



長期暴露試験に基づく 鋼管杭の被覆防食工法の耐久性評価 — 40年の歩み —

港湾空港技術研究所 構造研究領域
材料研究グループ 小池 賢太郎

本日の内容



- 港湾鋼構造物の防食工法
- 被覆防食工法の性能評価の課題
- 鋼管杭の被覆防食工法の耐久性評価に関する長期暴露試験
(波崎観測栈橋)

[暴露40年調査で得られた成果の紹介]

- 暴露40年経過した重防食被覆（ポリエチレン）
- 暴露39年経過したペトロラタム被覆

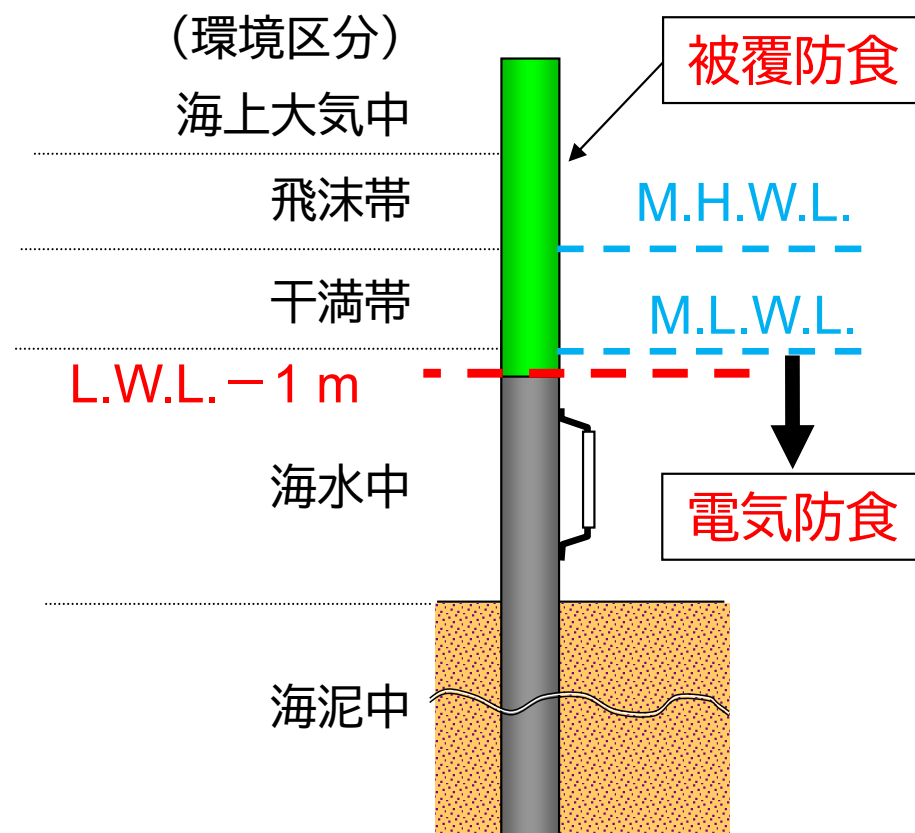
- 今後の展望

港湾鋼構造物の防食方法



- 鋼材表面を各種材料で覆い，腐食環境から遮断（**被覆防食**）
- 鋼材表面に電子を供給し，腐食反応を抑制（**電気防食**）

防食工法の適用範囲



被覆防食の種類

- ① 塗装
- ② 有機被覆
- ③ ペトロラタム被覆
- ④ モルタル被覆
- ⑤ 金属被覆

被覆防食の課題

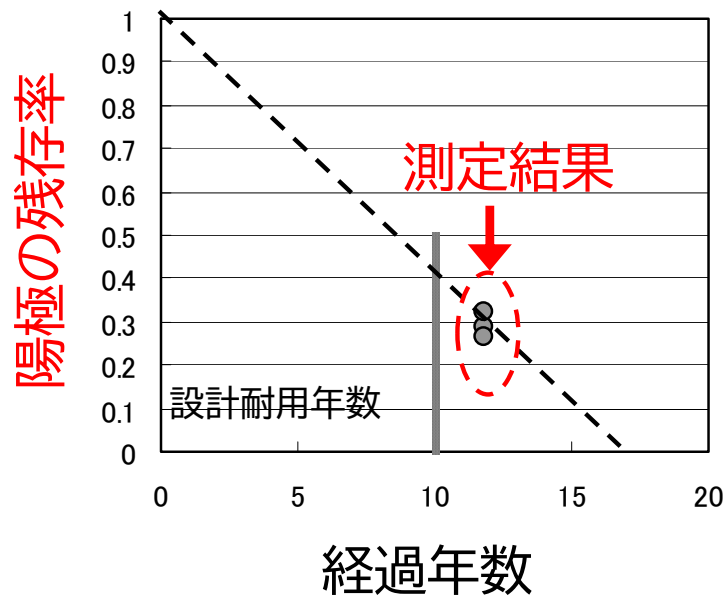
- ・ 長期供用後の被覆材の性能や防食効果の実態が明らかではない
- ・ 劣化予測手法が確立されていない

港湾鋼構造物の防食工法の性能評価の現状



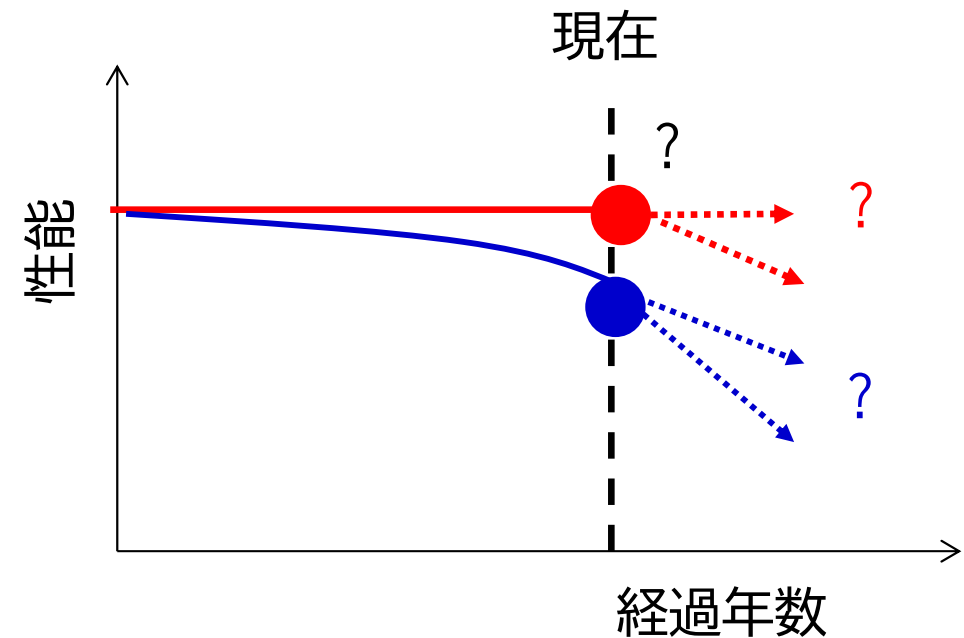
電気防食（海中）

- ・ 耐用年数の設定は容易
- ・ 現状の性能把握，将来予測ともに比較的容易



被覆防食

- ・ 耐用年数の設定は困難
- ・ 現状の性能把握，将来予測ともに困難

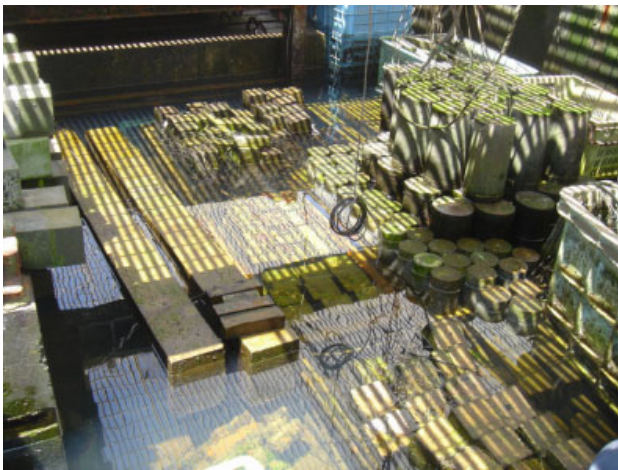


課題：被覆防食工法の性能評価，将来予測方法の確立

港湾空港技術研究所での取り組み



各種被覆防食の劣化予測手法の確立を目的として、被覆防食の各種性能の経年変化について、テストピースおよび実構造物を対象にした調査・検討を長期間にわたり実施している



海水循環水槽



海水シャワー暴露試験場



波崎観測栈橋
2025年度：試験開始41年目

港湾空港技術研究所内 長期暴露試験施設

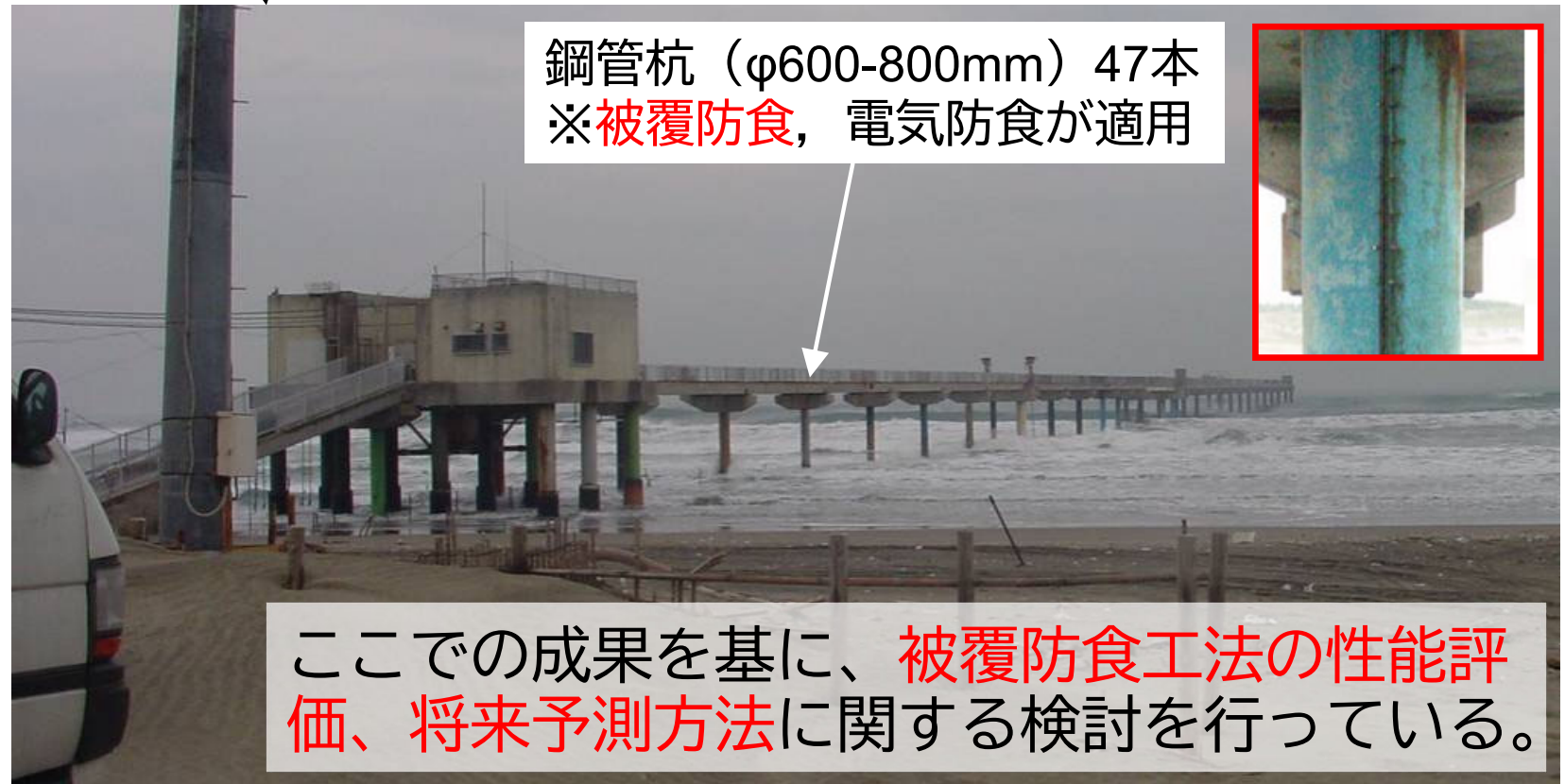
波崎観測栈橋の概要



位置図



- ・ 全長427.0mの観測栈橋
- ・ 栈橋を構成する鋼管杭に対して、多様な種類の「被覆防食工」を適用し、長期耐久性（耐用年数，劣化特性等）を1984年より開始（2025年度で41年目）



鋼管杭（φ600-800mm）47本
※被覆防食，電気防食が適用



ここでの成果を基に、被覆防食工法の性能評価、将来予測方法に関する検討を行っている。

波崎観測栈橋で適用されている防食工法



塗装



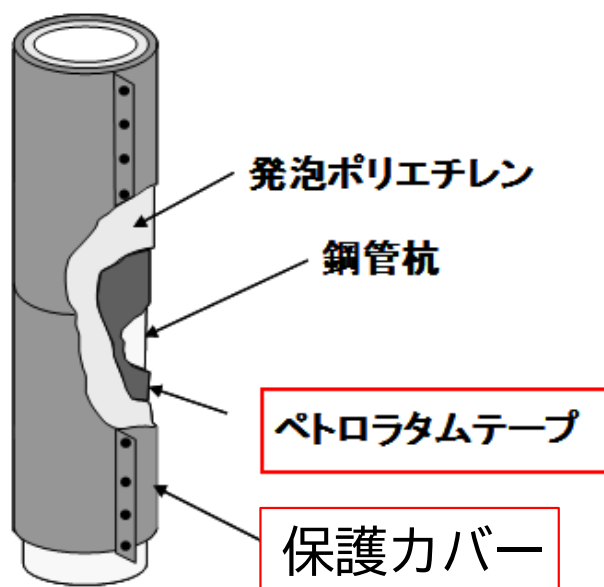
有機被覆（水中硬化形被覆）



有機被覆（ポリエチレン）



ペトロラタム被覆 （*石油ワックスの一種）



無機被覆（コンクリート被覆）

スタッドジベル



電気防食

- ・流電陽極（水中溶接式）
- ・流電陽極（磁石式）



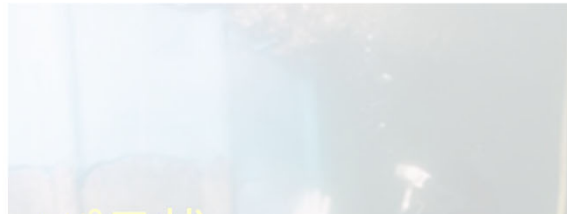
波崎観測栈橋で適用されている防食工法



塗装



有機被覆（水中硬化形被覆）

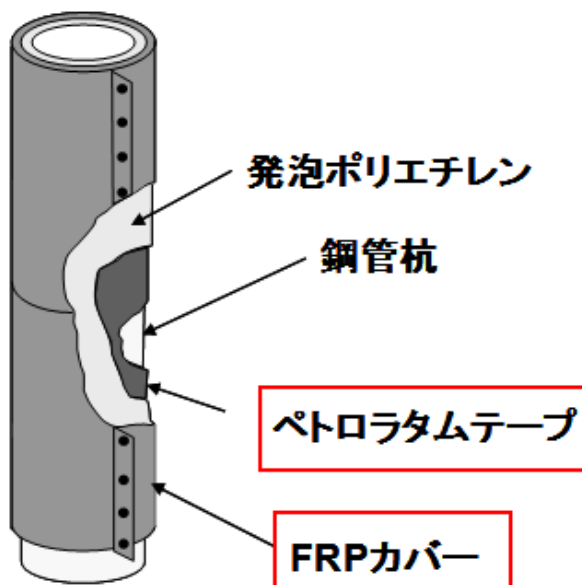


2024年
適用後40年経過した重防食被覆
（ポリエチレン）の調査

有機被覆（ポリエチレン）



ペトロラタム被覆
（*石油ワックスの一種）



無機被覆（コンクリート被覆）

スタッドジベル



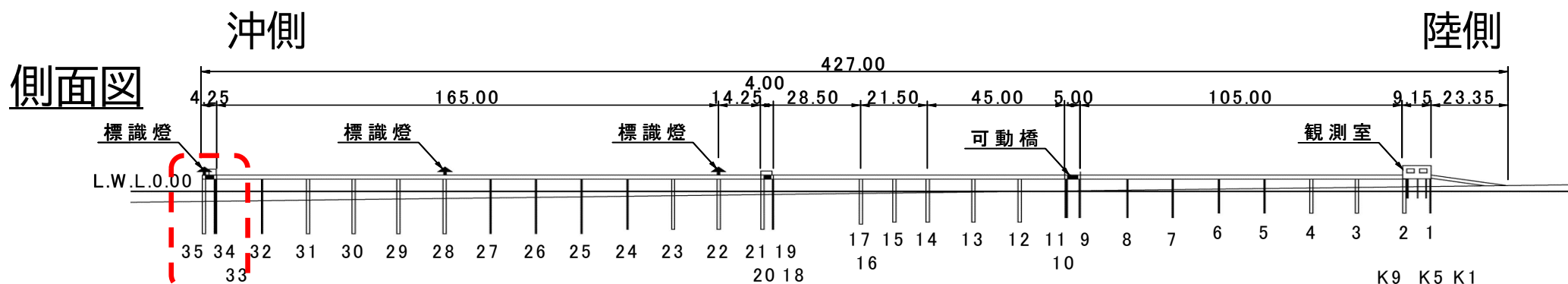
2024年
適用後39年経過した
ペトロラタム被覆の調査

電気防食

- ・流電陽極（水中溶接式）
- ・流電陽極（磁石式）



暴露40年経過した重防食被覆（ポリエチレン）の調査



← 例) 重防食被覆（ポリエチレン）を適用した杭の外観（No.35杭、40年経過時）

重防食被覆の補修方法検討箇所

調査項目

外観調査：被覆自体には変状は見られず

詳細調査

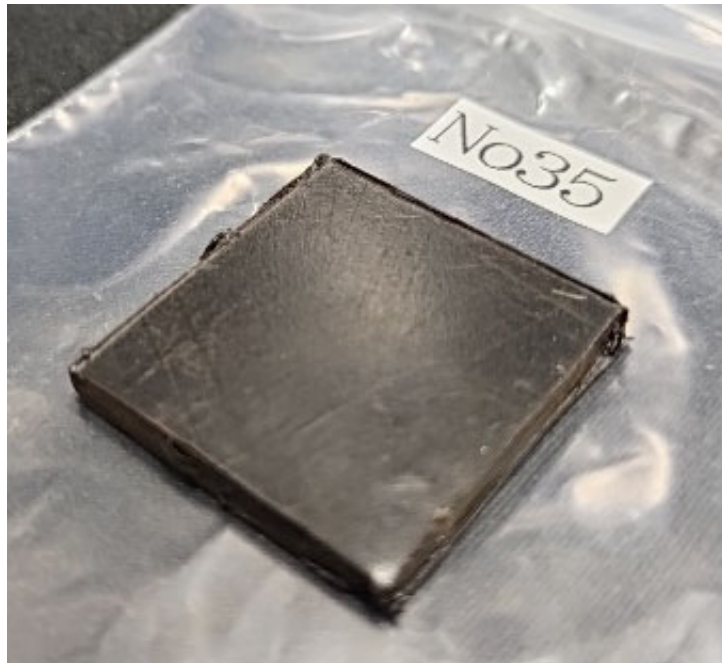
- ・ 被覆材の健全性に関する分析（体積抵抗率）
- ・ 被覆下鋼材の状態（肉厚）

暴露40年経過した重防食被覆（ポリエチレン）の調査



・被覆材の健全性に関する分析（体積抵抗率）

鋼管杭から採取した
ポリエチレン被覆材



有機被覆材（ポリエチレン、ウレタンなど）の
主な劣化要因

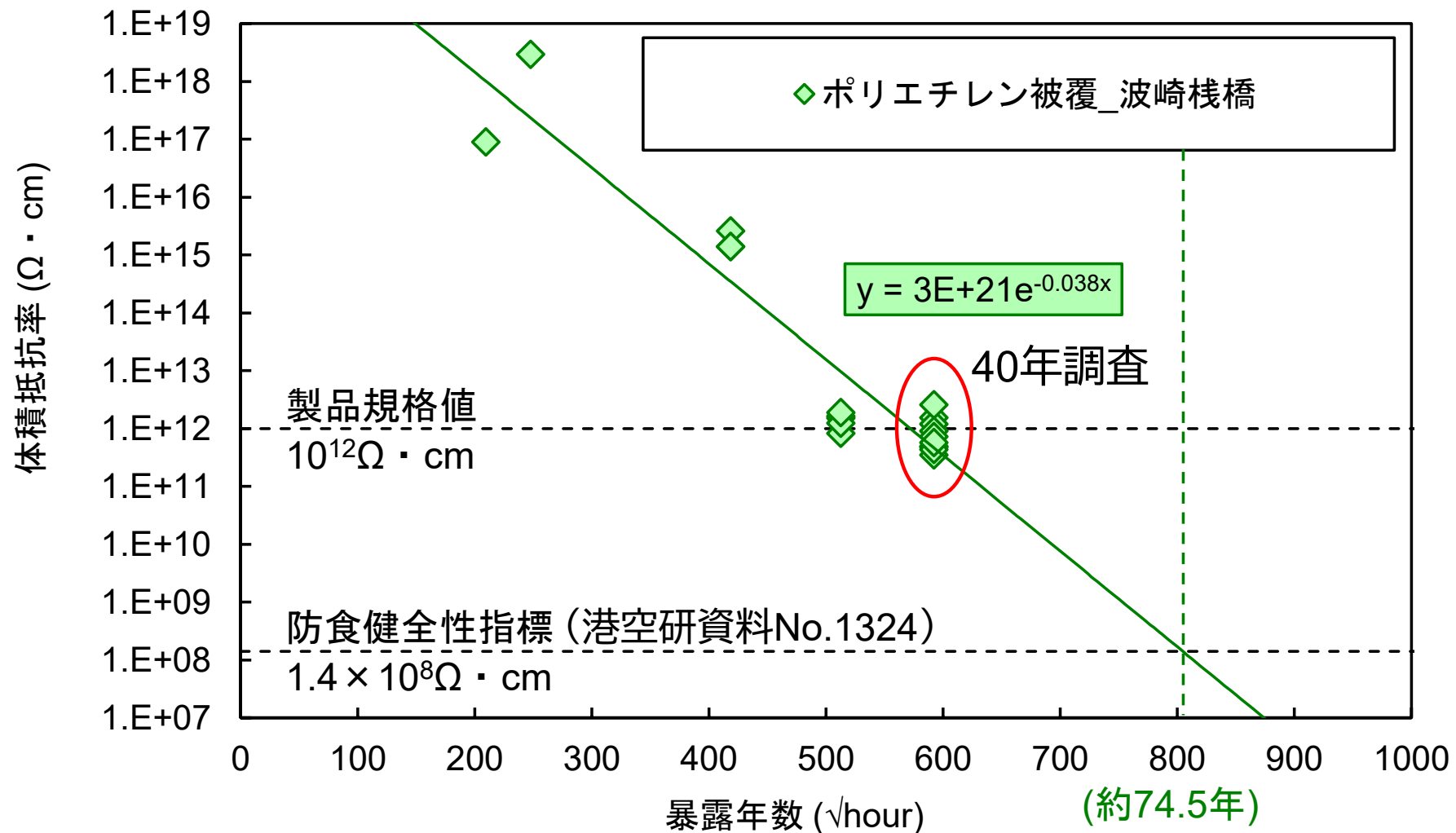
- ・紫外線による光酸化
→ ラジカル反応による高分子結合の切断
 - ・加水分解
→ 水との反応による高分子結合の切断
- 被覆材の弾性低下、粗化、表面の微細クラックの発生
- 劣化因子である水分や酸素の侵入が容易になる

「体積抵抗率」を指標に、被覆材の健全性を評価
することを検討中

暴露40年経過した重防食被覆（ポリエチレン）の調査



・ポリエチレン被覆の体積抵抗率の経時変化



暴露40年経過した重防食被覆（ポリエチレン）の調査



・ポリエチレン被覆被覆下の鋼材の状態

例) ポリエチレン被覆を除去し
鋼材面を露出させた状態 (No.34杭)



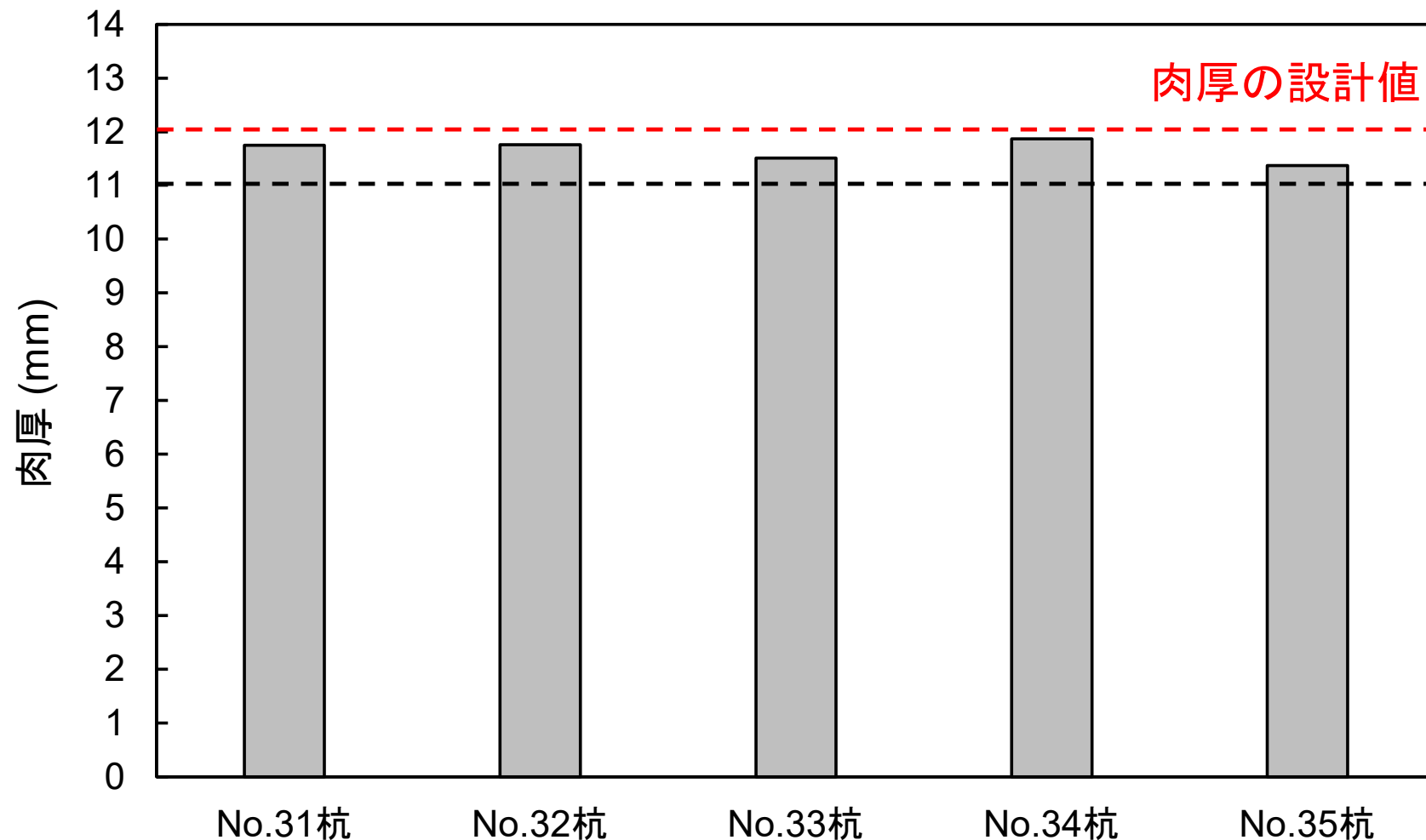
超音波厚み計により、鋼材の肉厚を測定



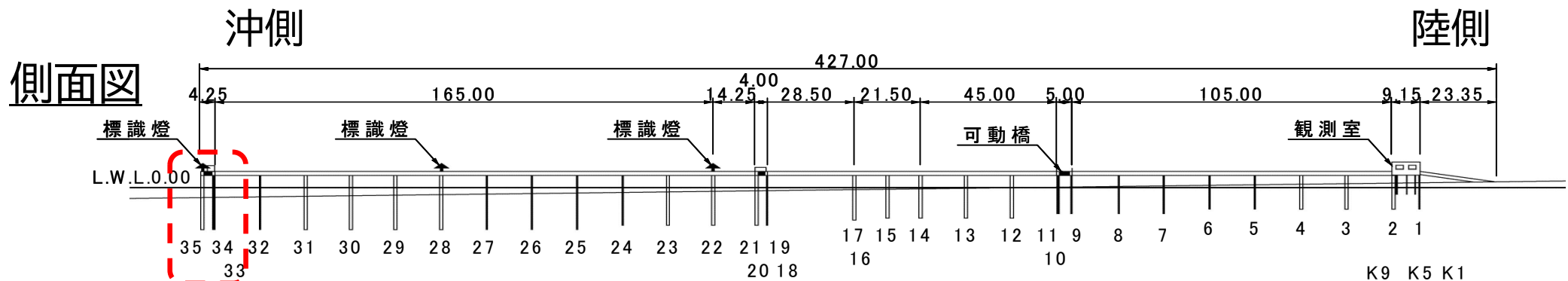
暴露40年経過した重防食被覆（ポリエチレン）の調査



・ポリエチレン被覆被覆下の鋼材の状態



暴露40年経過した重防食被覆（ポリエチレン）の調査



← 例) 重防食被覆（ポリエチレン）を適用した杭の外観（No.35杭、40年経過時）

重防食被覆の補修方法検討箇所

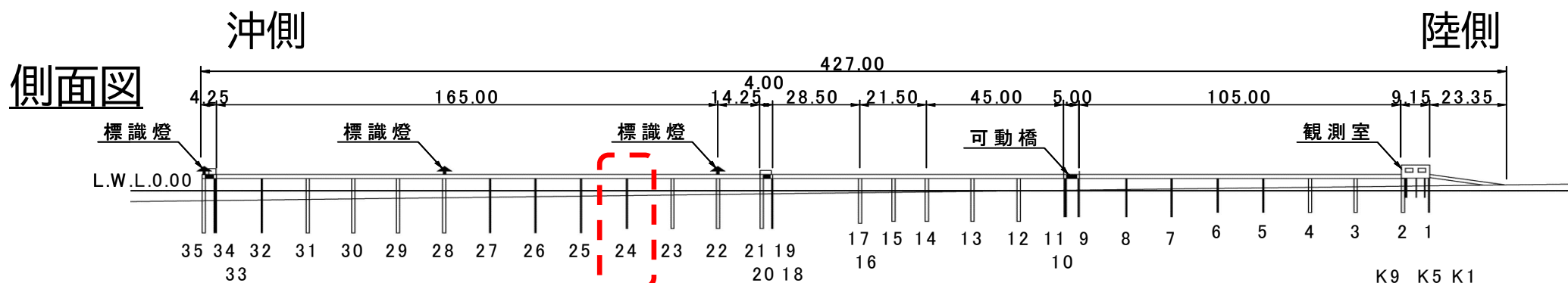
調査項目

外観調査：被覆自体には変状は見られず

詳細調査：

- ・被覆材の健全性に関する分析（体積抵抗率）
 - ・被覆下鋼材の状態（肉厚）
- 変状は見られず健全な状態を維持していた

暴露39年経過したペトロラタム被覆の調査



ペトロラタム被覆を適用した鋼管杭(No.24)

2024年

FRPカバー(39年経過)からチタンカバー方式へ更新

→ 39年経過したペトロラタム被覆を調査

調査項目

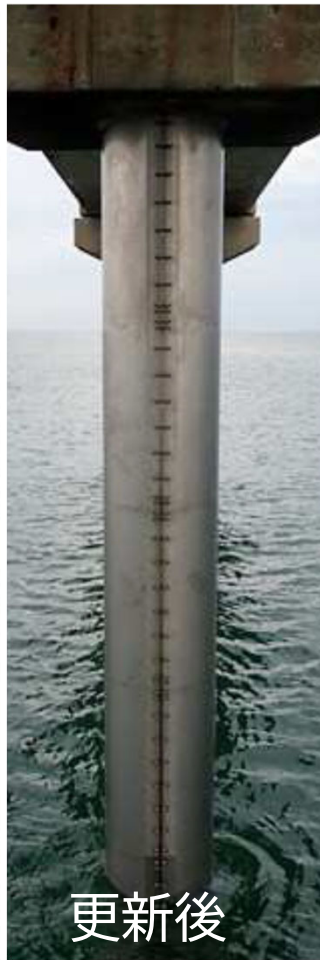
外観調査：カバーの破損、錆汁の滲出なし

詳細調査

- ・カバー材の状態（外観、強度）
- ・ペトロラタムの状態（油分残存、絶縁抵抗）
- ・被覆下鋼材の状態（外観、肉厚）



更新前

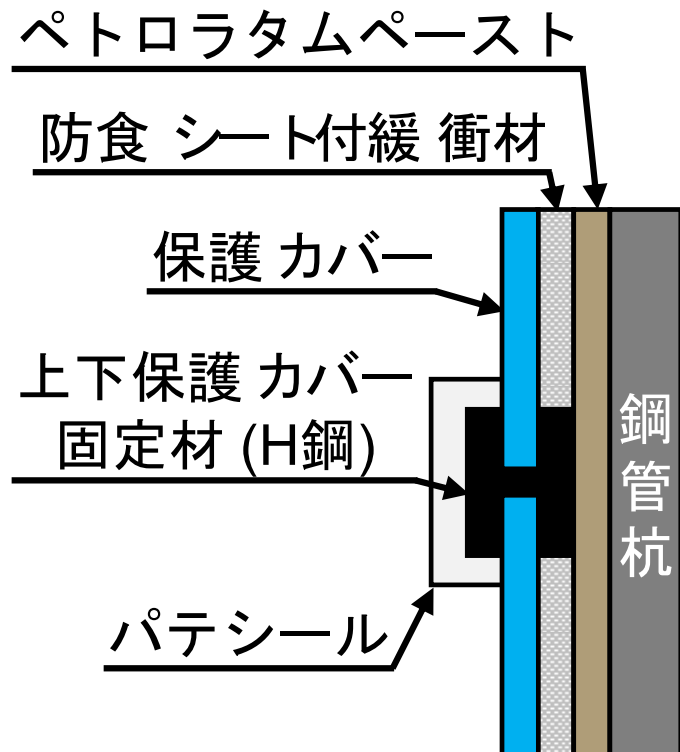


更新後

暴露39年経過したペトロラタム被覆の調査

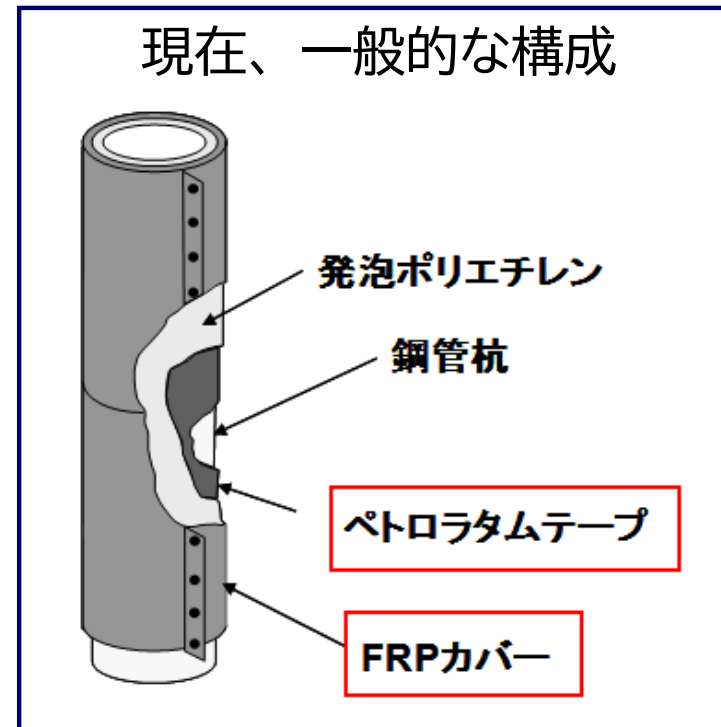


No.24杭で適用された
ペトロラタム被覆の構成



FRPカバー側にペトロラタム
を塗布し、一体化したカバー
を鋼管杭へ固定

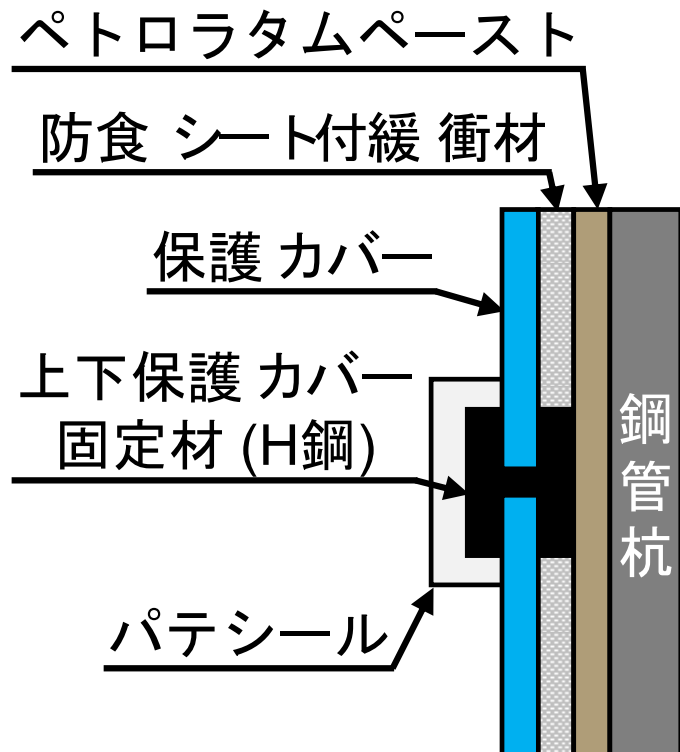
現在、一般的な構成



暴露39年経過したペトロラタム被覆の調査



No.24杭で適用された
ペトロラタム被覆の構成



FRPカバー側にペトロラタム
を塗布し、一体化したカバー
を鋼管杭へ固定



上下カバー継ぎ部：
・H鋼を加工した固定具
を使用しており堅牢
→ 波浪等によるカバー
のズレが発生し難い

暴露39年経過したペトロラタム被覆の調査



・カバースタットの状態

調査項目

・外観観察

一部、カバースタット表面にFRPのガラス繊維が露出していた。
(紫外線劣化、波浪、漂砂などに起因したカバースタット表面の摩耗)
FRPカバースタットの割れ、欠損などは確認されず。

・強度特性

	上段	中段	下段	実務ハンドブック
引張強度	118	106	109	80～120
曲げ強度	191	191	193	100～180
曲げ弾性率	10798	10212	10864	4400～7800
単位：N/mm ²				

カバースタットから試験片を採取



暴露39年経過したペトロラタム被覆の調査



・油分（ペトロラタム）の状態



ペトロラタム被覆の主な劣化要因

- ・ カバー上下端、上下継ぎ部からの水の侵入
→ それに伴う油分（ペトロラタム）の漏出
→ 油分が水分を含むことによる絶縁抵抗の低下

ペトロラタム被覆の**防食効果の低下**

調査項目

- ・ 油分残存率
- ・ 絶縁抵抗

ペトロラタムペースト採取の様子



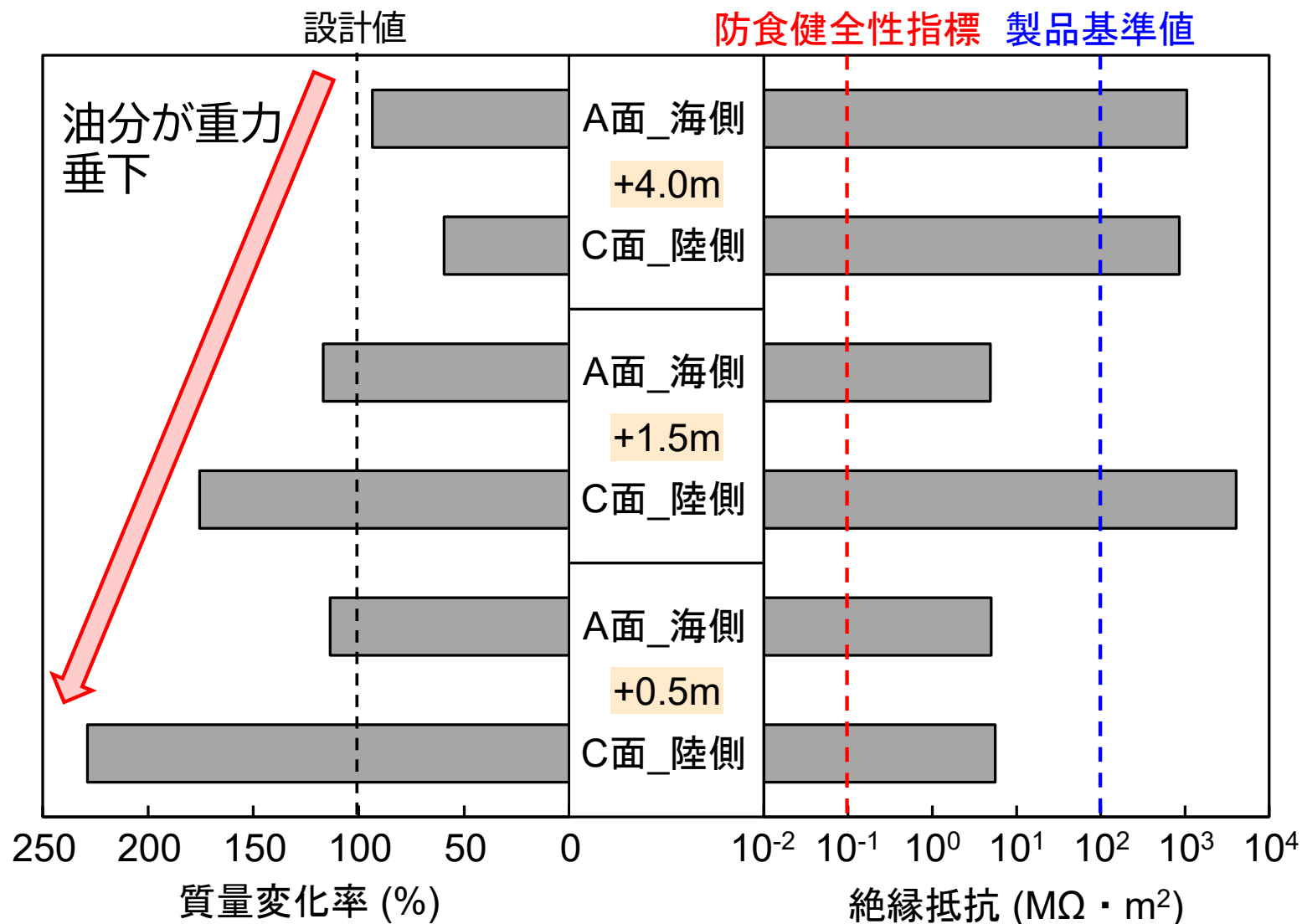
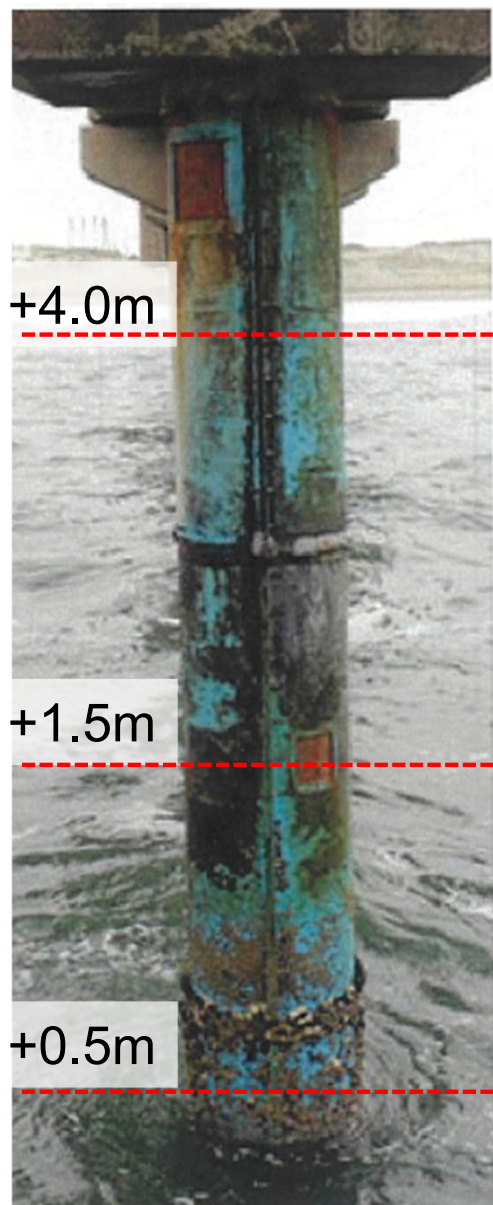
暴露39年経過したペトロラタム被覆の調査



・油分（ペトロラタム）の状態

(港空研報告No.1402)

防食健全性指標 製品基準値



暴露39年経過したペトロラタム被覆の調査



・被覆下鋼材の状態（外観、肉厚）

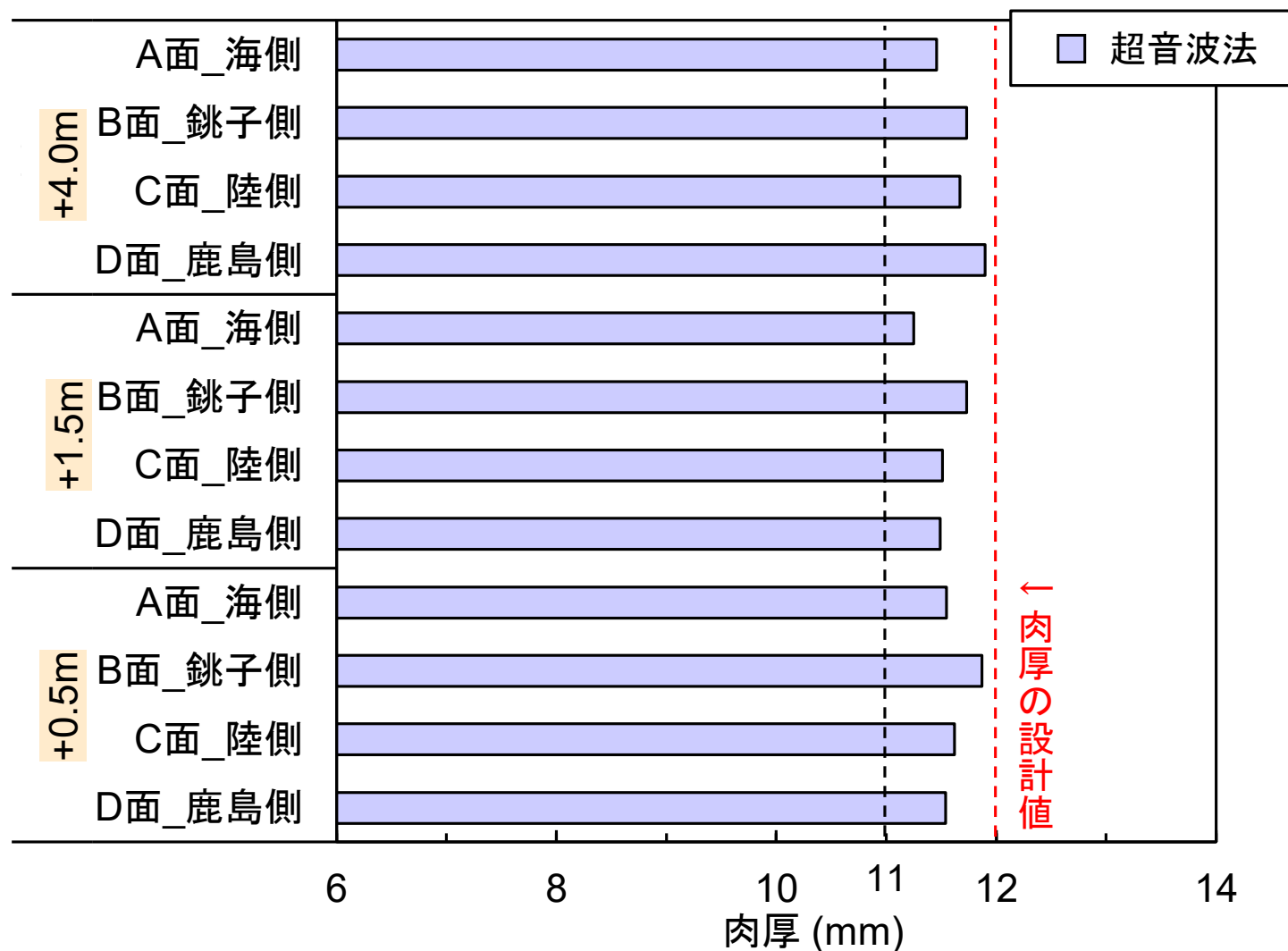
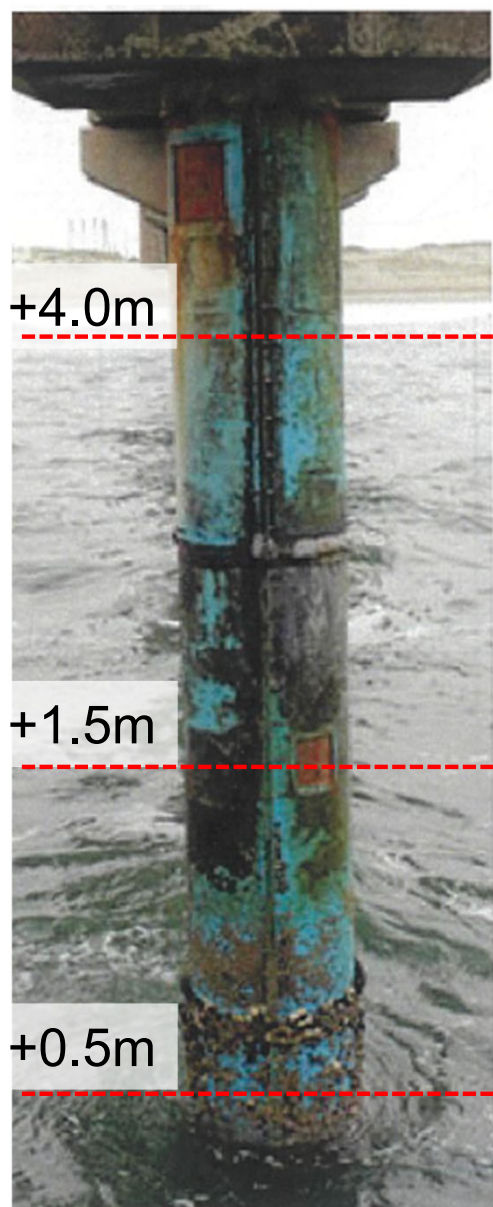


水分浸透に起因すると思われるペトロラタムの白色固化と一部微さび等の変状が確認された。（変状は端部、継ぎ部に限定されていた）

暴露39年経過したペトロラタム被覆の調査



・被覆下鋼材の状態（外観、肉厚）



暴露39年経過したペトロラタム被覆の調査



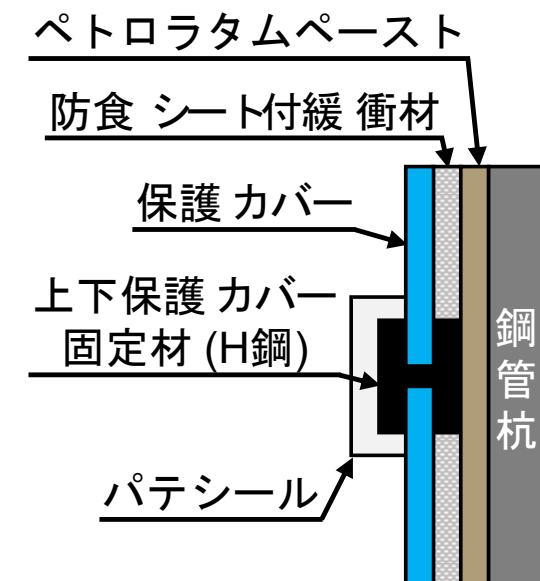
カバー端部際やカバー継ぎ部周辺のごく限定された範囲にて、水分浸透に起因すると思われるペトロラタムの白色固化と一部微さび等の変状が確認された。
→ペトロラタム被覆の防食機能は暴露39年経過しても十分に機能していた。

ただし…

No. 24杭の特徴

波浪等によるカバーのズレが発生し難い固定方式が採用されていたことで、（現行の一般的な工法と比較して）保護カバー継ぎ部からの海水の侵入が抑制されたことが、40年近い長期にわたり防食機能を維持したことに大きく寄与したと考えられる。

→ 端部、継ぎ部の処理の重要性が示された結果



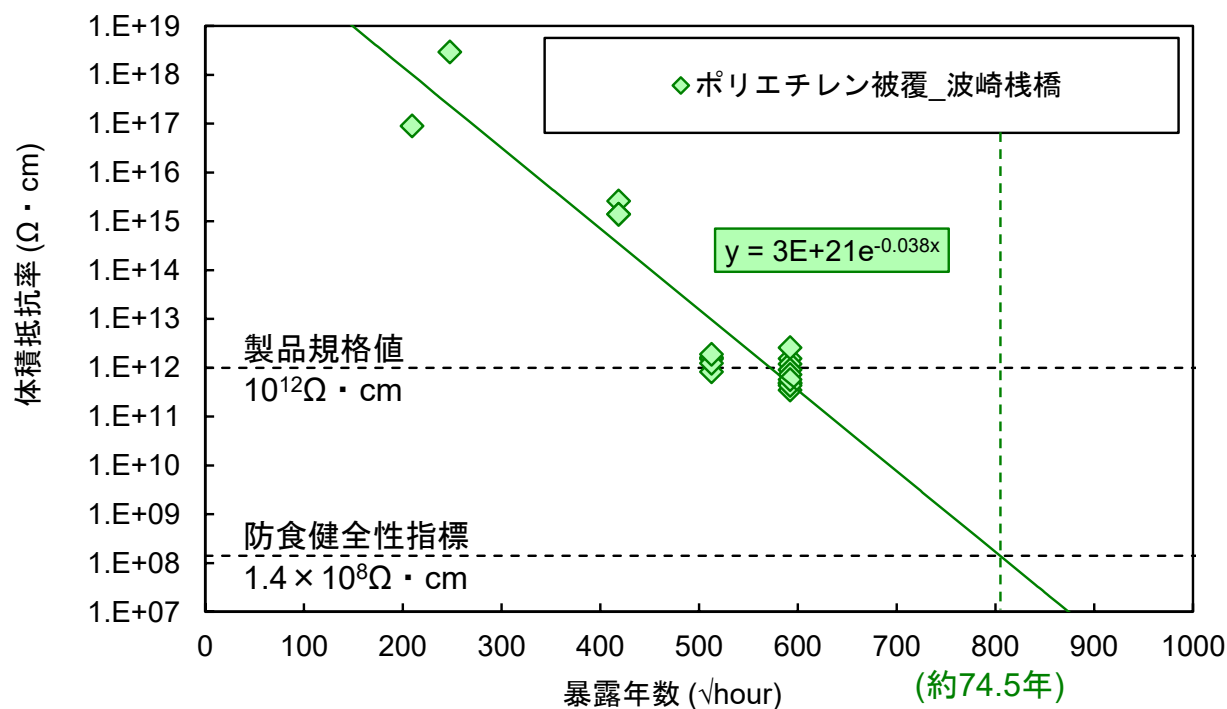
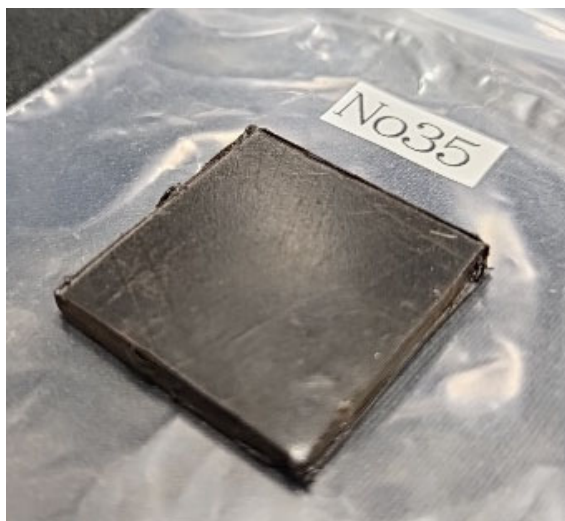
今後の展望 ● 非破壊による被覆防食工の性能評価技術の確立

① 体積抵抗率の現地計測技術について

体積抵抗率は被覆材の健全性を示す指標として有効

→ 現状は実構造物からサンプルを採取

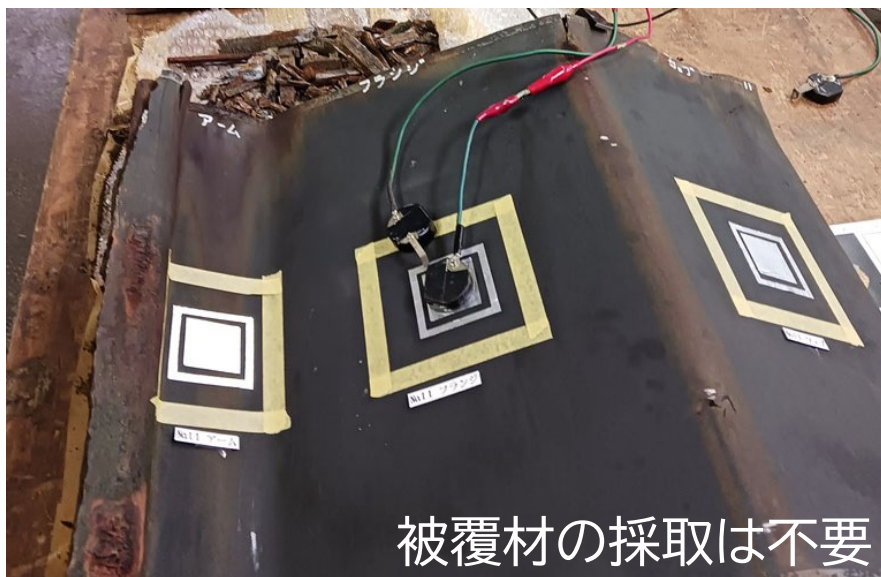
⇒ (補修をしても) サンプルを採取した箇所から劣化が進展するケースがある。



今後の展望 ● 非破壊による被覆防食工の性能評価技術の確立

① 体積抵抗率の現地計測技術について

重防食鋼矢板の試験体を用いて
体積抵抗率を測定している様子



現地計測における注意点
体積抵抗率に及ぼす要因

- ・ 温度の影響
- ・ 被覆表面の状態
→ 汚れ（水分、塩分、藻類）

対策

被覆材表面の高圧洗浄、除湿機による測定
空間の水分調整

現地計測における被覆材の水分調整法



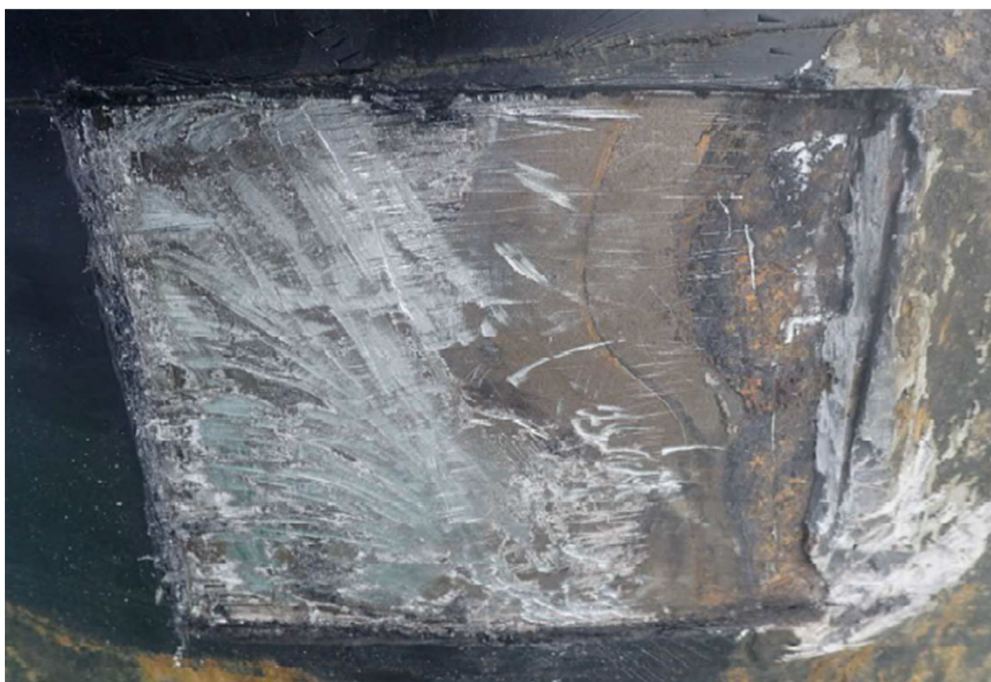
現地計測における最適な測定
条件を検討している。

今後の展望 ● 非破壊による被覆防食工の性能評価技術の確立

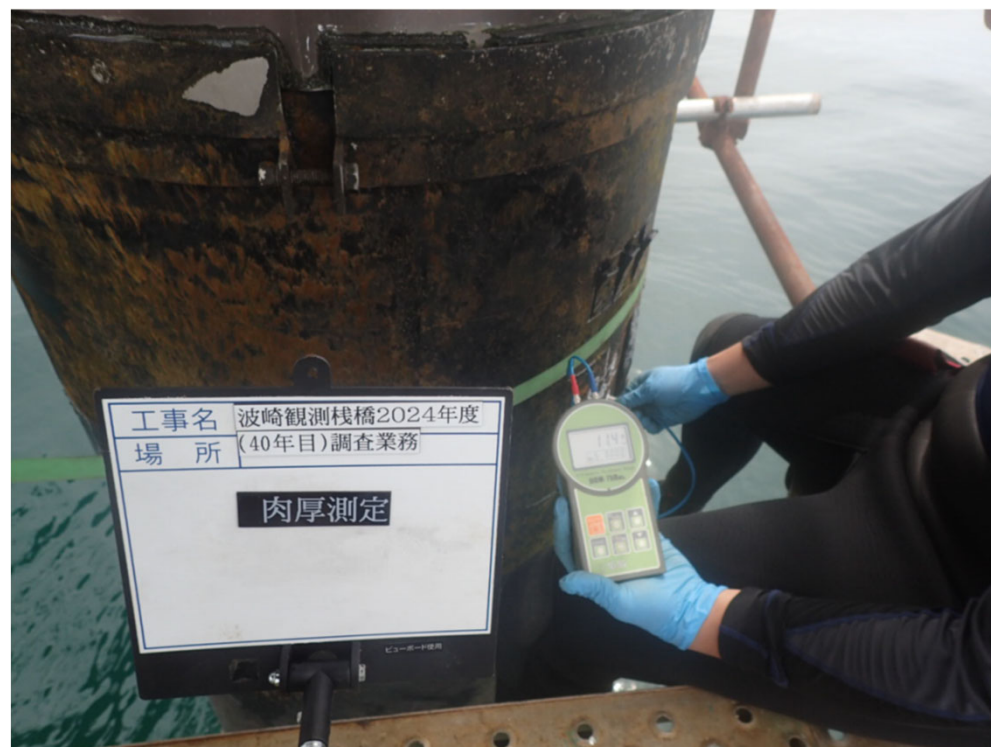
② 被覆下の鋼材肉厚の非破壊計測

例) ポリエチレン被覆を除去し
鋼材面を露出させた状態 (No.34杭)

測定後、補修箇所から劣化が
進展するケースがある。

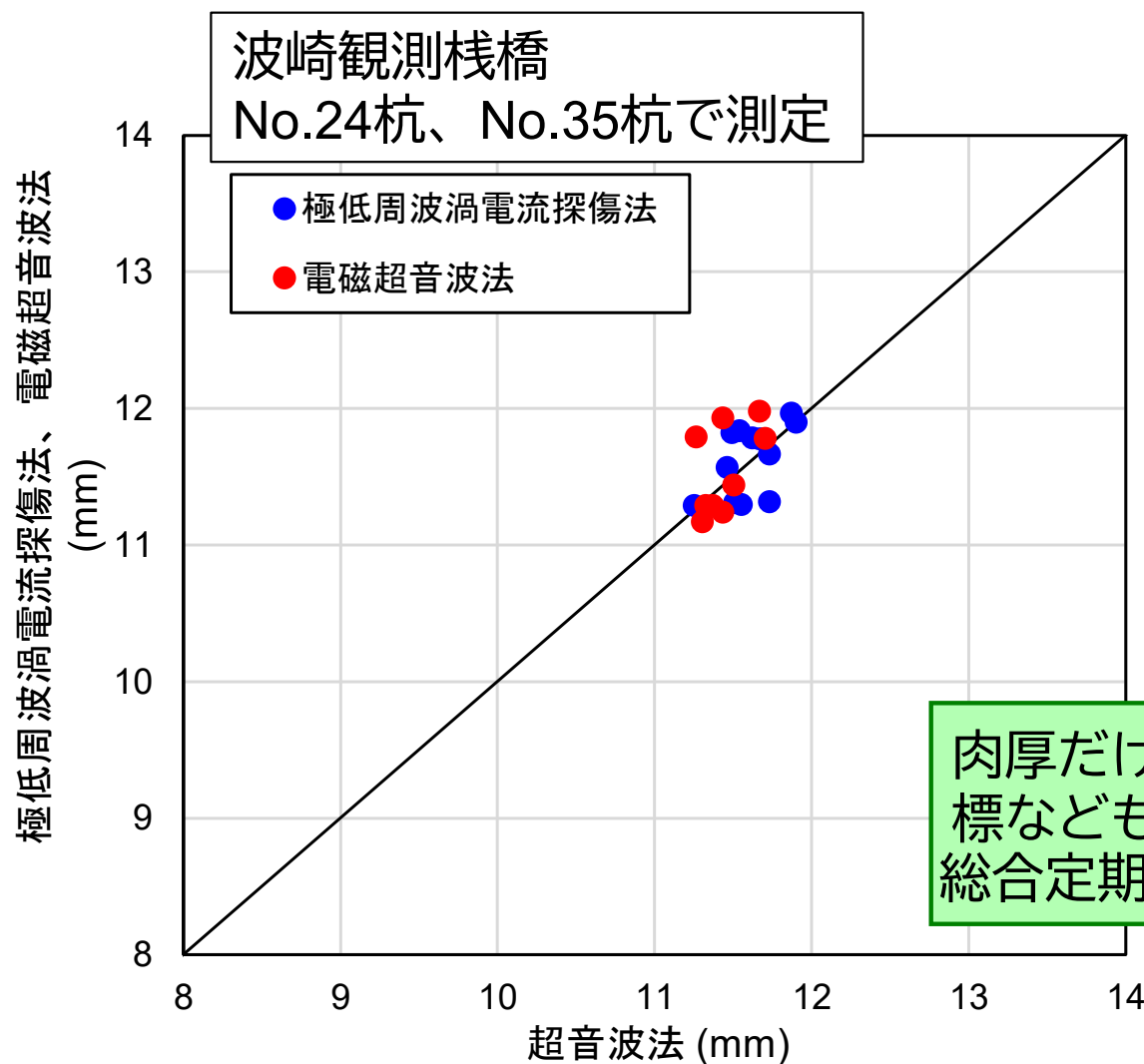


超音波厚み計により、鋼材の肉厚を測定



今後の展望 ● 非破壊による被覆防食工の性能評価技術の確立

② 被覆下の鋼材肉厚の非破壊計測



測定の様子



肉厚だけではなく、体積抵抗率やその他指標なども踏まえて、被覆防食の防食状態を総合定期的に判断できる手法を検討している。

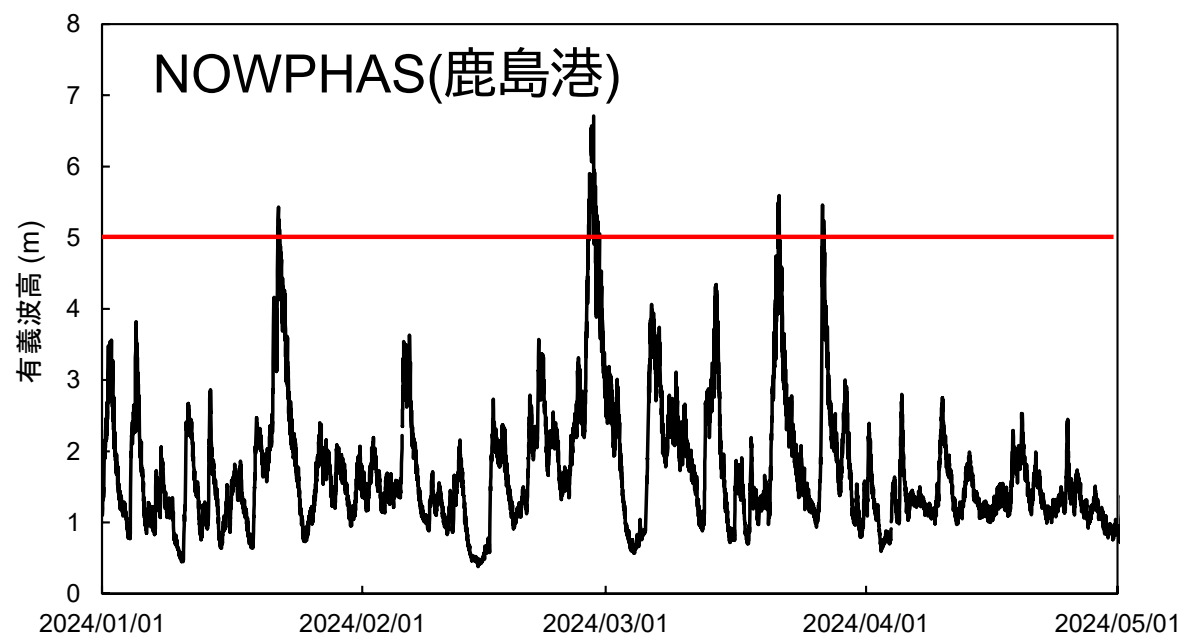


● 高波浪による被覆防食の破損事例（気候変動、海面上昇）



モルタル
カバーの
脱落

近年の波崎の海象



時期によっては、有義波高5mを超える波浪が複数回発生

要検討事項

→ カバー内外で、どのように波力が作用しているのか



- 波崎観測栈橋における
鋼管杭の被覆防食工法の耐久性評価に関する長期暴露試験
 - ・ 暴露40年経過した重防食被覆（ポリエチレン）
 - ・ 暴露39年経過したペトロラタム被覆
- 被覆材、被覆下の鋼材は健全状態を維持

※暴露40年調査の成果を取り纏めた港空研資料を
来年度発刊予定

- 今後の展望
 - ・ 非破壊による被覆防食工の性能評価技術の確立
 - ・ 高波浪による被覆防食の破損事例への対応