

海中電磁界応用における研究動向とポイント

Domestic Trends in Research and Points on Underwater Electromagnetic Field Applications

石井 望^{*1}
Nozomu Ishii

高橋 応明^{*2}
Masaharu Takahashi

陳 強^{*3}
Qiang Chen

吉田 弘^{*4}
Hiroshi Yoshida

^{*1} 新潟大学

^{*2} 千葉大学

^{*3} 東北大学

^{*4} 海洋研究開発機構

^{*1} Niigata University

^{*2} Chiba University

^{*3} Tohoku University

^{*4} Japan Agency of Marine-Earth Science and Technology

1. はじめに

国内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。元来、海中では電磁界の減衰が大きいので、通信等で利用されることはほとんどなかった。しかしながら、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。測定および解析技術の進展により、測定のダイナミックレンジを安価に確保することが可能になったこと、損失が大きい空間において動作するアンテナの解析が可能になったことが挙げられる。技術が進化したとはいえ、損失の大きい空間における電磁界のふるまいを根本的に変更することは不可能であり、課せられた制限の中で、電磁界の海中応用を検討せざるを得ない。実際の応用を考えると、測定系のダイナミックレンジによる拘束が大きく、いわゆる「遠方界」での測定が不可能である。このため、海中電磁界の適用先は、近傍界領域に限定されることになり、長距離通信などの遠方界を利用したい応用は無理ということになる。

本稿では、まずここ数年の国内における海中電磁界に関する研究事例について簡単に紹介する。著者の目に触れた範囲での事例や文献紹介になることをお許しいただきたい。続いて海中電磁界が近傍界に限定される場合について、電磁界の振る舞いについて簡単に紹介する。海中電磁界の応用を検討する際に、電磁界がどのような距離特性を示すのかをイメージしておくことが不可欠と考えるためである。

2. 国内における海中電磁界に関する研究動向

まず海洋産業において、どのような海中電磁界の応用が期待されているかについては文献[1]が詳しい。多くの新しい海洋開発の取り組みにおいて、基盤となる技術が海洋ロボットとその航法・通信・観測技術である。海中ロボットをプラットフォームとした HF, MF 帯の海中電磁界応用として、通信・測位・探査・非接触給電が挙げられている。

著者らのグループは、電波の海中応用として、減衰等を考慮して 10 kHz などの HF 帯の周波数を利用することを提案しており[2]、ハーフシースダイポールアンテナを利用した岸壁での海中電磁波伝搬試験について報告している[3]。その中で、海中での直接波伝搬のみならず海面上を通過するラテラル波伝搬が含まれることを明らかにしている[4]。このような電磁界の振る舞いは FDTD 法により計算されることが多いが、Bessel 関数のスペクトル積分を含む厳密式によっても評価することができる[5]。この厳密式では、直接波を分離することができるが、それ以外の成分については収束性の悪いスペクトル積分を評価する必要がある。

シース付きのダイポールアンテナおよびループアンテナの特性については FDTD 法、モーメント法により数値解析が実施されている[6,7]。海中応用の具体例として、浅海中でのダイバー位置を推定する、海中位置推定問題について検討を行っている[8-10]。FDTD シミュレーションに基づいて、ラテラル波の寄与も含めた位置推定モデルを作成し、設定した許容誤差範囲内でダイバー位置を精度よく推定できることを明らかにしている。

海中での位置推定・センシングをも可能とする海中チャネルサウンドが試作され、実際の海中において電磁界の伝搬試験ならびに基本的な通信試験が実施されている[11-13]。この装置を利用して、ダイバー位置推定問題の実証するための実験も行われている[14]。実際に海中で試験を行う場合、装置の準備、人手の確保、試験サイトの借用など、大規模実験が余儀なくされる。これに対して、実験室で水槽を利用して実験することを目的に、疑似スケールモデルが考案された[15,16]。実際に、実験室内に設置した水槽内でダイバー位置推定問題の疑似スケールモデルを構築し、ダイバーに装着したアンテナからの電磁界分布の測定が実施されている[17,18]。

水中・海中における非接触給電に関する検討も行われている[19-22]。多段コイルを利用した無線給電方式については、直径 3.4m、給電・受信コイル間隔 10m とした試作システムを海中に沈めて電力効率の評価が行われている[22]。また、海中電磁界を利用した通信システムについても、MF 帯において 0.5m 間隔で、伝送レートの評価が行われている[23]。

さらに、先に紹介したハーフシースダイポールアンテナが海中でなぜうまく動作するのかということを知りたいために、回路的な視点による解明しようとする試み[6]、海中での電磁界の振る舞いを微視的な観点から解明しようとする試みが行われている[24,25]。

紙面の都合で省略するが、海外においても海中電磁界に関する研究成果は近年多数公表されている。

3. 利用できる海中電磁界の距離特性

海中電磁波の利用を考える上で、電磁波が進行するとどの程度の減衰を受けるのかを見積もることが大切である。減衰は「減衰定数」により評価されるのが通例であるが、海水の場合は、利用できる海中電磁界を考える際は、減衰定数 α による減衰 $\exp(-\alpha r)$ の他に、距離 r の逆数の 3 乗、2 乗に比例する寄与もあわせて考慮しなければならない。

いま、図 1 に示すような z 向きの電氣的微小ダイポールアンテナを考える。簡単のため、電流モーメント Il は 1 と

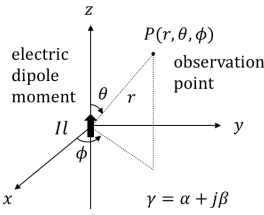
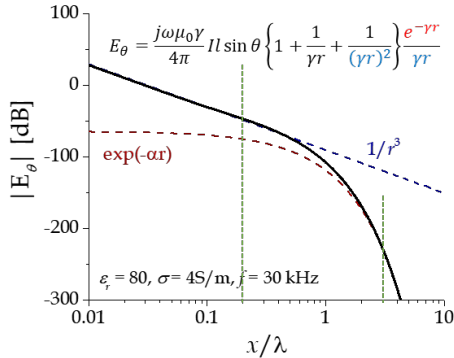


図1: 電氣的微小ダイポールアンテナの配置

図2: $|E_\theta|$ の距離特性 ($\theta = \pi/2$)

する。このアンテナの電磁界成分のうち、 E_θ を次に示す。

$$E_\theta = \frac{j\omega\mu_0\gamma}{4\pi} \sin\theta \left\{ 1 + \frac{1}{\gamma r} + \frac{1}{(\gamma r)^2} \right\} \frac{e^{-\gamma r}}{\gamma r} \quad (1)$$

ここで、 γ は海中の伝搬定数である。図2は、 $\theta = \pi/2$ とし、 $|E_\theta|$ の距離特性を波長 λ で正規化して図示してある[15]。ただし、周波数は30kHzとし、海水の複素比誘電率の実部 $\epsilon_r = 80$ 、導電率 $\sigma = 4 \text{ S/m}$ とした。図2より、 $x < 0.2\lambda$ では $|E_\theta|$ は $1/r^3$ に従い、 $x > 3\lambda$ では $|E_\theta|$ は $\exp(-\alpha r)$ に従うことがわかる。 $x = 3\lambda$ のレベルは $x = 0.01\lambda$ のレベルよりも250dB下回っており、通常の送受信システムのダイナミックレンジでは対応できない。すなわち、遠方界領域で信号受信は不可能と考えてよい。また、 $\lambda = 9.13 \text{ m}$ であり、実際に設置されるであろうアンテナのサイズを考慮すると、必ずしも $x < 0.2\lambda$ とは限らないといえよう。すなわち、式(1)に含まれる $1/r^3$ 、 $1/r^2$ 、 $\exp(-\alpha r)$ の寄与の合成により電界の距離特性が構成されることになる。なお、角度特性は距離に関係なく $\sin\theta$ の特性に従う。

4. むすび

ここ数年における海中電磁界に関する研究事例を簡単に紹介するとともに、海中電磁界の応用に利用できるのはアンテナの近傍界領域であり、その電磁界の振る舞いについて、微小ダイポールアンテナを例に説明した。本稿を通じて、海中電磁界に興味をお持ちの方に、初期的な情報を提供できれば幸いである。

謝辞 本研究の一部はJSPS科研費20K04496による。

参考文献

[1] 吉田, “海中電磁気の産業応用,” 2019信学ソ大, 通信1, ABS-1-11, pp. S-50 - S-51, Sep. 2019.

- [2] 陳他, “電波の海中応用へのアプローチ,” 信学技報, A・P2016-92, pp. 25-28, Sep. 2016.
- [3] H. Sato et al., “Dipole antenna with sheathed-cover for seawater use,” Proc. ISAP 2017, POS1, 1376, Phuket, Thailand, Oct. 2017.
- [4] 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, A・P2018-5, pp. 23-28, Apr. 2018.
- [5] 石井他, “浅海海中位置推定に特化した電界数値積分の高速化について,” 信学技報, A・P2020-84, pp. 60-65, Nov. 2020.
- [6] S. Xu, et al., “Design of sheathed dipole antennas for seawater use,” 2019信学ソ大, 通信1, ABS-1-13, pp. S-54 - S-55, Sep. 2019.
- [7] 羽賀他, “モーメント法によるシース付き海水中ループアンテナの解析,” 2019信学ソ大, 通信1, ABS-1-12, pp. S-52 - S-53, Sep. 2019.
- [8] 高橋他, “海中位置推定へのアプローチ,” 信学技報, A・P2016-188, pp. 59-62, Mar. 2017.
- [9] R. Kato et al., “Investigation of a 3D undersea positioning system,” Proc. ICECOM 2019, Dubrovnik, Croatia, Oct. 2019.
- [10] 阪谷他, “機械学習による電磁波を用いた海中位置推定システムの基礎検討,” 電子情報通信学会水中無線技術研究会資料, UWT2021-5, pp.22-25, June 2021.
- [11] 菅他, “海中チャンネルサウンダの開発,” 信学論B, vol. J104-B, no. 3, pp. 359-368, Mar. 2021.
- [12] 滝沢他, “海中における電波源位置推定に関する一検討,” 2019信学ソ大, 通信1, ABS-1-5, pp. S-38 - S-39, Sep. 2020.
- [13] 松田他, “電波を用いた海底下埋設物センシングシステムの評価,” 2020信学ソ大, 通信1, BS-5-3, pp. S-54 - S-55, Sep. 2020.
- [14] R. Kato et al., “Measurement of an undersea positioning system using electromagnetic waves,” IEICE Comm. Express, DOI: 10.1587/comex.2021XBL0092 (accepted).
- [15] 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, A・P2016-125, pp. 11-16, Dec. 2016.
- [16] 石井, “損失媒質中における微小電氣的ダイポールアンテナ間の伝送特性測定について,” 電子情報通信学会水中無線技術研究会資料, UWT2021-2, pp.6-11, June 2021.
- [17] 石井他, “疑似スケールモデルを用いた海中ダイポールアンテナの3Dパタン計測,” 信学技報, A・P2019-61, pp. 73-78, Aug. 2019.
- [18] 佐藤他, “海中アンテナの偏波特性に関する実験的検討,” 電子情報通信学会水中無線技術研究会資料, UWT2021-4, pp.16-21, June 2021.
- [19] 栗井他, “水中のワイヤレス給電に関わる幾つかの新しい現象,” 信学論B, vol. J104-B, np. 3, pp. 1284-1293, Nov. 2013.
- [20] 篠原他, “海水中非接触電力伝送の交流損失の考察,” 電気学会全国大会, 4-216, Mar. 2018.
- [21] 小川他, “海中ワイヤレス充電および通信のためのアンテナ開発,” 2018信学ソ大, 通信1, BI-9-3, pp. SS-38 - SS-39, Sep. 2018.
- [22] 榎場他, “多段コイルを用いた海水内のワイヤレス電力伝送の設計と一検討,” 2019信学ソ大, 通信1, ABS-1-12, pp. S-52 - S-53, Sep. 2019.
- [23] 行實他, “Wavelet OFDMを用いた高速海中通信システムの基礎検討,” 2020信学ソ大, 通信1, BS-5-8, pp. S-63 - S-64, Sep. 2020.
- [24] 吉田他, “塩水中のアンテナの動作についての一考察—分子とイオンの視点から—,” 信学技報, A・P2020-83, pp. 56-59, Nov. 2020.
- [25] 吉田他, “海中でのアンテナのふるまいについての一考察,” 電子情報通信学会水中無線技術研究会資料, UWT2021-3, pp.12-15, June 2021.