

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：柳沢 雄二、片野 浩司、
山口 和哉、五十嵐 匡、
岸 寛人、永長 哲也、
田中 隆夫、平 伴斉

【要旨】

寒冷海域においては、近年の気候変動により海水が減少することで、海水の移動速度の増加や運動の活発化に影響を与え、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水の形状や挙動は把握されていない。本研究は、水中構造物の内部空洞状況を探査する技術と水中構造物に影響を及ぼす海水の形状を調査する技術の確立を目的とする。

平成 24 年度は、開発中の音響プローブの性能試験を実施し、1 次波の送信波形の違いによる 2 次波透過性試験の結果、Linear Frequency Modulation (LFM) 波形がもっとも良く透過することおよび、厚さ 70mm のコンクリート板を透過した波形の最大振幅は水中のみを伝搬した波形と比べ、3 分の 1 程度に減衰することがわかった。また、海水下面計測試験では、パンチルト装置により一定速度での回転計測を行い、密度が均一なデータを取得し、港内を浮遊する海水の下面形状、移動距離、速度等を把握できることを確認した。

キーワード：水中構造物点検、空洞化、パラメトリック送信技術、音響プローブ、海水下面形状

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水が減少することで、海水の移動速度の増加や運動の活発化に影響を与え、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 年を経過する岸壁が 2020 年には全体の約 25%、更に 2030 年には約 53% 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、近年では図-1 に示すように、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事例も発生している。

安全で安心な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、主に潜水土により実施されているが、人手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。

本研究では、水中構造物の内部状況を探査可能とし、中詰め砂の吸い出し状況など構造物内部の空洞化や構造物表面の欠損状況を併せて計測し、可視化表現を可能とする計測技術を開発する。また水中構造物に対する海水の影響を把握するため、寒冷海域の沿岸施設に近づく海水の下面形状や挙動を超音波計測機器を利用して効率的に計測する技術を確立する。



図-1 内部の空洞化により陥没した岸壁（左）と損傷した鋼矢板岸壁（右）

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」、科学研究費補助金研究（研究期間：平成 23～25 年度）、研究課題名：「コンクリート構造物内部の空洞化およびコンクリート打設作業状況の音響映像診断技術開発」にて行っている。

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

路面下の空洞を探査する技術としては、地中に向けて電磁波を送信しその反射信号を解析する地中レーダ法が知られている。しかし、電磁波は含水比の高い土や水中では減衰が大きいため、残留水位が高い岸壁などでは内部の空洞分布を把握することは困難である²⁾。

水中構造物内部空洞把握のための可能性技術調査として、浅田ら³⁾は超音波による非線形現象を応用した市販のパラメトリックソナーを用いて、海中から水平方向に岸壁内部の計測試験を行い、コンクリート裏面の反射波を検出した。

本研究では、このパラメトリック送信技術⁴⁾に着目し、効率的に水中構造物内部の探査を行い、表面損傷状況と合わせて可視化することを目的としている。このうち平成 23 年度は事前確認試験として、海底下表層探査に使用される市販のパラメトリックソナー（SES2000、Innomar 社）を用いて岸壁上部から内部空洞探査試験を行い、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。また、より指向性の良い音波により水中構造物に適した計測を行うことを目的として、音響プローブ、信号受信制御回路、パワーアンプを製作した（図-2）。

2. 1 音響プローブ性能試験

製作した音響プローブは、送波器 60 本（周波数帯域 100kHz±10kHz）、受波器 33 本（周波数帯域 1Hz-170kHz）とそれらを取り付ける保持具とコネクタ、配線を保護するための保護カバーで構成されている。保護具表面は曲率半径 2000mm の曲面、外形 240mm、送波器および受波器は外径 200mm の円内に固定されている。

送波器および受波器は外側から円形に交互に配置されており、送波器は図-3 に色分けされているように 4 つのチャンネルに分かれている。各チャンネルから送信する音波の位相をずらすことで、フォーカス距離を 1.0m～3.0m まで変えることができる。これにより音波の強度を強めるとともに、方位分解能を向上させる。岸壁との

距離に応じてフォーカス距離を変えることで、距離・方位分解能を高品質に保つことができる。この音響プローブの音響透過試験を東京大学生産技術研究所の試験水槽（3500mm×1800mm×700mm、図-4）で実施した。



図-2 音響プローブ（上）とパワーアンプ（下）

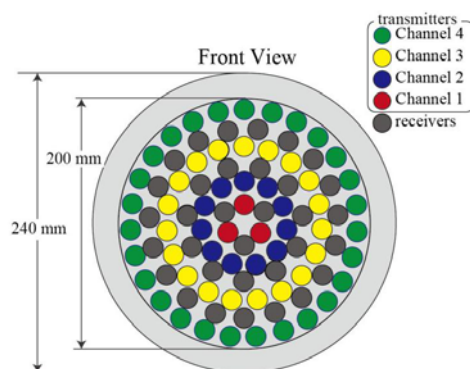


図-3 音響プローブ送受信プローブ配置



図-4 試験水槽

2. 1. 1 送波試験

図-5の3種類の波形(以下、Summing1、Summing2、Linear Frequency Modulation (LFM) という)の音波を音響プローブから送信し、どの送信波形がより透過するかについて試験を行った。Summing1はシングルパルス、Summing2はトリプルパルス、LFMは時間とともに周波数が増加するものである。

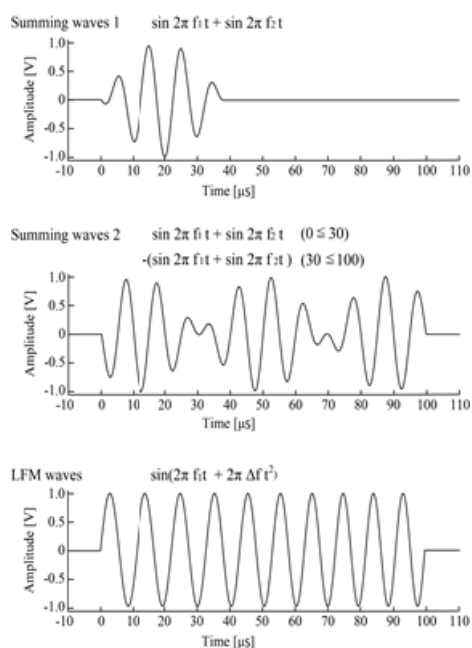


図-5 送信波形

(1) 試験方法

図-4のように、試験水槽内に水を満たし、音響プローブから発信した音波がターゲットを透過し、ターゲット後方のハイドロフォン (TC-4013、Reson 社) で受信するという方法で実施した。音響プローブと駆動用の制御装置を用いて、周波数 $100 \pm (2 \text{ 次波周波数}/2)$ [kHz] となる1次波を発生させ、音響プローブからターゲットへ向けて音波を照射する。ターゲットはコンクリート板 (250mm×250mm×70mm) とした。音響プローブからターゲットまでの距離は2.0mとし、フォーカス点はターゲットの表面に設定した。ハイドロフォンはターゲットの後方0.1mに設置し、ターゲット中心とハイドロフォンの高さは音響プローブの中心と同じ高さとした(図-6)。

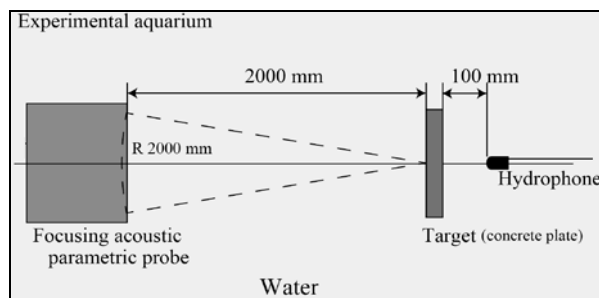


図-6 送波試験方法

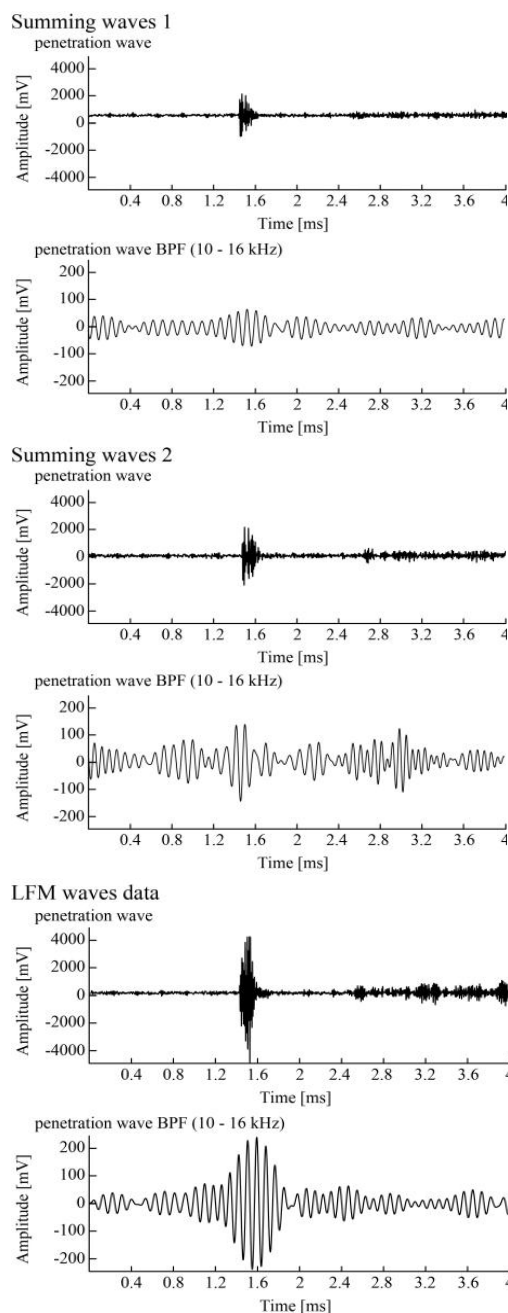


図-7 各送信波形における透過波形(上段)と透過波をバンドパスフィルタ(13±3kHz)にかけた波形(下段)

(2) 試験結果

送信波形ごとの透過波計測結果を図-7に示す。各送信波形の上段の図は2次波 13kHzの透過波、下段はこの透過波に10~16kHzのバンドパスフィルタにかけた波形である。縦軸は振幅 (mV)、横軸は送信してから時間 (ms) を表している。バンドパスフィルタをかけた透過波の最大振幅をSumming1を基準として比較すると、Summing2が2.3倍、LFMが3.2倍であり、LFMがもっとも良く透過することがわかった。よって本研究ではLFM波形を用いることとした。

2. 1. 2 透過試験

(1) 試験方法

LFMを用いた音響透過試験を実施した。配置は送波試験と同様とし、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計測を行った(図-8)。

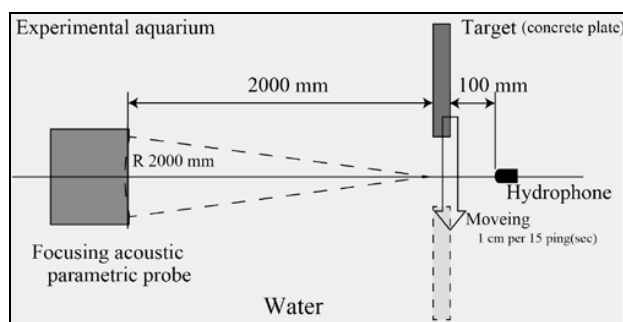


図-8 透過試験方法

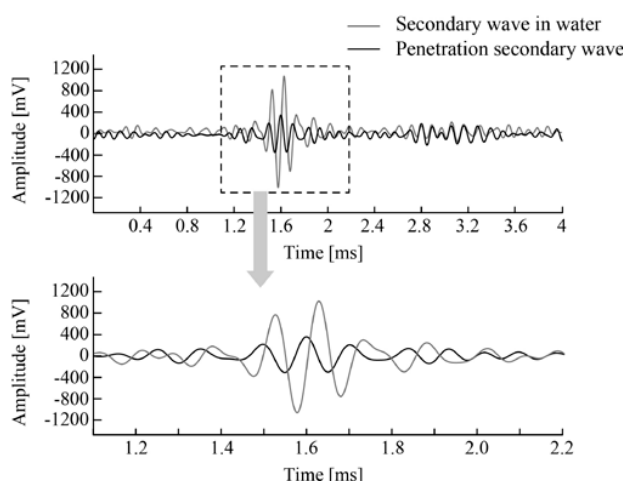


図-9 透過試験結果 (2次波周波数 10kHz)

(2) 試験結果

2次波周波数 10kHzの計測結果を図-9に示す。灰色の線が水中のみを伝搬した音波の受信波形、黒い線が水中とコンクリートを透過した音波の受信波形である。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早いためである。また、振幅(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。

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

沿岸施設の水中構造物に対して海水が及ぼす影響を把握するため、海水の基礎的なデータを効率的に計測する方法を検討した。

水中構造物と海水の接触や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⁵⁾。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⁶⁾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。

平成23年度は、深浅測量で広く利用されているマルチビームソナーを海底付近に設置し、海底から海水下面の凹凸形状を計測することができた。

平成24年度は、電動の回転機構を用いて一定時間間隔で海水下面を計測し、その結果から海水塊の挙動を確認した。

3. 1 計測方法の検討

平成23年度と同様、マルチビームソナーの送波ファンビーム(120度の扇状に放射されるビーム)の中心が真上から60度傾いた方向に向く状態で海底に設置し、鉛直軸周りに180度回転させることで、海水の下面形状を計測した(図-10)。

海底付近にソナーヘッドを設置するために、平成23年度は岸壁から張り出した計測台からソナーヘッドと補助計測機器を取り付けたポール(アルミ製φ45mm)を海中へ下ろした(図-11)。しかし海水の挙動を計測するためには、多数の海水塊が浮遊する海中にポールを下ろす必要があり、ポールに海水塊が衝突し破損することが想定された。図-12は計測台付近に浮遊していた幅2~3mの海水塊であるが、このような海水塊が多数浮遊しており、計測が困難であった。

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

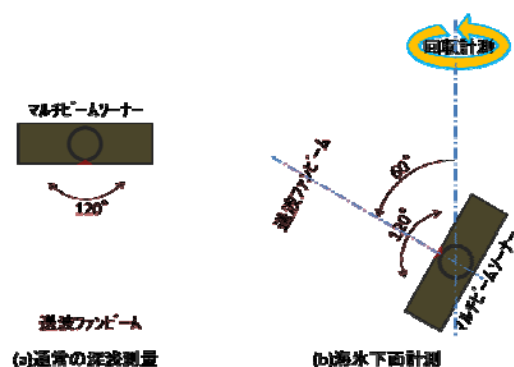


図-10 マルチビームソナー設置向き

(a) 下向きに音波を照射し海底地形を計測

(b) 真上から60度傾け海底から海氷下面を計測

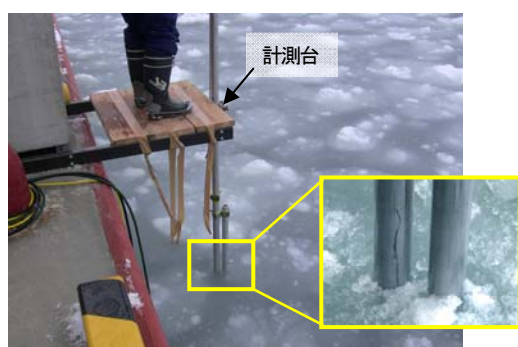


図-11 海氷面へのポール投入（平成23年度）



図-12 計測台付近にて採取した海水（平成22年度）

そこで平成24年度は、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する方法を検討した。また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(図-13)。計測装置はワイヤーロープで吊り下げて海底に直置きする。今回の計測箇所のお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に影響はない。

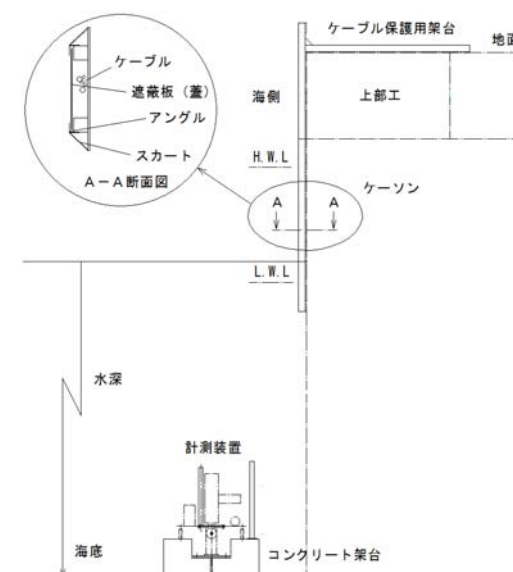


図-13 計測方法（平成24年度）

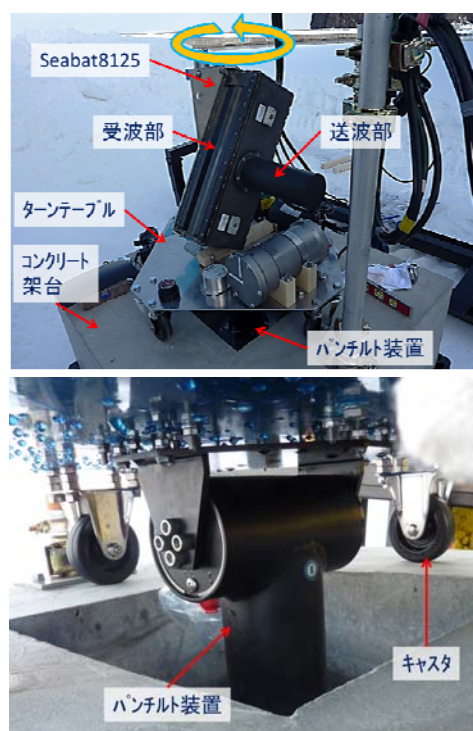


図-14 計測装置

3. 2. 計測装置、ケーブル保護用架台の概要

計測装置はソーナーヘッド、パンチルト装置およびその他計測機器から成り、これらが水流の影響から耐えられるようにコンクリート製の架台に固定した（図-14）。全ての計測機器は4つのキャストが付いたターンテーブル上に取り付けられており、パンチルト装置により鉛直軸周りに回転する。このためパンチルト装置は全ての機器の重量を支える必要がなく、小型のものを使用できる。

また、ケーブル保護用架台を上部工に据え付け、コンクリートブロックを載せて固定した（図-15）。

3.3 試験概要

平成 23 年度と同様、実海域において計測試験を実施した。概要を以下に示す。

なお、試験にあたっては北海道開発局網走開発建設部網走港湾事務所によるフィールド提供等の協力をいただき、室蘭開発建設部苫小牧港湾事務所にはマルチビームソナー（SEABAT8125）等、一部の計測機器を貸与いただいた。

(1) 計測場所等

・試験場所

ウトロ漁港 -5.0m 岸壁（北海道斜里郡斜里町ウトロ、図-16）

・計測装置設置位置（図-17）

計測箇所 A： -6.5m 水深

計測箇所 B： -5.0m 水深

・試験実施期間

平成 25 年 2 月 13～15 日（3 日間）

(2) 使用機器・機械等

主な計測機器は以下のとおり。

・マルチビームソナー（SEABAT8125、SEABAT7125、RESON 社）

・モーションセンサ（DMS2-05、Teledyne TSS 社）

・磁気方位センサ（Heading Smart Sensor C100 type、Applied Microsystems 社）

・RTK-GPS（BASE-MS750、ROVER-BD750、Trimble 社）

・音速度計（SVPS、AML 社）

・2 軸傾斜センサ（NS-30/DMG-2、Measurement Specialties 社）

・パンチルト装置（PT-25-FB、ROS 社）※回転角を同時出力

また、砕氷、計測装置・ケーブル保護用架台の設置・撤去に使用した機械等は以下のとおりである。

・バックホウ（山積 0.8m³級）

・クレーン装置付トラック（12t 車、2.9t 吊）

・コンクリートブロック（約 2t）

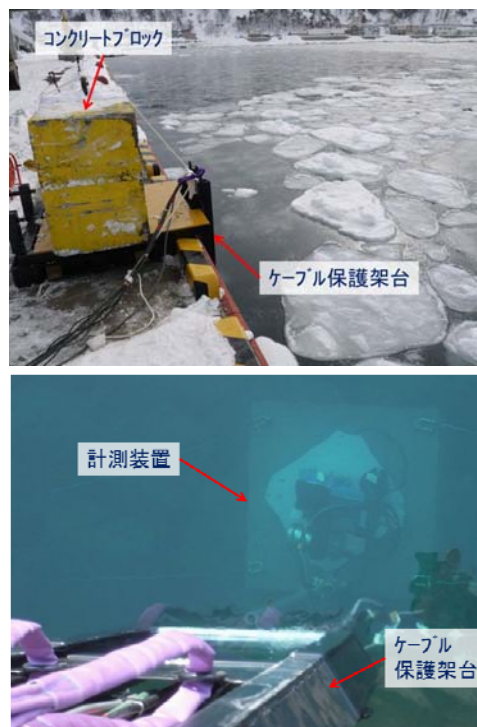


図-15 ケーブル保護用架台



図-16 試験場所（ウトロ漁港 -5.0m 岸壁）

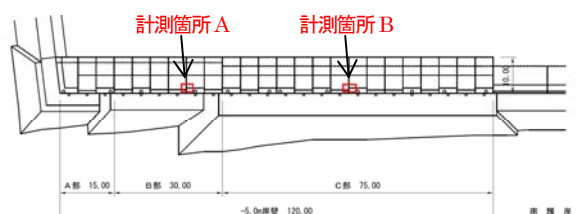


図-17 試験場所詳細および計測箇所

(3) 計測装置設置方法

以下に、計測装置の設置方法を示す。

- ・海中へ計測装置を投入するため、バックホウにて計測装置投入箇所（2.0×2.0m 程度）を砕氷し海氷を取り除く。
- ・水中カメラにて海底部に障害物がないか確認する。
- ・開口部より装置を投入・設置する（図-18）。
- ・ケーブル位置に合わせてケーブル保護用架台を上部工に設置する。固定用のコンクリートブロックを架台に載せて固定する。
- ・保護用ケースの蓋（鉄板）を上部よりスライドさせて前面部を遮蔽する。

なお、計測装置の回収時にもソーナーヘッドおよび補助計測機器の損傷を防ぐため砕氷を行った。

また、機械能力についての留意点を以下に示す。

- ・計測装置はワイヤーロープで吊って海中へ投入するが、水深に応じた揚程を有するクレーン装置を使用する必要がある。
 - ・今回使用したクレーン装置が約 0.9t の計測装置を吊ることができる作業半径は約 7.0m で、この時の揚程は約 10.8m となる。
 - ・計測時は不測の事態に備えバックホウを近接に配置した。
- また、計測装置の設置状況は、ターンテーブルに取り付けた傾斜計で確認した。3 日間の計測試験中での最大傾斜は 3 度程度であった。

3. 4 計測方法

計測方法は以下のとおりである。

- ・SEABAT8125 を上向きから 60 度傾け回転計測。
- ・海氷が動き始めたら、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う。
- ・実施日程等は以下のとおりである。

日時：平成 25 年 2 月 13 日

11:52 から 5 分毎に 17 回計測（13:12 迄）

場所：計測箇所 A（図-17）

機器：SEABAT8125（周波数：455kHz、レンジ：35m、スワ幅：120 度）

データ取得時回転速度：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）

なお、データ取得および処理にあたっては以下の点に

留意した。

- ・計測方向を把握するために磁気方位センサを使用した。が、構造物等から磁気の影響を受ける場合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する。
- ・データ収録・処理ソフトウェア（HYPACK）を用いて、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）を作成した。
- ・計測前に、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。

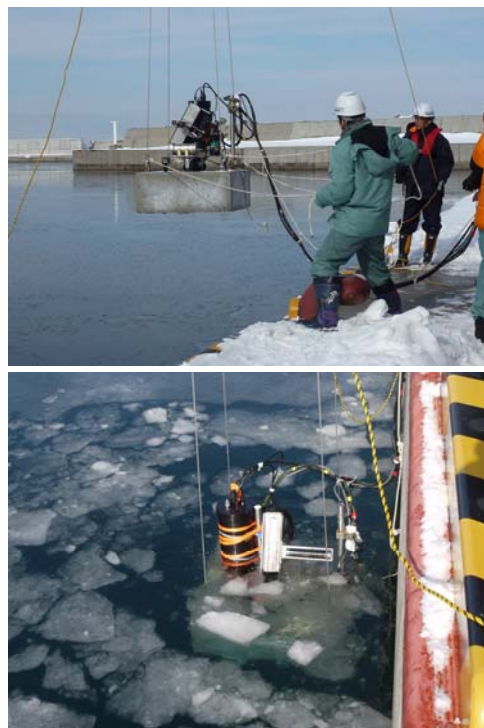


図-18 計測装置の海中への投入

3. 5 データ解析

(1) 海氷下面形状の把握

平成 24 年度に取得した海氷下面形状の点群データの一例を図-19 に示す。計測期間中、港内の海氷塊は少なかったが、前年度の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することができた。

(2) 海氷の挙動の把握

一定時間間隔で計測した海氷の位置座標の変化を利用して海氷の移動速度を算出した。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する。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-20)。このとき、時間変化する潮位を考慮し断面位置が水面に対して同一となるよう配慮した。計測中の潮位変動は約10cmであった。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ることで挙動を確認した(図-21)。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。

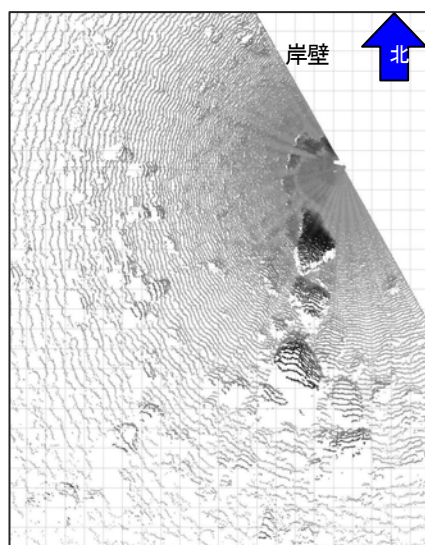


図-19 海氷下面の凹凸形状

4. まとめ

水中構造物内部の劣化・損傷状況探査技術として開発を行っている音響プローブの性能試験を行い、以下のことがわかった。

(1) 音響プローブから送信する1次波の送信波形の違いによる2次波透過性試験の結果、LFMがもっとも良く透過する。

(2) 厚さ70mmのコンクリート板を透過した波形と水中のみを伝搬した波形の最大振幅を比較すると3分の1程度に減衰する。

今後は本プローブについてさらに性能試験を実施し、基礎データを蓄積するとともに、実際の現場への適用についても検討する予定である。

また、マルチビームソナーを用いて沿岸施設に近づく海氷計測を行い、以下のことを確認した。

(3) 計測装置の回転機構に電動のパンチルト装置を用いて一定の回転速度で海氷下面計測を行い、均一な密度

のデータを取得し、港内を浮遊する海氷の形状、移動距離、速度等を把握できる。

海象が穏やかだったため、岸壁に衝突するような海氷の挙動の計測はできなかったが、今後は様々な条件下での適用性や装置の耐久性についても検討を行う予定である。

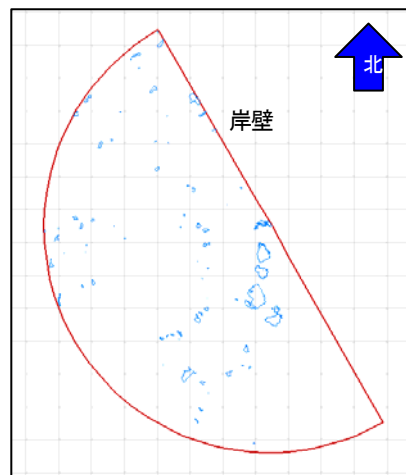


図-20 海氷断面の外周形状(赤枠は計測範囲)

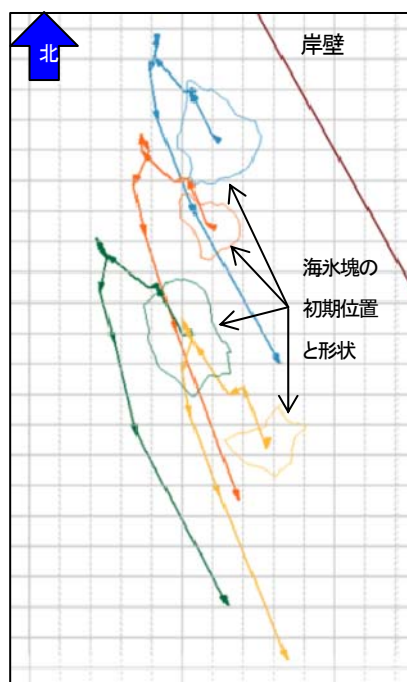


図-21 海氷塊の軌跡

参考文献

- 1) 藤原弘道：港湾施設の戦略的な維持管理・更新の取り組みについて、建設マネジメント技術、第414号、pp.28-32、2012.11.
- 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、

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

第 26 号、pp.171-176、2010.6.

3) 浅田昭、秋元和實、国島英樹：コンクリート構造物の空洞化探査、非破壊検査、第 60 巻 7 号、pp.387-390、2011.7.

4) 海洋音響学会編：海洋音響の基礎と応用、pp.277-280、2009.3.

5) 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、第 36 回海洋開発シンポ

ジウム、2011.6.

6) 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、1992.6.

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 : YANAGISAWA Yuji

KATANO Koji,

YAMAGUCHI Kazuya,

IGARASHI Tadashi,

KISHI Norihito,

EINAGA Tetsuya,

TANAKA Takao,

TAIRA Tomonari

Abstract : In cold-sea areas, there are concerns that the climate-change-associated decreases in sea ice of recent years may cause changes in the patterns of sea ice movement, thereby accelerating the deterioration of ports and port structures. Subsequently, deteriorated coastal facilities have the risk of their filling materials flowing out, and of that outflow causing structures to subside. Nevertheless, the shapes and movement patterns of sea ice that are likely to result in damage to underwater structures are not fully understood.

In FY 2012, the performance of an acoustic probe that is under development was evaluated. The penetration of secondary sound waves was tested based on different primary wave forms, and it was found that Linear Frequency Modulation (LFM) waves have the greatest penetration, and that the maximum amplitude of waves that penetrate a 70-mm-thick concrete board is only one-third that of the same waves penetrating water. In the water under sea ice, we used a measurement system equipped with a pan and tilt device to make a 180-degree measurement of sea ice movements with a fixed rotating speed. This has allowed data of consistent quality to be obtained, which provided researchers with the information on contours, traveling distance and velocity of sea ice floating in the port.

Key words : underwater structural inspection, hollowing, parametric technology, acoustic probe, sea ice form