

潮間帯における音波を用いた安価な海底探査装置の試作

津田宗一郎¹ 森下功啓²

概要: 近年の大雨頻度の上昇や山林の荒廃に伴い、河川の防災やアサリなどの漁業資源管理のために、河川の影響を受ける潮間帯における堆砂厚のモニタリングが重要となってきた。ただし、土砂の堆積厚を長期間にわたって精度よく低コストでモニタリングする方法は存在しない。そこで、本研究では音楽用の振動スピーカーを用いて、乱数で変調したスイープ波を出力するデバイスを開発した。本装置から出力した音声信号をコンクリートマイクと IC レコーダーを用いて録音し解析したところ、直接波は検知できたが海底での反射波は検知できなかった。また、海底下の地質境界面からの反射波を捉えるには変調信号の自己相関をさらに抑える必要があることがわかった。

A Prototype of Inexpensive Seafloor Survey Device Using Sound Wave in The Intertidal Zone

SOICHIRO TSUDA¹ KATSUHIRO MORISHITA²

Abstract: In response to increased heavy rain frequency and forest degradation, monitoring of sediment thickness in tidal flats has become crucial for river disaster prevention and fisheries management. Current methods for long-term, accurate, and low-cost monitoring are lacking. This study developed a device using a speaker to emit randomized sweep waves. Analysis of recorded sound signals captured some seabed reflections, but further suppression of signal self-correlation is needed to detect reflections from the seabed's geological boundary.

1. はじめに

1.1 背景

近年、気候変動の影響により日本では大雨が増加している。また、山間部はニホンジカによる食害により下草が減少し土砂が河川に流入しやすくなった。加えて沿岸での漁業資源は減少傾向にあり、特に熊本県の球磨川流域ではこの傾向が顕著である[1]。そのため、河川の防災面だけでなく、アサリを始めとする漁業資源の管理のためにも、河口や浅海域における土砂堆積量や堆積厚のモニタリングが重要と考えられる。

1.2 先行研究

河川の土砂運搬量については、ダムの堆砂量や、実験式や平常時における土砂濃度のモニタリングと流速の観測に基づく物理シミュレーションによる推定が行われている。最近ではドップラー流速分布計と濁度と水圧のセンサーによる出水時の土砂流出量モニタリング例もある。また、水深が浅く水の透明度の高い河川地形の場合は、緑色レーザーLiDARを搭載したドローンで計測する事例もある。加えて、国土交通省は河床変動を音響測深機やロッドを用いた観測を行っている。ただし、これらの手法では粒径の異なる土砂への置換や、地下構造までは観測できない。また、高頻度な観測も難しい。

なお、海底の地下構造の調査手法としては、音波を用いた海底測深手法がある。音波を用いた海底地質調査の基本原理は、音波が海底から反射するまでの時間に音速を掛けることで計測器と海底との間の距離を計測することにある。このとき、音波の大部分は海底で反射するが、音波はある程度地中に伝搬し、泥から砂に変わるような音速の変わる境界面でも反射する。この反射波を検出することで海底の砂泥の厚みを求めることができる。この音波を用いた海底の観測手法は、深さ数十メートル以上の海域では普通に用いられている手法であるが、潮間帯の様に時間によって海底が露出するような場所での適用例はない。

また、海の底質環境を調査する方法として、潜水士による目視調査や、採泥器を用いた試料採集が行われているが、大雨や洪水などの災害時にはどちらも調査が困難となることが予想される。

以上のように、河川から流出し堆積する土砂量やその厚みの計測のために、ダムの堆砂量やレーザーや音響を用いた既存技術はあるものの、潮間帯において土砂の堆積量を長期間にわたって精度よく低コストでモニタリングする方法は存在しない。ただし、水深以外にも海底下の地質構造を計測可能という点で音響探査技術は他に比べて優れている。

1.3 目的

本研究では調査対象を砂と泥とし、河口付近に堆積する土砂量を省電力かつ低コストで継続的にモニタリングする手法を明らかにすることを目的とする。そのため、海底下の地質構造も観測可能な音波を用いた観測デバイスを提案する。ただし、洪水時に堆積する砂泥の厚みは数ミリメー

¹ 熊本高等専門学校生産システム工学専攻
Department of Production Systems Engineering, Kumamoto National College of Technology

² 熊本高等専門学校建築社会デザイン工学科
Department of Architecture and Civil Engineering, Kumamoto National College of Technology

トルから数十センチメートルと考えられることから、単純なパルス性の正弦波やスイープ波（時間に伴い周波数の変わる正弦波）では距離分解能が足りないと考えられる。

本論文では、構成部品が安価で制御が簡単な一般用音響製品とマイコンを組み合わせ、出力する音響信号に変調を加えて水深やその地下構造の計測が可能であるか検討したので報告する。

2. 論文構成

本論文は7章から構成される。第1章では本研究の背景を述べた。第2章は本章である。全体の構成を説明している。第3章では、Arduinoを用いた信号検知実験について報告する。第4章では作成した水中音響デバイスを報告する。第5章では、スピーカーから信号を出し、検出して距離を測定できることを確認した結果を報告する。第6章では前章までの結果を踏まえ、海で実験した結果を報告する。最後に第7章で本研究をまとめる。

3. 音響信号選定用の Arduino を用いた実験

水中では波の影響や音速が空気中に比べて速いことにより反射波が返ってくるまでの時間が短い。そのため直接波と反射波を区別するためには信号検知において時間分解能を高める必要がある。そこで、反響やノイズの影響を受けにくい信号を選択することを目的とし、条件を変えつつマイコンから音響信号の発信し、それを IC レコーダーで録音した後に解析した。

3.1 実験手法

発信音が単純な正弦波の場合は環境音によって容易にかき消されてしまう恐れが強い。そこでデジタル変調を施すことである程度のノイズ耐性の向上を図った。本研究で

は、マイコンで実現が簡単な FSK (Frequency Shift Keying) 信号と TSP (Time Stretched Pulse) 信号に位相変調を施したものをを用いた(図1)。また、ノイズ耐性を確認するために、アクティブスピーカーからホワイトノイズを出力した。

ここで、ホワイトノイズとは、全ての周波数帯で一定のエネルギーを持つランダムな信号のことである。一般的には、テレビやラジオのチューニングがずれた際に聞こえる雑音として認識されている。また、FSK 信号とは、0 と 1 に異なる周波数の正弦波を割り当て、01001101 のような 2 進数の数列を連続した信号に加工したものを指し、TSP 信号とは時間とともに周波数が上昇していく信号を指す。

本実験では、Python を用いて 800 bit の乱数列を生成し、FSK 信号では乱数列の 0 に 300 Hz, 1 に 400 Hz, 1 bit に 10 ミリ秒を割り当てて音を鳴らした。また、TSP 信号では時間とともに周波数を 100 Hz から 650 Hz に変化させ、更に乱数列の 0 を逆相, 1 を正相として位相を反転させた。

また、研究室の机上から音を鳴らし、発信源から離れた場所にマイクを設置して IC レコーダーで録音した(図2)。アンプには電源装置から給電し、プログラムを書き込んだ Arduino DUE と振動スピーカーを接続した。ホワイトノイズを出力するアクティブスピーカーは PC からの USB バスパワー駆動とした。

音響信号の検出方法は、録音した音源と手本となる音響信号（以下、原信号）との間で畳み込みを行うことで相関を取るものとした。具体的には、まず実験で得た音源と原信号をそれぞれフーリエ変換する。この際、2 つの音響信号の長さをそろえ、信号長を 2 の n 乗にするために、0 詰めする。次に、実験で得た音源から作成したフーリエ変換結果に対して複素共役をとり、2 つを要素ごとに掛け合わせものを逆フーリエ変換することで相関波形を得る。うまく相関が取れば、録音音源内における音響信号の先頭部



図1 信号の波形（左から、FSK 信号、位相変調した TSP 信号）



図2 実験の様子（左から、実験装置、スピーカーから 10cm の地点のマイクロフォン、スピーカーから 3m の地点のマイクロフォン）

分に鋭い相関のピークが見られる。

机の上に設置した振動スピーカーとマイクロフォンとの距離を 10 cm とし、この状態で Arduino から出力した音を録音することで原信号を取得した。

また、振動スピーカーの上にアクティブスピーカーを乗せ、そこからホワイトノイズを出し、振動スピーカーとマイクロフォンとの距離を 10 cm および 3 m の条件でそれぞれ複数回にわたって FSK 信号と位相変調した TSP 信号を録音した。録音後、それぞれの音源と原信号との間の相関を求めた。

3.2 実験結果

実験で得た原信号のスペクトログラムを図 3 に示す。FSK 信号は 2 つの周波数の異なる音が不規則に連続した信号になっているのに対して、位相変調した TSP 信号は時間と共に周波数が増加しつつ、位相が反転したタイミングで帯域が広がっていることが確認できた。

実験で得た録音音源と原信号の間で得られた相関波形を図 4、図 5 に示す。青のグラフが実験で得た音の振幅を表し、赤のグラフが相関を表している。ここで、実験中はホワイトノイズを出力し続けていたため、振動スピーカーとマイクロフォン間の距離 10 cm と 3 m を比較すると、ホワイトノイズと音響信号の間の振幅比が異なることがわかる。これはホワイトノイズを出力したアクティブスピーカーに指向性があることを示している。

FSK 信号の実験では、振動スピーカーとマイクロフォンとの距離が 10 cm の場合に相関のピーク以外の高さが 0.25 程度となり、距離 3 m では 0.35 程度となった。これは距離 3 m の方が信号以外に対する相関が高いことを示しており、距離が離れるほど信号とノイズの比である SN 比が低下してしまうことが懸念された。また、相関ピークは距離 10 cm のときに 1 から 0.8 程度となり、距離 3 m で 1 から 0.75 程度であった。距離 3 m の方が相関のばらつきが増えた。

位相変調した TSP 信号の実験では、相関のピークの前後に若干の相関が出ているが、時間経過とともに速やかに低下していることがわかる。したがって、位相変調した TSP 信号は FSK 信号に比べて自己相関が低いことを示している。また、繰り返し発していた信号に対する相関は 1 から 0.9 程度で、FSK 信号に比べてばらつきが少なかった。

以上のことから、本実験で扱った FSK 信号と位相変調した TSP 信号を比較すると、位相変調した TSP 信号の方が遠距離での信号検知能力が高いことがわかった。そのため以降は位相変調した TSP 信号を使用した。

4. 水中音響デバイスの作成

水中で音響信号を出力し、またその音を録音する実験

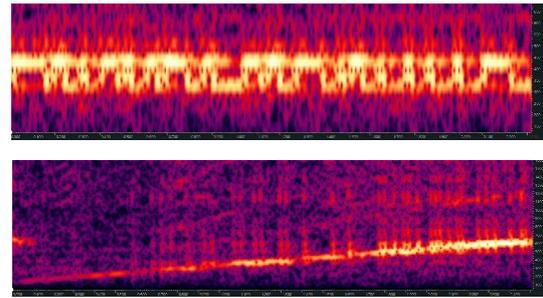


図 3 原信号のスペクトログラム
(上から、FSK 信号、位相変調させた TSP 信号)

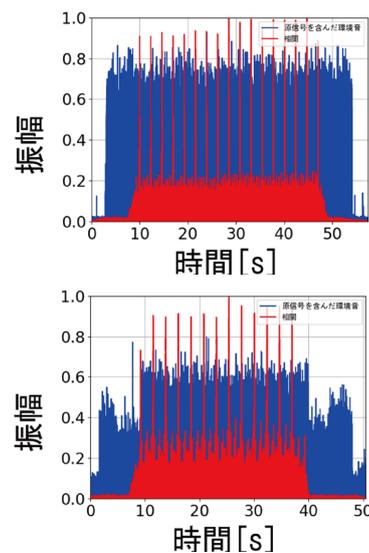


図 4 FSK 信号におけるノイズの影響下での
距離と相関の関係
(上から、振動スピーカーとマイク間の距離 10cm, 3m)

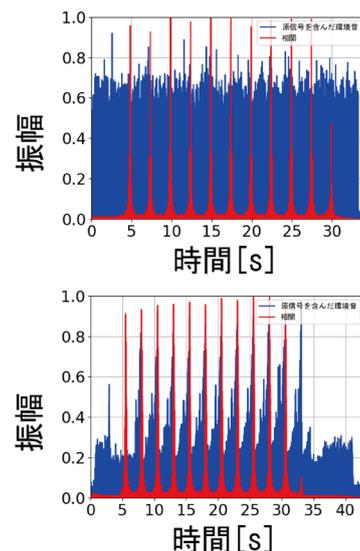


図 5 位相変調した TSP 信号におけるノイズの影響下での
距離と相関の関係
(上から、振動スピーカーとマイク間の距離 10cm, 3m)

装置として、水中音響デバイスを作成した(図6, 7)。本デバイスは音を発信する信号発信デバイスと信号受信デバイスの2つで構成される。

4.1 信号発信デバイス

本デバイスは水中で音響信号を出力することを目的とするため、ステンレス製の防水コンテナ内に Arduino DUE, アンプ, モバイルバッテリー, 振動スピーカーを搭載し、パッキンで防水を行った。

ここで、水中に沈めた箱の中で通常の空中用スピーカーから音を出しても水中と空中とで音速に差がありすぎるため水中には音はほとんど出ていかない。そのため、筐体を直接振動させる振動スピーカーを用いている。防水コンテナは上下に蓋があり、その片方と振動スピーカーをロウ接し一体化を計り、振動スピーカーによって信号発信デバイス全体が振動することで水中に信号を伝える方式とした。

また、水中での実験では波や気象の影響で水中音響デバイスがあらゆる方向に揺さぶられることが予想されるため、内容物の固定具を3Dプリンターで作成した。

なお、慣性のために振動スピーカーはアンプから電圧信号を受けても即座には応答しない。そのため停止している状態から音圧が上がるまでにわずかな時間を要する。そこで、音響信号に先立って20波の500Hzの慣らしの音を出力するようにした。

4.2 信号受信デバイス

AS樹脂製のエアロックコンテナ内に、ICレコーダー(TASCAM Portacapture X8)を搭載した。ここで、防水と水中音を効率よく録音するために、筐体の振動をコンクリートの非破壊検査用マイクロフォン(MW-25F)、および楽器用チューニングマイクロフォン(KTM-1200)を使って録音するものとした。2つのマイクを搭載したのは、どちらが適したデバイスであるか検討するためである。この2つのマイクをICレコーダーのLチャンネルとRチャンネル

にそれぞれ接続した。

なお、内容物はプラスチック段ボールとスタイロボードで固定した。また、マイクロフォン固定用にL字型の建築用金物を激強力両面テープで接着して固定し、これにコンクリートマイクを磁石で固定し、チューニングマイクで挟んだ。マイクの固定位置は指向性をなくするためにエアロックコンテナの底面とした。

5. 原信号を用いた測深の確認

5.1 概要

信号を発信して受信することで直接波と反射波を検知する。直接波と反射波は信号受信デバイスに到達する時間が異なるため、この経過時間の差を用いて反射面までの距離を測ることが可能である。本章では、前章で報告した水中音響デバイスを用いて信号の送受信及び測深ができるかどうか確認した結果を報告する。

5.2 原信号の理想波形の作成

水中では音の伝搬速度が空気中よりも速い。そのため直接波と反射波の区別をつけやすくするために、音響信号の周波数変化率を3章で使用した信号よりも増加させた。また、原信号を出力するデバイスの音響特性に影響を受けないようにするために、Pythonを用いて原信号の理想波形を作成した。信号に使用した周波数の計算式を式(1)に示す。

$$f = 2200t + 500 \quad (1)$$

作成した原信号の理想波形のスペクトログラムを図8に示す。信号として出力した正弦波の波数は22000波とし、信号長は約3.05秒とした。500kHzから14kHzまで時間[t]に伴って周波数が上昇する。なお、実際に出力される信号の周波数は2倍の変化率となる。また、固定の乱数系列



図6 信号発信デバイス(左から、内容物、ロウ接箇所、コンテナ内の様子、外観)



図7 信号受信デバイス(左から、内容物、金物の配置場所、コンテナ内の様子、外観)

をもちいて、位相を変調した。

5.3 原信号のノイズ耐性の検証

原信号のノイズ耐性を調べるために、原信号と原信号にホワイトノイズを足し合わせたものとの相関を取得した。取得した自己相関を図9に示す。足し合わせたホワイトノイズの振幅は、原信号の振幅の0%, 100%, 1000%, 10000%, 100000%の4パターンである。0%は原信号の自己相関を表している。

ノイズが100%, 1000%の時はノイズによる相関がほぼ出ているが、10000%ではノイズによる相関が0.2程度出ている。また、100000%では原信号の相関が確認できずにノイズに埋もれる結果となった。このことから、作成した原信号のノイズ耐性は原信号の1000%までであり、原信号の振幅の1000%のノイズ下で信号を検出でき、原信号の振幅の100000%のノイズ下では信号が検出できない。

5.4 パッシブスピーカー間の距離の測定

提案手法を用いて少なくともスピーカー間の距離を測定できることを確認した。本実験では、空中において同じ音響信号を2つのスピーカーから同時に発信し、その録音音源と原信号との相関を取ることで、スピーカー間の距離を求めることができることを検討した。スピーカー間の距

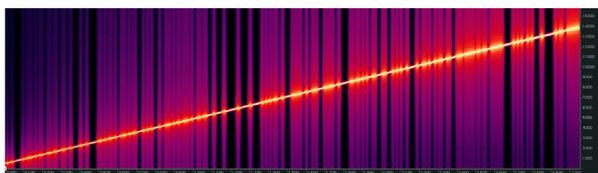
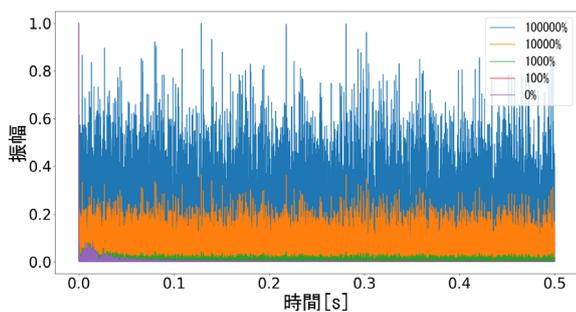


図8 作成した原信号理想波形のスペクトログラム



離に応じた到達時間差を伴う相関波形を観測できれば良い。

実験場所は地面が土で短い芝の生えた場所とし、ICレコーダー (Portacapture X8) に接続したマイク (BSHSM03BK) を一つ、アンプ (LP-V3S) につないだパッシブスピーカー (SX-LFD5) の2つを用いた。

マイクは三脚の上に固定し、その高さを地面から68 cmとした。マイクとスピーカー間の距離が1 mのとき、スピーカー間の距離は30 cmと1 mで録音した。また、マイクとスピーカー間の距離が2 mのときは、スピーカー間の距離は30 cmと1 mと1.5 mとした。

スピーカーから出力した音響信号はPythonによって作成した理想的な原信号である。また、信号の出力に先立って500 Hzの音を20波出力した。実験時の風速は1 m/s以下で、気温Tは12.2°Cであった。したがって風によるドップラーシフトや音速の変動を考慮していない。また、音速を式(2)で求めた。

$$v = 331.5 + 0.6t \quad (2)$$

5.4.1 実験結果

実験で得た音源と原信号の相関を図10に示す。また、到達時間の差から二つのマイク間の距離を求めたものをまとめた表を表1に示す。

マイクとスピーカー間の距離が1 m, 2 mともに信号の相関を得られた。ここで、30 cmの相関のピークが低くなっているのは、後方のスピーカーから出力された音波が前方のスピーカーに阻まれたためと考えられる。

到達時間の差の理論値と、実際の到達時間の差が0.1 ms

図9 ホワイトノイズ影響下の原信号の自己相関

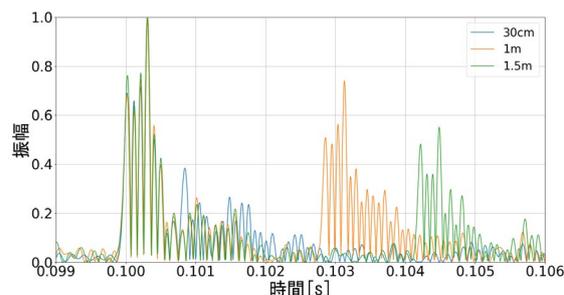
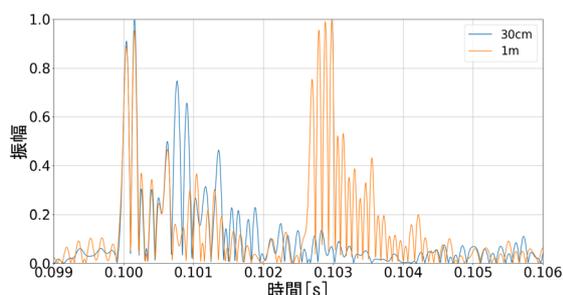
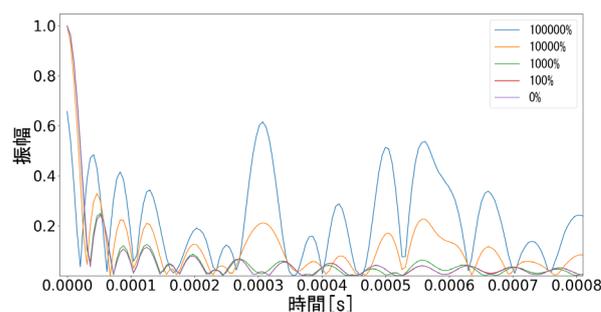


図10 距離測定実験で得られた相関

(左から、マイクとスピーカー間の距離が1 m, 2 m. 凡例はスピーカー間の距離を示す.)

表 1 距離測定実験で算出した距離の関係

スピーカーマイク間の最短距離[m]	1	1	2	2	2
スピーカー間の距離[m]	0.3	1	0.3	1	1.5
実験時の音速[m/s]	338.88	338.88	338.76	338.76	338.76
到達時間の差の理論値[ms]	0.885	2.951	0.886	2.952	4.428
実際の到達時間の差[ms]	0.902	2.981	0.846	2.863	4.489
到達時間の差から求めた距離[m]	0.306	1.010	0.287	0.970	1.521
求めた距離の誤差[%]	1.890	1.020	-4.470	-3.013	1.380

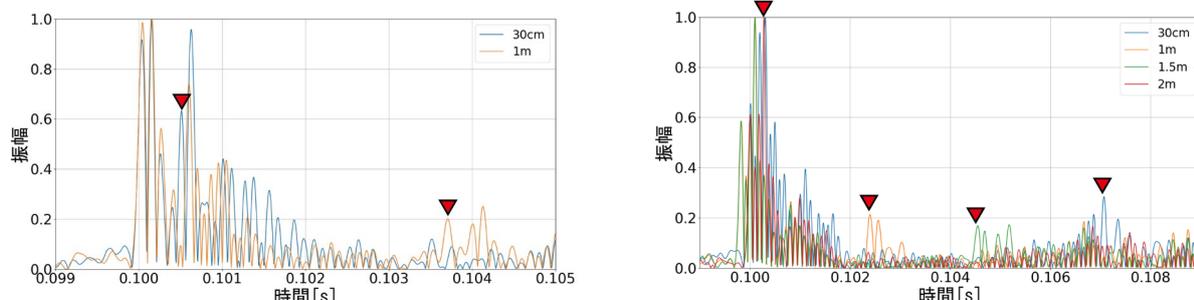


図 11 パッシブスピーカーを用いた反射波検知実験で得られた相関
 (左から、マイクとスピーカー間の距離が 1m, 2m. 凡例は壁との距離を示す.)

表 2 パッシブスピーカーを用いた反射波検知実験で算出した距離の関係

スピーカーマイク間の距離[m]	1	1	2	2	2	2
壁とマイク・スピーカーの距離[m]	0.3	1	0.3	1	1.5	2
実験時の音速[m/s]	338.76	338.76	338.82	338.82	338.82	338.82
到達時間の差の理論値[ms]	0.491	3.649	0.260	2.445	4.739	7.296
実際の到達時間の差[ms]	0.51	3.707	0.200	2.402	4.551	7.333
到達時間の差から求めた壁までの距離[m]	0.306	1.011	0.263	0.990	1.462	2.007
求めた距離の誤差[%]	2.114	1.101	-12.496	-1.034	-2.557	0.347

以下に収まっており、それに伴って到達時間の差から求めた距離も理論値との差が 0.3 m 以下に収まっている。設定した条件においては、距離の誤差の絶対値は最大 4.5% となり、スピーカー間の距離が増えるほど誤差は小さくなる傾向が見られた。

5.5 パッシブスピーカーを用いた反射波の検知

次に、壁に反射した音響信号を観測できることを確認する実験を行った。実験場所はコンクリートの地面と壁がある建物の外壁のある場所とし、IC レコーダー (Portacapture X8) に接続したマイク (BSHSM03BK) を 1 つ、アンプ (LP-V3S) につないだパッシブスピーカー (SX-LFD5) を 1 つ用いた。マイクの高さは地面から 68 cm、マイクとスピーカー間の距離を固定して、スピーカーとマイクとの間隔はそのままに、壁との距離を変化させることで、壁までの距離に応じて直接波と反射波の到達時間差を伴う相関波形が得られれば反射波を検出できたことを示す。本実験では、マイクとスピーカー間の距離と、壁とマイク・スピーカーとの距離を表 1 に示す条件で計測した。

5.5.1 実験結果

実験で得た音源と原信号の相関を図 11 に示す。実験時の

気温から音速 v を求め、到達時間の差を求めた。その到達時間の差から算出した反射面の距離を表 2 に示す。

マイクとスピーカー間の距離が 1 m, 2 m とともに信号の相関を得られた。マイクとスピーカー間の距離が 2 m で壁との距離が 30 cm のときの誤差が大きくなっている。また、マイク・スピーカー間の距離が 2 m で壁まで 0.3 m のときは直接波との分離性が悪く反射波は見えない。

本実験においては、壁とマイク・スピーカーとの距離が離れるほど計測された距離の誤差が小さくなる傾向が見られた。また、反射面である壁との距離が短く、かつスピーカーとマイク間の距離が離れていると計測誤差が大きくなることが示唆された。したがって、直接波と反射波の到達時間差を得るためには、壁までの距離が近い場合はマイク・スピーカー間の距離は短い方がよく、反射面までの距離が遠いなら離れた方が良いと考えられる。

5.6 水中音響デバイスを用いた反射波の検知

水中音響デバイスの信号発信デバイスを用いて前節と同様に壁で反射した信号を測定できることを確認する実験を行った。

実験場所は熊本高等専門学校八代キャンパスの図書室

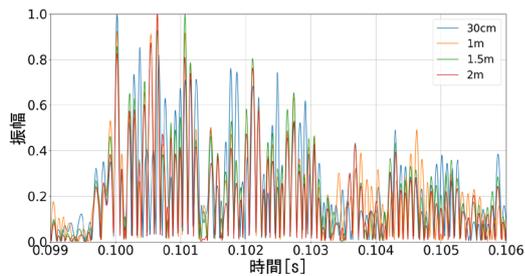


図 12 水中音響デバイスを用いた
反射波検知実験で得られた相関

表 3 パッシブスピーカーを用いた
反射波検知実験で算出した距離の関係

スピーカー・マイク間の距離[m]	1	1
壁とマイク・スピーカーの距離[m]	0.3	1
実験時の音速[m/s]	340.02	340.02
到達時間の差の理論値[ms]	0.489	3.635
実際の到達時間の差[ms]	0.375	3.441
到達時間の差から求めた壁までの距離[m]	0.260	0.963
求めた距離の誤差[%]	-13.194	-3.707

下のピロティの壁で、IC レコーダー (Portacapture X8) に接続したマイク (BSHSM03BK) を 1 つ、信号発信デバイスを用いた。マイクと信号発信デバイス間の距離を固定して、信号発信デバイス、マイクと壁の距離を変化させることで、壁との距離に応じた信号の到達時間の差を得られる手法とした。

実験では、マイクの高さは地面から 68 cm、マイクとスピーカー間の距離を 1 m とし、壁との距離は 30 cm、1 m、1.5 m、2 m と変化させた。

5.6.1 実験結果

本実験で得た音源に対する相関を図 12 に示し、マイクと反射面の距離が測定できたものを表 3 に示す。反射波を確認できたのは 30 cm と 1 m のみであった。また、30 cm と 1 m は検出できたが、パッシブスピーカーを用いた場合よりも自己相関が大幅に増加した。これは、信号発信デバイスで音響信号を出力すると残響が強く、そのためにピーク前後の相関がだらだらと続くものと考えられた。

6. 水中音響デバイスを用いた海底測深

6.1 概要

実際に海中で信号が検出可能かを確認するため、熊本県八代市大島で実験を行った。得られた音源と原信号、空気

中で信号発信デバイスから出力した原信号での比較を行った。空気中での原信号の録音は、信号発信デバイスにコンクリートマイク (MW-25F) を密着させ、チューニングマイク (KTM-1200) を信号発信デバイスの蓋に挟んで録音した。録音したスペクトログラムを図 13 に示す。

6.2 実験手法

水中音響デバイスを水深約 65 cm の地点に浮かべ、送受信間が 30 cm、1 m、3 m、6 m、9 m の地点で原信号を出力し、信号受信デバイス内に搭載した IC レコーダー (PortacaptureX8) に接続したコンクリートマイクとチューニングマイク (KTM-1200) で録音した。

本デバイスはそのまま水に入れると沈むため、実験の際は気泡緩衝材を筒状にして信号発信デバイスの上部に巻き付け、ビニールテープで固定し浮力調整を行った。また、海面にまっすぐに浮くようにビニール被覆の鉄ワイヤーをコンテナに巻き付け、ビニールテープで固定し、さらにスタイロフォームをインシュロックで固定することで浮力の調整を行った。エアロックコンテナは蓋をしてつまみを回すことでシリコン製のパッキンが圧迫されて密閉することで防水性を持たせているが、実験では一ル袋をかぶせ輪ゴムで固定した。

6.3 実験結果

本実験では原信号の反射波の相関が確認できない結果となった。原信号と実験で得られた音源との相関を図 14、15 に示す。今回録音した音源では信号を出力する際に大きなノイズが含まれている箇所があり、相関波形を重ねて描画する際に直接波の相関のピークがそろわなかった。そのため、相関のピークを探す範囲を音源の 1 秒とし、大きなノイズのある箇所を避けて相関を出力した。

泥の上に水中音響デバイスを置いて相関を取得したものを図 16 に示す。水中での挙動が土の上とほぼ同じとすれば、海面の揺れによる装置の動揺の影響は非常に大きいと考えられる。波によって水中音響デバイスが動揺し、信号の通過経路が一定ではなくなってしまった。さらに、チューニングマイクは金物に挟んでいるので、挟んでいる方向にデバイスが揺れるとマイクがずれてノイズが生まれる可能性がある。これを防ぐためには、デバイスを上下左右に動かないように固定する方法を考える必要がある。

また、今回の実験からコンクリートマイクとチューニングマイクの特徴を比較すると、コンクリートマイクはチューニングマイクよりも時間分解能が高く、ノイズ耐性も少し高い

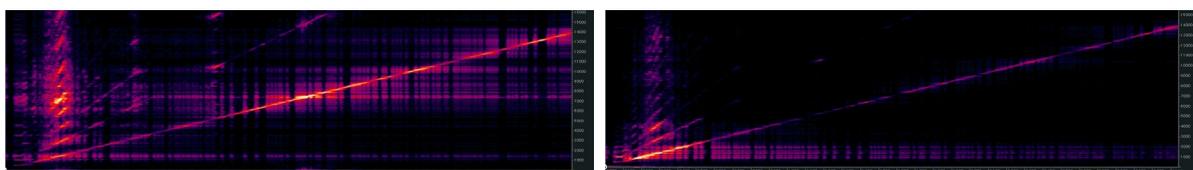


図 13 空気中で得た原信号のスペクトログラム (左から、コンクリートマイク、チューニングマイク)

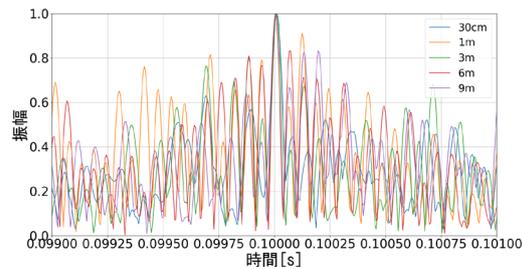
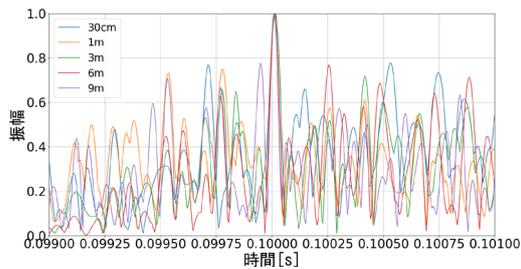


図 14 海中実験でコンクリートマイクを用いて得た相関
(左から理想波形による相関結果, 空气中で録音した原信号による相関結果)

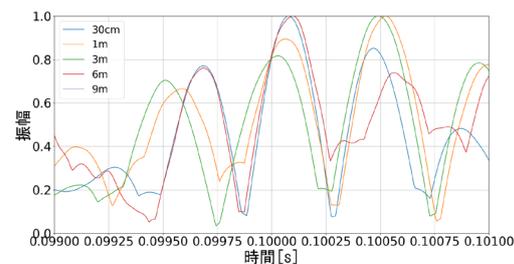
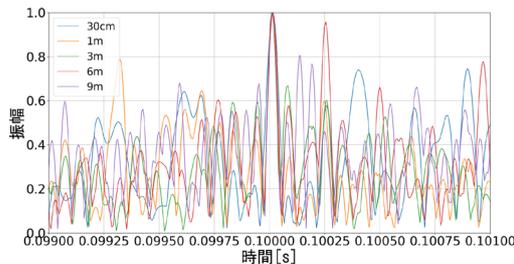


図 15 海中実験でチューニングマイクを用いて得た相関
(左から理想波形による相関結果, 空气中で録音した原信号による相関結果)

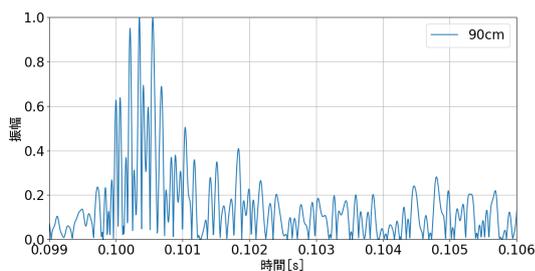


図 16 泥の上で計測した相関

結果となった。また、コンクリートマイクのほうが録音の振幅が大きい。

7. おわりに

本研究の目的は、河口付近に堆積する土砂量を省電力かつ低コストで継続的にモニタリングする手法を明らかにすることであった。本論文では、そのために構成部品が安価で制御が簡単な一般用音響製品とマイコンを組み合わせたデバイスを作成し、出力する音響信号に変調を加えて水深やその地下構造の計測が可能であるか検討した。

実験では、Arduino DUE を用いて FSK 信号と位相変調した TSP 信号の出力が行えることを確認し、相関処理によって録音した音源から音響信号を検出した。また、音響信号を検討した結果、位相変調した TSP 信号の方が相関の検出力が強いことがわかった。

また、水中で音響信号を出力し、それを録音する水中音響デバイスを作成した。これにより 14 kHz までの位相変調した TSP 信号を出力できることと、水中を伝搬した直接波の検出ができた。

反射波を検出できることについては空中で一般的なパツプスピーカと IC レコーダを用いて検証を行い、条件はあるものの反射波を検出できた。また、水中音響デバイスの信号発振デバイスと IC レコーダの組み合わせでも反射波を検出できた。

ただし、水深が約 70 cm における海中で同様の実験を行ったところ、直接波は検出されたものの、海底で反射した信号を検知できなかった。これは水中音響デバイス自体が共鳴しやすく、音響信号が残響しやすいことや、波の影響を受けて動揺したことで海底からの反射波の到達時間が一定とならなかったために反射波の相関のピークが明確には得られなかったことが影響していると考えられる。

今後は、水中音響デバイスの筐体における共振を抑え、相関処理に対する波による動揺の影響を除外するために固定方法を見つけるか、動揺しても大丈夫な程度に信原長を短くする検討が必要である。

謝辞 本研究を遂行するに際してご指導を頂いた森下功啓助教並びに実験に協力して下さったアサリ漁師の宮田様に厚くお礼申し上げます。また、本研究は長岡技術科学大学技術開発教育研究振興会の助成を受け実施しました。

参考文献

- [1] 堤裕昭, 西岡祐玖, 北川昇, 藤芳義裕, 小崎盛行, 山元光晴, 一宮睦雄, 小森田智大: 佐敷干潟におけるアサリ (*Ruditapes philippinarum*) 個体群の季節変動とその変動を制御する要因, 日本ベントス学会誌, 73 巻 1 号, pp1-10(2018)