

# 建築材料の耐久性モニタリングと評価に関する 基礎的研究

## Basic research on monitoring and evaluation of building materials

谷口 円<sup>1)</sup>, 高橋光一<sup>2)</sup>, 糸毛 治<sup>3)</sup>, 飯泉元気<sup>2)</sup>  
Madoka Taniguchi<sup>1)</sup>, Kouichi Takahashi<sup>2)</sup>, Osamu Itoge<sup>3)</sup> and Genki Iizumi<sup>2)</sup>

地方独立行政法人北海道立総合研究機構

建築研究本部

建築性能試験センター

Building Performance Testing Center

Building Research Department

Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization

---

<sup>1)</sup> 建築研究部建築システム G 研究主幹 <sup>2)</sup> 建築研究部建築システム G 研究職員 <sup>3)</sup> 建築研究部建築システム G 主査

1) Senior Reseach Manager of Building system Group 2) Chief of Building system Group of HRO 3) Researcher of Building system Group

## 概要 Abstract

### 建築材料の耐久性モニタリングと評価に関する基礎的研究 *Basic research on monitoring and evaluation of building materials*

谷口 円<sup>1)</sup>, 高橋光一<sup>2)</sup>, 糸毛 治<sup>3)</sup>, 飯泉元気<sup>2)</sup>  
Madoka Taniguchi<sup>1)</sup>, Kouichi Takahashi<sup>2)</sup>, Osamu Itoge<sup>3)</sup> and Genki Iizumi<sup>2)</sup>

キーワード : 建築材料, 長期耐久性, モニタリング, 評価, 促進試験  
Keywords : *Building materials, Long-term Durability, Monitoring, evaluation, accelerated test*

#### 1. 研究概要

##### 1) 研究の背景

- ・高度経済成長期から大量に建設された建築物の老朽化が進み、建替、維持管理に関わる財政負担軽減のため、ストックマネジメントや建築物の長寿命化の必要性が叫ばれている
- ・建築物の寿命は、構成する部材、材料の寿命に依存することは自明であり、個々の材料の耐久性を定量的に知ることは、建築物の寿命予測、制御を行う上で必要不可欠となる。
- ・そのため、寒冷地にある唯一の研究機関として、各種材料の実環境下での材料の耐久性モニタリング（暴露試験）を継続する責務がある。
- ・一方、実環境モニタリングは長時間を要するため、短期間での評価のため日射、凍結融解など特定因子の強度を高めた室内促進試験が行われる。しかしながら、促進試験による劣化の再現性や実際の耐用年数との関係が明らかでないことが課題となっている。

##### 2) 研究の目的

最新の技術動向を踏まえた寒冷地における各種建築材料の耐久性について、実環境におけるモニタリング（暴露試験）と室内促進試験および実構造物調査によるデータの収集と評価に関する基礎的検討を行う。

#### 2. 研究内容

##### 1) 建築材料の技術動向に関わる調査（H28～R1 年度）

- ・ねらい：国内の建築材料全般について、寒冷地における耐久性データが不足している材料を検討する。また、外断熱を施した築年数の異なる実構造物等の外観調査等を行い、外装等に使用される材料の耐久性に関わるデータを収集する。
- ・試験項目等：動向調査、ヒアリング、現地調査等

##### 2) 建築材料の長期耐候性に関するモニタリング（H28～R1 年度）

- ・ねらい：現在モニタリング中の屋根用・外壁用金属板、自己修復コンクリート、長寿命コンクリートの計測を継続する。これらの材料について、定期的に非破壊試験を実施し、劣化の定量的評価と耐久性にかかわるデータを収集、地域性について検討する。また、試験室において同様のサンプルを用いた促進暴露試験を実施し、地域、環境影響による劣化と促進条件による劣化との関係について検討を行う。
- ・試験項目等：超音波伝搬速度、光沢度、色差計、顕微鏡観察、蛍光 X 線、X 線回折等

<sup>1)</sup> 建築研究部建築システム G 研究主幹 <sup>2)</sup> 建築研究部建築システム G 研究職員 <sup>3)</sup> 建築研究部建築システム G 主査

1) Senior Research Manager of Building system Group 2) Chief of Building system Group of HRO 3) Researcher of Building system Group

### 3. 研究成果

#### 1) 建築材料の技術動向に関わる調査 (H28~R1 年度)

- ・ジャパンホームショー, 建材展に参加し, 外装建材の動向調査を行った。省力化のための技術や長寿命化等に伴う美観の持続性をうたった建材等が多くみられた。
- ・建築技術協会の外断熱耐久性研究委員会と連携し, 解体が決定した各地の公営住宅について, 外断熱改修建物の耐久性調査を実施した。外断熱パネルは表層の剥がれ等が見受けられるが, アンカーの引き抜き強度等の低下が認められる物件はなかった。

#### 2) 建築材料の長期耐候性に関するモニタリング (H28 ~R1 年度)

- ・金属板は, 全地域からサンプルを回収した。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。
- ・暴露 10 年目を迎えた自己修復コンクリートの非破壊計測, コアによる詳細調査・分析を行った。自己修復コンクリートでは比較用の普通コンクリートに比べて劣化の進行が遅いこと (図 1), 未水和成分が残存していることが明らかになった。

表 1 ファスナーの引き抜き試験結果および腐食状況写真 (No. 7)

記号	調査面	腐食状況	確認強度 (kN)	備考
No. 1	北東面	部分的な腐食	10 以上	
No. 2		頭部付近からの部分腐食	10 以上	
No. 3		頭部付近の部分腐食	8.56	コンクリート破壊
No. 5	南西面	全面的な断面欠損を伴う腐食	9.47	ファスナー破断
No. 6		全面的な断面欠損を伴う腐食	6.61	ファスナー破断
No. 7		全面的な腐食	10 以上	



表 2 暴露サンプルの劣化状況の一例

番号	基板名称	めっき組成	塗装系	留萌	札幌	旭川
				表	表	表
1	塗装溶融亜鉛めっき鋼板	Zn(Z25)	ポリエステル	飛散 (紛失)		
8	塗装溶融亜鉛-アルミ合金めっき鋼板	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)			

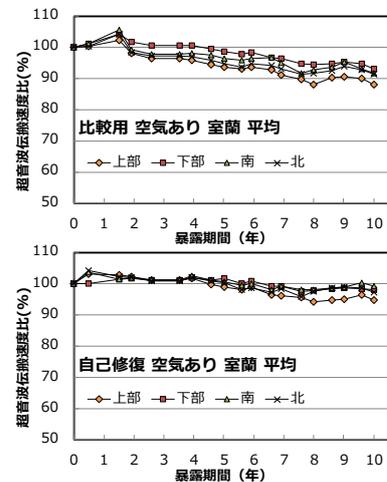


図 1 自己修復コンクリートの非破壊計測結果

### 4. 今後の見通し

- ・外断熱建物の診断結果は, 耐久設計指針等の基礎データとして活用される。
- ・金属板の長期暴露試験結果は, 技術相談等の基礎資料として活用される。
- ・自己修復コンクリートの長期耐久性のデータは, コンクリート構造物の耐久設計基礎資料として活用される。

## 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. 建築材料の動向に関わる調査 .....	- 2 -
2.1 国内の建材にかかわる調査 .....	- 2 -
2.2 外断熱建物の耐久性調査 .....	- 2 -
3. 建築材料の長期耐候性に関するモニタリング .....	- 4 -
3.1 建築外装用金属板 .....	- 4 -
3.2 自己修復コンクリート .....	- 13 -
4. まとめ .....	- 19 -

# 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、最新の技術動向を踏まえた寒冷地における各種建築材料の耐久性について、実環境におけるモニタリング（暴露試験）と室内促進試験および実構造物調査によるデータの収集と評価に関する基礎的検討を行うこととした。

## 1.2 研究の構成

表 1.1.1 に当初でこれまで実施してきた調査対象と調査の期間を示す。

本研究は平成28年から令和元年までの4年間実施した調査である。調査対象とした建築材料は、平成27年末に10年目の結果を報告した後、引き続き暴露を行った建築外装用金属板と当所の重点研究で開発した「自己修復コンクリート」「長寿命（火山灰）コンクリート」と重点研究「劣化分析技術の開発」で作成した劣化モデルを検討するためのサンプルである。

本報告書では、金属板（平成30年で暴露期間終了14年間）、自己修復コンクリート（10年目までの結果）について報告する。なお、金属板については、平成27年度に本研究以前に実施していた経常研究「建築材料の耐久性に関する調査」終了時に暴露期間10年目までの結果を報告しているため、本報告では、主要な結果について報告する。

表 1.1.1 調査対象と調査期間

建材種類	年 度																																																								
	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	H7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	R1	2	3	34
窯業系 サイディング	経常研究：建築材料の耐久性に関する調査																																																								
	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	経常研究：建築材料の耐久性に関する調査																																																								
外断熱複合板	経常研究：建築材料の耐久性に関する調査																																																								
	暴露試験																																																								
建築外装用 金属板	経常研究：建築材料の耐久性に関する調査																																																								
	暴露試験															経常：建築材料の耐久性モニタリングと評価に関する基礎的研究										経常：建築材料の耐久性評価に関する基礎的研究																															
自己修復 コンクリート											重点：自己修復コンクリートの開発					共研：自己修復コンクリートの実用					暴露試験										経常：建築材料の耐久性評価に関する基礎的研究																										
																重点：長寿命コンクリートの開発					暴露試験															経常：建築材料の耐久性評価に関する基礎的研究																					
長寿命（火山灰） コンクリート																重点：劣化の分析評価技術の開発					暴露試験										経常：建築材料の耐久性評価に関する基礎的研究																										
																暴露試験																																									

## 2. 建築材料の動向に関わる調査

### 2.1 国内の建材にかかわる調査

国内の建材にかかわる動向調査として、2017年度に一般社団法人日本能率協会主催の「Japan Home & Building Show」、2019年度に日本経済新聞社主催「建築・建材展」に参加した。外装材を主として、防水材料等について調査を行った。以下に結果を示す。

(1) 一般社団法人日本能率協会主催「Japan Home & Building Show」(2017年度)

総展示規模 535 社・団体、878 ブースの出展があった。出展製品として、内外装材が最も多かった。外装材製品を中心に、計 30 のブースについてヒアリングを行った。外装材の新製品の PR はあまり行われておらず、外装タイル用の接着剤の PR を行っているところが多かった。

建物の供用年数の増加に伴い、タイル仕上での剥落が大きな課題となっている。また、モルタルによる貼り付けは一定以上の技能が要求されることから、技能工の高齢化が進むとともに若年労働者が不足するため、将来的には施工が困難となることが予測される。その対策技術として、躯体追従性に優れ、施工も簡便な接着剤工法へと移行している。

(2) 日本経済新聞社主催「建築・建材展」(2019年度)

総展示規模 312 社・団体、735 ブースの出展があった。出展製品の内訳では、内装部材が最も多くその次に外装部材であった。ついで、床材、その他部材、景観材料・エクステリア等となっていた。こちらでも外装材を中心にヒアリング等を行った。

外装材のキーワードでは、セルフクリーニング、メンテナンスフリー、軽量などが見受けられた。

美観の持続性について PR しているものが多く、促進試験の結果を示し、変色の小さいこと見える化したものや施工直後と経年後の実建物の写真等を例示し、持続性を示しているものもあった。サイディングでは、塗膜色の 15 年保証や、変色と褪色について 30 年保証を打ち出しているものもあった。

### 2.2 外断熱建物の耐久性調査

#### (1) 調査概要

外断熱建物の耐久性調査は、一般社団法人北海道建築技術協会「外断熱耐久性調査委員会」(委員長足立祐介北海学園大学教授)と協力し、実施した。

研究期間において、道内にある 3 棟の外断熱改修を行った公営住宅について、調査を行った。表 2.2.1

表 2.2.1 調査項目の一例

非破壊調査	
設計図書の調査	建物内外部目視調査
内断熱の状況調査	室内温熱環境調査
断熱材の性能試験	
外断熱材の破壊調査	
背面状況の確認	主アンカーの引抜強度試験
コンクリートの破壊調査	
コア採取	圧縮強度試験
中性化試験	鉄筋腐食程度確認

に調査項目を示す。調査項目はここに掲げる項目から、調査建物の状況に応じて可能な項目について選定し、行った。

調査を行った住棟は、旭川近郊の A (昭和 48 年建設、昭和 59 年外断熱改修実施)、札幌近郊の B (昭和 46 年建設、平成元年外断熱改修実施)、北見近郊の C (昭和 41 年建設、昭和 55 年外断熱改修実施)、D (昭和 44 年建設、昭和 55 年外断熱改修実施) の 4 棟である。

以下に主要な結果を抜粋して示す。

#### (2) 調査結果

##### 1) 外断熱改修工法

使用された外断熱改修工法は、A では、寸法 900×1800 mm の炭酸カルシウム系発泡断熱材 60mm パネルを金属アンカーと接着剤により留付けるものであった。B は寸法 900×2700mm の EPS 断熱材 40mm と無機系外装材 12 mm を一体成型した複合パネルをファスナーとダンゴ貼りの接着剤で留付けるものであった。C は、EPS (厚さ 50×2 で 100 mm)、メッシュシート 2 枚貼りの上、吹き付けタイル仕上げ、EPS1 枚の大きさは概ね 600 mm×1200 mm 程度であり、それを 5~7 本のプラスチックアンカーとダンゴ貼りにて留付けるものであった。D は、ウレタン吹付 (厚さ 50mm) を行った上に木下地を組み、繊維混入セメントケイ酸カルシウム板 (900 mm×2700 mm) 厚さ 12mm 板を張り付けたものであった。

##### 2) パネルの止付けアンカーの状況

表 2.2.2 に A で得られたアンカーの腐食状況および引抜強度試験結果と写真 2.2.1 にアンカーの腐食状況を示す。

いずれのアンカーも腐食が見られ、引抜強度は 0.71~3.70kN の範囲であった。建築基準法に基づき、建物規模、所在地から風圧力を算出し、アンカーに必要な耐力を計算すると 0.24kN となった。本調査で

表 2.2.2 アンカーの腐食状況および引抜強度  
試験結果

記号	位置	腐食状況	引張強度 (kN)	
			測定値	平均値
No. 1	北面窓下	全面浮き錆	1.82	1.81
No. 2	北面窓下	全面錆	2.73	
No. 3	北面窓下	一部点錆	1.12	
No. 4	東面一般部	全面浮き錆	0.71	
No. 5	北面一般部	一部浮き錆	0.79	
No. 6	北面一般部	全面錆	3.70	



写真 2.2.1 アンカーの腐食状況

はアンカーの耐力が十分に残存していると判断された。

B では解体工事の状況から、調査ができなかった。

C ではプラスチックアンカーであり、引き抜けることなく、軸の伸び破断により試験を終えた。測定値は 0.91~1.70kN に分布し、平均値は 1.14kN となった。建築基準法に基づき、アンカーに必要な耐力を計算すると 0.13kN となった。現時点でも、十分な耐力を保持していると考えられる。

### 3) 中性化試験

図 2.2.1~2.2.4 に各建物について外壁の仕様(外断熱有無)と中性化深さの関係を示す。

建物 A, D において、外断熱のある部位で中性化深さが小さくなる傾向が認められた。A は全面接着剤を用いた工法、D は前面にウレタンが吹き付けられていた。一方、B, C はダンゴ張りとアンカーの併用であった。

以上から、外断熱改修工法において、躯体に仕上げ材が密着するような手法では、仕上げ材が保護層となり、中性化の進行が抑制されていると考えられる。

### (3)まとめ

本調査結果を以下にまとめる。

- ・外断熱改修後 30 年程度経過した建物において、使用されているアンカーは、腐食等は認められるが、耐力は保持されていた。

- ・躯体に仕上材等が密着する工法では、保護層の役割を果たし、中性化の進行を抑制する効果が認められた。

なお、調査結果は以下の報告も参照されたい。

- ・外断熱改修後 32 年が経過した鉄筋コンクリート造建築物の調査, 日本建築学会北海道支部研究報告集, Vol. 90, pp. 9-12, 2017-06

- ・外断熱改修後 28 年が経過した鉄筋コンクリート造建築物の調査, 日本建築学会北海道支部研究報告集, Vol. 91, pp. 35-38, 2018-06

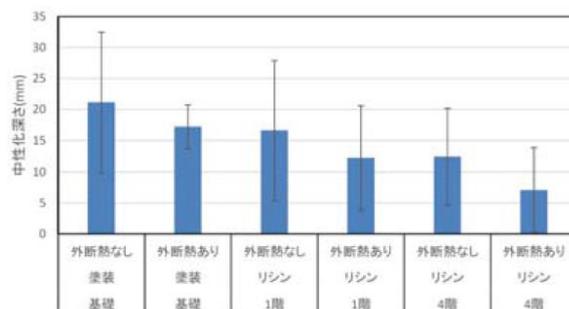


図 2.2.1 外壁仕様と中性化深さの関係 (A)

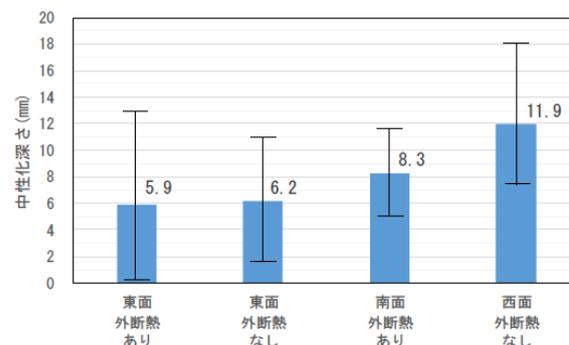


図 2.2.2 外壁仕様と中性化深さの関係 (B)

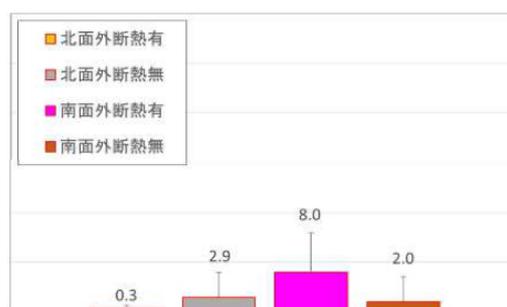


図 2.2.3 外壁仕様と中性化深さの関係 (C)

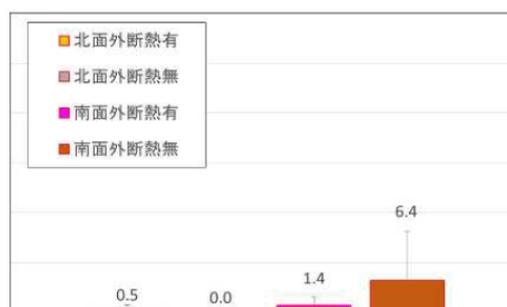


図 2.2.4 外壁仕様と中性化深さの関係 (D)

### 3. 建築材料の長期耐候性に関するモニタリング

#### 3.1 建築外装用金属板

##### (1) はじめに

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ことを目的に平成 17 年より暴露試験を行っている。平成 27 年度に 10 年までの結果を報告した。平成 27 年以降も暴露を継続していたが、平成 30 年冬の爆弾低気圧の影響で留萌で暴露台やサンプルの破損、飛散が生じた。そのため、全サンプルの回収を余儀なくされ、暴露試験を終了することとした。これに伴い、全地域において翌年サンプルの回収を行ったため、留萌は 13 年、その他地域は 14 年の期間となった。

本報告では、10 年目の結果をふまえ、以降に得られた結果の概要を報告する。

\*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。

##### (2) 試験概要

##### 1) 試験体内訳

表 3.1.1 に試験体一覧を示す。

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。

##### 2) 試験体の形状および試験方法

図 3.1.1 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） 塗装試験体のみで実施し、150mm×300mm の平板を設置した。

・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。

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。暴露地の条件に応じ、設置する暴露台、試験体の数は調整した。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、

表 3.1.1 試験体一覧表

No.	めっき記号	めっき付着量	塗装種類
1	Z25	250	ポリエステル
2	Y25	250	ポリエステル
3	AZ150	150	ポリエステル
4	Y25	250	ポリエステル（低光沢）
5	AZ150	150	ポリエステル（低光沢）
6	Y25	250	ポリエステル+フッ素
7	AZ150	150	ポリエステル+フッ素
8	Y25	250	フッ素
9	AZ150	150	フッ素
10	K12	120	高耐候性アクリル
11	-	-	ポリエステル
12	-	-	フッ素

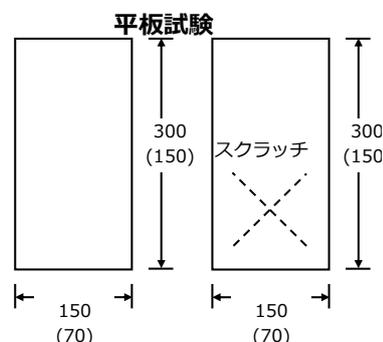


図 4.1 試験体形状

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。

・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。

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あり）を計画しているが、本報告では、14(13)年までの結果とする。

### (3) 実験結果

#### 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14(13)年までの結果について概要を記す。表4.2に14(13)年目での試験体写真を表3.1.2に示す。

10年までの結果と大きく相違なく、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、止付け部（4角）から、変退色、腐食の発生等の変状が認められた。留萌では、No.1の試験体は飛散し紛失した。塗膜の膨れや赤錆までの腐食が認められた。札幌では、大部分に白さびの発生が認められるものがあった。旭川では、No.1で端部にわずかな白さびが認められるが、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は10年目で、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が、13年目には試験体が紛失していた。腐食により止付け部の強度が低下していたためと飛散したと考えられる。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では、留萌で角部分から赤錆の発生が10年目より拡大し、札幌でも表面全体において、白錆の点発生が認められた。

めっき組成と塗料の組み合わせで、目視による変状発生程度を留萌のサンプルで比較する。

最も変状が小さいのは、No.10であり、高耐候ア

クリル塗料とめっき（K12）であった。次にNo.8、No.9であり、フッ素塗料とめっきはY25、AZ150であった。

最も変状が大きいのは、No.1と推測され、ポリエステル塗料とめっきZ25であり、次にNo.2であり、ポリエステル塗料とめっきY25であった。

以上から、本調査の範囲ではあるが、飛来塩分の多い厳しい沿岸環境下において、高耐候性を発揮するには、高耐候塗料、高耐候なめっきを使用することが有効である。

#### 2) 傾斜暴露試験

表3.1.3に暴露14(13)年目の平板試験体の写真を示す。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は海岸地域である留萌、上磯で赤さびが10年に比べ広がっていた。また、留萌の材料では、破れが生じているものが多く、強風の影響によるものと考えられる。

表3.1.4に暴露14(13)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、膨れが確認されたのは、No.1, 2, 4, 6, 8, 10であった。それ以外の試験体では、傷部分に錆がわずかであるか、膨れが比較的小さかった。これらのめっきはAZ150であった。

図3.1.1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、その後増加し10程度以上になり、右肩上がりの直線で上昇した。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3.1.2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。10年目の結果と大差ない。No.1, 3, 4, 5, 6, 7, 11は、暴露開始直後から5年目程度で保持率はおおよそ40~20%程度に収束していた。No.2, 8, 9, 10, 12については、経年とともに徐々に光沢度が低下した。

暴露地では、大差はないものの、No.1, 3, 8, 9, 10では留萌で、光沢度の低下が若干早かった。

表 3.1.2 乾性沈着試験 13 年目（留萌）、14 年目（旭川、札幌）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 <sup>2</sup> )	塗装系	14年後の状況（旭川）		14年後の状況（札幌）		13年後の状況（留萌）	
					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 <sup>®</sup> ウレタン-混入 ポリエステル						
7		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素樹脂 <sup>®</sup> 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）						

表 3.1.3 傾斜暴露試験平板試験体の13年目（留萌）、14年目（旭川、札幌）の状況

番号	試験体の名称	めっき組成	めっき量 (g/m <sup>2</sup> )	塗装系	14年後の状況（旭川）		14年後の状況（札幌）		13年後の状況（留萌）		14年後の状況（上磯）		14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	フッ素樹脂パワータン-混入ポリエステル										
7		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素樹脂パワータン-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）										

表 3.1.4 傾斜暴露試験スクラッチ有試験体の 13 年目（留萌）、14 年目（旭川、札幌）の状況

番号	試験体の名称	めっき組成	めっき量 (g/m <sup>2</sup> )	塗装系	14年後の状況（旭川）		14年後の状況（札幌）		13年後の状況（留萌）		14年後の状況（上磯）		14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 <sup>o</sup> ウ <sup>a</sup> -混入 ポリエステル										
7		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素樹脂ハ <sup>o</sup> ウ <sup>a</sup> -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）										

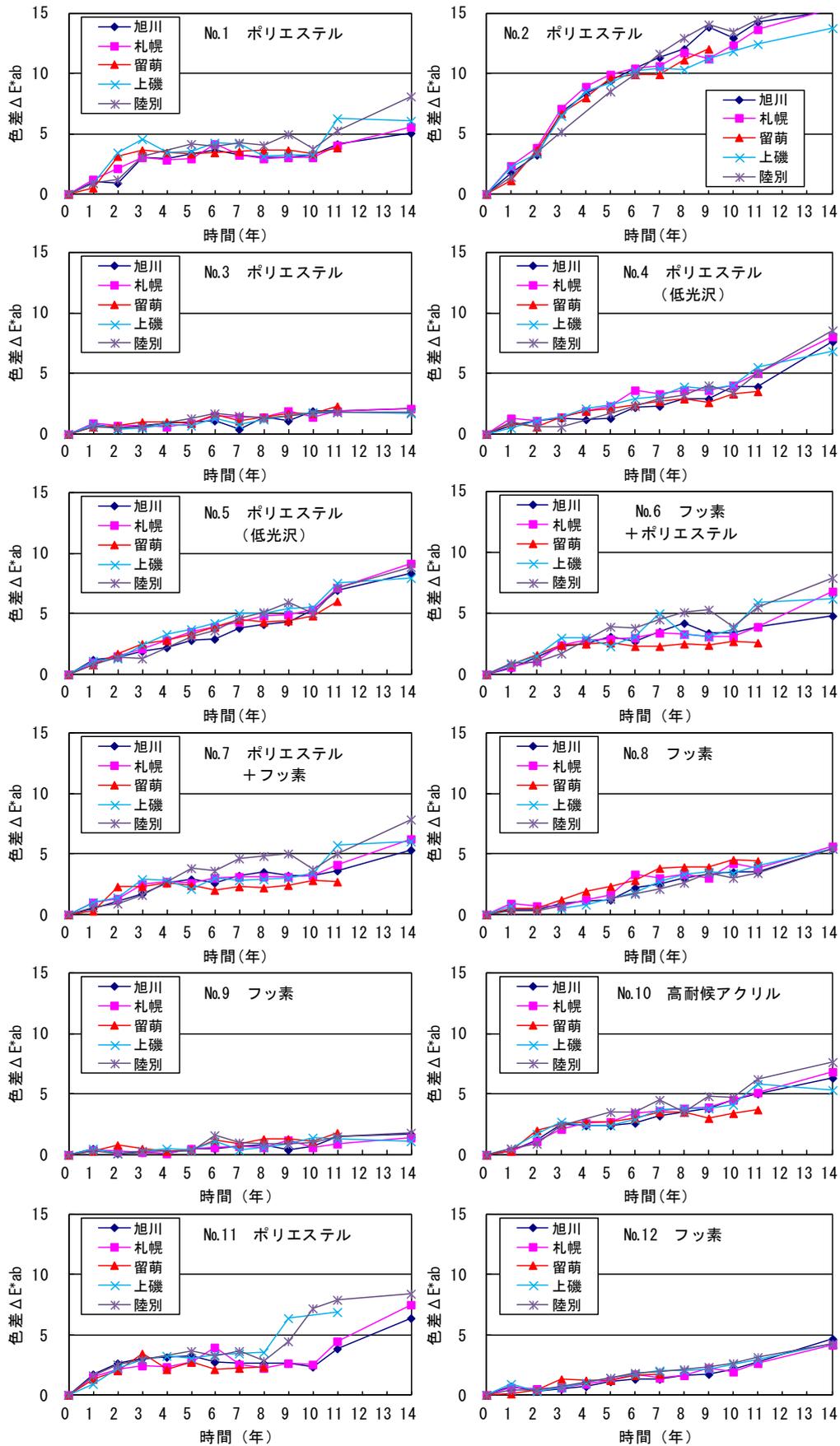


図 3.1.1 傾斜暴露平板試験体の暴露試験結果 (色差)

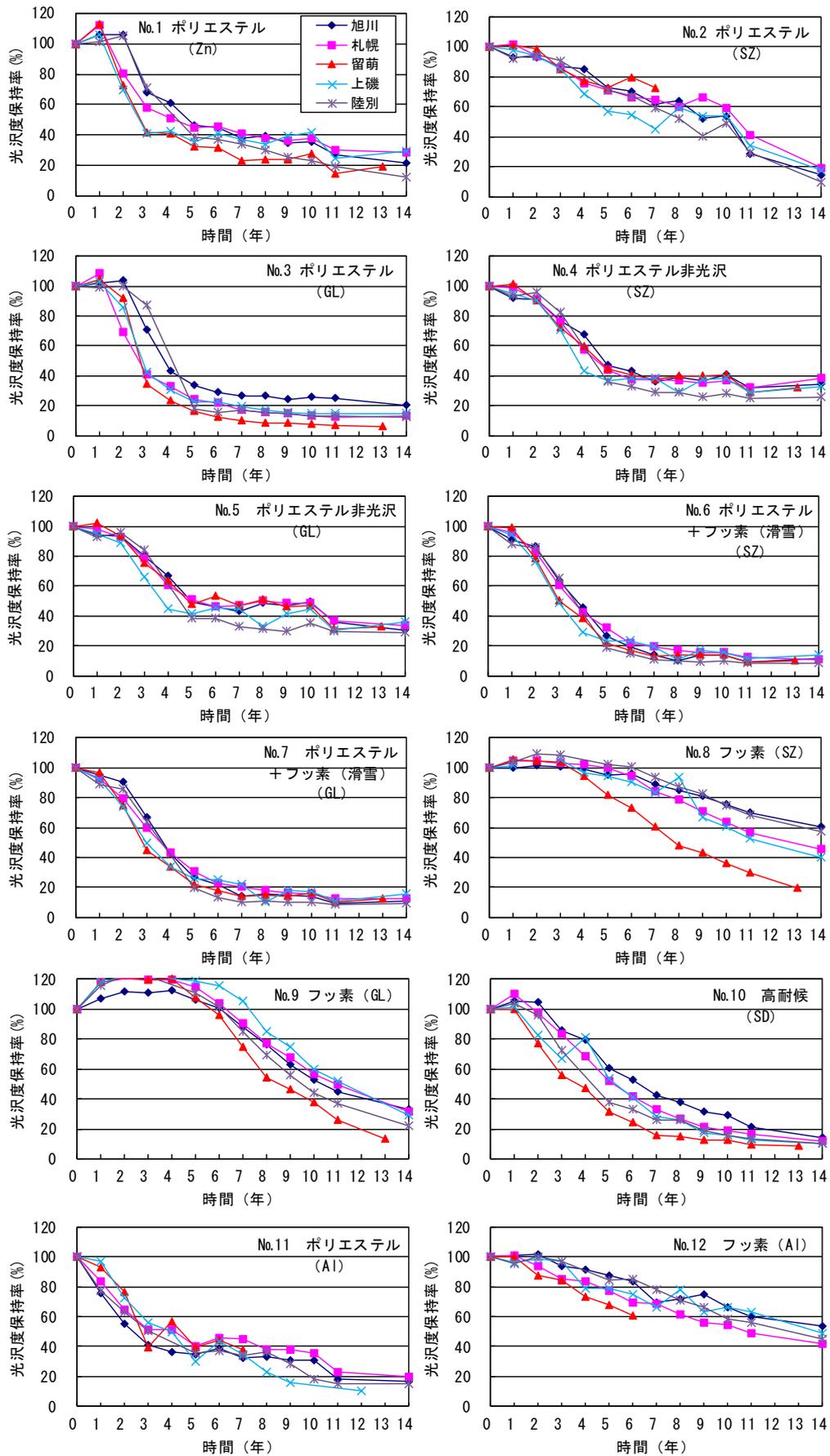


図 3.1.2 傾斜暴露平板試験体の暴露試験結果（光沢度保持率）

(4) 考察

1)劣化曲線の検討

14(13)年目までの結果を用い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、14年までの範囲では、基板で腐食は発生しているものは限定的条件のものであった。塗装部分の変化に着目すると、色

差の変化はそれほど大きくないが、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。

以上をふまえ、ここでは、光沢度を指標として検討する。また、劣化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)から減ずることで得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した。

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種類の試験体のデータがそろっている札幌で得られた30度傾斜暴露の実験結果を用いて、最小二乗法による近似により、定数  $K, a, b$  を求めた。

図 3.1.3 に実測値と予測値の関係の例を示す。表 3.1.4 に係数の一覧および実測値とのモデル式によ

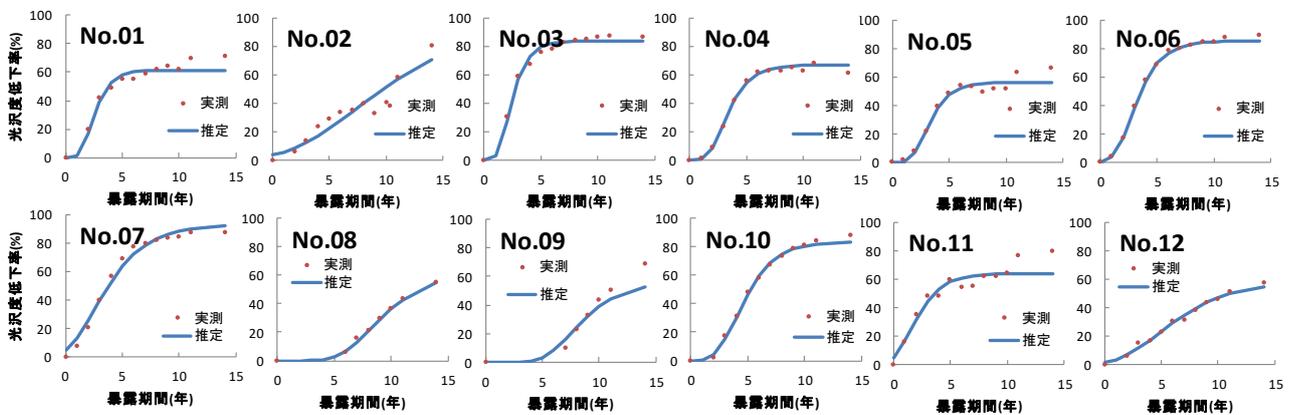


図 3.1.3 暴露試験での実測値と予測値の関係

表 3.1.4 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	100	83	67	56	85	93	62	56	84	64	59
	$a$	1.8E-05	0.035	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	0.851	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	0.99	0.96	1.00	0.98	0.99	0.97	0.99	0.91	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

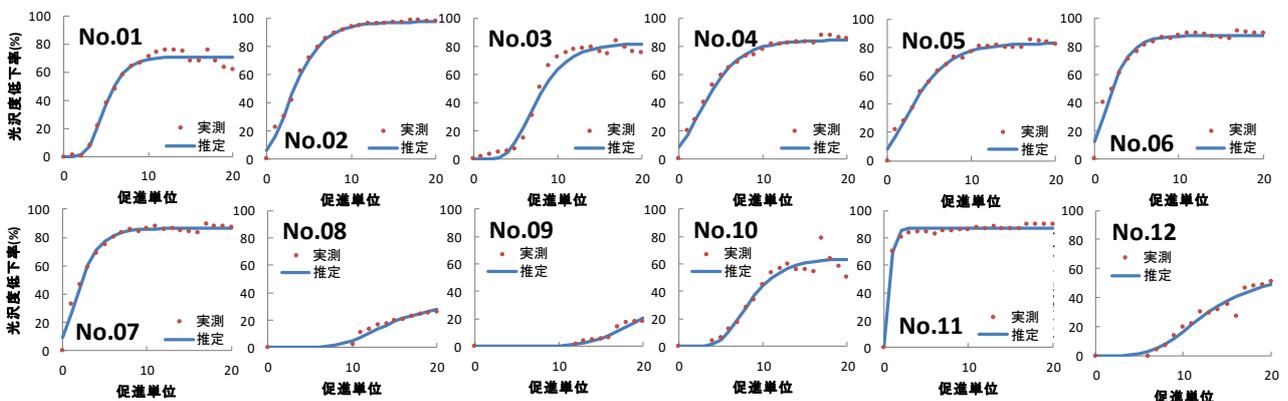


図 3.1.4 促進試験での実測値と予測値の関係

る推測値の重相関係数を示す。重相関係数は0.9以上であった。概ね、モデル式の当てはまりは良いが、No. 2, 11では、重相関係数が少し低かった。

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3.1.5に実測値と予測値の関係を示す。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が得られたと考える。

## 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、劣化曲線を用いて検討する。

係数 $a, b$ は劣化曲線の形状を表すものであるが、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3.1.5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。暴露では耐久性の高いものから、2, 8, 9, 12, 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。No.2の順位が暴露と促進で大きく異なる結果となった。No.2は、暴露で計測年度ごとのばらつきが大きく、モデルの当てはまりがあまりよくないため、モデルから算出した性能低下時間が長くなったと考えられる。ばらつきの理由はあきらかではなく、今後の検討課題とする。その他の試験体では、劣化の進行の序列では概ね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

表 3.1.5 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以下に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鋼板	Zn(Z25)	250	ポリエステル	2.9	5.3	555
2	塗装溶融亜鉛-アルミ合金めっき鋼板	5% Al-Zn (Y25)	250	ポリエステル	11.7	3.9	100
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/ウレタン-混入ポリエステル	3.6	2.3	188
7		55% Al-Zn (AZ150)	150	フッ素樹脂/ウレタン-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合金めっき鋼板	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

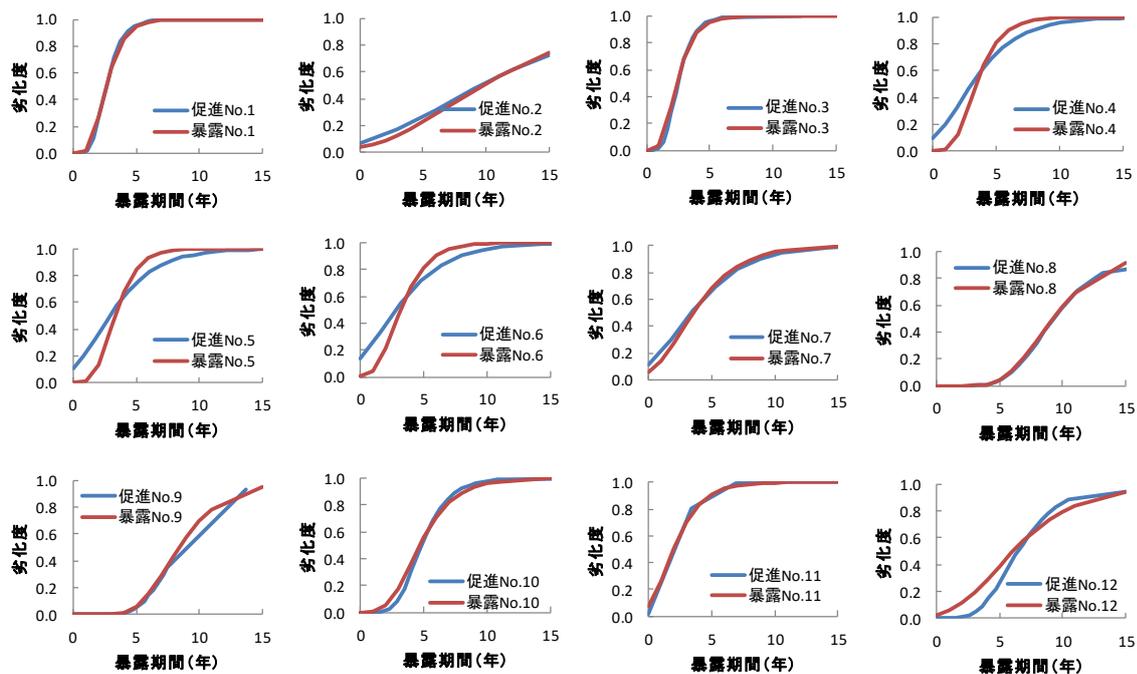


図 3.1.5 暴露と促進で得られた劣化曲線の比較

験結果を暴露時間に換算し表すことができる。図 3.1.5 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到達値（モデル式の  $K$ ）に対する光沢度の比で表している。

No. 4, 5, 6, 12 を除き、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。曲線形状が異なるものでは、No. 12 を除き促進で劣化が早い傾向となっていた。促進試験は、実環境の劣化に対し、安全側の評価をしているともいえる。

#### (5) まとめ

本研究の結果は以下のようにまとめられる。

- ・乾式沈着条件における耐久性は、本調査の範囲ではあるが、飛来塩分の多い厳しい沿岸環境下において、高耐候性を発揮するには、高耐候塗料、高耐候なめつきを使用することが有効である。
- ・傾斜暴露試験において、暴露期間 14 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った。光沢度は経年で低下し、収束したものがあつた。
- ・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。

- ・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。

- ・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あつた。

- ・促進と暴露で収束する劣化程度（この場合光沢度）が異なっ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。

## 3.2 自己修復コンクリート

### (1) はじめに

平成 16～18 年の 3 年にわたり、重点研究「自己修復コンクリートの開発」を行い、供用期間に乾燥収縮や凍結融解作用等により生じる微細なひび割れを自ら修復する機能を付加した信頼性の高いコンクリートの調合設計手法の提案を行った。

これを受け、平成 19～20 年には、開発したコンクリートの実用化を目指し、実際のコンクリート工場において「自己修復コンクリート」を製造し、基礎性状、高い信頼性の検証を行うための共同研究「自己修復コンクリートの実用化」を行った。

この中で信頼性の検証のため、屋外暴露試験体を作製し、10 年間のモニタリングを行うこととした。これらのモニタリングは経常研究「建築材料の耐久性モニタリングと評価に関する基礎的研究」に引き

継がれ、継続してきた。今回、10年目の計測を迎えたため、ここに報告する。

(2) 実験概要

1) 試験体の概要

屋外試験体の形状は、□-1500×1500mm、幅 500mm、厚さ 150mm のボックスカルバートとした。

使用材料、試験体の作製方法の詳細は、北方建築総合研究所調査研究報告 No. 245「自己修復コンクリートの実用化」2. 自己修復コンクリートの基礎性状 (1) 製造とフレッシュ時の性状」に示されている。

コンクリートは4種類とし、比較用の普通コンクリートで空気の連行のないN、空気の連行のあるNA、本研究で提案した自己修復コンクリートであるフライアッシュを混合し、空気連行のないFと空気連行のあるFAとした。

また、同時にφ100×200mmの円柱試験体の封緘試



写真 3.2.1 屋外暴露試験体の設置状況 (旭川)

験体の暴露も行っている。円柱試験体では、圧縮強度の測定を行うものとし、測定材齢は28日、半年、7ヶ月、1年、5年、10年とする。この封緘試験体は、外部への水分の放出がないため、温度の影響のみを検討できるものとして位置づけた。

2) 暴露試験状況

表 3.2.1 計測計画

暴露地域	記号	コア採取				超音波伝搬時間の計測									
		半年	1年	2年	10年	1年	2年	3年	4年	5年	6年	7年	8年	9年	10年
旭川	N				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	NA	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	F				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	FA	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	
室蘭	N				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	NA	○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	F				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	FA	○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	
江別	N				○	○	○			○				○	
	NA	○	○			○	○			○				○	
	F				○	○	○			○				○	
	FA	○	○			○	○			○				○	

表 3.2.2 10年目計測にかかわる分担表

項目	分担					
	室工	北大	前橋工大	北電	日鉄住金	北総研
■非破壊						
超音波伝搬速度計測				○	○	○
写真撮影				○	○	○
■破壊試験						
・コア採取(4本)				○	○	○
圧縮強度・静弾性(3本)				○	○	○
水和計測等(1本)		○	○			△
・封緘試験体(3本)						
圧縮強度・静弾性				○	○	○
■水中養生サンプル						
圧縮強度・静弾性	○					

屋外暴露試験体の設置状況を写真 3.2.1 に示す。

暴露場所は、旭川（北方建築総合研究所骨材置き場）、江別（北海道電力総合研究所敷地内）、室蘭（日鐵セメント（株）本社工場敷地内）の 3 地点とした。

円柱試験体は、それぞれのコンクリート種類ごとに、写真の通りボックスカルバート内に設置した。

### 3) 測定項目

表 3.2.1 に当初からの計測計画を、表 3.2.2 に 10 年目の分担表を示す。

ボックスカルバートの継続的なモニタリングには、非破壊試験である超音波伝搬速度の計測を継続している。旭川、室蘭では、毎年 5 月、10 月の 2 回、江別では、暴露 5 年目、10 年目において 5 月、10 月の計測を行った。測定位置は調査研究報告 No. 245「自己修復コンクリートの実用化」に示す通りである。

破壊試験として、コアの採取を行った。10 年目 10 月の超音波伝搬速度の計測後、NA および FA のボックスカルバートから 100φ コアを 4 本採取した。採取したコア 3 本により、圧縮強度、静弾性係数の計測を行った。圧縮強度の計測用のコアのうち、NA、FA のものについては、20℃で 48 時間以上吸水させた後、強度の計測を行った。

また、採取したコアの 1 本を用いて、X 線回折、EPMA による断面観察、熱重量・示差熱（TG-DTA）を行った。

さらに、残存している封緘暴露試験体についても、圧縮強度、静弾性係数の計測を行った。N および F は封緘養生のまま、NA および FA は 48 時間以上 20℃水中養生を行った後、試験に供した。

あわせて、室蘭工大に保管していた水中養生の 10 年目の試験体についても、圧縮強度の計測を行った。

### (3) 実験結果と考察

#### 1) ボックスカルバートの非破壊試験

図 3.2.1 に各地の超音波伝搬速度の計測結果を示す。縦軸は超音波伝搬速度比としており、暴露初期に得られた計測値に対する割合で表している。暴露地別にそれぞれのコンクリートでの計測位置ごとの平均で示した。

旭川では、自己修復の空気なしの上部を除き、暴露期間の経過に伴い、速度比が大きく低下したものはなかった。

比較用では、いずれも 100%を下回っているものの、

自己修復では、空気連行のない上部を除き、100%以上の速度比を保っているものが多かった。

室蘭では、暴露期間が長くなるに伴い、比較用では、空気連行の有無にかかわらず速度比が 90%まで低下していた。自己修復では、空気なしの上部において、90%近くまで低下していたが、それ以外は、10 年経過後も速度比は大きく低下していなかった。

比較用では、いずれも 90%程度まで低下しているものの、自己修復では、空気連行のない上部を除き、100%程度の速度比を保っているものが多かった。

江別では、室蘭と同様に暴露期間が長くなるに伴い、比較用では、空気連行の有無にかかわらず速度比が 90%まで低下していた。自己修復では、空気なしの上部において、90%近くまで低下していたが、それ以外は、10 年経過後も速度比は大きく低下していなかった。

比較用では、いずれも 90%程度まで低下しているものの、自己修復では、空気連行のない上部を除き、100%程度の速度比を保っているものが多かった。

全体でみると、旭川では凍結融解による組織の劣化をあまり受けておらず、室蘭、江別では同程度に劣化が進行したと考えられる。

また、いずれの地区、試験体においても、暴露開始後の初回の計測時に、速度比が 100%を超えている。これは、残存した未水和成分の反応により設置以降に水和し、緻密化したと考えられる。その後、比較用では、乾燥状態で変動があることを考慮しても、徐々に速度比が低下する傾向が認められていた。このことは、水和反応がほぼ終了したコンクリートで徐々に乾燥や凍結融解により組織が緩んだと考えられる。



写真 3.2.2 上部の劣化状況  
(9 年目, 旭川自己修復空気なし)

一方、自己修復では、暴露開始後から2年目くらいまで速度比の増加が認められ、その後も100%以上で推移するものが多かった。夏季、冬季の修復、劣化は明解に判断できないものの、速度比の低下が緩

やかであることは明らかであった。乾燥、凍結融解による作用は同等であるとする、速度比の緩やかなことは、未水和成分として残存しているフライアッシュが反応することで、微細ひび割れを充填する

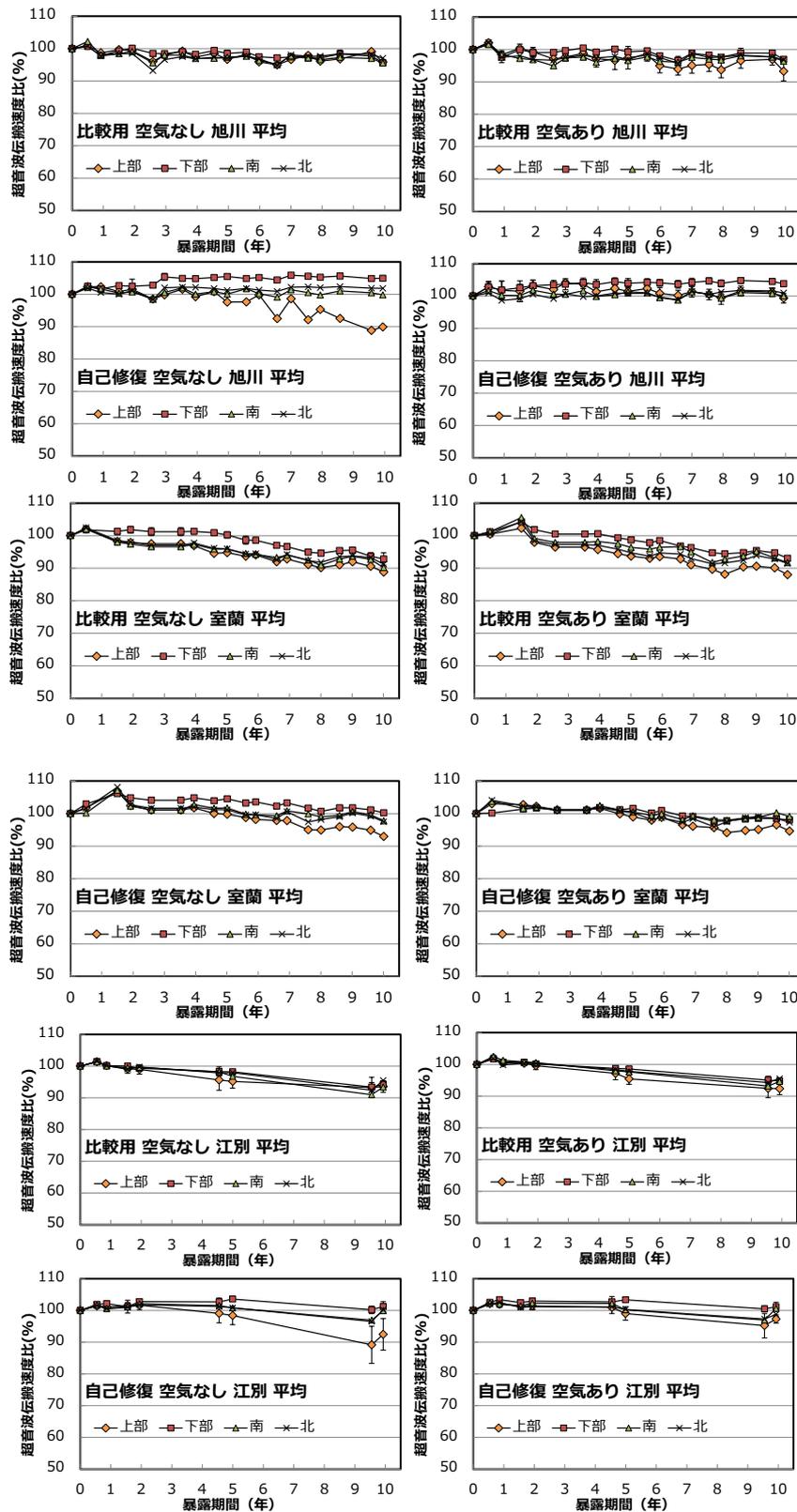


図 3.2.1 超音波伝搬速度の結果

ことにより、組織のゆるみが進行しづらくなっていると考えられる。試験体の上部の状況を写真 3.2.2 に示す。上部では、速度低下の大きい結果となったが、表層の状況を観察すると、スケーリング等により骨材が露出し始めている。水分の供給条件によっては、凍結融解作用による損傷が卓越し、修復しきれない場合もあることがうかがえる。

## 2) 採取コアによる試験

### ・圧縮強度

図 3.2.2 にコアの圧縮強度試験結果を示す。比較用、自己修復ともに、暴露 10 年で圧縮強度の

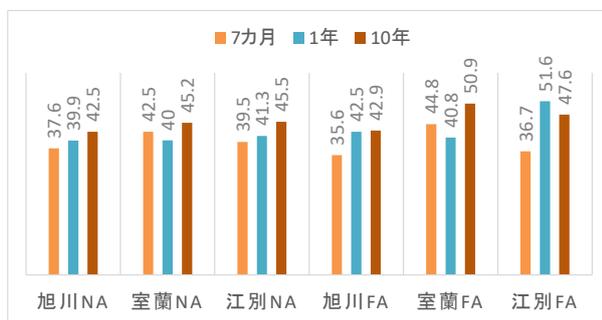


図 3.2.2 コアの圧縮強度試験結果

増加が認められた。増加程度は自己修復の方が大きく、室蘭、江別では 50N/mm<sup>2</sup> 近い強度となっていた。

### ・X線回折

図 3.2.3 に粉末 X 線回折測定結果の例として旭川 FA の回折プロファイルを示す。

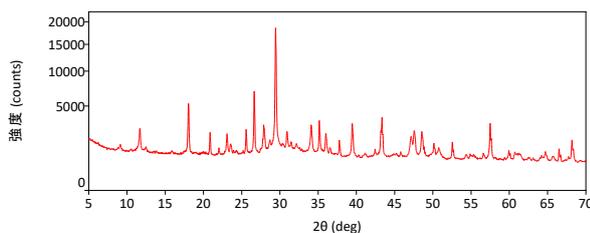


図 3.2.3 粉末 X 線回折測定結果(旭川 FA)

得られたプロファイルから、粉末 X 線回折/リートベルト法により未反応セメント鉱物量、水和生成物量を算定した。表 3.2.3 に各試料のセメント当たり換算した鉱物組成を示す。

表 3.2.3 リートベルト解析結果

Sample	セメントあたりの鉱物組成(%)						
	C3S	C2S	C4AF	CH	Katoite	Aft	Mc
室蘭N	0.6	2.9	2.1	18.4	1.3	3.0	10.4
室蘭FA	0.8	3.1	1.7	12.3	1.4	3.1	11.1
旭川N	0.8	3.7	2.3	17.9	1.7	2.5	10.5
旭川FA	1.3	2.8	1.6	13.3	1.8	3.0	12.5

各試料とも未水和のセメント鉱物が僅かに認められた。また、水酸化カルシウム(CH)生成量は、フライアッシュ混和コンクリートで明らかに少なかった。フライアッシュは、単位セメント量一定の上、細骨材置換で用いていることから、生成 CH 量の減少は、フライアッシュのポズラン反応の進行を示唆するものと考えられる。また、フライアッシュ混和コンクリートでは、カルシウムアルミネート系水和物(katoite(C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>), Aft(エトリンガイト), Mc(モノカーボネート))の生成量がやや多くなった。

### ・EPMA による断面観察

図 3.2.4 に反射電子像から算出した各相の体積割合を示す。UH は未反応セメント、CH は水酸化カルシウム、CSH は C-S-H、フライアッシュ及び水和生成物、Pore は粗大空隙である。フライアッシュを含むコンクリートにおいては水酸化カルシウム量が低下した結果であった。また、いずれの暴露場所においても未反応のセメントがわずかに残存している結果であった。

図 3.2.5 に EDX によって測定した元素比を示す。カルシウムとシリカの比 (C/S) はフライアッシュ無混和の試料において高い値を示した。暴露した試験体は若干低い値を示した。一方、アルミニウムとシリカの比 (A/S) は、フライアッシュを混和した試料において高い値を示し、C/S と同様に暴露によって値は低下した。

図 3.2.6 と 3.2.7 に EPMA によって分析した元素分布の一例を示す。カルシウム濃度が高くシリカが低濃度の部分は水酸化カルシウムを示しており、いずれの試料でも多く存在していることがわかる。フライアッシュを混和した試料においてはアルミとシリカが高濃度で存在している部分が未反応フライアッシュであり、暴露後も多く残存している様子が確認できる。

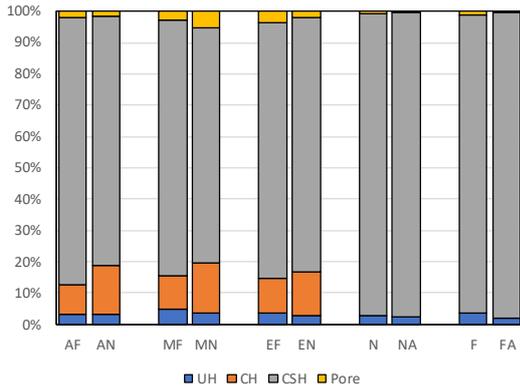


図 3.2.4 反射電子像から算出した各相の体積割合

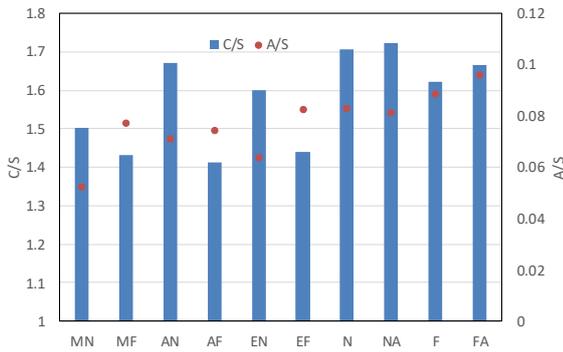


図 3.2.5 EDX により測定した元素比

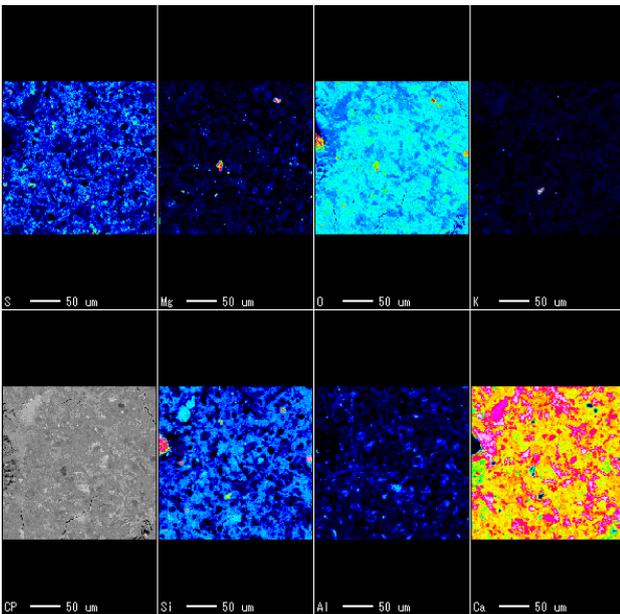


図 3.2.6 EPMA によって測定した元素分布 (EN)

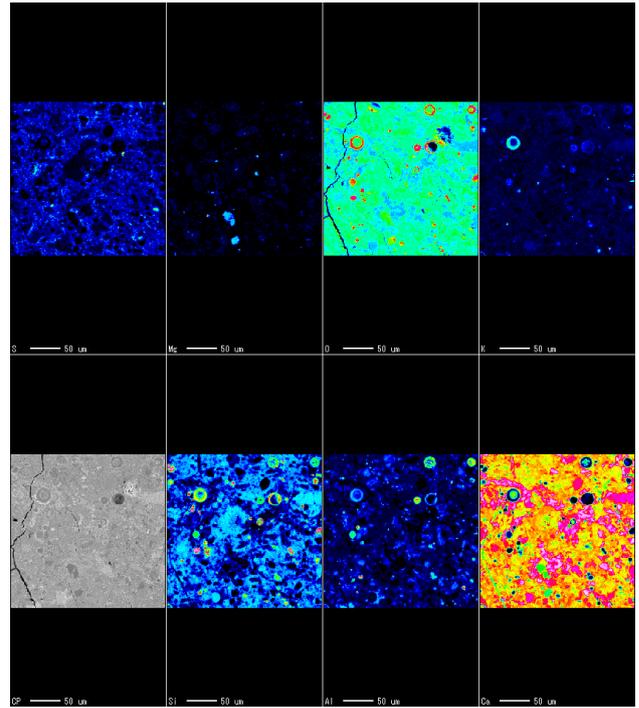


図 3.2.7 EPMA によって測定した元素分布 (EF)

・熱重量・示差熱 (TG-DTA)

図 3.2.8 に熱重量・示差熱分析の結果を示す。旭川で採取されたコアの結果である。

100℃～400℃までの減量が自己修復の方が多い傾向となっていた。400-500℃間の減少は水酸化カルシウムの脱水であり、これらの量は大きく異なる見受け

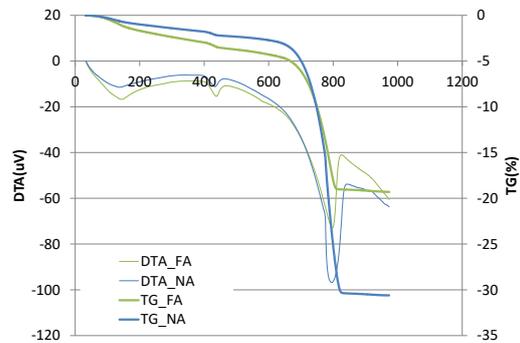


図 3.2.8 熱重量・示差熱分析の結果

られる。600℃～の減量は、炭酸カルシウムの脱炭酸によるものと考えられる。この減量は大きく異なる結果となった。本研究でのコンクリートに使用した骨材は、峯朗産砕石（石灰岩）であった。そのため、試料中の骨材含有量等の影響があったと考えられる。

3) 封緘暴露試験体

図 3.2.9 に封緘暴露試験体の圧縮強度試験結果を

示す。

比較用、自己修復ともに、暴露期間の増加に伴い圧縮強度が増加していた。増加程度は自己修復の方が大きく、特に暴露期間1年までで大きかった。いずれの地域においても自己修復では、55N/mm<sup>2</sup>以上の高い強度となっていた。

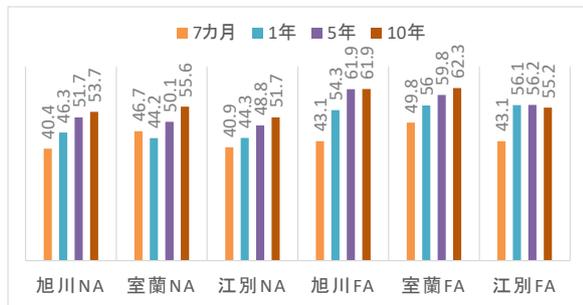


図 3. 2. 9 封緘暴露試験体の圧縮強度試験結果

#### 4) 水中養生試験体

図 3. 2. 10 に水中養生試験体の圧縮強度試験結果を示す。

比較用、自己修復ともに、材齢5年までは材齢の増加に伴い圧縮強度が増加していたが、10年目の結果は低下していた。この原因については、明らかではない。自己修復の方が比較用に比べ、高い圧縮強度となっていた。

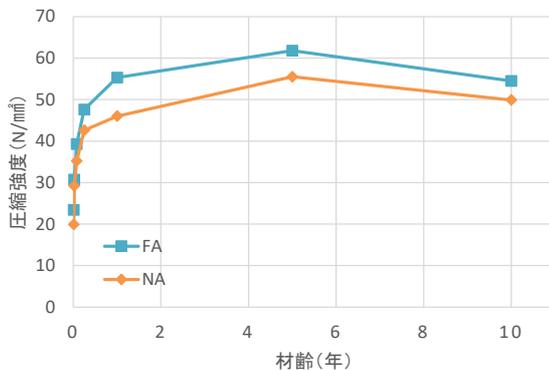


図 3. 2. 10 水中養生試験体の圧縮強度試験結果

#### (4)まとめ

本研究の成果を以下にまとめる。

- ・自己修復コンクリートでは、暴露開始後から2年目くらいまで超音波伝搬速度比の増加が認められ、その後も初期値以上を維持する部位が多かった。
- ・夏季の修復、冬季の劣化は明解に判断できなかった。

- ・自己修復コンクリートでは、普通コンクリートに比べ、経年に伴う超音波伝搬速度比の低下が緩やかであった。コアの分析結果において未水和のフライアッシュと水酸化カルシウムが残存しており、反応が継続し、微細ひび割れが充填され、超音波伝搬速度比の低下が緩やかであると考えられる。

- ・水分の供給条件によっては、凍結融解作用によるスケーリング等の損傷が卓越し、修復しきれない部位もあった。

- ・コアの分析において、自己修復コンクリートでは水酸化カルシウム(CH)量が普通コンクリートに比して減少しており、フライアッシュのポゾラン反応の進行が示唆された。
- ・自己修復コンクリートの圧縮強度(コア、封緘暴露)は暴露後1年までに大きく増進し、その後も長期にわたり増進する傾向であった。

#### 4. まとめ

本研究のまとめは、各章に記した通りであり、ここでは再掲しない。

今後の取り組みとして、

- ・当所開発品の暴露の継続
- ・暴露試験後の回収サンプルの詳細分析(破壊試験を含む)

以上について、次年度以降の研究において実施する予定である。