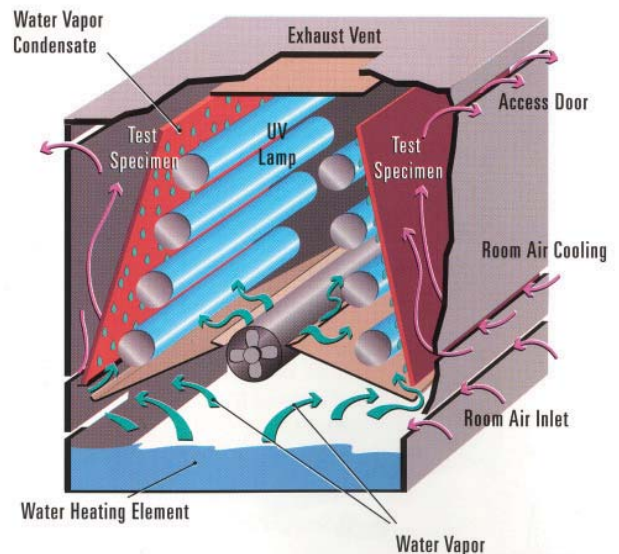


図12 紫外線蛍光ランプ式耐候性試験の試験槽の概念図<sup>16,17</sup>

蛍光管は比較的安いで低いランニングコストでかつ比較的促進性の高いことを特徴としており、塗膜や材料の耐候性の相対比較やスクリーニングなどに活用するのに適しているようである。<sup>16~19)</sup>

紫外線蛍光ランプはすでに述べたように促進試験用光源としての強度は大きくはない(図5、表2・3参照)。しかし、初期の「FS-40ランプ(UVB313)」に代表されるように短波長の紫外線部に照射強度が偏っており(図11参照)、これにより塗膜や材料の劣化が促進されるようになっている。

総説・解説

耐候性試験としての光沢保持率と色差での比較例 (UVB313ランプ条件) を図3、4<sup>2)</sup>に示しているが、その促進性は比較的大きいと言える。しかしながら、実際の地表面には照射されない295nm以下のいわゆるUV-B紫外線による塗膜の劣化が中心と考えられ、時々屋外ばくろの結果との整合性が問題となることがあるようであり、この点に注意しておく必要がある。<sup>2,12,17)</sup>

#### 4.1 分光分布

蛍光管では初期の設計時から「FS-40」ランプ (UVB313) が標準的に使用されてきている。このランプは図11から判るように313nmにピークを持ち、紫外線部に集約された特徴のある分光分布を持っている。このことが低照度条件で高エネルギーの紫外線照射が可能なこの試験機の特徴となっているのであるが、前項でも触れたように塗膜や材料の劣化モードが実際の屋外ばくろや他の促進試験法とは異なる結果になりやすい。このことから、太陽光の波長分布に近いUVA340、UVA351などの蛍光ランプが開発され、より実際の屋外条件に近い紫外線照射が行なえるようになっていく。但し、UVA340、UVA351ランプでは太陽光レベルに近似した分光分布のため、促進効果はあまり期待できない。初めの解説でも述べているが、可視光や赤外線による照射がないことから、これらに基づく塗膜や材料の劣化はほとんど起こり得ない。ISOやJISなどの規格ではそれぞれの試験目的に合わせてランプを選択するよう指示しているが、これらの促進性と相関性のバランスの悪さはこの試験法のひとつの弱点である。

塗料関係の試験ではUVB313ランプが標準的に使われており、結露・暗黒条件とのさまざまな組み合わせのサイクル設定でわれやはがれの再現試験などに実績が多い。<sup>16~23)</sup>

#### 4.2 試験条件

ランプ照射時の温度の標準的な規定は特になく、温度管理は表8にもあるようにブラックパネル温度計 (BPT) で行なうが、一般に紫外線照射時50~90℃、暗黒・結露時40~70℃の範囲で設定できる。

蛍光管では照射強度、暗黒・結露条件などについて時間、温湿度を自由に設定できるようになっており、それぞれのユーザーで試験目的によって様々な試験条件が設定されノウハウとなっている。この試験では紫外線照射→暗黒・結露のサイクルが8~12時間で設定がされていることが多く、これらを数~10数サイクル繰り返す試験法が一般的である。

なお、結露条件用の水として水道水の使用を可としているメーカーもあるが、水槽内面へのシリカの著しい沈積や付着などあり、高純度の純水を供給することが望ましい。

#### 4.3 関連規格

すでに述べたように蛍光管ではJIS K 5600-7-8 塗料一般試験方法 第7部:塗膜の長期耐久性 第8節:促進耐候性 (紫外線蛍光ランプ法)やASTM、ISOなどの規格がある。(表9参照)

このJIS規格はISO規格がそのまま翻訳されたものであるが、ここでは試験槽、ランプ、照度計、試験片、操作手順、校正の手順などが具体的に規定されている。

蛍光管は光源である紫外線蛍光ランプ自体がすでに国際的に広く規格化されていたことや、これに暗黒 (結露) 条件を伴う促進耐候性試験機として開発されたことから、装置の構造や構成が比較的単純で試験機メーカーによるスペックの差がほとんどないことから、これらの規格化も早くから進むこととなった。但し、これらも既存の試験機の標準的な取り扱いを前提にした内容に留まっており、具体的な試験条

表9 紫外線蛍光ランプ式耐候性試験の関連規格

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 第7部:塗膜の長期耐久性 第8節:促進耐候性 (紫外線蛍光ランプ法)
JIS K 7350-3-1996	プラスチック実験室光源による暴露試験方法 第3部:紫外線蛍光ランプ
JIS D 0205-1987	自動車部品の耐候性試験方法
ASTM関係	
D4587-2001	Standard Practice for Fluorescence UV-condensation Exposure on Paint and Related Coatings
D3794-2001	Standard Guide for Testing Coil Coatings
D1248-1998	Standard Specification for Polyethylene Plastics Extrusion materials for Wire and Cable
G-151	Standard Practice for Exposing Nonmetallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light
ISO関係	
ISO 11507-1998	Paints and varnishes-Exposure of coatings to artificial weathering-Exposure to fluorescence UV and water
ISO 4892-3-2000	Plastics-Method of exposure to laboratory light sources-Part3:Fluorescence UV lamps
SAE関係	
J2020	Accelerated Exposure of Automotive Exterior Materials Using a Fluorescent UV/Condensation Apparatus

件やサイクル条件の規定や試験目的に応じた試験条件、試験方法の指定などの規定とはなっていない。この試験法も自動車メーカーや建材メーカーなどを中心にして試験規格の改訂や新設などが進んでいるが、いずれも個別の社内規格に留まっている。これらは蛍光灯の種類、照射条件のほか、暗黒・結露時の温湿度やサイクル条件などそれぞれのユーザーの試験法への考え方、求めるデータの多様性などからそれぞれに異なっている。

### 5. 太陽追跡式集光ばくろ試験法(EMMAQUA)<sup>17)</sup>

太陽追跡式集光ばくろ試験法である「EMMAQUA」をSWOMやメタハラなどの促進耐候性試験と同じテーマで取り上げて扱うことには多少の戸惑いを感じることもあるが、やはりひとつの促進性効果を狙って開発されたものであり、すでにさまざまなユーザーや研究者において耐候性評価のための促進試験法として広く使用され、耐候性に関する研究報告や技術報文でもこの試験法によるデータが数多くある。<sup>20-22), 24-27)</sup>



写真6 EMMAQUA試験機

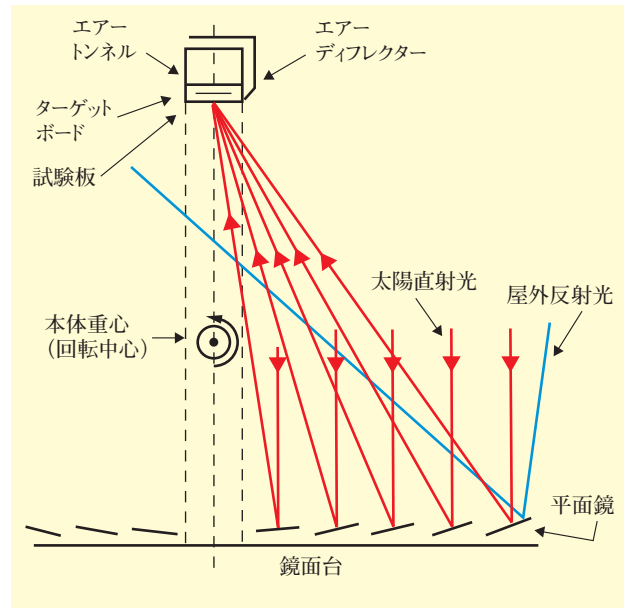


図13 EMMAQUAの模式構造図<sup>17,28)</sup>

「EMMAQUA」はEquatorial Mount with Mirrors for Acceleration, with Water(Aqua)の略で、これを直訳すると「水分負荷型反射鏡付き赤道式取付け装置」ということになる。正確に言うとAtlas社の登録商標であり試験法としての一般名称ではないが、永年にわたって自然条件での独占的な促進耐候性試験として実績を重ねられ、現在ではこの種の促進耐候性試験の一般名称として定着している。

「EMMAQUA」は1960年にAtlas社のDSET研究所で開発された。10枚の平面鏡を取り付けたフレネル式反射板システムで自然の太陽光を集光させ、試験装置の上部に試験板を取り付けてこれに強力な自然光を照射するように設計されたものである。写真6<sup>17,28)</sup>は「EMMAQUA」の試験装置の外観であり、図13<sup>17,28)</sup>、図14<sup>29)</sup>に装置の模式構造図を示した。

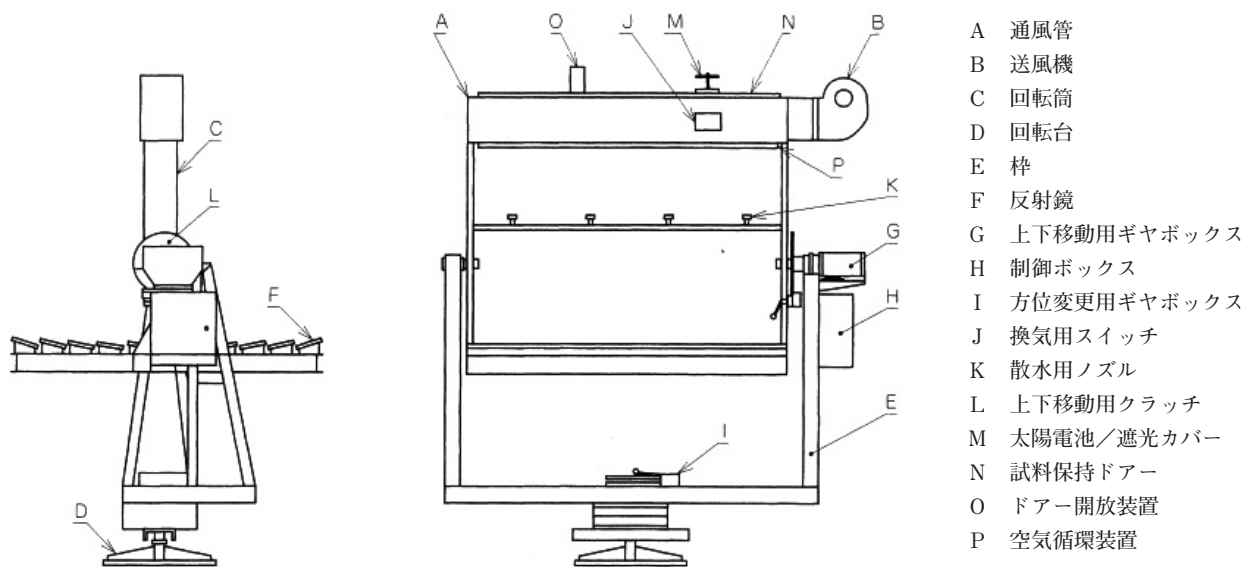


図14 JIS Z 2381;2001 屋外暴露試験方法通則にある太陽追跡集光暴露試験装置の概略図<sup>29)</sup>

当然のことながら、太陽は南天を早朝から夕方にかけてその季節に応じた高さで移動してゆくため、この試験装置はその日ごと時間ごとに正確に太陽高度に合わせて追跡できるように設計されており、この装置で理論的には全日光の8倍、紫外部の全放射に対して5倍の照射強度が得られるようになっている。

### 5.1 露光量管理

「EMMAQUA」は試験面に照射される紫外線のエネルギー量で試験期間を制御するようになっており、試験装置に設置されている照度計で照射された紫外線量を積算して、試験期間を判定している。フロリダにおける年間の紫外線量は280MJ/m<sup>2</sup> (平均)であるが、「EMMAQUA」ではこの値を標準にして140MJ/m<sup>2</sup> (半年相当)～1400MJ/m<sup>2</sup> (5年相当)までの試験期間が設定されている。

「EMMAQUA」はあくまで自然条件での促進試験であることから、天候の晴雨のほか、曇りの程度や霧の発生量などで試験面に照射される紫外線が日常的に変動するため、通常の耐候性試験のように日数や時間数を決めて試験する方式とはなっていない。

実際の試験サイトであるアリゾナのフェニックスは気象学的には比較的安定した天候の地域であること、光源となる太陽自体は年間を通じてごく安定したものであることや四季に応じて太陽の高度は決まっていることから、試験開始日が決まればある程度正確にその終了日を予測することができるようになってきている。Atlas社では過去のフェニックスの気象データや四季に応じての紫外線量をベースとした予測計算ソフトを準備しており、最近ではホームページ<sup>30)</sup>でこの予測計算ソフトを利用できるようにしている。(図15参照) この予測計算ソフトはかなり精度よく試験終了日を求められるようになっており、予測終了日と実際の終了日の誤差は最大でもせいぜい3日程度である。なお、表10<sup>17, 28)</sup>は各月ごとの平均紫外線量の実績値であるが、11～3月の冬季は夏季に

Notice: This is for estimating purposes only. It is based on extensive radiation measurements, but actual calculations will vary depending on weather conditions.

図15 EMMAQUAのばくろ日数予測計算画面の例<sup>30)</sup>

比べて2～3倍の試験時間を要することとなる。

太陽追跡式集光ばくろ試験の装置は日本でも開発されており、スガ試験機の製品カタログ<sup>31)</sup>にも掲載されているが、年間1,420MJ/m<sup>2</sup>の紫外線照射量を確保するためには降雨量の少ない砂漠のような乾燥性気候が必須条件となるようであり、年間を通しての平均湿度が30%前後のアリゾナのフェニックスでこの試験が実施されることに大きな意味がある。

理論的にはより低緯度で太陽光の照射の大きいところが望ましい訳であるが、高湿度条件では太陽光の散乱が大きくなって実際の試験面に照射される紫外線量を十分に確保することが難しくなるようである。一方、中近東や北アフリカのような本格的な砂漠では砂の飛散による試験体の損傷が起こりやすいなどの問題もあり、Atlas社ではアリゾナのフェニックスのような岩盤質の砂漠地帯が最も試験条件が良いと考えているようである。

表10 EMMAQUAおよび代表的ばくろ試験場の平均日射量と紫外線量<sup>17, 28)</sup>

月	EMMAQUA(フェニックス)		アリゾナ州フェニックス		フロリダ州マイアミ	
	全波長	紫外部*	全波長	紫外部*	全波長	紫外部*
1月	2,990	59	490	20	505	20
2月	3,430	76	546	20	545	23
3月	3,830	98	633	25	618	27
4月	5,180	143	755	33	612	28
5月	5,380	153	786	39	609	28
6月	5,920	184	770	37	543	26
7月	5,190	158	745	35	532	25
8月	4,960	131	756	33	543	24
9月	4,690	119	711	29	540	22
10月	5,050	130	705	26	555	22
11月	3,820	92	582	19	490	18
12月	3,580	77	525	18	496	19
合計	54,020	1,420	8,004	334	6,588	280

\*385nm以下

単位: MJ/m<sup>2</sup>

表11 EMMAQUAの標準試験条件<sup>17,28</sup>

		EMMAQUA	EMMAQUA (NTW) *	EMMA
露光条件 (MJ/m <sup>2</sup> )	全波長	54,020	54,020	54,020
	紫外部**	1,420	1,420	1,420
シャワー 条件	昼 間	8分/1時間	なし	なし
	夜 間	8分×3回 (一定間隔)	3分/15分	なし
	水 質	脱イオン水(電気抵抗:1MΩ以上、シリカ量:0.2ppm以下)		
	水 圧	40PSI	40PSI	
試験板のサイズ***		13cm (5インチ)×5 or 7.5cm		
Atlas社推奨用途		標準条件 一般プラスチック向け	自動車・建材向け	砂漠・乾燥条件

\*NTW; Night Time Wettingの略

\*\*385nm以下

\*\*\*ターゲットボードのサイズ;13cm (5インチ)×143cmの大きさまでは取り付け可能

## 5.2 試験条件

「EMMAQUA」は自然の太陽を光源とする効率的なばくろ試験方式であり、最も現実的で理想的な試験法であるとAtlas社では説明しているし、一般にもそういう風な印象を持たれていることが多い。同じ試験方式でシャワーのないものを「EMMA」と称しているが、こちらの方は水(降雨)を劣化条件として組み込んでいないため塗膜の耐候性試験法としてはあまり現実的ではない。

「EMMAQUA」にはシャワー条件のない「EMMA」も含めて表11<sup>17, 28)</sup>に示したような3種類の試験条件が用意されているが、性能評価や規格適合性評価のための耐候性試験のほとんどは「EMMAQUA」か「EMMAQUA (NTW)」のい

ずれかで行なわれている。Atlas社によると「EMMAQUA」が一般プラスチック材料用の試験で標準的な条件であり、「EMMAQUA (NTW)」が自動車用途向けの試験で夜間の結露条件を再現することを意図したものであるとのことであるが、日本ではもっぱら「EMMAQUA」での試験依頼が多いようで、「EMMAQUA (NTW)」は建材メーカーが試験条件として採用しているところが多い。その他、試験の目的に応じて太陽光の反射強度やシャワー条件の変更ほか、夜間の上水浸漬などを行な

うことも可能であるが、特殊な研究目的の耐候性試験を除いてほとんど実績はないようである。

なお、EMMAQUAのシャワー噴霧に於いてもSWOMやXWOMと同様に試験面へのアルカリ塩やシリカの付着による汚染があるため、シャワー用水には厳しい水質管理が必要であり、Atlas社では抵抗値1MΩ以上、シリカ0.2ppm以下の基準で水質を管理している。

## 5.3 関連規格

「EMMAQUA」は実質的にはAtlas社の独占的な耐候性試験であるがASTMやMILなど米国を中心に規格の整備が進

表12 EMMAQUAの関連規格

規格No.	名称または内容
JIS関係	
Z 2381-2001	屋外暴露試験方法 通則
K 7219-1998	プラスチック-直接屋外暴露, アンダーグラス屋外暴露及び太陽集光促進屋外暴露試験方法
ASTM関係	
D 4364	Standard Practice for Conducting Accelerated Outdoor Weathering of Plastic Materials Using Concentrated Natural Sunlight
G 90	Standard Practice for Performing Accelerated Outdoor Weathering of Nonmetallic Materials Using Concentrated Natural Sunlight
D 3841	Specification for Glass-fiber-reinforced Polyester Plastic Panels
D 4141	Standard Practice for Conducting Accelerated Outdoor Exposure Test of Coatings
E 1596	Standard Test Method for Solar Radiation Weathering of Photovoltaic Modules
ISO関係	
ISO 877-1994	Plastics-Method of Exposure to Direct Weathering, to Weathering Using Glass-filtered Daylight, and to Intensified Weathering by Daylight Using Fresnel Mirrors
SAE関係	
J 576	Plastics Materials for Use in Optical Parts Such as Lenses and Reflex Reflectors of Motor Vehicle Lighting Devices
J 1961	Accelerated Exposure of Automotive Exterior Materials Using a Solar Fresnel-reflective Apparatus
ANSI関係	
NSF 54	Flexible Membrane Liners
MIL関係	
T-22085D	Tapes, Pressure-sensitive Adhesive Preservation and Sealing
FORD	
ESB-M16J14A	Enamel, Thermoset 2-Component Color Coat, Exterior High-gloss

んでおり、ISO規格(ISO 877-1994)にもなっている。さらにはこのISOがそのまま翻訳されてJIS化(K 7219-1998)もされている。それらを表12にまとめた。

#### 5.4 使用にあたっての留意点

太陽光集光方式というのは原理的には凹面鏡や凸レンズで光を焦点に集めるやり方と同じである。子供の頃の遊びや理科の実験で太陽光をこの方法で集光すると紙や布などはたちどころに焦げ付き、発火することを経験しているが、「EMMAQUA」でも同じで、集光面は目的としている紫外線、可視光のほか長波長の赤外部についても照射されることになる。表11にも示しているが、照射されるエネルギーとしては長波長部の方が圧倒的に大きいと言える。

試験板はかなりの高熱を受けることになるため、「EMMAQUA」では図13、14にあるように試験板を取り付けるターゲットボードの裏側をエアートンネルとし、ファンを回してここから空冷するようになっている。これによって試験板が焦げ付くほどの高温になることを防いでいるが、通常の屋外ばくろよりも高温状態で試験を行なうことになる。より高い温度で試験を行なうことはそれだけ反応速度を大きくし、ばくろ試験の促進性を高めることになるが、「EMMAQUA」が他の促進耐候性試験に比べて熱の影響に基づく劣化の程度が比較的大きいと指摘はこれまでのいくつかの耐候性評価の研究でも見られている。<sup>25-27)</sup>

非架橋系の樹脂や熱軟化傾向の大きい材料の耐候性を評価するような場合には、この点の注意が必要である。EMMAQUAは太陽光を使用した促進試験方法ではあるものの、赤外線部の影響がかなり強くなり、実際の太陽光とはその波長分布は異なっていることをあらためて認識しておく必要がある。

## 6. おわりに

本報ではメタルハライドランプ式耐候性試験と紫外線蛍光ランプ式耐候性試験とその機器を中心に解説した。これらは高促進性に特徴のある試験法であるが、この「高い促進性」が往々にして最も進んだ試験法と解釈されることもあり、その結果を長期耐久性の評価や製品の保証条件にしている場合も一部にはある。そのためには、これらの試験データの蓄積や実際のばくろ試験データとの緻密な対比・検証が必要であり、これらの試験法のさらなる研究や検討が重ねられることが望まれる。

殊にメタルハライドランプ式耐候性試験については単に日本国内だけに留まらず、広く国際的な普及が進んでゆくことを願っている。

## 参考文献

1) 日本試験機工業会「JTM-G01:2000 メタルハライドランプ方式試験機」(2000)

2) 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)

3) 木島芳雄、吉田安雄:工業材料、33 [14]、85 (1985)

4) 木島芳雄:プラスチックエージ、33 [11]、143 (1987)

5) 中野雅司:塗装技術、37 [10]、131 (1998)

6) 木島芳雄:マテリアルライフ、11 [2]、78 (1999)

7) 木島芳雄:工業塗装、151、16 (2000)

8) アイグラフィックス株式会社・岩崎電気株式会社 技術資料SUV-F1「超促進耐候性試験機技術資料」(1988)

9) 岩崎電気株式会社「アイスーパーUVテスター」カタログ(2005)

10) ダイブライニング株式会社「メタルウェザー」カタログ

11) スガ試験機株式会社「メタリングウェザーメーター」カタログ(2004)

12) 土居依男:塗料の研究、121、8 (1992)

13) JIS K 5572 フタル酸樹脂エナメル(2005)

14) JIS K 5600-7-8 塗料一般試験方法 第7部:塗膜の長期耐久性 第8節:促進耐候性(紫外線蛍光ランプ法)(1999)

15) ISO11507 Paints and varnishes-Exposure of coatings to artificial weathering-Exposure to fluorescence UV and water (1998)

16) 株式会社東洋精機製作所「UV2000™」カタログ(2001)

17) Atlas社「Weathering Testing Guidebook」(2001)

18) 三洋貿易株式会社「QUV」カタログ

19) スガ試験機株式会社「デューパーパネル光コントロールウェザーメーター」カタログ

20) 竹島鋭機、川野敏範、高村久雄:色材、55 [10]、715 (1982)

21) 竹島鋭機、川野敏範、高村久雄:色材、55 [12]、872 (1982)

22) 竹島鋭機、川野敏範、高村久雄:色材、56 [1]、9 (1983)

23) 落合周一郎、清水久孝、中井満、三上陽一:マテリアルライフ、5 [3]、68 (1993)

24) E.Oakley: J.Paint Technology、43 [555]、43 (1971)

25) J.L.Scott: J.Coating Technology、49 [633]、27 (1977)

26) J.L.Scott: Pigment and Resin Technology、12 (1980)

27) 竹島鋭機、川野敏範、高村久雄、加藤繁道:色材、56 [7]、457 (1983)

28) 豊田通商株式会社「ATLASウェザリングサービス」カタログ

29) JIS Z 2381屋外暴露試験方法 通則(2001)

30) スガ試験機株式会社「屋外暴露装置」カタログ

31) <http://www.atlaswsg.com/azweath/mainweath.html>

32) CIE Technical Report "Solar Spectral Irradiance" Pub No.85 (1989)

33) 高分子劣化・崩壊の(樹脂別)トラブル対策と最新の改質・安定化技術、高分子物性研究会(1982)