

海中および海面の電磁波伝搬

Electromagnetic wave propagation in the sea and at the sea surface

高橋 応明*1
Masaharu Takahashi石井 望*2
Nozomu Ishii陳 強*3
Qiang Chen吉田 弘*4
Hiroshi Yoshida*1 千葉大学
Chiba University*2 新潟大学
Niigata University*3 東北大学
Tohoku University*4 海洋研究開発機構
Japan Agency of Marine-Earth Science and Technology

1. はじめに

近年、我が国では海洋の様々な利用方法が検討され始め、新たな海洋産業の創出を支えるための技術開発が進んできている[1]。従来、海洋における無線通信では一般的に音波が利用されてきた。これは音波が電波や光波に比べて海水中における減衰が小さく、遠方での通信に適しているためである。しかし、音波の海水中における伝搬速度は約 1.5 km/s であり、海中の電波伝搬速度に比べて 20 万分の 1 程度とかなり低速である。また、海中では雑音が多く発生しており、海面や海底などからの多重反射の影響も大きく、海水温度や塩分濃度、深度による回折の影響も考慮すべき問題である[2]。光波に関しては海水中の濁りによる散乱減衰が大きく、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[3]。電波は海水中での減衰が大きいが問題として挙げられ、電波による海水中の通信は困難だと考えられていた。

しかしながら、国内外における海中電磁界応用に関する研究は、ここ数年、精力的に行われている。2000 年代になると、欧州で低い周波数での電磁界利用について検討されるようになった[4]。これは、デバイスや通信技術の進展により、測定のダイナミックレンジを十分に確保することが可能になったことが大きい。また、解析技術の発展により、損失の大きい媒質での解析のダイナミックレンジが十分に確保できるようになったことも大きい。このように、測定、解析、通信方式などが発展したために、海中での電磁波を用いた通信等が検討されるようになった。

我々は、海水の減衰量の大きさを利用することによって、海水中の反射波や回折波の影響を無視でき、海水による損失が大きいため、近距離ではあるが音声よりは高速な通信が可能であると判断し、海水中における電波利用、特に浅海における利用を考えている。

海水中における電波利用の 1 つとして、水難救助の補助技術を考える。水難事故[5]では人的被害が懸念されるため、ダイバーの活躍が期待される。しかし、水中は時として視界が悪いことがあり、海中に浮かんでいる様々な漂流物によってダイバーが危険を伴う場合がある。ここで、ダイバーが自身の現在位置を把握することが可能であれば、より安全かつ確実に救助活動ができると考えられる。ゆえに、著者らは電磁波を用いた海中位置推定システムを検討している。

本稿では、海中の微小ダイポールアンテナと海面上にある微小ダイポールアンテナ間で、海中および海面での電磁界がどのように伝搬するかについて、示していく。

2. 平行な微小ダイポール間の電磁界

図 1 に示すように、深度 z [m] に設置された長さ l [m] の微小ダイポールアンテナを送信アンテナとし、それと平行になるように海面上に置かれた受信アンテナを想定する。海水の損失が大きいため、このような状況では、送信アンテナから海中を直接伝わって受信アンテナに到達する直接波と、海面まで直上に伝わり、その後、海面を伝搬していくラテラル波に分けられる。送受信アンテナ間距離と深度に依存はするが、ある程度離れていると、直接波に比べてラテラル波の方が、受信アンテナに速く強い信号が到達する。このとき、海水の誘電率を ϵ 、導電率を σ 、透磁率を μ とする。また、送受信アンテナ間の距離を r [m] とし、深度 z と海面上のアンテナ間距離 r_h の関係は、 $r_h = \sqrt{r^2 + z^2}$ 、 $r_h \gg z$ とする。送信アンテナに流れる電流 I [A] とすると、マクスウェルの方程式より導出した受信電界強度は以下となる[6-8]。

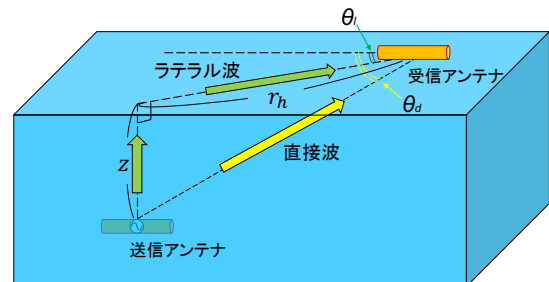


図 1 海中に置かれたアンテナからの伝搬

直接波

$$|E_d| = \frac{I l e^{-\alpha r}}{4\pi\sigma r^3} \sqrt{(3 \cos^2 \theta_d - 1)^2 (1 + \alpha r)^2 + \alpha^2 r^2 \{2 - (3 + 2\alpha r) \sin^2 \theta_d\}^2} \quad (1)$$

ラテラル波

$$|E_l| = \frac{I l e^{-\alpha z} |3 \cos^2 \theta_l - 1|}{16\pi^2 \omega \epsilon_0 z^3 r^3} \sqrt{(1 + \alpha z)^2 + \alpha^2 z^2 (1 + 2\alpha z)^2} \quad (2)$$

ここで、 θ_d 、 θ_l は、直接波、ラテラル波それぞれの到来方向とアンテナの軸方向とのなす角である。また、波数 $k = \sqrt{\omega^2 \epsilon \mu - j \omega \mu \sigma} \cong \alpha(1 - j)$ 、減衰係数 $\alpha \cong \beta \cong \sqrt{\omega \mu \sigma / 2}$ とする。

受信アンテナには、これら直接波とラテラル波が合成されて受信される。直接波の強度は、アンテナ間距離の 2 乗に反比例しており、遠方界領域ではないことがわかる。また、ラテラル波の強度は深度に反比例している。そのため、

浅海域では、このラテラル波成分が伝搬に大きく寄与することがわかる。

3. 海波がある海面での電磁界

穏やかな海面での電磁界は、先のように理論的にも求めることが可能だが、実際の海面には波があり、海波が発生すると、受信アンテナの姿勢やアンテナ間の距離が変化し、受信信号強度 (RSS) の値に影響を与え、その影響を考慮してシステム設計する必要がある。

海波がある場合の基礎検討として、FDTD 法による数値計算にて、その影響を評価した。解析モデルを図 2 に示す。このモデルは、高さ 8m の自由空間と深さ 9m の海水を有している ($\epsilon_r=80$, $\sigma=4.0\text{S/m}$) [9]。海波があるモデルでは、海の波を表現するために正弦波を用いた。図に示すように、この正弦波の振幅は 1.2m、波長は 4m とした。これらのパラメータは、ダイバーが救助活動可能な最大サイズである。先と同様に、送受信アンテナは微小ダイポールアンテナを想定し、使用周波数 10kHz、受信アンテナ (Rx) は、長さ 2m、送信アンテナ (Tx) は長さ 0.7m とした。海面上に設置してある受信アンテナは、海波による位置変動の影響を受けないよう、ブイの上部またはドローンに搭載されていると想定し、波から十分なマージンをとって、海面から 3m の高さで想定した。この状態では、海中からの直接的な波を受けず、ラテラル波のみを受信する[10]。

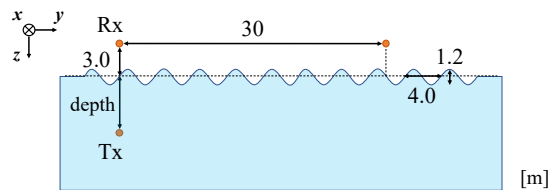


図 2 海波がある海面での解析モデル

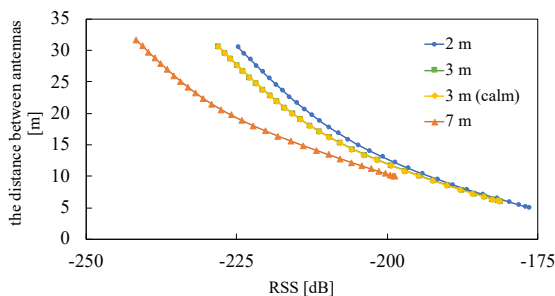


図 3 送受信アンテナ間距離による RSS

FDTD 法による受信アンテナでの RSS の計算結果を図 3 に示す。受信アンテナの位置を送信アンテナの直上から海面に平行に移動させた場合の、受信信号強度を示している。また、パラメータは、送信アンテナの深度が 2m, 3m, 7m の場合を示す。これらのパラメータは、図 2 に示すように 2 つのダイポールアンテナを平行に配置して計算したものである。なお、この RSS はアンテナの整合を考慮しておらず、実際には整合をとったアンテナを使用する。

RSS はアンテナ間の距離が離れると、急速に減衰していく。また、送信アンテナの深度により、海水での損失が大きいと、RSS が大きく異なっている。また、RSS の変化は、海中伝搬による減衰曲線と空中伝搬での減衰曲線とに

2分することができる。さらに、水深 3m の場合、風と波の 2 つの海面状態で RSS を示しているが、RSS の差は最大でも 0.3dB となっている。このように、受信アンテナを空中に浮かせて使用することで、十分な海波対策になると考える。

4. まとめ

本稿では、海中の微小ダイポールアンテナと海面上にある微小ダイポールアンテナ間で、海中および海面での電磁界の伝搬について述べた。海中から空間に出て伝搬するラテラル波の影響を考慮して、システムを構築することがわかる。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 20K04496 による。

参考文献

- [1] 吉田弘, “海中における電磁波伝搬とその応用”, 「宇宙・海洋・地中へ広がるマイクロ波応用」ワークショップ, 大阪, Jan, 2016.
- [2] 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”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.113, no275, WBS2013-32, pp.k65-70, oct, 2013.
- [3] (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.
- [4] Xianhui Che, Ian Wells, Gordon Dickers, Paul Kear, and Xiachun Gonr, “Re-evaluation of RF electromagnetic communication in underwater sensor network,” IEEE Communication Magazine, vol.48, no.12, pp.143-151, Dec. 2010
- [5] 警察庁生活安全局生活安全企画課, “令和元年における水難の概況”, https://www.npa.go.jp/publications/statistics/safetylife/chiiki/R01suanin_gaikyou.pdf, Jun, 2020.
- [6] M.Siegel and R.W.P.King, “Radiation from linear antenna in a dissipative half-space,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.AP-19, no.4, pp.477-485, Jul.1971
- [7] J.R.Wait, “The electromagnetic fields of a horizontal dipole in the presence of a conducting half-space,” Can.J.Phys., vol.39, pp.1017-1028, 1961
- [8] Ryosuke Kato, Masaharu Takahashi, Nozomu Ishii, Qiang Chen, Hiroshi Yoshida, “Investigation of a 3D undersea positioning system using electromagnetic waves”, IEEE Transaction on Antennas and Propagation, DOI:10.1109/TAP.2020.3048584, Jan, 2021.
- [9] A.Hales, G.Quarini, G.Hilton, L.Jones, E.Lucas, D.McBryde and X.Yun, “The effect of salinity and temperature on electromagnetic wave attenuation in brine,” Int. J. Refrigeration, vol. 51, pp 161-168, 2015.
- [10] 小林大希, 加藤涼介, 高橋応明, “電磁波を用いた海中位置推定システムにおける波対策の基礎検討,” 2020 年電子情報通信学会総合大会, B-1-10, p.10, Mar. 2020.