建築用外装塗料の耐候性と環境劣化因子による多変量解析

MULTIVARIATE ANALYSIS FOR WEATHERABILITY OF ARCHITECTURAL COATINGS REFERRING ENVIRONMENTAL DEGRADATION FACTORS

平田 信人*¹, 檜野 紀元*², 富板 崇*³

Nobuhito HIRATA, Norimoto KASHINO and Takashi TOMIITA

The weatherability of colored architectural coatings is evaluated by a 4-years outdoor exposure test at various areas. Gloss retention, differences of brightness and value b^* along yellow-blue axis were applied by a multivariate analysis referring estimated environmental degradation factors, 1) equivalent environmental temperature based black panel thermometer, 2) solar ultraviolet dose, 3) wetness time and 4) freezing/thawing cycle. Value of delta-L, an element of color difference, of yellow samples modified by those of white one were almost constant and did not related with referred factors. Therefore, the traditional evaluation system based mainly on color difference may be reducing accuracy.

Keywords: Architectural coating, Weatherability, Multivariate analysis, Environmental degradation factors, Outdoor exposure test, Modified brightness

建築用塗料, 耐候性, 多変量解析, 環境劣化因子, 屋外暴露試験, 明度補正

1. はじめに

建築用塗料の耐候性に関して, 屋外暴露試験が多く実施されており, その結果も多く報告されている¹⁻⁶⁾。その耐候性を評価する指標として, 光沢残存率や色差などがあるが, 「色差」については, 色相・彩度・明度の変化量が複合されたものである⁷⁾。

屋外暴露試験によってそれらの値が変化する原因は, 前報⁸⁾で「塵埃が付着することで, 明度低下を生ずる」ことを指摘したように, 他の要素変化の原因と同じではない。

今回「着色塗料」の屋外暴露試験結果を解析するに際して, 測色時に得られる明度 (L 値), 黄~青味の彩度 (b^* 値) を精査したところ, 顔料種によってそれぞれ特有の変化があることが認められ, 「色差の値」に基づくこれまでの耐候性評価手法の精度を改善する手がかりが得られた。

さらに, 著者らは塗料の耐候性に関わる「環境劣化因子」である紫外線・熱 (温度)・水分など⁹⁾ を, 全国各地における気象観測結果から推定しているのを, これらを説明変数とする重回帰式により, 特性変化を表現することを試みた。

2. 試料

本報では着色塗料を扱うが, 展色剤として耐候性が高いとされる

ウレタン樹脂を選定した。これは他の耐候性試験プロジェクト^{2, 3)}でも共通である。白色体質顔料として酸化チタンを配合した塗装系に, 表-1に示すような b^* 値の絶対値が大きい黄色顔料 (有機系と無機系)・青色顔料 (有機系) と, L 値が小さい黒色顔料を混合した塗料を調整し, これらを 300×90mm の鉄板に塗布した。今回の白色試料は, 前報⁸⁾の「白色ウレタン樹脂塗料: UE」と同一で, 明度補正のために参照される。

表-1 供試塗料の種類

記号	色調	一般名・組成	顔料	顔料濃度 (phr)*
WHT	白	ウレタン樹脂塗料/acrylic polyol isocyanate 架橋	titanium dioxide	80
YEL-O	黄(有機)	"	isoindoline yellow	20
YEL-I	黄(無機)	"	lead chromate	50
BLU	青	"	phthalocyanine copper	20
BLK	黒	"	carbon black	5

phr: 樹脂固形分に対する顔料濃度の百分率

*1 関西ペイント販売㈱ 執行役員・工修

*2 市立前橋工科大学 教授・工博

*3 ウェザリングワークショップ 工博

Executive Director, Kansai Paint Sales Co., Ltd., M. Eng.
Prof., Maebashi Institute of Technology, Dr. Eng.
Weathering Workshop, Dr. Eng.

3. 屋外暴露試験

前報⁸⁾と同様に、国内の代表的な気候区分に属する、恵庭（北海道）・つくば（茨城）・大田（東京）・平塚（神奈川）・尼崎（兵庫）・沖永良部（鹿児島）にて、南（記号：S）／北（N）垂直面に暴露した。恵庭では1987年9月より、つくば・大田・尼崎・沖永良部では同年10月より、平塚では同年11月より試験を開始して、1991年まで4年間の1年経過毎に試料を回収した。（前報⁸⁾で「1988年10月より試験を開始」と誤って記したが、本報の通り訂正する。）

4. 屋外暴露試験の結果

回収された試料を、水道水を流しながらウーローラーを用いて水洗後に、BYK 社製マイクロトリグロス光沢計を用いて 入射角：60°での光沢（記号：G）と、Minolta 社製 CR300 型 色差計を用いて明度（L）・黄～青軸の彩度（b*）を、特異的な変色部分を避けて、各試料の概ね中心部分およびその上下 10cm センチ付近の3ヶ所を、それぞれ3回測定してこれらを平均化した。前報で提案したように「白色試料の明度変化量： ΔL_w 」で、他の試料の明度変化を補正した後の値（以後、補正後の明度）： $\Delta L - \Delta L_w$ 」も求めた。これらの4年経過時点までの屋外暴露試験の結果を表-2に示す。また、暴露地点別に光沢変化の経時変化を図-1に、明度と4試料の「補正後の明度変化」を図-2と図-3に、3つの着色試料のb*値を図-4に示す。

光沢 ---- 初期段階は緩やかで経年が進むと変化の速度が大きくなる傾向があり、これは指数関数的な変化に似ている。南面が北面より光沢減少が速く、亜熱帯の沖永良部にて暴露された試料、それに次いで大田で暴露されたもので速い。

明度 ---- 白色試料で補正すると明るい黄色試料（YEL-O, YEL-I）では1年経過後よりほぼ一定となる傾向があり、前報で「白色試料で明度変化が一定となる」ことと共通である。暗色の青色試料（BLU）と黒色試料（BLK）では、経過年によって変動はあるが概ね明度が上昇している。南面が北面より変化が大きいが、沖永良部では南北であまり差がないことに着目できる。

b*値 ---- 有彩の3試料（YEL-O, YEL-I, BLU）については、年数が増えると絶対値が減少して彩度が低下する。この指標でも、YEL-I, BLUに関して沖永良部では南北面の差が顕著ではない。

5. 環境劣化因子による重回帰分析

高分子素材の屋外耐久性を予測するため、特性変化を作用因子の重回帰式で表す手法が提案されている¹⁰⁾。塗料などの「環境劣化因子」の主要なものに関して、著者らは気象要素から推定する手法を報告しており、いくつかの作用因子で南北面のおよその差も把握している。前報⁸⁾では、気象要素である「降水量」・「日最高気温」・「水平面紫外線量」を用いて重回帰分析をおこなっていたが、本報では、既報に示した「環境劣化因子」の推定値、あるいはそれに基づく値

表-2 着色塗料の光沢・明度・b*値の経時変化

試料	方位	洗浄 期間(年)→	評価 項目	地 点																											
				恵庭				つくば				大田				平塚				尼崎				沖永良部							
				1.	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
				0																											
WHT	S	あり	G	87.6	80.2	65.1	40.6	29.8	84.1	76.7	55.7	35.8	76.9	51.1	29.5	21.9	80.4	50.2	25.1	14.1	78.7	51.6	25.6	17.4	65.7	39.1	16.3	13.8			
			L*	96.9	95.7	93.8	95.3	96.2	95.8	94.1	95.5	96.1	95.2	93.2	93.8	95.6	95.5	95.2	95.8	96.3	95.7	95.0	96.5	96.8	95.4	96.5	96.7	96.9			
			ΔL^*w	-1.2	-3.1	-1.6	-0.7	-1.1	-2.8	-1.4	-0.8	-1.7	-3.7	-3.1	-1.3	-1.4	-1.7	-1.1	-0.6	-1.2	-1.9	-0.4	-0.1	-1.5	-0.4	-0.2	0.0				
			b*	1.4	2.7	3.8	3.7	2.9	2.7	3.3	2.9	2.2	3.0	4.2	2.9	2.7	2.8	3.3	2.8	2.0	3.2	3.8	2.8	2.3	3.0	3.5	2.7	2.8			
	N	あり	G	87.6	83.2	77.8	66.8	45.9	85.9	80.9	73.6	55.0	81.0	70.1	54.5	35.7	81.8	62.9	33.1	17.6	81.2	63.3	35.7	21.2	67.2	43.4	25.0	13.1			
			L*	96.9	95.4	95.2	95.8	96.2	96.1	94.8	94.9	95.3	91.2	89.9	91.6	93.6	94.8	91.3	94.2	96.0	95.2	93.5	94.8	95.4	95.4	96.1	96.8	96.9			
			ΔL^*w	-1.5	-1.7	-1.1	-0.7	-0.8	-2.1	-2.0	-1.6	-5.7	-7.0	-5.3	-3.3	-2.1	-5.6	-2.7	-0.9	-1.7	-3.4	-2.1	-1.5	-1.5	-0.8	-0.1	0.0				
			b*	1.4	2.5	3.5	2.8	2.4	2.8	3.1	2.9	2.2	3.3	4.6	3.7	2.9	2.8	3.9	2.9	2.5	3.3	4.1	3.3	2.4	3.2	3.1	3.3	2.6			
YEL-O	S	あり	G	88.2	81.3	45.0	17.6	7.9	84.4	59.2	28.3	15.6	78.1	42.0	16.9	6.6	84.3	50.2	25.3	12.9	77.7	39.9	18.9	7.8	66.9	32.6	12.2	6.3			
			L*	76.1	80.5	79.6	80.8	79.5	80.3	79.3	79.9	79.3	79.6	77.1	77.3	77.4	80.2	79.5	76.4	78.9	79.8	78.8	80.1	79.2	80.0	79.6	80.8	79.8			
			$\Delta L^*-\Delta L^*w$	5.6	6.6	6.3	4.1	5.3	6.0	5.2	4.0	5.2	4.7	4.3	2.6	5.5	5.1	1.4	3.4	4.9	4.6	4.4	3.2	5.4	3.9	4.9	3.7				
			b*	97.0	94.7	76.8	61.6	55.5	95.8	83.2	73.9	68.2	93.1	77.4	75.0	77.4	95.0	84.4	71.7	68.3	93.0	79.2	71.2	67.2	90.7	72.7	63.8	63.8			
	N	あり	G	88.2	86.2	73.4	50.9	26.2	86.7	79.4	61.0	33.3	82.5	76.6	59.5	36.1	84.7	74.1	62.4	39.2	81.5	66.9	42.1	18.3	76.2	44.8	19.4	5.0			
			L*	75.7	76.1	74.7	76.3	78.3	76.1	74.9	75.4	76.8	75.0	70.7	70.1	72.0	75.6	70.4	69.2	78.3	75.3	72.3	73.8	77.8	74.7	74.6	76.0	80.9			
			$\Delta L^*-\Delta L^*w$	1.9	0.7	1.7	3.3	1.2	1.3	1.7	2.7	5.0	2.0	-0.3	-0.4	2.0	0.3	-3.8	3.5	1.3	0.0	0.2	3.6	0.5	-0.3	0.4	5.2				
			b*	97.0	96.3	89.7	80.7	68.6	96.8	90.7	85.4	72.5	94.3	85.7	81.5	68.8	95.5	85.9	82.6	71.5	94.3	85.7	80.7	69.3	93.0	82.7	69.5	61.1			
YEL-I	S	あり	G	88.5	86.6	81.6	76.1	64.9	86.6	85.8	73.5	73.5	79.0	68.1	51.6	35.6	85.4	80.7	69.0	55.2	82.4	71.3	52.6	37.8	74.2	61.8	53.6	46.9			
			L*	74.8	78.2	76.7	78.0	77.5	78.5	77.4	78.1	78.5	78.6	77.0	76.5	75.6	79.1	77.8	75.3	78.5	78.9	77.5	78.6	79.4	78.7	78.4	79.6	79.6			
			$\Delta L^*-\Delta L^*w$	4.6	5.0	4.8	3.4	4.9	5.4	4.7	4.5	5.5	5.9	4.8	2.1	5.7	4.7	1.6	4.3	5.3	4.6	4.2	4.7	5.4	4.0	5.0	4.8				
			b*	112.4	106.8	102.4	100.8	90.9	107.6	102.4	99.4	92.8	104.4	97.8	106.3	83.9	107.3	104.0	97.0	90.4	105.0	98.8	97.2	91.8	104.2	101.5	100.4	94.7			
	N	あり	G	88.5	86.5	84.4	80.7	75.1	87.9	87.1	83.2	81.0	80.4	78.5	70.5	52.3	85.5	85.7	82.4	71.7	82.6	78.7	67.5	53.6	78.2	69.7	60.4	50.0			
			L*	75.3	73.9	72.2	73.9	79.5	74.2	72.7	73.3	78.4	73.5	70.8	71.1	74.2	74.5	70.8	68.1	79.5	74.0	72.4	73.8	78.5	73.8	73.2	74.9	80.2			
			$\Delta L^*-\Delta L^*w$	0.1	-1.4	-0.3	4.9	-0.3	-0.5	0.0	4.7	3.9	2.5	1.1	2.2	1.3	1.1	-4.5	5.1	0.4	0.5	0.6	4.7	0.0	-1.3	-0.3	4.9				
			b*	112.4	107.7	105.1	103.0	94.4	108.9	104.6	100.8	94.0	104.8	98.3	115.6	84.2	108.3	99.5	98.1	91.2	106.4	101.9	100.9	90.2	104.7	102.1	101.6	95.2			
BLU	S	あり	G	86.5	85.3	80.1	79.4	71.6	85.6	84.4	81.5	81.1	79.6	76.8	68.3	56.4	85.8	83.7	83.9	77.1	84.0	76.4	69.7	61.2	78.4	64.6	59.3	50.8			
			L*	72	4.0	13.9	11.1	20.7	3.6	10.7	13.0	20.7	6.9	10.4	5.0	23.4	5.8	7.0	9.0	21.9	6.5	13.8	12.0	22.0	7.2	10.2	11.6	21.3			
			$\Delta L^*-\Delta L^*w$	-2.0	9.8	5.5	14.2	-2.5	6.3	7.2	14.3	1.4	6.9	0.9	17.5	0.0	1.5	2.9	15.3	0.5	8.5	5.2	14.9	1.5	3.4	4.6	14.1				
			b*	-25.9	-25.5	-18.5	-20.9	-12.2	-25.7	-19.4	-17.9	-11.7	-21.2	-18.7	-14.4	-9.2	-25.7	-24.0	-19.6	-10.2	-22.8	-18.7	-18.9	-12.3	-22.2	-19.5	-20.1	-12.5			
	N	あり	G	86.5	85.8	81.1	80.2	71.0	87.2	85.5	84.4	80.9	82.1	79.9	70.9	57.9	85.1	86.3	83.7	78.5	83.2	79.2	72.6	65.6	78.9	68.4	62.4	53.7			
			L*	8.7	6.9	9.5	11.3	20.4	6.8	10.0	10.6	22.4	8.1	10.4	8.4	23.2	7.8	8.9	8.8	21.0	8.3	10.2	10.4	21.4	8.8	10.3	11.9	20.8			
			$\Delta L^*-\Delta L^*w$	-0.3	2.5	3.7	12.4	-1.1	3.4	3.9	15.3	5.1	8.7	5.0	17.8	1.2	5.8	2.8	13.2	1.3	4.9	3.8	14.2	1.6	2.4	3.3	12.1				
			b*	-25.9	-25.8	-22.1	-20.5	-12.2	-27.2	-21.5	-23.7	-13.0	-23.7	-20.6	-15.2	-10.9	-25.7	-23.1	-20.9	-13.1	-23.6	-19.2	-19.9	-11.8	-23.4	-21.4	-19.5	-13.1			
BLK	S	あり	G	86.9	85.0	79.2	72.6	64.4	86.0	86.1	86.5	83.6	80.5	77.3	69.4	59.5	86.9	86.8	85.9	82.2	85.2	77.5	75.5	70.4	73.0	47.0	34.9	26.4			
			L*	7.6	5.0	9.3	12.0	21.1	5.0	11.9	11.9	22.0	7.9	12.2	3.0	24.5	5.7	6.8	10.6	23.4	7.7	11.8	12.8	23.4	8.7	12.9	15.0	20.7			
			$\Delta L^*-\Delta L^*w$	-1.4	4.8	6.0	14.2	-1.5	7.1	5.7	15.2	2.0	8.3	-1.5	18.2	-0.5	0.9	4.1	16.4	1.3	6.1	5.6	15.9	2.6	5.7	7.6	13.1				
			b*	-0.9	-1.2	-2.9	-3.7	-0.9	-0.9	-3.2	-3.3	-0.3	-1.0	-2.9	6.1	-0.7	-0.8	-1.9	-2.9	-0.7	-1.4	-3.0	-2.7	-0.6	-2.1	-2.5	-2.8	-1.7			
	N	あり	G	86.9	85.0	78.5	72.5	62.9	87.4	86.0	84.0	84.0	82.1	80.3	71.4	63.9	84.5	86.9	85.6	82.2	84.9	83.8	82.4	75.7	76.0	57.9	44.1	32.0			
			L*	7.8	7.6	10.1	12.9	20.8	7.2	9.6	10.6	22.2	8.5	10.6	7.7	25.1	8.1	10.3	9.6	23.2	8.4	10.1	11.4	23.5	9.2	11.1	13.9	23.2			
			$\Delta L^*-\Delta L^*w$	1.3	4.0	6.2	13.7	0.2	3.9	4.8	16.0	6.4	9.8	5.2	20.6	2.4	8.1	4.5	17.3	2.3	5.7	5.7	17.2	2.9	4.1	6.2	15.4				
			b*	-0.9	-0.9	-2.8	-3.8	-1.2	-0.7	-3.2	-3.4	-0.2	-1.0	-2.7	4.5	-0.7	-0.5	-2.7	-2.9	-0.5	-0.9	-2.7	-2.3	-0.5	-2.1	-2.7	-3.3	-1.8

図-1 光沢変化の地域差

図-2 明度の地域差

を参照する。

5. 1 環境劣化因子

水分 --- 結露時間, Wetness time (記号: WT) で定量化される¹¹⁾が、垂直面ではまだ推定値が得られていないので、暫定的に

図-3 補正後の明度の地域差

図-4 b*値の地域差

30°面の値を参照する。暴露地点と結露時間の推定地点が離れている場合は、当該地点の両側にある気象観測官署の値を基に、距離により按分した(他の環境因子でも同様)。また、方位の影響を変数: $\langle N \rangle$ を導入(南面では0, 北面では1の値)して解析する。

熱(温度) --- ブラックパネル温度に基づく「熱劣化量マップ・南/北垂直面」¹²⁾を参照し、変動する気象環境条件下での特性変化に等しくなるような、仮定の一定温度:相当環境温度, Equivalent environmental temperature (ET) を求めた。この指標は化学反応速度論に基づき、熱(温度)による促進劣化作用を考慮したものである。

紫外線量, Solar ultraviolet radiation dose (UV) --- 沖永良部の水平面での推定値が示されている資料¹³⁾で、暴露地点に最も近

い気象観測官署での値に基づく。館野（茨城県つくば市）において、水平面：南垂直面：北垂直面の年間紫外線量の比が1：0.67：0.30と推定された¹⁴⁾のでこの比率を乗じた。緯度や観測年によって比率はいくらか異なる。沖永良部での南／北垂直面の紫外線量については、基礎データである全天日射量が観測されていないので、最新の手法¹⁴⁾が適用できない。水平面と南北垂直面での紫外線量の比率も緯度や気候の季節変化で変動し、つくばの値で代替することで誤差があるのが現状であり、まず「主要な作用因子を抽出する」ことを第一として、本報の解析ではある程度の誤差は許容した。

凍結融解回数、Freezing/thawing cycle (FZ) ---- 氷点温度以下のブラックパネル温度に基づく「凍結融解回数マップ・南／北垂直

表-3 環境劣化因子と SO₂ 濃度

因子 (記号)	結露 時間 (WT)	相当 環境温度 (ET)	紫外線量 (UV)	凍結融解 回数 (FZ)	SO ₂ 濃度 (SO)
単位	hrs/year	deg C	MJ/m ² /year	cycle/year	ppm
方位/角度	S/30	S/90 N/90	S/90 N/90	S/90 N/90	
暴露地点					
恵庭	1153	20.3 12.9	128 57	171 160	0.005
つくば	2724	24.4 17.5	137 61	127 123	0.004
大田	881	25.1 19.4	138 61	36 25	0.011
平塚	1451	25.4 19.5	141 62	41 33	0.007
尼崎	636	25.6 20.6	147 64	34 28	0.008
沖永良部	1044	29.0 24.4	160 70	0 0	—

表-4 光沢残存率の環境劣化因子による重回帰分析

試料	log(G/G ₀)=C ₀ +(C _{WT} •WT+C _{ET} •ET+C _{UV} •UV+C _{FZ} •FZ+<N>)•Yr の各係数						重相関 係数 R
	C ₀	C _{WT}	C _{ET}	C _{UV}	C _{FZ}	<N>	
WHT	1.73E-2	—	—	-1.20E-3	—	—	0.7714
YEL-O	1.19E-1	—	—	-1.95E-3	—	—	0.8769
YEL-I	1.38E-2	—	—	-4.47E-4	—	—	0.7425
BLU	-5.95E-3	—	—	-2.11E-4	—	—	0.5623
BLK	-6.76E-5	—	—	-3.12E-4	—	—	0.4273
WHT	1.69E-1	—	-8.34E-3	—	—	—	0.9153
YEL-O	2.76E-1	—	-1.19E-2	—	—	—	0.9155
YEL-I	5.78E-2	—	-2.87E-3	—	—	—	0.8169
BLU	2.74E-2	—	-1.59E-3	—	—	—	0.7223
BLK	4.75E-2	—	-2.31E-3	—	—	—	0.5421
WHT	1.78E-1	—	-9.82E-3	2.86E-4	—	—	0.9193
YEL-O	2.56E-1	—	-8.38E-3	-6.83E-4	—	—	0.9264
YEL-I	5.63E-2	—	-2.60E-3	-5.26E-5	—	—	0.8179
BLU	3.14E-2	—	-2.29E-3	1.36E-4	—	—	0.7414
BLK	5.28E-2	—	-3.24E-3	1.80E-4	—	—	0.5540
WHT	1.49E-1	2.94E-5	-1.14E-2	3.28E-4	3.91E-5	—	0.9551
YEL-O	2.78E-1	5.06E-5	-1.23E-2	-2.83E-4	-4.71E-4	—	0.9509
YEL-I	3.87E-2	2.00E-5	-3.68E-3	-1.69E-5	1.48E-5	—	0.9296
BLU	2.28E-2	1.48E-5	-3.17E-3	1.83E-4	-2.27E-5	—	0.8730
BLK	3.42E-2	1.73E-5	-4.12E-3	1.95E-4	3.81E-5	—	0.6518
WHT	1.52E-1	2.66E-5	-8.10E-3	-2.79E-4	1.49E-4	-2.95E-2	0.9560
YEL-O	2.66E-1	6.22E-5	-2.58E-2	2.22E-3	-9.27E-4	1.22E-1	0.9582
YEL-I	4.00E-2	1.87E-5	-2.22E-3	-2.88E-4	6.40E-5	-1.31E-2	0.9308
BLU	2.36E-2	1.41E-5	-2.34E-3	2.83E-5	5.28E-6	-7.49E-3	0.8740
BLK	3.50E-2	1.67E-5	-3.32E-3	4.68E-5	6.50E-5	-7.21E-3	0.6522

面」¹⁵⁾を参照した。

各暴露地点におけるこれらの値を表-3にまとめる。

5. 2 重回帰分析

光沢残存率については、その対数：log(G/G₀)を目的変数とし、「4つの環境劣化因子と方位のうちのひとつ、および組み合わせたもの」と経過時間、Yr (1, 2, 3, 4 年)の積を説明変数として重回帰分析を行った。目的変数のデータ数は、暴露地点(6箇所)×方位(2条件)×経過時間(4年)の積でN=48となり、その結果を表-4に示す。

補正後の明度：ΔL-ΔL_Wを目的変数とする重回帰分析の結果を表-5に、有彩試料のb*値の分析結果を表-6にそれぞれを整理する。

表-5 補正後の明度の環境劣化因子による重回帰分析

試料	ΔL-ΔL _W =C ₀ +(C _{WT} •WT+C _{ET} •ET+C _{UV} •UV+C _{FZ} •FZ+<N>)•Yr の各係数						重相関 係数 R
	C ₀	C _{WT}	C _{ET}	C _{UV}	C _{FZ}	<N>	
YEL-O	1.89	—	—	4.34E-3	—	—	0.3079
YEL-I	1.22	—	—	6.59E-3	—	—	0.4220
BLU	5.93E-1	—	—	2.17E-2	—	—	0.6224
BLK	2.00	—	—	1.98E-2	—	—	0.5419
YEL-O	2.75	—	4.49E-3	—	—	—	0.0546
YEL-I	1.60	—	2.37E-2	—	—	—	0.2597
BLU	-2.33	—	1.54E-1	—	—	—	0.7544
BLK	-1.60	—	1.57E-1	—	—	—	0.7366
YEL-O	3.25	—	-8.34E-2	1.70E-2	—	—	-0.5620
YEL-I	2.01	—	-4.84E-2	1.39E-2	—	—	0.4885
BLU	-2.55	—	1.93E-1	-7.46E-3	—	—	0.7609
BLK	-2.15	—	2.55E-1	-1.88E-2	—	—	0.7743
YEL-O	3.26	1.86E-5	-8.47E-2	1.71E-2	-1.26E-4	—	0.5622
YEL-I	2.16	2.51E-5	-5.26E-2	1.47E-2	-1.26E-3	—	0.4940
BLU	-3.80	-3.21E-4	2.37E-1	-1.51E-2	1.14E-2	—	0.8118
BLK	-3.34	-3.64E-4	3.00E-1	-2.64E-2	1.12E-2	—	0.8160
YEL-O	3.42	-1.32E-4	9.02E-2	-1.53E-2	5.77E-3	-1.58	0.6116
YEL-I	2.22	-3.53E-5	1.75E-2	1.73E-3	1.11E-3	-6.32E-1	0.5016
BLU	-3.95	-1.85E-4	7.79E-2	1.43E-2	6.06E-3	1.43	0.8165
BLK	-3.56	-1.65E-4	6.88E-2	1.65E-2	3.35E-3	2.08	0.8252

表-6 有彩試料の b* 値の環境劣化因子による重回帰分析

試料	Δb* =C ₀ +(C _{WT} •WT+C _{ET} •ET+C _{UV} •UV+C _{FZ} •FZ+<N>)•Yr の各係数						重相関 係数 R
	C ₀	C _{WT}	C _{ET}	C _{UV}	C _{FZ}	<N>	
YEL-O	-2.74	—	—	-5.62E-2	—	—	0.7955
YEL-I	-5.63	—	—	-2.58E-2	—	—	0.6318
BLU	1.29	—	—	2.19E-2	—	—	0.7118
YEL-O	2.97	—	-3.64E-1	—	—	—	0.8837
YEL-I	-2.38	—	-1.79E-1	—	—	—	0.7498
BLU	-1.50	—	1.52E-1	—	—	—	0.8474
YEL-O	2.85	—	-3.43E-1	-4.16E-3	—	—	0.8841
YEL-I	-2.20	—	-2.10E-1	6.13E-3	—	—	0.7530
BLU	-1.66	—	1.81E-1	-5.55E-3	—	—	0.8515
YEL-O	5.35	1.58E-3	-4.96E-1	1.66E-2	-2.83E-2	—	0.9385
YEL-I	-1.21	3.85E-4	-2.54E-1	1.29E-2	-9.78E-3	—	0.7781
BLU	-2.59	-4.89E-4	2.31E-1	-1.27E-2	9.91E-3	—	0.8888
YEL-O	5.17	1.74E-3	-6.82E-1	5.12E-2	-3.46E-2	1.68	0.9399
YEL-I	-1.06	2.42E-4	-8.81E-2	-1.78E-2	-4.19E-3	-1.49	0.7821
BLU	-2.69	-3.92E-4	1.18E-1	8.19E-3	6.12E-3	1.01	0.8916

6. 考察

6. 1 相当環境温度と紫外線

光沢残存率 …… 時間経過とともに減少しており、「相当環境温度, *ET*」および「紫外線, *UV*」の係数はマイナスとなっている。*ET* との相関係数が *UV* のそれより大きいことは、「紫外線量のみで耐候性を説明する」ことには限界があることを示している。「*ET* と *UV*」の相乗効果をみると、相関係数の上昇は僅かで *UV* の係数にはプラスの場合もあって、これまでの認識とは異なるように思われるが、「日射量データ」のみから *UV* が推定されるのに対して、*ET* は、その算出の基となるブラックパネル温度を推定する際に「気温」と「日射量データ」を参照しており、既に「紫外線と熱」の相乗効果を取り込んだ指標となっているためである。

補正後の明度 …… 明るい黄色試料では、時間経過に関わらず一定であって、*ET*・*UV* とともに相関性はなく、地域差も認められない。暗色の青色と黒色試料では明度が上昇して、*ET* のみの相関係数が *UV* のみより大きく、*ET* と *UV* の相乗効果も少ない。

*b**値 …… 0 に近づいて絶対値が減少するような、鮮やかさが失われる。*ET* のみの相関係数は *UV* のみより大きく、相乗効果も少ない。

6. 2 結露時間・凍結融解・方位係数

ET と *UV* に加え、「結露時間, *WT*」「凍結融解回数, *FZ*」「方位係数, *<N>*」を追加することで、説明変数が増えたことで重相関係数は上昇する。

光沢残存率 …… *WT*・*FZ*・*<N>* の効果は顔料種によって様々ではあるが、*ET* は常にマイナスの値となっており主要な指標であることが裏づけられる。

補正後の明度 …… 明るい黄色試料では、説明変数の種類が増えても、先に述べたように、明度は時間経過に関わらず一定であるため、その効果は少ない。暗色試料では、*ET* の係数はプラスである。*FZ* の係数もプラスで、物理的な作用によって明度上昇に寄与していることが推察される。

*b**値 …… *ET* の係数は黄色試料ではマイナス、青色試料ではプラスのままである。*FZ* の係数の正負は *ET* と同じで、鮮やかさが失われることに寄与している。

全評価項目に共通して、*WT* の係数の正負は *ET* の係数とは逆である。絶対湿度が一定であれば気温が高くなると相対湿度が低下するため、主に相対湿度によって決まる *WT* は気温が高いと低下する¹¹⁾。ブラックパネル温度より求められる *ET* は、6.1 で述べたように気温と日射量の増加によって高くなる。本報で扱っている試料の温度は、ブラックパネルほど高くないので、*ET* を説明変数として導入したことで、結果的に「温度や日射量の効果が、過剰に影響している」可能性があり、それを補正するため、*WT* の係数が *ET* と正負が異なるのだらう。垂直面での *WT* が得られていない段階での考察は、今後精査の上修正されることも考えられる。

6. 3 SO₂濃度の影響

高分子素材の劣化には、酸性雨の影響がある^{16~17)}とされている。沖永良部以外の5ヶ所の暴露地点で、大気汚染状況が観測されている¹⁸⁾ので、SO₂濃度(*SO*)の年平均の観測結果を表-3に示す。沖永良部を除く5地点について(*N*=40)、説明変数に *SO* を追加した場合を表-7に示す。

SO の観測値の精度は他の因子に比べて低いので、重回帰分析の結果として得られたその係数:*C*_{SO}の意味は吟味されねばならないが、「酸性雨の影響」とも思われる特性変化の兆候を示す試料もみられる。

光沢残存率 …… *SO* を考慮しない場合に比べて、試料:BLU・BLK では相関係数が上昇し、*SO* の係数はマイナスであることから、これらの試料では *SO* が特性変化に寄与している。SO₂濃度は「大田が高い」ことで図-1との対応がある。他の大気汚染物質が大きく関係していることも考えられるので、今後 SO₂成分のみを選択的に作用させるような、室内促進耐候性試験などに基づいた考察が必要と思われる。

補正後の明度 …… *SO* を導入しない段階で、YEL・O の重相関係数が表-5で0.6116であった値に比べ、沖永良部を除いた5地点のみの表-7では0.9180に上昇している。本報では考慮していない沖永良部特有の環境因子、例えば前報⁸⁾で塩分の作用に着目したが、この供試塗料に限って強く作用していたことが取り除かれたためとも考えられる。*SO* を説明変数に加えることは、表-7に示すように重相関係数は変わらないか、僅かな増加にとどまり、効果は少ない。

表-7 SO₂濃度を考慮した重回帰分析の結果

環境劣化因子による重回帰式の各係数								重相関係数	
試料	C ₀	C _{WT}	C _{ET}	C _{UV}	C _{FZ}	<N>	C _{SO}	R	
光沢									
WHT	log(G/G ₀)=C ₀ +(C _{WT} ・WT+C _{ET} ・ET+C _{UV} ・UV+C _{FZ} ・FZ+<N>+C _{SO} ・SO)・Yr	1.54E-1	2.41E-5	4.40E-4	-1.79E-3	2.30E-4	-9.69E-2	—	0.9468
YEL-O		2.44E-1	4.70E-5	-9.66E-3	-5.16E-4	-6.26E-4	1.56E-2	—	0.9763
YEL-I		4.84E-2	1.57E-5	6.19E-4	-8.43E-4	1.63E-4	-3.57E-2	—	0.9245
BLU		2.28E-2	1.40E-5	-1.78E-3	-8.73E-6	-4.61E-5	-9.03E-3	—	0.8704
BLK		1.58E-2	1.49E-5	3.80E-4	-3.19E-4	-1.12E-4	-2.06E-2	—	0.8360
補正後の明度									
WHT	ΔL・ΔL _{WT} =C ₀ +(C _{WT} ・WT+C _{ET} ・ET+C _{UV} ・UV+C _{FZ} ・FZ+<N>+C _{SO} ・SO)・Yr	1.53E-1	3.65E-5	-4.23E-3	-1.65E-3	3.91E-4	-1.07E-1	9.15	0.9591
YEL-O		2.44E-1	4.35E-5	-9.00E-3	-4.95E-4	-6.42E-4	2.12E-2	-1.86	0.9765
YEL-I		4.94E-2	6.66E-6	2.37E-3	-7.89E-4	1.20E-4	-2.07E-2	-4.91	0.9420
BLU		2.37E-2	5.98E-6	-2.35E-4	3.96E-5	-8.37E-5	4.17E-3	-4.35	0.9285
BLK		1.71E-2	3.63E-6	2.55E-3	-2.52E-4	-1.65E-4	-2.05E-3	-6.10	0.9670
補正後の色度									
YEL-O	Δa・Δa _{WT} =C ₀ +(C _{WT} ・WT+C _{ET} ・ET+C _{UV} ・UV+C _{FZ} ・FZ+<N>+C _{SO} ・SO)・Yr	-6.58	-4.12E-5	2.39E-2	-2.94E-2	2.92E-3	3.86	—	0.9180
YEL-I		2.48	-9.32E-5	7.34E-2	-9.32E-3	2.93E-3	-1.09	—	0.4835
BLU		-4.16	-3.60E-4	2.65E-1	-1.75E-2	9.34E-3	1.94E-1	—	0.8246
BLK		-3.98	-3.10E-4	2.22E-1	-8.91E-3	6.21E-3	1.12	—	0.8249
YEL-O	Δb・Δb _{WT} =C ₀ +(C _{WT} ・WT+C _{ET} ・ET+C _{UV} ・UV+C _{FZ} ・FZ+<N>+C _{SO} ・SO)・Yr	-6.57	-1.57E-4	4.62E-2	-2.87E-2	2.38E-3	4.05	-62.9	0.9183
YEL-I		2.48	-9.42E-5	7.36E-2	-9.31E-3	2.92E-3	-1.09	-0.546	0.4835
BLU		-4.20	-3.23E-5	2.02E-1	-1.94E-2	1.09E-2	-3.45E-1	178	0.8317
BLK		-4.01	-6.74E-5	1.75E-1	-1.04E-2	7.35E-3	7.20E-1	131	0.8283
b*値									
YEL-O	Δb* = C ₀ +(C _{WT} ・WT+C _{ET} ・ET+C _{UV} ・UV+C _{FZ} ・FZ+<N>+C _{SO} ・SO)・Yr	5.42	1.80E-3	-6.89E-1	5.75E-2	-4.09E-2	1.89	—	0.9516
YEL-I		-1.63E-1	2.97E-4	-1.68E-1	-9.12E-3	-2.63E-3	-1.22	—	0.8031
BLU		-3.20	-4.50E-4	1.91E-1	-1.68E-3	6.00E-3	6.65E-1	—	0.9066
YEL-O		5.39	2.03E-3	-7.34E-1	5.61E-2	-3.98E-2	1.51	125	0.9524
YEL-I		-1.58E-1	2.55E-4	-1.59E-1	-8.86E-3	-2.82E-3	-1.15	-22.7	0.8032
BLU		-3.26	4.55E-5	9.51E-2	-4.66E-3	8.32E-3	-1.49E-1	269	0.9250

b*値 …… 表-6に示した6地点の値に比べて、沖永良部のデータを除いた表-7の値では、重相関係数は若干上昇する。これにSOの影響を考慮すれば、重相関係数はいくらか大きくなる。

7. まとめ

本報で扱った着色塗料の屋外暴露試験とその重回帰分析の結果から得られた知見は以下のとおりである。

1) 時間経過と共に光沢減少・彩度低下が認められ、これを種々の「環境劣化因子」によって重回帰分析を行ったところ、相関が高い因子が抽出できた。

環境劣化因子である、「紫外線」、および「ブラックパネル温度に基づく相当環境温度」は、特性変化と相関が高く、地域差の指標になる。特に相当環境温度は、日射量の効果を含んでおり、紫外線量よりも有効である。「凍結融解作用」は、物理的な特性変化因子として作用する試料もあった。「結露時間」は、「相当環境温度」による過剰な熱劣化作用を補正するような効果があり得る。

2) 白色塗料の明度低下量で、他の着色塗料の明度変化を補正したところ、明色塗料では、1年経過した後、一定の飽和状態に達し、環境劣化因子の影響はほとんどない。暗色塗料では経時的な明度上昇があり、環境劣化因子が作用することで説明できる。

3) 従って、これまで「色差」を指標として塗料の耐候性を評価していたが、その成分：明度と彩度は、それぞれ別の因子が作用して特性変化も異なるため、解析精度を高められなかった懸念がある。

参考文献

- 1) 建設省建築研究所、日本建築仕上材工業会：建築用仕上塗材の耐久性能に関する研究（共同研究最終報告書）、平成2年1月
- 2) 日本塗料工業会・耐候性研究会：建築構造用塗料の耐候性に関する調査研究〔報告書・第1報〕、平成9年10月
- 3) 日本塗料工業会・耐候性研究会：建築構造用塗料の耐候性に関する調査研究〔報告書・第2報〕、平成12年10月
- 4) (社)建築業協会・高耐候性材料評価研究会（岩井孝次、矢野瑞穂ほか）、外壁用塗料の耐候性評価に関する研究（その1～43）、日本建築学会大会学術講演梗概集・A、1991～2000年
- 5) 景観材料の美観性維持に関する調査研究委員会：景観維持に関する調査報告（その3）、（社）日本建材産業協会、平成12年3月
- 6) 新発電システムの標準化に関する調査研究委員会（塗料系分科会）：新発電システムの標準化に関する調査研究（新発電関連要素機器の長期耐久性及び寿命予測の標準化）成果報告書、（財）日本ウェザリングテストセンター
- 7) JIS Z 8730 色差表示方法
- 8) 平田信人、櫻野紀元、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
- 9) Jonathan W. Martin: A Systems Approach to the Service Life Prediction Problem for Coating Systems, Proceedings of Corrosion 97 Research Topical Symposia(New Orleans), The National Association of Corrosion Engineers, pp.235-256, 1997
- 10) T. Ogawa: Numerical Prediction of Weatherability by Applying the Method of Multivariate Analysis for Plastic Film, Proceedings of 5th international symposium on weatherability(Tokyo), Material Life Society, Japan, pp.85-90, 2002.10
- 11) 富板 崇、櫻野紀元：南30°面における観測結果に基づく結露時間の推定、日本建築学会構造系論文集、No.563, pp.29-35, 2003.1
- 12) 富板 崇：水平・傾斜・垂直面でのブラックパネル温度に基づく熱による特性変化予想マップ、日本建築学会構造系論文集、No.538, pp.43-47, 2000.12
- 13) 楡木 堯、富板 崇：国内の紫外域日射量マップ、建築研究資料、No.60、建設省建築研究所、1987.3
- 14) 富板 崇：傾斜・垂直面における紫外線量の推定手法、日本建築学会構造系論文集、No.535, pp.29-34, 2000.9
- 15) 富板 崇、櫻野紀元、濱崎 仁：国内各地でのブラックパネル温度に基づく凍害要因の定量化、日本建築学会構造系論文集、No.563, pp.45-51, 2003.1
- 16) G. Frohnsdorff and L. W. Masters: The Meaning of Durability and Durability Prediction, Proceedings of 1st Durability of Building Materials and Components, pp.18-30, Ottawa, 1978
- 17) JIS Z 2381 大気暴露試験方法通則
- 18) 国立環境研究所・環境データベース「大気環境月間値・年間値データファイル」
- 19) Atlas Electric Devices Company: Weathering Testing Guidebook, 2001
- 20) 加川邦博：塗膜の耐候性のメカニズムと試験技術、塗装技術、第41巻11号、pp.53-62, 2002.10
- 21) 小西萌一：塗料分野の耐候性試験の現状、Proceedings of 2nd international symposium on weatherability(Kawaguchi), Material Life Society, Japan, pp.34-44, 1994.9

(2003年1月24日原稿受理、2003年6月26日採用決定)