

## 14.7 寒冷海域における沿岸施設の水中調査技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：技術開発調整監付（寒地機械技術）

研究担当者：大槻敏行、山口和哉、田所 登、  
岸 寛人

### 【要旨】

寒冷海域においては、近年の気候変動により海氷が減少することで、海氷の運動が活発化し、水中構造物の劣化を促進させることが懸念されている。劣化損傷が進行した水中構造物では、中詰め材の吸い出しやこれに起因する陥没事故などが発生する危険性がある。また、水中構造物に損傷を与える可能性がある海氷の形状や挙動はあまり把握されていない。本研究では、水中構造物内部の劣化・損傷状況探査および可視化技術と、水中構造物に影響を及ぼす海氷の形状を計測する技術を開発した。水中構造物内部の劣化・損傷状況探査および可視化技術については、超音波のパラメトリック送信技術を利用したパラメトリックプローブの仕様を検討し、作製した。パラメトリックプローブを用いて室内試験水路および実物大河川実験施設で試験を実施し、パラメトリックプローブから送信する音波が鋼矢板を透過し、背後のターゲットや模擬空洞壁面までの距離を計測できることを確認した。また、パラメトリックプローブを用いた計測を効率的に行うための計測システムおよび計測データを簡易な操作で解析するソフトウェアを作製した。沿岸施設に近づく海氷の計測技術については、マルチビームソナーを海底に設置し、回転させることで、海底から海氷下面形状を計測する装置を作製した。この装置を用いて現地試験を実施し、海氷下面形状データを取得できることを確認した。また、得られたデータから海氷下面形状とその移動量を把握するソフトウェアを作製した。

キーワード：水中構造物内部状況、点検技術、パラメトリックプローブ、海氷計測技術

### 1. はじめに

寒冷海域においては、近年の気候変動により海氷が減少することで、海氷の運動が活発化し、水中構造物の劣化を促進させることが懸念されている。劣化損傷が進行した水中構造物では、中詰め材の吸い出しやこれに起因する陥没事故などが発生する危険性がある。また、建設後50年を経過する全国の岸壁は2013年には全体の約8%であったが、2023年には約32%、更に2033年には約58%と急速に増加することから、今後一斉に補修や改修が必要となることが予想されている<sup>1)</sup>。近年では、鋼矢板岸壁の損傷による裏込め土の吸い出しや、それに伴う岸壁内部の空洞化により路面が陥没するなどの事例も発生している。

沿岸域を継続的に利用するためには、沿岸施設の安全性の向上や効率的な保全対策が必要であり、従前の事後的維持管理から予防保全的管理へと転換し、戦略的な維持管理による機能の保持が求められている。

一方、現状の水中構造物の点検調査は、主に潜水士により実施されているが、人材不足やコスト高などの課題があ

る。また、効率的に水中で構造物の内部探査を行う技術は現在なく、管理者の要望は高い。

これらの課題に対して本研究では、水中構造物内部の劣化・損傷状況探査および可視化技術と、水中構造物に影響を及ぼす海氷の形状を計測する技術の開発に取り組んだ。

なお、本研究は、東京大学生産技術研究所との共同研究（研究期間：平成 23～25 年度、研究題目：「沿岸施設におけるコンクリート構造物内部の空洞化診断および水中計測技術に関する研究」、および研究期間：平成 26～27 年度、研究題目：「水中構造物内部状況の画像化点検技術に関する研究」）にて実施した。

## 2. 水中構造物内部の劣化・損傷状況探査および可視化技術の開発

### 2.1 水中構造物内部空洞探査手法の検討

現在、岸壁エプロン下部の点検には、非破壊で路面下空洞探査を行える地中レーダ探査法が採用されている<sup>2)</sup>。

地中レーダ探査法とは、地上から地中に向けて電磁波を照射し、空洞などからの反射波を測定することで地中の状況を推定・把握する手法である。しかし、電磁波は水分を多く含んだ地中では減衰するため、水中構造物の海

水面以下では地中レーダによる探査は困難となる<sup>3) 4)</sup>。この課題に対して、超音波のパラメトリック送信技術を利用した水中構造物内部点検手法の開発に取り組んだ。通常、音波は「周波数が高いほど指向性が良く透過性が低い」、「周波数が低いほど指向性が悪く透過性が高い」という性質を持っている(図-1)。このため周波数が高い音波は、物体表面の細かい形状の計測に向いており、海底の地形を計測する深浅測量や濁った水中でも撮影可能な音響カメラなどに利用されている。一方、周波数が低い音波は透過性が良いため、海底下数十mの地層探査などに利用されている。パラメトリック送信技術は、わずかに周波数が異なる2つの音波(1次波)を同時に送信することで発生する差音(2次波)を利用する技術である。2次波は透過性および指向性に優れているという性質を持っており、海底下地層探査技術として利用されている<sup>5) 6)</sup>。この技術を応用して、海中から水中構造物内部の点検を行う手法を検討した(図-2)。

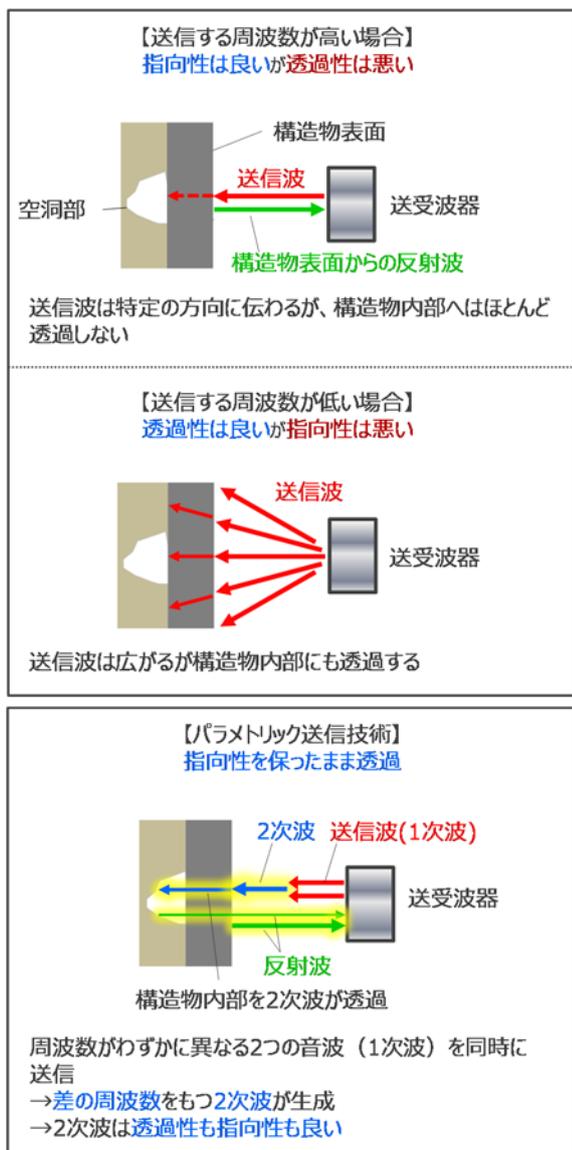


図-1 周波数による音波の性質の違い

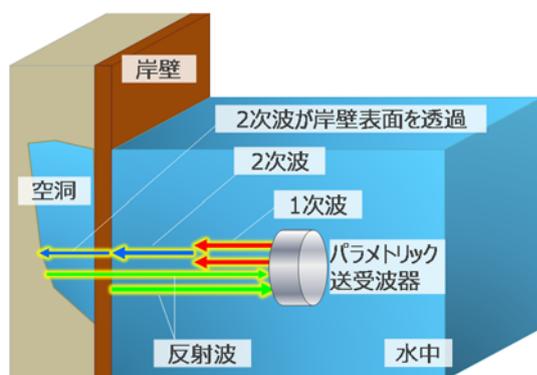


図-2 計測方法

## 2.2 パラメトリック送信技術の利用可能性確認試験

市販のパラメトリックソナー(SES2000、Innomar社、図-3)を使用し、パラメトリック送信技術の内部空洞探査への有効性を確認した。

### 2.2.1 試験方法

岸壁エプロン下にある既知の空洞部を計測するため、エプロン上から SES2000 を下に向け音波を送信した(図-4)。SES2000 は水中で使用する機器であるため、海水を満たしたドラム缶の上部中央にソナーを下向きに設置した。また、SES2000 から送信される音波の経路上に空気層があると、音波は空気層で反射し、その先には伝搬しない。そのため散水したアスファルト上に布を敷き、さらに散水し、その上に海水を満たしたビニールプールを置き、その中にドラム缶を設置した(図-5)。1次波中心周波数は100kHzであり、2次波周波数は10、8、6、5、4kHzを使用し計測を行った。

### 2.2.2 試験結果

図-6 に試験結果を示す。図-6 上は健全箇所、下は空洞箇所計測した結果である。縦軸はソナーからの距離を表している。各周波数について100ping分(音波の送信回数)のデータを表示している。反射波が強いほど白く、弱いほど黒く表示しており、縦方向の緑線はその平均値である。

図-6 において、最初に反射強度の強い箇所が各周波数の同位置に現れており、これはドラム缶およびアスファルト上面での反射である。図-6、上方の赤い点線は音波の伝搬速度を1500m/s(水中)とした場合のドラム缶

底位置であり、ソナーからの距離は0.77mとなり、反射強度の強い箇所とほぼ一致する。それより下方は地中となるため、実際には音波の伝搬速度が変化（アスファルト、地中での音の伝搬速度は水中の倍程度になることを考慮する必要がある）するが、本解析では音波の反射強度の有無に着目しているため、音波の伝搬速度は1500m/sで換算している。ドラム缶底で反射した音波が再び水面で反射することで現れる多重反射も分布図中1.5m付近に確認できる。最も明瞭である10kHzの図について、健全箇所と空洞箇所の両図を比較すると、空洞箇所の図だけに図中赤丸部の反射が見えており、この部分が地中の空洞を表している。

以上により、パラメトリック送信技術が内部空洞探査へ利用可能であることを確認した。しかしSES2000は既定の周波数や波形しか使用できず、取得できる情報が限られるという制約があることから、水中構造物に適したソナーとしてパラメトリック音響プローブ（以下、音響プローブという）を試作した。



図-3 SES2000（送受波器）

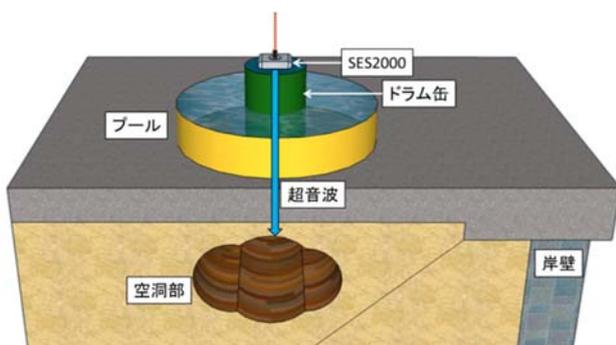


図-4 計測方法



図-5 試験状況

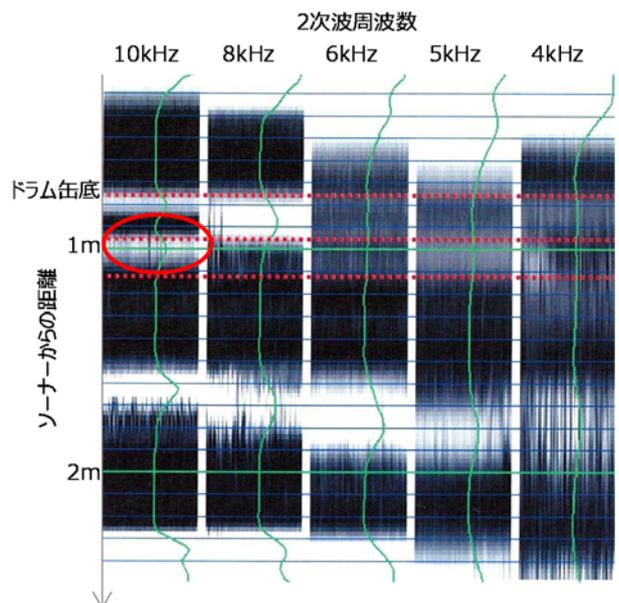
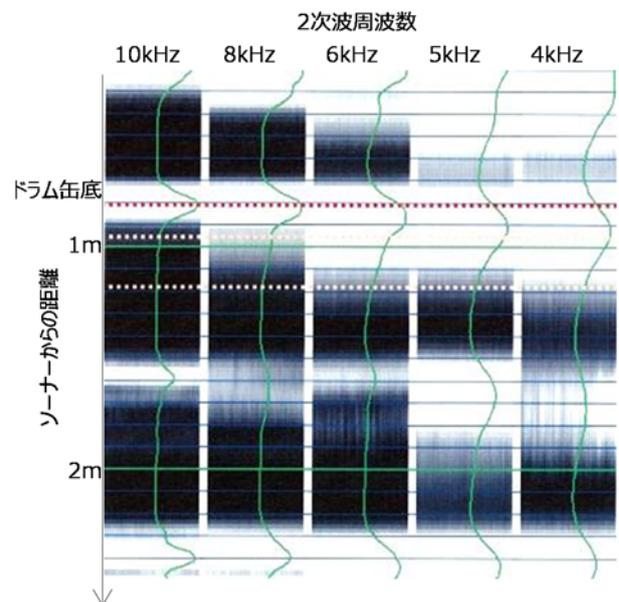


図-6 計測方法（上：健全箇所、下：空洞箇所）

## 2.3 音響プローブの性能試験

### 2.3.1 音響プローブの試作

試作した音響プローブは、60本の送信用プローブ（周波数帯域 100kHz±10kHz）、33本の受信用プローブ（周波数帯域 1kHz-170kHz）と保持具で構成されている（図-7 上）。送信用プローブおよび受信用プローブは、保持具（外形 240 mm）の 200 mm 円内に、外側から同心円状に交互に配置されており、送信用プローブは図-7 下に示す色分けのように 4 つのチャンネルに分かれている。保持具は、曲率 1500 mm および曲率 2000 mm の 2 種類を製作した。その他は、取り付け用のコネクタ、ケーブルを保護するための保護カバーで構成されている。保持具の曲率 R に合わせて、送信用プローブおよび受信用プローブを配置することにより、送信波を音響プローブから曲率 R 離れた位置に集束させる。60本の送信用プローブを、高電圧の電気信号により同時励振させることで、強力な超音波を水中に放出させ、曲率 R の位置において送信波を絞ることで、エネルギー密度を高め、試験対象物背後からの反射波を 33本の受信用プローブで受信する。また、各チャンネルから送信する音波の位相を制御することにより、フォーカス距離を 1.0 m～3.0 m まで変更することができる。

この音響プローブの音響透過試験は、東京大学生産技術研究所浅田研究室の試験水槽（3500mm×1800mm×700mm、図-8）で実施した。試験は、音響プローブ専用に開発された、信号送受信制御装置、パワーアンプを用いて行った。

### 2.3.2 試験方法

音響プローブおよびハイドロフォン（超音波測定用の水中マイク）の配置図を図-9 に示す。ターゲットを音響プローブとハイドロフォンの中心を結ぶ線に対し直交方向に移動させながら波形を取得した。2次波周波数は 5kHz、8kHz、10kHz、12kHz、15kHz、送波周期は 1s として、ターゲットを 15ping ごとに 1cm 移動させた。

### 2.3.3 試験結果

2次波周波数 10kHz の計測結果を図-10 に示す。灰色の線が水中のみを伝搬した音波の受信波形、黒色の線が水中とコンクリートを透過した音波の受信波形を表している。点線枠で囲んだ部分を拡大したものが下段の図であるが、受信波形の到達時間が、水中のみを伝搬した場合よりコンクリートを透過した場合の方が 4分の1 波長ほど早くなっている。これは水中よりコンクリート中の方が、音速が速いためである。また、振幅の最大値を比較すると、水中のみを伝搬した場合は 1023mV、ターゲ

ットを透過した場合は 332mV であり、3分の1 程度まで減衰することがわかった。

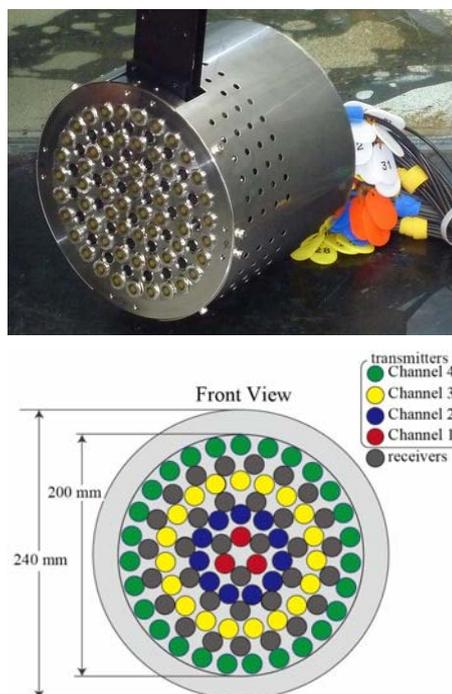


図-7 音響プローブ（上）と送受信プローブ配置図（下）



図-8 試験水槽における試験状況

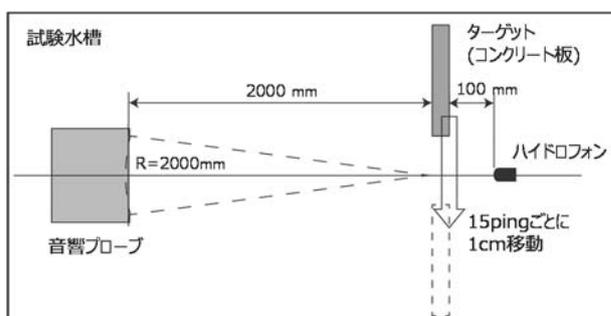


図-9 透過試験配置図

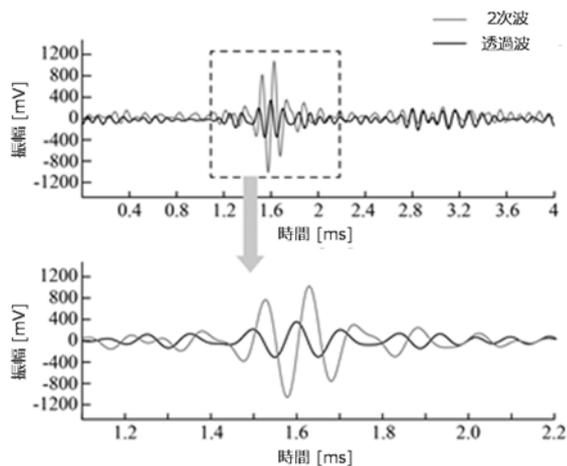


図-10 透過波試験結果

## 2. 4 音響プローブの改良

2.3 節のとおり、音響プローブの性能試験を実施したが、本装置では送信音圧が小さく、2次波がよく生成されないため透過性能が低いことがわかった。原因としては、個々の素子間のインピーダンスの違いにより音圧を高められないことが考えられた。そこで、透過性能を高めるため大音圧の音波を生成できるパラメトリックプローブの仕様を検討し改良した。

パラメトリックプローブ(図-11)は、コンポジット製法で製作された送受一体型で、同心円状に5つの送信チャンネルと5つの受信チャンネルが配置されたアニュラレイ送受波器である。焦点距離が標準の状態では1.5mとなるように素子が配置されており、パラメトリックプローブ前面はわずかに凹面状になっている。またチャンネルごとの送波タイミングを電子的に制御することで焦点距離を±0.5mの範囲で変更することができる。1次波の中心周波数は100kHzであり、2次波周波数は5~20kHzを使用できる。



図-11 パラメトリックプローブ

## 2. 5 室内試験水路におけるパラメトリックプローブの透過性能確認試験

### 2.5.1 試験方法

寒地土木研究所の室内試験水路(長さ85m、幅1.6m、深さ3m)を使用し、パラメトリックプローブから送信する音波が鋼矢板を透過するか確認試験を行った。試験方法および試験状況を図-12、13にそれぞれ示す。水路底面から水面までの深さは約1.1mであり、パラメトリックプローブの中心が水路幅方向の中央、水面から0.5mの深さになるよう単管で固定した。次にパラメトリックプローブ前面から1mの位置に鋼矢板(Ⅱw型、有効幅600mm、有効高さ130mm、厚さ10.3mm)を設置した。その際、ターゲットからの反射波が鋼矢板の周囲を回り込まないように、鋼矢板の両側に木板を設置し、水路を塞いだ。そしてパラメトリックプローブから1.5mの位置にターゲットを沈め、1.5m→1m→1.5mと移動させ、その様子を計測した。強い反射を得られるよう、ターゲットにはEVA樹脂板(幅600mm、長さ845mm、厚さ20mm、図-14)を使用した。

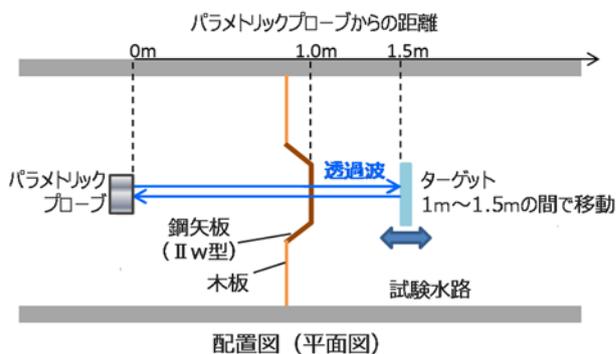


図-12 試験方法概略図

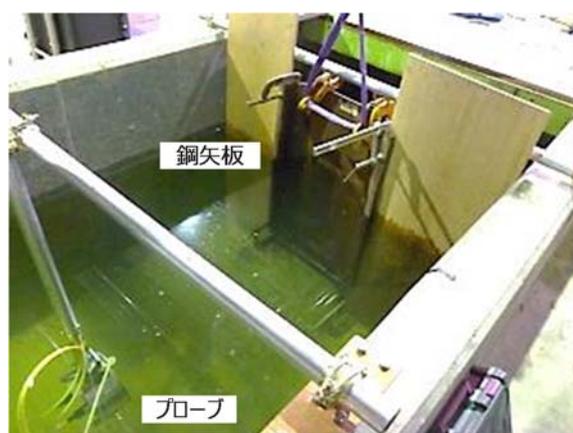


図-13 試験状況

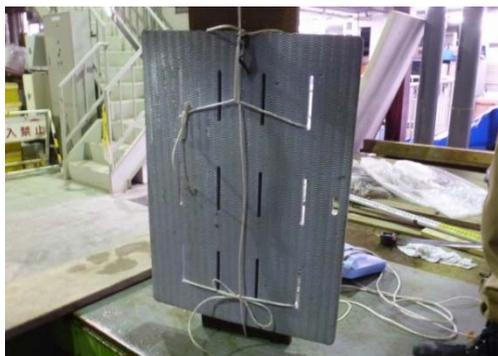


図-14 ターゲット

### 2.5.2 試験結果

図-15 に試験結果を示す。2 次波周波数は 5kHz である。まずパラメトリックプローブから 1m の位置に強い反射が見えている。これは鋼矢板の表面からの反射である。次に、図中 A の位置から反射が現れ、時間とともに 1.5m から 1m まで近づき、再び 1.5m まで離れ、B の位置で消えていることがわかる。これが鋼矢板の後ろで前後に移動させたターゲットからの反射である。A の位置で現れるのは計測を開始してからターゲットを水中（パラメトリックプローブの音軸上）に投入したため、B の位置で消えるのはターゲットを水上に回収したためである。また、ターゲットからの反射より遠い位置に複数の線が見えている。この内、2m→1m→2m および 2.5m→1m→2.5m と移動している線は鋼矢板とターゲットの間で発生した多重反射である。また、機械振動も含まれていると考えられる。

以上により、パラメトリックプローブから送信する音波が鋼矢板を透過し、背後のターゲットまでの距離を計測できることを確認した。

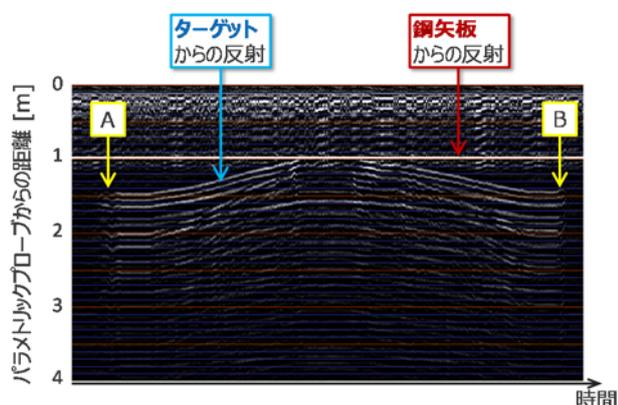


図-15 試験結果

## 2. 6 実物大河川実験施設における試験

### 2.6.1 試験方法

2.5 節の試験から、パラメトリック送受波器から送信する超音波で鋼矢板背後の物体までの距離を計測できることを確認した。

本装置を用いて北海道内の港にて現地計測試験を行ったところ、岸壁内部からの反射を捉えることができた<sup>7)</sup>。しかし、供用されている港では、実際に内部がどのような状況であるか、計測結果と比較して確認することができない。そこで、鋼矢板岸壁背後に空洞が発生した状況を模擬し、その空洞の大きさを計測する方法について検討し、試験を実施した。

計測方法を図-16 に示す。バックホウのバケットに計測機器昇降装置を固定し、そこにパラメトリック送受波器、パラメトリック送受波器の動揺を計測するモーションセンサ (DMS-05、Teledyne TSS 社)、位置情報を取得する GNSS 移動局アンテナ (SPS851、Trimble 社) を取り付けた。位置情報の計測は RTK 測位により行った。データ収集用 PC や GNSS 受信機本体等はバックホウ上部の旋回体側面に取り付けた計測機器収納ボックス内に固定した。各計測機器のケーブルはバックホウのアームに沿わせて、計測機器収納ボックスまで配線した。計測機器昇降装置は電動ラックピニオン式で、可動範囲は 3m である。

試験は、国土交通省北海道開発局帯広開発建設部が有する実物大河川実験施設である十勝川千代田実験水路にて実施した。水路の護岸の一部が鋼矢板で構成されており、その陸側に穴を掘り、水を貯めることで模擬空洞を作製し、鋼矢板岸壁背後に空洞がある状況を再現した(図-17)。模擬空洞への注水は水中ポンプを用いて水路から水を汲み上げた。模擬空洞の大きさは、計測開始時で奥行き(鋼矢板からの垂直距離)約 0.9m、深さ(バックホウが置かれた地表面を 0m とする。後出の「深さ」もすべて同義とする)約 1.1m であったが、注水により穴の周囲が崩れ、計測終了時には奥行き約 1m、深さ約 0.9m となった。この模擬空洞がある位置において、バックホウを停止させた状態で、パラメトリック送受波器を深さ約 0.35m の位置から深さ約 1.75m まで降下させて計測を行った。図-16 中の d はパラメトリック送受波器の昇降範囲の上端から模擬空洞の底部までの鉛直距離であり、計測開始時は約 0.75m、計測終了時は約 0.55m であった。パラメトリック送受波器から鋼矢板までの水平距離は約 1m とした。計測に影響を与えないよう、計測中はポンプを停止した。実験時の水路内の流速は 3m/s

程度であった。

### 2.6.2 試験結果

計測結果例を図-18 に示す。2 次波周波数は 8kHz である。まずパラメトリック送受波器から約 1.1m の位置に強い反射が見えており、鋼矢板の表面を表している。次に、パラメトリック送受波器からの距離が約 2.1m (鋼矢板からの距離約 1m) の位置に、深さ 0.35m~0.99m の間で反射があり、これは鋼矢板より遠い位置からの反射を表している。この反射について、図-16 の模擬空洞の奥行きおよび深さと比較する。模擬空洞の奥行きは計測時間中に約 0.9m から 1m に変化しており、図-18 の計測結果の反射の位置とおおよそ一致する。また模擬空洞の深さも約 1.1m から 0.9m に変化しているが、図-18 の反射の下端は深さ 0.99m であり、模擬空洞の深さの変化の範囲に含まれている。以上から、この反射は模擬空洞の奥側の壁面であると言える。模擬空洞の壁面の反射が深くなるにつれ遠ざかっているのは、水中ポンプにより注水する過程で壁面の洗掘が起こりえぐられたことなどが考えられるが、計測終了までにさらに壁面の崩壊が進んだため、詳細な形状は確認できなかった。



図-17 模擬空洞 (上) と試験状況 (下)

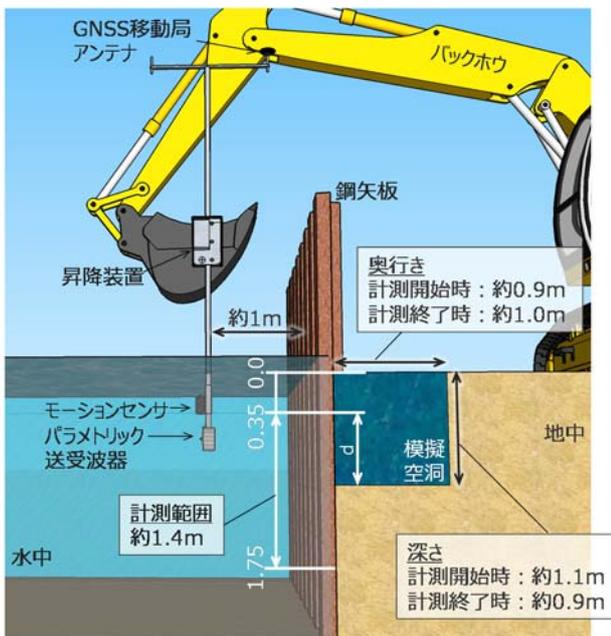


図-16 計測方法概略図

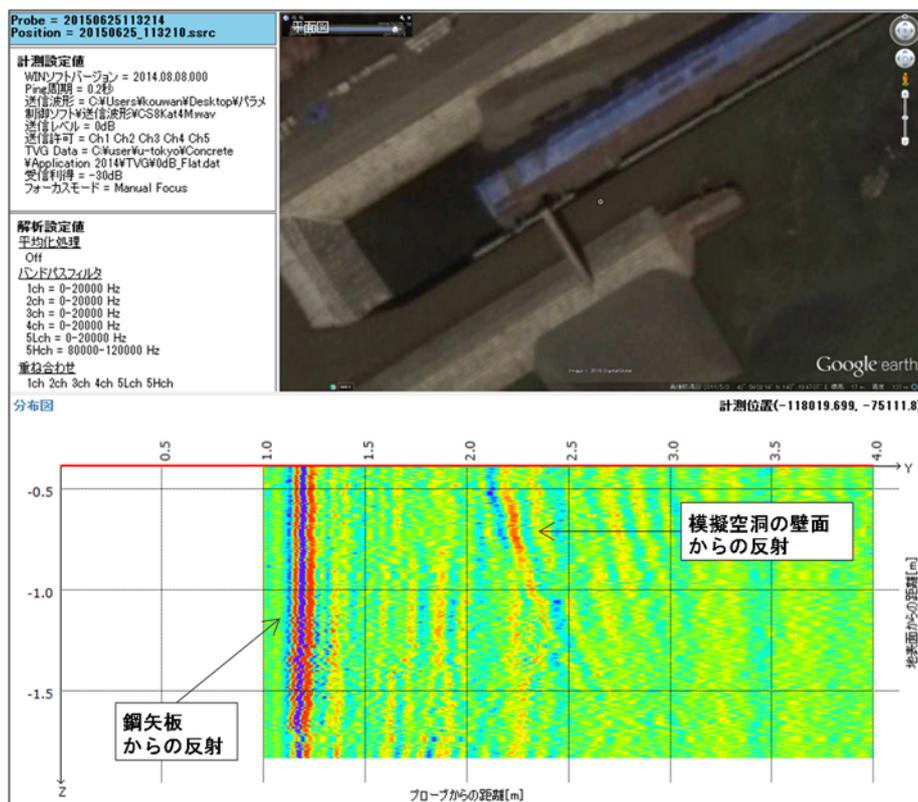


図-18 模擬空洞計測結果例

## 2.7 計測システムおよびデータ解析ソフトウェアの作製

パラメトリックプローブによる水中構造物の調査では、GNSS やモーションセンサなど多数の機器を同時に使用する必要があり、機器の設置や配線が煩雑であり計測開始までに時間がかかる。また、各計測機器の設定が複雑であり制御ソフトウェアも異なるため、操作に習熟していないと設定ミスやデータ欠測が生じる可能性がある。さらに、実際の計測現場では計測できる時間は限られているため、短時間で確実に設定作業を行う必要がある。

そこで、各機器の設置、設定および計測を簡易な操作で行うことを可能とするシステムについて、検討、作製した。また、パラメトリックプローブにより取得したデータにバンドパスフィルタ処理等を行い、GNSS およびモーションセンサにより得られた位置・動揺データと統合し、表示する解析ソフトウェアを作製した (図-18)。

## 2.8 まとめ

パラメトリックプローブの作製、パラメトリックプローブによる計測を簡易に実施するためのシステムの作製、計測されたデータを解析、表示するソフトウェアの作製を行い、岸壁内部状況の探査および可視化技術を開発した。

## 3. 音響計測技術を利用した沿岸施設に近づく海水の計測技術の開発

水中構造物と海水の接触、衝突による劣化や損傷を評価するには、海水の挙動や伝達荷重などを推定する手法の確立が必要である<sup>8)</sup>。伝達荷重は海水に風や水流などの流体力が作用し、海水塊を通じて施設に作用する力であるが、この流体力はせん断力と形状抵抗力からなり、海水の移動速度に依存する<sup>9)</sup> ことから、海水の挙動を把握できれば、水中構造物の劣化や損傷の評価にとっての基礎データとすることができる。沿岸施設に対して海水が及ぼす影響を把握するための基礎的なデータを得るため、港内の海水を陸上から効率的に計測する手法を検討し、実海域において検証試験を行った。

### 3.1 計測手法の検討

港内の海水の形状・挙動を効率的に計測する手法の候補として、深淺測量に利用されているマルチビームソナーおよびサイドスキャン機能付き魚群探知機を選定して、フィールド試験を実施し、海水下面形状計測への適用性を検討した。その結果、サイドスキャン機能付き魚群探知機はデータ出力形式が非公開で数値化が困難であり、また計測対象物周辺に岸壁のような垂直な構造物等がある場合、構造物等からの信号と海水からの信号が重

なって受信され分離できないことから、海氷下面形状計測には適さないことがわかった。一方、マルチビームソナーは多数の鋭い音響ビームを扇状に発信（送波ファンビーム）することで、一度に多数点の水深を計測し、3次元点群データを取得する装置であり、海氷の形状計測に活用が可能であることを確認した。よって、マルチビームソナーを用いて、海氷下面形状を計測する手法について検討を行った。

通常の深淺測量では送波ファンビームの中心が真下に向くよう設置し、移動することで海底地形を計測する。しかし、本研究では海氷下面の形状を計測することから、マルチビームソナーを海底に設置し、送波ファンビームの中心を真上から60度傾け、鉛直軸周りに180度回転させ計測する手法を考案した（図-19）。

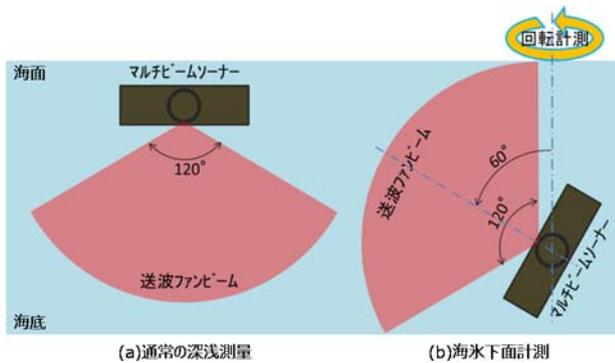


図-19 マルチビームソナー設置向き

### 3.2 手動回転計測

#### 3.2.1 試験方法

試験方法を図-20に示す。マルチビームソナーほか計測機器を単管（アルミ製、径45mm）に取り付け（図-21）、岸壁から海底付近まで垂下し、手動で鉛直軸周りに回転させ、計測を行った。マルチビームソナーはSeabat8125（Teledyne Reson社）を使用した。試験は北海道斜里町ウトロ漁港（図-22）にて実施した。

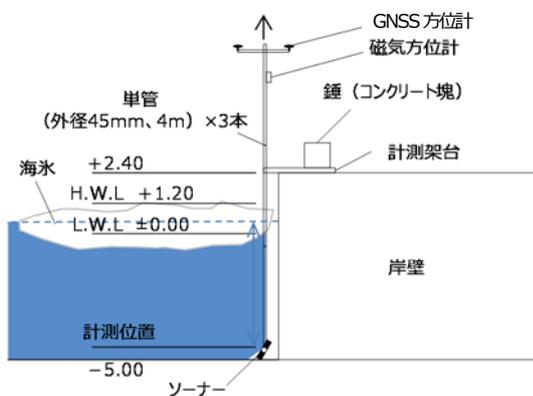


図-20 試験方法

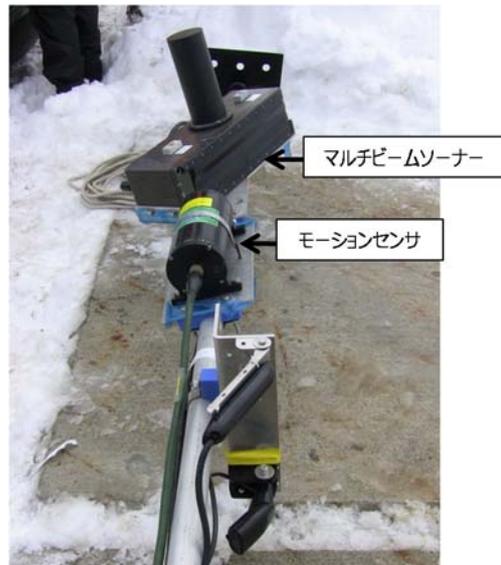


図-21 計測機器取付状況



図-22 ウトロ漁港位置図（国土地理院ホームページ、地理院地図（電子国土Web）をもとに作成）

#### 3.2.2 試験結果

マルチビームソナーを使用して海氷下面の凹凸形状の3次元データを取得した。計測結果を図-23に示す。計測点の半径方向の分布に着目すると、回転中心から100m程度までデータを取得できているものの、回転中心から遠くなるほどデータ密度が低くなっており、回転中心から遠い位置では凹凸形状の把握が困難であった。使用したマルチビームソナーは図-19に示した120度の範囲で240本の音響ビームを放射するが、各ビームは0.5度間隔で放射される。そのため遠距離になるほどデータ密度が低くなり、上述の結果となった。

計測時、港内は結氷していたため、水平面上での流水の移動が確認できなかった。そこで、潮位変動による海氷の上下動を3次元データより確認した（図-24）。計測開始時と40分後に計測されたデータを比較すると、50

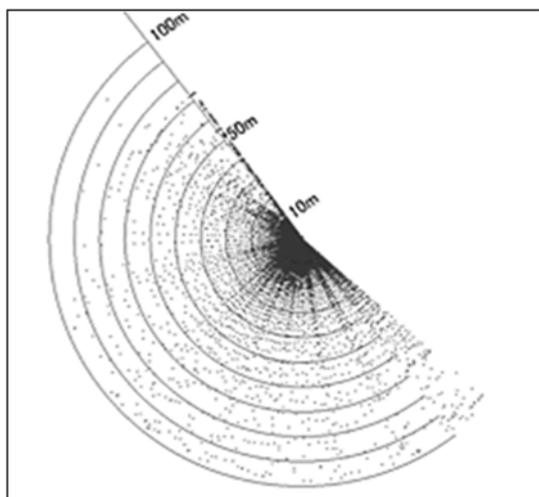


図-23 海氷下面形状の3次元データ

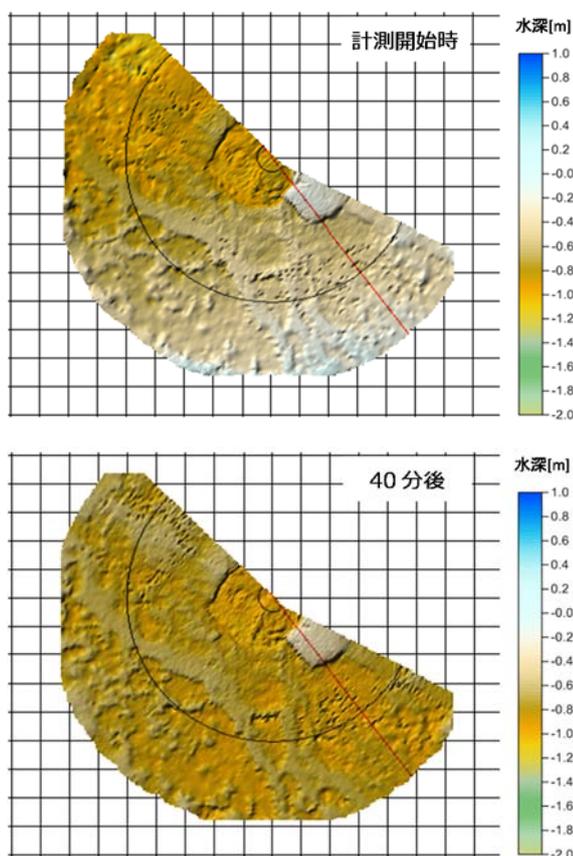


図-24 潮位変化による海氷の上下動

cm程度の潮位変化による上下動を確認できた。

### 3.3 電動回転計測

3.2節の手動回転計測では、海底付近にソーナーヘッドを設置するために、岸壁から張り出した計測台からソーナーヘッドと補助計測機器を取り付けた単管を海中へ下ろし、手動回転により計測を行い、データが取得可能

であることを確認した。しかし海氷を計測するためには、図-25に示すような、多数の海氷塊が浮遊する海中に計測装置を下ろす必要があり、単管に海氷塊が衝突し破損することが想定された。また、図-23に示すようにデータ密度が高い部分と低い部分があることがわかる。これはマルチビームソーナーの回転を手動で行ったことにより、回転速度が一樣にならず、回転方向のデータ密度にムラが生じたためである。

これらを解決するために、電動パンチルト装置にソーナーヘッドを取り付け海底に設置し計測する方法を検討し、改良した。

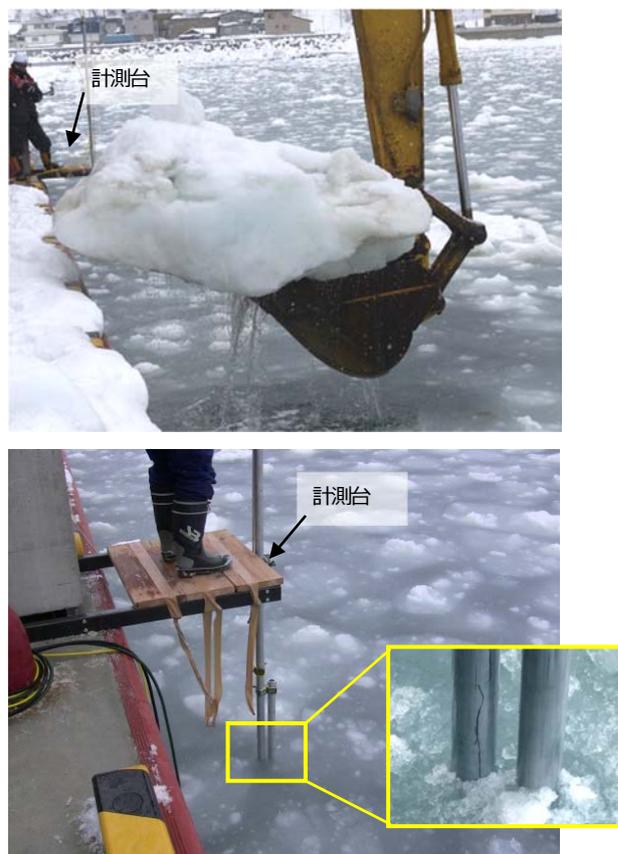


図-25 計測台付近で採取した海氷(上)と計測状況(下)

#### 3.3.1 計測装置改良

計測装置はマルチビームソーナー (Seabat8125、Teledyne Reson 社) のソーナーヘッド、パンチルト装置およびその他計測機器から成り、これらが水流に耐えられるようにコンクリート製の架台に固定した (図-26)。全ての計測機器は4つのキャスタが付いたターンテーブル上に固定されており、このキャスタが計測機器の重量を支えている。そのため、パンチルト装置は鉛直方向の荷重を受けずに回転することができる。各機器の電源および制御ケーブルは、陸上から海中部の機器へ接続して

いるため、海氷の衝突から保護できる構造とした。計測装置はワイヤーロープで吊り下げて海底に設置する。今回の計測箇所は海底面は捨石を敷き詰めた基礎マウンドであったが、設計基準上の不陸は5cm以下であり、この程度であれば海底への設置時に架台がわずかに傾斜することがあっても計測は可能である。ケーブル保護用架台は上部工に据え付け、コンクリートブロックを載せて固定した。

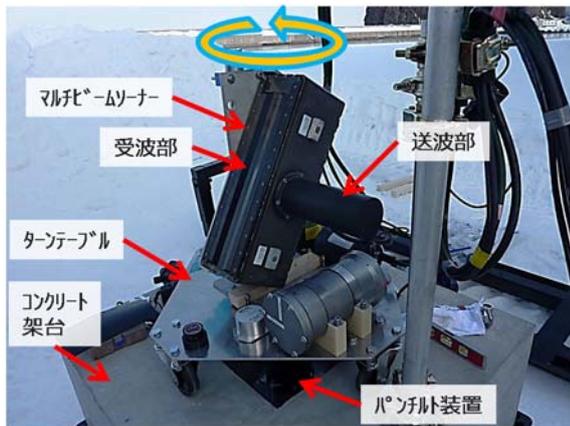


図-26 計測装置

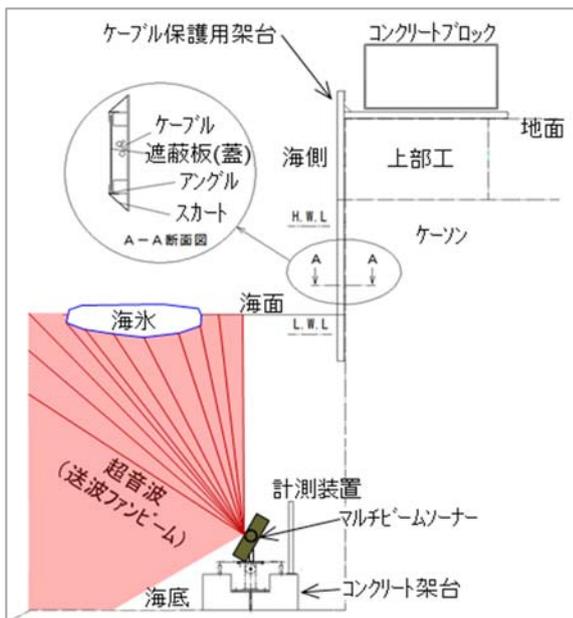


図-27 試験方法

### 3.3.2 試験方法

本装置を用いて、3.2 節と同様の試験を実施した (図-27)。

試験は、海氷が動き始めてから5分毎に計測し、港内の海氷がなくなるまで、または、海氷の動きが停止したと判断されるまで行った。データ取得時の回転速度は

1deg/s (初期位置 (岸壁を背にしたときに送波ファンビームが右に出る方向) から反時計回りに180度回転するまでデータを取得、その後初期位置まで戻す間は4deg/sで時計回りに回転) とした。海中の音波の伝搬速度を補正するため、音速度計により音速を計測した。

データ処理には統合水路測量ソフトウェア (HYPACK、HYPACK 社) を使用した。生データから明確な多重反射やノイズ等を除去することで、点群データ (X、Y、Z 座標) を作成し、計測方向の把握にはパンチルト装置より出力された回転角のデータを使用した。

### 3.3.3 データ解析

#### (1) 海水下面形状の把握

取得した海氷下面形状の点群データの一部を図-28に示す。計測期間中、港内の海氷塊は少なかったが、手動回転計測に替わり、パンチルト装置を使用したことで回転角速度が一定となり、均一な密度のデータを取得できていることがわかる。

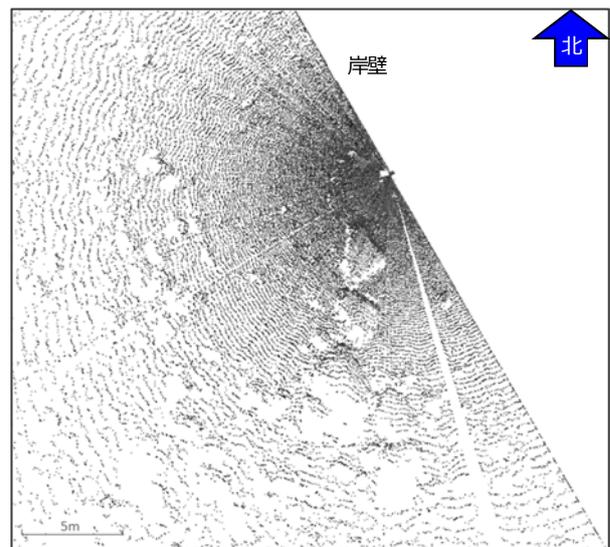


図-28 海水下面の凹凸形状

#### (2) 海氷の挙動の把握

一定時間間隔で計測した海氷の形状および位置座標の変化から、海氷の体積および移動速度を算出するソフトウェアを作製し、解析を行った。解析に使用したデータは当日の11:52から55分間計測したものである。

まず、点群データから三角メッシュデータを作成した。海氷塊の断面形状は任意水深の水平断面であるが、比較的大きな断面積が得られる海面付近の断面とし、個々の海氷塊の外周形状を認識した (図-29)。このとき、時間変化する潮位 (計測中の潮位変動は約10cm) を考慮して補正を行った。この作業を各時刻に取得したデータに

対して行い、解析ソフトウェア上で時刻ごとにレイヤ化した。次に計測範囲内の特徴のある任意の海氷塊を抽出し、各海氷塊の中心の軌跡を求めた(図-30)。これにより各時間における位置の変化から、速度、方向が把握できることを確認した。

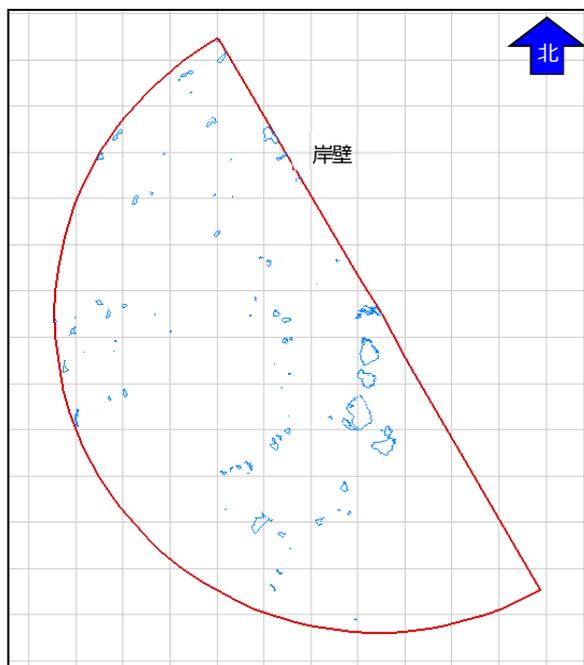


図-29 海氷断面の外周形状(赤枠は計測範囲)

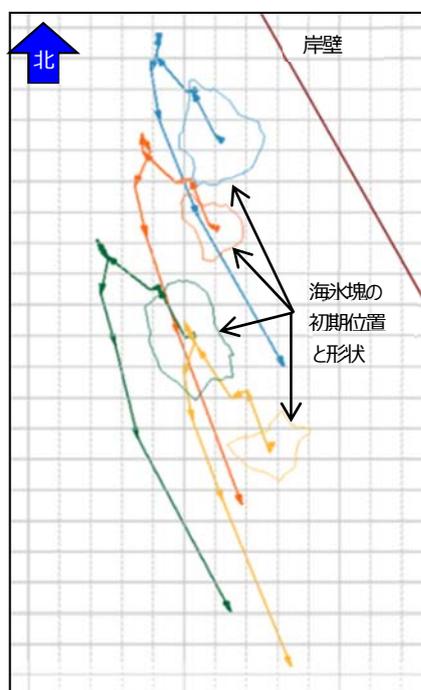


図-30 海氷塊の軌跡

### 3.4 適用範囲検証試験

回転計測装置の使用可能な回転速度、計測可能範囲について検証を行った。

#### 3.4.1 試験方法

模擬海氷として、枕木を長さ1m、幅0.6m、高さ0.4mの直方体に組んだものを使用した(図-31)。比重は海氷と同程度の0.9になるよう、比重の異なる2種の枕木を用いて調整した。

港内が全面結氷していたため、計測装置および模擬海氷を投入するために、計測装置投入位置から岸壁に沿って約23m、岸壁から海側に約4.5mの範囲で砕氷し、開水面を作製し、海側に約2mの位置(開水面のほぼ中央)に模擬海氷を停止させ計測した。



図-31 試験状況

#### 3.4.2 試験結果

##### (1) 半径方向および深さ方向分解能

図-32は回転中心付近に模擬海氷を浮遊させ、下面形状を計測したもので、上は平面図、下は深さ方向断面図である。左方に見える青い部分が海氷下面を表しており、赤および黄色い部分は砕氷によりできた開水面とそこに浮かぶ小さな氷である。中央右の水色部分が模擬海氷を表している。図中の白線と数値は寸法を表しており(単位:m)、図中左の白い輪は描画ソフトウェア(Fledermaus, QPS社)の画像回転用ハンドルである。平面図で模擬海氷が長さ約1m、幅約0.5mの長方形で表されている。深さ方向には約0.3m~0.4mで表されているが、模擬海氷の比重が約0.9、高さが0.4mであり、喫水は約0.36mとなることから、概ね正しく計測されている。

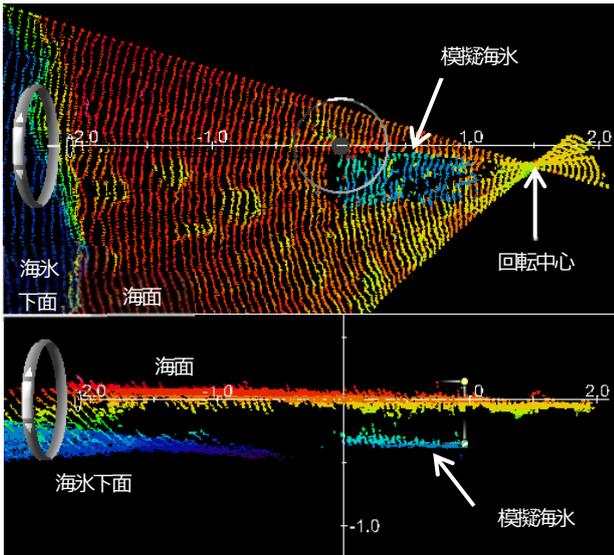


図-32 模擬海水下面計測結果（上：平面図、下：鉛直断面図）

(2) 回転装置回転速度

計測装置回転方向の分解能は、計測装置の回転速度と計測装置からターゲットまでの水平距離に依存する。図-33は回転速度 0.5deg/s および 4deg/s で 180 度回転させ計測したときのデータで、計測半径（レンジ）は 30m である。中央下の黒い部分は砕氷作業によりできた開水面であり、この箇所に装置を設置しており、回転計測のほぼ中心にあたる。両図を比較すると、特に中心から離れた部分では 0.5deg/s の方が 4deg/s よりも同心円状の点群がはっきりと見えており、これは 0.5deg/s のほうが密にデータが取れていることを表している。しかし回転方向と半径方向のデータ間隔を比較すると、回転速度 4deg/s の場合でも、回転方向のデータ間隔の方が半径方向のデータ間隔よりも密であることから、回転速度を下げて計測しても大幅な精度の向上は期待できない。また、より短時間で計測するために 5deg/s 以上の回転速度による計測も試みたが、通信速度と計測ソフトウェアの関係から 5deg/s 以上では回転装置の角度データを取り込むことができなかった。以上から回転装置の使用可能な回転速度は 4deg/s までとなった。

3.5 まとめ

マルチビームソナーを用いた海水下面形状の計測装置の作製、計測データから海水の体積や移動距離等を把握するソフトウェアの作製を行った。これにより沿岸施設に近づく海水の計測技術を開発した。

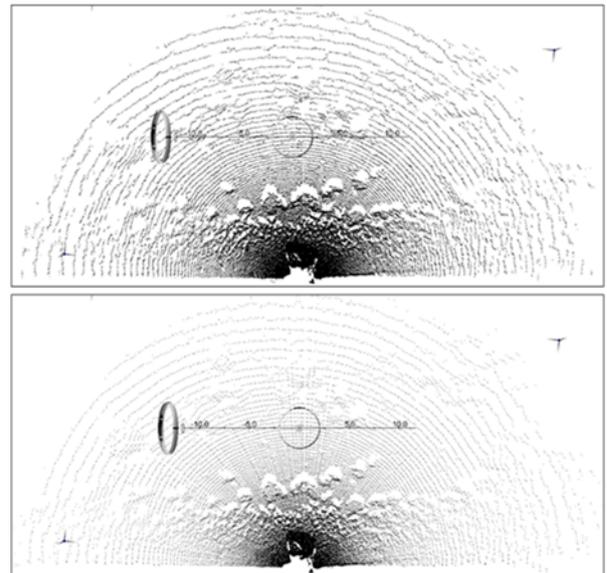


図-33 回転速度によるデータ密度の違い（上 0.5deg/s、下：4deg/s。各図の中央の円、楕円および直線は解析ソフトウェア Fledermaus (QPS 社) の操作ハンドルおよびスケール（円の中央が 0m）

4. 寒冷海域における水中計測技術の適用範囲や対象物に応じた音響特性、運用方法のとりまとめ

パラメトリックプローブを用いた水中構造物内部の劣化・損傷状況探査および可視化技術、マルチビームソナーを用いた沿岸施設に近づく海水の計測技術について実施したこれまでの試験から得られた知見、データを精査し、各技術の適用範囲や運用方法についてとりまとめを行い、寒冷海域における沿岸施設の水中調査技術ハンドブックを作成した（図-34）。

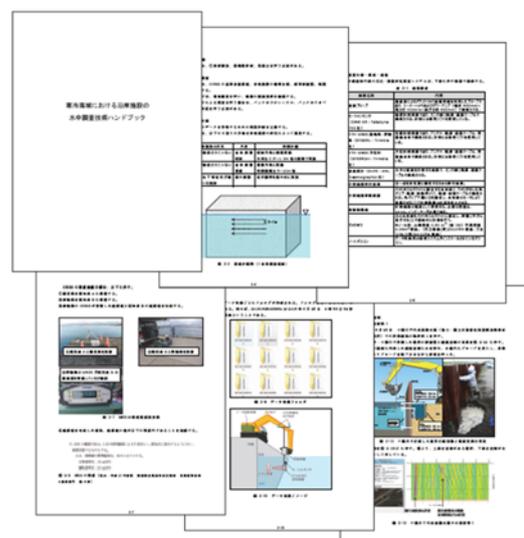


図-34 寒冷海域における沿岸施設の水中調査技術ハンドブック（抜粋）

## 5. まとめ

本研究では、水中構造物内部の劣化・損傷状況探査および可視化技術と、水中構造物に影響を及ぼす海氷の形状を計測する技術の開発に取り組んだ。その成果を以下に要約する。

- 1) 水中構造物内部の劣化・損傷状況探査および可視化技術については、鋼矢板を透過し背後の空洞の奥行きを計測できるパラメトリックプローブ、パラメトリックプローブをバックホウに搭載し計測を行うための計測システムおよび取得したデータを解析するためのソフトウェアを開発した。
- 2) 音響計測技術を利用した沿岸施設に近づく海氷の計測技術については、回転装置にマルチビームソーナールを取り付け、海底から海氷下面形状を計測する装置および取得したデータから海氷の体積や移動距離等を把握するソフトウェアを開発した。
- 3) これらの技術について、適用範囲や運用方法についてとりまとめを行い、寒冷海域における沿岸施設の水中調査技術ハンドブックを作成した。

沿岸施設を対象として研究を実施してきた技術であるが、適用条件を満たせば港湾以外でも使用可能であり、河川施設の調査への応用も期待される。今後は現場での調査等を通じて成果を普及しデータを蓄積することで、老朽化する施設の維持管理の効率化に寄与したいと考えている。

## 参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：今後の港湾施設の維持管理等の課題に対する対応方針（2014）、p. 2
- 2) 小池豊、三木偉信：三次元地中レーダを活用した鋼矢板岸壁エプロン部の補修履歴と吸出し空洞の評価、海洋開発論文集、第26号、pp. 171-176、2010. 6
- 3) Daniels, D. J. (2004). Ground Penetrating Radar, 2nd Edition, the Institution of Electrical Engineers, London.
- 4) 利岡徹馬：レーダ探査による河床部探査実験、地質ニュース、537号、pp. 24-28、1999. 5
- 5) 海洋音響学会編：海洋音響の基礎と応用、pp. 277-280、2009. 3
- 6) Madricardo, F., Buogo, S., Calicchia, P., Cannelli, G. B., Donnici, S. and Lezziero, A.: “Acoustical Prospecting in Extremely Shallow Water in The Venice Lagoon: First Results and Comparisons.” Proceedings of the Eighth European Conference on Underwater Acoustics, 2006
- 7) 岸寛人、浅田昭、虻川和紀、藤澤慶：パラメトリック送信技術を用いた水中構造物内部点検手法について、海洋音響学会 2015 年度研究発表会、2015. 5
- 8) 木岡信治、竹内貴弘：“氷群下面の凹凸を考慮したアイスブームへの伝達荷重に関する基礎的研究”、土木学会論文集 B3 (海洋開発)、Vol.67、No.2、pp.1021-1026、2011
- 9) 上田俊也、佐伯浩、山下俊彦、村木義男、榎国夫：“浮氷盤に作用する流体力に関する実験的研究”、海洋開発論文集、Vol. 8、pp.135-140、1992

## STUDY ON UNDERWATER SURVEY TECHNOLOGY FOR COASTAL FACILITIES IN COLD SEA AREAS

**Budgeted** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Director for Cold-Region Technology

Development Coordination

(Machinery Technology)

**Author** : OTSUKI Toshiyuki

YAMAGUCHI Kazuya

TADOKORO Noboru

KISHI Norihito

**Abstract** : In cold sea areas, recent environmental changes have led to greater movement of sea ice, thereby raising the risk of accelerated deterioration in underwater structures. As a result, filling materials in aging coastal facilities may be lost, which can lead to structural collapse. However, as no investigation of sea ice forms that may damage underwater structures has been conducted, the related impacts are not understood. Accordingly, this study was intended to develop a measurement technique that can be used to determine the internal states of underwater structures and a technique for surveying sea ice forms that may impact coastal facilities. As regards inspection method and visualization technique for internal state of underwater structure, specifications of a parametric acoustic probe using parametric transmission technology was studied and the probe was built. Some experiments were conducted by using the probe in an indoor water channel and a full-scale river experimental facility and it was confirmed that the sound transmitted from the probe penetrate a steel sheet pile, and could measure the distance to a target and distance to a wall of a mock cavity behind a sheet pile. Furthermore, a measuring system was made to carry out measurements using the probe efficiently. A data analyzing software was also made to analyze with simple operation. As regards surveying technique for sea ice which moves closer to coastal facilities, a device which can measure sea ice forms from under the sea by using a multi-beam sonar was built and field experiments were conducted. Furthermore, a data analyzing software which calculates volume and travel distance of sea ice was made.

**Key words** : internal states of underwater structures, inspection technique, parametric acoustic probe, sea ice measurement technique