

# 藻場観測用音響位置特定システムの開発～送受信系～

仲嶋 一\* 出柄 響\*

A basic study of submarine acoustic beacon / communication system mounted to instruments for observation of seaweed beds

Hajime NAKAJIMA\* Hibiki DEGARA\*

## ABSTRACT

We are studying an acoustic beacon / communication system used in observation systems for seaweed beds and their environment. The planned system employs short baseline system to be mounted on relatively small ROVs or observation instruments. We are developing an acoustic transmit / receive system. We developed a system using piezo electric actuators and its transmission characteristic by eye pattern. We use 50 kHz for a carrier frequency, and it was modulated by a binary phase shift keying modulator to an intermediate frequency of 3.125 k symbol/s. We made experiments in the big aquarium of Fukuyama university Marine bio center, but many and strong effect of multi-pass are happened. We report estimations of transmission characteristic of developed system and discuss how to improve it.

キーワード：音源像，行動認識，位置推定，アレイ信号処理，相互相関，スマートベッド。

**Keywords:** Acoustic beacon, Short baseline system, Seaweed bed, ROV, Cross correlation, Smart bed.

## 1. まえがき

我々は福山大学が推進する研究プロジェクトである「瀬戸内の里山・里海学」の一つのサブプロジェクトである「瀬戸内の藻場探査」プロジェクトに取り組んでいる[1][2]。このプロジェクトは、海のゆりかごとも呼ばれる沿岸域の藻場に移動・固定の観測機器を導入し、藻場の環境、生育状態、藻場内の生態系を観測するというものである。瀬戸内海は栄養分が多く豊穡の海である反面、微生物や流れ込む河川の影響で透明度が低く、水深 5m 程度の藻場と言えど上記観測機器の位置を海上から光学的に特定することは極めて困難である。また、藻の生い茂る中を優先の ROV で移動することは、テザーが藻に絡まり航行不能になる可能性が高く、テザーレスによる航行システムが必要とな

る。このようなテザーレス自律航行システムでも、海中における自機の位置の把握が必須となる。このような要求に基づき、我々は海中における位置特定システムの開発を行っている。

透明度の低い水中特に塩水中の伝搬では光を含む電磁波の使用が極めて困難であり、音波がもっぱら用いられ、情報通信においても唯一の手段である。このため、情報通信を兼ねた位置特定音響システムの構築を最終目標とした。前報告ではレジャー用のソナーを送受信器をしたシステムの検討結果を報告したが[3]、ソナーでは素子寸法が大きく、また、指向性が高すぎるため拡散のための凸面鏡を設置する必要とした。一方、実装対象の藻場観測機器は海藻の茂る中を小回り良く移動するために小型である必要があり、送受信器の大型化は実装上問題であった。本稿では、小型化の

ための送受信系の検討結果について報告する。

## 2. 海中音響ビーコン／通信システムのコンセプト

### 2. 1 音響ビーコンシステム

海中音響ビーコンは古くより海底油田掘削等で用いられている技術で、海底の構造物と海上の船舶等の相対位置を確保するために用いられている[4][5]。図1および図2に代表的なビーコンによる位置特定方式を示す。図1は海底(海中)に一つのビーコンを設置し、船舶等の海上設備に複数の受信機(Hydrophone)を特定のベースライン長を以て配置し、個々の受信機への到達時間差及び伝搬時間からビーコンの位置を特定するものである。複数の受信機を海上設備に配置するため、そのベースライン長は比較的短くなり、ショートベースライン方式と呼ばれ、3次元的な方位を特定するため、一般に直交する方位に配置される。この方式は、海中のビーコンが一定周期で音響パルスを送るピンガー方式と、海上より音響パルスを発信し、それを受信したビーコンが音響パルスを返すトランスポンダー方式に二分される。ピンガー方式はシステム構成が簡単であるが、海上設備側では受信機間の到達時間差しか判らないので、ビーコンの到来方位 $\theta$ のみが特定できることになる。海底油田等の海底構造物であれば水深 $Z$ が既知であるので、方位角 $\theta$ と推進 $Z$ からビーコンの3次元位置が特定できる。トランスポンダー方式では、海上設備で発信した時間からビーコンの返信の到達した時間差から絶対距離 $\rho$ を算出することが可能であり精度が向上するとともに、ROV等の水深が不定の対象における3次元位置特定が可能となる。

一方、図2に示す海底に複数のビーコンを設置する方式は、ロングベースライン方式と呼ばれており、トランスポンダー方式のみが可能である。海上設備より個々のビーコンを指定した音響パルス信号を発信し、

対応する音響パルスを受信したビーコンだけが音響パルスを返すことで送受信間の時間遅れから個々のビーコンと海上設備との絶対距離 $\rho$ を算出し、その各々の距離から海上設備の位置を特定するものである。この方式では、海中のビーコンの位置が既知でなければならず、海中の構造物も比較的大きくなければならないので、ROVのような小さく、かつ位置の特定できないものには使用することはできない。このため、本研究で採用する方式は、必然的にショートベースライン方式となる、

### 2. 2 システムコンセプト

提案する海中音響ビーコン／通信システムの概念図を図3に示す。詳細は後述するが、海中機器、母船搭載機器は同等の送受信機能を持つことを想定しており、複数の圧電トランスデューサー等による送受信素子アレイと信号処理ユニットからなる。藻場観測において母船はROVに追従して移動するものとし、ROVの動作水深を5m以浅として通信距離を10mと設置した。また、搭載を予定しているROVは定位置での観測を主目的としており、高速で移動する仕様とはなっておらず、速度としては0.5knot程度になる見込みである。

ROVや固定観測器等海中機は藻場の中で用いられるため0.5m以下程度の小型に設計される。このような小型機に搭載されるため、送受信素子アレイのベースライン長としては0.2m~0.3m程度に抑える必要がある。受信波の位相から伝搬時間差を計測するため、搬送周波数はなるべく高いほうが有利であるが、音波では電磁波に比べて送受信機器の移動や海流によるドップラー広がりやマルチパスによる遅延広がりが大きいことや[4]、高周波になるほど伝搬損失が大きくなることから搬送周波数を際限なく高くとること

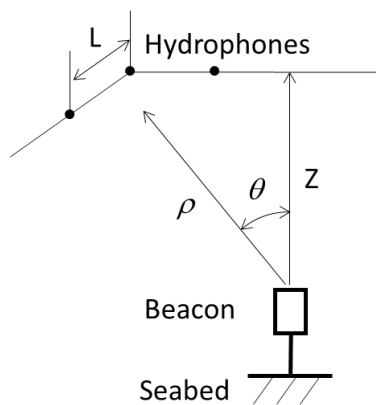


図1 ショートベースライン方式  
Fig.1 Short-baselin system

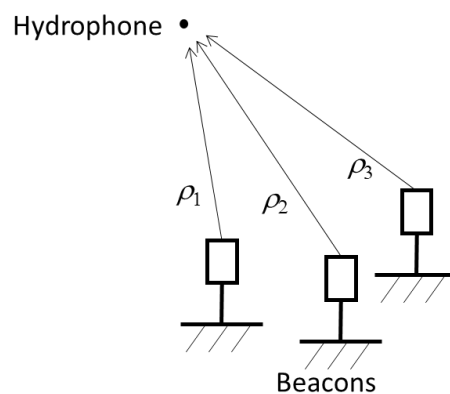


図2 ロングベースライン方式  
Fig.2 Long-baseline system

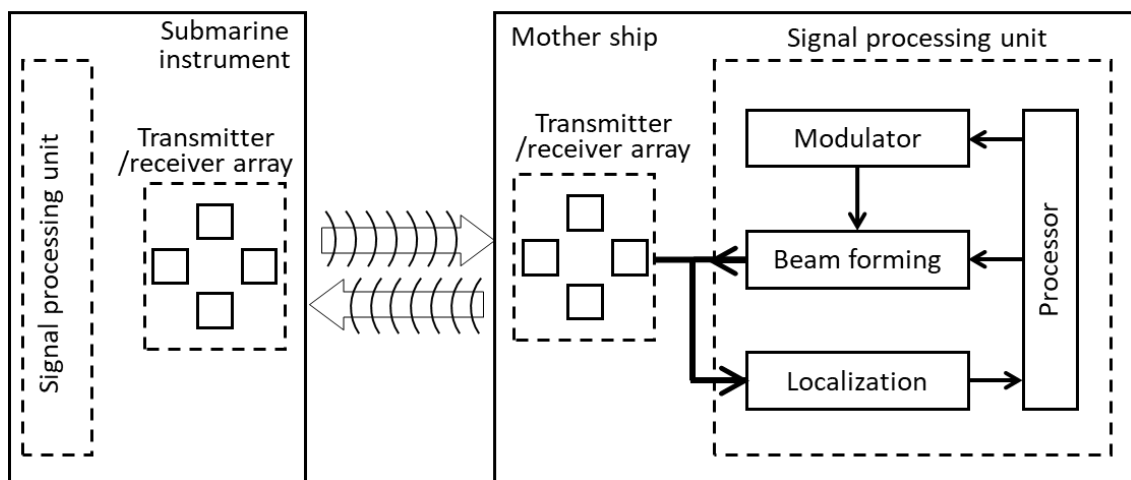


図3 ビーコン／通信システムの基本構成図  
Fig.3 Basic structure of the beacon/communication system.

はできない。ドップラー広がりには送受信距離を  $L$ 、移動体と母船の相対速度を  $V$ 、音速を  $C$ 、音響周波数を  $f$  とした場合、到達波の位相変動  $\phi$  は、

$$\phi = 2\pi L \frac{V}{C^2} f \quad \dots (1)$$

で求めることができる。本プロジェクトにおける ROV の設計最大速度は 2 knot (≒3.6 km/h) であり、 $L=10\text{m}$ 、 $C=1500\text{m/s}$ 、許容位相変動を BPSK の限界である 1/4 周期として、搬送波は 56 kHz 以下となる。

藻場では海底や岩礁など近接して多くの反射体が存在し先に述べたマルチパスによる遅延広がりにより信号劣化を引き起こす。また、海面も刻々と反射角度を変化させる除去の困難な動的障害となる。このため、ビーコンと母船送受信機広がり角の狭いビームで相互に音響信号を伝送し合うことが好ましい。一方、個々の送受信素子アレイにとって送受信相手の機器がどの方位に存在しているかは不特定であるため、初期状態等互いの位置が不明な状態では全方位に亘って狭角のビームを掃引して探索する必要がある。このような要求から、送受信素子アレイは、水平円周上に複数の素子を配置した構成とし移相器によって個々の素子へ入力する信号の遅れ時間を制御することで角度選択性の高い狭角の音響ビームを形成する方針としている。図では 4 方位に素子を配置しているが、各素子の発信音響波が干渉しなければならないため、最終的な構成としては、比較的広がり角の大きな小型発信素子を密に配列しフェーズドアレイを想定している。

### 3. 送受信系の基礎検討

#### 3. 1 送受信素子の選定

前章で述べたように送受信器は小型の素子が必要であり、かつ小型の ROV で使用することから定電圧で駆動できることが好ましい。このような要求から、送信素子として積層圧電アクチュエータ（トーチキン AE0505D16DF 駆動面寸法：5×5 mm、共振周波：69 kHz）を選定した。この素子の最大発生力は 0.34 MPa であり、音響波の発生源としては十分である。一方、本素子を受信機として使用した場合には十分な受信感度が得られず、直径 20mm、振動周波数 5 MHz の超音波振動子（メーカー不明）を用いた。これは出力回路としてチャージアンプを用いていることが原因である可能性があり、今後共用化の可能性を検討していく。

#### 3. 2 評価用回路

評価送受信システムの概略構成を図 4 に示す。送信系としては、搬送波周波数 50 kHz の BPSK 変調とした。シンボルはアイパターン評価のため M 系列符号とし、特性多項式 (4,1) の 4bit または特性多項式 (5,2) の 5bit、シンボルレートは 6.25 k symbol/s または 3.125 k symbol/s で構成した。

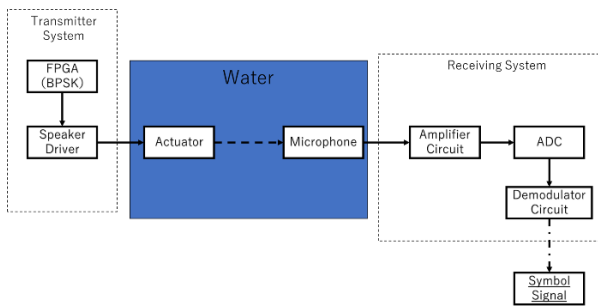


図4 送受信システムの概略構成

Fig.4 An outline of transmit and receive system.

ロジック回路はFPGA (Cyclone IV) 内で構成し、FPGA 出力をゲート駆動信号としてMOS トランジスタのHブリッジにより積層圧電アクチュエータを駆動している。

検出回路の初段アンプには容量 100 pF と抵抗 27 kΩ を並列に使用し、58 kHz を遮断周波数とする高域遮断フィルタを構成し、不要な低域で積分特性が現れないようにしている。また、後段は遮断周波数

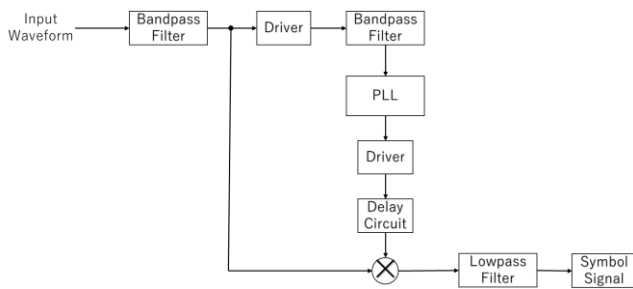


図5 復調回路のブロック図

Fig.5 A block diagram of demodulator .



(a)



(B)

図6 マリンバイオセンターの大型水槽での送受信実験

106 Hz, 141 kHz, 利得 7.5 倍の帯域通過フィルタ 2 段で構成されている。復調回路としては、図5に示すようなPLLを用いた構成を考えているが、評価段階においては、変調におけるクロックを復調にも用いることが可能であり、PLLによる同期検波は実施せず、Matlabにおけるソフトウェア上で、検波及び復調を行っている。

### 3.3 送受信実験

作製した送受信系を用い、因島にある福山大学マリ

ンバイオ

センター

の大型水

槽を借用

して実験

を実施し

た。水槽

は幅 \* m,

奥行き \* m,

深さ 5m

で種々の

近海魚が

飼育され

ており、

樹脂製の

岩礁が設

置されて

いる。ま

た、海水

が循環さ

れており、

水面は常

に波打っ

ている。送

受信系は、

図5のよ

うにバッ

クヤード

からアル

ミニウム製

のポールに

装着して、

水槽内に

配置した。

送信器を

図中丸印

で囲んで

いる。

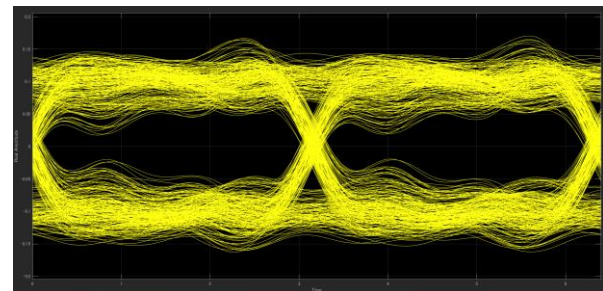
図7に受

信信号の

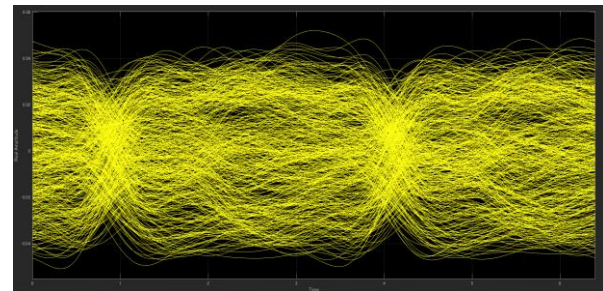
アイパター

ンの1例

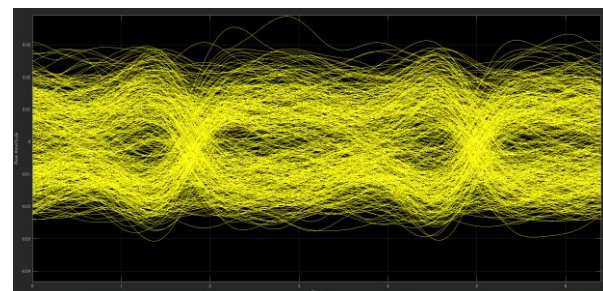
を示す。本



(a) 0.5 m



(b) 1 m



(c) 2 m

図7 受信信号のアイパターンによる評価

Fig.7 An estimation of received signals by eye-patterns.

送信器を水面より約 0.5 m の深さに水面と平行に設置している。(a)の送受信間距離 0.5 m ではアイパターンは開いているが、(b)の 1 m ではアイが全く開いていない。一方、(c)の 2 m では、さらに距離が離れているにも関わらず若干アイパターンが改善

している.これは水面での反射によるマルチパスが関係していると推察され,一旦は直接波の減少に対する水面反射波の増加により信号品質が大幅に劣化したものの,距離が増加し,水面に対する反射角度が浅くなったことで,水面による散乱反射波の多くが受信機に到達せず,深さ方向に抜けていったためと考えられる.図8に送受信系の設置深度を約2mとした場合のアイパターンを示している.図7で同様の送受信間距離1mに比較して良好なパターンが得られており,水面での反射が減少したためと考えられる.

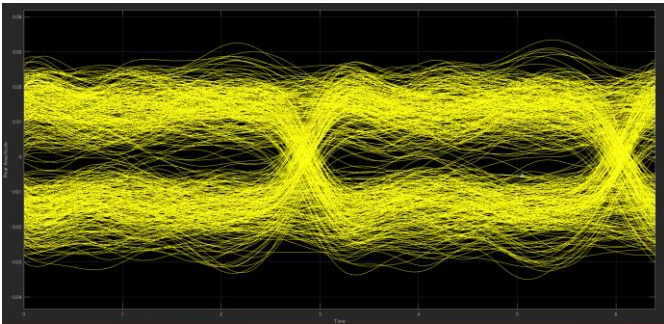


図8 深度約2m,送受信器間距離1mでのアイパターン  
Fig.8 An eye-pattern at a distance of 1.0m and a depth of 2 m.

#### 4. まとめ

藻場観測機器の位置を特定するための音響位置特定システムの送受信系の開発について報告した.マルチパスと考えられる信号劣化が激しく,現状で目的の10mの通信距離を確保できる見通しは得られていない.距離に対する信号振幅の低下も大きいことから,送信波の狭角度化により信号低下とマルチパス波の発生両方を抑えることが有効と考えられ,今後の課題である.

#### 参考文献

- [1] 田中聡,村上祐紀,五賀正典,仲嶋一:藻場観測のための海底カメラの開発,福山大学工学部紀要, Vol.42, pp.9-17 (2019).
- [2] 田中聡,仲嶋一,五賀正典:瀬戸内海の藻場探査を行う海底カメラの運用に関する研究,計測自動制御学会第23回パターン計測シンポジウム (2018).
- [3] 仲嶋一,松若泰大:福山大学工学部紀要, Vol.43, pp.9-17 (2019)
- [4] 岸康太郎,野々瀬茂,富岡源一郎:音響式大深度位置検知装置,日本造船学会誌. **613**, 368-373, (1980).
- [5] 横山謙三,山下重之:海洋開発における計測と制御,計測と制御. **9**(5), 361-376, (1970).

