

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—

吉田 弘[†] 石井 望[‡] 高橋 応明^{††} 陳 強^{†††}

[†] 海洋研究開発機構 〒237-0061 横須賀市夏島町 2-14

[‡] 新潟大学 〒950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050

^{††} 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

E-mail: [†] yoshidah@jamstec.go.jp

あらまし 導電性とみなせる周波数帯の電磁場が印加された塩水中の半露出型ダイポールアンテナについて検討する。これまで伝送回路網と FDTD 法を用いた考察を行ってきたが、新たに、塩水を水分子とイオンのレベルにまで分解し、電磁場が塩水粒子にどのようにエネルギーを輸送しているかを分子動力学法で検証した。その結果、磁場は塩水粒子に直接エネルギーを輸送せず、電場を介してエネルギーを輸送していることを確認した。この結果を実測データとゾンマーフェルト方程式を解いた数値解析結果と比較したところ、海中の半露出型ダイポールアンテナが電場に感応していることを定性的に説明できた。

キーワード 海中アンテナ, 半露出型ダイポールアンテナ, 分子動力学, ゾンマーフェルト方程式

A Seawater Antenna Analysis

—The description from a perspective of particles—

Hiroshi YOSHIDA[†] Nozomu ISHII[‡] Masaharu TAKAHASHI^{††} and Qiang CHEN^{†††}

[†] Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, 237-0061 Japan

[‡] Niigata University 8050 Ikarashi 2-nocho, Nishi-ku, Niigata, 950-2181 Japan

^{††} Chiba University 1-33 Yayoicho, Inage-ku, 263-8522 Japan

^{†††} Tohoku University 6-6-05, Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579 Japan

E-mail: [†] yoshidah@jamstec.go.jp

Abstract This paper describes an electromagnetic (EM) coupling mechanism of a half sheath antenna (HSA) immersed in seawater using classical molecular dynamics (MD) simulation. The MD results show that energy of magnetic field does not transfer to water molecules and ions directly. This can support experimental results and numerical calculation results using Sommerfeld equation of seawater EM wave propagation which show the HAS mainly responds electric field.

Keywords Seawater antenna, Half sheath antenna, Classical molecular dynamics, Sommerfeld equation

1. 海中のアンテナ

海中の通信・測位・テレメトリ媒体は音波であるというのが常識である。陸上で使われている電波（主としてマイクロ波帯）は海中に入ると急激に減衰し使い物にならないとされているからである。しかし、海中で仕事をする立場からは、音波は気中の電波のように万能ではないと言わざるを得ない。電波応用がこれだけ進んだ現代では、電波技術を応用すれば海中音響でも何でも実現できるとお考えになる向きもあるだろう。しかし、海中音響伝搬とトランスデューサの特性を考慮すると、電波でできたことが全て音響でできるわけでは無い。つまり、音波が苦手なシチュエーションが

海中には存在するわけである。例えば海中ビジネスになりそうな浅海部の橋脚点検などがそうである。そのようなシチュエーションでは、通信や測位を光や低周波電磁場で補完することが望ましい。例えば浅海かつ多数の構造物が周囲にある環境では音響マルチパスが強くまた音響雑音も高くなる。低周波の電磁場は波というよりは場として広がっていくので、反射波という概念は無い。つまり構造物などによるマルチパスは影響しない。こういった低周波電磁場の特徴を使えば、これまで困難であった橋脚点検ロボットに安定した通信（ただし超低速）や測位を提供できる。

海水（導電媒質）中で電磁場を利用するためには、

海水とのエネルギー交換を効率的に行うアンテナが非常に重要である。これまで、海中の電磁場については多くの研究がなされてきており、ある程度のモデルが存在している。一方、海中のアンテナについては、計測のために多くの試作が試みられているが標準化はされていない。一般的に海水は導電媒質であることから電界成分が非常に小さくなるため、磁界型アンテナが利用されている。ユニークな海中アンテナには、Lucasら[1]の提案する純水バッファ層を有するループアンテナやダイポールアンテナがある。また、長波帯においては電極を利用した例もある。

海中アンテナが標準化されていない理由には、私たちが利用する基準インピーダンスである 50Ω に比較して、海中アンテナの入力インピーダンスが極端に低下するため、海中のアンテナシステム全体の効率が整合回路の損失に大きく左右され、アンテナ自身の効率が推定しにくいためである。藤井ら[2]は絶縁型ループアンテナ、絶縁型ダイポールアンテナ、露出型ダイポールアンテナの三種類について、海水のアンテナ同士の結合と入力インピーダンスの計算に FDTD 法をもちい、 50Ω への整合損失計算には等価回路法をもちいて、 $10\text{ kHz}\sim 10\text{ MHz}$ における海中での全システムの伝送効率を求めた。彼らの結果では、ループアンテナが最も伝送効率が高く、絶縁型ダイポールが最も効率が悪い。しかし、彼らは露出型ダイポールの一部を絶縁することによって効率が上がるのではないかと推測している。

陳ら[3]は、藤井らの系において、 2 m 長のダイポールアンテナの絶縁層の長さを変えた場合の海中での伝送特性を計算している。整合回路の Q を固定した場合は、完全露出と半露出でそれほど伝送特性に差はでないが、レジスタンスとリアクタンスは露出部が全長の半分のときに大きくなることから、実用的には半露出型が整合回路の Q を上げることができそうだ。加藤ら[4]は、半露出型ダイポールを作成し海中伝搬計測を実施してきているが、FDTD シミュレーションは全露出型で実施しており相対値はよく一致している。

さて、これらの報告のように、海中でのアンテナの性能評価は進んでいるが、動作モードは今一つ明確でない。とくにダイポールアンテナにおいては動作メカニズムの解明が不十分である。そこで、半露出型ダイポールアンテナ(HSA: Half Sheath dipole Antenna)に着目し、実測した伝搬特性、ゾンマーフェルド方程式の数値解から、HSA がいずれの電磁界成分を受信しているのか明らかにする。さらにその物理を明確にするために、古典分子動力学法(MD: Molecular Dynamics)を用いて海水の水分子とイオンの電磁界応答を調べ、HSA と海水のエネルギー交換メカニズムの説明を試みる。

2. 海中での電磁界計測

2.1. 計測コンフィグレーションとアンテナ

海中伝搬の計測データには、冬季サロマ湖で計測したデータを用いる。氷上計測は海上計測と異なり非常に安定した環境でデータを得ることが可能である。図1に計測コンフィグレーションを示す。送信アンテナを氷上(気中)に置き、受信アンテナを海中に設置して相互の配置を変更して、水平方向伝搬特性と深度方向(垂直方向)伝搬特性を計測した。深度方向特性を計測する場合は、海中の受信アンテナを深度方向に移動する。計測周波数は 10 kHz である。

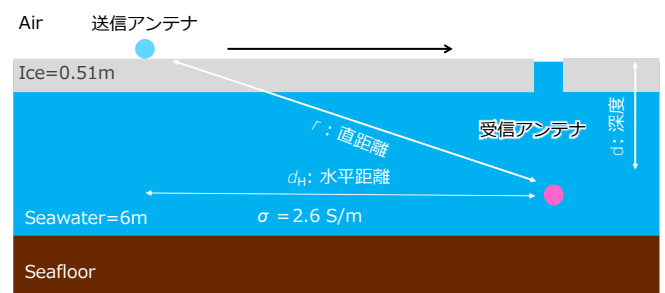


図1 計測コンフィグレーション。

氷上アンテナには Small loop antenna (SLA) を、海中アンテナには HSA を用いた。SLA の共振にはマイラーコンデンサを用い、整合にはメインループの内側に作ったマッチングループで 50Ω になるようにループ径を調整している。HSA (図2) は、 $\Phi 5 \times 2000\text{ mm}$ の真鍮エレメントの半分を純水で覆ったダイポール構造のアンテナで、整合はトロイダルコアで行っている。



図2 半露出型ダイポールアンテナ(HAS)

2.2. ゾンマーフェルド方程式の数値解と実験結果

図3のように、海氷面を $z=0$ としてループアンテナの中心を高さ h に置いた場合に、開口が z 方向を向いている場合と、開口が x 方向を向いている2ケースについて、3層のゾンマーフェルド方程式を解き数値解析を図1のパラメータで行った。

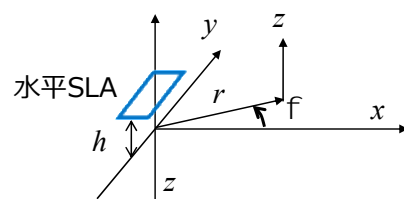


図3 ループアンテナの配置(開口面が z 方向)

深度方向伝搬特性ならびに水平方向伝搬特性の実測値と、実測値にゾンマーフェルド方程式の数値解析結果をフィッティングしたものが、図4と図5である。数値解析結果については、それぞれ理想的な存在する電磁界成分を記した。なお、それぞれ計測時期が異なり解析も別々に行ったため、座標系が異なっているが、今回の考察目的には問題がない。いずれの場合も数値計算の電界成分に実測値がフィットしている。

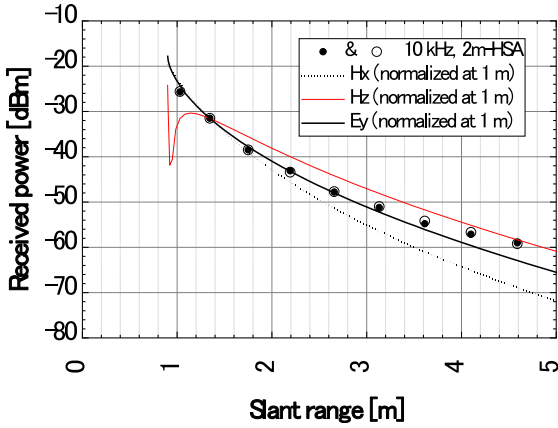


図4 深度方向伝搬特性の実測値と数値解析結果。

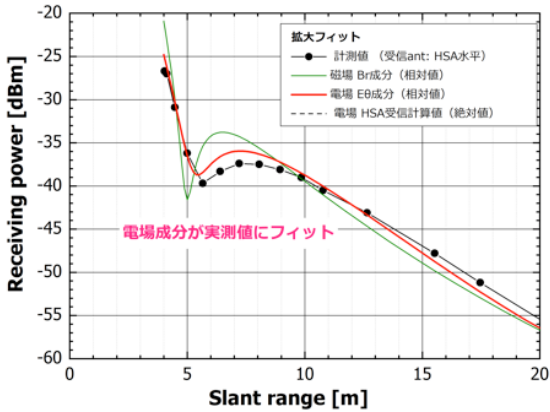


図5 水平方向伝搬特性の実測値と数値解析結果。

3. 分子動力学シミュレーション

このシミュレーションは外部電磁界による海水粒子の振る舞いをしらべ、海水を導電率と誘電率で代表させるマクロ表現では説明できない様な、特異な現象が発生しないかをしらべるために着手している。今回の報告はその派生として、海水の粒子の外部電磁場応答のシミュレーション結果を利用して、海中ダイポールアンテナの動作メカニズムの説明を試みる。

3.1. シミュレーションモデル

古典 MD 法は、分子とイオンをモデル化できる粒子シミュレーション手法である。水に電磁界を印加するシミュレーションはいくつか知られている[5][6]。MD 法では分子の原子間のポテンシャルを Lennard-Jones

ポテンシャルで記述しており、水分子の分極を表現できる様になっている。また粒子間の相互作用は力学モデルとクーロン力で記述される。オープンソースの LAMMPS をベースにソースコードを作成している。3次元の粒子同士の相互作用を計算するため非常に大きな計算リソースが必要なため、計算エリアは約 10 nm の立方体となり、全計算時間は 10 ns としている。海水を表現するために、このキューブのなかに 15,863 個の水分子と 133 個のナトリウムイオンと塩素イオンがそれぞれ入っている。この数は導電率 $\sigma = 4 \text{ S/m}$ に相当する。計算する温度は 2°C としている。熱平衡状態を作るためランダム配置の状態から 1 ns 間外力が無い状態でシミュレーションを実行する。

このモデルにおいて、外部電磁界はローレンツ力として個々の粒子に入力する。範囲が nm のオーダーであるから電磁界は一様と考える。また、電磁界は正弦波で電界, \mathbf{E} は z 方向に、磁場, \mathbf{B} は x 方向に印加している。

$$\mathbf{E}(t) = E_0 \cos(\omega t)(0\mathbf{i} + 0\mathbf{j} + 1\mathbf{k}) \quad (1),$$

$$\mathbf{B}(t) = B_0 \cos(\omega t)(1\mathbf{i} + 0\mathbf{j} + 0\mathbf{k}) \quad (2),$$

ここで $\omega = 2\pi f$ であり周波数は $f = 500 \text{ MHz}$ としている。本来は 10 kHz で実行したいが、計算リソースが全く不足しているため、海水で導電性と考えられる 500 MHz に設定した。残念ながら MD のモデルでは粒子が動いたことによる場の電磁界の変化は組み込めない。つまり電界と磁界のつながりも表現できない。そこで、ローレンツ力のそれぞれの項を平面波の場合の E-B 関係を使って式(3), (4)のように近似的に結びつける。

$$E_0 = Z \frac{B_0}{\mu_0} \quad (3),$$

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu_0}{\sigma}} = \sqrt{\frac{2\pi f \times 4\pi \times 10^{-7}}{\sigma}} e^{i\frac{\pi}{4}} \quad (4),$$

ここで Z はインピーダンス、 μ_0 は真空中の透磁率である。

3.2. シミュレーション結果

作成したモデルを使用して、海水に電界のみ、磁界のみ、電磁界を印加する 3つのパターンについて計算を行った。時間変動するソースを用いているので、本質的には電界のみと磁界のみはあり得ない物理現象であるが本モデルでは分離が可能である。

図6は磁界のみを海水に与えた時の水分子の Z 方向の平均ダイポールモーメント(DPM)と、海水の温度の時間変化である。磁界のみ印加しても、DPMに現れる

のは熱運動成分だけであり、系の温度も変化していない。図7は電磁界を与えた場合である。この時は明らかに水分子のDPMも変動し、系の温度も上昇している。電界のみ与えた場合はこのケースとほとんど変わらないことからデータは割愛した。なお、現象を熱雑音から浮き上がらせて可視化できるように大強度の電磁場を印加している。

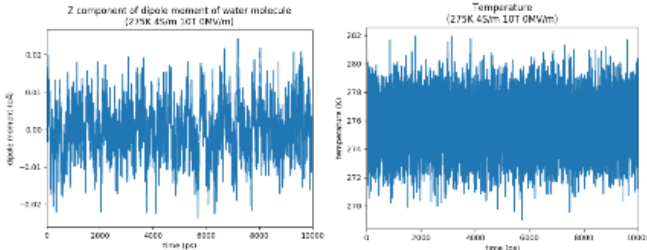


図6 磁界のみを海水に加えた時の時間変動。(左)水分子の平均DPMの変化。(右)系の温度。

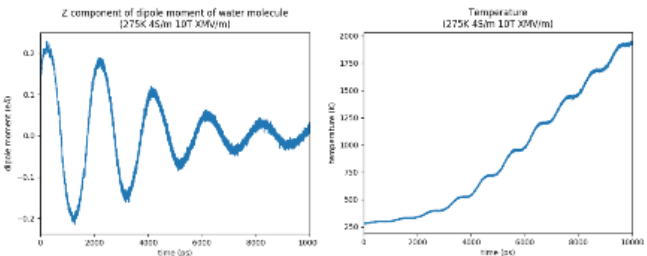


図7 電磁界を海水に加えた時の時間変動。(左)水分子の平均DPMの変化。(右)系の温度。

4. 考察

2節の結果から、海中の半露出ダイポールアンテナ(HSA)は電界成分を受信している。ダイポールアンテナだから当然と考えるところだが、導電媒質中では電界成分は非常に小さくなるはずである。なので、電界を受信しているということであれば、ループアンテナに比べて効率が圧倒的に低下するはずである。陳らが指摘しているように、HSAの動作の理解には電流が重要であると思われる。しかし、導電電流を駆動しているのは電界でなく磁界による $v \times B$ 力(ここで v は粒子の速度)とも考えられる。

しかし古典MDシミュレーション結果では、磁界は海水にエネルギーを輸送できないことが明確である。この理由は粒子速度は熱運動によるものであり、平均すると速度はゼロになることから、 $v \times B = 0$ となり海水粒子にエネルギーを輸送しないのである。もちろん、電界型アンテナは直接磁界を効率よく受信できないことから、媒介となる海水に磁界からエネルギー輸送がないということは、磁界を介してHSAにエネルギーは入出力されないということである。

一方、電界に目を向けてみると、海水分子双極子の振動を励起している。また図8に示す様にイオンも駆

動している。水分子のDPM、イオンの変位、温度上昇を比較すると、初期にはDPMが激しく振動するが、時間と共にイオン変位が大きくなり、イオン変位の増大とともに系の温度の上昇率が上がっている。このような事から定常時には電磁界エネルギーはイオンに輸送され熱に交換されていると考えられる。

すると電界はどのようにHSAとエネルギー交換をしているのだろうか。水分子のDPM振動による電磁界再放射が寄与するとすれば、完全絶縁型でも効率が上がるはずなので、やはり電流が重要である。しかし、イオン変位はゆっくりであるためアンテナとエネルギーをやりとりできるとは考えにくい。するとイオン電動を媒介する自由電子が寄与していると考えるのが最ももらしい。海水は電界からエネルギーを受け電子の移動を電界方向に発生させる。その電子がインピーダンスの低いアンテナ導体とやりとりを行うと考えて良いだろう。こう考えると、導電率が低いほどアンテナ表面積を増やす必要があるように思われる。今後はこの様な観点からパラメータを振った実験を行いたい。

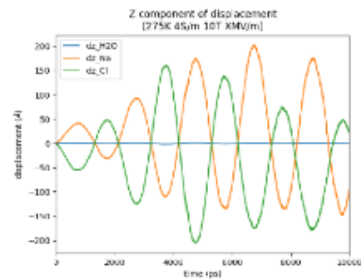


図8 電磁界を海水に加えた時のイオンの時間変位。

文 献

- [1] A. I. Al-Shamma'a, A. Shaw, and S. Saman, "Propagation of Electromagnetic Waves at MHz Frequencies Through Seawater," IEEE Trans. AP., VOL. 52, NO. 11, pp. 2843-2849 (2004).
- [2] 藤井直道, 佐藤弘康, 陳強, 石井望, 高橋応明, 吉田弘, 菅良太郎, "海水中におけるアンテナ間の伝送効率の解析," 信学技報, vol. 117, no. 318, WPT2017-50, pp. 33-37, 2017年11月.
- [3] 陳強, 佐藤弘康, 石井望, 高橋応明, 吉田弘, "海中アンテナの設計と評価," 信学技報, vol. 119, no. 168, AP2019-60, pp. 69-71, 2019年8月.
- [4] 加藤涼介, 高橋応明, 吉田弘, 石井望, 陳強, "氷結したサロマ湖における海中電磁波伝搬の基礎検討" 信学技報, vol. 119, no. 168, AP2019-62, pp. 79-83, 2019年8月.
- [5] M. Tanaka and M. Sato, "Microwave heating of water, ice, and saline solution: Molecular dynamic study," J. Chem. Phys. 125, 034509 (2007).
- [6] LiJun Yang, KaMa Huang, and XiaoQing Yang, "Dielectric Properties of N,N-Dimethylformamide Aqueous Solutions in External Electromagnetic Fields by Molecular Dynamics Simulation," J. Phys. Chem. A 2010, 114, 1185-1190 (2009)