

# 海洋中における電磁波を利用した位置測距の検討

## Study on a Positioning System in the Sea Water Using Electromagnetic Waves

石井 望<sup>\*1</sup>  
Nozomu Ishii

高橋 応明<sup>\*2</sup>  
Masaharu Takahashi

陳 強<sup>\*3</sup>  
Qiang Chen

吉田 弘<sup>\*4</sup>  
Hiroshi Yoshida

<sup>\*1</sup> 新潟大学    <sup>\*2</sup> 千葉大学    <sup>\*3</sup> 東北大学    <sup>\*4</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>\*1</sup> Niigata University    <sup>\*2</sup> Chiba University    <sup>\*3</sup> Tohoku University    <sup>\*4</sup> Japan Agency of Marine-Earth Science and Technology

### 1. はじめに

海水中での電波利用として、著者らは低周波の電波を利用した海水中位置測距システムについて検討を行っている[1]-[7]。海水中における電波は、その大きな減衰のため、長距離の通信には不向きであるとされていた。しかしながら、近年の無線通信技術、デジタル通信技術および計算電磁気学の発展により、限定的な使用となるかもしれないが、海水中における電波利用を再検討すべき時期であると著者らは考えている。近年においては、国内では、海洋開発研究機構において、MHz帯における海水を充たした水槽内でのアンテナ間伝搬試験が実施されており[8]、海外に目を転じると、港湾内でループアンテナ間の伝搬試験が実施されている[9]。また、応用範囲を近距離に限定し、電波でなく、磁気誘導 (magnetic induction, MI) の観点から、ループアンテナ間の通信試験を実施した例も報告されている[10]。

時代を遡ると、1960年代をピークに電波の海水中応用に着目した研究が行われていた。当時のエポックメイキングな話題は、海面直下に配置されたアンテナ間の距離特性は、直接波とラテラル波の寄与に分離できることが理論的、実験的に検証されたことであろう[11]-[13]。ここで、直接波はアンテナ間を海水中で直線的に進む波を指し、ラテラル波は、送信アンテナからその直上の海面まで鉛直上向きに進み、海面に出て、海面に沿って進み、受信アンテナの直上で海面から受信アンテナまで進む波を指す。直接波が受ける減衰よりもラテラル波が受ける減衰が小さいと、ラテラル波が優勢となって受信される。つまり、直接海水中を伝搬させるのではなく、海面より出て空气中を伝搬させる方が通信に有利であることを意味する。この現象は、アンテナを海面よりそれほど離れていない点に設置した場合に出現する。

著者らは、浅瀬での船舶転覆を想定した救助支援を目的とした、電波を利用した海水中位置推定システムを検討している。周波数は kHz帯の低周波で、ダイバーが海面下1 m~10 mで捜索活動を行うことを前提としている。この実現のため、

- (a) 海水中における電波伝搬特性 (周波数特性, 通信可能距離, 数値モデル)
- (b) 海水中の測位アルゴリズム (ラテラル波の影響を考慮した電波の振幅減衰特性の逆関数的利用)
- (c) 疑似スケール則を利用したアンテナ設計・測定法の開発に取り組んでいる。

本稿では、著者らが検討を進めている海水中における位置測距技術について、要素技術毎に説明を行う。まず、海水中で動作するアンテナおよび整合回路を述べ、海水中でのアンテナ間の伝送効率について議論する[5][7]。海洋中

で海面近くにアンテナを設置した場合の電磁波伝搬モデルについても述べる[7]。続けて、海中位置推定システムについてその概要を説明する[3][6]。さらに、実験室内におけるスケールモデル実験を可能とする疑似スケール則について説明する[2]。

### 2. 海水中アンテナと伝搬モデル

物理的な大きさの制約から、海水中アンテナは、その大きさが波長よりも十分に小さい、電気的小形アンテナとなるため、反射係数が大きくなり、整合回路が必須となる。また、海水中アンテナは内部損失が小さいこと、アンテナ対向時の伝送効率が良いことが望まれる。腐食の問題を解決するとともに、導体と海水の直接接触を避けるため、アンテナを無損失に近い誘電体 (例えば、純水) で覆う。この覆いをシース (sheath) という。著者らは、海水アンテナとして、(a) 露出ダイポールアンテナ、(b) シース付ダイポールアンテナ、(c) シース付ループアンテナについて検討した。整合回路は、各アンテナの入力インピーダンス特性に適した集中定数素子により構成される L型整合回路を採用した[5]。これら整合回路とアンテナを海水中で対向させて配置すると、kHz帯では、シース付ループアンテナ、露出ダイポールアンテナ、シース付ダイポールアンテナの順に伝送効率は悪くなる[7]。シース付ダイポールアンテナについては、アンテナ導体の一部をシースで覆った場合の検討を行っており、伝送効率の観点からは半分覆うとよいという知見を得ている[4]。

浅瀬の海中で、送受信アンテナ間における電波の伝搬経路として次の3つの可能性が考えられる。

- (a) アンテナ間の海水中を最短距離で届く経路 (直接波)
- (b) 海面に達した波が海面を伝搬し再び海水中に戻る経路 (ラテラル波)
- (c) 海面で反射する経路 (反射波)

これらの経路に関する電磁界の近似式が Mooreらにより導出されている[11]。しかしながら、Mooreらの近似式は遠方距離を前提としている。そこで、著者らはラテラル波の海水中の位相変化を加えて近距離に対して成り立つように修正している[7]。ここで、近似式について簡単に説明を加えておく。(a)の直接波は、海水が無限に存在しているときの微小ダイポールアンテナによる電磁界である。このダイポールアンテナからの距離を  $r$  とすると、 $1/r^3$ などの逆べき項と指数関数的減衰因子  $e^{-\alpha r}$  から構成される。(b)のラテラル波は、送信アンテナ直上の海面上に微小ダイポールアンテナが存在するとしたときの電磁界である。このこのダイポールアンテナからの距離を  $\rho$  とすると、 $1/\rho^3$ などの逆べき項からなり、指数関数的減衰因子は含まれない。(c)の反射波は、海面を完全導体と考え、イメージ法により、海

水が無限に存在しているとし、送信アンテナとそのイメージの合成電磁界として構成される。著者らは、修正した近似式が、FDTD法によるシミュレーション結果、海水中の伝搬特性実地試験の結果によく一致することを確認している。

### 3. 位置測距システムの概要

海面に複数設置されたGPSルーターは自身の位置をGPS衛星からの信号で決定するとともに、ダイバー送信機から発した信号の振幅情報を受信する。海水中での位置は、複数のGPSルーター間でルーター位置情報と受信振幅情報を総合して特定される[1]。基本原理を説明するため、ダイバー送受信機の送信アンテナおよびGPSルーターの受信アンテナが無指向性であるとし、海面を介してのラテラル波が存在しないと想定した場合における位置測距について説明する。海面上の3つのGPSルーターが存在し、ダイバー送信機からの受信振幅が測定されているとする。各GPSルーターは、その受信振幅レベルからダイバー送信機が存在する球面を特定することができる。3つのGPSルーターにおける受信振幅レベルに関する球面の交点がダイバー送受信機の位置ということになる。実際には、様々な誤差要因が間がられるので、交点としてみなしうる範囲にダイバー送受信機が存在する。実際には、浅瀬での探索活動が想定されるので、ダイバー送受信機からの信号は直接波ではなく、ラテラル波としてGPSルーターで受信される可能性がある。このために、著者らは前もって、アンテナ距離と受信電力の関係を知る必要がある。GPSルーターとダイバー送受信機間の距離が短い場合、GPSルーターは直接波のみを受信する。しかし、ある程度距離が離れると、海面経由のラテラル波が優勢になる。すなわち、ある距離で減衰カーブの微係数が変わる。さらに、ダイバー送受信機の海面からの距離によって、ラテラル波を介しての受信レベルが変化する。このように、ラテラル波が存在すると、アンテナ距離と受信電力の関係が複雑になる。このため、著者らはダイバー送受信機の海面からの距離をパラメータとして、アンテナ距離と受信電力の関係を記述することにした[3]。離散的な受信レベルの距離換算データとなるが、実際に交点を調べる際には、離散的に位置を変化させて位置推定を行っているため、実用上問題は無い。

さらに、GPSルーター側にダイポールアンテナと想定した場合、その指向性を考慮した受信電力強度の校正を行う必要がある[6]。深さ4mにダイバー送信機のダイポールアンテナを設置した場合、FDTD法によるシミュレーションにより、約75%の位置で誤差2m以内の位置推定が実現できることを確認している[6]。

### 4. 疑似スケール則による実験室内試験

電磁界のスケール則として、寸法を $1/n$ 倍にすると周波数が $n$ 倍となることがよく知られている。その際、誘電率や導電率は変更する必要はないが、導電率は $n$ 倍としなければ電磁界的に等価とはいえない。海水中におけるアンテナ間の伝搬距離特性などを調べる際、上記のスケール則を適用する場合、例えば、10kHz動作の現実モデルを、例えば、1MHz動作のスケールモデルで考える場合、導電率を100倍にしないといけない。10kHzでの海水の導電率を4S/mとすれば、1MHzでは400S/mの液体を用意する必要

がある。これを等価食塩水で用意するのは、食塩水飽和の問題により、現実的ではない。

著者らの提案している疑似スケール則は、スケール則による導電率を変化させなければいけないという問題に対する実用的な解である[2]。というのは、疑似スケール則は、変位電流項を無視した、導電媒質中でのマクスウェルの方程式を出発点とするからである。具体的には、疑似スケール則では、寸法を $1/n$ にすると周波数が $n^2$ 倍となる。その際、誘電率や導電率のみならず導電率も変更する必要はない。すなわち、10kHzの海水実験は、同じ海水を用いて1MHzで実施してもよいということになる。ただし、寸法を小さくするためには、周波数をより高くする必要があることに注意を要する。

### 5. まとめ

本稿では、kHz帯の低周波の電波を用いた新たな海中測位法を構築するために必要な要素技術について、著者らがこれまでに得た知見を取りまとめた。海水中で動作するアンテナ系の設計、実現法を確立するとともに、海面近傍における海水中伝搬に関する近似式を検討した。位置測距について、ラテラル波の影響およびアンテナの指向性を考慮することで、実用上問題のない位置推定が可能であるという数値シミュレーション結果を示した。さらに、実験室レベルでの海水中測定を可能とする疑似スケール則について紹介した。今後、これらの要素技術を統合して、海水中における位置測距に関する実験を行う予定である。

### 文 献

- [1] 陳 他, “電波の海中応用へのアプローチ,” 信学技報, AP2016-92, pp.25-28, Sep. 2016.
- [2] 石井 他, “疑似スケールモデルを用いた微小ダイポールによる海水中電磁界,” 信学技報, AP2016-125, pp.11-16, Dec. 2016.
- [3] 高橋 他, “海中位置推定へのアプローチ,” 信学技報, AP2016-188, pp.59-62, Mar. 2017.
- [4] H. Sato et al., “Dipole antenna with sheath-cover for seawater use,” *Proc. ISAP 2017*, POS1, 1376, Phuket, Thailand, Oct. 2017.
- [5] 藤井 他, “海水中におけるアンテナ間の伝送効率,” 信学技報, WPT2017-50, pp.33-37, Nov. 2017.
- [6] 久野 他, “電磁波を用いた海中位置推定システムの検討,” 2018信学ソ大(通信), B-1-144, p.144, Mar. 2018.
- [7] 藤井 他, “海中無線通信用アンテナと伝搬モデルに関する研究,” 信学技報, AP2018-5, pp.23-28, Apr. 2018.
- [8] H. Yoshida et al., “Study on land-to-underwater communication,” *Proc. 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2011)*, Brest, Jan. 2011.
- [9] A. I. Al-Shamma'a, et al., “Propagation of electromagnetic waves at MHz frequencies through sea-water,” *IEEE Trans. Ant. & Propagat.*, vol. 52, no. 11, pp. 2843-2849, Nov. 2004.
- [10] H. Guo, et al., “Multiple frequency band channel modeling and analysis for magnetic induction communication in practice underwater environments,” *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, vol. 66, no. 8, pp. 6619-6632, Aug. 2017.
- [11] R. K. Moore and W. E. Blair, “Dipole radiation in a conducting half space,” *J. Res. Nat. Bur. Std. D Radio Propagation*, vol. 65, no. 6, pp. 547-563, Nov.-Dec. 1961.
- [12] R. K. Moore, “Radio communication in the sea,” *IEEE Spectrum*, vol. 4, no. 11, pp. 42-51, Nov. 1967.
- [13] M. Siegel and R. King, “Electromagnetic propagation between antennas submerged in the ocean,” *IEEE Trans. Ant. & Propagat.*, vol. 21, no. 4, pp. 507-513, July 1973.