

海中位置推定へのアプローチ

高橋 応明[†] 野田 耕司[†] 陳 強[‡] 石井 望^{††}

[†]千葉大学 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

[‡]東北大学 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

^{††}新潟大学 〒950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050

E-mail: [†]omeifaculty.chiba-u.jp, [‡]chenq@ecei.tohoku.ac.jp, ^{††}nishii@eng.niigata-u.ac.jp

あらまし 電波の海中での応用の1つとして、水中での位置推定システムの検討を行った。本報告では、ダイバーの位置推定を目的とし、kHz帯にて数値計算を行った。海水は高導電性損失媒質であるため、伝搬損失が最小になる経路で伝搬し、ラテラル波になることを示した。また、受信電力強度を用いて位置推定ができることを示した。

キーワード 微小ダイポールアンテナ, 導電媒質, 海中での伝搬, ラテラル波, 測位, FDTD法

Approach to undersea position estimation

Masaharu TAKAHASHI[†] Koji NODA[†] Qiang CHEN[‡] and Nozomi ISHII^{††}

[†]Chiba University, 1-33 Yayoicho, Inage-ku, Chiba, 263-8522 Japan

[‡]Tohoku University, 6-6-05 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579 Japan

^{††}Niigata University, 8050 Ikarashi2-cho, Nishi-ku, Niigata 950-2181 Japan

E-mail: [†]omeifaculty.chiba-u.jp, [‡]chenq@ecei.tohoku.ac.jp, ^{††}nishii@eng.niigata-u.ac.jp

Abstract As an application of radio waves in the ocean, we investigated a position estimation system underwater. In this report, numerical calculation is performed in the kHz band for estimating the position of the diver. Since seawater is a highly conductive loss medium, it propagates along the path with the minimum propagation loss, suggesting that it becomes a lateral wave. We also showed that the position estimation is possible using the received power strength.

Keywords Infinitesimal Dipole Antenna, Conducting medium, Propagation in Sea, Lateral wave, Positioning, FDTD

1. はじめに

我が国では海洋に関する様々な利用方法が検討され始め、新たな海洋産業のための技術開発が進んでいる[1]。地球や宇宙空間において、情報をやり取りするための手段として、電波、音波、光波を用いた研究が日進月歩で行われている。この中でも海洋での通信には音波を用いる手法が広く実用化されている[2]。これは音波が電波や光波に比べて海中での減衰が少ないからである。しかし、音波は海中における伝搬速度は1500 m/sと電波に比べて非常に遅く、雑音の多さ、海面や海底からの多重反射の影響、海水温度、塩分濃度、深度による回折波などの問題がある[3][4]。また光波では、海水中の濁りによる散乱減衰が大きく、さらに通信の不安定性、通信容量や速度といった観点から水中での通信には適さないとされている[5]。しかし、電波は減衰量の高さが問題であるが、一方でその高さから反射波や回折波の影響を無視できると推測できる。すなわち、海中での電波の利用を考える余地は十分にあるといえる。

電波の海中での応用の1つとして多発している海難

事故における水難救助を考える[6]。救助を行うダイバーは常に危険にさらされており、安全の確保が重要になる。ダイバーが自身の現在位置を確認できれば、より安全な救助の活動ができると考えられるため、無線技術による水中での位置推定システムを検討する必要がある。

本報告では、kHz帯における海中での位置推定システムを検討する。海水は高導電性損失媒質であるため、位置推定には多くの課題がある。本報告においては、システムのアルゴリズムを簡素化するように努めた。

現在、海洋での位置測位にはGNSS(Global Navigation Satellite System)が用いられている。GPS(Global Positioning System)衛星4基からの電波を地上にある受信機が受け取ることで位置の特定と時刻の補正が可能となる。しかし、海底などの電波が届かない場所では利用できない。このような場所の位置推定の研究では、データベースと測定パターンを照合することで位置を特定する技術や、電波の伝搬損失を利用した技術がある。伝搬損失を用いる方法は、受信機で得られた値から伝搬距離を逆算し、各受信機を中心とし

た計算した伝搬距離と等しい円を描き、複数の円の交点を算出することで位置推定を行う[7].

2. 位置推定モデル

本報告においては、海中という GNSS システムが使用できない場所にて、かつ事前にマッピングデータを複数集めることも困難な場所、さらに港湾など浅瀬の水深を仮定し、海面が大きく変動しない場合を想定し、電波の伝搬損失を利用した位置推定法の検討する。図 1 に位置推定のイメージモデルを示す。海中にいるダイバーが送信アンテナを持ち、受信アンテナを海面に浮かんでいるブイに取り付け、送信アンテナから放射された電波の減衰量を計測し、位置の推定を行う。

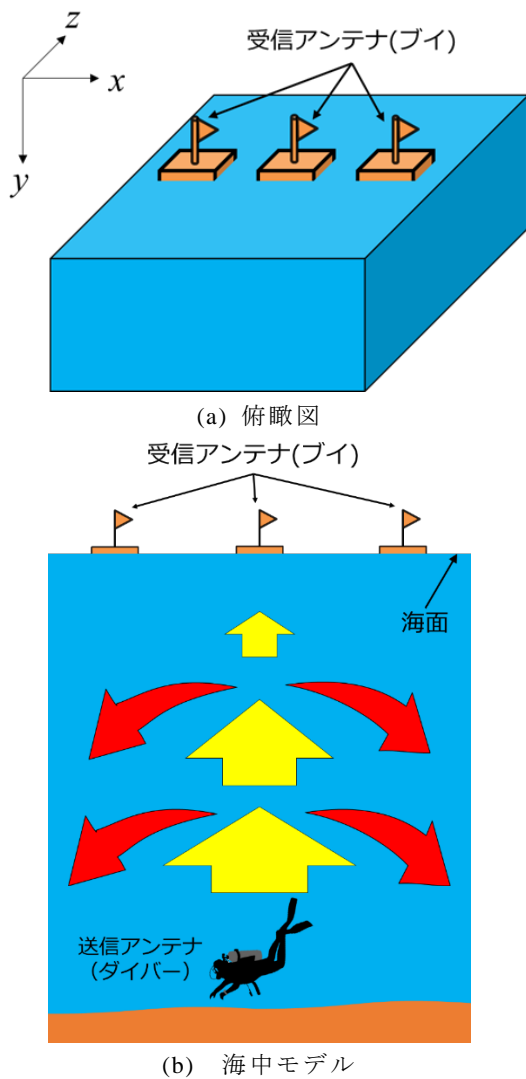


図 1 位置推定のシステム想定図

先行研究において、海水中での 100dB 減衰の伝搬距離と周波数の関係がシミュレーションで求められている。その結果、10kHz の超長波電波であれば、理論上 1m あたり 3.5dB の減衰に止めることができ、30m 以上の距離を伝送することが可能である[3]。そこで、本報告においては 10kHz の周波数を用いて位置推定を行う

こととする。

シミュレーションにあたり、図 2 に示すような、簡易モデルを考える。海上 2 m を自由空間とし、海中($\epsilon_r = 80.0$, $\sigma = 4 \text{ S/m}$)は 9 m とする。50 m × 50 m の海面に複数個のブイ型受信機を 20 m 間隔で 3 つ配置している。ブイ型受信機には、単純な構造である 2 m のダイポールアンテナを用いる。また、ダイバー側には、単純な構造で所持するのに邪魔にならない 0.7 m のダイポールアンテナを用いるものとした。解析には FDTD 法 (Finite Difference Time Domain Method)を用いて、ブイ型受信機を含む平面での位置推定の検討をした。

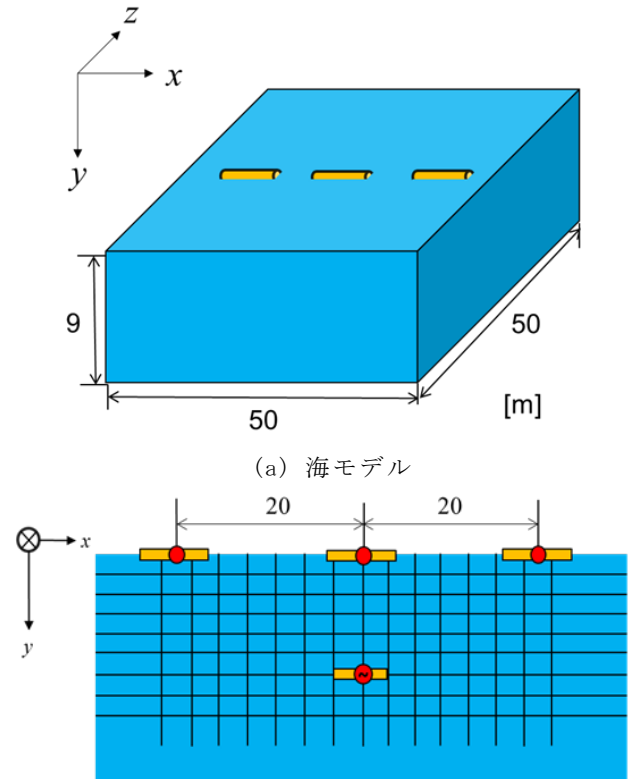


図 2 簡易シミュレーションモデル

3. 海中での伝搬特性

海中の送信アンテナの位置を、z 軸を固定し、y 軸 (深さ方向) に 1 m ごと、x 軸 (横方向) に 3 m ごととの交点 120 点での受信電力を図 3 に示す。ここでは、アンテナのインピーダンス整合については考慮していない。図より、深さ毎に受信電力が異なることがわかる。海は高導電性損失媒質なため、アンテナ間距離 8 m までの、急速な減衰領域とその後の $1/r^3$ の緩やかな減衰領域に分けられる。このようにアンテナの深さ毎に異なる伝搬特性が生じる原因については、次に述べる。

一般的な媒質を伝搬する場合、最短経路での伝搬が支配的となるため、アンテナ間距離で伝搬損失は決まり、図 3 のような複数の曲線にならず 1 本の曲線となる。しかし、海中のような高導電率損失媒質では、伝搬損失が最小となる経路が支配的となる。そのため、図 4 に示すような、ラテラル波 (Lateral Wave) を考える必要がある。送信アンテナから放射された電波は、減衰の多い海中を最短距離とする様、海面に向けて垂直に伝わり、その後、海面を伝搬する[8]-[11].

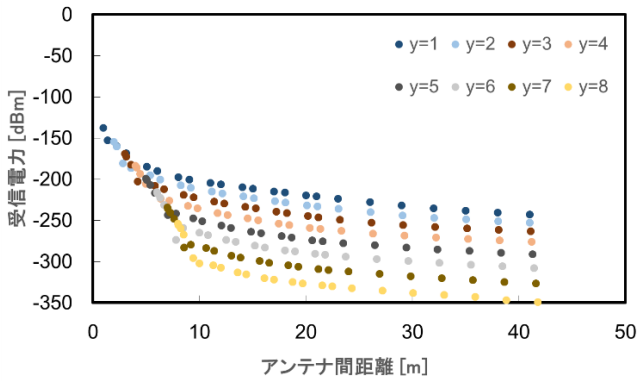


図3 受信電力とアンテナ間距離の関係

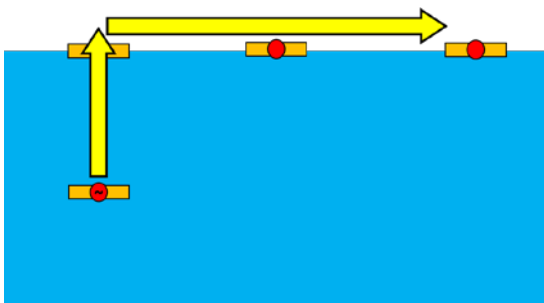
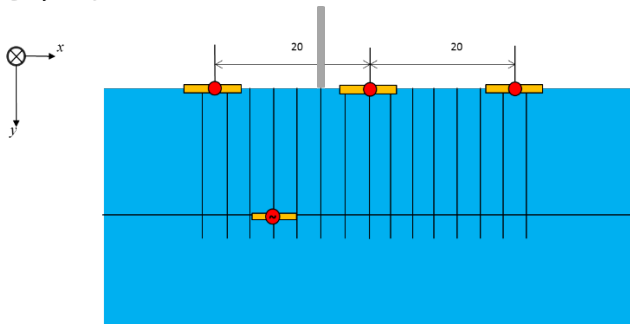
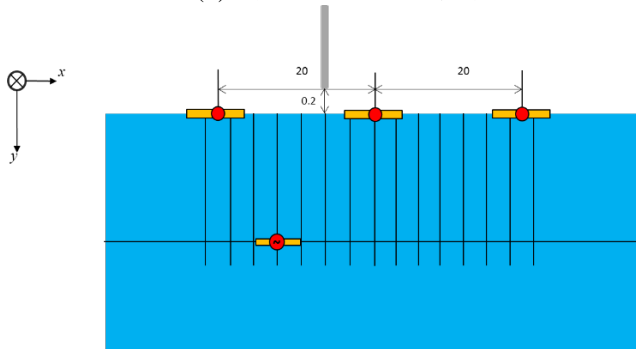


図4 海中伝搬のイメージ (ラテラル波)

この現象の確認のため、次のようなシミュレーションを行い、ラテラル波の確認を行った。図5に示すように、(a)海面に接するように金属板を設置した場合と(b)海面から0.2mの空隙を設けて金属板を設置した場合の3つの受信アンテナでの受信電力を算出した。海中の送信アンテナは、減衰量大きい深さ8mの場合を考える。



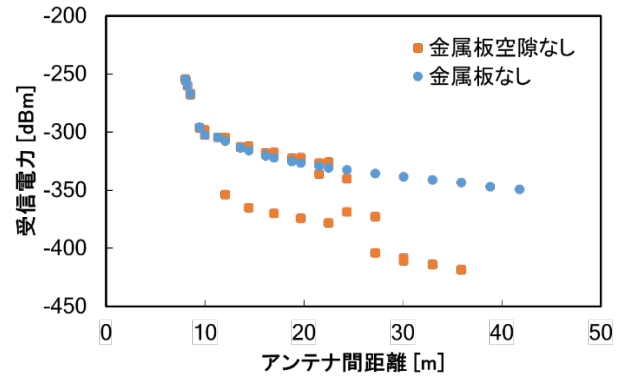
(a) 海面まで塞いだ場合



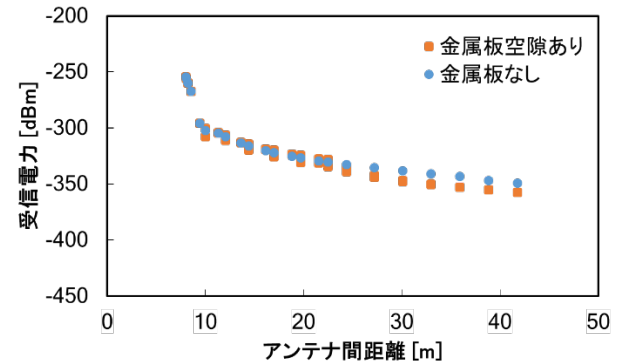
(b) 海面に空隙を設けた場合

図5 金属板を用いたラテラル波の検証

計算結果を図6に示す。比較として、図2に示した金属板がない場合を再掲してある。(a)海面まで塞いだ場合、ラテラル波の経路に金属板が存在する位置では、受信電力が急激に低下している。これに対し、(b)海面に空隙を設けた場合、金属板の有無で受信電力に若干の減少があるものの大きな違いは生じていない。これらより、アンテナ間の伝搬は、海中を最短距離で結ぶ伝搬ではなく、海面を伝わる伝搬が支配的であり、ラテラル波が伝搬していることが分かる。このことは、アンテナの指向性などを検討するときに、一考する必要がある。



(a) 海面まで塞いだ場合



(b) 海面に空隙を設けた場合

図6 ラテラル波の検証計算

4. 位置推定の検討

前節の海中での伝搬特性を基に、深さ方向の2次元平面での位置推定を検討する。図7に推定のイメージをまとめた図を示す。矢印は得られた受信電力に対応するアンテナ間距離と等しい半径であり、矢印の色はそれぞれの色の円と対応している。3つの交点は赤色で示した。位置推定の精度は、推定した位置と実際の位置の直線距離を推定誤差とする。

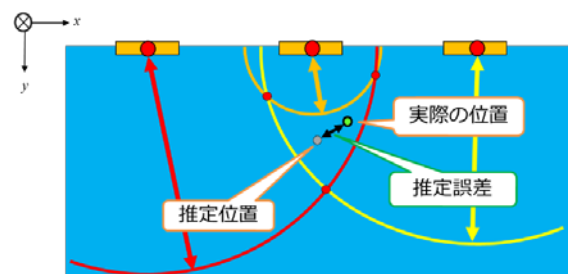


図7 推定誤差の算出

ここでは、ダイバーの体の大きさなどから、成人が手足を広げた際の範囲を考慮し、許容誤差を最大 2 m 以内とした。

送信アンテナの各位置で得られた受信電力を基に位置推定を行う図 3 の縦軸と横軸を入れ替えたグラフに深さ毎の近似曲線を加えた図 8 に示す。各深さの伝搬特性を 6 次関数の近似曲線とした。3 つの受信アンテナの受信電力から、近似曲線を用いてアンテナ間距離を逆算する。ある受信電力値を基にアンテナ間距離を推定することになるのだが、送信アンテナの深さに応じた複数のアンテナ間距離が推定される。

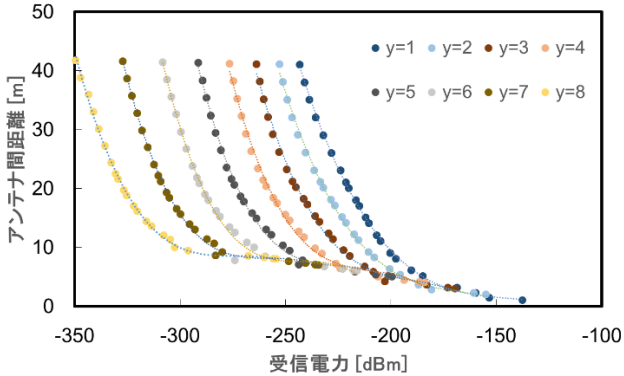


図 8 受信電力とアンテナ間距離の関係

深さ $y=1\sim 8$ m の 1 m 毎に、各受信アンテナの中心から得られた受信電力に対応するアンテナ間距離と等しい半径の円を描き、それら 3 つの円のうち、2 つの円で求められる交点 3 つの x 座標を仮算出した。この深さ y 毎の 3 点の x 座標の分散が一番小さいケースを採用し、それらの重心を x 座標とし、深さ y 座標を修正する。ここで、受信アンテナの近傍など、一部の位置では y 座標が算出できないことがあるが、分散が小さかったある深さにおいて推定した複数の x, y 座標を用いて、 y 座標を補正した。

以上の方法により、位置推定した結果を図 9 および表 1 に示す。 y 座標を補正する必要があった位置は 16 点 (☆) であった。全位置で誤差 2.0 m 以内を達成した。誤差 1.0 m 未満になった位置は全 120 点中の約 86.7% になった。また、誤差 0.5 m 未満の位置は 62.5 % になった。

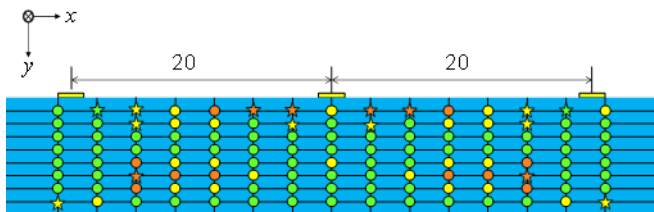


図 9 位置推定結果

表 1 位置推定の結果

誤差 δ (m)	マーカー	位置数
$0 \leq \delta < 0.5$	●★ (Green)	75
$0.5 \leq \delta < 1.0$	●★ (Yellow)	29
$1.0 \leq \delta < 2.0$	●★ (Orange)	16
$2.0 \leq \delta$	● (Red)	0

5. まとめ

本報告では、海中のダイバーの位置推定を目的とし検討を行った。海水のような高導電性損失媒質では、伝搬損失が最小になる経路で伝搬し、ラテラル波になることを示した。また、受信電力強度を用いて、位置推定ができることをシミュレーションにて示した。

今後の課題として、以下の点を挙げる。

- ・ 3次元位置推定への展開
- ・ 位置推定精度の向上
- ・ 任意の深さでの位置推定の検討
- ・ 波など海の諸条件下の検討

本検討により、今後の電波の利用が海中にも積極的に拡大していくと期待される。

文 献

- [1] 吉田弘, "海中における電磁波伝搬とその応用," IEEE MTT-S Kansai Chapter「宇宙・海洋・地中へ広がるマイクロ波応用」ワークショップ
- [2] H. Yoshida et al., "Study on land-to-underwater communication," 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC 2011, Jan. 2011.
- [3] 陳強, 高橋応明, 石井望, "電波の海中応用へのアプローチ," AP2016-92, pp.25-28, 信学技報, Sep 2016.
- [4] 大浜俊樹, 滝沢賢一, 井家上哲史, "海中における電磁波利用無線通信に関する一検討," 信学技報, WBS2013-32, pp.65-70, Oct. 2013.
- [5] (社)海洋産業研究会, "水中音響通信の高度化による海洋産業の発展と新事業創出等効果に関する調査研究報告書," (社)日本機械工業連合会・(社)海洋産業研究会, 東京, 2005
- [6] 警察庁生活安全局地域課, "平成 27 年における水難の概況," https://www.npa.go.jp/safetylife/chiiki/h27_suinan.pdf, Sep. 2016.
- [7] 小池侑紀, 高橋応明, "受信強度を用いたカプセル内視鏡位置推定," 2016 年信学総大, B-1-202, p.202, Mar. 2016.
- [8] R.W.P. King, M.F. Brown, "Lateral electromagnetic waves along plane boundaries: A summarizing approach," Proceedings of the IEEE, vol.72, no. 5, pp.595-611, May 1984.
- [9] R.K. Moore, "Radio communication in the sea," IEEE Spectrum, vol.4, no.11, pp.42-51, Nov. 1967.
- [10] M. Siegel and R. King, "Electromagnetic propagation between antennas submerged in the ocean," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.21, no.4, pp.507-513, Jul. 1973.
- [11] 石井望, 高橋応明, 陳強, "擬似スケールモデルを用いた微小ダイポールによる海水内電磁界," 信学技報, AP2016-125, pp.11-16, Dec. 2016.