

財団法人 日本塗料検査協会

西支部 検査部 岡 本 未 佳

1. はじめに

屋外暴露試験は、最も実用に近い状態で耐久性評価を行える試験方法であるが、日射量、降水量や湿度などの制御のできない天候要因が大きく影響を及ぼす試験方法でもある。屋外暴露試験において試験結果に影響を及ぼすといわれる様々な要因の中で、特に太陽光の与える影響は大きい。その中でも、短波長領域の紫外線はエネルギー量が大きいため、塗膜劣化に大きく影響することが知られている。

屋外暴露試験については、JISやISO等の規格によって試験方法が規定されている。屋外暴露試験方法が記されているJIS K 5600-7-6によると、試験開始時期は4月又は10月の2通りあり、どちらを選んでもよいことになっている。しかし、実際に4月開始と10月開始では、試料によっては若干異なる結果が得られる場合がある。そこで、試験結果に影響を与える要因についての検証を行うこととした。

2. 銚子暴露試験場の気候変化

日本塗料検査協会では、JISによる屋外暴露耐候性試験を、JIS K 5600-7-6 附属書1で推奨されている暴露試験場である(財)日本ウエザリングテストセンター銚子暴露試験場で実施している。図1に、銚子暴露試験場の所在を示す。

千葉県銚子市にあるこの暴露場は、関東平野の最東端に位置し、北は利根川、東と南は太平洋に面しており、年間を通して比較的風が強く、風力発電も盛んに行われている。気候は比較的温暖で、冬場は暖かく、夏場は涼しい海洋性気候であり、年間平均気温は15℃前後である。

昨今懸案事項となっている地球温暖化の影響によって、最近では気候条件が変化し、屋外暴露試験の結果が厳しいものになっているのではないかとの懸念の声も聞かれることから、過去10年間にわたる銚子暴露試験場の気象データを調査した。

過去10年間の銚子暴露試験場の気象データを図2に示す。

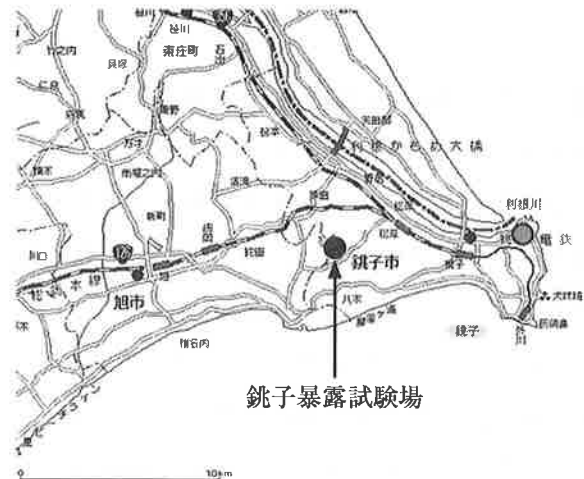


図1 (財)日本ウエザリングテストセンター 銚子暴露試験場

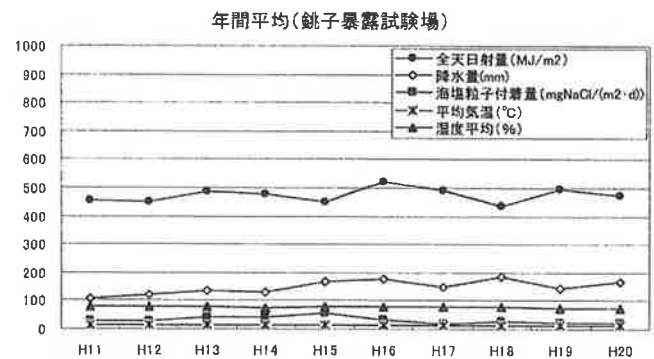


図2 平成11年～平成20年までの気候変化

平成11年～平成20年までの10年間の、銚子暴露試験場における全天日射量、紫外線量、降水量、海塩粒子付着量、気温および湿度の年間平均値を数値化したものを表1に示す。図2および表1より、銚子暴露試験場は過去10年間をみても大きな変動はないことがわかる。表1より、屋外暴露試験において、試験結果に最も影響が大きい要因の1つとされている紫外線量のみを抽出して、図3に示した。

表1 平成11年～平成20年までの気候変化

年度	年間平均（銹子暴露試験場）					
	全天日射量 (MJ/m ²) [*]	紫外線量 (MJ/m ²) [*]	降水量 (mm) [*]	海塩粒子付着量 (mgNaCl/(m ² ・d))	気温平均 (°C)	湿度平均 (%)
H11	453.17	27.91	107.0	26.1	15.3	77
H12	449.08	27.36	119.3	29.1	14.8	78
H13	487.54	25.34	133.9	39.8	14.5	78
H14	478.46	25.39	130.8	40.4	14.5	76
H15	449.14	24.76	165.0	56.3	13.7	78
H16	523.01	27.43	176.1	32.0	14.8	78
H17	492.83	26.25	147.7	19.3	13.9	77
H18	436.07	22.74	186.8	29.0	14.9	79
H19	497.37	23.88	141.4	21.2	15.2	76
H20	469.99	22.21	166.3	24.4	14.6	76

※年間月平均

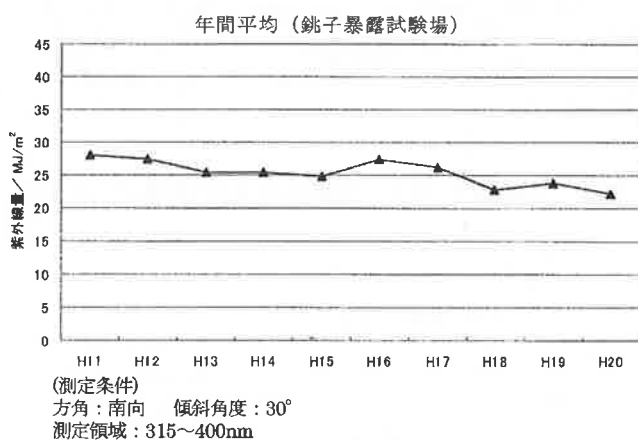


図3 銹子暴露試験場における紫外線量 (MJ/m²) 推移

図3より、この10年間で紫外線量は22～28 MJ/m²で、ほぼ横ばいに推移していることがわかる。

3. 屋外暴露試験開始時期の影響(1)

JISによる屋外暴露耐候性試験および防せい性試験は、一部を除き、原則として毎年4月または10月に試験を開始することが各製品規格に規定されている。また、試験期間も各製品規格により3か月～36か月の範囲内で規定されている。

表2に示したのは、JIS K 5663 合成樹脂エマルションペイント1種に相当する試料で作製した試験片を用いて、12か月間屋外暴露試験を実施した結果である。結果より、試料A、Bともに秋季に屋外暴露試験を開始した場合に比べて、春季に試験開始した場合のほうが塗膜欠陥（割れ）の程度が大きくなることが確認された。

なお、評価方法はJIS K 5600-8-1と、JIS K 5600-8-2またはJIS K 5600-8-4による。

表2 JIS K 5663 1種 暴露結果

試験期間	割れの等級 (方向性のない割れ)	
	試料A	試料B
H18. 4月～H19. 3月	4(S3)c	4(S3)c
H18. 10月～H19. 9月	2(S3)c	1(S3)c
H19. 4月～H20. 3月	4(S3)c	3(S4)c
H19. 10月～H20. 9月	1(S4)c	1(S4)c

備考) 使用塗料：JIS K 5663 1種 相当品

暴露期間：12か月

評価例) 2(S1)c：割れの量の等級が2、大きさの等級が1で全塗膜層を貫通している割れ

表2に示した試験結果と、暴露期間による気候条件との相関関係を明らかにするため、表3にそれぞれ暴露期間ごとの気象データをまとめた。

表3より、全天日射量、紫外線量、降水量および海塩粒子付着量の12か月間の総量は、試験開始時期によって変動はみられるが、暴露試験結果との明確な相関は認められない。

塗膜劣化の進行レベルは、塗料の構成要素によって大きく変化する。塗膜劣化に影響する要因のひとつである全天日射の中で、地表に到達する近紫外線(UV-A、UV-B)は、特に影響の大きいことが知られている。

この領域の波長の光は、約293～398kJ/mol付近のエネルギーをもつ。これは、有機物の基本であるC-C結合エネルギー(約348kJ/mol)などに匹敵する。有機物の結合エネルギーよりも大きなエネルギーをもった波長の太陽光線(紫外線)に曝されることによって、塗膜の劣

表3 試験期間(12か月)ごとの気候条件

時期 (銹子暴露場)	12か月の総量				12か月の平均	
	全天日射量 (MJ/m ²)	紫外線量 (MJ/m ²)	降水量 (mm)	海塩粒子付着量 (mgNaCl/(m ² ・d))	平均気温 (°C)	湿度平均 (%)
H18. 4月～H19. 3月	5411.27	272.58	2095.5	317.4	15.3	78.3
H18. 10月～H19. 9月	5931.74	285.60	2094.0	322.0	15.4	76.6
H19. 4月～H20. 3月	5992.67	286.83	1772.0	289.2	14.8	75.5
H19. 10月～H20. 9月	5600.10	265.60	2091.0	282.2	14.5	75.9

化が進行することになる。

図4に示したのは、屋外暴露試験を実施した平成18年4月～平成19年3月までの1年間（春季）の、銹子暴露試験場における紫外線量、降水量、海塩粒子付着量および平均気温を抽出したものである。

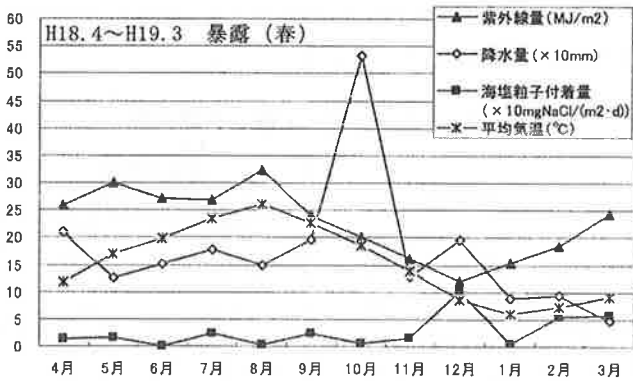


図4 平成18年4月～平成19年3月の気象データ推移

図4より、紫外線量は1年間を通して、平均気温とともに夏季に最も高い値を示すことがわかる。また、降水量は秋季に最も多く、海塩粒子付着量は冬季に多い。

塗膜劣化は、太陽光線のエネルギーによる化学的作用だけでなく、温度変化や、雨水による塗膜の膨潤・湿潤作用、光エネルギーと水分による塗膜の加水分解などの様々な因子が相互に繰返し作用し合って起こる。

図5、図6および図7には、それぞれ平成18年10月～平成19年9月分（秋季）、平成19年4月～平成20年3月分（春季）および平成19年10月～平成20年9月分（秋季）の紫外線量、降水量、海塩粒子付着量および平均気温を示した。

以上の気象データ推移より、例年1年間を通して、紫外線量は夏季に最も高い値を示し、冬季に最も低い値を示している。夏季は紫外線量・気温ともに高いことから、太陽光線のエネルギーによる塗膜の分解劣化が最も促進される時期と考えられる。そして、その後の降水・海塩粒子の付着により、相乗効果でさらに塗膜劣化は促進される。

更に春季開始暴露と秋季開始暴露とでは、紫外線量が最大となるタイミングが異なることがわかる。即ち、春季に屋外暴露試験を開始する場合、紫外線量のピークを迎えるまでの期間が4か月程度であるが、この紫外線での劣化と同時に、同期間の比較的多い降水量等の相乗効果により、初期段階での塗膜ダメージが与えられることとなる。また、秋季に開始される場合、紫外線量のピークを迎えるまで約10か月程度あり、初期段階での紫外線量は春季開始に比べて比較的少なく、降水量も少ない。これらのことから、塗膜形成後に「耐光性」と「耐水性」の影響を同時に受けるまでの期間の違いが、屋外暴露試験結果に影響を及ぼしている可能性が示唆される。

クを迎えるまで約10か月程度あり、初期段階での紫外線量は春季開始に比べて比較的少なく、降水量も少ない。これらのことから、塗膜形成後に「耐光性」と「耐水性」の影響を同時に受けるまでの期間の違いが、屋外暴露試験結果に影響を及ぼしている可能性が示唆される。

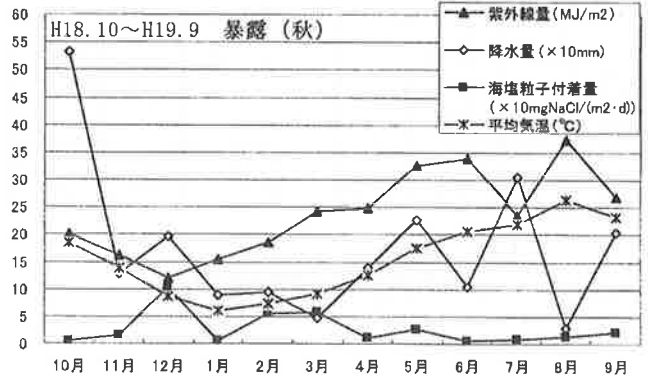


図5 平成18年10月～平成19年9月の気象データ推移

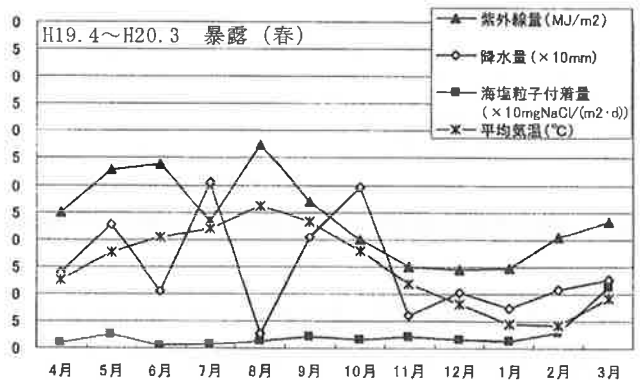


図6 平成19年4月～平成20年3月の気象データ推移

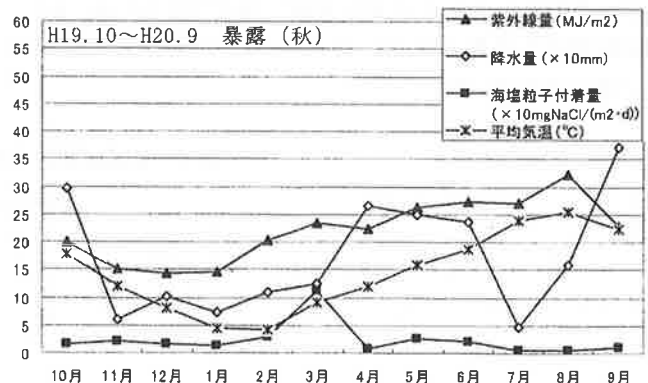


図7 平成19年10月～平成20年9月の気象データ推移

4. 屋外暴露試験開始時期の影響(2)

JIS K 5621 一般用さび止めペイント 2種に相当する試料で作製した試験片を用いて、6か月間屋外暴露試験を実施した結果を表4に示す。1シーズンではあるが、秋季に屋外暴露試験を開始した場合に比べて、春季に試験開始した場合のほうが塗膜欠陥（さび）の程度が大きくなることが確認された。

なお、JIS K 5621は2008年1月の改正によって試験方法が変更となったため、H19.4月～9月およびH19.10月～H20.3月までのものとした。

表4 JIS K 5621 2種 暴露結果

試験期間	さびの等級	
	試料C	試料D
H19.4月～H19.9月	Ri1(S4)	Ri1(S4)
H19.10月～H20.3月	異常を認めない	異常を認めない

備考) 使用塗料：JIS K 5621 2種 相当品
暴露期間：6か月

評価例) Ri2(S3)：さびの面積の等級が2で大きさの等級が3のさび

表4に示した試験結果と、暴露期間による気象データとの相関関係を明らかにするため、表5に6か月の暴露期間ごとの気象データをまとめた。

表5より、全天日射量、紫外線量、降水量および海塩粒子付着量等の全要因においてかなりの差が認められる。平均気温は当然であるが、春季の6か月と秋季の6か月とでは、春季と比較して秋季では紫外線量が約2/3となり、降水量も減少している。海塩粒子付着量は春季の約2.4倍となるが、対象期間である6か月の内の1か月（3月）を除くと、春季・秋季ともさほど変わりはない。またこの1か月は、暴露試験終了直前であり、海塩粒子付着量が防せい性に与える影響は小さかったものと

思われる。

春季開始のほうが秋季開始と比べて、海塩粒子付着量を除く全ての気候条件の影響を大きく受けていることを示している。これらのことから、試験期間が6か月のような短期間となる場合では、試験開始時期は極めて大きな影響を与えていることがわかる。

5. おわりに

JISによる屋外暴露耐候性（防せい性）試験は、一部を除き原則として毎年4月または10月に試験を開始することが各規格で規定されているが、屋外暴露試験を開始する時期によって試験結果に影響を及ぼす可能性が今回改めて示唆された。このことは、試験期間が3か月や6か月といった短期間である場合において、暴露開始時期によっては試験結果が大きく左右される可能性があることを示している。これを受けて、3か月、6か月のような短期間の試験を行う場合には、暴露開始時期を「4月」に統一するような提案の必要性が示唆された。いずれにせよ、実際に塗装される市場では、1年間を通して期間に関係なく塗装されることから、塗料設計者は、最も条件が厳しいと思われる時期に屋外暴露試験を行い、品質確認を行っておく必要があるであろう。

参考文献

- 1) 気象年報、財団法人 日本ウエザリングテストセンター 銚子暴露試験場、平成10年～平成20年
- 2) 瓜谷詔夫 他：防食塗料と塗装、大日本塗料株式会社、第9章、pp250-254
- 3) 第41回 塗料講座、社団法人 色材協会、pp96-98

表5 試験期間（6か月）ごとの気候条件

時期 (銚子暴露場)	6か月間の総量				6か月間の平均	
	全天日射量 (MJ/m ²)	紫外線量 (MJ/m ²)	降水量 (mm)	海塩粒子付着量 (mgNaCl/(m ² ・d))	平均気温 (°C)	湿度平均 (%)
H19.4月～H19.9月	3274.21	179.09	1008.0	84.1	20.4	82.0
H19.10月～H20.3月	2718.46	107.74	764.0	205.1	9.3	69.0

財団法人 日本塗料検査協会

東支部 検査部 清水 亮 作

1. はじめに

近年、地球温暖化現象やヒートアイランド現象が大きな社会問題となっており、都市の緑化・断熱性に優れた建築・冷暖房効率の向上等、種々の対策が講じられていますが、これらは既に構築されている都市や建築物に対して簡便に実施することは困難です。そこで、既設の建築物等については、塗るだけで蓄熱を抑制することが期待できる「高反射率塗料」が注目され、近年、普及しつつあります。最近では、国や地方自治体が普及に向けた助成を始めるなど、益々注目されるようになってきました。しかし、普及当初は、高反射率塗料の性能を客観的に評価するための試験方法等が確立されていなかったために、塗料メーカーや販売各社が独自の方法でアピールしているのが現状でした。

そこで、社団法人日本塗料工業会を中心に高反射率塗料の性能指標の1つである「日射反射率」を求める試験方法を確立し、日本工業規格（JIS）として制定しました（JIS K 5602⁽¹⁾「塗膜の日射反射率の求め方」平成20年9月）。このJIS規格が制定されたことにより、遮熱塗料の1つである「高反射率塗料」については統一した試験方法で試験を行うことが可能となりました。これで、高反射率塗料の評価手法については、ユーザーに与えていた混乱を一往解消できたと思われませんが、今度は、日射反射率の優劣（高い/低い測定値）についての競争が始まっているように感じています。このような性能の競争は好ましいことであり歓迎したいところですが、同時に測定結果の信頼性（精度や限界等）についても十分に定量化した上で行われなければ、根拠の無い数字だけが一人歩きしたりして、再びユーザーに混乱を与える事態になりかねません。

ところで、試験や測定の結果には必ず不確かさが付随します。不確かさとは、「計測における不確かさの表現ガイド（Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM）」によると、「合理的に測定量に結びつけられ得る値のばらつきを特徴づけるパラメータ」と定義されています。分かり難い表現ですが、従来の「誤差」に代わる概念として近年普及してきました。「誤差」

は、「誤差＝測定値－真値」で表される分かり易い考え方でしたが、肝心の「真値」を知ることができない以上、我々のように実際の測定値を扱う者にとっては机上の空論になってしまいます。そこで、現実的な手法として「不確かさ」の概念が普及してきました。

不確かさは、JIS K 5602「塗膜の日射反射率の求め方」によって求められる値（日射反射率）についても付随してきます。日射反射率の測定結果に高い精度を求めようとすると、当然ながら試験手法にはそれ以上の精度が求められます。JIS K 5602に規定する日射反射率の測定手法は、どの程度正しい測定を行うことが可能なのでしょうか？ JIS K 5602の解説を見ると、測定の不確かさに関する記述があり、これによると合成標準不確かさが1.21%であると記載されています。しかし、その値は、日々の試験で経験している値より少し大きいようにも感じています。

そこで、今回は、JIS K 5602「塗膜の日射反射率の求め方」における不確かさをJISの記載より更に詳細に評価してみました。

2. 「塗膜の日射反射率の求め方」における不確かさ

2.1 測定量

JIS K 5602「塗膜の日射反射率の求め方」において不確かさの対象となる量は、分光光度計により測定される塗膜の分光反射率と標準とする太陽日射が考えられます。ただし、標準とする太陽日射（太陽日射の真値）を定義することは困難であることと、非常に複雑な自然環境を不確かさとして考慮することは適切でないと考え、今回は、「不確かさは含まれていない定数」として扱うことにしました。

2.2 測定方法

2.2.1 試験片の作成

JIS K 5602に従い、塗料を塗る下地の板（試験板）には、JIS K 5600-4-1に規定する隠ぺい率試験紙（写真1）を用い、その黒地部分の分光反射率を測定します。これは、塗膜によっては光（太陽光中に含まれる波長範

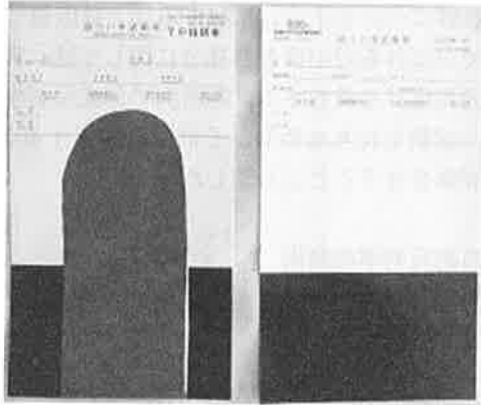


写真1 隠ぺい率試験紙の例(右)と、試験紙に塗料を塗布した例(左)

間 300～2500nm の光)を透過する場合があります、その場合、下地の反射率によって測定される塗膜の分光反射率に影響を与えるため、安定した下地を決める必要があります。ただし、JIS K 5600-4-1 に示す隠ぺい率試験紙は、可視光領域(波長範囲 380～780nm)の特性についてのみ規定しています。ここでは、太陽光(波長範囲 300～2500nm)を対象としているため、JIS K 5600-4-1 で定める可視領域の波長範囲だけでは要求性能を満たしているとは限りません。そこで、隠ぺい率試験紙を製造している各社の試験紙を複数用意して試験板を作成し、この試験板を測定して求められた日射反射率のばらつきを試験板(隠ぺい率試験紙)の不確かさとして評価に加えることにしました。

なお、塗料の塗り方及び乾燥方法は、塗料メーカーの指定する方法によるものとしています。当然ながら、「高反射率塗料」は、各社様々な設計思想により開発されており、その性能を発揮する上で塗装系が極めて重要な役割を担っているためです。

2.2.2 標準太陽日射の定義

日射反射率を塗膜の分光反射率から求めるには、標準となる太陽日射を定義する必要があります。JIS K 5602 では、ISO 9845-1 “Solar energy -- Reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions -- Part 1: Direct normal and hemispherical solar irradiance for air mass 1.5” から引用しています。ちなみに、この ISO 9845-1 は太陽日射を用いている他の JIS 規格(JIS R 3106「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」、JIS A 5759「建築窓ガラス用フィルム」、JIS C 8910「一次基準太陽電池セル」等)でも参照されています(図1)。なお、日射反射率の評価は全天日射(直達

日射+間接日射)が望ましいとする報告があり⁽²⁾、JIS K 5602 では、ISO 9845-1 に記載された全天日射のデータを標準太陽日射として定義されています(JIS R 3106 は、直達日射のみ考慮)。

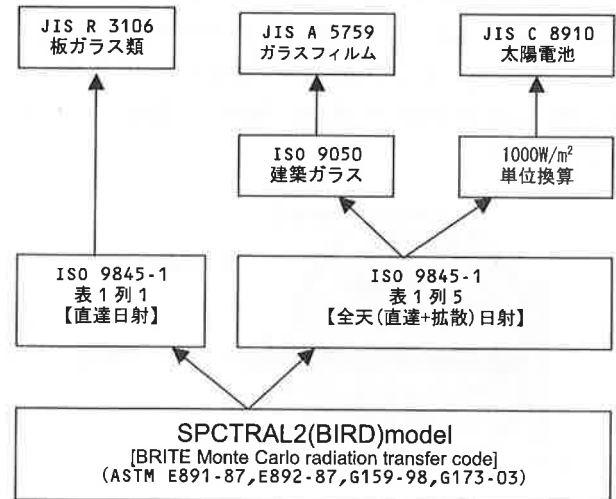


図1 JIS 規格の太陽光スペクトルが決まる過程

2.2.3 分光反射率の測定

(1) 標準白色板

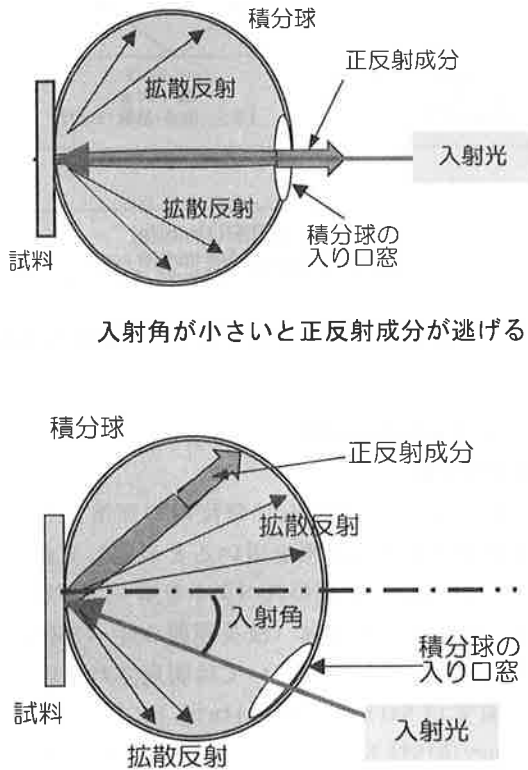
JIS K 5602 では、100%拡散反射の標準として発泡ふっ素樹脂系標準白色板を用いると規定しており、ここでは、labsphere 社製のスペクトラロン(写真2)を用いました。拡散反射体(波長範囲 300～2500nm)の国家標準は、まだ日本においては制定されていませんが、米国では National Institute of Standards and Technology(NIST) にトレーサブルの物が入手可能です。labsphere 社より校正証明書付きのスペクトラロンを購入すると、校正証明書と共に CD-ROM が添付されており、250～2500nm まで 1nm 間隔で絶対反射率に対する校正値が記録されています。この校正値は、標準板の「かたより」成分として補正します。また、校正証明書には校正の標準不確かさが記載されているため、この値を校正値の不確かさ(Bタイプ)として用いました。



写真2 スペクトラロンの外観

(2) 試料の正反射（鏡面反射）成分と測定の幾何学条件

分光光度計では、試料表面で反射した拡散反射光を積分球で捕捉し、積分球内に設置した検出器でその強度を検出します。ここで、試料が持つ正反射（鏡面反射）成分も日射反射の成分として検出したいため、試料に対し入射角を付けて測定光を照射する必要があります（図2・下）。なぜなら、正反射成分は入射角を付けていないと積分球の入射光用窓から光源に向かって逃げてしまうためです（図2・上）。



入射角が小さいと正反射成分が逃げる

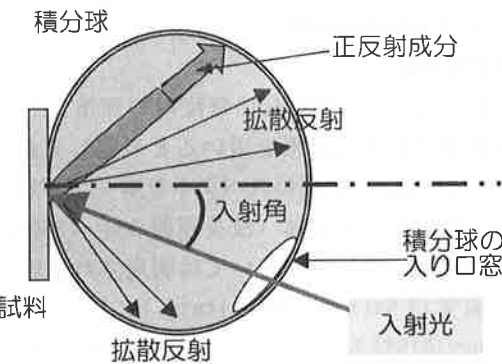


図2 入射角が小さいと正反射成分が逃げる

ここで、測定の幾何学条件による複雑な問題が発生します。すなわち、入射角を付ける事で、物理則（フレネルの法則）に従う「入射角と反射率の関係」が発生します。また、塗膜の正反射成分は、鏡のような完全な鏡面反射ではなく、一般に拡散反射成分と混ざった状態（鏡面反射と拡散反射の境界が明確でない）であるため、この両反射成分を明確に分離することが困難です。したがって、積分球の直径や入射光用の穴の大きさ等も反射成分の捕捉（あるいは、積分球より逃げる割合）に影響を与えるものと考えられます。

一方、分光光度計の積分球の構造や測定の幾何学条件は、測定器のメーカーや機種によって固定されている場合が多く、通常、測定者が自由に変更することができません。したがって、これらの幾何学条件等が測定結果に

与える影響について十分に検討することは困難です。

そこで、これらの不確かさ成分に関しては、異なる銘柄の分光光度計を所有する試験所間で分光反射率の安定した同一試料を持ちまわし、それぞれ測定することでAタイプ評価を行うことにしました。

2.2.4 日射反射率の算出

塗膜の日射反射率は、JIS K 5602 に従い以下の式で算出します。

$$\text{日射反射率(\%)} = \frac{\text{塗膜からの日射反射量}}{\text{太陽光の全日射量}} \times 100$$

$$R(\%) = \frac{\sum_{\lambda} [E_{\lambda} \Delta_{\lambda} \cdot \rho_{\lambda} \cdot STD_{\lambda}]}{\sum_{\lambda} E_{\lambda} \Delta_{\lambda}} \times 100$$

ただし、

- R : 求める塗膜の日射反射率 (%)
- $E_{\lambda} \Delta_{\lambda}$: 波長 (λ) における、標準太陽光スペクトルの重係数 (W / m^2)
- ρ_{λ} : 波長 (λ) における、試料の分光反射率の測定値 (%)
- STD_{λ} : 波長 (λ) における、標準白色板の絶対反射率 (校正值) (%)
- $\sum_{\lambda} E_{\lambda} \Delta_{\lambda}$: 標準太陽光スペクトルを波長 (λ) で積分した累積積算照度 = $1000 (W / m^2)$

3. 不確かさの要因

検討すべき不確かさの要因を表1にまとめました。また、測定のモデル式と不確かさの算出式を次式に示します。

$$R = \frac{\sum_{\lambda} [E_{\lambda} \Delta_{\lambda} \cdot \rho_{\lambda} \cdot STD_{\lambda}]}{1000} + \epsilon_{\text{Meas}} + \epsilon_D + \epsilon_m + \epsilon_B$$

$$u^2(R) = \frac{\sum_{\lambda} [E_{\lambda}^2 \Delta_{\lambda}^2 \cdot \rho_{\lambda}^2 \cdot u^2(STD_{\lambda})]}{1000^2}$$

$$+ u^2(\epsilon_{\text{Meas}}) + u^2(\epsilon_D) + u^2(\epsilon_m) + u^2(\epsilon_B)$$

$$= \frac{u^2(STD_{300-2200\text{nm}}) \cdot \sum_{\lambda=300}^{2200} [E_{\lambda}^2 \Delta_{\lambda}^2 \cdot \rho_{\lambda}^2]}{1000^2}$$

$$+ \frac{u^2(STD_{2200-2500\text{nm}}) \cdot \sum_{\lambda=2200}^{2500} [E_{\lambda}^2 \Delta_{\lambda}^2 \cdot \rho_{\lambda}^2]}{1000^2}$$

$$+ u^2(\epsilon_{\text{Meas}}) + u^2(\epsilon_D) + u^2(\epsilon_m) + u^2(\epsilon_B)$$

表1 不確かさの要因

記号		不確かさの要因と求め方	
$u_c(R)$	$u(\varepsilon_{\text{Meas}})$	分光光度計の光学的な幾何学構造の違いによる不確かさ。測定器のメーカーや機種で決まるので、分光光度計の銘柄が異なる試験機関で共同実験を行う。	
	$u(\varepsilon_D)$	分光反射率測定の測定日違いの不確かさ。実験によって求める。	
	$u(\varepsilon_m)$	分光反射率測定の繰り返しの不確かさ。実験によって求める。	
	$u(STD)$	$u(STD_{300-2200\text{nm}})$	標準白色板の校正の不確かさ。校正証明書に付記されている値(300～2200nm)をBタイプとして用いる。
		$u(STD_{2200-2500\text{nm}})$	標準白色板の校正の不確かさ。校正証明書に付記されている値(2200～2500nm)をBタイプとして用いる。
$u(\varepsilon_B)$	下地(隠ぺい率試験紙)の不確かさ。実験によって求める。		
$E_\lambda \Delta_\lambda$ 及び $\sum_\lambda E_\lambda \Delta_\lambda$		標準太陽光スペクトルが持つ不確かさ。この値は、ISO 9845-1から参照するものとし、不確かさは無視する。	

4. 実験の計画及び不確かさの算出法

4.1 $u(\varepsilon_{\text{Meas}})$ (分光光度計の光学的な幾何学構造)

分光光度計の光学的な幾何学構造の違いによる不確かさで、これらは分光光度計を購入した時点で決まってしまう。測定器のメーカーや機種によって決まるので、通常、ユーザーが自由に可変することはできません。そこで、分光光度計の銘柄が異なる試験機関で共同実験を行って求めました。

4.2 $u(\varepsilon_B)$ (下地(隠ぺい率試験紙)の銘柄違い)

安定した塗料を可能な限り均一に塗装した試験片を作成し、これを銘柄の異なる分光光度計で求めた分光反射率より日射反射率を求めました(表2)。ただし、このデータは同一試験機関内で種々の銘柄の分光光度計を取り揃えることができなかつたため、異なる試験機関による共同実験により求めたものです。また、下地である隠ぺい率試験紙の銘柄違いについても同時に実験し、それ

表2 分光光度計の銘柄違いと下地(隠ぺい率試験紙)の銘柄違いが試験結果に及ぼす影響

分光光度計の機種(M)	下地の銘柄(B)	日射反射率(%)				
		繰返し(n)				
		1	2	3	4	5
A社・モデルA	TP1	52.56	52.54	52.53	52.43	52.47
	NT1	52.21	52.27	52.22	52.23	52.25
	TP2	52.52	52.40	52.43	52.40	52.49
	NT2	52.37	52.33	52.37	52.39	52.35
B社・モデルA	TP1	52.79	52.63	52.71	52.78	52.79
	NT1	52.49	52.56	52.56	52.37	52.37
	TP2	52.64	52.76	52.59	52.66	52.61
	NT2	52.59	52.53	52.54	52.66	52.71
C社・モデルA	TP1	52.79	52.81	52.79	52.84	52.81
	NT1	52.63	52.56	52.56	52.63	52.62
	TP2	52.74	52.79	52.80	52.74	52.79
	NT2	52.78	52.73	52.70	52.71	52.70
C社・モデルB	TP1	52.58	52.79	52.60	52.59	52.76
	NT1	52.60	52.36	52.35	52.57	52.41
	TP2	52.78	52.66	52.67	52.54	52.50
	NT2	52.47	52.48	52.73	52.73	52.61

それぞれのばらつき要因を分散分析によって分離させました(表3)。

表3 分散分析表⁽³⁾

要因	S	f	V	E(V)
ϵ_{MeasM}	1.19260	3	0.39753	$\sigma e^2 + 20 \sigma M^2$
ϵ_{BB}	0.62655	3	0.20885	$\sigma e^2 + 20 \sigma B^2$
誤差 e	0.37145	73	0.00509	σe^2

なお、実際の測定は、どこか一つの試験機関の分光光度計が用いられ、更にある一種の銘柄(機種)が用いられるため、それぞれ算出した要因の標準偏差をそのまま不確かさで見なしても良いでしょう。そこで期待値より、それぞれの要因の標準不確かさを求めると、

$u(\epsilon_{\text{Meas}})$ (分光光度計の光学的な幾何学条件等) :

$$\sqrt{\frac{V_M - V_e}{20}} = \sqrt{\frac{0.39753333 - 0.00508836}{20}} = 0.140079 (\%)$$

$u(\epsilon_B)$ (下地(隠ぺい率試験紙)の銘柄) :

$$\sqrt{\frac{V_B - V_e}{20}} = \sqrt{\frac{0.20885000 - 0.00508836}{20}} = 0.100936 (\%)$$

であると算出されました。

4.3 $u(\epsilon_D)$ 、 $u(\epsilon_m)$ (測定日及び繰り返し)

安定した塗料を可能な限り均一に塗装した試験片について、測定日を変えてそれぞれ9回測定しました(表4)。その結果、測定日違いのばらつきは非常に小さい結果であることが解ったため、測定日違いによる効果は無視して良いものと考え、誤差項にプールし(表5)、全データの標準偏差を繰り返しの不確かさとしました。なお、JIS K 5602「塗膜の日射反射率の求め方」では、繰り返し1回の測定結果で報告しても良いことになっています(繰り返し測定の規定は無い)。

表5 分散分析表
(測定日違いによる効果を誤差にプール)⁽³⁾

要因	S	f	V	E(V)
繰り返し e	0.95527	26	0.03674	σe^2

$u(\epsilon_D)$ (測定日違いの不確かさ) = 0

$u(\epsilon_m)$ (繰り返し) = $\sqrt{\sigma e^2} = \sqrt{0.03674131} = 0.19168$

4.4 $u(STD)$ (標準白色板の不確かさ)

$\epsilon_{STD(300-2200nm)}$ (波長範囲 300 ~ 2200nm)

$\epsilon_{STD(2200-2500nm)}$ (波長範囲 2200 ~ 2500nm)

発泡ふっ素樹脂標準白色板(labsphere社のスペクトラロン)を購入しますと、米国NISTトレーサブルの校正証明書が添付されています(図3)。ここに標準不確かさが与えられているため、これをBタイプとして用いました。ただし、波長の範囲によって与えられている不確かさが異なるため、ここでは、それぞれの不確かさに

表4 測定日と試験の繰り返しが試験結果に及ぼす影響

測定日(D)	繰り返し(n)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10月25日	52.45	52.53	52.60	52.01	52.49	52.60	52.60	52.33	52.55
10月26日	52.43	52.49	52.60	51.94	52.42	52.30	52.56	52.24	52.51
10月27日	52.45	52.43	52.60	51.98	52.44	52.32	52.58	52.24	52.52

表6 標準白色板の感度係数及び不確かさ

不確かさの要因		太陽光スペクトルの含有率(感度係数)	校正証明書に記載されている不確かさ	不確かさ
$u(STD)$	$\epsilon_{STD(300-2200nm)}$	波長範囲 300 ~ 2200nm 98.4 (%)	0.5 (%)	0.492 (%)
	$\epsilon_{STD(2200-2500nm)}$	波長範囲 300 ~ 2200nm 1.59 (%)	2.0 (%)	0.0318 (%)

太陽光スペクトルが含まれている比率を乗じて求めました (表6)。

ESTIMATE CALIBRATION UNCERTAINTY
 The random uncertainty, expressed by standard deviation, of reflectance measurements performed by Labsphere, Inc. is less than 0.005 for the spectral range 300-2200 nm, and is less than or equal to 0.020 over the spectral range 250-2500nm.

図3 校正証明書の記載内容

5. 不確かさの合成

以上の結果をバジェットシートにまとめ、表7に示しました。その結果、標準不確かさが±0.56%であると算出されました。

6. おわりに

建築設計の分野では、日射反射率が1~2%曖昧であると建築物の熱設計に支障をきたすそうです。そこで、日射反射率の測定値がどの程度信頼できるのかについて、強い関心が寄せられていました。

今回、この試験方法における不確かさが約±0.56% (標準不確かさ) と求まりました。それでも、シビアな要求に対しては十分であるとは言えませんが、概ね良好で妥当と思われる不確かさが得られました。ただ、経験的 (何となく経験しているばらつき) に、「±0.3%くらいでは」と想像していたのですが、詳細に検討したと

ころ、それより大きい結果となりました。バジェットシートを見ると、標準白色板の不確かさが最も大きいことを示しています。通常の測定業務では、複数の標準白色板を替えながら試験することは少なく、いつも決まった同じ標準を用いることが多いです。このことから、通常の経験ではより大きな不確かさ要因 (標準白色板) に気付かなかったものと思われます。

更に精密な試験を要求する場合、表7に示したバジェットシート中で最も大きい不確かさを与えている標準白色板の不確かさを小さくする努力が求められます。今回用いた標準白色板は、米国NISTの標準にトレーサブルな物ですが、今後、日本においても標準白色板の国家標準 (波長範囲300~2500nm) を進めているとの事です (現時点で、300~1600nmまでの波長範囲で標準化されている)。日本における標準白色板についても期待したいところです。

7. 参考文献

- (1) JIS K 5602「塗膜の日射反射率の求め方」、財団法人規格協会、平成20年9月制定
- (2) 酒井英樹、永村一雄、井川憲男：分光反射率に基づく建築材料の日射反射率の測定方法—測定条件の妥当性の検討—日本建築学会環境系論文集、No. 616(20070630) pp. 31-36
- (3) (独)産業技術総合研究所計測標準研究部「分散分析プログラム」を用いて算出

表7 「塗膜の日射反射率の求め方」バジェットシート

記号		感度係数	標準不確かさ	標準不確かさ 感度係数を考慮	不確かさの要因	
$u(R)$	$u(\rho_\lambda)$	ϵ_{Meas}	1.0	0.140 (%)	0.140 (%)	分光光度計の銘柄等
		ϵ_m	1.0	0.192 (%)	0.192 (%)	繰り返し
		ϵ_D	1.0	無視	無視	測定日
	$u(STD)$	$\epsilon_{STD(300-2200nm)}$	0.9841	0.5 (%)	0.492 (%)	標準白色板
		$\epsilon_{STD(2200-2500nm)}$	0.0159	2.0 (%)	0.032 (%)	
	$u(\epsilon_B)$		1.0	0.101 (%)	0.101 (%)	下地 (隠ぺい率試験紙)
合成標準不確かさ $u(R) = \sqrt{0.140^2 + 0.192^2 + 0.492^2 + 0.032^2 + 0.101^2}$				0.56 (%)	日射反射率 (%)	
拡張不確かさ (K=2) $Uc = u(R) \times 2$				1.1 (%)		