

電波の海中応用へのアプローチ

—振幅減衰を利用した測位システムに向けて—

陳 強[†] 高橋 応明^{††} 石井 望^{†††}

[†] 東北大学 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

^{††} 千葉大学 〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

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

E-mail: [†]chenq@ecei.tohoku.ac.jp, ^{††}omei@m.ieice.org, ^{†††}nishii@eng.niigata-u.ac.jp

あらまし 本報告では、電波を利用した海中応用に関する現代的なアプローチについて考察する。これまで、電波の海中応用は数多く行われてきたが、その大きな減衰のために応用範囲が限られていた。昨今の電磁界シミュレーション技術、測定技術、あるいは、信号処理技術の飛躍的発展により、電波の海中応用についての研究が世界的に精力的に行われている。本報告では、著者らが検討を行っている海中測位システムについて、システム設計のための基礎データとともに、設計事例を紹介する。

キーワード 海水中の伝搬、損失性媒質、測位、電磁波、アンテナ

Exploring EM Wave Applications under Sea Water

- Concept of Positioning System Using Amplitude Decay -

Qiang CHEN[†], Masaharu TAKAHASHI^{††}, and Nozomu ISHII^{†††}

[†] Tohoku University

6-6-05 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579 Japan

^{††} Chiba University

1-33 Yayoicho, Inage Ward, Chiba, 263-8522 Japan

^{†††} Niigata University

8050 Ikarashi2-cho, Nishi-ku, Niigata 950-2181 Japan

E-mail: [†]chenq@ecei.tohoku.ac.jp, ^{††}omei@m.ieice.org, ^{†††}nishii@eng.niigata-u.ac.jp

Abstract This research is focused on exploring EM wave applications under sea water. Because of high conducting loss of the sea water, the applications of EM wave in sea water has been limited to few areas. However, owing to fast development of technologies in EM numerical simulation, EM measurement and signal processing in recent years, the EM applications has again attracted great attention from the researchers in the EM area. In this report, a fundamental study on positioning system using EM wave is introduced and the positioning approach is given based on the date of fundamental study.

Key words Propagation in sea, Lossy media, Positioning, Electromagnetic wave, Antennas

1. はじめに

近年、世界中で海難事故が相次いで起きている。ダイバーの献身的な活動により多くの人命が救助された一方で、水中の可視性の悪いうえに、沈没した船や船の破片、浮遊物などの危険物が多いため、救援活動中に水中を泳ぐダイバーの安全を確保することが重要な課題となる。ダイバーは自分自身により、現

在の水中位置を確認できれば、より安全に水中の救援活動を行えるため、無線技術を用いた海水中の測位システムの確立が重要なテーマになる。本研究では、海難事故に役立つ技術の確立を目的とし、中波以下の低い周波数帯の電波を利用した水中測位システムを検討する。

従来の海水中の無線伝送は音波や光がよく利用されているが、電波の利用は非常に限定的であった。しかしながら、海水内で

の測位に限定すれば、音波は雑音や海水温度・密度に依存するため、光は濁りに弱いため、データ通信を可能とする電波の利用が期待される。また、学術的意義としては、これまでほとんど実用されなかった海水中での電波の積極的利用に対して道筋を付ける点である。

これまで行われてきた海水中における電波の伝搬に関しては、1960年代まではMHz帯以下における海水中にある2点間の通信を目的とした研究が盛んに行われていた[1],[2]。電波の伝搬損失が指数関数的に急激に増大するため、海水中の通信にMHz帯の電磁波が使われることはなかった。1990年代には、英国において海水中（港湾内）のMHz帯伝搬実験が行われた[3]。また、音波を利用する通信・位置計測では多重反射、光を利用する通信では海水中の濁りによる通信の不安定性、通信容量・速度の観点から、近年、海水中での電波伝搬の可能性を再び探る動きがでてきている[4]-[11]。1960年代に比べて現在においては無線通信技術、デジタル通信技術や計算電磁気学の技術は飛躍的に進歩しており、海水中における電波伝搬・利用に対して新たな展開を提案できる状況ができつつある。

本報告では、海水中における電波伝搬損失の特性を解析し、海上／海中の測位システムを構築するための測位方法や実現可能な周波数帯などについて検討を行う。

2. 水中の伝搬損失

損失媒質中における x 方向に伝搬する平面波の電界 E を

$$E = E_0 e^{-\gamma x} \quad (1)$$

とする。ここで、伝搬定数 γ は複素数で、減衰定数 α と位相定数 β からなり、

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} \quad (2)$$

となる。ここで、 ω は平面波の角周波数、 σ 、 ϵ と μ はそれぞれ媒質の導電率、誘電率と透磁率である。周波数が極めて低い場合は、 $\sigma \gg \omega\epsilon$ となり、変位電流が無視できるため、伝搬定数は

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma} \quad (3)$$

と近似的に表現でき、

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (4)$$

となる。日本の河川における塩分濃度の平均値は約 76mg/l 程度で、18°C 時の導電率は 11.15mS/m 程度だといわれている[12]。本報告では、この導電率の値を淡水の導電率の値として扱う。一方、海水中の導電率は、海水の温度だけではなく、地球上のロケーションや海流、水深にも依存するため、2~8 S/m の範囲で変動する[1]。本研究では、海水の導電率を 4S/m とする。そして、淡水と海水中の減衰定数は

$$\begin{aligned} \alpha_r &= 2.098 \times 10^{-4} \sqrt{f} [\text{Np/m}] \\ &= 1.822 \times 10^{-3} \sqrt{f} [\text{dB/m}] \quad (\text{river}) \\ \alpha_s &= 3.974 \times 10^{-3} \sqrt{f} [\text{Np/m}] \\ &= 3.452 \times 10^{-2} \sqrt{f} [\text{dB/m}] \quad (\text{sea}) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ただし、 f は周波数とし、その単位を Hz とする。以下の検討はこれらの減衰定数をベースに進められる。

3. 測位システムの検討

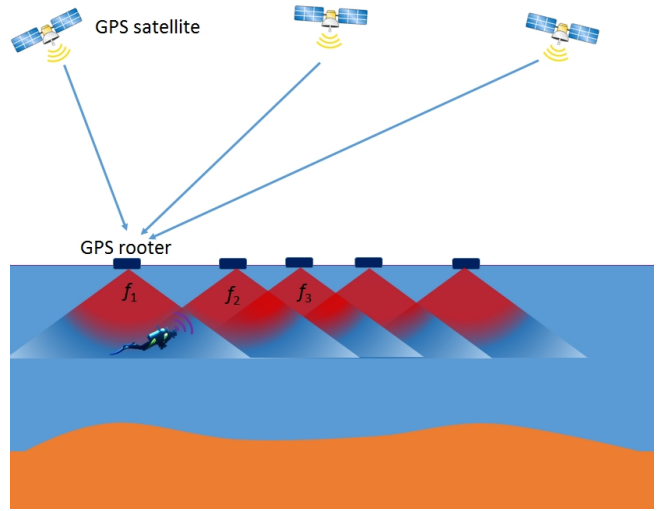


図1 中継局による測位システムの構成

本研究では、浅瀬の水深（港湾など）を仮定し、海面が大きく変動しない場合を想定する。図1に示すように、複数個のGPSルーターを浮きに取り付け、ある間隔で海面上に設置する。GPSルーターは自分の位置をGPS衛星からの信号で決定すると共に、潜水中のダイバーが持つ受信機に位置情報を送信する。受信機では、GPSルーターからの位置情報、電波キャリアの位相と振幅情報を総合して、ダイバーの海中での位置を推定する。

水中における測位システムでは、陸上、海上における測位システムで行われている位相差に着目する方法は利用できない。まず使用する周波数帯に問題がある。ダイバーの海水中での視界を考慮すると1mが許容分解能の上限と考えられる。空間分解能が半波長で与えられるならば、半波長が1mとなる周波数は700kHzである。しかしながら、この周波数で海水中を3.5m進むと100dBの減衰が生じるため、到達距離が短く、現実的ではない。以下に、簡単なシミュレーションを用いてこれを説明する。

100dBの伝搬損失を前提に、河川と海水中に電波の伝搬距離と水中の距離分解能を考える。式(5)を用いて、伝搬距離と周波数の関係を計算した結果を図2に示す。周波数の平方根に反比例して伝搬距離が短くなるが、30m以上の距離を伝送するために、淡水の河川では3MHz、海水では10kHz以下の電波を使用する必要がある。また、淡水と海水中の電波の実効波長と周波数との関係を図3に示す。淡水の河川では3MHzの実効波長は約15mであり、海水中では10kHzの実効波長も同様に15mである。そのため、もし淡水または海水中のセンシングに電波を利用する場合は、最小の距離分解能が約7.5mとなることがわかる。

水中救難の目的とすれば、水中測位の距離分解能を1m以下

にしたい。図4に示すように、海水では周波数 700kHz の実効波長が 2m となるため、700kHz の電波を使えば、海水中においては約 1m の距離分解能が得られる。しかしながら、図5に示すように、周波数 700kHz の電波の伝送距離がわずか 3m と短くなってしまふ。以上のことから、電波の位相情報を用いた測位システムの実現は困難である。

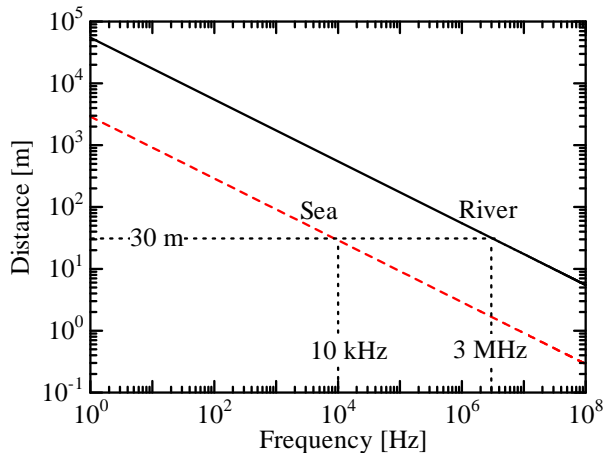


図2 河川と海水中の 100dB 減衰の伝搬距離と周波数の関係

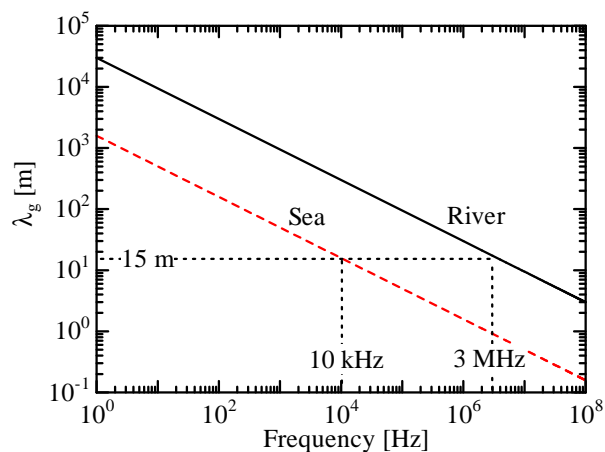


図3 河川と海水中の実効波長と周波数の関係

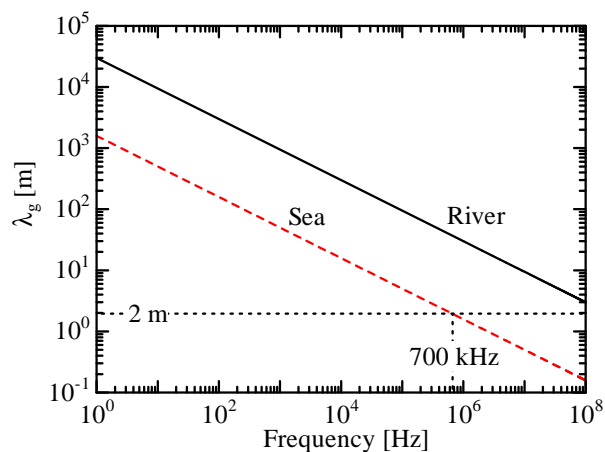


図4 河川と海水中の実効波長と周波数の関係

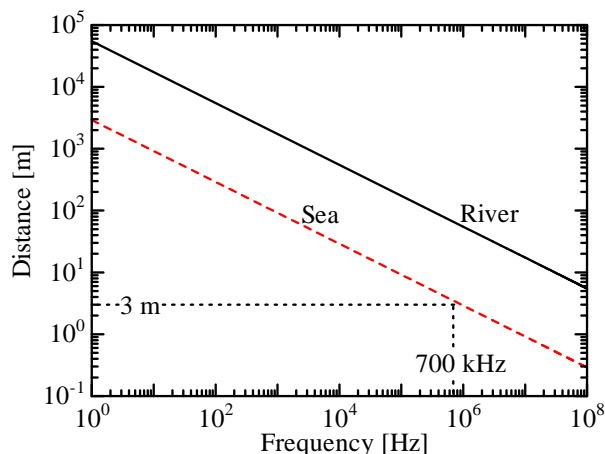


図5 河川と海水中の 100dB 減衰の伝搬距離と周波数の関係

そこで、本研究で提案・検討する振幅に着目した測位システムでは、海水中での大きな指数関数的な減衰に着目する。式(5)から、10kHzにおける1mあたりの海水中に減衰は3.5dBである。すなわち、ルーターからの距離が40mであっても、1mの位置変動(送受信距離の変化)は3dB程度の振幅変動をもたらすことになる。したがって、ダイバーに搭載する電波受信器は、GPSルーター(送信機)からの距離を受信した信号の振幅の変動により位置推定が可能となる。

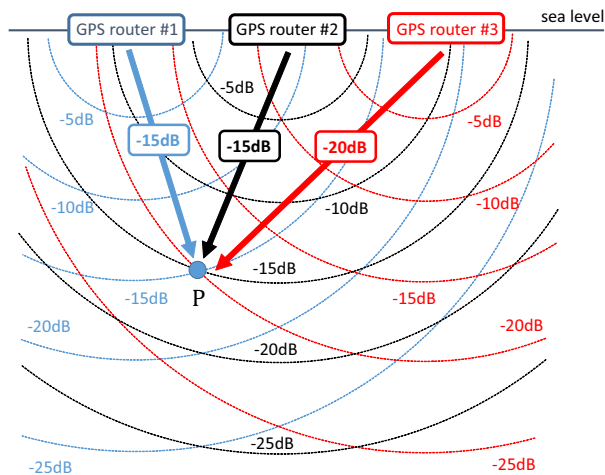


図6 振幅減衰を利用した測位システムのイメージ

図6に振幅減衰を利用した測位システムのイメージを示す。海水中にGPSルーター(送信機)からの電波が等方的に減衰して伝わるものとする。複数個の送信機から周波数の異なる信号を送信し、それらをダイバー(受信機)で3つ以上の信号を同時に受信すれば、受信機で受信した各周波数の振幅の変動により位置推定が可能となる。自由空間において距離に反比例して信号が減じることに着目した例はあるが、そればかりでなく指数関数的に減衰する信号を取り扱う点が提案システムのユニークな点であり、振幅のみに着目するため、受信機のコストダウンにもつながる。

4. ま と め

本報告では、低周波の電波を用いた海中測位システムについて、システム設計のための基礎データとともに検討した結果を示した。10kHz程度の超長波電波を用いて、海水中における電波の振幅変動の情報により、海中の位置推定が理論的に可能であることが分かった。

今回提案した電波の海水応用の技術展開として、以下の課題を考えている。

- ダイバーが取り扱いし易い大きさの超小形、海水中用アンテナの開発
- 海水中位置推定アルゴリズムの開発
- 海水温や海流などの影響による複数レイヤでの損失媒質中の伝搬モデルの検討
- 海水温、場所、深度などによって異なる海水の電気定数の測定技術の開発
- 上記を踏まえた解析モデルの構築と大規模計算の実現
- ダイバーの人体や機材、船舶や地形が位置精度に与える影響の検討およびその低減技術の開発など

現在、海水中アンテナの開発設計 [13], [14] や損失媒質中の波源位置推定 [15] など、これらの課題に向かって一部の検討を始めている。

また、電波の海水応用として今回は海中測位について検討してきたが、

- ダイバーの生体情報モニタリング
- 海中通信システム
- 海中ロボット制御
- 海中センサネットワーク

など、様々なアプリケーションが期待されている。

文 献

- [1] R. K. Moore, "Radio communication in the sea," IEEE Spectrum, vol. 4, no. 11, pp. 42-51, Nov. 1967.
- [2] 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.
- [3] A. I. Al-Shamma'a, A. Shaw and S. Saman, "Propagation of electromagnetic waves at MHz frequencies through seawater," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 52, no. 11, pp. 2843-2849, Nov. 2004.
- [4] A. Shaw, A. i. Al-Shamma'a, S. R. Wylie and D. Toal, "Experimental Investigations of Electromagnetic Wave Propagation in Seawater," 2006 European Microwave Conference, Manchester, 2006, pp. 572-575.
- [5] C. Uribe and W. Grote, "Radio Communication Model for Underwater WSN," 2009 3rd International Conference on New Technologies, Mobility and Security, Cairo, 2009, pp. 1-5.
- [6] X. Che, I. Wells, G. Dickers, P. Kear and X. Gong, "Re-evaluation of RF electromagnetic communication in underwater sensor networks," IEEE Communications Magazine, vol. 48, no. 12, pp. 143-151, December 2010.
- [7] H. F. Guarnizo Mendez, F. Le Pennec, C. Gac and C. Person, "Deep underwater compatible Wi-Fi antenna development," 2011 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), Brest, 2011.
- [8] H. Yoshida et al., "Study on land-to-underwater commu-

nication," 2011 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), Brest, 2011.

- [9] A. Gkikopouli, G. Nikolakopoulos and S. Manesis, "A survey on Underwater Wireless Sensor Networks and applications," 2012 20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED), Barcelona, 2012, pp. 1147-1154.
- [10] Amanda Collins, "Application of Subsea Wireless Technology to Environmental Monitoring," 2013 OCEANS, San Diego, 23-27 Sept. 2013.
- [11] K. Shizuno, S. Yoshida, M. Tanomura and Y. Hama, "Long distance high efficient underwater wireless charging system using dielectric-assist antenna," 2014 Oceans - St. John's, St. John's, NL, 2014.
- [12] www.corrosion-center.jp/Publish/HBcdrom/pdf/3hen_1_1.pdf
- [13] 藤井直道, 佐藤弘康, 陳 強, "海水中のダイポールアンテナの特性解析," 電子情報通信学会総合大会, B-1-84, 2016年3月.
- [14] 藤井直道, 佐藤弘康, 陳 強, "純水シース付ダイポールアンテナの入力インピーダンス," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-37, 2016年9月.
- [15] 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," 電子情報通信学会総合大会, B-1-202, 2016年3月.