

共同研究報告書

整理番号第467号

沿岸施設におけるコンクリート構造物内部の空洞化
診断及び水中計測技術に関する研究

共同研究報告書

平成27年10月

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所
国立大学法人東京大学生産技術研究所

Copyright © (2015) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

沿岸施設におけるコンクリート構造物内部の空洞化 診断及び水中計測技術に関する研究 共同研究報告書

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所
技術開発調整監付寒地機械技術チーム

上席研究員	大槻 敏行
元上席研究員	柳沢 雄二 ^{※1}
元総括主任研究員	片野 浩司 ^{※2}
主任研究員	山口 和哉
元研究員	五十嵐 匡 ^{※3}
研究員	岸 寛人
元研究員	平 伴齊 ^{※4}
教授	浅田 昭

国立大学法人 東京大学 生産技術研究所

- ※1：現 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所技術開発調整監付寒地技術推進室
- ※2：現 国立研究開発法人土木研究所つくば中央研究所技術推進本部先端技術チーム
- ※3：現 国土交通省北海道開発局札幌開発建設部施設整備課
- ※4：現 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所技術開発調整監付寒地技術推進室道北支所

要旨

近年、社会資本の老朽化に関する問題が顕在化している。国土交通省によると港湾施設においては、建設後50年を経過する岸壁が、2013年時点で約8%であったものが2023年には全体の約32%、更に2033年には約58%と急速に増大するとされ、今後一斉に補修や改修を必要とする事が予想される。特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、港湾・漁港構造物の劣化を促進させることが懸念されている。老朽化した施設では、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。しかし、効率的に水中構造物の内部探査を行う技術は確立されていない。また、水中構造物に損傷を与えると推定される海氷の形状調査は行われておらず、十分にその影響が把握されていない。そこで効率的な水中構造物内部の劣化・損傷状況探査技術および沿岸施設に近づく海氷形状の調査技術について研究を行った。本報告では得られた研究結果について述べる。

キーワード：水中構造物、内部点検、パラメトリック送信技術、海氷計測

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及び水中計測技術に関する研究

目 次

1. 背景	1
2. 水中構造物内部の劣化・損傷状況探査及び可視化技術の開発	2
2. 1 パラメトリック送信技術	2
2. 2 パラメトリック送信技術の利用可能性確認試験（平成 23 年度）	3
2. 2. 1 試験方法	3
2. 2. 2 試験結果	4
2. 3 音響プローブ性能試験（平成 24 年度）	5
2. 3. 1 音響プローブの試作	5
2. 3. 2 送波試験	7
2. 3. 3 透過波試験	9
2. 4 音響プローブの改良	12
2. 4. 1 透過波測定試験	12
2. 5 水中構造物内部探査に関する現場適合性試験（平成 25 年度）	15
2. 5. 1 バックホウを用いた現地試験	16
2. 5. 2 計測システム検討	20
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	22
3. 1 計測方法の検討	22
3. 2 現地試験（平成 23 年度）	22
3. 3 現地試験（平成 24 年度）	25
3. 3. 1 計測装置改良	26
3. 3. 2 試験概要	28
3. 3. 3 計測方法	29
3. 3. 4 データ解析	29
3. 4 適用範囲検証試験（平成 25 年度）	31

3. 4. 1	試験方法	32
3. 4. 2	試験結果	32
4.	まとめ	38
5.	謝辞	39

1. 背景

近年、社会資本の老朽化に関する問題が顕在化している。国土交通省によると港湾施設においては、建設後 50 年を経過する岸壁が、2013 年時点で約 8%であったものが 2023 年には全体の約 32%、更に 2033 年には約 58%と急速に増大するとされ、今後一斉に補修や改修を必要とする事が予想される¹⁾。特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運動が活発化し、港湾・漁港構造物の劣化を促進させることが懸念されている。老朽化が進行した水中構造物では、損傷箇所などから内部の土砂が流出する。これにより水中構造物内部に空洞が生じ、空洞箇所の上のエプロンが陥没する現象の発生要因となる(図-1)。

水中構造物の内部点検には、非破壊で路面下空洞探査を行える地中レーダ探査法が使用されている。しかし、水分を多く含む海面水位以下の地中では、地中レーダによる探査は困難であり、効率的に水中構造物の内部探査を行う技術は確立されていない。また、水中構造物に損傷を与えると推定される海水の形状調査は行われておらず、十分にその影響が把握されていない。安全で安心な港湾・漁港施設の継続利用のためには、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、経済的な維持管理による機能の保持が求められている。

そこで、水中構造物内部の劣化・損傷状況探査技術および沿岸施設に近づく海水形状の調査技術について研究を行った。



図-1 穴の開いた鋼矢板 (左) と岸壁内部の空洞化によるエプロンの陥没²⁾ (右)

2. 水中構造物内部の劣化・損傷状況探査及び可視化技術の開発

岸壁などの水中構造物の内部点検には、非破壊で路面下空洞探査を行える地中レーダ探査法が使用されている。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、水中構造物の海面水位以下では地中レーダによる探査は困難となる^{3), 4)}。そこで本研究では、超音波のパラメトリック送信技術を利用して、岸壁内部を点検する手法について研究を行った。

2.1 パラメトリック送信技術

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-2左）。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。

この両者の長所を合わせたのがパラメトリック送信技術である（図-2右）。1つの送受波器から異なる周波数の音波（以下、1次波という）を同時かつ同軸方向に送信すると、差の周波数の音波（以下、2次波という）が発生する。2次波は周波数が低いため透過性が良いが、同時に1次波の周波数と同等の指向性も有している^{5), 6)}。この技術は前述の海底下地層探査の方位分解能を向上させる方法として利用されているが、これを岸壁内部の劣化・損傷状況探査へ応用する方法を検討した。

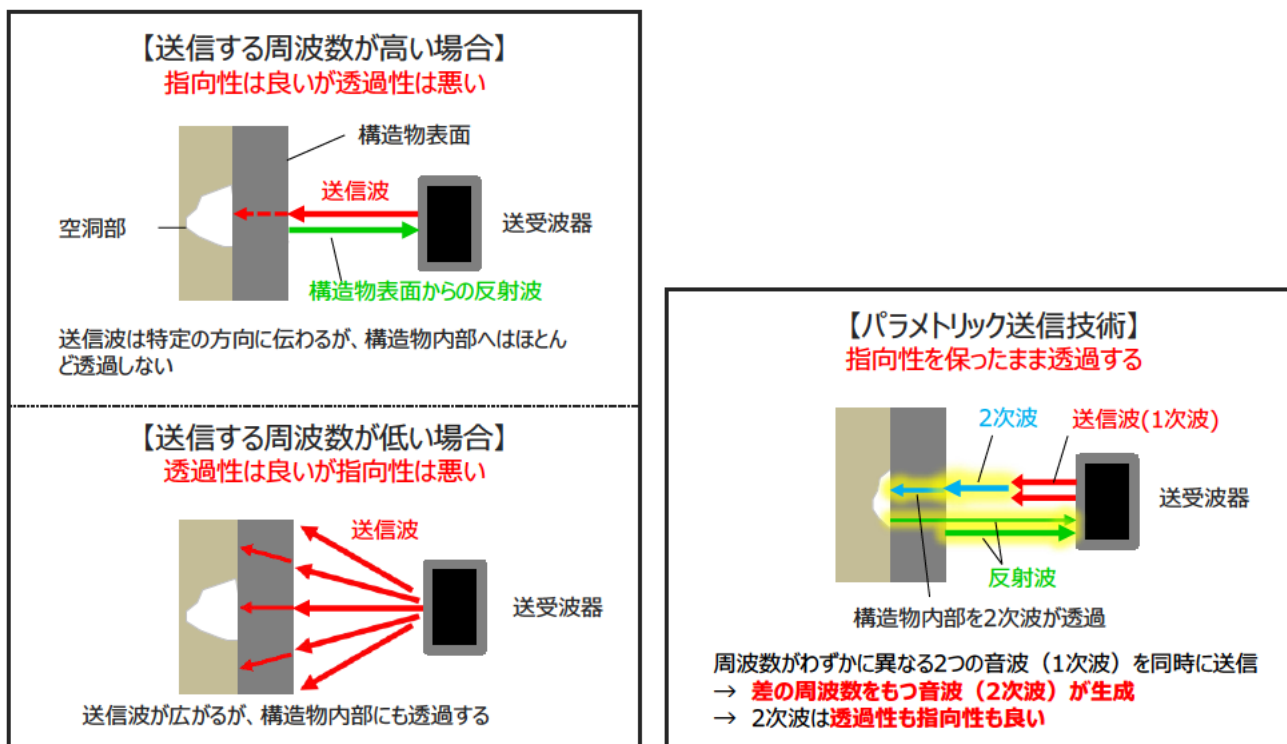


図-2 周波数による音波の性質の違い（左）とパラメトリック送信技術（右）

2. 2 パラメトリック送信技術の利用可能性確認試験（平成 23 年度）

市販のパラメトリックソナー（SES2000、Innomar 社製、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。

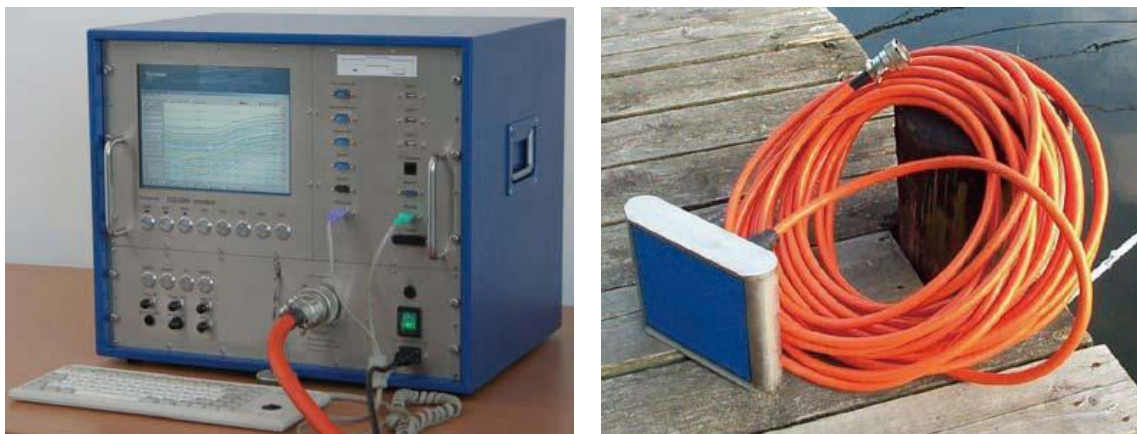


図-3 SES2000（左：本体、右：トランスデューサ）

2. 2. 1 試験方法

試験場所を図-4 に示す。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-5）。SES2000 は水中で使用しなければならないため、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-6）。

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。



図-4 追直漁港（北海道室蘭市）

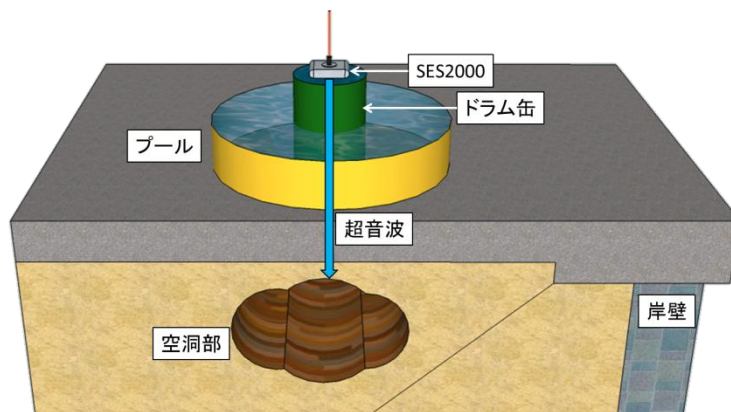


図-5 試験方法



図-6 試験状況

2. 2. 2 試験結果

図-7 に試験結果を示す。図-7 左は健全箇所、右は空洞箇所で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、弱いほど黒く表しており、縦方向の緑線は反射強度を表している。

図において、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、これはドラム缶底及びアスファ

ルト上面での反射である。図中、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。

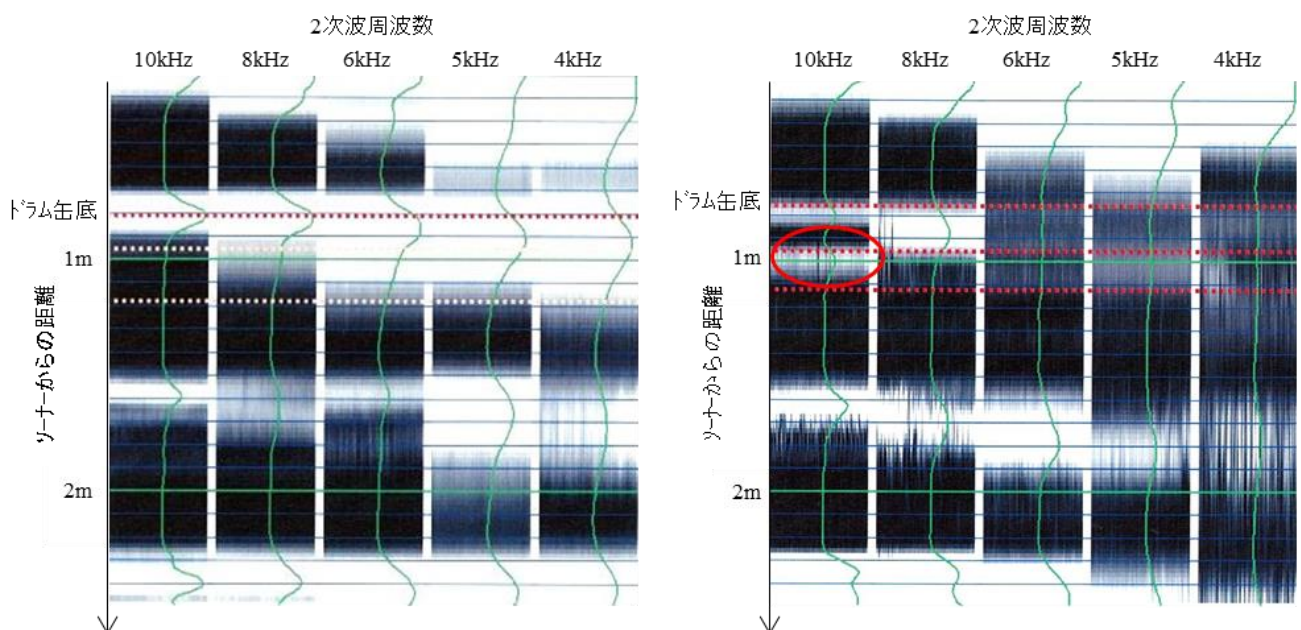


図-7 SES2000 による確認試験（左：健全箇所、右：空洞箇所）

2. 3 音響プローブ性能試験（平成 24 年度）

2. 3. 1 音響プローブの試作

試作した音響プローブ(ジャパンプローブ(株)社製)は、主に 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-8 左)。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-8 右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、強力な音響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-9）で実施した。試験は、音響プローブ専用開発された、信号送受信制御装置（株）リンク社製、パワーアンプ（T867-2M クリエイト・デザイン（株）社製）を用いて行った（図-10）。

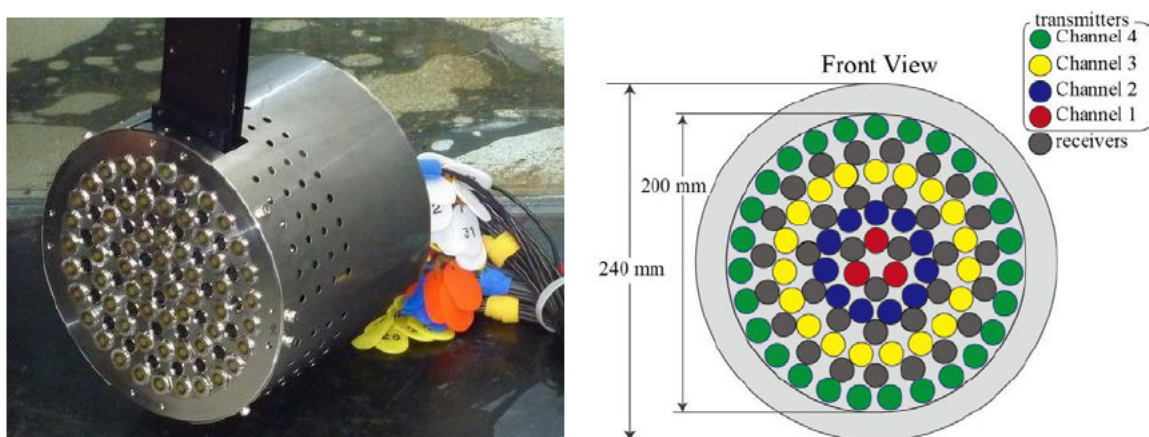


図-8 音響プローブ（左）と送受信プローブ配置（右）



図-9 試験水槽における試験状況



図-10 パワーアンプと信号送受信制御装置

2. 3. 2 送波試験

送波試験は、2次波が生成される3種類の送信波形を用いて、各送信波形の構造物内部空洞探査への適応性について試験を行った。使用した3種類の送信波形を図-11に示す。送信波形は、シングルパルス(Summing 1)、トリプルパルス(Summing 2)、時間とともに周波数が増加する波形(LFM : Linear Frequency Modulation)を用いた。

(1) 試験方法

試験配置図を図-12に示す。音響プローブの保持具は曲率2000mmを使用し、音響プローブの焦点距離2.0mの位置に受信用ハイドロフォン(TC-4013、Reson社製)を設置した。受信用ハイドロフォンの10cm手前にターゲット(コンクリート板 : 250mm×250mm×70mm)を設置して、ターゲットを透過した透過波の記録を行った。送信波は、各送信波形で2次周波数が13kHzとなる波形を使用した。ターゲットの中心位置と受信用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。

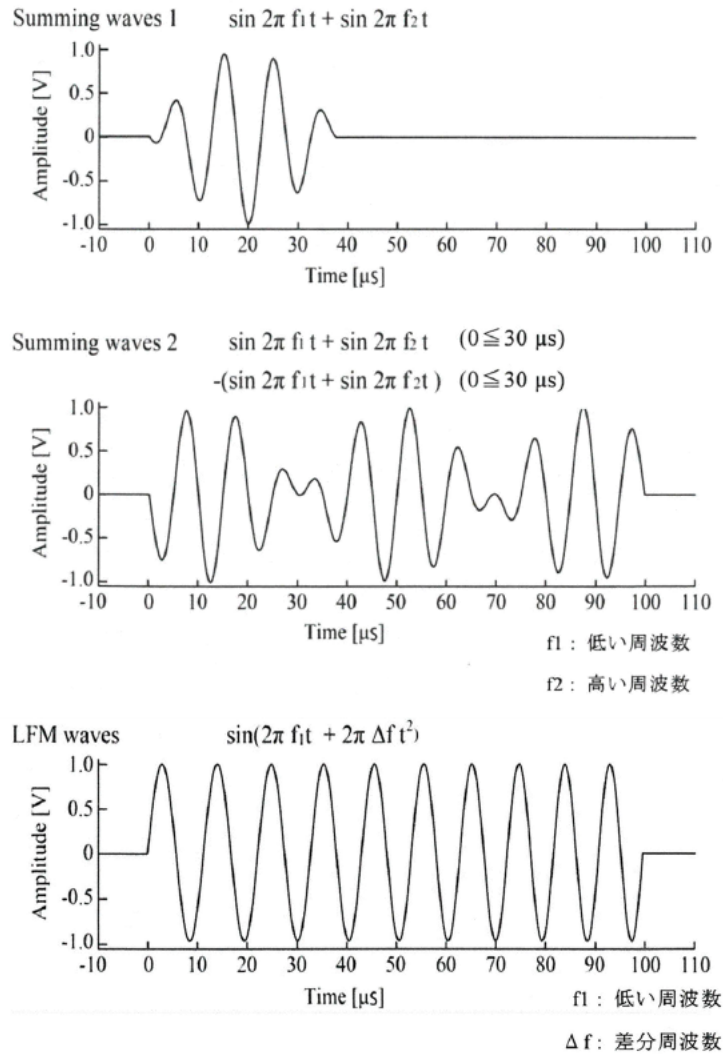


図-11 送波波形 (2次波周波数: 15kHz)

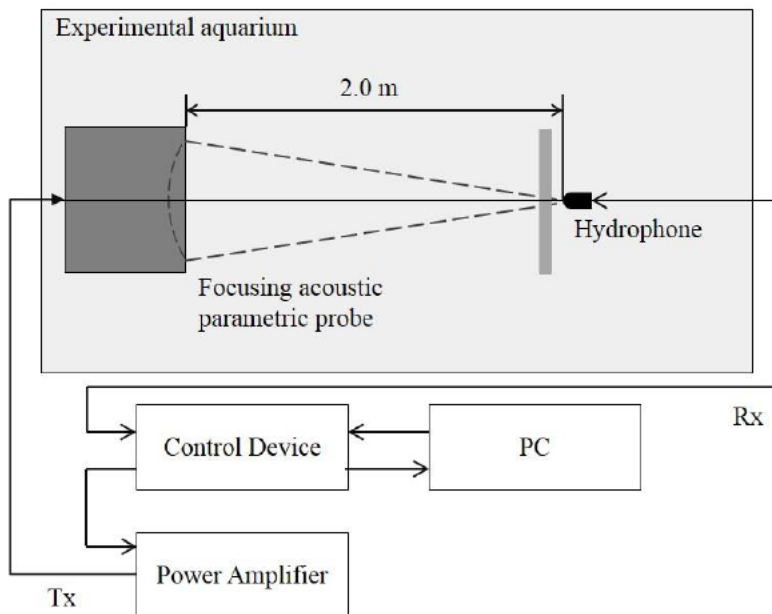


図-12 送波試験配置図

(2) 試験結果

送信波形ごとの受信透過波を図-13に示す。各送信波形の受信透過波の上段は受信したそのままの受信透過波形、下段の図はこの透過波に10~16kHzのバンドパスフィルタをかけた波形である。縦軸は振幅 [mV]、横軸は送信してからの時間 [ms]を表している。バンドパスフィルタをかけた透過波を比較すると、Summing 1の振幅を基準として、Summing 2が2.3倍、LFMが3.2倍であり、LFMが最も良く透過することがわかった。よって音響プローブの性能試験ではLFM波形を用いることとした。

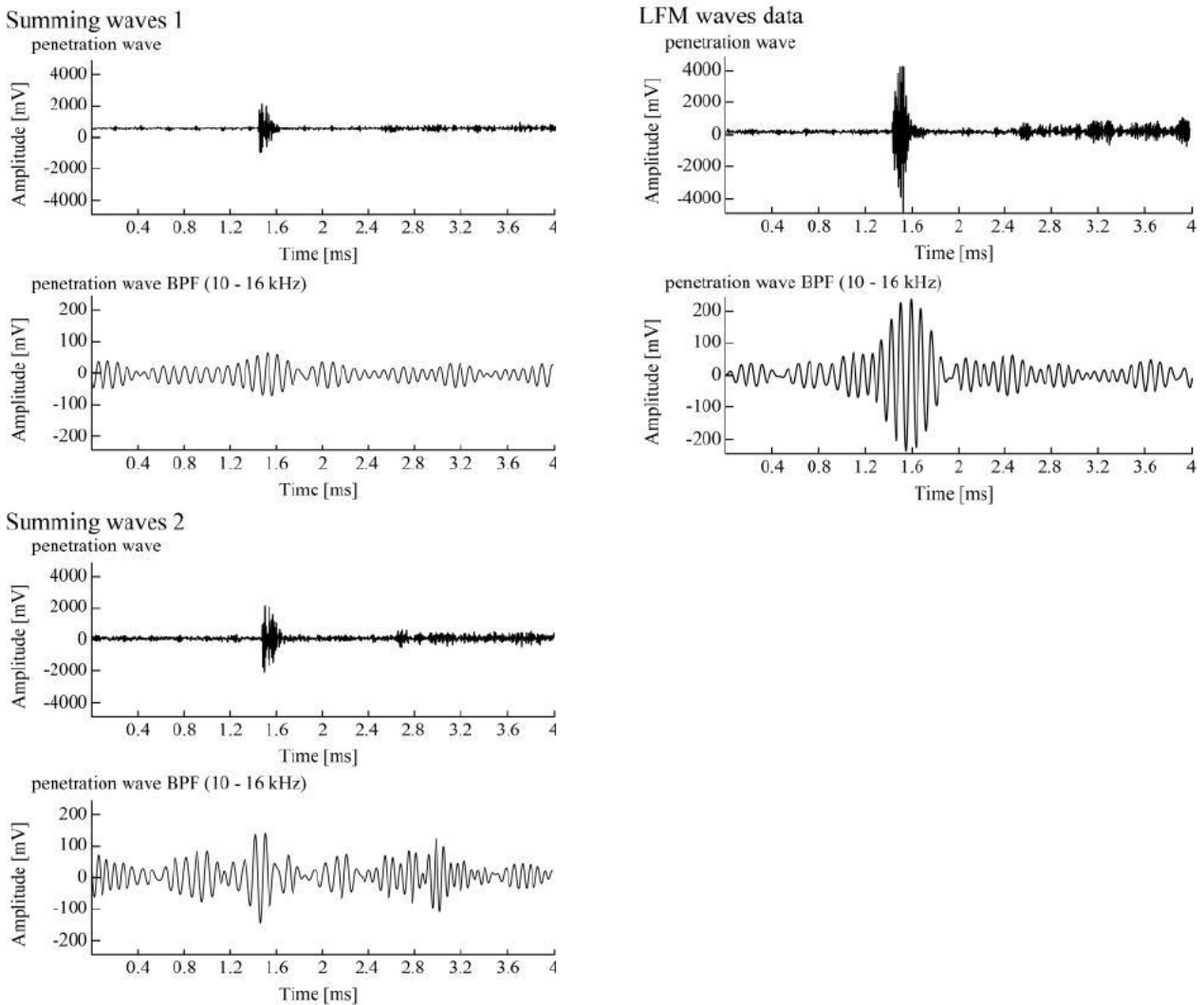


図-13 送波試験結果

2. 3. 3 透過波試験

次に、LFMを用いて透過波試験を実施した。

(1) 試験方法

音響プローブ、ハイドロフォンの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。測定方法を図-14に示す。

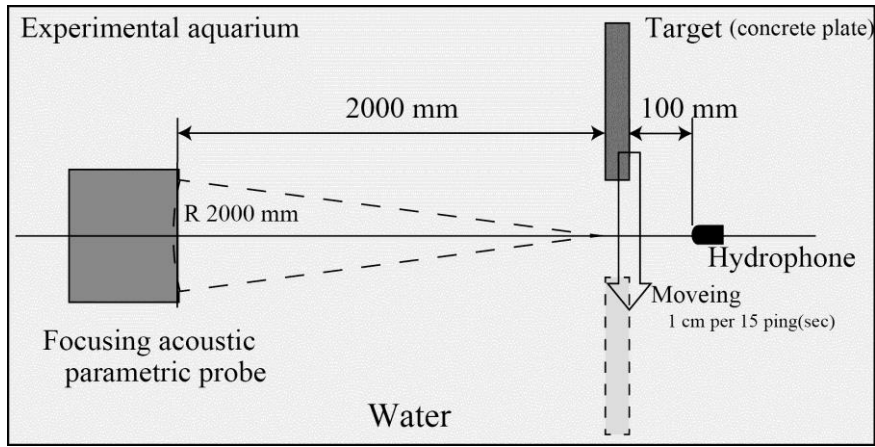


図-14 透過波試験配置図

(2) 試験結果

2次波周波数10kHzの計測結果を図-15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-16に2次波周波数が5kHz、8kHz、12kHz、15kHzの透過波形を示す。使用したすべての周波数でターゲットを透過することを確認した。各周波数の最大振幅を比較すると5kHzが200mV程度で最も透過しにくく、8kHzが400mV程度で最も透過しやすいことがわかった。

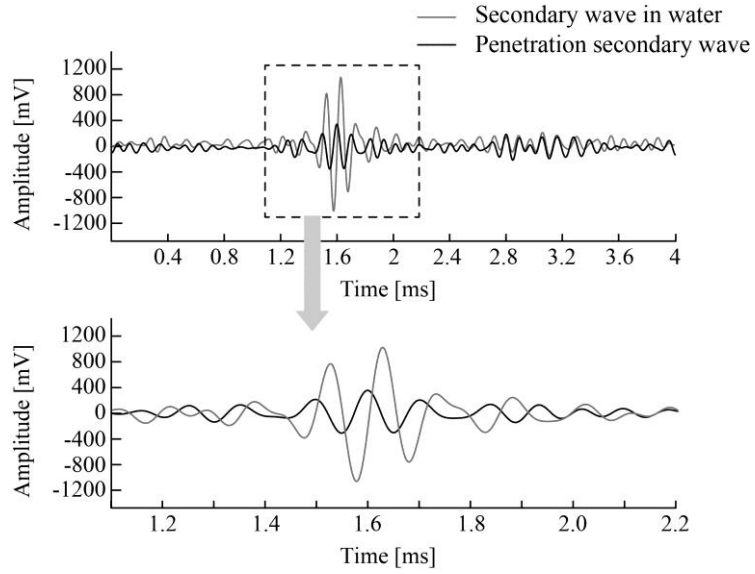


圖-15 透過試驗結果 (2次波周波数: 10kHz)

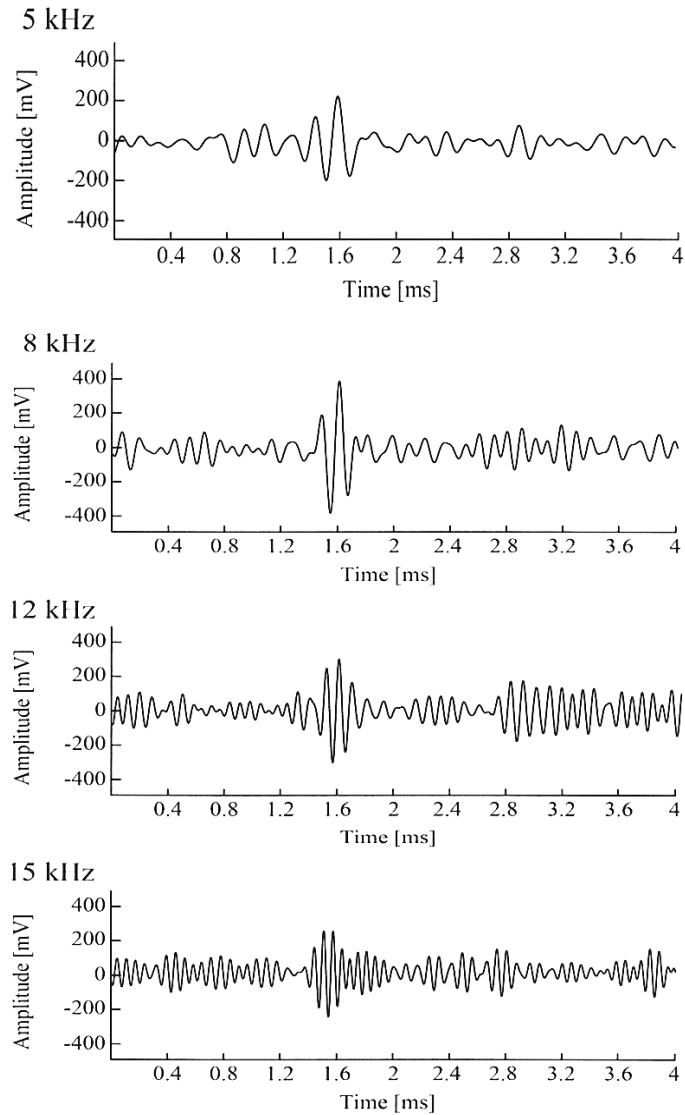


圖-16 透過試驗結果 (2次周波数: 5、8、12、15kHz)

2. 4 音響プローブの改良（平成 25 年度）

前節のとおり、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送受波器の仕様を検討し改良した。

パラメトリック送受波器（図-17）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、パラメトリック送受波器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-17 パラメトリック送受波器（左）とパワーアンプ（右）

2. 4. 1 透過波測定試験

改良したパラメトリック送受波器について、透過波測定試験を東京大学生産技術研究所の試験水槽で実施した。

(1) 試験方法

パラメトリック送受波器、鋼矢板（SP-IIw：有効幅600mm、有効高さ130mm、厚さ10.3mm）、反射板（スタイロフォーム、厚さ15mm）の配置を図-18に示す。水槽の壁際から0.5mの位置に図のように鋼矢板を配置した。鋼矢板からパラメトリック送受波器の焦点距離である1.5m離れた位置にパラメトリック送受波器を配置し、鋼矢板を挟んで逆側に反射板を設置した。測定は、反射板が壁際にあるときと、壁際から4cm鋼矢板に近づけた位置にあるときの2パターンについて行った。2次波周波数には10kHzを使用した。

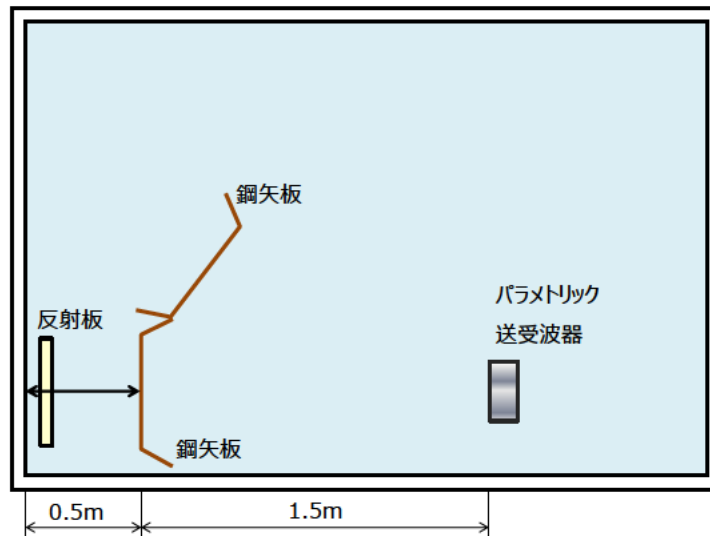


図-18 透過波測定試験配置

(2) 測定結果

壁際に反射板を配置したときの反射波を図-19に、壁際から4cm離れた位置に反射板を配置したときの反射波を図-20に示す。図-19、図-20の1.5m付近に現れている反射は、2枚配置した鋼矢板のうち、斜めに配置した鋼矢板からの反射である。次に、1.6m付近に現れている反射波はパラメトリック送受波器から1.5mの位置に配置した鋼矢板の表面から反射してきたものである。壁際に配置した反射板からの反射波は2.1m付近に現れている。配置距離から0.1mずれているのは、パワーアンプや収録器内での遅延の影響によるものと考えられる。図-20の壁際から4cm離れた位置に反射板を配置したときの反射波形を見ると、2枚の鋼矢板からの反射波は図-19と同様の位置に現れているが、反射板からの反射波は、図-19よりも4cm手前の2.0m付近に現れている。図-21は、図-19と図-20の反射波形を重ねて表示し比較したものであり、赤線が反射板を壁際に配置したとき、緑線が反射板を壁際から4cm離れたときの波形である。位置が変わっていない2枚の鋼矢板からの反射は重なっているが、反射板からの反射位置は変化していることがわかる。また、1.5mから1.9m付近までの波形は重なっていることから、2枚の鋼矢板からの反射波であることがわかる。一方、2m付近にある反射板からの反射波はずれており、2.4m付近にある反射もずれている。このことから、2.4m付近に現れている反射波は、反射板に起因する反射であると言える。

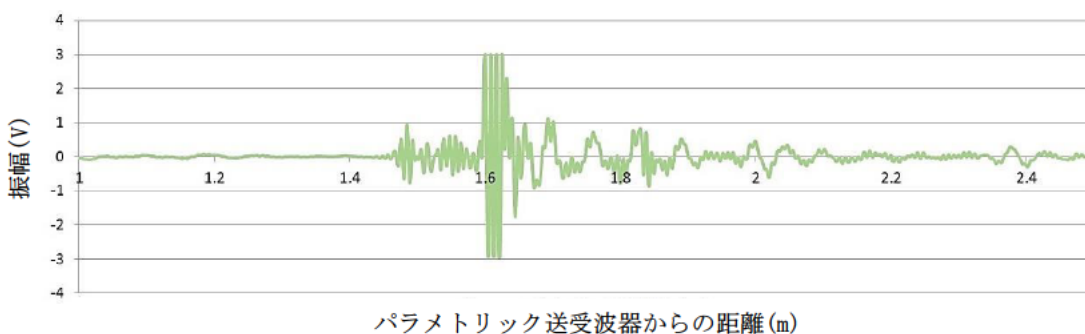
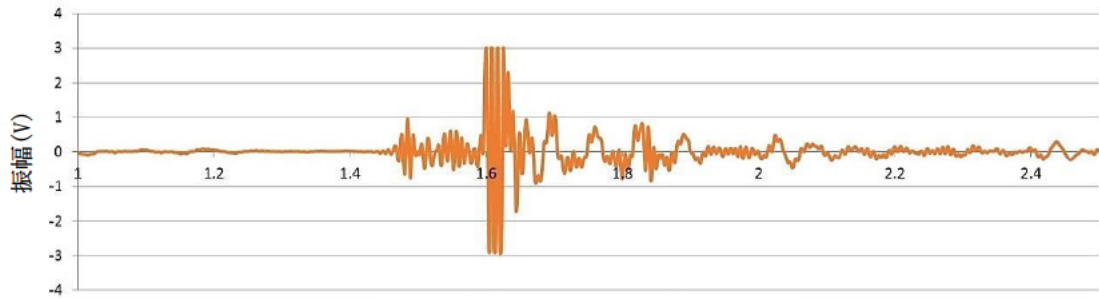
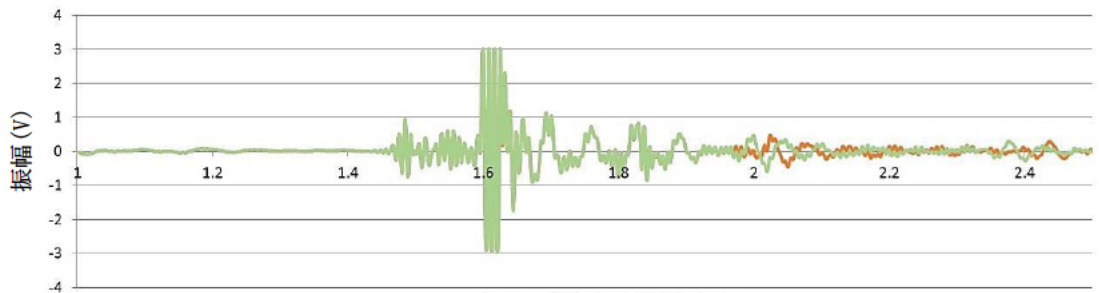


図-19 壁際に反射板を配置したときの反射波



パラメトリック送受波器からの距離 (m)

図-20 壁際から 4cm 離れた位置に反射板を配置したときの反射波



パラメトリック送受波器からの距離 (m)

図-21 2つの反射波の比較

反射板からの反射波をハミング窓を用いて抜き出し、FFTにより周波数パワースペクトルを求めた。結果を図-22、図-23に示す。図-22は反射板からの反射を切り取ったものであり、図-23は図-22の波形の周波数パワースペクトルである。図-23から、図-22の波形は10kHzから20kHzの周波数で構成されていることがわかる。また1次波周波数である100kHzも含まれていることがわかる。

以上の結果から、鋼矢板のさらに後ろにある反射版からの反射を捉えることができおり、パラメトリック送受波器を用いて鋼矢板背後の物体までの距離を計測できると言える。

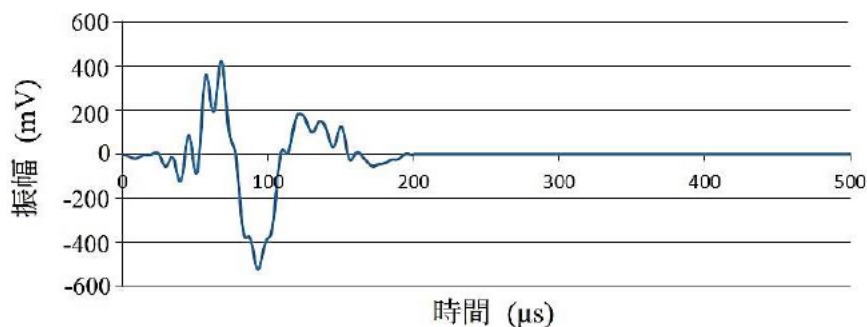


図-22 壁際に反射板を配置したときの反射波

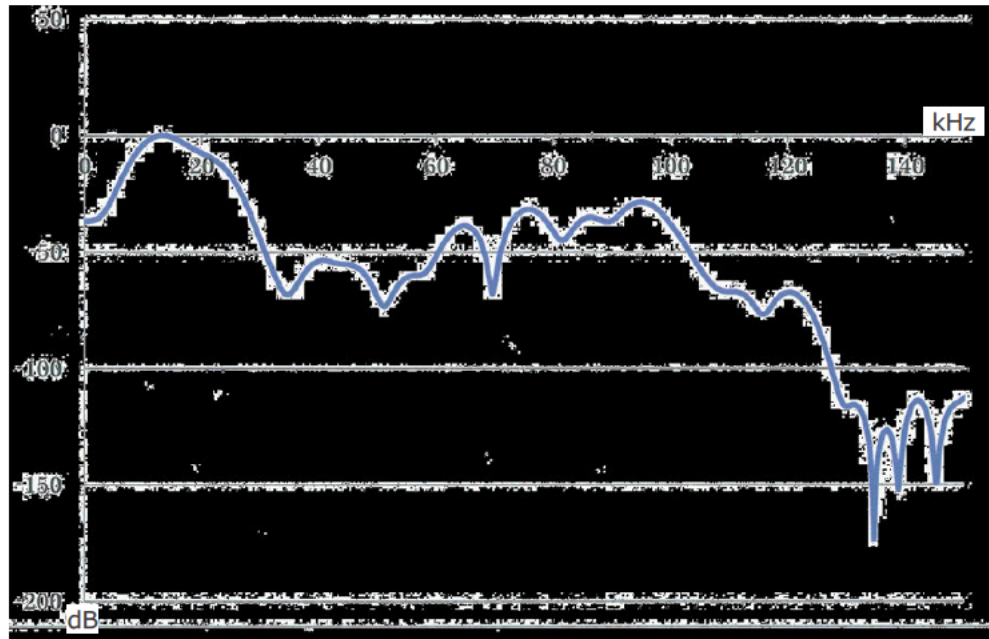


図-23 壁際に反射板を配置したときの反射波の周波数パワースペクトル

2.5 水中構造物内部探査に関する現場適合性試験

前述の内部探査技術が実際に現場へ導入されることを想定した場合、簡易に計測できること、操作が複雑でないことなどが必要となる。

これまで岸壁水中部の表面劣化状況および内部空洞を超音波計測機器を用いて把握する技術について研究を行ってきたが、これらの調査で使用する主な計測機器の構成は、ソナー（音響測深）、GPS（位置・方位計測）、モーションセンサ（動揺計測）、データ収録用PC、統合型水路測量計測ソフトウェアなど、通常の深淺測量で使われるものと同じであり、計測も深淺測量と同様に、これらの計測機器を船舶に艀装し行ってきた。しかし船舶を用いる計測には表-1に示すような制約があり、計測が困難になることがある。

表-1 船舶を用いた計測に関する制約、課題

作業内容	制約、課題
船舶の使用	計測条件に合う船舶の確保（船舶の有無、大きさ、安定性、艀装の可否）、船員の確保
艀装、撤去	時間がかかる、危険（海上での機器取付、取外）
操船	岸壁との衝突を避けるため、岸壁との距離を3.5m程度離す必要がある 速度、進行方向を一定に保つのが難しい
計測	風や波の影響により解析に使用できないデータとなることもある

また使用する機器が多く、それらの設置・撤去、設定作業は煩雑であり、港湾計測に熟練していないとデー

タの欠測等の要因にもなり得る。

これらの課題を解消するため、船舶を使用せず岸壁水中部を陸上から計測する手法を検討し、実海域試験を実施した。さらに計測に使用する各機器の設置・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を行った。

2. 5. 1 バックホウを用いた現地試験

船舶を使用せず岸壁水中部の計測を陸上から計測する手法として、バックホウを用いた方法を検討し、実海域試験を実施した結果について述べる。

(1) 主な計測機器と計測方法

主な使用機器について以下に示す。

a) パラメトリック送受波器

b) モーションセンサ (DMS-05 : Teledyne TSS 社)

動揺計測装置であり、センサ部と電源・通信ケーブルで構成される。

c) RTK-GPS 基地局、移動局 (SPS851 : Trimble 社)

位置計測装置であり、アンテナ、電源・通信ケーブル、受信機本体で構成される。

d) RTK-GPS 方位計 (SPS552H : Trimble 社)

方位計測装置であり、アンテナ、電源・通信ケーブル、受信機本体で構成される。

船舶に代わる移動体には、汎用機械として広く使用されているバックホウを選定した。計測方法はバックホウのバケットにソーナー昇降装置を取り付け、その下端にパラメトリック送受波器等を取り付けてバックホウを岸壁に平行に走行させることで連続的に計測を行った (図-24)。

平成 24 年度の船舶を使用した計測では、図-25 の右のような計測機器の水深を変更する作業が数回あり、1 回の深さ変更には 20 分程度を要した。そこで図-26 に示すソーナー昇降装置を作製した。本装置はラックピニオン方式であり、ラック付き角パイプ (50mm 角)、モータ、操作ボックスからなる。昇降スイッチでモータを作動させ毎秒約 2cm で昇降を行う。昇降スイッチを操作しない状態ではブレーキがかかる。可動域は 3m、ラック付き角パイプ含め 180kg 程度まで昇降させることができる。

図-27 は本装置をバックホウへ取り付けるための金具である。バックホウのバケット側面が歪んでいたため木板を挟んで金具を取り付けた。この金具を船舶の側面への取り付けに対応できるものに換えることで、本昇降装置を船舶で使用することも可能である。

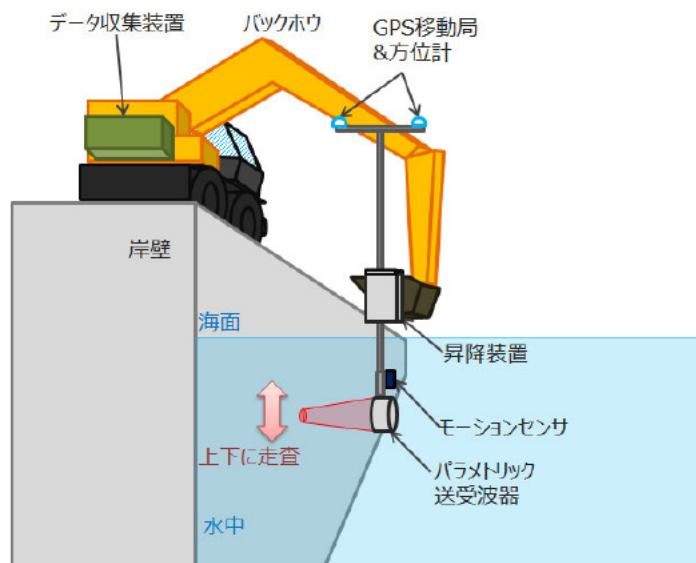


図-24 バックホウを使用した計測方法

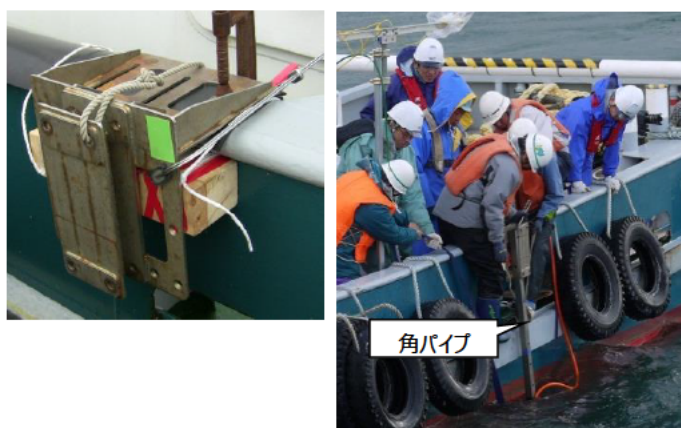


図-25 角パイプを船舶の側面へ取り付けるための金具（左）と計測機器固定水深変更作業（右）

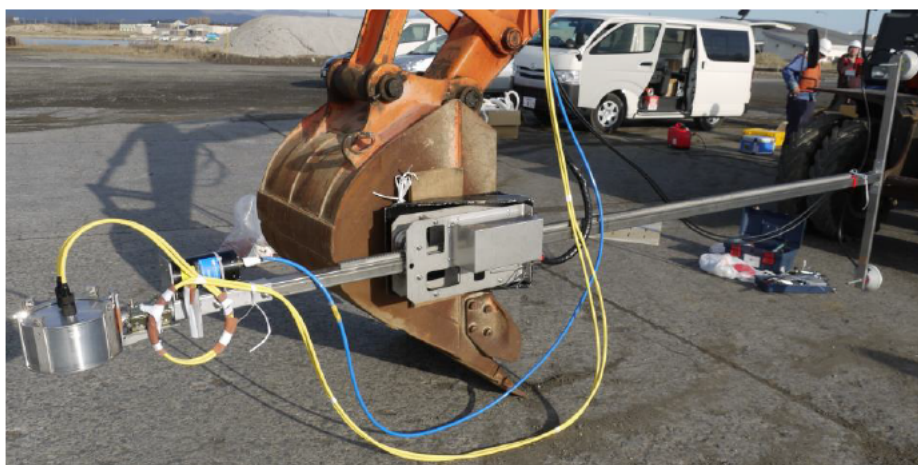


図-26 ソナー昇降装置取付状況



図-27 ソナー昇降装置取付金具のバックホウへの取付状況

(2) 船舶を使用した計測とバックホウを使用した計測の動揺データの比較

船舶を使用して計測を行った場合とバックホウを使用して計測を行った場合について、モーションセンサによるロール（進行方向に対して左右方向の揺れ）および、ピッチ（進行方向に対して前後方向の揺れ）の計測値を比較した。使用したデータは、両試験期間において、風向や波の状態が近かった平成24年10月24日（船舶による計測）と平成25年8月28日（バックホウによる計測）のものである。

ロールおよびピッチの計測値を図-28、29にそれぞれ示す。横軸は時間、縦軸は角度を表している。バックホウによる計測では計測範囲を20m程度としていたため、70秒以降データがないが、船舶による計測との比較のため横軸を合わせて表示した。

まずロールについて比較する。船舶による計測について見ると、水深によらず周期が約4秒、ロールが-2度～+2度の範囲で振動していることがわかる。岸壁からの計測機器までの距離が3.5mであるとすると岸壁上の音波の照射位置は±0.1m程度の範囲で上下動する。バックホウによる計測では振動の周期が短く、揺れは最大で-0.3度～+0.3度程度であり、水深が深いほど揺れが大きくなっている。これは現地計測中に目視で観察していても見られた傾向である。バックホウのバケット先端と岸壁の距離は約1mまで近づけることが可能であり、岸壁から計測機器までの距離を1.5mとするとロールの値による岸壁上の音波の照射位置は最大でも±7mm程度となる。

次にピッチについて比較する。船舶による計測について見ると、ロールと同様に約4秒、-0.7度～+1.0度の範囲で振動している。バックホウによる計測では-0.4度～+0.3度の範囲で振動している。特に船舶による計測との違いは、船舶が周期的な揺れであるのに対し、バックホウによる計測は30秒付近まで上昇していた値が、それ以降下降していく点である。これは計測箇所の地面のわずかな起伏をバックホウが上り下りしたことを表していると考えられるが、岸壁と計測機器の距離が近いため、計測に与える影響は小さい。

バックホウによる計測については、船舶のような揺れは抑えられても走行による振動や、路面の起伏の影響が懸念されたが、本計測の結果、走行による揺れはロール、ピッチとも小さく、計測精度を向上できることを確認した。

さらに作業性等については以下の点を確認した。

- ・陸上で機器取付などの作業が全て行えるため、船舶を使用する計測よりも簡単かつ安全に実施できる。
- ・バックホウのバケットへの金具の固定は、バケットの側面が歪んでいたため、木板を挟んで取り付けたが、計測時の走行や波によるずれなどは発生せず、安定して計測を行うことができる。

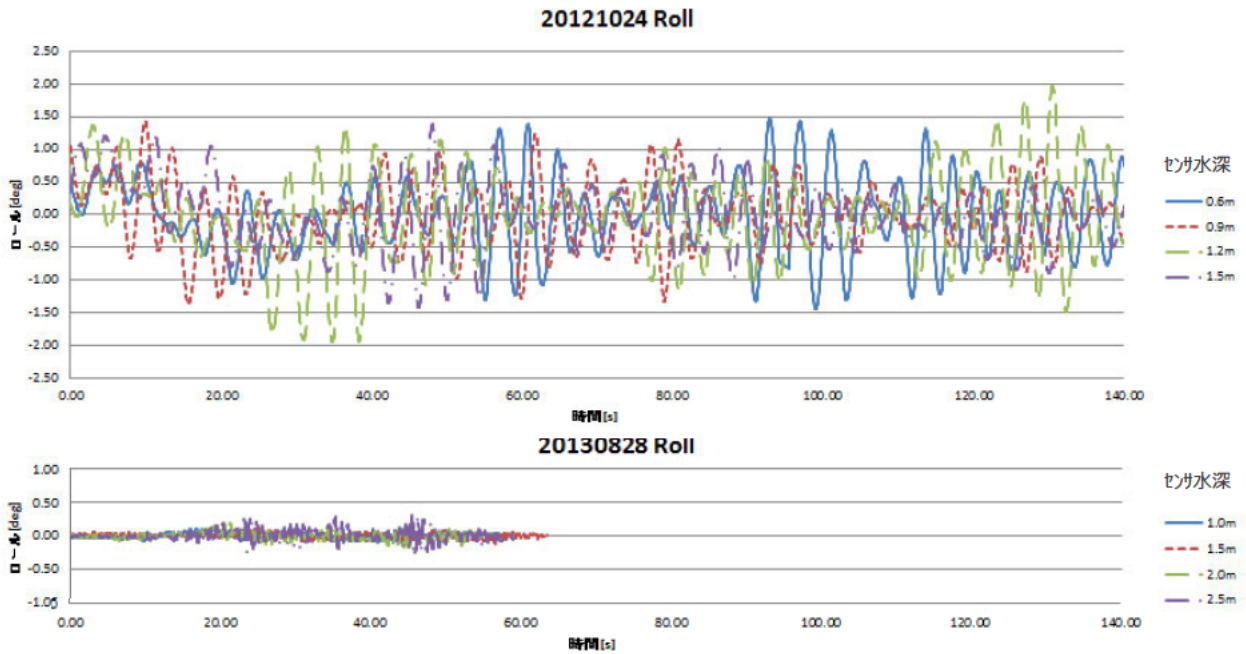


図-28 ロール計測値（上：船舶による計測、下：バックホウによる計測）

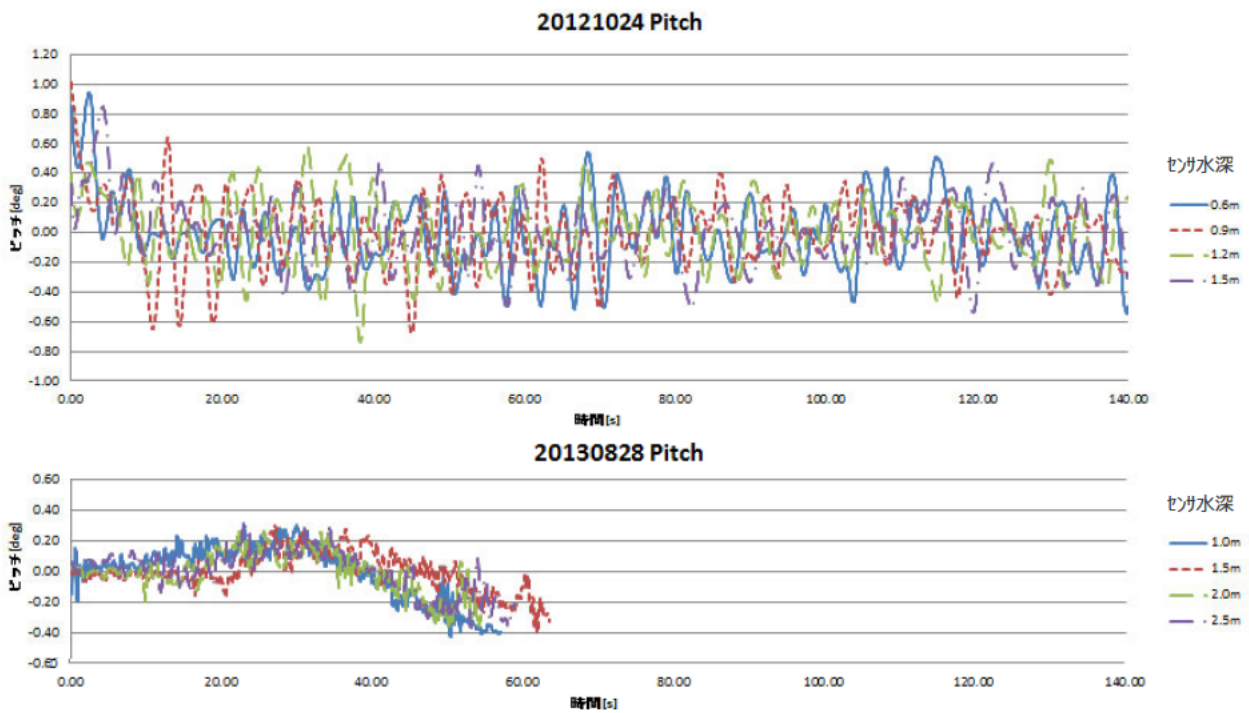


図-29 ピッチ計測値（上：船舶による計測、下：バックホウによる計測）

(3) 岸壁内部計測試験

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水深 2.8m の位置に垂下し、そこから水深 1m まで上昇させ、岸壁内部計測を行った結果について、図-30 に示す。計測した岸壁は鋼矢板岸壁である。岸壁の上部工に設置されている防舷材との接触を避けるため、パラメトリック送受波器と岸壁の距離は約 2m とした。2 次波周波数は 8kHz である。

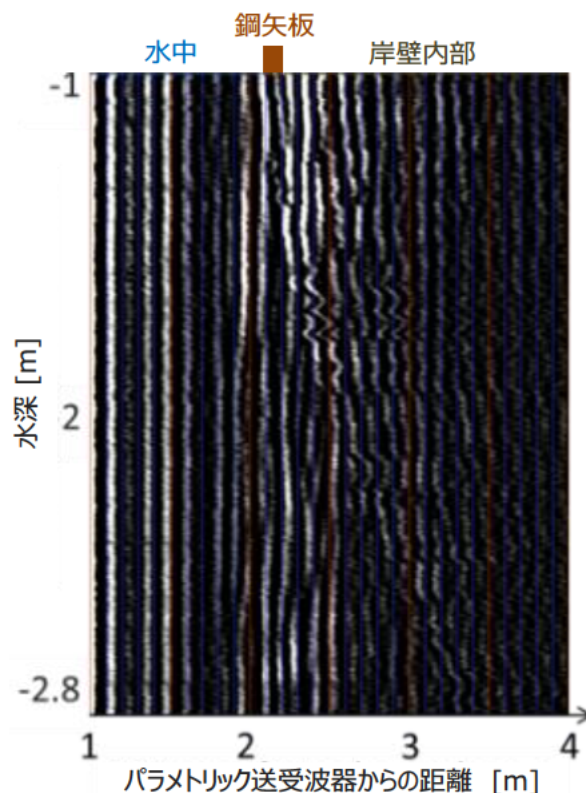


図-30 岸壁内部計測結果

パラメトリック送受波器から約 2.2m の位置に反射が見られ、岸壁表面を表している。次に、パラメトリック送受波器からの距離が約 2.3m、水深約 1.6m の位置から、右斜め下に向かう反射層が見えており、これは岸壁内部からの反射を表している。この反射層は、異なる材質の境界や、水分を多く含む部分とそうでない部分の境界などの可能性が考えられる。

2. 5. 2 計測システム検討

水中音響機器による構造物水中部の点検では、前節に示した GPS やモーショセンサなど様々な機器を使用するが、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の可能性がある。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、以下の項目について検討し仕様を作成した。

① 計測機器配線接続部検討

計測準備および撤去に要する時間を短縮するために、各計測機器の電源ボックスおよび受信機本体を箱等の中に整理して配置し、配線作業を簡略化する方法について検討を行った。検討では配線だけでなく、筐体の大きさ、材料等、防水性についても考慮した。

② 艀装方法検討

バックホウまたは他の陸上機械へ、前述の①で検討した各計測機器本体部を整理・収納した箱等および計測用 PC を艀装する方法について検討を行った。また、各装置のケーブルを効率的に配線、撤収できる方法についても検討した。

③ 設定計測ソフトウェア詳細設計

各計測機器の設定・計測を一元的に管理することで、計測作業を単純化するソフトウェアの詳細設計を行った。

3. 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の開発

水中構造物と海氷の接触や衝突による劣化や損傷を評価するには、海氷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⁷⁾。伝達荷重は海氷に風や水流などの流体力が作用し、海氷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、海氷の移動速度に依存する⁸⁾ことから、海氷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氷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、港内の海氷を陸上から効率的に計測する方法を検討し、実海域において検証試験を行った。

3.1 計測方法の検討

港内の海氷の形状・挙動を効率的に計測する手法として、深淺測量で広く利用されているマルチビームソナーの使用を検討した。マルチビームソナーは多数の指向性の鋭い音響ビームを扇状に発信（送波ファンビーム）して、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る。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-31）。

3.2 現地試験（平成23年度）

(1) 試験場所、試験期間

- ・試験場所： ウトロ漁港（北海道斜里郡斜里町、図-32、33）
- ・試験期間： 平成24年2月7～9日

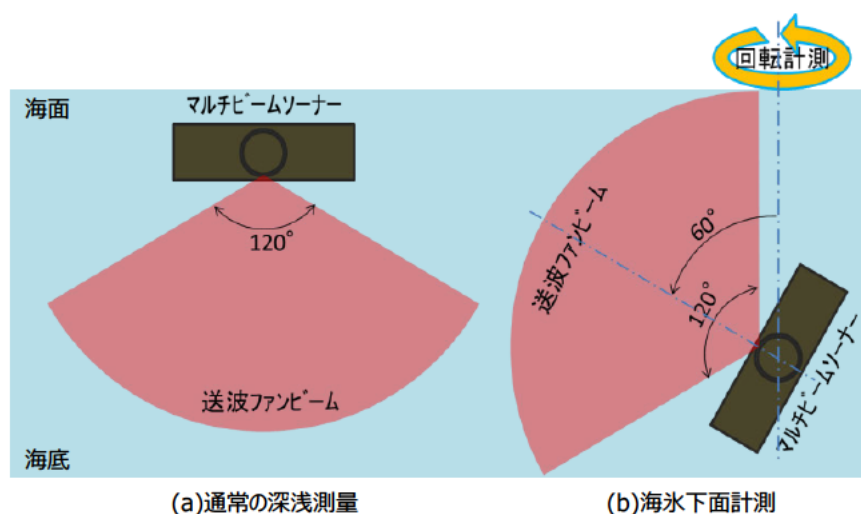


図-31 マルチビームソナー設置向き



図-32 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）

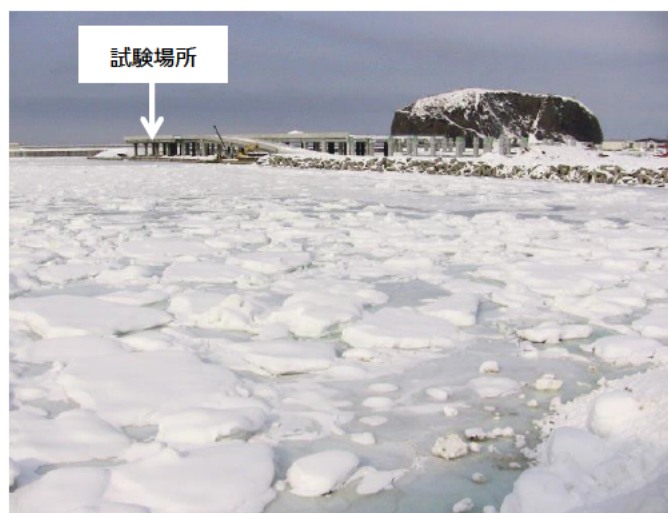


図-33 ウトロ漁港全景

(2) 試験方法

試験方法を図-34 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-35）、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、計測パターンのおり計測を行った。マルチビームソナーは Reson 社製の Seabat8125 を使用した。

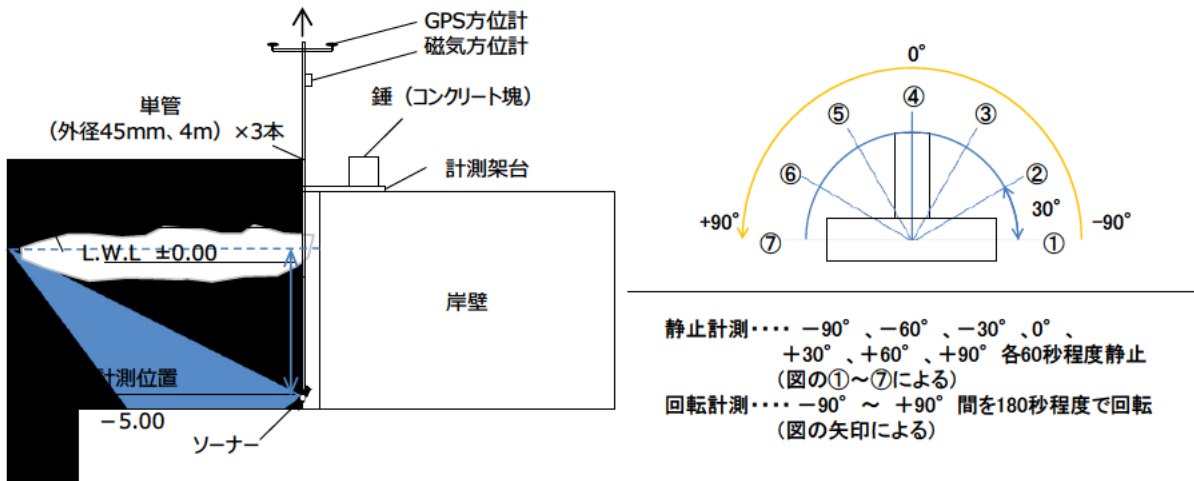


図-34 計測方法 (左) と計測パターン (右)

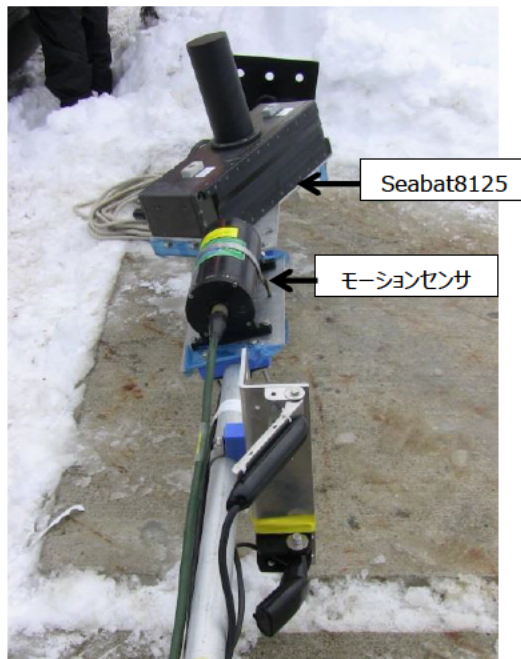


図-35 計測機器取付状況

(3) 試験結果

マルチビームソナーを使用して海水下面の凹凸形状の3次元データを取得した。Seabat8125で計測した結果を図-36、37に示す。計測点の分布から、回転中心から100m程度までデータを取得できているが、データ密度が小さく、遠方では凹凸形状の把握が困難であった。

港内が結氷し、水平面上での流氷移動が確認できなかったため、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-38)。計測開始時と40分後に計測されたデータを比較したところ、50cm程度の潮位変化による上下動を確認できた。

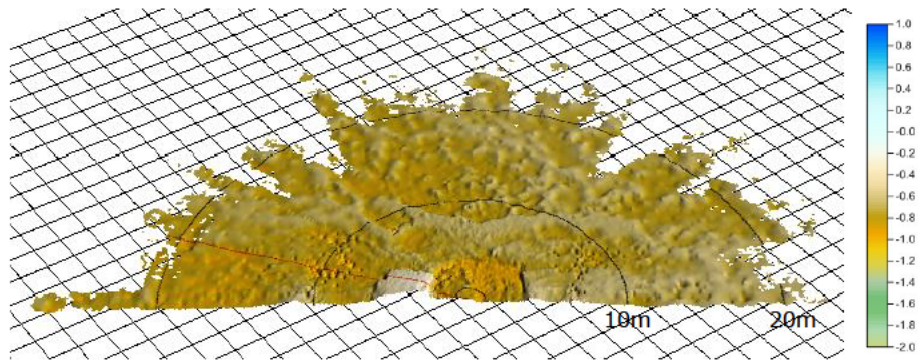


図-36 海水下面形状

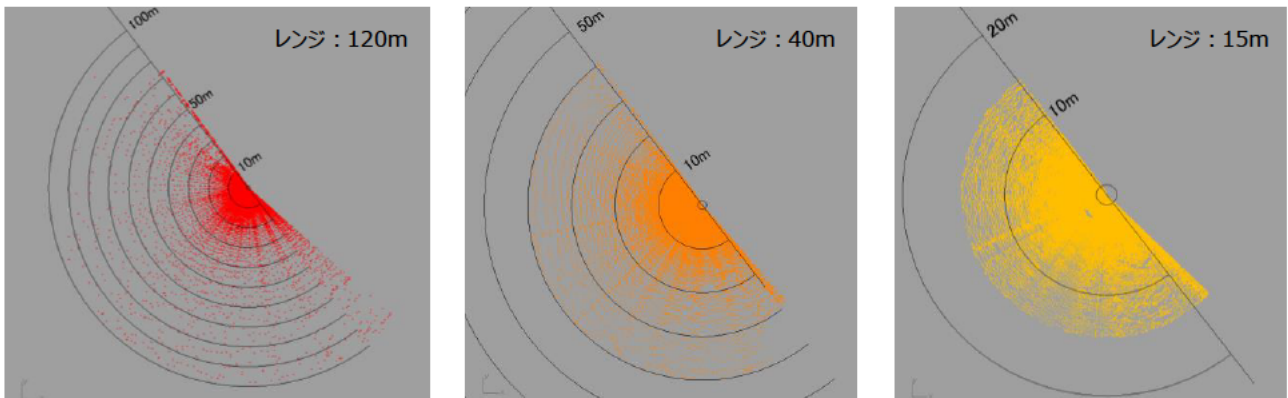


図-37 計測レンジによるデータ密度の違い (Seabat8125)

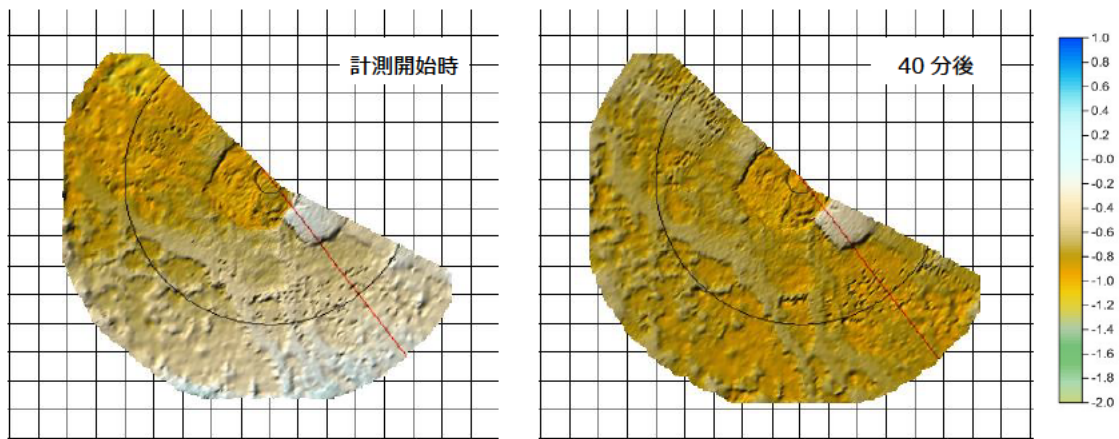


図-38 潮位変動による海水の上下動

3. 3 現地試験 (平成 24 年度)

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-39 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-37 でデータ密度の違い

について示したが、全レンジの計測結果で放射状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ナーの回転を手動で行ったため、回転速度が一様にならず、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、平成 24 年度は、電動パンチルト装置にソナーヘッドを取り付け海底に設置する方法を検討した。



図-39 計測台付近で採取した海氷（左）と海氷面への単管投入（右）

3. 3. 1 計測装置改良

計測装置はマルチビームソナー（Seabat8125）のソナーヘッド、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-40）。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（図-41）。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。今回の計測箇所の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。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-42）。

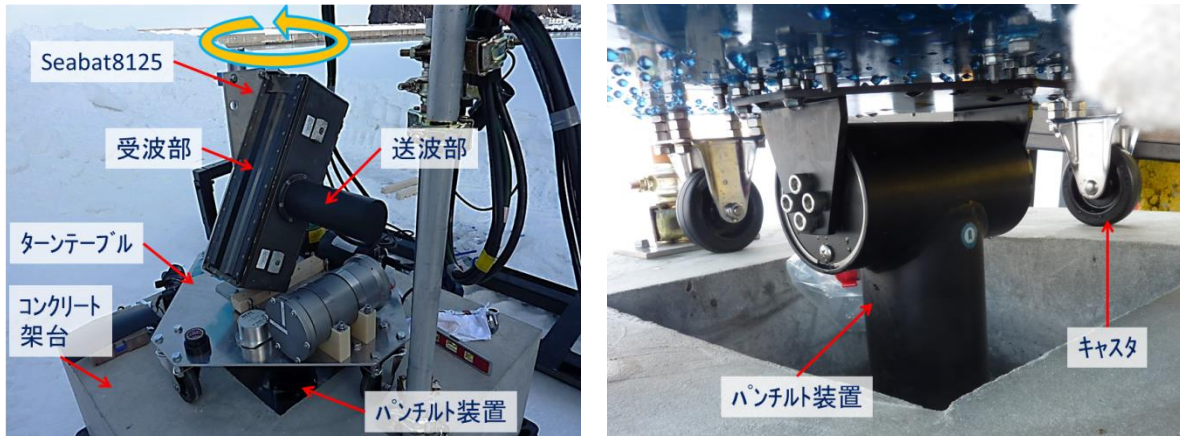


図-40 計測装置

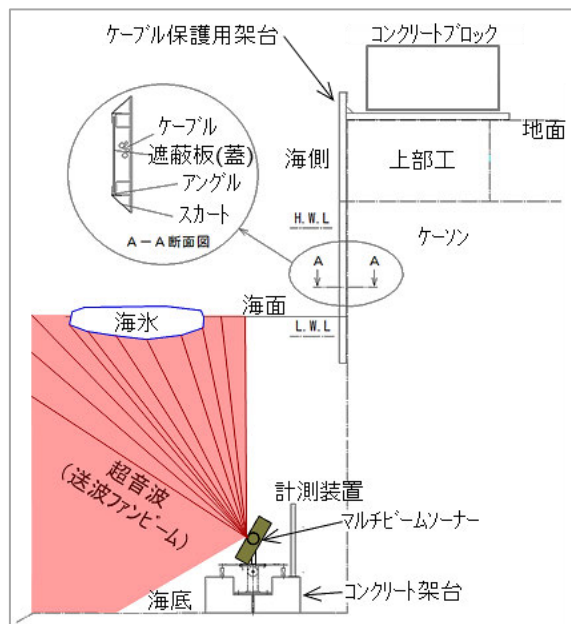


図-41 計測方法 (平成 24 年度)

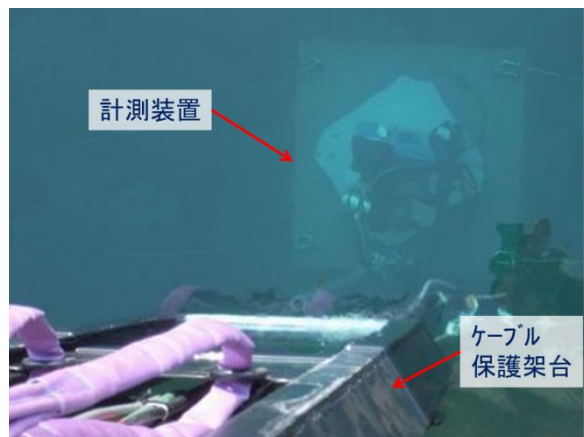


図-42 ケーブル保護用架台

3. 3. 2 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。

(1) 計測場所、試験期間

- ・試験場所： ウトロ漁港（前年度と同じ）
- ・試験期間： 平成 25 年 2 月 13～15 日

(2) 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-43）。
- ・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。
- ・ケーブル保護用架台の蓋（鉄板）を上部よりスライドさせて前面部を遮蔽する。

また、使用する機械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。
- ・計測時は不測の事態に備えバックホウを近接に配置する。

なお、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。



図-43 計測装置の海中への投入

3. 3. 3 計測方法

計測方法は以下のとおりである。

- ・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。
- ・実施日時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）

機器：マルチビームソナー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）

- ・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。

また、データ処理方法は以下のとおりである。

- ・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. 4 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-44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できていることがわかる。

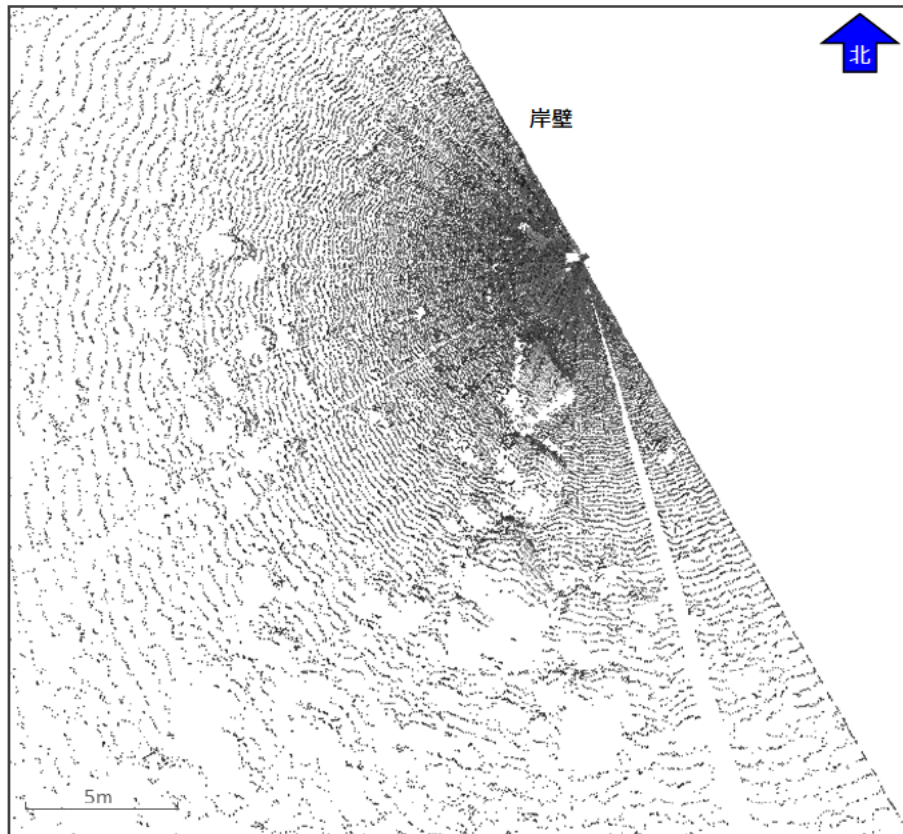


図-44 海氷下面の凹凸形状

(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-45左)。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-45右)。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。

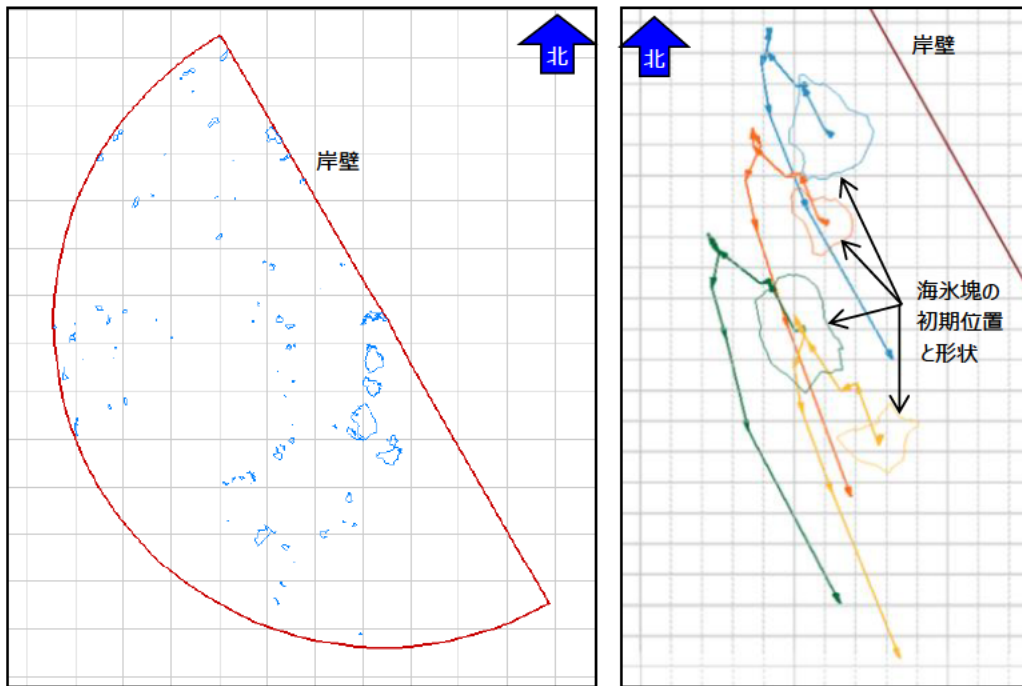


図-45 海氷断面の外周形状（左、赤枠は計測範囲）と海氷塊の軌跡（右）

3. 4 適用範囲検証試験（平成 25 年度）

平成 25 年度は回転装置の使用可能な回転速度、計測可能範囲について検証するための計測を行った。

(1) 試験場所、試験期間

試験場所および期間を以下に示す。

- ・ウトロ漁港（前年度と同じ）
- ・試験期間：平成 26 年 2 月 25 日～27 日

気象庁のアメダスデータ⁹⁾によるとこの期間、最高気温は連日プラスであり、平均風速も 1m 未満と非常に穏やかな気象条件であった。また港内の海氷は全面結氷し、港外も海氷が密接しており、全く海氷が移動しない状況であった（図-46 左）。



図-46 海氷状況（左、平成 26 年 2 月 24 日）と模擬海氷（右）

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-46 右）。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、開水面を作製した（図-47）。試験方法を図-48 に示す。開水面内の海側へ向かって右方に計測装置を設置し、計測装置位置を 0m とした。そこから左に 5m、7.5m、15m の位置（以下、「模擬海氷岸壁法線方向位置〇m」という）で、約 2m 海側（開水面のほぼ中央）に模擬海氷を停止させ計測した。



図-47 砕氷作業（左）と開水面（右）

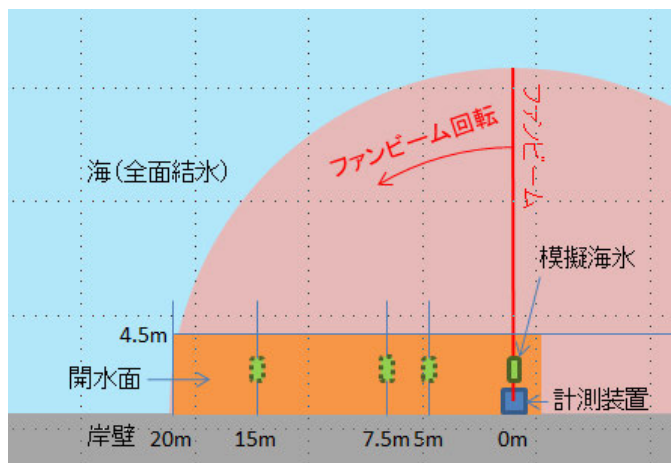


図-48 試験方法（橙色部分が開水面）

3. 4. 2 試験結果

(1) 半径方向および深さ方向分解能

図-49 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0.3～0.4m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。

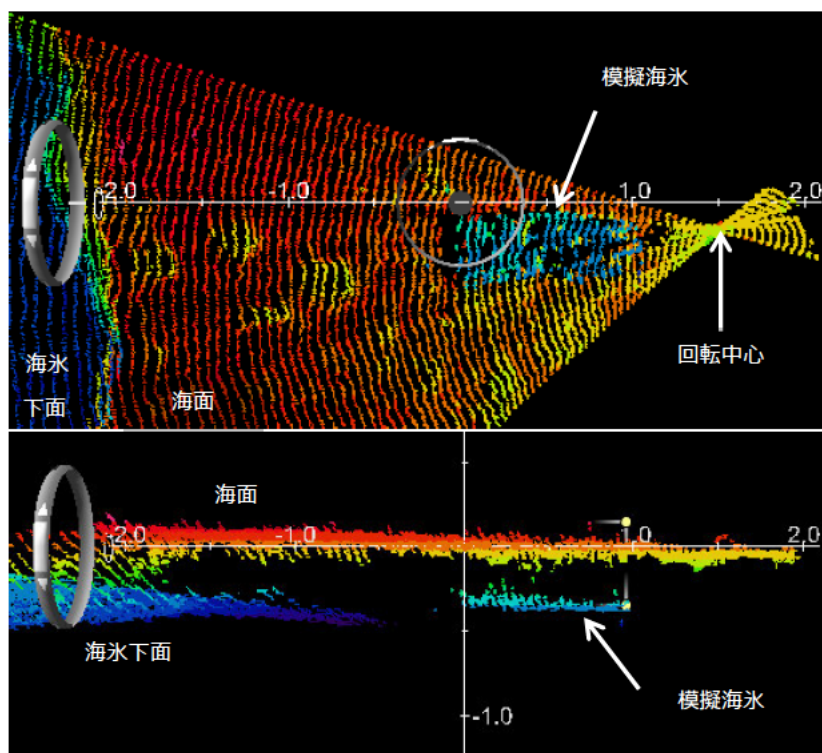


図-49 模擬海氷下面計測結果（上：平面図、下：鉛直断面図）

(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-50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、4deg/sの場合でも回転方向のデータ密度の方が高く、回転速度は4deg/sでもデータに影響はない。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。

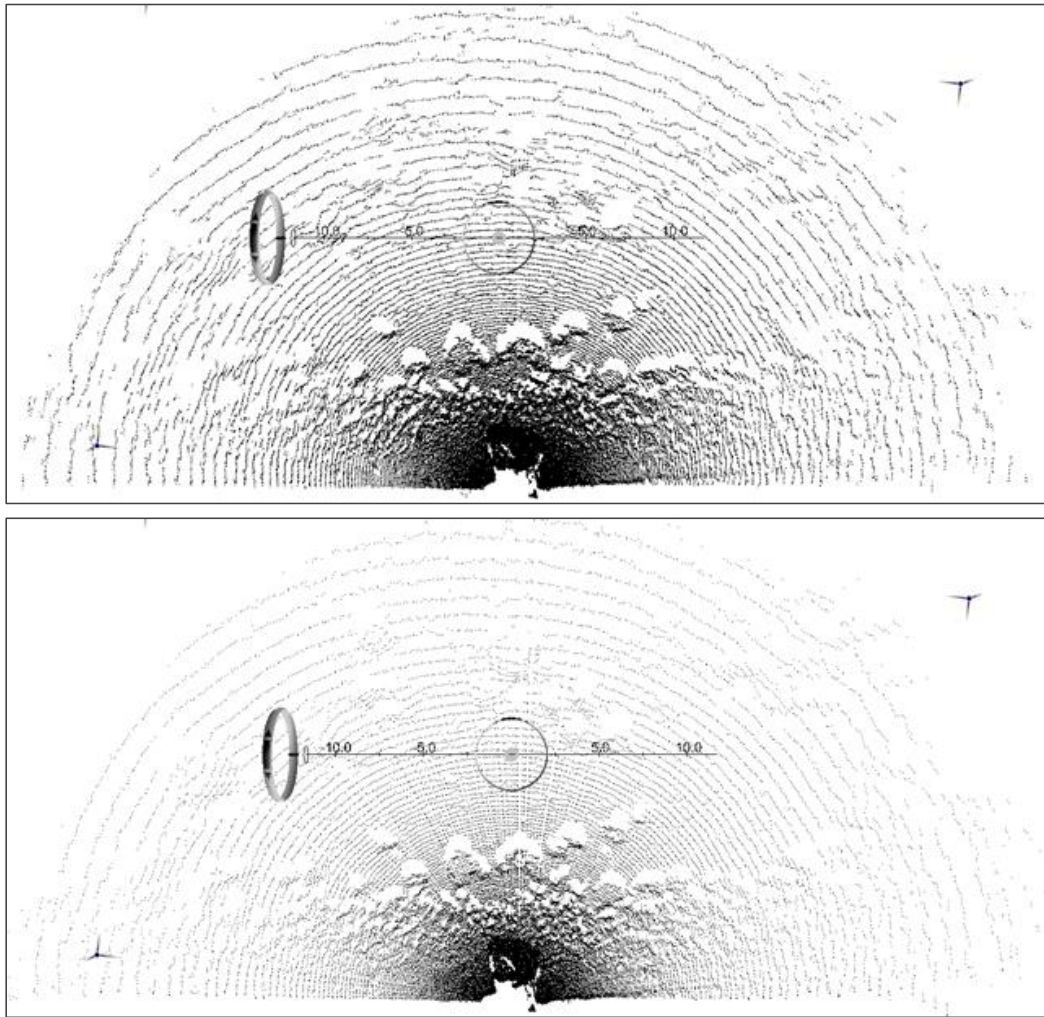


図-50 回転速度によるデータ密度の違い（上：0.5deg/s、下：4deg/s。各図の中央の円、楕円および直線は解析ソフトウェア Fledermaus（QPS 社）の操作ハンドルおよびスケール（円の中央が 0m）

(3) 計測可能範囲

図-51 は模擬海氷岸壁法線方向位置 5m、7.5m、15m、回転速度 2deg/s における計測結果である。5m、7.5m の場合は模擬海氷を塊として認識できるが、15m では半径方向のデータの間隔が広がっている。これは使用したマルチビームソナーの 1 本の音響ビームのビーム幅が 0.5 度であり、ソナー直上の海面ではデータ密度が大きくなり、水平距離が遠くなるほどデータ密度が小さくなるためである。

ここで半径方向のデータ間隔について考察する。マルチビームソナー水深を d [m]、マルチビームソナーの音響ビームのビーム番号を m （真上から 1、2、3、…）とすると、ソナーからの音響ビームが海面に当たるときの半径方向距離 r_m [m] は

$$r_m = d \times \tan(0.5 \times (m - 1)) \quad \dots (1)$$

となる。よって海面に当たるときの m 番目と $m-1$ 番目のビームの半径方向距離の差 Δr [m] が、半径方向のデータ間隔となり、式 (1) をグラフにすると図-52 となる。

計測時のマルチビームソナー音波受波部の水深は約 4.5m で、このとき回転中心からの距離が 5m、7.5m、15m の位置における半径方向のデータ間隔はそれぞれ約 8cm、15cm、45cm となり、実測データの海面部分の同心円模様の間隔とほぼ一致していた。以上より、長さ 1m 程度のターゲットを塊として認識するには半径方向データ間隔が 15cm 程度である必要があり、ソナー水深 4.5m では計測半径は 7.5m 程度（水深の約 1.7 倍）であることがわかった。

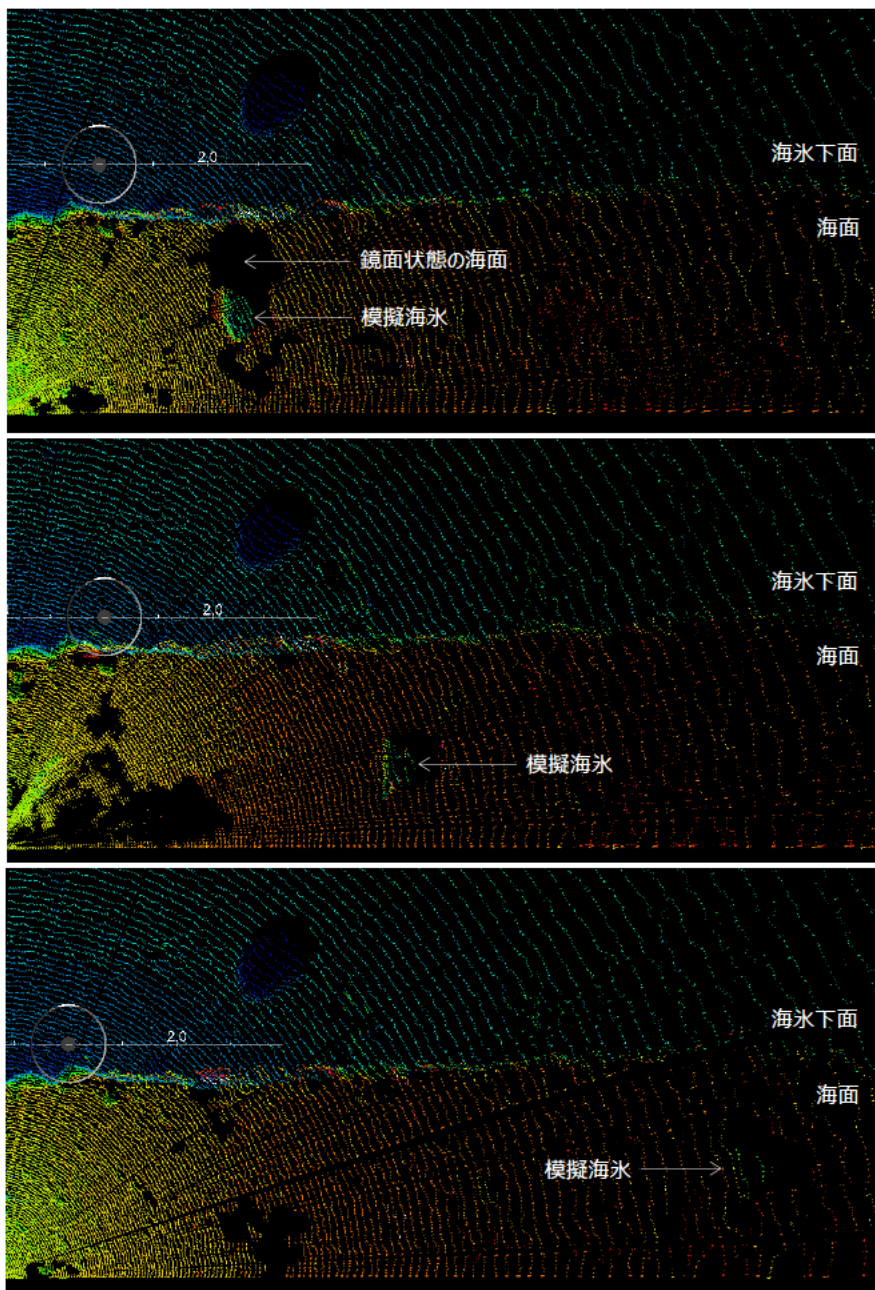


図-51 模擬海水位置を変更しての計測（上：5m、中央：7.5m、下 15m。各図の中央左の円および直線は解析ソフトウェア Fledermaus の操作ハンドルおよびスケール（円の中央が 0m））

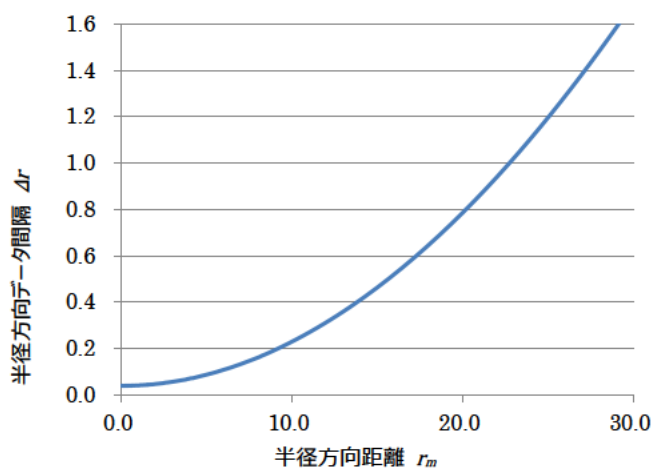


図-52 半径方向データ間隔 ($d = 4.5$ [m])



図-53 模擬海氷計測状況 (図-51 上のデータを計測した時刻とほぼ同じ時刻に撮影)

長さ 1m のターゲットに 15cm 間隔で音響ビームが当たれば塊として認識できることから、6.7 回ビームが当たれば認識可能と考える。この値からソーナーの水深とターゲットの長さを変化させ、本装置の計測可能半径を計算する。 $m-1$ 番目の音響ビームが海面に当たるときの半径方向距離 r_{m-1} [m] は式 (2) となる。

$$r_{m-1} = d \times \tan(0.5 \times (m - 2)) \quad \dots (2)$$

$$r_{m-1} = r_m - \Delta r \quad \dots (3)$$

式 (1) ~ (3) から r_m は

$$r_m = \frac{-\Delta r \pm \sqrt{\Delta r^2 - 4 \cdot (d^2 - \Delta r \times d / \tan(0.5))}}{2} \quad \dots (4)$$

となる。ターゲットの代表長さを l [m]、ターゲットに半径方向にビームが当たる回数を b [回] とすると

$$\Delta r = l/b \quad \dots (5)$$

となる。ソーナー水深 d [m] において、 $b = 6.7$ 、 $l = 1, 3, 5$ としたときの計測可能半径は式 (4)、(5) から図-54 のようになる。

この図からターゲットに半径方向にビームが当たる回数と同じであれば、ターゲットが大きいほど計測可能

半径は大きくなるのがわかる。たとえば岸壁の水深として一般的である7.5mにソナーを設置した場合、図中の点線との交点の半径となるが、過年度の計測時に見られた実際の海氷塊は直径にして約3mほどであったことから、計測可能半径は約17mとなる。

また、無風状態などで海面に全く波が立たない鏡面状態の場合、海底に設置したマルチビームソナーから送信された音波は、海面で鏡面反射し、その箇所についてはデータが欠測となることがわかった（図-51上、図-53）。しかし今回の計測で鏡面反射が生じたのは、全面結氷していた港内の海氷を奥行き約4.5m、幅約23mに渡り砕氷して開水面を作ったことで、周囲の海氷が動く、または風が吹くなどの現象が起こらない限り、波が立つことがない状況だったためであり、実際に海氷計測を行う場合には同様の条件で計測することはないと考える。

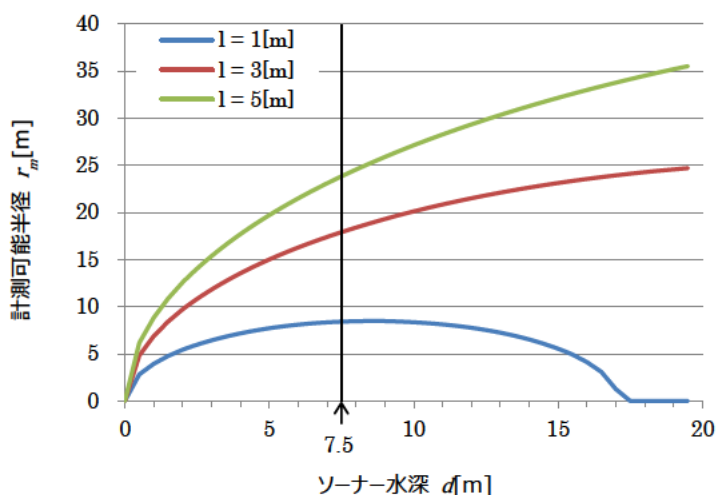


図-54 ターゲット長さ、ソナー水深と計測可能半径の関係

4. まとめ

水中構造物内部の劣化・損傷状況探査技術について、パラメトリック送受波器を導入し、性能試験を行い、パラメトリック送受波器が鋼矢板背後の物体や異なる材質の境界までの距離を計測できることがわかった。また、パラメトリック送受波器を用いて水中構造物の内部探査を行うために、バックホウにより計測する手法を検討し試験を行い、船舶による計測に比べ動揺が大幅に低減することができ、計測精度を向上させることができることを確認した。さらに、岸壁水中部の点検に使用する機器の設置・配線・設定に関する煩雑さを軽減し、簡易な操作で計測を行うことを可能とするシステムについて検討し仕様を作成した。これらをシステム化することで水中構造の内部探査を行うことが可能となる。

また、沿岸施設に近づく海氷の計測技術について、マルチビームソナーとパンチルト装置を組み合わせ、海底から計測を行う手法を考案し、試験を行い、海氷下面形状を計測可能な技術を開発した。

5. 謝辞

本研究を行うにあたり、国立大学法人東京大学生産技術研究所の虻川和紀氏（現 国立研究開発法人港湾空港技術研究所）および水野勝則特任助教には、室内試験、現地試験、解析の全過程に渡り尽力していただきました。また、国立大学法人熊本大学沿岸域環境科学教育センターの秋本和實准教授には、SES2000 の機材提供および操作法のご指導をいただきました。さらに、国土交通省北海道開発局小樽開発建設部小樽港湾事務所および網走開発建設部網走港湾事務所、北海道岩内町、岩内郡漁業協同組合、北海道斜里町、ウトロ漁業協同組合の皆様には、現地試験におけるフィールドの提供などご協力いただきました。ここに厚くお礼申し上げます。

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) 国土交通省：既存の社会基盤施設の維持・管理、統合科学技術会議、社会基盤PT、第7回、2009
- 3) 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）
- 4) 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巻、pp.171-176（2010）
- 5) 海洋音響学会編：海洋音響の基礎と応用（（株）成山堂書店、東京、2004）
- 6) F. Madricardo, S. Buogo, P. Calicchia, G. B. Cannelli, S. Donnici and A. Lezziero: “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) 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
- 8) 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
- 9) 気象庁ホームページ：気象庁 | 過去の気象データ検索（宇登呂 2014年2月（日ごとの値））

共同研究報告書
COOPERATIVE RESEARCH REPORT of P.W.R.I.
No.467 October 2015

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所
寒地土木研究所 寒地技術推進室

〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 電話 011-590-4046