



# 第29回土木鋼構造研究シンポジウム

## 波崎海洋研究施設等における 被覆防食工法の長期海洋暴露試験の成果

港湾空港技術研究所

構造研究領域 材料研究グループ

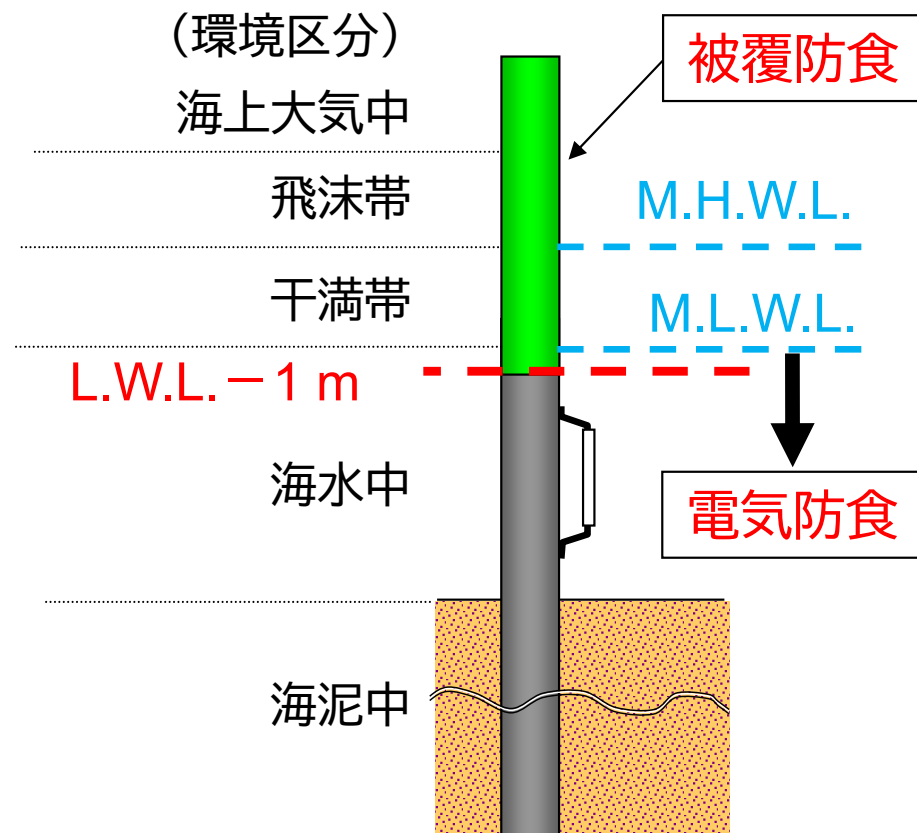
小池 賢太郎

# 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

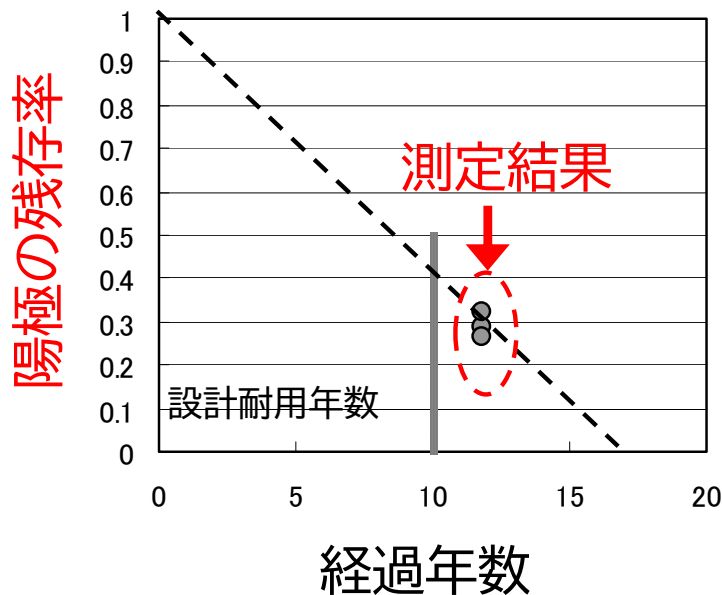
- ① 塗装
- ② 有機被覆
- ③ ペトロラタム被覆
- ④ モルタル被覆
- ⑤ 金属被覆

# 港湾鋼構造物の防食工法の性能評価の現状



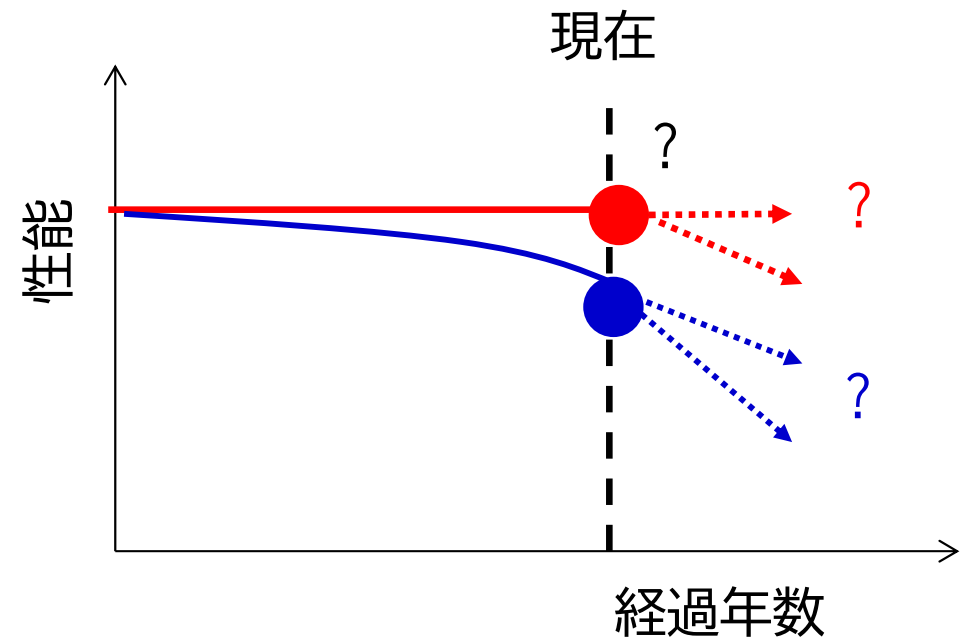
## 電気防食（海中）

- ・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



各種防食工法



波崎観測棧橋

2025年度：試験開始41年目

重防食被覆：ウレタンエラストマー被覆



港湾空港技術研究所内 長期暴露試験施設  
海水シャワー場（2025年度：試験開始17年目）

- 各種被覆被覆を適用した試験体、構造物の暴露試験・調査
  - 被覆防食の長期の防食性能の実態把握
  - 防食性能の評価指標と現場計測技術の確立
  - 将来予測法の検討

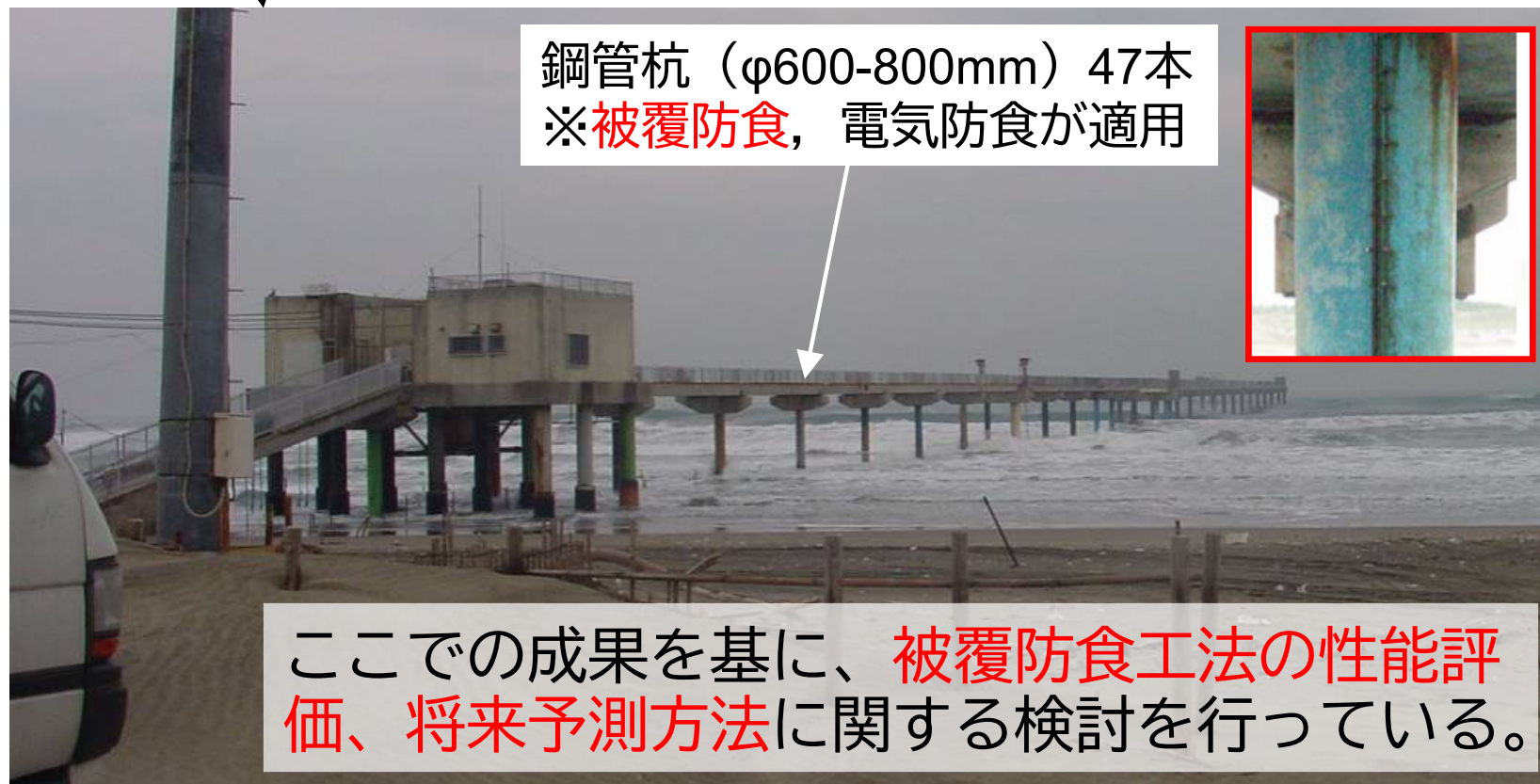
# 波崎観測栈橋の概要



## 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



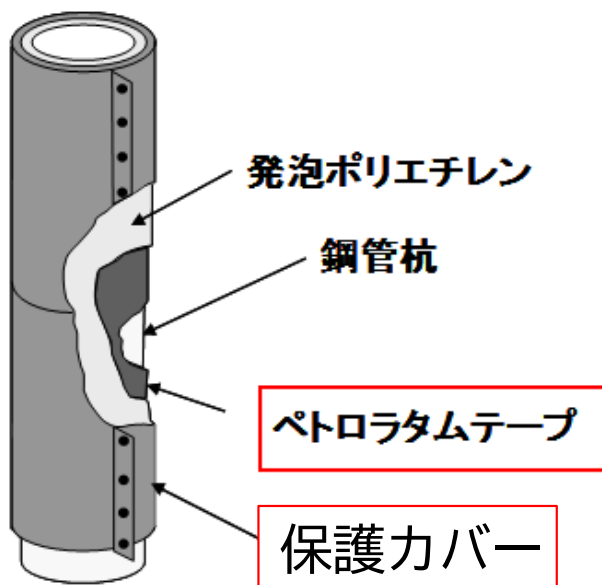
## 有機被覆（水中硬化形被覆）



## 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）



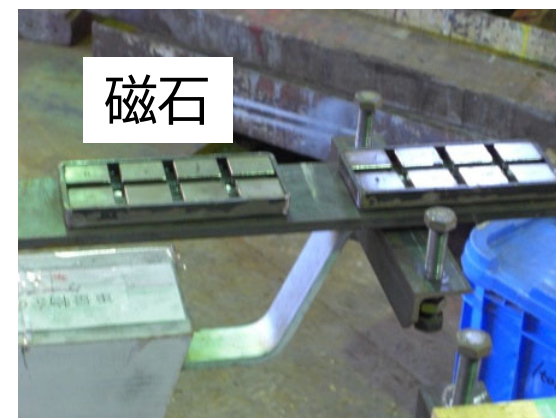
## 無機被覆（コンクリート被覆）

スタッドジベル



## 電気防食

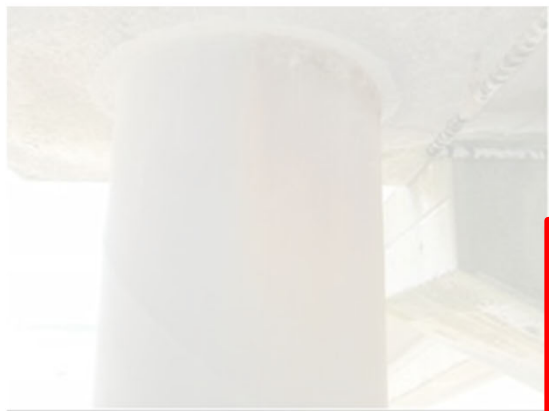
- ・流電陽極（水中溶接式）
- ・流電陽極（磁石式）



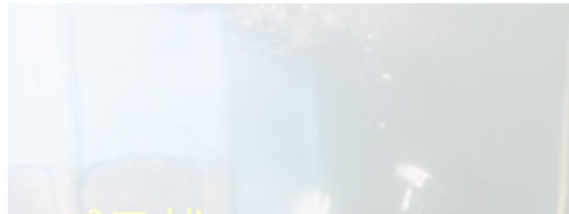
# 波崎観測栈橋で適用されている防食工法



塗装



有機被覆（水中硬化形被覆）

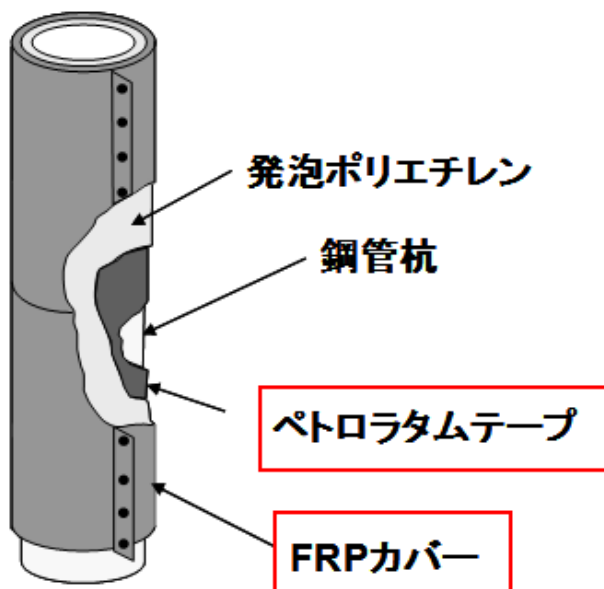


有機被覆（ポリエチレン）



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

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）



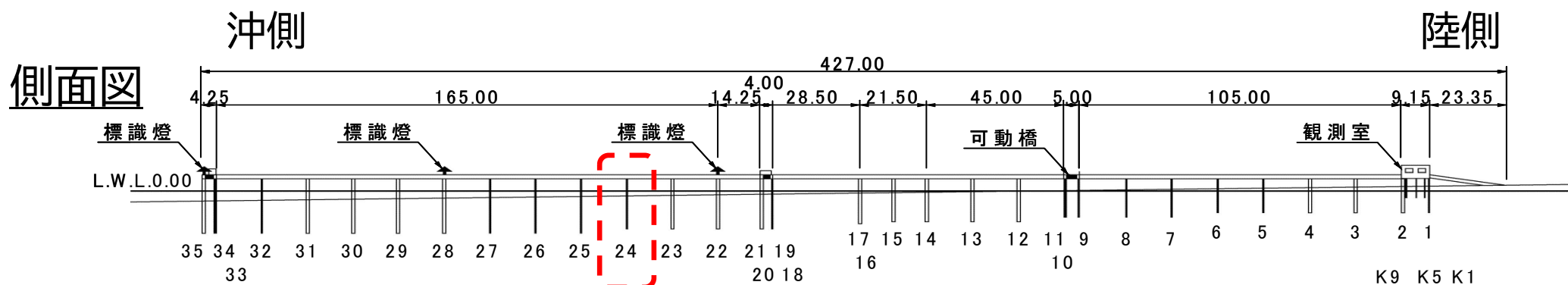
2024年  
適用後39年経過した  
ペトロラタム被覆の調査

電気防食

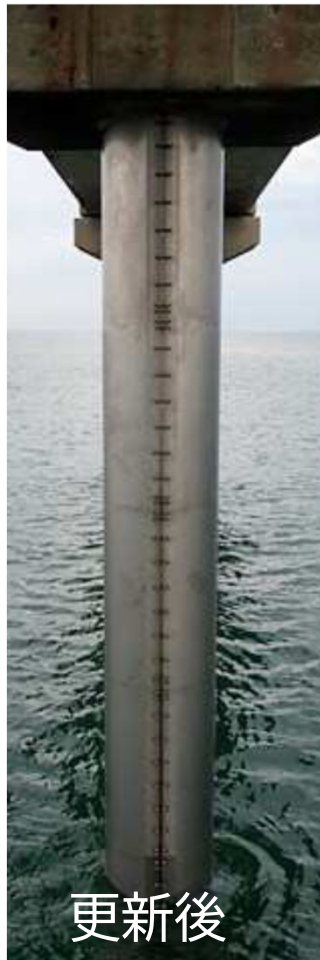
- ・流電陽極（水中溶接式）
- ・流電陽極（磁石式）



# 暴露39年経過したペトロラタム被覆の調査



更新前



更新後

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の調査

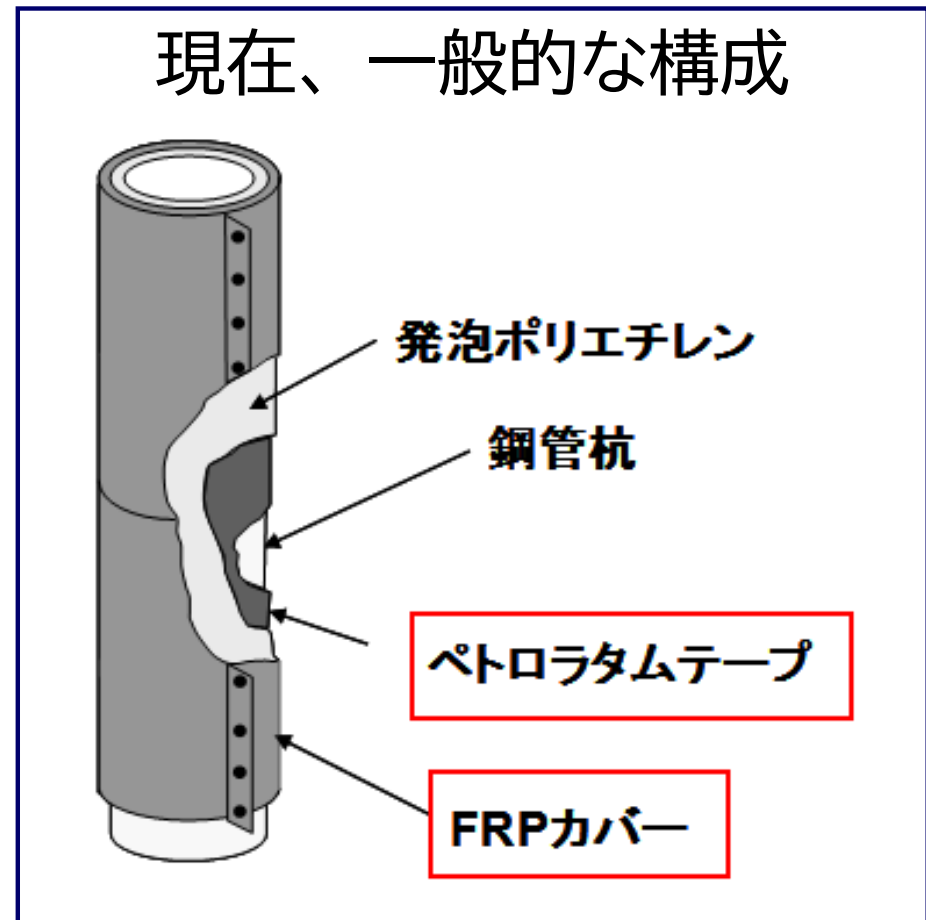
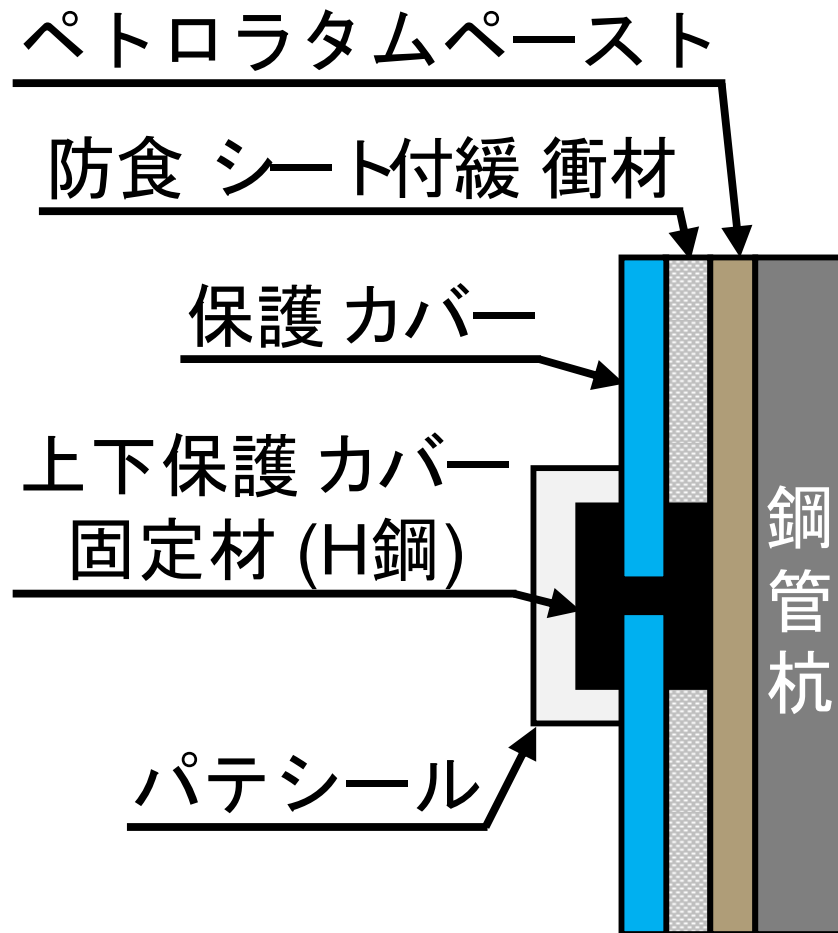
調査項目

外観調査：カバーの破損、錆汁の滲出なし

詳細調査

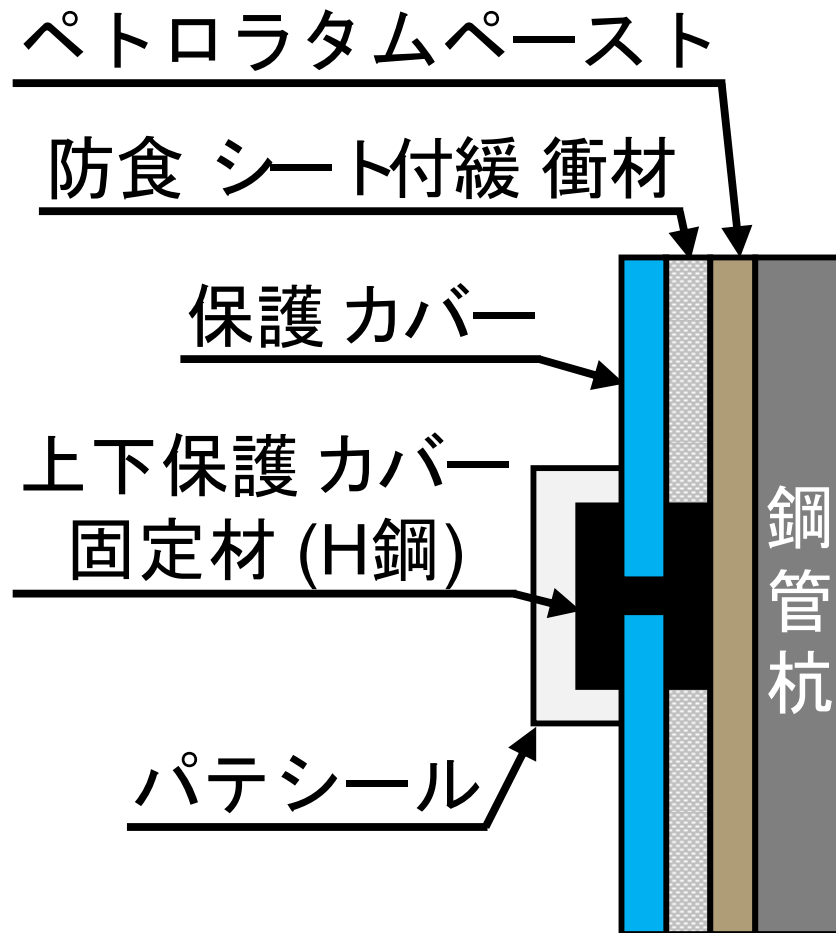
- ・カバー材の状態（強度、FT-IR、電子反射像）
- ・ペトロラタムの状態（油分残存、絶縁抵抗）
- ・被覆下鋼材の状態（外観、肉厚）

# 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

# No.24杭で適用されたペトロラタム被覆の構成



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

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



# 詳細調査：FRPカバー



## 調査項目

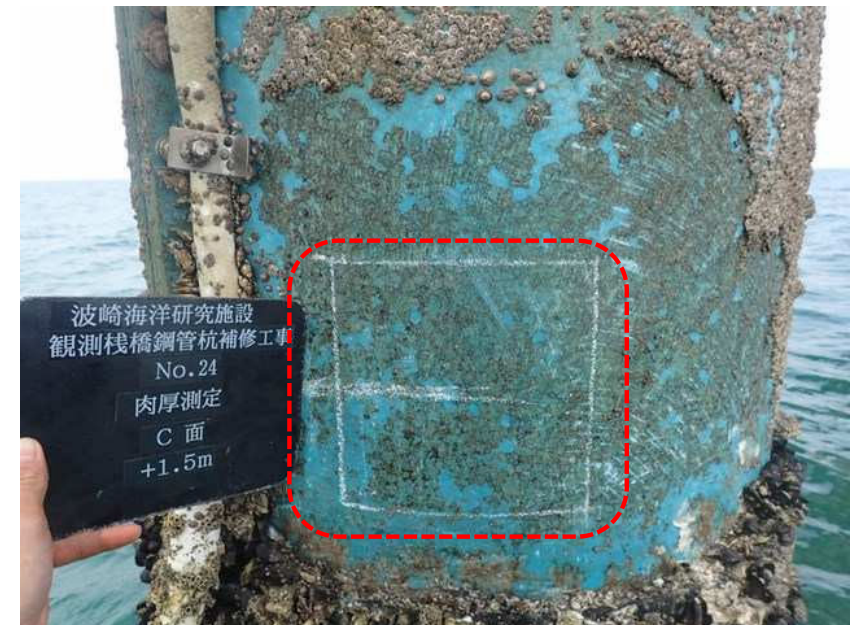
### ・ 外観観察

一部、カバー表面に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表面の摩耗)  
FRPカバーの割れ、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 <sup>2</sup>				

## カバーから試験片を採取



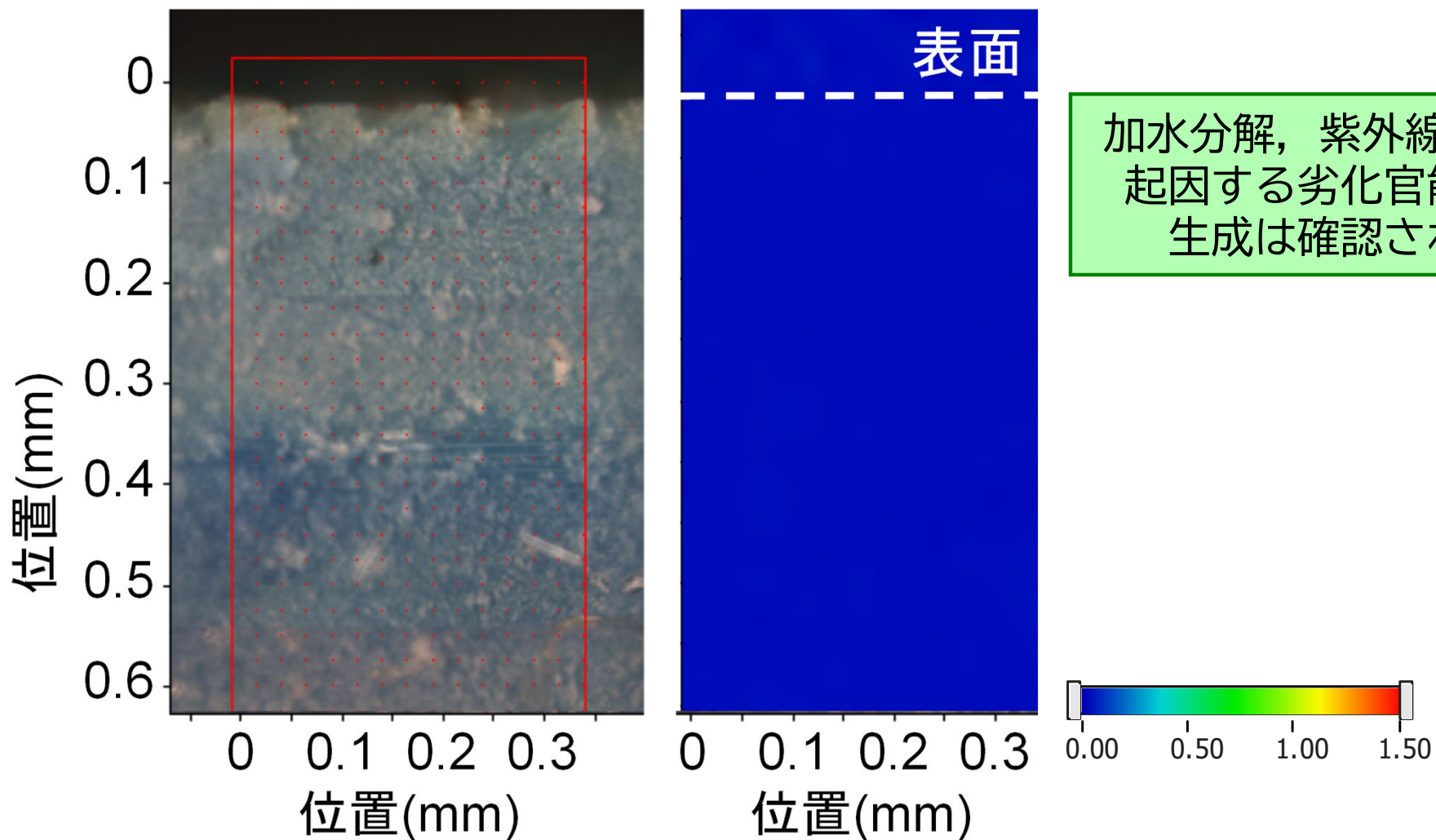
# 詳細調査：FRPカバー



## 調査項目 ・ FT-IRイメージング（中段カバー）

顕微鏡画像

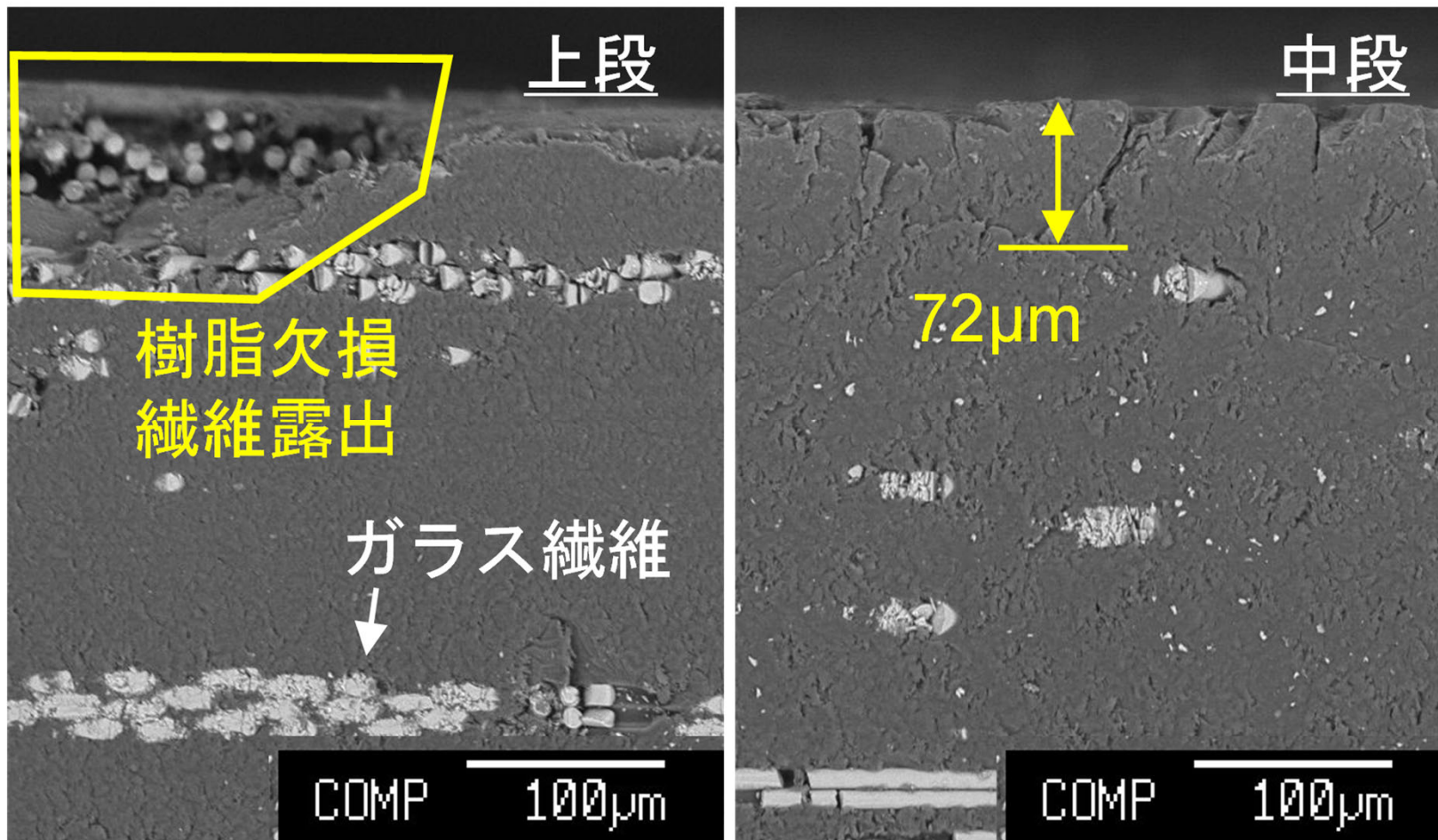
カルボン酸塩



# 詳細調査：FRPカバー



調査項目 ・ 電子反射像（上段、中段カバー）



樹脂の加水分解，紫外線劣化の影響はごく表層に限定されていた

# 詳細調査：ペトロラタムペースト



## 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

- ・ 外観
- ・ 油分残存率
- ・ 絶縁抵抗

## ペトロラタムペースト採取の様子



## ・外観観察



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）

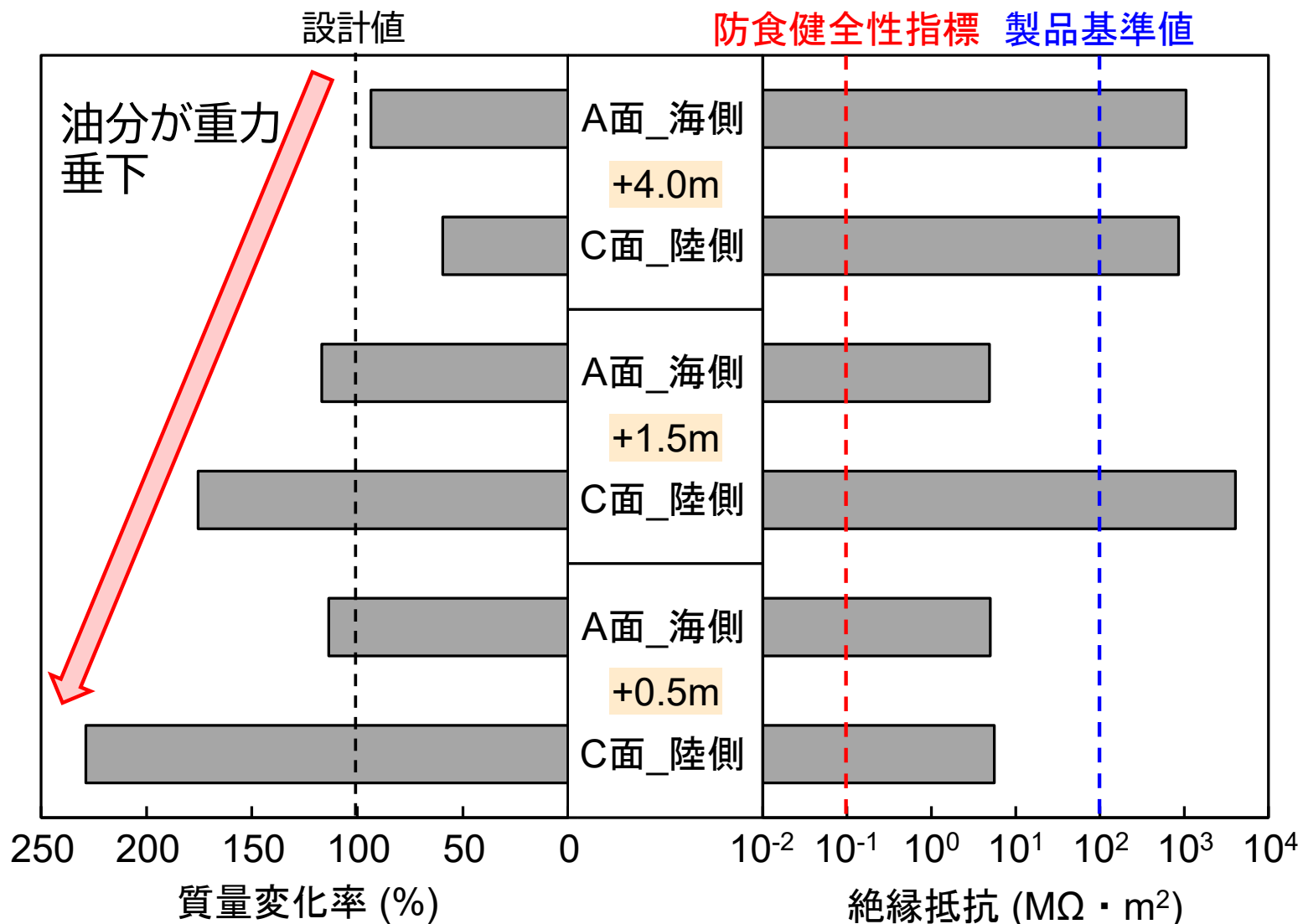
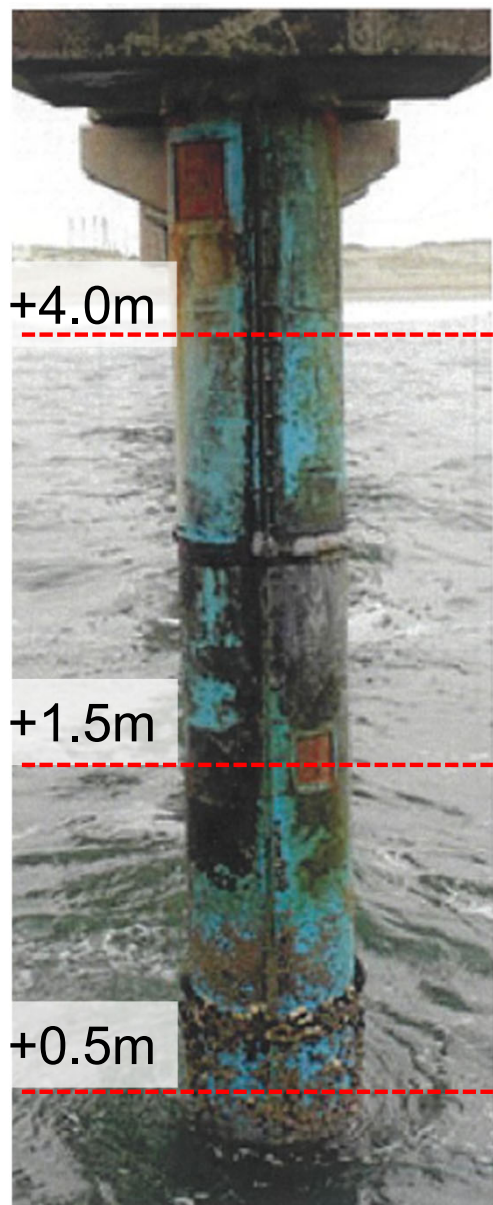
# 詳細調査：ペトロラタムペースト



## ・油分残存、絶縁抵抗

(港空研報告No.1402)

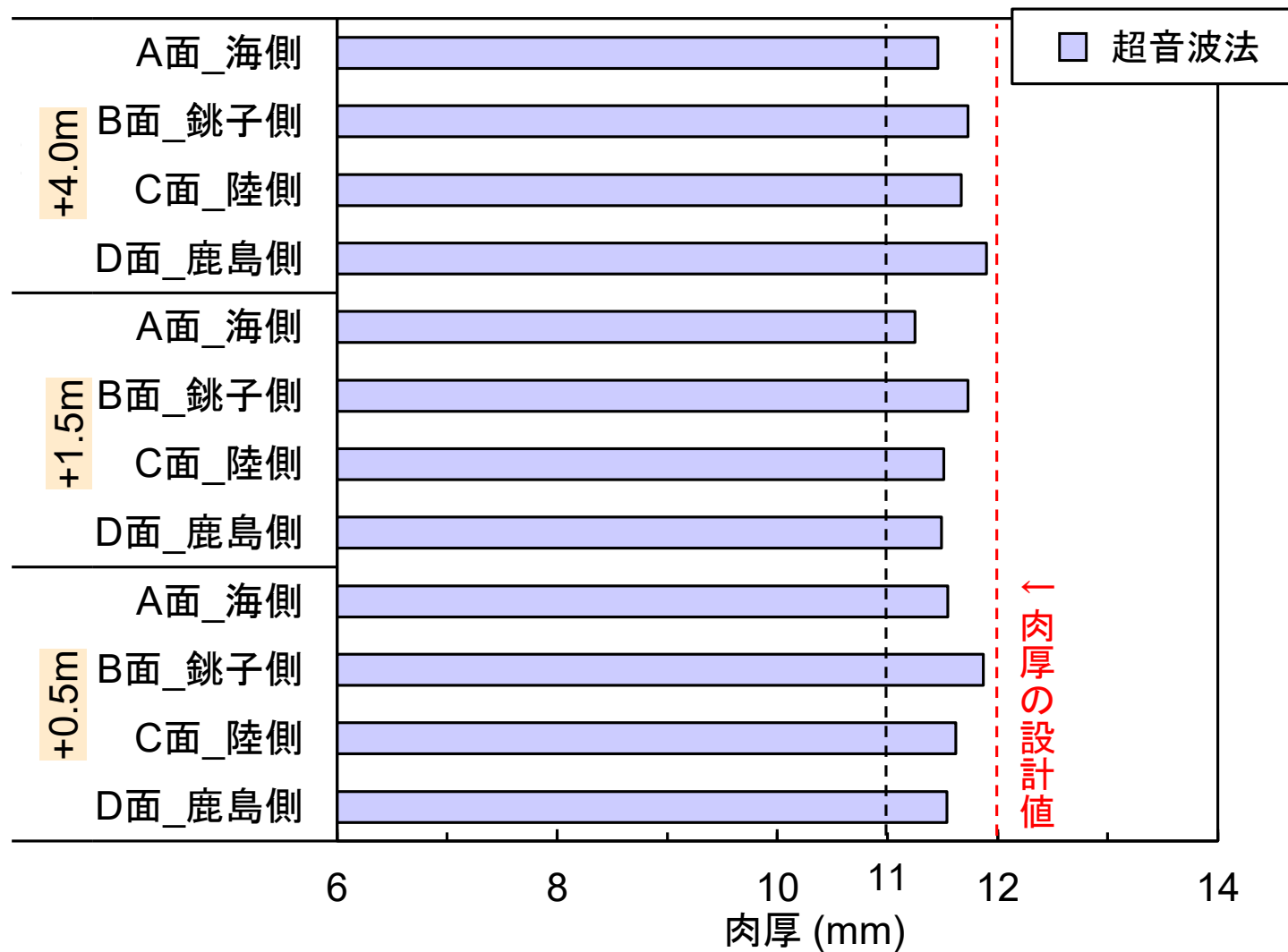
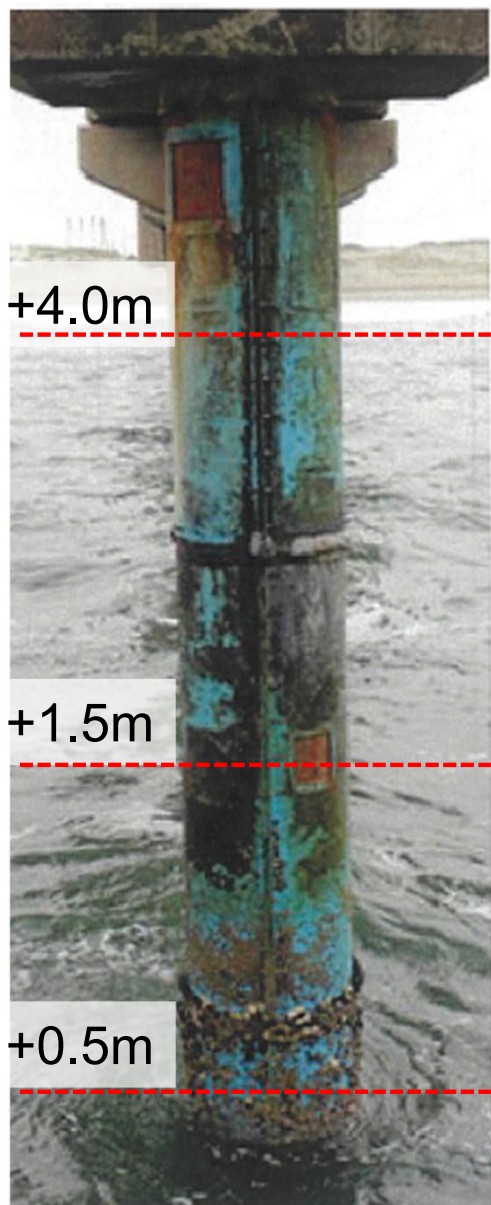
防食健全性指標 製品基準値



# 詳細調査：被覆下鋼材の状態



## ・肉厚



# 暴露39年経過したペトロラタム被覆の調査



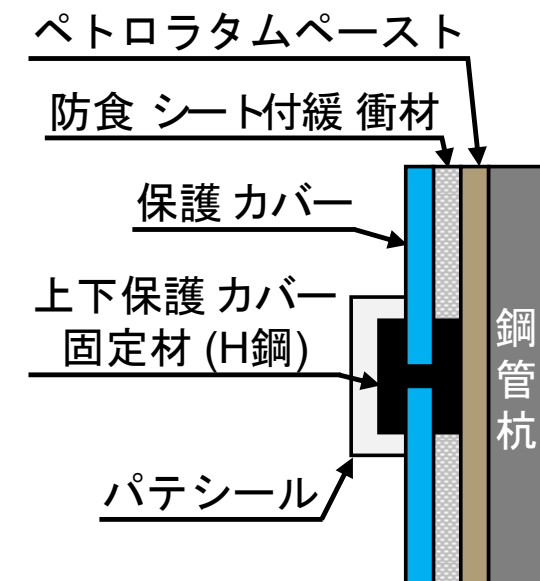
カバー端部際やカバー継ぎ部周辺のごく限定された範囲にて、水分浸透に起因すると思われるペトロラタムの白色固化と一部微さび等の変状が確認された。  
→ペトロラタム被覆の防食機能は暴露39年経過しても十分に機能していた。

ただし…

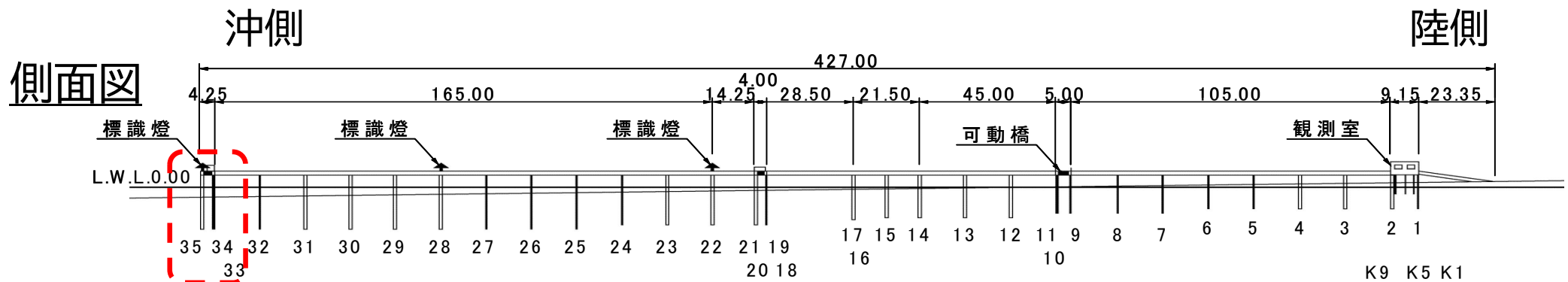
## No. 24杭の特徴

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



# 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

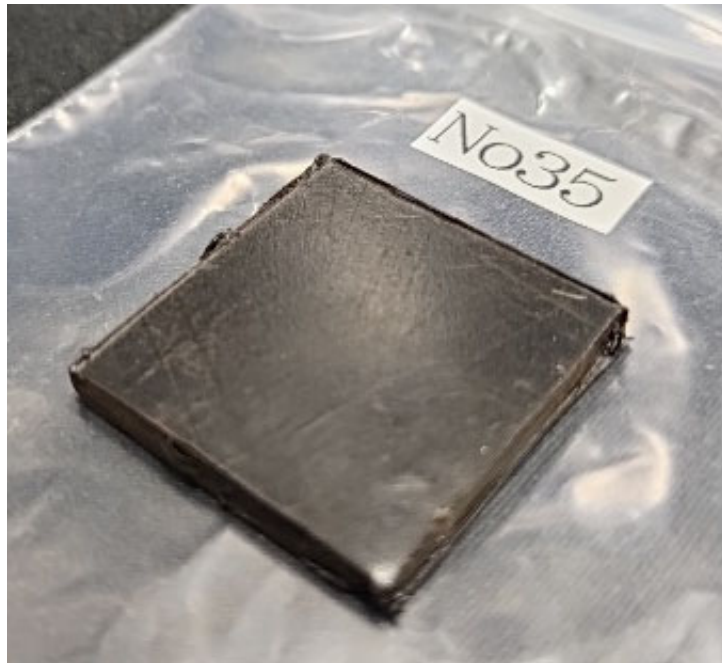
- ・ 被覆材の健全性に関する分析（体積抵抗率、FT-IR）
- ・ 被覆下鋼材の状態（肉厚）

# 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

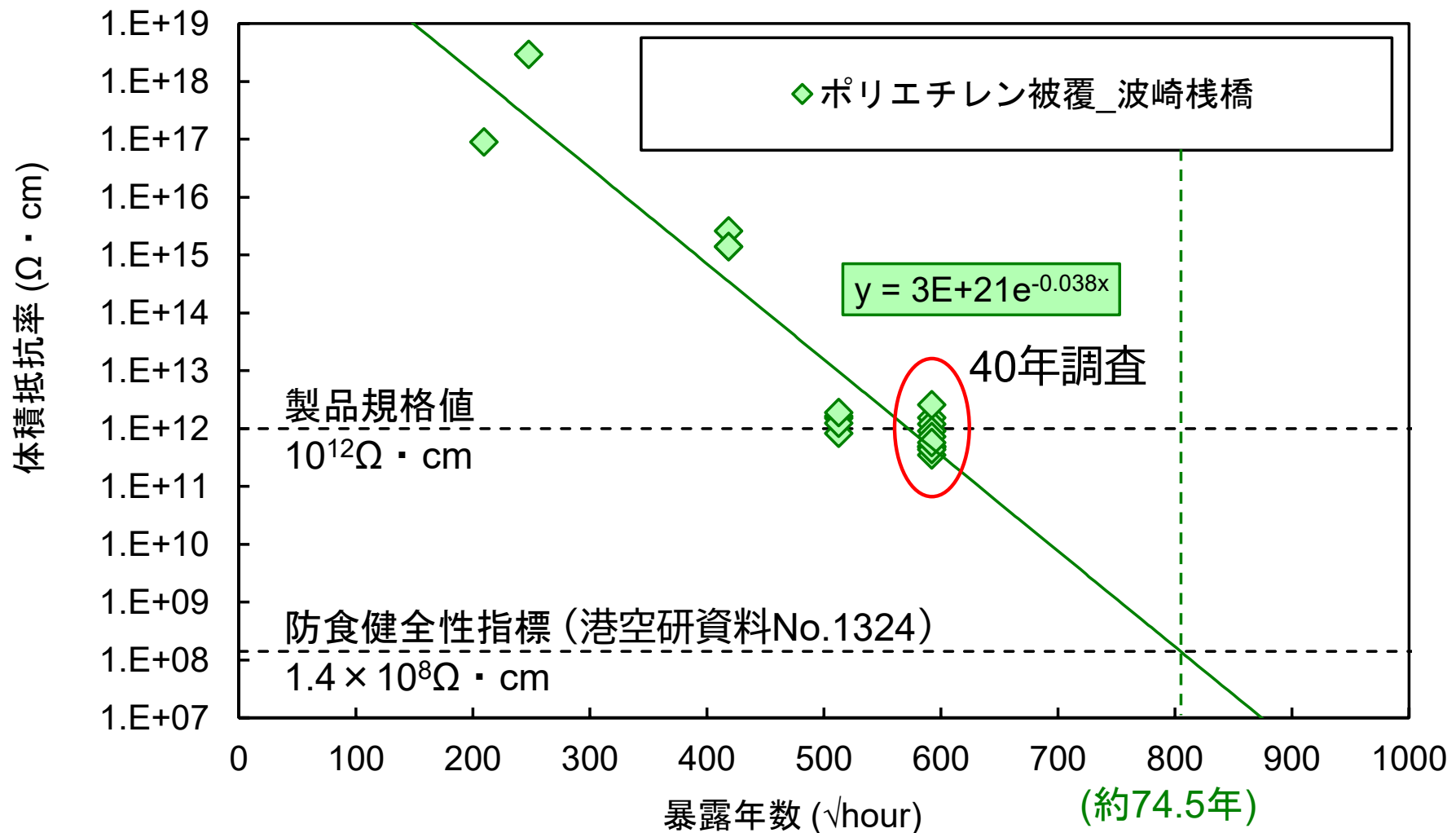
- ・紫外線による光酸化  
→ ラジカル反応による高分子結合の切断
  - ・加水分解  
→ 水との反応による高分子結合の切断
- 被覆材の弾性低下、粗化、表面の微細クラックの発生
- 劣化因子である水分や酸素の侵入が容易になる

「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

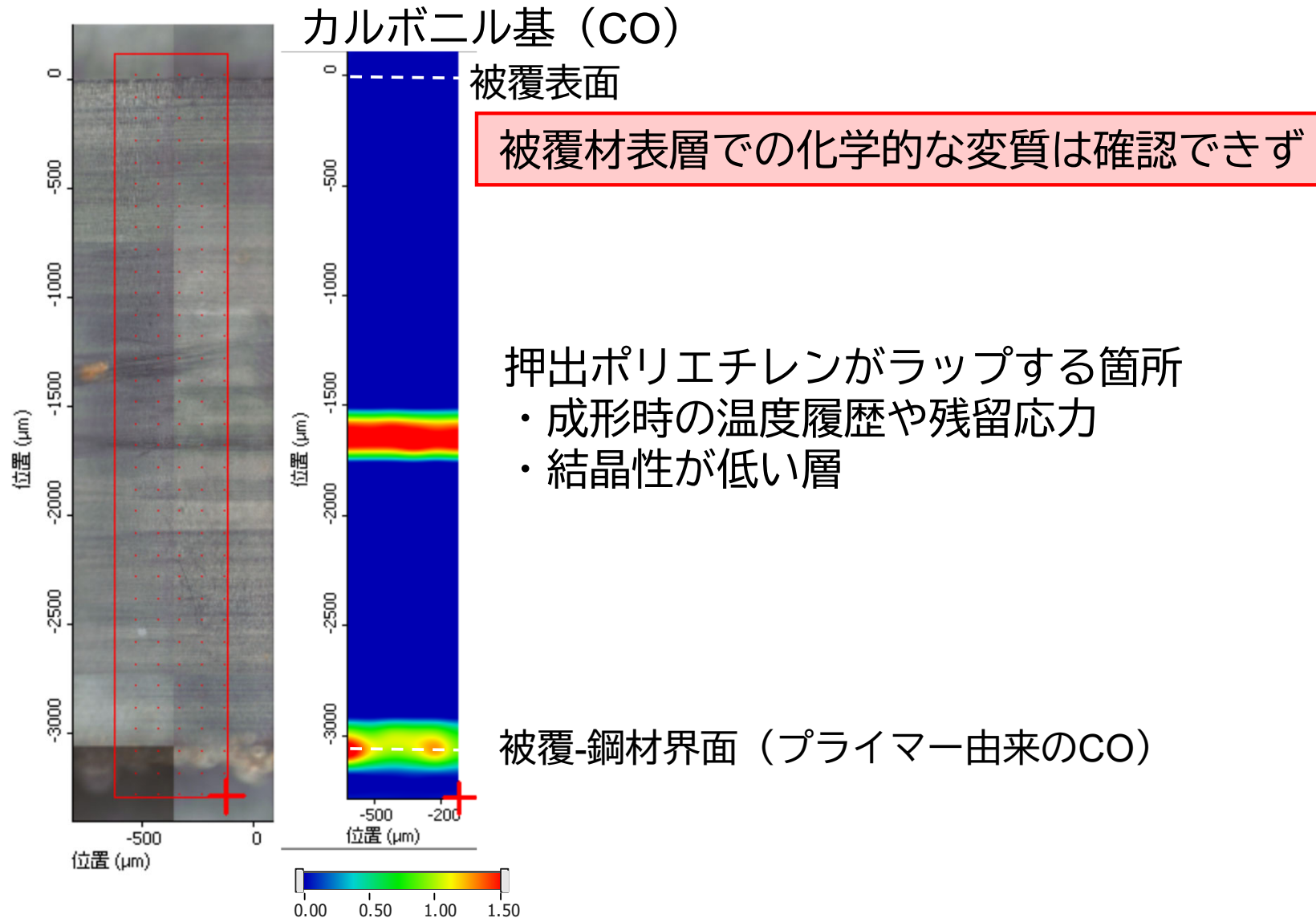


# [重防食被覆の長期の防食性能の実態把握]



## FT-IRイメージング（劣化官能基の生成状況）

ポリエチレン被覆（暴露40年）



# 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)



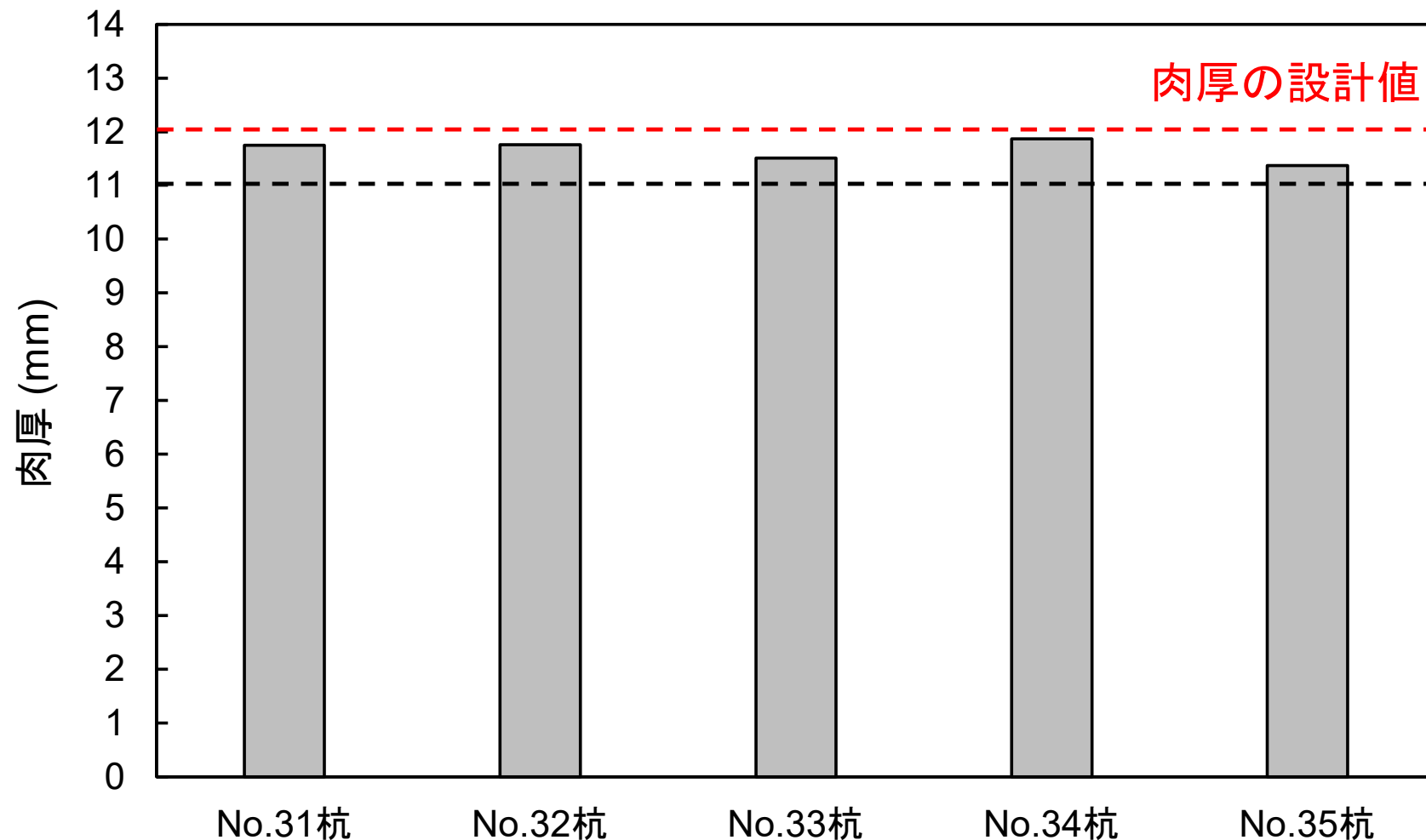
超音波厚み計により、鋼材の肉厚を測定



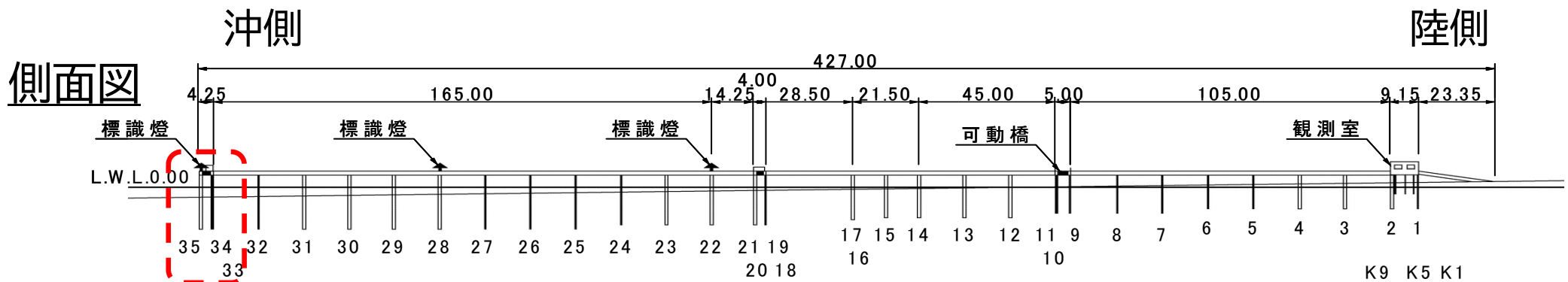
# 暴露40年経過した重防食被覆（ポリエチレン）の調査



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

# 港湾空港技術研究所での取り組み



## 各種防食工法



### 波崎観測棧橋

2025年度：試験開始41年目

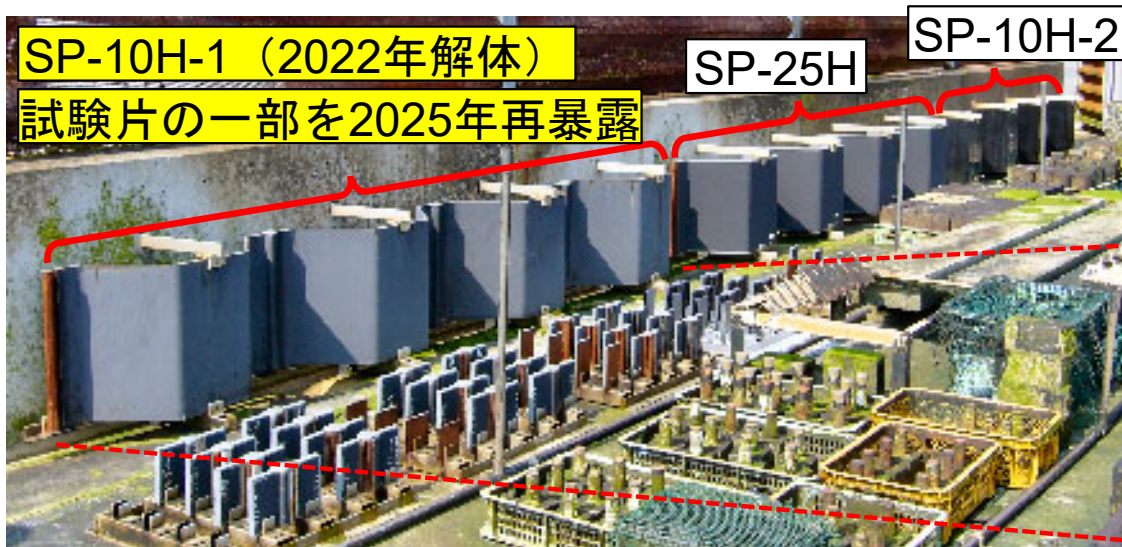
## 重防食被覆：ウレタンエラストマー被覆



港湾空港技術研究所内 長期暴露試験施設  
海水シャワー場（2025年度：試験開始17年目）

- 各種被覆被覆を適用した試験体、構造物の暴露試験・調査
  - 被覆防食の長期の防食性能の実態把握
  - 防食性能の評価指標と現場計測技術の確立
  - 将来予測法の検討

# ウレタンエラストマー被覆を適用した鋼矢板試験体の長期暴露試験



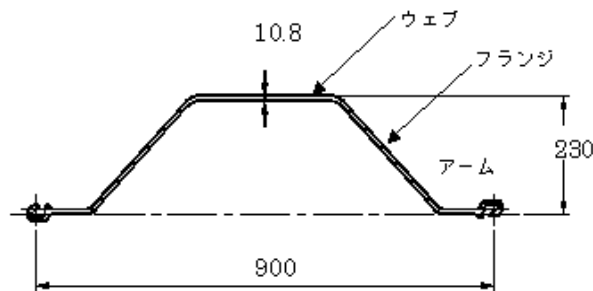
再暴露試験片



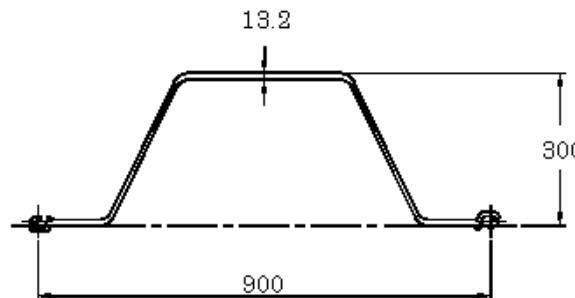
港湾空港技術研究所 海水シャワー場

## 使用したハット形鋼矢板の種類

SP-10H型



SP-25H型

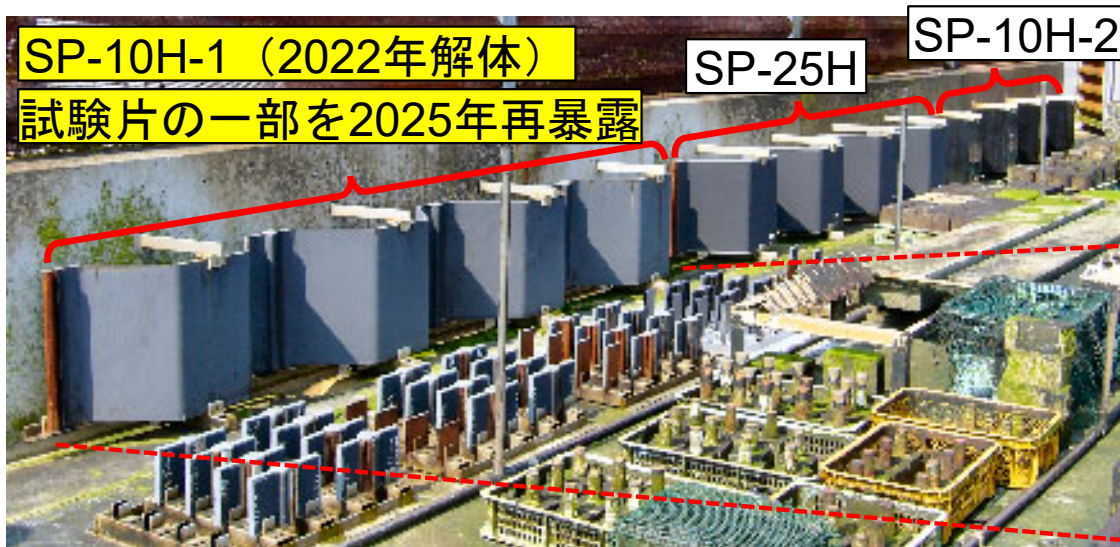


## 海水シャワー場の環境条件

久里浜湾の海水を用いて、  
約3時間のシャワー散布と約9時間の  
自然乾燥を繰り返す乾湿繰返し環境

→ 現在、暴露約17年経過  
(2025年度時点)

# ウレタンエラストマー被覆を適用した鋼矢板試験体の長期暴露試験



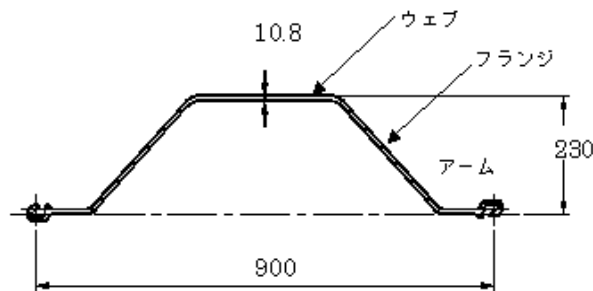
再暴露試験片



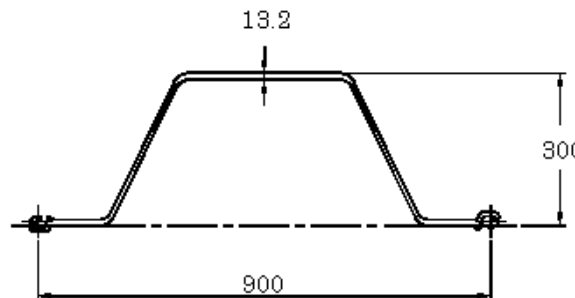
港湾空港技術研究所 海水シャワー場

## 使用したハット形鋼矢板の種類

SP-10H型



SP-25H型



## 暴露17年調査

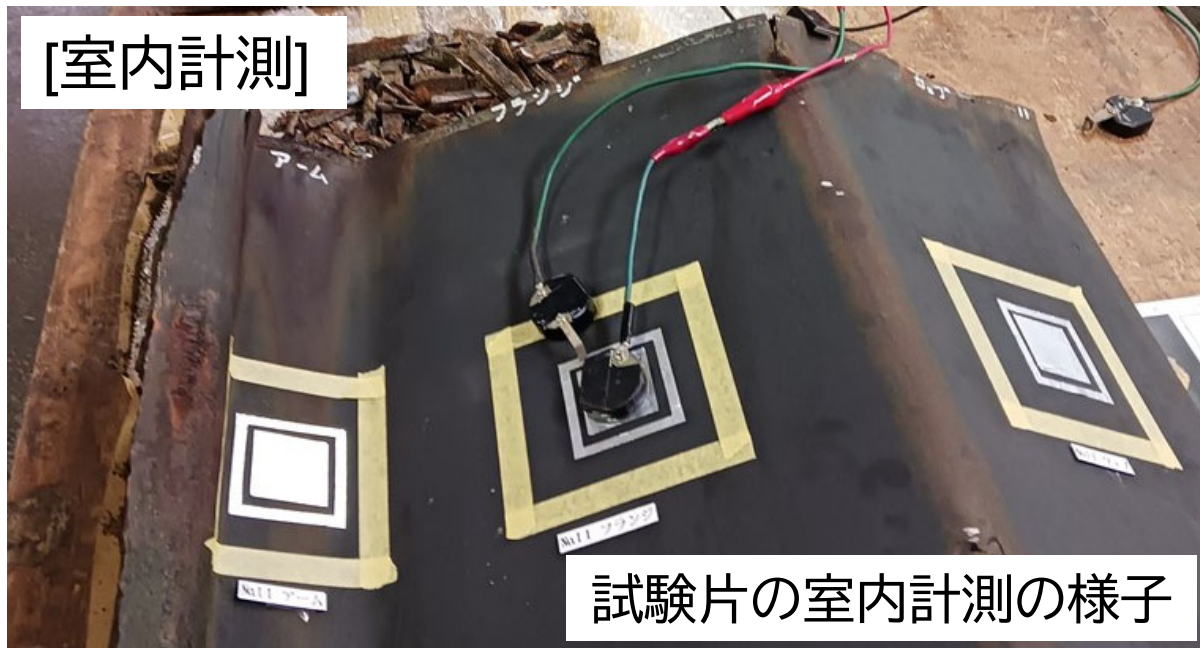
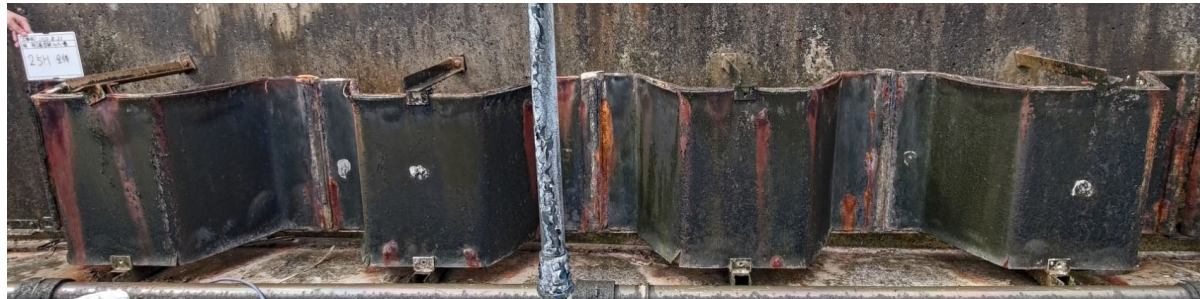
- 被覆材の健全状態の確認  
→ 体積抵抗率、FT-IR
- 被覆下鋼材の状態  
→ 肉厚

# ウレタンエラストマー被覆を適用した鋼矢板試験体の長期暴露試験



## 体積抵抗率の現場計測および室内計測

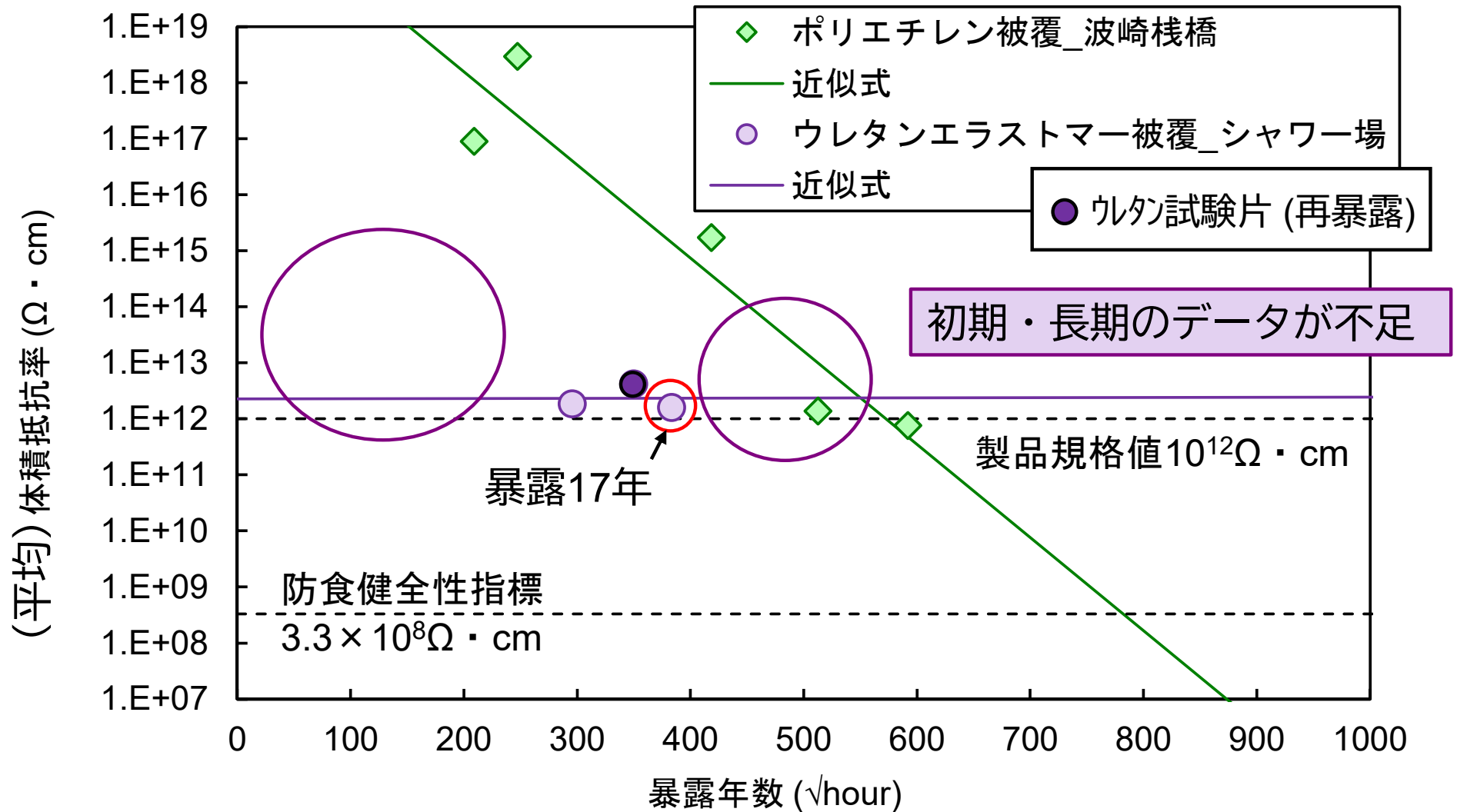
ウレタンエラストマー被覆鋼矢板  
[現場計測] SP-25H、SP-10H-2



# ウレタンエラストマー被覆を適用した鋼矢板試験体の長期暴露試験



## 体積抵抗率の経時変化

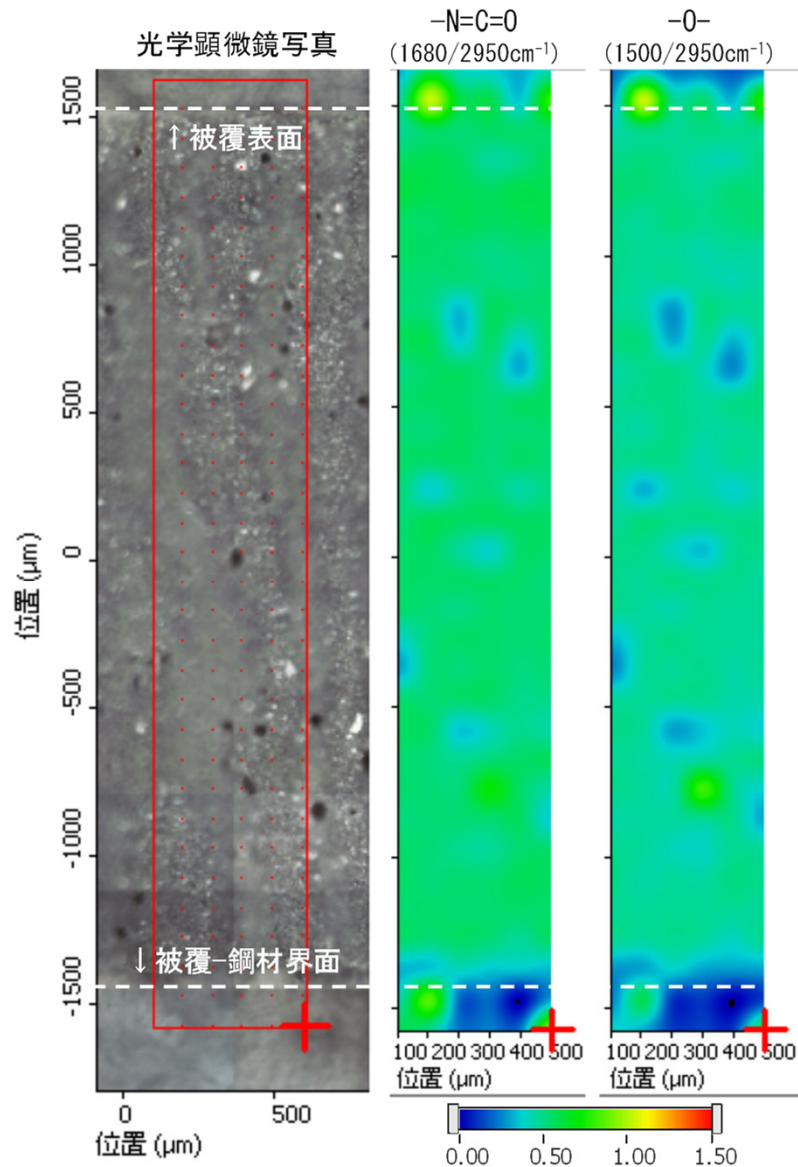


# ウレタンエラストマー被覆を適用した鋼矢板試験体の長期暴露試験



## FT-IRイメージング（劣化官能基の生成状況）

### ウレタンエラストマー被覆（暴露14年）



被覆材表層での化学的な変質は確認できず

# 各種被覆被覆を適用した試験体、構造物の暴露試験・調査



## ○ 被覆防食の長期の防食性能の実態把握

### - 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39年経過したペトロラタム被覆
- ・ 暴露40年経過した重防食被覆（ポリエチレン）  
→ 被覆材、被覆下の鋼材は健全状態を維持

### - 海水シャワー場におけるウレタンエラストマー被覆の 長期暴露試験（暴露17年目）

- 被覆材、被覆下の鋼材は健全状態を維持
- 防食性能（体積抵抗率）に関する初期、長期（20年以上）の  
データが不足している。

⇒ 暴露試験の継続、新規試験体、実構造物調査によるデータ補完

# 港湾空港技術研究所での取り組み



各種防食工法



波崎観測棧橋

2025年度：試験開始41年目

重防食被覆：ウレタンエラストマー被覆

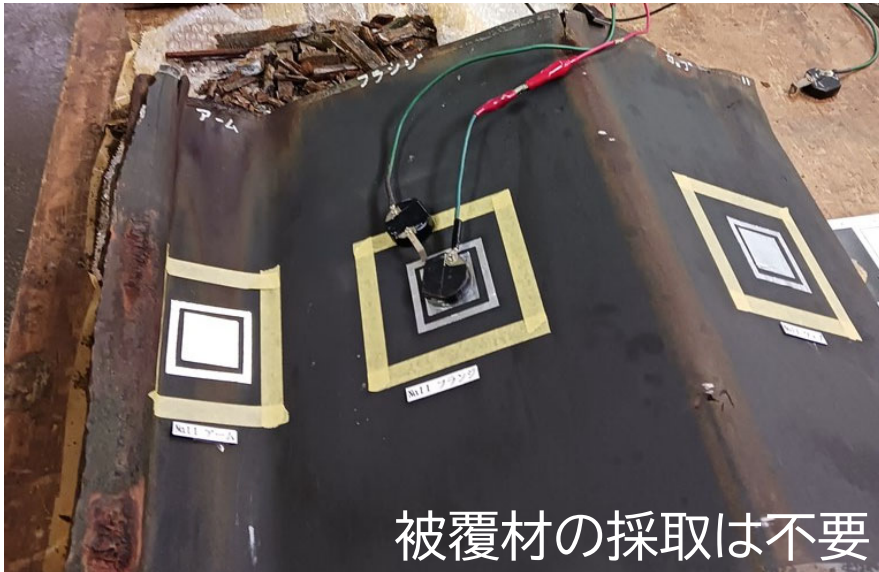


港湾空港技術研究所内 長期暴露試験施設  
海水シャワー場（2025年度：試験開始17年目）

- 各種被覆被覆を適用した試験体、構造物の暴露試験・調査
  - 被覆防食の長期の防食性能の実態把握
  - **防食性能の評価指標と現場計測技術の確立**
  - 将来予測法の検討



## 体積抵抗率の現地計測技術について



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



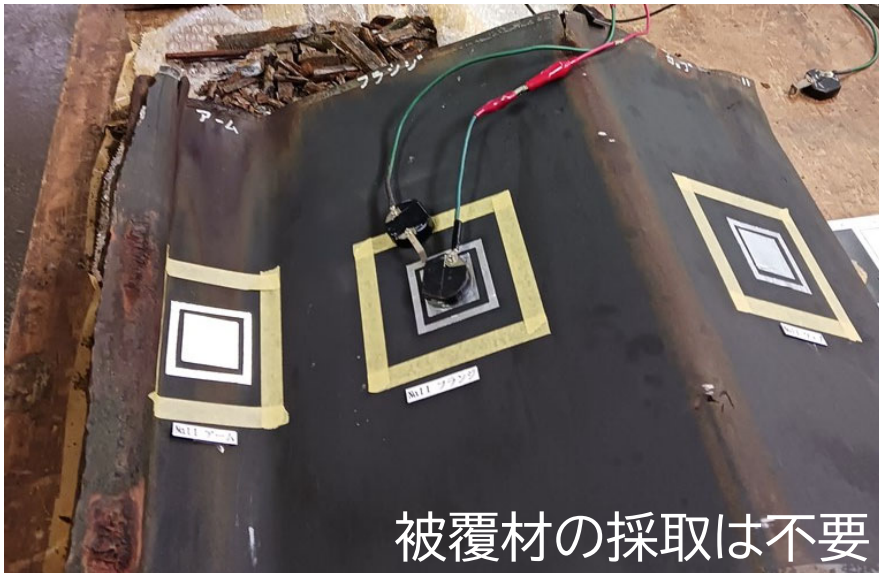
試験片であれば、“現場計測”と理想的な試験条件である“室内計測”の両方の結果を比較可能

現地計測における最適な測定条件、適用限界の見極めを行う。

# [防食性能の評価指標と現場計測技術の確立]



## 体積抵抗率の現地計測技術につ



被覆材の採取は不要

現  
体  
・  
・  
文  
被  
空



## 現地計測における被覆材の水分調整法



試験片であれば、“現場計測”と理想的な試験条件である“室内計測”の両方の結果を比較可能

現地計測における最適な測定条件、適用限界の見極めを行う。



## 被覆下の鋼材の状況に関する非破壊計測（肉厚）

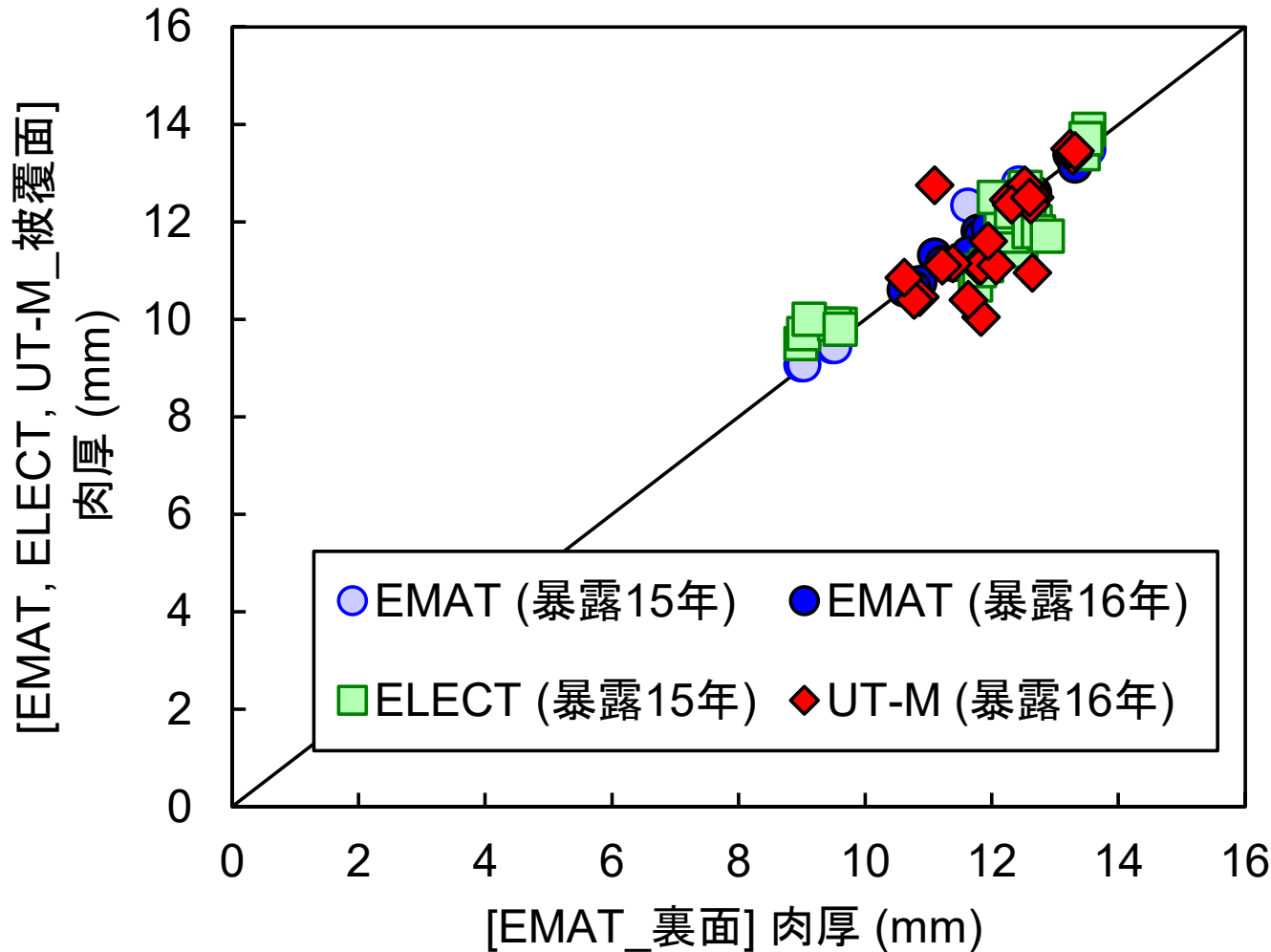
（例）被覆上から鋼材肉厚の測定が可能な機器

電磁超音波法（EMAT）	極低周波渦電流探傷法（ELECT）	超音波法（マルチエコー）
 <p>印加した磁気により鋼材表面に超音波を発生させ、超音波の往復伝搬時間から鋼材の肉厚を推定。</p> <p>長所：キャリブレーション不要 短所：測定可能リフトオフ3mm</p> <p>測定精度：<math>\pm(\text{測定} \times 1\% + 0.05\text{mm})</math></p>	 <p>未知板厚（測定対象）と基準板厚の磁気スペクトルの差異から、鋼材肉厚を推定。</p> <p>長所：水中計測可、 測定可能リフトオフ60mm 短所：基準板厚の値が必要</p> <p>測定精度：測定値の<math>\pm 5\%</math> mm</p>	 <p>超音波パルスを発振し、反射して戻ってきたエコーを受信し、反射までの時間を測定することにより、測定対象物の厚みを推定。</p> <p>長所：水中計測可、 測定可能リフトオフ20mm 短所：被覆表面との密着状態が測定に影響する</p> <p>測定精度：<math>\pm 0.05\text{mm}</math></p>



## 被覆下の鋼材の状況に関する非破壊計測（肉厚）

測定の様子



測定方式ごとに測定精度が異なるため、目的に応じて機器の選択をすると良い。