

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1059

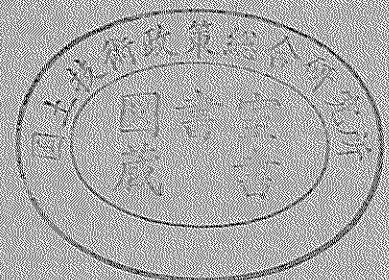
September 2003

超音波を利用した水中座標計測技術の開発

白 井 一 洋

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan



## 目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 既存の水中測位技術	4
2.1 測位のための音源	4
2.2 測位方法	4
2.3 信号処理	6
3. 開発目標と基本システムの構成	6
3.1 開発目標	6
3.2 測位システムの構成	6
4. 測位システムの原理	7
4.1 座標, 向き, 傾斜同時測定方法	7
4.2 音速補正の方法	7
4.3 M系列	8
4.4 M系列信号による伝搬時間の測定	9
4.5 M系列信号による同時放射信号の分離	10
4.6 位相変調 (P S K) 方式	10
5. シミュレーション	11
5.1 M系列の識別とノイズの影響について	11
5.2 測位精度の比較	12
6. 水槽実験	14
6.1 伝搬時間の測定精度	14
6.2 信号の分離	18
6.3 測位精度	19
7. 高精度化の為の検討	23
7.1 送受波器の形状	23
7.2 ドップラー効果の影響	23
8. 結論	24
9. あとがき	25
参考文献	25

# Development of Underwater ultrasonic positioning system

Kazuhiro SHIRAI

## Synopsis

The underwater construction in port and harbor is shifting from human strength to mechanization for efficiency improvement and the safety improvement. The underwater positioning technology influences the accuracy of construction. An existing underwater positioning technology was made for taking a position such as the dive boats and ROV, which moved the wide range. Therefore, this technology can not be used for the underwater construction.

We developed the underwater positioning system, which can measure the position of underwater construction machine by accuracy of  $\pm 10\text{cm}$  or less. The underwater construction machine usually moves within 20m in radius from barge. This system is made up of 3 responders and 4 receivers. The main measurement errors of a past system are time and sound wave velocity. We excluded these and achieved making to high accuracy. M-sequence was used to improve the accuracy of the time measurement. The average speed of sound in water was obtained as a solution of the simultaneous equations.

The following results were obtained by the simulation and the water tank experiment.

- 1) The following errors are included in the measurement of time in the use of M-sequence.  
$$-2T < \text{measurement error} < T \quad T: \text{Sampling time of AD converter}$$
- 2) The base line of 5.9m or more is necessary to maintain the accuracy of  $\pm 10\text{cm}$ , when time can be measured until  $1\mu$  second.
- 3) When all the measurement values at time are included of the same error level, the measurement accuracy of position is not influenced.
- 4) The Doppler effect caused at the movement speed of the underwater construction machine does not influence on the measurement accuracy.

**Key Words:** underwater positioning system, SBL, M-sequence, ultrasonic

---

Senior Researcher, Construction and Control system Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-8445063

Fax : +81-46-8440575

e-mail:shirai@pari.go.jp

# 超音波を利用した水中座標計測技術の開発

白井一洋

## 要 旨

港湾工事の水中部施工は、施工の効率化、安全性の向上のため人力施工から機械化施工に移行しつつあり、近年、水中施工機械の遠隔操作やロボット化の研究が進められている。水中での測位技術は施工機械の施工精度に直接影響する重要な要素技術であるが、既存の水中測位技術は、広範囲を移動する潜水艇や ROV 等の測位を目的に造られたため、水中施工機械の施工精度を満足できるような精度の技術は現状では存在しない。

本研究では、台船から半径 20m 以内で水中工事を行う水中施工機械の位置を、 $\pm 10\text{cm}$  以下の精度で測位する水中測位技術の開発を行った。測位システムは 3 個のレスポングと 4 個の受波器からなる SBL 方式で、従来の水中測位の主な誤差要因である、超音波の伝搬時間と伝搬速度の測定誤差を排除することにより高精度測位を達成した。伝搬時間の測定精度を向上させるため、M 系列信号で位相変調した PSK 信号を超音波に使用し、相関法により伝搬時間を測定した。超音波の伝搬速度は受波器を 4 個使用することにより、移動体の座標値と超音波の伝搬速度を未知数として、連立方程式の解として求めた。これにより、測位の度に伝搬経路全体の平均音速を得ることができる。

本研究では、シミュレーションと小規模な水槽実験により以下の結果を得た。

1) M 系列信号で変調した PSK 信号の相関法による測定値には以下の誤差が含まれる。

$$-2T < \text{誤差} < T \quad T: \text{AD 変換器のサンプリングタイム}$$

2) 本システムは測位対象物が水深 20m で、超音波の伝搬時間を  $1\mu\text{sec}$  まで計測できる場合、 $\pm 10\text{cm}$  の測位精度を維持するためにはベースライン長 5.9m 以上が必要である。

3) 伝搬時間測定誤差が、4 個の受波器で計測した伝搬時間に同程度含まれていると、測位精度には影響を与えない。

4) 測位対象物の移動で生じるドップラー効果による測位精度への影響は、ROV や水中バックホー等の移動速度では現れない。

キーワード：水中測位，SBL，M 系列，超音波

---

施工・制御技術部 主任研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5063 Fax:046-844-0575 e-mail:shirai@pari.go.jp

## 1. まえがき

港湾工事の水中部の施工は、潜水士による人力作業が大半である。しかし、近年の港湾工事の大規模、大水深化に対応するため、水中工事の機械化、ロボット化の研究が進められている。これらの施工機械の水中部での位置を正確に知ることは、施工精度に直接影響するだけでなく、施工効率や安全性の向上に大きな影響を与える。捨て石均し機や浚渫ロボット等のすでに実用化されている水中施工機械の位置計測の方法は、施工機械から海面上にまでロッドを伸ばし、レーザ測位儀やGPSにより行われている。<sup>1)~4)</sup>しかし、この方法は水深が深い場合や潮流が速い場合には使用できない。水中での測位方式は1960年代中頃より検討使用され、水中部は音響機器を用いた相対測位により測定し、これに海上部の基準点（母船等）の絶対位置を考慮し、水中部での絶対位置を算出するものである。<sup>5)</sup>これらの水中部での音響測位は、ROV、AUV、有人潜水船、水中調査ロボット、潜水士等の位置測定や誘導等に使用され、計測範囲は数kmから数百mで、測位精度は数mから数十cm程度である。

本研究では、台船から半径20m程度の範囲内で、移動、作業する水中施工機械の位置を10cm以下の精度で測定する方法について開発を行った。測定はSBL方式により、測位の主要な誤差要因である伝搬時間と音速の測定精度を高めることにより高精度化を図った。伝搬時間の計測精度を高めるために、M系列信号で位相変調した超音波を使用し、相互相関関数を求め伝搬時間を計測した。音速の測定精度を高めるためには受波器を4個使用し、X-Y-Z座標と音速を未知数とした連立方程式の解として伝搬経路全体の平均音速を求めた。

## 2. 既存の水中測位技術

ROVや水中施工機械等の水中移動体の測位には超音波を使用し、基準点（母船や海底）からの相対位置を測定する音響測位装置が広く利用されている。

### 2.1 測位のための音源

測位のために超音波を放射する音源として、ピング、トランスポンダ、レスポндаの3種類があり、これらを総称して、ビーコンと呼んでいる。使用される超音波周波数は20kHz~100kHzの範囲が多い。これらの音源は以下の特徴を有している。

#### (1) ピンガ

タイマーを内蔵し、一定の周期で超音波を発信するも

ので、超音波の到来角度のみ検出可能であり、簡易な位置出しに使用される。

#### (2) トランスポンダ

船舶、ROV等から発せられた超音波信号を受信して応答信号を発信するもので、3次元位置測定が可能であり水中移動体の位置測定に一般的に使用されている。

#### (3) レスポнда

船上と結ばれたケーブルを通じてトリガー信号を受け超音波を発信するもので、3次元位置測定が可能でトランスポンダと比較すると片道だけの伝搬時間を測定しているので精度が良い。しかし、水中移動体と母船の間がケーブルで結ばれている必要があるためauvや広範囲を移動する物体の測定は出来ない。用途としては、ROVや水中カメラ等の有線で移動する機器の位置出しに使われる。

## 2.2 測位方法

音響測位の方法には、海底に設置されたトランスポンダを座標基準点にする場合や、船舶に装備された送受波器を座標基準点とする場合がある。この座標基準点のとりかたにより以下の3つの測位方法に分類される。

- ① LBL (Long Base Line) 方式
- ② SBL (Short Base Line) 方式
- ③ SSBL (Super Short Base Line) 方式

#### (1) LBL (Long Base Line) 方式

本方式は、図-1に示す様に3個以上のトランスポンダを海底面に設置し、船舶や水中移動体上の送受波器と各トランスポンダのスラントレンジ（直距離）を測定することにより、トランスポンダの座標系における送受波器の位置を算出する方式である。

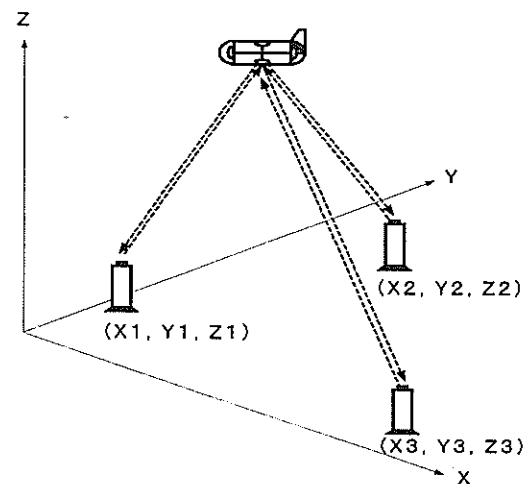


図-1 LBL方式

海底に設置したトランスポンダの間隔がベースライン長であり、長いものでは数 km にも及ぶものもあり、LBL 方式と呼ばれている。

LBL 方式では、海底面に設置したトランスポンダの位置を測定前に計測しておく必要があり、この作業をキャリブレーションと呼び、かなりの時間を要する。キャリブレーションの精度がシステム全体の測位精度に影響するため非常に重要な作業となる。

長所は、広範囲にわたって高い測位精度が得られ、船体の動揺補正が不要なことである。

短所は、複数のトランスポンダを海底に設置し、キャリブレーションを行わなければならない事である。

### (2)SBL (Short Base Line) 方式

本方式は図-2 に示す様に移動体に 1 個のビーコンを設

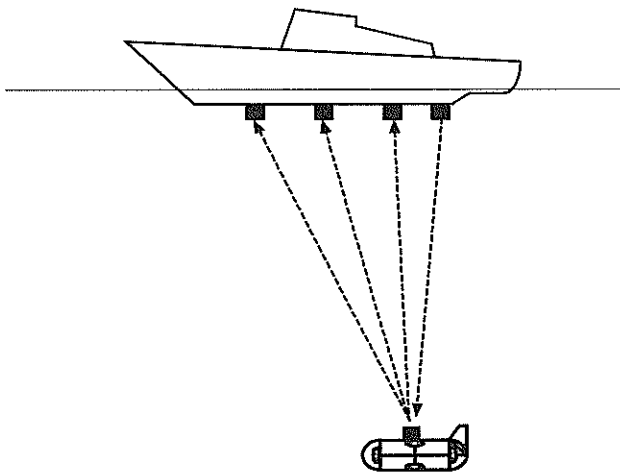


図-2 SBL方式

置し、船舶に 3 個以上の受波器を装備する。この場合にベースライン長は受波器の間隔であり、船舶の大きさによって制限され数 m ~ 数十 m で SBL 方式と呼ばれている。測位方法はトランスポンダ及びレスポンダを使用する場合と、ピンガを使用する場合で異なる。

#### a) トランスポンダ、レスポンダによる方法

船舶に装備された送波器から信号を発信し、トランスポンダからの応答信号を受信する。各受波器への信号の到達時間差からトランスポンダの方向を測定し、同時にスラントレンジを計測する。この 2 つの情報からトランスポンダの座標を算出する。

#### b) ピンガによる方法

ピンガはスラントレンジの測定が出来ないため、水中移動体に水圧計等を装備し水深を測定する。この水深値とピンガからの各受波器への超音波の到達時間差により測定したピンガの方向により、ピンガの座標を計算する。

長所は、ビーコンが 1 個で測定でき、キャリブレーションが不要である。LBL 方式に比較して運用が容易である。

短所は、水深が深くなると精度が低下する。船体動揺を補正するため高精度のロール、ピッチ検出器が必要になる。

#### (3)SSBL (Super Short Base Line) 方式

本方式は SBL 方式と同様の機器の配置（水中移動体に 1 個のビーコンを設置し、船舶に 3 個以上の受波器を装備する。）であるが、ベースライン長を使用する超音波の伝搬波長の数波長以下に短くしたもので、SSBL 方式と呼ばれている。ベースライン長が短いため、各受波器で受信される信号の位相差からトランスポンダの方向を測定

表-1 各方式の特徴

	LBL	SBL		SSBL	
		ピンガ	トランスポンダ レスポンダ	ピンガ	トランスポンダ レスポンダ
測位精度	10~20m	水深の 20%の半径の海域で水深の 1%	水深の 20%の半径の海域で水深の 1%. さらに広い海域でスラントレンジの 1~3%	水深の 20%の半径の海域で水深の 1%	水深の 20%の半径の海域で水深の 1%. さらに広い海域でスラントレンジの 1~3%
測位範囲	水深の数倍の半径の海域	水深と同じ半径の海域	水深の 2 ~ 3 倍の半径の海域	水深と同じ半径の海域	水深の 2 ~ 3 倍の半径の海域
ロール、ピッチ計測	無	有	有	有	有
キャリブレーション	有	無	無	無	無

し、SBL方式と同様にスラントレンジを測定し、ビーコンの位置を算出する。

長所は、1個の容器の中に受波器アレーを納めることが出来、SBL方式よりもさらに運用が容易になったことである。その他の特徴は、SBL方式と同様である。

### 2.3 信号処理

位置測定では、音波の伝搬時間の測定精度が位置精度に大きく影響をあたえる。通常はパルスを使用し、閾値を設定し、受信電圧がそれ以上の電圧レベルに達したときに超音波の到達時刻として測定しているものであるが、この方法はノイズに弱いので測定が不安定になることや、実際の到達時間より少し長めに到達時間が計測される。ノイズに強い信号処理の方法として、チャープ信号を使ったパルス圧縮方式とM系列信号を使った位相変調方式がある。

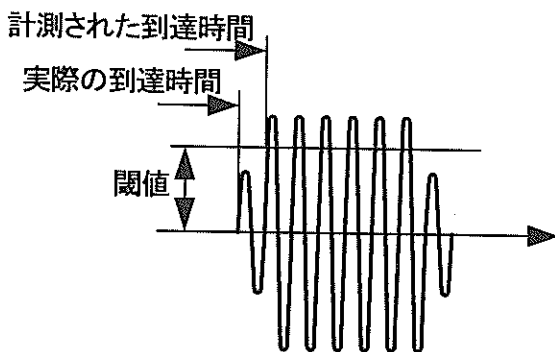


図-3 閾値による計測

#### (1) チャープ信号を使ったパルス圧縮方式

運輸省第四港湾建設局(現九州地方整備局)で開発した方式は、搬送波の周波数がパルス幅  $\tau$  の間で時間に対して  $f_1$  から  $f_2$  に直線的に変化するチャープ信号(図-4参照)を使用し、受信信号をチャープ信号に対する疑似マッチドフィルターとして直線遅延を持つフィルターを考え、このフィルターを通過させることにより、受信パルスは圧縮され、その実頭値は大きくなる。<sup>6) 7)</sup>

この方式の利点は①パルス圧縮によりS/N比が改善される。②周波数成分は伝搬中に変動を受けにくいのでパルス圧縮により安定した信号が得られる。③周波数に対し自由度があり、周波数弁別能力に優れている。④低周波数で高精度が得られる。

#### (2) M系列信号を使った位相変調方式

M系列は、0と1の数値の並びで周期的な疑似不規則系列の1つである。この系列は、強い自己相関のためノ

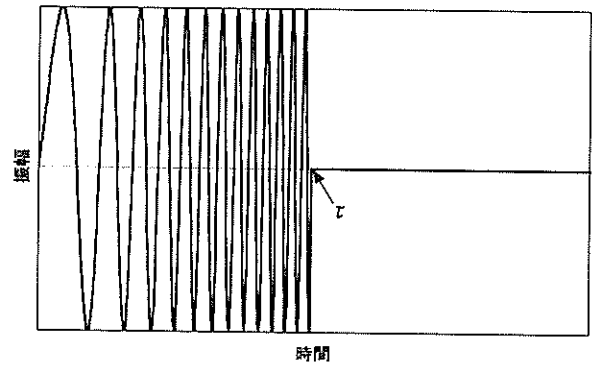


図-4 チャープ信号

イズに強く、時間分解能に優れているので、水中測位<sup>8)</sup>や海洋音響トモグラフィ<sup>9)</sup>に使用されている。

本研究では、M系列信号を使用し、伝搬時間測定・信号の識別を行っているので、4章でM系列信号について詳しく説明する。

## 3. 開発目標と測位システムの構成

本システムは水中施工機械やROVの位置計測に使用するもので、GPSにより台船の位置を測定し、台船に装備したSBL方式により水中移動体の水中での位置を測定するものである。

### 3.1 開発目標

本システムは、水中移動体の測位装置として使用するもので、水中バックホウを台船上から遠隔操作し、捨て石均しを行う場合を想定する。測定項目は水中バックホウの位置(X-Y-Z座標)、傾斜、向きを同時にリアルタイム(1秒間に2回程度)に計測する。位置の測定精度は±10cm以下とする。測定範囲は半径20m以下の範囲とする。

### 3.2 測位システムの構成

本システムの機器配置は、図-5に示す様に台船側に3個のGPSと4個以上の受波器を装備し、バックホウ側に3個のレスポングを装備する。台船の座標、傾斜、向きは3個のGPSにより測定し、台船側からの電気信号によりバックホウに装備した3個のレスポングから同時に超音波を発信する。この信号を台船側の受波器で受信し、3個のレスポングの座標を測定する。この3点の座標値からバックホウの座標、傾斜、向きを計算により求める。

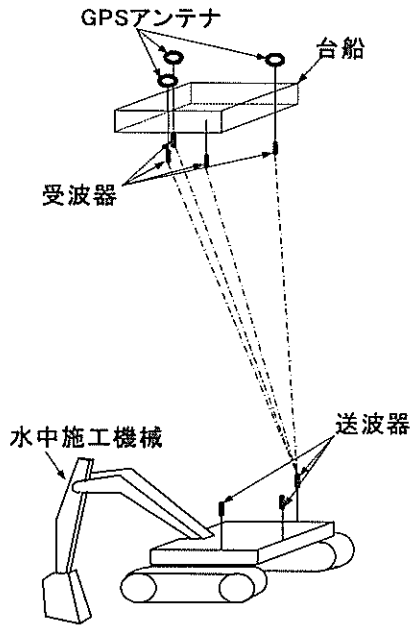


図-5 測位システムの構成

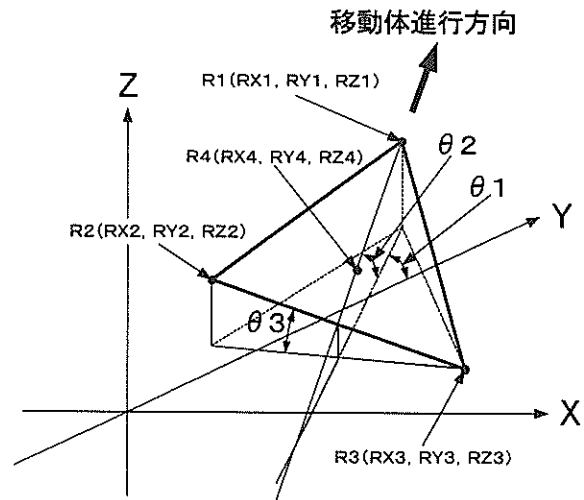


図-6 レスポンダと移動体の座標

X軸とR2-R3の成す角度とする。

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{RY_2 - RY_3}{RX_2 - RX_3} \right) \quad (4)$$

#### 4. 測位システムの原理

本システムは水中移動体の座標、向き、傾斜を同時に測定するものであり、このためにM系列信号を使用し、各送波器からの受波信号を識別している。また、超音波の伝搬時間から距離を求めるためには、超音波の伝搬範囲全体の伝搬速度を知る必要が有る。このため受波器を4個にし超音波の伝搬速度を未知数として計算により求めることとした。

##### 4.1 座標、向き、傾斜同時測定方法

水中移動体にレスポндаを正三角形の頂点に配置し、この3個のレスポнда(R1, R2, R3)から同時に音波を発信する。3個のレスポндаから発信される超音波信号を識別するため、それぞれ異なったM系列で変調した超音波信号を使用する。

移動体の座標は、3個のレスポндаで形成される三角形の重心(R4)として求める。図-6に示すように3個のレスポнда(R1, R2, R3)の座標から重心R4の座標は下式で求まる。

$$RX_4 = (RX_1 + RX_2 + RX_3) / 3 \quad (1)$$

$$RY_4 = (RY_1 + RY_2 + RY_3) / 3 \quad (2)$$

$$RZ_4 = (RZ_1 + RZ_2 + RZ_3) / 3 \quad (3)$$

移動体の向き  $\theta_1$  はY軸とR1-R4の成す角度又は

移動体の進行方向に対する傾斜角度  $\theta_2$  は

$$RX_5 = (RX_2 + RX_3) / 2 \quad (5)$$

$$RY_5 = (RY_2 + RY_3) / 2 \quad (6)$$

$$RZ_5 = (RZ_2 + RZ_3) / 2 \quad (7)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{RZ_1 - RZ_5}{\sqrt{(RX_1 - RX_5)^2 + (RY_1 - RY_5)^2}} \quad (8)$$

移動体の進行方向と直角方向に対する傾斜角度  $\theta_3$  は

$$\theta_3 = \tan^{-1} \frac{RZ_2 - RZ_3}{\sqrt{(RX_2 - RX_3)^2 + (RY_2 - RY_3)^2}} \quad (9)$$

となる。

##### 4.2 音速補正の方法

測位において大きな誤差要因となるものの1つに、音の伝搬速度の値がある。海水中での音速は水温、圧力、塩分濃度の影響を受け変化する。このため、精度を必要とする場合には、水温、塩分濃度を測定し、実験式(Mackenzieの式)により音速を算出したり、音速測定用の送受波器を備えたりするものもある。しかし、このような方法で測定される音速は、特定の地点の音速であり、伝搬経路全体の平均音速を求めることは出来ない。

本装置では受波器を4個使用し、1個のレスポндаの座標(XR, YR, ZR)と音速Cを未知数とする、連立方程式に



より求める。

$$(C * T1)^2 = (XR - X1)^2 + (YR - Y1)^2 + (ZR - Z1)^2 \quad (10)$$

$$(C * T2)^2 = (XR - X2)^2 + (YR - Y2)^2 + (ZR - Z2)^2 \quad (11)$$

$$(C * T3)^2 = (XR - X3)^2 + (YR - Y3)^2 + (ZR - Z3)^2 \quad (12)$$

$$(C * T4)^2 = (XR - X4)^2 + (YR - Y4)^2 + (ZR - Z4)^2 \quad (13)$$

$T1 \sim T4$  : レスポンダから各受波器までの測定された伝搬時間

$X1 \sim X4, Y1 \sim Y4, Z1 \sim Z4$

: 各受波器の X, Y, Z 座標

この方法により、常時音速を考慮したレスポンスの座標を求める事が出来る。

#### 4. 3M系列

本装置では、3個のレスポンスから同時に発信した超音波信号を識別するため、伝搬時間の計測精度を高めるといふ2つの目的でM系列信号を使用している。

M系列とは、Maximum length sequence の最初のMをとったM-sequence の和訳で、最大長系列または最大周期列といわれる疑似不規則信号の1つである。M系列は1950年代後半に登場し、現在、スペクトル拡散通信などの通信分野で広く用いられているほか、遅延時間の測定や乱数発生、故障診断など計測制御技術に用いられている。<sup>10)</sup>

M系列は0と1の数値の並びで、シフトレジスタと加算器で作ることの出来る疑似不規則信号である。ただし、シフトレジスタの中間部分から取り出されるタップはレジスタのどの位置から取り出してもよいわけではなく、特定の組み合わせを使った場合のみ取り出されるデータ系列(0と1の並び)をM系列と呼ぶ。<sup>11)</sup> 図-7のn段のシフトレジスタの各段に係数  $f_i$  ( $f_i=0$  又は  $1$ ) をかけ、加算機(排他的論理和)により加算され、出力される。 $a_i$  はシフトレジスタの初期値が全て0である場合を除いて、次々と  $a_i$  (0 又は  $1$ ) が出力される。この出力される系列  $a_i$  の周期は  $f_i$  のとり方により長くなったり短くなったりする。この  $f_i$  を適切に決めるとn段のシフトレジスタを用いて発生することの出来る最大周期系列が得られ、この系列はM系列と呼ばれる。n段のシフトレジスタにより得られるM系列の周期は  $2^n - 1$  となる。また、1周期中に含まれる0と1の数の割合は一定で、1の数が  $2^{n-1}$  個、0の数が  $2^{n-1} - 1$  個となり0の数が1の数よりひとつ少なくなる。

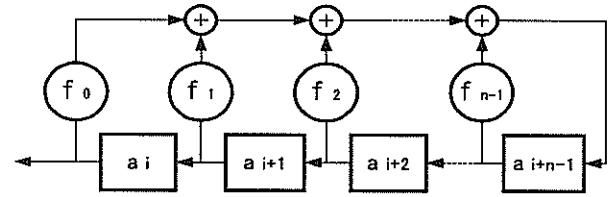


図-7 シフトレジスタと加算機による出力回路

図-7の回路で出力される系列は

$$a_{i+n} = \sum_{j=0}^{n-1} f_j \times a_{i+j} \quad (14)$$

上式は  $f_n = 1$  とすると

$$\sum_{j=0}^n f_j \times a_{i+j} = \sum_{j=0}^{n-1} f_j \times a_{i+j} + f_n \times a_{i+n} = a_{i+n} + f_n \times a_{i+n} = 0 \quad (15)$$

(排他的論理和)

ここで  $a_{i+j} = x^j \times a_i$  とする遅延演算子  $x$  を(15)式に代入

すると

$$\left( \sum_{j=0}^n f_j \times x^j \right) a_i = 0 \quad (16)$$

$$f(x) = \sum_{j=0}^n f_j \times x^j \quad (f_0 = 1, f_n = 1) \quad (17)$$

(17)式は、特性多項式と呼ばれ出力される系列を決めるものである。出力される系列がM系列であるためには、特性多項式は原始多項式と呼ばれる多項式でなければならない。この原始多項式は多数発表されており、これを利用して用途に応じたM系列を発生させることが出来る。

例として、原始多項式  $f(x) = x^4 + x + 1$  によりM系列を求める。

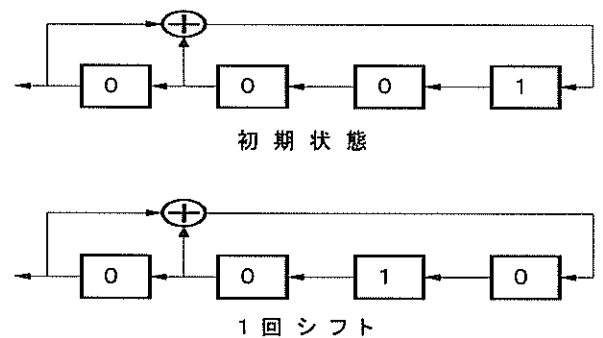


図-8 M系列の発生回路

原始多項式から  $f_4 = 1, f_3 = f_2 = 0, f_1 = f_0 = 1$  であるので、図-8で示される4段のシフトレジスタが得られる。初期値を0001とした場合、図-8の初期状態の様に、

各レジスタに数値が入る。次にシフトレジスタの数値を左にシフトさせ先頭のレジスタの数値が出力される。右端のレジスタには左端とその隣のレジスタの数値の加算（排他的論理和）した数値が入る。この動作を繰り返すことにより周期的なM系列信号が出力される。この場合、図-9 に示すM系列信号が得られる。周期は  $2^4 - 1 = 15$ 、1の数は8個、0の数は7個となる。

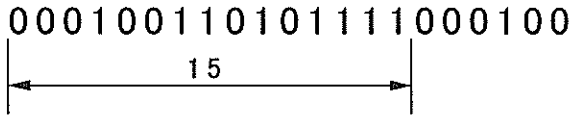


図-9 M系列信号

この0, 1の信号を0を-1, 1を1にそれぞれ対応させた系列を考えると、自己相関関数  $R(\tau)$  は、次式で与えられる。

$$R(\tau) = 1 \quad \tau = 0, (2^n - 1)\Delta t, 2(2^n - 1)\Delta t, \dots \quad (18)$$

の場合

$$= \frac{-1}{2^n - 1} \quad \tau \text{ が上記以外の場合}$$

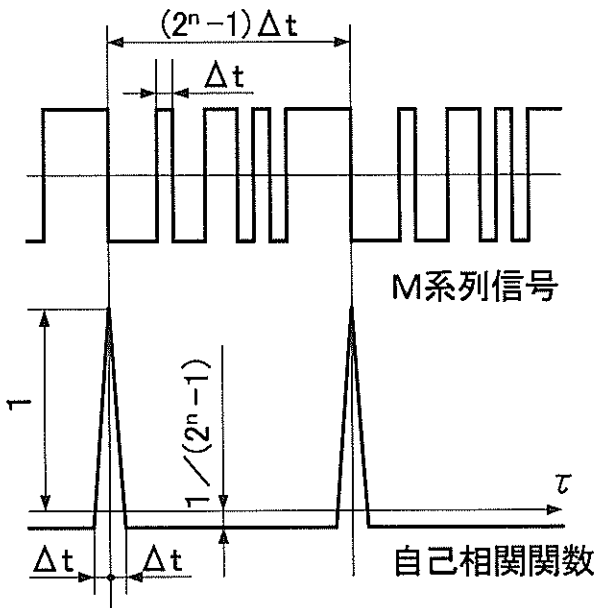


図-10 M系列信号と自己相関関数

$\Delta t$  を充分小さく取り  $n$  を大きく取れば、自己相関関数はディラックの  $\delta$  関数とみなされ白色雑音と近似して良いことが分かる。<sup>10)</sup>

このM系列の自己相関が鋭いピークを持つことを利用

して、遅延時間の測定が行える。

#### 4. 4M系列による伝搬時間の測定

図-11 に示す様に、超音波の送受波を考えると、送波した信号  $x(t)$  が水中を伝搬する間に減衰し、ある時間  $\tau_0$

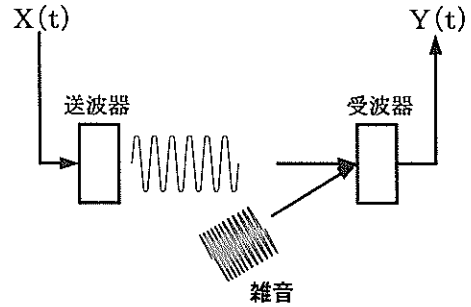


図-11 伝搬時間の測定

経過後受波器に到達し、更に、雑音が混入した信号  $y(t)$  として測定される。

$$y(t) = A \times x(t - \tau_0) + n(t) \quad (19)$$

$A$  : 減衰を表す定数  
 $n(t)$  : 雑音

$x(t)$  と  $y(t)$  の相互相関関数  $R_{xy}(\tau)$  を求める。

ただし、 $n(t)$  は  $x(t)$  と相関が無いものとする。

$$R_{xy}(\tau) = \langle x(t - \tau)y(t) \rangle \quad (20)$$

$$= \langle x(t - \tau)\{Ax(t - \tau_0) + n(t)\} \rangle$$

$$= \langle Ax(t - \tau)x(t - \tau_0) \rangle + \langle x(t - \tau)n(t) \rangle$$

$$= AR_{xx}(\tau - \tau_0)$$

ここで  $R_{xx}(\cdot)$  は自己相関関数

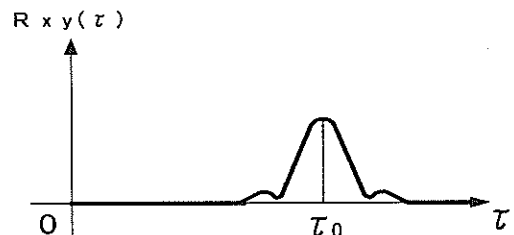


図-12 相互相関関数

自己相関関数は原点に於いて最大となるので、図-12 に示す様に  $\tau = \tau_0$  で相互相関関数は最大となる。

よって、送波信号と受波信号の相互相関関数が最大となる点  $\tau_0$  を求めることにより超音波の伝搬時間を測定することが出来る。

#### 4.5 M系列信号による同時放射信号の分離

本システムでは、水中移動体の向きと傾斜を測定するため、3個の超音波送波器を水中移動体に装備し、これらの送波器から同時に超音波を放射する。台船側の各受波器の受波信号を送波器毎の信号に分離して、伝搬時間を計測する必要がある。図-13 に示す様に、受波器からの出力信号は、各送波器からの送波信号が伝搬時間毎に時間差を持って重ね合わされた信号として出力される。

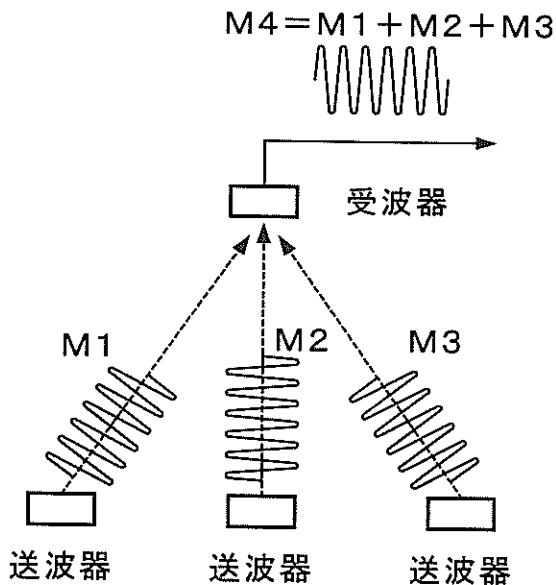


図-13 複数の送波器からの受波信号

通常使用されているパルス波では、パルス幅を到達時間差よりも短くすることにより、音波の分離は可能であるが、送受波器の位置関係が不明な場合、どの送波器からの受波信号であるかを特定できない。

M系列の場合、送波信号と受波信号の相互相関関数を求め伝搬時間を測定するため、相互相関関数が異なるM系列間で小さくなれば受波信号の分離は可能となるが、一般的には異なるM系列間の相互相関関数の絶対値は大きい。

しかし、特定のM系列の組み合わせには相互相関関数の値が小さい3値だけを取り、その出現頻度の既知であるM系列の対があり、これをプリファードペア (preferred pair) なM系列と言う。<sup>12)</sup>

例として、5段のM系列で次の3つの原始多項式

(21) (22) (23) で示されるM系列は互いにプリファードペアなM系列である。(24)式はそれ以外の原始多項式である。

$$f(x) = x^5 + x^4 + x^2 + x + 1 \quad (21)$$

$$f(x) = x^5 + x^3 + x^2 + x + 1 \quad (22)$$

$$f(x) = x^5 + x^2 + 1 \quad (23)$$

$$f(x) = x^5 + x^4 + x^3 + x + 1 \quad (24)$$

原始多項式(21)式から得られるM系列の自己相関関数、および他の原始多項式から得られるM系列との相互相関関数を図-14 に示す。

図中のM1は(22)式から得られるM系列、M2は(23)式から得られるM系列、M3は(24)式から得られるM系列をそれぞれ表している。

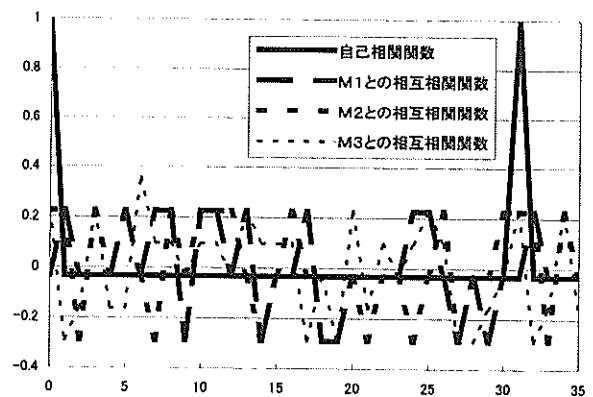


図-14 M系列の相関関数

5段のM系列の周期は  $2^5 - 1 = 31$  であるので、自己相関関数は31毎に最大値1を示す。また、M1・M2との相互相関値の絶対値の最大値は0.29であり、M3は0.35であった。3個の送波器は、水中移動体上のほぼ同じ位置に設置するため受波レベルは大差ないと考えられるため、自己相関関数は相互相関関数の3倍以上であるので十分識別が可能であると考えられる。

#### 4.6 位相変調 (PSK) 方式

M系列信号をそのまま送波器に与えても、信号を発信することが出来ない。このため超音波の送波に適した搬送波を変調して、M系列信号を送る必要がある。超音波送波器は固有振動数により発信しているので、周波数変調が難しい。このため、位相を変化させるPSK (phase shift keying) 方式が主流である。

PSKは、搬送波の位相を主に  $0^\circ$  と  $180^\circ$  に切り替え

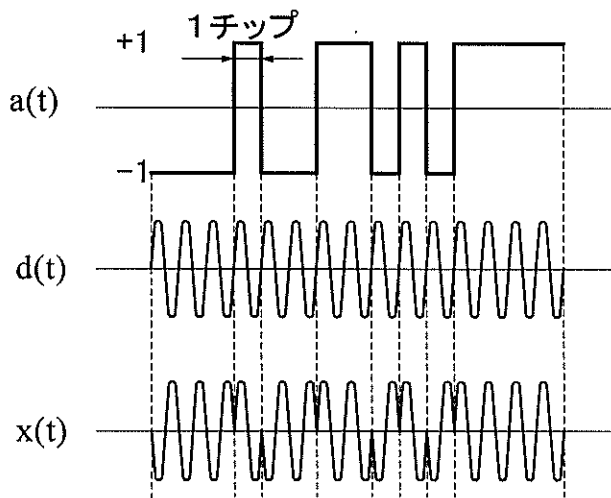


図-15 PSK

て変調し、超音波を発信する方式である。

搬送波を  $d(t) = \sin(\omega t)$  とすると

$$\begin{aligned}
 x(t) &= \sin(\omega t + \phi) \quad \phi = 0, \pi & (25) \\
 &= a(t) \times \sin(\omega t) \quad a(t) = \pm 1 \\
 &= a(t) \times d(t)
 \end{aligned}$$

(25)式より  $a(t)$  は、0, 1 からなるM系列信号を-1, 1に変換したものであり、 $a(t)$ と搬送波  $d(t)$ を掛け算することにより、M系列信号により位相変調した信号が得られる。図-15にPSKを示す。 $x(t)$ が超音波送波器に与えられる超音波信号となる。図-15にはM系列信号1チップの中に搬送波が1周期分描かれているが、実際には送波器の立ち上がり特性を考慮して、1チップに搬送波は2周期以上含まれている。

図-16は原始多項式  $f(x) = x^4 + x + 1$  から作られるM系列信号を1チップ内に2周期分入るようにしてPSKにより搬送波を変調した信号とその自己相関関数である。周期は4次の原始多項式で有るので  $2^4 - 1 = 15$  であり、自己相関関数の最大値と一致している。

## 5. シミュレーション

### 5.1 M系列の識別とノイズの影響について

ノイズを含んだM系列信号の識別が相互相関関数を求めることにより可能であることを確認するため、数値計算を行った。

計算条件は以下の通りである。

- ・M系列M1の原始多項式： $f(x) = x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$
- ・M系列M2の原始多項式： $f(x) = x^5 + x^3 + x^2 + x + 1$

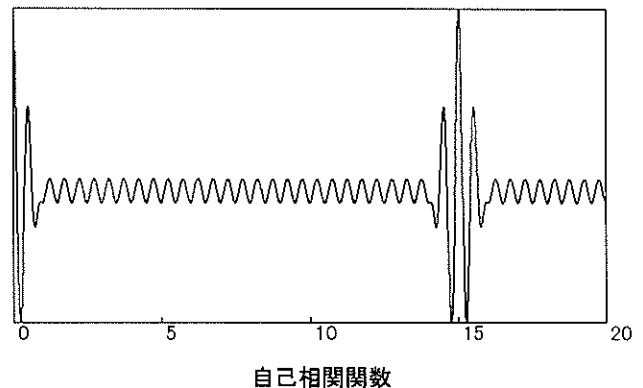
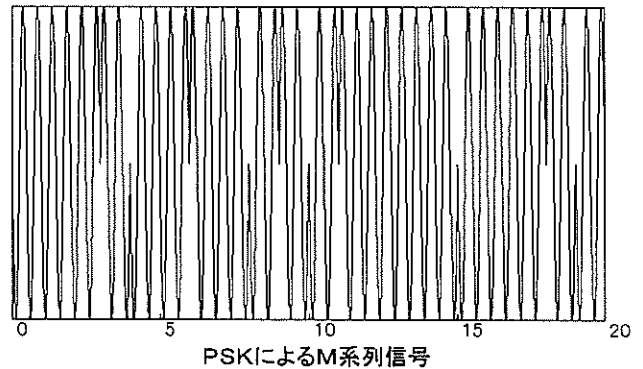


図-16 PSKによるM系列の自己相関関数

(M1とM2はプリファードペアなM系列)

- ・M1の開始点：1000点目から  
(図-17では横軸を1/1000で表示)
- ・M2の開始点：1200点目から
- ・PSK：1チップ内に2周期の搬送波を含む
- ・サンプリング数：搬送波1周期当たり10点
- ・ノイズ：Visual BasicのRnd関数により発生
- ・ノイズレベル：PSK信号の振幅の2.5倍

### 計算方法

各原始多項式からM系列を求め、M系列で搬送波を位相変調してM系列1周期分のPSK信号を得る。PSK信号を開始点1(1000番目)と1.2(1200番目)から1周期分表示し、信号M1、M2とする。ノイズをRnd関数により発生させ、振幅を信号M1、M2の2.5倍とし、ランダムノイズM3とする。信号M1とM2及びランダムノイズM3を加算したものを、信号M4とする。信号M4と各PSK信号1周期分の相互相関関数を求め、相関M5、M6とする。各相互相関関数の絶対値の最大値を求め、最大値点に表示する。

計算の結果、図-17に示す様に相関関数の最大値の点、ノイズの中でも明確に現れ、各PSK信号の開始点と一致していることが分かる。

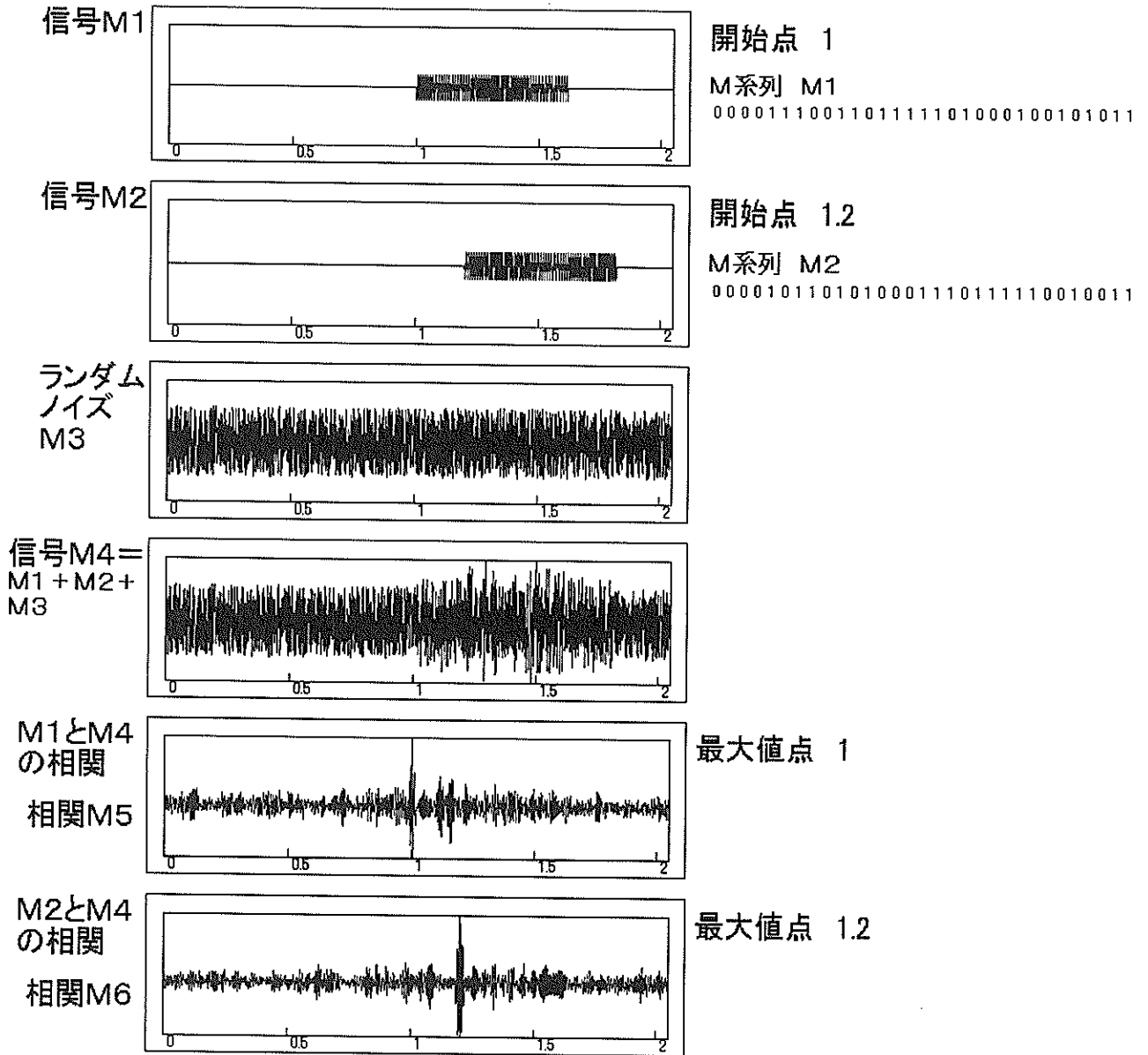


図-17 2種類のM系列信号の分離

5.2 測位精度の比較

従来方式のSBL方式と新方式での測位精度の比較を、シミュレーションにより行う。

比較の条件は、

- ・受波器の3点の配置は同一で本方式の4個目の受波器を三角形の重心に配置するものとする。
- ・伝搬時間の計測値は同一とする。
- ・超音波の伝搬速度  $c$  は  $1500\text{m/s}$  とし、従来方式の伝搬速度は  $0.3\%$  の誤差 ( $1495.5\text{m/s}$ ) を含むものとする。

(1) レスポンダの座標計算

図-18 に示す様に受波器は同一平面上に配置する。

a) 従来方式

レスポндаの座標を未知数  $x, y, z$  とし、レスポндаから各受波器までの距離と伝搬時間の関係は、次式で表される。

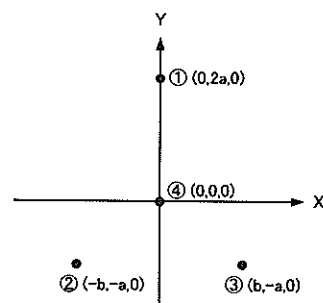


図-18 受波器の配置

$$x^2 + (y-2a)^2 + z^2 = (ct_1)^2 \quad (26)$$

$$(x+b)^2 + (y+a)^2 + z^2 = (ct_2)^2 \quad (27)$$

$$(x-b)^2 + (y+a)^2 + z^2 = (ct_3)^2 \quad (28)$$

上記連立方程式を解く、

レスポンドの座標は次式で表される。

$$x = \frac{c^2(t_2^2 - t_3^2)}{4b} \quad (29)$$

$$y = \frac{-c^2(2t_1^2 - t_2^2 - t_3^2) - 2b^2 + 6a^2}{12a} \quad (30)$$

#### b) 新方式

未知数を送波器の座標  $x, y, z$  と超音波の伝搬速度  $c$  とし、(26)~(28)式に④の受波器までの式(31)を加え、連立方程式を解く、

$$x^2 + y^2 + z^2 = (ct_4)^2 \quad (31)$$

レスポンドの座標は次式で求まる。

$$c^2 = \frac{2b^2 + 6a^2}{(t_1^2 + t_2^2 + t_3^2 - 3t_4^2)} \quad (32)$$

$$x = \frac{(t_2^2 - t_3^2)(b^2 + 3a^2)}{2b(t_1^2 + t_2^2 + t_3^2 - 3t_4^2)} \quad (33)$$

$$y = a - \frac{(t_1^2 - t_4^2)(b^2 + 3a^2)}{2a(t_1^2 + t_2^2 + t_3^2 - 3t_4^2)} \quad (34)$$

#### (2) レスポンドの移動と測位誤差

図-19 に示す様にレスポンドを受波器の下 20m の距離

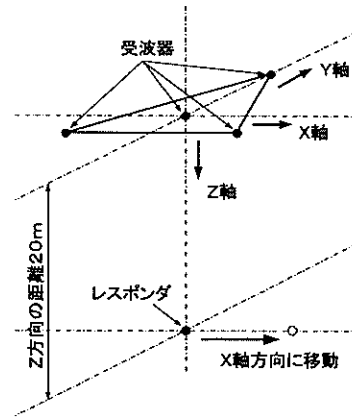
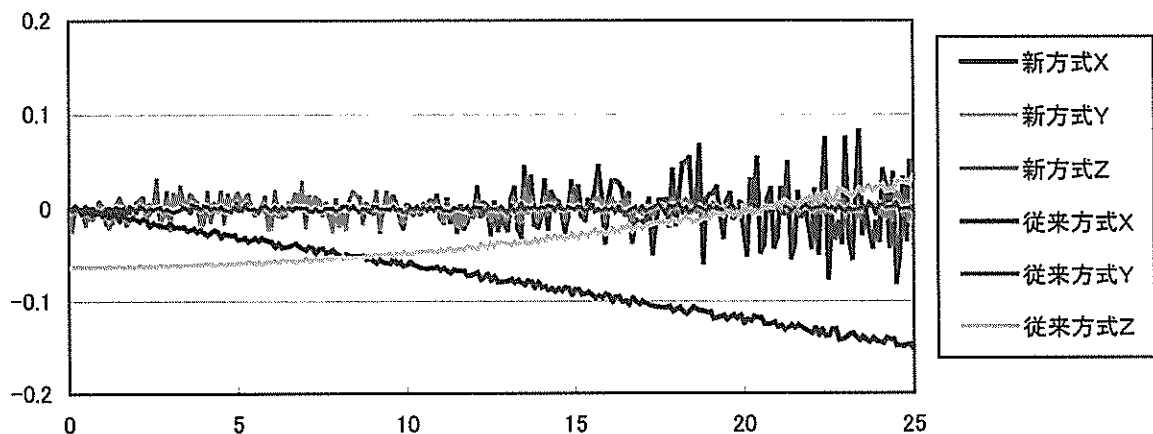


図-19 受波器の配置とレスポンドの移動方向

に置いて、X-Y座標の原点からX軸方向に水平移動させた場合の、レスポンドの座標に対する測位誤差を求めた。

シミュレーションの方法は、最初にレスポンドと各受波器の距離を幾何学的に求める。求めた各距離から超音波の伝搬速度を  $c = 1500\text{m/s}$  とし、伝搬時間を計算する。このとき、伝搬時間の有効数字の桁数を任意に決め、有効数字以下は四捨五入とする。測位誤差は最初に決めたレスポンドの座標と計算により求めたレスポンドの座標の差で表している。

図-20 は  $a=2\text{m}$  (一辺の長さ約 6.93m の正三角形)、伝搬時間の有効桁数 6 桁 ( $0.1\ \mu\text{sec}$  を四捨五入) とした場合の計算結果である。従来方式より精度が良く、測位誤差は  $\pm 0.1\text{m}$  以下と成っている。



a=1m(一辺の長さ約 3.46m の正三角形)

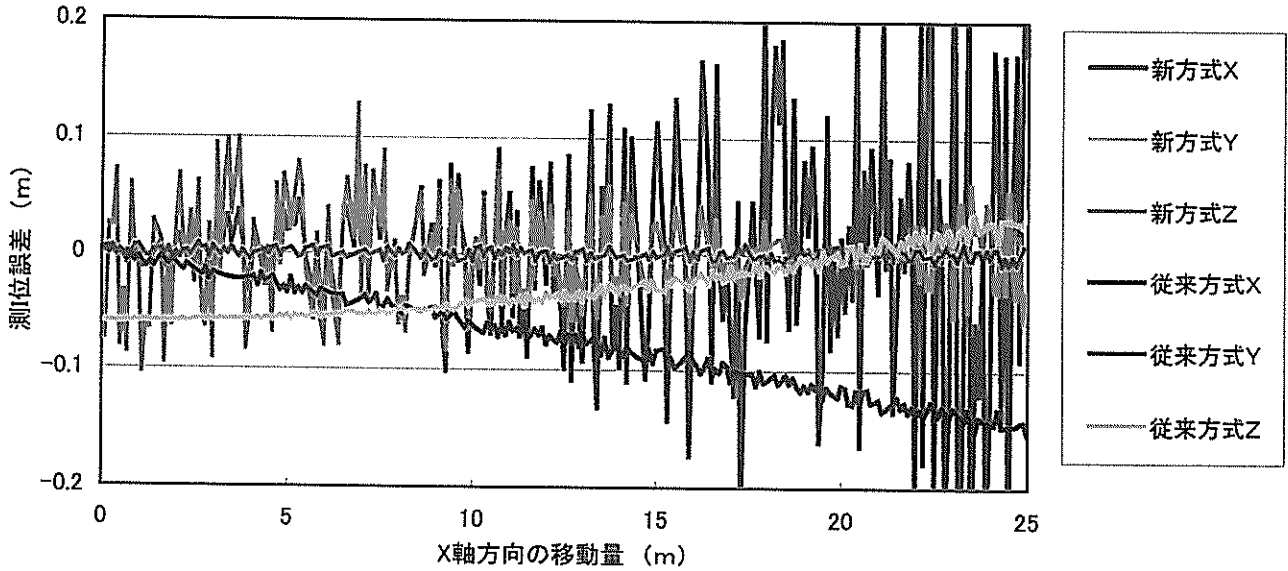


図-21 計算結果 2

a=3m(一辺の長さ約 10.39m の正三角形)

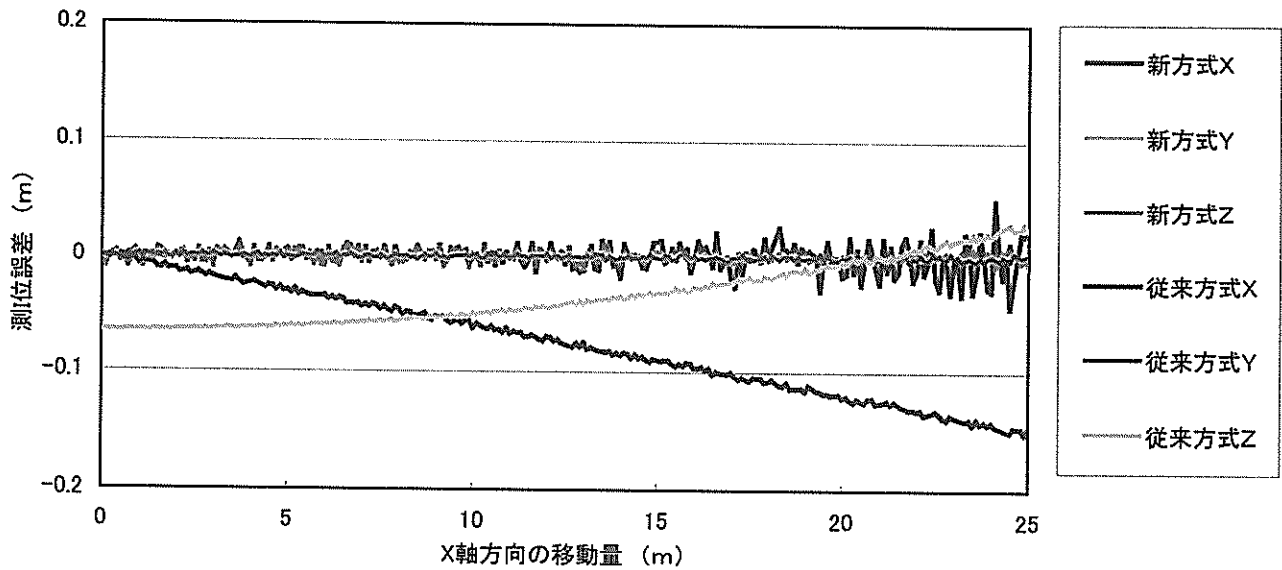


図-22 計算結果 3

図-20～22 から解る様に、新方式はベースライン長を長くすることが、高精度測位に非常に重要である。計算の結果、測位対象物が水深 20m で超音波の伝搬時間を 1  $\mu$  sec まで計測できる場合、 $\pm 10$ cm の測位精度を維持するためには、受波器が一辺 5.9m 以上の正三角形を形成する必要がある。一例として、水中バックホウ支援台船「伯稜」の船体主要寸法は長さ 28.0m $\times$ 幅 13.4m $\times$ 深さ 3.0m であり<sup>13)</sup>、本方式の受波器を取り付けるのに十分な大きさである。

## 6. 水槽実験

### 6.1 伝搬時間の測定精度

超音波の伝搬時間の測定精度が測位精度に直接影響するため、従来の閾値による伝搬時間の測定と M 系列による相関値による伝搬時間の測定を行った。

#### (1) 測定条件

図-23 に示す様に、水深 40cm 付近に送受波器を一直線上に約 2m 離して配置し、受波器を 1mm 毎に 1 cm まで送

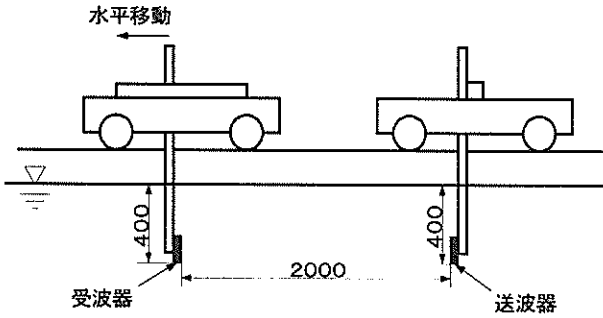


図-23 伝搬時間の測定精度

受波器間が広がる方向に水平移動させ、最後に更に1cm移動させて各位置で伝搬時間を2回ずつ測定した。

受波器の移動は、繰り返し位置決め精度±0.05mm、分解能0.05mmの精密多点位置決め電動スライダに受波器を固定した鋼管を取り付けて行った。

使用した超音波・AD変換器は、以下の通りである。

・ 閾値による方法

超音波の種類： トーンバースト波

送波電圧： ±75V

周波数： 200kHz

パルス幅： 10 波長

繰り返し周期： 100ms

・ M系列信号

原始多項式： $f(x) = x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$

搬送波周波数： 200kHz

送波電圧： ±75V

・ AD変換器

サンプリング周波数： 5MHz

分解能： 8ビット

(2)測定結果

表-2 及び図-24 に閾値による伝搬時間の測定結果を示す。太線が最大受波電圧の1/3を閾値とした場合、細線が最大受波電圧の1/2を閾値とした場合である。

閾値を最大受波電圧の1/3とした場合、ノイズによりデータが飛んでいるのが解る。

図-25 に受波器を2mm移動した地点で計測した受波波形を示す。水深が浅かったため、直接波の後方に水面反射が受波されている。実際の到達時間は波形から判断した時間である。閾値が最大値の1/3の時の到達時間の測定はノイズを測定しているため実際の到達時間より早くなっているため測定エラーである。閾値が最大値の1/2の時の到達時間は、実際の到達時間より半波長程度の遅れとなっている。

表-3 及び図-26 にPSK信号(M系列)による伝搬時間の測定結果を示す。M系列信号を位相変調する場合に

表-2 トーンバースト波の測定値 (ms)

移動距離	閾値を最大値の1/3		閾値を最大値の1/2	
	測定値1	測定値2	測定値1	測定値2
0mm	1.327	1.327	1.327	1.3292
1	1.3274	1.3256	1.33	1.3298
2	1.3194	1.3302	1.3304	1.3306
3	1.3286	1.3286	1.3308	1.3306
4	1.3294	1.256	1.3314	1.3318
5	1.3306	1.2864	1.3328	1.33
6	1.3326	1.3328	1.333	1.333
7	1.3316	1.3312	1.3336	1.3334
8	1.2606	1.332	1.3342	1.3338
9	1.2872	1.3348	1.3348	1.335
10	1.3354	1.2664	1.3356	1.3356
20	1.2802	1.32	1.3424	1.3418

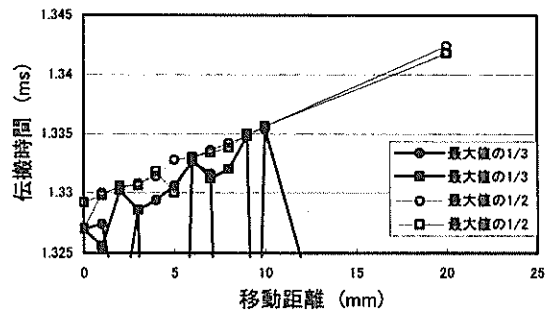


図-24 閾値による伝搬時間計測値と移動距離

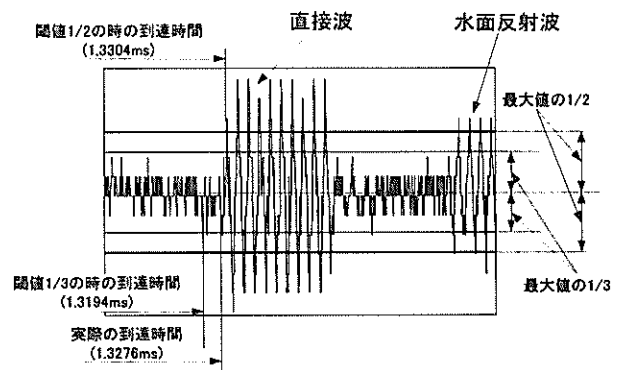


図-25 トーンバースト波形

1チップ内に搬送波が2周期、4周期、6周期入る様にしてPSK信号を作成した。閾値による測定と異なり、データのばらつきが少なく、ほぼ、一直線上に測定値が並んでいる。

図-27 がPSK信号の受波波形である。パルス幅が長いので波形からは、水面反射を判断することは出来ない。

また、拡大波形から解るように、受波波形には位相変



表-3 PSK信号 (M系列) の伝搬時間の測定値

(ms)

移動距離	1チップ2波		1チップ4波		1チップ6波	
	1	2	1	2	1	2
0mm	1.3282	1.3282	1.3284	1.3284	1.3284	1.3284
1	1.3286	1.3286	1.329	1.3288	1.3288	1.3288
2	1.3292	1.3294	1.3298	1.3298	1.3298	1.3298
3	1.3298	1.3298	1.33	1.3304	1.3304	1.3304
4	1.3306	1.3306	1.3308	1.3308	1.3308	1.3308
5	1.3312	1.3314	1.3316	1.3312	1.3314	1.3314
6	1.3318	1.332	1.332	1.332	1.3322	1.3322
7	1.3324	1.3328	1.3328	1.3328	1.3328	1.3328
8	1.3334	1.3332	1.3334	1.3332	1.3334	1.3334
9	1.334	1.334	1.3342	1.334	1.3338	1.3338
10	1.3344	1.3344	1.3346	1.3344	1.3348	1.3348
20	1.3414	1.3414	1.3416	1.3412	1.3412	1.3412

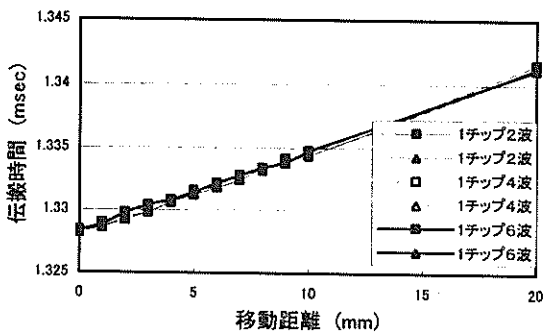


図-26 M系列による伝搬時間計測と移動距離

調の場所が明確には現れていない。これは送受波器の周波数特性によるもので、高い周波数まで応答できないためであり、ローパスフィルターを通過した様な波形になっている。実際の到達時間は波形から判断した時間である。相関関数の絶対値の最大値から求めた値は、 $1.8 \mu\text{sec}$ ほど遅れた時間として測定されている。

図-28 に相関波形を示す。受波波形からは判別できなかった直接波と水面反射が明確に現れている。また、直接波の相関関数の最大値がマイナスに成っており、位相が反転していることが解る。

(3) 考察

a) 伝搬時間の測定精度

閾値による方法は、測定精度を上げるために閾値を小さく設定すると、ノイズの影響を受けて測定エラーが増大する事が、図-24 から解る。このため、以下の考察では、測定エラーの多い、閾値を最大値の1/3に設定したデータは使用しないものとする。

表-4 は受波器を1mm毎に移動して測定した時間の差(0mmの地点の測定時間と1mmの地点の測定時間の差、

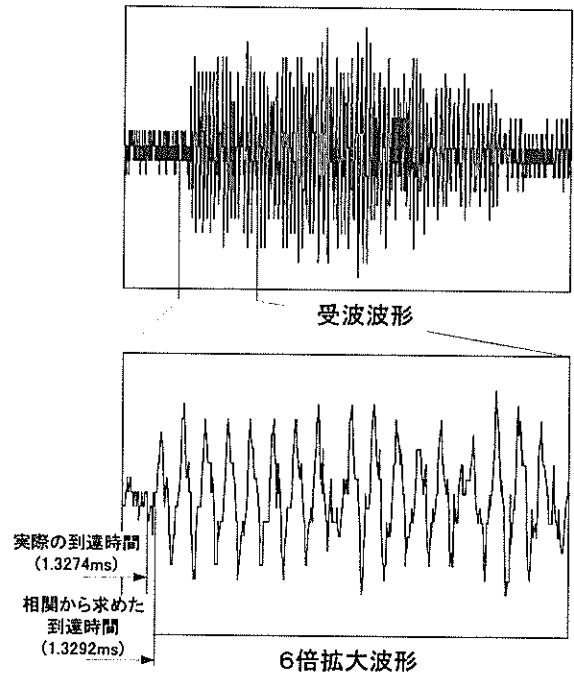


図-27 PSK信号の受波波形

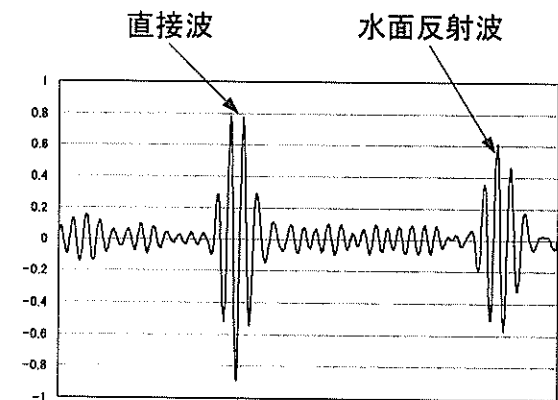


図-28 相関関数

表-4 1mm 間を伝搬する超音波の時間 (ms)

	1チップ2波	1チップ4波	1チップ6波	閾値を最大値の1/2とした
平均	0.00063	0.00062	0.00064	0.00074
標準偏差	0.00018	0.00021	0.00021	0.00095

1mm の地点の測定時間と 2mm の地点の測定時間の差、(・) を求め、その平均値と標準偏差を表したものである。つまり、1mm の間を伝搬する時間を求め、その平均値と標準偏差を求めた。ただし、10mm の地点の測定時間と 20mm の地点の測定時間の差は、10 で割ってデータとして使用した。

PSK 信号の相関により求めた時間は閾値により求めた時間より  $0.1 \mu \text{sec}$  短く測定されている。また、測定値のばらつきは標準偏差で閾値による方法の  $1/4$  以下であり、AD 変換器のサンプリング周期  $0.2 \mu \text{sec}$  とほぼ同じ値であるため、高精度な測定であることが分かる。

b) 伝搬時間測定の再現性

表-5 は受波器が同じ位置で、伝搬時間を 2 回測定したデータの差を示している。

PSK 信号の相関により求めた時間差は  $0 \sim 0.004 \mu \text{sec}$  であり、閾値により求めた時間差は  $0 \sim 0.0028 \mu \text{sec}$  であり、相関による測定が再現性に優れていることが分かる。

表-5 伝搬時間測定の再現性 (ms)

移動距離	1チップ2波	1チップ4波	1チップ6波	閾値を最大値の1/2とした
0mm	0	0	0	-0.0022
1	0	0.0002	0	0.0002
2	-0.0002	0	0	-0.0002
3	0	-0.0004	0	0.0002
4	0	0	0	-0.0004
5	-0.0002	0.0004	0	0.0028
6	-0.0002	0	0	0
7	-0.0004	0	0	0.0002
8	0.0002	0.0002	0	0.0004
9	0	0.0002	0	-0.0002
10	0	0.0002	0	0
20	0	0.0004	0	0.0006

ここで、AD 変換によるサンプリング誤差について考えると、図-29 に示すように B の地点で信号が到達した場合、サンプリングが No. 1 の様に到達時間と一致していれば、到達点は B 点と判断し問題はない。しかしこの様なケースはごく稀で通常は No. 2 の様に、サンプリングと到達時間は一致しない。この場合、A 又は C 点が到達地点として判断されてしまうので、前後に最大でサンプリング間隔の誤差が生じる。

トリガー信号は、超音波の信号の発信時刻を知らせる

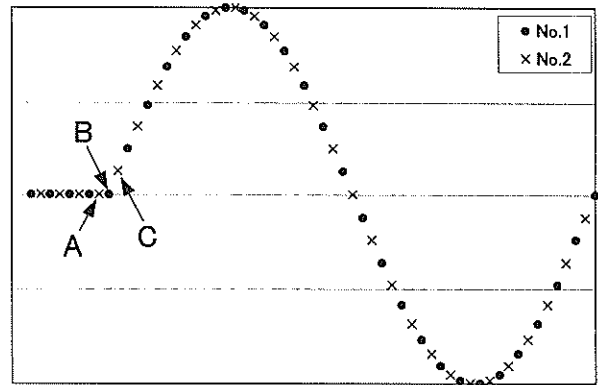


図-29 サンプリング位置と信号

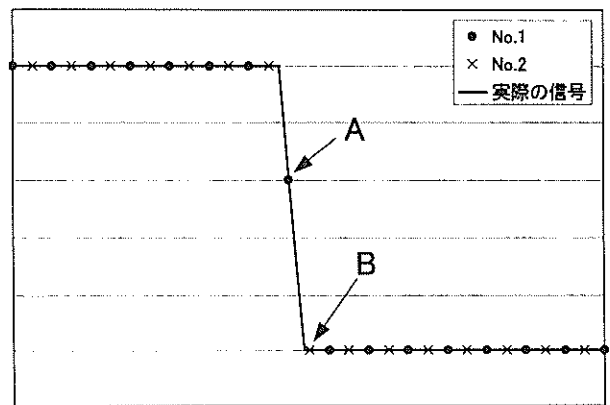


図-30 サンプリング位置とトリガー信号

ための矩形波であるが、これも、AD 変換器の影響を受ける。図-30 のようにトリガー信号が任意の電圧 (A 点) を横切った時に送波が開始されるように設定した場合、No. 1 では、トリガー点 A から時間測定が開始され正しい測定が成される。しかし、信号のサンプリングと同様に通常は No. 2 の様になるため、B 点から時間計測がなされ、最大でサンプリングタイムだけ時間が短く測定される。

以上、サンプリングによる誤差をまとめると測定データ個々に含まれる誤差は

$$-2T < \text{誤差} < T \quad T: \text{サンプリングタイム} \text{ となる。}$$

また、測定データ間の差をとった場合、サンプリングによる誤差の最大値は  $\pm 3T$  となる。

よって、表-5 の PSK 信号の相関により求めた時間差は、サンプリングタイムが  $0.0002 \text{msec}$  であるので、サンプリングによる誤差であり、再現性が良いことが分かる。また、サンプリングタイムを短くすることにより更に高精度測定が出来ることが期待される。

c) AD 変換器のサンプリングタイムと測定精度

AD変換器のサンプリングタイムを短くすることにより、PSK信号の相関から求めた伝搬時間の測定精度が向上することを確認するために、サンプリング周波数 10MHz と 25MHz で同様の実験を行い、受波器の各位置での測定値間の差から、距離 1mm を伝搬する時間を求め、その結

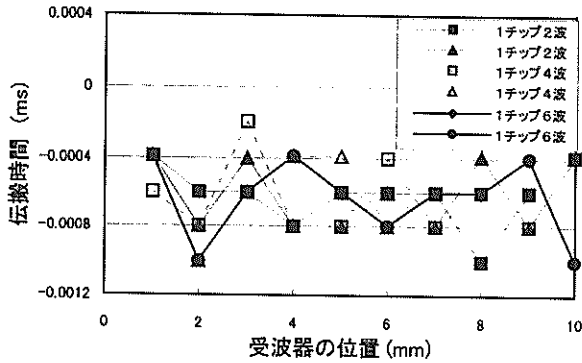


図-31 サンプリング周波数 5MHz 時の 1mm の伝搬時

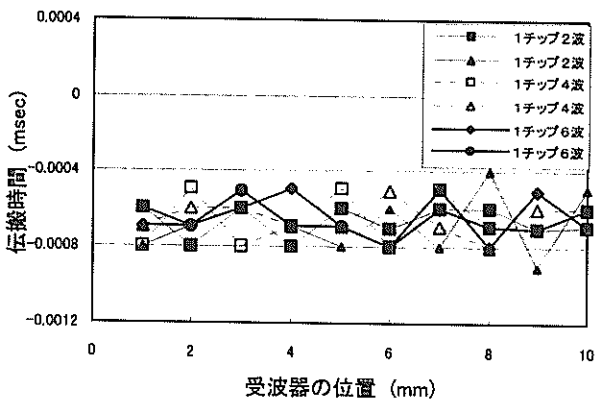


図-32 サンプリング周波数 10MHz 時の 1mm の伝搬時間

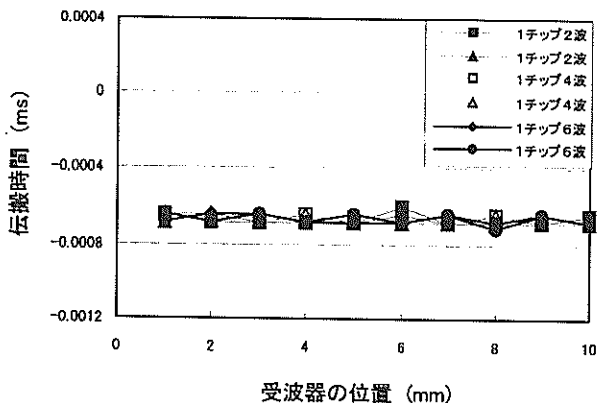


図-33 サンプリング周波数 25MHz 時の 1mm の伝搬時間

果を図-31~33 に示す。

サンプリング周波数が高くなるに従って、伝搬時間のばらつきが小さくなり、測定精度が向上しているのが分かる。

1チップ内の波数の差による測定精度の影響は、今回の実験では大きな違いは見られなかった。

## 6.2 信号の分離

2個の送波器から同時に異なったM系列のPSK信号を送波し、1個の受波器で受けて2つの信号に分離できることを確認するための実験を行った。

### (1) 実験方法

図-34 に示す様に、送波器を2個並べこれと対向するように約 1m 離して受波器を設置した。

1台の発振器から異なるM系列により変調したPSK信号を同時に2個の送波器に送り、受波器により受波した信号をAD変換して記録した。

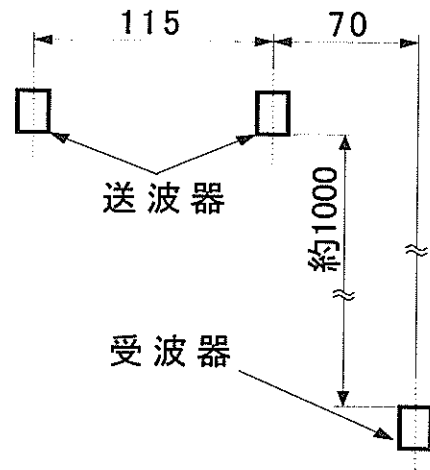


図-34 送受波器の配置

使用した超音波・AD変換器は、以下の通りである。

### ・M系列信号

$$\text{原始多項式} : f(x) = x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$$

$$f(x) = x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$$

搬送波周波数 : 200kHz

送波電圧 : ±10V

PSK信号の1チップ内の波数 : 2波

### ・AD変換器

サンプリング周波数 : 5MHz

分解能 : 8ビット

### (2) 結果及び考察

図-35 に受波信号を、図-36, 37 に相関関数を示す。

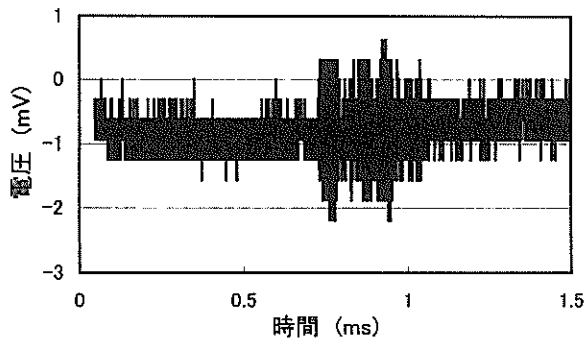


図-35 受波信号

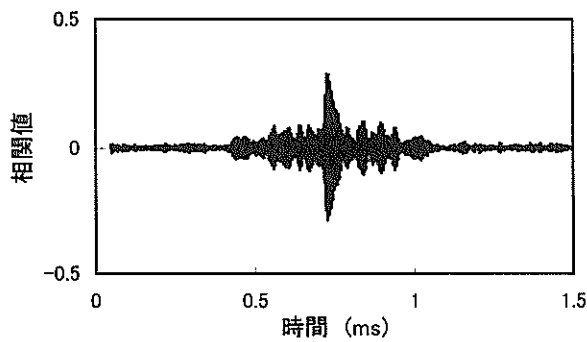


図-36 相関関数 1

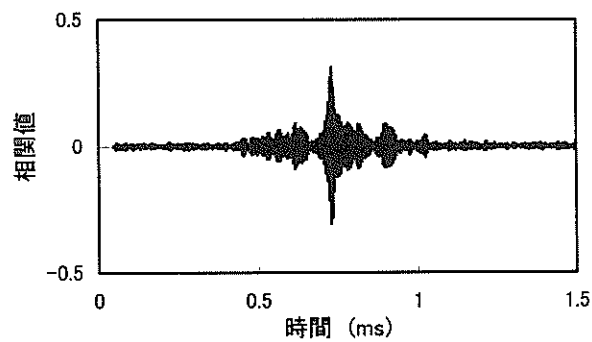


図-37 相関関数 2

この実験では、送波用のアンプを使用できなかった為、送波電圧が低くノイズレベルが大きくなっているが、それぞれの相関値のピークが同じ程度にでており、二つの信号が明確に分離できていることが分かる。

### 6.3 測位精度

1 個の送波器（レスポング）の位置を新方式と従来方式で測位し、精度比較を行った。

#### (1) 実験方法

写真-1 に示す様に送受波器をそれぞれ台車に取り付け、実験を行った。1 個の受波器を台車上の精密多点位置決め電動スライダーに取り付け、図-38 に示す①～④の座標に移動させ、各点で 2 回ずつの測定を行った。①から④までの座標で測定終了後、台車に取り付けた定規の目盛に従って、送波器を手動で 1cm 水平移動させた。この方法で繰り返し測定し、送波器の位置に対する受波器の①から④の測定データから、送波器の移動軌跡を求めた。測位の原点は受波器配置三角形の重心位置④とし、重心④と三角形の頂点②を結ぶ線を Y 軸、これと直交する線を X 軸とする。送波器は受波器配置の外側に Y 軸に平行に水平に移動することとなる。

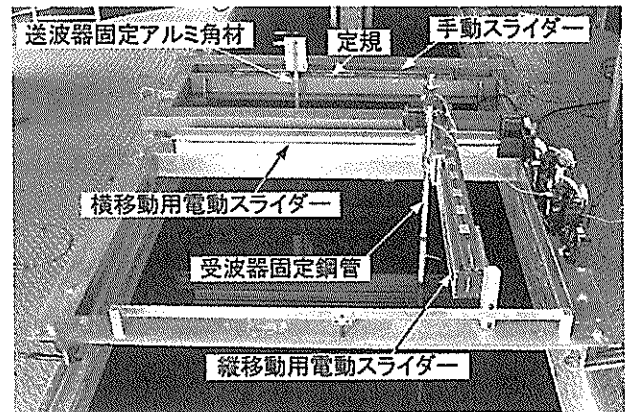


写真-1 実験状況

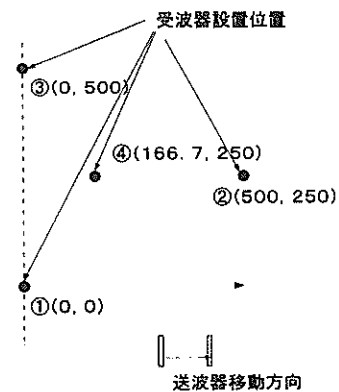


図-38 送受波器の配置

使用した超音波・AD 変換器・送受波器は、以下の通りである。

#### ・ 閾値による方法

超音波の種類： トーンバースト波  
 送波電圧： ±75V  
 周波数： 200kHz

パルス幅 : 10 波長

繰り返し周期 : 100ms

・ M系列信号

原始多項式 :  $f(x) = x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$

搬送波周波数 : 200kHz

送波電圧 : ±75V

PSK 信号の 1 チップ内の波数 : 2 波, 4 波

・ AD 変換器

サンプリング周波数 : 25MHz

分解能 : 8 ビット

・ 送受波器 (写真-2)

受波器

周波数帯域 : 100kHz ~ 500kHz

外形寸法 : φ 4mm × 長さ 20.7mm

送波器

共振周波数 : 200kHz

外形寸法 : φ 14.1mm × 長さ 24mm

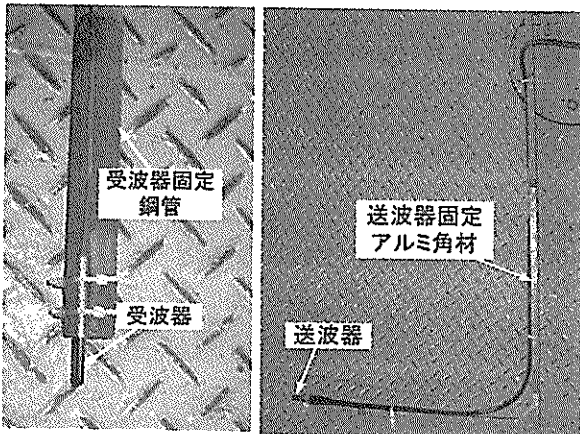


写真-2 送受波器

図-39 及び写真-3 に測定機材を示す。測定データは一度データ収録用パソコンに保存し、全ての測定が終了後、解析用ソフトで送波器の軌跡を求めた。

送受波器の位置関係は図-40 に示す様になるが、送受波器間の距離は直接測定が出来ないので、採寸により求めたが、送波器を固定した棒のたわみや取り付け精度等のため、正確ではなく参考程度の値である。

(2) 測定結果

図-41~43 に測位結果を示す。横軸は定規の目盛の読みを測位結果の Y 軸が最小値の位置を 0 に換算して表示した。図中のシミュレーションの X 軸と Z 軸の値は新方式による測位結果 (1004 点) の全平均値を使用した。

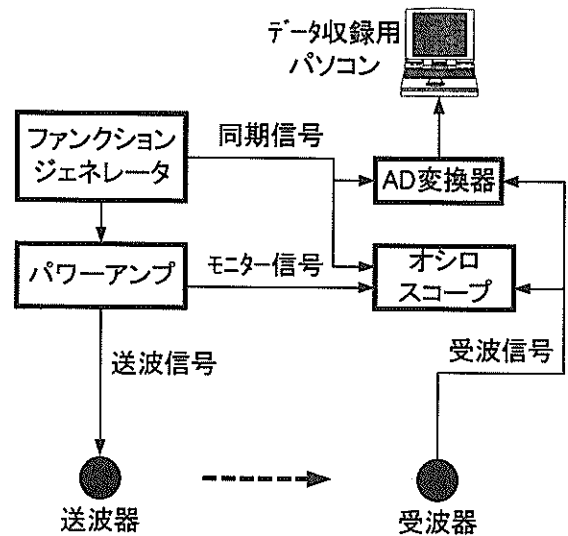


図-39 測定装置結線図

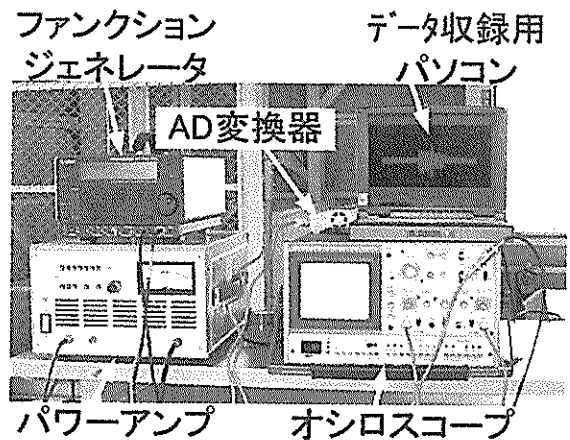


写真-3 測定装置

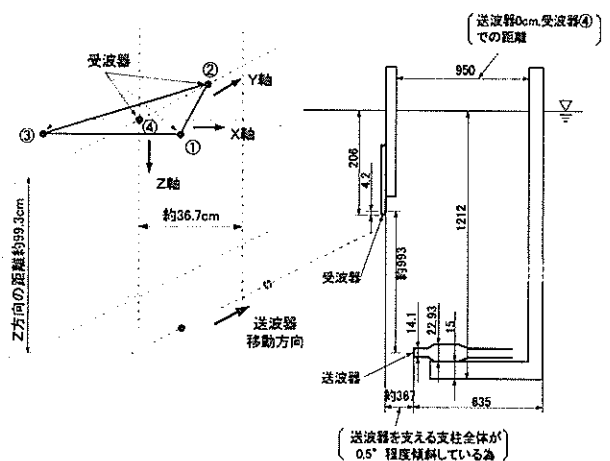


図-40 送受波器の配置

従来方式で使用する超音波の伝搬速度は実験の前後で水温を測定し、その値から超音波技術便覧の大気圧中における清水中の音速 1448.3m/s (水温 11°C)<sup>14)</sup> を採用した。

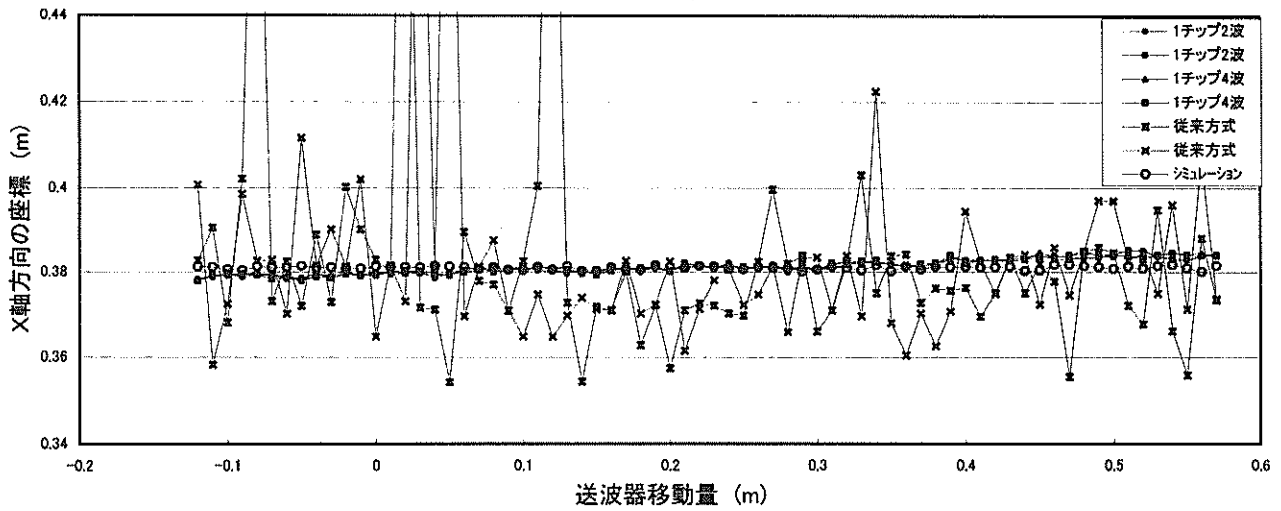


図-41 X軸方向の測位結果

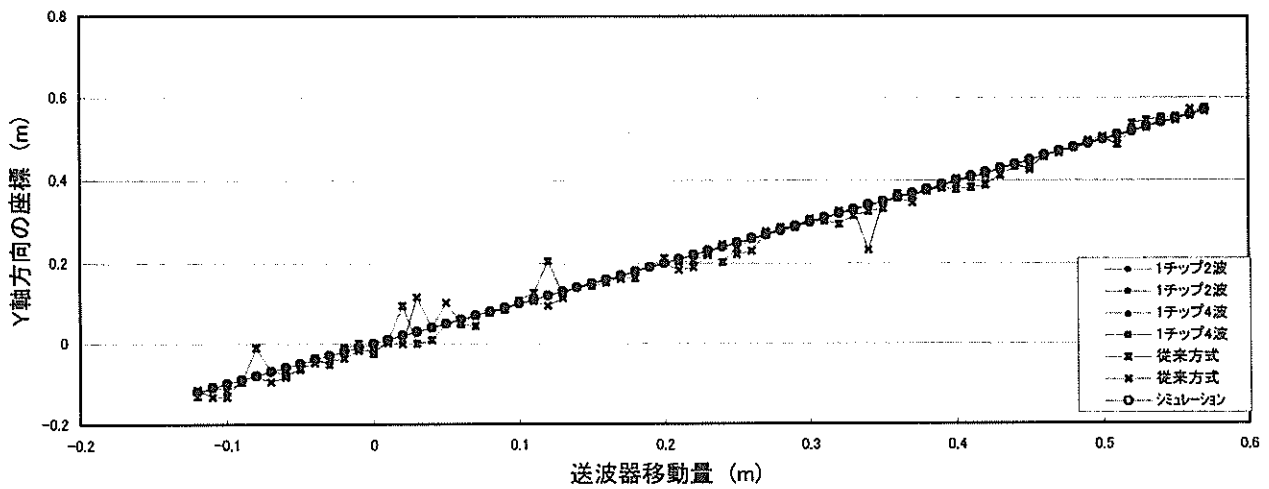


図-42 Y軸方向の測位結果

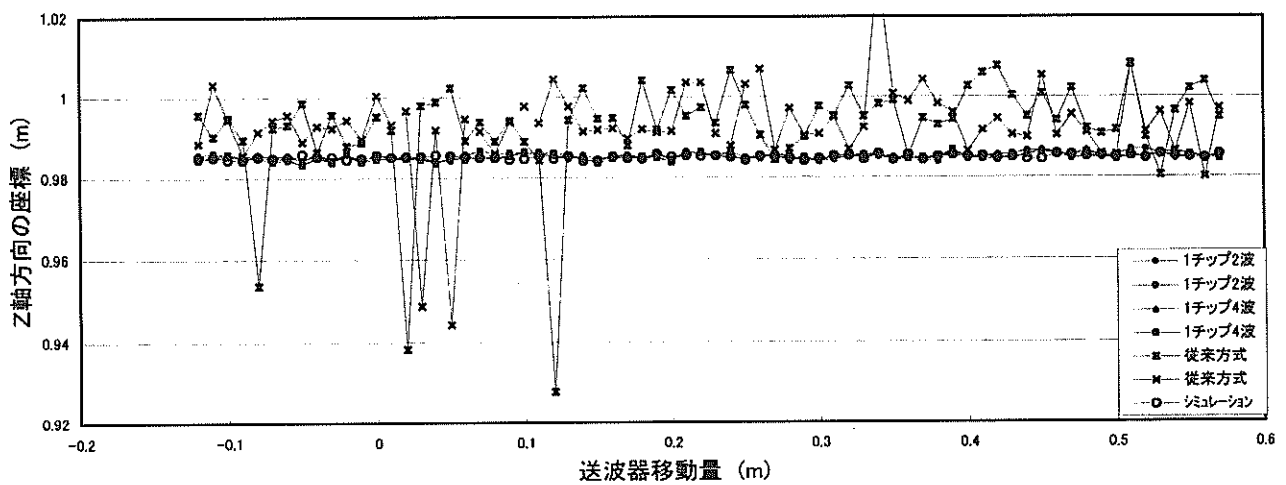


図-43 Z軸方向の測位結果

表-6 再現性の比較

単位 (mm)

	X軸			Y軸			Z軸		
	1チップ2波	1チップ4波	従来方式	1チップ2波	1チップ4波	従来方式	1チップ2波	1チップ4波	従来方式
平均値	-0.041	0.057	0.567	0.012	0.011	2.954	-0.023	0.078	-0.317
標準偏差	0.405	0.409	47.085	0.298	0.287	30.966	0.451	0.4	17.921

(3) 考察

a) 再現性

送波器の各点でそれぞれ2回ずつ超音波を放射し、測定した値から求めた座標の差の平均値と標準偏差を表-6に示す。

図-41~43及び表-6から、従来方式は測位誤差が大きく、再現性が悪いことが分かる。

1チップ2波と1チップ4波の標準偏差の差はほとんど無く、両者の間に差は認められない。また、平均値、標準偏差ともに1mm以下であり、再現性がよいことが分かる。

b) 測位精度

送受波器間の正確な距離を直接測定できないため、送波器をY軸方向に1cmごとに移動して座標測定した結果の隣りあうY座標の測定値の差(1cmが正しい値)で精度検証する事とした。

表-7にPSK信号およびシミュレーションの平均値、標準偏差、最大値及び最小値を示す。図-44には各値をプロットしたものを示す。

10mmの移動量に対し平均値の誤差、標準偏差ともに1mm以下であり正確な測定が行われていることが解る。

図-44から、送波器が受波器の原点から離れるにしたがって誤差が大きくなっており、シミュレーションより

表-7 Y軸の測定値間の差 (mm)

	1チップ2波	1チップ4波	シミュレーション
平均	9.995	9.978	10.014
標準偏差	0.736	0.788	0.529
最大値	12.567	13.212	11.792
最小値	7.632	7.349	8.879

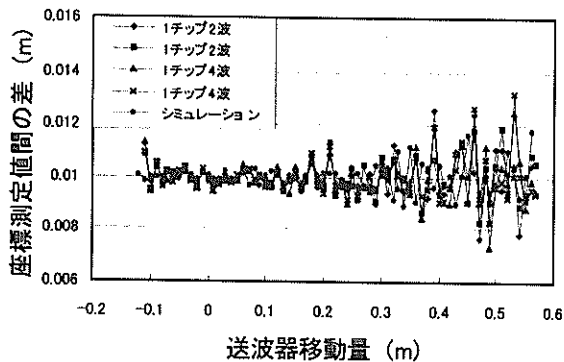


図-44 Y軸の座標値間の差

やや誤差は大きいですが、同様の傾向を示している。

誤差が大きい原因に関しては、シミュレーションでは0.1μsecまで正確な時間測定が可能であるという条件で行ったが、実験ではサンプリング周波数が25MHzであり、サンプリングによる誤差の最大値は、±3T=0.14μsec(T=サンプリングタイム)であり、シミュレーションより時間測定の条件が劣っていることが原因と考えられる。

c) 相関関数の最大値の取り方

今回の実験では相関関数の最大値を絶対値の最大値ではなく、マイナス側の最大値を採用した。図-45に示す様に本来の超音波の到達点は受波波形から判断して、B点となるべきである。しかし、絶対値の最大値はほとん

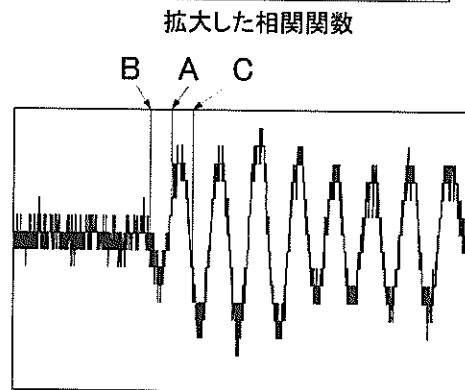
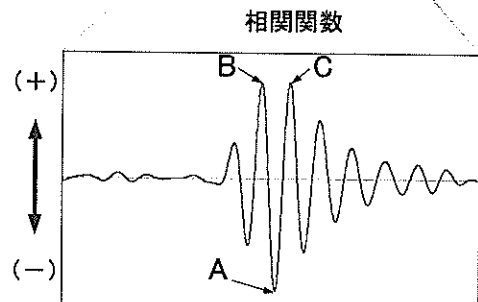
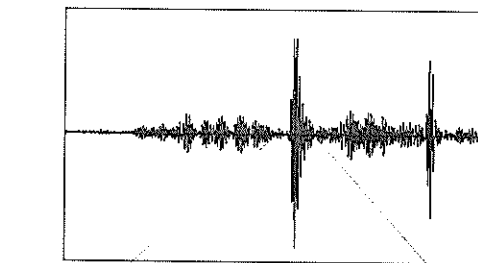


図-45 相関関数と受波波形

どの場合 A 点であり、稀な場合であるが B 点や C 点が最大値となる場合がある。この原因は、受波波形が送受波器の周波数特性のため送波器に加えた P S K 信号とは異なった波形になっているためと考えられるが、明確な原因は不明である。

相関関数の絶対値の最大値を取ると、測位計算に使用する時間測定データに半波長から 1 波長の誤差が含まれる可能性がある。しかし、相関関数のマイナス側の最大値を時間測定データとすると、誤差は常に半波長となる。

図-46, 47 は図-20 と同一条件で行ったシミュレーションである。図-46 は③の受波器の測定データが常に半波長(2.5 μ sec)だけ遅れた誤差を有している場合で、図-47 は①から④全ての受波器の測定データが常に半波長(2.5 μ sec)だけ遅れた誤差を有している場合である。図から解るように、測位計算においては 1 つの時間測定データだけ誤差を含んでいる場合は、その影響を受けて測位結果も誤差が大きくなる。しかし、全ての時間測定データが同じだけ誤差(微小な誤差)を含んでいる場合は、測位結果は誤差を含んでいない場合(図-20)とあまり変わらないことが分かる。

以上の結果から、全ての時間測定データが A 点を選択

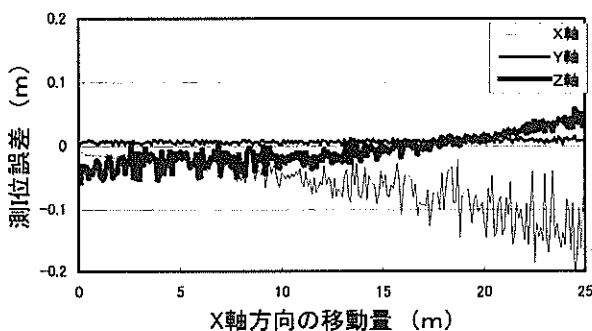


図-46 1つの時間データだけ微小誤差を含む場合

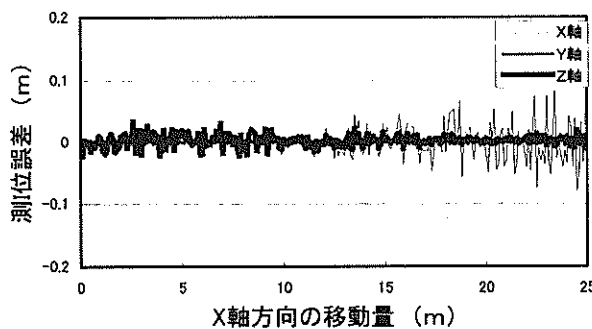


図-47 全時間データが微小誤差を含む場合

するマイナス側の最大値を相関関数の最大値をとした。これにより、全ての時間測定データは約半波長(2.5 μ sec)の遅れを有しているが、測位にはほとんど影響を及ぼさないものと判断できる。

## 7. 高精度化の為の検討

### 7.1 送受波器の形状

送受波器の形状は、無指向性で高出力が得られるものとして、円筒形のものが多く使用されている。この場合送受波器の座標を重心位置として、測位計算を行っているが、音波の到来方向によって送受波器の座標が異なる可能性がある。

本システムでは幾何学的に座標中心が 1 点に定まる球形の送受波器を使用することとする。

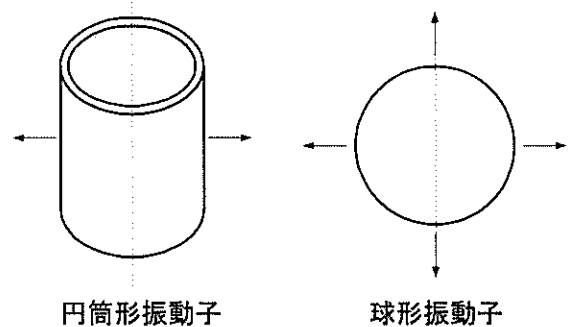


図-48 超音波振動子

### 7.2 ドップラー効果の影響

水中移動体が移動している場合には、超音波信号にドップラーシフトの影響が現れることが想定されるためその影響について検討した。

既存の水中バックホーをモデルに検討する。

水中バックホーの性能を下記とすると

回転速度：12.7rpm

運転席の最大回転半径：2m

走行速度：7km/h

最大速度を求めると、回転時約 2.66m/sec となる。

周波数の変化は

音源が接近するときの周波数  $f_1$  は、

$$f_1 = f / (1 - V/c) \quad (35)$$

音源が遠ざかるときの周波数  $f_2$  は

$$f_2 = f / (1 + V/c) \quad (36)$$

$f$  : 音源の周波数  $V$  : 音源の速度  $c$  : 音速で表される。



$c = 1,500\text{m/sec}$ ,  $f = 200\text{kHz}$  として,

$f_1$ ,  $f_2$  を求めると

$f_1 = 200.355\text{kHz}$ ,  $f_2 = 199.646\text{kHz}$  となる.

この周波数変化した P S K 信号に対して, 相関を求めた. 計算条件は以下の通りである.

M 系列の原始多項式:  $f(x) = x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$

搬送波周波数: 200kHz

サンプリング周波数: 5MHz

P S K 信号: 1 チップ内に 2 周期の搬送波を含む

P S K 信号の開始点: 1000 番目のサンプリング点

図-49 に各周波数毎の相関関数を示す. 200kHz のときの相関値の最大値を 1 として表示している. 各相関値の最大値の位置を表-8 に示す. 相関関数の最大値の位置の変化は 1 のみであり, 水中バックホーの速度ではドップラー効果によって, 測位に影響が現れることはない.

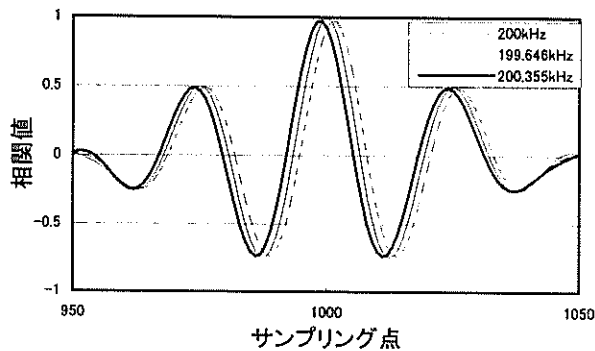


図-49 ドップラー効果による相関値の変化 1

表-8 相関関数の最大値の位置 1

周波数 (kHz)	199.646	200	200.355
相関関数の最大値の位置	1001	1000	999

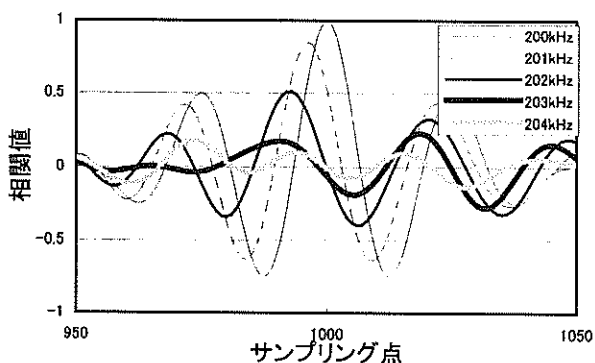


図-50 ドップラー効果による相関値の変化 2

表-9 相関関数の最大値の位置 2

周波数 (kHz)	200	201	202	203	204
相関関数の最大値の位置	1000	996	993	1019	1720

図-50 及び表-9 はドップラー効果により, 周波数が 200kHz から 1kHz ごとに 204kHz まで変化したときの相関関数とその最大値の位置を求めたものである.

周波数が 202kHz (1%の周波数の変化) のときに, 相関関数の最大値の位置は 7 ポイント (サンプリング周波数が 5MHz であるので, 搬送波の 1/4 波長程度) のズレである.

4 個の受波器で受信した波形が 202kHz の周波数変化を受けた場合を想定して, ベースライン長 6.93m, 水深 20m で X 軸方向に 20m 水平移動した場合の測位誤差の最大値を計算により求めると, X 方向が 6.7cm, Y 方向が 0.6cm, Z 方向が 3.2cm であり, 目標とする測位精度 10cm 以下を満足している.

周波数が 200kHz から 202kHz にドップラー効果により変化するときの水中移動体の速度は, 53.5km/h (約 29 ノット) である. ROV の航行速度は 2~3 ノットであり, 水中施工機械や ROV 等の移動速度によるドップラー効果では測位精度に影響が出ないことが解る.

## 8. 結論

水中施工機械の高精度水中測位に使用する目的で, 水中座標計測技術の開発を行った. 本システムは M 系列信号の相関法による高精度な伝搬時間計測技術と, 超音波の伝搬経路全体の平均音速を常時求める計算手法により実現されたものである. シミュレーションと簡単な水槽実験により以下の結果を得た.

- 1) M 系列信号で変調した P S K 信号の相互相関による伝搬時間計測の測定値に含まれる誤差は以下の通りである.

$$-2T < \text{誤差} < T \quad T: \text{AD 変換器のサブリングタイム}$$

- 2) 相互相関による伝搬時間の測定値は, 上記誤差範囲内で再現性が優れている.
- 3) プリファードペアな M 系列信号で変調することにより, 2 つの送波器から同時に放射された超音波信号を 1 つの受波器で受け, この信号から各送波器からの超音波信号に分離し, 伝搬時間を精度良く測定できる. 送受波器間隔を約 1m とした水槽実験により, これを確認した.
- 4) 上記特性を利用し, 測定対象物に送波器を 3 個装備し, 3 つの送波器から同時に超音波を放射することにより, 測定対象物の座標, 向き, 傾斜を測定でき

る。

- 5) 送波器にレスポンドを使用し、4個の受波器から成るSBL方式により、測定された伝搬時間から超音波の伝搬速度と送波器の座標を算出できる。ただし、高精度測位を実現するには、適当なベースライン長とM系列信号で変調したPSK信号の相互相関による高精度な伝搬時間計測が必要である。
- 6) 本システムは測位対象物が水深20mで、超音波の伝搬時間を $1\mu\text{sec}$ まで計測できる場合、 $\pm 10\text{cm}$ の測位精度を維持するためにはベースライン長5.9m以上が必要である。
- 7) 1辺50cm, 2辺55.9cmの2等辺三角形の頂点とその重心に受波器を配置し、深さ方向に受波受アレーから約98cm離れた位置を水平に移動するレスポンドを測位する実験を行った結果、
  - ・同じ位置で2回の測定を行った再現性は、従来方式と比較し、平均値で1桁、標準偏差で2桁小さい値を示し、再現性が非常によいことが解った。
  - ・Y軸方向に1cm毎に送波器を移動させて測位したY座標値の差を求めると移動量1cmに対して測定値の平均値0.9978cm, 標準偏差0.0788cmと高精度に測定された。
  - ・M系列による変調したPSK信号の1チップ2波の場合と1チップ4波の場合で、再現性、測位精度共に差は認められなかった。
  - ・Y座標値の移動量はシミュレーションと同様に座標原点から遠ざかるに従って増大する傾向を示した。
  - ・伝搬時間を求める相関関数の最大値の求め方は、真の到達位置よりも半波長程度遅れた位置になるマイナス側の最大値を採用することにより、高精度な測位結果が得られた。
  - ・伝搬時間測定誤差が、4個の受波器で計測した伝搬時間に同程度含まれていると、測位精度には影響を与えない。
- 8) 測位対象物の移動で生じるドップラー効果により、周波数に変化する事による測位精度への影響は、ROVや水中バックホー等の移動速度では現れない。

## 9. あとがき

本システムの利用目的は、従来の水中測位機器が対象としていた広範囲を移動する潜水艇やROV等の測位とは異なり、台船のすぐ近くで作業する、開発途上にある遠

隔操作型の水中施工機械の測位である。この利用においては、測位範囲は狭いが、水中施工機械の施工精度に直接影響するため、高い測位精度が要求される。このため、従来技術の誤差要因を排除することにより、新たな測位方法を考案した。

本研究では基本原理の考案と、水槽実験によるその検証を行い、有効性が確認された。

今後、実用化のための機器開発、実海域試験等を行い、実工事で使用できるまでに完成度を高めることが必要である。

(2003年5月12日受付)

## 参考文献

- 1) 沖電工業気株式会社：水中作業ロボットにおける位置測定装置，作業船，第175号，昭和63年1月，pp58-64
- 2) 五洋建設株式会社：浚渫ロボット「ふたば」の施工実績，作業船，第190号，平成2年7月，pp34-43
- 3) 東洋建設株式会社：着座型タンパ式捨石均し機，作業船，第195号，平成3年5月，pp3-8
- 4) 岩崎峯夫：施工機械講座 最近の施工支援技術(3)「水中位置測定装置」，作業船，第257号，2001年9月，pp52-57
- 5) 川口勝義：深海調査機器運用における音響機器活用，超音波TECHNO，2001.11-12，PP46-50
- 6) 運輸省港湾局：水中施工技術のロボット化に関するWG報告書，昭和63年3月，pp309-349
- 7) 運輸省第四港湾建設局下関機械整備事務所：水中位置測定装置の開発ー水中ロボットの支援システムー，作業船，第181号，平成元年1月，pp53-58
- 8) 海中作業船システムの開発研究委員会：海中作業船システムの開発研究，作業船，第196号，平成3年7月，pp53-60
- 9) 王勇 他：中部熱帯太平洋トモグラフィー観測実験における双方向伝搬音波の変動特性，日本音響学会講演論文集II，2001年秋期，pp1127-1228
- 10) 柏木：M系列とその応用，昭晃堂，1996年
- 11) 山内雪路：スペクトラム拡散通信，東京電気大学出版局，2001年
- 12) 丸林元，中川正雄，河野隆二共著：スペクトル拡散通信とその応用，電子情報通信学会，1998年
- 13) 運輸省港湾局監修：現有作業船一覧，(社)日本作業船協会，1999，pp876-877
- 14) 実吉順一，菊池吉充，熊本乙彦監修：超音波技術便覧，日刊工業新聞，1978，pp1392

港湾空港技術研究所資料 No. 1 0 5 9

2 0 0 3 . 9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発 行 所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬 3 丁目 1 番 1 号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印 刷 所 野 崎 印 刷 紙 器 株 式 会 社

Copyright © (2003) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。