文献調査に基づく仕上塗材・塗料の耐候性評価に関する提案

PROPOSAL ON WEATHERABILITY EVALUATION OF COATING MATERIALS BASED ON LITERATURE SURVEYS

長谷川 拓哉*, 千 歩 修**, 福 山 智 子***

Takuya HASEGAWA, Osamu SENBU and Tomoko FUKUYAMA

In order to evaluate the durability of coating materials, estimation equation of the gloss retention was proposed in previous study. This paper reported the applicability of the proposed equation to outdoor exposure test results and accelerated weatherability test results obtained from literature surveys. It was high correlation between estimated results and measured results of gloss retention. Obtained outdoor exposure results showed that the type of coating materials were mainly affected on the weatherability. It was proposed estimation method of gloss retention in coating materials exposed to outdoor from accelerated weatherability test results.

Keywords : *Coating materials, Weatherability, Gloss retention, Outdoor exposure test, Accelerated weathering test*

塗材, 耐候性, 光沢保持率, 屋外暴露試験, 促進耐候性試験

1. はじめに

建築用仕上塗材・塗料の耐久性に関し, 促進耐候性試験と屋外暴露試験との関係が議論されることが多い^{例え 1)}。しかし, 促進耐候性試験に用いられる光源と太陽光では分光分布が異なっており, 紫外線による樹脂骨格の破壊作用が化学成分によって異なることが指摘されている²⁾。促進耐候性試験方法, 樹種によってその促進倍率が異なる場合³⁾もあり, 建築用仕上塗材・塗料の耐候性を評価する上では, 屋外暴露試験によることが基本と考えられる。

一方で, 両者には相関が認められることが報告されているとともに^{例え 1)}, JIS A 6909 では品質規格として, 促進耐候性試験結果に基づき耐候形 1~3 種の区分が規定されており, 屋外暴露環境下の耐候性の目安としていわれると考えられる。しかし, 前述の理由で, 定量的に「促進耐候性試験は屋外暴露の〇〇年に相当」とは一概に言えず, 耐候性の大小比較の際の定性的な目安とされてきた。定性的な評価に留まってきたのは, 塗膜劣化の進行について定式化されていないことが一因と考えられる。劣化進行の定式化は多くの研究者が検討しており, 例え 近藤ら⁴⁾は, 建築物の調査に基づき, 線形, 指数, 対数等の回帰式を検討し, 耐候形の区分に使用される指標である光沢保持率については, 対数関数で表すのが適当であるとしている。著者らは, 小池・田中らの防水層の耐候性に関する研究⁵⁾に基づき, 屋外暴露環境下の光沢保持率低下を表す式を提案している⁶⁾。しかし, 限られたデータでの検討であり, 適用性の検討は十分とはいえない。

本研究では, 建築用仕上塗材・塗料を対象として, 札幌市における 13 年の屋外暴露試験より光沢保持率低下を検討するとともに, 促進耐候性試験結果および屋外暴露試験結果を報告している文献調査を行い, 提案式の適用性の検討を行う。その上で, 塗膜の劣化進行に関して促進耐候性試験と屋外暴露試験の関係を検討し, 両者を結びつける考え方を提案することを目的としている。なお, 本研究は, 文献^{6),7)}にデータを追加し, 新たに考察を加えたものである。

2. 検討の概要

2.1 実験および文献調査の概要

実験の概要を表 1 に示す。各種仕上塗材・塗料を $\phi 10 \times 3.5\text{cm}$ の W/C57.5%としたコンクリート試験体に施工したものを北海道大学工学部(札幌市)に屋外暴露し, 6, 8.5, 13 年時に色差および光沢度の変化を測定した。色差は色彩色差計を用い $L^*a^*b^*$ 表色系にて測定した。光沢度は 60° の光沢度計を用いて測定した。なお, 既報⁸⁾において同じ仕上塗材・塗料を濾紙に施工した試験体について, JIS A 1415 に準拠したサンシャインウェザーメータ(以下 SWM)試験を 2500 時間行い, 色差および光沢度の変化を報告している。

文献調査の概要を表 2 に示す。文献調査は, 本学会構造系論文集, 技術報告集, 大会梗概集より, 建築用塗料, 仕上塗材を対象として, 促進耐候性試験および屋外暴露試験を行っているもの^{1), 5), 8)~25)}を収集した。なお, 促進耐候性試験は, SWM 試験およびキセノンランプ法の結果を収集した。ここで, 同じ樹脂系や仕上げ種類でも耐候

* 北海道大学大学院工学研究院空間性能システム部門 准教授・博士(工学)
(2016 年 8 月 20 日逝去)

** 北海道大学大学院工学研究院空間性能システム部門 教授・工博

*** 北海道大学大学院工学研究院空間性能システム部門 助教・博士(工学)

Assoc. Prof., Division of Human Environmental Systems, Faculty of Engineering, Hokkaido Univ., Dr. Eng.
Prof., Division of Human Environmental Systems, Faculty of Engineering, Hokkaido Univ., Dr. Eng.
Assist. Prof., Division of Human Environmental Systems, Faculty of Engineering, Hokkaido Univ., Dr. Eng.

性に違いがあると考えられる。ここでは、上塗材の劣化は表面から開始されるとともに、耐候性は素地、下塗、既存塗膜によらず同程度⁵⁾であったことや、経験的に樹脂系で耐候性の大小为評価されてきたことから、仕上塗材・塗料は樹脂系毎に同様に扱えると仮定して、整理を行うこととした。分類については、多くのデータが報告されている、アクリル樹脂系、ウレタン樹脂系、シリコーン樹脂（アクリルシリコン樹脂）系、ふっ素系樹脂系の4種類を主な対象とし

表 1 実験の概要

仕上材料名	本論文での呼称	上塗材 (TP) の揮発成分	促進耐候性試験 ⁸⁾	屋外暴露試験
反応硬化形成樹脂エマルジョン系 複層塗材 (TP: ウレタン)	複層 RE-U	溶剤系	素地: 濾紙	素地: コンクリート (W/C 57.5%)
反応硬化形成樹脂エマルジョン系 複層塗材 (TP: アクリル)	複層 RE-A	水系	試験方法: SWM (JIS A 1415に準拠。試験サイクル 120分中18分散水。試験時間2500時間)	試験方法: 北海道大学工学部 (札幌市) 屋上に水平に暴露。暴露後6、8、5、13年で劣化デグリー、光沢度、色差を測定
シリコーン系塗料	アクリルシリコン	溶剤系		
ふっ素系塗料	ふっ素	溶剤系		

注) この他に外装薄塗材E、外装厚塗材Eも実施

た。なお、シリコーン樹脂系は、一般にアクリルシリコン樹脂系と呼称されているが、本論文では、本来の樹脂の名称を考慮し、シリコーン樹脂系と呼称することとする。

2.2 既報で提案した光沢保持率低下の予測式

既報⁵⁾において、光沢保持率低下の予測式として、式(1)を提案している。

$$X = 100 \times \frac{G_{t+h}}{G_0} = \frac{100}{\exp\left(A \exp\left(-\frac{B_h}{T}\right)t + D \exp\left(-\frac{B_{th}}{T}\right)(t)^a\right)} \quad (1)$$

ここで、 X : 光沢保持率 (%), G_0 : 光沢度の初期値, G_{t+h} : 劣化後の光沢度, T : 材料温度 (絶対温度 (K)), t : 時間, I : 単位時間における紫外線の強さ, A, B_h, D, B_{th}, a : 定数
既報⁵⁾では、総紫外線量 $(It)^a$ の指数 a は 1 と仮定し、材料温度 T を相当環境温度²⁶⁾として、式(2)を簡便な予測式として提案している。

表 2 光沢保持率のデータを収集した文献の概要

文献	種類	樹脂種類 ^{*1}					仕上塗材種類／主材 (JIS A 6909等)	促進耐候性試験		屋外暴露試験					
		A	U	S	F	他		試験方法	素地	データ数	暴露箇所（地点）	素地	方位	暴露期間	データ数
1), 9)	塗料 ^{*2}	●	●	●	●		—	SWM (JIS D 0205, 6000時間) キセノンランプ法 (JIS D 0205, 8000時間) 他	スレート板	11, 11	6箇所（つくば市, 青梅市, 豊川市, 高槻市, 大阪市, 糸満市）	スレート板	南面垂直	10年	36
10)	塗料	○ ●	○ ●	○ ●	○ ●		—	SWM (JIS K 5400 9.8.1準拠, 6000時間) ^{*8}	スレート板	5	3箇所（つくば市, 札幌市, 糸満市） ^{*8}	スレート板/鋼板	南面30°	5年	5
8) 本実験	仕上塗材, 塗料	◆ ◇	◆	●	●		薄塗材E 厚塗材E 複層塗材RE	SWM (JIS A 1415, 2500時間)	濾紙	4	1箇所（札幌市）	コンクリート	水平	13年	4
11)	塗料					● ^{*4} ● ^{*5}	—	SWM (JIS K 5400 9.8.1準拠, 2000時間)	不明	2	1箇所（糸満市）	不明	南面23°	8年	2
12), 13)	塗料			○	○	○ ^{*3} ●	—	キセノンランプ法 (JIS K 5600-7-7, 8000時間)	繊維強化セメント板	5	3箇所（札幌市, つくば市, 宮古島） ^{*9}	繊維強化セメント板	南面30°（宮古島は20°）	7年	10
5)	仕上塗材	◆	◆	◇			薄塗材E	—	—	—	4箇所（石狩, つくば, 東京, 沖永良部）	コンクリート	東・西・南・北面垂直	10.5年	40
		◆	◇		複層塗材E										
		◆	◆		防水形複層塗材E 防水形薄塗E										
14)	塗料（一部仕上塗材）	● ○ ◇	●			● ^{*6}	—	—	—	—	6箇所（恵庭市, つくば市, 東京都, 平塚市, 尼崎市, 沖永良部）	鉄板	南・北面垂直	4年	36
15)	仕上塗材		◆				アクリルゴム系	—	—	—	1箇所（佐賀県玄海町）	コンクリート	東・西・南・北面垂直	20年	3
			◆		ウレタンゴム系										
			◆		ウレタン樹脂＋セメント系										
16)	仕上塗材	◆	◆		◆		アクリルゴム系	—	—	—	1箇所（千葉市）	フレキシブル板	南面45°	3年	5
			◆		アクリルゴム系 ウレタンゴム系										
17)	塗料		●	●	●		—	—	—	—	2箇所（沖縄県西原町, 宜野湾市）	アルミ板	南面30°	4年	6
18)	仕上塗材	◆	◆				アクリルゴム系	—	—	—	2箇所（東京都, 柏崎市）	スレート板	南面45°	10.9年	5
			◆		エポキシ樹脂系										
			◆		エポキシ樹脂系 アクリルゴム系										
19)	塗料					○ ^{*5}	—	SWM (JIS H 8602, 10000時間) 他	アルミ板	3	1箇所（印西市）	アルミ板	南面30°	9年	3
20)	仕上塗材	◆ ◆ ◆					複層塗材E 防水形薄塗材E 防水形複層塗材E	SWM (JIS K 5400 9.8.1相当, 3000時間)	モルタル	6	—	—	—	—	—
21)	塗料	● ○ ●	● ○	●	●	● ^{*7}	—	SWM (JIS D 0205, 3500時間)	不明	9	—	—	—	—	—
22)	塗料	● ○	● ○	● ○	● ○		—	SWM (JIS A 1415, 5000時間)	フレキシブル板	42	—	—	—	—	—
23)	塗料		●	●		● ^{*5}	—	SWM (JIS K 5400 9.8.1準拠, 2000時間)	スレート板	7	—	—	—	—	—
24)	塗料				●	● ^{*5}	—	SWM (JIS H 8602, 7000時間)	アルミ板	12	—	—	—	—	—
25)	塗料				●	● ^{*5}	—	SWM (JIS K 5400 9.8.1準拠, 4000時間)	アルミ板	10	—	—	—	—	—

*1 A: アクリル樹脂系, U: ウレタン樹脂系, S: シリコーン樹脂系, F: ふっ素樹脂系
○: 塗料, ◇: 上塗材として使用, 黒: 溶剤系, 白: 水系, 灰: その他 (文献中に記載のないものも含む)
*2 アクリル樹脂, アクリルシリコン樹脂, ふっ素樹脂系を対象 (硬・軟2種類) *3 ポリシロキサン樹脂系 *4 ポリウレタン樹脂系 *5 ポリエステル樹脂系
*6 アルキド樹脂系 *7 無機系塗料 *8 つくば市の5年目のデータのみ収集 *9 札幌市と宮古島のデータのみ収集

$$X = \frac{100}{\exp(\beta t)} \quad (2)$$

$$\text{ここで、} \beta = A \exp\left(-\frac{B_h}{T}\right) + D \exp\left(-\frac{B_{lh}}{T}\right) \times I$$

できるだけ簡便な式の方が、実用性は高いと考えられることから、以下、式(2)について屋外暴露試験および文献調査から得られた光沢保持率のデータに基づきその適用性の検討を行う。

3. 実験結果および文献調査結果および考察

3.1 光沢保持率低下の提案式の屋外暴露試験結果および促進耐候性試験結果への適用性の検討

(1) 屋外暴露試験結果への適用

屋外暴露試験の結果を図1に示す。図中の点線は式(2)に基づき最小自乗法により求めた係数 β を用いた光沢保持率の予測例（図2、図4も同じ表現）であり、光沢保持率低下の進行を表現できていると考えられる。既往研究のデータに対し同様に光沢保持率を予測した例を図2に示す。実測値を表現できているものと、実測値と予測値が乖離しているものがみられた。文献調査から得られた屋外暴露

試験と本実験の全155データを対象として、実測値と式(2)による予測値の重相関係数の範囲を図3に示す。147（全体の約95%）のデータが重相関係数0.80以上を示した。樹脂系毎の重相関係数の平均値を図3中に示しているが、今回の調査範囲ではふっ素樹脂系は低い結果となった。図2中央に示す通り、光沢保持率低下が小さいものが多かったことが要因と考えられる。一部、図2右に示すように、低下した光沢保持率が再び上昇している場合も低い重相関係数を示し、一様な低下ではない場合は、式(2)の適用は困難と考えられる。

(2) 促進耐候性試験結果への適用

SWM試験の既往研究のデータによって算出した例を図4に示す。屋外暴露試験と同様に、実測値を表現できているものと、実測値と予測値が乖離しているものがみられた。SWM試験の111データを対象として、予測値と実測値の重相関係数の範囲を図5に示す。SWM試験の結果は屋外暴露試験よりも重相関係数が低い傾向となったが、68（全体の約61%）のデータが重相関係数0.80以上を示した。SWM試験の結果は屋外暴露試験よりも測定点数が多いことから、測定誤差の影響で重相関係数が低くなったことが一因と考えられる。図5中に各樹脂系の重相関係数の平均値を示す。耐候性が高いと考えられるものほど重相関係数は低下し、特に屋外暴露試験と同様、ふっ素樹脂系の重相関係数は低い結果となった。光沢保持

図1 屋外暴露試験の光沢保持率低下

図2 既往研究における屋外暴露試験結果と式(2)との対応の例

図3 本実験および既往研究の屋外暴露試験結果と式(2)による予測値との重相関係数の範囲

図4 既往研究におけるSWM試験結果と式(2)との対応の例

図5 既往研究のSWM試験結果と式(2)による予測値との重相関係数の範囲

図6 既往研究におけるキセノン法試験結果と式(2)との対応の例

図7 屋外暴露2年目までのデータによる屋外暴露10年の予測値と実測値の関係

率が低下しない場合、式(2)で進行を表すことは困難であると考えられる。また、図4右に示すように初期では光沢保持率が低下せず、途中から低下する場合がSWM試験ではより多くみられた。式(2)ではなく式(1)の各係数を最小自乗法により求めた結果（一点鎖線）を図4右中に示す。途中から光沢保持率が低下する場合、式(1)による方が精度よく表すことができるといえる。この原因として、総紫外線量(I_t)の指数 a を1と仮定していたが、この仮定が適当でなく、既往研究⁴⁾で言及されている通り、正確に予測する場合は材料毎に評価する必要があると考えられる。しかし、SWM試験でも6割以上、屋外暴露試験では9割以上が高い重相関係数を示していることから、実用的には式(2)によって光沢保持率低下の進行を表すことができると思われる。ここで、図6に既往研究におけるキセノンランプ法の試験結果の例を示す。試験結果の収集数が少なかったため、屋外暴露試験、SWM試験のような分析をしていないが、キセノンランプ法の光沢保持率低下も式(2)で表現可能と考えられる。

(3) 短期の屋外暴露結果による長期の屋外暴露結果の予測

10年以上の屋外暴露試験（2年のデータがあるもの）^{9),15),18)}による光沢保持率の低下が屋外暴露2年までの短期間の結果で予測できるかについて検討を行った。屋外暴露試験2年までの結果から係数 β を最小自乗法により算出し、その β を用いて屋外暴露10年時の光沢保持率を予測し、その結果と実測値を比較した。結果を図7に示す。両者の重相関係数は0.49程度と低い結果となった。これは、初期は光沢保持率低下が生じていない場合が見られており、短期間の屋外暴露結果から評価した場合、長期的な屋外暴露試験結果は危険側の評価になる可能性があるといえる。

3.2 暴露地域・樹脂種類による係数 β のばらつき

係数 β は、屋外暴露環境条件と仕上塗材・塗料種類の両方の影響を受けるが、両者の影響の大きさを検討する上で、屋外暴露環境による光沢度低下の差を検討する必要がある。同仕様の試験体を複数の地点で屋外暴露試験を行った文献^{5),9),14)}を対象として、地域毎の仕上塗材・塗料種類の差に対する式(2)の係数 β の変動係数と仕上塗材・塗料種類毎の地域の差に対する変動係数の算出を行った。結果を表3に示す。ここで、変動係数が大きいということは、個々の試験体の光沢保持率の差が大きいということであり、その要因の影響が大きいと考えられる。表から、いずれの文献においても、一部突出して大きい変動係数を除くと、地域毎の仕上塗材・塗料種類の差による変動係数よりも仕上塗材・塗料種類毎の地域の差に対する変動係数が小さい結果となっている。このことから、屋外暴露による光沢保持率の低下には、仕上塗材・塗料種類の影響が大きく、仕上塗材・塗料種類のポテンシャルの耐候性の影響が大きいといえる。なお、突出して大きい変動係数を示す原因は明確ではないが、汚れの付着などの影響などが考えられる。また、仕上塗材・塗料種類毎の地域の差に対する変動係数の平均値は概ね30%程度となっている。各文献の屋外暴露地には北海道から沖縄まで含まれていることを考えると、日本の一般的な地域間における熱・光による劣化進行を表す係数 β の変動は、変動係数で約30%であり、比較的小さいといえる。ただし、海岸近くなど、特別な環境では異なることも考えられ、今後の検討課題と考えられる。

3.3 促進耐候性試験と屋外暴露試験の関係の検討

耐久性総プロで示された仕上塗材・塗料の推定耐用年数は、式(3)

によることとされている²⁷⁾。

$$Y=Y_s \times O \times D \times B \times C \times M \quad (3)$$

ここに、 Y_s : 標準耐用年数 (年)、 O : 材料による係数、 D : 地域環境による係数、 B : 部位による係数、 C : 施工水準による係数、 M : 維持保全による係数

促進耐候性試験と屋外暴露試験との関係において、暴露年数1年相当促進時間を求めると、試験方法、樹脂種類によって異なることが指摘されている¹⁾。このため、式(3)において地域による条件は係数 D で考慮されるが、実環境での耐用年数を知りたい場合、材料毎・地域毎に屋外暴露試験を実施する必要がある。

ここで、前節で示した通り、光沢保持率の低下は、暴露地の影響よりも仕上塗材・塗料種類の影響が大きいたことが示唆された。つまり、塗膜がもつポテンシャルの耐候性の影響が地域環境条件の影響よりも大きいと考えることができる。ここで、促進耐候性試験で求めた β から、屋外暴露試験での β の平均値が一意に決まると仮定する。この屋外暴露試験での β の平均値が、標準的な耐候性を表すと考え、部位・地域条件による違いは、この標準的な β に対する

表3 複数の暴露地で実施された屋外暴露試験における暴露地と仕上塗材・塗料種類の変動係数

文献	塗材種類	暴露箇所	地域毎の仕上塗材・塗料種類毎の差に対する変動係数 (%)	平均値 (%)	仕上塗材・塗料種類毎の地域の差に対する変動係数 (%) ^{*1}	平均値 (%)
5)	9	4	28.1~56.9	40.8	10.3~62.8 (25.9)	21.2 ^{*2}
9)	6	6	44.3~85.5	68.0	12.4~54.9	30.1
14)	6	6	31.6~79.1	56.6	17.1~303.1 (42.2)	30.5 ^{*2}

*1 () は、変動係数が1つだけ大きい場合、次に大きい変動係数を示す。

*2 大きい変動係数を除いた平均

図8 SWM試験から求めた β と屋外暴露試験から求めた β の関係

図9 平均を1とした時の屋外暴露試験の β のばらつき

ばらつきとして表現できると考えられる。

(1) SWM 試験と屋外暴露試験の関係

SWM 試験と屋外暴露試験を行っているデータを対象として、SWM 試験^{1), 8), 10)}から求めた β と屋外暴露試験^{9), 10)}および本実験結果から求めた β の関係を図 8 に示す。なお、SWM 試験は芳香族に属する樹脂系は屋外暴露試験と相関が低いことが指摘されていることから²⁾、脂肪族の樹脂系のみを対象とした。この時の平均値を 1 として平均値に対する比のばらつきを図 9 に示す。データ数は少ないが、尖度、歪度は 0 に近いことから、正規分布に従うと仮定した。変動係数を前述の 30% と仮定した場合の危険率 5% のライン ($\pm 1.96\sigma$) を図 8 中に示す。シリコン樹脂系、ふっ素樹脂系など耐候性が高いものは、危険率 5% のラインを超えるものがみられるが、他は概ねこのラインの中にあることがわかる。屋外暴露の β は SWM 試験の β の約 0.091 倍、促進倍率 (促進耐候性試験の試験時間が屋外暴露試験の何年に相当するかの倍率) にして約 10.9 倍となった。シリコン樹脂系、ふっ素樹脂系など耐候性が高い塗膜が 5% のラインを超えた理由は、明確ではないが、屋外暴露時の汚れ等の影響とともに、促進耐候性試験でのばらつきが考えられる。促進耐候性試験のばらつきについて、複数メーカーの同じ樹脂系で実施された SWM 試験²²⁾における各樹脂系の係数 β の変動係数を表 4 に示す。同じ樹脂系でもばらつきが大きく、特に耐候性が高いものは、ばらつきが大きいことがわかる。このばらつきは、樹脂の化学組成によるもの、試験条件によるものが含まれていると考えられ、化学組成による影響が大きいと考えられる。試験条件のばらつきについてはデータが少なく明確ではないが、文献²²⁾より比較的化学組成が近い条件と考えられるアクリル樹脂系の変動係数が 0.30 であり、試験条件によるばらつきに近いものと推測される。促進耐候性試験結果はこの程度のばらつきを考慮する必要があると考えられる。

(2) キセノンランプ法試験と屋外暴露試験の関係

同様に、キセノンランプ法試験での結果^{1), 12)}と屋外暴露試験^{9), 13)}での結果を図 10 に示す。キセノンランプ法でも SWM 試験と同様の傾向がみられた。文献¹³⁾の宮古島の結果を除いて求めた屋外暴露の β は SWM 試験の β の約 0.11、促進倍率にして約 9 倍となった。ここで、JIS A 6909:2003²⁸⁾からは、促進耐候性試験としてキセノンランプ法が採用されており、SWM 試験から試験時間が改められている。SWM に対してキセノン法は 1.2~1.25 倍の試験時間となっているが、今回の結果でも SWM 試験とキセノンランプ法の試験時間の比率は約 1.2 倍となり、概ね JIS で示された比率と一致する結果となった。文献¹³⁾の宮古島の結果は、屋外暴露の β の値が著しく危険率 5% のラインを大幅に上回る結果となった。この原因は明らかではないが、海塩粒子の影響などを考慮する必要があると考えられる。

(3) 促進耐候性試験結果による光沢保持率低下の予測

以上の結果より、促進耐候性試験をその塗膜のポテンシャルの耐候性と考え、式(4)、(5)に示す通り、促進耐候性試験より屋外暴露試験の β を推定し、これにばらつきを考慮することで、光沢保持率低下の予測が可能となると考えられる。

$$X = \frac{100}{\exp\{(\beta_e \pm c\sigma)t\}} \quad (4)$$

表 4 既往研究²²⁾における各樹脂系の SWM 試験から求めた β の変動係数

樹脂系	変動係数
アクリル樹脂系	0.29
ウレタン樹脂系	0.73
シリコン樹脂系	0.81
ふっ素樹脂系	1.10

図 10 キセノンランプ法から求めた β と屋外暴露試験から求めた β の関係

表 5 各樹脂系の β

樹脂系	データ数	β の平均値	変動係数	推定耐用年数(年)	文献 ²⁹⁾ で提案された仮RSLC(年)	仮RSLCから求めた β
溶剤系						
アクリル樹脂系	41	0.30	0.57	4	4	0.30
ウレタン樹脂系	25	0.17	0.49	7	7	0.17
シリコン樹脂系	14	0.11	0.25	11	10	0.12
ふっ素樹脂系	30	0.06	1.49	20	13	0.09
水系						
アクリル樹脂系	12	0.27	0.38	4	5	0.24
ウレタン樹脂系	5	0.09	0.08	13	7	0.17
シリコン樹脂系	6	0.14	0.74	9	9	0.13
ふっ素樹脂系	2	0.25	0.87	5	11	0.11

図 11 実測値と仮 RSLC から求めた β の関係

図 12 仮 RSLC から求めた各樹脂系 (溶剤系) の光沢保持率

$$\beta_e = m \times \beta_a \quad (5)$$

ここに、 β_e : 屋外暴露試験による β の平均値、
 c : 危険率に応じた係数 (95% の場合 1.96)、 σ : β の標準偏差、
 m : 促進倍率 (SWM 試験: 0.09、キセノンランプ法: 0.11)、
 β_a : 促進耐候性試験による β

式(3)で示された地域、部位、施工水準、維持保全状況を、ばらつきとして表現することで、塗膜の耐久設計ができると考えられる。これらの要因によるばらつきをどのように設定するかは、明らかではなく、今後実建物データの蓄積により検討が必要である。

3.4 樹脂系と耐候性 1~3 種の位置づけの検討

各樹脂系の耐用年数を検討するため、文献調査結果を樹脂系で分類し、整理を行った。整理にあたり、溶剤系・水系等の別は文献の記載の通りに分類した。なお、溶剤系・水系等の別について記載のない文献は、試験体作製時期から溶剤系と推定した。結果を表 5 に示す。ばらつきがみられるものの、樹脂系毎に近い値となる傾向を示した。ここで添田ら²⁹⁾は、光沢保持率が 30% となる時点を目録上の寿命 (耐用年数) として、仮 RSLC (Reference Service Life of

図 13 促進耐候性試験(キセノン法)による各耐候形の位置づけ

図 14 推定した屋外暴露環境における各耐候形の位置づけ

Components。仕上塗材の上塗材の値)を提案している。実測値から求めた β と仮 RSLC から求めた β の関係を図 11 に示す。データ数の少ない水系では一致しないものもあるが、概ね一致する傾向を示した。この仮 RSLC が美観の観点からみた各樹脂系の標準的な耐用年数であると仮定すると、この係数 β は各樹脂系の標準的な光沢保持率低下の進行を表すと考えられる。この係数 β を用いた各樹脂系(溶剤系)の光沢保持率低下を図 12 に示す。

JIS A 6909 に規定された耐候形 1～3 種は、それぞれキセノンランプ法試験において 600 時間(3 種)、1200 時間(2 種)、2500 時間(1 種)の間、光沢保持率 80%以上であることが求められている。光沢保持率低下が式(2)に従うとすると、その進行は図 13 のようになる。ここで、図 10 に示した関係式より屋外暴露試験の結果を推定すると図 14 のようになる。図 14 中に図 12 に示した各樹脂系の光沢保持率低下の進行を併せて示す。アクリル樹脂系は耐候形 3 種、ウレタン樹脂系は耐候形 2 種、ふっ素樹脂系は耐候形 1 種にほぼ相当する結果となり、経験的に知られている耐候形の種別に相当する樹脂系種類と概ね一致する結果を得た。以上、各樹脂系の標準的な光沢保持率低下と JIS A 6909 に規定された耐候形の位置づけを示した。この結果を基にメーカーのカタログに示された耐候性から耐久設計を行うことができると考えられる。しかし、現在ここに示した以外の塗膜も多くあり、光沢保持率の評価が難しい艶消し等も増えてきていることから、今後、これらの塗膜についても検討が必要と考えられる。

4. まとめ

- (1)既報で提案した光沢保持率低下の予測式は、屋外暴露試験、促進耐候性試験ともに概ね実測値を表現できることを確認した。
- (2)光沢保持率は、暴露地の影響よりも塗膜種類の影響が大きい。
- (3)光沢保持率低下の進行を表す係数 β の変動は、一般的な地域の場合、変動係数で約 30%である。
- (4)地域による差をばらつきと考え、促進耐候性試験の結果から屋外暴露試験の結果を予測する手法を提案した。
- (5)各樹脂系の標準的な光沢保持率低下の進行を表す係数 β の値を示した。

参考文献

- 1)竹内博幸, 矢野瑞穂, 和田高清: 外壁用塗料の耐候性能評価に関する研究, その 32 促進耐候性試験と屋外暴露試験による評価の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 985-986, 1996. 7
- 2)飯田真司他 2 名: 促進耐候性試験法, 塗料の研究第 145 号, pp. 22-37, 2006. 3
- 3)近藤照夫, 青柳久足, 藤城春雄, 小久保正美: 建築外装用仕上塗料の耐候性能評価 その 1 アクリル樹脂系塗料の実態調査, 日本建築学会大会

学術講演梗概集 A-1, pp. 523-524, 1993. 7

- 4)小池迪夫, 田中享二: 合成高分子防水層の耐候性, その 6 光熱劣化における光と熱の定量的評価, 日本建築学会論文報告集第 289 号, pp. 1-10, 1980. 3
- 5)長谷川拓哉, 朴宰弘, 千歩修, 濱崎仁: 屋外暴露試験に基づく仕上塗材の劣化と鉄筋コンクリート造躯体保護効果の経年変化, 日本建築学会構造系論文集 N0. 686, pp. 679-686, 2013. 4
- 6)長谷川拓哉, 千歩修: 屋外暴露環境下における仕上塗材・塗料の光沢保持率低下予測に関する検討, 2012 年大会学術講演会研究発表論文集, 2012. 10
- 7)長谷川拓哉, 千歩修, 福山智子: 文献調査に基づく建築用塗料・仕上塗材の促進耐候性試験による劣化進行予測に関する検討, 2014 年大会学術講演会研究発表論文集, 2014. 10
- 8)長谷川拓哉, 千歩修, 大久保孝昭, 古賀純子: 建築仕上塗材の中性化抑制効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集第 609 号, pp. 23-30, 2006. 11
- 9)茂木正史他 6 名: 外壁用塗料の耐候性能評価に関する研究 その 40 全国 6 ヶ所における屋外暴露 10 年までの光沢残存率, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 207-208, 2000. 9
- 10)栗原大典他 4 名: 有機溶剤を低減した環境対応形塗料の屋外暴露 10 年後の結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 1101-1102, 2006. 9
- 11)堀長生, 奥田章子他 3 名: 塗装仕上の耐久性向上技術に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 1091-1092, 2014. 9
- 12)今泉桂, 本橋健司: ポリシロキサンを主成分とする塗料の性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 471-472, 2008. 9
- 13)今泉桂, 本橋健司: ポリシロキサンを主成分とする塗料の性能評価 その 5 屋外暴露 7 年後の耐久性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 1075-1076, 2014. 9
- 14)平田信人, 榎野紀元, 富板崇: 各種環境下における建築用塗料の耐候性と耐汚染性の評価, 日本建築学会構造系論文集 No. 553, pp. 19-25, 2002. 3
- 15)御手洗泰文他 4 名: 重要構造物マスコンクリートの管理 ー保護塗装の効果と耐久性に関する 20 年のモニタリング試験結果ー, 日本建築学会技術報告集第 13 巻第 26 号, pp. 389-394, 2007. 12
- 16)平野竜行, 村上信直: 外装塗材の性能評価に関する研究, その 2 塗材表面の劣化挙動について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 43-44, 1989. 10
- 17)犬飼宏, 西尾竜生, 大城武: 沖縄における高性能仕上塗材の耐候性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 1367-1368, 1995. 8
- 18)佐々木正治他 3 名: 外壁仕上材の耐候性およびコンクリートの保護性に関する 131 ヶ月の屋外暴露試験結果, その 1. 仕上塗材の耐候性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 479-480, 1997. 9
- 19)後藤善光, 朝倉崇博, 大澤悟: 外装アルミ用塗料の耐久性に関する研究 その 17 高耐候性ポリエステル粉体塗料の屋外暴露 9 年目の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 1089-1090, 2014. 9
- 20)河野政典他 3 名: 仕上塗材の経年劣化を考慮した中性化抑制効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文集第 584 号, pp. 15-21, 2004. 10
- 21)三浦勇雄, 矢野瑞穂: 低汚染性外装用塗料の耐汚染性能と耐候性能評価に関する研究 その 2 サンシャインウェザーメータによる耐候性能評価結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 859-860, 1997. 9
- 22)今泉桂, 本橋健司, 三浦正継: 環境対応型塗料の耐候性能について, その 2 サンシャインウェザーメータによる評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 617-618, 1997. 9
- 23)伊藤孝男他 5 名: 光触媒を利用した外装用塗料の耐候性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 1099-1100, 2004. 8
- 24)朝倉崇博, 齋藤俊, 大澤悟: 外装アルミ用塗料の耐久性に関する研究 その 11 各種粉体塗料の基本物性及び促進劣化試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 987-988, 2013. 8
- 25)奥田章子, 堀長生: 金属下地塗装に関する研究 その 2 ふっ素樹脂粉体塗装の耐候性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 995-996, 2013. 8
- 26)小池迪夫, 田中享二: 合成高分子防水層の耐候性, その 4 屋外暴露における熱の影響の評価, 日本建築学会論文報告集第 263 号, pp. 11-118, 1978. 1
- 27)建設省: 建設省総合技術開発プロジェクト 建築物の耐久性向上技術の開発 報告書, 1985
- 28)JIS A 6909 (建築用仕上塗材), 2003. 3
- 29)添田智美他 6 名: 外装用塗料・仕上塗材の標準耐用年数に関する調査研究 その 6 美観上の塗装仕様別リファレンスサービスマイフの設定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 1067-1068, 2009. 8

PROPOSAL ON WEATHERABILITY EVALUATION OF COATING MATERIALS BASED ON LITERATURE SURVEYS

Takuya HASEGAWA^{}, Osamu SENBU^{**} and Tomoko FUKUYAMA^{***}*

^{*} Assoc. Prof., Division of Human Environmental Systems, Faculty of Engineering, Hokkaido Univ., Dr. Eng.

^{**} Prof., Division of Human Environmental Systems, Faculty of Engineering, Hokkaido Univ., Dr. Eng.

^{***} Assist. Prof., Division of Human Environmental Systems, Faculty of Engineering, Hokkaido Univ., Dr. Eng.

From the viewpoint of the durability of coating materials for buildings, the estimation of their weatherability is critical. JIS A 6909 has regulated the weatherability types for coating materials based on the accelerated weatherability tests. However, the relationship between the deterioration progress in coating materials under the accelerated weatherability test and that under the outdoor exposure test is not clear yet.

An outdoor exposure test on coating materials for 13 years in Sapporo, a literature survey on the results of the outdoor exposure tests and accelerated weatherability tests (using the sunshine and Xenon lamp weather meters) were carried out to elucidate the relationship. In a previous study, the authors proposed an equation for estimating the gloss retention decrease, which is an indicator of deterioration in coating materials. In this study, the applicability of the proposed equation to the experimental results of the outdoor exposure test and literature survey was investigated. The results showed a high correlation between the estimated results and the measured results for gloss retention though there are some exceptions.

To investigate the estimation method of the gloss retention after the long term exposure at the initial material age, we also compared the ten years gloss retention measured values to estimated values using two years values. The estimation of the long-term outdoor exposure results from the short-term results was difficult. The outdoor exposure test results from multiple regions showed that the weatherability was mainly affected by the coating material type.

A method for the estimation of the gloss retention decrease during the outdoor exposure test using the accelerated weatherability test results was proposed. The average gloss retention was determined using the gloss retention obtained from the accelerated weatherability test. The dispersion for the average gloss retention showed the regional differences. The gloss retention was estimated by a probabilistic model using the average gloss retention and standard deviation obtained from the experimental results. Consequently, the obtained experimental results were almost within the significance level of 5%.

Finally, the standard deterioration of the gloss retention for each resin type of the coating materials was also analyzed. The standard degradation progress of gloss retention and this definition enabled to calculate the service life of each resin type. The results showed that the weatherability types 1, 2, and three regulated in JIS A 6909 were equivalent to the service lives of fluorine, urethane, and acrylic resins respectively. The estimation results correlated with the empirical service life of the coating materials.

(2016年8月7日原稿受理, 2016年12月28日採用決定)