土木学会論文集, Vol. 81, No. 18, 25-18166, 2025.

# 音響灯台方式による簡易・高精度水中測位システムの開発

堤　賢一郎[1]・杉本　英樹[1]・齋藤　隆[2]・吉澤　真吾[3]・松本　さゆり[4]

[1] 五洋建設（株）土木 M&E 本部 M&E 技術部開発グループ
（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: kenichirou.tsutsumi@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)
[2] 株式会社多摩川電子 技術部（〒252-1113 神奈川県綾瀬市上土棚中 3-11-23）
[3]（大）北見工業大学 工学部（〒090-8507 北海道北見市公園町 165）
[4] 正会員　（国研）海上・港湾・空港技術研究所 港湾空港技術研究所
（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1）

本研究では，港湾工事に適応する音響灯台方式の水中測位システムを開発し，実海域で測位精度を検証する試験を行った．音響灯台方式は，SSBL 方式など従来の測位システムに比べて，GNSS が不要であるなど構成が簡素で，複数点を同時に測位ができる．試験では，音響灯台である送波器を既設岸壁から設置して，水中の複数の測位対象物を高い精度で測量することができた．これらの結果をもとに，現場への適応性と有効性について報告する．

***Key Words :*** *underwater sound effects, measuring position, shallow sea, acoustic lighthouse system, marine civil engineering,*

## 1.　はじめに

港湾工事における構造物やブロックの設置，捨石を利用したマウンド築造工事，潜水士作業などでは，高精度な水中測位が要求される．従来の水中測位システムは，主に水中音響測位装置，GNSS衛星測位装置，方位計，姿勢検出器などで構成され，各装置の誤差や温度躍層などによる音速の変化が測位精度に影響する．そこで，水中の基準点に送波器を，測位対象物に受波器を設置する音響灯台方式による音響灯台測位システム（以下，「音響灯台システム」）を構築した．本研究では，実海域実証実験を行い，音響灯台システムの有効性を評価した．

## 2.　音響測位の概要

一般的に，海上工事などで使用する作業船などの測位には衛星測位を用いるが, 水中では電磁波の減衰が大きいため, 衛星測位を使用することができない. そのため, 水中にある構造物，潜水士や水中建機などの測位手段として超音波を利用した水中音響測位が用いられることがある．水中音響測位は船舶に設置した送受波器と呼ばれる音響測位装置や測位対象に設置するトランスポンダと呼ばれる応答器からなる．送受波器とトランスポンダとの信号伝搬に係る時間などから，送受波器から見たトランスポンダの相対位置を算出し，GNSS衛星測位などで求めた送受波器の設置座標や方位を与えることでトランスポンダの絶対位置を求める．

音響測位装置は基準座標の取り方によって, LBL（Long Base Line： 長基線）方式，SBL（Short Base Line： 短基線）方式，SSBL（Super Short Base Line ： 超短基線）の3つの方式[1),2)]に分類される．この名称は，測位に用いる送受波器の間隔であるベースラインの長さに由来する．以下に概要を説明する．

### (1)　LBL 方式の原理

LBL方式は，図-1のように海底に3基以上のトランスポンダを設置して，海上の船舶などに設置した送受波器と各トランスポンダ間の直距離を音響信号の送受によって求めて，海上の船舶などの位置を算出するものである．この方式は海底に設置するトランスポンダの位置座標が基準座標となるため，あらかじめ正確に求めておく必要がある．LBL方式のベースラインは，トランスポンダ間の距離となる．トランスポンダが3基（$T_1$,$T_2$,$T_3$）あれば，図-2に示すように送受波器とトランスポンダ間の距離で求められる交点は2点（M, M‘）算出できる．実際はトランスポンダが海底付近に設置されており，面対象の位置

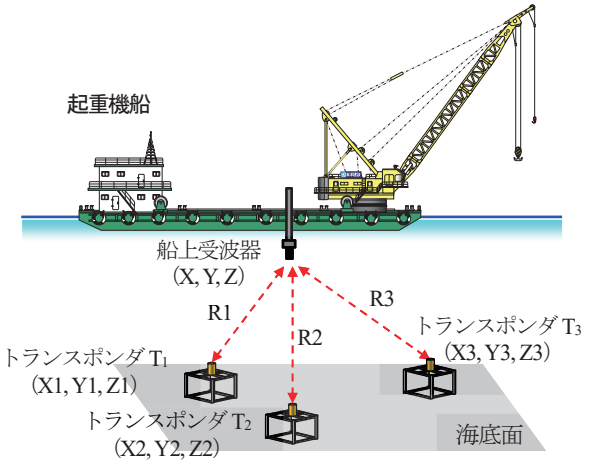



図-1　LBL方式の概要

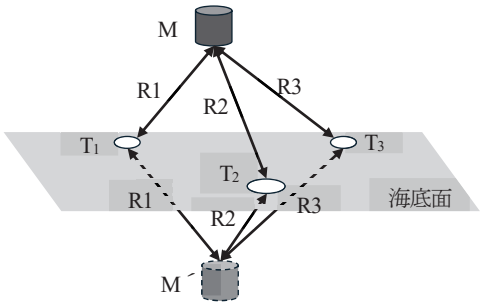



図-2　3点による計測と2つの解

にある点（M‘）は現実的な解ではないことからため，測定目標（M）の位置を特定できる．

### (2)　SBL 方式の原理

SBL方式は，図-3のように海上の船舶などに3基以上の受波器を設置して，送波器から海底の構造物や移動体に設置したトランスポンダへの質問信号に対する応答信号を各受波器で受信し，往復の伝搬時間を測定して得られる距離からトランスポンダとの相対位置を特定するものである．この方式は，海上の船舶に設置する受波器の位置座標が基準座標となり各受波器間隔が使用する船舶の大きさによって決定される．SBL方式のベースラインは受波器間の距離となる．ベースライン長が測定目標までの距離に対して短いが，基本的な原理はLBL方式と同様である．また，測位対象物の絶対座標を算出するには，受波器を設置する船舶のロール，ピッチおよびヨー角の高精度な検出が必要である．

### (3)　SSBL 方式の原理

SSBL方式は，複数の伝搬時間を使うLBL方式やSBL方式とは異なり，短い間隔で設置された受波器アレイを用いる．SSBL方式のベースラインは，受波器アレイ間の距離となる．各受波器アレイで超音波を受信するわずかな時間差から到来方向を算出し，受波器アレイとトランスポンダ間の伝搬時間から求められる距離を組み合わせて，位置を特定する方法である．一般的には，受波器と送波

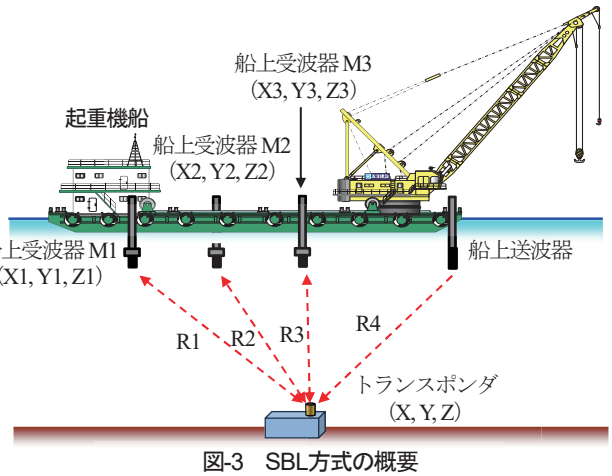



図-3　SBL方式の概要

器と合わせて一つの箇体に組み込んでいるため，取り扱いが容易というメリットから，港湾工事ではSSBL方式が多く用いられている．港湾工事で使用する水中測位システムは図-4のように，SSBL方式の水中音響測位装置とGNSSや方位計，姿勢検出器などで構成するものが主流であり，各装置の誤差と温度躍層などによる音速度の変化が測位精度に影響する．

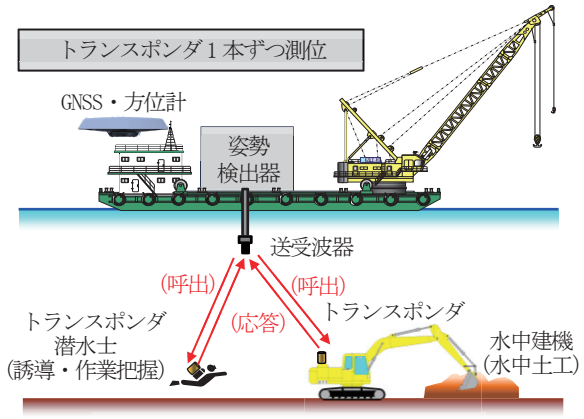



図-4 従来の水中測位システム

## 3.　音響灯台システムの概要

今回，開発した音響灯台システム（以下，「本システム」と記す）は，LBL 方式の原理をベースに以下のマルチパスと呼ばれる音響反射に強いアルゴリズムを組み合わせて，高精度の測位を行うものである．音響灯台は海底に固定した音響計測設備を指す言葉であるが，本研究では音響信号を発する海底に固定した設備を指す．

超音波伝搬距離は，送信した信号の複製である参照信号と受信した信号の相互相関関数を計算し，相関関数の振幅が最大となる時刻から送信時刻を差し引くことで，伝搬時間を算出し，水中音速を乗じて求める．これを，相互相関関数・最大値検出法と呼ぶ．

構造物近傍や浅海域では，海面，海底や岸壁などが近いため，マルチパスの影響が大きくなる．このため，反射波が重なり生じた合成波の振幅が直接波の振幅より大

きくなることがあり，測位誤差の要因となる．これに対し，山田 [3]らが有効性を確認した，繰り返し可変しきい値法を採用した．これは，相関関数波形に対してしきい値を超える音波の最短到達時間を検出する処理を，しきい値を変えながら繰り返す処理である．これにより，反射由来の合成波と参照信号の相関ピークが直接波より大きい場合でも，正しい時間位置を検出することができる．

### (1) 音響灯台システム

音響灯台システムの特徴を以下に示す．

① 測位対象の水深近くに基準点を設置するため，温度躍層による水中音速の影響を受けにくい（各音響灯台や測位対象の設置水深が異なり，温度躍層の影響が大きくなる場合，測位精度が低下する可能性がある）．

② 既設構造物上に基準点を設置するため，船上のGNSS 測位が不要となり水平測位誤差がない．

③ ベースライン（送波器間距離）の長さを確保できるため，精度の高い測位が可能である．

④ 信号伝送は送波器から受波器への片道伝搬のため，呼出信号と応答信号の往復伝搬で測距を行う水中音響測位装置に比べて伝搬誤差が半分となる．

⑤ 水中の受波器で信号を受信するため，同時に複数点での測位が可能である．

なお，音響灯台は 3 基以上必要となるが，増設することにより測位精度を向上させることが可能となる．

また，図-5 に運用構想図を示す．音響灯台は港内外問わず運用可能であるが，図-5 では外洋をイメージした構想図である．本研究では，音響灯台システムの測位精度を確認するため，音響灯台を岸壁に設置した（(2)に後述）．

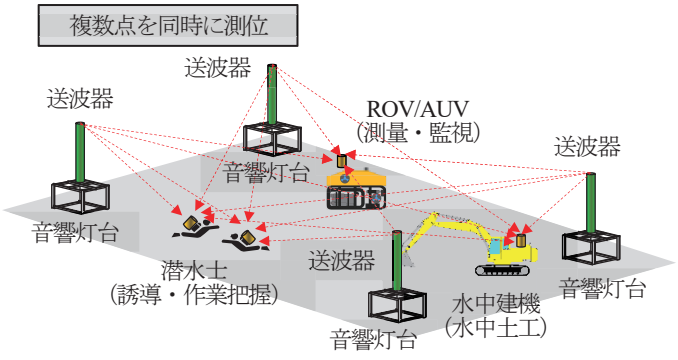



図-5 音響灯台構想

### (2) 測位試験仕様

図-6 に試験配置図を示す．音響灯台は岸壁に 4 基設置した．音響灯台は，正確な設置座標があれば，洋上や海底でも適用可能であるが，本試験では，揚重機などを使用して設置でき，正確な座標を測量にて求めやすい岸壁へ固定設置した．岸壁固定では，岸壁で音波が反射して測位に影響を与えることが懸念されるが，前述の繰り返し可変しきい値法を採用しているため，正確な測位が可能である．音響灯台を洋上に設置する場合は，音響灯台が常に動いているため，高精度な姿勢および位置による

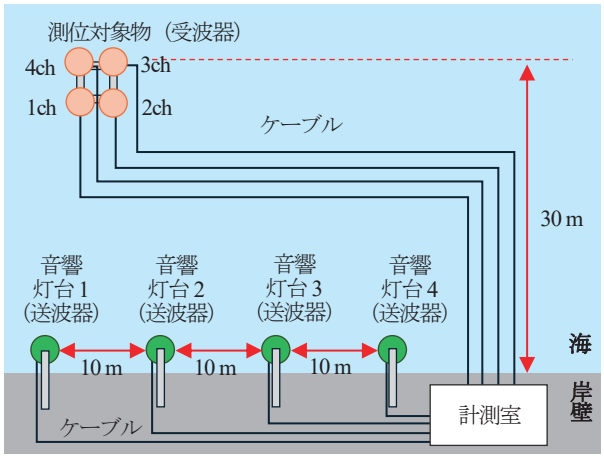



図-6 実証試験機器配置

基準点座標の補正が必要で，簡易的な導入は難しい．音響灯台を海底に設置する場合は，位置把握に音響測位装置を使用すると，その測定誤差も測位誤差に加わるため，音響灯台そのものの精度検証が難しい．以上の理由から，本試験は音響灯台を岸壁に固定することにした．

本試験では，1 個の受波器で，4 基の音響灯台からの信号を受信する．これは和田 [4]らが検証した，複数音源の水中音響測位手法を利用するもので，1 秒間に 15 点の同時測位が可能である．複数点の信号を同時に処理するために，重複した信号を分離する処理を行うが，信号干渉が多ければ，エラーと判定する．これは，同時測位数と測位性能がトレードオフの関係にあることを示している．こうした検証結果から，本試験では精度検証を目的とするため，重複なく送信した．1 基の音響灯台から送信される測位信号長は 160 ms である．1 秒の間に 4 基分の測位信号を割り付け，それぞれの送波器から 250 ms の間隔で送信した．送信間隔と測位信号長の差である 90 ms（=250 ms -160 ms）が，次の音響灯台からの送信信号に重ならない時間である．水中の超音波伝送速度（1,500 m/s）から，伝送距離 135 m（= 90 ms ×1,500 m/s）となり，30 m 四方の試験範囲では十分であった．今回の検証試験にあたり，信号長および送信間隔は，以上のように決定したが，測位対象の範囲，地理的な条件を考慮した信号および測位仕様を設計することが可能である．

## 4. 実証試験の概要

写真-1 のように既設岸壁に 10 m 間隔で 4 基の音響灯台 1～4 を水深 4 m の位置に設置して，岸壁から沖合約 30 m，水深約 7 m の海底に設置した写真-2 に示す受波器

を取り付けた測位対象物（以下，「固定局」と記す）を設置した．計測室にて音響灯台の送波操作および受波器で受信した信号から座標演算処理を行った．また，従来の

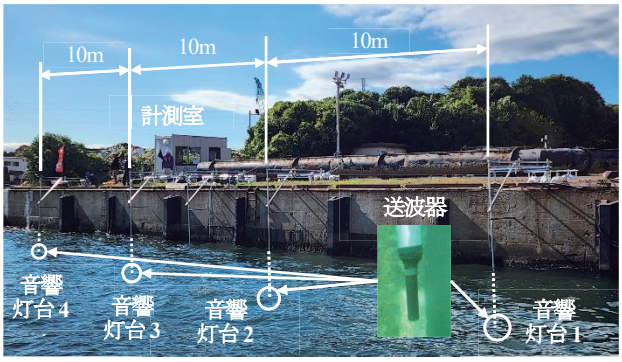



写真-1 音響灯台

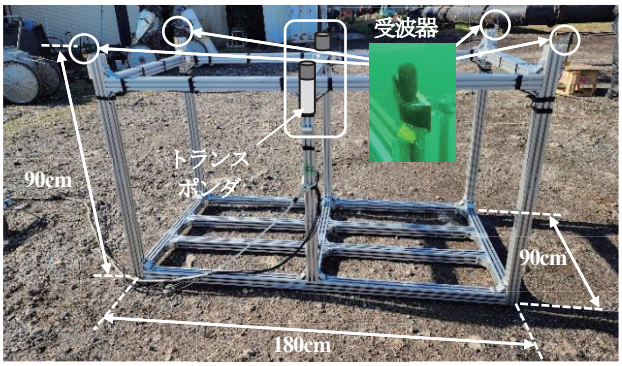



写真-2 固定局

音響測位装置との測位誤差を比較するため，港湾工事の深浅測量で使用するナローマルチビームソナー（R2Sonic，LLC 製・SONIC2024）を用いた測量（以下，「ナローマルチ測量」と記す）と，別の音響測位装置（株式会社 SGK システム技研製・SSBL-100CHD）を用いて固定局を測位（以下，「SSBL 測位」と記す）した．SSBL-100CHD の送受波器は音響灯台 2 と音響灯台 3 の中間地点の音響灯台と同じ水深に設置し，トランスポンダは固定局を構成する天端のアルミフレームの 2 つの長辺の中点に 1 台ずつ取り付けた．

## 5. 実証試験の結果

### (1) 測位のバラツキ

音響灯台により固定局を約30分間測位し，各chで330点程度のデータを収録した．測位結果を図-7に，固定局位置を拡大したものを図-8に示す．図-8から各chのプロット値は一点に集中しており，安定して測位ができたことが見てとれる．4点のプロット値を比べると，4chが測位値の幅が大きいことがわかった．そこで，次のプロセスで平均座標値およびバラツキを求めた．

① 各chのXY座標値ごとに標準偏差をとる．
② 各座標値の平均値を求め，平均値から標準偏差の2倍の範囲内の座標値を抽出する．
③ 抽出した座標値を用いて，各chの座標値およびバラツキ（平均座標値との差）の平均を算出して，表-1にまとめた

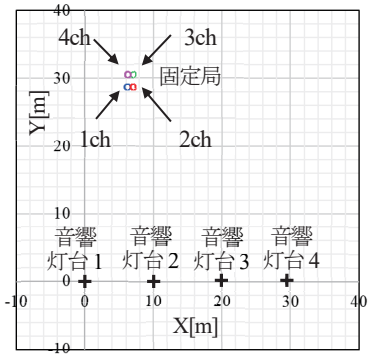



図-7 測位座標表示

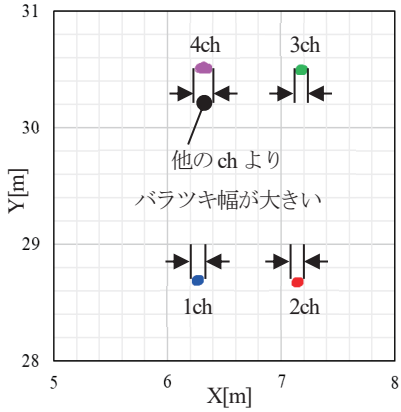



図-8 測位座標表示（拡大図）

表-1 各chの座標値の算出結果

| ch | | X座標 (m) | Y座標 (m) |
|---|---|---|---|
| 1 | 平均座標値 | 6.262 | 28.694 |
| | バラツキ | 0.008 | 0.006 |
| 2 | 平均座標値 | 7.142 | 27.687 |
| | バラツキ | 0.008 | 0.006 |
| 3 | 平均座標値 | 7.177 | 30.500 |
| | バラツキ | 0.008 | 0.006 |
| 4 | 平均座標値 | 6.298 | 30.520 |
| | バラツキ | 0.012 | 0.007 |

表-1から，4 chのX座標値が他のchの結果と比べてばらつきが大きいことがわかる．図-9に各chのX座標値およびY座標値の確率分布を示す．4 chの分布曲線が2 chに比べて低い釣鐘型であることから，外乱の影響が他のchよりも大きかったと推測される．今回，外乱の特定には至らなかったが，一般的に超音波伝送にかかわる外乱の要素として，水中における船舶の動力部の稼働音，水中作業中の音（溶接やケレン），水中生物の活動音ならびに潮流によるじょう乱雑音などが相乗したノイズ[5]や，水中構造物，船舶船体などによる伝搬の遮へいや反射などがあげられる．受波器の配置，周辺環境などを含めて，今後

の測位性能向上の課題である.

測位精度について，超音波が伝搬する送波器と受波器との間の斜距離をスラントレンジと呼び, SSBL測位の精度をスラントレンジ比で表すことがある．一般的にスラントレンジ比は1～3 %[6]である．今回の試験配置では，岸壁から固定局の間の距離が約 30 mであり，この距離をスラントレンジとして, 対するバラツキの百分率をとると，0.02～0.04 %となる．開発目標として，一般的な測位装置と同レベルの精度を目指しており，本結果からそれを上回る精度で測位できたといえる.

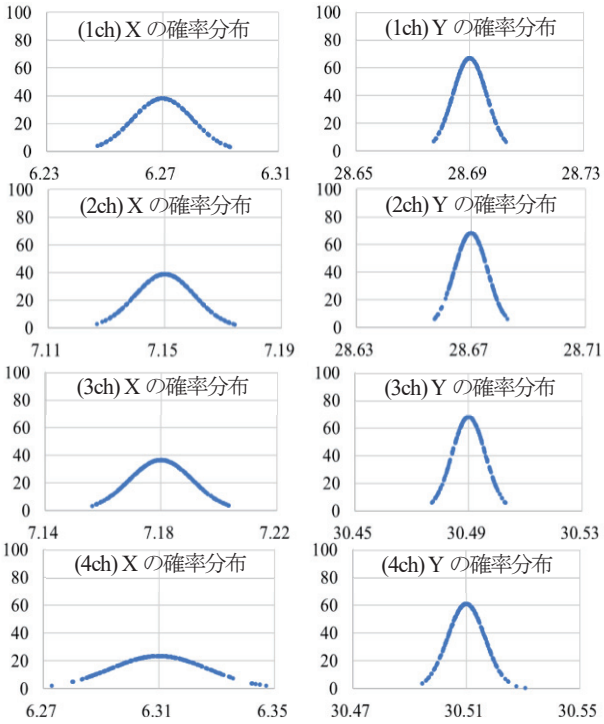



図-9 各 ch の XY 座標別の確率分布

### (2) 測位の正確度

測位の正確度を求めるにあたって，受波器間隔および測位座標という2つの指標を設けた. 受波器間隔を正確に監視することは，水中建機と据付ブロックの接触災害の防止などの安全面，測位座標を正確に把握することは安全面しかり施工品質の向上に繋がるためである．今回の試験では，固定局の絶対位置が不明であるから正確な測位誤差を検討することはできない．しかしながら，岸壁に設置した音響灯台の座標についてはスタティックなGNSS測位を行っており，安定的な測位値を取得したうえで固定局を測位しており，音響灯台と固定局間の音響測距から測位した音響灯台測位が最も誤差要因の小さい計測となる．そのため音響灯台測位を基準として，従来用いられているSSBL測位とナローマルチ測量による固定局の測位値を比較する. 図-10にナローマルチ測量による測量成果を示す．破線は固定局を強調するため描いており，海底から1 m程度の高さがある4個の点を固定局の四隅として，各受波器の座標を特定した．また，同図から，固定局が窪地に設置されていることがわかる．潜水士による設置状況の調査の結果，固定局が窪地に傾いて設置されていることが確認できたため，破線部が固定局であることは明らかであった．また，SSBL測位では約2時間計測し，約5500個の測位データを得た．得られた測位データから標準偏差の2倍の範囲の数値を抽出する工程を5回繰り返し，その後に平均値を求めた．この平均値を測位装置による測位結果とした.

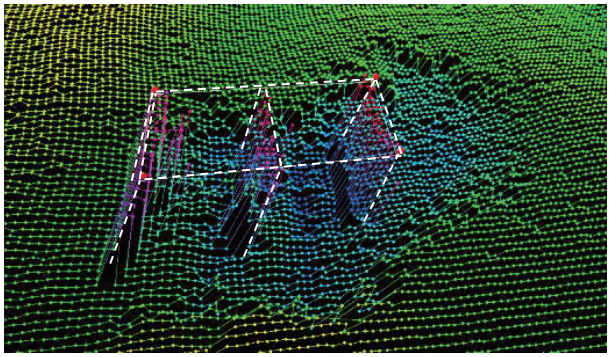


図-10 ナローマルチ測量成果

#### a) 受波器間隔

固定局に取り付けた4つの受波器の間隔をメジャーで計測した実測値と，表-1の座標を用いて算出した受波器間の距離の比較を表-2に示す．また，実測値に対する算出値の差が -0.3 ～ -2.6 cmであった．この値も岸壁から固定局の間の距離 30 mに対する百分率を求めると，0.5 ～ 2 .0 %であり，高い精度で計測できたといえる.

表-2 各ch間隔の計測結果

| ch間距離 | 1&2 (m) | 2&3 (m) | 3&4 (m) | 4&1 (m) |
|---|---|---|---|---|
| メジャー計測<br>※真値 | 0.889 | 1.826 | 0.895 | 1.826 |
| 音響灯台<br>(誤差) | 0.877<br>(-0.012) | 1.822<br>(-0.004) | 0.869<br>(-0.026) | 1.823<br>(-0.003) |
| ナロー<br>(誤差) | 0.886<br>(-0.003) | 1.735<br>(-0.091) | 0.877<br>(-0.018) | 1.791<br>(-0.035) |

#### b) 測位座標

音響灯台, ナローマルチ測量とSSBL測位による固定局の位置を図-11に，計測値を表-3と表-4に示す．固定局の座標が3種の計測方法でどれも異なっていることがわかる．SSBL測位では，音響灯台付近の位置は捉えているものの，海底や海面からのマルチパスに干渉され，位置ずれを生じたと考えられる. また, マルチビーム測量では, RTK-GNSSにより測位を行っており周囲に背の高い船舶などの障害物があったことや，船体動揺補正に用いるセンサ類の計測誤差などにより位置ずれが生じたと考えられる．真値は不明ながら，従来方法では正確な測位が難

しいことがわかる．今後ドライドックなどの環境で，光波による測位と併せた本方式の正確度の検証が必要と考える．

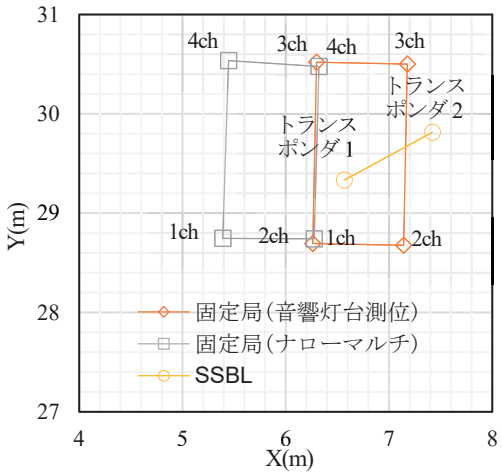



図-11 測位座標結果

表-3 音響灯台とナローマルチ測量による計測結果

| | ch 1 | | ch 2 | |
|---|---|---|---|---|
| | X座標 (m) | Y座標 (m) | X座標 (m) | Y座標 (m) |
| 音響灯台 | 16.262 | 28.694 | 17.142 | 28.677 |
| ナロー | 15.390 | 28.746 | 16.276 | 28.742 |
| 絶対差 | 0.872 | 0.052 | 0.866 | 0.065 |
| | ch 3 | | ch 4 | |
| | X座標 (m) | Y座標 (m) | X座標 (m) | Y座標 (m) |
| 音響灯台 | 17.177 | 30.500 | 16.298 | 30.520 |
| ナロー | 16.322 | 30.476 | 15.446 | 30.536 |
| 絶対差 | 0.855 | 0.024 | 0.852 | 0.016 |

表-4 音響灯台とSSBL測位による計測結果

| | X座標 (m) | Y座標 (m) |
|---|---|---|
| 固定局 1 chと 4 chの中点 | 1.114 | 30.422 |
| SSBL測位トランスポンダ1 | 0.925 | 30.710 |
| 絶対差 | 0.288 | 0.190 |
| 固定局 2 chと 3 chの中点 | 1.966 | 30.202 |
| SSBL測位トランスポンダ2 | 1.616 | 30.015 |
| 絶対差 | 0.187 | 0.350 |

## 6. おわりに

本試験により，新たに開発した音響灯台方式の水中測位システムが，水中での固定局の位置を高精度に測位できることがわかった．また，送波器に近い ch 1 や ch 2 の測位状況が良いことから，測位対象物を囲むように音響灯台を設置することにより測位安定性が向上する可能性を示唆している．今回は，構造物や作業船が近傍にある港湾工事現場への/実装を想定して，作業船が隣接して係留している岸壁を試験場所に選定したが，沖合の防波堤工事や風力発電施設の整備など，マルチパスなどの影響が少ない開けた海域では，より安定した測位が期待できる．また，システム構成が複雑ではないため，現場導入作業に多くの人材やコストを要しない．

今回の検証で音響灯台方式の有効性と高精度な測位能力が実証された．港湾工事だけでなく，今後整備される風力発電施設の維持管理や海底資源開発における調査および採掘作業，海上海象の影響を受けにくい水中輸送などの構想においても有効であり，ロボティクスや計測および調査など幅広い分野への応用に取り組んでいきたい．

謝辞: 本研究の検証試験にあたり，試験海域と船舶の提供をいただいた五栄土木株式会社袖ヶ浦事業所，潜水作業にご協力いただいた株式会社マリテックス，ナローマルチ測量を実施いただいた株式会社シーエスネットの関係者に感謝します．

**REFERENCES**

1) 杉本英樹：建設の施工企画, pp. 53-54,（社）日本建設機械化協会， 2012. [Sugimoto, H.: *Kensetsu no sekoukikaku*, pp. 53-54, Nihonkennsetsukikaikakyoukai, 2012.]
2) 海洋音響学会：海洋音響の基礎と応用，pp. 236-242, 成山堂書店, 2004. [Kaiyoonkyogakkai.: Kaiyouonkyou *no Kiso to Ouyo*, pp. 236-242, 2004.]
3) 山田優生，吉澤真吾，齋藤隆，杉本英樹：音波反射に強い距離測定アルゴリズムに基づく水中音響測位，電子情報通信学会 SIS 研究会, SIS2023-8，pp. 41-44, 2023. [Yamada, Y., Yoshizawa, S., Saito, T., and Sugimoto, H.: Underwater Acoustic Positioning Based on Distance Measurement Alogrithm Resistant to Acoustic Reflection, *The Institute of electronics, information and communication engineers*, IEICE Technical Report SIS2023-8 pp. 41-44, 2023.]
4) 和田篤士，吉澤真吾，湯浅智志，杉本英樹：時分割・符号分割多重による複数音源を対象とした水中音響測位の試験評価，電子情報通信学会 SIS 研究会, SIS2022-21，pp. 53-56，2022. [Wada, A., Yoshizawa, S., Yuasa, S., and Sugimoto, H.: Test Evaluation of Underwater Acoustic Localization for Multiple Sound Sources by Time division and Code Division Multiplexing, *The Institute of electronics, information and communication engineers*, IEICE Technical Report SIS2022-21 pp. 53-56, 2022.]
5) 土屋明（訳）: 水中音響の原理, pp. 202-204, 共立出版, 1978. [Tsuchiya, A.: *Suityuonkyou no Genri*, pp. 202-204, Kyouritsu Shuppan, 1978.]
6) 浦環，高川真一：海中ロボット総覧，pp. 136，成山堂書店 1994. [Ura, T and Takagawa, S: *Kaityu robotto souran* Seizando Shoten, pp. 136, 1994.]

**(Received February 4, 2025)**
**(Accepted May 15, 2025)**

土木学会論文集, Vol. 81, No. 18, 25-18166, 2025.

# DEVELOPMENT OF A SIMPLE AND ACCURATE UNDERWATER POSITIONING SYSTEM USING ACOUSTIC LIGHT-HOUSE METHOD

Kenichirou TSUTSUMI, Hideki SUIGIMOTO,
Takashi SAITO, Shingo YOSHIZAWA and Sayuri MATSUMOTO

In this study, we developed an underwater positioning system utilizing acoustic beacons adapted for harbor construction and conducted tests in real sea areas to verify positioning accuracy and tracking performance. Compared to conventional side systems such as the SSBL system, the acoustic Light-house method is simpler in configuration, eliminating the need for GNSS, and allows for simultaneous positioning of multiple points. During the tests, acoustic Light-houses (transmitters) were installed on existing quay walls, enabling high-precision measurement of multiple underwater positioning targets. Based on these results, we report on the adaptability and effectiveness of the system in real-world applications.