

MEMS マイクを用いた音響測位装置の開発

Development of the acoustic positioning system using MEMS microphone

○学 濱田 大貴 (九工大) 末吉 弘昌 (九工大)
増田 殊大 (東大) 正 西田 祐也 (九工大)
正 石井 和男 (九工大)

Daiki HAMADA, Kyushu institute of technology, daiki.hamada745@mail.kyutech.jp
Hiromasa SUEYOSHI, Kyushu institute of technology, sueyoshi.hiromasa433@mail.kyutech.jp
Kotohiro MASUDA, The university of Tokyo, k-masuda@g.ecc.u-tokyo.ac.jp
Yuya NISHIDA, Kyushu institute of technology, y-nishida@brain.kyutech.ac.jp
Kazuo ISHII, Kyushu institute of technology, ishii@brain.kyutech.ac.jp

Marine resource survey by an underwater vehicle is expected. To realize cheap self-positioning for the underwater vehicle, we have been developing on the acoustic positioning system which is low cost and easy to maintain. The acoustic positioning system has four hydrophones which consists of molding commercially available MEMS microphones with pressure-resistant resin, an audio device, and a micro controller. To evaluate the system, positioning experiments was performed in the small tank. In the experiments, the system detected delay time among four hydrophones, however its positioning was not good accuracy. In the future, we will improve the accuracy of positioning by interpolating data and considering the effect of baseline.

Key Words: Underwater vehicle, Acoustic positioning, Hydrophone

1. 背景

水中ロボットを用いた海洋エネルギーや鉱物資源の開発が期待されている。島国である日本は広範囲の排他的経済水域を持つため、海洋資源の調査が活発に行われている。日本近海においてはメタンハイドレートや鉱物資源が存在することが推定されている[1]。これらの資源は広い範囲に分布しているため、行動範囲に制限がなく、自律航行可能な水中ロボットAUV(Autonomous Underwater Vehicle)に期待が集まっている。

AUVが自律航行するためには高精度な運動制御システムや環境認識システム、経路計画などが必要である。その中でも自己位置推定手法はロボットの基本的かつ重要な課題である。水中では電磁波の減衰が大きく、測位手法としての運用は難しいため、自己位置推定には超音波を利用した音響測位が一般的に用いられている[2]。

音響測位のための装置はいくつか市販されている[3][4][5]。これらの装置ではAUVにピンガやトランスポンダといった送波器を装着し、その音波を船舶に着けたハイドロフォンやトランスポンダといった受波器により受信することで音響測位する。しかしこれらは導入コストが高く普及しづらい、専用の回路により構成されているため故障した際に修理できない、という課題がある。

本論文では市販されている音響測位装置の課題に注目した。

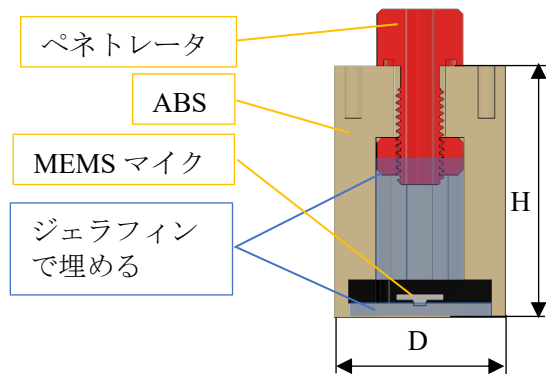


Fig.1 Hydrophone

MEMS マイクとジェラフィンを用いて作成したハイドロフォンを用いて水中音波を計測し、安価でメンテナンスがしやすい音響測位装置を提案する。

2. 水中音響測位システム

まず音響を取得するための水中マイクであるハイドロフォンについて説明する。その後音響測位の原理について説明し、製作した音響測位システムについて説明する。

2.1 MEMS マイクを用いたハイドロフォン

ハイドロフォンの構成機器、製作方法を説明する。廉価なハイドロフォンを製作するためにMEMS マイクを用いたモジュール (SPU0414HR5H-SB) を使用した。MEMS マイクは大量製造可能であるため安価で、振動・衝撃や温度変化に強いという特徴がある。水中でマイクを使用可能にするためには、水からの音波をマイクに伝える媒質が必要である。このとき、媒質の条件としては、水の音響インピーダンスである $1.48 \times 10^5 [\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}]$ に近く、マイク全体を空気が入ることなく覆える材料でなくてはならない。そこで本研究では音響インピーダンスが $1.55 \times 10^5 [\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}]$ である耐圧樹脂 (Jellafin® (ジェラフィン)) に注目した。耐圧樹脂は脱泡器を用いて気泡を取り出し、流し込むことでハイドロフォンを製作した。製作したハイドロフォンの構成を図1に、構成機器を表1に示す。

Tab.1 Structure of hydrophone

寸法 (ΦD×H) [mm]	Φ36×65
重量 [g]	200
材料	MEMS マイク ABS ジェラフィン
ペネトレーター	BlueRobotics M10 Cable Penetrator for 6mm Cable

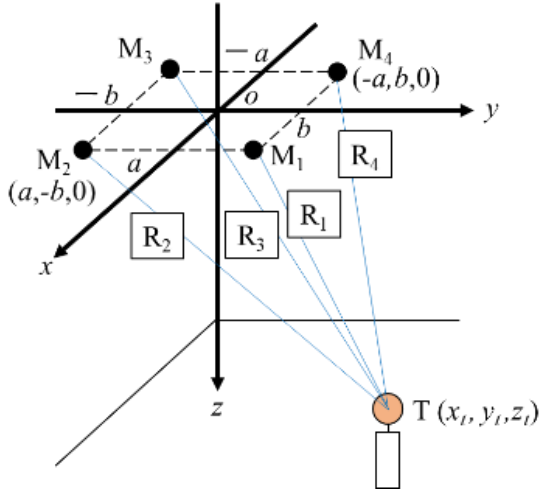


Fig.2 Positioning by SBL

2.2 音響測位の原理

音響測位にはLBL(Long Base Line)やSBL(Short Base Line)、SSBL(Super Short Base Line)方式といった方式がある。本研究ではSBL方式を用いた。SBL方式は3個から4個のマイクロフォンを設置し、海中にある音源からの音波を各受波器で受信し、伝播時間を測定して得られる距離から音源の相対位置を算出する音響測位手法である[2]。SBL方式では送波器1個で測定できるため、キャリブレーションが不要である。そのためLBL(Long Base Line)方式と比較して運用が容易となる。その反面、水深が深くなると精度が低下する。

次にSBL方式に基づいて4個のマイクロフォンを用いた音源特定原理について述べる。図2のようにマイクロフォン $M_n(n=1\sim 4)$ を対象に設置し、この中心に原点を置く座標系での音源 T の位置 (x_t, y_t, z_t) を表現する。このときマイクロフォンから音源までの距離 $R_1\sim R_4$ をスラントレンジといい、マイクロフォンの設置位置 a, b をベースラインという。マイクロフォンの位置を (x_n, y_n, z_n) ($n=1\sim 4$)とすると、スラントレンジ $R_n(n=1\sim 4)$ は

$$R_n^2 = (x_t + x_n)^2 + (y_t + y_n)^2 + z_t^2 \quad (2)$$

とあらわされる。この式から、

$$R_1^2 + R_2^2 - R_3^2 - R_4^2 = 8ax_t \quad (3)$$

$$R_1^2 - R_2^2 - R_3^2 + R_4^2 = 8by_t \quad (4)$$

$$R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 + R_4^2 = 4(x_t^2 + y_t^2 + z_t^2 + a^2 + b^2) \quad (5)$$

が導出でき、これを変形することで

$$x_t = (R_1^2 + R_2^2 - R_3^2 - R_4^2)/8a \quad (6)$$

$$y_t = (R_1^2 - R_2^2 - R_3^2 + R_4^2)/8b \quad (7)$$

$$z_t^2 = ((R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 + R_4^2)/4 - x_t^2 - y_t^2 - a^2 - b^2) \quad (8)$$

と、音源の位置を推定できる[2]。

2.3 遅れ時間の推定と遅れ時間に基づく音響測位

2.2節で述べたSBL方式ではスラントレンジが未知数であり、そのまま解くことはできない。そこで各マイクロフォンが信号を受信したときの遅れ時間に注目する。スラントレンジ R_1 を基準と考える。このとき他のスラントレンジ R_2, R_3, R_4 は、受信波形の遅れ時間 $\Delta\tau_{ii}$ ($i=2,3,4$)を用いて

$$R_1^2 = (x_t - a)^2 + (y_t - b)^2 + z_t^2 \quad (9)$$

$$R_2 = R_1 - \Delta\tau_{12}c \quad (10)$$

$$R_3 = R_1 - \Delta\tau_{13}c \quad (11)$$

$$R_4 = R_1 - \Delta\tau_{14}c \quad (12)$$

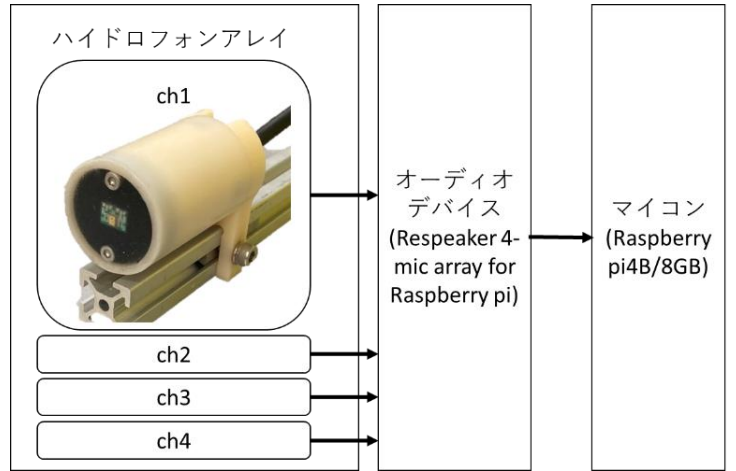


Fig.4 Structure of acoustic positioning system

と表現することができる。式(6)~(8)に加えて式(9)~(12)を連立させることにより音源の位置 (x_t, y_t, z_t) の推定が可能となる。

遅れ時間を求める手法としては単純に閾値による立ち上がり時間の差から求める方法と、相互相関関数により求める手法がある。相互相関関数は2つの信号間の類似度や時間遅れの測定に利用される関数であり、時刻 t における信号 $u(t)$ とさらに時間 τ だけ経過した信号 $v(t+\tau)$ とすると、それらの相互相関関数は

$$R_{uv}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} 1/T \int_0^T u(t)v(t+\tau) dt \quad (13)$$

となる。この相関関数が最大となる遅れ τ が2つの信号間の時間差となる。

2.4 音響測位装置

本研究では既存の音響測位装置がもつ導入コストの高さ、メンテナンス性が良くないという課題に注目し、これらを解決する音響測位装置を開発した。開発のコンセプトを以下に示す。

- ・10万円程度で製作可能
- ・既存オーディオデバイスで開発可能

製作した音響測位装置の構成について説明する。図3に音響測位装置の構成を示す。これらのマイクロフォンが受信した音波の遅れ時間により位置推定を行うため同時に録音する必要がある。そこで4つのマイクを同時に録音可能であるオーディオデバイス(Respeaker 4-Mic Array for Raspberry Pi)を用いた。また、オーディオデバイスはRaspberry pi (Raspberry Pi 4 Model B/8GB)に接続し、取得した音波を保存した。

次に録音したデータを用いた音響測位の流れについて説明する。まずバンドパスフィルタを用いて録音した波形から送波器の持つ周波数帯域に対応する波形のみを抽出する。その後波形から音波の立ち上がりを閾値により検出する。検出した音波は検出した点を中心に前後に切り出しを行い受信波形とする。このとき受信波形の形を比較できるように受信波形を正規化する。一度切り出したあとは反射音や残響を考慮し、検出した点から読み飛ばしをする。こうして各マイクロフォンの録音データから受信波形を切り出した後は遅れ時間を算出する。このとき、送波器の発振周波数、発振間隔、発振時間といった発振設定はわかっているものとし、切り出しや読み飛ばしをするデータ数はこれら設定を基準に経験的に定めた。遅れ時間の算出には立ち上がり検出による方法と相互相関関数による方法の2つの手法を採用している。立ち上がり検出では受信波形の包絡線を求め、受信波形が最大値に対して

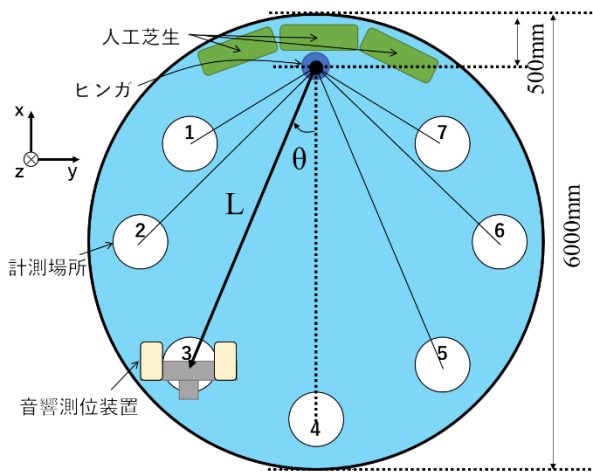


Fig.4 Experiment environment

10[%]に変化した点を立ち上がり時間として取得する。その後一つの hidroフォンの立ち上がり時間を基準としてほかの hidroフォンの立ち上がり時間の遅れを遅れ時間として算出する。一方で相互相関関数による方法では受信波形全体を一つの関数として、ほかの受信波形との相互相関を取得することにより遅れ時間を算出する。遅れ時間が算出された後は式(6)~(12)に代入し、それを解くことで音源の座標および各スラントレンジを算出する。

3. 性能評価試験

作成した音響測位装置によって音響測位を行う前に、 hidroフォンの受波試験を行い、水中環境下での音波の取得可能かどうかを評価した。その後 hidroフォンの受波感度特性試験を行い、作成した hidroフォンの周波数に対する感度の変化を評価した。最後に hidroフォンを用いて音響測位装置を構成し、音響測位実験を行うことで音響測位装置を評価した。音響測位装置では 2.4 節に述べた流れに従い受信波形を解析し位置推定を行った。

3.1 受波感度特性試験

作成した hidroフォンの受波感度とその周波数特性を調べた。市販の hidroフォンを横に並べ、音波からの音圧を計測し、その際に発生する電圧から感度を計算した。

実験条件について述べる。実験は室内の水槽で行った。水槽の大きさは縦 600[mm]横 1700[mm]深さ 500[mm]である。水槽の周りにはプラスチックシートおよび人工芝を敷き、反射波を減衰させた。送波器には海洋電子株式会社製のピンガを使用した。発振間隔は 2[s]とし、発振波形数は 10 波とした。市販の hidroフォンは TELEDYNE 社製の RESONTC4013 を用いた。 hidroフォンの高さは水面から 250[mm]とした。ピンガの高さは hidroフォンの中心とピンガの中心が合うように設定した。 hidroフォンとピンガの距離は 800[mm]とした。デジタルオシロスコープ (Analog Discovery2) を用い受信波形を表示させた。デジタルオシロスコープのサンプリングレートは 1[MHz]に設定した。 hidroフォンの受信をするためにグラウンドは水中に落とし共通とした。

次に実験方法について述べる。まずピンガの発振周波数を 21.164[kHz]に設定した。製作した hidroフォンを設置し音源からの音波を受信した。受信波形を確認したのち、今度は市販の hidroフォンを製作した hidroフォンと同様の高さ、横に 50[mm]離れた位置に設置し受波周波数特性実験を行った。

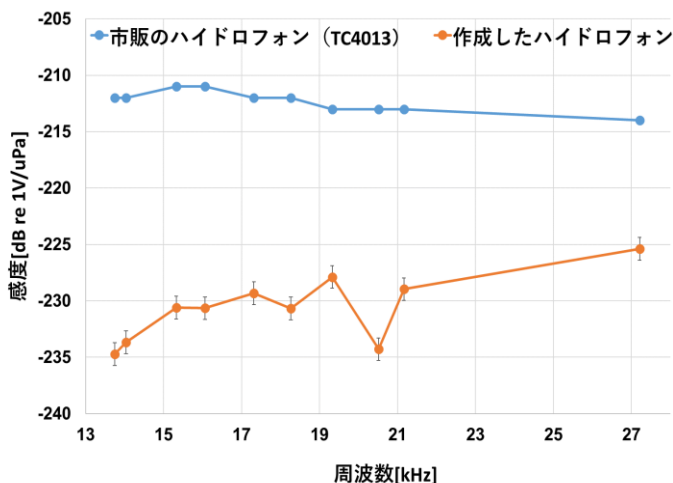


Fig.5 Frequency response of receiver sensitivity

ピンガからの音波を 2つの hidroフォンで受信し記録した。その後市販の hidroフォンの受信結果とその感度よりピンガの音圧を計算した。そうして得た音圧と製作した hidroフォンの受信電圧を再び式(1)に代入することで製作した hidroフォンの感度を計算した。ピンガの発振周波数を 27.112、20.513、19.324、18.265、17.316、16.064、15.326 14.035 13.746[kHz]に変更し同様に実験を行い、感度を計算することでそれぞれの発振周波数に対する受波感度特性を取得した。

3.2 音響測位試験

作成した 4つの hidroフォンを用いてピンガの位置を推定する実験を行った。

実験条件について述べる。実験環境は図3のように設置した。実験で使用した水槽は直径 6000[mm]、深さ 1200[mm]であった。音響測位装置は 2.4 節で述べたものを使用した。 hidroフォンのベースラインは 90[mm]、115[mm]とした。音響測位装置の中心位置は水面から 750[mm]にし、ピンガの高さは設置した hidroフォンの中心位置とピンガの中心位置が合うようにした。またピンガの近くの壁には反射音の防止として人工芝を敷いた。ピンガの発振周波数は 21.164[kHz]とし、発振間隔は 2[s]、発振波形数は 10 波とした。

実験方法について述べる。ピンガと hidroフォンをそれぞれ水に沈め、ピンガからの音波を音響測位装置で録音した。その後 hidroフォンの沈める場所を図3の①~⑦に変更し、それぞれの場所で実験した。測定位置は Lと thetaにより設定され、それぞれ①:L=2300[mm]、theta=67[°]、②:L=3400[mm]、theta=45[°]、③:L=4400[mm]、theta=28.6[°]、④:L=4800[mm]、theta=0[°]、⑤:L=4400[mm]、theta=-28.6[°]、⑥:L=3400[mm]、theta=-45[°]、⑦:L=2300[mm]、theta=-67[°]、である。録音の際の hidroフォンの録音データは x 軸方向に向けた。それぞれの hidroフォンの録音データをバンドパスフィルタにかけた。通過後のデータから受信波形を切り出し、立ち上がり時間と相互相関関数それぞれから遅れ時間を計算した。その後算出された遅れ時間からピンガ位置を推定した。各受信波形について同様にピンガの位置を推定し、取得した遅れ時間の平均値、推定した位置の平均値を計測した位置ごとにまとめた。録音時間は 10[s]とし、録音のサンプリングレートは 96[kHz]とした。

4. 実験結果

4.1 受波感度特性試験結果

受波感度特性試験により得られた周波数ごとの感度を図4に示す。x 軸が周波数[Hz]、y 軸が受波感度[dB]である。最も

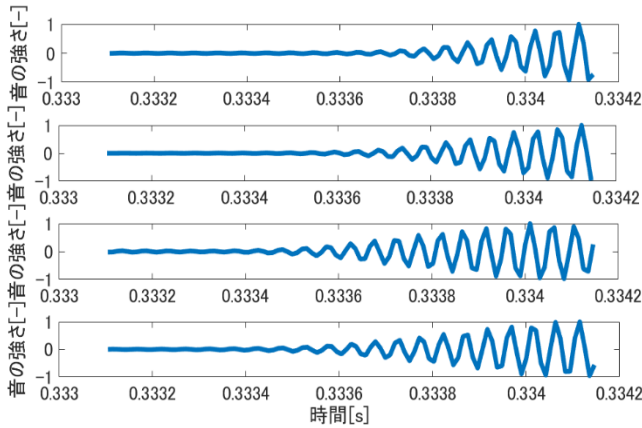


Fig.6 Receiving waveforms

感度が良い周波数は 27.112[kHz]で-225±0.476[dB]であった。

4.2 音響測位実験結果

図 5 に今回製作した音響測位装置を用いてピンガの音波を録音した一部である受信波形を示す。x 軸が時間[s]、y 軸は最大受音レベルを 1 とした時の音の強さである。また、表 2 に立ち上がり時間計測に基づく音響測位の結果を表 3 に相互相関数に基づく音響測位の結果をまとめる。表における推定座標および推定距離、推定角度が遅れ時間に基づき算出された値であり、距離と角度が今回設定した値である。表中の―は計算不可能であったを示す。

5. 考察

受波感度特性試験について、図 5 に示すように実験で使用した市販のマイクロホンに比べると、感度が悪いことが確認された。これを改善するためにはマイクロホンを構成する MEMS マイクを変更し感度そのものの向上や、音響インピーダンスがより水に近い材料の採用が考えられる。

音響測位実験について、図 6 に示すように立ち上がり時における受信波形の形状にほとんど差がないことが確認された。しかし、設定した 10 波よりも多くの波が確認された。これは壁からの反射波による波の合成が考えられる。反射音については実海域で実験した結果と比較することで影響を調べることが可能と考える。

また表 2 表 3 に示した音響測位の結果では、遅れ時間を立ち上がり時間により算出した場合と相互相関数により算出した場合の両方で正確な位置を出すことができなかった。これを改善するためには、取得したデータの補間およびベースラインの工夫が挙げられる。今回製作した音響測位装置のオーディオデバイスでは最大サンプリング周波数を 96[kHz]である。送波器は 21.164[kHz]と設定したため、1 周期波形に対し約 4 つのデータが取得される。1 周期に対して取得しているデータ数が不足していると誤差が大きくなるため、正確な位置推定ができなかったのではないかと考える。この問題を解決するために取得した生のデータを処理するのではなく、データ補間により間のデータを推定しデータ数を増やすことが考えられる。データ補間により遅れ時間の細かな表現が可能となり、位置推定の精度が向上すると考える。また、ベースラインによる影響も大きい。今回は同一平面上の四角形の頂点に配置したためベースラインを稼ぐことができず、位置推

Tab.2 Result of acoustic positioning based on rise time detection

測定位置	遅れ時間			推定座標			推定距離	推定角度	距離	角度
	Δt_{12} [s]	Δt_{13} [s]	Δt_{14} [s]	x[mm]	y[mm]	z[mm]	L[mm]	θ [°]	L[mm]	θ [°]
①	0.000092	0.000068	0.00013	80.021	260.399	312.331	379.414	46.329	2300	67
②	0.000003	0.000008	0.000141	-14.429	556.637	476.361	694.336	1.425	3400	45
③	-0.000088	0.000032	0.000054	-390.496	-93.061	956.417	1089.847	-50.545	4400	29
④	-0.000253	0.000053	0.000133	-996.819	336.212	73.072	1110.526	—	4800	0
⑤	0.000044	0.00017	0.000148	-412.172	-90.507	759.088	960.439	21.936	4400	-29
⑥	0.000118	0.000094	0.000057	78.505	-155.513	811.199	852.951	62.124	3400	-45
⑦	0.000092	0.000067	0.000002	79.982	-272.784	858.392	948.794	42.617	2300	-67

Tab.3 Result of acoustic positioning based on cross-correlation function

測定位置	遅れ時間			推定座標			推定距離	推定角度	距離	角度
	Δt_{12} [s]	Δt_{13} [s]	Δt_{14} [s]	x[mm]	y[mm]	z[mm]	L[mm]	θ [°]	L[mm]	θ [°]
①	-0.000031	-0.00001	-0.00001	-67.93	0.002	1018.422	1043.754	-15.095	2300	67
②	0.000031	-0.000042	0.000081	-6.79	399.868	676.06	750	15.095	3400	45
③	0	0.000158	0.000113	-516.306	-190.974	640.259	1040.294	0	4400	29
④	-0.000254	-0.000217	-0.000119	-122.283	407.986	1007.098	1155.834	—	4800	0
⑤	-0.000006	0.00014	0.000081	-720.109	-468.75	631.296	1154.407	-2.988	4400	-29
⑥	0.00001	-0.00001	0.00001	67.93	86.806	949.523	950.694	4.98	3400	-45
⑦	-0.000004	0.000004	-0.000025	-27.172	-59.028	997.41	1045.764	-2	2300	-67

定の計算に誤差が生じたのだと考える。例えば同一平面上だけでなく立体的にマイクロホンを配置することでベースラインを稼ぐことが可能となる。一方で立体的に配置することによる受信波形への影響などは十分に考慮する必要がある。

立ち上がり時間検出による遅れ時間の推定そのものについてはある程度の精度は確保できたと考える。表 2 における位置③と⑤の推定角度では符号が逆転しており、送波器が音響測位装置から見て左右のどちらにあるかを検出できている。一方で位置①と⑦では推定角度はほぼ同じ値となった。これは壁からの影響が大きくなったことと、マイクロホンの指向性による影響であると考えられる。これらの位置は音響測位システムの正面が壁から近いので反射が強く表れたと考える。

6. 結論

本論文では既存オーディオデバイスで開発可能かつ安価である音響測位装置の提案を行った。実験では製作したマイクロホンの周波数特性を示し、評価した。製作した音響測位装置を用いた音響測位実験では良い結果は得られなかったものの、音響測位装置のさらなる開発に向けて様々な観点から議論を行った。今後はベースラインによる影響を考慮することやデータ補間といった処理を行うことで精度の向上を目指す。

参考文献

- [1] 大川 豊, 高井 隆三, 矢後 清和, 石田 茂資, 北村 文俊, 千秋 貞仁, 國分 健太郎: “海洋資源利用に関する調査”, 海上技術研究所報告, Vol.6, No.3, pp.51-104, 2006
- [2] 海洋音響学会: “海洋音響の基礎と応用”, 成山堂書店, 2004
- [3] “WATER LINKED”, <https://waterlinked.com/underwater-gps/>(最終閲覧日:2021-03-08)
- [4] “blueprint subsea”, <https://www.blueprintsubsea.com/pages/product.php?PN=BP00843>(最終閲覧日:2021-03-08)
- [5] “株式会社オーシャンウイングス” https://oceanwings.jp/CATALOG_2020/GAPS.pdf(最終閲覧日:2021-03-08)