

港湾施設の点検作業のための 新技術の研究開発について

(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
新技術研究開発領域 計測・システム研究グループ
主任研究官 田中 敏成

- 背景
- 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）
- ①超音波による鋼材の非接触肉厚測定技術
 - 鋼材岸壁等の点検技術
 - 鋼材肉厚非接触式測定機の開発
 - 横浜港における測定（様子）
 - 横浜港における測定（結果）
- ②遠隔操作による栈橋上部工下面の無人点検技術
 - 栈橋下における点検作業
 - ROV試験機
 - 遠隔操作の支援機能
 - 現地実証試験
 - SIPにおける取り組み

- ③基礎杭の被災調査
 - 災害対応
 - 基礎杭調査装置
 - 常陸那（2012年1月24～25日）
 - 仙台港（2012年3月5日）
 - その他の計測事例
- おわりに



鋼矢板の穴あき



杭栈橋の床板裏劣化

供用後50年以上経過する係留施設数

	2009年度	2019年度	2029年度
老朽化施設数	約1000	約3800	約9600
総施設数に対する割合	約5%	約19%	約48%

総施設数：約2万施設

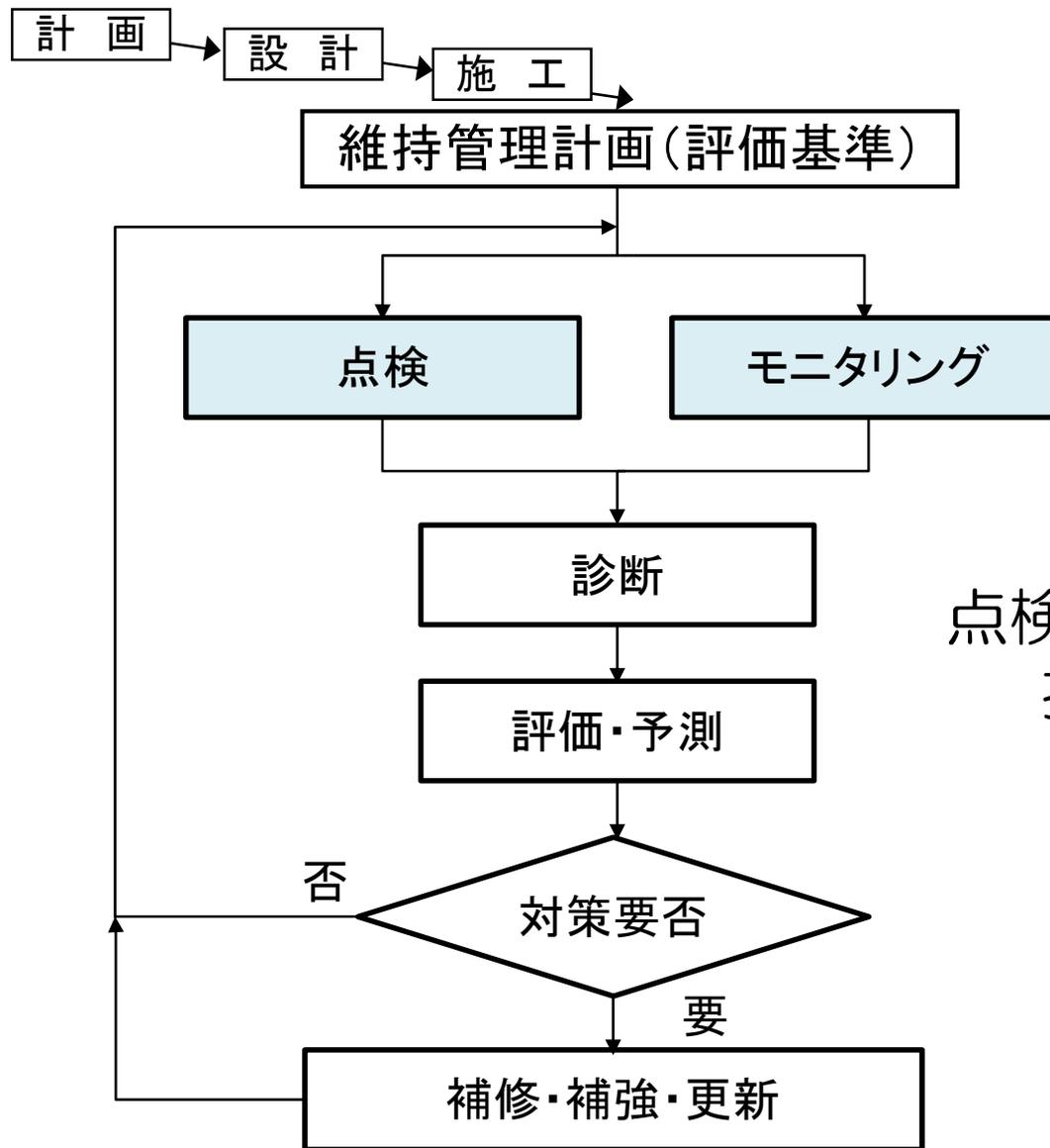
2034年度には…**約60%と推計**

(国土交通白書等より)

✓ 国内に約2万施設ある係留施設の設計供用期間は、一般的に50年

✓ 2029年に供用期間50年以上経過する係留施設数の割合は、約48%

✓ 経年により、鋼部材やコンクリート部材の劣化によって構造物の安全性が低下し、大規模な補修や撤去/更新を余儀なくされる



点検・モニタリング
技術は重要！

アセットマネジメントの流れ

SIP課題：インフラ維持管理・更新・マネジメント技術

- 重大リスクの顕在化（笹子トンネル事故など）
- 維持修繕費の急激な高まり、厳しい財政状況
- 熟練労働者の減少

事故を未然に防ぎ予防保全によるライフサイクルコストの最小化

→ **新技術（ICRT等）を活用しシステム化されたインフラマネジメントが必須**

※ICRT: Information and Communication Technology
+ Information and Robot Technology

- 維持管理のニーズとシーズのマッチング（新技術→現場へ）
- 予防保全による維持管理水準の向上を低コストで実現
- 国内重要インフラを高い維持管理水準に維持
- 魅力ある継続的な維持管理市場の創造+海外展開の礎

サブテーマ：アセットマネジメント技術

研究課題：港湾構造物のライフサイクルコストの高度化のための点検診断および性能評価に関する技術開発

(2014d-18d, 港空研[構造・材料・計測]・東工大・理科大・東亜・カハートテック)

A 港湾構造物の点検診断システムの開発

- ↳ ①点検装置（上部工目視、鋼管杭・矢板肉厚）
- ↳ ②機器・センサ選定スキーム
- ↳ ③点検診断システム

B 港湾構造物の性能評価・将来予測手法の構築

- ↳ ①鋼部材
- ↳ ②コンクリート部材

C 港湾構造物のライフサイクルコストシステムの高度化

実施内容

- ①超音波による鋼材の**非接触肉厚測定技術**
- ②遠隔操作による**栈橋上部工下面の無人点検技術**



インフラ維持管理・更新・マネジメント技術



大学等

SIP
府省庁横断的研究

インフラ維持管理
フローに必要な
5つの
研究開発
項目

4
構造材料・劣化機構・補修・補強技術



構造材料の劣化機構をシミュレーションし、構造物の劣化進展予測システムを構築

アセット
マネジメント
技術

1~4の研究成果をインフラマネジメントに
実装させながら、効率的な維持管理が
達成される仕組みや技術を開発

1
点検・
モニタリング・
診断技術

インフラの損傷度等をデータで
把握する効率的で効果的な点検、
モニタリングを実現



3
情報・
通信技術

インフラの維持管理・更新・
補修に関するビッグデータの
マネジメント技術を開発



2
ロボット技術
(点検、災害対応用等)

効率的・効果的な点検・診断等を行うロボットや
災害現場でも調査・施工可能なロボットを開発



企業



各省庁
施策

国内外のインフラへの実装

PD
Program Director



プログラムディレクター
藤野 陽三
横浜国立大学
先端科学高等研究院
上席特別教授

私たちは世界最先端のICTとIRTの
融合「ICRT」を活用した5つの技術で
課題を抱えるインフラマネジメントに
イノベーションを起こします。

①超音波による鋼材の 非接触肉厚測定技術

従来方式 接触式肉厚測定装置



特徴
●測定範囲
10mm~508mm

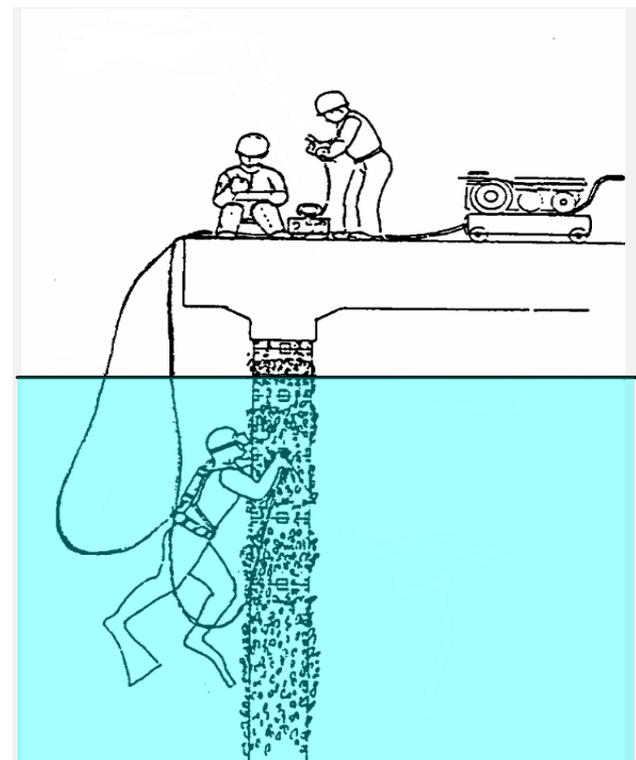
超音波厚さ計UMX-2



ケレン



サンダー



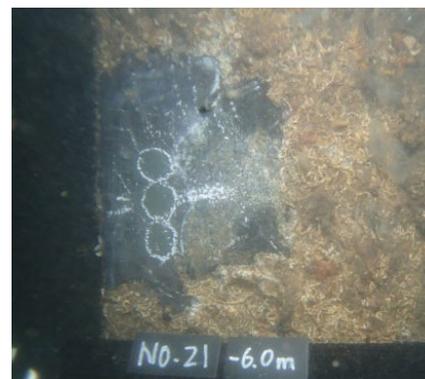
ケレン

サンダー

厚み計測

接触式計測の流れ

- ✓ 装置が簡易で計測しやすい
- ✓ 除去物の処分費用が掛かるため コストの増大
- ✓ 貝等の付着物除去や表面の研磨等の前処理に時間がかかる



N0-21 -6.0m

肉厚測定効率化を目指し、付着物除去等が不要な『非接触式肉厚測定装置』を開発

鋼材肉厚非接触式測定機とは

超音波を鋼板内に集中させ、**鋼板内での多重反射**を測定し、**非接触で肉厚を計測**する装置

開発効果

付着物を取り除く作業の**手間を省略**

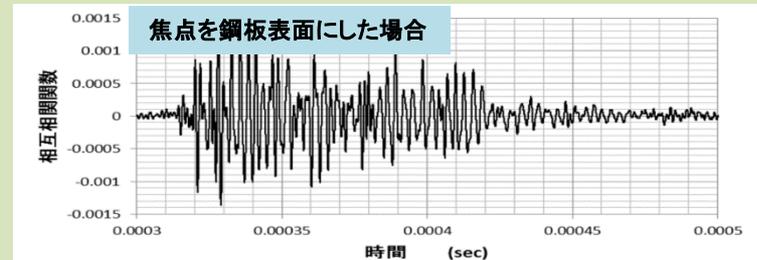
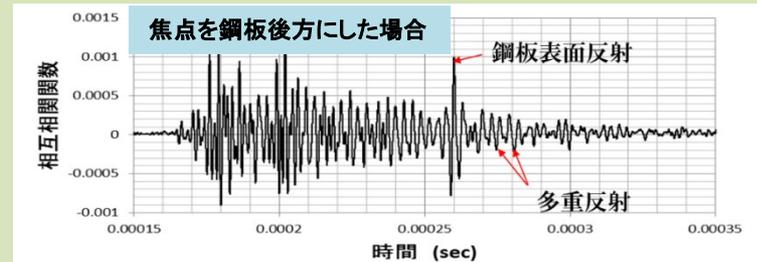
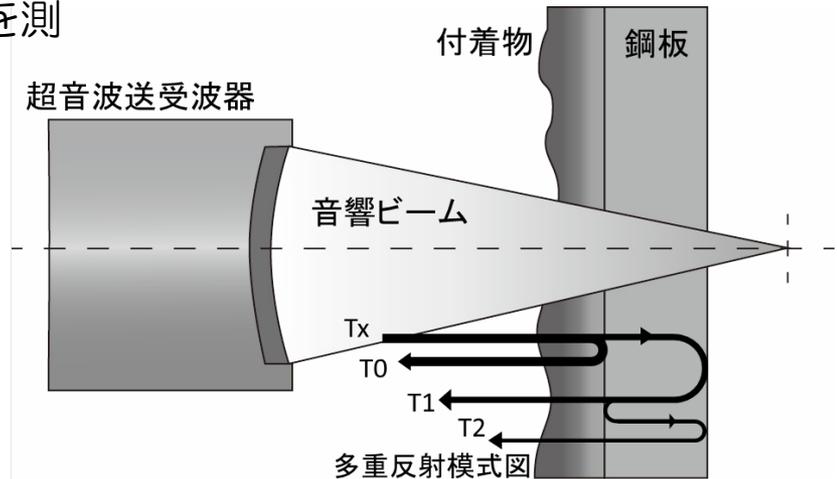
➡作業効率の向上・計測範囲の拡大・費用の減少
連続的な肉厚測定が可能

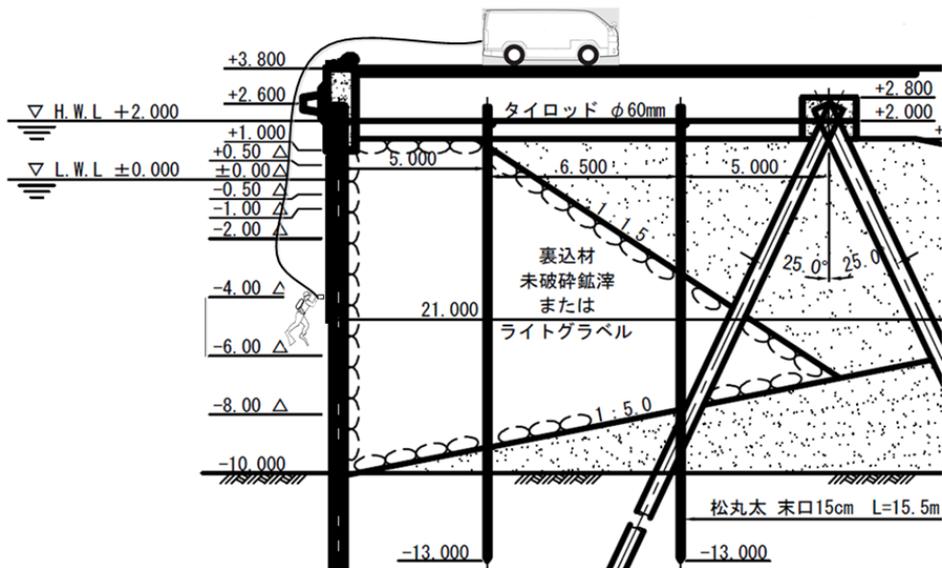
➡作業効率の向上・安全性の向上・研究への寄与
他フィールドや他産業への**技術転用**

➡橋梁・水中配管への適応

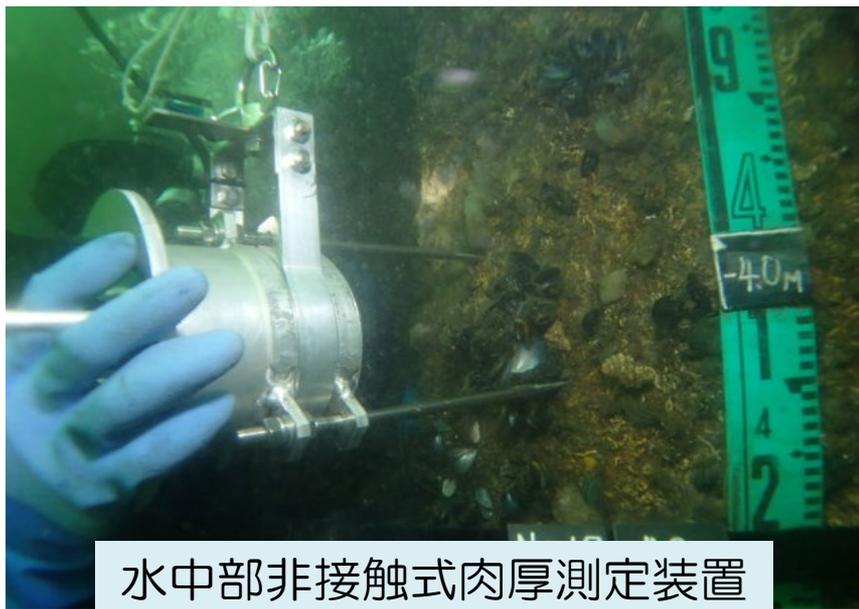
計測原理

- 送受波器に**焦点集束型音源**を使用する。
- 送受波器を、**焦点が鋼板の後方**に来る様に設置する。
- 付着物と鋼板には、**焦点と比べて弱い音**が当たる。
- 鋼板内に伝搬した超音波は、**多重反射**して距離を進み、**鋼板内で焦点**を結ぶ。
- 結果、**付着物からの反射波より、多重反射が大きくなり**肉厚測定ができる。





測定状況



水中部非接触式肉厚測定装置



陸上部非接触式肉厚測定装置(H28年度小型化)

機材投入



測定結果例

単位：(mm)

矢板No.	水深	従来方式 (A)	非接触 (B)	(A)-(B)	付着物の厚さ	付着生物の種類
16	+0.5	21.62	21.48	0.15	70	カキ、イガイ、フジツボ
	0	21.61	21.50	0.12	90	カキ、イガイ、フジツボ
	-0.5	21.63	21.25	0.38	80	カキ、イガイ、フジツボ
	-1	21.57	21.62	-0.05	70	カキ、イガイ
	-2	21.92	21.21	0.72	40	イガイ、ホヤ
	-4	21.89	21.11	0.78	40	イガイ、ホヤ
	-6	21.88	20.63	1.26	35	イガイ、ホヤ
	-7.4	22.10	22.12	-0.02	25	コケムシ

効率・コスト比較

対 象	従来		本研究で開発する点検装置	
	肉厚調査 (10m以浅)	肉厚調査 (10m以上20m以浅)	非接触式測定機 (10m以浅)	非接触式測定機 (10m以上20m以浅)
1日当りの点検数量	50点/日	50点/日	200点/日	200点/日
効 率 従来との比	—	—	4.00	4.00
費 用 従来との比	—	—	0.21	0.21

結果

コスト：約5分の1 作業効率：約4倍
従来方法との平均誤差：±5%以内

② 遠隔操作による 棧橋上部工下面の無人点検技術

人力による試み

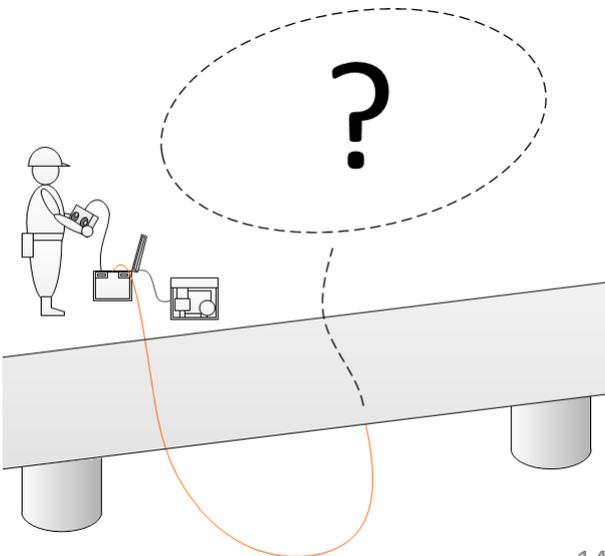
- **棧橋上部工**の一般定期点検診断
 - ↳ 棧橋上部工下面部（床版裏，はり）
 - ↳ **目視**による一次点検作業
- 小船に乗った作業員や潜水士による目視
 - ↳ **安全性**（波浪，潮位）
 - ↳ **効率性**（スクリーニング）



これまでのROV等による無人点検の試みの事例



※ROV; Remotely Operated Vehicle

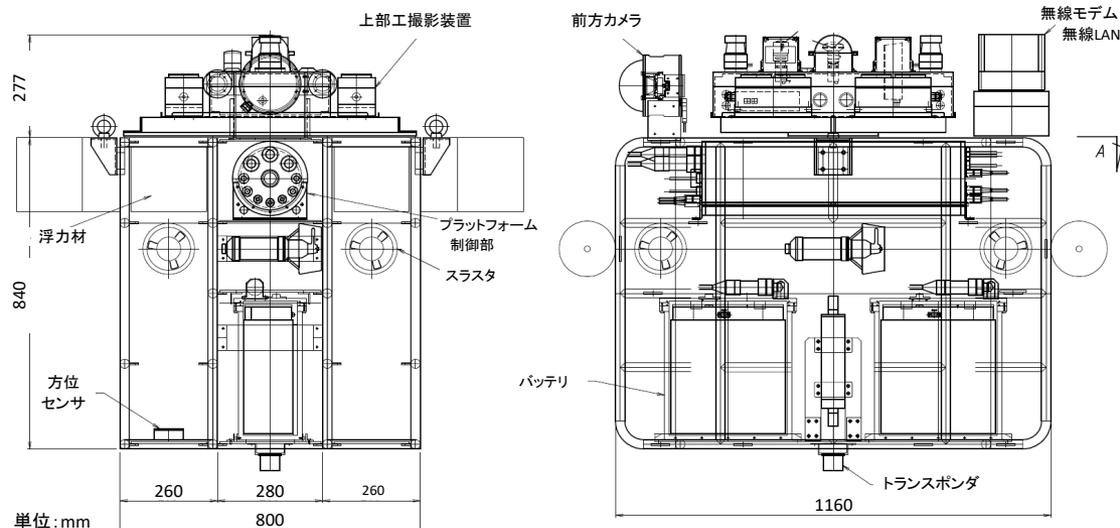
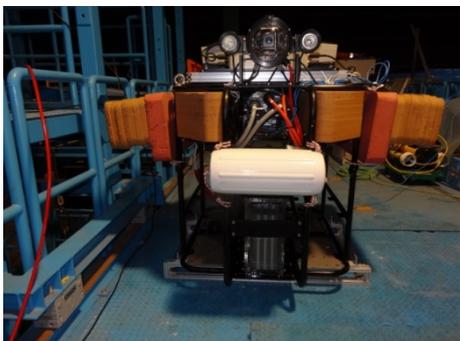


構造物下のROVの位置や運動状態を把握できていない

- 目標位置に容易に**到達できない**
- **不用意な経路選択**による索絡まりの恐れ
- 点検位置が不明で**点検情報の管理が困難**
→ 安全で確実な運用は容易でない



- (1) 棧橋上部工点検調査用ROV試験機→目視点検用画像を水中部無人で取得
- (2) 構造物下における測位と運動推定
 - ↳(a) 構造物下における測位 (測位情報の中継)
 - ↳(b) 簡易運動推定機能 (オプティカルフローを利用した運動推定機能の実装)
- (3) 点検位置情報等の管理
 - ↳付帯情報をファイル名に自動的に付記

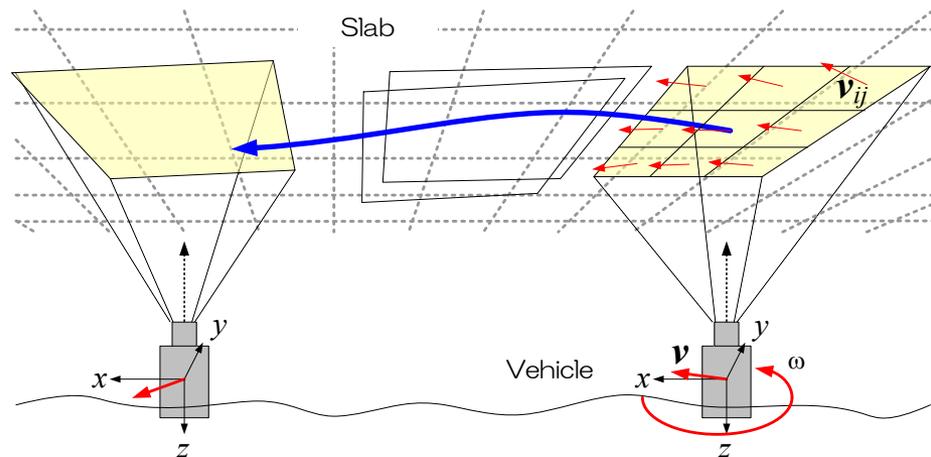
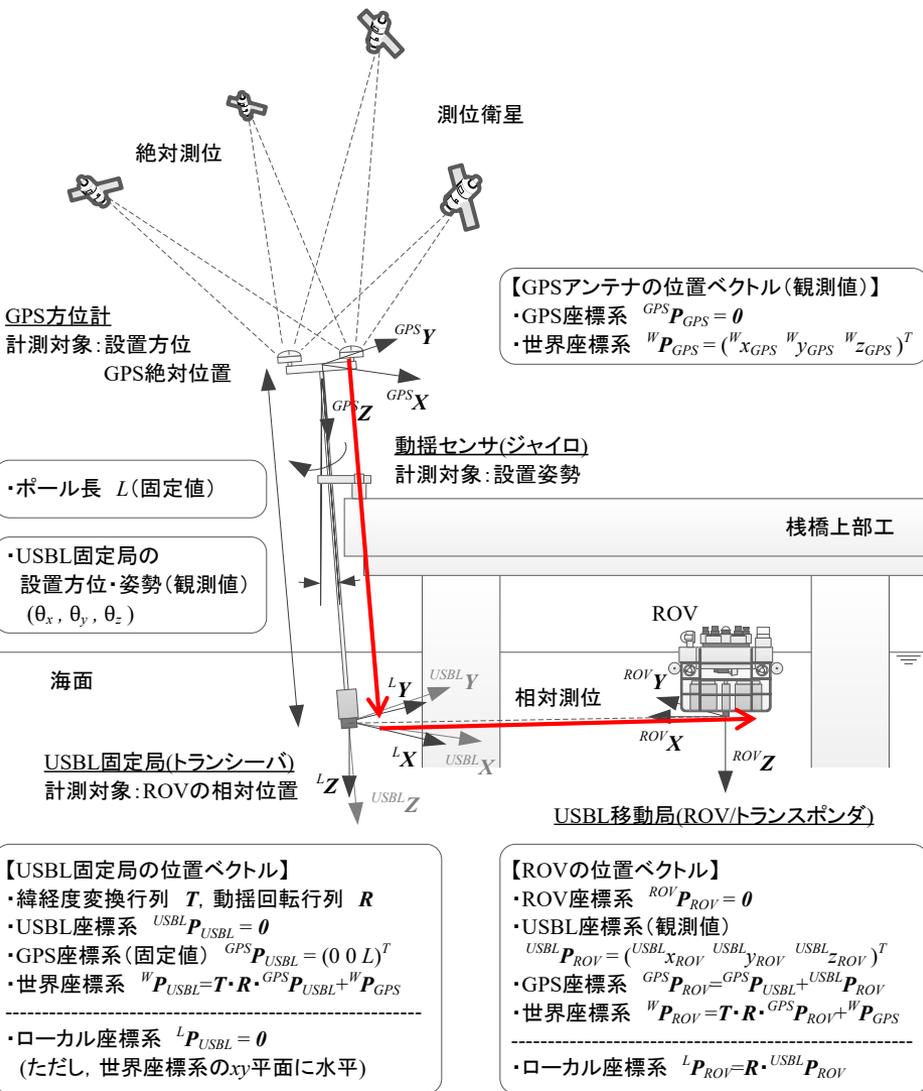


形 式	半没水型 (バッテリー駆動, 有索/無索)
推進器	前後(150W)×2基, 左右(150W)×2基
観測機能	カメラ(操縦, 上方撮影, 上方撮影超広角) LED照明(前方×2灯, 上方×8灯) 音響測位機能×1式 上方距離計×1台 レーザーマーカー×1式 LRF(測域センサ)×2台 方位計×1台 自動雲台×1台
外形寸法	L1160mm(浮体含1460mm) ×W800mm(浮体含1350mm)×H1117mm
質 量	約190kg(パラスト含む, 自動雲台含まず) 約230kg(パラストおよび自動雲台含む)

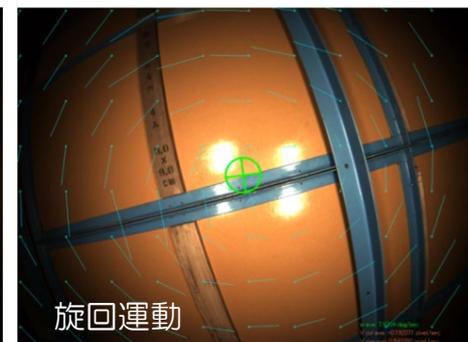
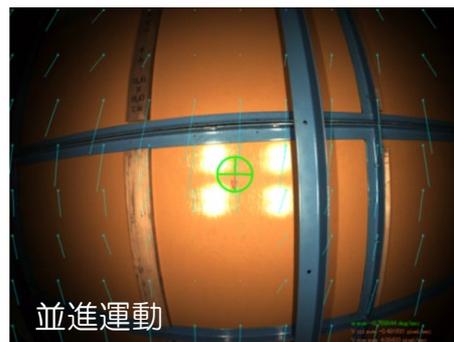
棧橋上部工点検調査用ROV試験機

(a) 構造物下における測位 (測位情報の中継)

(b) 簡易運動推定機能 (オプティカルフローを用いた運動推定)



オプティカルフローを利用した
平面内運動(並進速度, 旋回速度)の推定



オプティカルフロー(フローベクトル; 水色細線)

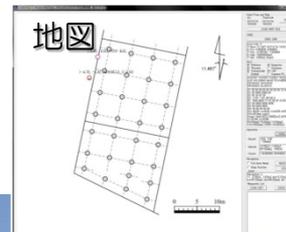


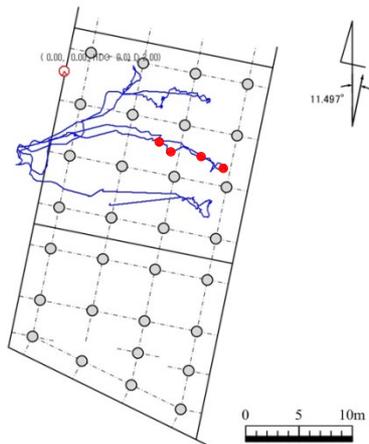
機器等の配置

GPSコンパス
(基準点の設置位置&方位)

傾斜計

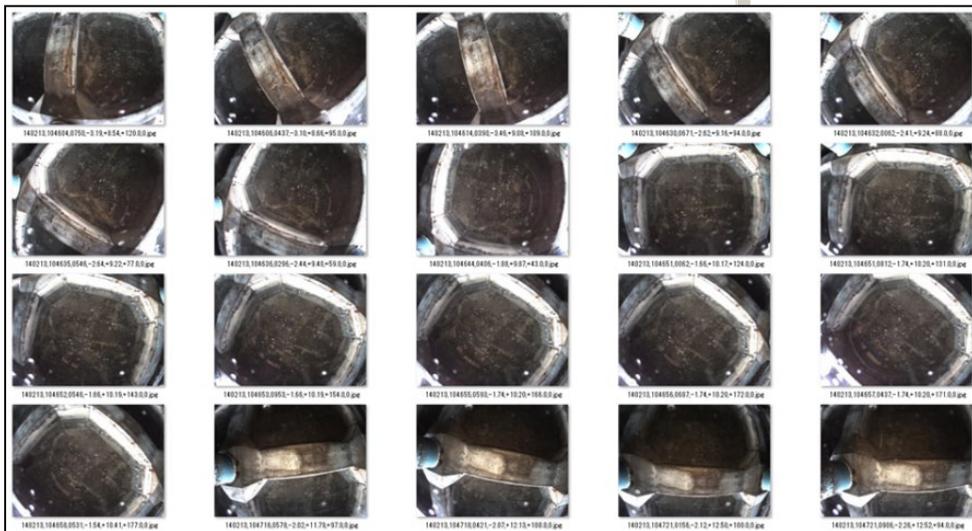
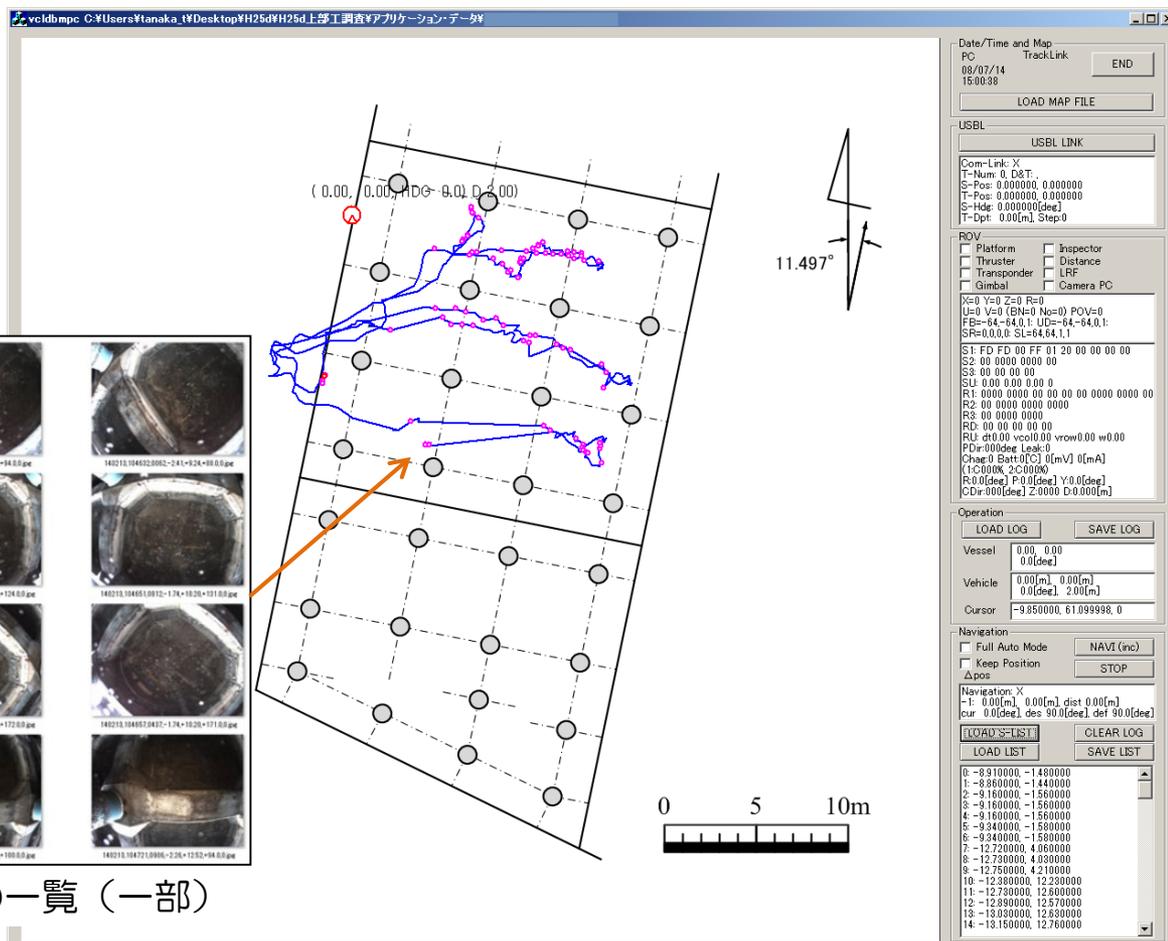
操作・制御装置





点検位置情報等の管理

- 調査経路；青線
- 撮影位置；桃点
- 19m四方1スパンの杭の内側16m四方 → 419秒



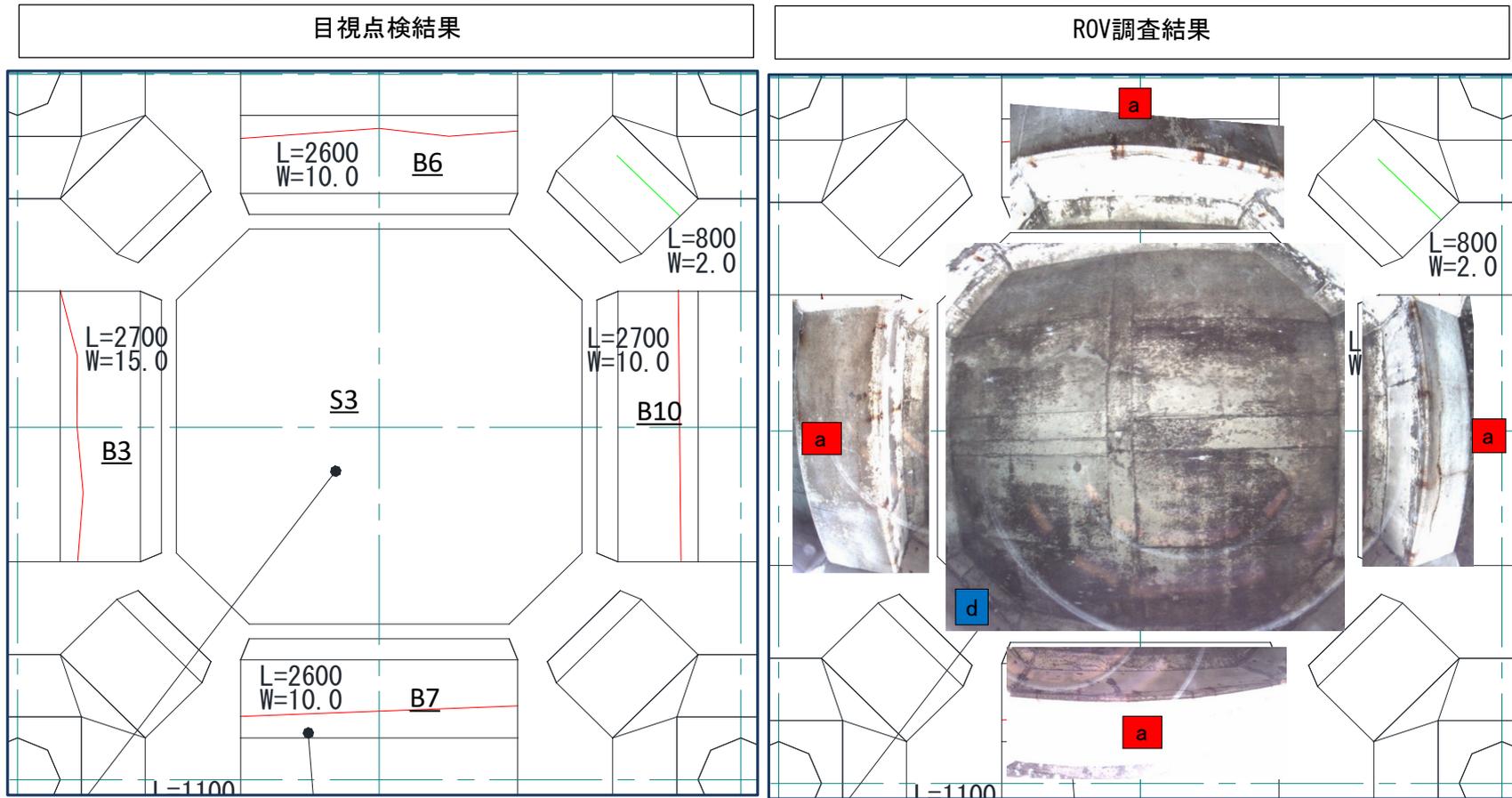
右図の桃色の点の位置で撮影された画像の一覧（一部）

調査経路（青線）と撮影位置（桃点）の管理

付帯情報の様式 [ymd],[hms],[m sec],[Pos(NS)],[Pos(EW)],[Dir(Mag)],[CameraType].jpg
 ファイル名の例 140213,104652,0546,-1.66,+10.19,+143.0,0.jpg

目視点検結果とROV調査結果の比較

「港湾の施設の維持管理マニュアル（財団法人沿岸技術研究センター，平成19年10月）」表4-1に基づく劣化度判定の試み



点検診断における劣化度の判定基準（係留施設）

劣化度	判断基準
a	部材の性能が著しく低下している状態
b	部材の性能が低下している状態
c	変状はあるが，部材の性能の低下がほとんど認められない状態
d	変状が認められない状態

劣化 ↑

※ 港湾の施設の点検診断ガイドライン
【第2部 実施要領】（国土交通省港湾局）

(1) 上部工撮影装置の改良

	PARI従来型	PARI改良型
カメラ種別	GigEカメラ	DSLR
カメラ解像度	2590×1942	6016×4016
5m四方撮影時の抽出可能な最小ひび割れ幅(1画素の1/2程度)	1.28mm	0.62mm
撮影位置情報の記録	非GPS位置情報を独自型式でファイル名に記録	非GPS測位情報をジオタグ(GPS IFD)に変換して記録
寸法, 質量	L650xW580xH222, 25kg	L600xW580xH385, 20kg



改良型主要機器

- ・カメラ制御用PC×1 (リアルタイムLAN変換器)
- ・カメラ×2
- ・照明 LED×8
- ・ストロボ×1
- ・マーカー×2
- ・距離計×1
- ・LRF×2
- ・磁気方位計×1
- ・方位ジャイロ×1

(2) GPS利用不可の環境での撮影位置の管理手法の改善

- ・非GPS位置情報をNMEA 0183準拠に変換してカメラへ供し, 写真内のExif GPS IFDタグに記録 → 撮影写真データへの位置情報の埋め込み

- **Exif (Exchangeable image-file format)**
JEIDA(現JEITA)が規格化した画像ファイルフォーマット。撮影条件や著作権情報などをメタデータとして含み, 撮影位置情報 (GPS IFDタグ) がジオタグとして機能。
- **NMEA 0183**
米国海洋電子機器協会により規定・管理される海上電子装置 (ジャイロ, 自動操舵装置, GPS等) のデータ仕様。
- **メタデータ**
データに付される属性等の付帯情報。
- **ジオタグ**
写真データ等に付される位置に関する付帯情報の総称。

入力例：LQF7フォーマット (音響測位出力形式)
出力例：NMEA01837フォーマット (カメラ受信可能形式)

地図上での表示

```

IMPORT PORT DATA
File: L651/20/15.14.15.00;35.10.00000;13940.0000;35.13.74126;13943.27164;115.7.2.5

EXPORT PORT DATA
COM1: $PGRG:WGS:0011
COM2: $PGRG:WGS:0000;N.000000000;E.105.0.0.2.5;M.0.0;A.*5E
COM3: $PCPRNC:14.1600.00;A.35.13.74126;N.13943.27164;E.0.000.000.000;15;A*60
COM4:
COM5:
COM6:
COM7:
COM8:
  
```

(3) 操作支援・測位支援用の基本ソフトウェア開発

- ・外乱および錯綜構造物環境下における衝突回避支援
- ・USBL音響測位に代わる**新しい非GPS測位技術**

測位

- LRF (Laser Range Finder, 測域センサ) で取得した反射点データからランドマークを検出
- 地図との照合を連続的に実施
- 自機の移動に伴って測位基準点や方位推定補助点をシームレスに切り替え
- 位置と方位の推定処理を継続

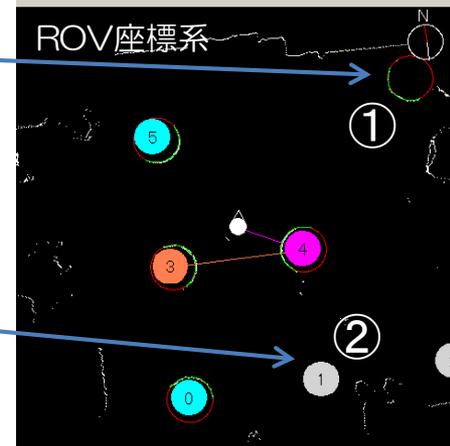
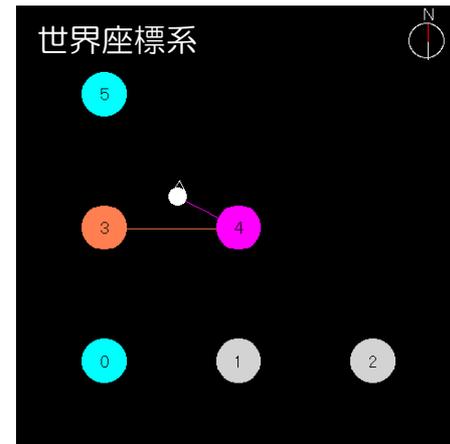
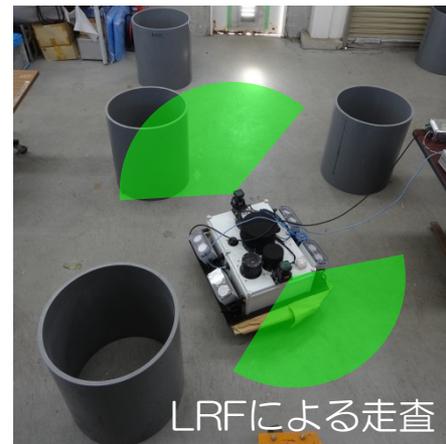
耐外乱性

- ① 検出されても地図上に存在せず照合できない杭
→ 測位には利用しない
- ② 地図上には存在するが検出できない杭
→ 内部的には未検出杭と同様の扱い
→ 異常な検出結果が照合や測位に影響を及ぼさないことを確認

特徴

- 地図と異なる杭配置の混在環境下でも測位可能
- 地図と矛盾した検出結果を積極的に利用してランドマーク単位での地図の更新が可能
→ 測位と地図生成 (更新) が同時に可能なSLAM的手法

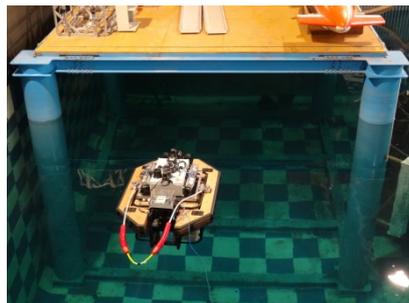
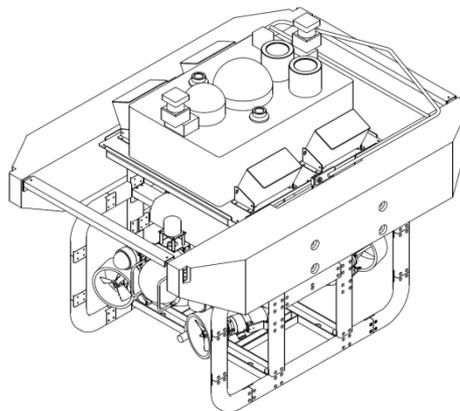
※SLAM: Simultaneous Location And Mapping



- ▲ 自機
- 照合杭(測位基準点)
- 照合杭(方位推定補助点)
- 照合杭
- 未照合杭
- 検出物

(4) 新しい点検プラットフォームの開発

- 増設のタフェース → 各種機器の増設可
- 外部PC接続機能 → 制御機能の追加可
- 小型・軽量 → 港空研従来型比で約1/2 (約80kg)
⇒ 上部工撮影装置を搭載し、改良型 (SIP型) 棧橋上部工調査用ROVを構築 ('16d予定)



カメラ	操縦用×1 (GigEカメラ) 調査用×2 (デジタル一眼レフ, GigEカメラ)
最大速度	1.5kt程度 (ひし形配置スラスタ×4)
寸法, 質量	L1200xW900xH971, 80kg+バラスト

棧橋上部工点調査用ROV (SIP型カメラ+'13d型ビークル)

SIP型棧橋上部工点調査用ROV (SIP型カメラ+SIP型ビークル)

(5) 現場実証試験

- 研究開発成果の実証
- 課題の整理
- 運用手順等の組立
- 能力の算出, 作業単価の試算 ('13d型→SIP型で更新予定)

作業単価の試算	従来方法		港空研従来型ROV	SIP型ROV
	対 象	海上 (船外機)	海上 (潜水土)	海上 (ROV)
1日当たりの点検数量	1240m ² /日	1200m ² /日	1800m ² /日	更新予定
効 率 従来との比	—	—	海上 (船外機) : 1.45 海上 (潜水土) : 1.50	
費 用 従来との比	—	—	海上 (船外機) : 1.09 海上 (潜水土) : 0.40	
1施設当りの点検日数	4.8日	5.0日	3.3日	

※1施設6,000m²(幅20m×延長300m)を点検した場合

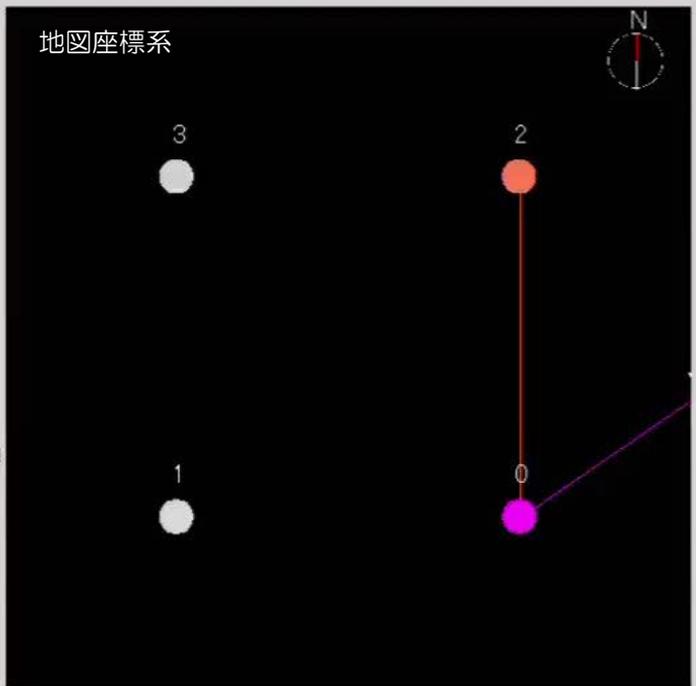
※結果の整理作業は含まない

装置構成

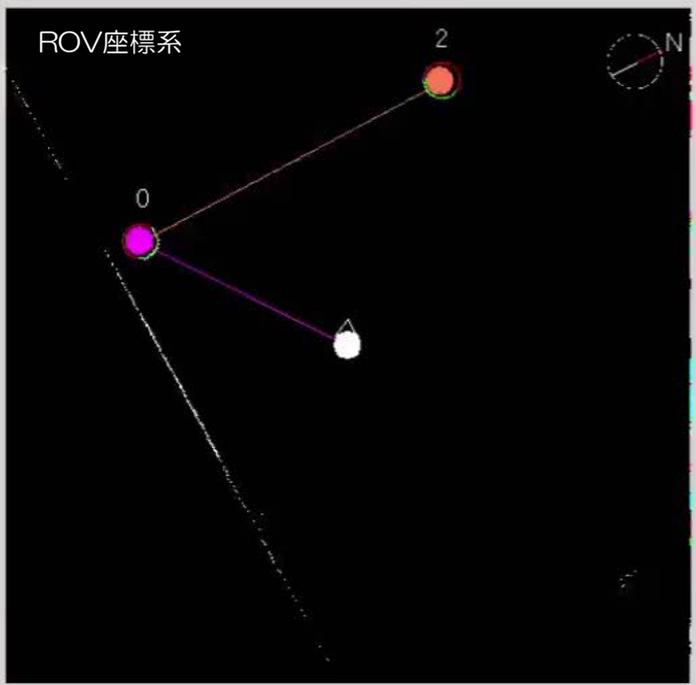
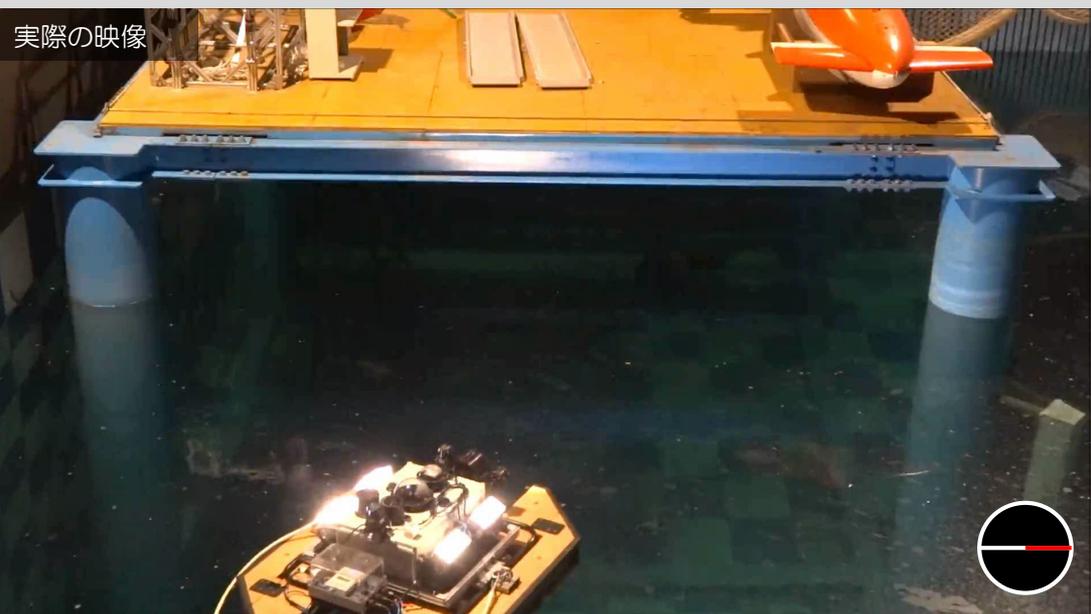
上部工撮影装置 (SIP型)
ROV部 (港空研従来型)



x1/100 -
x1/10 -
x1
x10 -

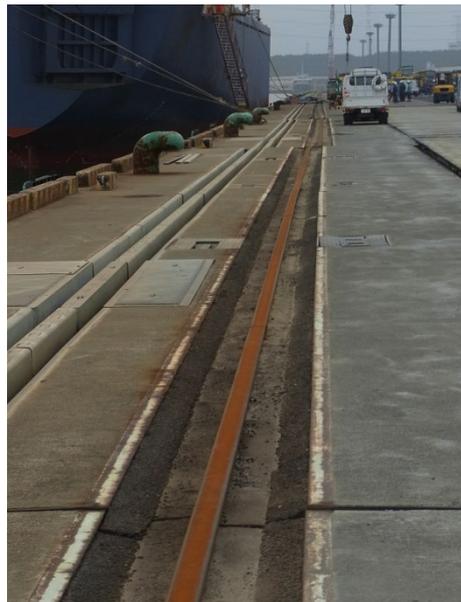


実際の映像

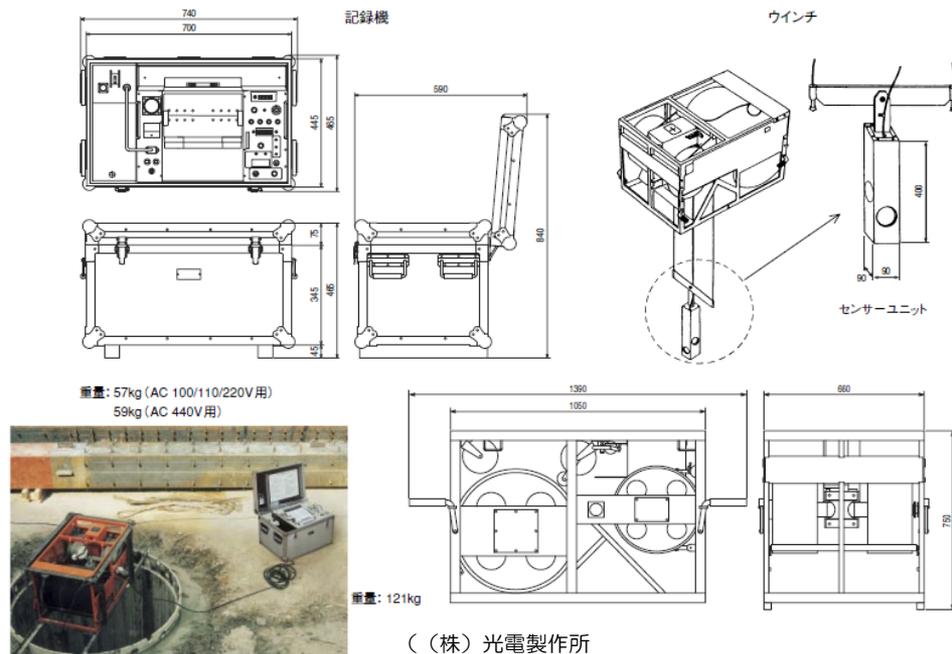


③基礎杭の被災状況調査

2011年3月11日 東北地方太平洋沖地震
常陸那珂港の荷役岸壁が被災（レール直下の基礎杭）

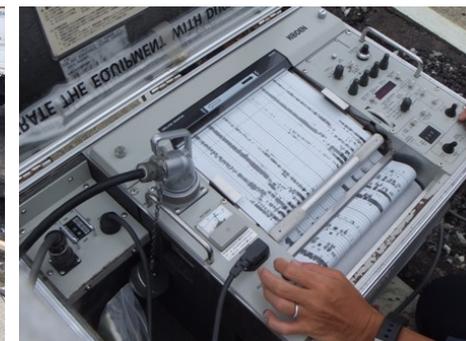


②超音波式側壁測定装置



掘削孔の上にセットされたウインチ(左)
ケーブル接続された記録機(右)

被災杭の計測試行

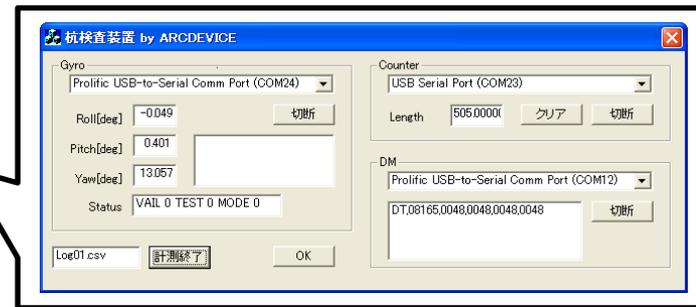
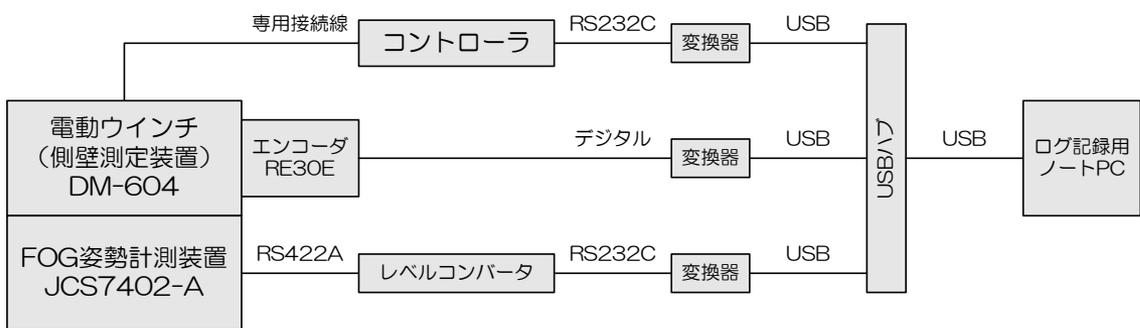
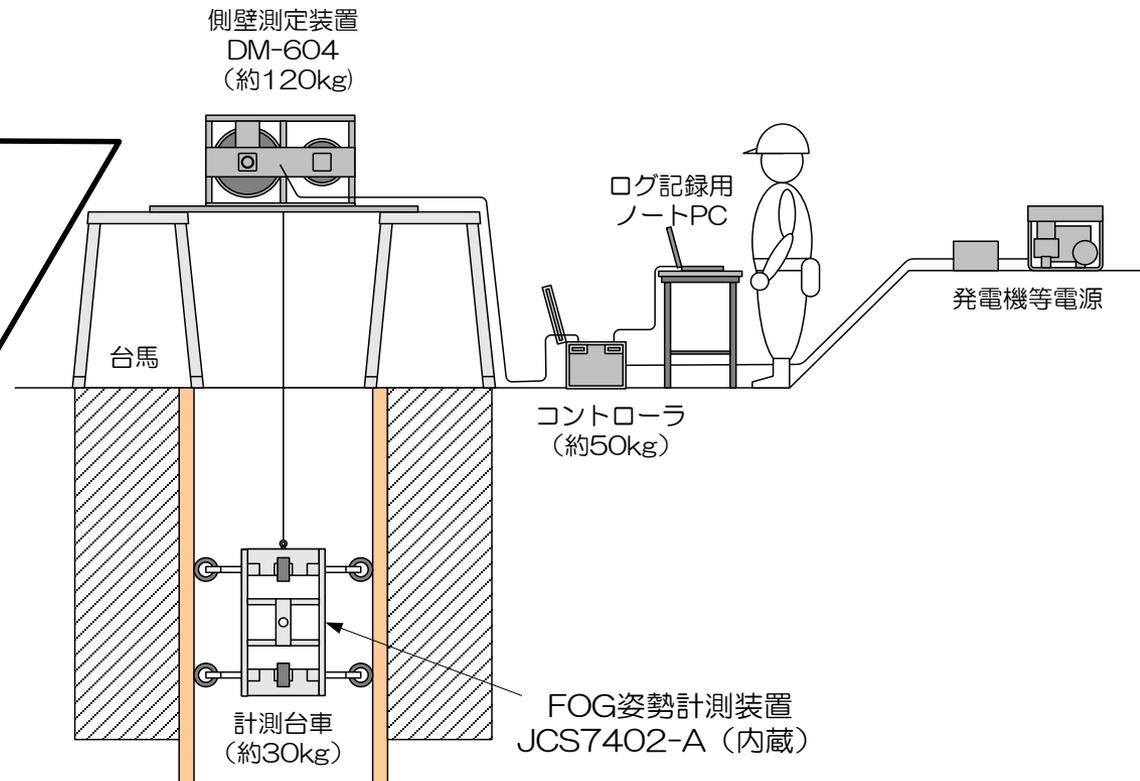
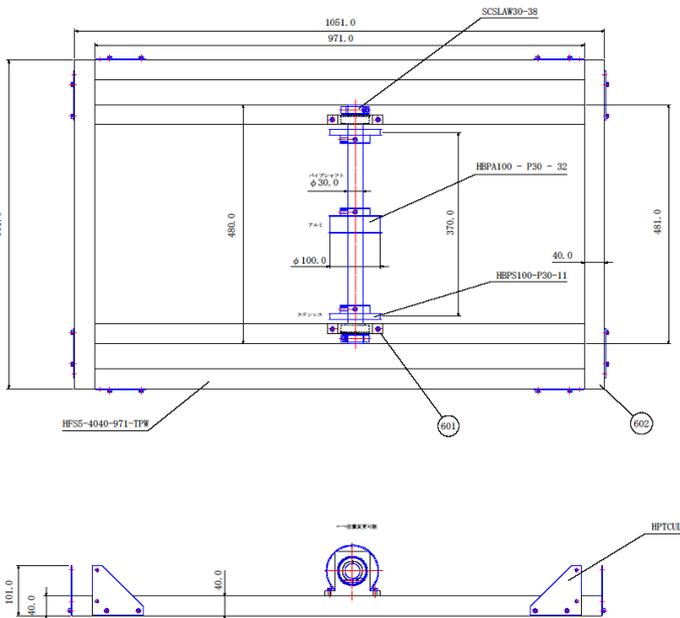


本来の用途・用法：鉛直の先孔側壁の計測
○既成の技術で即対応可能
△大きな傾斜に対応不可（側壁や杭に干渉）
△放電記録紙からの読み取り（精度は読み取り者次第）

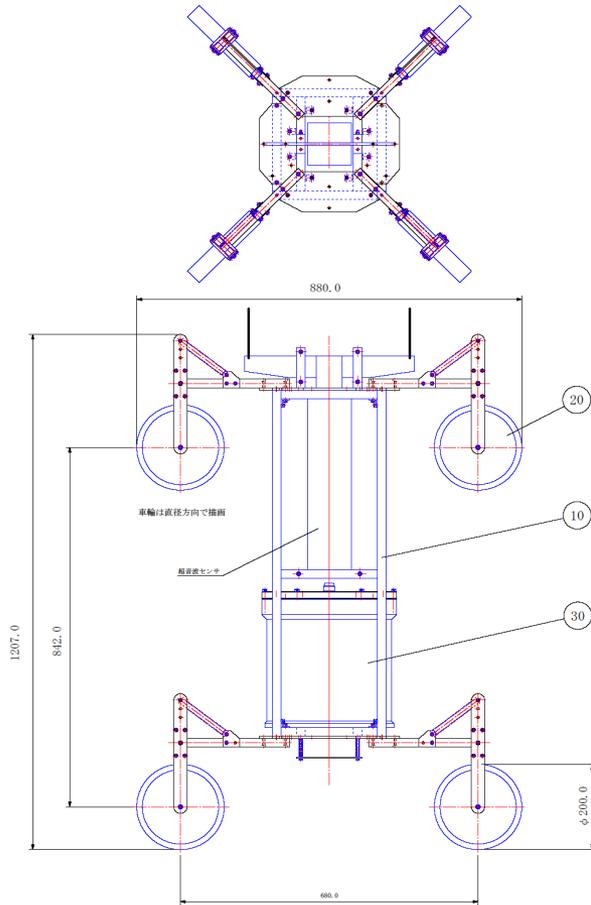
①挿入式傾斜計 被災杭の計測試行



本来の用途・用法：土中等にガイドを先行設置
○簡易な装置構成
△ガイドの事後設置は想定されていない
△概ねガイドの継ぎ目部分のみで傾斜が変化



計測台車



質量：約30kg

姿勢計測装置

項目	精度
姿勢角 分解能 $\leq 0.1^\circ$	□—ル角およびピッチ角 $\leq \pm 0.15^\circ$ @input $\pm 10^\circ$ $\leq \pm (0.2^\circ + 1\% \text{ of input})$ @input $\pm 10 \sim 45^\circ$ コー角 $\leq \pm (1\% \text{ of input} + 2^\circ / \text{minutes})$
角速度 分解能 $\leq 0.1^\circ / \text{s}$	$\leq \pm 5^\circ / \text{s}$
加速度 分解能 $\leq 0.1 \text{m/s}^2$	$\leq \pm 0.5 \text{m/s}^2$
備考	RS232CおよびRS422A出力の場合



FOG姿勢計測装置JCS-7402-A

<http://www.jae.co.jp/product/koki/gyro.html>

（日本航空電子工業（株）製）

装置全景



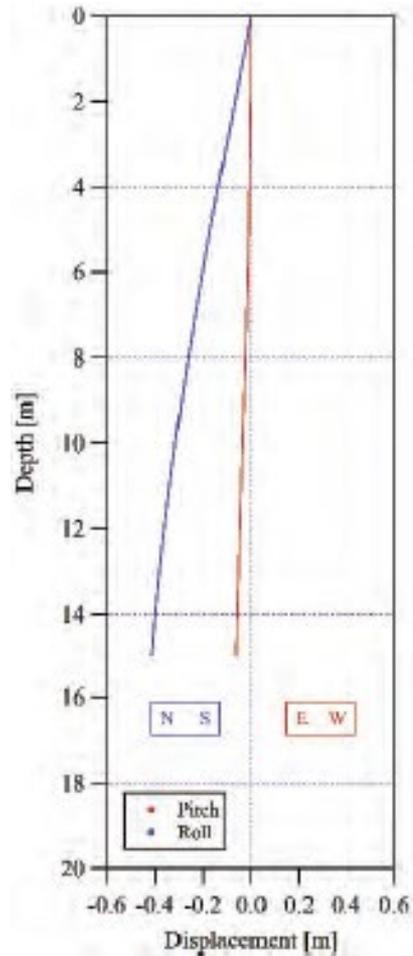
装置の設置状況



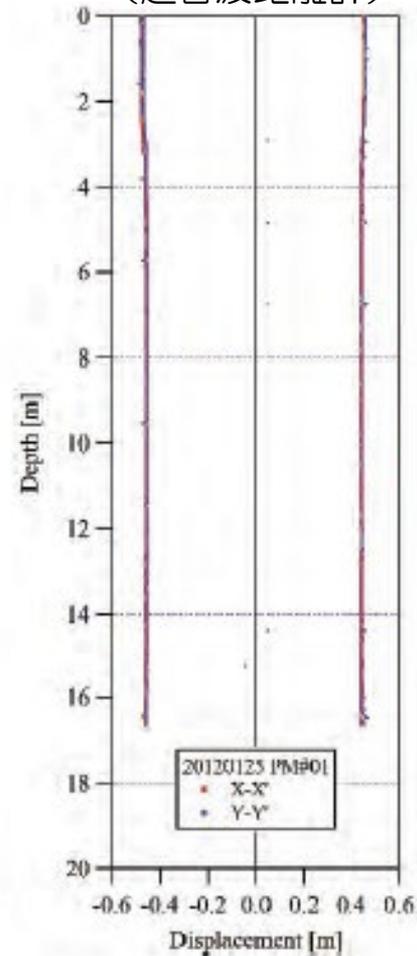
基礎杭の計測状況



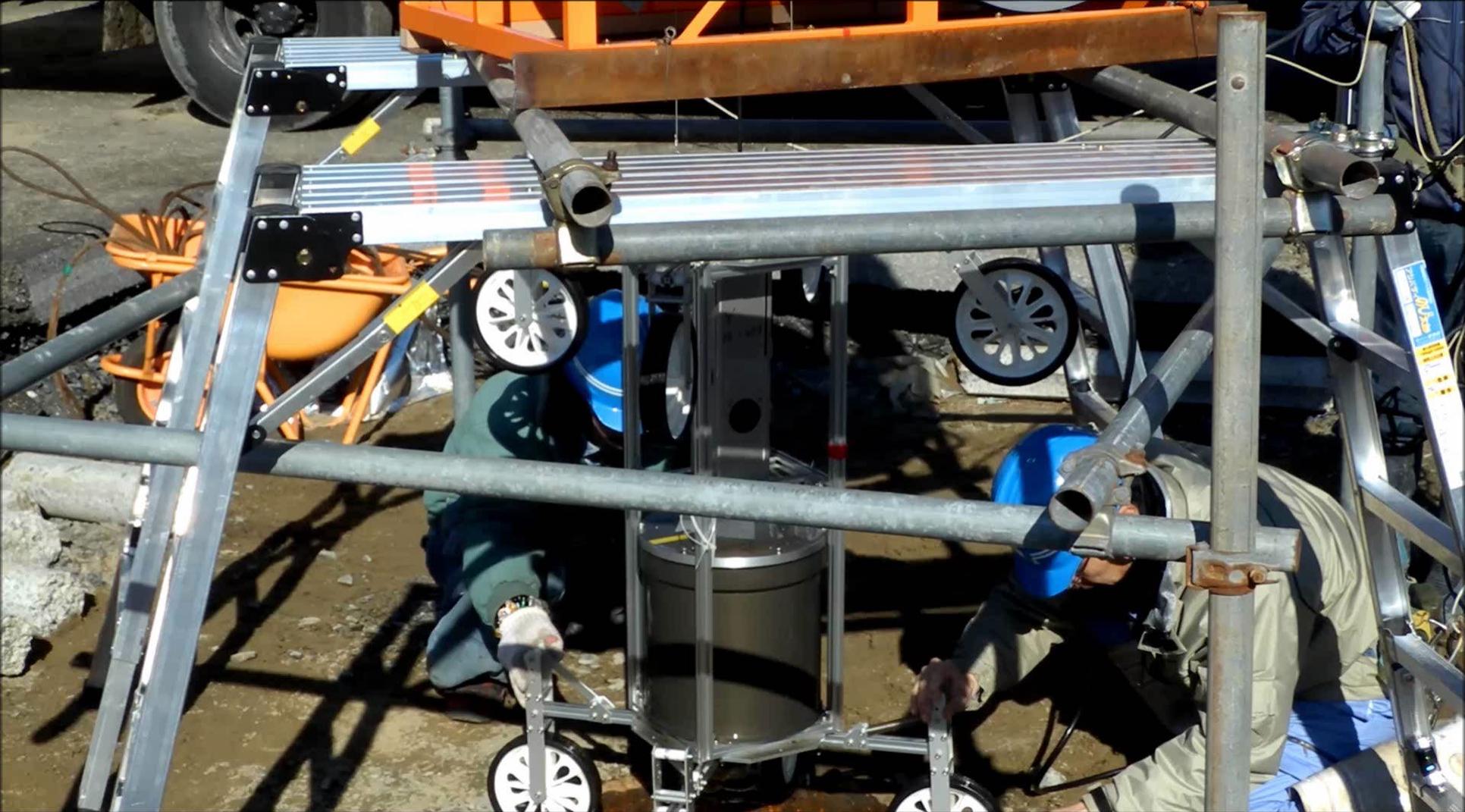
姿勢計測
(ジャイロ)



記録資読取值
(超音波距離計)



計測試験結果



仙台港（2012年3月5日）

斜杭の計測



タイロッドが貫通した斜杭への対応



電動ウインチ下部に追加した滑車でワイヤの繰り出し方向を調整

狭隘部への対応に薄型台車を用意
電動ウインチを手動ウインチに変更

東京港中央防波堤（2014年）

第二海堡鋼管矢板（2012年12月）

高止まりした杭の調査



港空研の点検・調査技術の研究開発事例

- ① 超音波による非接触肉厚測定技術
- ② 遠隔操作による栈橋上部工下面の無人点検技術
- ③ 基礎杭の被災状況調査

まとめ

- 定期点検（一般点検，詳細点検）
増大する点検対象への対応
→ 能力向上，コスト縮減
- 被災調査
供用可否の判断，災害査定，復旧工事のための照査
→ 安全性，迅速性
- 新技術の役割
点検にかけられる予算，労働力，時間などに様々な制約
→ 「新技術」，「人+新技術」

ご清聴ありがとうございました