

博士論文

水中構造物の音響可視化診断

東京大学大学院新領域創成科学研究科

環境学研究系海洋技術環境学専攻

虻川和紀

# 目次

<b>1. 序論</b> .....	<b>1</b>
1.1 はじめに .....	1
1.1.1 社会資本の老朽化 .....	1
1.1.2 水中構造物の老朽化と劣化 .....	3
1.1.3 港湾構造物の検査手法 .....	4
1.1.4 水中部に必要な点検項目 .....	7
1.2 目的 .....	8
<b>2. マルチビーム測深器を用いた外部形状調査</b> .....	<b>10</b>
2.1 はじめに .....	10
2.2 マルチビーム測深機 .....	10
2.3 船橋港湾調査 .....	11
2.3.1 調査地 .....	11
2.3.2 調査機器 .....	12
2.3.3 調査機器配置 .....	15
2.3.4 調査方法 .....	16
2.3.5 解析手法 .....	17
2.3.6 結果 .....	24
2.4 岩内港湾調査 .....	29
2.4.1 調査地 .....	29
2.4.2 調査機器 .....	30
2.4.3 艀装方法 .....	32
2.4.4 計測方法 .....	34
2.4.5 計測結果 .....	35
2.5 まとめ .....	36
<b>3. 音響ビデオカメラを用いた高解像度外部形状診断</b> .....	<b>39</b>
3.1 はじめに .....	39
3.2 高分解能音響ビデオカメラ .....	39

3.3	岩内港調査 .....	42
3.3.1	調査地 .....	42
3.3.2	調査機器.....	44
3.3.3	艀装方法.....	46
3.3.4	計測方法.....	48
3.3.5	解析方法.....	50
3.3.6	結果 .....	52
3.4	分解能向上のための調査手法検討と実地試験 .....	53
<b>4.</b>	<b>パラメトリックソナーを用いた内部空洞探査 .....</b>	<b>54</b>
4.1	はじめに .....	54
4.2	パラメトリック地層探査システム .....	54
4.3	現地調査 .....	57
4.3.1	調査地 .....	57
4.3.2	調査機器.....	57
4.3.3	調査機器配置.....	58
4.3.4	調査方法.....	59
4.3.5	解析手法.....	60
4.3.6	結果 .....	62
4.4	集束型音響レンズの作成 .....	64
4.5	集束型音響レンズを装着したパラメトリックソナーを用いたコンクリート 水槽内試験.....	65
4.6	集束型音響レンズを装着したパラメトリックソナーを用いた現地試験 ..	69
4.6.1	試験方法.....	69
4.6.2	試験結果.....	71
4.7	集束型パラメトリックソナーの開発 .....	73
4.7.1	集束型パラメトリックソナー .....	73
4.7.2	音響特性試験.....	74
4.7.3	透過波試験.....	77

4.8	新型集束型パラメトリックソナーの開発 .....	80
4.8.1	集束型パラメトリックソナーの開発設計 .....	80
4.8.2	集束型パラメトリックソナー .....	82
4.8.3	集束型パラメトリックソナー試験 .....	84
4.8.3.1	試験方法 .....	84
4.8.3.1	測定結果 .....	84
4.8.4	寒地水路試験 —鋼矢板透過試験— .....	87
4.8.4.1	試験方法 .....	87
4.8.4.2	試験結果 .....	88
4.8.5	パラメトリックソナー現地試験 .....	97
4.8.5.1	試験場所 .....	97
4.8.5.2	計測機器 .....	99
4.8.5.3	艀装方法 .....	100
4.8.5.4	試験方法 .....	102
4.8.5.5	試験結果 .....	103
4.9	まとめ .....	104
<b>5.</b>	<b>結論 .....</b>	<b>114</b>
	<b>参考文献 .....</b>	<b>117</b>
	<b>謝辞 .....</b>	<b>122</b>

# 1. 序論

## 1.1 はじめに

### 1.1.1 社会資本の老朽化

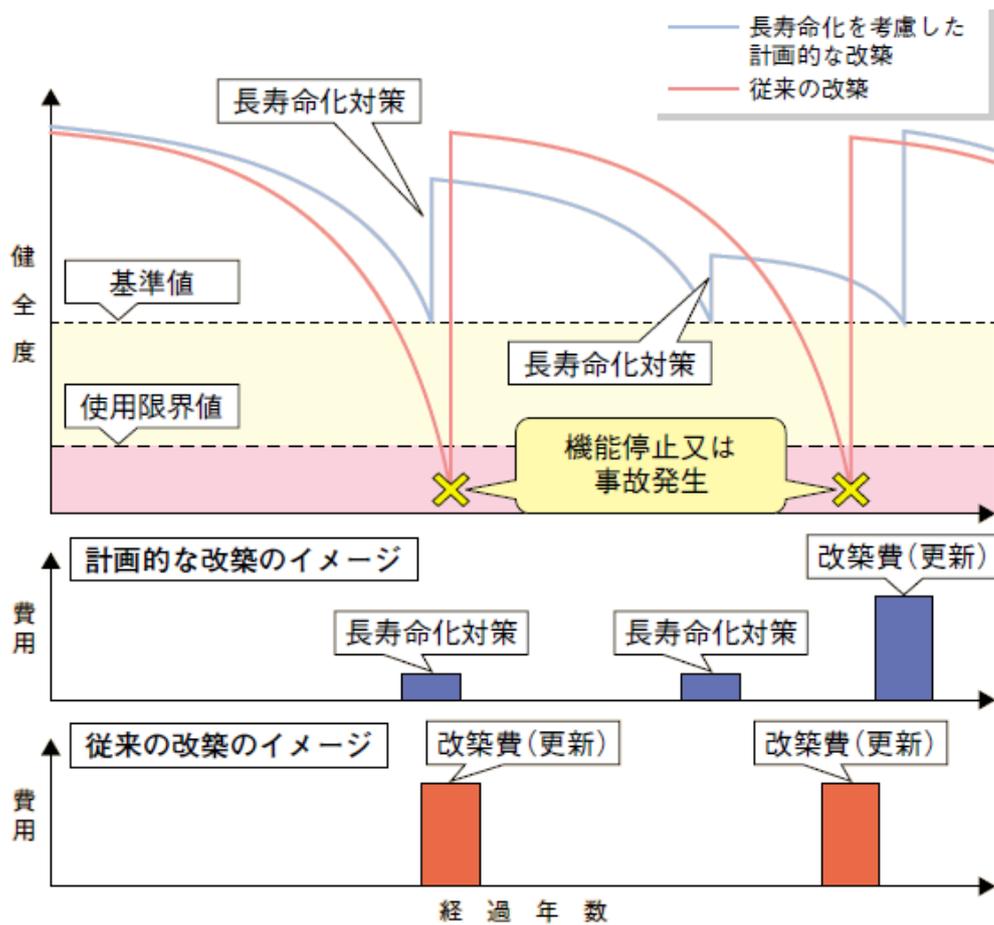
国民生活やあらゆる社会経済活動は、道路・鉄道・港湾・空港等の産業基盤や生活基盤、国土保全のための基盤、都市を形成するインフラによって支えられている。わが国では、昭和 39 年の東京オリンピックのころに整備された首都高速道路など高度成長期以降に整備された社会資本が今後急速に老朽化するとされている[1]。平成 21 年度国土交通白書[2]に建設後 50 年以上経過する社会資本の割合を示したものがある。Table 1-1 に示すように 2009 年と 2029 年を比較すると、道路橋は約 8%から約 51%へ、河川管理施設(水門等)は約 11%から 51%へ、下水道管きよは約 3%から約 22%へ、港湾岸壁は約 5%から約 48%へ急増する。急速な老朽化の進行による課題として、維持管理費や更新費の急増、重大な事故や致命的な損傷等が発生するリスクが飛躍的に高まることがあげられる。維持管理費や更新費の急増では、現在の維持管理や更新の水準を維持するために、ピーク時である 2030 年頃には現在の約 2 倍必要となるとされている[3]。そのため、単純に更新を行うだけではない社会資本の維持管理や更新の方策などの検討が必要である。老朽化した社会資本の重大な事故や損傷では、2007 年 8 月に起きた米国ミネソタ州の鋼トラス橋が供用中に突然崩落し、多数の死傷者を出す重大事故が発生している。国内では、2007 年に岐阜県木曾川大橋と秋田県本荘大橋で部材が破断するなどの重大な損傷が報告されている[4]。

急速に進行する社会資本の老朽化より、維持管理費や更新費の急増と重大な事故や致命的な損傷等が発生するリスクが飛躍的に高まることが示唆されている。この事態に対応するために、ストックの状態を点検し、異常が認められれば、致命的欠陥が発現する前に速やかに措置し、寿命を延ばすことによりライフサイクルコストの低減を図るという「予防保全的管理」(Fig.1-1)への移行が進められている[5]。

Table 1-1 建設後 50 年以上経過する社会資本の割合

	2009年度	2019年度	2029年度
道路橋	約8%	約25%	約51%
河川管理施設(水門等)	約11%	約25%	約51%
下水道管きよ	約3%	約7%	約22%
港湾岸壁	約5%	約19%	約48%

(出典：平成 21 年度国土交通白書)



(出典：平成 20 年度国土交通白書)

Fig1-1 予防保全対策を考慮したライフサイクルコストの低減

### 1.1.2 水中構造物の老朽化と劣化

港湾施設は、四方を海洋に囲まれるわが国にとって、安全・安心な生活や円滑な経済社会活動を担っている。一般に港湾施設では、防波堤等の外郭施設、岸壁等の係留施設、航路・泊地等の水域施設等の基幹施設が設置される。これらの施設がそれぞれにその機能を十分に発揮し、かつ個別の機能が相互に効率的に結びつくことで、港湾自体もまたその使命を十分に果たすことができる[6]。港湾施設も高度経済成長期に集中して多く建設された。高度経済成長期の始めは、小型の船舶が多く使用されたことと、港湾の水深も浅いことから重力式ケーソン構造が多く建設された。その後、経済活動の発展に伴い大型の船舶が使用されるようになり、大水深岸壁の需要が高まり、コンクリートに比べると大水深に有利で軟弱地盤にも対応でき、安価で容易な施工で高い信頼性が得られる鋼矢板や鋼管杭が使用された岸壁が多く建設された。建設当時は、コンクリート構造物は劣化しない構造物であり、鋼矢板や鋼管杭は供用中の腐食しるを確保すれば維持管理を必要としないメンテナンスフリーの構造物だと考えられていた。しかし、港湾施設は、海水に直接暴露される極めて過酷な環境下に置かれているため、老朽化した港湾施設で塩害による鉄筋の腐食やコンクリートの剥離・剥落が報告されている。また、鋼矢板や鋼管杭構造物では、設計当初よりも腐食の進行速度が激しく肉厚不足や腐食孔の発生被害が報告されており、健全な状態を維持することは容易ではない[7][8][9]。港湾岸壁の背面土砂が吸出しを受け、Fig.1-2 の様な内部空洞が発生し局所的な地盤沈下や上面陥没が発生した被害例も数多く報告されている[10][11]。水域施設の空洞化現象に関してこれまで施工不良や洗掘などいくつかの要因が考えられてきた。特に多いのが海底地盤の液状化現象による吸出しである[12][13][14]。近年では、路面部が陥没した護岸の付近に矢板の腐食孔やケーソン目地の劣化が発見されており、そのような損傷から背面土砂の吸出しが起り空洞化の発生が報告されている[15][16]。港湾でも急速な老朽化が問題視されており、図1に示したように港湾岸壁は、20年後には現存する施設の約48%が老朽化し、上記のような重大な事故や致命的な損傷等が発生するリスクが高まっている。そのほかにも、2011年3月に起きた東日本大震災の際に、老朽化し劣化し耐久力の低下が発生した港湾岸壁で傾斜や崩壊が頻発した。また、見た目が健全な岸壁においても内部損傷が促進された可能性が示唆されている[17]。



(出典：北海道開発局留萌開発建設部留萌港湾事務所)

上部路面陥没 北海道遠別港



(出典：北海道開発局留萌開発建設部留萌港湾事務所)

鋼矢板岸壁の腐食劣化 北海道遠別港



(出典：鹿島港湾・空港整備事務所)

地震による岸壁の崩壊 鹿島港湾岸壁

Fig1-2 損傷を受けた港湾岸壁

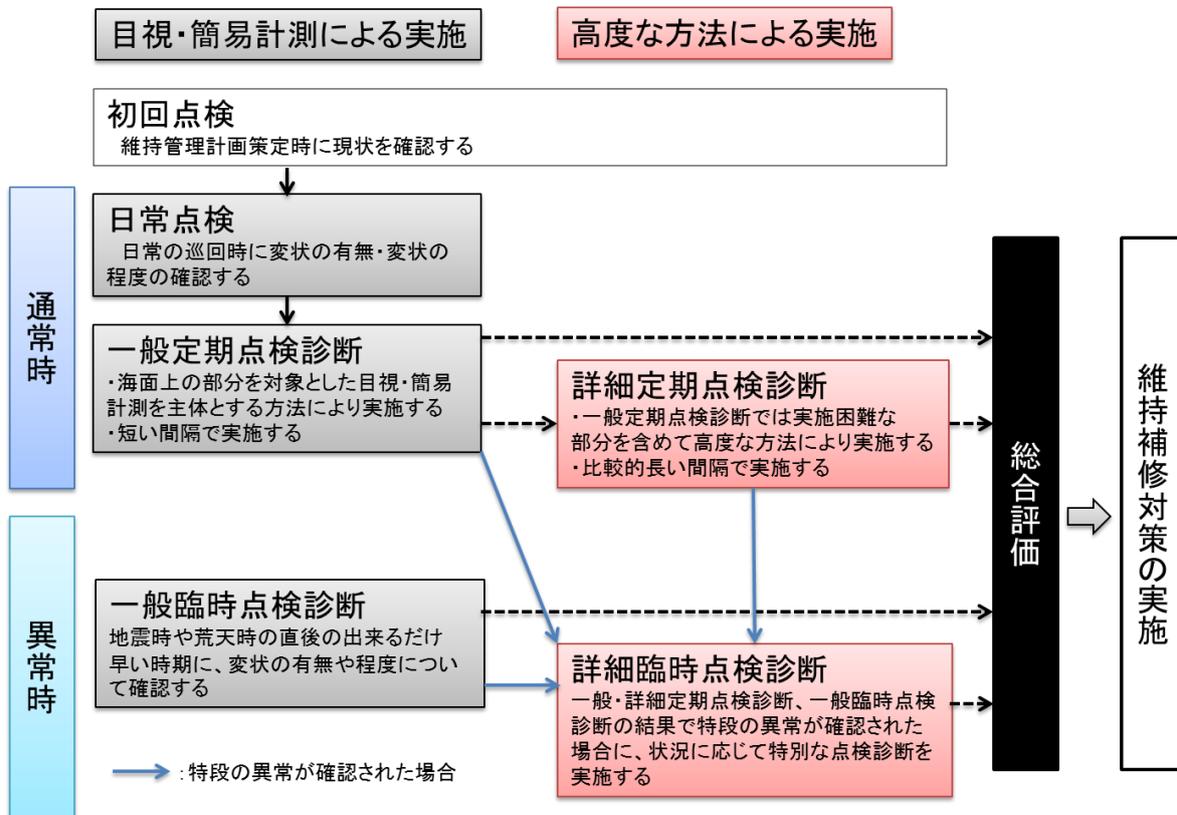
### 1.1.3 港湾構造物の検査手法

港湾構造物の健全な状態を維持し管理するためには、構造物の状態をいかに把握し管理する必要がある。

港湾施設では、Fig.1-1 で示したようにライフサイクルコストの低減を図るとともに、港湾の施設機能を良好に保持し、安全性の低下を防止するための点検、評価、補修等の総合的な維持管理を行っている。港湾施設の定期点検は、初回点検、日常点検、定期点検、臨時点検診断に分けられ実施されている。各点検の診断種類と実施時期を Fig.1-3 に示す[61]。

日常点検や一般定期点検では、日常の巡回時に変状の有無や程度の確認、海面から上の部分を対象とした目視調査を主体として行っている。陸上部や海面上部に現れた異常は日常点検や一般定期点検で発見することができる。しかし、前述したケーソン目地からの裏理材の吸出しや鋼矢板の腐食孔は海面付近や海面下で発生するため、日

常点検や一般点検診断では発見できない。



(出典：港湾構造物の維持・補修マニュアル)

Fig1-3 各点検の診断種類と実施時期

水中部分の調査が含まれるのは詳細定期点検診断である。診断時期は各港湾の重要度によって異なっている。詳細定期点検診断では、コンクリート構造物のひび割れ、剥離・剥落、ケーソン目地の劣化具合の目視調査、鋼構造物の目視、鋼材の腐食、亀裂、損傷や変状の点検を潜水土によって点検している。また、岸壁直下の海底部の洗掘や土砂の堆積を潜水土による計測や測量機器を用いて点検している。Fig.1-4 に、現在行われている岸壁の点検手法をまとめる。

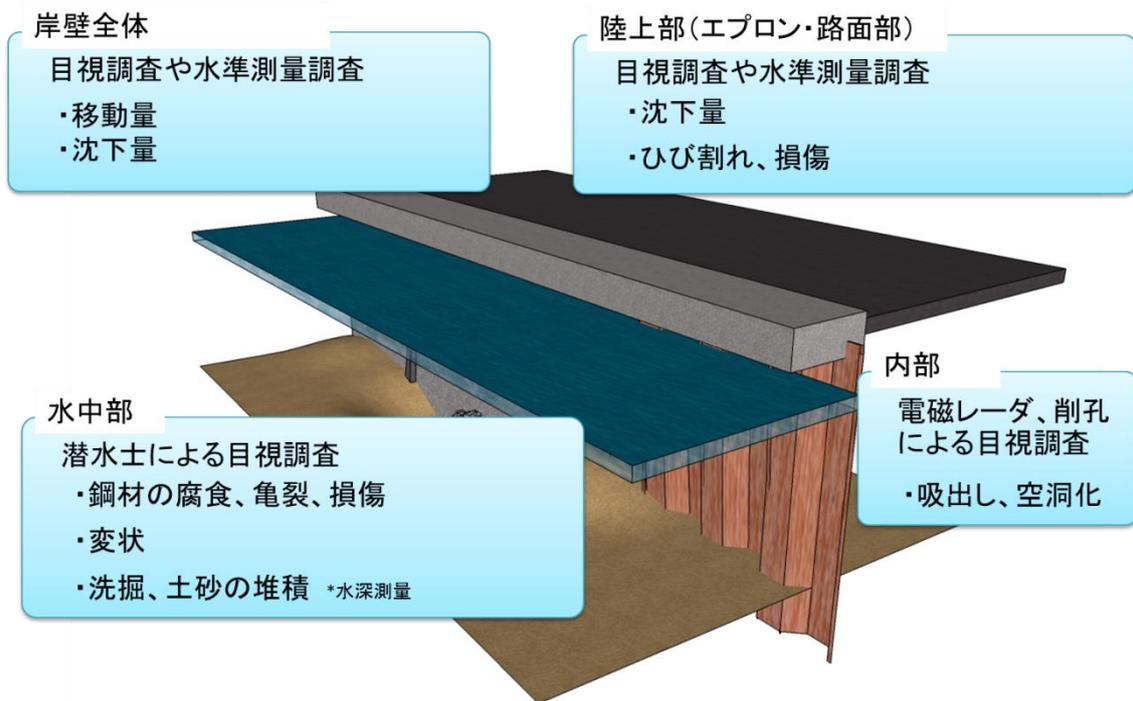


Fig1-4 岸壁の点検手法

港湾構造物の水中部の点検は、陸上部の点検とは大きく異なっており容易には点検出来ず、潜水士による目視や写真撮影での点検を主としている。潜水士による点検は、港湾構造物の水中部全体ではなく、ある程度の間隔毎に目視や異常部の写真撮影を行っており、港湾構造物全体の点検はほとんど行われていないのが現状である。また、水中の濁度状況に作業効率が影響し、透明度の低いところでは手探りでの点検となり困難な作業である。さらに、現在水中部の岸壁内部情報の取得が不可能で、港湾構造物点検時に必要な項目にも関わらず、技術的問題から岸壁路面部付近までの調査に限られており、水中部の内部診断は行われていなかった。維持管理を行う上で、水中構造物の水中部の状況をより効率よく、正確に把握可能な点検技術が求められている。

### 1.1.4 水中部で必要な点検項目

劣化状況診断手法の提案にあたり、港湾構造物水中部で必要な点検項目を Table 1-2 のように定めた。定めた点検項目は、港湾構造物の維持・補修マニュアルを基礎とした。マニュアルにない必要項目は、現時点で行われている潜水土調査や地中レーダー、削孔調査の点検報告書を参考とした。

#### 1、 構造物水中部全体調査

潜水土調査の問題点となっている面的に効率よく調査が出来ない点を解決するために、水中部全体を効率よく調査を行えることを必要な点検項目とした。

#### 2、 海底状況

港湾構造物の維持・補修マニュアルにも挙げられている海底状況把握を点検項目とした。港湾構造物の維持・補修マニュアルでは、構造物直下の海底地盤に洗掘や土砂堆積の有無を点検項目としている。点検方法は、潜水調査や水深測量で海底面の起伏、洗掘傾向か堆積傾向を測定している。判定基準として、深さ 1m 以上の洗掘、マウンドや構造物への影響の有無、深さ 0.5m 未満の洗掘又は土砂の堆積の有無となっている。以上から、点検項目を定めるにあたり、0.1m 分解能で海底状況を調査可能にする調査方法の提案を行う。

#### 3、 変状

港湾構造物の維持・補修マニュアルにも挙げられている構造物全体の変状を点検項目とした。港湾構造物の維持・補修マニュアルでは、傾斜と法線方向の凹凸を点検項目としている。現在は、水中部の計測が技術的に困難なため陸上部で傾斜と法線方向の凹凸を計測している。変形の許容限界値の例として、傾斜：3～5度(順勾配)や法線の凹凸：20～30cm と示されている。変形の許容限界値の例から水中部の点検項目では、傾斜角を1度分解能、法線方向の凹凸を0.1 m 分解能で計測することとした。

#### 4、 鋼材の腐食、亀裂、損傷

港湾構造物の維持・補修マニュアルにも挙げられている鋼材の腐食、亀裂、損傷を点検項目とした。点検方法は、潜水土による目視調査、直接計測を行っている。判定基準として、腐食による開孔や変形、その他著しい損傷があることや裏理材が流出している兆候があるなど、腐食孔の有無となっている。また直接計測では、孔食等を変状図として整理するとある。以上のことから、鋼材の腐食、亀裂、損傷状況の有無を点検項目とするとともに、腐食孔等の形状を計測可能なものとした。形状計測では、潜水土が1 m 程度離れ目視できる程度の大きさ(0.1 m 程度)から直接計測で計測可能な0.01 m を計測可能な方法とした。

## 5、 内部状況

港湾構造物の維持・補修マニュアルにも挙げられている岸壁内部状況を点検項目とした。内部状況調査では、裏理材の吸出し、空洞化を点検項目としている。点検方法は、電磁波レーダーや削孔による目視調査などを行っている。判定基準として、吸出しが生じている、もしくはその可能性がある、空洞が生じている可能性があるとなっている。以上のことから水中部において、吸出しや空洞の有無を点検項目とするとともに、空洞の形状や発生位置を計測可能なものとした。発生位置や形状計測では、現在行われている削孔による目視調査や電磁波レーダー調査の点検報告を参考にし、0.1 m 分解能で計測可能な方法とした。

Table 1-2 水中部の必要点検項目

点検項目	点検基準	必要分解能
構造物水中部 全体調査	全体調査可能	
海底状況	洗掘、土砂堆積の有無 形状	0.1 m
変状	傾斜 法線方向の凹凸	1度 0.1 m
鋼材の腐食、 亀裂、損傷	腐食孔等の有無 形状	0.01 ~ 0.1 m
内部状況	吸出し、空洞の有無 発生位置、形状	0.1 m

## 1.2 目的

以上のように、近年、港湾構造物の劣化や局所的な地盤沈下や上面陥没が発生した被害例が数多く報告され、現存の施設状況を正確に把握することが重要とされている現状から、維持管理を行う上で水中構造物の水中部の状況をより効率よく、正確に把握可能な水中部の港湾構造物の劣化状況診断手法を提案する。特に本研究では、高度経済成長期に数多く建設され、現在老朽化が問題となっている鋼矢板岸壁を対象として診断手法の提案を行う。診断手法の提案にあたり、1.1.4 章で説明した水中部の必要点検項目を満たす点検手法の開発を目指す。また、水中部の点検を目的とすることから、海洋調査に使用される音響機器に注目した。

本研究では、Fig1-5 に示すようなマルチビーム測深器や音響ビデオカメラを使用し外部形状を把握する劣化診断手法とパラメトリックソナーを用いた岸壁内部診断手法の提案を行う。マルチビーム測深器を用いた調査では、1、水中部全体調査 2、海底状況 3、変状 4、鋼材の腐食、亀裂、損傷を目的として調査方法の提案を行う。音響ビデオカメラを用いた調査では、4、鋼材の腐食、亀裂、損傷の詳細な計測を目的としている。サブボトムプロファイラー(パラメトリックソナー)を用いた調査では、5、内部状況の調査方法の提案を行う。

本研究によって港湾構造物状況を正確に把握可能な診断手法の効率化が進むことにより、港湾岸壁の状況を、視覚的にわかりやすいデータとして提供できるため、維持管理が容易になり、経過観察や緊急時点検に有効活用できる。また、港湾岸壁だけではなく海岸護岸、河川護岸に応用可能である。岸壁だけではなく、コンクリートを透過し検査できるので、沿岸防波堤や橋脚の水中基礎の内部・外部診断にも応用可能だと考えられるため、多くの水中構造物の維持管理への貢献が期待できる。

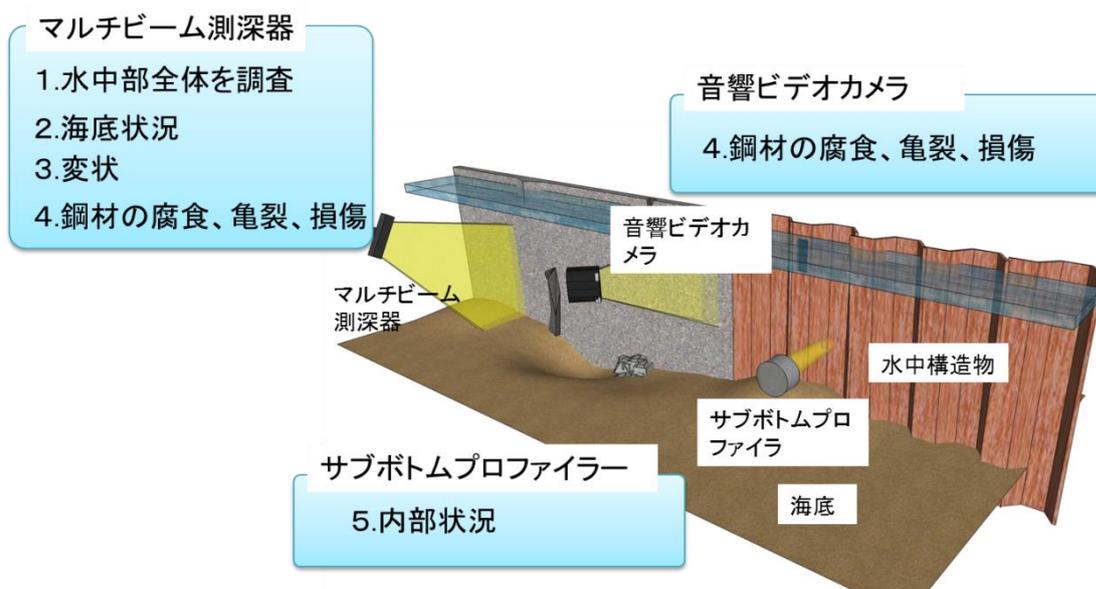


Fig1-5 提案手法

## 2. マルチビーム測深器を用いた外部形状調査

### 2.1 はじめに

第1章で述べたように、岸壁の外部形状調査は、潜水士による目視調査及び直接計測が主流であり、岸壁の全体像を把握するのは困難である。そこで本章では、マルチビーム測深器を用いた港湾岸壁外部形状の定量化を目的とした。

### 2.2 マルチビーム測深機

マルチビーム音響測深機とは、海底に向け船の下から左右放射状に指向性の高い音響ビームを多数配列して、船の進行とともに一度で多数点の水深を測る装置である。マルチビーム技術が発達してから海底の様子が詳細に見ることが出来るようになり、海洋開発・調査が大きく進歩してきた[18]。

近年では、浅海[19]から深海域用[20]のものまで開発され、高機能化・多機能化するとともに解析技術[21]・周辺技術[22]・利用技術[23][24]とも目覚しく進歩している。利用分野も多岐にわたり、海図作成[25]、海洋調査・開発[26]、水産資源調査[27][28]、物理探査[29][30]、港湾・海岸などの浚渫土砂調査[31][32]、海草藻場調査[33][34]などに利用されている。利用環境は海洋だけに留まらず、淡水域でも利用され始めており、ダムの貯水・維持管理[35][36]、河川調査[37][38]などに利用される。

マルチビームは周波数が高くなるほど分解能が高いが、水中での吸収損失が大きくなり対応する水深は浅くなってしまふ。逆に、周波数が低くなると対応する水深は深くなる。周波数 450kHz のマルチビームでは水深 100m までの計測、200kHz では水深 300m までの計測が可能である。湖沼においては、200kHz から 400kHz が適当である[39][40]。

マルチビーム音響測深機における計測手法は、ミルズクロス法に基づくものが大多数を占めている[41][42]。

## 2.3 船橋港湾調査

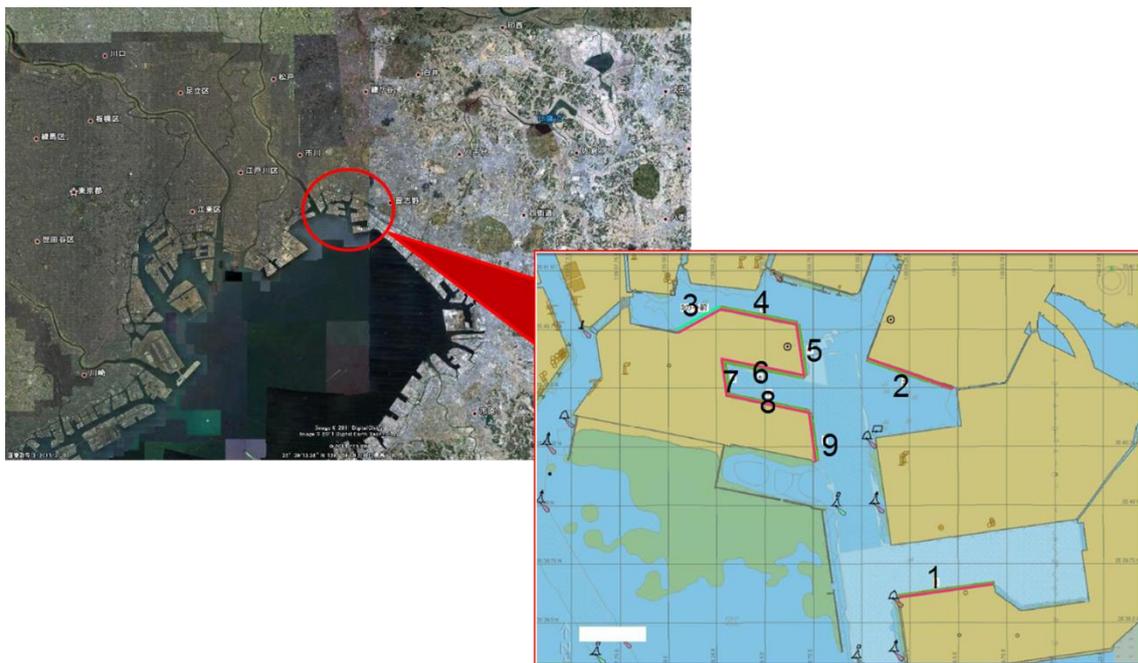
### 2.3.1 調査地

本調査では、2011年3月11日の東日本大震災で被害を受けたとされる千葉港葛南中央区(以後、船橋港)周辺岸壁を調査対象とした(Fig.2-1)。

千葉港は、千葉県の東京湾沿いの京葉工業地域にまたがる工業港で、海岸線の総延長は133km、面積は24,800haを誇る港湾であり、国際貿易の上で特に重要な港として特定重要港湾に指定されている。

調査対象地である船橋港は、船橋市の埋め立て地(北緯 $35^{\circ}40'$ 、東経 $139^{\circ}58'$ )に位置し、総面積は133haある港である。船橋港は、輸入鉄鋼基地として多数の鉄鋼の積み出しが多く行われており、周辺には石油化学工業や鉄鋼業、食品業、港運業等が立地している。また、油槽所として利用されている個所もあり、千葉港の中でも重要な位置を占めている。

調査対象岸壁は、Fig.2-1に示すとおり1から9の9つの岸壁とした。調査対象岸壁は、矢板、鋼管杭式がほとんどを占めており、栈橋式が2つほどある。



(出典：千葉葛南港湾事務所資料)

Fig.2-1 船橋港調査箇所位置図

### 2.3.2 調査機器

本調査で岸壁の形状を定量的に計測するために、マルチビーム測深機(Seabat7125, RESON 社, USA) を用い、動揺補正と位置計測のために、動揺センサ(PHINS, IXSEA 社, France)と Differential GPS (DGPS 16X, GARMIN 社, USA) を使用した。測深データ及び動揺・位置は、データ記録処理ソフトウェア (HYPACK, HYPACK 社, USA)を用いて記録した。

#### (a) マルチビーム測深機

本調査では、マルチビーム測深機は、Seabat7125 (RESON 社, USA)を用いた(Fig.2-2)。Reson 社の Seabat シリーズは世界的によく海底地形測量に用いられており、日本でも多数の測深器が用いられている。使用周波数は、455 kHz で、調査船と直行方向に 140° の幅で 512 本の音響ビームで広範囲を一度に測定できる。ビーム幅は進行方向が 1°、直行方向が 0.5°、分解能は 6 mm で調査可能である(Table.2-1)[62]。

#### (b) 動揺センサ

本調査では、調査船の動揺補正を行うため、ストラップダウン方式 3 軸光ファイバージャイロを用いた高精度慣性航法装置 PHINS (IXBLUE 社, France)を用いた(Fig.2-3)。3 軸光ファイバージャイロにより高精度の姿勢(ロール、ピッチ、ヒーブ)・方位データの取得が可能である。ロールは進行方向に直角な横揺れ、ピッチは進行方向の縦揺れ、ヒーブは鉛直方向の上下運動を表す。データの取得時間は、20 Hz とした。ロール・ピッチの計測誤差は、0.01 度での計測が可能である[63]。

#### (c) Differential GPS

D-GPS (ディファレンシャル GPS)とは、既知点において GPS 信号の誤差を決定した後、補正値を送信することで受信側の精度を向上させるシステムである。本調査では、DGPS 16x (GARMIN 社, USA)を使用した(Fig.2-4)。位置データは、1 Hz で取得した。位置計測誤差は、±3 m である[64]。

#### (d)収録ソフトウェア

測深データ及び動揺・位置のデータ収録用ソフトウェアとして、HYPACK (HYPACK 社, USA)を用いた。HYPACK は windows OS 上で作動する統合測量水路測量ソフトウェアであり、測量計画、操船ナビゲーション、リアルタイム地形表示、データ収録などが可能である。この HYPACK を用いて、Seabat7125, PHINS, DGPS 16x のデータを収録し、それらに PC 時刻を基準のタイムスタンプを割り当てた後に、HYPACK データ形式で出力した。



(出典 : Seabat7125 Product leaflet)

Fig.2-2 マルチビーム測深機 Seabat7125

Table.2-1 Seabat7125 の仕様[62]

仕様	
Frequency	200kHz or 400kHz (dual frequency available)
Along-track transmit beamwidth	2° at 200kHz & 1° at 400kHz
Across-track receive beamwidth	1° at 200kHz & 0.5° at 400kHz
Max ping rate	50Hz (±1Hz)
Pulse length	30 μs - 300 μs Continuous Wave 300 μs - 20ms Frequency Modulated (X-Range)
Number of beams	512EA/ED at 400kHz, 256EA/ED at 200kHz
Max swath angle	140° in Equi-Distant Mode; 165° in Equi-Angle Mode
Typical depth	0.5m to 150m at 400kHz, 0.5m to 400m at 200kHz
Max depth	175m at 400kHz; 450m at 200kHz
Depth resolution	6mm
Data Output	Bathymetry, sidescan and snippets 7K data format



---

PHINS	
Data output rate	20 Hz
Roll, Pitch accuracy	0.01 deg

---

Fig.2-3 高精度慣性航法装置 PHINS[63]



---

DGPS 16x	
Data output rate	1 Hz
Position accuracy	$\pm 3$ m

---

Fig.2-4 DGPS 16x[64]

### 2.3.3 調査機器配置

Seabat7125 及び各計測機器の接続と器材配置は Fig.2-5 のように構成した。HYPACK を搭載した PC に DGPS 16x、PHINS、Seabat7125 を接続し位置、動揺、測深データを記録した。DGPS 16x は受信の妨害がない調査船の屋根に固定し設置した。動揺センサ PHINS は調査船の重心近くとし両舷から均等な距離に設置を行った。Seabat7125 は一度の航行で岸壁及び岸壁直下の海底面を調査出来るように水面から 30°下方に傾けて調査船に艀装した(Fig.2-6)。

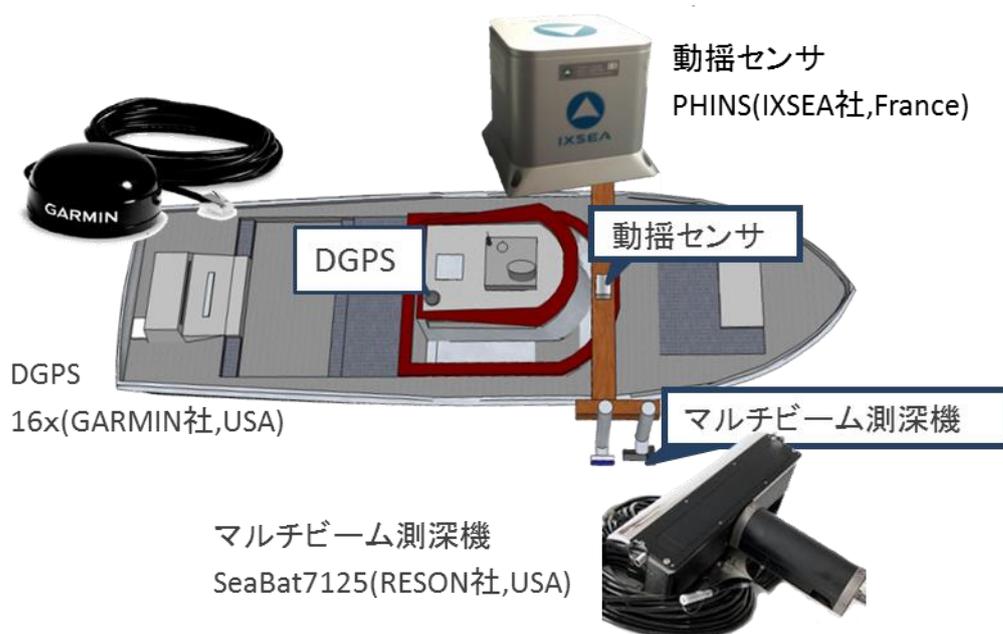


Fig.2-5 艀装概念図



Fig.2-6 マルチビーム測深器艀装図

### 2.3.4 調査方法

本調査ではマルチビーム測深器による港湾岸壁の変状調査評価を目的とするため、調査対象である船橋港湾内の 2011 年 3 月の東日本大震災で被害を受けたであろう 9 つの港湾岸壁を調査対象とした。

調査は、港湾岸壁と岸壁直下の海底地形形状の測定を行うため港湾岸壁から約 4, 5 m 程度離れて走査した(Fig.2-7)。同時に、DGPS で調査船の位置情報、調査船の挙動(ロール、ピッチ、ヒーブ、ヘディング)を、PHINS を用いて記録した。音速度測定は、調査日ごとに、調査開始前、調査日の昼ごろ、調査終了後の 3 点で計測を行った。

また、マルチビーム測深器による測定と同時に調査船から港湾岸壁海上部の目視調査を行った。

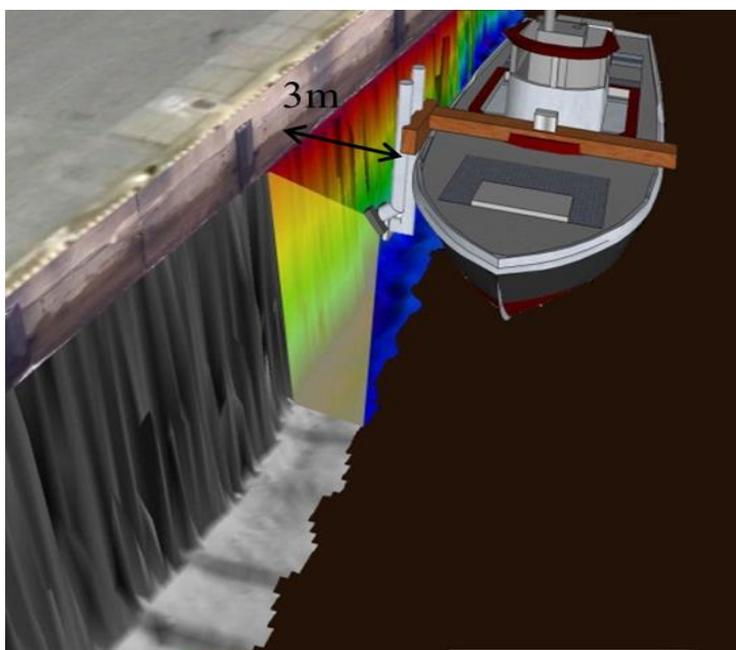


Fig.2-7 調査概念図

### 2.3.5 解析手法

調査で得られたマルチビーム測深器のデータから岸壁形状を評価するために 3次元図の作成と傾斜角解析を行った。解析方法のフロー図を Fig.2-8 に示す。以下に解析手法を具体的に述べていく。

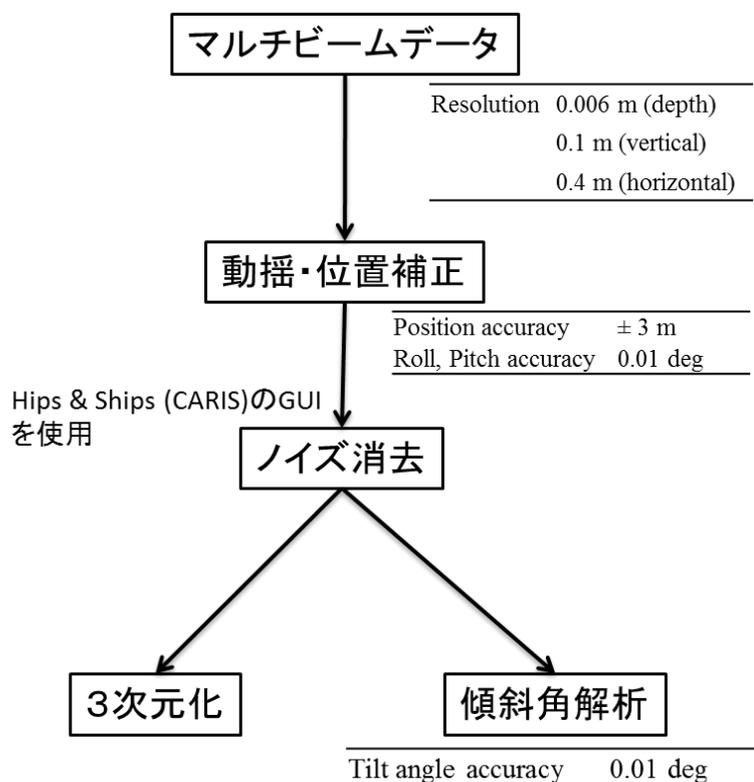


Fig.2-8 解析フロー図

#### 取得データ

HYPACK で収録した調査データは、1 測深ごとに.HSX ファイルにテキストデータで記録されている。まず、1 側線ファイルから収録されているデータを読み込むプログラムを作成し、ファイルに含まれる解析に使用するデータを測深 Ping 毎に取得した。取得したデータは、

- 1Ping 中で得られた 512 個の音響反射の片道伝播距離(スラントレンジ)
- 1Ping 中で得られた 512 個の音響反射強度
- 船体座標系でのロール角(deg.)・ピッチ角(deg)・ヒープ量(m)
- 日本平面直角座標系 9 系を基準とする平面座標系における GPS アンテナの座標
- 絶対座標系での船の方位
- 各データの取得時間

の 6 つのデータを取得した。

そのほかにも、

- ・ 調査時に取得した水中音速データ
- ・ 調査機器配置時に測定したマルチビーム測深器、GPS アンテナ、モーションセンサの船体座標系における位置関係
- ・ 調査日時の潮位データ

を用いた。

なお潮位データは気象庁のホームページを参照とした[43]。

### 測深点の構築

調査データから取得した

- ・ 1Ping 中で得られた 512 個の音響反射の片道伝播距離(スラントレンジ)を用いて測深点の構築を行った。まず、得られたデータを次のように整理した。

- ・ 1ping 中に含まれる第 1 beam から第 512 beam までの beam 数

$$\text{Beam}_1, \text{Beam}_2, \dots, \text{Beam}_N, \dots, \text{Beam}_{512} \quad (2.1)$$

- ・ 第 N beam における、1 番目から 512 番目までのスラントレンジ

$$\text{SL}_1, \text{SL}_2, \dots, \text{SL}_N, \dots, \text{SL}_{512} \quad (2.2)$$

- ・ 第 N beam における beam 角

マルチビーム受波器の中心からの各 beam 角を求める。Seabat7125 の 1ping のビーム角は 140 度なので中心から第 1 beam までの角度は 70 度となる。各 beam のビーム角  $\theta_{\text{beam}}$  は以下の式で算出する。また、中心からのビーム角  $\theta_{\text{beam}}$  をラジアンに変換する。

$$\theta_{\text{beam } N} = \{(\theta_m / \text{Beam}_{512})(\text{Beam}_N - 1) - (\theta_m / 2)\} (\pi / 180) \quad (2.3)$$

ただし、

$\theta_m$  : 使用したマルチビーム測深器のビーム角

- ・ 第 1 ping から第 N ping までのマルチビーム受波器の位置

各 ping の GPS によって得られた日本平面直角座標系 9 系を基準とする平面座標系における GPS アンテナの座標( $X_{GN}$ ,  $Y_{GN}$ )と、器材配置位置を用いてマルチビーム受波器の位置を求める。

$$X_{mN} = X_{GN} + X_d \quad (2.4)$$

$$Y_{mN} = Y_{GN} + Y_d \quad (2.5)$$

$X_d$  : GPS からマルチビーム受波器の中心までの距離

また、水深方向の Z 軸を求めるために、マルチビーム受波器面の中心から水面までの距離と気象庁により観測された潮位を用いて求める。各 ping の計測時間の潮位  $H_t$  からマルチビーム受波器面の中心から水面までの距離  $H_m$  の差をマルチビーム受波器面の Z 軸位置  $Z_m$  とする。

$$Z_{mN} = H_{tN} + H_m \quad (2.6)$$

・ 第 1 ping から第 N ping までの調査船の方位

$$\theta_{head1}, \theta_{head2}, \dots, \theta_{headN}, \dots, \theta_{head512} \quad (2.7)$$

最後に式(2.1)から(2.7)で求めたビーム数、スラントレンジ、各ビームのビーム角、マルチビーム受波器の位置、調査船の方位を用いて測深点( $X_N, Y_N, Z_N$ )を求める。測深点  $X_N$  を調査船の直角方向として、 $Y_N$  を調査船の進行方向、 $Z_N$  を水深方向とした。水深は水面を 0 m として、海面以上をプラス側、海底方向をマイナスとしている。

$$X_N = SL_N \sin(\theta_{beamN}) + X_{mN} \quad (2.8)$$

$$Y_N = Y_{mN} \quad (2.9)$$

$$Z_N = SL_N \cos(\theta_{beamN}) + Z_{mN} \quad (2.10)$$

(2.8)、(2.10)で求めた  $X_N, Z_N$  の関係を Fig.2-9 に示す。ここでは、マルチビーム測深器を海底面に向けるように取り付けられた状態の( $X_N, Y_N, Z_N$ )を求めているので、2.2.3 で述べた、マルチビーム測深器を  $30^\circ$  下方に傾けた状態の( $X_N, Y_N, Z_N$ )を求めなければならない。以下に式を示す。

$$\begin{bmatrix} X_{N\theta} & Z_{N\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_N & Z_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_{offset} & -\sin\theta_{offset} \\ \sin\theta_{offset} & \cos\theta_{offset} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$\theta_{offset}$  : マルチビーム測深器の取り付け角度

(2.11)で求めた  $X_{N\theta}, Z_{N\theta}$  の関係を Fig.2-10 に示す。

最後に、(2.9)と(2.11)式で求めた( $X_{N\theta}, X_N, Z_{N\theta}$ )に調査船の方位  $\theta_{head}$  を用いて各 ping の測深点の構築を行う。構築した測点を Fig.2-11 にしめす。

$$\begin{bmatrix} X_N & Y_N & Z_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{N\theta} & Y_N & Z_{N\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_{head} & -\sin\theta_{head} & 0 \\ \sin\theta_{head} & \cos\theta_{head} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

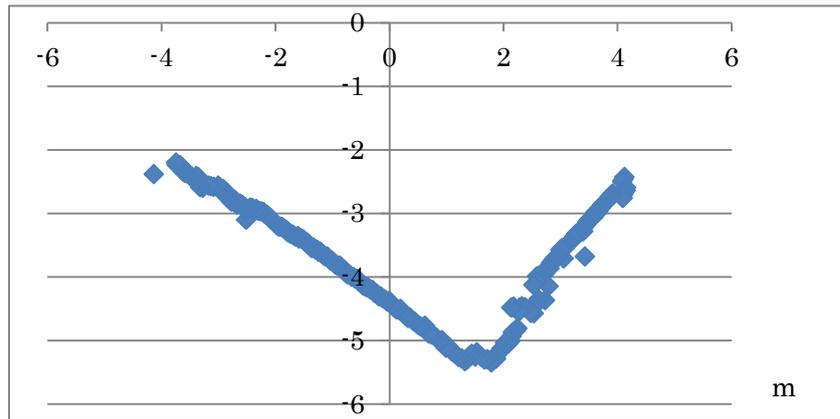


Fig.2-9  $X_N, Z_N$  の関係

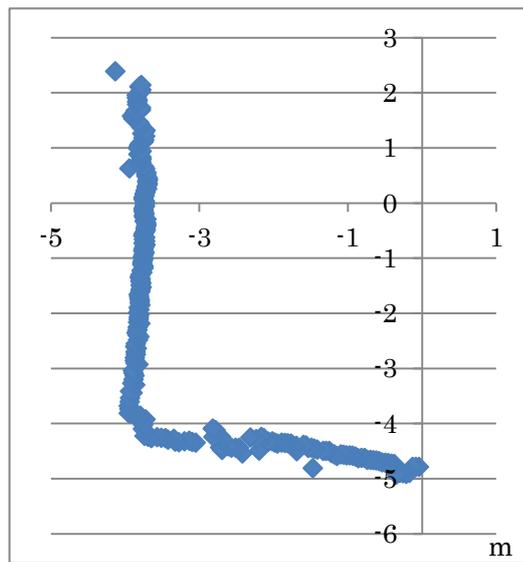


Fig.2-10 マルチビーム角度補正後の  $X_N, Z_N$  の関係

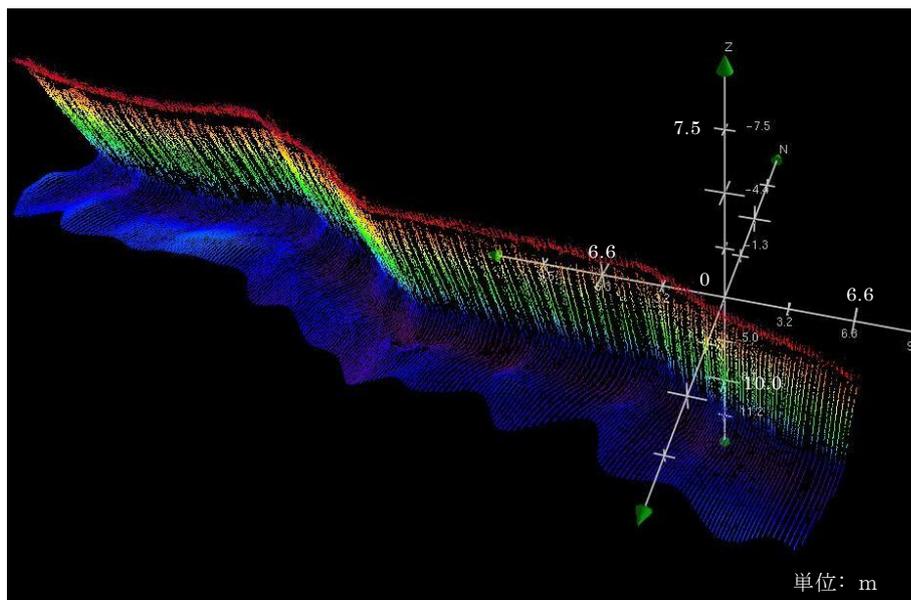


Fig.2-11 Row データ 3次元図

**動揺補正[44]**

次に構築した測点に対して動揺補正を行い、直交座標系での位置( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ )を求めていく。まず、動揺補正に必要なデータを次のようにした。

・測定開始時刻  $T_n$ 、収録時間間隔を  $\Delta T_n$  のモーションセンサから得られる船のロール角  $\theta_{roll}$ 、ピッチ角  $\theta_{pitch}$  は以下の様に定める。

$$\theta_{roll}(T_n), \theta_{roll}(T_n + \Delta T_n), \theta_{roll}(T_n + 2\Delta T_n), \dots \quad (2.13)$$

$$\theta_{pitch}(T_n), \theta_{pitch}(T_n + \Delta T_n), \theta_{pitch}(T_n + 2\Delta T_n), \dots \quad (2.14)$$

・測定開始時刻  $T_n$ 、収録時間間隔を  $\Delta T_n$  のモーションセンサから得られる船のヒープ量  $\theta_{heave}$  は以下の様に定める。

$$H_{heave}(T_n), H_{heave}(T_n + \Delta T_n), H_{heave}(T_n + 2\Delta T_n), \dots \quad (2.13)$$

ロール角  $\theta_{roll}$ 、ピッチ角  $\theta_{pitch}$ 、ヒープ量  $H_{heave}$  はマルチビーム測深器とサンプリングレートが異なるため、各データの時刻同期を行うこととした。時刻は PC 時刻のタイムスタンプを基準としており、同期方法は線形補間とした。線形補間を用いたのは、各機器の収録間隔が十分短いため、短時間スケールでの外的要因が少なく信頼性を得られたためである。結果、各 ping の( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ )におけるロール角  $\theta_{roll}$ 、ピッチ角  $\theta_{pitch}$ 、ヒープ量  $H_{heave}$  が得られた。

得られた各角度と変位量を用いて動揺補正を行い、各 ping の( $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'_{heave N}$ )を式(2.14)を用いて求めた。

$$[X'_N \ Y'_N \ Z'_N] = [X_N \ Y_N \ Z_N] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{roll} & -\sin\theta_{roll} \\ 0 & \sin\theta_{roll} & \cos\theta_{roll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{pitch}) & 0 & \sin(\theta_{pitch}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_{pitch}) & 0 & \cos(\theta_{pitch}) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$Z'_{heave N} = Z'_N + H_{heave N} \quad (2.15)$$

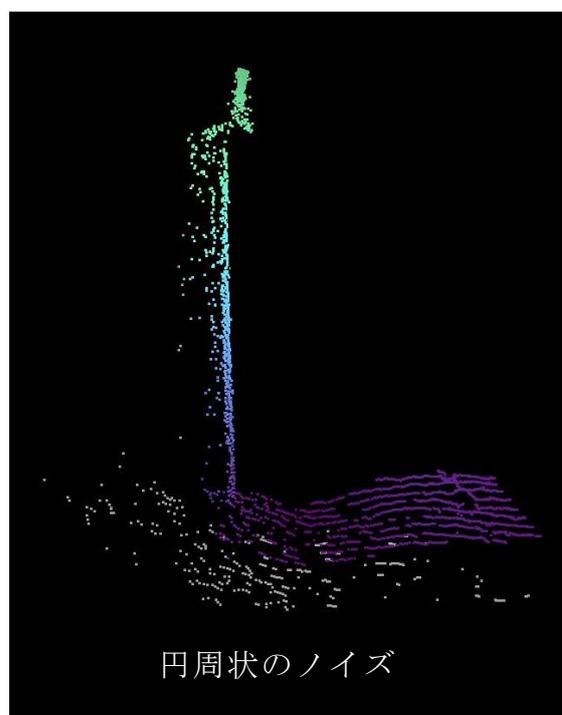
### ノイズ処理

構築した測深データから、測深データ解析ソフトウェア(HIPS&SHIPS, CARIS 社, Canada)を用いて, Fig.2-12 のようなスパイクノイズや乱反射によるノイズを消去した。Fig.2-12(a)は、港湾岸壁の後ろに出てきているノイズである。岸壁部分と海底面が交わる箇所はマルチパスが起りやすく Fig.2-12(a)のようなノイズが発生する。また、水面から返ってきた測点もノイズとして除去している。Fig.2-12(b)はマルチビーム測深器の円周状に乗っているノイズである。明らかに海底面下から返ってきているノイズであり除去している。

また、今回使用した Seabat7125 では各測点の反射強度情報を取得しており、反射強度の弱い(マルチパスなどは弱くなる) 測点を除去している。ノイズの消去後 3次元図を構築し、岸壁形状及び、岸壁付近の海底地形 (洗掘や堆積)の解析を行った。



(a) 港湾岸壁後部と水面のノイズ



(b) 海底下からのノイズ

Fig.2-12 ノイズ消去

### 傾斜角解析方法

ノイズ処理後の測深データを用いて、岸壁の傾斜を定量的に評価するため、Fig.2-13に示すような傾斜角解析を行った。

傾斜角解析は、10スワスのデータを使用し傾斜角を求めた。始めに、岸壁の下部部分の平均点  $xu_{ave}$  を求めるために岸壁と海底面の交差部分から海底面に被らない様に下部部分を選定し、選定した枠内の全測深点の X 軸方向座標の平均化を行った。

$$xu_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Xu_i \quad (2.16)$$

$xu_{ave}$  : 岸壁の下部部分の平均点

$Xu$  : 選定枠内の測点

$n$  : 選定枠内の全測点数

次に、上部エプロン部分に被らないような上部部分を選定し、選定した枠内の全測深点の X 軸方向座標の平均化を行った。

$$xh_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Xh_i \quad (2.17)$$

$xh_{ave}$  : 岸壁の上部部分の平均点

$Xh$  : 選定枠内の測点

$n$  : 選定枠内の全測点数

最後に、平均化で求めた位置( $xu_{ave}$  ,  $xh_{ave}$ )から傾斜角  $\theta_{angle}$  を算出した。

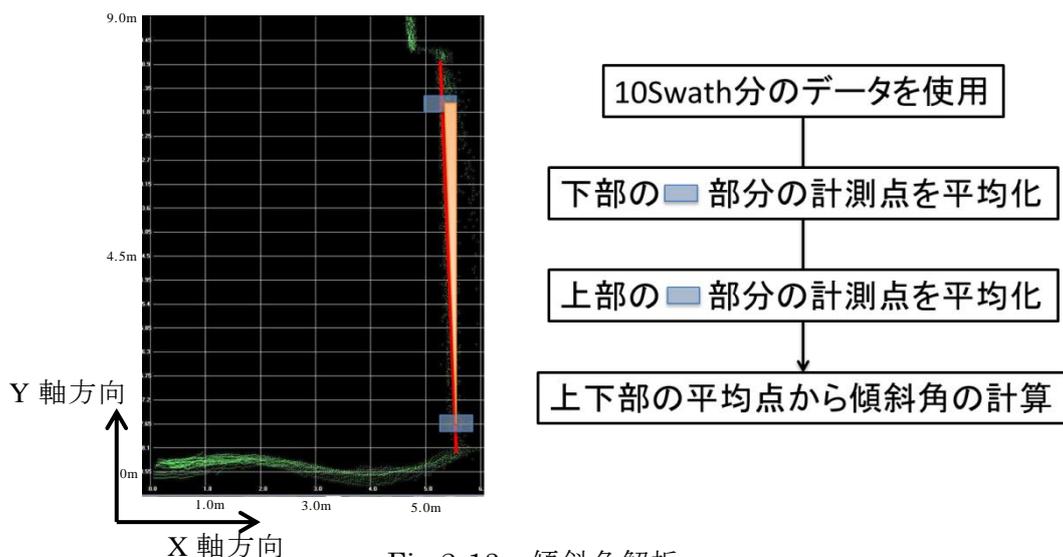


Fig.2-13 傾斜角解析

### 2.3.6 結果

#### 航跡図

調査時に取得した GPS の位置情報を基に調査時の航跡図を作成した。調査した航跡図を Fig.2-14 に示す。航跡図は、HYPACK で収録した調査データから緯度経度情報 (GPGGA) を作成したプログラムで読み取り、Google Earth (Google, USA) を用いて航跡を表示した。調査岸壁は、前述した 9 つの岸壁で行っている。Fig.2-14 から以下の事が読み取れる。

- ・調査船は、概ね岸壁から 4~5 程度離れて航行しており、計画に沿った調査が出来た
- ・岸壁番号 1、2、3 は岸壁途中からの調査であり、その他は始点から終点まで調査が行われている。
- ・岸壁番号 8 では途中で途切れ、岸壁に途中から入りなおしている。これは、マルチビーム測深器の不調が原因で測深が途中で止まってしまったものである。

以上の事により、計画した岸壁の調査は概ね行われていることがわかる。Fig.2-15 は岸壁番号 5 の岸壁であり、調査した中でも直線的な航路がとれている。しかし、調査日は風、波が強く岸壁に近づきすぎたり、離れたりしており、直線的に航行出来たとは言えない。また、Fig.2-16 に示すように途中で大きな弧を描いているのがわかる。この航跡は、港に荷卸しをする船を避けた船避けの航跡であり、船避け時、船避け前後の岸壁のデータは取れていないことがわかる。そのほかにも、GPS の位置計測誤差が ±3 m ということもあり、所々航跡が乱れている箇所が見受けられる。



Fig.2-14 調査時の航跡図



Fig.2-15 岸壁 5 の航跡図

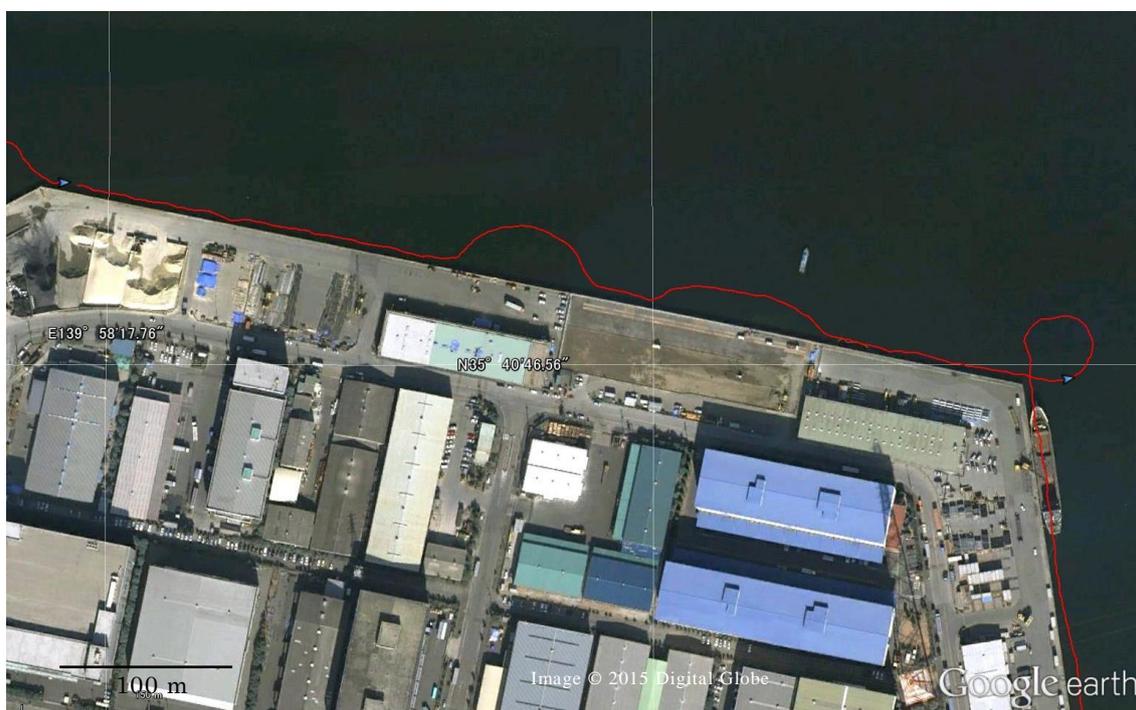


Fig.2-16 停泊船避け時の航跡

### 動揺

調査時に取得した岸壁 No.5 のモーションセンサデータを Fig.2-17 に示す。調査時は、波や風が強く、ロール角、ピッチ角、ヒープ量ともに短い揺れが大きいことがわかる。また、調査船の方位も直線的ではなく岸壁方向化から離れたり近づいたり繰り返している。

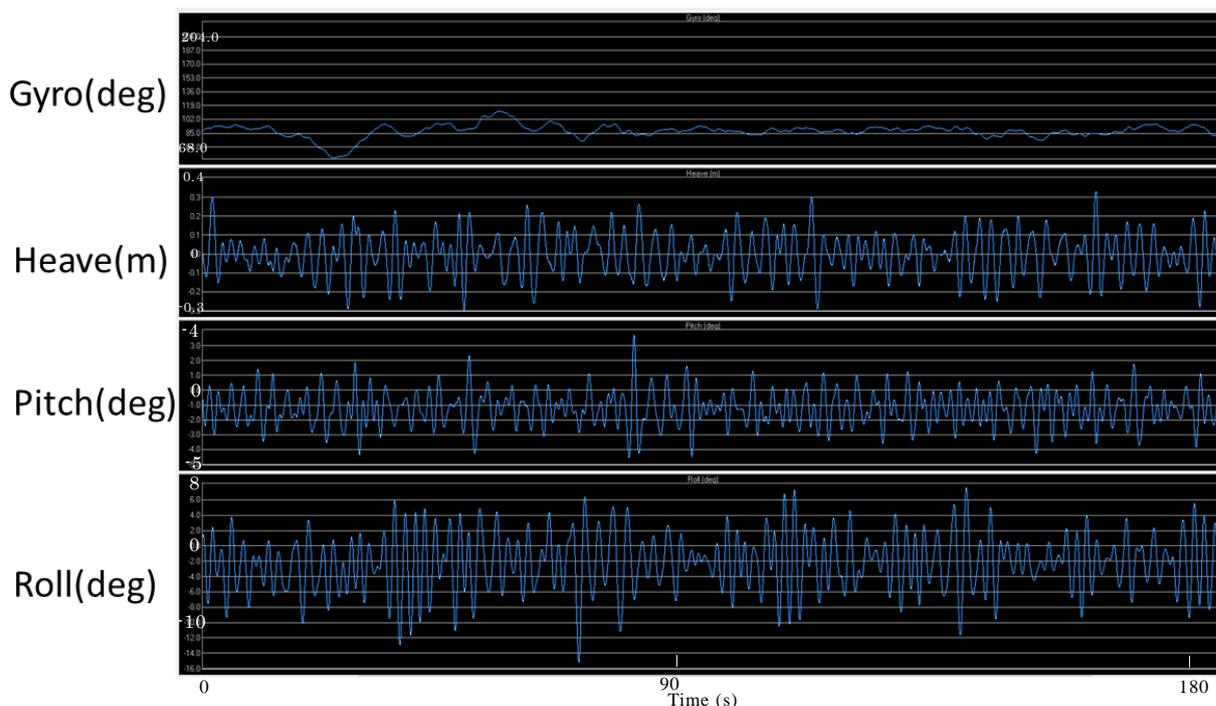


Fig.2-17 モーションセンサのデータ

### 三次元図

調査地点 5 の岸壁 3 次元図と断面図を Fig.2-18, Fig.2-19 に示す。岸壁直下の海底で堆積及び洗掘が十数箇所確認された。最も大きな堆積は、高さ 3.0 m 長さ 38.2 m であった(Fig.2-20)。直上の岸壁に顕著な形状変化・腐食孔が見られなかったことや堆積長が長いこと、堆積形状が吸出しによる堆積とは考えにくいことから、潮流や貨物船のスクリューにより形成された堆積だと思われる。今回確認された堆積の中には、背面土砂の吸出しによる堆積は確認できなかったが、岸壁形状と海底状況を同時に測ることにより腐食孔や劣化の診断が可能であることがわかった。

また、Fig.2-19 の岸壁断面図から No.20-21 で岸壁が傾斜していることが見てとれる。平均傾斜角と Roll 角を Fig.2-21 に示す。290 m から 310 m の間で約 1.5 度前方に傾斜していた。平均傾斜角と Roll 角の間に、強い相関は見られなかった( $R^2 = 0.038$ ,  $p < 0.001$ )。よって、Roll 角に関係なく岸壁が傾いていることが示唆され、本手法により岸壁の外見形状とともに傾斜角も定量化することが可能となった。

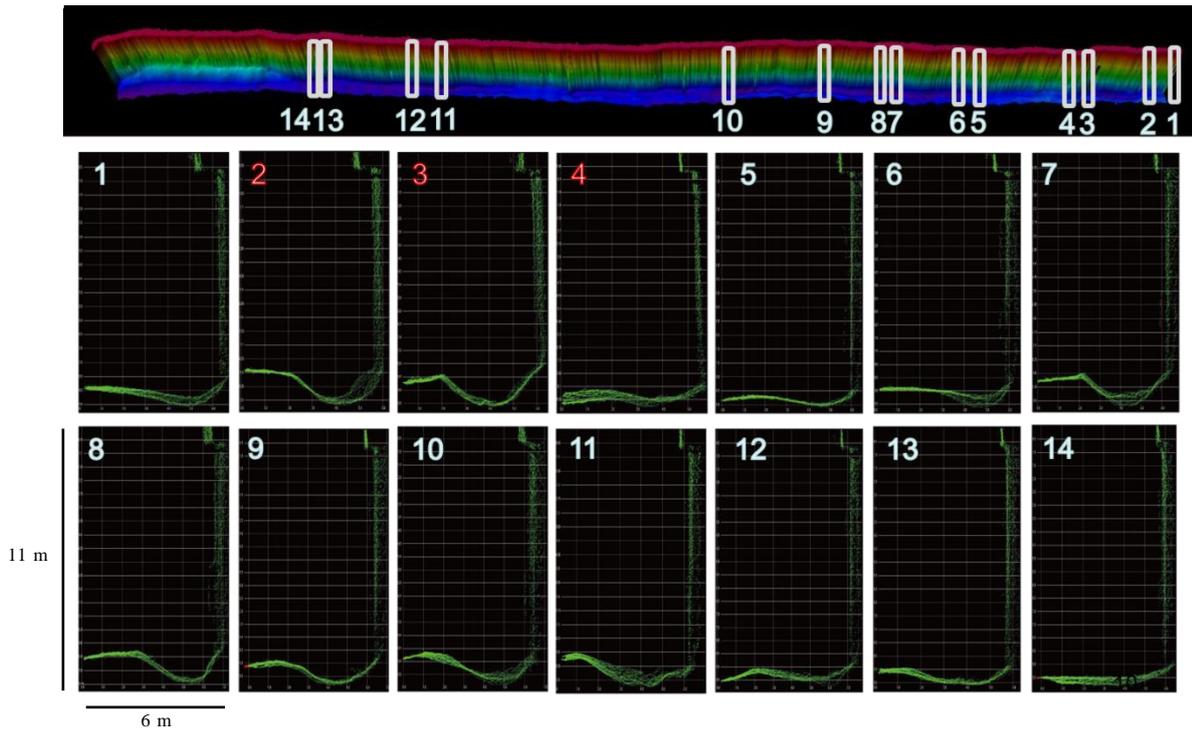


Fig.2-18 調査地点 5 の岸壁 3 次元図と断面図①

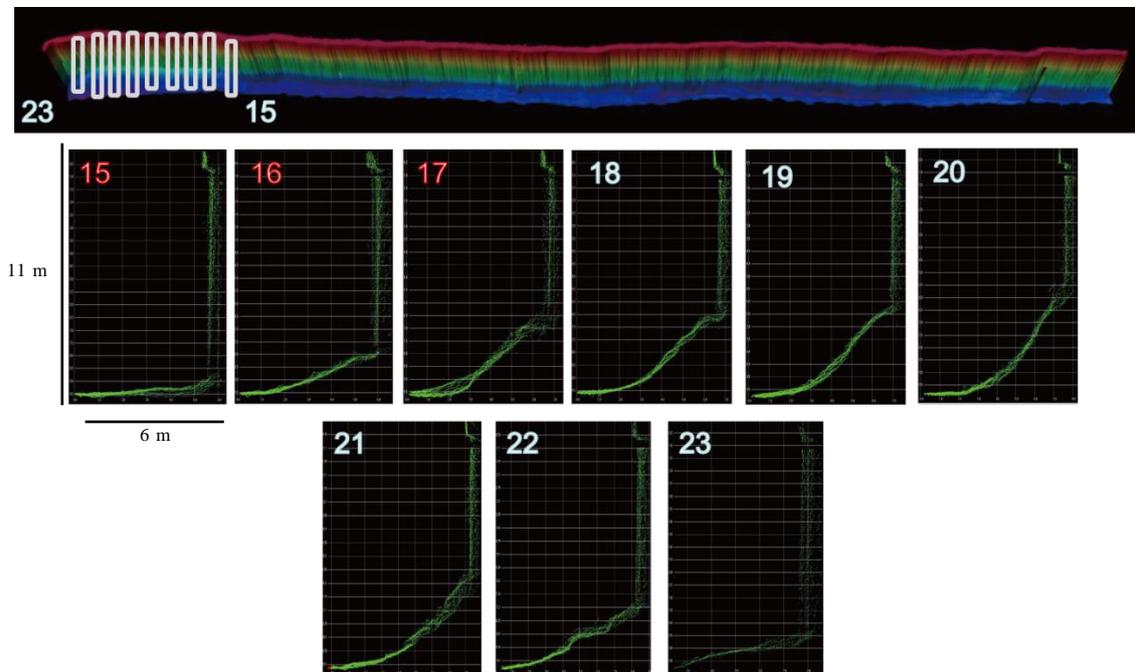


Fig.2-19 調査地点 5 の岸壁 3 次元図と断面図②

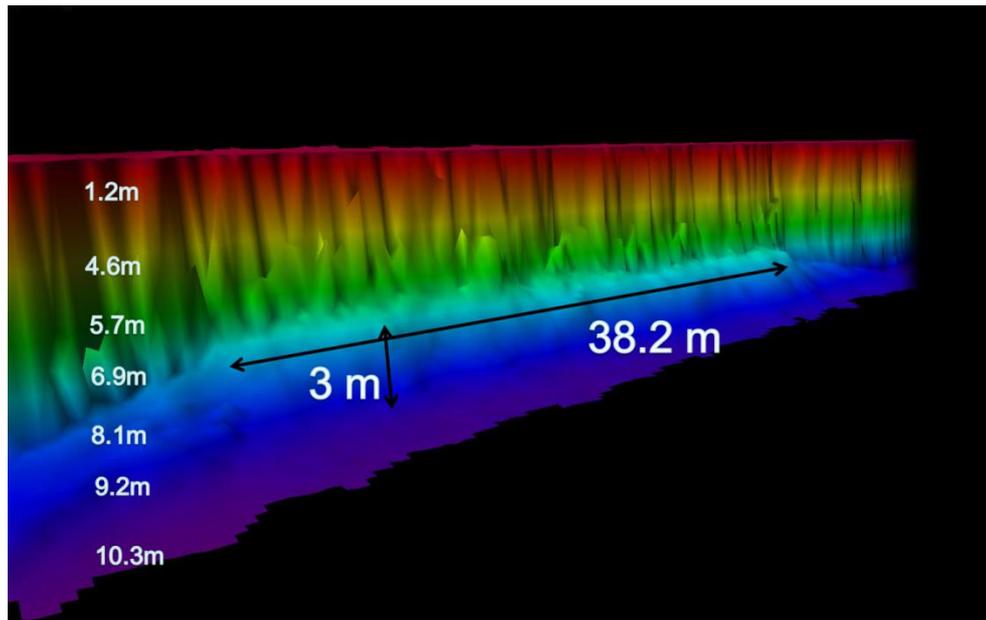


Fig.2-20 調査地点 5 の堆積箇所

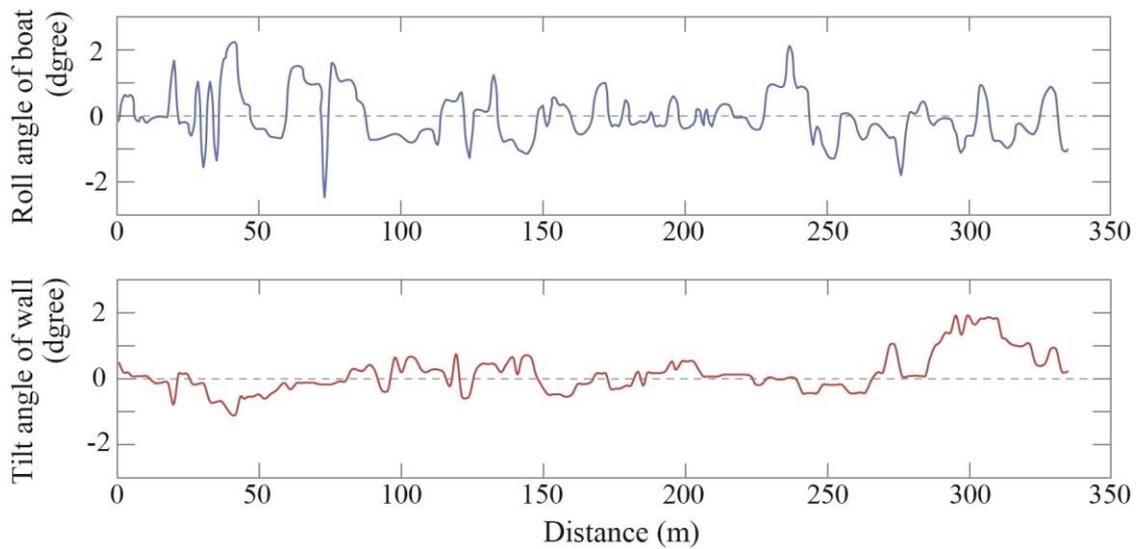


Fig.2-21 岸壁傾斜角とロール角の比較

### 2.3.7 まとめ

今回の調査で、岸壁 3 次元図より岸壁周辺の洗掘と堆積の位置や形状が計測でき、表面部の形状も復元可能であった。また、断面より岸壁傾斜角を解析することにより、1.5 度傾いている岸壁を特定することが出来た。以上のことからマルチビーム測深器を用いることで岸壁形状及び傾斜角、海底地形が視覚的・定量的に調査可能であることが示唆された。

## 2.4 岩内港湾調査

船橋港湾調査で、岸壁 3 次元図より岸壁周辺の洗掘と堆積の位置や形状の計測、岸壁の傾き計測が可能となった。しかし、当初の目的であった被災し、ひび割れなどの被害が見られなかった。そこで、本項では岸壁上部の路面が陥没し腐食孔が開いている被災岸壁を対象とした岸壁形状調査を行った。

### 2.4.1 調査地

本調査は、北海道岩内町にある岩内港(北緯  $42^{\circ} 59'$  , 東経  $140^{\circ} 30'$  )の港湾岸壁で行った(Fig.2-22)。対象岸壁は、本章の目的であるひび割れなどの被害により生じた傷等の検出を行うため、水深が浅い部分の岸壁に上部滑落が見られ、腐食孔も存在するとされている岸壁とした。対象岸壁の全長は、272 m であり、岸壁の中間付近で 7.5 m 岸壁と 5.5 m 岸壁に別れ、繋ぎ目部分はコンクリート岸壁である。中央付近以外は、鋼矢板岸壁で構成されている。調査は、5.5 m 岸壁を対象として行った。

Fig.2-22 左側図の K3 は海側の岸壁先端部であり、K1 は調査岸壁の根元である。調査岸壁の KA の地点に大きな路面沈下が見られ、沈下部の鋼矢板に腐食孔の存在が疑われている。

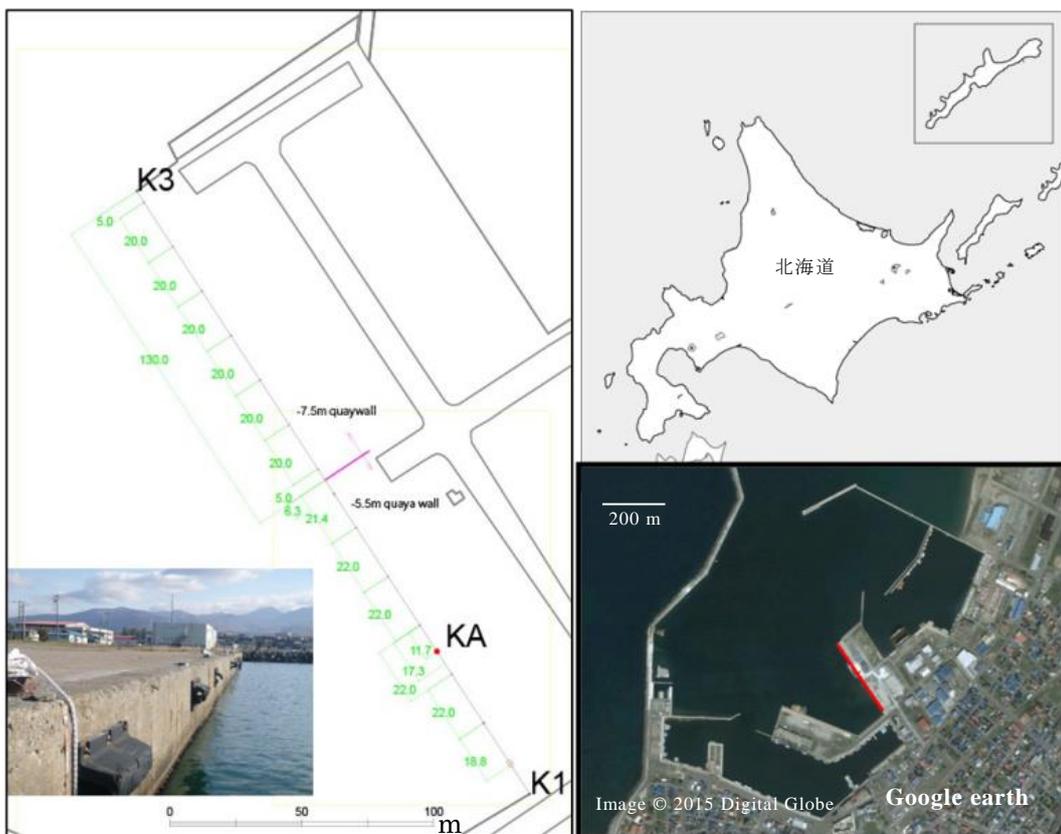


Fig.2-22 調査位置図

## 2.4.2 調査機器

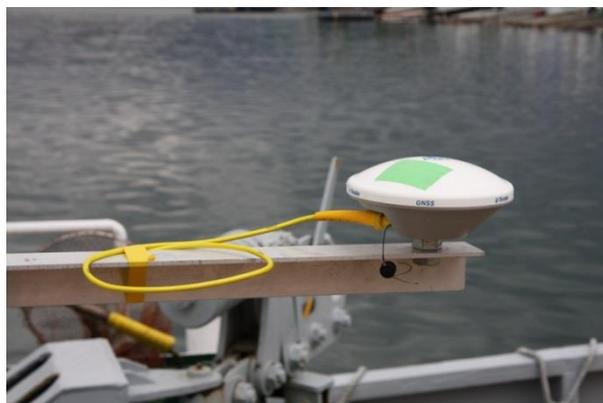
本調査では、ひび割れなどの被害の探査や岸壁の形状を定量的に計測するマルチビームを用いたシステムの構築のために、共同研究先である寒地土木技術研究所が所有するマルチビーム測深機(Seabat8125, RESON 社, USA) を用いて観測システムの構築を行った。また、動揺補正と位置計測のために動揺センサ(DMS Series-05, Teledyne TSS Ltd., USA)と RTK-GPS(SPSx51 Modular GPS, Trimble®)を使用した。測深データ及び動揺・位置は、データ記録処理ソフトウェア (HYPACK, HYPACK 社, USA)を用いて記録した。本調査で使用した機器の一覧を Table2-2、Fig2-23 に示す。

Table.2-2 調査機器一覧

機器名称		内容
①	マルチビーム測深機 (Seabat8125: RESON社, USA)	世界的によく海底地形測量に用いられており、日本でも多数の即新規が用いられている。使用周波数は、455 kHzで、調査船と直行方向に120° の幅で256本の音響ビームで広範囲を一度に測定できる。ビーム幅は進行方向が1°、直行方向が0.5°、分解能は6 mm で調査可能である
②	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。計測には統合型水路測量計測ソフトウェア (HYPACK) を使用している。
③	RTK-GPS基地局 (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。計測には統合型水路測量計測ソフトウェア (HYPACK) を使用している。
④	RTK-GPS方位計、移動局 (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。計測には統合型水路測量計測ソフトウェア (HYPACK) を使用している。
⑤	音速度計 (SVPS: AML Oceanographic社)	水中の音速を計測する機器で、センサ部と電源・通信ケーブルで構成される。
⑥	ノートパソコン	岸壁音響計測システムのデータを収録するパソコン



マルチビーム測深機 (Seabat8125)



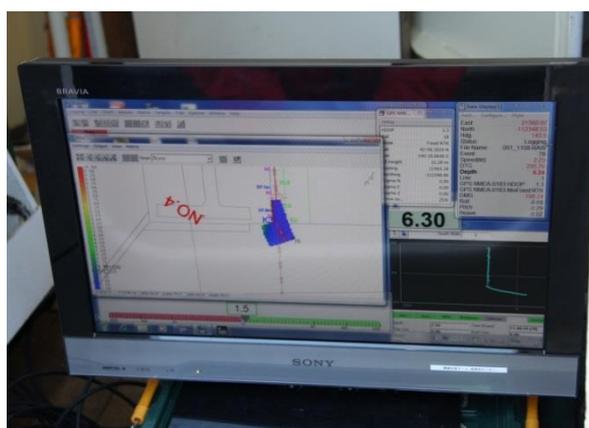
RTK-GPS 移動局



RTK-GPS 基地局



音速度計



HYPACK-PC

Fig.2-13 調査使用機材

### 2.4.3 艀装方法

Seabat8125 及び各計測機器の艀装概念図を Fig.2-23 に示す。調査船に取り付けた治具固定具で調査ポールを固定し、調査ポールの上先端部分に RTK-GPS 移動局を設置した。また、調査ポール下先端部に Seabat8125 を一度の航行で岸壁及び岸壁直下の海底面を調査出来るように水面から 45°下方に傾けて取り付けを行った(Fig.2-24)。Seabat8125 の取り付け後に Fig.2-26 に示すようにポール下先端を固定紐で固定した。モーションセンサは、調査船の進行方向にモーションセンサの進行方向が向くようにし、RTK-GPS のほぼ真下に設置した(Fig.2-27)。測深データ記録 PC やナビゲーション用 PC 等は船室内に設置し、オペレーションを行った。

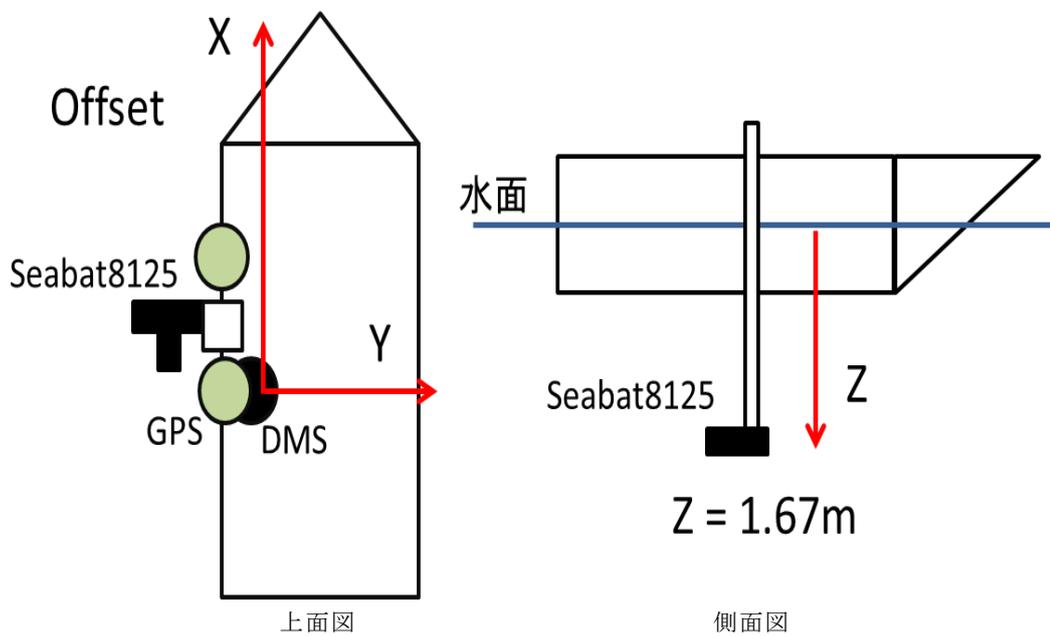


Fig.2-24 艀装概念図

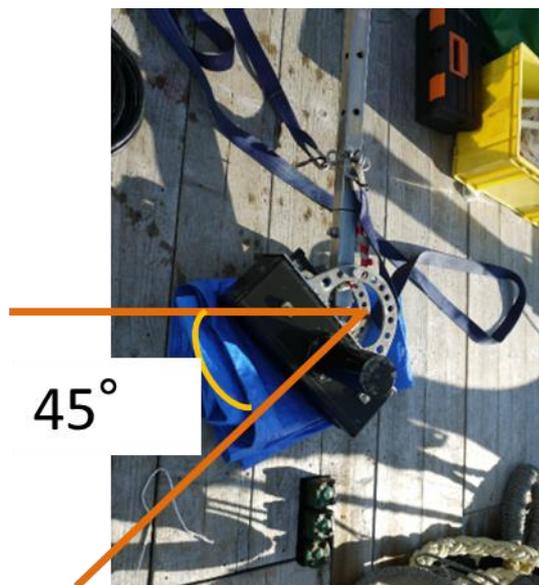


Fig.2-25 Seabat8125 の取り付け



Fig.2-26 Seabat8125 の艀装の様子

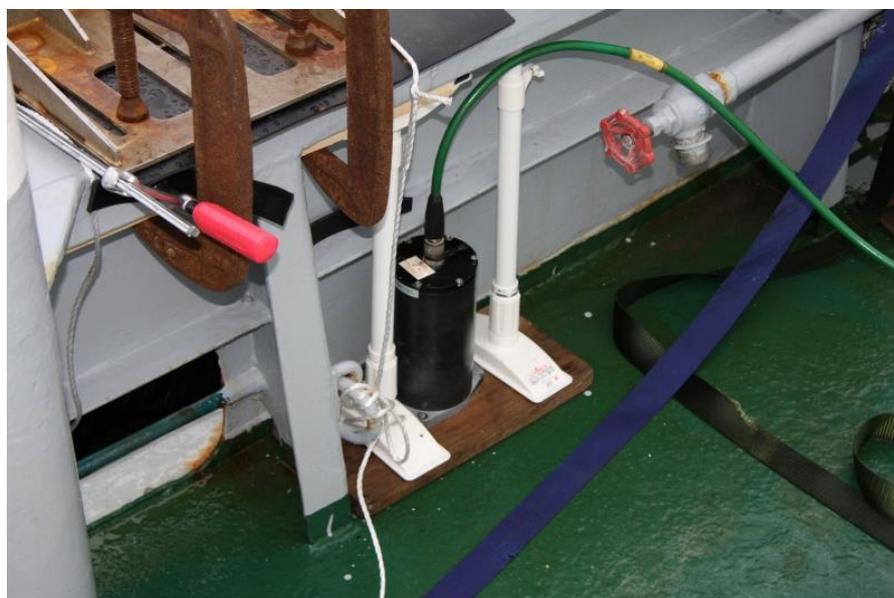


Fig.2-27 モーションセンサの設置

#### 2.4.4 計測方法

調査は、港湾岸壁と岸壁直下の海底地形形状の測定を行うため港湾岸壁から約 4, 5 m 程度離れて Fig.2-28 に示すように、岸壁先端部付近から岸壁に沿うように走査した(Fig.2-29)。計測時の船速は、取得している測深データの乱れと大きな揺れが出ないように 1.0m/s(0.6~1.4m/s)とし、出来るだけ速度が出ないようにした。このときに、岸壁から一定距離を保つように、HYPACK を用いて測線を設定し、出来るだけ測戦場を航行するように操船をお願いした。また調査船の先端付近にて約 4m の距離ポールを船頭に持ってもらい実測でも岸壁のエプロン部分との距離を測りながら航行している。計測の終了位置付近は、L型になっているため終了地点付近手前から調査速度を落とし、計測を停止してから後進してもらい、海側に抜けるような進路を取っている。以上と同じ計測を 4 回行った。マルチビーム測深器の測深開始とともに、RTK-GPS で調査船の位置情報、調査船の挙動(ロール、ピッチ、ヒープ、ヘディング)を、DMS-05 を用いて、HYPACK で収録した。音速度測定は、調査日ごとに、調査開始前、調査日の昼ごろ、調査終了後の 3 回計測を行った。

また、マルチビーム測深器による測定と同時に調査船から港湾岸壁海上部の目視調査を行った。

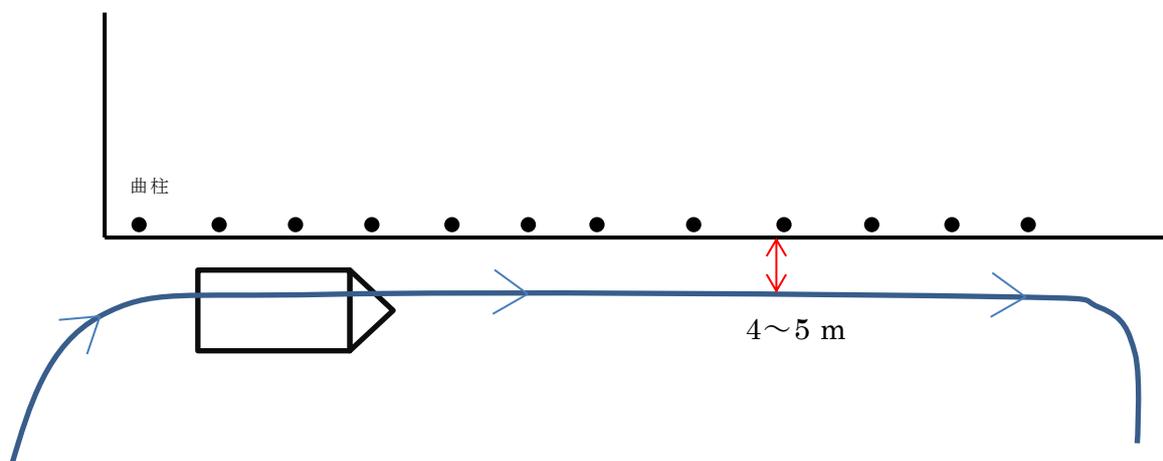


Fig.2-28 調査概念図



Fig.2-29 調査時の様子

### 2.4.5 計測結果

本計測の解析は、船橋調査解析方法(2.3.5)と同様にマルチビーム測深器から得られた測深データとモーションセンサにより取得したロール角、ピッチ角、ヒープ量、RTK-GPSにより取得した位置情報を元に3次元図の作成を行った。

始めに、取得した測深データは、マルチビーム測深器取り付け時に水面から45°下方に傾けて取り付けを行ったため45°傾いているので、取得した測深データ全体を45°の補正值を用いての補正を行った。次にモーションセンサで取得したロール角、ピッチ角、ヒープ量で同様の修正を行い、RTK-GPSで取得した位置情報で測深データの位置あわせを行う。水深に対しては、計測時のマルチビーム艀装深度を足し合わせ、実際の水深と合わせるように補正を行った。3番目に、音響測深データ解析用プログ

ラムを用いて、ノイズ消去を行った。行ったノイズ処理手法は、船橋調査解析方法(2.3.5)同様な手法でノイズ消去を行った。4番目に、ノイズ消去後の測深データを用いて測深データの3次元可視化を行った。最後に、4回計測したうちの3回を足し合わせ Fig.2-30 に示すような3次元図の作成を行った。3次元作成に使用しなかったデータは、計測時に調査船と対象岸壁の距離が離れすぎてしまったため、使用しなかった。

Fig.2-30 の上の図は、調査岸壁全体を表示したものである。岸壁部分の色の変化は、岸壁基線からの飛び出しと凹みを示したものである。緑を中心として、赤になるにつれ海側に飛び出している。また、逆に青に近づくにつれ陸側に凹んだ状態を表している。Fig.2-30 中央右部分の赤い部分は、7.5m岸壁と5.5m岸壁の境にあるケーソン岸壁を示している。ケーソン岸壁から右に行くと同様に赤くなっている箇所が見られる。これは、Fig.2-31 に示すように岸壁自体が歪んでいる箇所である。さらに右に行くと、海底面が三角に盛り上がっているところがある。Fig.2-30 の下の図は海底面が盛り上がっているところを拡大した図である。その真上に、腐食孔らしきものが見られる。その位置を、潜水士によって調査した結果、Fig.2-32 のような腐食孔が見られた。

## 2.5 まとめ

従来の岸壁水中部の点検手法で問題となっていた、①簡易に岸壁全体を調査可能な調査方法、②岸壁水中部の状況把握を解決するために、海底地形調査で使用されているマルチビーム測深器を用いた点検手法を提案した。①簡易に岸壁全体を調査可能な調査方法については、提案したマルチビーム測深器を用いた手法により、一度に岸壁全体と岸壁直下部の海底地形を3次元形状で把握可能とした。また、②岸壁水中部の状況把握については、大まかな岸壁形状を3次元で復元することが出来、潜水士による点検では不可能だった岸壁形状の計測も可能になった。岸壁部の状況把握と共に岸壁直下部の海底地形も計測可能なことにより、岸壁形状と合わせて直下部の洗掘や堆積、鋼矢板岸壁に出来た腐食孔からの吸出された裏込め土砂だと思われる堆積を確認し、海底地形と合わせて劣化状況の診断が可能となった。さらに、3次元形状を計測可能になった結果、岸壁の傾斜を算出することが可能となった。しかし、腐食孔自体の詳細な形状の計測が難しく、詳細な損傷の定量化を行うことが難しいことがわかった。

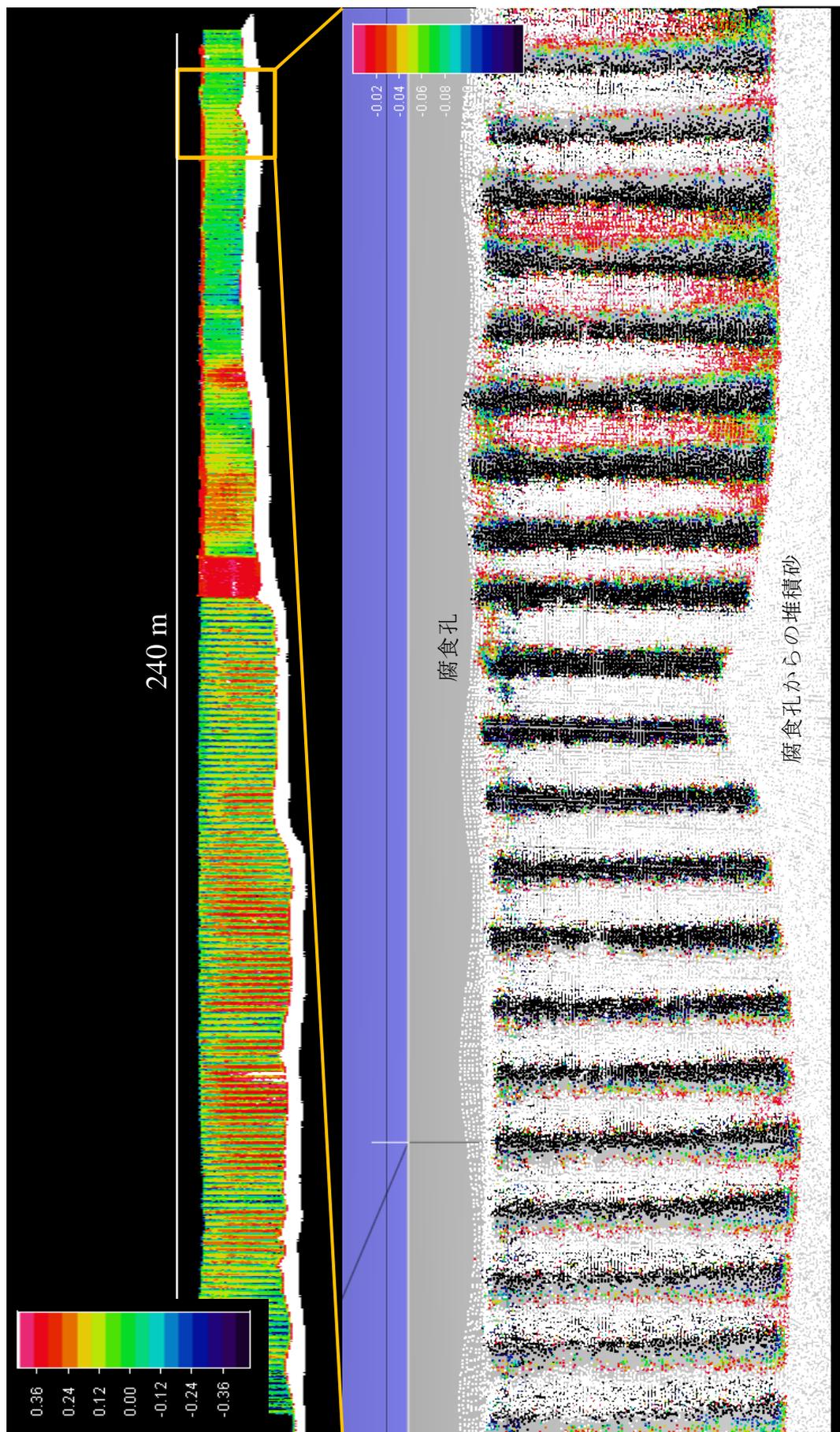


Fig2-30 調査岸壁 3 次元図

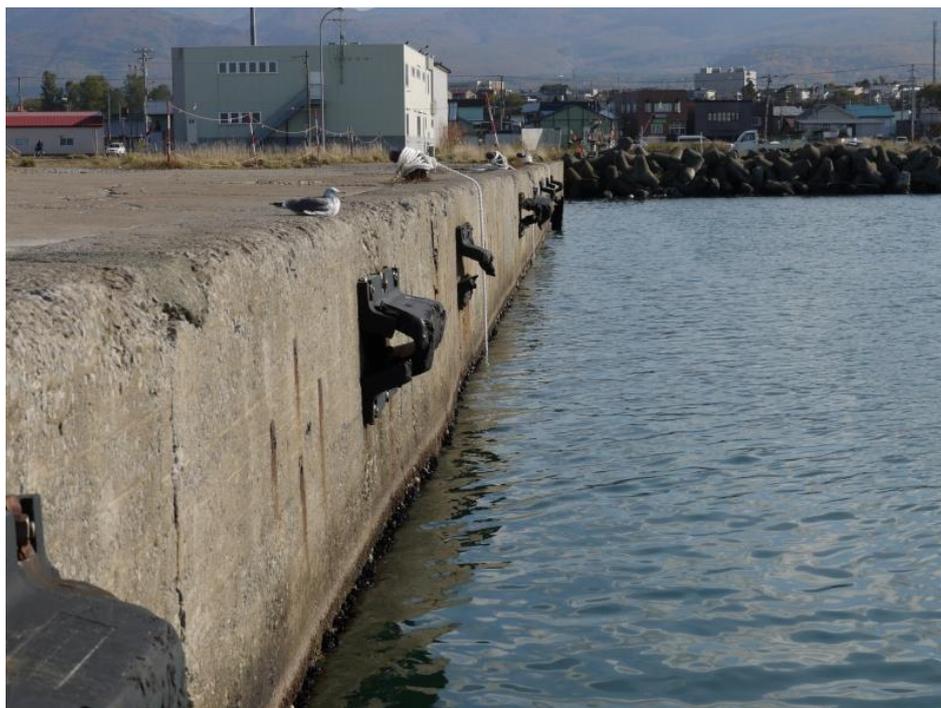


Fig.2-31 岸壁の歪みの様子



Fig.2-32 腐食孔

## 3. 音響ビデオカメラを用いた高解像度外部形状診断

### 3.1 はじめに

マルチビーム測深器では、港湾岸壁の傾斜角を算出し、三次元的に岸壁形状及び海底地形を視覚的、定量的に調査可能であることが示唆された。しかし、腐食孔の形状計測が難しく、詳細な損傷の定量化を行うことが難しいことがわかった。

そこで本章では、マルチビーム測深器による形状調査よりも詳細な損傷が定量化可能な音響ビデオカメラを用いた高解像度外部形状診断手法の提案を行う。音響ビデオカメラを用いた調査では、1 cm～5 cm 程度の腐食孔や劣化により生じた傷等の検出を目的とした。本章では、音響ビデオカメラを用いて損傷した鋼矢板岸壁を用いた表面形状調査を行い、港湾岸壁の2次元モザイク図と3次元図を作成し腐食孔及び劣化などの損傷判断を行う。

### 3.2 高分解能音響ビデオカメラ

本調査で用いた音響ビデオカメラ DIDSON (Dual - Frequency Identification Sonar)(Fig.3-1)[45]は、リアルタイムで高品質な音響ビデオ画像を出力することが可能な、水中用のビデオカメラである。Table.3-1 に音響ビデオカメラ DIDSON の仕様を示す。DIDSON で収録した音響画像データはバイナリの Raw データで保存されているため、後段で付属の解析ソフトや独自のアルゴリズムを用いることにより、幅広い画像処理が適用可能であるなど、データの汎用性が高いことも特徴の一つである。DIDSON は HF(High-Frequency)モードと LF(Low-Frequency)モードを備えており、それぞれの中心周波数は 1.8 MHz と 1.1 MHz である。これらのモードは、音響ビデオカメラを使用する用途や環境によって適切に選択する必要がある。たとえば、近距離(1.0 m～7.0 m 程度)での撮影には HF モードで高解像度撮影をし、遠距離では LF モードで物体を確認するなどに向いている。HF モードでは水平方向に 96 本の音響ビームを形成しており、ビーム 1 本の水平視野角は  $0.3^\circ$ 、つまり水平領域全体で  $29^\circ$  の視野角を有し高分解能計測が可能である。また垂直方向は、通常  $14^\circ$  の垂直視野角である。画像分解能は使用レンジにもよるが、ビーム 1 本のサンプリング数は 512 であるので、例えば 5 m レンジで使用する場合は、1 cm 程度の画像分解能となる(Fig.3-2)。

また、DIDSON の仕様用途は多岐にわたっており、河川地形調査[46] 3 や漁業研究などの魚類行動調査[47]、サイズ計測[48]などが行われている。さらに ROV などのプラットフォームに艀装し前方監視[49]やステーション探査に用いられている。近年では、魚類以外の生物環境調査にも使用されている。たとえば、ハスの生育環境と白鳥の環境調査では DIDSON を用いてハスの生育数のカウントを行うと共に白鳥が蓮根を食した後に出来た穴の個数の行い比較し沼の環境評価を行っている[50]。また、高山湖沼において DIDSON を用いた小型の沈水植物の分類や水深方向の分布の可視化[51]、DIDSON で撮影した画像を用いてスペクトルなどを解析することで種判別などを可能としている[53]。

以上のように DIDSON は河川地形の計測や小型の動植物の判別等多岐にわたって使用されており、種判別や地形計測、穴のカウント等の解析技術をさらに発展させ、1 cm ～5 cm 程度の腐食孔や劣化により生じた傷等の検出を目指した。

Table.3-1 音響ビデオカメラ DIDSON の仕様[45]

ビーム部	最大レンジ	1.1MHz	40m
		1.8MHz	12m
	ビーム間隔	1.1MHz	0.6° 間隔、48 本
		1.8MHz	0.3° 間隔、96 本
	視野角	水平	29°
		垂直	14°
			3° (1)
			1° (2)
フレームレート			5～20 f/s (撮影距離依存)
焦点距離			1～40 m
寸法	幅	171 mm	
	奥行き	307 mm	
	高さ	205 mm	
重量			7.0 kg (水中 -0.6kg)

(1) 3° 音響レンズ使用時

(2) 1° 音響レンズ使用時



Fig.3-1 音響ビデオカメラ DIDSON

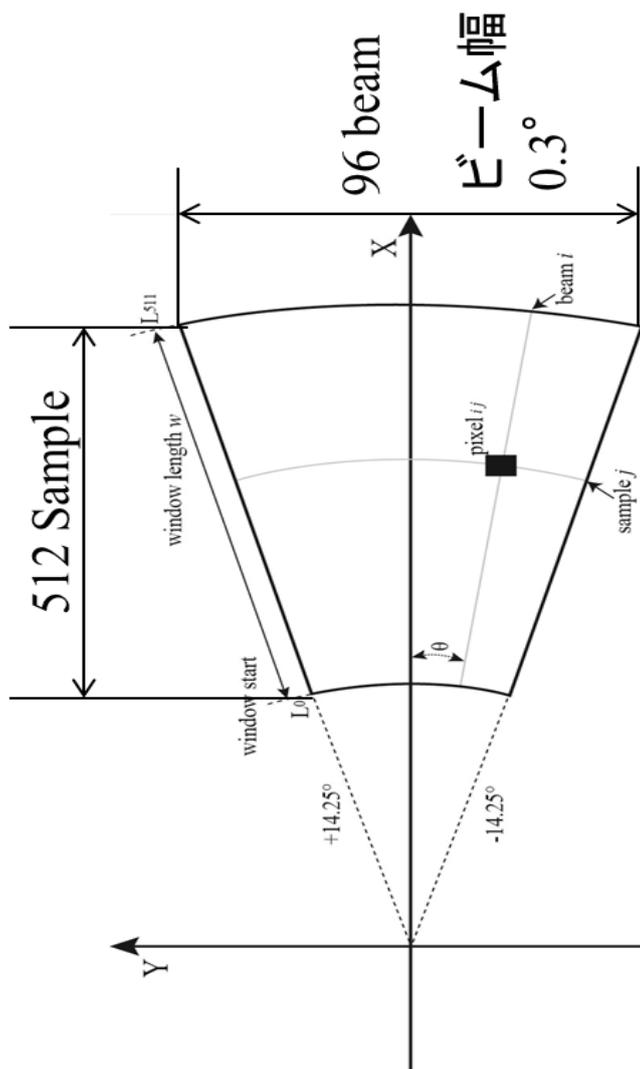


Fig.3-2 DIDSON のビーム概要

## 3.3 岩内港調査

### 3.3.1 調査地

本調査は、北海道岩内町にある岩内港(北緯  $42^{\circ} 59'$  , 東経  $140^{\circ} 30'$  )の港湾岸壁で行った(Fig.3-3)。対象岸壁は、本章の目的である腐食孔や劣化により生じた傷等の検出を行うため、水深が浅い部分の岸壁に上部滑落が見られ、腐食孔も存在するとされている岸壁とした。対象岸壁の全長は、272 mであり、岸壁の中間付近で7.5 m岸壁と5.5 m岸壁に別れ、繋ぎ目部分はコンクリート岸壁である。中央付近以外は、鋼矢板岸壁で構成されている。調査は、5.5 m 岸壁を対象として行った。

Fig.3-3 左側図の K3 は海側の岸壁先端部であり、K1 は調査岸壁の根元である。調査岸壁の KA の地点に大きな路面沈下(Fig.3-4)が見られ、沈下部の鋼矢板に腐食孔の存在が疑われている。Table.3-2 に K1、K2、KA の緯度経度を示す。

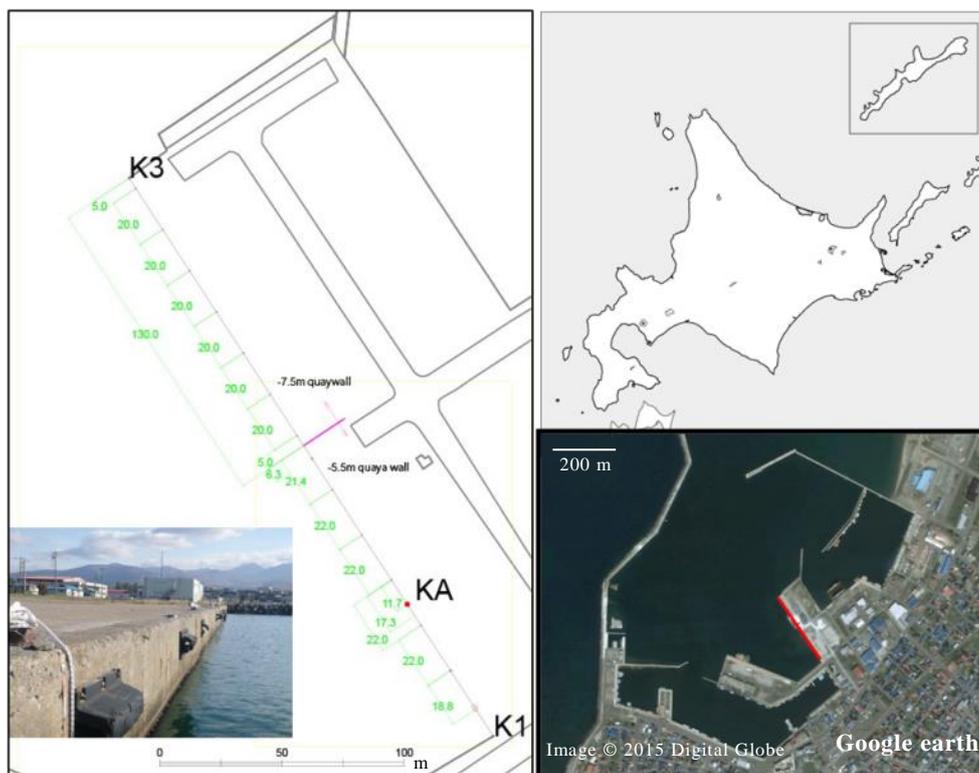


Fig.3-3 岩内港調査岸壁位置図

Table.3-2 調査岸壁と沈下部の位置

地点	緯度 (N)	経度 (E)
K1	42° 59'11.48''	140° 30'58.04''
K3	42° 59'18.84''	140° 30'51.49''
KA	42° 59'13.22''	140° 30'56.49''



Fig.3-4 路面沈下部

### 3.3.2 調査機器

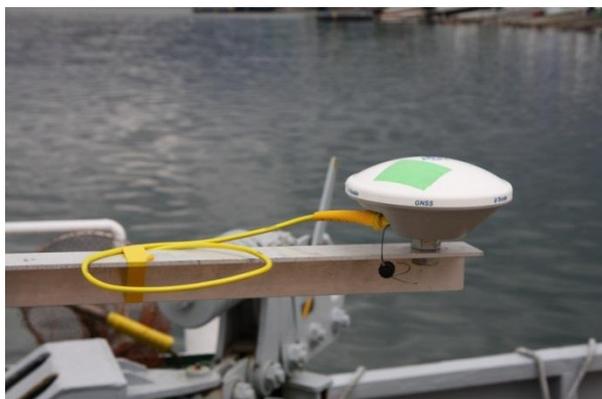
本調査では、詳細な腐食孔や劣化により生じた傷等の形状を定量的に計測するために、音響ビデオカメラ(DIDSON, Sound Metrics, USA)を用い、動揺補正と位置計測のために動揺センサ(DMS Series-05, Teledyne TSS Ltd., USA)と RTK-GPS(SPSx51 Modular GPS, Trimble®)を使用した。DIDSON データは DIDSON 用の PC を用いて記録を行った。動揺・位置は、データ記録処理ソフトウェア (HYPACK, HYPACK 社, USA)を用いて記録した。本調査で使用した機器の一覧を Table.3-3、Fig.3-5 に示す。

Table.3-3 調査機器一覧

機器名称		内容
①	音響カメラ (DIDSON : Sound Metrics社)	超音波を用いたビデオカメラであり、ソーナーヘッド、電源ボックスおよび電源・制御ケーブルで構成される。音の反射強度を明暗で表現することにより、水中の物体の表面状態を可視化する。得られた画像を音響カメラ解析ソフトで処理することでモザイク図を作成し、水中構造物の劣化状況調査に使用する。計測には専用ソフトウェアを使用している。
②	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。計測には統合型水路測量計測ソフトウェア (HYPACK) を使用している。
③	RTK-GPS基地局 (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。計測には統合型水路測量計測ソフトウェア (HYPACK) を使用している。
④	RTK-GPS方位計、移動局 (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。計測には統合型水路測量計測ソフトウェア (HYPACK) を使用している。
⑤	水中距離計 (PSA-916D : Teledyne Benthos社)	岸壁から①までの距離を計測し、計測した距離をバックホウのオペレータへ知らせるため機器であり、センサ部、電源・通信ケーブルで構成される。計測には専用ソフトを使用している。
⑥	音速度計 (SVPS : AML Oceanographic社)	水中の音速を計測する機器で、センサ部と電源・通信ケーブルで構成される。
⑦	ノートパソコン	岸壁音響計測システムのデータを収録するパソコン



モーションセンサ DMS-05



RTK-GPS 移動局



RTK-GPS 基地局



水中距離計



音速度計



DIDSON 音響レンズ

Fig.3-5 調査使用機材

### 3.3.3 艀装方法

DIDSON 及び各計測機器の艀装概念図を Fig.3-6 に示す。調査船に取り付けた治具固定具で調査ポールを固定し、調査ポールの上先端部分に RTK-GPS 移動局を設置した (Fig.3-7)。また、調査ポール下先端部に、水中高度計、モーションセンサ、DIDSON を Fig.3-8 に示すような治具に設置した後、取り付けを行った。水中高度計は、常に岸壁正面に向くように調査船と直交するような取り付けを行っている。モーションセンサは、調査船の進行方向にモーションセンサの進行方向が向くように設置した。

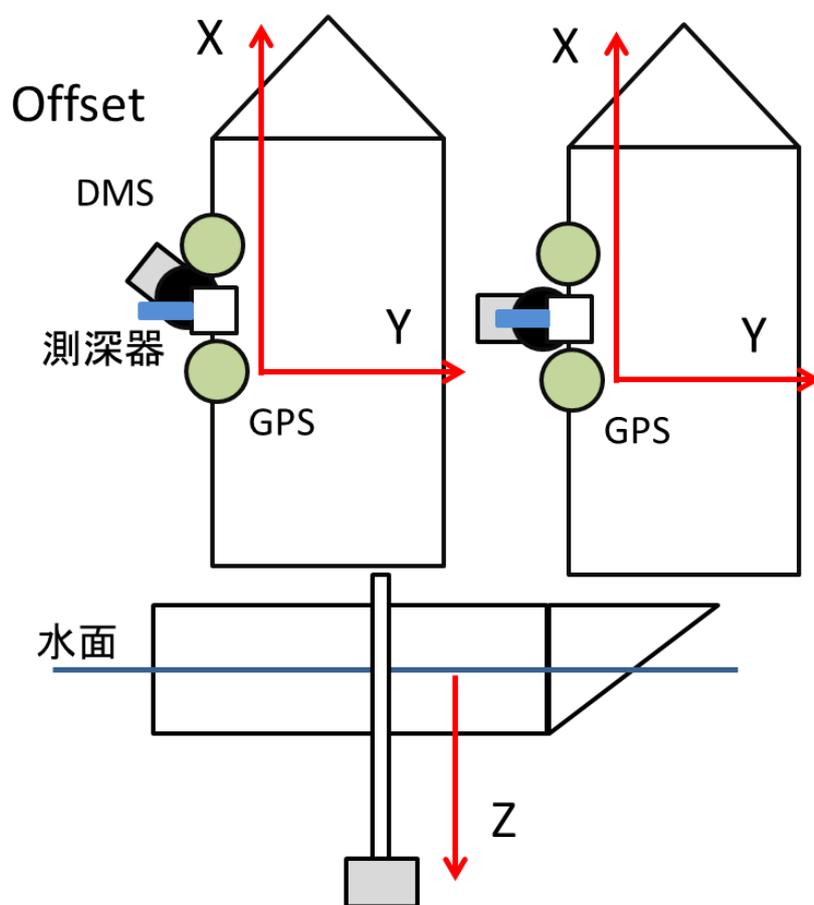


Fig.3-6 艀装概念図



Fig.3-7 RTK-GPS 移動局

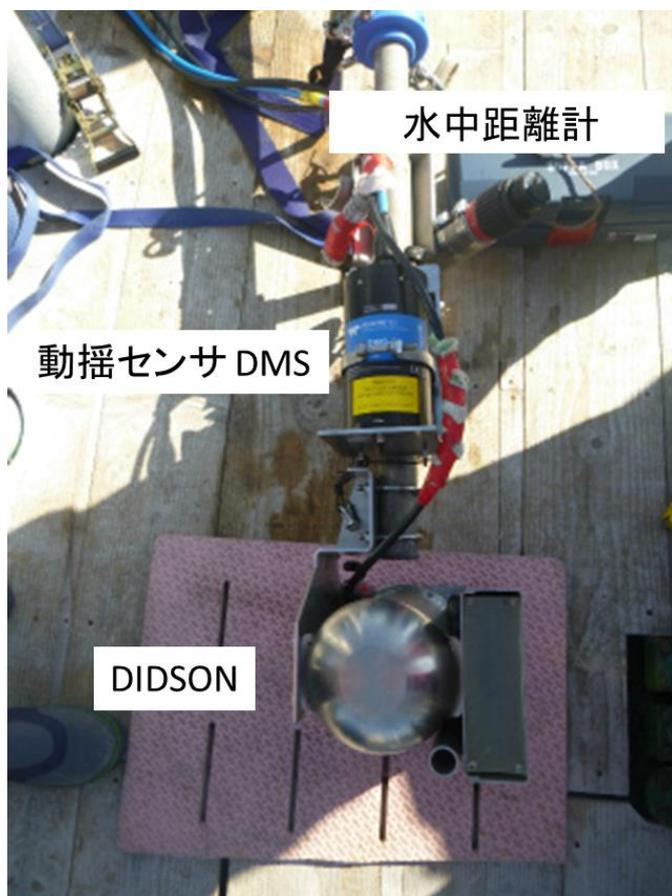


Fig.3-8 DIDSON、モーションセンサ、水中高度計の取り付け

### 3.3.4 計測方法

計測方法は、本章の目的である 2 次元モザイク及び 3 次元図の作成のため、DIDSON の撮影向きとビーム幅を変更した 2 種類とした(Fig.3-9)。

2 次元計測では、岸壁の映像を取得できるように進行方向へ  $45^\circ$  傾け、岸壁の映像撮影を行った(Fig.3-10)。2 次元図作成計測では、一度に岸壁の広い水深範囲を計測するために、DIDSON の標準である  $14^\circ$  のビーム幅を使用した。3 次元図作成計測では、既製品のようなマルチビーム測深器のように使用し、詳細な岸壁の起伏形状を計測するために、岸壁をスライスするような計測方法を採用した。マルチビーム測深器として使用可能とするため、DIDSON のレンズ部分に 1 度のレンズを装着し、岸壁に対し垂直となるよう艤装した(Fig.3-10)。

2 次元図作成計測及び 3 次元図作成計測ともに岸壁から 3m 程度はなれるように調査船を航行させ走査を行った(Fig.3-11)。測定水深は 0.96 m と 1.86 m の 2 通りの水深で行った。計測時の船速は、撮影映像の乱れと大きな揺れが出ないように 1.0 m/s(0.6～1.4 m/s)とし、出来るだけ速度が出ないようにした。映像撮影は、10 fps とした。

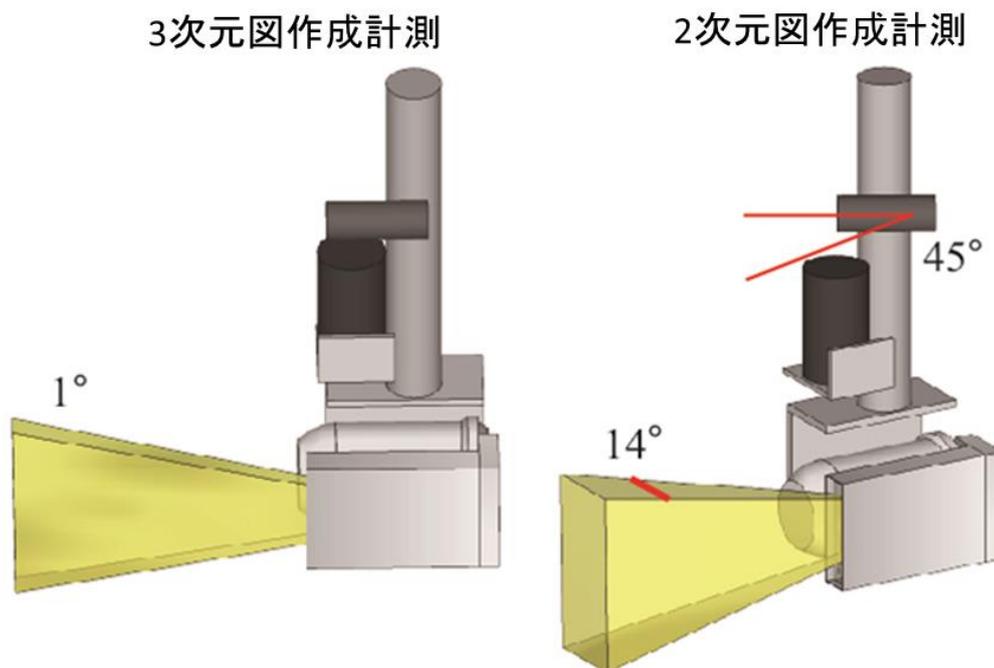


Fig.3-9 2次元図と3次元作成計測方法

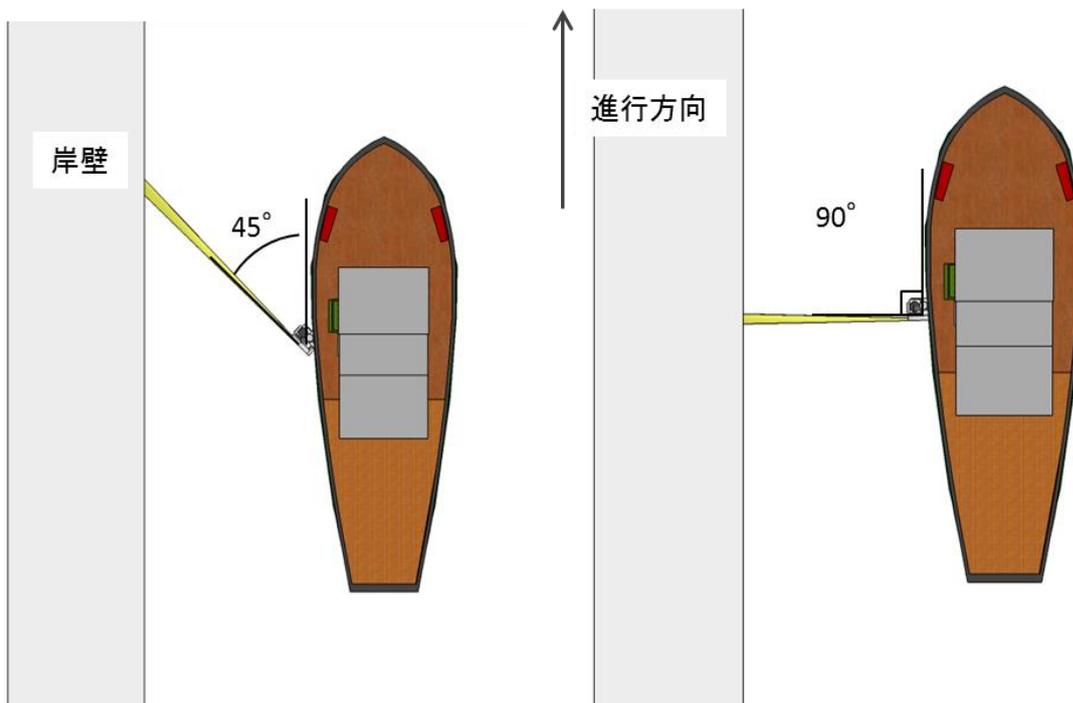


Fig.3-10 2次元図と3次元作成計測方法概念図 平面



Fig.3-11 調査時の様子

### 3.3.5 解析方法

計測試験で取得したデータを用いて2次元モザイクングと3次元図プログラムの開発を行った。Fig.3-12に簡単な2次元モザイクング、Fig.3-13に3次元図の作成手法を示す。Fig.3-12のモザイクングエリア設定では、中心の20ビームを使用し、はじめに来る岸壁の箇所を走査しモザイクング箇所の選定を行った。3次元図の作成では、岸壁表面部の探査を行うために輝度値が最大になる点を走査し岸壁表面の選定を行った。

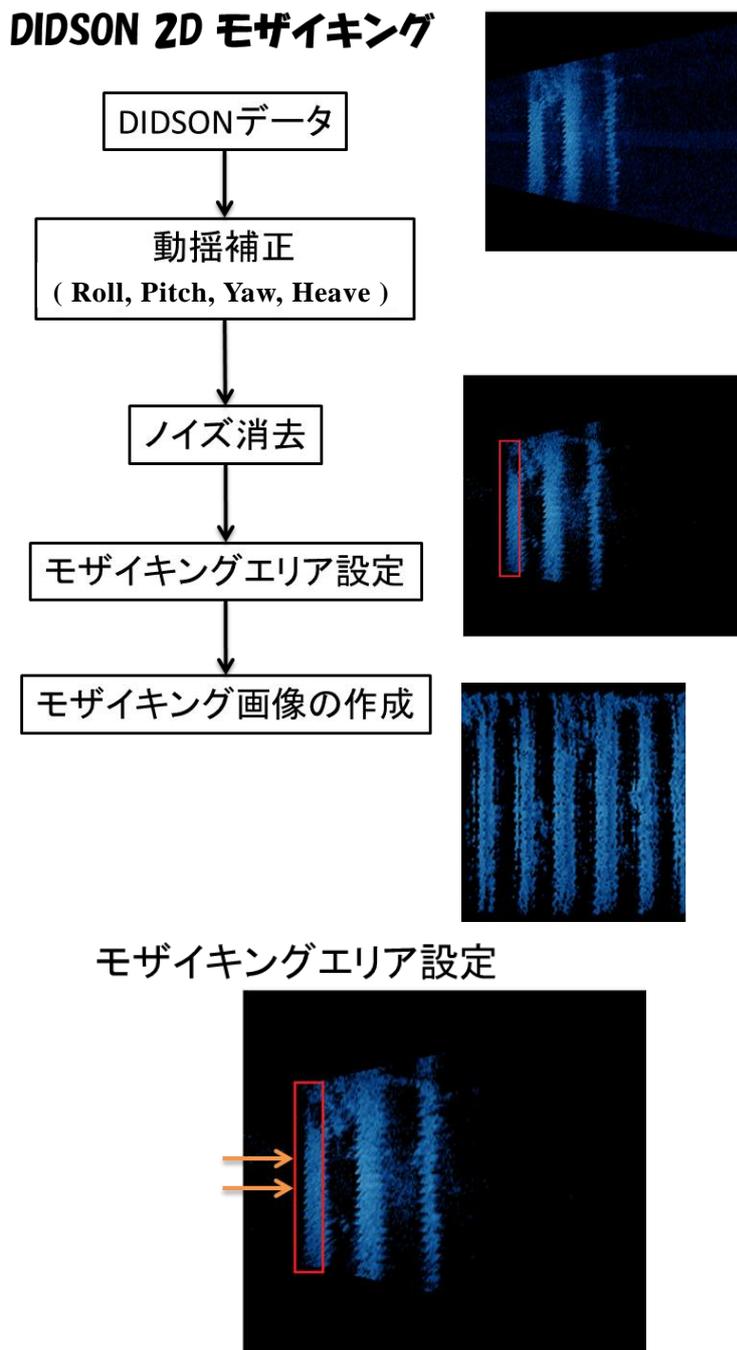


Fig.3-12 2次元モザイクング解析フロー図

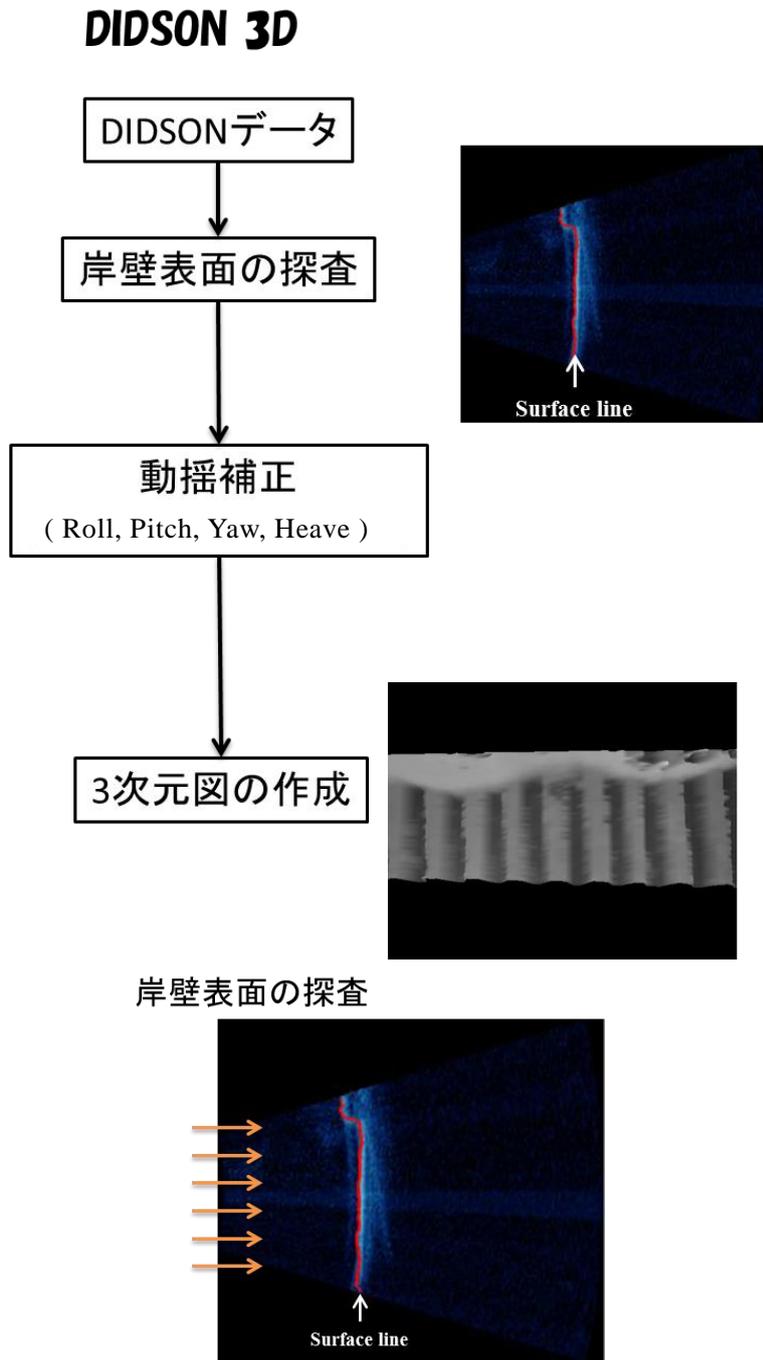


Fig.3-13 3次元図解析フロー図

### 3.3.6 結果

作成したモザイク図を Fig.3-14 に示す。作成した 3 次元図を Fig.3-15 に示す。モザイク図では腐食孔の形状を捉えることが出来き、見た目でも穴の開いている様子が見て取れる。モザイク図上の計測では、腐食孔の大きさが横 0.26 m, 縦 0.3 m であったのに対し、潜水士による直接計測では、横縦共に 0.3 m であった。縦方向の計測値は同様の値を示したが横方向の計測値は、0.04 m の誤差が生じた。次に、三次元計測では、腐食孔の深さを捉えることが出来た。三次元上の計測では深さ 0.2 m であり、潜水士の直接計測でも 0.2 m であった。こちらもモザイク図上の縦方向の計測値のように直接計測と同様の結果が得られた。しかし、3 次元図で腐食孔形状には歪みが生じており横方向の分解能が 0.1 m という結果になった。これは、横方向(調査船進行方向)の分解能は DIDSON のビームをしぼめている分、船速に依存しやすいため三次元計測を行う際は船速を遅くする必要がある。また、今回の計測では、同じ側線でも調査船が岸壁に近づいたり離れたったりした。岸壁との距離は、垂直方向、奥行き方向の分解能に依存するため、分解能を一定に保つためには岸壁との距離を一定に保つ必要がある。

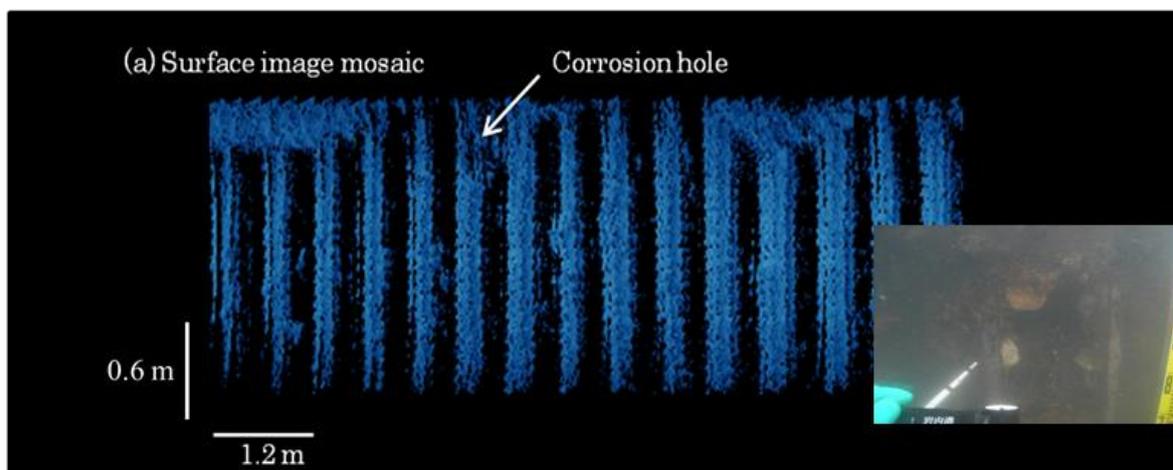


Fig.3-14 2次元モザイク図

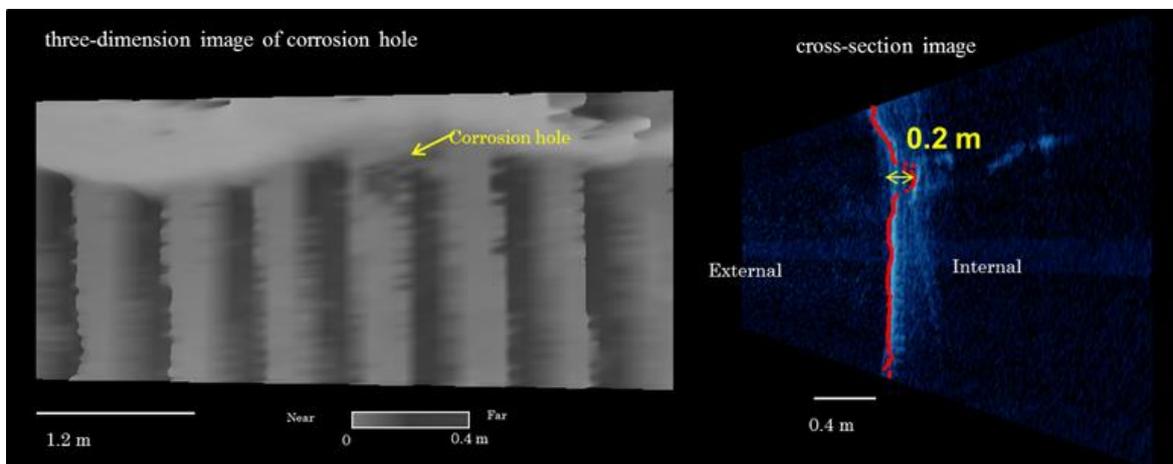


Fig.3-15 3次元図

### 3.4 分解能向上のための調査手法検討と実地試験

前述の試験結果より船速を遅く一定にし、岸壁との距離を一定に保つ必要があることがわかった。そこで、前回の試験と同様の岸壁で試験を行った。本試験では、岸壁側からバックホウを用いて低速(0.2 m/s 程度)で移動し鋼矢板の形状調査を行った。Fig.3-16 に計測結果の3次元図を示す。解析手法は前述の3次元図の解析方法と同じである。結果は、調査船を使用するときよりも動揺(波などの影響)を除去し詳細で歪みが少ないデータを取得した。鋼矢板岸壁の形状をはっきりと捉え、鉛直・水平・奥行き方向の誤差を2 cm 以下に押さえた。特に、奥行き方向は3 mm 程度の分解能で計測が可能である。これにより当初の目的であった1 cm~5 cm 程度の腐食孔や劣化により生じた傷等の検出が可能となった。

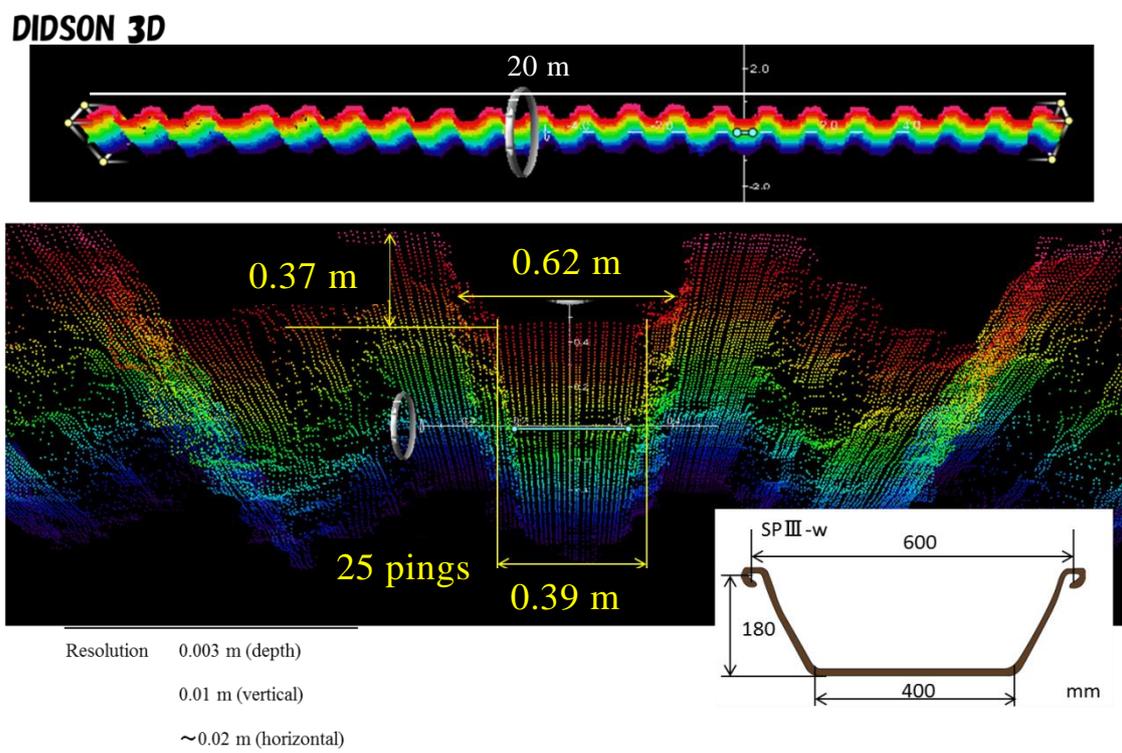


Fig.3-16 分解能が向上した3次元図

## 4. パラメトリックソナーを用いた内部空洞探査

### 4.1 はじめに

第2章、第3章では、港湾岸壁の外部形状について述べた。本章では、港湾岸壁の内部の調査手法を検討する。第1章でも述べたように、近年港湾岸壁の背面土砂が吸出しを受け、内部空洞が発生し局所的な地盤沈下や上面陥没が発生した被害が数多く報告されている。内部空洞は、岸壁外部に異常が見られてから発見されるため、内部空洞が大きくなり被害が出やすくなる。また、異常が見られても内部空洞の広がりや位置が特定できない場合が多い。

現在、岸壁内部の空洞探査の既存技術として主に、電磁波レーダーを用いた調査法が行われている[53][54]。電磁波レーダーによる調査は岸壁上面の路面から非破壊で空洞探査が可能である。しかし、地中に発信した電磁波は含水比の高い土や水中では著しく減衰するため、定期用限界深度は1.5m程度であり、残留水位が高い岸壁部では、深い位置での空洞分布を把握することが困難である[55]。既存技術の深部空洞分布の探査が困難という問題点を解決し、港湾岸壁の状況を正確に把握し、維持管理に貢献できる技術が必要とされている。

そこで本章では、海洋の海底下探査に使用されているパラメトリック地層探査システムを用いて内部空洞探査が可能か検討した。

### 4.2 パラメトリック地層探査システム

本研究では、岸壁内部の深部空洞分布まで把握するために、パラメトリック方式を用いた。岸壁の表面や内部の背面土砂は吸収損失が大きく高周波は深部まで透過することができない(Fig.4-1)。深部まで透過し内部空洞の反射を得るためには、周波数を低くする必要がある。しかし、周波数を低くすると方位分解能が低下し、サイドローブによるアーチファクトが発生し正確な内部診断が困難になる(Fig.4-2)。パラメトリック音源は、鋭い指向性(高方位分解能)を持ち、サイドローブが小さい低周波を生成することが可能である(Fig.4-3)。

パラメトリック法は、周波数の異なる2つ高周波(1次波)を1つの送波器から同時に同軸上に放射し、2つの高周波の非線形相互作用によって生じた差分周波数(2次波)を利用する方法である[56][57]。1次波の2つの周波数を近くすれば、2次波を低くす

ることが可能となり、低周波にも関わらず指向性は極めて鋭くなる。

調査には、パラメトリック地層探査システムで唯一既製品である SES2000(Innomar, Germany)を使用した。SES2000 の仕様を以下に示す(Fig.4-4)[58]。SES2000 は、高音圧の2つの周波数の合成波を使用した非線形音源である。1次波の中心周波数は 100 kHz を使用し、2次波(周波数：5,6,8,10,12,15kHz)が生成可能である。また、1次波と2次波を同時に収録する事が出来る。ビーム幅は、3.6° のペンシルビームとなっている。ローリングとピッチングによる揺れを補正するビームステアリング機能を搭載しており、動揺に然程影響されずにトランスデューサの直下を探査する事が出来る。また、1次波が 100 kHz であることからトランスデューサが非常に小型・軽量であり、扱いやすい機器である。主な使用用途として、海底下浅部の探査に使用されている [59][60]。

パラメトリックソナーの長所として挙げられる指向性が良い探査システムが水中構造物の内部探査に使用された報告はされていない。

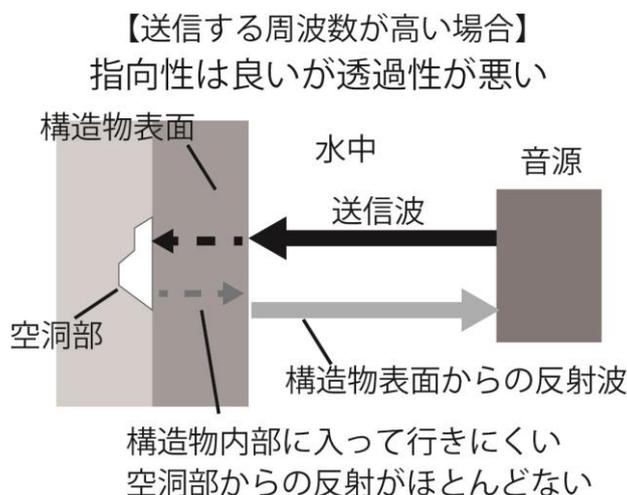


Fig4-1 高周波音源

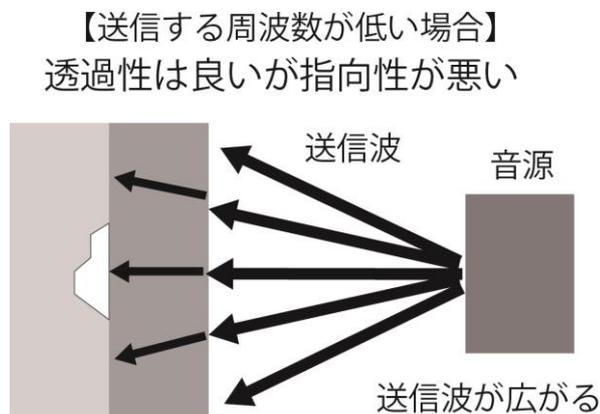


Fig4-2 低周波音源

【収束パラメトリック送信技術】  
指向性を保持したまま透過する

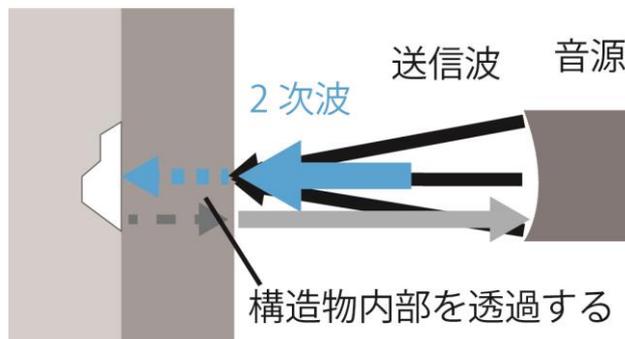


Fig4-3 集束パラメトリック音源



指向角	±1.8° (全角 3.6°)
1次周波数	100(kHz)
2次周波数	5,6,8,10,12,15 (kHz)
送信出力	12kW : 236dB
パルス幅	66~500 μ S
送信レート	最大 30 回/sec
消費電力	定格 300W

Fig4-4 SES2000 と送受波器の仕様[58]

## 4.3 現地調査

### 4.3.1 調査地

本調査は、3.3 と同様の調査地と調査対象岸壁で実施した。

### 4.3.2 調査機器

本調査で港湾岸壁の内部を計測可能か検討するために、パラメトリック地層探査システム(SES2000)を用い、動揺補正と位置計測のために動揺センサ(DMS Series-05, Teledyne TSS Ltd., USA)と RTK-GPS(SPSx51 Modular GPS, Trimble®)を使用した。動揺(ロール、ピッチ、ヒープ)と位置は、データ記録処理ソフトウェア (HYPACK, HYPACK 社, USA)を用いて記録した。SES2000 の計測データは付属品のデータ収録ソフトウェア(SESWIN)を使用して記録した。

#### (a) パラメトリック地層探査システム

本調査では、パラメトリック音源の有効性を確認するために既製品である SES2000 を用いた。詳細は、4.2 に記す。

#### (b) 動揺センサ

本調査では、調査船の動揺補正を行うため、ジャイロコンパス DMS Series-05 を用いた。高精度の姿勢(ロール、ピッチ、ヒープ)・方位データの取得が可能である。ロールは進行方向に直角な横揺れ、ピッチは進行方向の縦揺れ、ヒープは鉛直方向の上下運動を表す。データの取得時間は、20 Hz とした。ロール・ピッチの計測誤差は、0.1 度、ヒープの計測誤差は 5 cm での計測が可能である。

#### (c) Differential GPS

RTK-GPS(Real time kinematic Global Positioning System)とは、既知点において位置補正情報を受信側に送信することにより高精度の測位精度を向上させるシステムである。本調査では、SPSx51 Modular GPS を用いてヘディングの計測も行っている。

#### (d)収録ソフトウェア

動揺・位置のデータ収録用ソフトウェアとして、HYPACK (HYPACK 社, USA)を用いた。HYPACK は windows OS 上で作動する統合測量方水路測量ソフトウェアであり、測量計画、操船ナビゲーション、リアルタイム地形表示、データ収録などが可能である。SES2000 の計測データは付属品のデータ収録ソフトウェア(SESWIN)を使用して記録した。

### 4.3.3 調査機器配置

SES2000 及び各計測機器の接続と器材配置は、以下のように構成した。HYPACK を搭載した PC に SPSx51 Modular GPS、DMS Series-05 を接続し位置、動揺を記録した。SPSx51 Modular GPS は SES2000 を固定したポールの上部に T 字型に艀装した。動揺センサー DMS Series-05 は固定した SES2000 のポール直下に設置を行った。SES2000 は、Fig.4-5 の様に計測ポールに取り付けた。計測ポールは、取り付けた SES2000 の送受波面が港湾岸壁と平行になるように艀装した(Fig.4-6)。艀装後、各機材の位置関係を記録した。機材のオフセットは、Fig.4-7 に示す。



Fig4-5 計測ポールへの SES2000 の取り付け



Fig4-6 SES2000 の艀装

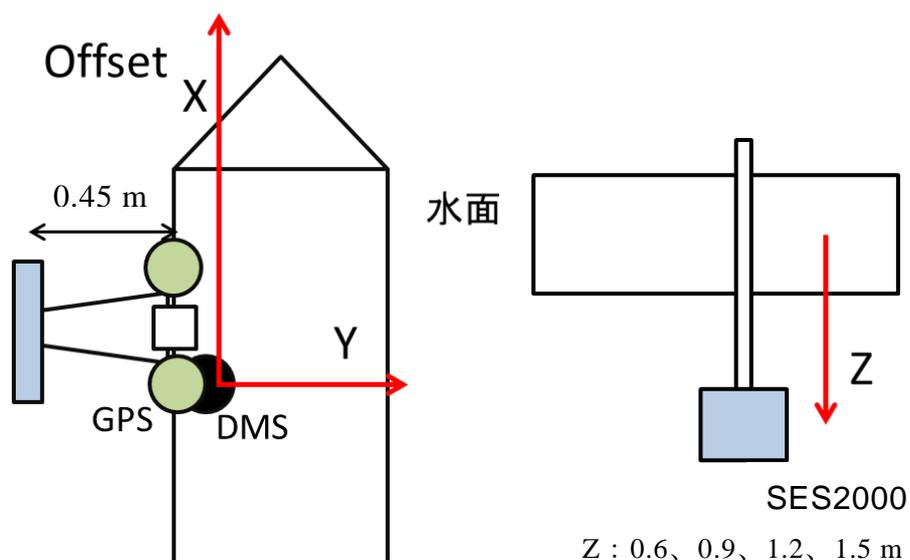


Fig4-7 SES2000 調査時の機材オフセット図

#### 4.3.4 調査方法

本調査で港湾岸壁の内部を計測可能か検討するために、内部空洞が発生している可能性のある岸壁を調査対象とした。

調査は、内部空洞探査を行うため港湾岸壁から約 3 m 程度離れて走査した(Fig.4-8)。同時に、GPS で調査船の位置情報、調査船の挙動(ロール、ピッチ、ヒープ、ヘディング)を、DMS Series-05 を用いて記録した。測定水深は、0.6、0.9、1.2、1.5 m の計 4 水深とした。船速は、出来るだけ遅くなるように 1.0m/s(0.6~1.4m/s)とした。



Fig4-8 SES2000 調査時の機材オフセット図

### 4.3.5 解析手法

調査で得られた SES2000 のデータから岸壁内部を評価するために内部の 2 次元図の作成を行った。解析方法のフロー図を Fig.4-9 に示す。以下に解析手法を具体的に述べていく。

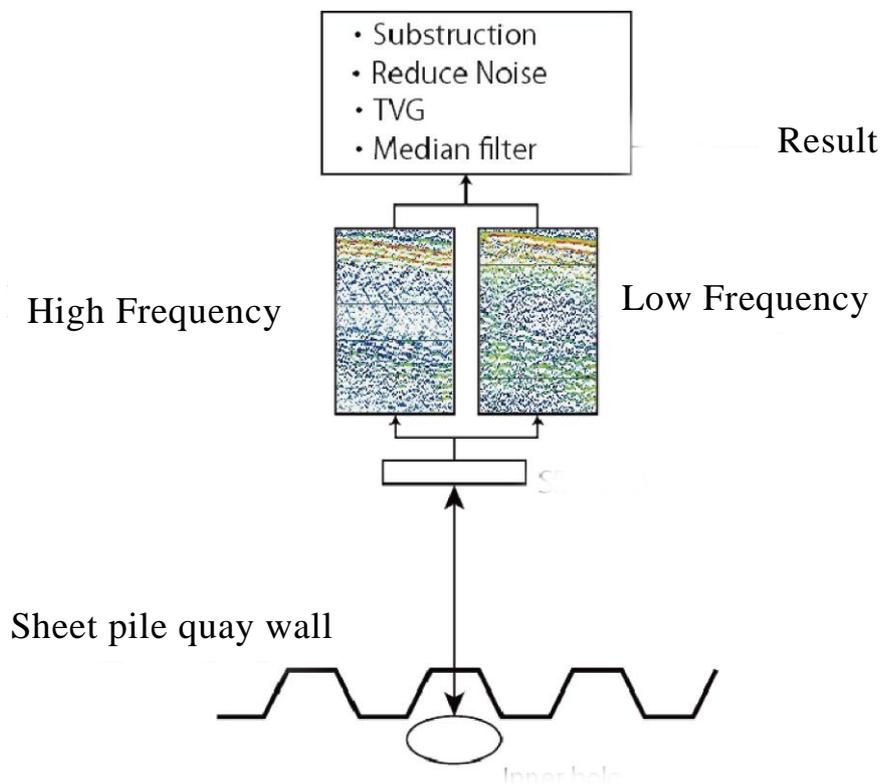


Fig4-9 SES2000 解析方法のフロー図

#### 取得データ

SESwIn で収録した調査データは、1 測深ごとに独自のフォーマットで記録されている。読み込むために SES コンバーターを用いてテキストファイルに変化した。まず、1 側線分のテキストファイルから収録されているデータを読み込むプログラムを作成した。

SES テキストデータから取得したデータは、

- 1Ping 中で得られた 480 個の反射強度
- 1Ping の時刻

の 2 つである。

さらに、HYPACK で収録した動揺と位置データは、1 測深ごとに.HSX ファイルにテキストデータで記録されている。

取得したデータは、

## CHAPTER 4. パラメトリックソナーを用いた内部空洞探査

- ・船体座標系でのロール角(deg.)・ピッチ角(deg.)・ヒープ量(m)
- ・日本平面直角座標系 9 系を基準とする平面座標系における GPS アンテナの座標
- ・絶対座標系での船の方位
- ・格データの取得時間

の 6 つのデータを取得した。

そのほかにも、

- ・調査時に取得した水中音速データ
- ・調査機器配置時に測定した SES2000、GPS アンテナの調査船体座標系における位置関係
- ・調査日時の潮位データ

を用いた。

なお潮位データは気象庁のホームページを参照とした。

### 2 次元図の作成

調査データから取得した

- ・ 1Ping 中で得られた 480 個の反射強度

を用いて 2 次元図の作成を行った。まず、得られたデータを次のように整理した。

- ・ 第 1 ping から第 N ping までの SES2000 の位置

格 ping ごとの GPS によって得られた日本平面直角座標系 9 系を基準とする平面座標系における GPS アンテナの座標( $X_{GN}$ ,  $Y_{GN}$ )と、器材配置位置を用いて SES2000 の位置を求める。

$$X_{mN} = X_{GN} + X_d \quad (4.1)$$

$$Y_{mN} = Y_{GN} + X_d \quad (4.2)$$

$X_d$  : GPS から SES2000 の中心までの距離

また、水深方向の Z 軸を求めるために、SES2000 の中心から水面までの距離と気象庁により観測された潮位を用いて求める。格 ping の計測時間の潮位  $H_t$  から SES2000 の中心から水面までの距離  $H_m$  の差を SES2000 の Z 軸位置  $Z_m$  とする。

$$Z_{mN} = H_{tN} + H_m \quad (4.3)$$

最後に、求めた( $X_N$ ,  $Y_N$ ,  $Z_N$ )に調査船の方位  $\theta_{head}$  を用いて各 ping の測深点の構築を行う。

$$[X_{N\theta} \ Y_{N\theta} \ Z_{N\theta}] = [X_N \ Y_N \ Z_N] \begin{bmatrix} \cos\theta_{head} & -\sin\theta_{head} & 0 \\ \sin\theta_{head} & \cos\theta_{head} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

深度方向の位置は全て水中音速である 1500 m/s で計算している。

### 4.3.6 結果

作成した 2 次元図を Fig.4-10、Fig.4-11 に示す。反射強度別に色分けしており、赤から紫に変わるにつれて反射強度が弱くなる。Fig.4-10 は 1 次波(100 kHz)を 2 次元図にしたもの、Fig.4-11 は 2 次波(8 kHz)を 2 次元図にしたものである。Fig.4-11 の拡大部分に腐食孔が空いている。腐食後部部分がつぶれてしまいよくわからなくなっているのがわかる。しかし、Fig.4-10 の 1 次波では腐食孔が空いているのが見て取れる。また、内部の広がりらしきものを捉えているのがわかる。

腐食孔の奥行きや内部空洞の広がり捉えることが出来たが、指向性が悪く形状をはっきりと捉えることが出来なかった。

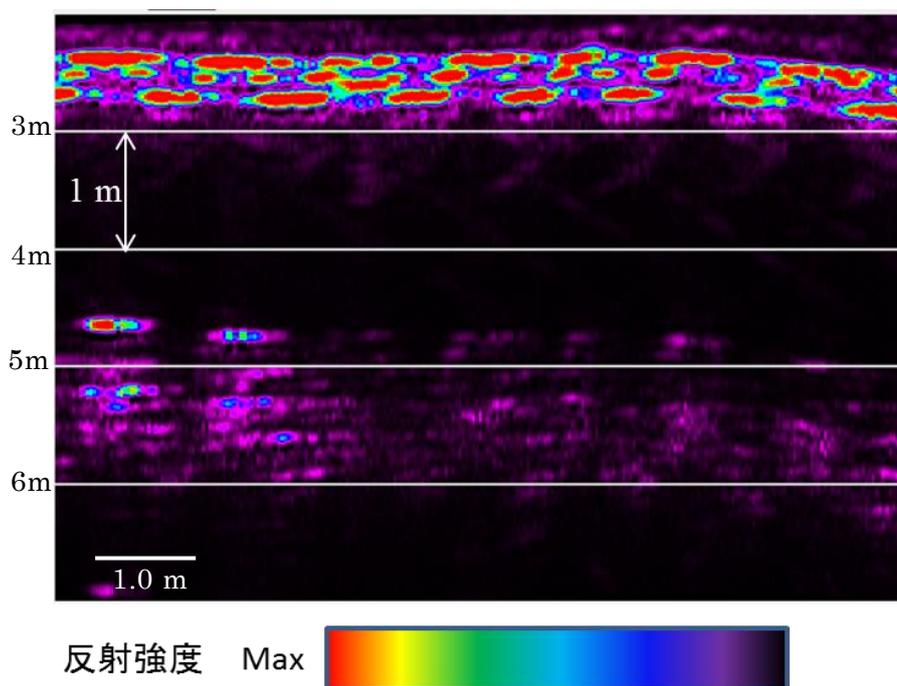


Fig4-10 2次元図(1次波 100 kHz)

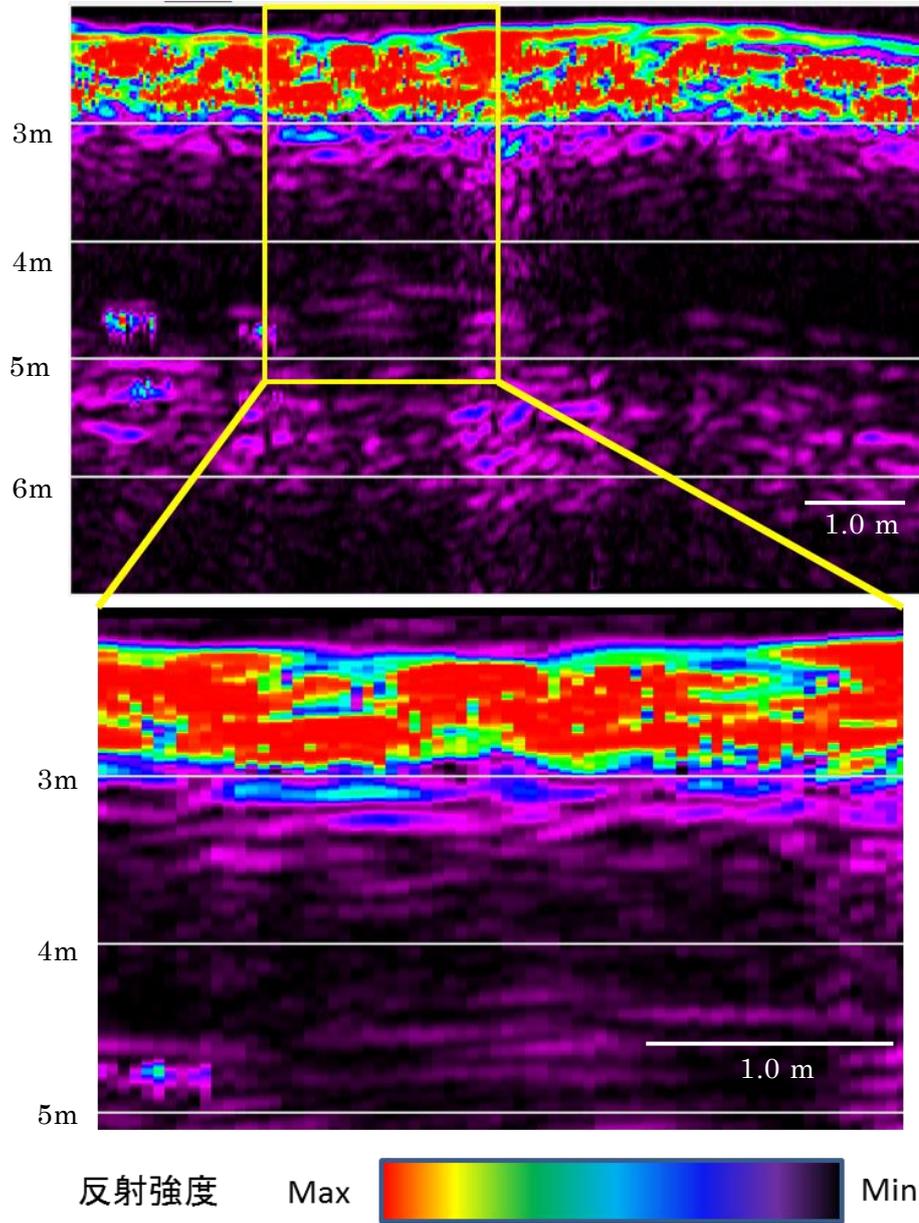


Fig4-11 2次元図(2次波 8 kHz)

## 4.4 集束型音響レンズの作成

前試験結果で、既製品のパラメトリックソナーでは指向性が悪く、鋼矢板や内部の形状をはっきりと捉えられなかった。そこで、収束型音響レンズを開発し、SES2000の指向性改善と音響エネルギーの集束を目指した。音響レンズは、海水に近い音響インピーダンスを持つ低密度ポリエチレンを使用して、焦点距離を 1.0mとし、屈折で焦点を合わせると共に位相距離も焦点に合わせて設計した。また凹型のレンズでは、厚さが厚くなってしまふ為、屈折でフレネル型のレンズとした。Fig.4-12 に開発した集束型音響レンズを示す。

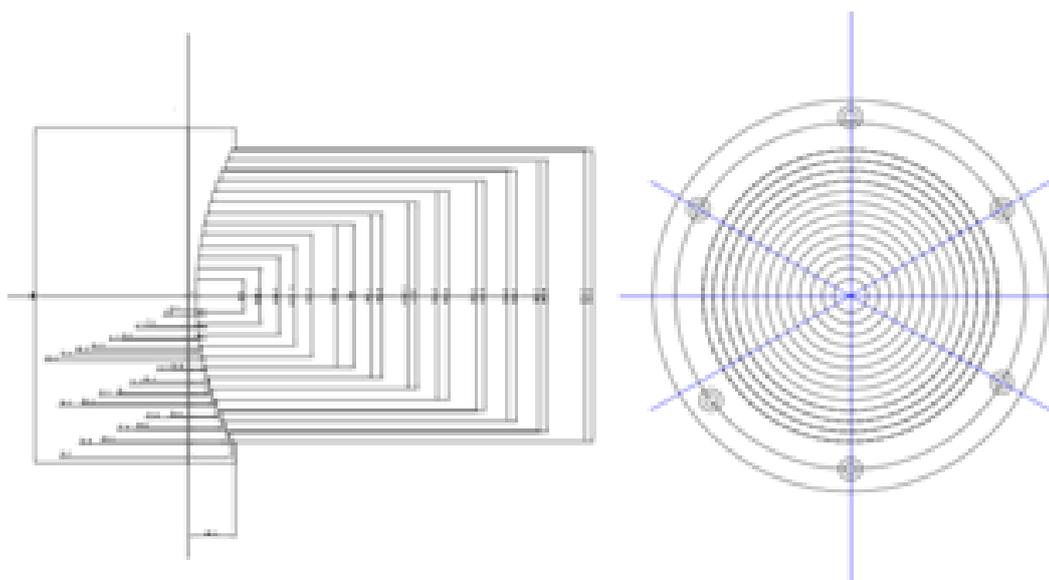
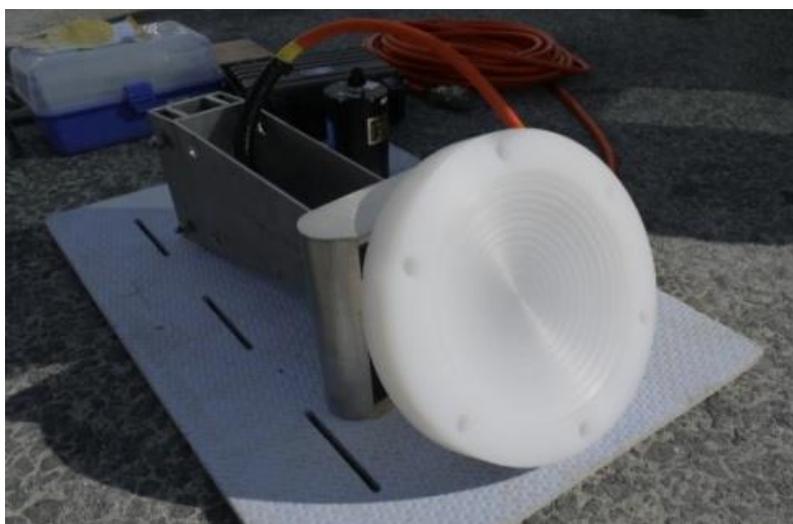


Fig4-12 集束型音響レンズ

## 4.5 集束型音響レンズを装着したパラメトリックソナーを用いたコンクリート水槽内試験

集束型音響レンズを装着した SES2000 を用いて、実岸壁で試験を行う前に探査距離分解能性能を計測するために寒地土木研究所が所有するコンクリート水槽で試験を実施した。Fig.4-13 のようにレンズを装着したパラメトリックソナーをコンクリート壁に向けデータの取得を行った。パラメトリックソナーをコンクリート壁から 1.0 m、0.8 m、0.6 m の位置に移動させデータの取得を行った。

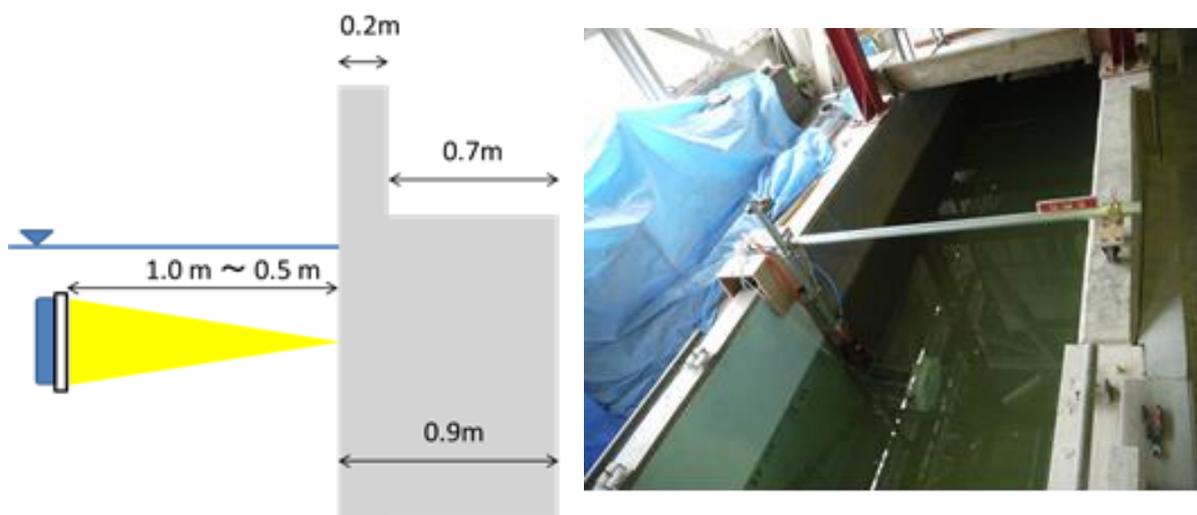


Fig4-13 試験の様子

取得したデータから 2 次元図の作成を行う。まず、取得したデータから 2 次元図の作成を行ったので Fig.4-14 に示す。ここで SES2000 のデータは、距離をすべて水中音速で計算しているため、ターゲット内部は距離補正を行う必要がある。下記に距離補正方法を示す。

1. 距離補正を行う際に送波信号は不要なので 0Level に落とす(Fig.4-15)。
2. 次に画像上部方向からコンクリート表面を探索する。コンクリート表面が反射強度の最大値となるので Ping ごとに最大値になる Sample 番号を求める。総 ping の平均 Sample 番号(Sample max)を求める。
3. 水中音速 ( $V_{water} = 1500 \text{ m/s}$ ) , コンクリート音速 ( $V_{conc} = 4250 \text{ m/s}$ ) を用いて距離補正を行う。Sample max までは  $V_{water}$  、Sample max からは  $V_{conc}$  を使用し、次式にて水中の時間  $W_t$ 、コンクリート内時間  $C_t$ 、コンクリート内の実距離  $L$  を求める。

$$Wt = (5.0 / 480) \times \text{Sample max} / V_{\text{water}} \times 2 \quad (4.5)$$

$$Ct = (5.0 / 480) \times (\text{Sample}_i - \text{Sample max}) / V_{\text{conc}} \times 2 \quad (4.6)$$

$$L = (Wt \times V_{\text{water}} / 2) + (Ct \times V_{\text{conc}} / 2) \quad (4.7)$$

Fig.4-16 に補正後の 2 次元図を示す。

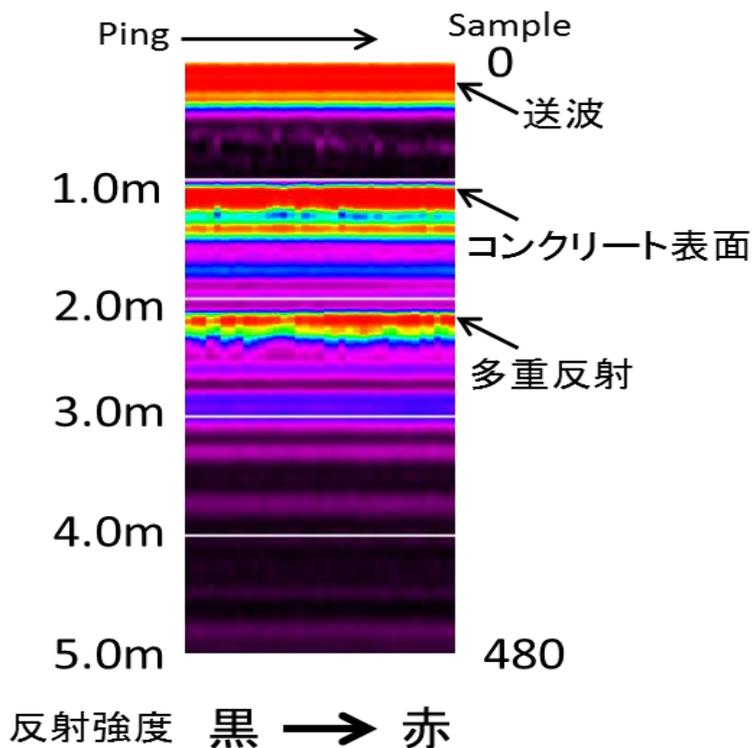


Fig4-14 距離補正前 2 次元図

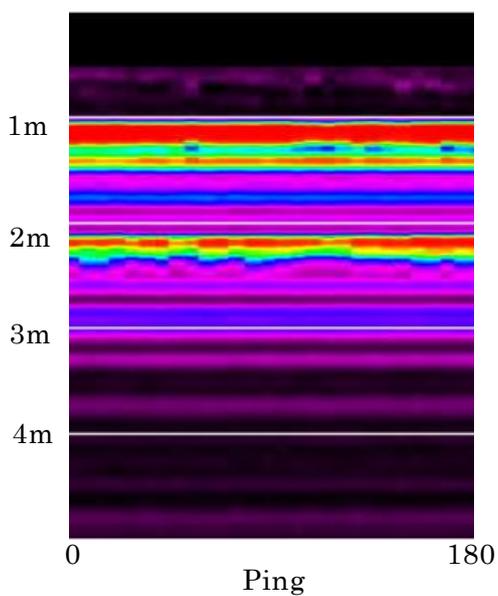


Fig4-15 送信波形 0Level 図

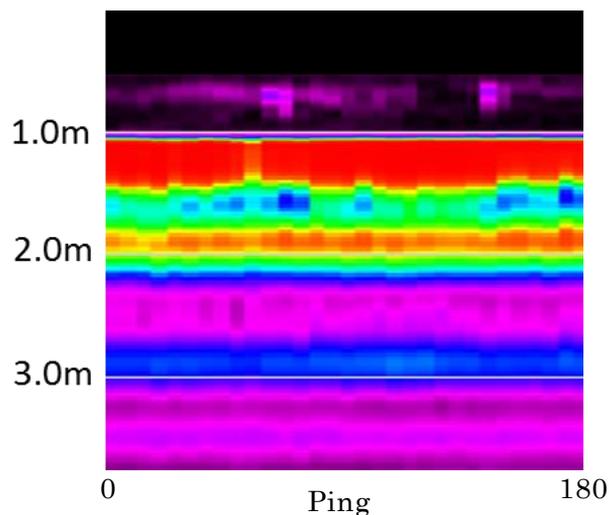


Fig4-16 距離補正後 2次元図

Fig.4-17 から Fig.4-19 に各距離の補正後結果を示す。Fig.4-17 の左側が補正前、右側が補正後の 2次元図である。補正後の 2次元図は送信波形が消えており、多重反射もレンジ外に移動している。コンクリート表面部から 2.0 m ラインまでは、コンクリート内部であり、コンクリート背面からの反射が見て取れる。Fig.4-18、Fig.4-19 も Fig.4-17 と同様な結果となっている。Fig.4-20 は、左からコンクリート壁から 1.0 m、0.8 m、0.6 m にソナーを設置した時の補正後の結果を並べたものである。どの距離でも一番初めの強い反射から 1.0 m ほどの距離に反射が見られた。計測に用いたコンクリートの厚みは 0.9 m であり、送波器からコンクリート表面までの距離を変えても表面から同じ位置(1m 前後：  $1/3$  波長 (16 cm)  $\sim$   $1/2$  波長(25 cm)の誤差が生じる)に現れるので多重反射やマルチパスではなくコンクリート壁の裏側面から反射であると言える。

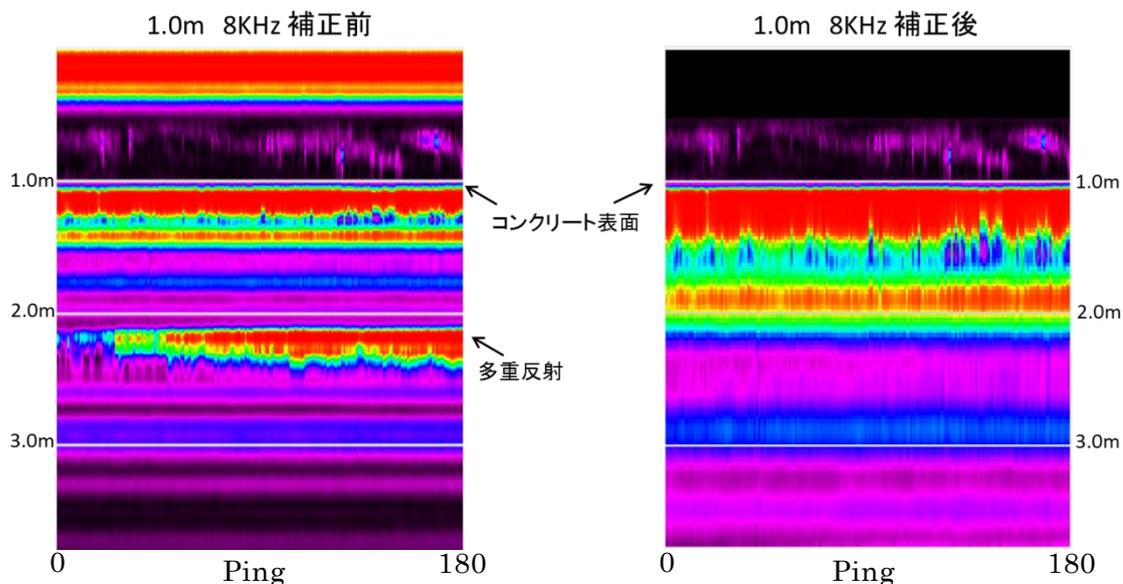


Fig4-17 距離 1.0 m、8 kHz 時の補正前と補正後 2次元図

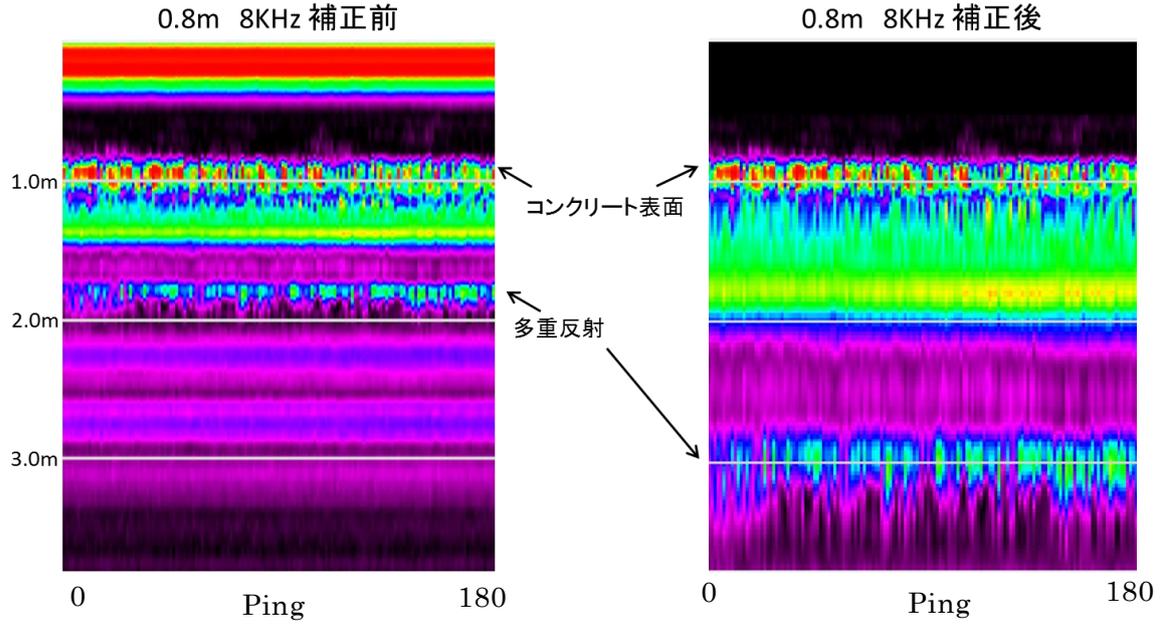


Fig4-18 距離 0.8 m、8 kHz 時の補正前と補正後 2 次元図

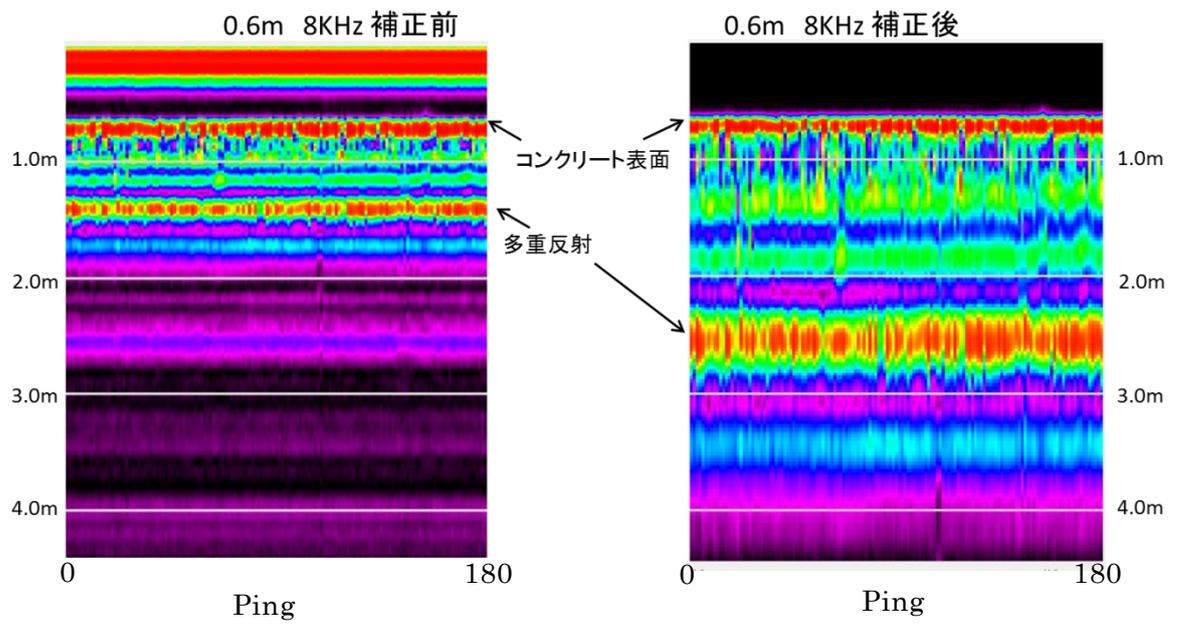


Fig4-19 距離 0.6 m、8 kHz 時の補正前と補正後 2 次元図

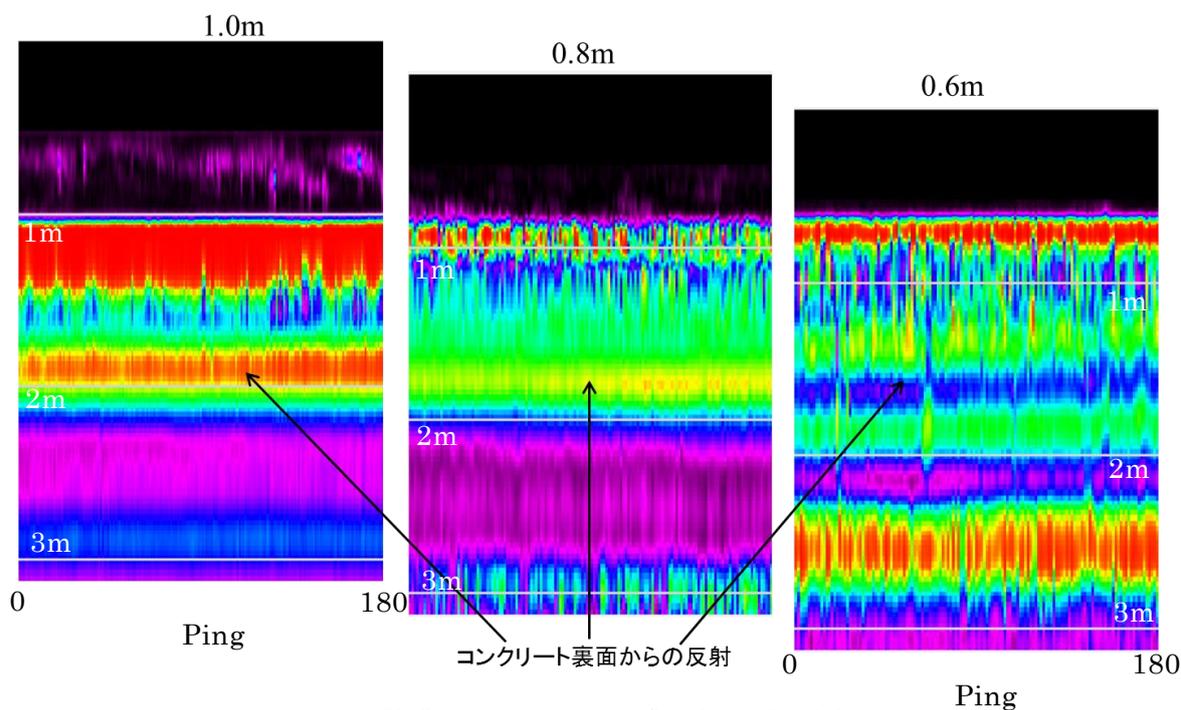


Fig4-20 各距離の、8 kHz 時の補正後 2 次元図の比較

## 4.6 集束型音響レンズを装着したパラメトリックソナーを用いた現地試験

集束型音響レンズを装着したパラメトリックソナーを用いて現地試験を行った。調査地は前回と同様の岩内港岸壁を使用して行った。前回の試験時に岸壁の腐食孔とともに内部の広がりをつ捉えたが、今回の試験時には腐食孔を発見した場所に岸壁の修繕工事が入っていたため同様の条件下となる続きの岸壁の一部を使用した。またモーションセンサと GPS は前回試験時と同条件となるように同一のものを使用した。

### 4.6.1 試験方法

本試験では、集束型音響レンズを装着したパラメトリックソナーによる補遺分解能の改善と探査状況評価を目的とした。今回は、前回と同じ条件下で試験を行いたかったが、3章の DIDSON 分解能の向上と同一日に試験を行ったためバックホウを用いた試験を行った。Fig.4-21 に試験方法を示す。DIDSON 時の試験と同様に昇降式の試験ポールをバックホウのバケット部分に取り付けた (Fig.4-22)。バケットを水面付近まで降ろしたあとに低速走行で 20 m ほどの試験区間を計測した。試験は、レンズ装着時とレンズなしの 2 通りで計測した。

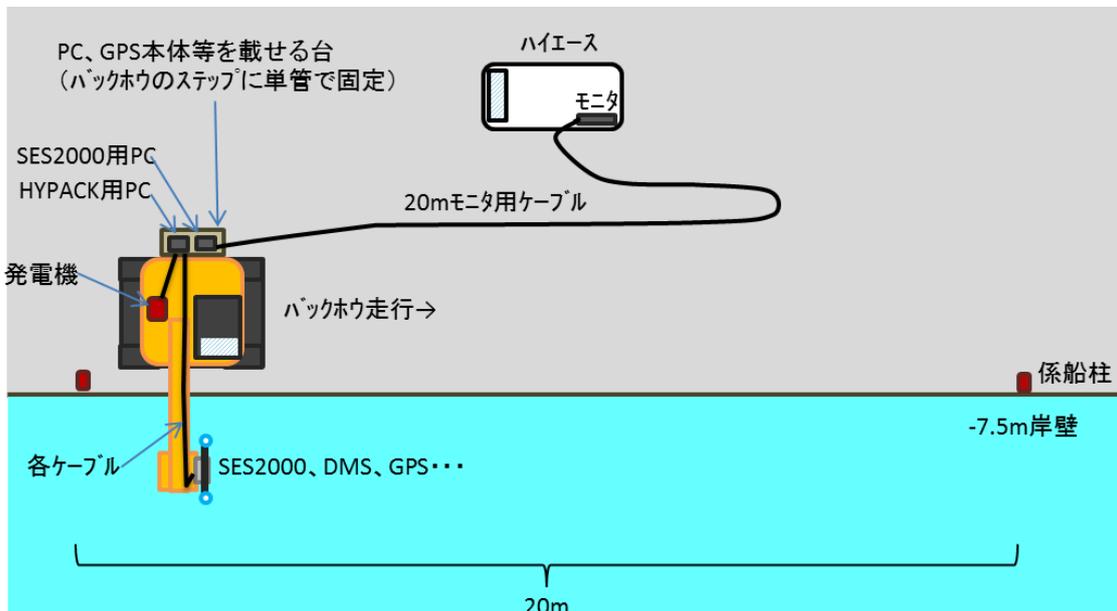
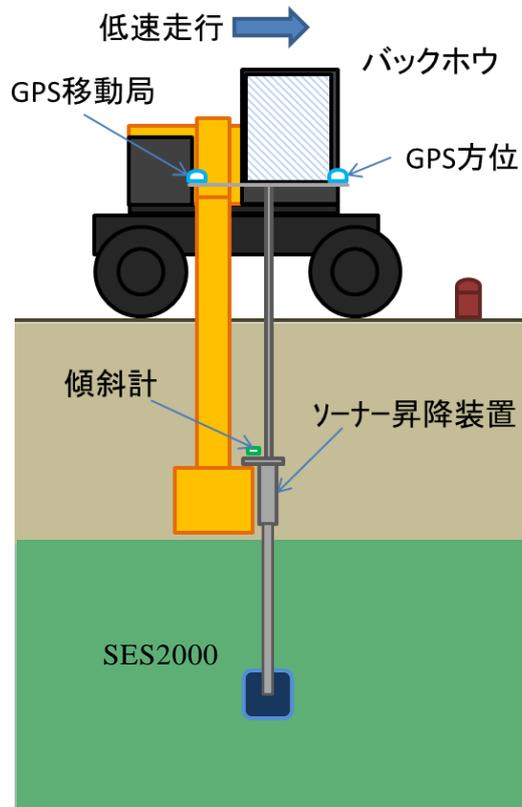


Fig4-21 集束型音響レンズ試験方法



Fig4-22 SES2000 の取り付け方法

#### 4.6.2 試験結果

集束型音響レンズありの試験結果代表例を Fig.4-23 に示す。解析手法は、4.5.3 と同様の手法で行った。集束型音響レンズを用いた試験では、1次波、2次波ともに鋼矢板岸壁の形状をはっきりと捉えることが出来た。音響レンズなしと音響レンズありの同周波数の試験結果を比較すると音響レンズの効果がはっきりとわかる(Fig.4-24)。

今回の試験結果より、既存のパラメトリックソナーに独自に設計したフレネルレンズを装着し、方位分解能の向上を図り位置探査能力を向上させた。しかし、部分にははっきりとした異常が見られなかった。

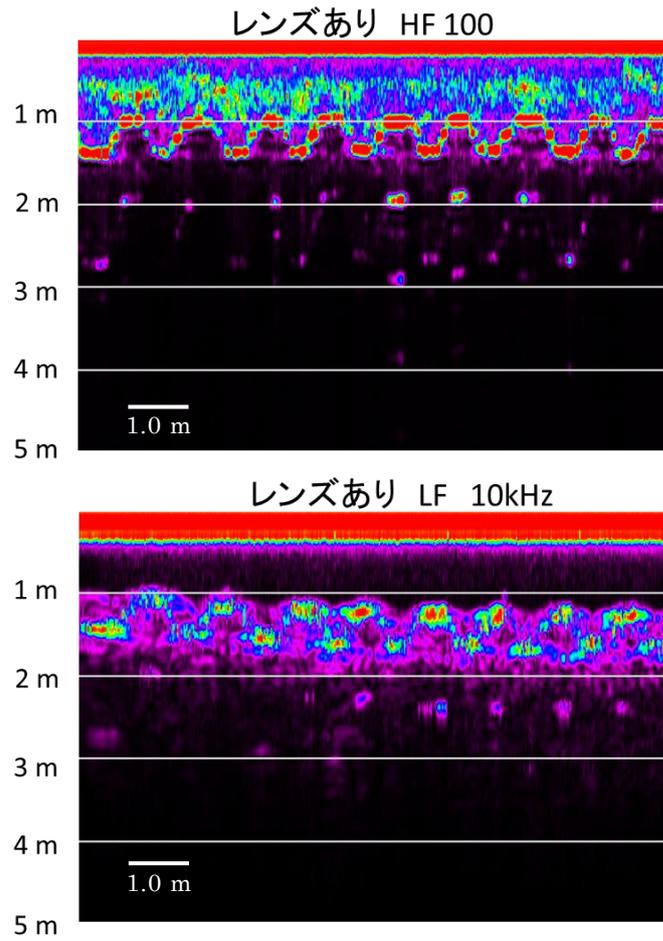


Fig4-23 集束型音響レンズありの試験結果代表例

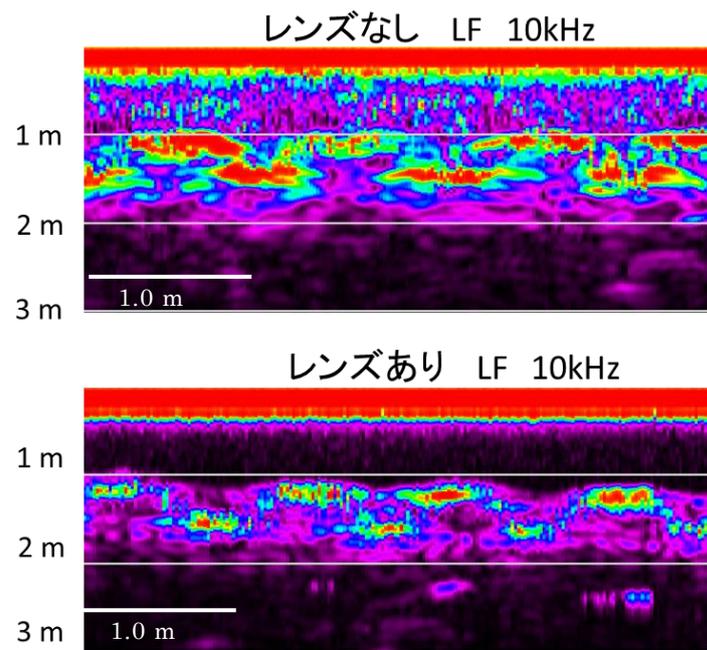


Fig4-24 音響レンズなしと音響レンズありの同周波数の比較

## 4.7 集束型パラメトリックソナーの開発

SES2000 に集束型音響レンズを装着したことにより、近距離でフォーカシングさせ探査能力の向上と方向分解能の向上を行うことが出来た。しかし、岸壁内部調査を行う上で下記の問題点が浮上した。

- ・ 指定された周波数や波形しか使用できない
- ・ 取得できる情報が限られる

以上の2点の問題点が挙げられる。

以上の問題点を解決するために、本節では集束型パラメトリックソナーの開発を行った。

### 4.7.1 集束型パラメトリックソナー

本研究で開発したフォーカス音響パラメトリックプローブの外形図を Fig. 4-25 に示す。フォーカス音響パラメトリックプローブは、60本の送波器(周波数帯域：100 kHz ± 10 kHz)、33本の受波器(周波数帯域：1 Hz - 170 kHz)により構成されており、全93本の送受波器を円形に外側から交互に配列している。送信部は、同心円状に並んでいるプローブを1チャンネルとして、全部で4チャンネル設けている。プローブ固定ジグの外形は240 mm で、プローブは外形200 mm の円内に固定し、曲率半径1500 mm とした。また、チャンネルごとに音波の送波タイミングを制御することが可能で、位相をずらすことにより1.0 m ～3.0 m までフォーカス距離を可変することができる。音波をフォーカスさせることにより、音波の強度を強めるとともに、方位分解能も向上する。岸壁との距離に応じてフォーカス距離を可変することで、内部診断可能な距離・方位分解能を高品質に保つことが可能となる。

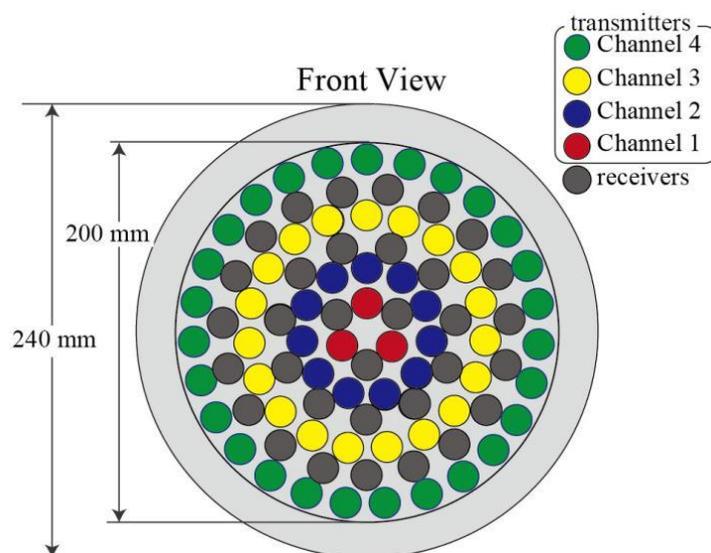


Fig4-25 開発した集束型パラメトリックプローブ

## 4.7.2 音響特性試験

## (a) 測定方法

新規開発したフォーカス音響パラメトリックプローブの送波試験を研究室保有の実験水槽(縦 3500 mm × 横 1800 mm × 深さ 700 mm)で行った。3つの送信波形(以下、Summing 1、Summing 2、LFM)を用いて、どの波形がターゲットをより良く透過するかを試験した。送波に用いた波形と式を Fig.4-26 に示す。

次に、試験に用いた実験系を Fig. 4-27 に示す。フォーカス音響パラメトリックプローブと駆動用の制御装置を用いて、1次波  $100 \pm (2 \text{ 次波周波数} / 2) \text{ kHz}$  を発生させ、パワーアンプで増幅後にフォーカス音響パラメトリックプローブの各チャンネルで同様の音波をターゲットに照射する。生成する2次波は、5 kHz ~ 15 kHz まで 1 kHz ごとに変化させた。ターゲットからの透過波をターゲット後方 0.1 m 位置に配置したマイクロホン(TC-4013、Reson、USA)で受信し制御装置を用いてサンプリングレート 250 kpsps でサンプリングした。ターゲットには、コンクリート板 (縦 250 mm × 横 250 mm × 厚み 70 mm) を用いた。ターゲットとフォーカス音響パラメトリックプローブの距離は 2.0 m とし、フォーカス点はターゲットの表面に設定した。ターゲットの中心とマイクロホンの高さは、フォーカス音響パラメトリックプローブの中心位置と同じ高さに設置した。

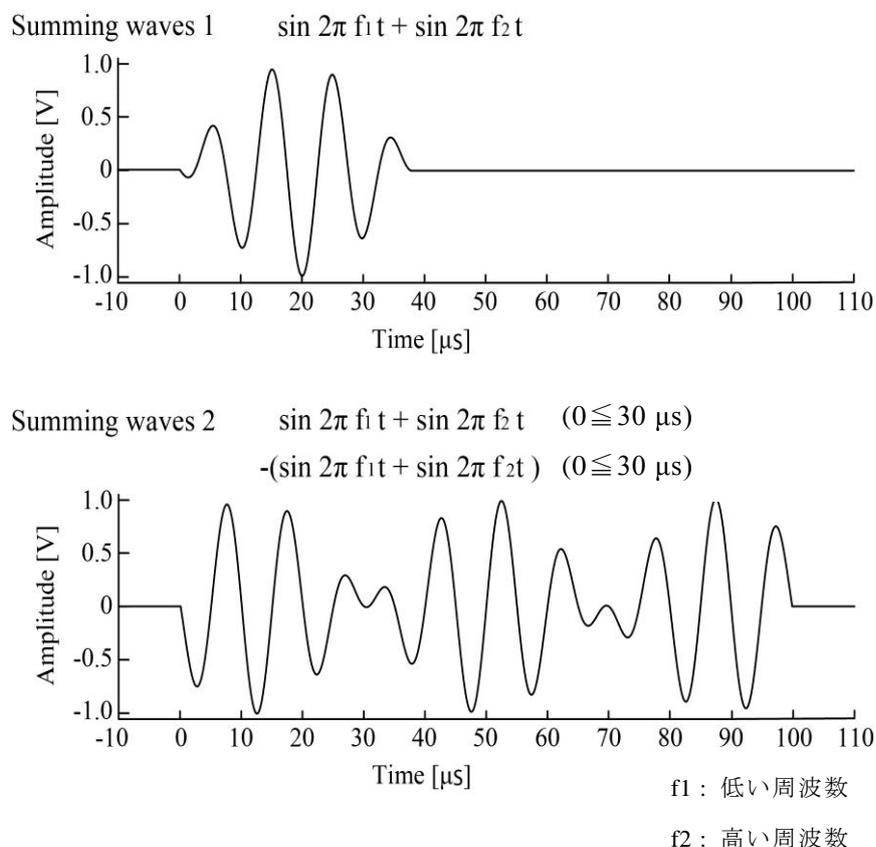


Fig4-26① 15kHz の各送信波形

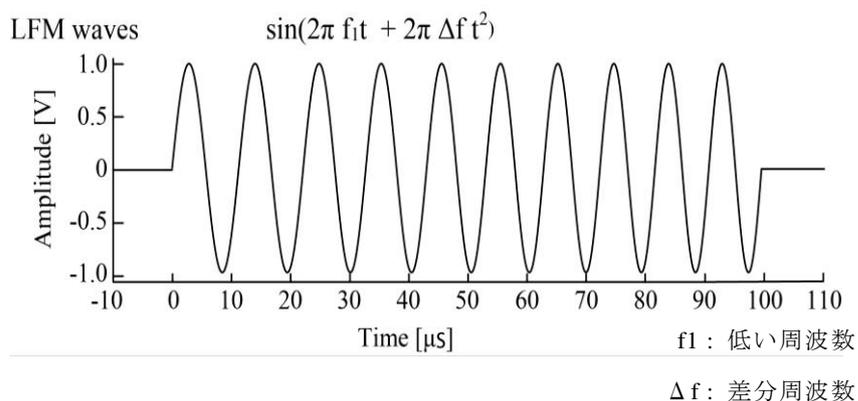


Fig4-26② 15kHz の各送信波形

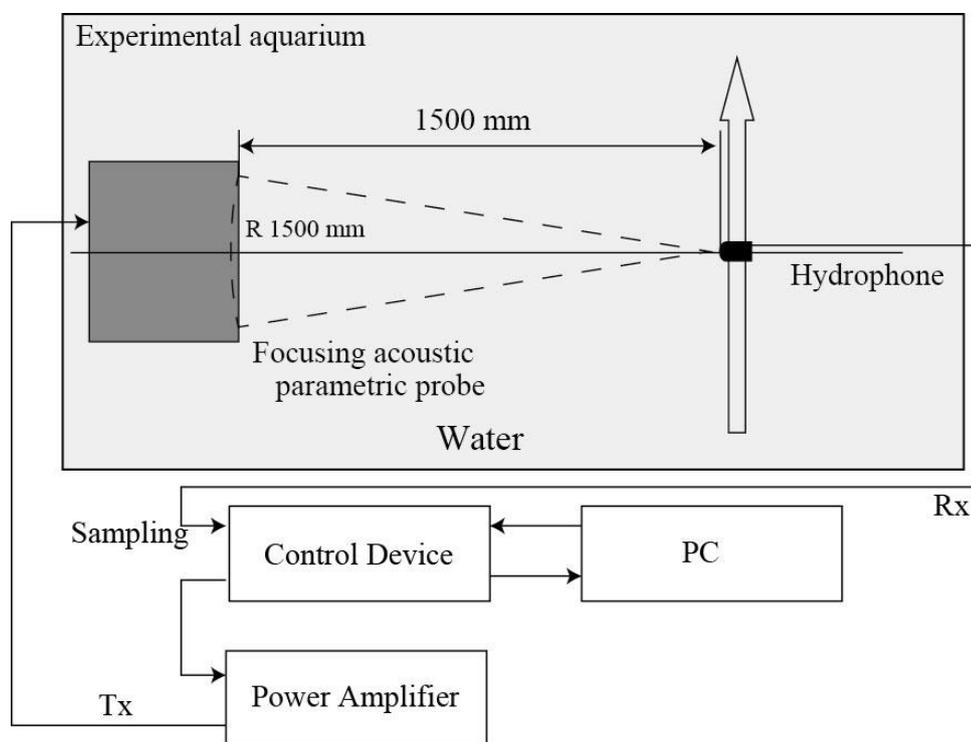


Fig4-27 送信波形試験の配置図

(b) 結果

測定した各送信波形のターゲット透過波形を Fig4-28 に示す。Fig4-28 は、2 次波 13 kHz の透過波と透過波に 10 kHz ~ 16 kHz のバンドパスフィルター(BPF) をかけた波形である。縦軸が振幅(mV)、横軸が送信してから時間(ms) を示している。最も良くターゲットを透過した波形は、LFM 波形である。Summing 1 波形と比較して最大振幅地点で 3.2 倍、Summing 2 とは 1.3 倍強く透過していた。また、Summing 1 波形と Summing 2 波形とでは、最大振幅地点で 2.3 倍違っていた。よって本研究では、LFM 波形を用いることとした。

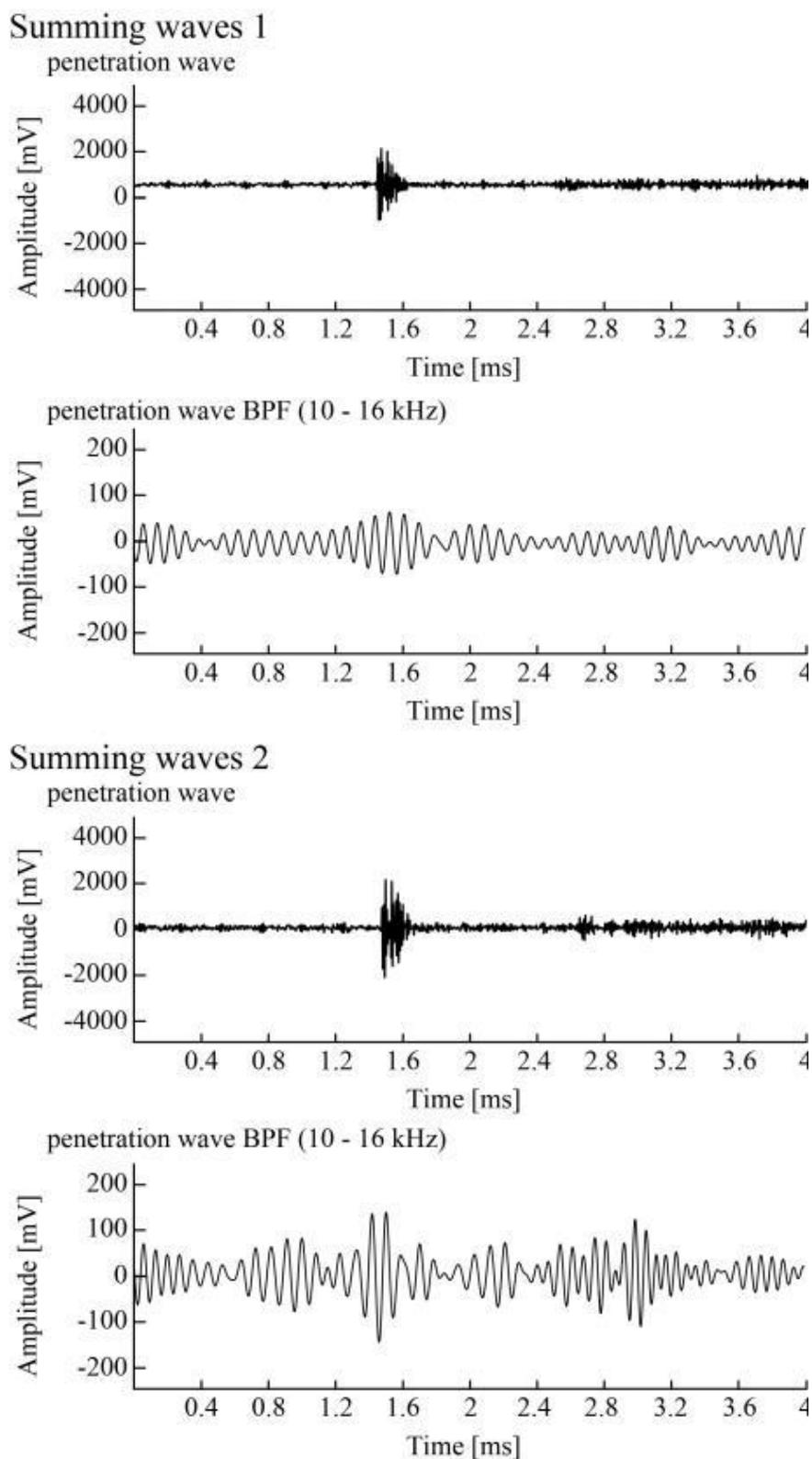


Fig4-28① ターゲットの透過波とバンドパスフィルターを使用した透過波

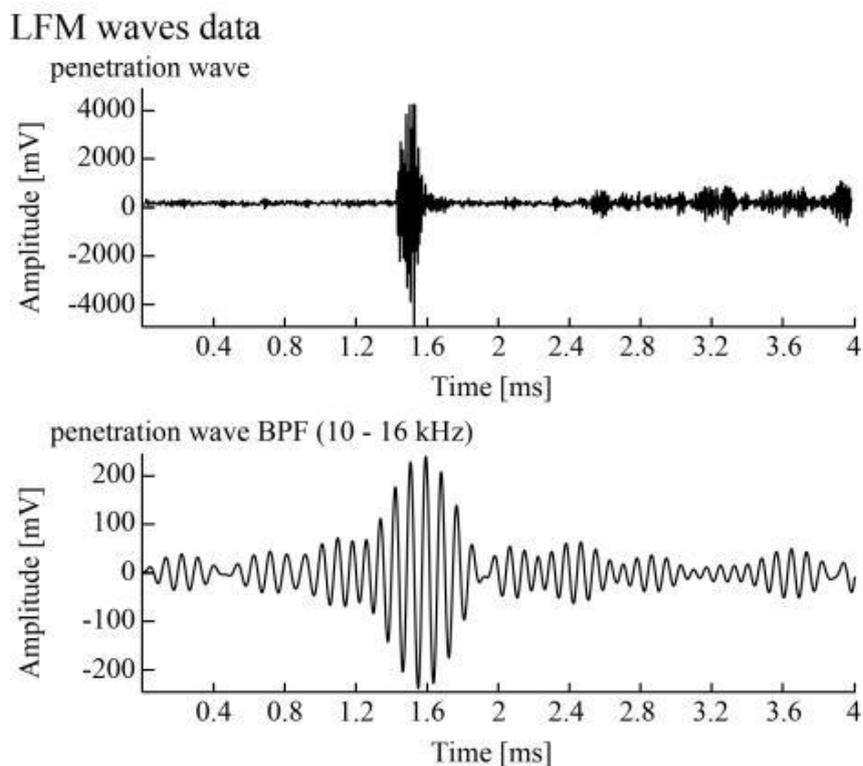


Fig4-28② ターゲットの透過波とバンドパスフィルターを使用した透過波

### 4.7.3 透過波試験

次に、LFM 波形を用いて透過波の音響特性試験を行った。実験系は、送波試験と同様にし、ターゲットのみをフォーカス音響パラメトリックプローブと直交に移動させながら波形を取得した。送波は 2 次波 5 kHz、8 kHz、10 kHz、12 kHz、15 kHz で送波レートは 1 Hz として、ターゲットを 15 ping 毎に 1 cm 移動させた。測定の開始位置と終了位置は、受波側にターゲットの影響がない位置とした。測定方法を Fig4-29 に示す。

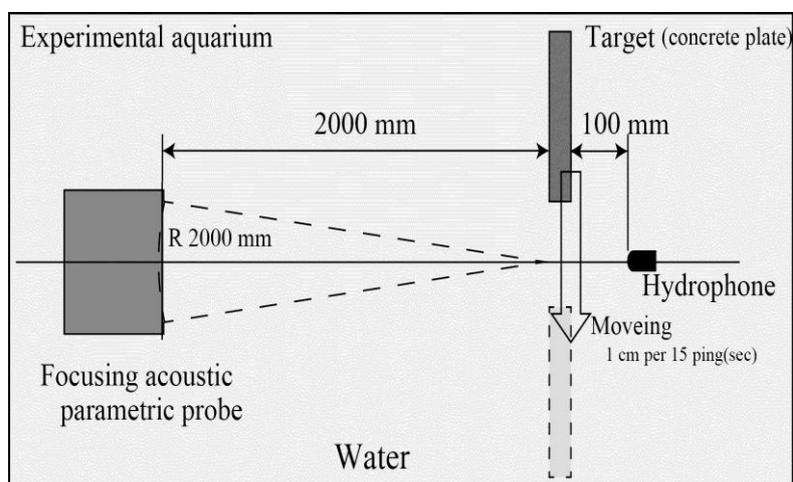


Fig4-29 透過波試験配置図

2次波10 kHzの測定結果をFig4-30に示す。灰線が、水中のみを伝搬した受信波形で、黒線が水中とコンクリートを透過した受信波形を示している。点線枠で切り出した拡大図を見ると、受信波形の到達時間が4分の1波長分程度早くなっている。このため、黒線はコンクリート内を透過してきた波形であることがわかる。透過波の振幅最大値を水中のみを伝搬した波形と比較すると、水中のみを伝搬した波形が1023 mV、透過波が332 mV であり、3分の1程に減衰している。

Fig4-31 に2次波 5 kHz、8 kHz、12 kHz、15 kHz のコンクリート透過波を示す。5 kHz ~ 15 kHz までの透過波試験で使用した周波数すべてでコンクリートを透過しコンクリート背面まで届くことがわかった。各周波数の最大振幅を比較すると5 kHz が200 mV と最も透過しにくく、8 kHz が2倍近い400 mV を示し、最も透過することがわかった。

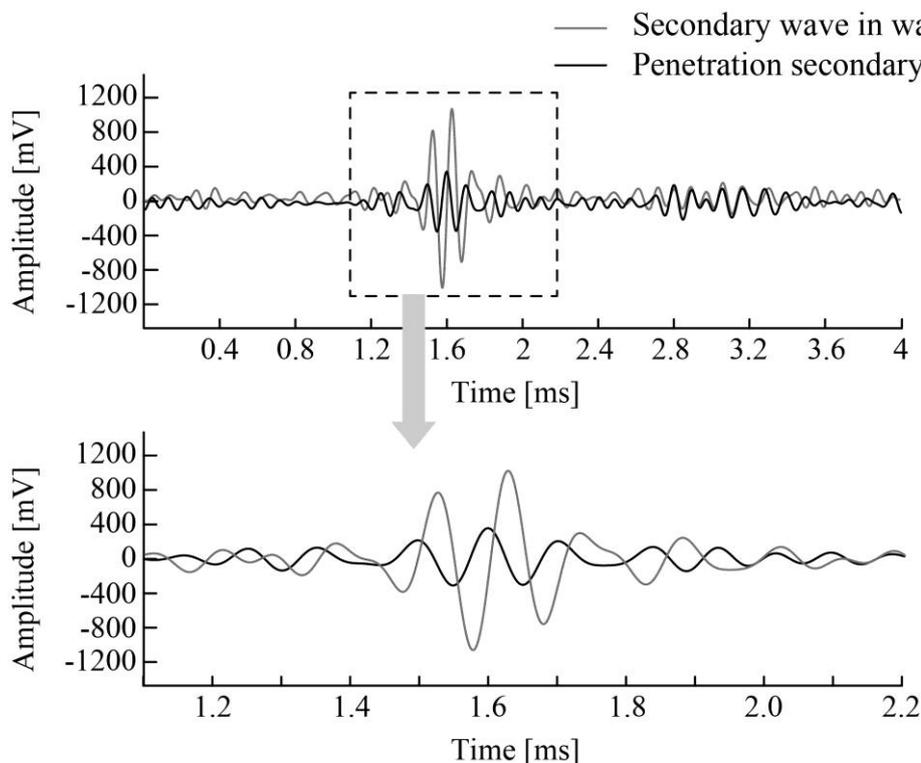


Fig4-30 透過波試験配置図

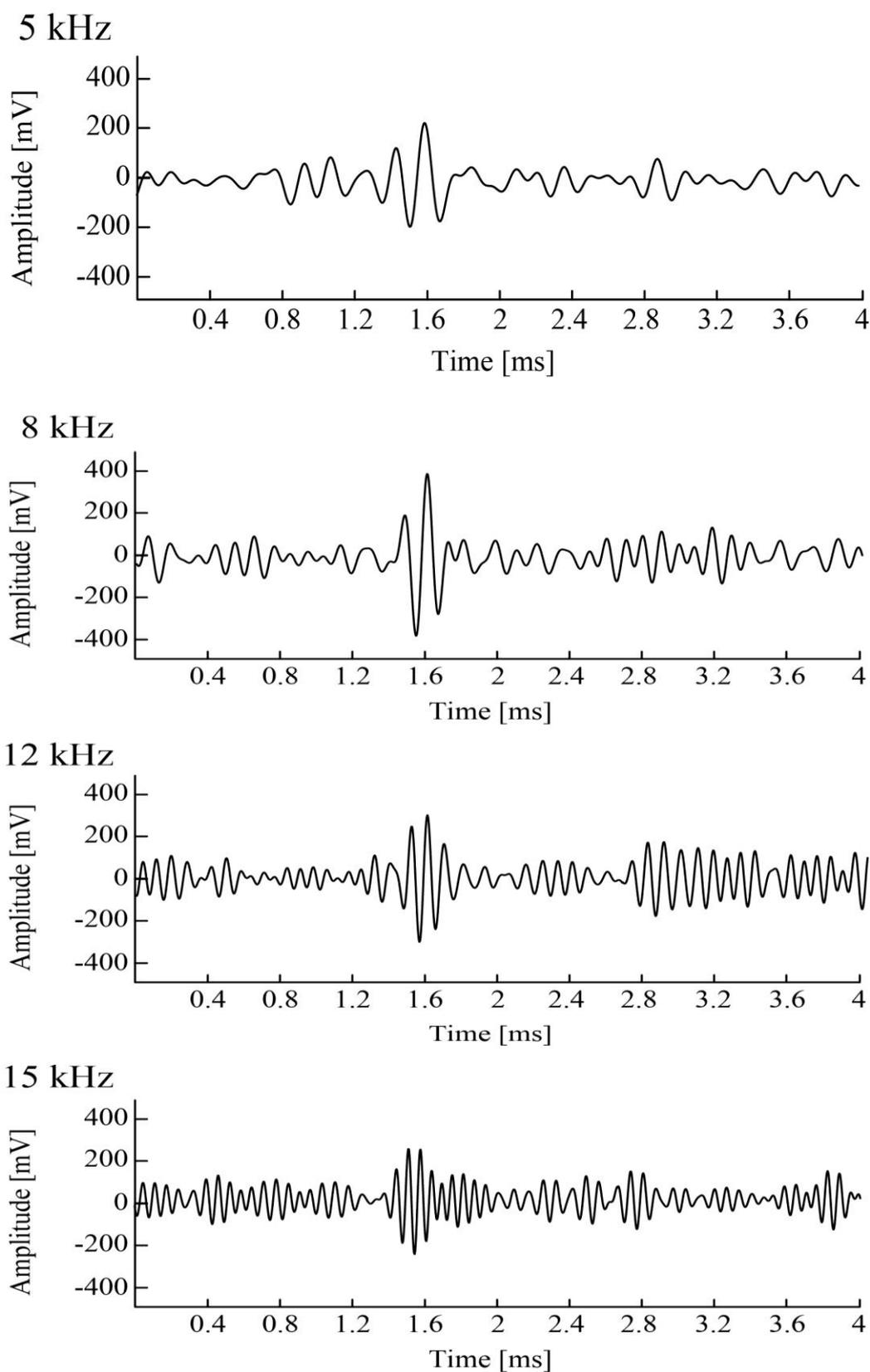


Fig4-31 透過波試験配置図

## 4.8 新型集束型パラメトリックソナーの開発

前節では集束型パラメトリックソナーを開発し指向性試験、音響特性試験、透過波試験を行った。しかし、開発したパラメトリックソナーでは送信音圧が足りず2次波が良く生成されないことが分かった。原因として、素子間のインピーダンスの違いにより設計音圧が確保されていないことだと考えられた。そこで今度は、コンポジット製法による素子一体型の新型パラメトリックソナーの開発を行い、内部空洞段差手法の開発を目指す。

### 4.8.1 集束型パラメトリックソナーの開発設計

パラメトリックソナーの開発に際して検討したのは以下の5点とした。

- RVS を 90~110kHz において最少とするため、受波器はリング状とした。
- 5 種類のサブスケールサンプルを作成し、試験結果を元に送信・受信性能の最も高い設計を検討した。
- 高周波において RVS を抑える目的で、素子の前面に吸音材を配置した。
- 送信素子はスタック型とした事により、TVR は 6dB 増加した。
- ハウジング内にトランスを配置し、各送信リングの必要最大電圧を抑えた。

検討に使用した5種のサブスケールサンプルを Fig4-31 に示す。



Fig4-31 サブスケールサンプル写真

作成したサブスケールサンプルを基に最大送信出力および最適なコネクタ、ケーブル、ハウジングの決定を行った。以下に最大送信出力とコネクタ等の仕様を示す (Table 4-1、Table 4-2)。

Table 4-1 最大送信出力

Ring	SL	V	VA	Power(w)
10	221	889	1051	780
8	219	879	826	613
6	216	851	566	420
4	212	846	355	264
2	205	869	163	121
ALL	230	865	2883	2141

Table 4-2 コネクタ仕様

	Housing Connector	Dummy Connector	Cable	
			Connector	Length
Rx	MCBH-12-FS	MCDC-12-MP	MCIL-12-MP	10m
Tx	MCBH-10-MP	MCDC-10-FS	MCIL-10-FS	10m

サブスケールサンプルを用いて5種類の空中及び水中でのインピーダンス計測を行った。また計測した最大送信出力および5種類のインピーダンス計測結果を用いて1次波(100 kHz)が最大音圧となる焦点距離の決定を行った。以下にインピーダンス計測の試験結果(Table 4-3)及び各焦点距離の最大音圧の結果 (Fig4-32)を示す。

Table 4-3 各チャンネルについての空中及び水中でのインピーダンス

送信 Ch	インピーダンス (空中)	インピーダンス (水中)
	(ohms)	(ohms)
2	348	218
4	1763	276
6	2405	376
8	3779	591
10	8817	1380

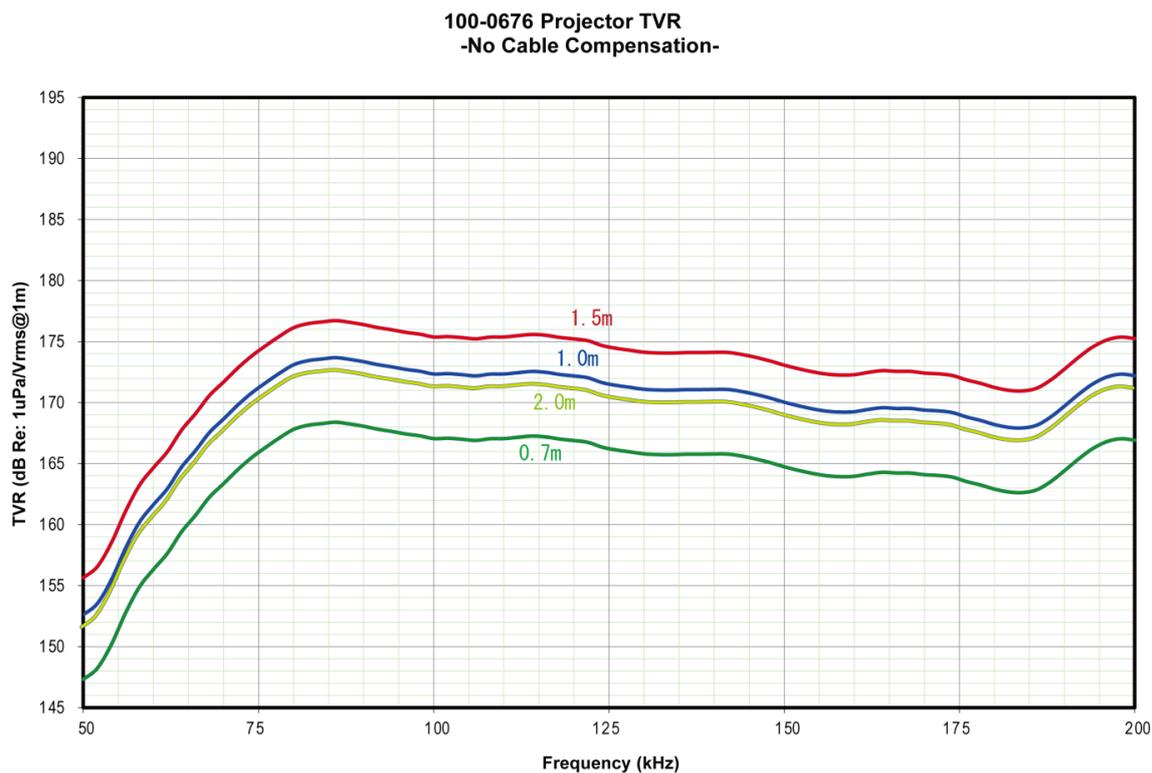


Fig4-32 焦点距離と送信感度特性

Fig4-35 各焦点距離の最大音圧を示す。焦点距離 1.5m で TVR 175 dB Re:1  $\mu$  Pa/Vrms@1m となり最大となるように設計した。

#### 4.8.2 集束型パラメトリックソナー

開発した集束型パラメトリックソナーの設計図を Fig4-33 に示す。集束型パラメトリックソナーは、コンポジット製法で作成した送受一体型のトランスデューサとした。トランスデューサの形状は、同心円状に配置された 10 個(受信 5ch、送信 5ch)のリング状チャンネルを持つサーキュラーアレイとした。送信 1 次周波数は音響プローブと同様とし、受信周波数帯を 5~20 kHz とした。焦点距離は、1.5 m としチャンネルごとに送波タイミングを制御することで  $\pm 0.5$  m 可変する事が出来る。アレイ音源レベルは、フォーカシング時で 228dB となるようにした。

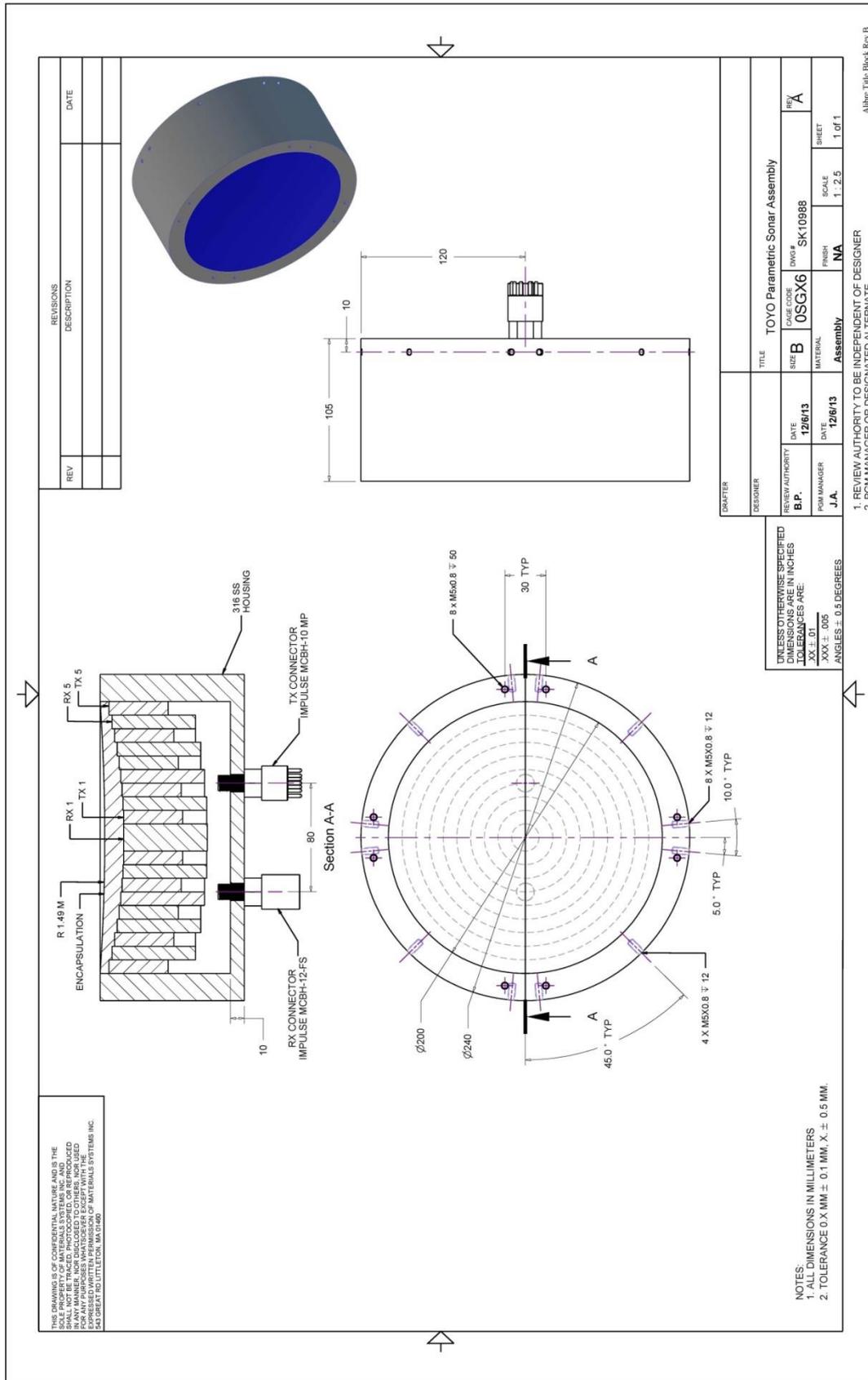


Fig4-33 集束型パラメトリックソーナーの設計図

### 4.8.3 集束型パラメトリックソナー試験

新しく開発した集束パラメトリックソナーを用いて、鋼矢板をターゲットとしたターゲット奥からの反射波・ターゲットの透過波測定を研究室保有の実験水槽で行った。

#### 4.8.3.1 試験方法

集束パラメトリックソナー、鋼矢板(JFESP-2W、有効幅 600mm、有効高さ 130mm、厚み 10.3mm)、反射板(スタイロフォーム、厚さ 15mm)の使用)の配置を Fig4-34 に示す。水槽壁際から 0.5mの箇所に Fig4-34 のように鋼矢板を配置した。鋼矢板からパラメトリックソナーの焦点距離である 1.5m箇所にパラメトリックソナーを配置し、鋼矢板を挟んで逆側の壁際に反射板を設置した。反射板が壁際にある時と、壁から 4 cm鋼矢板に近づけた配置の 2 測定を行った。使用周波数は 10 kHz とした。

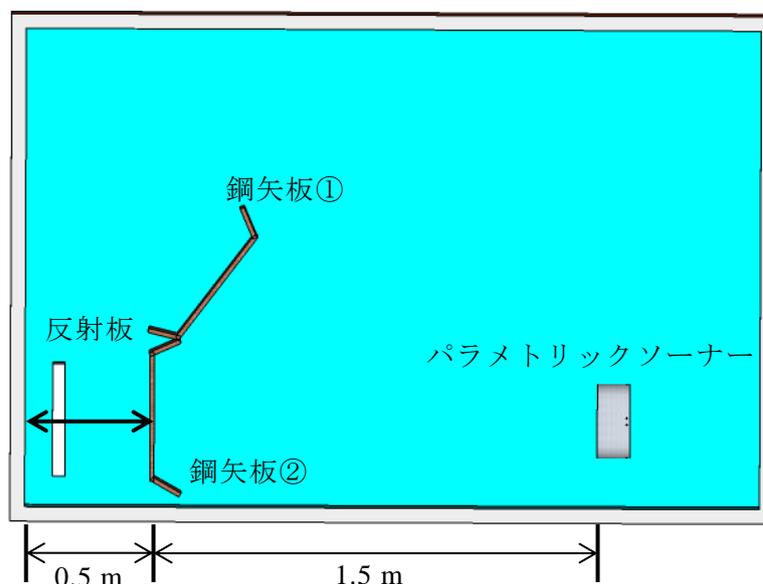


Fig4-34 集束型パラメトリックソナー試験

#### 4.8.3.1 測定結果

壁際に反射板を配置した時の反射波を Fig4-35 に、壁際から 4 cm離れた位置に反射板を配置した時の反射波を Fig4-36 に示す。Fig4-37 の 1.5 m 付近に現れる反射波は、2 枚配置したうちの手前に出ている鋼矢板から反射してきている反射波であることを確認した。次に 1.6m付近から返ってきている反射波は、パラメトリックソナーから 1.5mの位置に配置した鋼矢板の表面から反射してきた波形である。壁際に設置した反射板からの反射波は、2.1m付近に出現した。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で 0.1mずれていると考えられる。壁際から 4 cm離れた位置に反射板を配置した時の反射波 Fig4-36 では、2 枚の鋼矢板からの反射波は Fig4-35 と同様の位置に現れているが、反射板からの反射波は、Fig4-35 よりも 4 cm

手前の 2.0m 付近に現れている。Fig4-37 は、Fig4-35 と Fig4-36 を比較したもので、反射板からの反射位置の変化が見て取れる。Fig4-37 の赤線は反射板の位置が壁際で、緑線は 4 cm 手前に反射板を置いた時の反射波のグラフである。位置の変わっていない 2 枚の鋼矢板からの反射は重なっていることがわかる。このことから、1.5m から 1.9 m 付近までの反射波は 2 枚の鋼矢板からの反射波であることがわかる。また、2m 付近にある反射板からの反射はずれており、2.4m 付近にある反射波もずれていることがわかる。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ことがわかった。

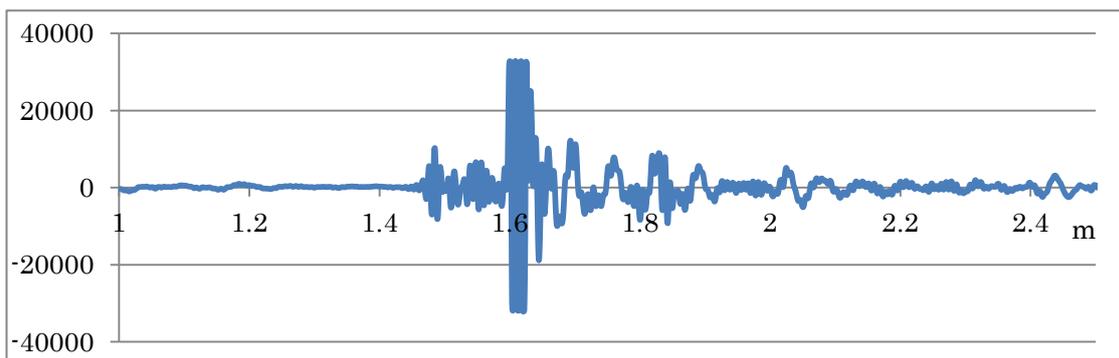


Fig4-35 壁際に反射板を配置した時の反射波

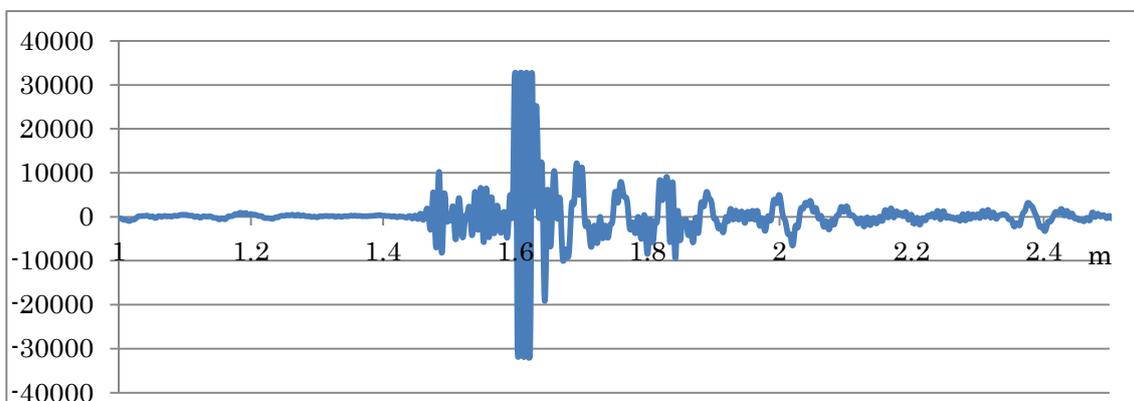


Fig4-36 壁際から 4 cm 離れた位置に反射板を配置した時の反射波

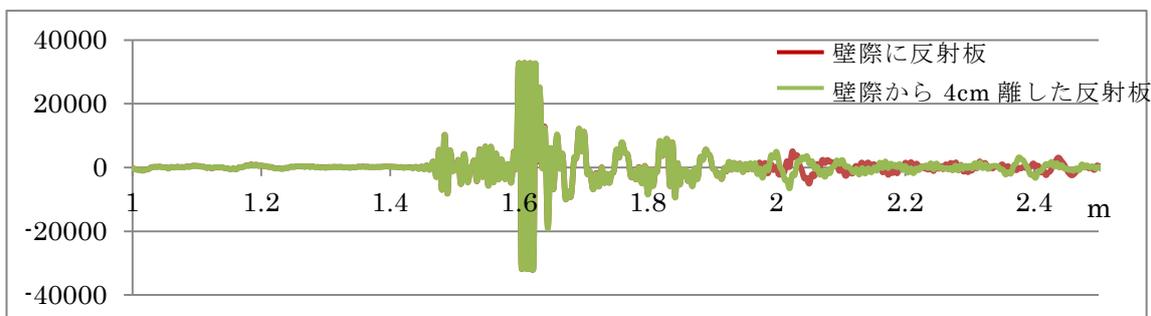


Fig4-37 2つの反射波の比較

反射板からの反射をハミング窓も用いて抽出しFFTによる周波数パワースペクトルを求めた。結果を Fig4-38 と Fig4-39 に示す。Fig4-38 は切り取った反射板からの反射波である。Fig4-39 は、Fig4-38 の波形の周波数パワースペクトルである。Fig4-39 から、Fig4-38 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。1次周波数である 100 kHz も乗っていることがわかる。

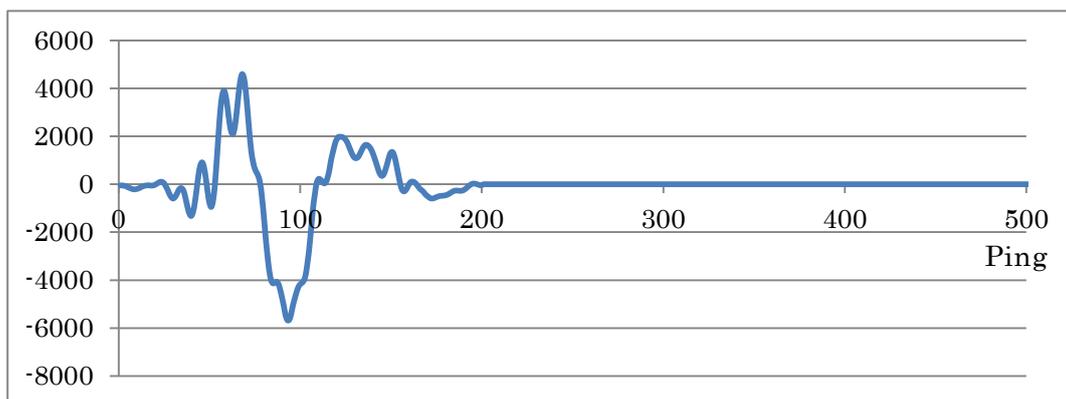


Fig4-38 壁際に反射板を配置した時の反射波

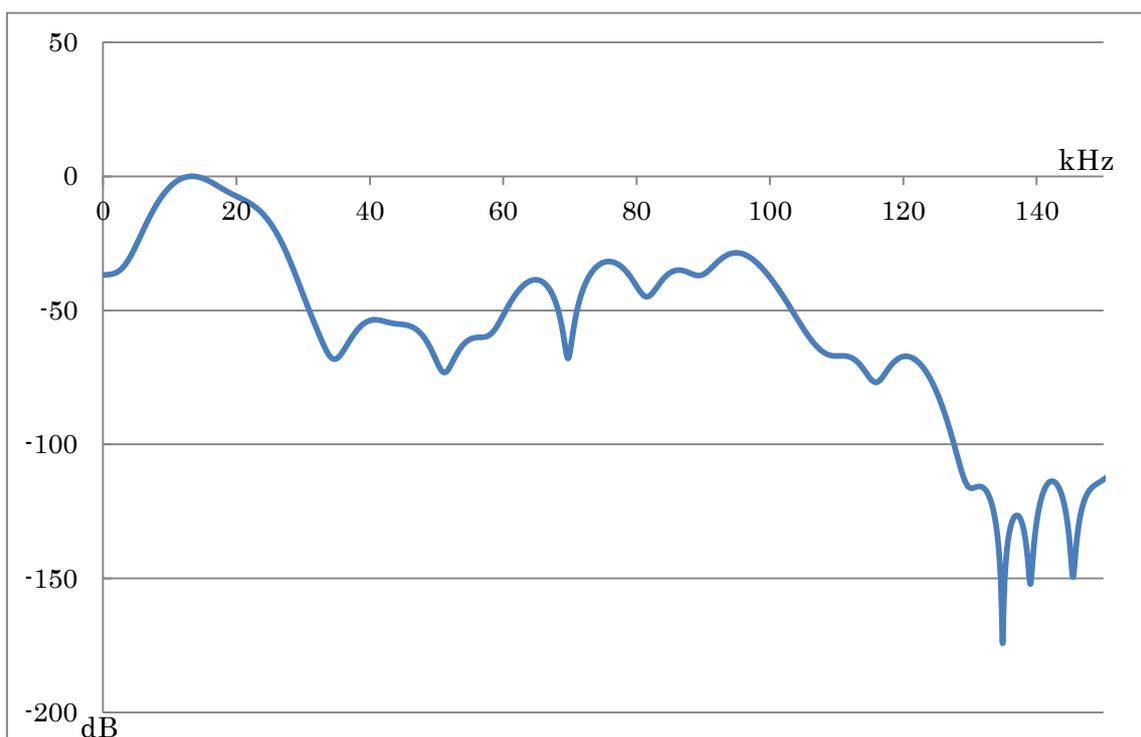


Fig4-39 壁際に反射板を配置した時の反射波の周波数スペクトル

以上の結果から、鋼矢板のさらに後ろにある反射板からの反射を捉えたと言える。これにより、新開発したパラメトリックソナーを用いて鋼矢板のさらに後ろにある物体を捉えることが出来ると言える。

#### 4.8.4 寒地水路試験 —鋼矢板透過試験—

4.7.3 で開発したパラメトリックソナーが鋼矢板の裏から返ってくる反射波を捉えられることがわかった。本試験では、共同研究先である寒地土木技術研究所が保有する実験水路にて実岸壁で実際に用いられている鋼矢板を使用し、鋼矢板裏からの反射を捉えられるか実験を行った。

##### 4.8.4.1 試験方法

集束パラメトリックソナー、鋼矢板、反射板（発泡板を使用）の配置を Fig4-40 に示す。実験水路は、幅 1.6m で全長 200m である。パラメトリックソナーの焦点距離である 1.5m の箇所に鋼矢板を配置した。鋼矢板は、JFESP-2W（有効幅 600mm、有効高さ 130mm、厚み 10.3mm）を使用した。鋼矢板の両脇を木板で水路壁と隙間のないように並べ、鋼矢板脇からの音波の回り込みを抑えた。水面からの回り込みは、Fig4-41 のように、鋼矢板と木板を水面に出すようにして抑えている。パラメトリックソナーから鋼矢板の裏側から 0.5m 後ろの 2.0m の位置に反射板を設置した。反射板は、スタイロフォーム(厚さ 15mm)を使用した。

測定方法は、測定開始から 10ping 後に反射板を鋼矢板側に徐所に移動させ、鋼矢板すぐ背面に付くまで移動させる。その後、背面に移動させた速度で始めの設置位置(2.0m)まで移動させ測定を行った。計測は、5 kHz、8 kHz、10 kHz の 3 周波数でおこなった。また、パラメトリックソナーから鋼矢板までの距離を 1.0m、パラメトリックソナーから反射板までの距離を 1.5m とし、上記同様の測定方法、使用周波数での計測も行った。

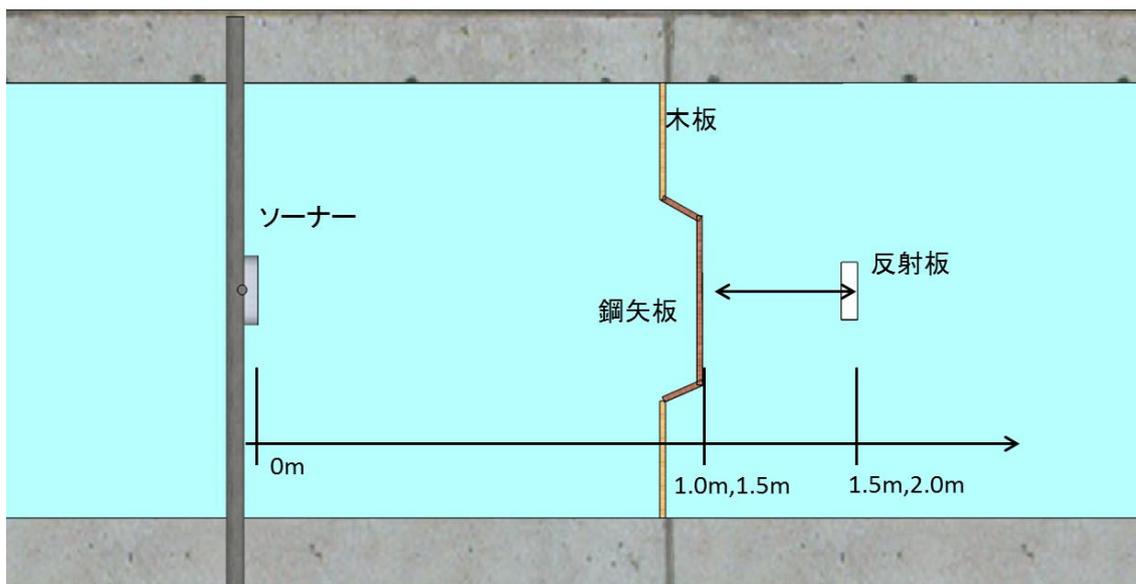


Fig4-40 水路試験配置図

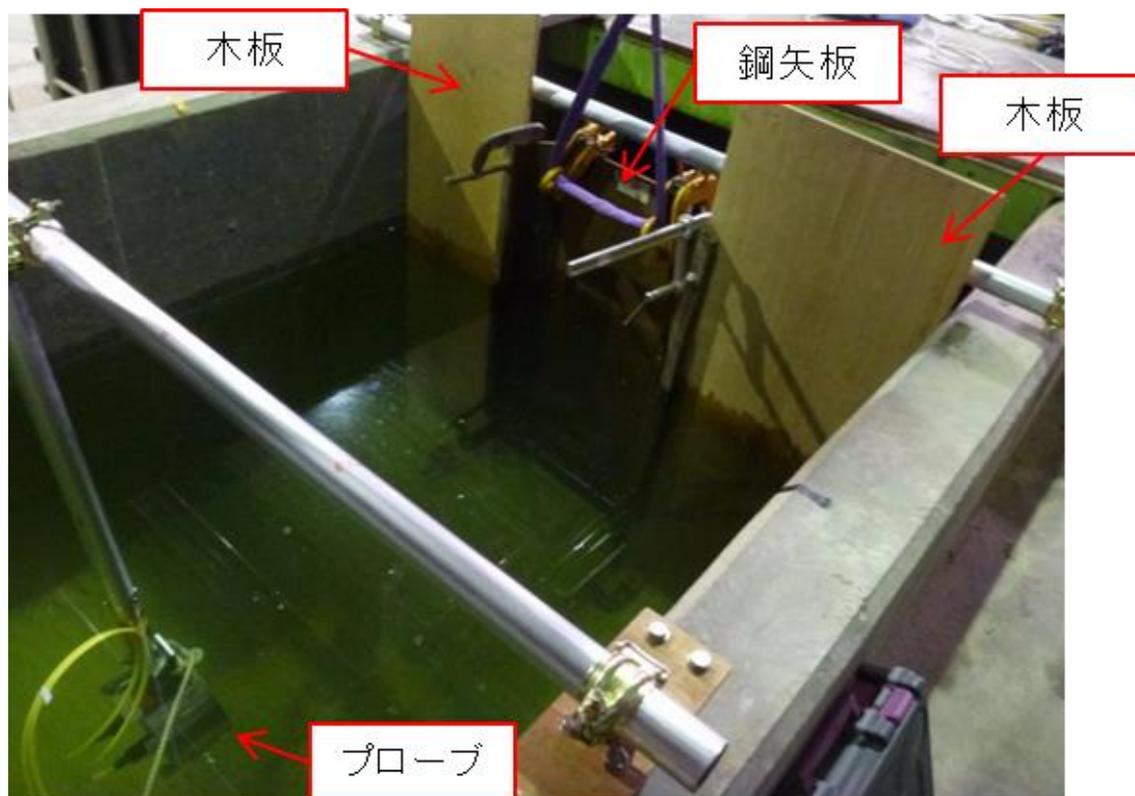


Fig4-41 水路上からの配置

#### 4.8.4.2 試験結果

本試験の結果を Fig4-42～Fig4-49 に示す。Fig4-42 は 1.0m の 10 kHz、Fig4-43 は 1.0m の 8 kHz、Fig4-44 は 1.0m の 5 kHz で、Fig4-45 は 1.5m の時の 10 kHz である。図の縦軸はパラメトリックソナーからの距離を示し、図中の赤、青、黒の順に振幅が小さくなる。Fig4-42～Fig4-44 では、パラメトリックソナーから 0.9m のところに鋼矢板の表面部分からの反射の振幅が一番大きく見て取れる。結果の図は、鋼矢板表面の振幅が最大となる点を利用して、パラメトリックソナーと鋼矢板の間に現れる振幅を鋼矢板からの反射振幅を走査することで削除している。また、パラメトリックソナーと鋼矢板の倍距離である 1.8m 付近に鋼矢板の多重反射が見て取れる。反射板からの反射は、Fig4-42～Fig4-44 全てで、図右側で 1.4m 付近に現れ、図の中心に行くにつれて 1.0m 付近まで移動しているのが見て取れる。図中心から、図左側に行くにつれて 1.4m 付近まで戻っているのが見て取れる。また、Fig4-49 は木板の後ろに反射板を設置し、鋼矢板試験時と同様に反射板を前後に動かした時の結果である。右木板と左木板の後ろから反射板からの反射が返ってきていないことがわかる。この結果から、木板を透過、または回り込んで反射してきていないことがわかる。Fig4-45～Fig4-44 と Fig4-45 の結果から、周波数 10 kHz、8 kHz、5 kHz とも鋼矢板を透過し、反射板の移動を捕らえられることがわかった。

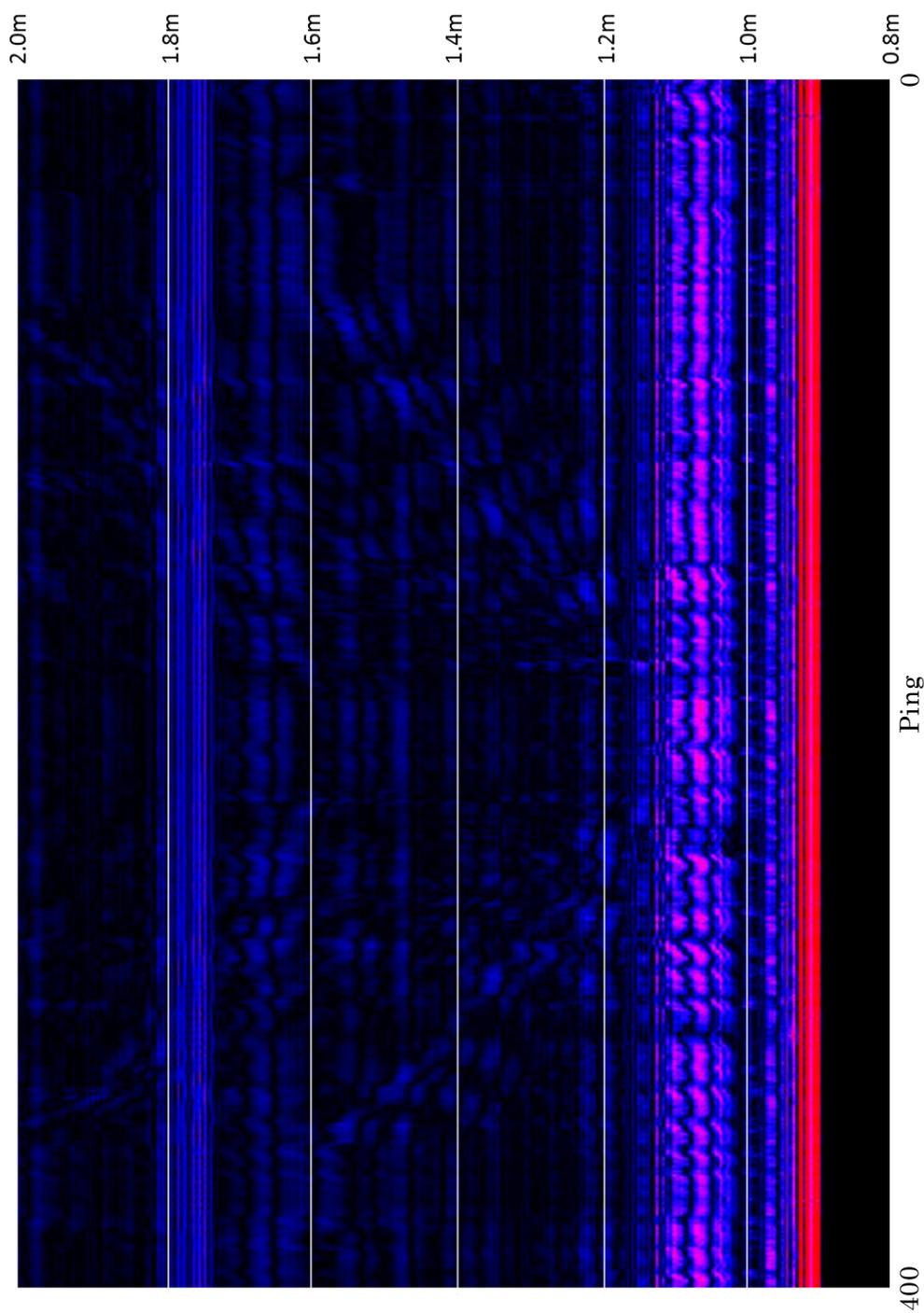
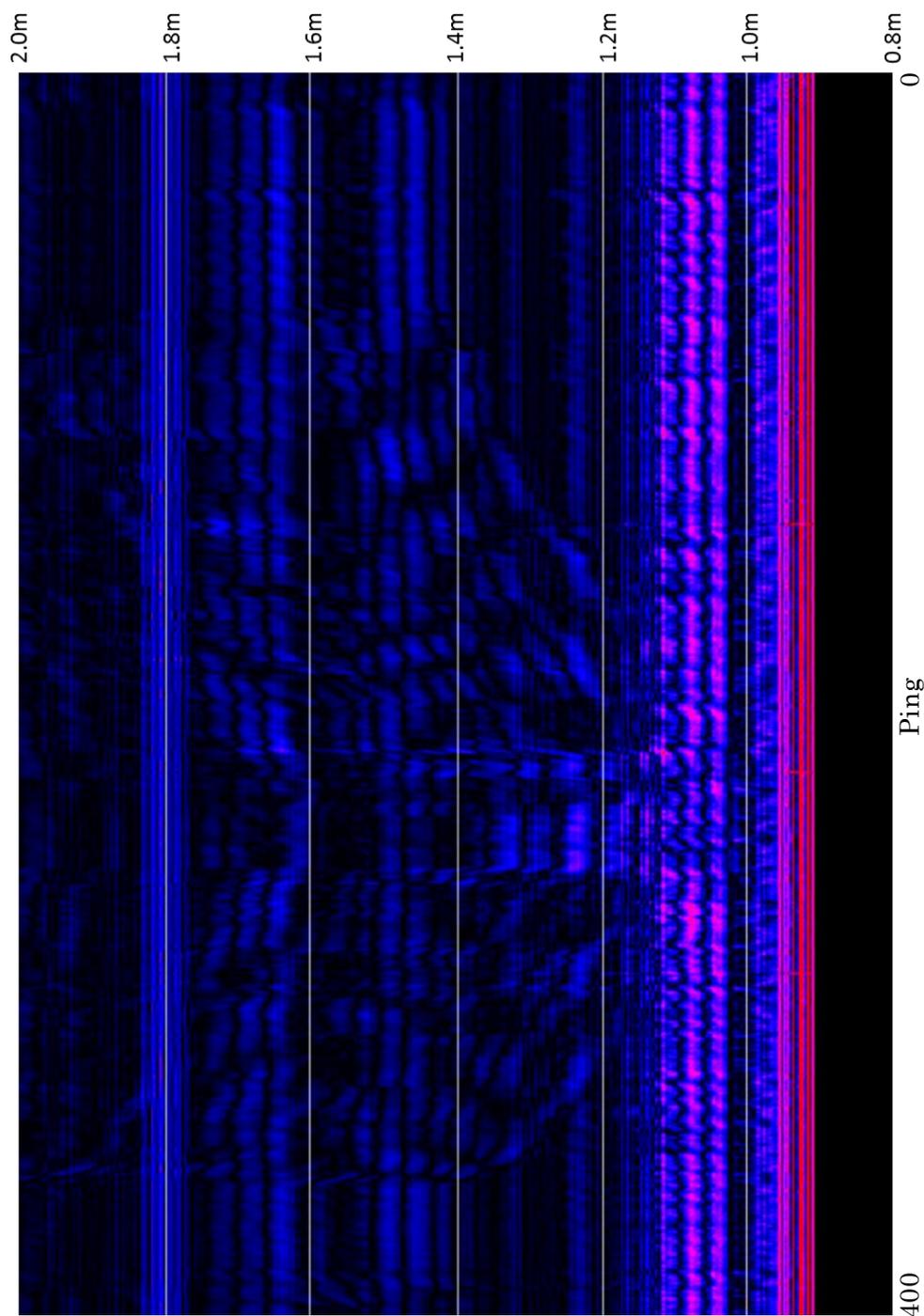


Fig4-42 1.0m 10 kHz の結果



Ping  
Fig4-43 1.0m 8 kHz の結果

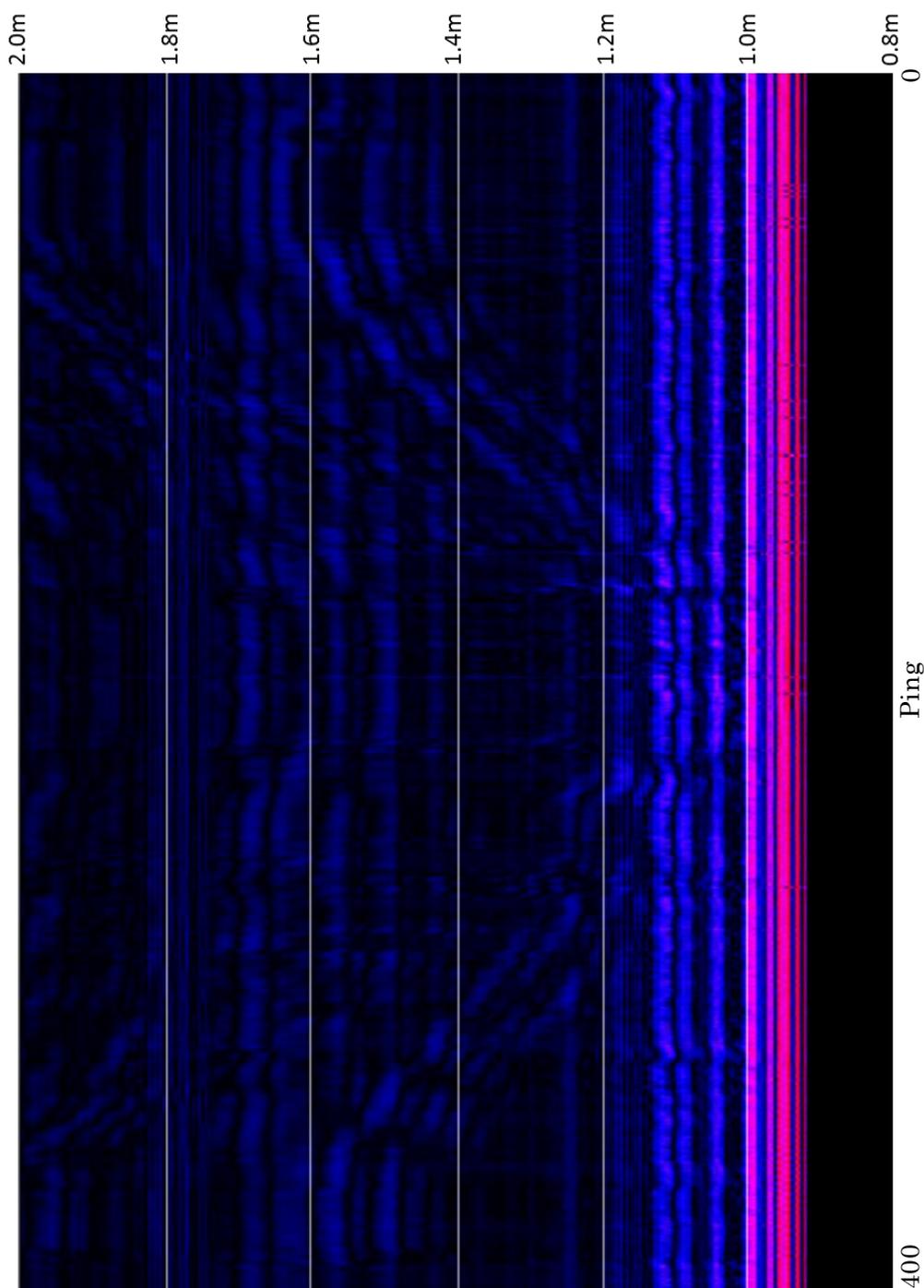


Fig4-44 1.0m 5 kHz の結果

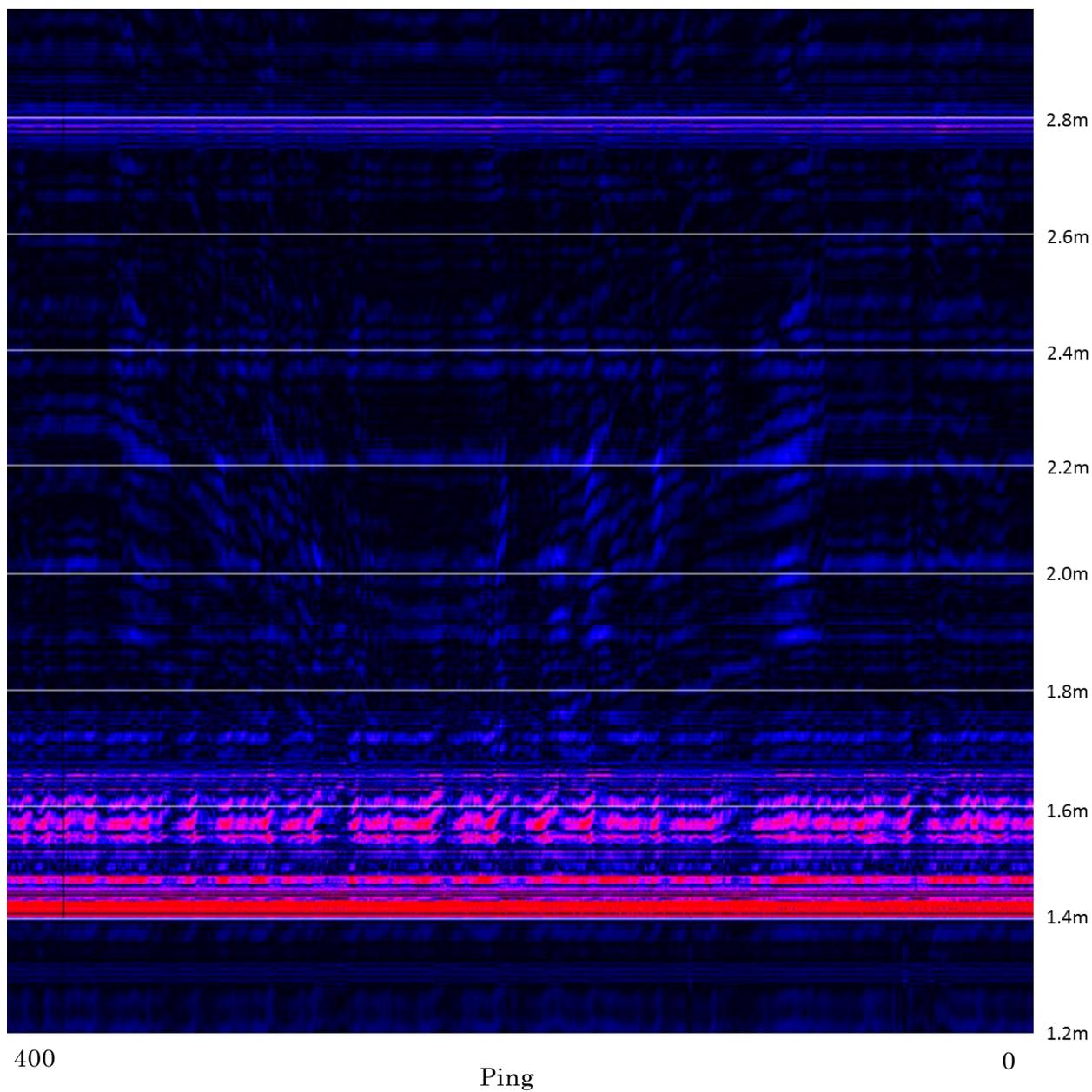


Fig4-45 1.5m 10 kHz の結果

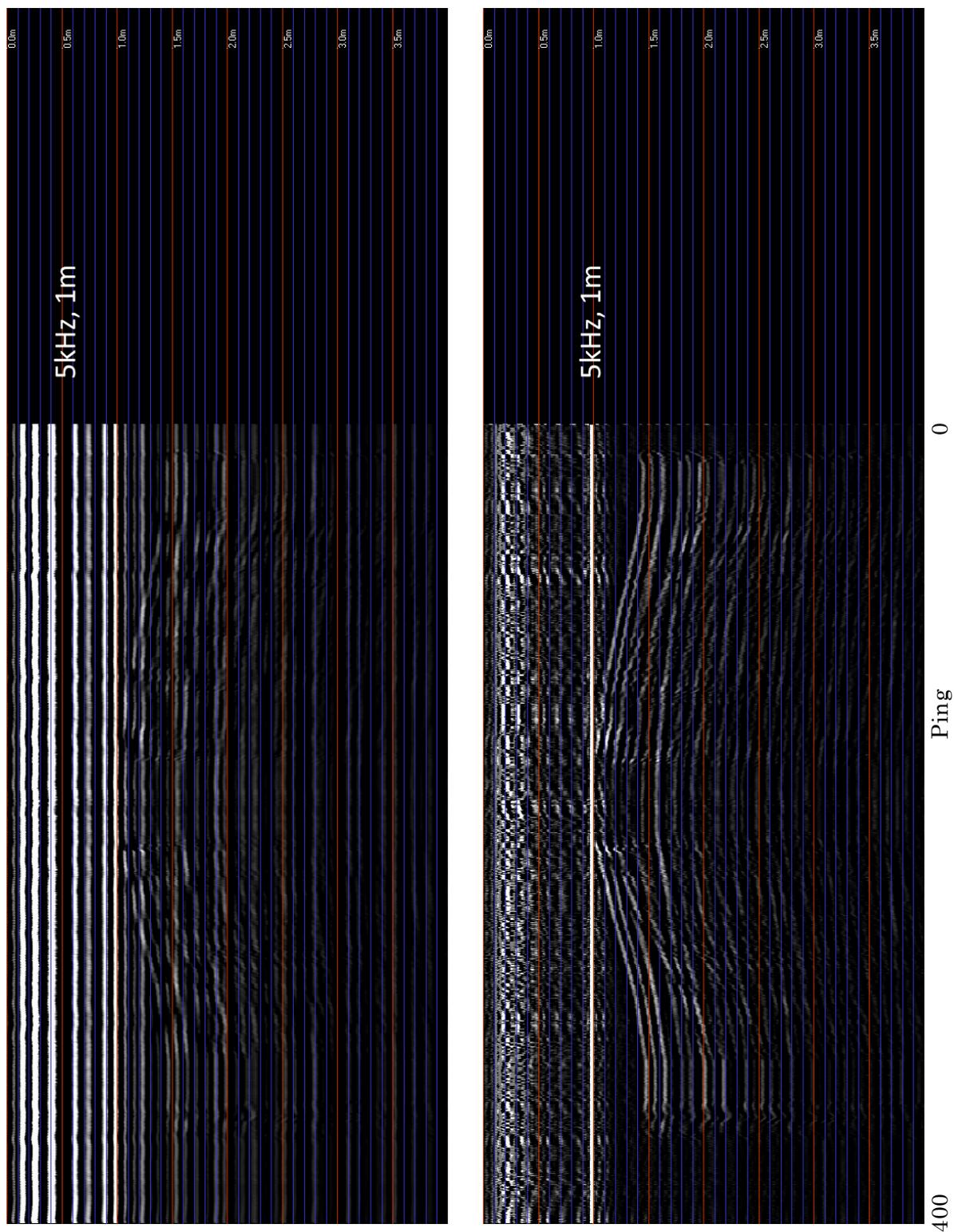


Fig4-46 1.0m 5 kHz のオリジナルと残響除去結果比較

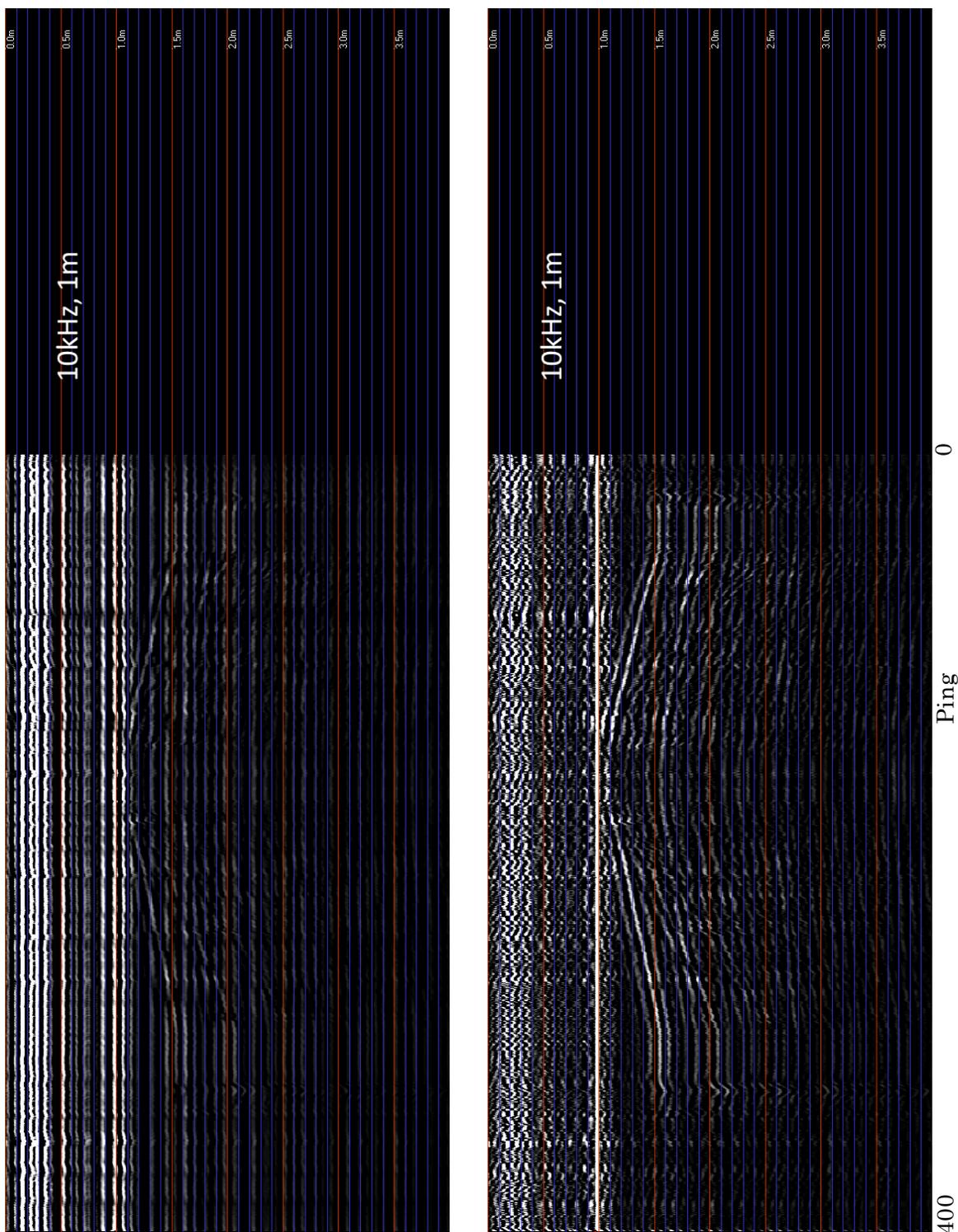


Fig4-47 1.0m 10 kHz のオリジナルと残響除去結果比較

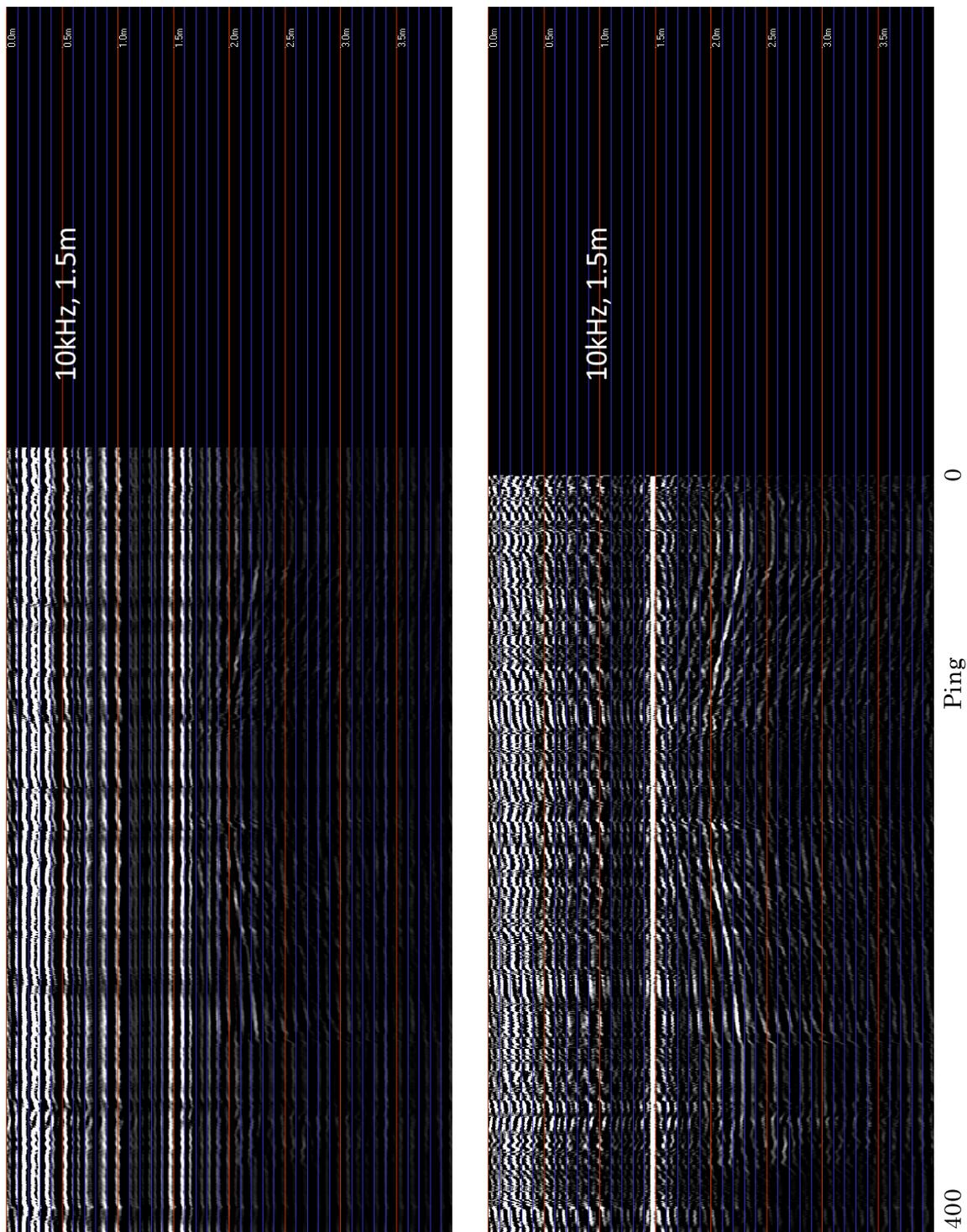


Fig4-48 1.5m 10 kHz のオリジナルと残響除去結果比較

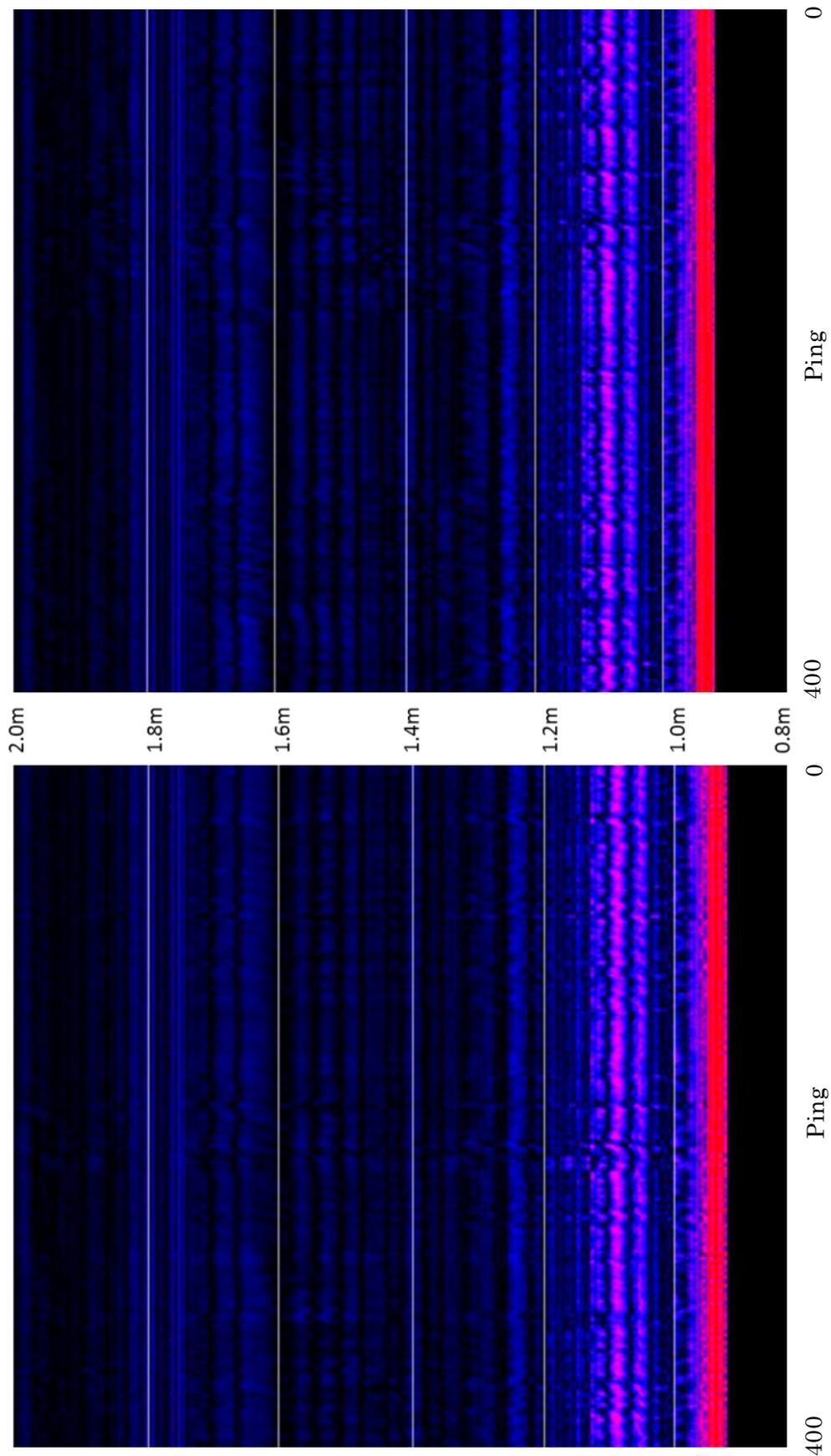


Fig4-49 1.0m 木板の結果

### 4.8.5 パラメトリックソナー現地試験

4.8.3、4.8.4 では、開発したパラメトリックソナーの基本性能を確認するため、本研究室所有の実験水槽、寒地土木研究所所有の水路で鋼矢板の奥から反射してくる反射波を捉えられるか室内実験を行った。室内実験では、鋼矢板の奥から反射してくる反射波を捉えることが出来、内部空洞探査への可能性を示した。本実験ではその有効性と実用性を検証するため、バックホウに艀装する手法で、実岸壁において内部空洞探査試験を行った。本項では、その実岸壁における内部空洞探査試験について説明する。

#### 4.8.5.1 試験場所

試験場所は、4.6 の集束型音響レンズを装着した SES2000 の実験を行った、北海道岩内港で試験を行った。試験場所を Fig4-50 に示す。4.3 で発見した腐食孔の開いている岸壁は試験日程時に修繕工事が行われていたため、壁続きの岸壁で行うこととした。

試験実施箇所は、Fig4-50 に示す中央ふ頭の海側半分の箇所の 20m ほどとした。中央ふ頭の真ん中にはケーソンが置かれており、ケーソンの左右で水深や岸壁仕様が別れている。今回試験する岸壁は、Fig4-51 に示すような鋼矢板の 7.5m 岸壁である。この箇所には、Fig4-50 の右下のような舗装が陥没している箇所がいくつかあり、鋼矢板岸壁内部に空洞が出来ている可能性がある。



Fig4-50 岩内港 試験実施位置図

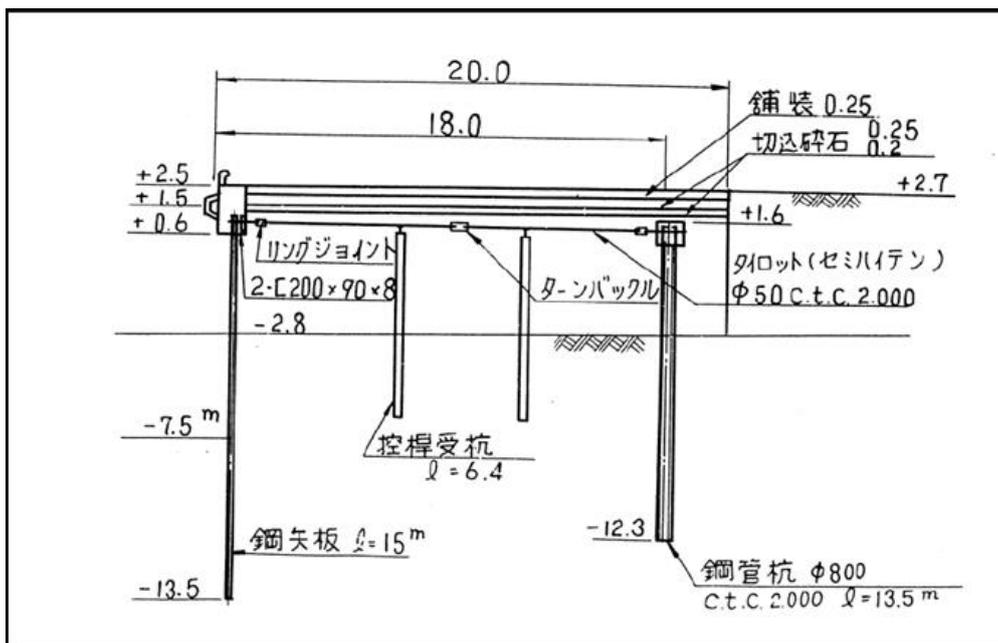


Fig4-51 計測箇所 標準断面図 中央ふ頭

## 4.8.5.2 計測機器

本試験で使用した計測機器一覧を Table 4-4 に示す。機材の構成は、4.5 の集束型音響レンズを装着した SES2000 の実験計測と表の 1 と 8 以外同じ構成である。

Table4-4 計測機器一覧

機器名称		内容
1	音響プローブ	超音波によるパラメトリック送信技術を利用したプローブであり、ソナーヘッドおよびパワーアンプ（幅約 400mm×高さ約 400mm×奥行き約 400mm）で構成される。
2	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。計測には統合型水路測量計測ソフトウェア（HYPACK）を使用している。
3	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。計測には統合型水路測量計測ソフトウェア（HYPACK）を使用している。
4	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。計測には統合型水路測量計測ソフトウェア（HYPACK）を使用している。
5	水中高度計（PSA-916D : Teledyne Benthos 社）	岸壁から①までの距離を計測し、計測した距離をバックホウのオペレータへ知らせるため機器であり、センサ部、電源・通信ケーブルで構成される。計測には専用ソフトを使用している。
6	傾斜計（NS-30/DMG-U : Measurement Specialties 社）	バックホウのバケットの傾きをバックホウのオペレータに表示する機器で、センサ部、電源・通信ケーブルで構成される。計測には専用ソフトを使用している。
7	音速度計（SVPS : AML Oceanographic 社）	水中の音速を計測する機器で、センサ部と電源・通信ケーブルで構成される。
8	パンチルト装置（PT-25 : Remote Ocean Systems 社）	①の音響カメラの角度を変更させる装置で、パンチルト装置本体、電源・制御ケーブルで構成される。
9	計測機器取付金具	①～③、⑤～⑦を定位置に固定する。
10	計測機器昇降装置	バックホウのバケットに固定する本体部と、ラックが付いた角パイプ、電源・制御ボックス、電源・制御ケーブルで構成される。角パイプ下端に⑩を固定し、本体部のモータにより昇降させることで計測装置の水深を変化させる。
11	発動発電機（IEG2000M、IEG900M : (株)やまびこ）	計測機器の電源として使用する。
12	バックホウ（ホイール型、日立建機 ZW-125）	⑪の本体部をバックホウのバケットに固定し、岸壁と平行に走行することで連続的に計測を行う。
13	ノートパソコン	岸壁音響計測システムのデータを収録するパソコン

### 4.8.5.3 艀装方法

バックホウを使用した計測概念図を Fig4-52 に示す。本試験では、4.5 の集束型音響レンズを装着した SES2000 の実験計測と違い、Fig4-53 に示すように収納ボックスをバックホウ背面に配置し、昇降装置の制御ボックスや計測記録機器等を収納ボックス内に納めることにより、計測準備の簡易化と急な天候の変化に対応可能な艀装方法を試みた。

パラメトリックソーナーは、専用の冶具(Fig4-54)に取り付け、ソーナー昇降装置のラック付き角パイプの先端に取り付けた。ラック付き角パイプは、長さが 3m あり、バックホウのバケットを水面近くに降ろすことにより、水面下 2.5m 程まで降ろすことが出来る。昇降装置の昇降速度は毎秒 2cm である。

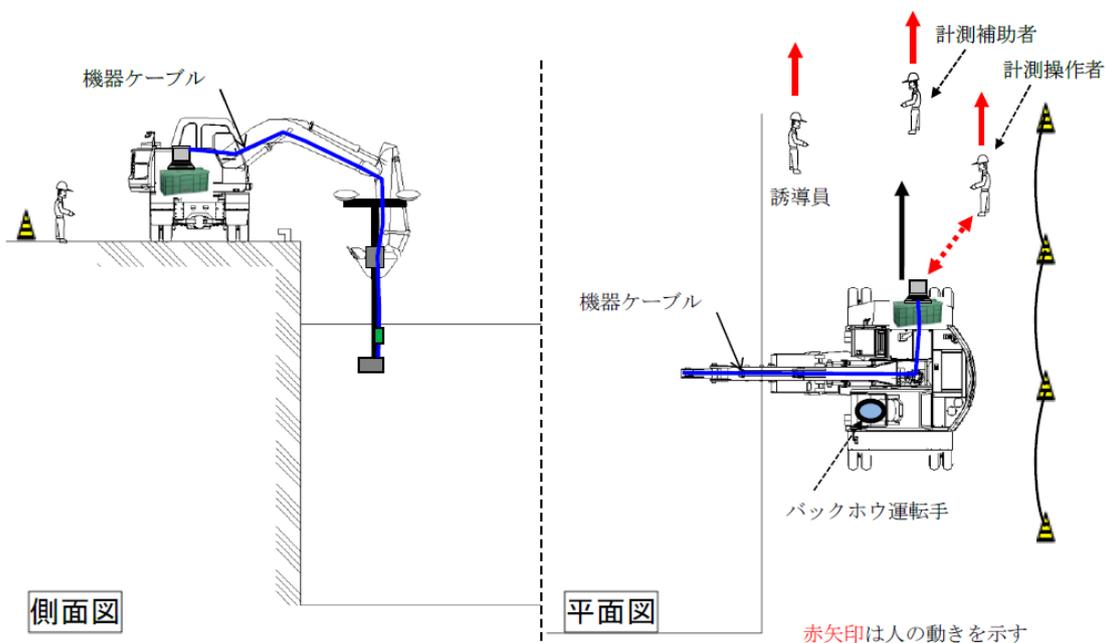


Fig4-52 艀装概念図 側面・平面

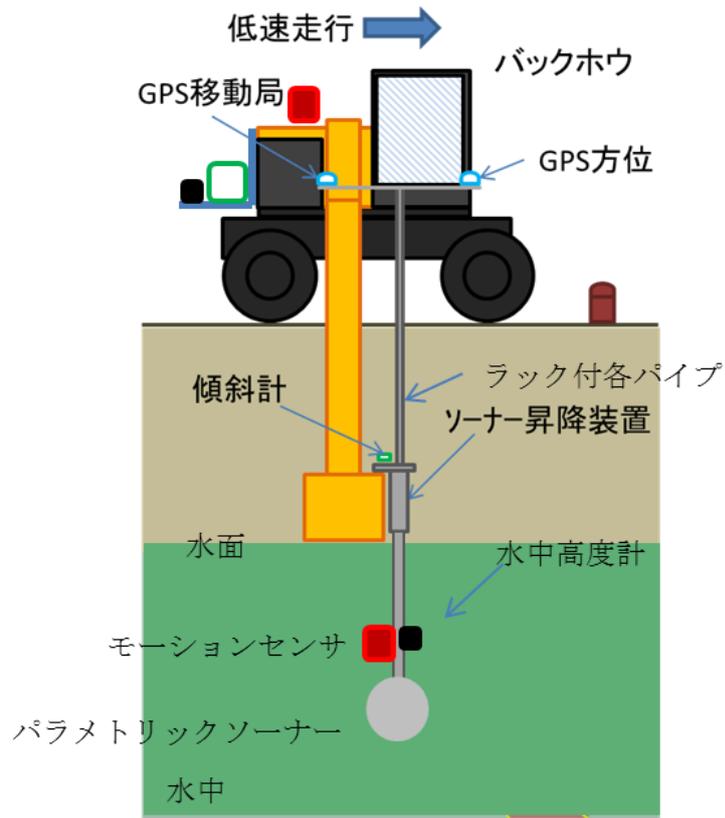


Fig4-53 機装概念図 正面



Fig4-54 パラメトリックソーナー専用治具

4.8.5.4 試験方法

試験方法を Fig4-55 に示す。4.5 の集束型音響レンズを装着した SES2000 の実験計測と同様にバケットを水面付近まで降ろしたあと、ソナー昇降装置でパラメトリックソナーが水面下 1.0m に潜るように下降させた。その後、低速走行で 20 m ほどの試験区間を往復走行し、岸壁内部の走査を行った。周波数を 10 kHz、8 kHz、5 kHz の 3 周波使用した。水面下 1.0m の走査終了後に水面下 1.0m 時と同様な試験方法で、水面下 2.0m も走査を行った。

その後、周波数 8 kHz、10 kHz を用いて、パラメトリックソナーのみを水面付近からソナー昇降機の限界まで上下させて計測を行った。

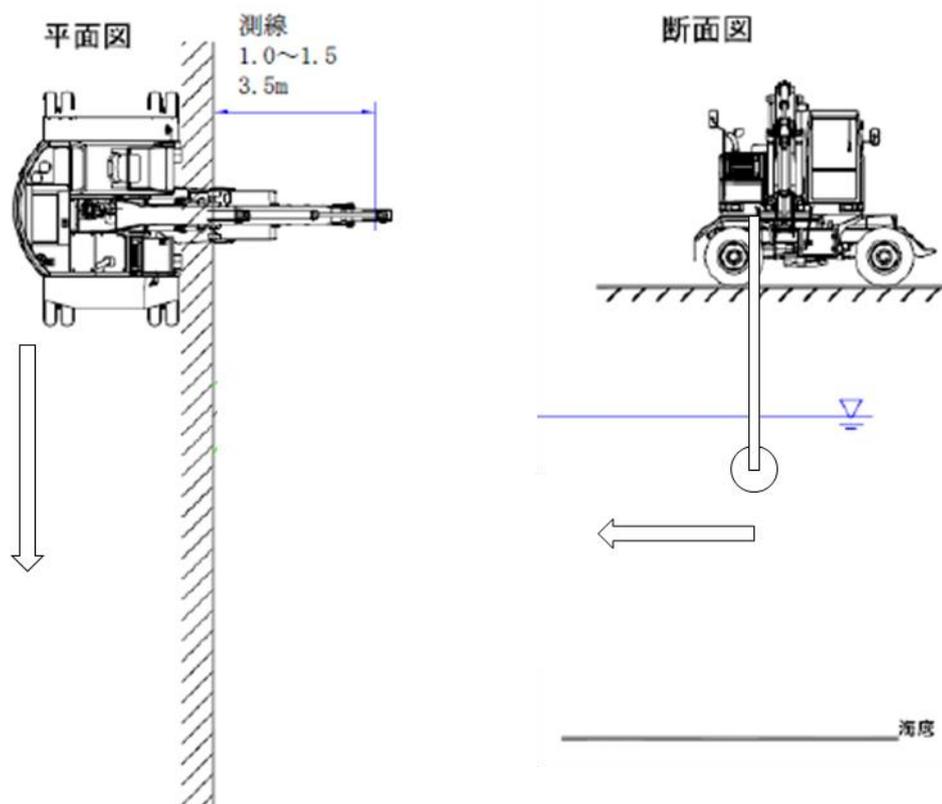


Fig4-55 岸壁内部空洞試験方法

## 4.8.5.5 試験結果

本試験の結果を Fig4-56～Fig4-64 に示す。Fig4-56 は 1.0m の 5 kHz、Fig4-57 は 1.0 m の 8 kHz、Fig4-58 は 1.0m の 10 kHz で、Fig4-92 は 2.0m の 5 kHz、Fig4-60 は 2.0m の 8 kHz、Fig4-61 は 1.0m の 10 kHz である。Fig4-62 と Fig4-63 はソナー昇降機の限界から水面付近まで上げた時の 8 kHz、10 kHz である。Fig4-56～Fig4-61 の縦軸はパラメトリックソナーからの距離を示し、横軸は移動方向の距離を示している。Fig4-62 と Fig4-63 の縦軸はパラメトリックソナーからの距離を示し、横軸は図右側がソナー昇降機を限界まで下げたところで、左側が水面付近になっている。図中の赤、青、黒の順に振幅が小さくなる。

Fig4-56～Fig4-58 では、パラメトリックソナーから 2.4m 付近に鋼矢板の表面部分からの反射の振幅が一番大きく見て取れる。2 重もしくは 3 重に見えるのは、鋼矢板が凹凸に交互に配置されているからで、2.3m 付近に出ている反射波はパラメトリックソナーから見て凸側の平たい部分からの反射でありであり、2.6m 付近に出ている反射波は凹側からの平たい部分反射であることがわかる。ちょうど 2.4m 付近に出ている凹凸部分に挟まれる反射波は、鋼矢板同士をつなぎ目の部分からの反射になる。鋼矢板の斜め部分は角度が鋭利なため直接反射してくる振幅は小さくなる。Fig4-56～Fig4-58 は、表面部分からの反射を見ると違いはなさそうだが、鋼矢板の裏側部分は 8 kHz が良く透過しているのがわかる。Fig4-56～Fig4-58 のいずれも、図左側の 4.0m 付近から一度反射が帰ってきているのが見て取れる。鋼矢板表面から 1.5m ほど離れており、鋼矢板を透過し、裏側から返ってきた反射だと思われる。また、Fig4-59～Fig4-61 では、鋼矢板の表面からの反射は Fig4-56～Fig4-58 とほぼ同じ結果であるに大して、水面から 1.0m では見えていた鋼矢板から 1.5m ほどの箇所にある反射がみられなくなった。

Fig4-62 と Fig4-63 は、Fig4-56～Fig4-58 で鋼矢板から 1.5m 付近に反射が返ってきた箇所の周辺で、パラメトリックソナーのみをソナー昇降機の限界から水面付近まで上げる計測の結果である。2.2m 付近に鋼矢板からの強い反射が見て取れる。また、右側(ソナー昇降機の限界)から水面に上がるにつれ、Fig4-62 と Fig4-63 とともに 2.4m 付近から左肩上がりで、3.4m 付近まで上がる反射が見える。

Fig4-56～Fig4-58 で見えた鋼矢板から 1.5m 付近の反射と Fig4-62 と Fig4-63 での水面に近づくとつれ鋼矢板から離れていく反射波の結果を合わせると、鋼矢板岸壁に出来た内部空洞だと考えられる。しかし、Fig4-56～Fig4-58 の結果で、横方向の広がりが見えない。これは、横方向の広がりは小さくなく土砂の角度がきついため正面に強く反射しないからだと考えられる。しかし、内部空洞は外から見えず、正否の判定が難しい。今後は、様々な条件の模擬岸壁を作成し、データを集める必要がある。

また、今回 Fig4-50 のように路面が大きく沈んだ箇所には、バックホウの重さで陥

没してしまう危険性があるため入れられなかった。岸壁の内部空洞を探査する上で路面の沈下箇所も測定しなければならないため、今後は沈下箇所も調査可能な調査機材の検討も必要だと考えられる。

## 4.9 まとめ

岸壁内部診断手法では、従来の岸壁内部の点検手法で問題となっていた、①岸壁内深部の探査が困難な点を解決するために、パラメトリックソナーを用いた岸壁内部診断手法を提案した。まず始めに、パラメトリック地層探査システムで唯一既製品である SES2000 を使用し、岸壁内部診断にパラメトリックソナーが使用可能か検討した。SES2000 を用いた実験水路のコンクリート壁厚み計測試験において、厚み 0.9m のコンクリート壁の厚みを計測することが出来た。また、実岸壁を用いた試験では、岸壁に出来た腐食孔の奥行きや広がりを捉えることが出来た。SES2000 や集束型音響レンズを使用することにより岸壁内部探査の可能性を示したが、既製品では指定された周波数や波形しか使用できない事や取得できる情報が限られるなどの岸壁内部調査を行う上で問題点が浮上した。そこで、問題点を解決するために集束型パラメトリックソナーの開発を行った。開発したパラメトリックソナーを用いた実験水路での鋼矢板透過試験では、鋼矢板の奥に設置した反射板の動きをはっきりと捉えることが出来、内部空洞探査への可能性を示した。さらに、開発したパラメトリックソナーを用いた岸壁内部調査手法の有効性と実用性を検証するための現地試験では、鋼矢板岸壁に出来た内部空洞だと考えられる、鋼矢板岸壁内部 1.5 m 付近からの反射を捉えることが出来た。

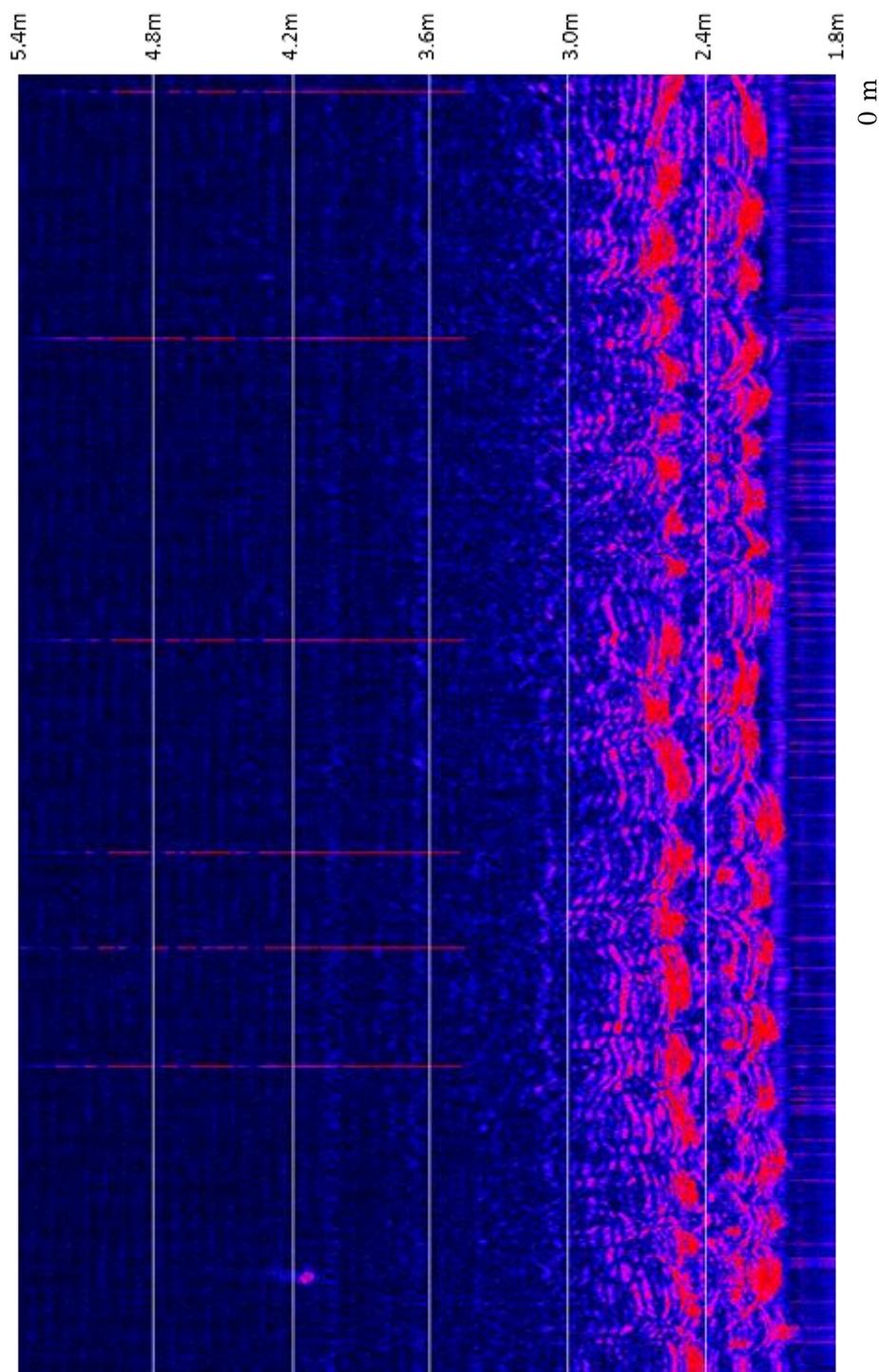


Fig4-55 水面から 1.0m 5kHz

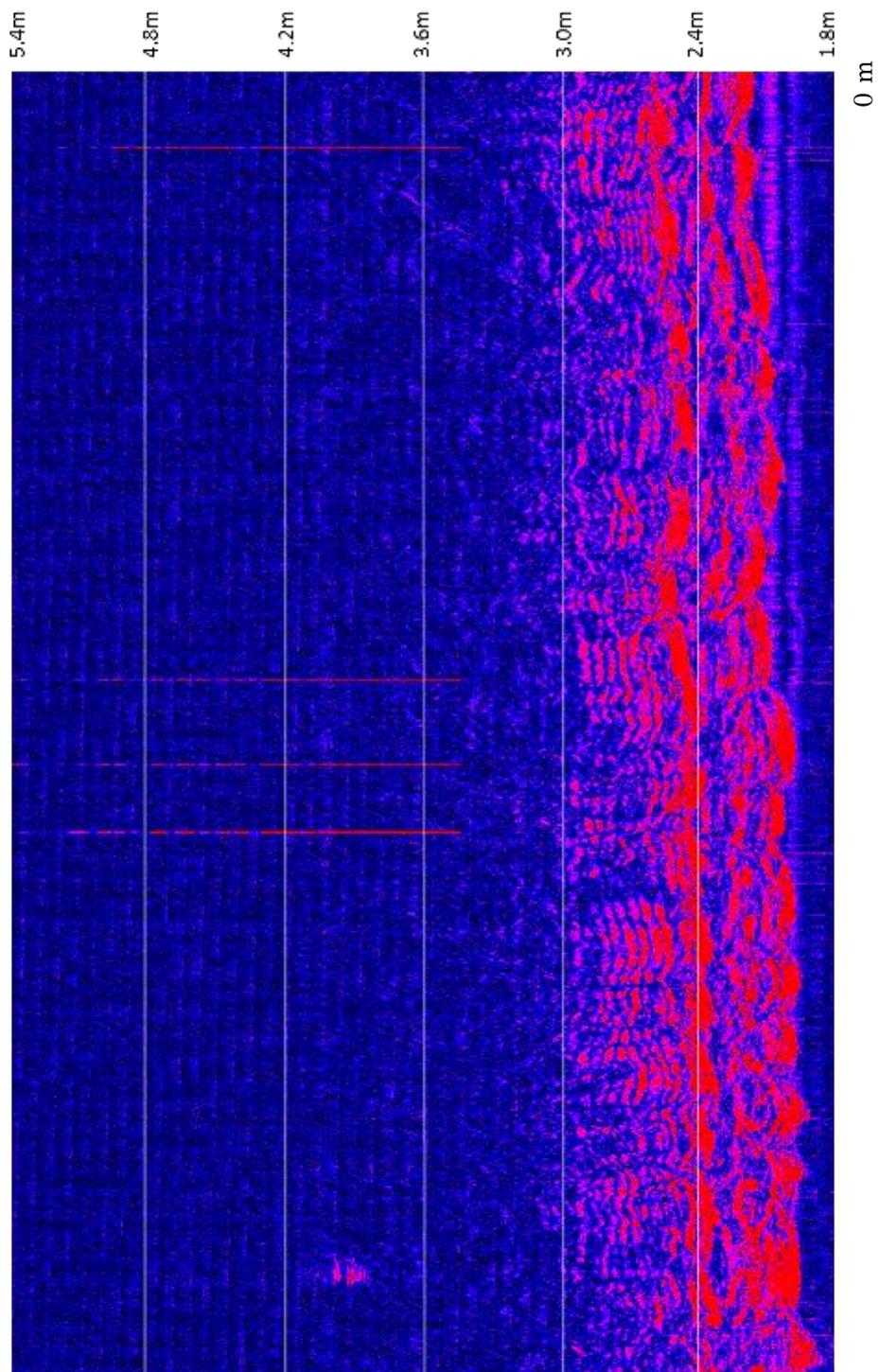


Fig4-56 水面から 1.0m 8kHz

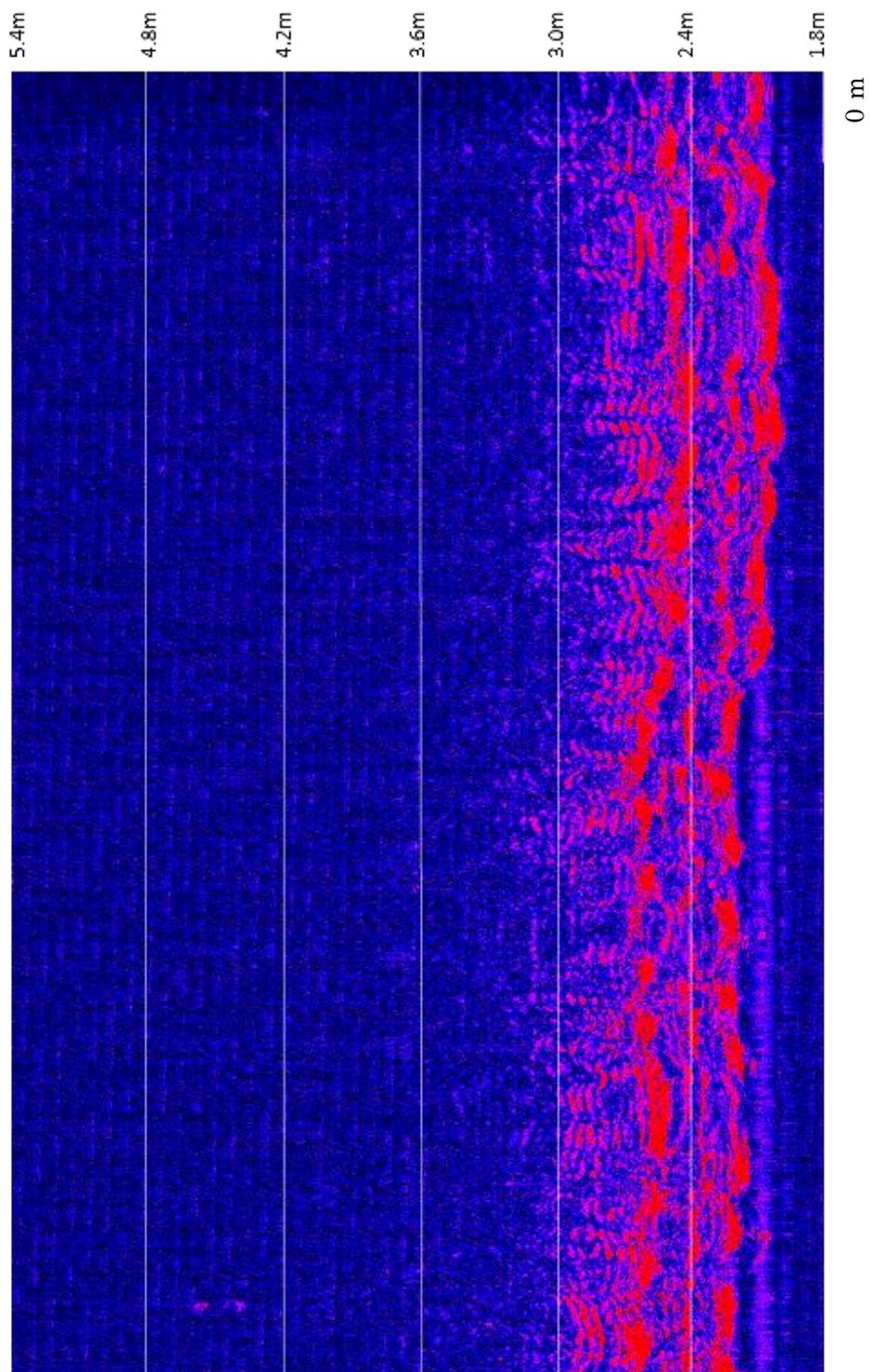


Fig4-57 水面から 1.0m 10kHz

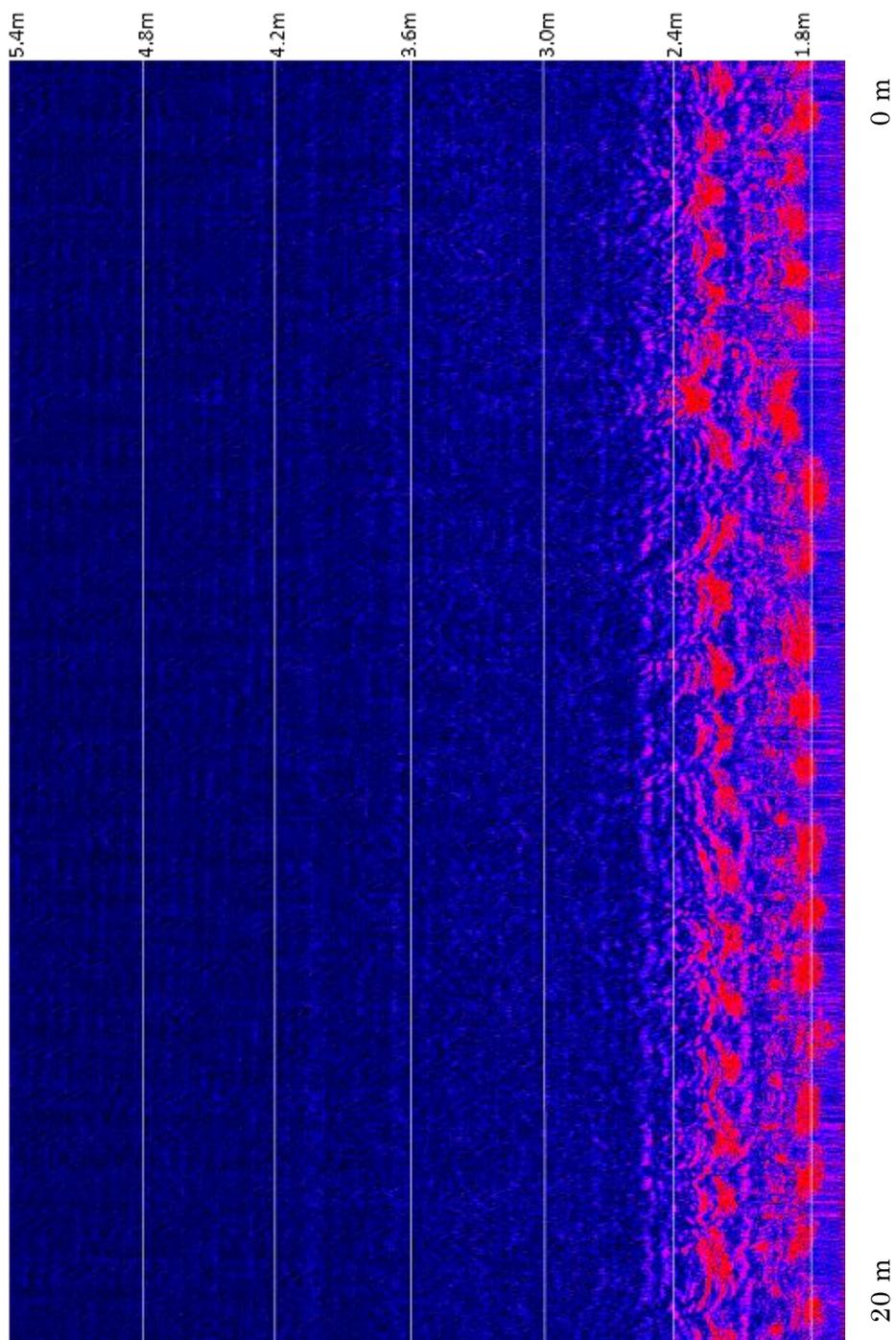


Fig4-58 水面から 2.0m 5kHz

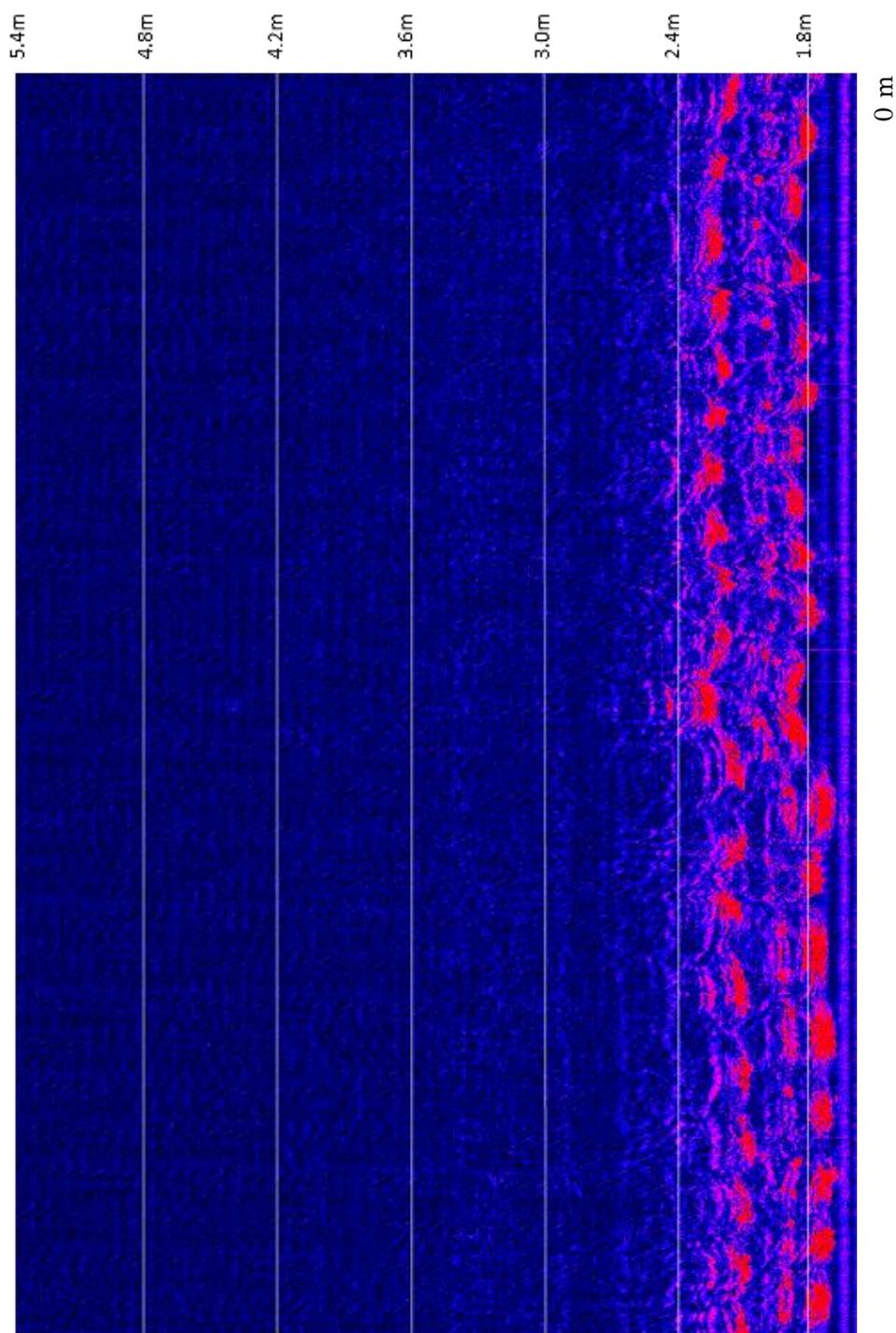


Fig4-59 水面から2.0m 8kHz

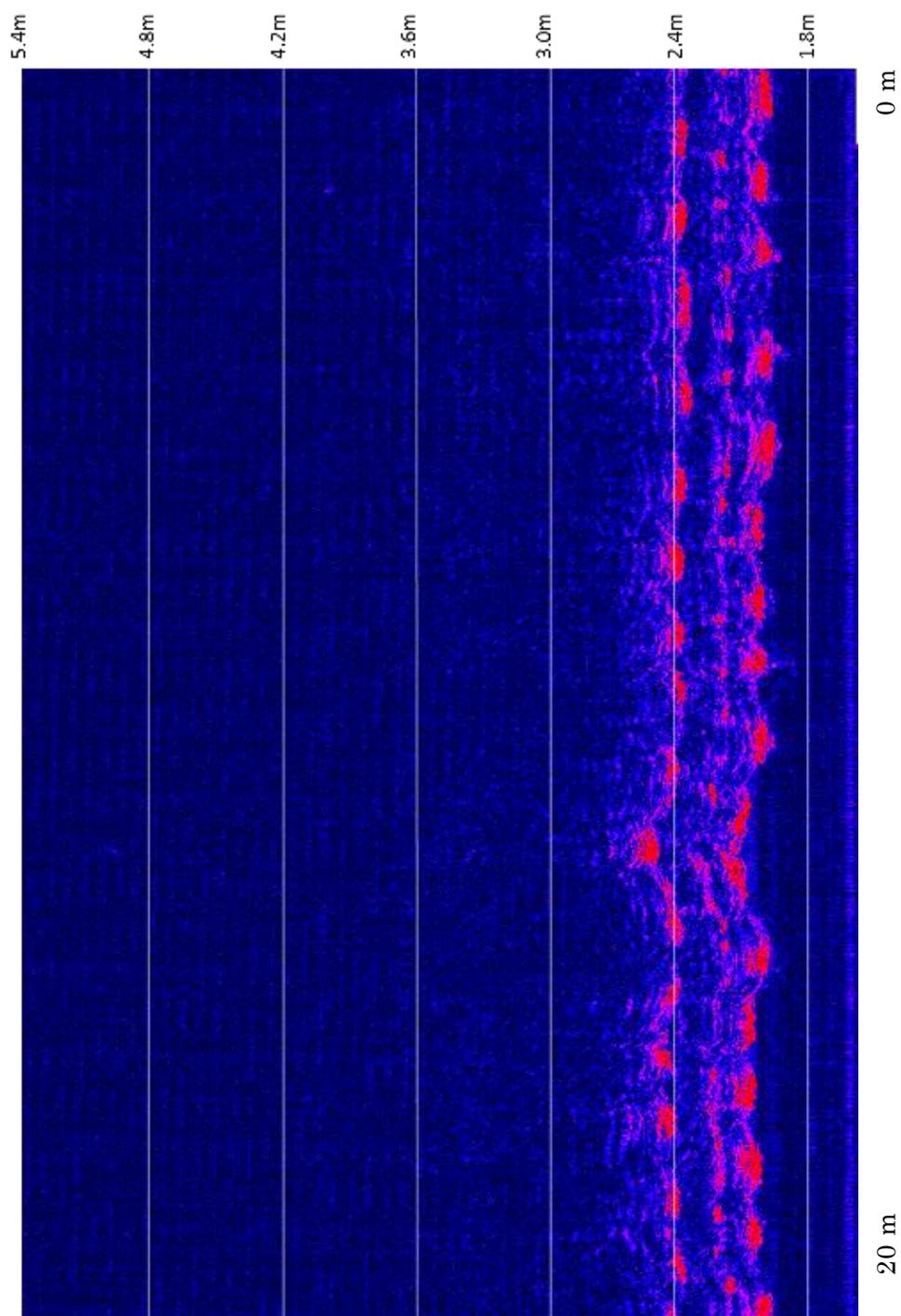


Fig4-60 水面から 2.0m 10kHz

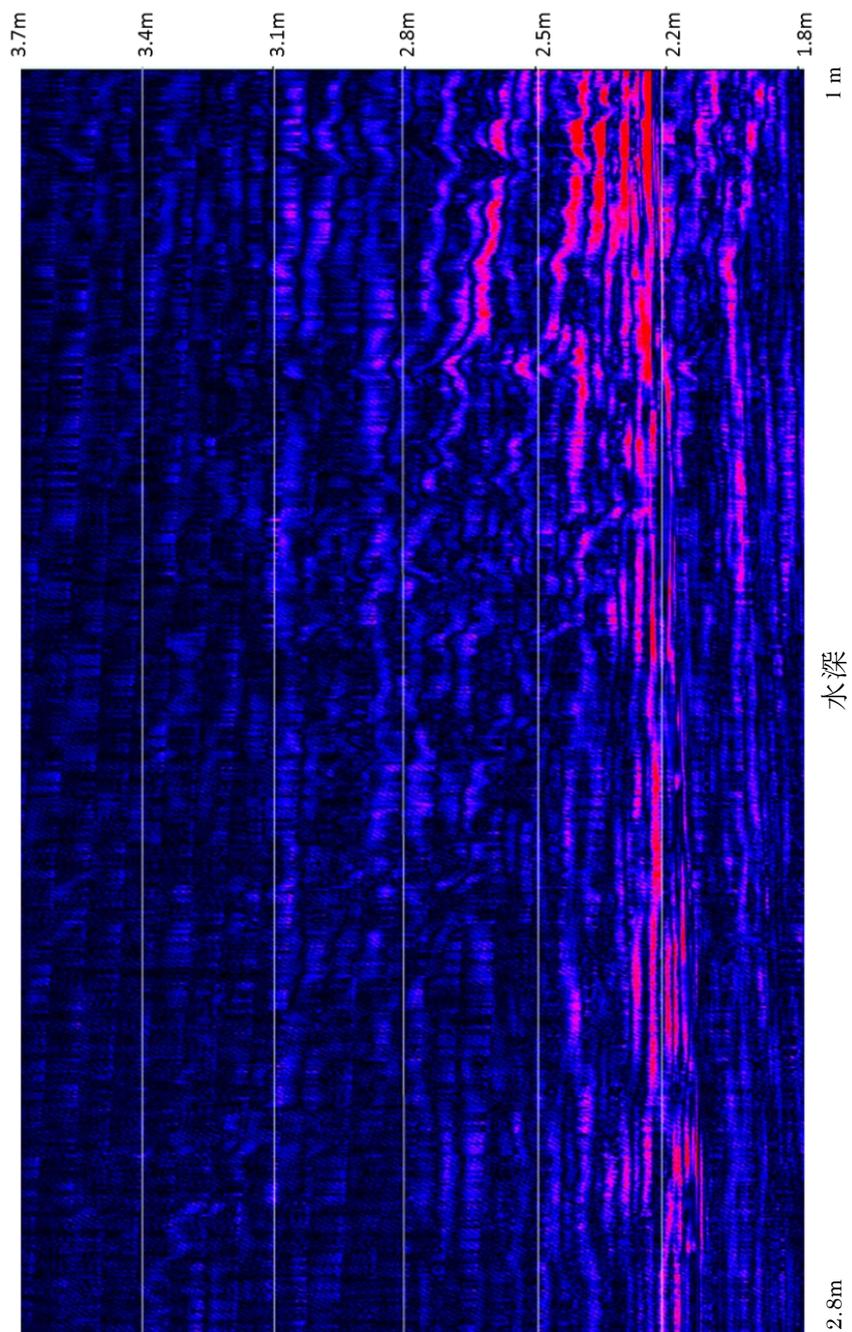


Fig4-61 深度方向探査図 8kHz

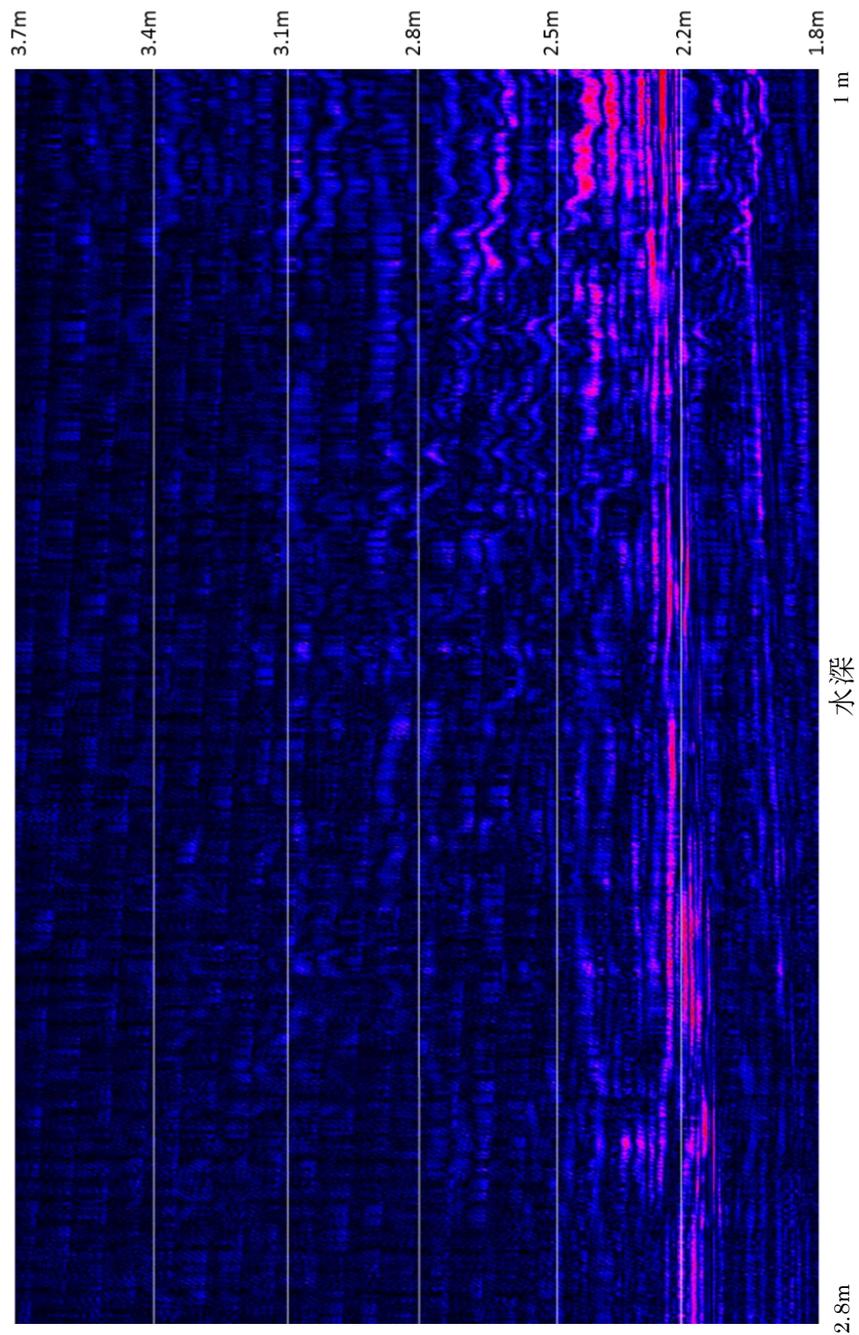
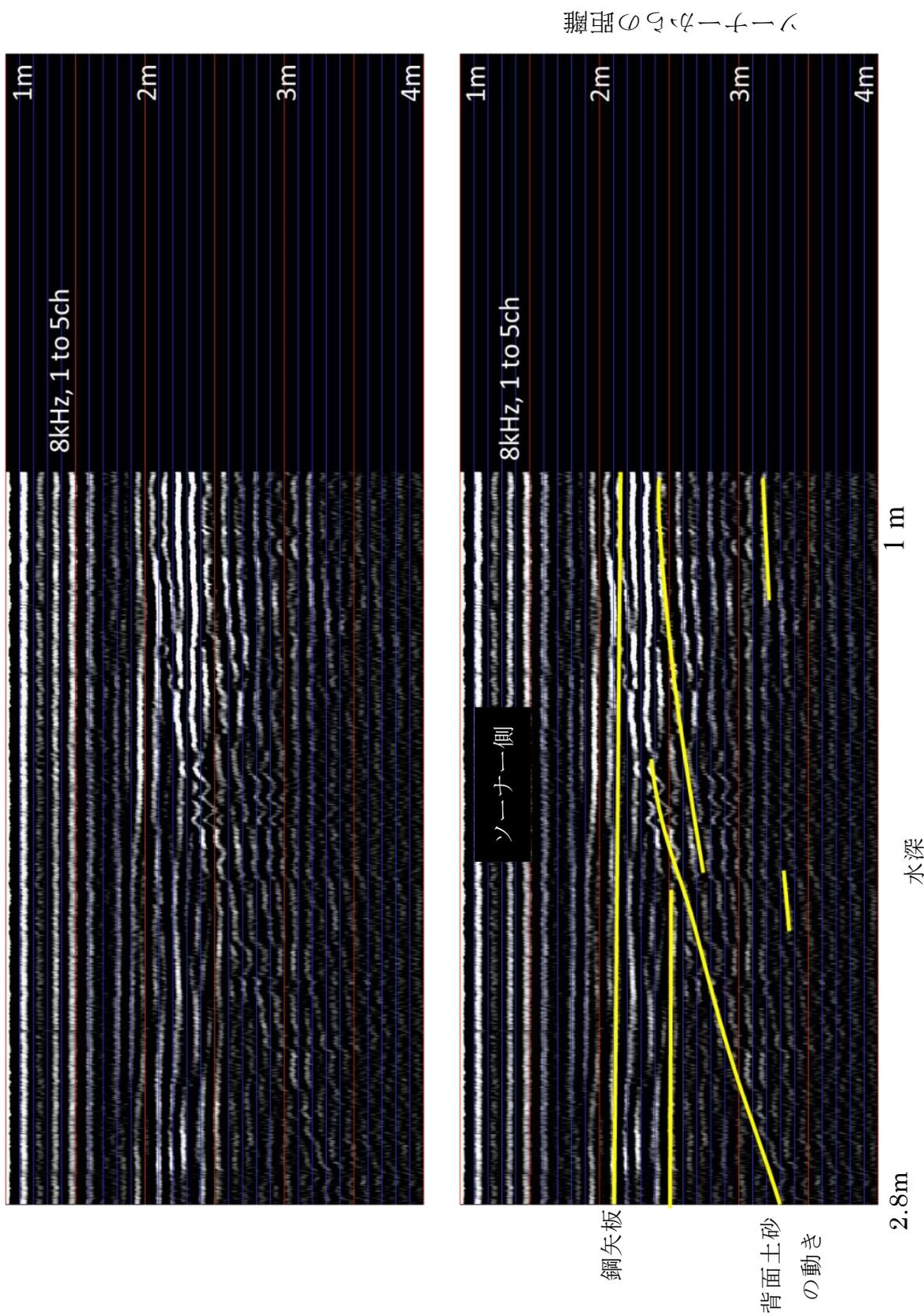


Fig4-62 深度方向探査図 10kHz



ソナーからの距離

Fig4-63 1Ch~5CH までを使用した深度方向探査図 8kHz

## 5. 結論

本研究では、港湾構造物の劣化や局所的な地盤沈下や上面陥没が発生した被害例が数多く報告され、現存の施設状況を正確に把握することが重要とされている現状から、水中音響技術による水中部の港湾構造物の劣化状況診断手法を提案した。点検項目で重要な港湾構造物水中部の点検は、陸上部の点検とは大きく異なっており容易には点検出来ず、港湾構造物全体の点検はほとんど行われていないのが現状であった。特に岸壁内部診断は、港湾構造物点検時に必要な項目にも関わらず、技術的問題から岸壁路面部付近までの調査に限られており、水中部の内部診断は行われていなかった。

そこで、本研究では、水中部の必要点検項目と必要分解能を定め、マルチビーム測深器や音響ビデオカメラを使用し外部形状を把握する劣化診断手法とパラメトリックソナーを用いた岸壁内部診断手法の提案を行った。まず第2章では、水中部の必要点検項目である 1、水中部全体調査 2、海底状況 3、変状 4、鋼材の腐食、亀裂、損傷を解決するために、海底地形調査で使用されているマルチビーム測深器を用いた点検手法を提案した。提案した手法及び計測分解能を Fig.5-1 に示す。1、水中部全体調査については、提案したマルチビーム測深器を用いた手法により、一度に岸壁全体の調査を可能とした。2、海底状況については、岸壁直下部の海底地形を3次元形状で0.1 m 分解能で洗掘や土砂堆積の深さや形状を把握可能とした。3、変状は、傾斜を0.1度、法線方向の凹凸を0.1~0.4 m 分解能で計測可能とした。4、鋼材の腐食、亀裂、損傷については、岸壁深さ方向0.1 m 分解能、岸壁法線方向0.1~0.4 m 分解能で計測可能とし、腐食孔の有無を確認できる程度の分解能での計測を可能としている。マルチビームを用いた計測手法では、4、鋼材の腐食、亀裂、損傷の形状計測の項目を満たすことが出来なかったが、その他で要求される計測分解能を満たすことが出来た。

第3章では、マルチビーム測深器を用いた計測で満たすことにできなかった4、鋼材の腐食、亀裂、損傷の形状計測の項目を満たすために、音響ビデオカメラを用いた高解像度外部形状診断手法の提案を行った。提案した手法は、岸壁を2次元モザイク化する2次元計測と3次元図を作成するための3次元計測の2通りの手法とした。提案した音響ビデオカメラを用いた高解像度外部形状診断手法を用いることにより、岸壁深さ方向0.03 m 分解能、岸壁法線方向0.1 m 分解能、奥行き方向0.01 m 分解能で計測可能とした。さらに、岸壁部陸上から、バックホウを使用した計測方法を提案し、岸壁深さ方向0.02 m 分解能、岸壁法線方向0.1 m 分解能、奥行き方向0.003 m 分解能で計測可能とした。

以上の結果から、マルチビーム測深器及び音響ビデオカメラを用いた調査手法は、要求される計測分解能を満たすことが出来たと結論する。マルチビーム測深器を用いた調査手法は、効率よく4つの項目を一度に岸壁を調査可能な点から点検のはじめに用いて使用することが考えられる。音響ビデオカメラを用いた高解像度外部形状診断手法は、音響ビデオカメラの特性上で一度に構造物及び海底状況を把握できないことから、1~4の項目を調査不可能ではないが、マルチビーム測深器で得られたデータにより腐食孔等が確認されたところに用いて形状計測を行う方法が効率よく点検可能な方法だと考えられる。また調査船を用いた計測方法は、調査船の船速と調査船と構造物の距離依存の項目が多いため、陸上からの計測手法と比べ分解能が低下してしまう。このことから、陸上から調査可能な構造物に本研究で提案した診断手法を用いる場合、持続的な維持点検管理という点から陸上からの調査方法を用いた手法を用いる方が良いと考えられる。しかし、例えば防波堤等の陸上からの点検が難しい構造物には、調査船を用いた手法を用いる方が良い。また、1.1.3章で挙げた異常時の点検では、構造物に接触しない調査船を用いた調査方法が有効であると考えられる。

岸壁内部診断手法では、岸壁内深部の探査が困難な点を解決するために、パラメトリックソーナーを用いた岸壁内部診断手法を提案した。まず始めに、パラメトリック地層探査システムで唯一既製品であるSES2000を使用し、岸壁内部診断にパラメトリックソーナーが使用可能か検討した。SES2000を用いた実験水路のコンクリート壁厚計測試験において、厚み0.9mのコンクリート壁の厚みを計測することが出来た。また、実岸壁を用いた試験では、岸壁に出来た腐食孔の奥行きや広がりをつまえることが出来た。SES2000や集束型音響レンズを使用することにより岸壁内部探査の可能性を示したが、既製品では指定された周波数や波形しか使用できない事や取得できる情報が限られるなどの岸壁内部調査を行う上で問題点が浮上した。そこで、問題点を解決するために集束型パラメトリックソーナーの開発を行った。開発したパラメトリックソーナーを用いた実験水路での鋼矢板透過試験では、鋼矢板の奥に設置した反射板の動きをはっきりと捉えることが出来、内部空洞探査への可能性を示した。さらに、開発したパラメトリックソーナーを用いた岸壁内部調査手法の有効性と実用性を検証するための現地試験では、鋼矢板岸壁内の土砂性質の違いをつまえることが出来た。以上のことから、パラメトリックソーナーを用いた調査手法は、内部空洞可視化の可能性を示した。今後は、模擬岸壁等を作成して内部空洞計測実験を実施し、内部空洞の可視化方法や解析方法の開発が必要である。また、複数の実岸壁のデータを収集することにより、内部空洞の広がりや過程や岸壁の外部状況と合わせた内部状況の評価基準の作成が必要である。以上のことにより、本研究で示した水中構造物外部診断手法は、目的とした水中部の点検項目を満たすことが出来、内部空洞探査手法では、鋼矢板岸壁内の内部空洞をつまえること

が可能であり、構造物内部を視覚化できる可能性が示唆された。本研究により、港湾岸壁の状況を、視覚的にわかりやすいデータとして提供できるため、維持管理が容易になり、経過観察や緊急時点検に有効活用できる。また、港湾岸壁だけではなく海岸護岸、河川護岸に応用可能である。岸壁だけではなく、コンクリートを透過し検査できるので、沿岸防波堤や橋脚の水中基礎の内部・外部診断にも応用可能だと考えられるため、多くの水中構造物の維持管理への貢献が期待できる。また本研究は、これまでにない岸壁内部探査法や非破壊検査、維持管理技術あり、港湾岸壁の安全点検や空洞化発生メカニズムの解明への補助が見込まれ、国内の玄関である港湾施設の安全性の向上が可能であると言える。

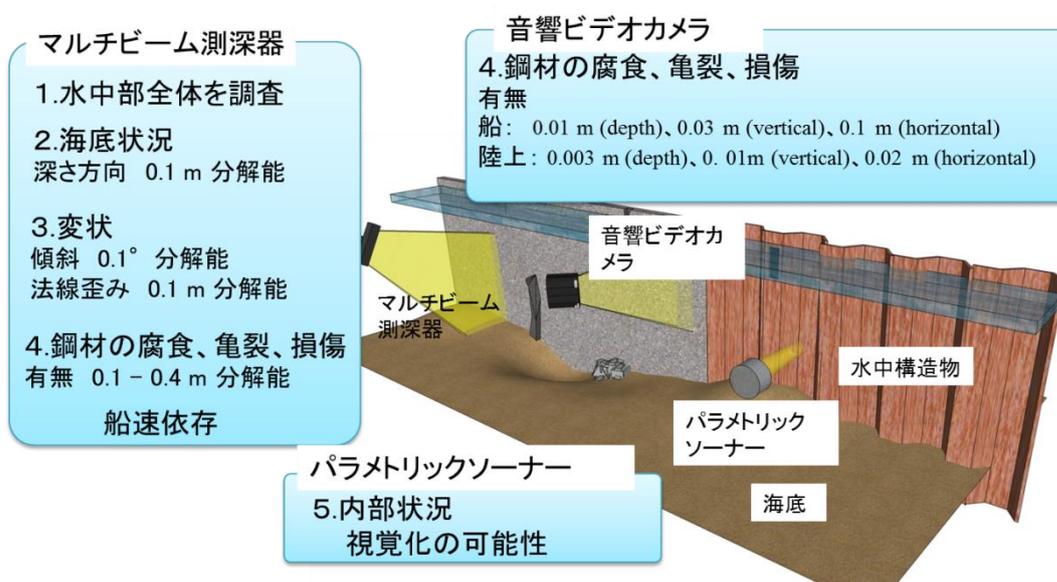


Fig.5-1 提案した手法及び計測分解能

# 参考文献

- [1] 国土交通省，社会資本の維持管理・更新に関し当面講ずべき措置，2013.
- [2] 国土交通省，国土交通白書，pp. 31 – 37，2011.
- [3] 国土審議会政策部会長長期展望委員会(編)，「国土の長期展望」中間とりまとめ，2013.
- [4] 西川和寛，国土マネジメントに関する諸問題について一人との関わりー，2007.
- [5] 国土交通省，国土交通白書，pp.78 – 86，2010.
- [6] 高橋宏直，後藤文子，横田 弘，“港湾施設の維持補修・更新費の将来推計”，国土技術政策総合研究所資料，No.257，2005.
- [7] 松島学，関博，松井邦人，“RC 栈橋施設の最適検査間隔”土木学会論文集，No.451/V-17，pp.197 – 204，1992.
- [8] 善一章，阿部正美，“港湾鋼構造物の腐蝕調査(第1報)ー大阪港、志布志港，佐世保港，下関港、富山港における腐蝕調査ー”港湾技術研究所港湾技術資料，No.49，pp.1 – 136，1968.
- [9] E. R. Kennedy, J. S. Wilson, “New York Harbor Corrosion”, Materials Protection, No.1, pp.53 - 55, 1967.
- [10] 安間清，石渡友夫，“海岸保全施設の維持管理手法”港湾技術研究所港湾技術資料，No.557，pp.1 – 54，1986.
- [11] 横田弘，岩波光保，関根好幸，“海岸保全施設の老朽化実態とその進行モデルの構築”，海岸工学論文集，第 50 卷，pp. 911-915，2003.
- [12] 岩崎福久、田中茂信，佐藤慎司，名合宏之，前野詩朗，小谷祐司，“海岸堤防の空洞化発生機構に関する実験的研究”，海岸工学論文集，第 42 卷，pp. 1026 - 1030，1995.
- [13] 重村利幸，滝口和男，多田 毅，林建二郎，藤間功司，“防波護岸背後からの土砂吸出しに関する基礎的研究”，海岸工学論文集，第 49 卷，pp. 871-875，2002.
- [14] 前野詩朗，小谷裕司，星山知恵，“変動水圧場における護岸裏込め土砂の流出限界に関する研究”，海岸工学論文集，第 47 卷，pp.926 - 930，2000.
- [15] 後藤仁志，五十里洋行，駒口友章，三島豊秋，吉年英文，“粒子法による護岸背後地盤空洞形成過程の数値解析”，土木学会論文集 B2，Vol. 66，No.1，pp821-825，2010.

- [16] S. Koshizuka, Y. Oka, “Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid”, Nucl. Sci. Eng., Vol. 123, pp. 421-434., 1996.
- [17] 高橋重雄, 戸田和彦, 菊池喜昭, 菅野高弘, 栗山善昭, 山崎浩之, 長尾毅, 下迫健一郎, 根木貴史, 菅野甚活, 富田孝史, 河合弘泰, 中川康之, 野津厚, 岡本修, 鈴木高二朗, 森川嘉之, 有川太郎, 岩波光保, 水谷崇亮, 小濱英司, 山路徹, 熊谷兼太郎, 辰巳大介, 鷺崎誠, 泉山拓也, 関克己, 廉慶善, 竹信正寛, 加島寛章, 伴野雅之, 福永勇介, 作中淳一郎, 渡邊祐二, “2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報”, 港湾空港技術研究所資料, No.1231, pp. 1 - 202, 2011.
- [18] 海洋音響学会(編), 海洋音響の基礎と応用, 成山堂書店, 2004.
- [19] 森弘和, 井上渉, 本間章禎, “新型浅海用マルチビーム測深機 (SEABAT 7101) 導入について”, 海洋情報部研究報告, No.46, pp. 69 - 77, 2010.
- [20] 半谷和祐, “SeaBeam3000 深海用マルチビーム測深機: 世界初のマルチビームから 50 年 (特集 活用が進むマルチビーム測深機).”, 超音波 techno, No.24-5, pp. 50 - 54, 2012.
- [21] A. Asada, “New Bathymetric Surveying and Processing System Based on SEA BEAM 2000”, 水路部研究報告, No.29, pp. 1 - 32, 1993.
- [22] 吉田弘, 百留忠洋, 石橋正二郎, 澤隆雄, 志村拓也, “深海自律形無人探査機とその要素技術の最前線”, IEICE Communications Society Magazine, No.5-2, pp. 127 - 136, 2011.
- [23] 川井仁一, 浅倉宜矢, 松本良浩, “測量船「明洋」への海底地殻変動観測用送受波器の船底装備について測量船「明洋」への海底地殻変動観測用送受波器の船底装備について”, 海洋情報部技報, No.27, pp. 50-55, 2011.
- [24] A. Asada, T. Yabuki, "Synthetic aperture technique applied to a multi-beam echo sounder", Earth, Planets and Space, Volume 53, Issue 4, pp 321-326, April 2001
- [25] 楠勝浩, “浅海用ナローマルチビーム音響測深機のデータを海図に採用するために”, 海洋調査技術, vol4, No.1, pp.39 - 46 , 1992.
- [26] 栗山隆, 松本勝時, 藤岡洋介, “Polymetallic sulfides on the off-axis volcanoes around the East Pacific Rise; 11° 30'North Latitude”, 資源地質, vo44, No.245, pp. 187 - 199, 1994.
- [27] Soria, Marc, Pierre Fréon, and François Gerlotto, “Analysis of vessel influence on spatial behaviour of fish schools using a multi-beam sonar and consequences for biomass estimates by echo-sounder.”, ICES Journal of Marine Science, vol53, Issue 2, pp.453 - 458 , 1996.

- [28] Misund, Ole Arve, "Underwater acoustics in marine fisheries and fisheries research.", *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, vol7, Issue 1, pp.1 - 34 , 1997.
- [29] 浅田昭, 矢吹哲一朗, "Preparations for the Coming Large Earthquakes at the Nankai Trough. Progress in the Long-term Seafloor Geodesy on the Kumano Trough", *地學雑誌*, vol110, No.4, pp.529 - 543 , 2001.
- [30] 浅田昭, "海底地形のマルチビーム音響探査と可視化技術", *地學雑誌*, vol109, No.6, pp.874 - 884 , 2000.
- [31] 青島元次, 鮫島強, 吉岡敦, 宇多高明, 三波俊郎, 石川仁憲, "Narrow multi beam 測量データを用いた湘南海岸の土砂量の長期的変化", *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, vol55, pp.776 - 780 , 2008.
- [32] 鶴岡春美, 宇多高明, 芹沢真澄, 古池鋼, 福本崇嗣, 星上幸良, 宮原志帆, "南九十九里浜における沖合養浜の追算と連続土砂投入の効果検討", *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, vol65, pp.711 - 715 , 2009.
- [33] 浅田昭, 堀井豊充, 三富龍一, 韓軍, 吉田善吾, "藻場のマルチビーム音響ソナーによる 3 次元可視化解析", *可視化情報学会誌*, vol25, pp.407 - 410 , 2005.
- [34] Komatsu, T., Igarashi, C., Tatsukawa, K., Sultana, S., Matsuoka, Y., Harada, S, "Use of multi-beam sonar to map seagrass beds in Otsuchi Bay on the Sanriku Coast of Japan", *Aquatic Living Resources*, vol.16, Issue.3, pp. 223-230 , 2003.
- [35] 佐野久一, 渡邊圭, "現場報告 ナローマルチ技術を活用したダム貯水池内の堆砂状況の把握", *ダム技術= Engineering for dams*, vol321, pp.48-55 , 2013.
- [36] 吉田善吾, 浅田昭, 池田泰幸, 樋口直明, 小松正人, 中澤祐治. "高精度マルチビーム測深によるダム堆砂量の経年変化測量と評価." *海洋調査技術*, No,16 2004.
- [37] Amiri-Simkooei, AliReza, Mirjam Snellen, and Dick G. Simons. "Riverbed sediment classification using multi-beam echo-sounder backscatter data." *The Journal of the Acoustical Society of America* 126.4 1724-1738. 2009.
- [38] Ernstsens, Verner B., R., Hebbeln, D., Bartholomä, A., Flemming, B. W. "Precision of high-resolution multibeam echo sounding coupled with high-accuracy positioning in a shallow water coastal environment." *Geo-marine letters* No,26.3 pp.141-149. 2006:
- [39] H., Yao, B., Zhou, T., Wei, Y., Chen, B., Liu, X., "Shallow water high resolution multi-beam echo sounder.", *OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*, , pp. 1 - 5, 2008.

- [40] Clarke, John E. Hughes, Larry A. Mayer, David E. Wells. "Shallow-water imaging multibeam sonars: a new tool for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf." *Marine Geophysical Researches*, No.18.6, pp.607-629.1996.
- [41] Farr, Harold K. "Multibeam bathymetric sonar: Sea beam and hydro chart." *Marine Geodesy*, No.4.2, pp. 77-93, 1980.
- [42] Capell, W. J. K. C. Kiesel, "An extend capability multibeam bathymetric mapping system", IEEE Conf. Proceedings of OCEANS'89, pp.1124-1136, 1989.
- [43] 気象庁潮位データ <http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/>
- [44] 卷俊宏, 浅田昭. "Time rigid motion compensation and noise reduction of multi-beam bathymetry data (shallow sea)." *海洋音響学会誌* 31.1: 28-38. 2004
- [45] Belcher, Edward, William Hanot, and Joe Burch. "Dual-frequency identification sonar (DIDSON)." *Underwater Technology*, 2002. Proceedings of the 2002 International Symposium on. IEEE, 2002.
- [46] Maxwell, Suzanne L., and Nancy E. Gove. "The Feasibility of estimating migrating salmon passage rates in turbid rivers using a dual frequency identification sonar (DIDSON)." Alaska Department of Fish and Game Regional Information Report 12A04-05 2004.
- [47] Moursund, Russell A., Thomas J. Carlson, and Rock D. Peters. "A fisheries application of a dual-frequency identification sonar acoustic camera." *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, No.60.3, pp.678-683. 2003.
- [48] Boswell, Kevin M., Matthew P. Wilson, and James H. Cowan Jr. "A semiautomated approach to estimating fish size, abundance, and behavior from dual-frequency identification sonar (DIDSON) data." *North American Journal of Fisheries Management*, No.28.3 pp.799-807. 2008
- [49] Negahdaripour, Shahriar, Pezhman Firoozfam, and Payam Sabzmeydani. "On processing and registration of forward-scan acoustic video imagery." *Computer and Robot Vision*, 2005. Proceedings. The 2nd Canadian Conference on. IEEE, 2005.
- [50] Mizuno, Katsunori, et al. "Quantification of whooper swan damage to lotus habitats using high-resolution acoustic imaging sonar in Lake Izunuma, Japan." *Aquatic Botany*, No.110, pp.48-54. 2013
- [51] Mizuno, Katsunori, and Akira Asada. "Three dimensional mapping of aquatic plants at shallow lakes using 1.8 MHz high-resolution acoustic imaging sonar and image processing technology." *Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2014 IEEE International. IEEE, 2014.

- [52] X. U. Chunhui, K. Mizuno, A. Asada, K. Abukawa, M. Yamamuro, "3D Views generation and Species Classification Methods of Aquatic Plants Using Acoustic Images". J. Marine Acoust. Soc. Jpn., No.40, pp.14-26, 2013.
- [53] 佐伯公康, 佐藤伸哉, 藤田士郎, 坪田幸雄, "レーダーを用いた海岸堤防の空洞探査事例". 水産工学研究所技報, No.25, pp.33-55. 2003
- [54] 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, Vol.26, pp171 -176, 2010.
- [55] J. L. Davis and A. P. Annan, "GROUND-PENETRATING RADAR FOR HIGH-RESOLUTION MAPPING OF SOIL AND ROCK STRATIGRAPHY," Geophysical Prospecting, vol.37, pp.531-551, 1989
- [56] P. J. Westervelt, "Parametric acoustic array," J. Acoust. Soc. Am, vol. 35, pp.535-537, 1963
- [57] H. O. Berkta, "Possible exploitation of nonlinear acoustics in underwater transmitting applications", J. Sound Vid., vol. 2, pp.435-461, 1965
- [58] Jens Wunderlich, Sabine Müller. "High-resolution sub-bottom profiling using parametric acoustics." ,International Ocean Systems, No.7.4, pp.6-11, 2003.
- [59] Endler, Rudolf. "Sediment physical properties of the DYNAS study area." Journal of Marine Systems, No.75.3, pp.317-329, 2009.
- [60] Gopinath, Girish. "Sediment stratification and bathymetric survey using sediment echo sounder in reservoirs and shallow marine areas." Nature, No.405, pp.60-63. 2000
- [61] 運輸省港湾技術研究所編著, 港湾構造物の維持・補修マニュアル, 沿岸開発技術研究センター, 1999.
- [62] Sabat7125 product leaflet, [http:// www.teledyne-reson.com/products/seabat /seabat -7125/](http://www.teledyne-reson.com/products/seabat/seabat-7125/)
- [63] IXBLUE PHINS technical specification, <http://www.ixblue.com/products/phins>
- [64] GPS 16x Technical Specifications, <http://www.garmin.com>

# 謝辞

本論文は、多くの方々のご指導とご協力を頂くことによってまとめることが出来ました。ここにお世話になった方々のお名前を挙げさせて頂き、心からの感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり、指導教員である浅田昭教授には、まことに多くの方々にご指導、ご鞭撻、並びに多大なるご協力を受け賜りました。また、研究面だけではなく、公私共に様々な成長の機会を頂きました。

東京大学生産技術研究所浅田研究室の教職員、メンバーの方々にも大変お世話になりました。水野勝紀特任助教には、研究方針や実験の進め方、各項目の解析方法などについて多くのご協力を頂きました。山中香織学術支援専門職員、山中絢子学術支援専門職員、岩永廣海氏には、学生生活や研究活動の手続きや管理など、多くのサポートを頂きました。博士課程の藤澤慶氏には、パラメトリックソーナーの実験の手伝いをして頂きました。

熊本大学沿岸域環境科学教育センターの秋元和實准教授には、SES2000の提供および操作法などのご指導、SES2000を用いた現地試験において多くのご協力及び貴重なアドバイスを頂きました。

寒地土木研究所寒地機械技術チームの大槻敏行氏、片野浩司氏、山口和哉氏、岸寛人氏には、寒地土木研究所水路試験や北海道現地試験を始めとする試験で、試験に関する手続きや準備、計測など様々なご協力を頂きました。

本研究は、特別研究員奨励費の助成を受けたものです。

最後になりますが、この他にも多くの方々にご協力頂きました。本研究活動を支えてくださった皆様には心からの感謝の意を表すとともに、厚く御礼申し上げます。