

## 5.4 結氷する港湾に対応する水中構造物点検技術に関する技術開発

研究予算：運営費交付金  
研究期間：平 20～平 22  
担当チーム：寒地機械技術チーム  
研究担当者：柳沢 雄二、片野 浩司、  
国島 英樹、五十嵐 匡、  
長瀬 禎、平 伴斉

### 【要旨】

港湾及び漁港施設の水中部における健全度診断は、有効な手法が確立されておらず、潜水士による目視観察に頼っているのが現状である。一方、港内における堆砂の計測は測量船による深淺測量が主体である。このことから、点検・計測作業の効率化を図るため、港湾構造物水中部劣化診断装置、鋼矢板式岸壁点検装置、及び簡易堆砂計測装置を開発し、港湾及び漁港施設の機能保全に寄与する点検計測システムの検討を行うものである。

キーワード：港湾構造物点検、音響カメラ、非破壊検査、水中地形計測、マルチビームソナー

### 1. はじめに

港湾及び漁港施設の水中部における健全度診断は有効な手法が確立されておらず、潜水士による目視観察に頼っており、点検時期が船舶の出入りが少ない冬期にまたがって実施されている。冬期間の港湾施設は結氷や流水等により損傷を受けることがあり、また、これらの影響で点検できる期間が短いことから、短期間で効率的な点検手法の開発が求められている。一方、港内における堆砂の計測は、測量船による深淺測量が主体であるが、上記と同様、海象条件が厳しく、冬期間は計測期間が制限されることから、短時間で簡易に計測可能な手法の開発が求められていた。

以上のことから、港湾構造物水中部劣化診断装置、鋼矢板式岸壁点検装置、簡易堆砂計測装置を開発し、現状作業の効率化を図ることで、港湾及び漁港施設の機能保全に寄与する点検計測システムの検討を行った。

## 2. 港湾構造物水中部劣化診断装置の開発

### 2.1 実態・動向調査

現状の点検調査方法の実態調査、点検技術の動向調査を実施した結果、主要部分となる撮影装置は、可視画像法と音響画像法の比較検討より、音響レンズを使用した音響カメラの採用が有利と判断した。

また、水槽及び実海域で音響カメラを使用し、基本性能の確認、岸壁面全体の撮影方法の検討を行った。その結果、実海域で撮影した画像の分解能は、潜水士の目視によるそれと比較すると、同程度（透明度が悪い状況で

はそれ以上）を得られることを確認した。

### 2.2 撮影試験（平成 20 年度）

平成 20 年度は、最終目標である点検計測システムにおいて必要となる構造物水中部全体のモザイク図の作成を行った。

モザイク図とは音響カメラによる画像をつなぎ合わせたもので、以下のようにして得られる。船舶に艀装されたポール状の架装装置先端に撮影装置（音響カメラ）を固定し、構造物水中部を撮影した。船舶は岸壁面と一定距離を保ちながらゆっくりと航行し、岸壁面水中部を撮影した（図-1）。

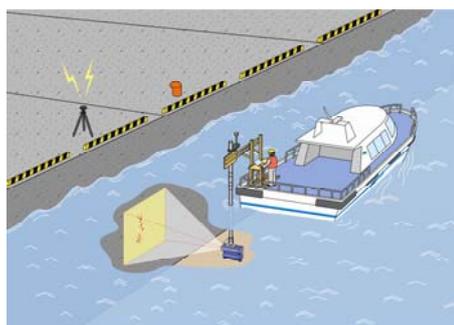


図-1 撮影イメージ図（当初）

#### 2.2.1 機器類の構成とデータ取得方法の確認

モザイク図を作成するには、音響カメラと岸壁間の距離をリアルタイムに計測し、同時に音響カメラの傾斜による距離補正を行う必要がある。そのため、撮影では音響カメラのほか、音響カメラの位置情報（または岸壁間

#### 5.4 結氷する港湾に対応する 水中構造物点検技術に関する技術開発

の実測距離)、姿勢情報を把握するため、RTK-GPS装置、モーションセンサーのほか、音響測深機等の機器類を使用しデータを取得した(図-2)。

機器類の設置は、架装装置(ポール)に直付し、得られたデータから、画像解析ソフトウェアに対し最適なデータを提供する機器類の構成を検討する。

データ取得は、データ取得用に1台、画像取得用に1台の計2台のPCで行い、データ取得時刻はGPS時刻データにより同期している。

なお、撮影前には音速度を撮影水深にて測定したほか、撮影箇所となる岸壁では、RTK-GPS装置による測量を実施し、処理画像の基準位置となる標定物(供試体、スタッフ等)を設置した。

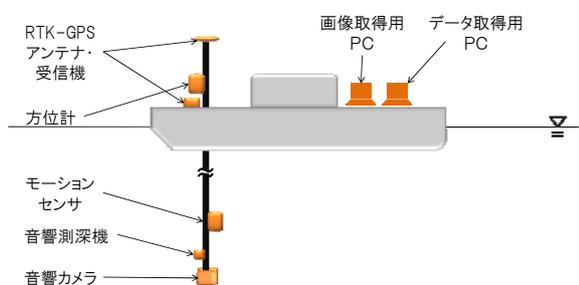


図-2 機器構成図

#### 2.2.2 架装装置の製作

音響カメラを水中で固定するための架装装置(試作機)の全景を写真-1に示す。



写真-1 架装装置

主要部材であるポールは伸縮可能で、-14m岸壁点検を想定しポール最伸長を13m、また、可搬性を考慮し最縮長を2.7mとした。撮影位置は1~13mの範囲で固定可能で、手動のワイヤーロープ巻き上げ機で位置調整し、エアの加圧により撮影位置でポールを固定する仕組みとなっている。

架装装置の性能については、ポールの伸縮動作、航行時の耐久性等の確認と、最深部(-14m)撮影時の画像の

有効性を確認する。また、現場適合性については、可搬性、艀装方法について確認した。

#### 2.2.3 画像解析ソフトウェアによるモザイク図作成

モザイク図は、2つの手法(系統的幾何補正、非系統的幾何補正(マッチング処理))により画像解析ソフトウェアにて作成する。前者は音響カメラの位置情報・姿勢情報により作成する手法であり変状位置が正確に示され、後者はマッチング手法による滑らかな画像が特徴である。

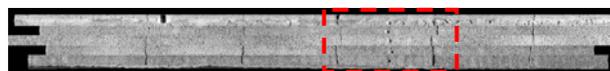
また、画像解析ソフトウェアで作成したモザイク図から、分解能及び位置精度を確認した。

写真-2(上)に作成したモザイク図を示す。分解能及び位置精度を確認するため、予めコンクリート平板表面にクラックを疑似再現した供試体(写真-2(中))を製作し、撮影する測線(水深1.0、2.5、4.0、5.5、7.0m)において岸壁面水平方向同位置に設置した。

写真-2(下)は供試体付近部分を拡大したものである。設置した供試体位置を比較した結果、最大2m程度のばらつきが見られ、位置精度に課題が残った。

また、供試体の撮影画像と疑似クラックの比較から、約3cmの分解能を確認した。

以上より、架装装置を含めた計測方法を改善し位置精度を高める必要がある。



約9m×100m

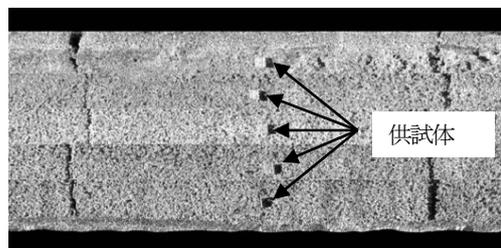
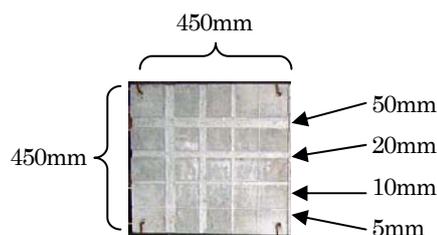


写真-2 モザイク図、供試体

#### 2.3 撮影試験(平成21年度)

モザイク図の位置精度を向上させるため、架装装置の

5.4 結氷する港湾に対応する  
水中構造物点検技術に関する技術開発

改造、画像解析ソフトウェアの改良を行い、平成21年度撮影試験を実施した。

2.3.1 架装装置の改造

平成20年度撮影試験では、ポール及びポール下部先端に取り付けた音響カメラ等は、航行時に水流抵抗を受けてポール自体にたわみが生じ、ポール上部先端部に取り付けたRTK-GPSアンテナとの間に位置誤差が生じた。このため、多段式ポール継ぎ目の重複部分を改良し、撓みの少ない構造に改造した。

また、架装装置を艀装するため単管パイプにより架台を組んだが、必要な強度が得られず振動の原因になったほか、設置に多くの時間を要し運用面で問題が明らかになった。このため、架装装置を船舷に短時間で確実に艀装する方法を検討し、艀装用架台を製作した(写真-3)。



写真-3 架装装置艀装用架台

2.3.2 画像解析ソフトウェアの改良

平成20年度撮影試験において、画像解析ソフトウェアは撮影条件や計測状況によってはモザイク処理が困難になることがわかった。このため、ソフトウェアの改良を行い、モザイク図の作成を実施した。

また、岸壁面水中部の画像に、光学式カメラで撮影した陸上部の画像を加え、水陸一体化したモザイク図の作成を行った(写真-4)。



写真-4 モザイク図(陸上部+水中部)

以上より、架装装置の改造及び画像解析ソフトウェアの改良で位置精度は向上し、精度の高いモザイク図を得

ることができた。

2.4 撮影試験(平成22年度)

架装装置の評価、調査費の比較をするため、平成22年度撮影試験を実施した。

2.4.1 施工方法

これまでの撮影試験で本技術の施工フローを確立した(図-3、写真-5)。また、撮影方法を図-4に示す。

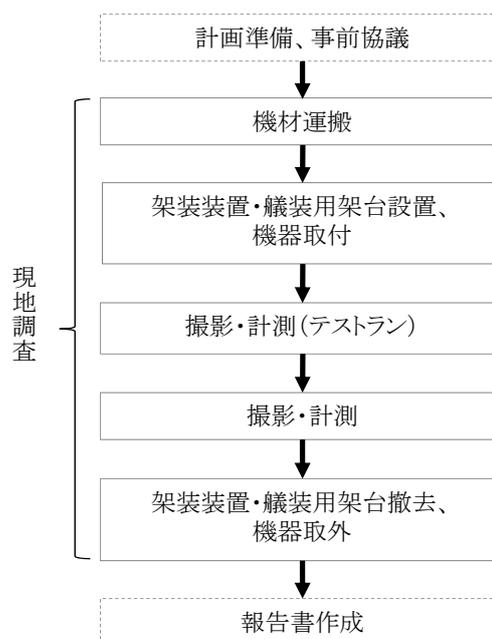


図-3 施工フロー



写真-5 艀装用架台組立(左上)、架台設置(右上)、機器取付(左下)、撮影計測(右下)

## 5.4 結氷する港湾に対応する 水中構造物点検技術に関する技術開発

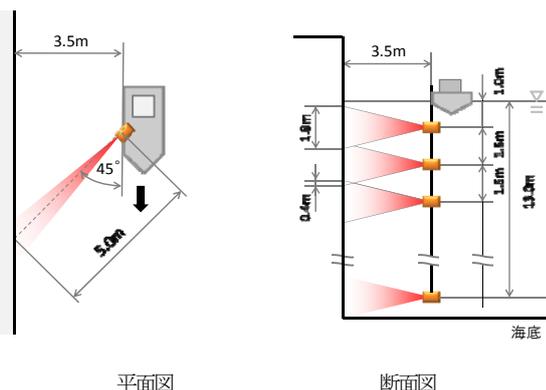


図-4 撮影方法

### 2.4.2 現地での適用性確認

前項の施工方法にて、実運用を見据えた現地試験を国土交通省北海道開発局稚内港湾事務所の協力を得て実施した。現地試験では撮影方法及び架装装置の評価を行い、また、本技術と従来の点検方法との施工費の比較や運用後の成果品管理について検討した。

確認・検討事項は以下のとおりである。

- ・架装装置の評価
- ・調査費の比較
- ・運用後の成果品管理（データ管理システム）

#### (1) 架装装置の評価

架装装置は、岸壁面水中部全体を効率よく撮影するために試作した伸縮式のポールである。過年度の現地試験では深水部を撮影した際ポールに振動が発生したため、ポール取付座の補強を行っている（写真-6）。



写真-6 架装装置の改造

これまでの現地試験において、各水深で音響カメラ近傍の振動の計測、及び画像解析装置によりモザイク図の作成を行った。

通常船速（1kt）で撮影した場合、音響カメラ位置の水深が-1.0m、-2.5m、-4.0m、-5.5m、-7.0mでは振幅の小さい振動が僅かに計測されただけで画像解析装置によるモザイク図作成には支障はなく、-8.5m、-10.0mといった水深が深い場合でも振幅のやや大きな振動が計測さ

れたがモザイク図作成に問題はなかった。以上より、通常船速では-10.0m迄の水深でモザイク図の作成が可能である。

また、撮影調査の効率化を目的として船速を2倍（2kt）とした試験を実施した。音響カメラ位置の水深が浅い場合（-1.0m、-2.5m）では、通常船速（1kt）の場合と状況は変わらなかったが、水深が深い場合（-7.0m以上）では、周期が短い振動が連続的に計測され、画像解析装置での処理作業に影響があった（図-5）。

この他、音響カメラは時間差のある多数のビームを使って画像を作成しており、移動しながらの撮影を行うことで画像に歪みを生じ、船速を2倍とした場合に特に分解能が低下した。以上より、1ktを通常速度として運用することが望ましく、撮影結果も概ね良好であった。

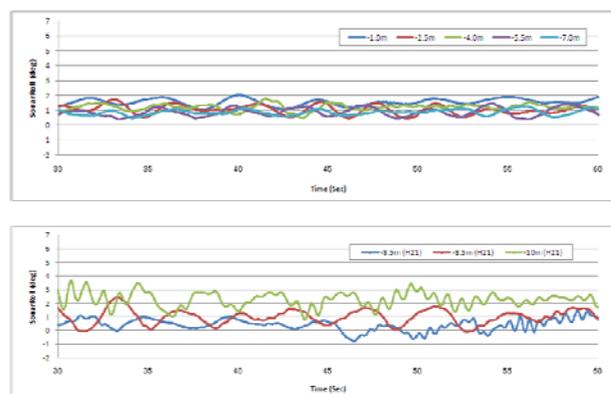


図-5 音響カメラ近傍の振動  
浅部（上）、深部（下）

#### (2) 調査費の比較

- ・日当り撮影面積

国土交通省の積算基準（暫定案）※によると、従来の標準的な点検作業では、潜水士2人で約1,200m<sup>2</sup>/日の調査面積となっている。

本技術において日当り撮影面積の試算については、終日撮影を実施した平成22年度現地試験（11月24日 作業時間：8:00～16:00）のデータを参考とした。

当日の撮影パターンを図-6に示す。撮影・計測は約180～200m単位で行い、撮影・計測と回送を繰り返し、途中、前方・後方撮影などのため撮影方向（音響カメラの向き）の切り替えを行った。

※維持管理計画書策定のための現地調査費（暫定案）：国土交通省

## 5.4 結氷する港湾に対応する 水中構造物点検技術に関する技術開発

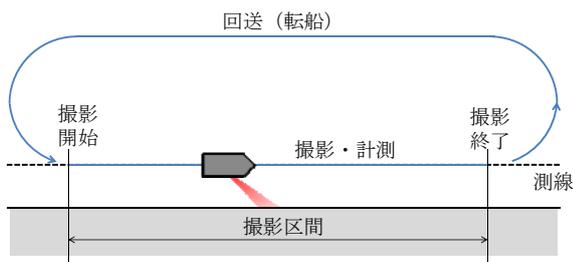


図-6 撮影パターン

なお、撮影速度は1ktを目標とし、回送時も架装装置への負荷を考慮し同程度の速度で航行した。また、撮影カメラ位置の変更は回送時に行った。

この日の撮影形態を表-1に示す。図-6の測線に沿った撮影を17回行い、カメラの撮影方向を4回変更した。これらより、撮影面積を試算すると、1回の撮影で225m<sup>2</sup>(H1.5m×W150m)となり、17回の撮影で約3,800m<sup>2</sup>となった。

表-1 作業形態

	開始時刻	終了時刻	撮影時間 (s)	撮影時間 (s)	距離 (m)	速度 (m/s)	速度 (kt)	カメラ方向 切り換え 時間 (s)	有効 回数	備考
1	9:00:24	9:04:25	241	241	180				◎	再測
2	9:09:33	9:13:11	218	218	180				◎	再測
3	9:18:25	9:20:05	100	100	180				◎	再測
4	9:24:20	9:27:20	180	180	180				◎	再測
								17:52		
5	9:45:12	9:49:10	238	238	180	0.76	1.47		◎	
6	9:52:08	9:53:21	73	73	180					対岸 (参考)
7	9:53:22	9:55:35	133	133	180					対岸 (参考)
8	10:01:52	10:06:29	277	277	180	0.65	1.26		◎	
9	10:14:16	10:18:54	278	278	180	0.65	1.26		◎	
								71:59		
10	11:30:53	11:35:03	250	250	180				◎	集積レンズ取付
11	11:40:00	11:44:10	250	250	180				◎	集積レンズ取付
12	11:49:33	11:54:13	280	280	180				◎	集積レンズ取付
13	12:03:00	12:07:02	242	242	180				◎	集積レンズ取付
								123:56		
14	14:10:58	14:16:25	327	327	200				◎	
15	14:19:17	14:21:33	136	136	200				◎	
16	14:28:44	14:34:35	351	351	200	0.57	1.11		◎	
17	14:43:01	14:49:09	368	368	200	0.54	1.06		◎	
								13:11		
18	15:02:20	15:08:08	348	348	200	0.57	1.12		◎	
19	15:15:41	15:21:36	355	355	200	0.56	1.10		◎	
20	15:29:52	15:35:24	332	332	200	0.60	1.17		◎	

但し、海象条件や航行状況、架装装置の振動などの影響で撮影画像や計測データが後の画像解析装置での処理に適さないと判断される場合は再測を行い、これらの時間的損失で撮影面積は減少する。

### ・調査費の比較

従来の点検方法(潜水調査)と本技術(撮影調査)の調査費を比較した。

潜水調査については、国土交通省の積算基準(暫定案)より「付着物除去を伴わない潜水調査」から施工費を算出した。また、撮影調査については、図-3の施工フローに従い調査費を算出した。

計画準備、事前協議については従来の点検方法に準ずるが、報告書作成においては、画像解析装置を使用するため、データ解析・整理等の労務費を加えた工数とした。

機材運搬は、比較のため、調査業者が所在する最寄りの都市から調査現場までの運搬距離を最短に設定した。

現地調査では、労務工数は現地試験での実績値を採用し、機械経費は損料計上とした。

### ・比較結果

撮影面積当りの直接業務費を比較した結果を図-7(赤線)に示す。

撮影調査においては、架装装置・艀装用架台設置(撤去)、機器取付(取外)、撮影・計測(テストラン含む)といった撮影1回当りに必要な費用(固定費)は割高だが、撮影1日当りの調査面積が大きいため、調査面積が約12,000m<sup>2</sup>以上であれば全体的な施工費は安価となる試算となった。

また、撮影面積当りの所要日数を比較した結果を図-7(青線)に示す。調査面積が小さい場合(約5,000m<sup>2</sup>以下)は潜水調査の所要日数は少なく済み、業務当りの調査面積が大きいほど(約5,000m<sup>2</sup>以上)撮影調査の方が短期間で済むことになる。

潜水調査の場合は、潜水土、機械共に現地での雇用・調達が可能なため、小規模な調査に適しているといえる。調査現場が遠方の場合、架装装置や機器が現地調達できないため事前に運搬費等と撮影面積を考慮したうえで調査方法を選択する必要がある。

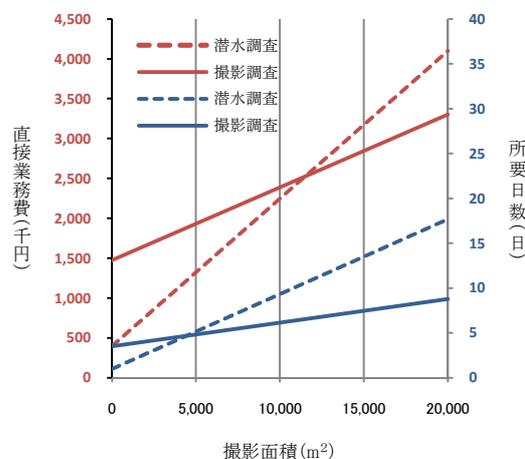


図-7 撮影面積当りの直接業務費及び所要日数



#### 5.4 結氷する港湾に対応する 水中構造物点検技術に関する技術開発

備試験を行い、超音波探傷法（SH波）の有効性が最も高いと判断した。

機能確認試験では超音波探傷法（SH波）による点検性能向上を目的に、探触子の大型化や複数化による効果、探傷器機種による性能比較、超音波が正常に伝わる非水溶性の接触媒質の性能確認、探触子圧着力の把握等を腐食のない健全な鋼矢板や実際の現場で使用されていた鋼矢板を用いて行った。その結果、探触子の大型化や複数化による検知性能向上よりも鋼矢板表面への密着性が重要であったため、小型かつ単体探触子の方が現場適合性が高いことがわかった。

また、非水溶性の接触媒質の性能については、音響シートを用いてエコー感度による性能比較を行った。シート厚 0.5mm と 1.0mm では、エコー感度に大きな差異は見受けられず、通常使用されている接触媒質との性能差は、3dB 程度のエコー感度の低下はあるものの、ほぼ同等の性能を有していることがわかった。このことから、接触時の耐久性を考慮するとシート厚 1.0mm の音響シートの方が優位であると判断した。また、探触子圧着力については 31N/cm<sup>2</sup> 以上必要であることがわかった（写真-7）。



写真-7 探触子圧着力確認試験

### 3.2 計測試験（平成20年度）

種々の規格の鋼矢板や様々な腐食劣化状態において超音波探傷法（SH波）による波形データを取得し、腐食の無い健全矢板を基準としたエコー波形との比較による腐食劣化判定手法について検討を行った。

#### 3.2.1 鋼矢板への超音波入射の確認について

超音波探傷法（SH波）による鋼矢板の点検手法は、探触子から発射した超音波を鋼矢板へ入力し、矢板表面付近を伝搬した超音波の反射状態を探傷器により波形として取得することで、波形の形状によって場所や劣化程

度を把握するものである。そこで、探触子の設置では水中で直立した状態で 31N/cm<sup>2</sup> 以上の圧着力を確保することから、マグネットと油圧ジャッキによって水中の鋼矢板へ固定可能な治具を製作した（写真-8）。

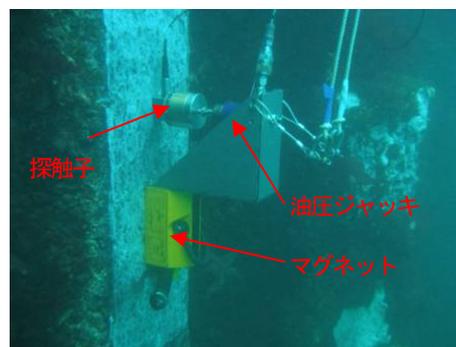


写真-8 探触子圧着治具

また、鋼矢板への超音波入射の確認や室内にて設定したエコー感度との補正について検証するため、透過法（二探触子法）による計測を実施した。

結果として、製作した治具は所定の圧着力を確保できたが、設置磁石の影響と想定される定位置エコーが確認された。このため、治具の配置の工夫や探触子の小型化が必要であると判断した。

透過法による超音波入射については、エコーの入射が確認できたが、探触子を上下方向に2個設置する必要があり作業性が悪いといった欠点があった。このことから、1個の探触子にカップリング（SH波+入射確認のための垂直探傷）機能を組み込んだ探触子の試作を行った。

#### 3.2.2 基準波形との比較による腐食の判定について

室内試験において透過法でのエコー波形の立ち上がりが80%となる感度を室内基準とし、II型～IV型までの鋼矢板で計測を行った感度条件に基づいて計測できなかったV型及びVI型の感度条件を想定するため、室内基準エコー感度の設定を行った。

一方、現場で計測を行った結果、室内基準感度に対し現場感度の補正は、6dB未滿と僅かであることが確認された。

また、腐食の影響が少ない健全な矢板で取得された波形を基準波形とし、腐食していると想定される矢板での波形を重ね合わせるにより腐食の判定を検討した（図-10）。



#### 5.4 結氷する港湾に対応する 水中構造物点検技術に関する技術開発

ボールジョイントを使用した過負荷を防止する機能を備えることとした。

##### (3) ケレン機能

矢板表面へ超音波を確実に入射させるため、表面の腐食及び付着物を除去する必要がある。このため、サンダー、ブラシによるケレン装置を備えることとし、ダストを除去するスクリーンの取付を検討した。

また、(2)、(3) 各機能の動力は圧縮空気とし、油漏れ等の懸念に配慮した。

##### (4) 監視機能

位置決め、作業状況確認のため、地上のモニターで遠隔操作（パン、チルト、ズーム等）が可能な水中カメラを取り付けた。

図-13 に点検装置の外観を示す。

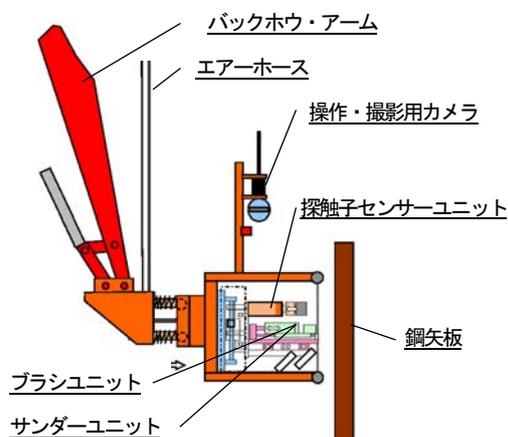


図-13 点検装置

#### 3.3.4 動作確認試験、超音波探傷確認試験

試験は、コンクリートベースに仮設した鋼矢板を現場矢板に見立て、陸上フィールドにて実施した。なお、本年度はケレン機能を除いた機器構成で実施した（写真-9）。



写真-9 動作確認試験、超音波探傷確認試験

動作確認試験では、点検装置の位置決めを補助員による誘導で行った場合と補助員に頼らず操作用カメラのモニター映像で行った場合での動作確認を行った（写真-10）。

補助員による誘導がある場合には、精度の高い位置決めが可能であった。しかしながら、カメラモニターによる操作では、矢板と架台との距離及び傾斜（水平、鉛直方向）の把握が困難であり、距離計や傾斜計などの補助装置が必要であることがわかった。



写真-10 操作用カメラのモニター映像

超音波探傷確認試験では、探触子のカップリングチェック機能、SH 波計測において、測定感度が室内試験にて計測し想定した感度より低い感度で鋼矢板への超音波入射を確認した。板厚計測においては、鋼矢板II型で誤差はほとんど無く、鋼矢板IV型でも0.2mmであり、点検装置による板厚計測においても板厚計測の有効性を確認した。

このほか、本年度は、点検システム全体の機能要件を検討した。

#### 3.4 計測試験（平成22年度）

平成21年度に試作した点検装置について、探触子圧着機構、装置押付機構、状況把握機構等の改造を行い、動作・機能の確認試験及び現地計測試験を実施した（写真-11）。

##### 3.4.1 点検装置改造

新たに追加する機構については、適応可能な機構の比較を行い妥当な機構を選定した。

###### (1) 探触子圧着機構

波や風圧等による装置全体の微動に対する探触子圧着安定性を向上させるため、油圧圧着治具を大型化し探触子を均等に押し付けるものとした。

###### (2) 均等装置押付機構、水平・垂直姿勢把握機構

装置をバックホウ・アームにより鋼矢板面へ均等に押し付けるため、装置押付バネ強度を増大させ過負荷検出スイッチを追加し、装置姿勢保持を確認可能にした。ま

#### 5.4 結氷する港湾に対応する 水中構造物点検技術に関する技術開発

た、鋼矢板面に対する装置の水平・垂直姿勢を把握するため、傾斜センサー（2軸）を新たに追加した。

##### (3) 状況把握機構

装置姿勢や接触面状況等の把握に必要な作業確認用カメラ（4台）を点検装置に取り付け、これらの情報をバックホウ運転室にて確認可能とし、装置制御を可能とした。

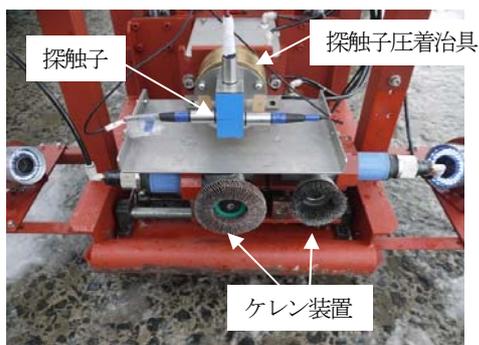


写真-11 点検装置（改造後）

#### 3.4.2 鋼矢板点検装置動作確認試験

点検装置の動作確認のため、現地計測へ向けた陸上試験を行った。試験では、コンクリート塊に鋼矢板を設置し基本動作の確認を行ったほか、深さ約4mのピットを利用した動作確認試験を行った（写真-12）。



写真-12 動作確認試験状況（ピット）

鋼矢板へ点検装置を押し付ける際、傾斜計による水平・垂直の姿勢確認は有効であり、姿勢や位置の微調整も運転室に設置したモニターにより確認でき、探傷の位置や状況も確認することができた。

また、点検装置を鋼矢板へ押し付けた状態では、接触バーは鋼矢板と密着され、動揺等による波形の乱れは確認できなかった。

同時に行った超音波探傷では、室内で計測した基準感

度に対し、ほぼ同等の感度で測定可能であったが、腐食により表面に凸凹がある場合は6dBを超える感度補正が必要であった。また、SH波は端部波形を確認でき、SV波による板厚計測は元厚と同等の値を確認できた。

#### 3.4.3 鋼矢板点検装置機能確認試験

動作確認試験からの不具合点を修正後、現地での機能確認試験を行った。

##### (1) 潜水士による計測

先ず、透過法試験により鋼矢板へのSH波入射確認を行い、全ての試験ケースで適切な入射を確認した（写真-13）。また、室内試験で得た感度との差（0～8dB）をSH波試験の室内基準感度に補正した。

計測した結果、6割程度のケースで腐食と判定できる波形を確認した。また、探傷範囲が長い（3m程度）場合には腐食の判定が困難であることを確認した。



写真-13 潜水士による計測

##### (2) 点検装置による計測

点検装置の機構確認のうち、現地試験ではケレン動作の確認を行った。サンダーとブラシによるケレン範囲は180×80mmとなり、探触子サイズ（65×34mm）の圧着を満足する処理が可能となった。しかし、付着物の除去は可能であったが表面の凸凹が残り鏡面処理は困難であった。また、感度補正は4～25dBとなり、やや高い補正が必要となった（写真-14）。



写真-14 点検装置による計測

測定結果は、5割程度のケースで腐食と判定できる波

5.4 結氷する港湾に対応する  
水中構造物点検技術に関する技術開発

形を確認した。また、探傷範囲が長い（3m 程度）場合には腐食の判定が困難であることを確認した。

3.4.4 まとめ（鋼矢板式岸壁点検装置の開発）

過年度の室内、陸上フィールド、及び現地試験により以下の成果を得た。

(1) SH 波感度調整方法の確立

計測時の基準感度は、室内、現地試験での透過法（カップリングチェック）による計測値の差を補正值とし、室内試験での SH 波試験値に補正值を加算することで腐食（傷）波形の確認が可能となった。

(2) 超音波（SH 波、SV 波）の波形の確認

上記の方法により、点検装置を使用し陸上から腐食（傷）波形を確認し、また、肉厚値を確認できた。

(3) 探傷方法の確立

過年度の室内試験にて健全な矢板から得た波形を基準波形（図-14、15 中の橙色線）として現地試験で計測した波形（図-14、15 中の青線）と重ね合わせ、基準波形より高いエコーが確認された場合は腐食（傷）があることを確認した。

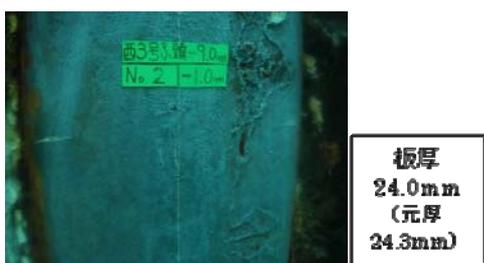
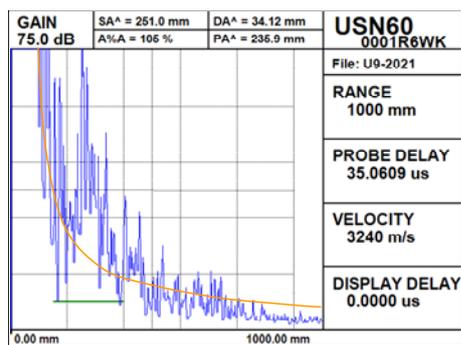


図-14 計測結果①

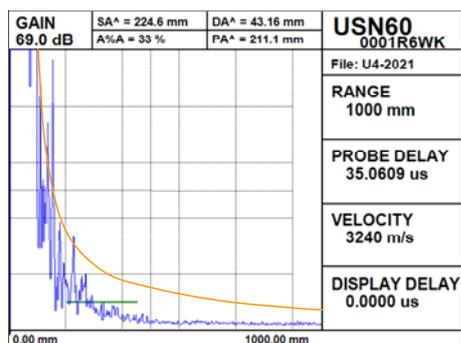


図-15 計測結果②

4. 簡易堆砂計測装置の開発

船舶を用いず岸壁等の陸上からマルチビーム測深機を垂下させ、ソナーヘッドを遠方へ向けて傾斜させた状態で水平に回転させて海底地形の計測を行う簡易堆砂計測装置を開発し、通常の深淺測量にて得た値を基準として比較を行った。また、計測距離及び精度向上のため、計測方式の異なる数種の計測機器を使用した計測試験を実施し、比較・検証を行った。

4.1 動向調査

北海道内における港内堆砂状況調査の現状に関する調査、及び水中地形計測技術の動向調査等を実施した。その結果、計測装置は、陸上からの計測の効率性や分解能等の比較検討によりマルチビームソナー（SEABAT8125）の採用が妥当であると判断した。

4.2 確認試験（平成20年度）

本年度は、マルチビームソナーを岸壁等から安全に垂下させ、ソナーヘッドを回転させて計測が可能な計測架台の試作を行い、岸壁上からの計測を行った（図-16）。

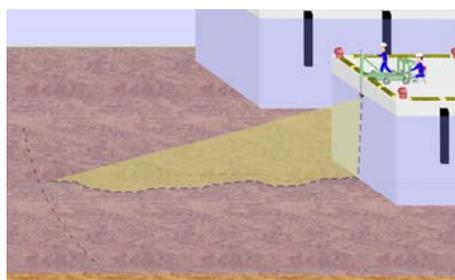


図-16 当初の計測イメージ図

4.2.1 計測架台の機能検証

計測架台（試作機）は岸壁等からマルチビームソナーヘッドを海面下 1m 程度まで安全に垂下させることができる。全景を写真-15 に示す。

装置の機能として、防波堤等からの計測も想定し、過年度の調査結果より、伸縮ポールの最伸張を 6m、また、

#### 5.4 結氷する港湾に対応する 水中構造物点検技術に関する技術開発

可搬性を考慮して架台全高は 1.8m とした。ポールの伸縮はワイヤーロープによる巻き上げ式で、ポール本体に取り付けたハンドルを回転させることによりソーナーヘッドも追従して回転する仕組みとなっている。

計測架台の構造は大きく 2 つに分かれており、伸縮機構を備えセンサー類を取り付ける計測装置部と、これを載せて岸壁前面まで張り出す架台部となっている。計測装置部と架台部は現地にて分解・組立が可能で、ワゴン車両に搭載して運搬することができる。現地では、センサー類を含めて組立に約 1 時間、分解に 30 分程度かかった。

また、作業人員は、計測装置部の重量が約 180 kg あることから 4 人程度必要であった。



写真-15 計測架台（試作機）

#### 4.2.2 計測データの評価

採用したソーナーは 120 度の扇状に測深範囲を有していることから、ソーナーヘッドを 20 度及び 30 度ロール方向に傾斜させてビームを遠方へ向けた状態とした。そして、水平方向に 5 度から 10 度刻みに回転させ 10 秒間静止する方法で機器の性能値である半径 100m 程度の範囲を計測した。

また、同じ海域でマルチビームによる通常の深浅測量を実施し、基準とする水深データの取得を行った。

図-17 は計測架台を使って計測した音波の到達範囲である。

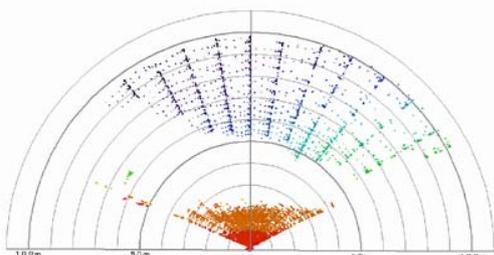


図-17 音波到達範囲図

試験を行った海域の海底地形が、岸壁前面沖合方向 17m 付近から 50m 付近まで勾配がやや急になっているため、方角によってはデータが取得できない状態であったが、音波の到達範囲は概ね 100m 程度あり機器の性能値を満足することができた。

#### 4.2.3 補正用センサーの評価

補正用センサー（モーションセンサー）の特性として、センサーが傾斜した状態での出力特性に不安があることから、水面に垂直となるよう伸縮ポールに取り付けた結果、動揺に対するデータの補正は有効であった。しかし、ソーナーヘッドの傾斜角度が補正データに影響を与えた可能性があるため、モーションセンサーの設置位置については、今後、検討が必要である。

#### 4.3 計測試験（平成 21 年度）

昨年度の課題を基に、試作した計測架台を改造し計測試験を行った。

改造点としては、磁気方位センサーによる方位取得が困難であったことから GPS による方位取得を行うものとした。また、ソーナーを垂下させる伸縮ポールにおいて波浪の影響が少なくなるように伸縮部の固定方法及び伸縮方法を見直した。動揺計については、設置場所の変更を行った（写真-16）。

#### 4.3.1 計測架台の検証

ソーナーヘッドを垂下させる多段伸縮ポール先端の第 1 段ポールにウインチワイヤーを連結させ、垂下の際に自重により順次繰り出す方式に変更したことにより伸縮動作が簡便となった。

また、伸縮ポール上部での GPS 方位取得を行うため、且つポールの回転をウインチワイヤーが妨げないように、ワイヤー取り回しのための梁を架台上部に新たに設けた。これにより、180 度以上の回転計測範囲を確保できた。



写真-16 陸上計測架台組立状況

## 5.4 結氷する港湾に対応する 水中構造物点検技術に関する技術開発

さらに、ソーナーヘッドの上面へ動揺計を設置することにより、動揺補正データ及びソーナーヘッド傾斜角度が直接的に計測できることから、ビーム計測座標の精度が向上した。しかし、改造による重量の増加や架台の付加等によって可搬性は低下した。

### 4.3.2 計測結果

船舶による深浅測量値を基準値とし、陸上計測架台を用いて水平方向に回転させた計測値と比較した結果、半

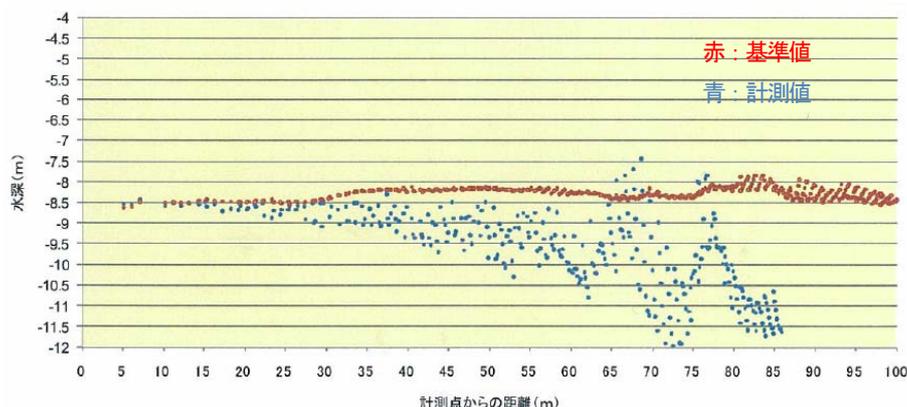


図-18 陸上計測データの一例

また、陸上から遠方の海底面へビームを発射して計測する本方式では、船舶等による直下の計測に比べ遠方でのビーム入射角が小さくなることから、ビームの屈折や湾曲に対する影響が大きかったと想定される。このため、遠方計測値のスクリーニングの検討や、海域条件による問題点の整理等を行う必要がある。

## 4.4 計測試験 (平成 22 年度)

計測方式の異なる数種の計測機器を使用した計測試験等を実施し、比較・検証を行った。

### 4.4.1 計測試験

昨年度の試験では海域条件によって遠方計測値の誤差が大きかったことから、本年度は試験実海域で事前確認試験を実施した。この結果、試験海域では顕著な音波散乱等もなく、ビーム到達距離も100m前後まで確認でき、試験箇所として問題ないと判断した。

実計測試験では、ソーナーヘッド回転角度を5度毎に10秒静止させた計測、1箇所で36秒、60秒、120秒、180秒静止させた計測、180秒かけて回転させた計測を、ソーナーヘッド取付角度30度、60度で計94パターン行った。また、予め比較の基準とする深浅測量値(基準データ)を海上(曳航体)から計測した。以下、精度の検証においては、計測精度を $\pm 0.25\text{m}$ の範囲<sup>\*</sup>とした。

<sup>\*</sup> 海上保安庁告示第102号「特級水域における測深誤差の

径 20m 程度までの距離までは基準値と同等な計測値であったが、それよりも遠方なほど大きな誤差を生じる結果となった(図-18)。

今回の誤差要因として、試験海域は河川からの流入がある港内であったこと、港口に近く河口付近の位置関係であったことから、淡水と塩水の間で音速にばらつきがあったと考えられる。

限度」の水深5m・特級0.253mによる。

到達距離20m以上で顕著であった入射角による誤差の検証として、以下の計測試験を実施した。

#### (1) 取付角度の変更 (SEABAT8125)

マルチビーム測深機 (SEABAT8125) を使用し、ソーナーヘッド取付角度を30度から60度に変更して計測したところ、データ密度の増加を確認した(図-19)。

しかし、ビームの各到達距離において計測精度を満たしたのは、取付角度30度で35m、60度で10mとなり、とくに、60度の場合は近距離から誤差が大きくなった。

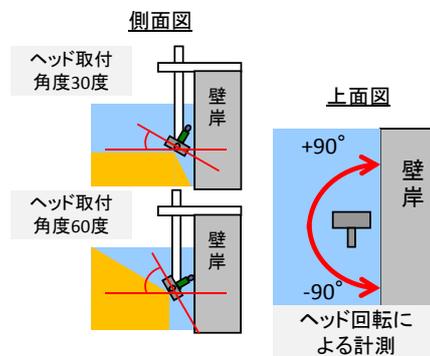


図-19 取付角度の変更 (30度→60度)

5.4 結氷する港湾に対応する  
水中構造物点検技術に関する技術開発

(2) SEABAT7101による計測

受波端部ほど入射角による誤差が大きくなるフラットアレイは常時表層面の音速度を正確に入力する必要があるが、当機器は送受波器がサークルアレイ方式であり、入射角の補正が不要である。ビーム幅（角度）を一定にした状態で150度の範囲を計測でき、また、各ビームのフットプリント間隔を等距離としたモードも備えている。この機器を用いてレンジを500mとし計測を行った。

結果は、3センサー中最も誤差が大きく、精度確保距離は概ね10m程度で、遠方へ行くほど誤差が増大した。原因

としては、遠方の到達距離を優先したため100m未満での音波出力と音波感度調整が不十分だった可能性がある。

(3) GeoSwathによる計測

当機器は、インターフェロメトリ方式を採用しており、複数の受波器を用いてビームの位相差から到来方向角度を正確に求める方式である。結果は、計測距離が54mまで計測精度を満たしており良好な結果であった。しかし、勾配変化の大きな地形等の計測データは計測誤差が増大する傾向を示した。

表-2 計測試験で使用した計測機器

形式	最大レンジ	周波数	スワ幅	特徴	計測結果	
					到達距離	計測精度 確保距離
SEABAT8125 (過年度より使用)	120m	455kHz	120度	クロスファンビーム方式、 フラットアレイ	119m	0~60m
SEABAT7101	500m	240kHz	150度	クロスファンビーム方式、 サークルアレイ	297m	0~10m
GeoSwath	190m	500kHz	240度	インターフェロメトリ方式	60m	0~50m

4.4.2 解析方法の検討

以上の試験結果から、SEABAT8125では計測精度は約60mが限界であり、ソーナーの方式が異なる他の機種はそれ以下であり、入射角の補正が要因ではなく、傾斜が遠方の誤差を生じさせているのは明かとなった。これにより、表-2の結果から、SEABAT8125の優位性を確認した。

計測距離が50m前後を過ぎると、フットプリントの拡大が顕著となり更に上方への浮き上がり現象から計測誤差は増加した。このときビームは、入射角が小さいため海底面にはフットプリントの端が当たっている状態である。また、遠方データは計測時間の増加に比例して取得率が上がっている。

こうした状況から、計測データのうちフットプリントの端側を採用する方法を考えた。以前から、計測したデータはメッシュ展開（1m×1m）し平均値を求める処理を行ってきたが、本試験においては計測距離50m以上の誤差縮小を目指して、各メッシュから最大水深の抽出を行った。

図-20はメッシュ展開後の各到達距離における計測誤差である。70mから80mにかけて計測精度を超えた誤差を生じているが、図-21における計測値の欠損区間の前後であり信頼性が低いと考えられる。

なお、欠損の原因は海底地形の形状に起因しており、影響のない場所では計測可能であったと考えられる。

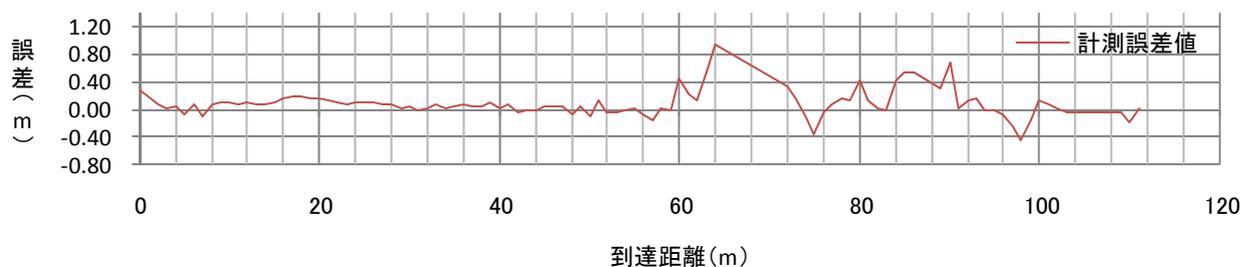


図-20 SEABAT8125による計測誤差値（180秒収録、メッシュ展開・最小値）

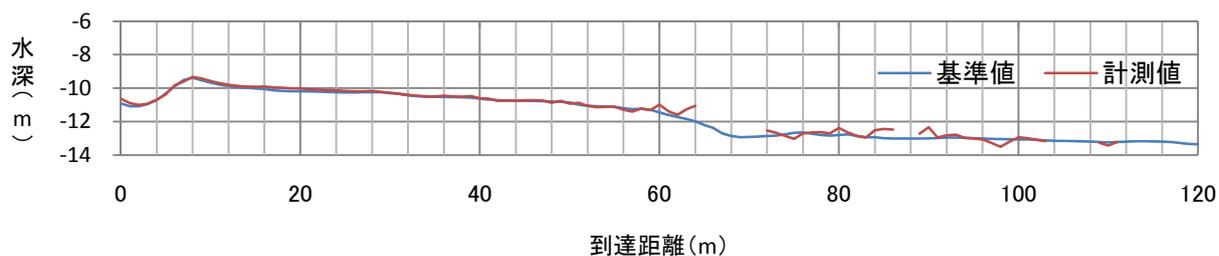


図-21 SEABAT8125による計測値と基準値の比較 (180秒収録、メッシュ展開・最小値)

#### 4.4.3 まとめ (簡易堆砂計測装置)

以上から、100m程度までの計測距離が必要な場合は、静止計測時間を120～180秒程度確保し、計測データについてはメッシュ展開し最小値を採用することで到達距離50m以上において効果的であり、これらにより100mまでの計測実現性が高いと考えられる。

#### 4.5 海水下面計測手法の検討

海氷が海域等へ及ぼす影響を把握するため、海水下面計測手法の検討を行った。また、潜水士が行なっているアイスブーム設置期間中の点検作業について、効率的な点検手法の検討を行った。

##### 4.5.1 海水下面計測 (平成 21 年度)

通常の深浅計測では、ソーナーヘッドを海底側に向け計測を行うが、浮遊する海水下面形状を計測するため、ソーナーヘッドを上方へ向けて計測を行った。この方法から、計測時の機器設定や取得したデータの確認を行った。

当初、サロマ湖湖口に設置されたアイスブームに捕捉された流氷を対象に計測する予定であったが、平成 21 年度は流氷が接岸せず、近隣漁港内の結氷下面を対象に計測を行った (写真-17)。



写真-17 海水下計測状況

十分に捉えることが可能であったが、20m 程度以降はビームの入射角が鋭角となり計測されなかった (図-22)。

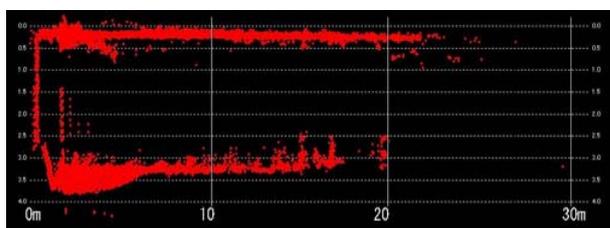


図-22 海水下計測データ (水深 2.5m より計測)

##### 4.5.2 水中撮影試験

アイスブーム設置期間中における潜水点検の効率化や安全性向上を目的として、水中カメラによる撮影試験を行った。アイスブームは1 スパン 110m 程度で全 13 スパン設置され、更に、湖口正面に位置するスパンは、下部にチェーン等によるネットで流氷を捕捉するようになっている。

撮影方法は、水中カメラを取り付けたポールを舷側に取り付け、アイスブームから 2～3m 離れて低速 (1～2kt 程度) で撮影を行った。その結果、ロープやチェーンを確認することが可能であった (写真-18)。



写真-18 アイスブーム水中画像

計測結果から、水面付近に平面状に広がる結氷下面を

5.4 結氷する港湾に対応する  
水中構造物点検技術に関する技術開発

4.5.3 海水下面計測（平成22年度）

平成22年度は、陸上からマルチビーム測深機（SEABAT8125）のソーナーヘッドを水深7.0mまで垂下させ、上方へ60度傾けた状態でソーナーヘッドを水平回転させ海水下面の形状を計測した（図-23、写真-19）。

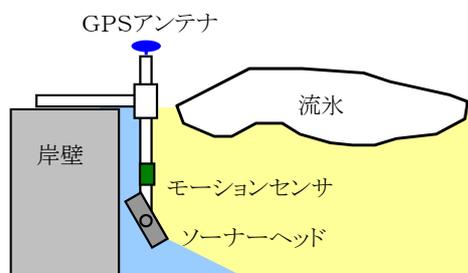


図-23 計測方法



写真-19 結氷状況及び海水下計測状況

計測結果から、計測した海水下の断面と回収した海氷の形状（幅約2.8m）を比較し、海面下の形状をマルチビーム測深機（SEABAT8125）で捉えることが可能であることを実証した（図-24、図-25）。



図-24 計測した海水断面（上）、回収した海氷（下）

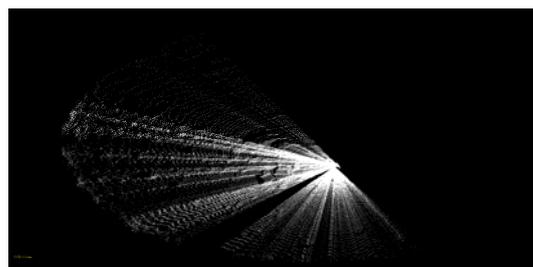


図-25 3次元表示データ（120mレンジ）

5. まとめ

港湾構造物水中部劣化診断装置の開発については、3カ年の現地試験を通して、各計測センサーを使用した取得データの解析手法を確立し、全体システムの性能要件を作成した。また、港湾施設における本技術の現場適合性を確認している。今後は、河川・ダム分野など、他分野での展開も望まれる。

鋼矢板式岸壁点検装置の開発では、陸上からSH波（探傷）、SV波（肉厚計測）による計測が可能になったことで、潜水土に頼らないで、腐食等の有無と肉厚計測値から矢板の劣化状況把握が可能となった。

簡易堆砂計測装置の開発では、本計測では、マルチビーム測深機（SEABAT8125）の計測値をメッシュ展開し、その範囲の最小値を採用することで、100m付近での計測精度が $\pm 0.25\text{m}$ の範囲内となり、メッシュ展開（最小値）による解析により100m迄の精度確保が期待できる。

また、海水下面計測では、実物との比較から流水の下面形状が計測可能であることを確認した。

今後は、各点検・計測技術の開発を更に進めるとともに、港湾及び漁港管理者による施設の機能保全に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 北海道開発局：平成18年度港湾構造物水中部劣化診断業務報告書
- 2) 北海道開発局：平成19年度港湾構造物水中部劣化診断業務報告書