

超音波による水中長距離計測システムの開発

宮澤 武明* 重松 文治*
平山 達也** 羽田 宏***

要 旨

大水深海域に設置する水中構造物の測位や、沈埋函工法における沈埋函端面間計測を目的とした水中長距離計測システムを開発した。海洋実験を行った結果十分な精度が確保でき、現場適用が可能であることを確認した。おもな実験結果を下記に示す。

大水深構造物の測位において、送受波器のベースラインを最適配置とするワイドベースライン方式を開発し、水深 70m の海域で精度検証実験を行った結果、標準偏差 0.35m であり安定した測位を行えることを確認した。

沈埋函端面間計測において新たに考案した音速補正方式の確認実験を行った結果、水中距離 200m の計測精度は 3.6cm であり高精度な計測を行えることを確認した。

1. はじめに

近年、排他的経済水域の設定、漁獲可能量制度の導入など、漁業を取り巻く環境が「獲る漁業からつくり育てる漁業」へと変わりつつある中、水産資源の保存、持続的利用を目的とした水深 200～300m 前後の大陸棚に人工礁や大型魚礁の設置が計画されている。

大水深海域にこれらの構造物を設置する場合は構造物が潮流などの影響を受けるため、水中でのリアルタイム高精度測位技術が必要になる。従来、浅海域においては 1 隻の作業船から構造物を測位していたが、大水深海域になると作業船上の送受波器と構造物を結んだ線の交差角が鋭角になるため、測位精度が低下する。そこで、GPS と送受波器を取り付けた 3 隻の測量船を最適形状に配置し交差角を理想に近い角度とすることで、大水深海域でも高精度な測位を可能とするワイドベースライン(Wide Base Line 以下 WBL と称す)方式を開発した。

一方、海底トンネル工事では工期短縮、コストダウンの観点から沈埋函工法が採用されている。沈埋函工法は水圧接合によって最終継ぎ手を施工するため、最終函設計値となる既設沈埋函の端面の位置管理が重要である。従来はレベルや光波測距儀を使用して相対する沈埋函の端面を測位し間接的に算出していたが、さらなる精度向上を図るには端面間を直接計測できる水中長距離計測技術が必要になる。

超音波の音速は水温の影響をもっとも大きく受けるため、これまで行っていた固定式音速計による音速値の補正だけでは精度の確保は困難である。そこで、超音波伝播経路の音速値を移動式音速計で計測し、後処理で距離計測値と同期化し補正することで精度向上を図る音速補正方式を考案し、高精度な水中長距離計測

システムを確立した。図 - 1 に直接測量と間接測量の概念図を示す。

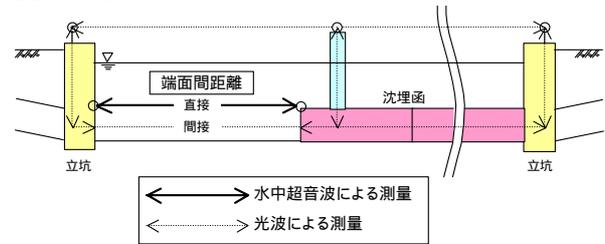


図 - 1 直接測量と間接測量の概念図

本稿では水中長距離計測システムを利用した WBL 方式と沈埋函端面間計測の概要、実験結果について述べる。

2. 水中長距離計測システムの概要

本システムは、WBL 方式による水中測位と沈埋函端面間計測で構成されるが、これらは基本的に超音波の利用方向が異なる。(鉛直方向の場合が WBL 方式であり、水平方向の場合が沈埋函端面間計測である。)

以下に、これらの方式の概要を示す。

2.1 WBL 方式の水中測位

(1) 概要

WBL 方式は、送受波器と GPS を搭載した 3 隻の測量船を、大水深目標物に対して、比較的大きな角度がとれるように、配置(理想的には、正三角錐)するもので、従来のショートベースライン方式と比較して、目標物に対して高精度な水中測位を行うことができる(ベースラインとは各送受波器の間隔である)。

WBL 方式の概念図を図 - 2 に、測量船搭載機器の外観を写真 1 に示す。

*技術研究所 **機械部 ***土木設計部

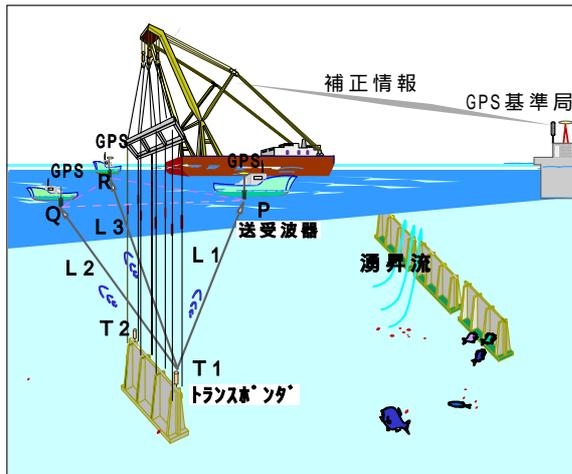


図 2 WBL方式の概念図

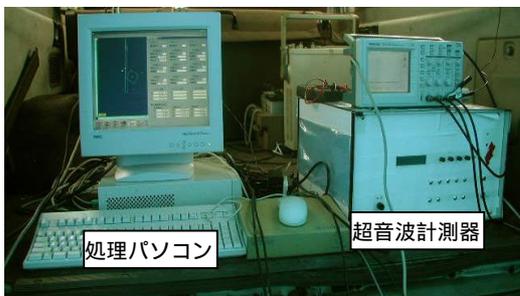


写真 - 1 測量船搭載機器の外観

(2) 位置検出方法

目標物の位置は、GPSで求めた3箇所の既知点座標値と超音波の伝搬時間と音速で求めた距離値をもとに算出する。

送受波器PからトランスポンダT1に向け超音波を放射し、これに回答してトランスポンダT1が発射した超音波を送受波器P、Q、Rが受信し、この間の伝送時間と水中音速値から距離 $\overline{P \cdot T1 \cdot P}$ 、 $\overline{P \cdot T1 \cdot Q}$ 、 $\overline{P \cdot T1 \cdot R}$ をリアルタイムに算出する。(送受波器P、Q、Rの計測開始時間の同期には、GPSから一秒毎に出力される1PPS信号を利用している。)

写真 2 にトランスポンダの外観を示す。



写真 - 2 トランスポンダ外観

(3) その他の構成技術

水中構造物に取り付けるトランスポンダは、有効利用するために、構造物の設置完了後は取り外し、再利用する必要がある。大水深の場合、潜水夫によるトランスポンダの回収が不可能であるため、専用の切離し装置を使用して、切り離しを行う。

2.2 沈埋函端面間計測

(1) 概要

沈埋函端面間計測では、超音波を水平方向に利用しているが、トランスポンダの位置検出原理はWBL方式と同様である。

沈埋函AとBの端面間距離(100~300m)の算出に必要な音速値を、沈埋函Bの上面に設置した固定式音速計の計測値と、測量船に搭載した移動式音速計の計測値から求めることで、高精度な水中距離計測を可能にしている。

沈埋函端面間計測の概念図を図-3に示す。

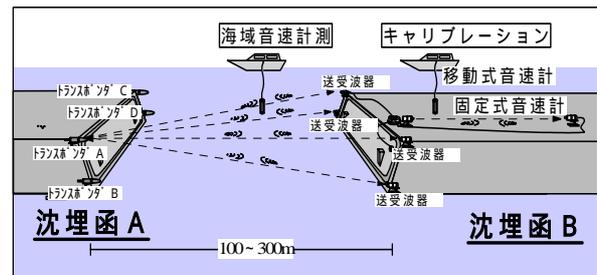


図 - 3 沈埋函端面間計測の概念図

(2) 計測手順

計測手順を以下に示す。

沈埋函Bの上面に設置した固定式音速計を使用して測量船に搭載した移動式音速計のキャリブレーションを行う。

沈設した沈埋函端面の四隅に設置した送受波器とトランスポンダとの距離16ラインを計測する。

と同時に移動式音速計で沈埋函端面間の海域の音速値を計測する。この時、音速値のほかに水圧センサーで音速計測点の水深、GPSで平面座標を計測しており、これらの値をもとに計測ライン上の音速値を後処理で求め、計測距離の音速補正を行う。

(3) 補正方法

固定式音速計と移動式音速計を使用した音速補正方法を下記に示す。(表-2、3参照)

固定式音速計の音速値算出

送受波器とトランスポンダの離隔距離を $L_0(m)$ 、計測距離を $L_1(m)$ とすると音速値 (m/s) は次式のように表される。ここで $K(m/s)$ は 15 における海水の

音速値 1500(m/s)で、 L_1 (m) は音速値 K (m/s) における計測距離、 L_0 (m) は既知距離である。

$$\alpha = \frac{K \cdot L_0}{L_1} \quad (1)$$

この音速値 (m/s) で補正した計測距離が一次補正距離である。

移動式音速計のキャリブレーション

固定式音速計の海域を移動式音速計で計測し、その平均音速値を c (m/s) とすると、音速補正係数 (%) は次式のように表される。

$$\rho = \frac{\alpha}{\beta_c} \cdot 100\% \quad (2)$$

沈埋函端面間海域の音速値算出

沈埋函端面間海域を移動式音速計で計測した音速値

を (m/s) とすると、沈埋函端面間海域の音速値 (m/s) は次式のように表される。

$$\gamma = \frac{\rho \cdot \beta}{100} \quad (3)$$

この音速値 (m/s) で補正した計測距離が二次補正距離である。

二次補正

送受波器とトランスポンダ間の計測距離を L_n (m) とすると二次補正後の計測距離 L (m) は次式のように表される。

$$L = \frac{L_n \cdot \gamma}{K} \quad (4)$$

2.3 システムの構成と仕様

システムの構成と仕様を表 - 1 に示す。

表 1 システムの構成と仕様

分類	項目	構成と仕様	
システム全体	機器構成	超音波制御装置：3式、超音波送受波器：5式、船位計測装置：3式 トランスポンダ：7式、データ伝送装置：2式、音速補正モジュール：1式 水中切離し装置：7式	
	計測方式	WBL	GPSの1PPS信号によって計測を開始し、3ラインを同時に計測する
		沈埋函	1ライン毎の計測
	周波数	200KHz	
	CH識別	コード信号による6CH識別	
	音速補正	WBL	深度値をもとに補正処理：海域の音速値 V (m/s) は超音波測位結果の深度値 D_s (m) と水圧センサの計測深度値 D_P (m) から次式のように算出し補正処理する。ここで K (m/s) は 15 における海水の音速値 1500 (m/s) である。 $V = K \cdot D_P / D_s$
		沈埋函	固定式・移動式音速計の計測値をもとに補正処理
	演算処理	WBL	リアルタイム処理
		沈埋函	後処理が必要
	最大計測距離	400m	
精度	WBL	測位精度 ± 1 m (水深 100m)	
	沈埋函	測距精度 ± 0.02 m (水平 100m)	
電源	AC100V (超音波制御装置)		
超音波送受波器	外形寸法・重量	120 × H140 (概略寸法)	
	出力	100W	
	指向角	半減全角 110°	
	ノイズ処理	AGC (AutoGainControl) による自動感度調整	
トランスポンダ	外形寸法・重量	157 × H500 (概略寸法)	
	出力	100W	
	指向角	半減全角 100°	
	電源	DC12V 内蔵電池、連続運転：約 24 時間、電池作動期間：約 1 ヶ月	
	耐圧	水深 300m	
水中切離し装置	制御方法	超音波信号による無線式切離し制御	
	出力	20 ~ 30W	
	CH識別	周波数変調による8CH識別	
	電源	DC12V 内蔵電池 電池作動期間：約 6 ヶ月	
処理ソフト	WBL	リアルタイム三次元測位・モニタ表示	
	沈埋函	距離計測・モニタ表示、GPSによる移動式音速計測、音速補正	

3. WBL方式の海域実験

3.1 実験概要

実験目的と方法を下記に示す。

測位精度の検証

GPSと送受波器を搭載した測量船 3 隻を移動させながら、水深約 70m の海底に設置したトランスポンダを測位し、精度を検証した。

水中切り離し装置の動作確認

測量船から切り離し用の超音波信号を送り、水中切り離し装置の作動・浮上実験を行い、切り離し CH の制御、浮上動作を確認した。

海域実験のイメージ図を図 - 4 に、実験状況を写真 - 3 に示す。

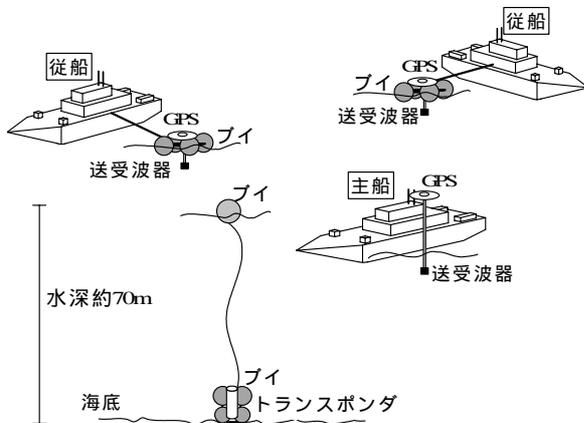


図 - 4 海域実験のイメージ図



写真 - 3 実験状況

3.2 実験結果

測位精度

大水深においては真値を求めることが困難であるため、ここでは任意形状におけるベースラインでの測位結果の再現性で精度を評価した。測位結果の標準偏差は $X = 0.35\text{m}$ 、 $Y = 0.30\text{m}$ であり、本方式によって安定した測

位を行えることが確認できた。測位結果を図 - 5 に、モニタ画面を写真 - 4 に示す。

水中切り離し装置の動作確認

水中切り離し装置の切り離し・浮上実験を行い、装置の CH 識別が正常に動作し、浮上回収が行えることを確認した。

水中切り離し装置とトランスポンダの外観を写真 - 5 に示す。

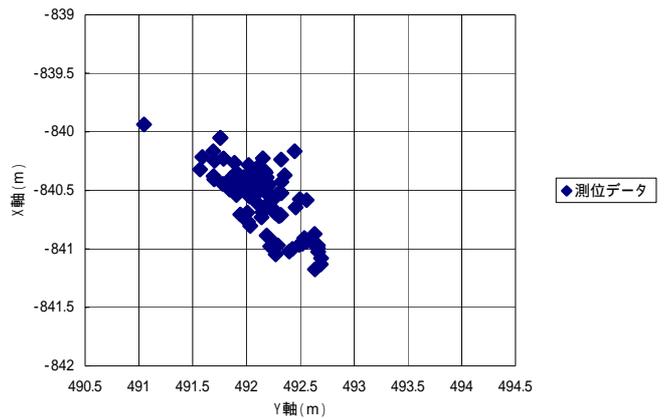


図 - 5 測位精度 (水深約 70m)

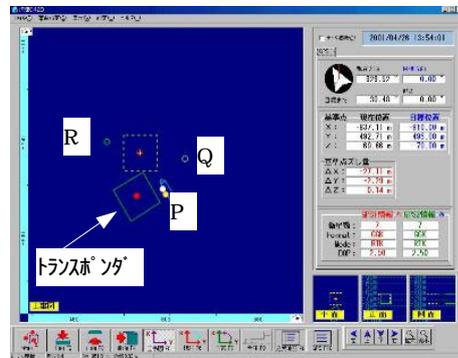


写真 - 4 モニタ画面

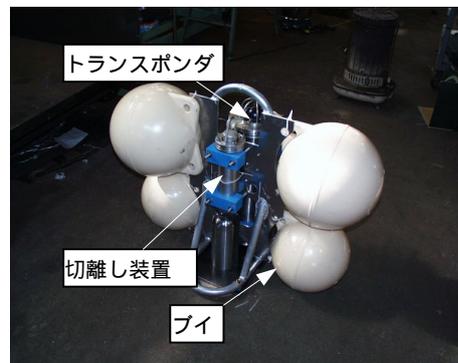


写真 5 トランスポンダの外観

4. 沈埋函端面間計測の海域実験

4.1 実験概要

実験目的と方法を下記に示す。

水中距離計測精度の検証

岸壁に設置した架台の下端に送受波器 A・B を取付け、
 栈橋に設置した架台の下端にトランスポンダ 0~3 を取
 り付けた。送受波器 A とトランスポンダ 0 は固定式音速
 計測に使用し、送受波器 B からそれぞれ約 100m、約
 200m、約 250m 離れた位置にトランスポンダ 1~3 を設
 置して水中超音波の距離計測に使用した。

送受波器とトランスポンダ間の距離は光波測距義で計
 測し、この値を真値とし精度検証した。

移動式音速計の有効性検証

移動式音速計によって固定式音速計の海域（地点 c₁~
 c₃）と超音波伝搬経路（地点 1~3）の音速値を計測し、
 この音速値の補正効果を検証した。

沈埋函端面間計測の実験概念図を図 - 6 に示す。

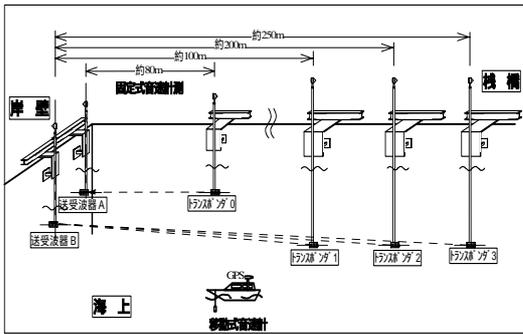


図 - 6 沈埋函端面間計測の実験概念図

4.2 実験結果

移動式音速計のキャリブレーション

固定式音速計による音速値を (m/s) 、同海域の任意
 地点における移動式音速計の音速値を $c_i (m/s) (i=1、$
 $2、3 \cdots n)$ とすると、この海域の移動式音速計による平
 均音速 c と音速補正係数 β は次式のように表される。

$$\beta_c = \begin{cases} \beta_c & (n=1) \\ \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\beta_{c1}}{2} + \beta_{c2} + \beta_{c3} \cdots \beta_{c(n-1)} + \frac{\beta_{cn}}{2} \right\}}{n-1} & (n>1) \end{cases} \quad (5)$$

$$\rho = \frac{\alpha}{\beta_c} \times 100\% \quad (6)$$

固定式音速計による音速値は計測海域全体の平均音速
 であり、移動式音速計による音速値は計測海域の任意地
 点における音速値である。今回の実験では送受波器 A 付
 近の地点 c₁、中間の地点 c₂、トランスポンダ 0 付近の地
 点 c₃ の 3 点の音速を移動式音速計で計測し、式(5)から
 海域の平均音速を求めた。固定式音速計による音速値は

1537.534(m/s)、移動式音速計による音速値は
 1538.90(m/s)、補正係数は 99.9111(%)となった。

移動式音速計の計測地点概念図を図 - 7 に、キャリブ
 レーション結果を表 - 2 に示す。

距離計測精度

超音波伝搬経路の海域の各地点における移動式音速計
 の音速値を $v_i (i=1、2、3 \cdots)$ とすると、移動式音速計
 による海域の平均音速 (m/s) と、固定式音速計と同等精
 度の音速値 (m/s) を次式のように表される。

$$\beta = \begin{cases} \beta & (n=1) \\ \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\beta_{v1}}{2} + \beta_{v2} + \beta_{v3} \cdots \beta_{v(n-1)} + \frac{\beta_{vn}}{2} \right\}}{n-1} & (n>1) \end{cases} \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{\rho \cdot \beta}{100} \quad (8)$$

送受波器 B とトランスポンダ 1、2、3 間の二次補正後
 の算出値は真値と比較するとそれぞれ 1.9cm、3.6cm、
 5.9cm であり、二次補正することで高精度な計測を行
 えることが確認できた。同様に一次補正後の算出値を真
 値と比較するとそれぞれ 2.3cm、9.8cm、9.6cm とな
 り、差は二次補正値と比較して大きくなっていることが
 分かる。今回の目標値は 100m に対して差は 2cm 以内
 としたが、二次補正を行うことで解決できた。

表 - 3 に二次補正後の精度を示す。

移動式音速計の有効性検証

計測ライン上の送受波器 B 側の地点 1、中間点の地点
 2、トランスポンダ 3 側の地点 3 の任意時刻における深
 度と音速値を図 - 8 に示す。

同一地点であっても深度によって音速値は異なり、地
 点 1 の深度 2.5~4.5m において約 1.5m 変化しており、
 距離 100m を計測したとき 0.1m の誤差を生ずること
 になる。この誤差を除去するには計測ライン上の音速値
 による補正が必要であり移動式音速計が有効であること
 が検証できた。また、音速値は時間の経過とともに常
 に変化しているため距離計測時刻と同期をとる必要が
 あり、本システムでは後処理で同期化を図っている。

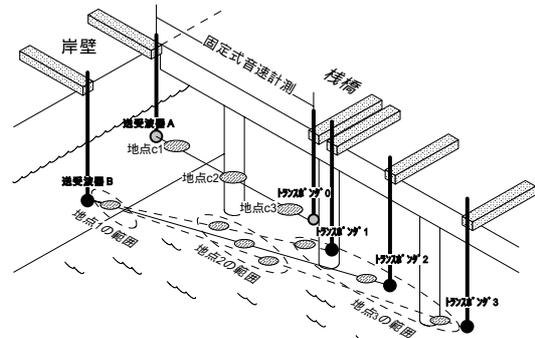


図 - 7 移動式音速計の計測地点概念図

表 - 2 固定式音速計と移動式音速計のキャリブレーション結果

送受波器	トランスポンダ	既知距離 (光波測距) L_0 (m)	超音波 計測距離 L_1 (m) $K=1500\text{m/s}$	固定式 音速値 (m/s)	地点 c_1 の 音速値 c_1 (m/s)	地点 c_2 の 音速値 c_2 (m/s)	地点 c_3 の 音速値 c_3 (m/s)	移動式 音速値 c_c (m/s)	音速補正係数 (%)
A	0	78.978	77.050	1537.534	1538.92	1538.91	1538.87	1538.90	99.9111

表 - 3 二次補正後の距離計測精度

送受波器	トランスポンダ	既知距離 (光波測距) L_0 (m)	超音波 計測距離 L_n (m) $K=1500\text{m/s}$	一次補正 距離 (m) $\cdot L_n / K$	一次補正 後の精度 (cm)	地点 1 の 音速値 c_1 (m/s)	地点 2 の 音速値 c_2 (m/s)	地点 c の 音速値 c_3 (m/s)	計測面上 の 音速値 (m/s)	端面間の 音速値 (m/s)	二次補正 距離 L (m)	二次補正 後の精度 (cm)
B	1	113.616	110.82	113.593	-2.3	1538.92	1538.95	1538.99	1538.95	1537.583	113.597	-1.9
B	2	206.855	201.71	206.757	-9.8	1539.32	1539.36	1539.39	1539.36	1537.992	206.819	-3.6
B	3	245.088	239.01	244.992	-9.6	1539.19	1539.14	1539.10	1539.14	1537.772	245.029	-5.9

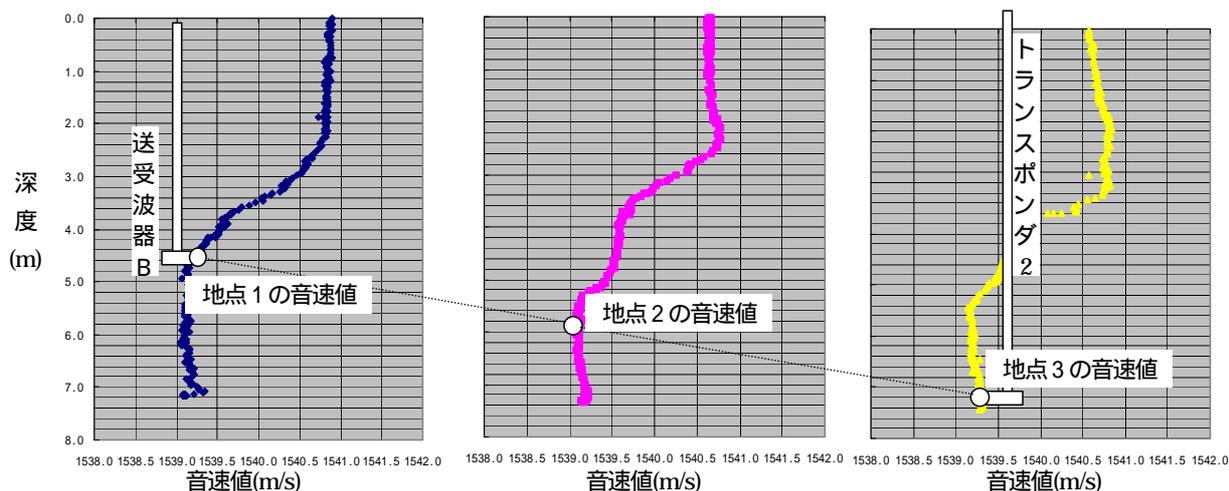


図 - 8 音速値の分布状況 (送受波器B～トランスポンダ2間)

5. まとめ

従来、超音波による計測は、長距離になると測距精度が低下し、大水深になると測位精度が低下するといった問題点があった。そこで、実用的な観点からこの問題を解決する方法を考案し、実験によって検証した。

本開発を通じて得られた成果を下記に示す。

WBLとすることで大水深下の水中構造物の測位精度を向上できる。

トランスポンダの回収に切り離し装置を使用したことで潜水作業を削減できる。

海水の音速値は同一地点であっても常に変化しており、固定式音速計の計測範囲外を計測する場合は移動式音速計による補正が必要である。

移動式音速計による補正を行うことで高精度な距離計測が可能である。

6. おわりに

現在、実工事の導入に向け、施工計画を進めている。工事概要、導入結果等については次の機会に報告する所存である。

謝辞

最後に本システムの開発に際し御協力いただいた関係者各位に感謝いたします。