

建築材料の耐久性に関する調査

Investigation on Durability of Building Materials

地方独立行政法人北海道立総合研究機構
建築研究本部 北方建築総合研究所

Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization
Building Research Department Northern Regional Building Research Institute

概要 Abstract

建築材料の耐凍害性の評価に関する研究 *Investigation on Durability of Building Materials*

谷口 円¹⁾、吉野 利幸²⁾、松村 宇³⁾、中村 暢³⁾
Madoka Taniguchi¹⁾, Toshiyuki Yoshino²⁾, Takashi Matsumura³⁾ and Tohru Nakamura³⁾

キーワード : 建築材料、耐久性、屋外暴露試験
Keywords : Building materials, Durability, Outdoor exposure test

1. 研究概要

1) 研究の背景

建築物の寿命が、構成する部材、材料の寿命に依存することは自明である。建築物の寿命予測、制御を行う上で、個々の材料の耐久性を定量的に知ることが必要不可欠となる。特に、屋外環境で使用する建築材料について耐久性を知りたいというニーズは一般消費者をはじめ発注者や設計者などにあり、建築材料の耐久性等に係る情報の整備が急務となっている。また、材料の耐久性を評価する方法として、日射、凍結融解など特定因子の強度を高めた室内促進暴露試験が行われる。しかしながら、短期間で劣化を付与できるものの、劣化の再現性や実環境における耐用年数との関係などが明らかとなっていない。

2) 研究の目的

建築材料の実環境下での耐久性に関するデータを収集するとともに、促進試験法と実環境下での耐久性との対応関係を明らかにする。

2. 研究内容

1) 窯業系サイディングの屋外暴露試験及び促進試験 (H7~17年度、H14~24年度)

- ・ねらい：窯業系サイディングの実環境での耐凍害性を把握し、耐凍害性に及ぼす環境要因の影響を明らかにするとともに、凍害劣化予測手法を構築する。
- ・試験項目等：屋外暴露実験（平成7~17年度：札幌市、北見市、北斗市、平成14~24年度：旭川市、札幌市、陸別町）、窯業系サイディングの促進凍結融解試験、凍害劣化予測手法の検討

2) 外断熱用外装材の屋外暴露試験及び促進試験 (H9~19年度)

- ・ねらい：外断熱建物に最も多く使われているセメント系の外断熱複合パネルの耐凍害性を明らかにする。
- ・試験項目等：屋外暴露実験（札幌市、北見市、北斗市）、外断熱複合パネルの促進凍結融解試験

3) 窯業系サイディング用シーリング材の屋外暴露試験及び促進試験 (H10~H22年度)

- ・ねらい：窯業系サイディング外壁に使用されるシーリング材の被着体からはく離や破断、汚れやチョーキング、ひび割れなどの耐久性に関する性能を把握する。
- ・試験項目等：屋外暴露実験（札幌市）、引張強度等の試験、材質分析

4) 屋根用・外壁用金属材の屋外暴露試験及び促進試験 (H16~H27年度)

- ・ねらい：フッ素塗装アルミニウム・亜鉛合金めっき鋼板や高耐久アクリル塗装 Zn・Al・Mg・Si 合金めっき鋼板など高耐候性や高耐食性を有すると考えられる塗装鋼板の実環境下での耐久性に関するデータを収集するとともに、促進劣化試験法との対応性を把握する。
- ・試験項目等：屋外暴露実験（旭川市、札幌市、留萌市、北斗市、陸別町）、促進耐候性試験および塩乾湿複合劣化試験、外観観察、質量変化、色差、光沢度

¹⁾ 環境研究部材建築技術 G 主査 ²⁾ 道総研フェロー（一般社団法人 北海道建築技術協会 専務理事） ³⁾ 環境研究部建築技術 G 研究主査 ⁴⁾ 環境研究部環境研究部建築技術 G 研究職員 1) Chief of Building Technics Group 2) Fellow of HRO 3) Researcher of Building Technics Group

3. 研究成果

1) 窯業系サイディングの屋外暴露試験及び促進試験（平成7～17年度、平成14～24年度）

実環境での耐凍害性に与えるサイディングの種類や製造方法の影響を明らかにした。また、劣化度指数（外観上の劣化程度）をはく離強さ比（凍結融解試験前後のはく離強さの比）から予測する手法を構築した（図1）。

2) 外断熱用外装材の屋外暴露試験及び促進試験（平成9～19年度）

実環境での外断熱用断熱複合パネルの耐凍害性は、セメント系で密度の大きな外装材は耐凍害性に優れること、非セメント系は耐凍害性・反り性状に優れることを明らかにした。

3) 窯業系サイディング用シーリング材の屋外暴露試験及び促進試験（平成10～20年）

変成シリコン系は暴露後にひび割れ、汚れなどの意匠性の低下やサイディング材とはく離が見られるとともに、モデュラス（M50）の上昇、伸び能力（E_{max}）の低下があり、5～10年で改修が必要なが確認された。ポリウレタン系はモデュラス、伸び能力ともに劣化が少なく、ある種のポリウレタン系は外観や物理性能に優れ、10年以上の耐久性が期待できることが明らかとなった（表1）。

4) 屋根用・外壁用金属材料の屋外暴露試験及び促進試験（H16～H27）

暴露試験10年までの計測を終了した。塗装の種類、鋼板材質や雨掛りの条件により、劣化程度に差が認められた（表2）。フッ素塗装アルミニウム・亜鉛合金めっき鋼板や高耐久アクリル塗装 Zn・Al・Mg・Si 合金めっき鋼板など高耐候性や高耐食性を有すると考えられる塗装鋼板で耐久性が高かった。腐食量は地域差があり、飛来塩分量予測値[※]とよく対応した（図2）。暴露試験とキセノンランプによる促進試験は、いずれも成長曲線による劣化のモデル化が可能であった。光沢度における促進量（実際の暴露期間1年に対応する促進試験の時間）は、試験体種類により異なり、劣化の早いものは100時間程度、高耐久なもので900時間程度と長くなった。

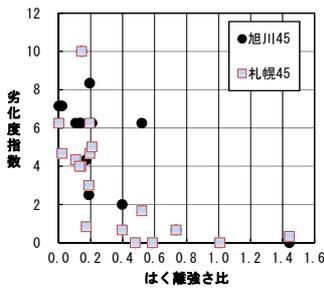


図1 窯業系サイディングのはく離強度比と劣化度指数の関係

表1 シーリング材の外観観察結果と物性試験結果（曝露10年後）
（ISO型試験体の外観観察結果） （タンベル型試験体結果）

記号	種類	界面はく離の有無	汚れの程度	チョーキングの程度	ひび割れ指数
MS①	変性シリコン	○○○	少	多	20
MS②		○○○	少	多	20
MS③		×××	少	中	20
MS④		××○	少	中	20
MS⑤		○○×	多	少	4
MS⑥		○○○	多	少	16
PU①	ポリウレタン	○○○	少	少	0
PU②		○○○	少	少	25
PS	ポリサルファイド	○○○	少	中	20

記号	M ₅₀ 引張強さ (N/mm ²)		破断伸び (%)	
	上層	中層	上層	中層
MS①	1.22	0.72	158	215
MS②	0.59	0.51	178	398
MS③	1.12	0.89	313	514
MS④	—	1.39	33	450
MS⑤	1.72	1.32	60	298
MS⑥	0.97	0.23	95	420
PU①	0.19	0.11	484	900
PU②	0.18	0.20	1135	1125
PS	—	—	30	55

○:劣化少 □:劣化中 ×:劣化大

表2 暴露試験10年での試験体状況（一部）

番号	基板名称	めっき組成	塗装系	留明	札幌	旭川	陸別
1	塗装溶融亜鉛めっき鋼板	Zn(Z25)	ポリエステル				
8	塗装溶融亜鉛-アルミニウム合金めっき鋼板	5% Al-Zn (Y25)	フッ素				
10	塗装溶融亜鉛-Al・Mg・Si合金めっき鋼板	11% Al-3% Mg-0.2% Si-Zn (K12)	高耐候アクリル				
12	アルミニウム合金板	-	フッ素（低光沢）				

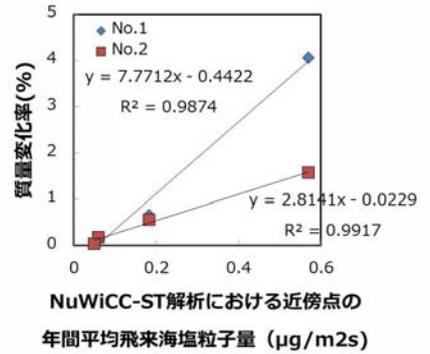


図2 年間平均飛来海塩粒子量[※]と質量変化量の関係

※環境科学研究センター、北海道電力共同研究「送電設備の腐蝕環境因子に関する研究」からデータ提供

4. 今後の見通し

窯業系サイディング及び窯業系サイディング用シーリング材に関する成果は、建材試験センター「窯業系サイディングを用いた住宅外壁の長期耐久設計・施工指針（案）」に反映された。各種建築材料の耐久性データや促進試験との対応等の知見は、学会発表等を実施し、公表するとともに、技術相談、指導において普及していく。

目 次

1. はじめに	- 1 -
1.1 背景と目的	- 1 -
1.2 研究の構成	- 1 -
2. 窯業系サイディング	- 2 -
2.1 はじめに	- 2 -
2.2 実験の概要	- 2 -
2.3 実験結果	- 3 -
2.4 まとめ	- 8 -
3. 外断熱複合板	- 9 -
3.1 はじめに	- 9 -
3.2 実験項目及び実験方法	- 9 -
3.3 実験結果	- 9 -
3.4 まとめ	- 10 -
4.1 はじめに	- 11 -
4.2 実験概要	- 11 -
4.3 実験結果	- 13 -
4.4 考察	- 31 -
4.5 まとめ	- 35 -
6. まとめ	- 36 -

1. はじめに

1.1 背景と目的

高度経済成長期からバブル期に大量に建設された建築物の性能低下が激増している。経年劣化が進み老朽化した建築物は、同時に各種性能も陳腐化することから、わが国では積極的に建替える傾向が強かった。しかしながら、対象となる建築物の量が膨大となり、建替、維持管理に関わる財政負担が不可能となってきたことから、建築物の長寿命化の必要性が叫ばれている。さらには新築に伴うCO2排出量、廃棄物最終処分量の削減の点からも、建築物の長寿命化は喫緊の課題となっている。

建築物の寿命が、構成する部材、材料の寿命に依存することは自明である。建築物の寿命予測、制御を行う上で、個々の材料の耐久性を定量的に知ることが必要不可欠となる。特に、屋外環境で使用する建築材料について耐久性を知りたいというニーズは一般消費者をはじめ発注者や設計者などにあり、建築材料の耐久性等に係る情報の整備が急務となっている。また、材料の耐久性を評価する方法として、日射、凍結融解など特定因子の強度を高めた室内促進暴露試験が行われるが、短期間で劣化を付与できるものの、劣化の再現性や実環境における耐用年数との関係などが明らかとなっていない。

以上から、本研究は、建築材料の実環境下での耐久性に関するデータを収集するとともに、促進試験法と実環境下での耐久性との対応関係を明らかにすることを目的とする。これにより、長期にわたり良好な状態で使用できる優良な建物の普及促進に向けて、長寿命化や維持保全技術の評価方法の確立に寄与するものとする。

1.2 研究の構成

表 1.1 に調査対象と調査の期間を示す。

本研究は平成7年から27年までの20年間実施した。調査対象とした建築材料は、窯業系サイディング、窯業系サイディング用シーリング材、外断熱複合版および建築外装用金属板である。

調査を実施した期間は、窯業系サイディングについては初期製品をH7～17、寒冷地での利用が増加するにつれ、改良品が発売されたため、改良品を用いた暴露をH14～24まで（サンプルは暴露を継続中）、窯業系サイディング用シーリング材については平成10～20まで、外断熱複合版はH9～19、建築外装用金属板H17～27まで（サンプルの暴露は継続中）とした。

それぞれの調査対象について、暴露試験および一部は促進試験を実施した。暴露地、条件の詳細は各章にて後述する。

表 1.1 調査対象と調査期間

建材種類	年度																			
	H7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
窯業系 サイディング	初期製品（暴露、促進試験）										改良品試験（暴露、促進試験）									
サイディング用 シーリング	暴露試験																			
外断熱複合板	暴露試験																			
建築外装用 金属板											暴露試験、促進試験									

指標で概ね評価できることを明らかにした。

2. 窯業系サイディング

2.1 はじめに

平成7年度から平成17年度にかけて窯業系サイディング（以下、サイディングという）の耐凍害性に関する実験を行い、平成18年3月に報告書「調査研究中間報告 平成17年度 INTERIM RESEARCH REPORT 2006.3 建築材料の耐久性に関する調査－窯業系サイディングの耐凍害性－」を発行した。

また、サイディング用シーリング材についても実験を行い、平成22年度までに試験が終了し、報告書「調査研究報告 No.295 2011. 3 建築材料の耐久性に関する調査－窯業系サイディング用シーリング材の屋外暴露実験結果－」を発行した。

一方、その間に、サイディングはメーカー各社において性能向上、とりわけ耐凍害性の向上が図られた。また、屋外暴露実験の途中過程において、当該研究で行った促進試験による耐凍害性評価結果と屋外暴露実験の結果が必ずしも対応しないことが示唆された。このため、研究所の旭川市移転と屋外暴露試験場の整備を契機に、サイディングの追加実験を行うこととした。本報告は、平成14年から平成27年までの結果をとりまとめたもので、比較可能な範囲で道内市販品の耐凍害性は大きく向上したこと、実環境での耐凍害性は促進試験結果に基づく新たな

2.2 実験の概要

実験に用いたサイディング

試験に用いた試験体を表1に示す。原料調合、成形法、養生法などが異なる18種類の塗装品で、No.1～16は寒冷地用でNo.17～18は温暖地限定品である。これらは平成14年に北海道内で市販されていたもの、当該年にメーカーから提供されたものである。

(3) 実験方法

1) 気中凍結水中融解試験

JISA5422-2002に準じ、300サイクルまで試験を行った。試験体数は各3枚とし、小口面のシールは行っていない。

2) はく離強さ試験

JISA5905-1994に準じて行った。凍結融解試験前・後の試験体からは、試験体の4隅の1か所から1個ずつ、合計3個の試験体を採取した。試験体の大きさは40×40mmとした。試験に先立ち、試験体を7日間20℃60%の実験室内に放置した。

3) 屋外暴露試験

試験体は、長さ200mm×幅100mmの大きさで各3枚とし、小口面のシールは行っていない。暴露方法は、南面45度傾斜と垂直の直接暴露で、試験体下部が納まる暴露架台の試験体受枠には雨水や融雪水が

表 2.1 実験に用いたサイディング

No.	板厚 (mm)	成形法	養生法	気乾かさ密度	24時間吸水率 (%vol)	凍融300サイクル後厚さ変化率 (%)	はく離強さ (MPa)		はく離強さ比 (B/A)
							凍融前 (A)	凍融300サイクル後 (B)	
1	11	プレス	湿熱	2.07	13.3	-0.2	3.8	5.5	1.44
2	15	脱水プレス	オートクレーブ	1.11	41.0	3.0	1.8	0.2	0.11
3	18	脱水プレス	オートクレーブ	1.15	42.5	1.4	1.6	0.2	0.14
4	12	単層抄造	オートクレーブ	1.04	46.6	20.0	2.1	0.0	0.02
5	16	押出	オートクレーブ	1.25	36.9	3.0	3.5	0.6	0.17
6	15	押出	オートクレーブ	1.51	28.3	-0.1	3.0	3.0	1.01
7	18	押出	オートクレーブ	1.10	32.3	0.0	2.4	1.8	0.73
8	13	押出	オートクレーブ	1.09	35.6	-0.1	2.3	0.9	0.40
9	12	積層プレス	オートクレーブ	1.12	18.7	2.3	0.6	0.3	0.52
10	16	抄造	—	1.20	26.4	3.6	1.6	0.3	0.20
11	12	抄造	—	1.14	45.5	32.9	0.6	0.0	0.00
12	16	積層プレス	オートクレーブ	1.33	18.8	1.4	1.2	0.6	0.48
13	18	押出	オートクレーブ	1.21	36.3	1.2	2.3	0.5	0.21
14	12	積層プレス	オートクレーブ	1.27	16.0	3.7	0.9	0.5	0.59
15	18	押出	オートクレーブ	1.07	40.3	1.1	2.8	0.5	0.19
16	15	押出	オートクレーブ	1.06	44.4	2.9	2.7	0.4	0.13
17	12	抄造	オートクレーブ	1.25	44.0	3.1	1.3	0.3	0.19
18	15	抄造	オートクレーブ	1.20	44.5	3.5	1.4	0.2	0.14

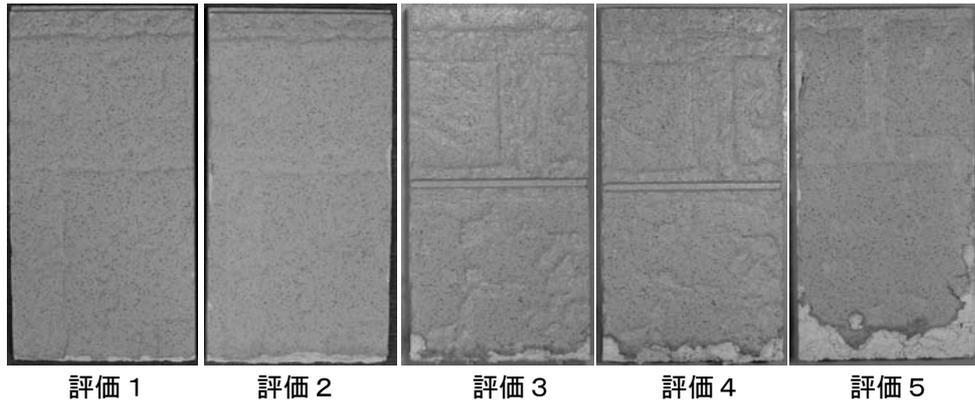


写真 2.1 凍害劣化程度と評価値

溜る形状になっている。曝露地は旭川市、札幌市及び陸別町小利別で、垂直曝露は旭川市のみである。暴露開始時期は旭川市及び札幌市は平成 14 年 9 月、陸別町は平成 17 年 11 月である。

4) 外観上の凍害劣化程度の評価と指数化

曝露試験における外観上の凍害劣化程度を表 2 に示す基準に基づいて評価した。目視による凍害劣化程度との対応を合わせて示す。また、写真 2.1 に凍害劣化程度と評価値の関係を示す。

見付の劣化面積は画像編集ソフトを用い、試験体表面の正面から撮影した写真について塗膜剥離部分や基材劣化部分を目視により黒色に塗りつぶし、その割合を求めることにより測定した。微細なひび割れは測定対象としていない。結果は暴露年数 10 年を基準とし、式(1)を用いて凍害劣化指数 D5 として表した。

$$D5 = P \times \frac{10}{t}$$

ここに、D5：凍害劣化程度の評価 5 を基準とする凍害劣化指数

P：凍害劣化程度の評価

t：暴露年数（P が 5 に至った場合はその年数（年））

2.3 実験結果

1) 凍結融解試験結果及びはく離試験結果

気中凍結水中融解試験による厚さ変化率、促進凍結融解試験前後のはく離強さの測定結果及びはく離強さ比を表 1 に示す。

図 2.1 に平成 7 年と平成 14 年のそれぞれのサイディングについて比較可能な範囲での厚さ変化率の対比を示す。9 種類のサイディングのうち 6 種類で厚さ変化率が小さくなっており、耐凍害性能の向上が

表 2.2 凍害劣化程度の評価基準

評価(P)	見付の劣化面積a(%)	目視による凍害劣化程度
0	$1 > a$	認められるような劣化がない
1	$2 > a \geq 1$	やっと認められる程度
2	$3 > a \geq 2$	明らかに認められる程度
3	$4 > a \geq 3$	非常にはっきりと認められる
4	$5 > a \geq 4$	著しい劣化が認められる
5	$a \geq 5$	激的な劣化が認められる

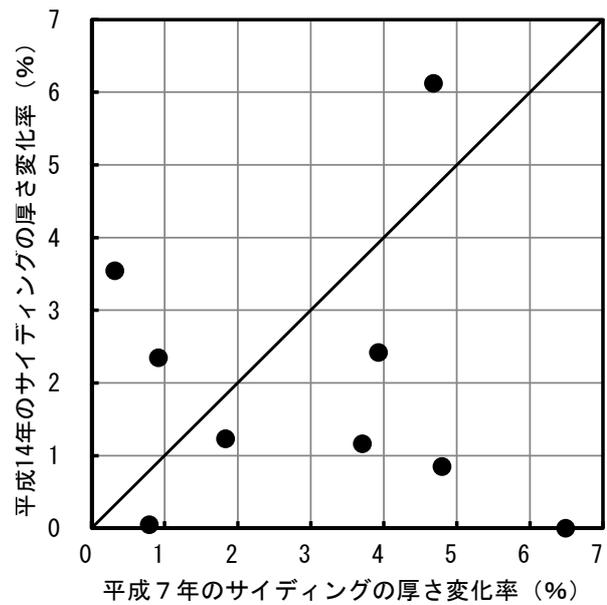


図 2.1 厚さ変化率の比較

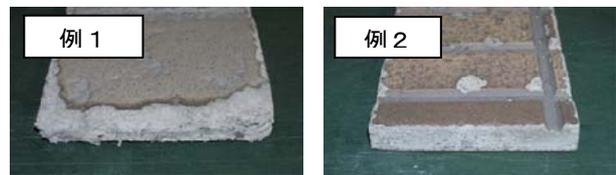


写真 2.2 凍害劣化形態の例

見られた。

厚さ変化率とはく離強さ比の関係を図 2.2 に示す。はく離強さ比は凍結融解作用後のはく離強さの残存率を表すもので、凍害劣化程度を端的に示す指標の一つである。サイディングの耐凍結融解性は厚さ変

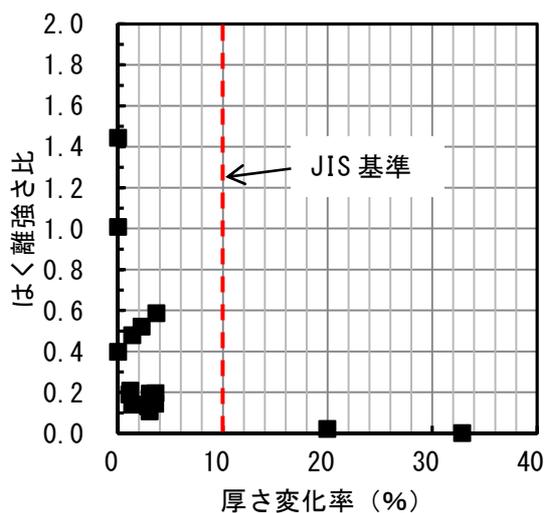


図 2.2 厚さ変化率とはく離強さ比の関係

化率が4%以下の範囲での変化が著しく、現在のJIS規格で10%となっている耐凍結融解性の評価基準はこの範囲で設定するのが適切と考えるが、厚さの測定精度は必ずしも高くないことから厚さ変化率を耐凍結融解性の指標とするには厚さ測定に高い精度が求められよう。

2) 屋外曝露試験結果

屋外曝露試験におけるサイディングの凍害劣化形態の例を写真2.2に示す。例1は典型的な凍害劣化形態で、小口から膨張し粉体化している。例2は表層がポップアウトのようなはく離現象を示すものであるが、基材の凍害劣化に特有の厚さ変化は生じておらず、例1とは異なる劣化形態である。

凍害劣化程度の評価と凍害劣化指数の算定値を表2.3に示す。曝露年数の進行とともに凍害劣化程度の評価は大きくなる。特に、抄造法によるサイディング(No.4、10、11、17、18)は概して凍害劣化が生じ易くその程度も大きい。積層プレスによるサイディングは概して劣化は少なく(No.9、14)、ポップアウト状の劣化現象は生じるが基材は脆弱化していない(No.12)。これらの傾向は、平成7年に開始した曝露実験と同様であり、製造方法の特性がサイディングの耐凍害性に影響していることが再確認された。

図2.3に札幌及び陸別の旭川との凍害劣化指数の比較を示す。札幌の凍害劣化指数は旭川の0.72倍、陸別は0.54倍となっている。各都市の気象環境を見ると(表4)、陸別町は最低気温が最も低いが寒冷期の降水量は最も少ない。札幌市は、最低気温は陸別町より高いが降水量が3都市の中で最も多い。この結果、凍害劣化は、気温よりも水分供給条件の影響が大きいことが再確認された。

2) 凍害劣化指数と物性値の関係

凍害劣化指数と各種物性値の関係を図4～6に示す。厚さ変化率及び凍融前のはく離強さと凍害劣化指数との相関性は小さく(図4、5)、これらの物性値を基準にして耐凍害性を予測することは困難であるように思われる。

凍結融解試験300サイクル後のはく離強さ又は、はく離強さ比と凍害劣化指数とのあいだには比較的良好な相関性が見られるが(図2.6、図2.7～2.9)、はく離強さ比の方が比較的凍害劣化指数の大小を判別できる割合が大きく、本研究の範囲ではサイディングの耐凍害性を評価する指標として最も優れていると考える。

最も凍害環境の厳しい旭川(図2.7)で見ると、はく離強さ比が0.3以下で凍害劣化指数が3(非常にはっきりと凍害劣化が認められる程度)以上となっている。札幌(図2.8)や暴露年数の短い陸別(図2.9;10年)では、はく離強さ比が0.3以下でも凍害劣化指数が3以下となっているが、これは凍害環境が旭川と比較して穏やか、又は暴露年数が短いためと思われる。

図2.7は曝露角度を90度とした場合の凍害劣化指数とはく離強さ比の関係を示したものである。曝露角度45度の場合と同様、はく離強さ比が0.3以上では凍害劣化指数が0であり、凍害を生じていない。

3) 曝露角度の違いによる凍害劣化指数

曝露角度の違いによる凍害劣化指数を図2.11に示す。45度傾斜曝露の凍害劣化指数は90度の垂直曝露の2.5倍程度であり、凍害劣化が促進されている。このことは、45度傾斜曝露の凍害環境は垂直曝露の2.5倍程度であるとも表せられる。すなわち、垂直曝露されたサイディングが45度傾斜曝露されたサイディングと同程度の凍害劣化に至るには2.5倍程度の年数を要するといえる。

表 2.3 凍害劣化程度の評価と凍害劣化指数

曝露地と 曝露角度	No.	暴露年数 (年)												凍害劣化 指数D ₅	備 考	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			13
旭川 45度	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	
	2	0	0	1	2	4	4	5	5	5	5	5	5	5	7.1	
	3	0	0	2	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10.0	
	4	0	0	2	3	4	5	5	5	5	5	5	5	5	8.3	
	5	0	0	0	0	0	0	2	2	2	3	4	5	5	4.2	
	6	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	4	5	5	4.2	塗膜剥がれ
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	
	8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	2	3	2.3	
	9	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	1.5	
	10	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	4	5	5	4.2	
	11	0	0	0	0	2	4	5	5	5	5	5	5	終	7.1	
	12	0	0	0	0	0	1	3	3	3	3	5	5	5	4.5	フビング*
	13	0	0	2	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10.0	
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	
	15	0	0	0	0	0	0	1	1	1	3	5	5	5	4.5	
	16	0	0	0	0	0	1	2	3	5	5	5	5	5	5.6	
	17	0	0	0	0	2	4	5	5	5	5	5	5	5	7.1	
	18	0	0	0	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10.0	
札幌 45度	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0		
	2	0	0	1	2	2	3	3	4	4	4	5	5	5	4.5	
	3	0	0	2	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	7.1	
	4	0	0	0	1	1	1	3	3	3	4	5	5	5	4.5	
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0.8	
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.8	
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0.8	
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1.5	
	10	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	5	5	4.5	
	11	0	0	0	0	0	0	1	1	4	5	5	終	終	5.0	
	12	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	4	4	4	3.1	フビング*
	13	0	0	0	2	3	4	5	5	5	5	5	5	5	7.1	
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	5	5	4.2	
	16	0	0	0	0	0	1	1	1	3	4	5	終	終	4.5	
	17	0	0	0	0	0	1	4	5	5	5	5	終	終	6.3	
	18	0	0	0	2	3	5	5	5	5	5	5	終	終	8.3	
陸別 45度	1															
	2	0	0	0	0	0	1	2	2	4	5				5.0	
	3	0	0	0	1	3	5	5	5	5	5				5.0	
	4	0	0	0	0	0	1	2	4	4	4				4.0	
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0				0.0	
	6															
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				0.0	
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				0.0	
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				0.0	
	10	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4				4.0	
	11	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3				3.0	
	12	0	0	0	0	1	1	1	2	4	4				4.0	フビング*
	13	0	0	0	0	1	2	4	5	5	5				6.3	
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				0.0	
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1				1.0	
	16	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3				3.0	
	17	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3				3.0	
	18	0	0	0	0	1	2	4	5	5	5				6.3	

表 2.3 凍害劣化程度の評価と凍害劣化指数（つづき）

曝露地と 曝露角度	No.	暴 露 年 数 (年)													凍害劣化 指数D ₅	備 考
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
旭川 90度	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.0	
	2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2	3	2.3	
	3	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	1.5	
	4	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2	1	1	0.8	
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.0	
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	0.8	
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.0	
	13	0	0	0	0	0	0	1	3	4	4	4	4	5	3.8	
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.8	
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0.8	
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	5	5	4.2	

表 2.4 曝露地の気象環境

	最低気温の 30年平年値 (°C)	最低気温が マイナス期 間の降水量 (mm)
旭川市	-13.5	387
札幌市	-7.5	427
陸別町	-21.2	264

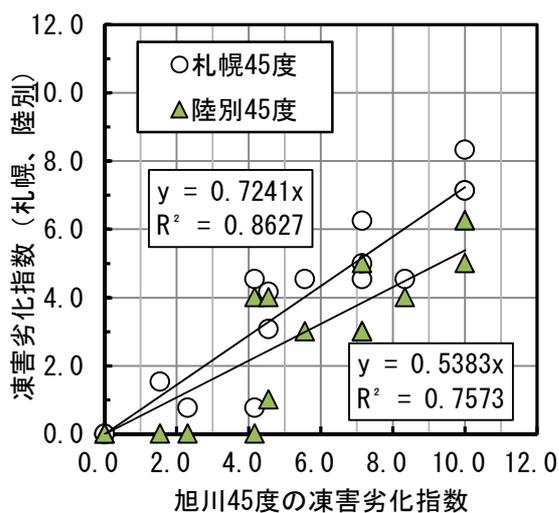


図 2.3 曝露地の凍害劣化指数の比較

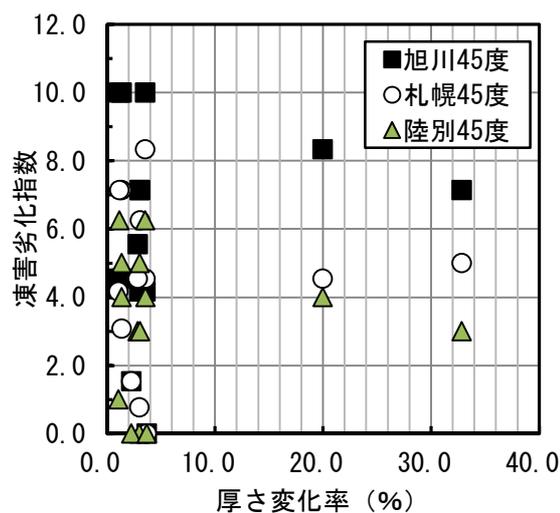


図 2.4 厚さ変化率と凍害劣化指数の関係

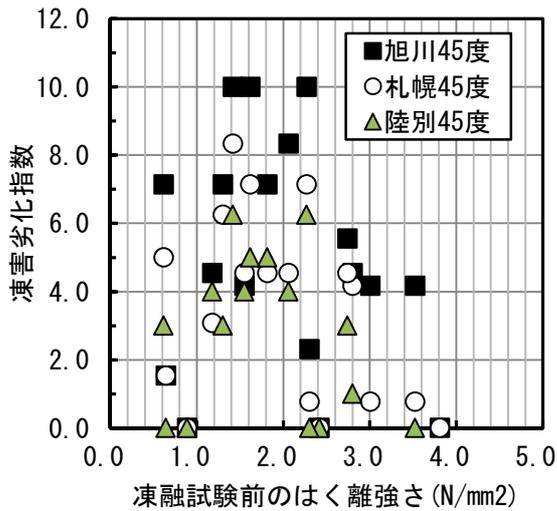


図 2.5 凍融前のはく離強さと凍害劣化指数の関係

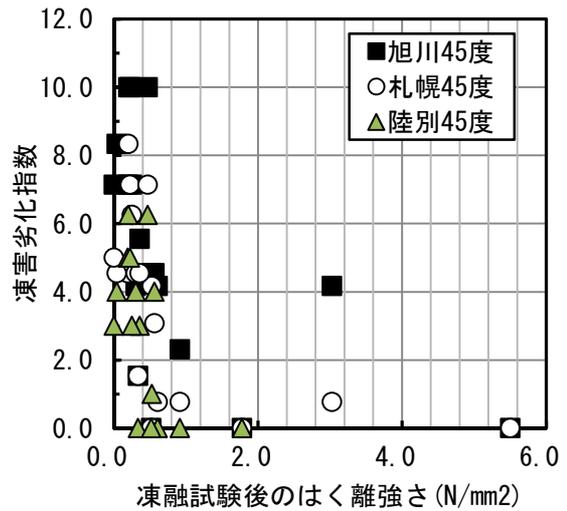


図 2.6 凍融後ろのはく離強さと凍害劣化指数の関係

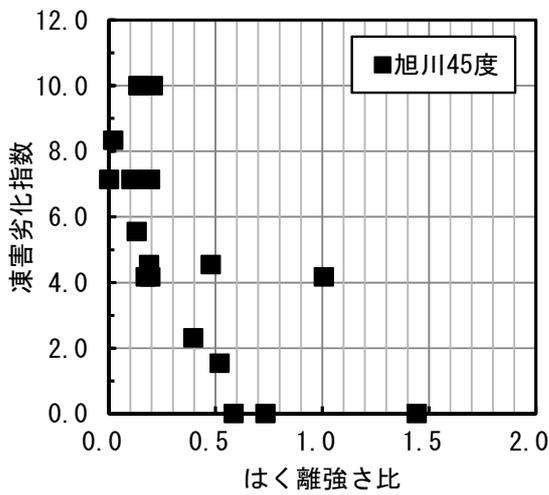


図 2.7 はく離強さ比と凍害劣化指数の関係

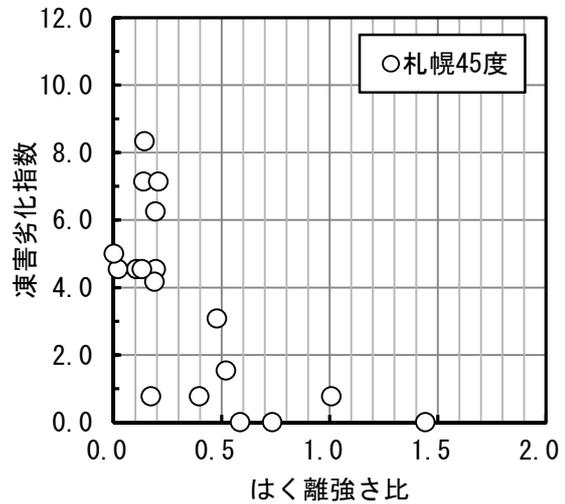


図 2.8 はく離強さ比と凍害劣化指数の関係

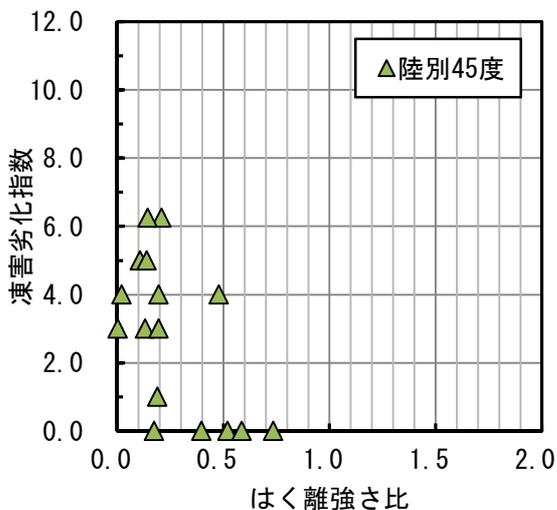


図 2.9 はく離強さ比と凍害劣化指数の関係

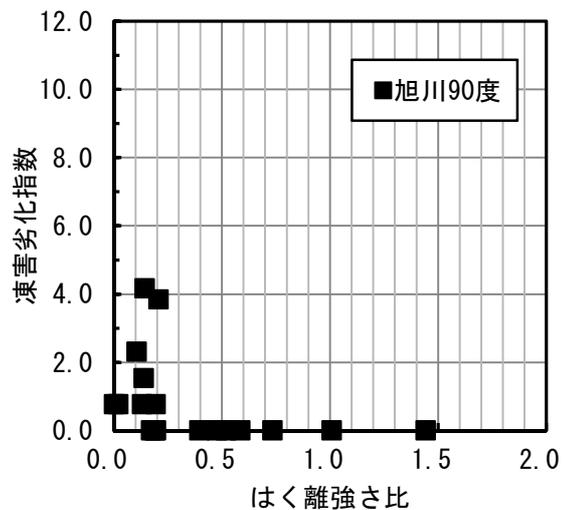


図 2.10 凍害劣化指数とはく離強さ比の関係(90度)

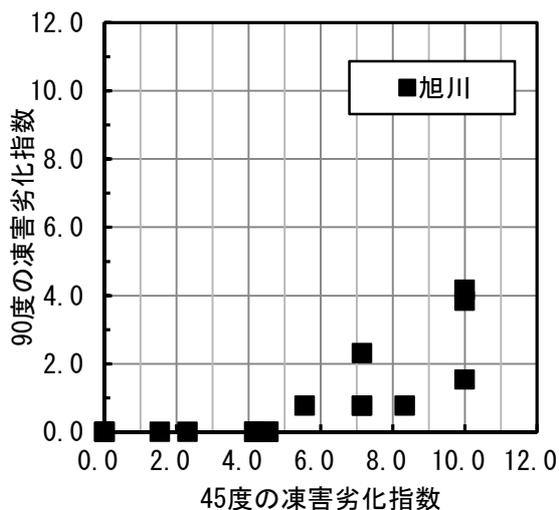


図 2.11 曝露角度の違いによる凍害劣化指数

2.4 まとめ

本実験の結果は次のようにまとめられる。

- (1) 平成 7 年製のサイディングと比較して平成 14 年製のサイディングの耐凍害性能の向上が見られた。
- (2) 耐凍結融解性を示す指標であるはく離強さ比は厚さ変化率が 4 % 以下の範囲での変化が著しく、厚さ変化率を耐凍結融解性の指標とするには厚さ測定に高い精度が求められよう。
- (3) 屋外曝露試験において、曝露年数の進行とともにサイディングの凍害劣化程度の評価は大きくなる。

特に、抄造法によるサイディングは概して凍害劣化が生じ易くその程度も大きい。積層プレス法によるサイディングは概して劣化は少ない。これらの傾向は、平成 7 年に開始した曝露実験と同様であり、製造方法の特性がサイディングの耐凍害性に影響していることが再確認された。

(4) 札幌の凍害劣化指数は旭川の 0.72 倍、陸別は 0.54 倍となっており、凍害劣化は気温よりも水分供給条件の影響が大きいことが再確認された。

(5) 厚さ変化率及び凍融前のはく離強さと凍害劣化指数との相関性は小さく、これらの物性値を基準にして耐凍害性を予測することは困難であるように思われる。

(6) はく離強さ比はサイディングの耐凍害性と比較的良い相関性が見られ、凍害評価する指標として優れていると考える。

(7) 最も凍害環境の厳しい旭川で見ると、はく離強さ比が 0.3 以下で凍害劣化指数が 3 以上となっている。曝露角度を 90 度とした場合の凍害劣化指数とはく離強さ比の関係は、曝露角度 45 度の場合と同様、はく離強さ比が 0.3 以上では凍害劣化指数が 0 であり、凍害を生じていない。

(8) 45 度傾斜曝露の凍害劣化指数は 90 度の垂直曝露の 2.5 倍程度であり、凍害劣化が促進されている。この結果、垂直曝露されたサイディングが 45 度傾斜曝露されたサイディングと同程度の凍害劣化に至るには 2.5 倍程度の年数を要するといえる。

3. 外断熱複合板

3.1 はじめに

R C造建物の外断熱の認定工法で多用された外断熱複合板を用いた外壁で、外装材部分の凍害や塗装のはく離といった早期劣化が多く見られたことから、その原因が外装部分の耐凍害性に起因するものかどうかを明らかにすることを目的とし、セメント系外断熱複合板の耐凍害性能を明らかにし、外断熱外装システムの耐久性向上に資する。

3.2 実験項目及び実験方法

(1) 試験体

実験に用いた試験体は表 3.1 に示すもので、G R C（ガラス繊維混入セメント板）系 3 種類、セメントサイディング系 4 種類及び樹脂板 1 種類の合計 8 種類である。

(2) 気中凍結水中融解試験

JIS A 5422（窯業系サイディング）に準じた気中凍結水中融解法により、凍結温度 -20°C 、融解温度 $+20^{\circ}\text{C}$ 、4 時間/サイクル、小口の防水処理なしで 600 サイクルまで試験を行い、厚さ変化率と外観観察を行った。試験体の大きさは $300\times 100\text{mm}$ とし、凍結融解試験終了後 $20^{\circ}\text{C}60\%$ の恒温恒湿室に 1 週間放置し、その後 24 時間吸水させて曲げ強さ試験、はく離強さ試験に供した。

(3) 曲げ強さ試験

JIS A 5422（窯業系サイディング）に準じ、気乾後表面を上にし、曲げスパンを 250mm とした 1 点集中荷重により試験を行った。試験体の大きさは $300\times 250\text{mm}$ とした。

(4) はく離強さ試験

JIS A 5426（スレート・木毛セメント積層板）の 6.5 に準じ、試験片から $4\text{cm}\times 4\text{cm}\times$ 製品厚さに切り出したものを試験体とし、 60°C で 1 日間乾燥した後、

試験体の表裏面に鋼板をエポキシ系接着剤で貼り付け垂直に引っ張った。

(5) 比重、吸水試験

試験体は $10\times 10\text{cm}$ とし、温度 20°C 湿度 60% の室内に 7 日間以上放置した後、レコードスタンドに立てかけ、試験体の上端が水面から 1 cm 程度の深さになるように水中に浸した。24 時間経過後、水中重量と空中重量を測定した後、 105°C で 24 時間乾燥し、比重及び吸水率を求めた。

(6) 屋外暴露試験

屋外暴露試験は、JIS Z 2381（屋外暴露試験方法通則）を参考に、南正面の 30 度傾斜暴露として行った。試験体の大きさは $300\times 100\text{mm}$ で、試験枚数は各 3 枚である。試験体下部の受け台は降雨や融雪水が溜まるようになっており、試験体への水分供給が可能となっている。暴露地及び暴露試験開始時は次のとおりである。

- ・札幌市（寒研屋上）平成 9 年 4 月 21 日（平成 14 年 4 月より工業試験場屋上）

- ・北見市（病院屋上）平成 9 年 5 月 22 日（平成 14 年 4 月より浄化センター屋上）

- ・上磯町（消防署屋上）平成 9 年 5 月 13 日

試験体の大きさは $300\times 100\text{mm}$ で、試験枚数は各 3 枚である。質量、厚さの測定は気乾後、24 時間吸水させたのちに行った。厚さは、試験体下端から 20mm 及び 200mm の位置の 3 点について行った。

3.3 実験結果

(1) 物理試験果及び気中凍結水中融解試験結果
物理試験果及び気中凍結水中融解試験結果を表 3.2 及び図 3.1 に示す。G R C系は、比重は 2 前後で密度が高く、24 時間吸水率も 10%程度で普通セメントモルタルに類似する値であった。サイディング系は、比重が 1 前後、24 時間吸水率は 30~50%で窯業系サ

表 3.1 試験体概要

種類	試験体 No.	外装材名称	厚さ (mm)	かさ比重
G R C系	1	ガラス繊維混入セメント板	9	2.0
	2	ガラス繊維混入セメント板	8	2.0
	3	ガラス繊維混入セメント板	10	2.0
サイディング系	4	繊維混入スラグ石膏セメント板	11	1.0
	5	繊維混入スラグ石膏セメント板	12	1.0
	6	パルプ混入石綿セメント板	13	0.9
	7	繊維混入セメントケイ酸カルシウム板	12	0.85(絶乾)
樹脂板	8	ガラス繊維混入火山れき サンドアッシュフェノール樹脂板	13	

表 3.2 物理試験及び気中凍結水中融解試験結果

	No.	絶乾密度	24時間吸水率 (%wt)	曲げ強さ (N/mm ²)	はく離強さ (N/mm ²)	気中凍結水中融解試験結果					
						厚さ変化率 (%)		外観観察結果 () 発生サイクル	曲げ強さ (N/mm ²)	はく離強さ (N/mm ²)	はく離強さ比
						300サイクル時	600サイクル時				
GRC系	1	2.13	8.8	8.7	4.02	-0.22	0.38	裏面スケーリング (200)	5.8	0.53	0.13
	2	2.03	11.3	12.9	2.63	1.74	3.55	反り (400)	0.0	0.00	0.00
	3	1.97	10.1	17.2	1.60	0.38	1.54	異常なし	11.5	0.07	0.04
サイディング系	4	1.13	37.8	13.6	2.65	0.20	0.26	軽微な小口剥離 (200)	13.8	0.14	0.05
	5	1.05	38.5	8.8	1.56	-0.01	0.00	異常なし	1.2	0.00	0.00
	6	0.97	39.9	7.9	1.06	0.07	1.65	軽微な層間剥離 (267)	0.9	0.00	0.00
	7	0.90	57.8	15.2	1.49	0.05	0.09	軽微な小口剥離 (67)	3.9	0.00	0.00
樹脂板	8	0.91	3.0	6.0	0.90	10.20	—	小口面ひび割れ (167)	—	—	—

イディングとほぼ同程度であった。

促進凍結融解試験の結果では、GRC系及びサイディング系とも一般的な窯業系サイディングと比較して厚さ変化率が小さく耐凍害性に優れる傾向を示したが、GRC系の方が比較的大きな厚さ変化率を示した。これは、裏面側のガラス繊維の分散が不均一で空隙が多く、裏面側で凍害劣化を生じたためである。また、樹脂板は、凍結融解の繰返しによって吸水が増大し、100 サイクルを超えると厚さ変化率が急激に増加している。凍結融解試験前後のはく離強さの変化を表すはく離強さ比を見ると、サイディング系で0.05~0.00であり、著しい内部劣化を生じていることが示唆された。

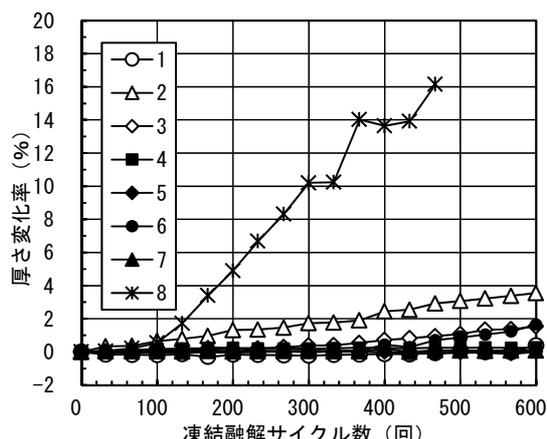


図 3.1 凍結融解サイクル数と厚さ変化率の関係

表 3.3 屋外曝露試験結果

種類	GRC系			サイディング系				樹脂板		
	No. 1	2	3	4	5	6	7			
札幌市	経過年数 (年)	2	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
		3	◎	◎	◎	◎	□	◎	◎	
		4	◎	◎	◎	◎	■	□	■	◎
		6	◎	◎	◎	◎	■	■	■	◎
		9	◎	◎	◎	◎	■	■	■	◎
	10	◎	◎	◎	◎	■	■	■	◎	
反り (mm)	0.19	6.1	1.62	3.67	3.32	9.86	4.37	0.60		
上磯町	経過年数 (年)	2	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
		3	◎	◎	◎	◎	□	◎	◎	
		4	◎	◎	◎	◎	■	◎	■	◎
		5	◎	◎	◎	◎	■	◎	■	◎
		6	◎	◎	◎	◎	■	◎	■	◎
	10	◎	◎	◎	◎	■	◎	■	◎	
反り (mm)	0.43	7.29	1.19	3.9	4.46	4.84	1.63	0.58		
北見市	経過年数 (年)	2	◎	◎	◎	◎	◎	□	◎	
		3	◎	◎	◎	◎	□	◎	◎	
		4	◎	◎	◎	◎	■	□	■	◎
		6	◎	◎	◎	◎	■	□	■	◎
		8	◎	◎	◎	◎	■	■	■	◎
	反り (mm)	—	—	—	—	—	—	—	0.16	

※ ◎ : 凍害発生なし ○ : 凍害の兆候あり □ : 凍害が顕在化 ■ : はく離、欠損、粉体化あり
反りは、長さ300mmの試験体による測定結果を長さ900mmの場合に換算した値

(2) 屋外曝露試験結果

屋外曝露試験結果を表 3.3 に示す。GRC系は外観上の劣化はほとんど見られず、促進凍結融解試験結果とほぼ同様の傾向であった。サイディング系は密度の大きいNo.4 では凍害劣化が見られないが、比較的密度の小さいNo.5~7は層間はく離や欠損、粉体化などの凍害劣化現象が曝露開始後4年以降から見られ、促進凍結融解試験結果とは異なる傾向となった。樹脂板は実環境では耐凍害性は良好な結果であり、促進凍結融解試験結果と相違した。これは、実環境では促進凍結融解試験ほど含水率が高まりにくいと考えられる。

反り性状に関しては、概してサイディング系が大きく、GRC系では製品による差が大きい。樹脂板は反りが小さかった GRC 系は耐凍害性に優れるといえる。また、凍害劣化の程度は道北 (北見市) や道南 (上磯町) の都市と比較して札幌市が最も大きかった。

3.4 まとめ

本実験の結果を以下にまとめる。

(1) 外断熱用断熱複合パネルでは、セメント系で密

度の大きな外装材は耐凍害性に優れ、非セメント系は耐凍害性・反り性状に優れていた。

4. 建築外装用金属板

4.1 はじめに

道内では建物の外壁仕上げ材料として窯業系サイディングやセメント系外装材が普及しているが、凍害や目地シーリング材の早期劣化などの問題から、複合金属サイディングや鋼板への関心が高くなっている。また、北海道における住宅用の屋根材はほぼ全て金属材料であり、屋根材の耐久性に対する関心も高い。近年、耐久性の向上を図った金属材料の使用が増えてきているが、寒冷地での長期耐久性に関して公表されたデータはほとんどない。また、酸性雨に関連して雨がかりとならない軒天や庇下、水溜り部の耐久性が問題となるが、それらに関するデータもない。今後、さらに普及が予想される金属材料の選択や施工・維持管理を適切に行うためには実環境下での耐久性を把握することが重要である。

建築物の外皮である屋根や外壁、庇等への適用拡大が予想される金属系材料について、乾性沈着注*1) や水溜り環境下注*2) を中心とした耐久性およびメンテナンスの有無による影響を明らかにする。

*1) 乾性沈着とは、晴天時に汚染物質を含むガス、エアゾル、ミストや粒子状物質などが外装材の表面に付着することを指す。軒下など雨がかりのないところでは腐食の原因となりやすい。

*2) 鉄は水と酸素が共存すると反応して錆を生成する。水溜りができやすい環境では塗膜の加水分解や鉄の腐食が進みやすくなる。

4.2 実験概要

(1) 使用材料

表1に試験体一覧を示す。

試験材料は塗装試験体と無塗装試験体を用意した。塗装試験体は、塗装基板について、一般的な塗装溶融亜鉛めっき鋼板のほか、塗装溶融亜鉛-5%アルミ合金めっき鋼板、塗装溶融亜鉛-55%アルミ合金めっき鋼板、塗装溶融亜鉛-11%アルミ-3%Mg-0.2Si合金めっき鋼板、塗装アルミニウム合金板の5種類を取り上げた。また、表面の塗装としてポリエステル塗装(標準, 低光沢)、フッ素塗装、高耐候アクリルの5種類とした。これらについて、市販されている組み合わせの中から選定し、12種類の試験体について試験を行った。

また、無塗装試験体は、汎用的なものから、耐腐食抵抗性が高いとされる材料を取り上げることとした。4種類の材料を選択し、亜鉛めっき鋼板(Z25, 0.40mm)、亜鉛-5%アルミ合金めっき鋼板(スーパージंक, Y25, 0.35mm)、亜鉛-55%アルミ合金めっき鋼板(ガルバリウム鋼板, AZ150, 0.35mm)、亜鉛-11%アルミ-3%Mg-0.2Si合金めっき鋼板(スーパーダイマ, K12, 0.40mm)の4種類としたについて、試験を行うこととした。

(2) 試験体の形状

1) 屋外暴露試験

図5.1に試験体形状を示す。屋外暴露試験では、暴露条件に合わせて3種類の形状の試験体を作製した。

・乾性沈着試験(水平下向き) 塗装試験体のみで

表 4.1 試験体一覧表

塗装	試験体の名称	めっき組成	めっき付着量 (g/m ²)	塗装種類	番号又は 記号
塗装	塗装溶融亜鉛めっき鋼板	Zn(Z25)	250	ポリエステル	No.1
	塗装溶融亜鉛- アルミ合金めっき鋼板	5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル	No.2
		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル	No.3
		5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル (低光沢)	No.4
		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル (低光沢)	No.5
		5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル+フッ素 (低光沢)	No.6
		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル+フッ素 (低光沢)	No.7
		5% Al-Zn (Y25)	250	フッ素	No.8
		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素	No.9
	塗装溶融亜鉛- Al・Mg・Si合金めっき鋼板	11%Al-3%Mg- 0.2%Si-Zn (K12)	120	高耐候アクリル	No.10
アルミニウム合金板	-	-	ポリエステル	No.11	
アルミニウム合金板	-	-	フッ素	No.12	
無塗装	亜鉛めっき鋼板	Zn	250	-	N
	亜鉛-5%アルミ合金めっき鋼板	5% Al-Zn	250	-	SZ
	亜鉛-55%アルミ合金めっき鋼板	55% Al-Zn	150	-	GL
	亜鉛-11%Al-3%Mg-0.2%Si合金めっき鋼板	11%Al-3%Mg-0.2%Si-Zn	120	-	SD

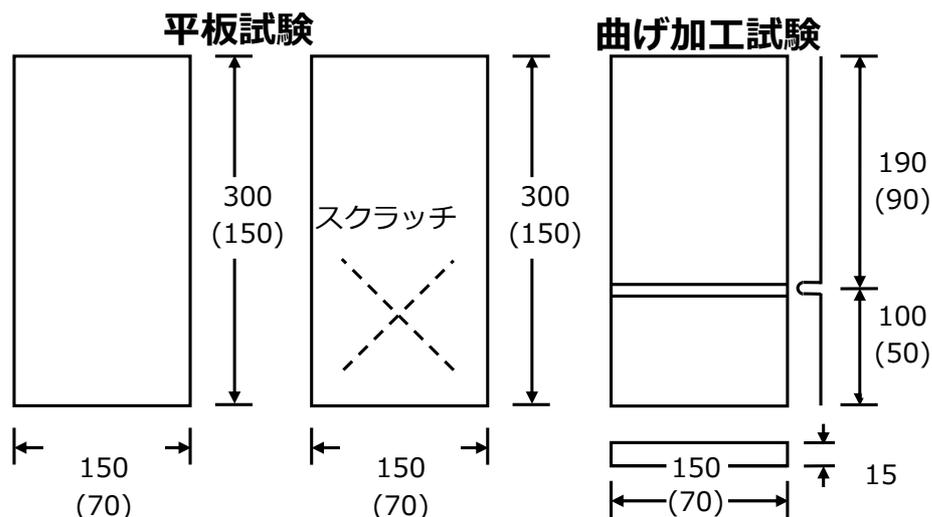


図 4.1 試験体形状

実施し、150mm×300mmの平板を設置した。

・水溜り試験（約30度傾斜暴露） 塗装試験体のみで実施し、150mm×300mmの大きさで短辺の端から100mmの位置にはぜを想定した曲げ加工を施した形状（塗装アルミニウム合金板を除く）のものとした。

・傾斜暴露試験（約30度傾斜暴露） 塗装試験体と無塗装試験体とし、150mm×300mmの平板とした。塗装試験体については、無傷のものと同時に片側に長さ50mmの長さ50mmのスクラッチ（×状の傷）を入れたものも設置した。

2) 室内促進試験

室内促進試験は、塗装試験体については、キセノンウェザーメータによる促進耐候性試験では、70mm×150mmの平板とした。サイクル腐食試験を実施するものでは、下半分にスクラッチを入れたものとした。無塗装試験体は、70mm×150mmの平板とした。

(3) 試験方法

1) 屋外暴露試験

屋外暴露試験の暴露地は、環境条件を考慮して、一般的な降雪寒冷地・都市部として札幌市（道立工業試験場庁舎屋上）、多雪厳寒地・都市部として旭川市（北総研暴露実験場）、重塩害地域として留萌市（留萌市役所庁舎屋上）、塩害地域として上磯町（上磯消防署庁舎屋上）、少雪厳寒地・田園地帯として陸別町（陸別暴露実験場）の5か所とした。

暴露方法は次のとおりとした。

・乾性沈着試験：試験体をアクリル板に固定し、雨

がかりとならないよう地上または床上から約1mの高さで下向きに設置した。試験体は塗装試験体とし、2枚設置した。計測時に、1枚は水洗いを行わず、もう1枚は水洗い（水道水）を行った。計測項目は、水洗いなしで目視観察、質量測定、ありで目視観察、質量変化、色調、光沢度とした。暴露地は、札幌市、留萌市、旭川市、陸別町の4か所とした。暴露地の条件に応じ、設置する試験体の数は調整した。

・水溜り試験：南面30度の傾斜暴露とした。試験体数は塗装試験体1枚、曲げ加工試験体を設置した。

暴露地は札幌市、留萌市、旭川市、陸別町、上磯町の5か所とした。暴露地の条件に応じ、設置する試験体の数は調整した。計測項目は、水洗い後に目視観察、質量測定とした。

・傾斜暴露試験：南面30度の傾斜暴露とした。試験体数は塗装試験体平板を2枚、1枚はスクラッチあり、無塗装試験体平板を1枚である。

暴露地は札幌市、留萌市、旭川市、陸別町、上磯町の5か所とした。暴露地の条件に応じ、設置する暴露台、試験体の数は調整した。

計測項目は、水洗いを行った後、平板では目視観察、質量変化、色調、光沢度とし、スクラッチ試験体は目視観察、質量変化とした。

それぞれの試験体について、色調測定には、HC-1（スガ試験機社製）を用い、計測条件としてD65光源10度使用とした。光沢度は、UVG-5P（スガ試験機社製）を用い、60度鏡面光沢度を計測した。

暴露期間は30年（暴露地によっては変更する場合があります）を計画しているが、本報告では、11年までの

結果とする。

2) 室内促進試験

実験室内における促進試験方法として、キセノンウェザーメータによる促進耐候性試験およびサイクル腐食試験を行った。

塗装試験体では、キセノンウェザーメータによる促進耐候性試験のみを6000時間、キセノンウェザーメータによる促進試験を1クール(300時間)実施後、サイクル腐食試験1クール(56サイクル)を1サイクルとし、10サイクル繰り返す2パターン of 試験を行った。

無塗装試験体では、サイクル腐食試験を868サイクルまで行った。

キセノンウェザーメータによる促進耐候性試験は、JISK5600-7-7-1999(塗料一般試験方法—第7部:塗膜の長期耐久性—第7節:促進耐候性(キセノンランプ法)に準じて行い、湿潤サイクル試験 サイクルAに準じ、放射エネルギー 550W/m², ブラック標準温度 65±2℃, 湿潤時間 18分, 乾燥時間 102分とした。ただし、乾燥時相対湿度はJISA6909(建築用仕上塗材)に準じ、50±5%とした。試験期間は、1クール300時間とした。

サイクル腐食試験は、JISK5600-7-9-2006(塗料一般試験方法—第7部:塗膜の長期耐久性—第9節:サイクル腐食試験方法—塩水噴霧/乾燥/湿潤の附属書1(規定)サイクルDに準じて行った。試験溶液は、塩化ナトリウム(50±10)g/lの中性溶液(pH6.0~7.0)とし、塩水噴霧 0.5時間 温度 30±2℃, 湿潤 1.5時間 温度 30±2℃, 湿度 95±3%, 熱風乾燥 2時間 温度 50±2℃, 温風乾燥 2時間 温度 30±2℃を1サイクルとした。試験期間は、1クール56サイクルとした。

塗装試験体は、70mm×150mmの平板、塗装面の下半分に長さ50mmのスクラッチありとした。無塗装試験体は、70mm×150mmの平板とした。

試験項目は、塗装試験体については目視観察、質量測定、色調、光沢度とした。無塗装試験体では、目視観察と質量測定および腐食減量の測定を行った。腐食減量は、腐食生成物を除去したのち、質量を計測し、劣化前の試験体質量から減じることで算出した。腐食生成物の除去は、JISZ2371-2000(塩水噴霧試験方法)の参考表1の材料「亜鉛及び亜鉛合金」に準じて行った。

4.3 実験結果

(1) 屋外暴露試験

1) 乾性沈着試験

ここでは、乾性沈着試験のうち、水洗い無のサンプルについて10年までの結果について概要を記す。表4.2に10年目での試験体写真を示す。図4.2に質量変化の結果を示す。

試験体種類、地域により腐食程度が異なっていた。暴露期間が長くなるにつれ、塗膜の割れ、剥離、変退色、腐食の発生等の変状がそれぞれに認められた。留萌に暴露した試験体で、塗膜の膨れや赤錆までの腐食が認められた。札幌でも白錆の発生が認められるものがあった。その他では、目立った腐食はなかった。試験体種では、亜鉛メッキ鋼板にアクリル塗料を塗っているNo.1で腐食が発生し、留萌では外周部が断面欠損を生じるほどの赤錆の発生等腐食が認められた。塗装溶融亜鉛-5%アルミ合金めっき鋼板にアクリル塗装をしたNo.2でも、留萌で角部分から赤錆の発生が認められ、札幌でも白錆の点発生が認められた。

質量変化率は、No.1, No.2の留萌の変動が大きかった。留萌では、腐食による錆等による質量増加の後、基板の損失による質量減少が生じたと推察される。また、札幌においたサンプルで質量増加が認められる。写真と比較すると、裏面に汚れの付着が著しく、これが質量増加の原因と考えられる。

乾式沈着の条件における耐久性は、ポリエステル塗装溶融亜鉛めっき鋼板が低く、次にポリエステル塗装溶融亜鉛-5%アルミ合金メッキ鋼板(Y25)となった。塗料で比較するとポリエステル塗料のもので耐久性の低いものが多く、フッ素パウダー入りやフッ素塗料では、耐久性の向上が認められた。

図4.3に腐食の認められたNo.1, 2について、NuWiCC-ST解析により算出された近傍点の年間平均飛来海塩粒子量と質量変化量の関係を示す。腐食による質量変化率は、基板の損傷が認められていない7年目(No.1)および8年目(No.2)の値を用いた。飛来した海塩粒子量と質量変化量は良く対応していた。日射量等の影響を受けにくい、乾式沈着試験であるため、腐食による質量変化には飛来塩分が大きく関係したと考えられる。

表 4.2 乾性沈着試験 10年目の試験体状況

番号	試験体の名称	めっき組成	めっき量 (g/m ²)	塗装系	10年後の状況 (旭川)		10年後の状況 (札幌)		10年後の状況 (留萌)		10年後の状況 (上磯)		10年後の状況 (陸別)	
					表	裏	表	裏	表	裏	表	裏	表	裏
1	塗装溶融亜鉛めっき鋼板	Zn(Z25)	250	ポリエステル										
2	塗装溶融亜鉛-アルミ合金めっき鋼板	5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル										
3		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル										
4		5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル (低光沢)										
5		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル (低光沢)										
6		5% Al-Zn (Y25)	250	フッ素樹脂パワ-混入 ポリエステル										
7		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素樹脂パワ-混入 ポリエステル										
8		5% Al-Zn (Y25)	250	フッ素										
9		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素										
10		塗装溶融亜鉛-Al・Mg・Si合金めっき鋼板	11%Al-3%Mg-0.2%Si-Zn (K12)	120	高耐候アクリル									
11	アルミニウム合金板	-	-	ポリエステル										
12				フッ素 (低光沢)										

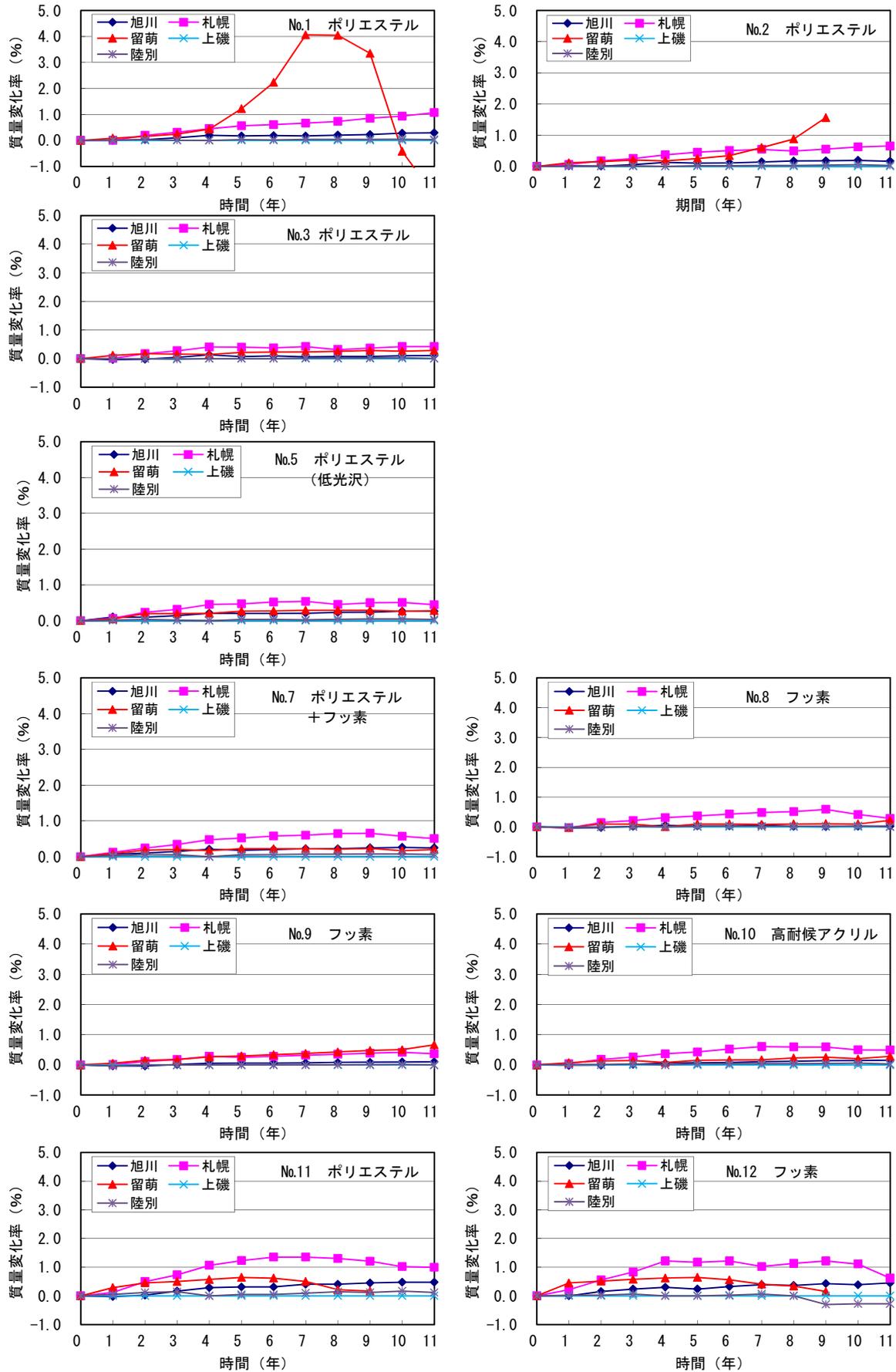


図 4.2 乾性沈着試験の暴露試験結果 (質量変化率)

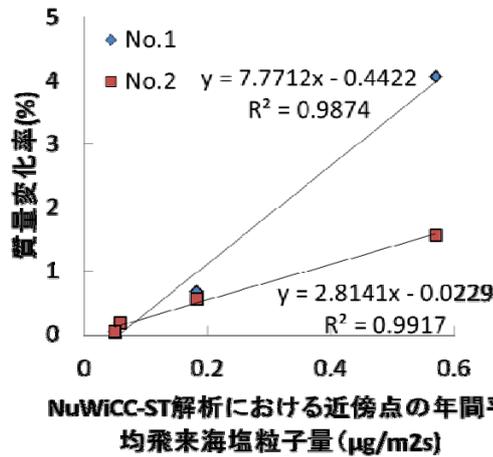


図 4.3 年間平均飛来海塩粒子量と質量変化量の関係

2) 水溜り試験

ここでは、曲げ加工をした試験体について計測した結果を示す。すべて傾斜した暴露台での暴露であり、計測前には水洗いを行い、目視観察と質量計測を行った。

表 4.3 に暴露 10 年目の試験体について、曲げ加工の凸部、凹部表面を撮影した写真を示す。いずれの試験体においても、加工部分には塗膜のヒビ、膨れ、白錆、黒錆や赤錆が発生していた。地域による差はそれほど明解ではなかった。また、比較的ポリエステル系の塗料を用いたもので、基板の種類に関わらず、錆が認められているようであった。

図 4.4 に初期の質量を 100 として表した質量変化率の経時変化を示す。経年に伴い、質量は増加する傾向が認められた。増加の程度はごくわずかであり、最大でも 0.5%程度であった。ここでは、毎回洗浄、乾燥した後の計測であることから、質量の増加は腐食が原因であると推察される。

質量増加率で比較するとほぼどの試験体においても、陸別で質量変化率が最も小さかった。一方、最も大きいのは留萌であった。また、質量増加率の小さい試験体は、熔融亜鉛-55%アルミ合金めっき鋼板を使用したもので、フッ素塗装、ポリエステル塗装、フッ素樹脂パウダー入りポリエステル塗装、低光沢のポリエステル塗装の順となった。また、高耐候アクリル塗装アルミ合金についても、質量変化率が小さかった。

折り曲げ等の加工部は耐久性の弱点となるが、加工のある場合の腐食程度は、めっき組成、塗料により異なり、耐久性の向上が認められたものがあつた。

表 4.3 曲げ加工有試験体の 10 年目の状況

番号	試験体の名称	めっき組成	めっき量 (g/m ²)	塗装系	10年後の状況 (旭川)	10年後の状況 (札幌)	10年後の状況 (留萌)	10年後の状況 (上磯)	10年後の状況 (陸別)
1	塗装溶融亜鉛めっき鋼板	Zn(Z25)	250	ポリエステル					
2	塗装溶融亜鉛-アルミ合金めっき鋼板	5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル					
3		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル					
4		5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル (低光沢)					
5		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル (低光沢)					
6		5% Al-Zn (Y25)	250	フッ素樹脂ハコガ-混入 ポリエステル					
7		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素樹脂ハコガ-混入 ポリエステル					
8		5% Al-Zn (Y25)	250	フッ素					
9		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素					
10		塗装溶融亜鉛-Al・Mg・Si合金めっき鋼板	11%Al-3%Mg-0.2%Si-Zn (K12)	120	高耐候アクリル				
11	アルミニウム合金板	-	-	ポリエステル					
12				フッ素 (低光沢)					

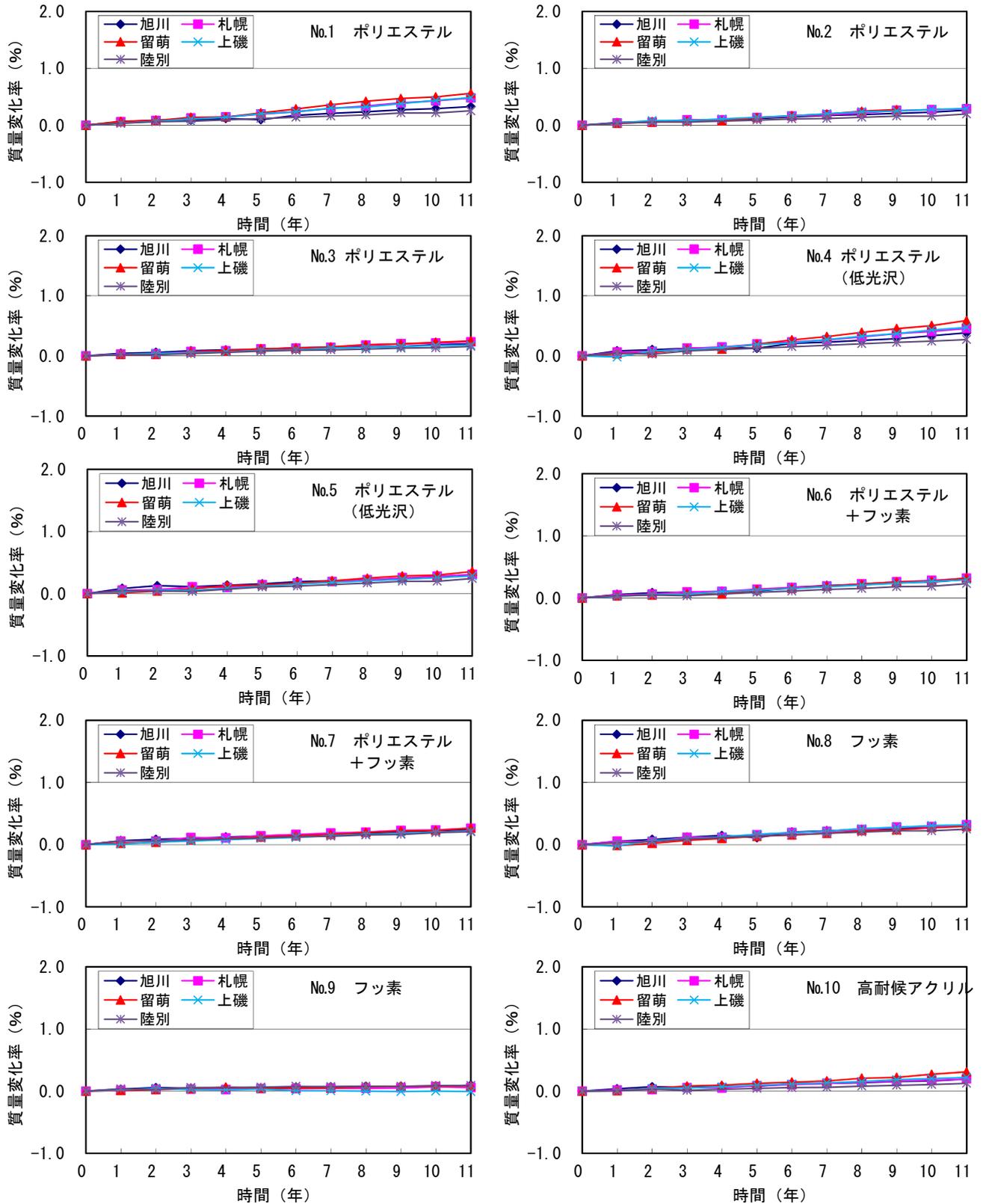


図 4.4 水溜り試験の暴露試験結果 (質量)

3) 傾斜暴露試験

表 4.4 に暴露 10 年目の平板試験体の写真を示す。いずれの試験体においても、顕著な腐食は見受けられなかった。ただし、四隅の固定金具近辺、周辺部から浮き、塗装ひび割れ等、赤錆が認められるものがあった。No. 1 が暴露地すべてでわずかでも赤錆が認められた。また、No. 11, 12 は固定金具部分から破れが生じた。これは風圧に耐えられない材料であったと考えられる。よって、これらの材料は風の強い海岸近傍である留萌では継続不可能となり、3 年目で一度試験体を紛失、それ以降に再開したため、10 年のデータは得られていない。

図 4.5 に質量の経時変化を示す。

質量に大きな変化はなかった。No. 11 ポリエステル塗装高耐候アクリル塗装アルミ合金については、質量減少が生じているが、四隅部が破断するなどの影響と考えられる。

表 4.5 に暴露 10 年目のスクラッチありの平板試験体の写真を示す。スクラッチありの平板試験体は No. 11, 12 で前述の理由のように破損等があったため、3 年目で中止した。

スクラッチ部分の腐食は、程度の差はあるが大半の試験体で観察された。暴露地域 5 か所の試験体全部にスクラッチ部分に錆が確認されたのは、No. 1, 2, 4, 6, 9, 10 であった。それ以外の試験体でも、錆は確認されないが、浮き、膨れが発生していた。

図 4.6 に質量変化率を示す。

いずれもわずかに減少していたが、に大差は認められなかった。スクラッチ部分の腐食は質量変化として検出できるほどではなかったと考えられる。

図 4.7 に色差の変化を示す。

大半の試験体の色差の変化は 10 年経過で 5 程度であった。色差は右肩上がりの直線で上昇する傾向であった。No. 2 は 10 年間で 15 程度の色差となり、最も大きかった。No. 3, 9, 12 では 5 よりも小さく、No. 3, 9 ではほとんど変化がなかった。また、それぞれの試験体の暴露地域による色差の変化は大差がない結果となった。

図 4.8 に乾性沈着試験で使用した試験体を水洗いし、色差を計測した結果を示す。大半の試験体の色差の変化は 10 年経過で 3 程度以下であった。色差は経年とともに上昇する傾向であった。No. 2 は 10 年間で 5 程度の色差となり、最も大きかった。No. 3, 9, 12 ではほとんど変化がなかった。また、それぞれの

試験体の暴露地域による色差の変化は大差がない結果となった。下向きで設置していることから、太陽光の影響が少なく、色差の変化は小さかったと考えられる。試験体種類による色差の変化の相違は同じような傾向を示し、No. 2 で変化が大きく、No. 3, 9, 12 で変化が小さかった。

図 4.9 に光沢度の変化を示す。光沢度の変化は光沢度保持率で表した。光沢度保持率は、初期値の光沢度を 100 とした時の割合である。

光沢度は経年とともに低下した。暴露開始直後から光沢度の低下が認められるものでは、5 年目程度で保持率はおよそ 40~20%程度になり、収束していた。試験体種類では、No. 1, 3, 4, 5, 6, 7, 11 がこれに該当する。初期に光沢度が顕著に低下しないものでは、経年とともに徐々に光沢度が低下し、10 年で収束しなかった。これは No. 2, 8, 9, 10, 12 が該当した。

暴露地による相違を見ると、大差はないものの、No. 1, 3, 8, 9, 10 では留萌において、光沢度の低下が大きい傾向が認められた。

図 4.10 に乾性沈着試験で使用した試験体を水洗いし、光沢度を計測した結果を示す。

光沢度は経年とともに低下するもの、しないものの両方の試験体があった。低下が認められなかったのは、No. 2, 8, 9, 12 であった。それ以外のものでは、低下が認められるものの、傾斜暴露のものに比べて低下割合が小さく、低下の傾向が異なった。直接日射の影響が小さいため、乾性沈着試験の試験体で光沢度の低下が少ないと考えられる。

暴露地による相違を見ると、低下が認められるものは、多少の地域差が認められていた。たとえば、No. 1 では留萌だけが劣化していた。No. 10 も同様の傾向であった。No. 3 は陸別だけで光沢度が高く、それ以外で低下が認められた。No. 7, 11 でも似たような傾向が認められた。

表 4.4 傾斜暴露試験平板試験体の 10 年目の状況

番号	試験体の名称	めっき組成	めっき量 (g/m ²)	塗装系	10年後の状況 (旭川)		10年後の状況 (札幌)		10年後の状況 (留萌)		10年後の状況 (上磯)		10年後の状況 (陸別)	
					表	裏	表	裏	表	裏	表	裏	表	裏
1	塗装溶融亜鉛めっき鋼板	Zn(Z25)	250	ポリエステル										
2	塗装溶融亜鉛-アルミニウムめっき鋼板	5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル										
3		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル										
4		5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル (低光沢)										
5		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル (低光沢)										
6		5% Al-Zn (Y25)	250	フッ素樹脂 [®] ウレタン-混入 ポリエステル										
7		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素樹脂 [®] ウレタン-混入 ポリエステル										
8		5% Al-Zn (Y25)	250	フッ素										
9		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素										
10		塗装溶融亜鉛-Al・Mg・Si合金めっき鋼板	11%Al-3%Mg-0.2%Si-Zn (K12)	120	高耐候アクリル									
11	アルミニウム合金板	-	-	ポリエステル										写真無し
12				フッ素 (低光沢)										

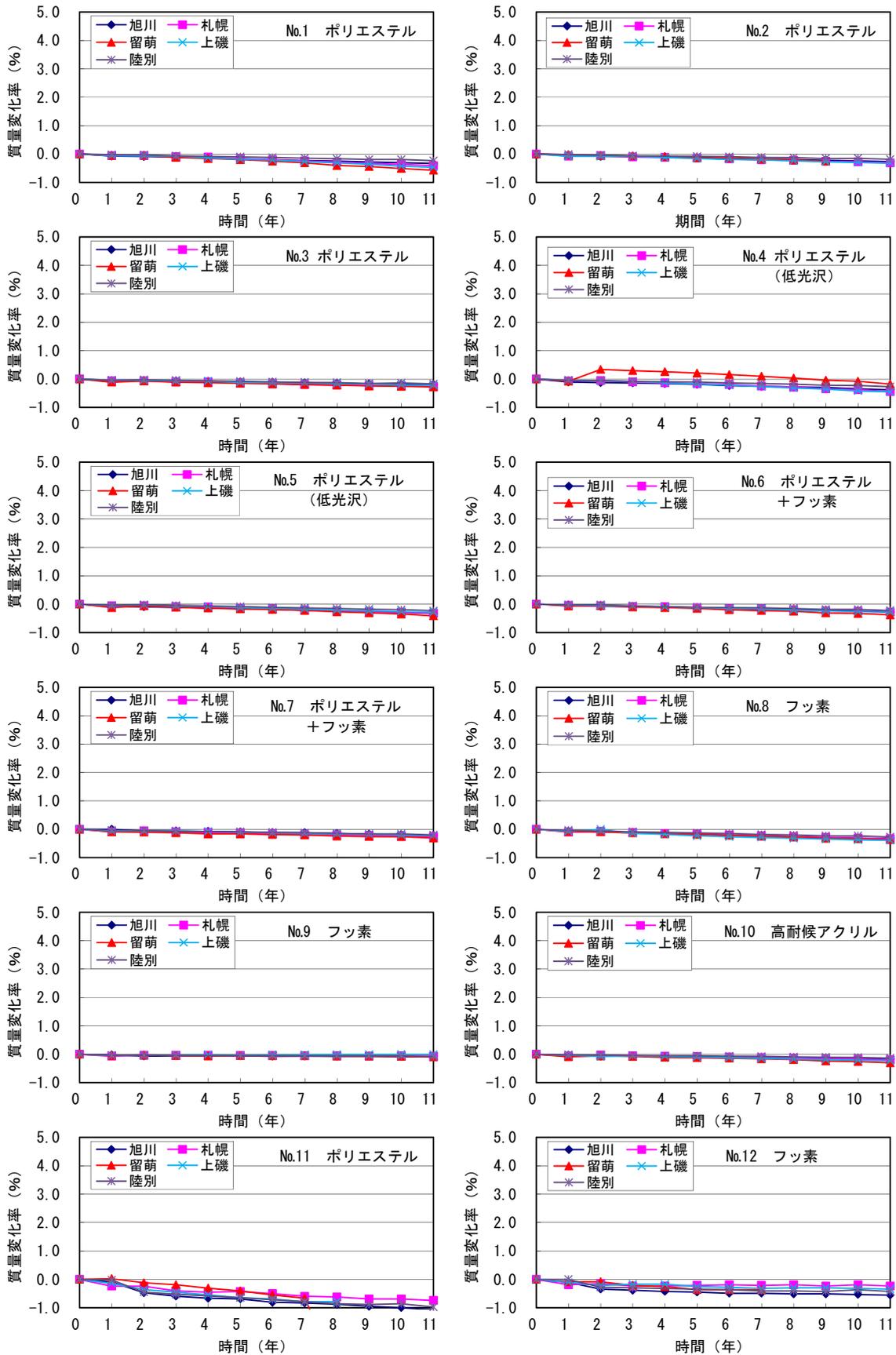


図 4.5 傾斜暴露試験平板試験体の暴露試験結果 (質量)

表 4.5 傾斜暴露試験スクラッチ有試験体の 10 年目の状況

番号	試験体の名称	めっき組成	めっき量 (g/m ²)	塗装系	10年後の状況（旭川）		10年後の状況（札幌）		10年後の状況（留萌）		10年後の状況（上磯）		10年後の状況（陸別）	
					表	裏	表	裏	表	裏	表	裏	表	裏
1	塗装溶融亜鉛めっき鋼板	Zn(Z25)	250	ポリエステル										
2	塗装溶融亜鉛-アルミ合金めっき鋼板	5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル										
3		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル										
4		5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル（低光沢）										
5		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル（低光沢）										
6		5% Al-Zn (Y25)	250	フッ素樹脂ハ ^o ウ ^o -混入 ポリエステル										
7		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素樹脂ハ ^o ウ ^o -混入 ポリエステル										
8		5% Al-Zn (Y25)	250	フッ素										
9		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素										
10		塗装溶融亜鉛-Al・Mg・Si合金めっき鋼板	11%Al-3%Mg-0.2%Si-Zn (K12)	120	高耐候アクリル									
11	アルミニウム合金板	—	—	ポリエステル										
12				フッ素（低光沢）										

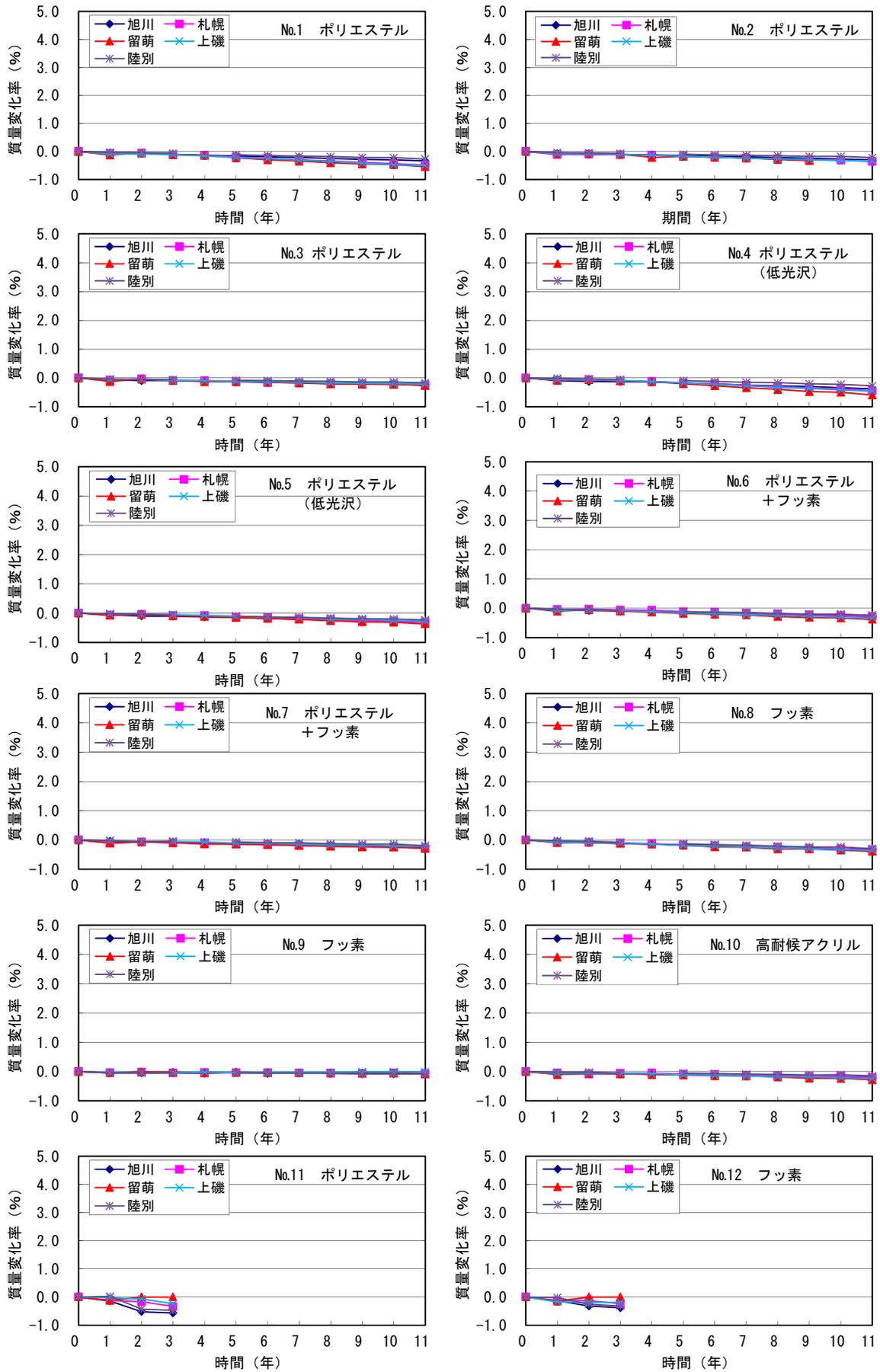


図 4.6 傾斜暴露試験におけるスクラッチ有試験体の暴露試験結果 (質量)

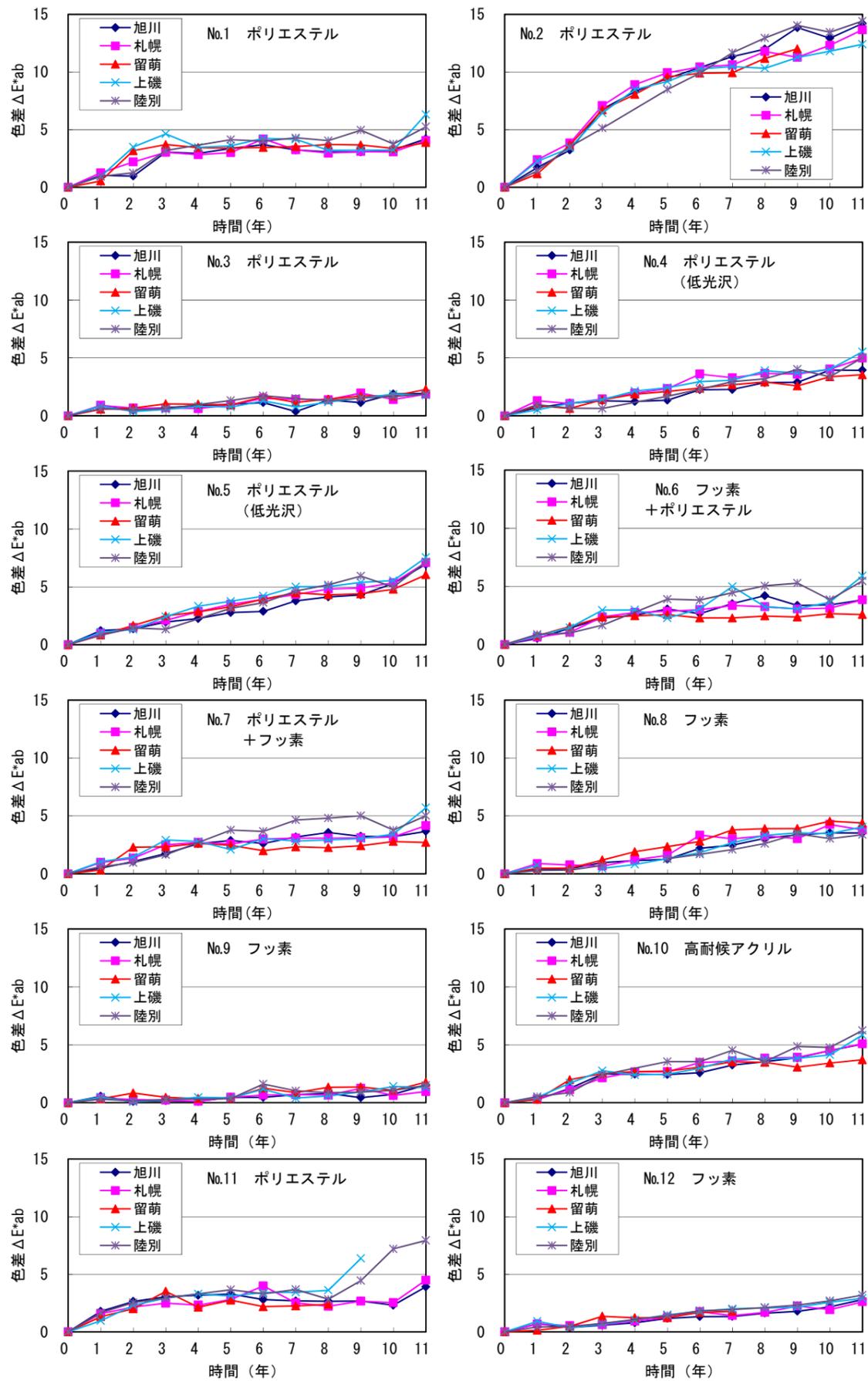


図 4.7 傾斜暴露試験における平板の暴露試験結果 (色差)

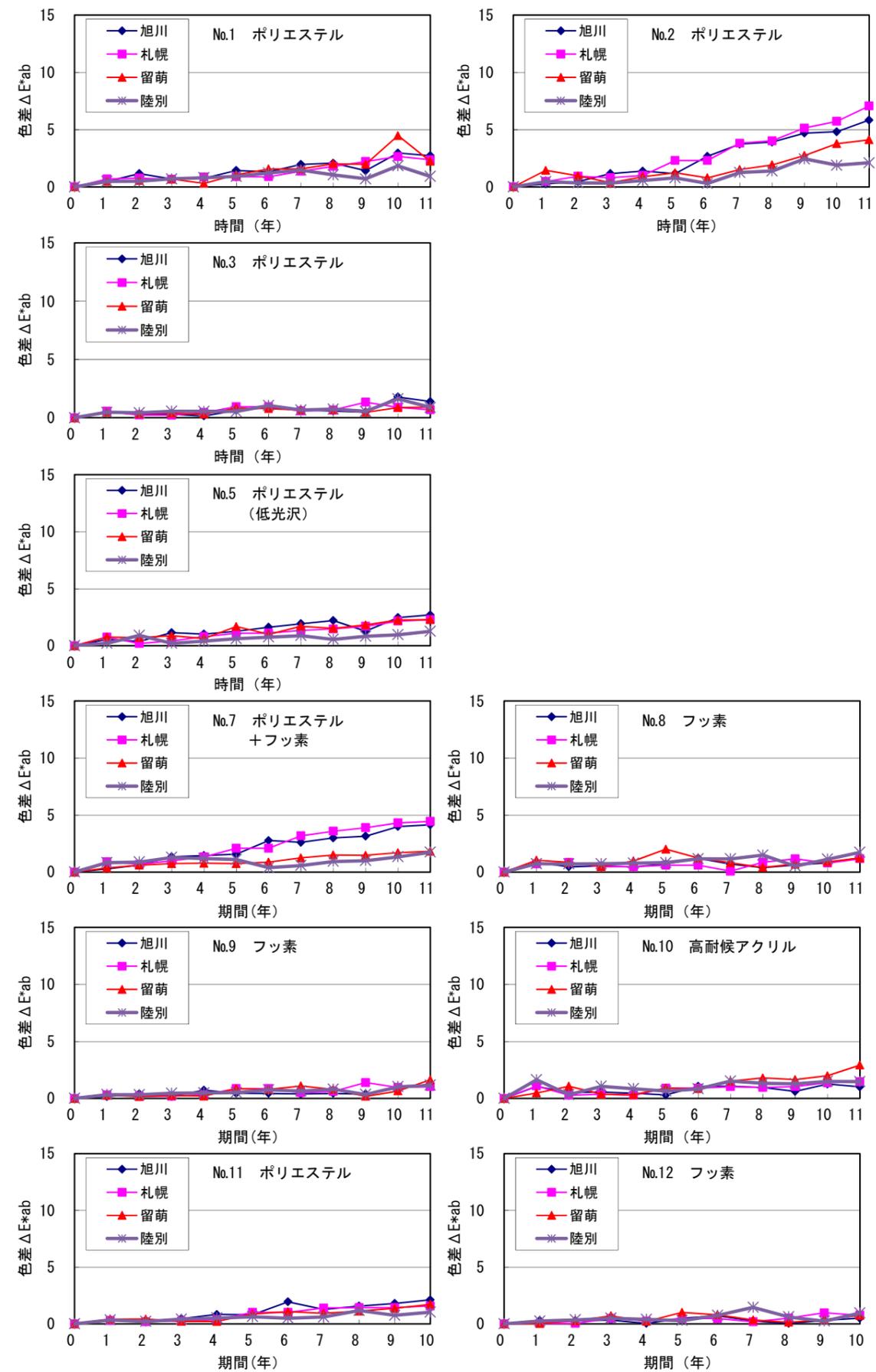


図 4.8 乾性沈着試験における平板の暴露試験結果 (色差)

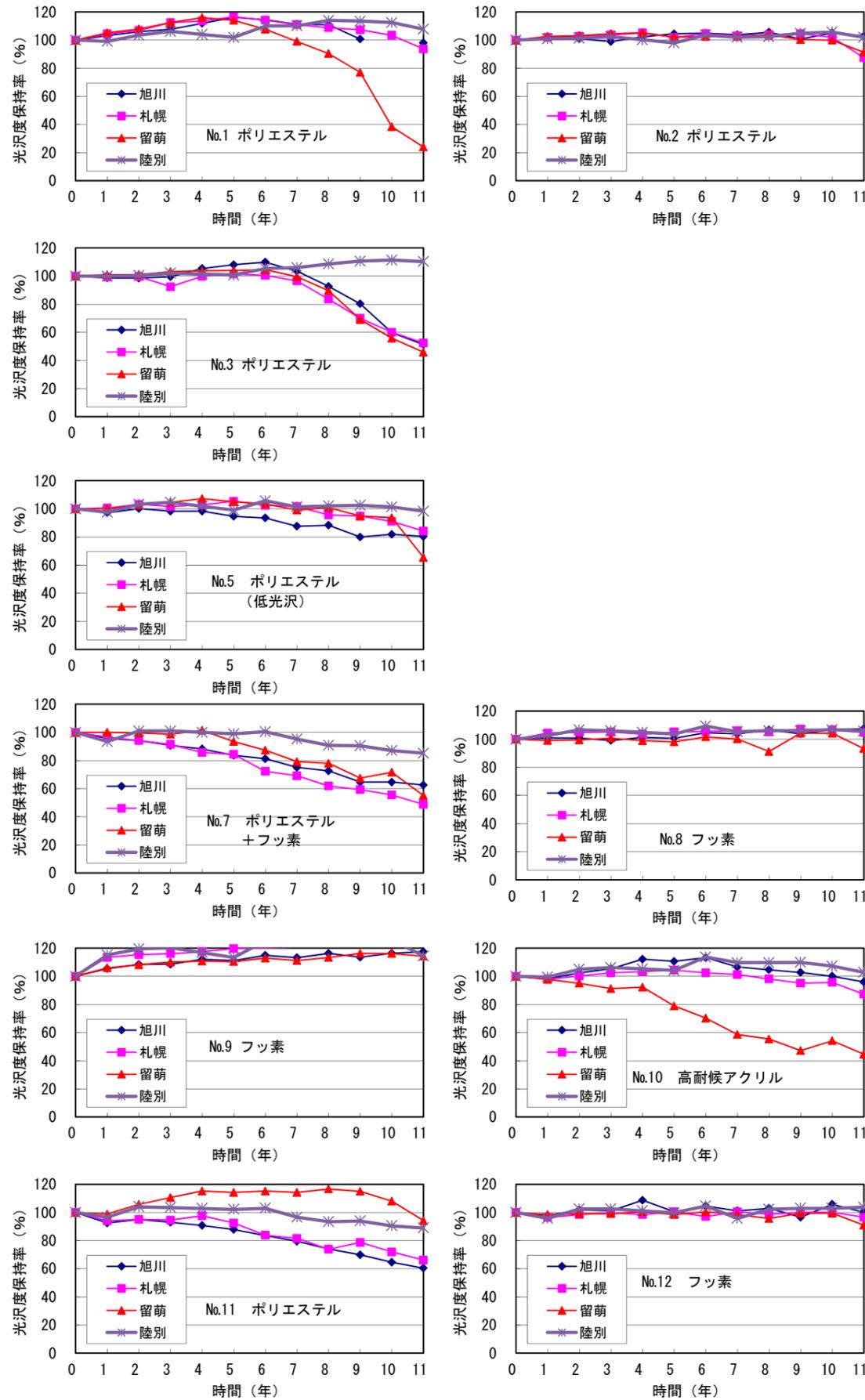


図 4.9 傾斜暴露試験における平板の暴露試験結果 (光沢度)

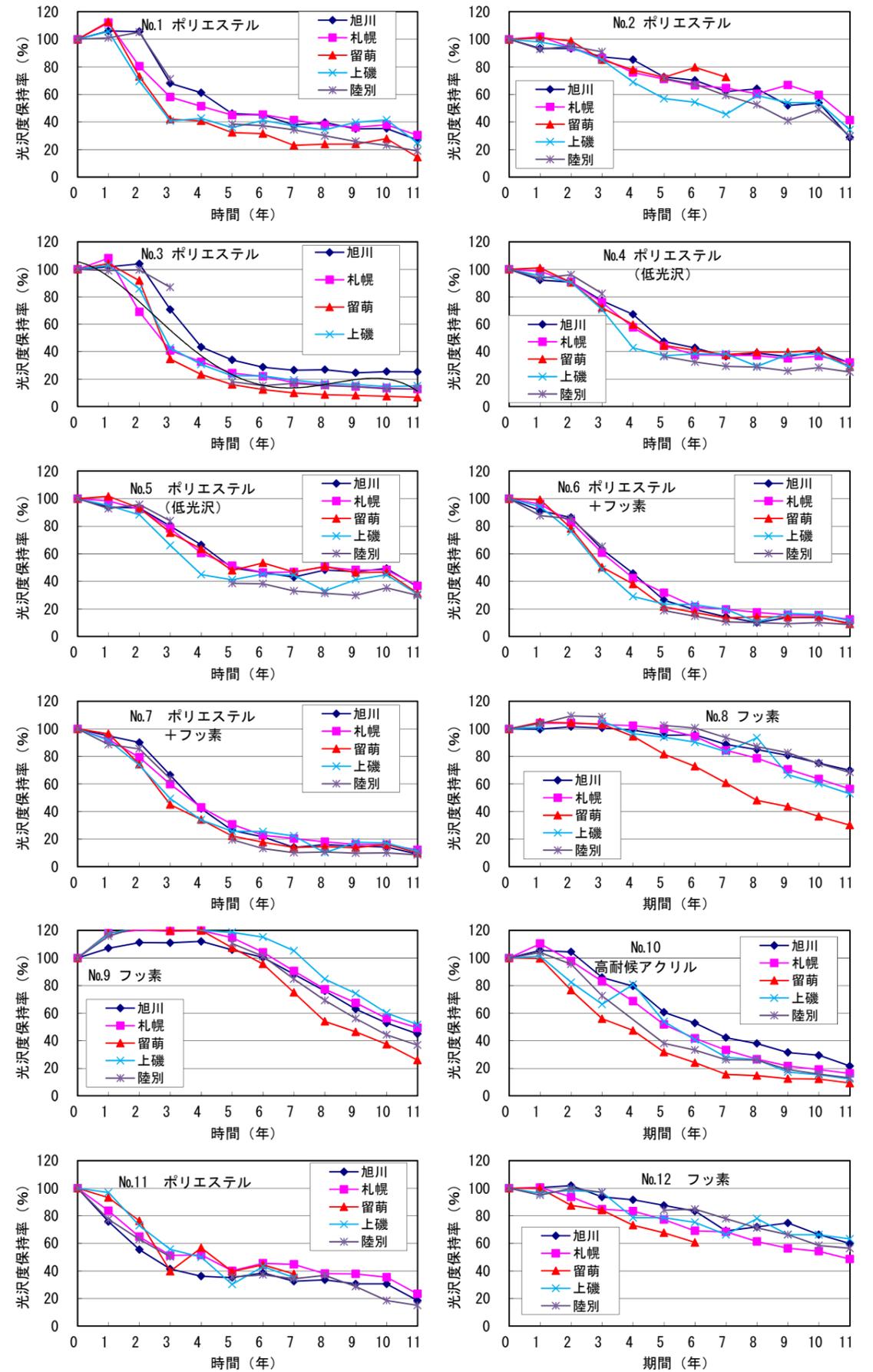


図 4.10 乾性沈着試験における平板の暴露試験結果 (光沢度)

(2) 室内促進試験

1) 塗装試験体

表 4.6 にキセノンウェザーメータによる促進耐候性試験での 5400, 5700 サイクル終了時点のスクラッチ部の拡大写真を示す。スクラッチ部以外は錆の発生等の変化は認められなかった。スクラッチ部分についても、No. 1 のみカッターの切込み部分に錆の発生が認められた。

図 4.11 にキセノンウェザーメータによる促進耐候性試験結果を示す。色差は、試験時間の増加に伴い大きくなっていったが、大半のもので 5 程度の変化であった。比較的色彩が大きく変化したものは、No. 2 で 17 程度、No. 6 および No. 10 で 10 程度の色差となった。

光沢度保持率をみると、試験時間の増加に伴い低下していた。また、試験体種類により低下の傾向には大きな差があり、照射早期に低下するものは保持率の低下が大きく、初期から低下しないものは長期間にわたり保持率を保っていた。もっとも保持率が低かったのは No. 2 で次に No. 11, No. 6 となり、最も高かったのは No. 9 であった。

表 7 にキセノンウェザーメータによる促進試験とサイクル腐食試験を組み合わせた複合試験結果の写真を示す。平滑部分に白錆が認められ、No. 1 で発生割合が多かった。スクラッチ部分には白錆が発生しているものが多く、No. 1, 2, 4, 6 で顕著に錆が確認された。

顕著に錆の発生したものは、塗装溶融亜鉛めっき鋼板、塗装溶融亜鉛-5%アルミ合金めっき鋼板であった。

塗料の種類による相違はあるが、塗装溶融亜鉛-55%アルミ合金めっき鋼板では比較的腐食の発生程度が小さいことがわかる。

図 4.12 にキセノンウェザーメータによる促進試験とサイクル腐食試験を組み合わせた複合試験の結果を横軸にキセノンウェザーメータの総照射時間をとり、示す。

色差、光沢度保持率とも、複合サイクルの促進試験結果は、キセノンウェザーメータのみでの促進試験結果とほぼ変わらない結果を示していた。

2) 無塗装試験体

表 4.8 に無塗装試験体のサイクル腐食試験結果写真を示す。また、図 4.13 にサイクル数と腐食減量の関係を示す。

亜鉛めっき鋼板 (Z25, 0.40mm) の腐食発生時期が最も早く、腐食損失量が大きかったため、試験は 476 サイクルで終了した。次に亜鉛-5%アルミ合金めっき鋼板 (スーパージンク, Y25, 0.35mm) の腐食発錆時期が早く、644 サイクルで損失量が大きく、試験を終了した。亜鉛-11%アルミ-3%Mg-0.2Si 合金めっき鋼板 (スーパーダイマ, K12, 0.40mm) では腐食減量はそれほど大きくならなかったが、白錆と下部に赤錆や断面欠損が認められた。亜鉛-55%アルミ合金めっき鋼板 (ガルバリウム鋼板, AZ150, 0.35mm) は白錆、汚れは認められるが著しいものではなかった。

表 4.6 キセノンウェザーメータによる促進耐候性試験結果

番号	試験体の名称	めっき組成	めっき量	塗装系	耐候性試験5400cy.	耐候性試験5700cy.
			(g/m ²)			
1	塗装熔融亜鉛 めっき鋼板	Zn(Z25)	250	ポリエステル		
2	塗装熔融亜鉛- アルミ合金めっき鋼板	5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル		
3		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル		
4		5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル (低光沢)		
5		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル (低光沢)		
6		5% Al-Zn (Y25)	250	フッ素樹脂ハコガ-混入 ポリエステル		
7		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素樹脂ハコガ-混入 ポリエステル		
8		5% Al-Zn (Y25)	250	フッ素		
9		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素		
10		塗装熔融亜鉛-Al・Mg・Si 合金めっき鋼板	11%Al-3%Mg- 0.2%Si-Zn (K12)	120	高耐候アクリル	
11	アルミニウム合金板	—	—	ポリエステル		
12				フッ素 (低光沢)		無し

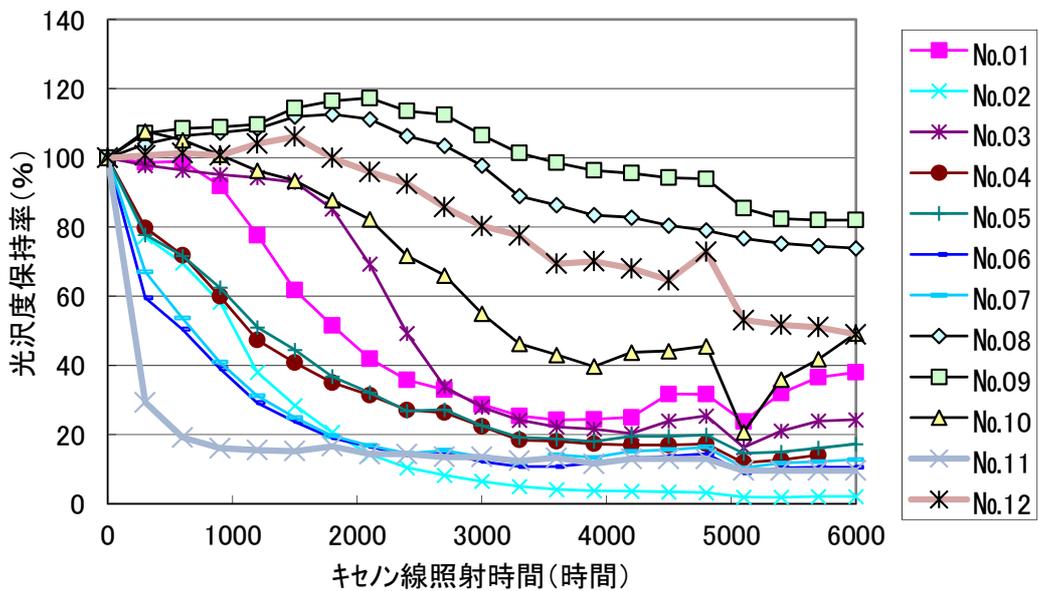
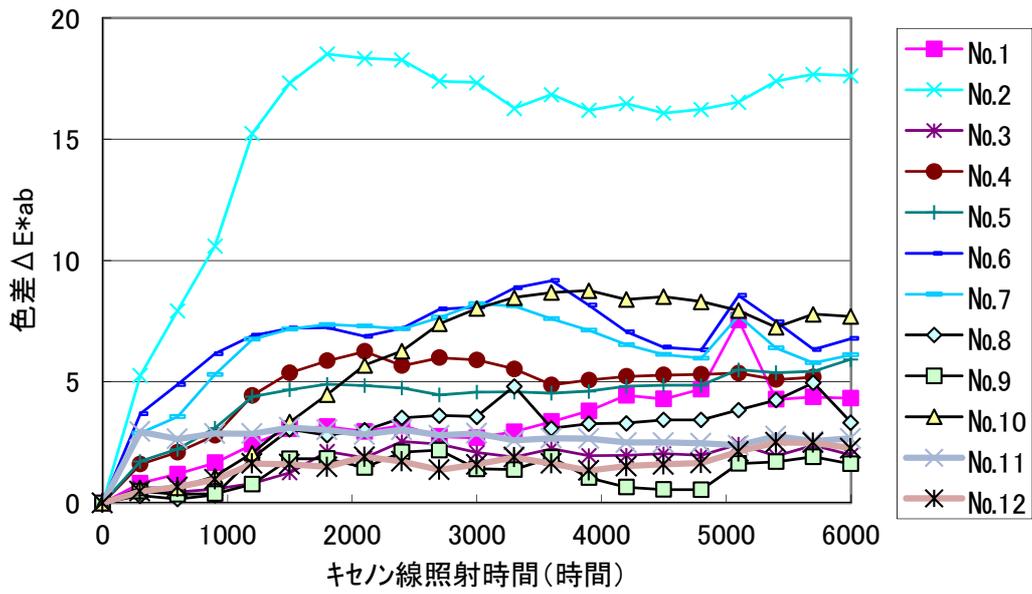


図 4.11 キセノンウェザーメータによる促進試験結果
(上段：色差の変化，下段：光沢度保持率)

表 4.7 促進耐候性試験+サイクル腐食試験結果

番号	試験体の名称	めっき組成	めっき量	塗装系	耐候性試験2700cy. +塩乾湿504cy.
			(g/m ²)		
1	塗装溶融亜鉛 めっき鋼板	Zn(Z25)	250	ポリエステル	
2	塗装溶融亜鉛- アルミ合金めっき鋼板	5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル	
3		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル	
4		5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル (低光沢)	
5		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル (低光沢)	
6		5% Al-Zn (Y25)	250	フッ素樹脂 [®] ウレタン [®] -混入 ポリエステル	
7		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素樹脂 [®] ウレタン [®] -混入 ポリエステル	
8		5% Al-Zn (Y25)	250	フッ素	
9		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素	
10		塗装溶融亜鉛-Al・Mg・Si 合金めっき鋼板	11%Al-3%Mg- 0.2%Si-Zn (K12)	120	高耐候アクリル
11	アルミニウム合金板	—	—	ポリエステル	
12				フッ素 (低光沢)	

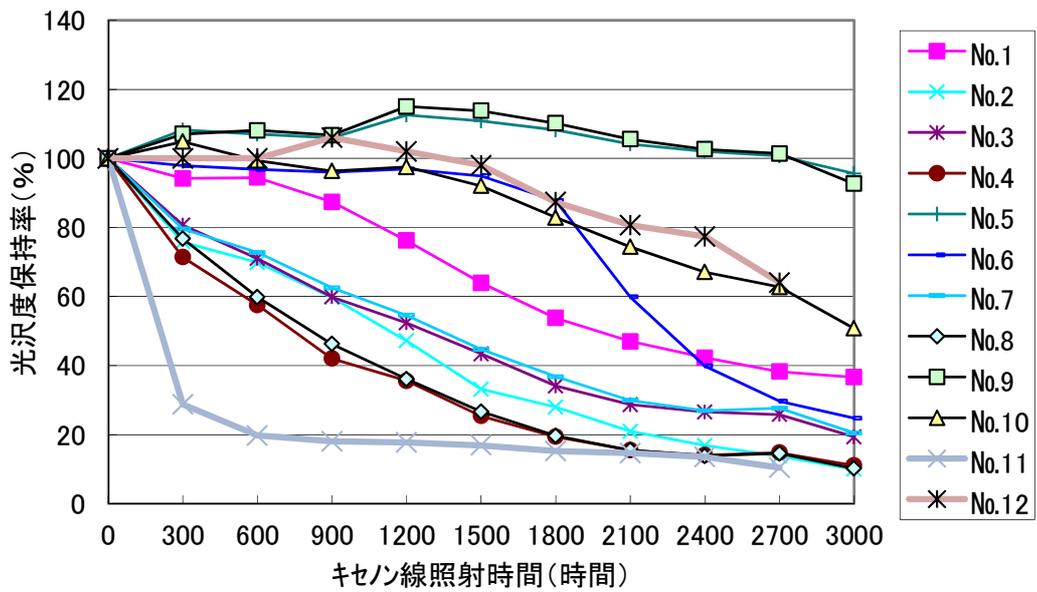
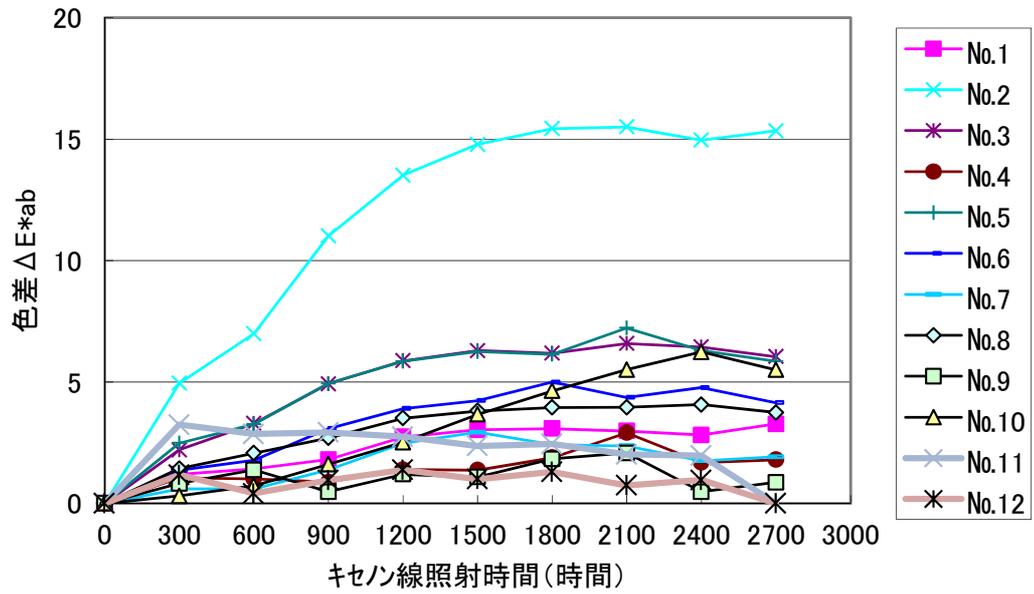


図 4.2 促進耐候性試験+サイクル腐食試験結果
(上段：色差の変化，下段：光沢度保持率)

表 4.8 サイクル腐食試験結果

番号	開始時	塩乾湿112c後	塩乾湿364c後	塩乾湿476c後	塩乾湿588c後	塩乾湿644c後	塩乾湿812c後
N							
SZ							
GL							
SD							

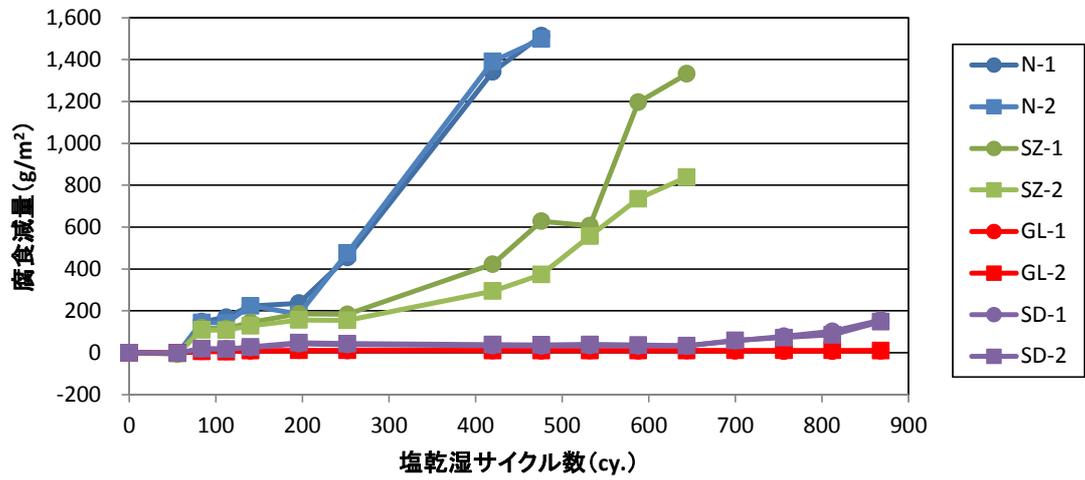


図 4.13 サイクル腐食試験結果（腐食減量）

4.4 考察

(1)劣化曲線の検討

塗膜の寿命予測手法について、たとえば吉田¹⁾は成長曲線からのアプローチがあることを示している。ロジスティック曲線やゴンペルツ曲線を近似できることが示されている。ここでは、成長曲線のうちのゴンペルツ曲線を近似し、劣化曲線をモデル化した上で、促進と暴露の対応や地域性が劣化に与える影響を検討することとした。

近似したゴンペルツ曲線は以下の式で示される。

$$y_t = K \cdot \exp(a^{bt})$$

ここに、 y_t : 塗膜の劣化程度、 K : 定数（最終的に収束する値）、 a, b : 実験定数、 t : 時間

いずれの実測データにおいても、10年までの範囲では、腐食は発生していないか、わずかなものが多かった。塗料の劣化を見ると、色差の変化はそれほど大きいとは言えないが、光沢度は顕著に低下しており、種類による差も大きかった。以上から、劣化曲線を検討するには光沢度について検討する。また、劣化程度が進む状況を表すため、これまで用いてきた光沢度残存率を初期値(100)から減ずること

られた値を光沢度低下率と定義し、 y_t に相当する劣化程度の指標とする。

はじめに、暴露試験結果についてモデル化する。ここでは12種類の試験体の札幌で得られた結果を用いて、実験結果を用いた最小二乗法による近似により、定数 K, a, b を求めた。

図4.14に実測値と予測値の関係の例を示す。表4.9に係数の一覧および実測値とのモデル式による推測値の重相関係数を示す。重相関係数は0.9以上であり、モデル式の当てはまりがよいことが分かる。

次に促進試験結果についてモデル化する。複合と単独の促進試験において、照射時間以外の因子が光沢度に与える影響が少ないことから、キセノンウェザーメータ単独の試験結果についてそれぞれの試験体のモデルを作製した。なお、300時間の照射を1単位として、(1)式の t にあてはめ、最小二乗法による近似により定数 K, a, b を求めた。図4.15に実測値と予測値の関係を示す。表9に促進での係数と重相関係数を合わせて示してある。こちらにおいても、重相関係数は0.9以上であり、モデル式の当てはまりがよいことが分かる。

以上から、成長曲線の近似により劣化曲線を得る

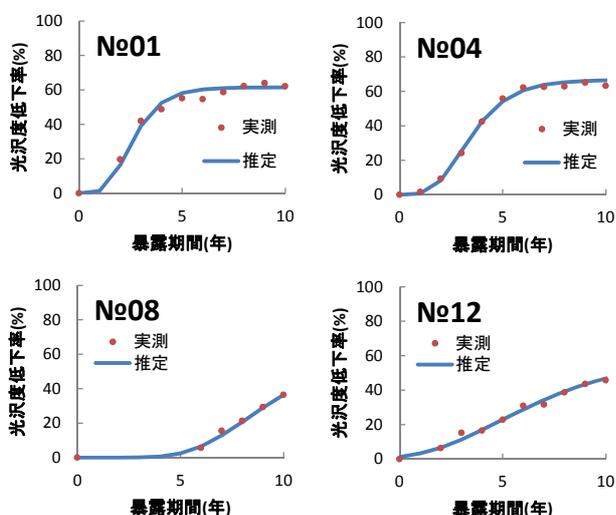


図 4.14 暴露試験での実測値と予測値の関係

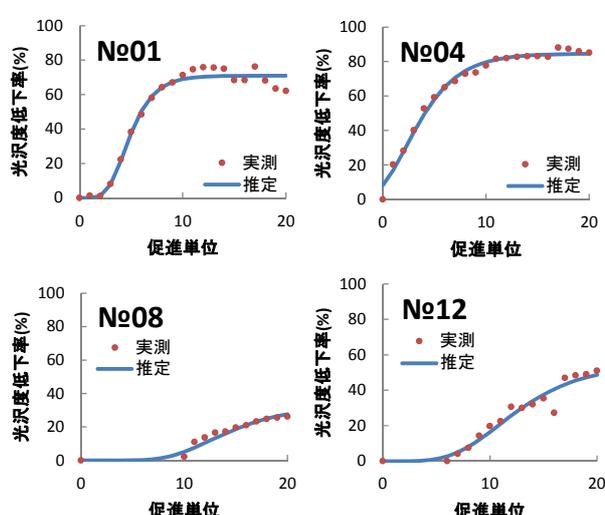


図 4.15 促進試験での実測値と予測値の関係

表 4.9 モデル式の係数と重相関係数

試験体記号		No.01	No.02	No.03	No.04	No.05	No.06	No.07	No.08	No.09	No.10	No.11	No.12
暴露	K	61	49	83	67	56	85	93	62	56	84	64	59
	a	1.8E-05	0.016	6.7E-05	6.5E-05	2E-05	0.002	0.052	4.2E-09	2E-10	0.000	0.074	0.022
	b	0.346	0.680	0.343	0.464	0.435	0.506	0.663	0.699	0.663	0.583	0.515	0.756
	R ²	0.96	0.91	0.98	1.00	0.98	1.00	0.99	0.99	0.96	0.99	0.94	0.99
促進	K	71	97	82	85	83	88	86	33	59	64	87	55
	a	6.E-07	0.063	1.E-06	0.099	0.101	0.139	0.109	2.E-09	2.E-11	2.E-08	0.012	6.E-06
	b	0.536	0.648	0.670	0.694	0.700	0.553	0.545	0.787	0.854	0.681	0.048	0.794
	R ²	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99	0.97	0.98	0.92	0.77	0.95	0.98	0.96

ことが可能と考える。

(2) 暴露と促進の対応

暴露試験と促進試験の対応について、モデル化した劣化曲線を用いて検討する。

K は劣化が進行し、最終的に収束する光沢度低下率である。K は各試験体で異なる値となり、初期値の7割程度までしか低下しないものから9割程度光沢度が低下するものまでであった。

No. 1, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 12 では暴露と促進の値で大差がなかった。No. 2, 5, 8, 11 では大きく異なる結果となった。促進試験により、塗膜の光沢度が最終的にどれだけ低下するかを概ね予測できると考えられるが、例外となるものもあった。塗膜の劣化を非破壊で評価するため、色差や光沢度を用いたが、これらの指標では評価しきれない変質をしているとも考えられる。今後はこれらも踏まえ、サンプル数の制限等を考慮しながら、破壊試験を含めた評価手法等の検討も行う必要がある。

係数 a, b は劣化曲線の形状を表すものであるが、4.1 で作製した劣化曲線においては、横軸となる時間軸の扱いに相違があるため、形状を直接比較することはできない。ただし、式1のKを左辺に移行すると、最終的な劣化状態に対する劣化程度が0～1で表すことができる。これを用いて、それぞれの試験体の劣化程度が0.6になるときの時間および照射単位を求めた。これらは、劣化度が同じため、促進単位を実際の暴露試験時間に換算することができる。表4.10にそれぞれの試験で劣化程度が最大値の0.6になるまでの時間（性能が0.4まで低下するのにかかった時間）および単位と暴露期間1年に相当する照射時間を算出した結果を示す。

一定レベルまで性能が低下するのにかかる時間は、それぞれが持つ耐久性の序列を表すと考えられる。表には、色掛けの濃淡で示しているが、暴露では耐久性の高いものから、8, 9, 12, 2, 10, 7, 4, 5, 6, 1, 3, 11 となった。促進では、9, 8, 12, 10, 3, 1, 5, 4, 2, 7, 6, 11 となった。暴露と促進の序列で

表 4.10 性能低下にかかる時間の比較と暴露に対応する促進量

試験体No.	基板種類	基板記号	めっき量	塗料種類	性能が0.4まで低下するのにかかった時間		暴露1年に対応する促進時間
					暴露 (年)	促進 (単位)	
1	塗装溶融亜鉛めっき銅板	Zn(Z25)	250	ポリエステル	2.9	5.3	555
2	塗装溶融亜鉛 — アルミ合金 めっき銅板	5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル	5.4	3.9	215
3		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル	2.7	8.3	902
4		5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル (低光沢)	3.8	4.1	325
5		55% Al-Zn (AZ150)	150	ポリエステル (低光沢)	3.7	4.2	345
6		5% Al-Zn (Y25)	250	フッ素樹脂ハウダ-混入 ポリエステル	3.6	2.3	188
7		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素樹脂ハウダ-混入 ポリエステル	4.3	2.4	170
8		5% Al-Zn (Y25)	250	フッ素	10.1	15.4	455
9		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素	9.2	24.5	801
10		塗装溶融亜鉛- Al・Mg・Si 合金めっき銅板	11%Al- 3%Mg- 0.2%Si-Zn (K12)	120	高耐候アクリル	5.3	9.2
11	アルミニウム 合金板	—	—	ポリエステル	2.5	0.7	87
12				フッ素 (低光沢)	7.2	13.7	572

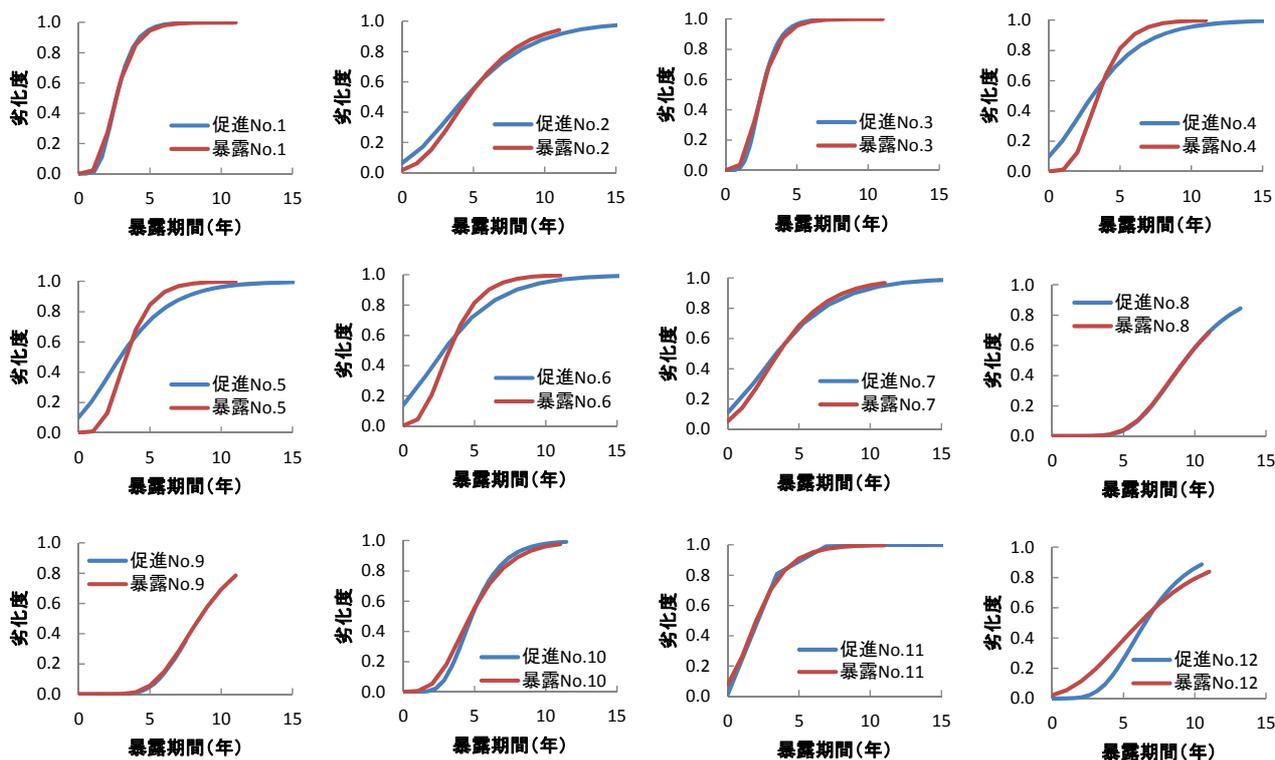


図 4.16 暴露と促進で得られた劣化曲線の比較

は大差ない結果となった。また、耐久性が高いものは劣化度が変化しない期間が5年程度と長く、低いものほど暴露、試験開始直後から劣化していた。

暴露1年に相当する照射時間は、試験体種類により異なる結果となった。暴露1年に相当する促進時間が最も短いものは87時間、長いものは902時間となった。

算出した照射時間と暴露期間の関係により促進試験結果を暴露時間に換算し表すことができる。図4.16に促進試験と暴露試験で得られた劣化曲線について横軸を暴露期間に換算した例を示す。なお、縦軸は劣化度とし、それぞれ収束する光沢度の最終値に対する光沢度の比で表している。

一部を除けば、促進試験と暴露試験で得られた劣化曲線は良く対応していた。曲線形状が異なるのは、No.4, 5, 6, 12であった。曲線形状が異なるものでは、塗料種類や基板等について関係性を見出すことができなかつたが、No.12を除き促進で劣化が早い傾向となっていた。これは、促進試験は安全側の評価をしているともいえる。

以上から、促進試験により塗料の劣化の進行の再現が概ね可能であり、その促進量は塗料の種類によって異なると考えられる。

なお、暴露試験は各地域で実施しており、地域差の影響も同様な手法により劣化モデルを作製することで、特徴の差を定量的に比較可能と考えられる。

しかしながら、10年の結果では、今回指標とした光沢度では地域差はあまり認められていない。また、腐食度等では差が認められるものもあったが、一部の試験体の限定された地域のサンプルであり、比較検討対象となるサンプルが得られていない状況と言える。

そのため、今後も観察を継続、データを取得し、劣化モデルの高度化を行うこととする。

4.5 まとめ

本研究の結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 乾式沈着条件における耐久性は、ポリエステル塗装溶融亜鉛めっき鋼板が低く、次にポリエステル塗装溶融亜鉛-5%アルミ合金メッキ鋼板 (Y25) となった。塗料で比較するとポリエステル塗料のもので耐久性の低いものが多く、フッ素パウダー入りやフッ素塗料では、耐久性の向上が認められた。
- (2) 乾式沈着条件において腐食の認められた試験体の地域差については、質量変化量は飛来した海塩粒子量と良く対応した
- (3) 水溜り試験において、折り曲げ等の加工のある場合の腐食程度は、めっき組成、塗料により異なり、耐久性の向上が認められたものがあつた
- (4) 傾斜暴露試験において、暴露期間 10 年では、腐食による質量変化や色差の変化、地域差は大きくなかつた。光沢度は経年で低下し、収束したものがあつた。
- (5) 室内促進試験では、色差、光沢度保持率とも、複合サイクルの促進試験結果とキセノンウェザーメータのみでの促進試験結果とは、照射時間の影響で整理でき、照射時間による低下程度に差はなかつた。

(6) 無塗装板のサイクル腐食試験では、亜鉛めっき鋼板 (Z25, 0.40mm) の腐食発生時期が最も早く、次に亜鉛-5%アルミ合金めっき鋼板 (スーパージंक, Y25, 0.35mm), 亜鉛-11%アルミ-3%Mg-0.2Si 合金めっき鋼板 (スーパーダイマ, K12, 0.40mm), 最も腐食の発生が遅いのは、亜鉛-55%アルミ合金めっき鋼板 (ガルバリウム鋼板, AZ150, 0.35mm) であつた。

(7) 塗膜の劣化は、暴露期間 (促進劣化期間) と劣化程度との関係に対し、ゴンペルツ曲線を近似し、劣化曲線を得ることができた。

(8) 促進量 (実際の暴露期間に対応する促進試験の時間) は、試験体種類により異なつた。

(9) 促進量を考慮すると、劣化曲線は促進と暴露で同様の形状となるもの、促進で劣化の早いものが多かつた。

(10) 促進と暴露で収束する劣化程度 (この場合光沢度) が異なつているものがあつた。色差や光沢度の指標では評価しきれない変質をしているとも考えられる。

暴露期間は 10 年であり、光沢度等では大きな差が認められていない。今後も試験を継続し、破壊試験を含めた評価手法等の検討も行う必要がある。

[参考文献]

- 1) 吉田豊彦: 塗膜の寿命 (Ⅲ), 色材, 65(7), pp. 435-440 (1992)

6. まとめ

本研究は、建築材料の実環境下での耐久性に関するデータを収集し、促進試験法と実環境下での耐久性との対応を明らかにするため、調査を実施したものである。以下に得られた結果をまとめる。

(1) 窯業系サイディング追加実験

・平成7年製のサイディングと比較して平成14年製のサイディングの耐凍害性能の向上が見られた。

・耐凍結融解性を示す指標であるはく離強さ比は厚さ変化率が4%以下の範囲での変化が著しかった。

・屋外曝露試験において、曝露年数の進行とともにサイディングの凍害劣化程度は大きくなる。

特に、抄造法によるサイディングは概して凍害劣化が生じ易くその程度も大きい。積層プレス法によるサイディングは概して劣化は少ない。製造方法の特性がサイディングの耐凍害性に影響していることが再確認された。

・札幌の凍害劣化指数は旭川の0.72倍、陸別は0.54倍となっており、凍害劣化は気温よりも水分供給条件の影響が大きいことが再確認された。

・厚さ変化率及び凍融前のはく離強さと凍害劣化指数との相関性は小さく、これらの物性値で耐凍害性を予測することは困難と考える。

・はく離強さ比はサイディングの耐凍害性と比較的良好な相関性が見られ、凍害の評価指標としてふさわしいと考えられる。

・最も凍害環境の厳しい旭川で見ると、はく離強さ比が0.3以下で凍害劣化指数が3以上となっている。曝露角度を90度とした場合の凍害劣化指数とはく離強さ比の関係は、曝露角度45度の場合と同様、はく離強さ比が0.3以上では凍害劣化指数が0であり、凍害を生じていない。

・45度傾斜曝露の凍害劣化指数は90度の垂直曝露の2.5倍程度であり、凍害劣化が促進されている。この結果、垂直曝露されたサイディングが45度傾斜曝露されたサイディングと同程度の凍害劣化に至るには2.5倍程度の年数を要するといえる。

(2) 外断熱複合板

・外断熱用断熱複合パネルでは、セメント系で密度の大きな外装材は耐凍害性に優れ、非セメント系は耐凍害性・反り性状に優れていた。

(3) 建築外装用金属板

・乾式沈着条件における耐久性は、ポリエステル塗

装溶融亜鉛めっき鋼板が低く、次にポリエステル塗装溶融亜鉛-5%アルミ合金メッキ鋼板(Y25)となった。塗料で比較するとポリエステル塗料のもので耐久性の低いものが多く、フッ素パウダー入りやフッ素塗料では、耐久性の向上が認められた。

・乾式沈着条件において腐食の認められた試験体の地域差については、質量変化量は飛来した海塩粒子量と良く対応した。

・水溜り試験において、折り曲げ等の加工のある場合の腐食程度は、めっき組成、塗料により異なり、耐久性の向上が認められたものがあつた

・傾斜曝露試験において、曝露期間10年では、腐食による質量変化や色差の変化、地域差は大きくなかつた。光沢度は経年で低下し、収束したものがあつた。

・室内促進試験では、色差、光沢度保持率とも、複合サイクルの促進試験結果とキセノンウェザーメータのみでの促進試験結果とは、照射時間の影響で整理でき、照射時間による低下程度に差はなかつた。

・無塗装板のサイクル腐食試験では、亜鉛めっき鋼板(Z25, 0.40mm)の腐食発生時期が最も早く、次に亜鉛-5%アルミ合金めっき鋼板(Y25, 0.35mm)、亜鉛-11%アルミ-3%Mg-0.2Si合金めっき鋼板(K12, 0.40mm)、亜鉛-55%アルミ合金めっき鋼板(AZ150, 0.35mm)の順であつた。

・塗膜の劣化は、曝露期間(促進劣化期間)と劣化程度の関係に対し、ゴンペルツ曲線を近似し、劣化曲線を得ることができた。

・促進量(実際の曝露期間に対応する促進試験の時間)は、試験体種類により異なつた。

・促進量を考慮すると、劣化曲線は促進と曝露と同様の形状となるもの、促進で劣化の早いものが多かつた。

・促進と曝露で収束する劣化程度(この場合光沢度)が異なつているものがあつた。色差や光沢度の指標では評価しきれない変質をしているとも考えられる。

なお、今後の課題について以下に記す。

サイディングについては、目視による劣化評価手法を提案し、成形法や種別による耐凍害性の特徴を把握することができた。現在のJIS等の試験法では、これらの劣化が再現できないこともわかつた。今後は試験法の見直しが課題と考えられる。

外断熱複合板では、外装部分の相違により劣化程

度が異なることが明らかとなった。しかしながら、部材、構造物での実環境における耐久性のデータはほとんど得られていない。今後は、道営住宅など先行的に外断熱工法が採用された物件等の実構造物の調査等を実施し、耐久性データを蓄積する必要がある。

金属板は、基材、メッキ、塗装の複合材料であり、10年程度の暴露期間では塩害環境の一部で腐食するにとどまった。そのため、結果的に塗膜の耐久性に関わる評価にとどまったことも否めない。今後は暴露試験を継続しつつ、腐食に対する保護効果等の損失を評価する手法や破壊試験を含めた塗膜性能の評価手法等を含めた検討を行っていく。