

軍艦島(端島)における RC建築物の状況と 保存に向けた検討

芝浦工業大学
工学部建築学科

濱崎 仁



講演の内容

- 調査の経緯・概要
- 軍艦島(端島)の概要と歴史
- 軍艦島の劣化外力
 - ・ 温湿度・風況
 - ・ 飛来塩分
- 目視による調査結果
 - ・ 部材の損傷・鉄筋の腐食
 - ・ 構造性能(被災度判定)
- コンクリートの状況
 - ・ セメント・セメント量
 - ・ 中性化深さ
 - ・ 塩化物イオン量
- 補修方法の検討

調査等の経緯

長崎市より日本建築学会に対して、長崎市端島（軍艦島）のコンクリート構造物群に対して、劣化・損傷状況の評価や将来予測、補修方法の提案などに関する調査委託。

（委託期間：2011～2013・2015～）

長崎市より日本コンクリート工学会に対して、端島の構造物の補修・補強方法およびそれらの施工方法などに関する調査委託。

（委託期間：2015～2016）

2014年1月：

「明治日本の産業革命遺産 九州・山口と関連地域」として、ユネスコに推薦書提出

2014年10月：

軍艦島炭鉱跡が、「高島炭鉱跡」として国史跡に登録

2015年7月：

ユネスコ世界文化遺産の構成要素の一つとして登録
（建築物群については周辺要素の一つ）

建築学会における調査内容(全体)

- 劣化外力の調査
 - 温湿度、風向
 - 飛来塩分量
- 材料に関する調査
 - 目視による劣化状況の調査
 - コンクリートの材料・調合(セメント、骨材、配合推定)
 - コンクリートの状態(中性化・塩化物イオン量)
 - 鉄筋の状態
 - その他の材料の状態
- 構造安全性の調査
 - 常時微動調査
 - 耐震性能評価(日給社宅16号棟)
- 護岸健全度調査
- 補修方法の検討

軍艦島(端島)

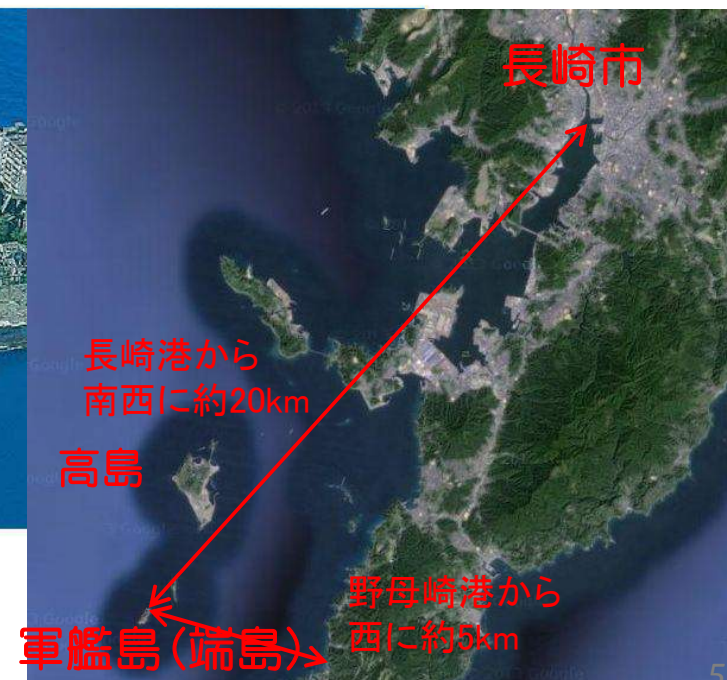


北西側の航空写真

北西側軍艦島 (H16. 10 月撮影) 旧高島町資料より



南東側の航空写真



歴史的経緯

軍艦島の簡易年表

年	主な出来事
1810年(文化3)	端島で石炭が発見される
1890年(明治23)	三菱社が端島炭鉱を買収する
1891年(明治24)	出炭開始

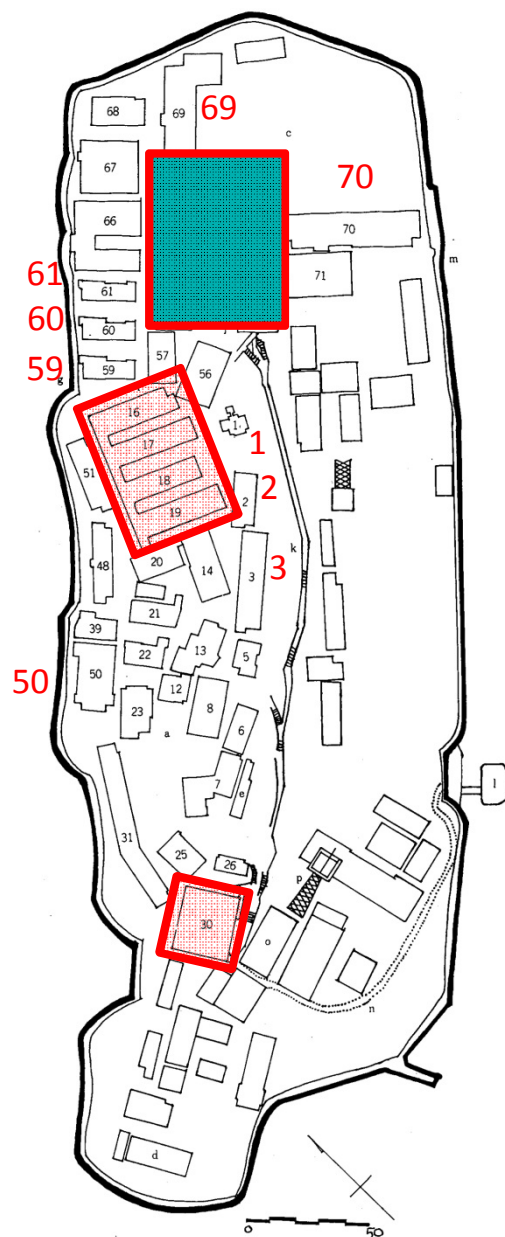
埋め立て
工事による
地形変化

1916年(大正5)
1918年(大正7)
1941年(昭和16)
1945年(昭和20)
1956年(昭和31)
1959年(昭和34)
1960年(昭和35)
1970年(昭和45)
1974年(昭和49)



1893(明治26)年以前	1901(明治34)年拡張
1897(明治30)年拡張	1907(明治40)年拡張
1899(明治32)年拡張	1931(昭和6)年拡張
1900(明治33)年拡張	

軍艦島の建造物群（住居系）



30号棟:

大正5年・RC7階

日本最古のRC造集合住宅

16～19号棟:

(日給社宅)

大正7年・RC9階

楕形に並んだ高層RC住宅

65号棟:

(報国寮)

昭和20年・SRC9階

島内最大規模の集合住宅



30号棟 | 1916年 | RC造 | 2



50号棟 | 1927年 | 鉄骨造 | 2



71号棟 | 1970年 | RC造 | 2

軍艦島の暮らし

炭鉱施設・住宅は勿論のこと、学校（町立端島小中学校）

・派出所・店舗・病院（端島病院）・寺院（宗福寺、宗派を問わない全宗寺）・神社（端島神社、岩礁最頂上に鎮座。このほかにも祠が点在）・映画館・理髪店・スナック・遊園地などもあり、島内において完結した都市機能を有していた。



島の唯一の社交場『白水苑』



8 単発台のパチンコ（昭和46年頃）

水の確保

水源のない端島では、水の確保が一番の問題。
消火用水、雑用水は海水を使用。雨水も積極活用。

蒸留水の時代(明治24年～昭和6年)

海水を蒸留して飲料水を確保、副産物の塩は外販。

給水船の時代(昭和7年～昭和32年)

S7年給水船三島丸(235t)進水。一日一往復。

戦後朝顔丸(298t)進水。一日三往復。

島内に2100tの高架水槽を設置。

海底水道の時代(昭和32年～)

昭和32年10月高島・端島海底水道完成(日本初)

150mm鋼管の外面をアスファルト巻の上にモルタルで保護。

長崎市三和町の浄水場から、一日5000tが送水可能。

軍艦島の状況 _見学コースより



見学通路



総合事務所跡



仕上工場跡

軍艦島の状況写真



台風時の様子



北西側護岸



70号棟外観



70号棟基礎

軍艦島の状況写真



30号棟外観



30号棟内観



65号棟外観



65号棟屋上

軍艦島の状況写真



地獄段(16号棟横・S40頃)



地獄段(現在)



16～19号棟屋上



16号棟居室内

建物内部 _18～16号棟内部



軍艦島の温湿度・風況の調査

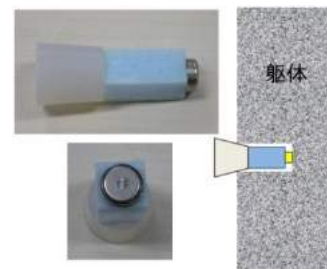


外気温湿度
観測装置



おんどとり

コンクリート
内部の温湿度
観測装置



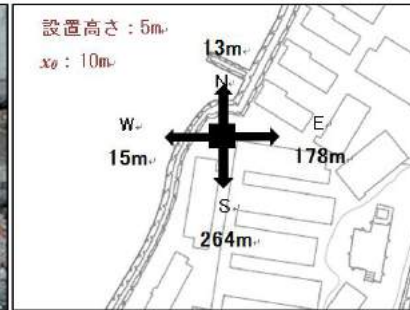
ハイグロクロン

*コンクリート表面から
5～6cm位置に設置

飛来塩分の調査



飛来塩分捕集器



海岸までの距離

51号棟の1階付近



飛来塩分捕集器

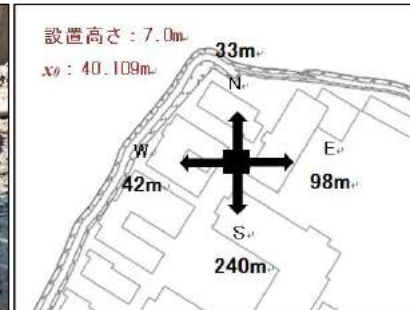


海岸までの距離

51号棟の屋上



飛来塩分捕集器

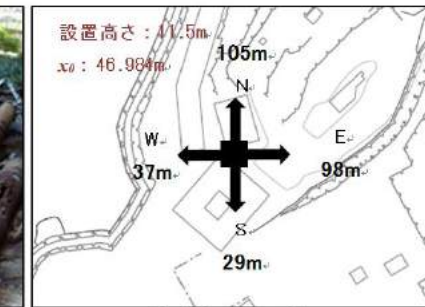


海岸までの距離

端島病院(69号棟)付近



飛来塩分捕集器

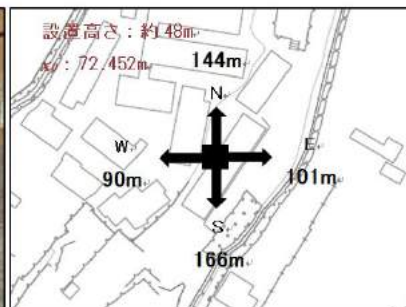


海岸までの距離

30号棟付近



飛来塩分捕集器

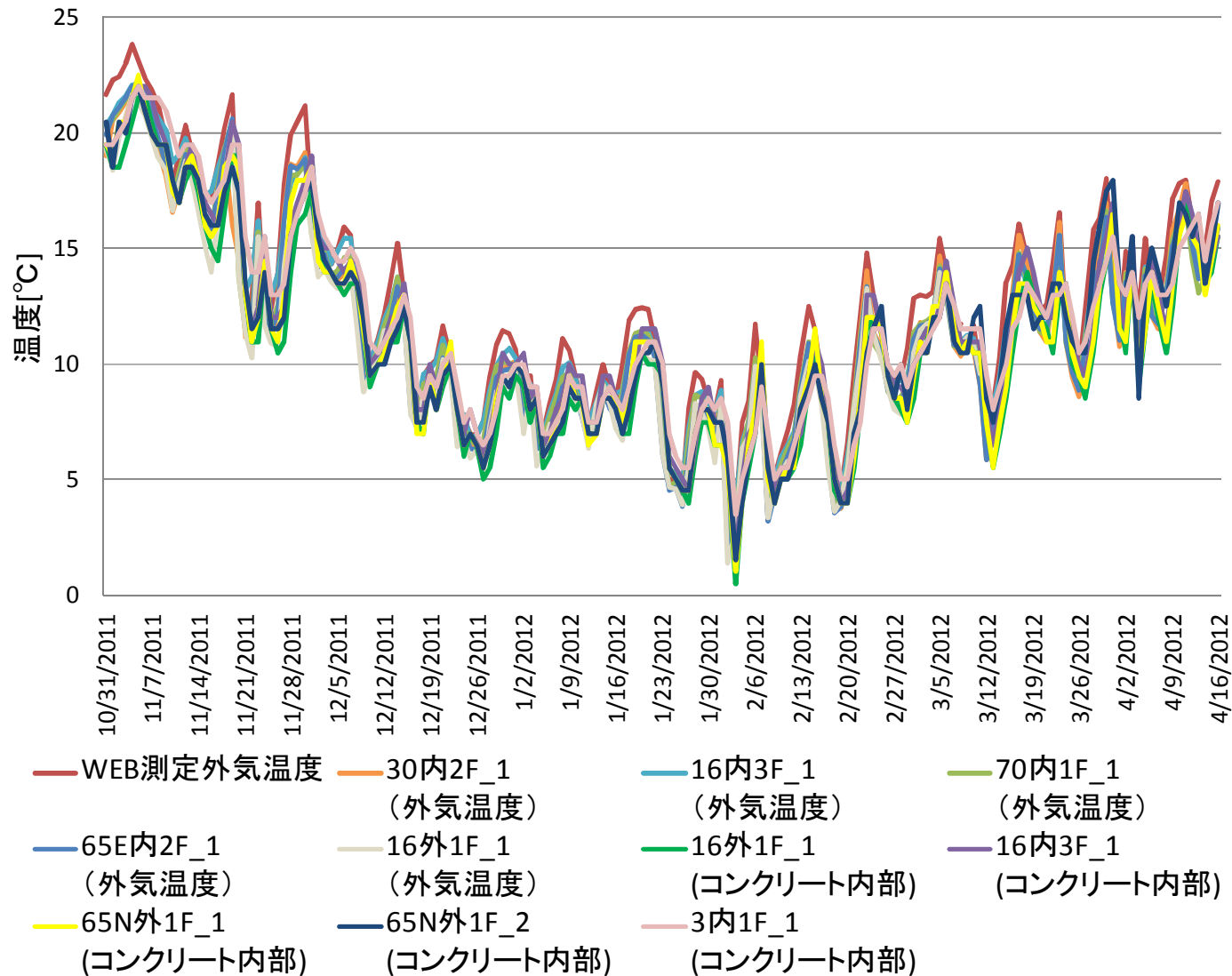


海岸までの距離

3号棟の屋上

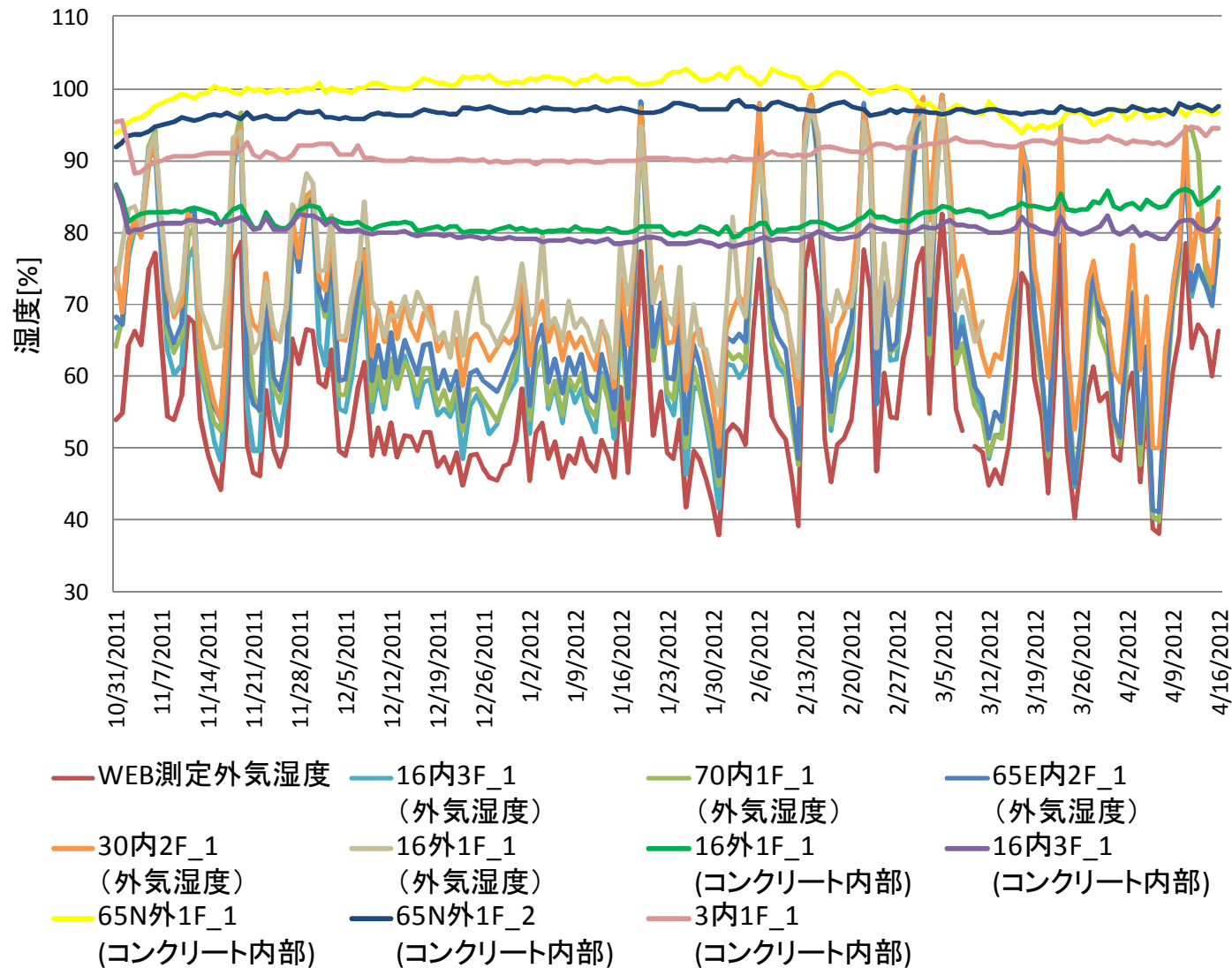
各地点における飛来塩分
捕集器の設置状況

気温およびコンクリート温度



軍艦島の各地点およびコンクリートの温度変化

湿度およびコンクリート内部湿度



軍艦島各地点およびコンクリート湿度変化

風況の測定結果



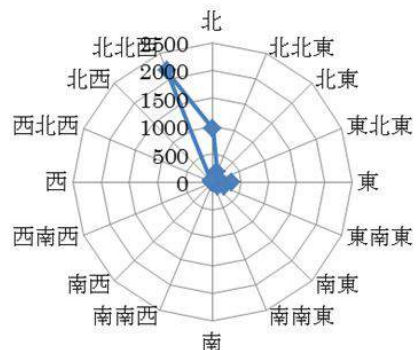
野母崎気象観測所, WRF, Webモニタシステムの風況

**web観測システムが
強風により破損**



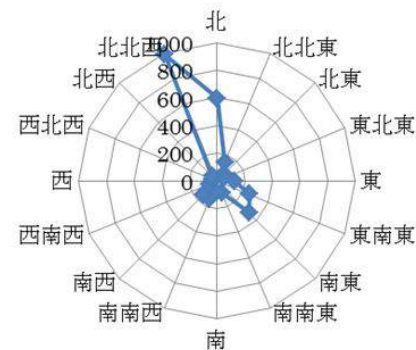
軍艦島の風況 (野母崎気象データより)

2012年2月 各方位積算風量
($\times 3600(\text{m})$)



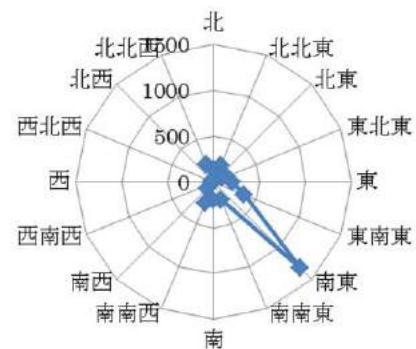
冬

2012年5月 各方位積算風量
($\times 3600(\text{m})$)



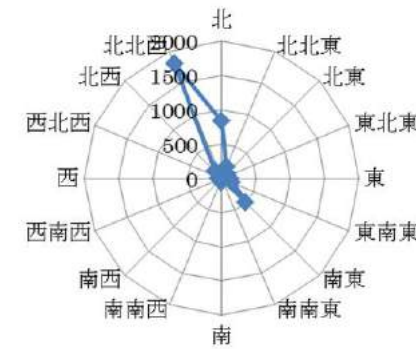
春

2012年8月 各方位積算風量
($\times 3600(\text{m})$)



夏

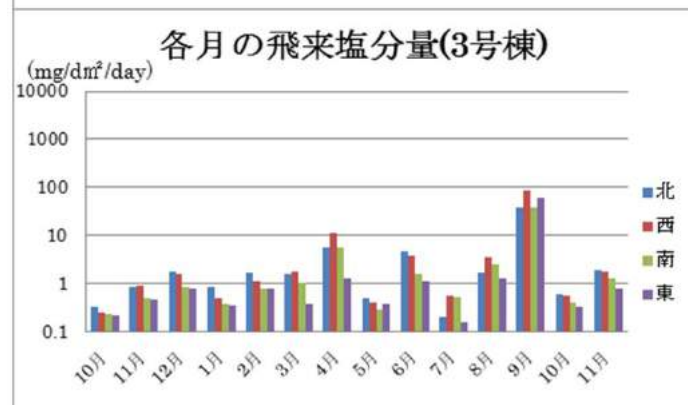
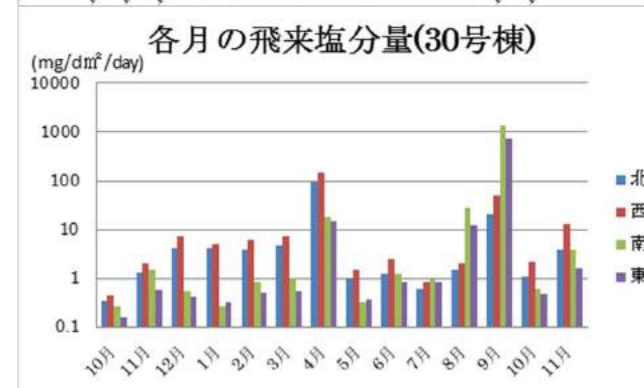
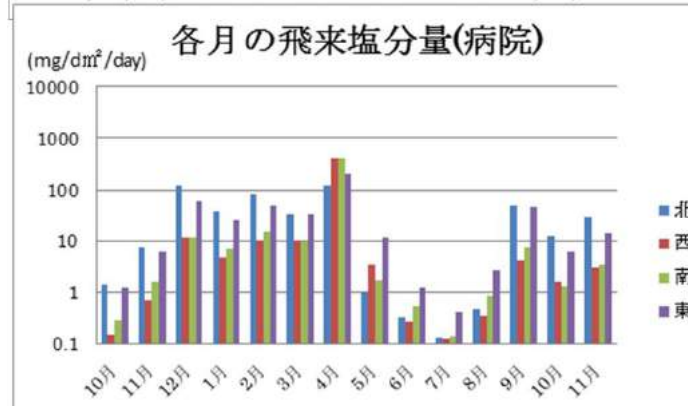
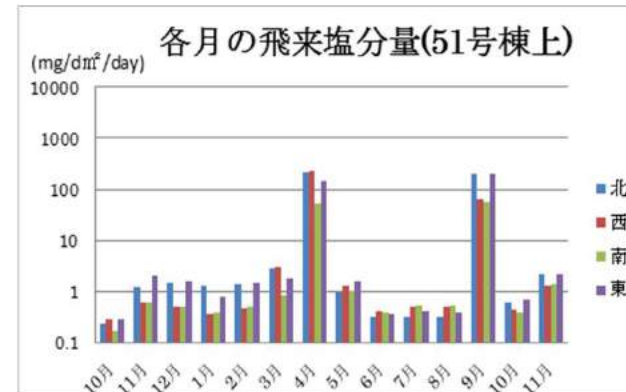
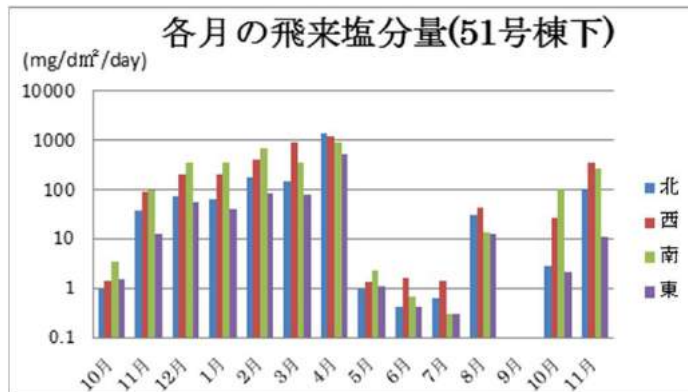
2012年11月 各方位積算風量
($\times 3600(\text{m})$)



秋

軍艦島における季節ごとの風況
(琉球大学山田義智教授より提供)

飛来塩分量（年間の傾向）



各地点での月毎の飛来塩分量

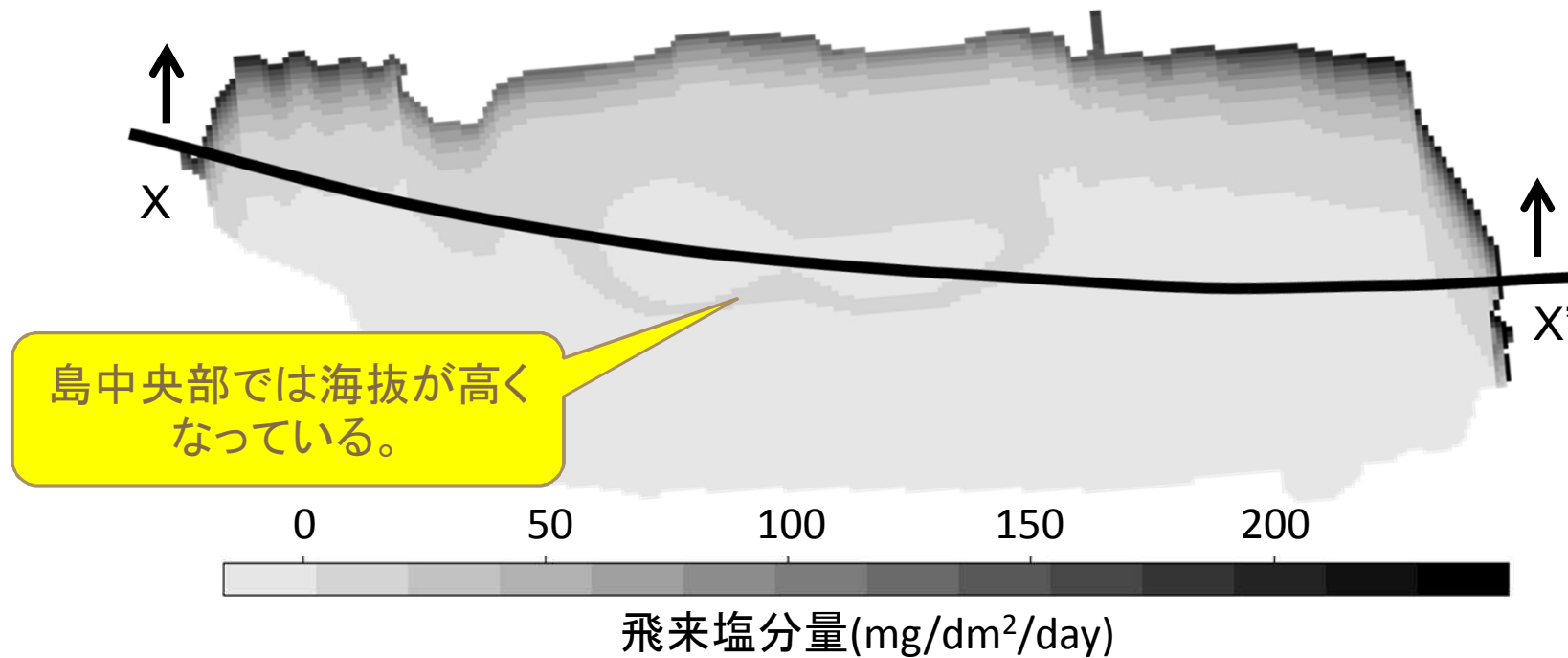


構造物による
飛来塩分の回
り込み概念

飛来塩分量の推定

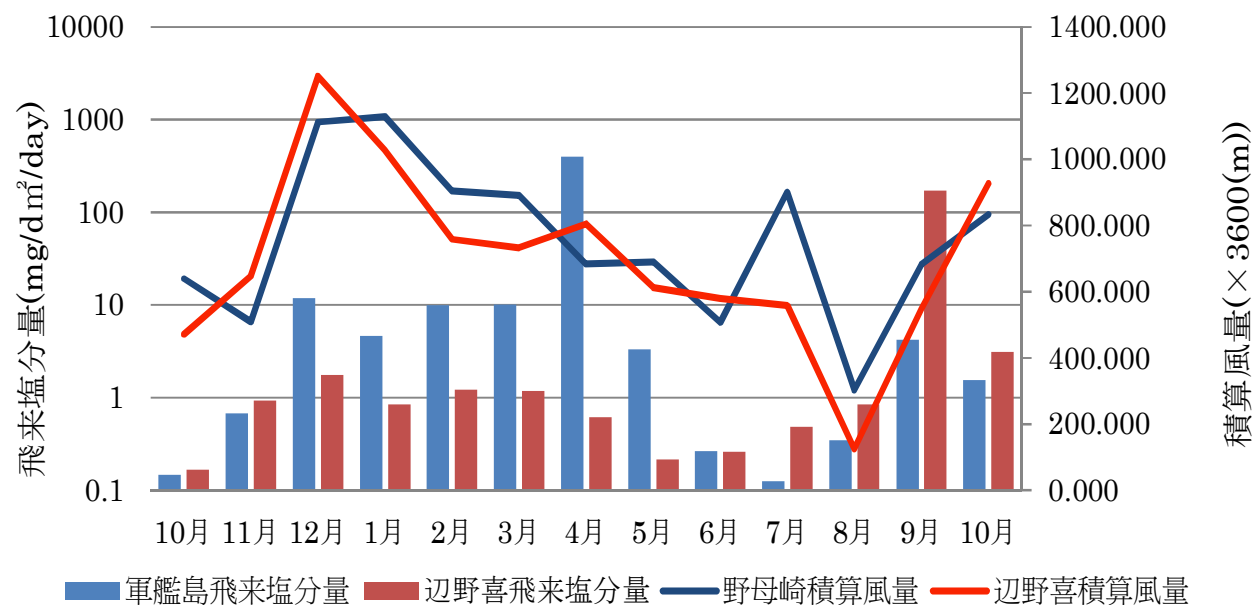
飛来塩分量の傾向：

- ・ 海岸からの距離が大きくなると小さくなる。
- ・ 積算風量が大きくなると大きくなる。
- ・ 標高が大きくなると小さくなる。



軍艦島の飛来塩分量推定(2011年12月)

飛来塩分量の比較 沖縄(辺野喜)との比較

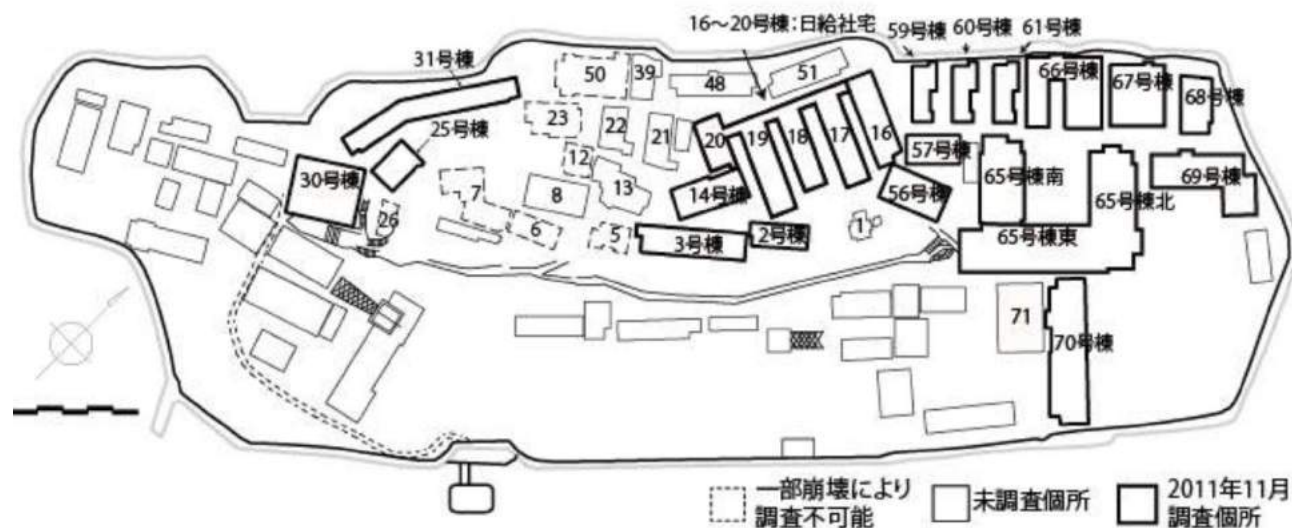


端島病院と辺野喜(沖縄)の飛来塩分量比較



軍艦島(左)と沖縄県辺野喜(右)の海岸の状況

目視による劣化状況



一般的な腐食(損傷)グレードの例 軍艦島での腐食(損傷)グレード

損傷度	損 傷 状 況
無	損傷が認められない
I	ごく軽微なひび割れさび汁
II	ひび割れ、さび汁、はく離等が部分的
III	ひび割れ、さび汁、はく離、剥落等が連続的
IV	鋼材の露出や破断、コンクリートの断面欠損等

損傷度	損 傷 状 況
I	表面のひび割れ+さび汁
II	(中間の状況)
III	腐食した鉄筋が露出
IV	(中間の状況)
V	鉄筋の痕跡はあるが朽ちている(存在しない)

腐食グレードの例



グレードⅠ



グレードⅡ



グレードⅢ



グレードⅣ

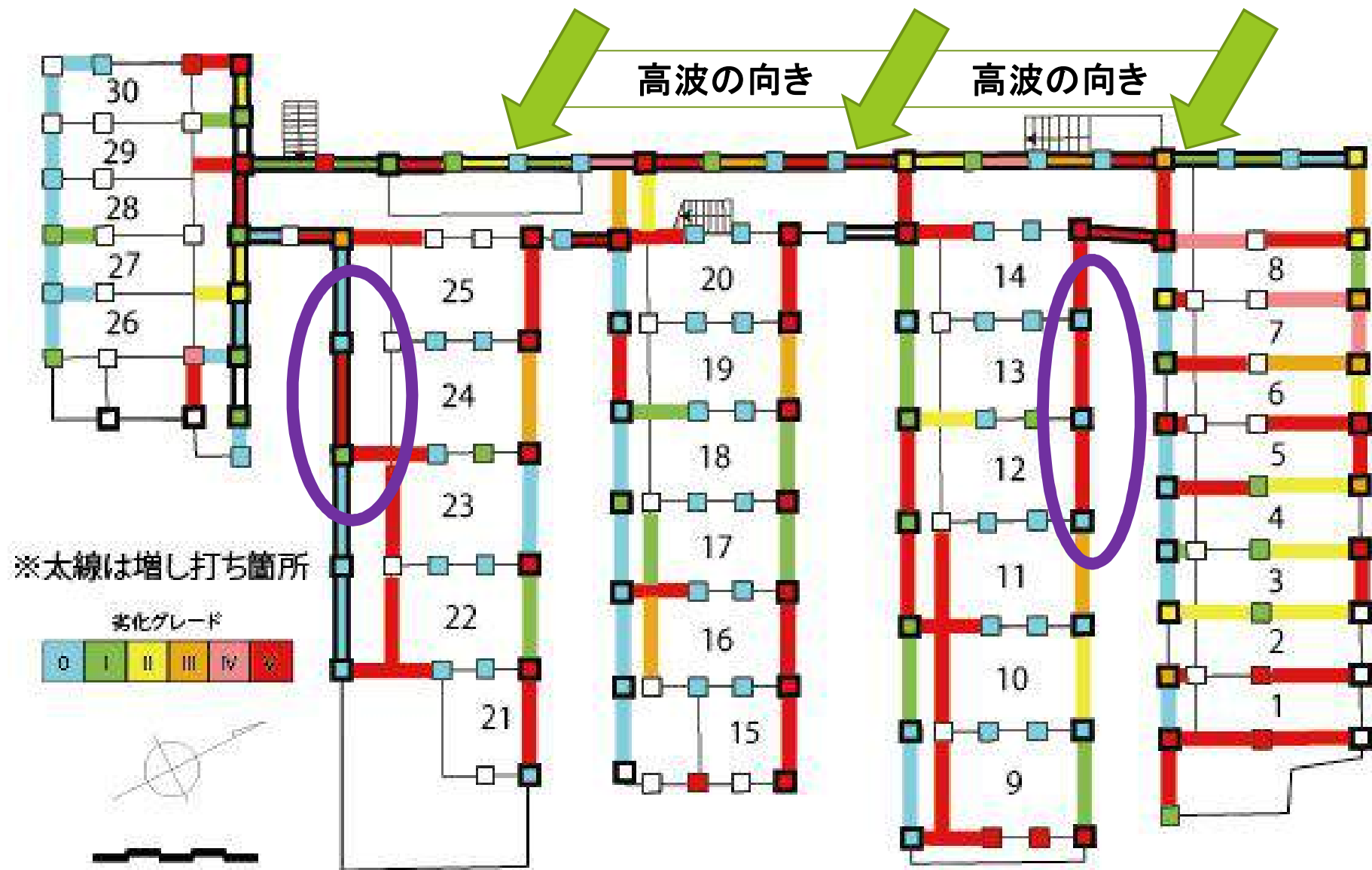


グレードⅤ

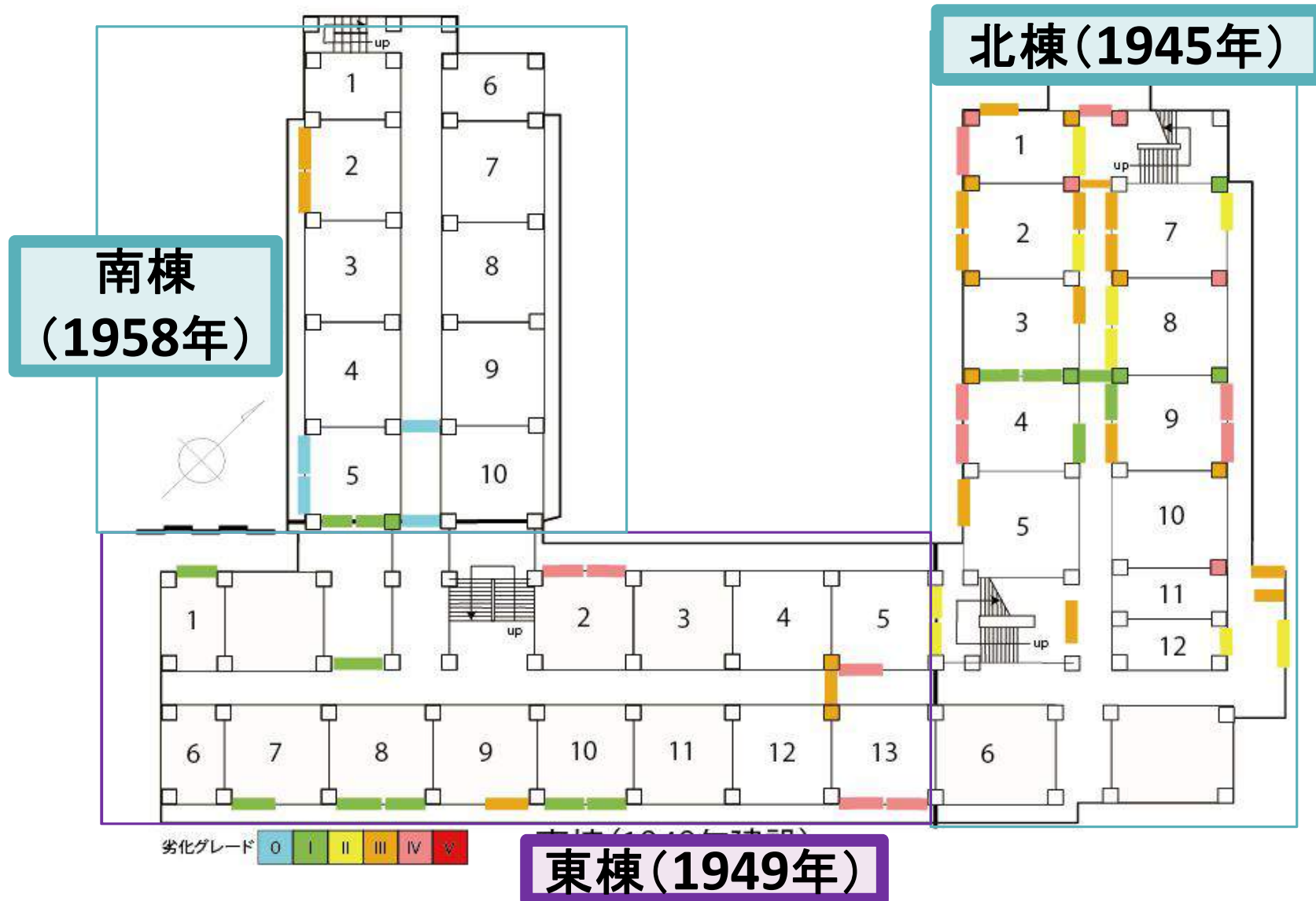


グレードⅤ

目視調査結果の例 日給社宅3階

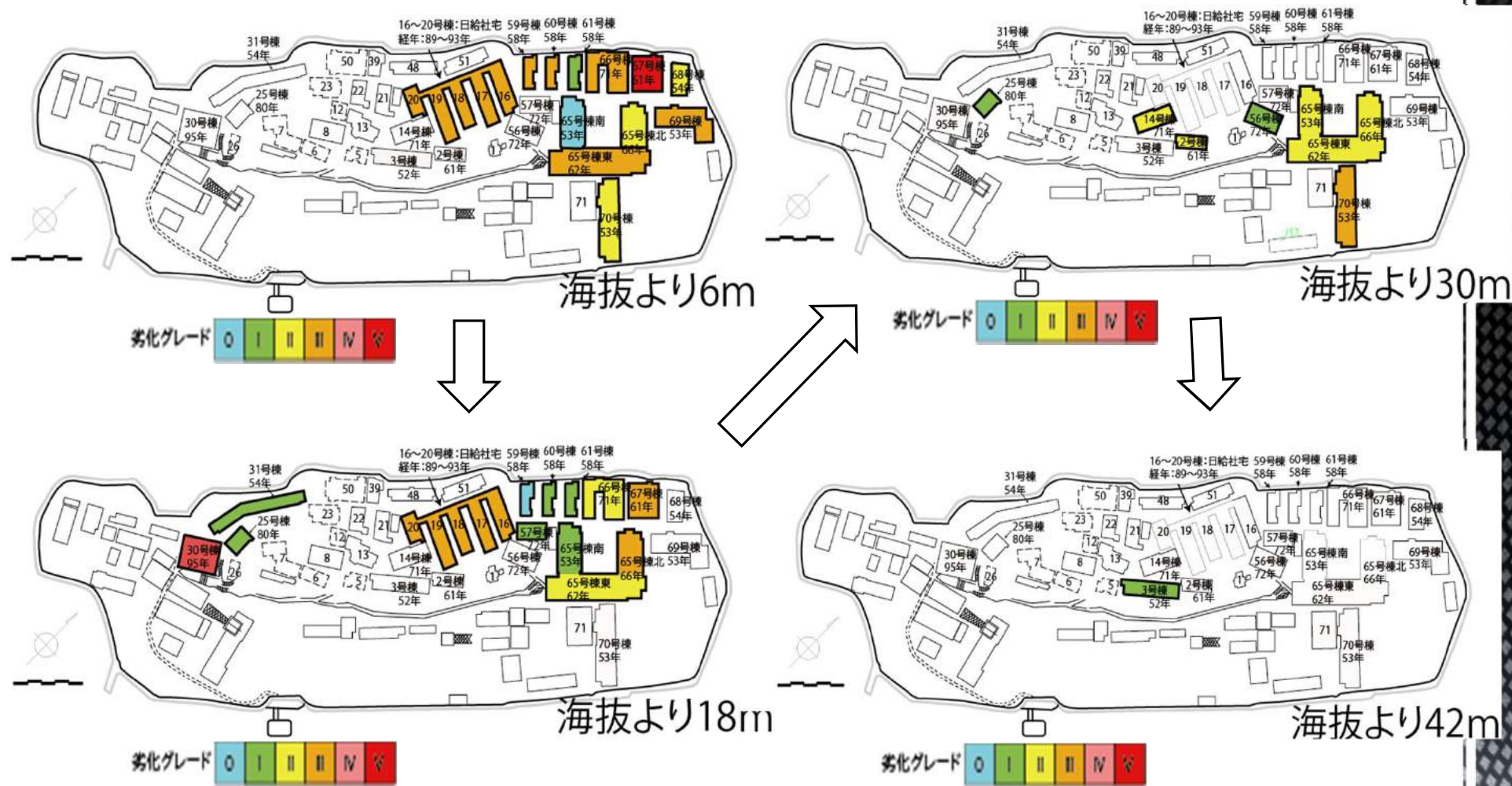


目視調査結果の例 65号棟



目視調査結果の例（海拔との関係）

海拔が高くなると腐食グレードが小さくなる傾向がある。



海拔と腐食状況の関係

コンクリート材料の調査

セメント関係の調査

①セメントペーストの状態

- ・対象： 16号棟5階(オリジナル部分)
16号棟3階(増打ち部分)
- ・試験方法：EPMAによる反射電子像の観察

②単位セメント量の推定

- ・対象： 16号棟3階(オリジナル部分)
- ・試験方法：NDIS 3422(グルコン酸ナトリウムによる硬化コンクリートの単位セメント量試験方法)

EPMA観察



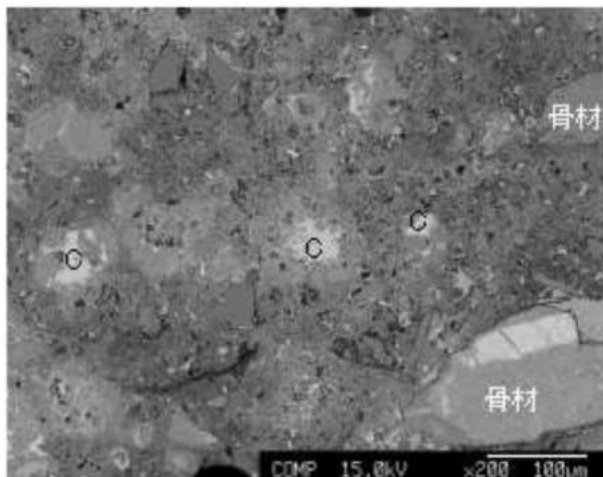
C:未水和セメント

B:炭素

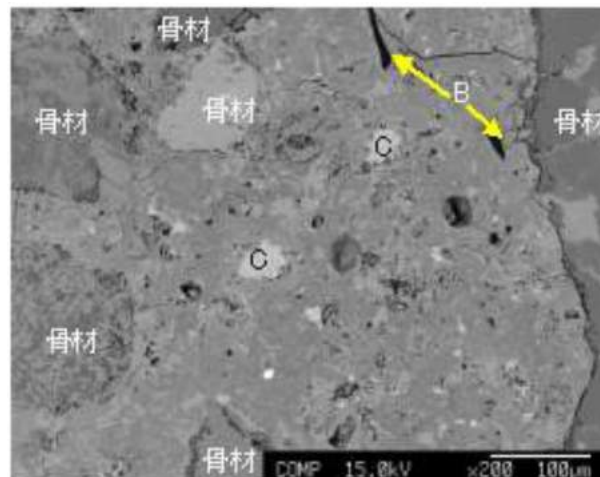
- セメント粒子はオリジナル粒子の方が大きい(粗い)

- フライアッシュや高炉スラグ微粉末等は見当たらない

単位セメント量
推定値: 253kg/m^3



5階オリジナル部分



3階打ち増し部分

コンクリート強度の推定

調査方法：

- (1)コア採取による調査
- (2)リバウンドハンマー(N型・P型)
- (3)衝撃弾性波

強度推定式：

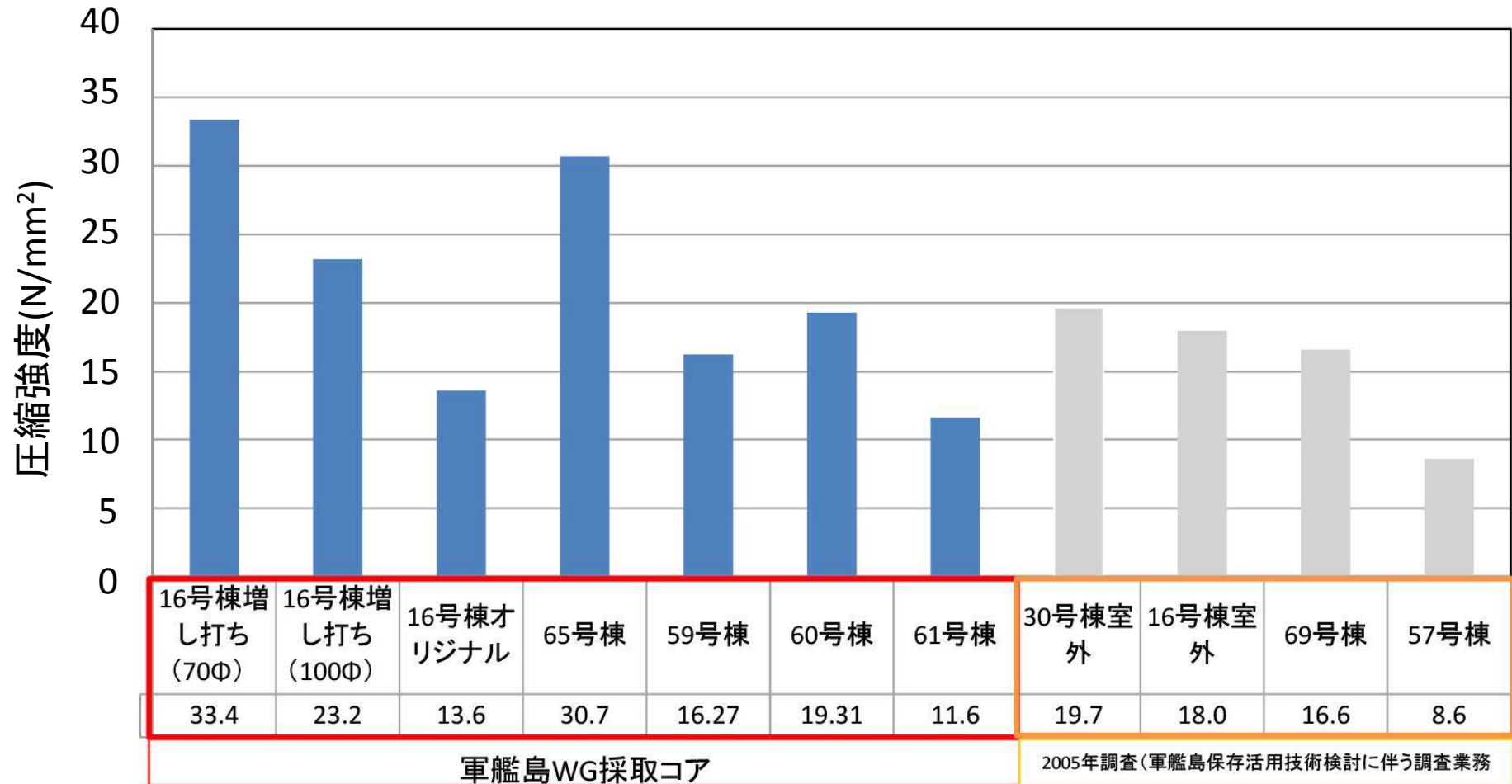
(2)反発度法

- ・N型： $F_c = (1.27R_n - 18) \times \alpha$ (N/mm²)
- ・P型： $F_c = (7.39R_p - 166.7) \times \alpha$ (kgf/cm²)

(3)衝撃弾性波法

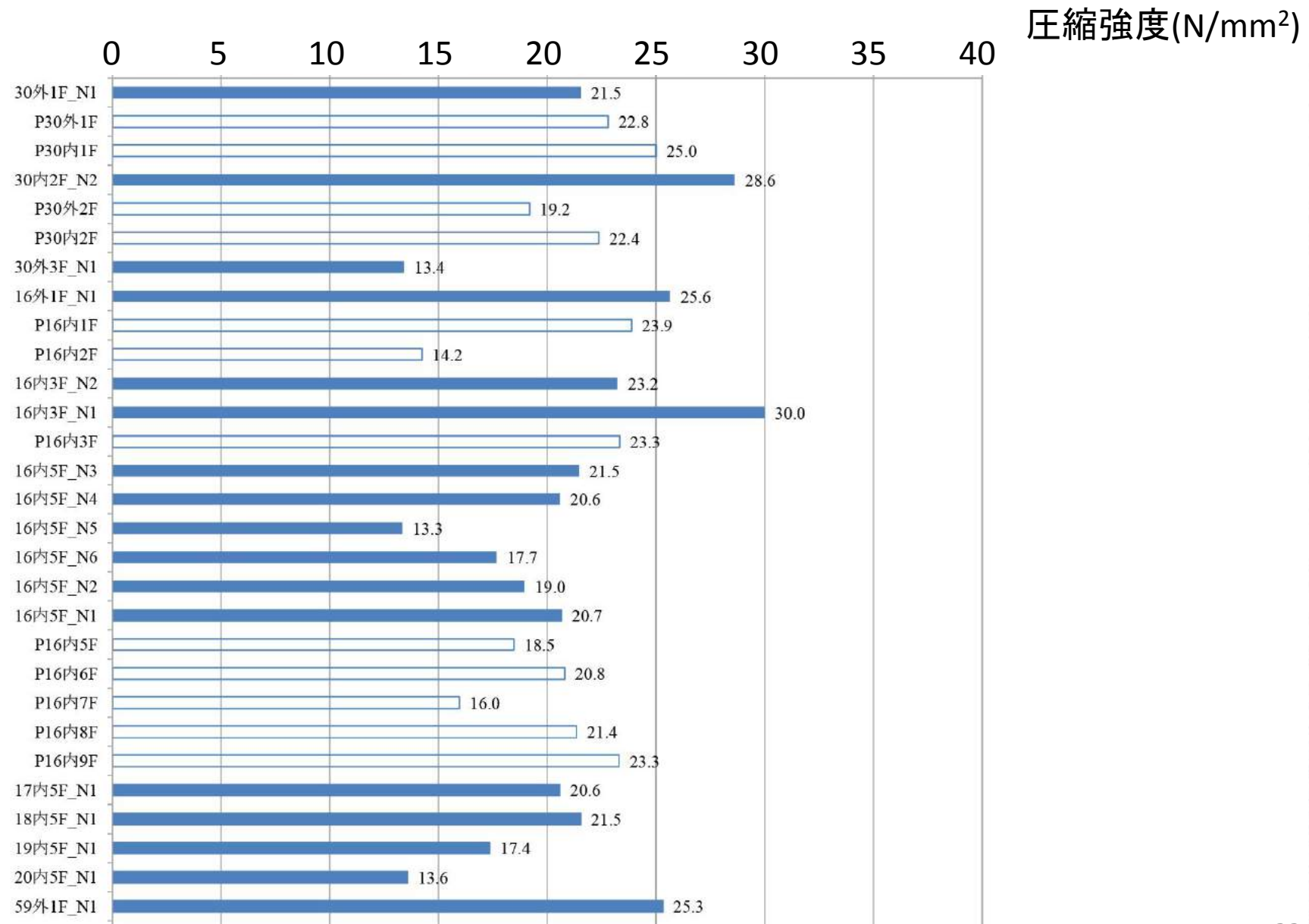
- ・ $F_c = 0.0001X^{1.5631}$ (N/mm²)

コアによるコンクリート強度



2005年度調査

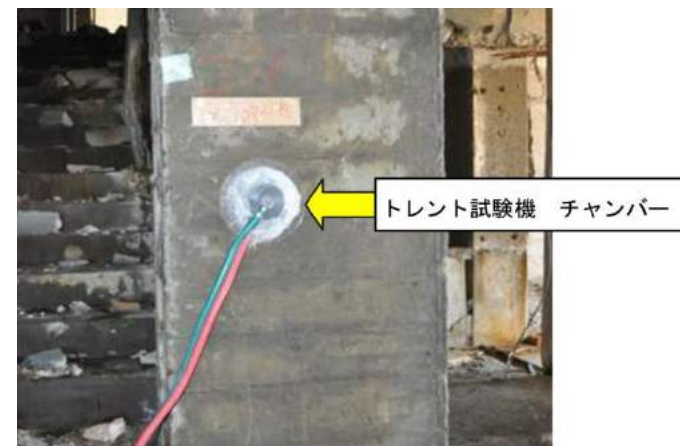
反発度法によるコンクリート強度



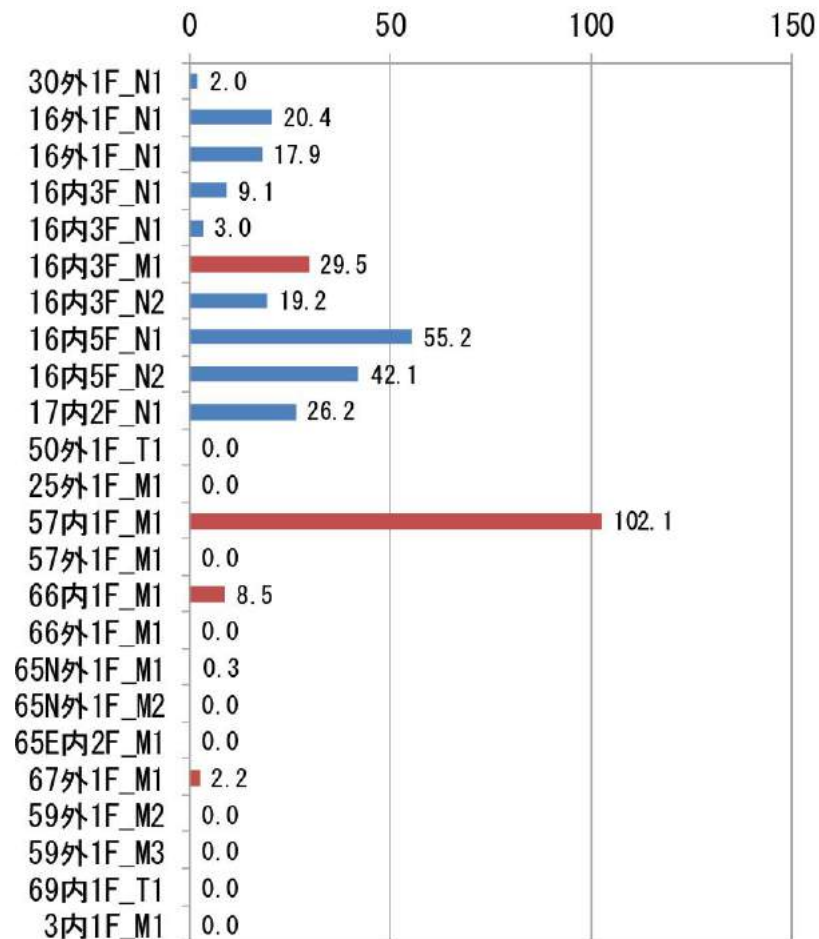
中性化深さの調査

調査方法：

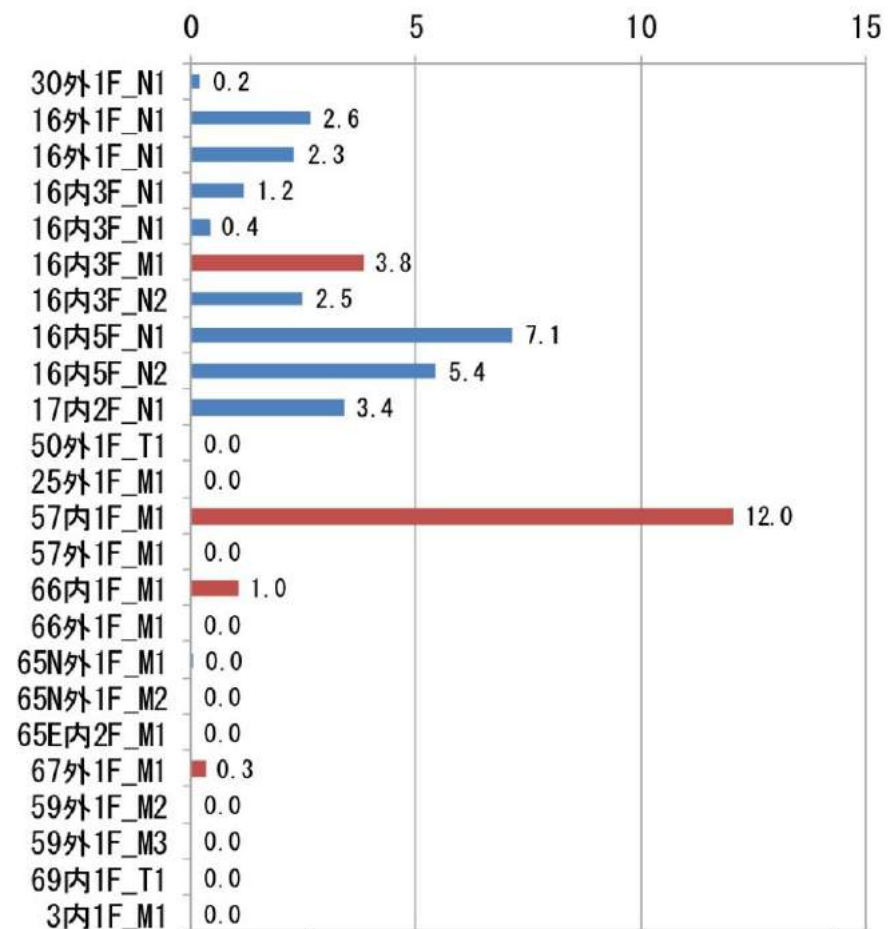
- (1) JIS A 1152 (フェノールフタレイン法・コア側面による調査)
- (2) 透気試験 (トレント法)



中性化深さ試験結果



中性化深さ(mm)



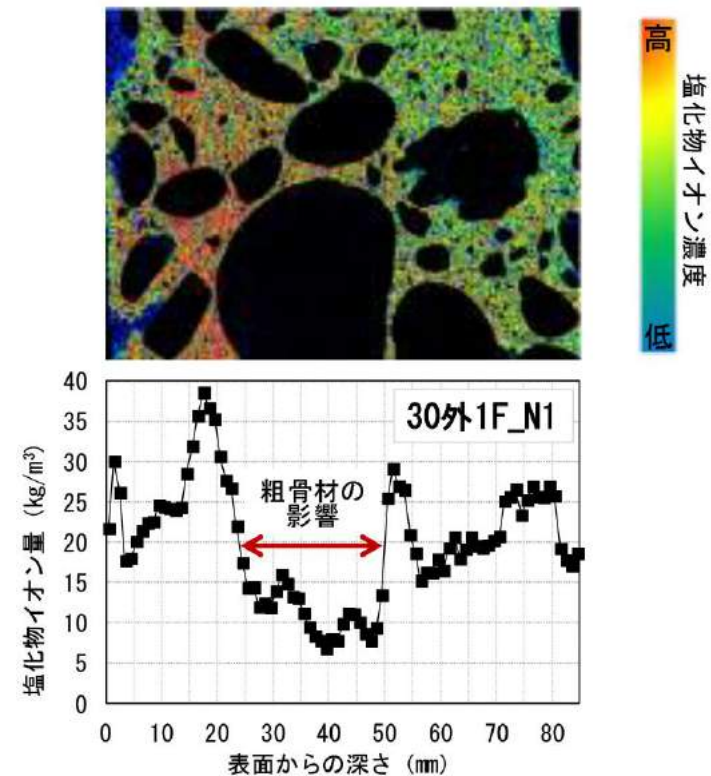
中性化速度係数(mm/v年)

■ 打放し
 ■ モルタル仕上げ
 ■ タイル・テラゾー

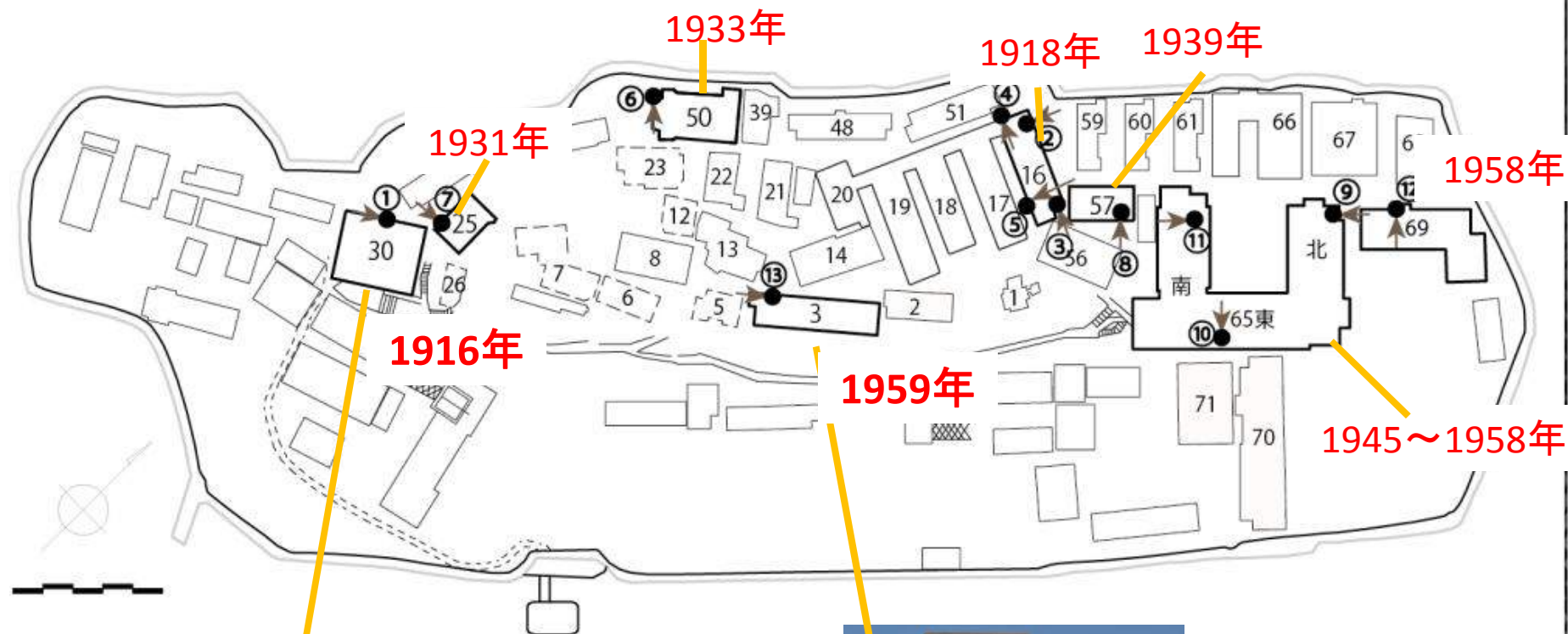
塩化物イオン量の調査

調査方法:

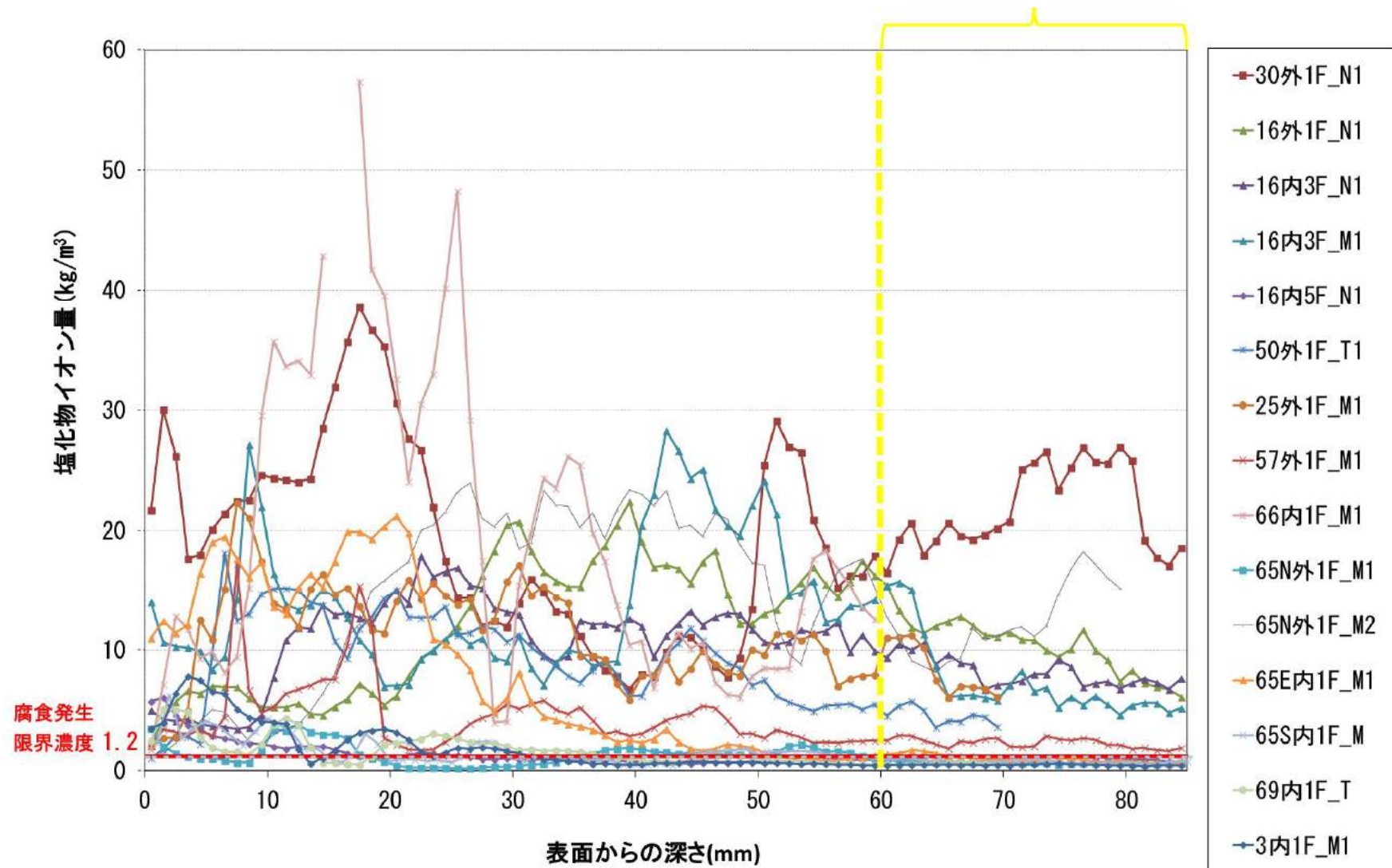
(1) EPMA(電子線マイクロアナライザ)による塩化物イオンの定量(JSCE G 574参考)



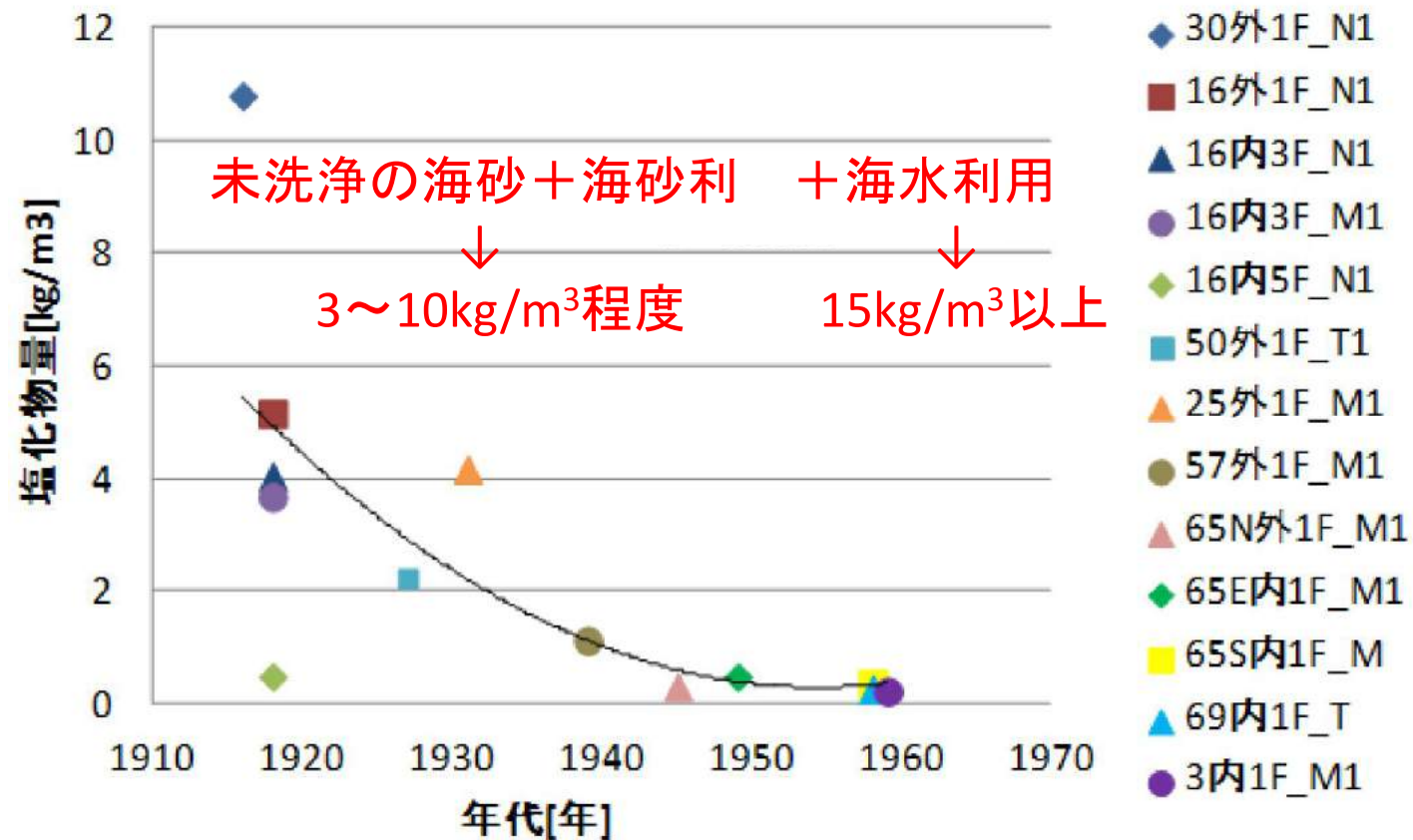
塩化物イオン量の測定箇所



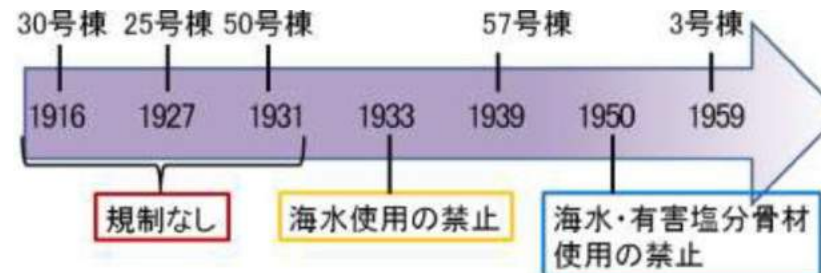
塩化物イオン量（深さ方向分布）



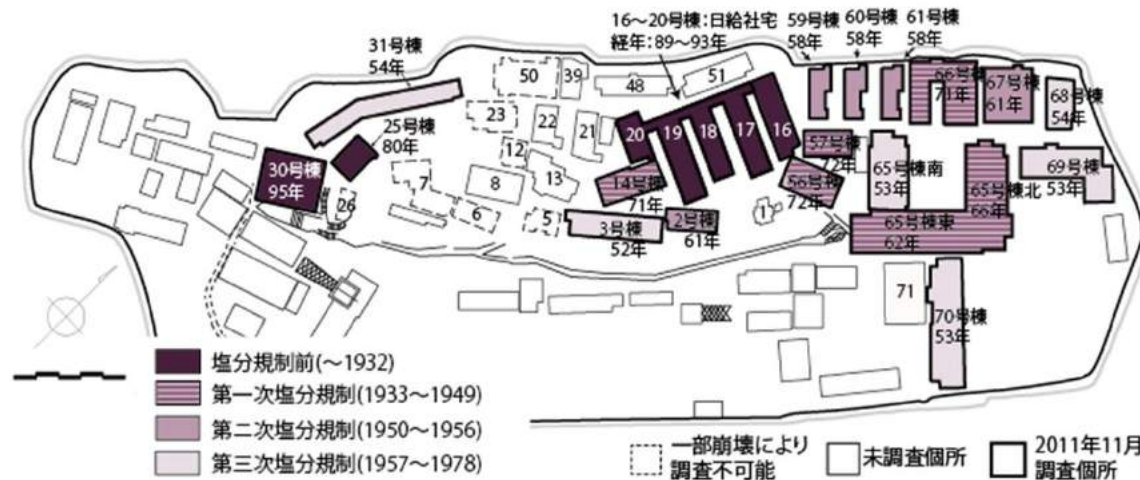
建設年代と塩分量



JASS 5における塩分規制



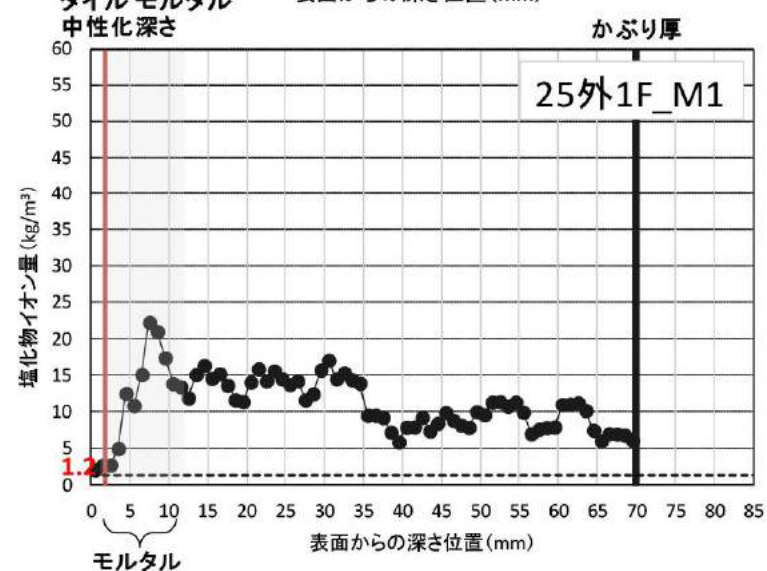
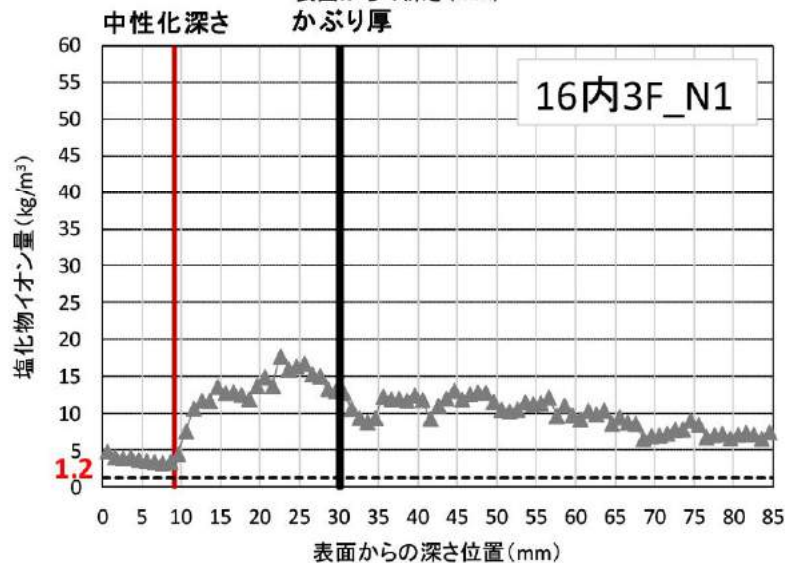
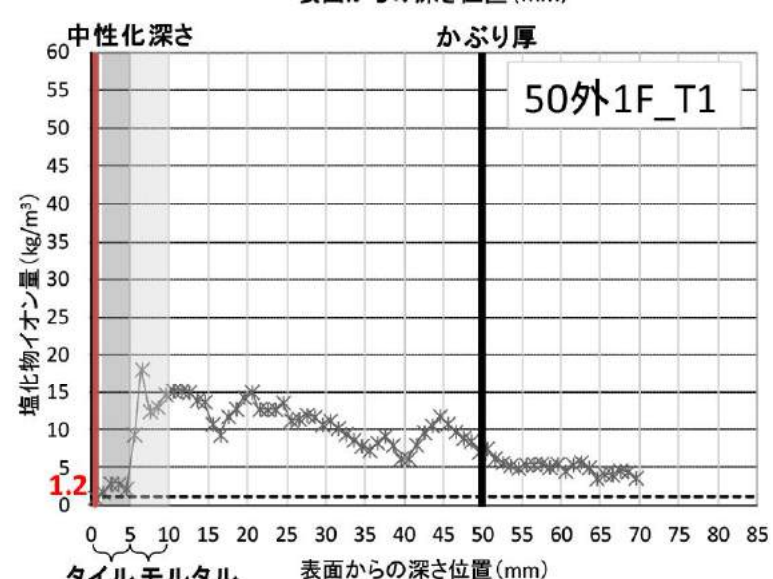
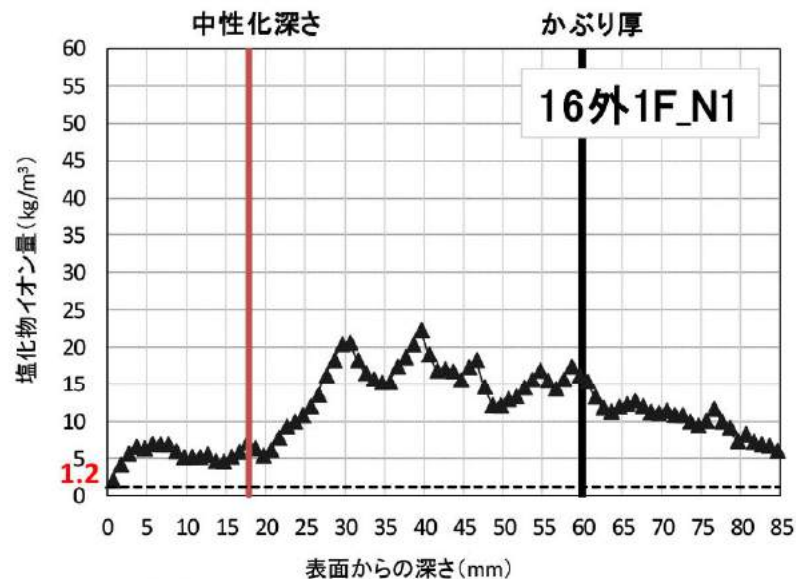
塩分規制について



軍艦島建物の塩分規制の適用状況

	測定箇所	築年数	塩化物量 (鉄筋位置) [kg/m ³]	かぶり厚 [mm]	雨掛かり	自然電位	透気係数 [× 10 ⁻¹⁶ m ²]	積算細孔容積 (mL/mL)	コンクリート 温度Ave[°C]	コンクリート 湿度Ave[%]	鉄筋腐食
建物外部	30外1F_N1	96	17.82	(40)	あり	－	0.089	0.1751	測定中	測定中	不明
	16外1F_N1	94	15.83	60	あり	－	10000		10.8	81.9	軽微
	50外1F_T1	85	7.30	50	あり	－	0.09	0.1581	測定中	測定中	完全腐食
	25外1F_M1	81	6.12	70	あり	－	10000	0.1608	測定中	測定中	軽微
	57外1F_M1	73	2.89	50	なし	－	212.3	0.2253	測定中	測定中	軽微
	65N外1F_M1	67	1.80	40	あり	不確定～有	10000	0.2528	11.2	99.3	完全腐食
	65N外1F_M2	67	15.61	85	あり	－	0.26	－	11.5	96.7	軽微
建物内部	16内3F_N1	94	13.07	30	なし	－	0.2	－	11.5	80.1	軽微
	16内3F_M1	94	6.46	70	なし	不確定～有	4286	－	測定中	測定中	軽微
	16内5F_N1	94	0.71	40	なし	－	4757	－	－	－	軽微
	65E内1F_M1	63	0.58	110	なし	－	2957	0.2076	－	－	軽微
	65S内1F_M	54	0.76	100	なし	－	2482	0.1986	－	－	軽微
	69内1F_T	54	0.50	95	なし	－	0.0067	－	－	－	軽微
	3内1F_M1	53	0.43	120	あり	不確定	90.47	－	11.7	91.2	軽微

中性化による塩化物イオンの濃縮



暴露試験実施の背景・目的

日本建築学会(2011~2012)の調査の一環として、軍艦島のRC構造物群の保存・補修方法を検討

- 厳しい塩害環境と内在塩分
- 経年による中性化の進行
- 歴史的構造物であるが故の制約

外観をできるだけ変えずに、鋼材腐食の進行を抑制



歴史的建造物の保存・修復

ICOMOSの国際憲章（ヴェニス憲章）

歴史的建造物の保存・修復には、Authenticity（真
正な価値）の確保が必要

Authenticity確保の考え方：

- ① 建設時と同じ材料・工法を用いること
- ② 形状や色などを変えないこと
- ③ 全体と調和させつつ、修復部分が明確に区別
できること・取り外せること

これらの条件を考慮し、軍艦島のRC
建造物群に適用可能な補修方法を検討

暴露試験の実施

基材モルタル

W/C=70%・S/C=4.5・細骨材の10%を鉄粉で置換

Cl= 1.2kg/m³(内在塩分、飛来塩分が比較的少ない部位を想定)

10kg/m³(初期の建物、飛来塩分が比較的多い部位を想定)

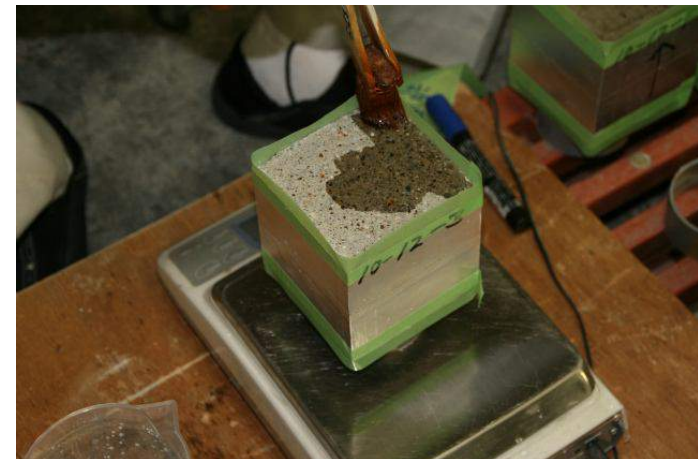
基材モルタルの養生

材齢2日	湿空養生
材齢7日(5日間)	標準養生
材齢10日(3日間)	50℃気中乾燥
材齢31日(21日間)	促進中性化(中性化深さ約21mm)
～材齢42日	補修施工
材齢56日	暴露試験開始

基材モルタルの形状・寸法

100×100×100mm

側面2面に補修を施し、残り4面を
厚膜表面被覆材でシール



暴露試験実施状況



69号棟(端島病院)西側
(飛来塩分が中程度の環境)

17号棟居室内
(飛来塩分が少ない環境)

補修仕様

分類	記号	仕様
補修なし	N	補修無し
表面被覆	MC	アクリルゴム系塗膜防水材 (JIS A 6021)
	WPE	防水形複層塗材E (JIS A 6909)
	CE	防水形複層塗材CE (JIS A 6909)
LiNO ₂ 処理	LNP1	LiNO ₂ 表面塗布 (400g/m ²) メーカー標準塗布量
	LNP2-1.2	LiNO ₂ 表面塗布224g/m ² (Cl ⁻ 1.2kg/m ³ 用・モル比1.0)
	LNP2-10	LiNO ₂ 表面塗布1120g/m ² (Cl ⁻ 10kg/m ³ 用・モル比0.6)
	LNIJ	LiNO ₂ 高圧注入処理 (注入量 : Cl ⁻ 1.2kg/m ³ 用 5cc/体、Cl ⁻ 10kg/m ³ 用30cc/体)
	LNP+PCP	Li ₂ O ₃ Si系固化材表面塗布 (200g/m ²) 後 LiNO ₂ 表面塗布 (約280g/m ²) およびLiNO ₂ 混入ポリマーセメントペースト2mm塗付け
浸透性 吸水防止材	BP	シラン系浸透性吸水防止材塗布 (600g/m ²)
LiNO ₂ +浸透性 吸水防止材	LNP1+BP	LiNO ₂ 表面塗布 (400g/m ²) 後、浸透性吸水防止材塗布 (600g/m ²)
	LNIJ+BP	LiNO ₂ 高圧注入処理 (上記参照) 後、浸透性吸水防止材塗布 (600g/m ²)

暴露試験の実施状況



16号棟—59号棟間
(飛来塩分の多い環境)

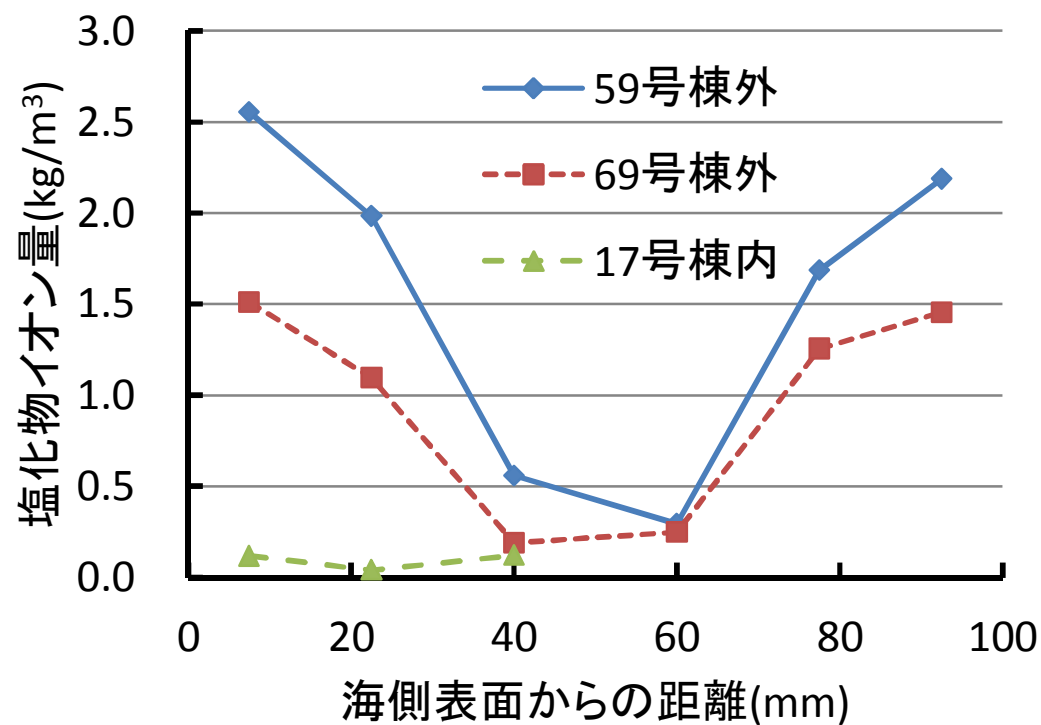


69号棟(端島病院)西側
(飛来塩分が中程度の環境)



17号棟居室内
(飛来塩分がない環境)

飛来塩分量（試験体による測定）

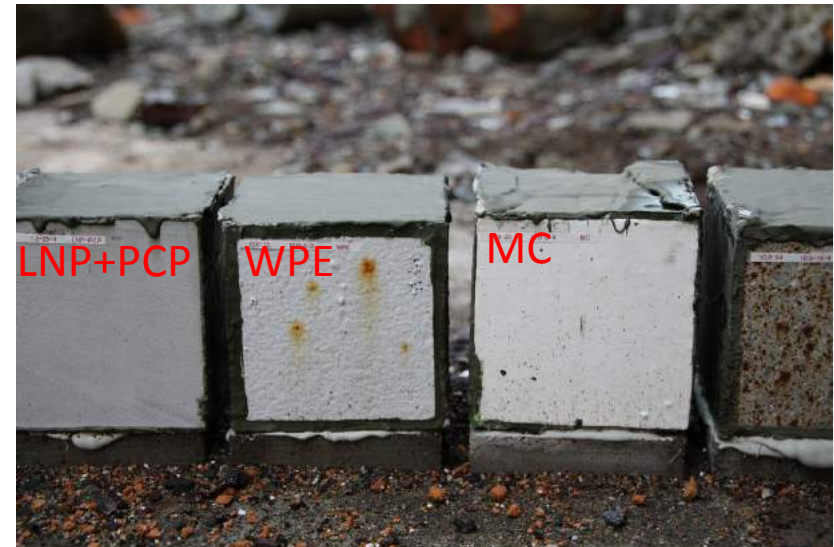
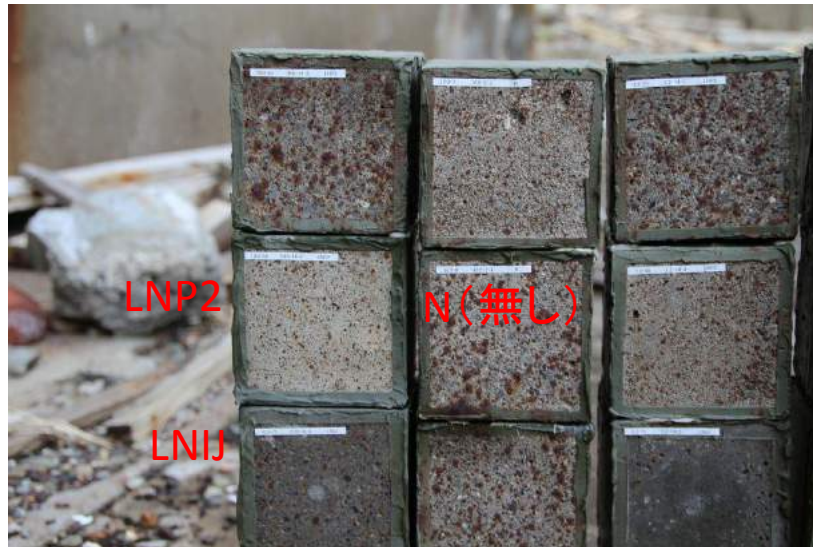


暴露場所	向き	表面Cl-量(kg/m³)	見掛けの拡散係数(cm²/年)
59号棟外	海側	3.24	0.17
	山側	2.86	0.20
69号棟外	海側	1.97	0.22
	山側	1.90	0.17

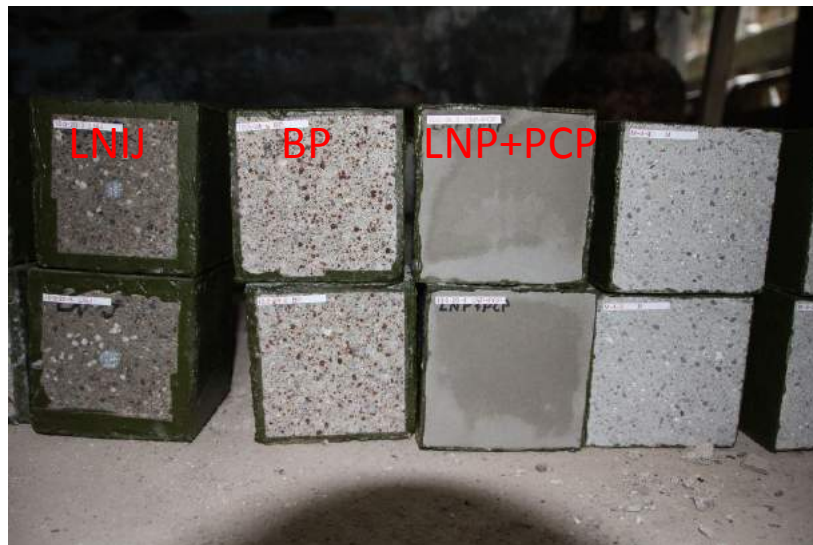
塩化物イオン量は、温水抽出塩分（イオンクロマトグラフで測定）

試験体の状況の例 (2015.2)

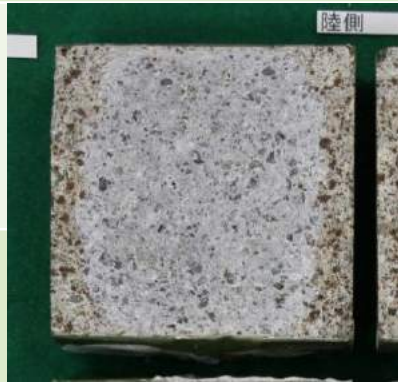
69
号棟
屋外



17
号棟
屋内



腐食状況の評価

グレード	状 況	表面	断面
0	全くさびていない状態		
1	一部の鉄粉がさびている状態		
2	ほぼ全ての鉄粉がさびている状態		
3	一部の鉄粉が腐食・膨張し、さび汁が見られる		
4	ほぼ全ての鉄粉が腐食膨張し、さび汁が見られる		

腐食状況 (Cl⁻:1.2kg/m³試験体)

Cl ⁻ (kg/m ³)	暴露箇所	補修仕様	腐食グレード					
			海側			山側		
			表面	中性化	未中性化	未中性化	中性化	表面
1.2	59号棟外	N	3.5	2.5	1.5	1.5	3.0	4.0
		LNP1	3.0	3.5	1.5	1.5	3.5	3.5
		LNP2-1.2	2.5	3.0	1.5	1.5	3.5	3.0
		LNP1+BP	3.0	1.0	0.0	0.0	1.0	2.0
		LNIJ	0.5	0.5	0.0	0.0	0.5	1.0
		LNIJ+BP	1.0	1.0	0.0	0.0	0.5	1.0
		BP	2.0	0.5	0.5	0.5	0.5	3.5
		LNP+PCP	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0
	69号棟外	N	2.0	2.5	1.0	1.0	2.5	3.0
		LNP1	2.0	3.0	1.0	1.0	3.0	2.5
		LNP2-1.2	2.0	3.0	1.0	1.0	3.0	3.0
		LNP1+BP	2.5	1.0	0.5	0.5	1.0	2.0
		LNIJ	0.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0
		BP	2.0	1.0	0.5	0.5	1.0	2.5
		LNP+PCP	0.0	1.0	0.5	0.5	1.0	0.0
	17号棟内	N	1.5	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0
		LNP1	1.5	0.5	0.0	0.0	0.5	1.0
		LNP2-1.2	1.5	0.5	0.0	0.0	0.5	0.5
		LNP1+BP	1.5	0.5	0.0	0.0	0.5	0.5
		LNIJ	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0
		BP	1.5	1.0	0.0	0.0	1.0	1.5
		LNP+PCP	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0



腐食状況 (Cl⁻:10kg/m³試験体)

Cl ⁻ (kg/m ³)	暴露箇所	補修仕様	腐食グレード					
			海側			山側		
			表面	中性化	未中性化	未中性化	中性化	表面
10	59号棟外	N	4.0	4.0	2.5	2.5	4.0	3.5
		LNP1	2.0	3.0	2.0	2.0	3.0	3.0
		LNP2-10	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0	3.0
		LNP1+BP	3.5	1.5	2.0	2.0	1.5	3.0
		LNIJ	1.5	1.0	0.5	0.5	1.0	0.5
		LNIJ+BP	1.0	1.0	0.5	0.5	1.0	1.5
		BP	2.5	2.0	1.5	1.5	2.0	2.5
		LNP+PCP	0.0	1.0	1.5	1.5	1.0	0.0
	69号棟外	N	2.0	3.5	2.0	2.0	3.5	3.5
		LNP1	2.0	2.5	2.0	2.0	2.5	2.5
		LNP2-10	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0
		LNP1+BP	2.5	2.0	1.5	1.5	2.0	2.0
		LNIJ	0.5	1.5	0.5	0.5	1.5	1.0
		BP	2.5	2.0	1.5	1.5	2.0	2.5
		LNP+PCP	0.0	1.5	1.5	1.5	1.5	0.0
	17号棟内	N	2.0	3.0	2.0	2.0	3.0	2.5
		LNP1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5
		LNP2-10	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5
		LNP1+BP	2.5	2.0	1.5	1.5	2.0	2.0
		LNIJ	1.5	1.5	0.5	0.5	1.5	1.0
		BP	2.0	2.5	1.5	1.5	2.5	2.5
		LNP+PCP	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0

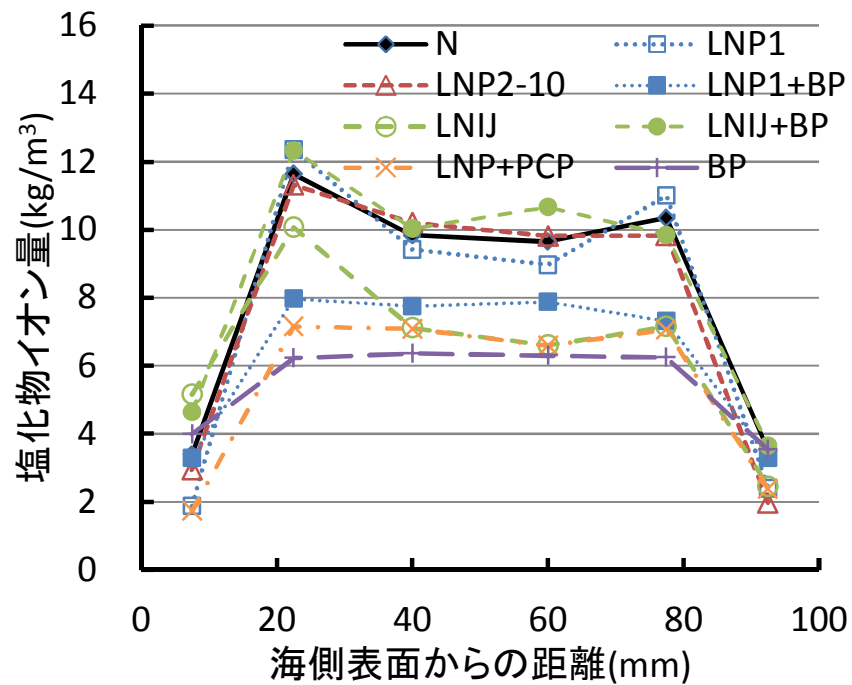


目視による腐食状況 表面被覆試験体

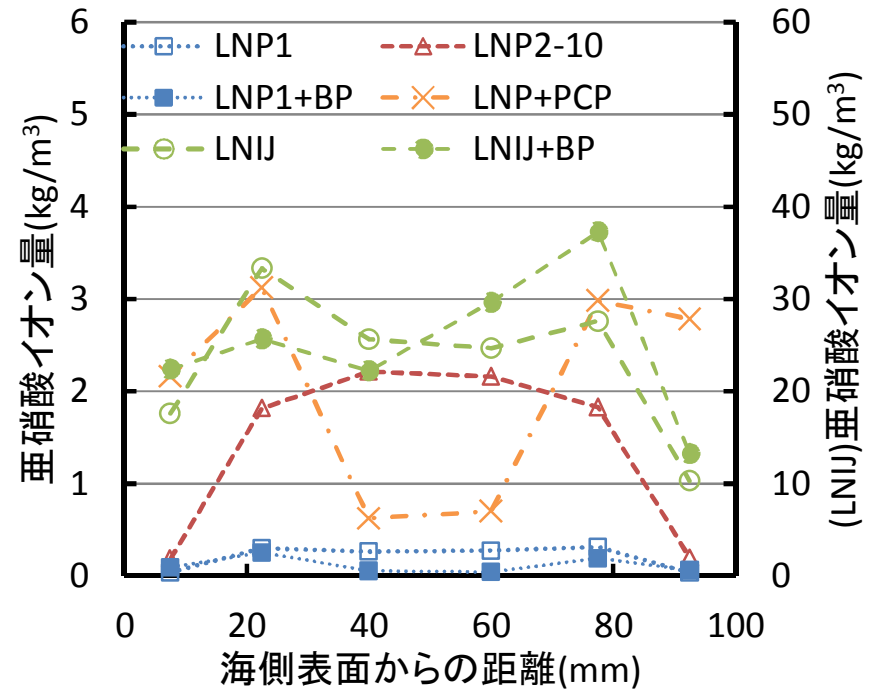
Cl ⁻ (kg/m ³)	暴露箇所	補修仕様	腐食グレード					
			海側			山側		
			表面	中性化	未中性化	未中性化	中性化	表面
1.2	59号棟外	N	3.5	2.5	1.5	1.5	3.0	4.0
		CE	0.0	1.5	0.5	0.5	2.0	0.0
		WPE	1.0	2.5	1.0	1.0	2.5	0.5
		MC	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5
	69号棟外	N	2.0	2.5	1.0	1.0	2.5	3.0
		WPE	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0
		MC	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0
	17号棟内	N	1.5	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0
		CE	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0
		WPE	0.0	1.5	0.0	0.0	1.5	0.0
		MC	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0
10	59号棟外	N	4.0	4.0	2.5	2.5	4.0	3.5
		CE	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0
		WPE	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0
		MC	0.0	1.5	2.0	2.0	1.5	0.0
	69号棟外	N	2.0	3.5	2.0	2.0	3.5	3.5
		WPE	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0
		MC	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0
	17号棟内	N	2.0	3.0	2.0	2.0	3.0	2.5
		CE	0.0	2.5	0.5	0.5	2.5	0.0
		WPE	0.0	2.5	0.5	0.5	2.5	0.0
		MC	0.0	1.5	0.5	0.5	1.5	0.0



塩化物および亜硝酸イオンの分布の例



塩化物イオン分布
(温水抽出塩分)



亜硝酸イオン分布

まとめ

軍艦島の建築物の現況と課題

- ◆ 厳しい塩害環境（飛来塩分量）
- ◆ 内在塩分（大量の塩分・建設年代による規制との関係）
- ◆ 中性化は一般的or小さめ
- ◆ 鉄筋腐食の進行（部材の欠損、鉄筋の断面欠損・消失）
- ◆ 部材性能（構造性能）に対する懸念、評価方法の検討
- ◆ 歴史的構造物に対する補修方法の検討