

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

—海中電磁界の疑似スケールモデル実験環境構築にむけて—

石井 望[†]

[†]新潟大学工学部 〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町 8050

E-mail: [†] nishii@eng.niigata-u.ac.jp

あらまし 本稿では、実験室内で設置可能な水槽内に注入された液体内に置かれた微小電氣的ダイポールアンテナの間の伝送特性の測定について述べる。海中における電磁波問題を実験室で模擬的に測定するためには、海水の比誘電率の実部と導電率が1 GHz程度までの周波数において周波数に依存しないことを着目して、疑似スケールモデルを導入するとよい。水槽実験では、例えば、海水とほぼ同じ電気特性をもつ食塩水の中で、二つのダイポールアンテナの間の位置関係を変化させることで、ダイポールアンテナ間の伝送係数 S_{21} の空間分布特性が計測できる。ダイポールアンテナとしては、平衡給電型のシース付きダイポールアンテナを利用する。平衡給電を実現するためには180°ハイブリッド結合器を利用する。伝送係数 S_{21} を測定する際、波長に比べて十分に短い長さのダイポールアンテナを利用することになるため、食塩水を介して直接波成分以外に、ケーブルに流れる不平衡電流による多重反射成分が重畳される。この多重反射成分は、 S_{21} を時間領域に変換し、直接波成分のみを取り出すゲーティングを適用することで除外できることを示す。さらに、食塩水の中で、一方のダイポールアンテナの位置を固定し、もう一方のダイポールアンテナの位置を変化させたときに得られる、伝送係数 S_{21} の三次元分布の測定例を示す。

キーワード 海水、電磁界、疑似スケールモデル、伝送係数、測定、シース付ダイポールアンテナ

Measurement of Transmission Characteristics between Two Electrical Small Antennas in Lossy Medium — To Construct a Measurement System for a Pseudo Scale Model for Electromagnetic Fields in Underwater —

Nozomu ISHII[†]

[†] Faculty of Engineering, Niigata University 8050, Ikarashi-2-nocho, Nishi-ku, Niigata, 950-2181 Japan

E-mail: [†] nishii@eng.niigata-u.ac.jp

Abstract This paper describes the measurement of transmission characteristics between small dipole antennas placed in a liquid injected into a water tank that can be installed in a laboratory. In order to simulate the problem of electromagnetic waves in underwater in a laboratory, it is advisable to introduce a pseudo-scale model focusing on the fact that the real part of the relative permittivity and the conductivity of seawater do not depend on the frequency at frequencies up to about 1 GHz. In the water tank experiment, for example, the spatial distribution characteristic of the transmission coefficient S_{21} between the dipole antennas can be measured by changing the positional relationship between the two dipole antennas in the salt water having almost the same electrical characteristics as seawater. As the dipole antenna, a balanced feeding type dipole antenna with a sheath is used. A 180-degree hybrid coupler is used to achieve balanced feeding. When measuring the transmission coefficient S_{21} , a dipole antenna with a length sufficiently shorter than the wavelength is used, so the multiple reflection component due to the unbalanced current flowing through the cable is superimposed on the direct wave component via the salt water. It is shown that this multiple reflection component can be excluded by converting S_{21} into the time domain and applying gating that extracts only the direct wave component. Further, a measurement example of the three-dimensional distribution of the transmission coefficient S_{21} obtained when the position of one dipole antenna is fixed and the position of the other dipole antenna is changed in salt water is shown.

Keywords Seawater, Electromagnetic Fields, Pseudo Scale Model, Transmission Coefficient, Measurement, Dipole Antenna with a Sheath

1. はじめに

これまで海中での電磁波利用はほとんど日の目を見ることはなかった。その理由はいうまでもなく、海中での電磁波の減衰が大きいためである。たとえば、10 kHzにおける海中の減衰定数は3.45 dB/mであり、30 mの平面波伝搬で104 dBの減衰を被る[1]。減衰定数は周波数の平方根に比例することから、周波数が高くなればなるほど減衰の程度は大きくなる[1]。また、送信電力を10倍にしても30 m平面波伝搬で94 dBの減衰を被ることになり、大電力増幅器で増幅しても通信可能距離を劇的に縮めるには至らない。逆の見方をすれば、電磁波が受信できる範囲でのアプリケーションであれば、つまり、アンテナの近傍において信号等をやりとりするアプリケーションであれば、海中での電磁波利用の可能性が出てくることになる。本稿では、海中での電磁波利用は近距離に限定されるという前提の下で、海中でのアンテナ間の伝送特性を実験室内で模擬的に測定する方法について、これまでの著者の検討結果をとりまとめて報告する。

近年の海中での電磁波利用についての検討では、海面近くでのアプリケーションを想定するため、媒質が海中のみの単一媒質ではなく、大気（空気）と海水とから構成される2層問題として扱わなければならない場合が多い。この2層問題では、有限領域に限定された波源を利用する際に、海中に置かれた二つのアンテナ間の電磁波伝送が海中を介した直接波伝搬のみならず、海面を迂回するラテラル波伝搬を考慮しなければならない場合が生じる[2,3]。このラテラル波はアンテナが海面の近くに配置された場合に直接波より優勢になる場合がある[3]。ともすると、ラテラル波の振る舞いに着目され、直接波の振る舞いについては置き去りされているきらいがある。しかしながら、実験を行うと、ラテラル波の発生は確認できるものの、実験サイドの様々な要因により、数値シミュレーションとの結果に一致するわけではない[4]。著者の感覚的な言いようで申し訳ないが、ラテラル波はその発生位置に極めてセンシティブで、ある意味、不安定さを持ち合わせる波のように思われる。その意味で、ラテラル波を積極的に利用するのではなく、まず安定している直接波の振る舞いを利用すべきと著者は考えている。このため、著者は、海中における直接波の特性にのみ着目して、海中電磁界に関する実験室での水槽実験を実現するためのスケール則の存在について検討を行った。

導電媒質内において、微小電氣的ダイポールアンテナによる電界が γr の関数であること、それから、 $\gamma r \rightarrow 0$ という近傍において、 $1/r^3$ の振る舞いを示し、周波数依存性がなくなり、電氣双極子(電氣的ダイポール)による静電界と一致する[5]。ここで、 γ は導電媒質の

伝搬定数であり、 r はアンテナ中心からの距離である。このように、アンテナ近傍では、直接波の距離特性は $1/r^3$ に比例する。また、電界が γr の関数であることから、距離を $1/n$ 倍するとき、周波数を n^2 倍にすれば、元のモデルと同じ電界の距離特性が得られる[6]。本稿では、この疑似スケールモデルについて、微小電氣的ダイポールアンテナによる電界の式を用いて直観的な説明を試みる。

水槽を用い、距離を変化させながら伝送特性の測定を行う実験系の構築にあたっては、伝送特性 S_{21} はネットワークアナライザにより計測し、アンテナ位置を動かすためにはスライダーを用いることになる[7]。本稿では、構築にあたっての注意点などを列挙する。

水槽内で実験系を構築するにあたりキーデバイスとなるのがアンテナである。本稿では、シース付きダイポールアンテナを紹介し、バラン構成も含めてその電氣特性を提示する[7,8]。ダイポールに平衡電流を給電するために、 180° ハイブリッド結合器を利用している。4ポートネットワークアナライザでディファレンシャルモード間のミックスドモード S パラメータを利用することで、 180° ハイブリッド結合器は不要とすることも可能であるが[9]、別にRFケーブルを2本用意し、その引き回しに注意しなければならない。

続いて、伝送特性 S_{21} を測定する際に生じる問題として、アンテナからの放射電力が小さくなり、ケーブルに生じる不平衡電流による多重反射の影響が強くなることが挙げられる。その例を紹介し、ゲーティング機能により多重反射成分が除去できることを明らかにする[9]。不平衡電流の発生メカニズムは十分に解明できている訳でないが、実験室内に設置可能な水槽内での実験では、波長に比べ十分に短いダイポールアンテナを利用せざるを得ないのも事実であり、そのためにケーブルに流れる不平衡電流が優勢になる可能性がある。不平衡電流を抑制するための対処療法的な解決策としては、ゲーティング機能を利用する、フェライトコアをビーズ状にケーブルに取り付ける[10]、同軸ケーブルをO/E, E/O変換を介して光ファイバに置き換える[11]などの方法がある。

さらに、アンテナ移動を直交3軸のスライダーを用いて制御することで、3次元的な伝送特性の分布を得ることができる。本稿では、その一例を紹介し、直接波とラテラル波が混在する場合の分布について簡単に言及しておく[7]。

以下、提示するデータは必ずしも海水の電氣特性を設定し、測定あるいはシミュレーションした結果とは限らないが、十分に導電媒質とみなせる場合の結果であり、海水の場合でも同様の特性を示すと考えられる。

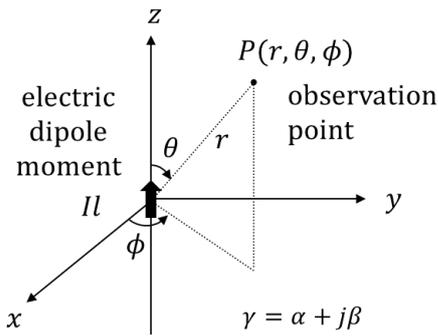


図 1: 原点配置の電氣的微小ダイポールアンテナ

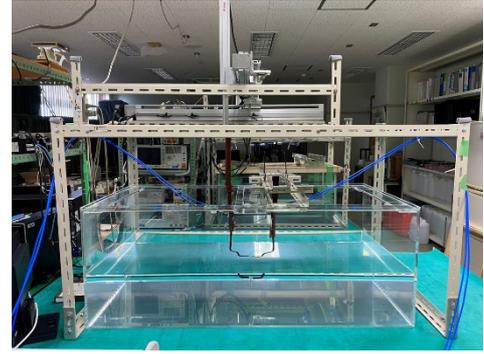


図 2: 三次元走査対応の水槽実験系の一部

2. 疑似スケールモデル

図 1 に示すように、一様な損失媒質内に球座標系を設定し、 z 向きの電氣的微小ダイポールアンテナを原点に置く場合を考える。このアンテナにより生じる電磁界成分の一つは

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

と与えられる。ここで、 γ は媒質の伝搬定数であり、 r は原点からの距離を表す。それ以外の変数については文献[6]を参照されたい。式(1)からわかるように、電磁界成分は γr の関数となる。つまり、周波数を変えても、 γr が同じであれば電磁界の分布は類似する。特に、媒質が導電媒質であるとき、 $\gamma \equiv \alpha + j\beta = (1+j)\sqrt{\omega\mu_0\sigma/2}$ の関係が成り立つ。ここで、 ω は角周波数、 σ は媒質の導電率である。このとき

$$\gamma r \equiv (1+j)\sqrt{\frac{\mu_0\sigma}{2}} \cdot \sqrt{\omega} r \quad (2)$$

と近似できる。導電率 σ が周波数によって変化しないと仮定すると、 γr は $\sqrt{\omega} r$ で決まることになる。このことから、距離を $1/n$ 倍とすると、周波数を n^2 倍すれば、 γr の値は変わらず、距離を縮尺する前と後で、電磁界の分布は類似することになる。これが疑似スケールモデルの距離と周波数に対する基本的な関係となる。具体例を挙げると、10 kHz の海中電磁界問題における 1 m は、これに対する 100 MHz の疑似スケールモデルでは、スケールファクタが $n = 100$ であり、 $1 \text{ m}/100 = 0.01 \text{ m} = 1 \text{ cm}$ ということになる。

疑似スケールモデルは、媒質が一様な導電媒質であることを仮定し、マクスウェルの方程式から直接導出することができる[6,12]。その際のポイントは、導電率が元の問題と疑似スケールモデルで変化しないという前提が成り立つことである。実際に、海水の塩分濃度と液温が決まれば、1 GHz 以下の周波数において、海水の比誘電率の実部と導電率は一定とみなせることから[13]、この前提条件は成り立っている。付け加えると、導電媒質の性質を示す食塩水では、塩分濃度と液温が

決まれば、同じ周波数範囲において、比誘電率の実部と導電率は一定となる[14]。なお、導電媒質の定義として媒質の損失正接 $\tan\delta$ が 10 以上とされているが[15]、損失正接 $\tan\delta$ が 3 程度の食塩水でも比誘電率の実部と導電率が一定となる傾向がみられる。

3. 水槽実験系構築の際の注意点

図 2 に示すような液体内に設置されたアンテナ間の伝送特性 S_{21} のための水槽実験系を構築する際の注意点について述べる。

液体は水槽に注入されることになるので、水槽のサイズをどのように選ぶかが問題となる。まず、設置されたアンテナから液面、水槽底面、側壁面までの間に電磁波が十分に減衰するように距離を確保する必要がある。減衰が十分でないと、これらの境界面からの反射波を考慮しなければならない。また、アンテナに接続されるケーブルのレイアウトを考慮し、水槽のサイズに余裕を持たせる必要もある。さらに、水槽のサイズが大きすぎると、用意しないといけない液体の量が多くなり、保管用タンクへの出し入れなどの液体管理などの手間が増える。保管用タンクに液体を戻さない場合は、蒸発防止のため、ラップで水槽の上部開口を密閉する必要がある。

液体内で、アンテナ位置を移動させるために、アンテナ固定治具（フォルダ）を用意する必要がある。また、液体中でのコネクタ接続を避けるため、アンテナはケーブルとある程度一体化して製作する必要がある。

アンテナの位置を制御するためにスライダーを利用することになるが、自作の場合はスライダーを固定するためのフレームを準備する必要がある。

また、アンテナと測定器を接続するために RF ケーブルが必要となるが、アンテナを移動させる際にケーブルの張力により、アンテナが回転などしないようにアンテナ固定法を工夫するとよい。

S_{21} を測定するにはネットワークアナライザなどを利用することになるが、液体内で大きな減衰が生じる

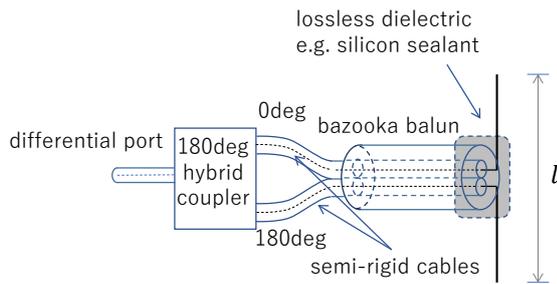


図 3: シース付きダイポールアンテナの例

場合は、測定系のダイナミックレンジを確保するために、増幅器を挿入するなどの対策が必要となる。

最後に、液体の電気特性の標準測定法としては同軸プローブ法、4端子法などが知られているが[16]、食塩水に利用するのであれば、塩分濃度計により塩分濃度および液温を測定し、Peymanの実験式[14]より比誘電率の実部、導電率を推定することができる。

4. シース付きダイポールアンテナ

水槽実験系でアンテナ間の伝送特性を計測する際に、最も重要なデバイスは実はアンテナ自体である。実際に、空気中に比べて海水中での波長は十分短くなるが、海中での減衰を減らすために例えば 10 kHz の周波数を利用すれば、海水中での波長は 15.8 m となる。スケールファクタを 100 として、疑似スケールモデルを考えると、周波数は 100 MHz となり、波長は 15.8 cm となる。実験室内に設置できる水槽内でアンテナ位置を走査することを考慮し、例えば、ダイポールアンテナの長さを 2.0 cm 程度に選ぶとしよう。これは 0.127 波長に対応し、アンテナは電気的小型アンテナとみなせる。よって、アンテナの反射係数の大きさが 1 に近づき、給電線路との整合が困難になる。この状態を回避するためには、ダイポールアンテナ給電部を無損失の誘電体（シース）で覆い、給電部でのアンテナ電流分布の平坦化を図るとよいことが知られている[8, 17]。具体的には、図 3 に示すように、2本のセミリジッドケーブルの内導体を折り曲げてダイポールアンテナを形成し、折り曲げ部分に耐水性の誘電材料を取り付ける（例えば、シリコンシーラントを塗布する）とよい。ダイポール側でない 2本のセミリジッドケーブルは 180° ハイブリッド結合器に接続され、ディファレンシャルモード信号のみを取り出せるようにする。使用する周波数によるが、バズーカバランを取り付け、不平衡電流の発生を抑制することも可能である[7]。シース付きダイポールアンテナは、ハイブリッド結合器での減衰、シースを付加していないダイポール部分から液体への大きな誘電体損により、アンテナポートに戻る電力が軽減されることから、アンテナ長にもよるが、

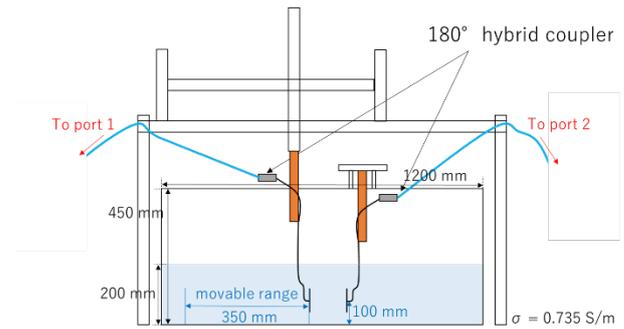


図 4: 長尺水槽を用いた伝送特性測定系

極端に整合が困難となる反射特性を示さないことが知られている。なお、シース付きダイポールアンテナの動作メカニズムについては引き続きその説明が進められている[18, 19]。

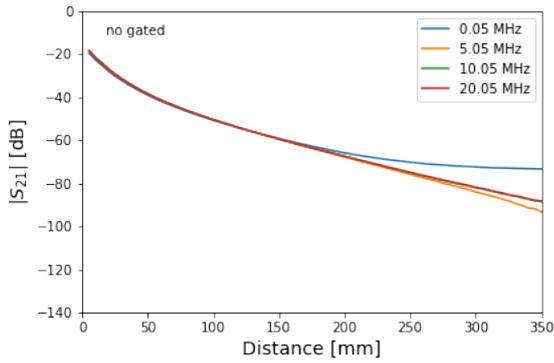
5. 測定事例

5.1. ゲーティング機能による多重反射除去

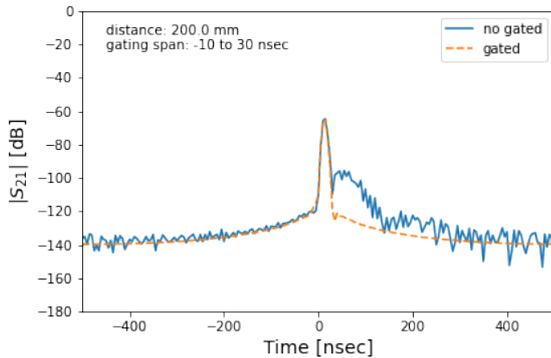
図 4 に示すように、水槽に濃度 0.423 % の食塩水を注入し、その中で 2つのシース付きダイポールアンテナを対向させ、伝送特性 S_{21} の距離特性を測定した事例を紹介する[9]。周波数 50 kHz - 10 MHz において、濃度 0.423 % の食塩水は、誘電正接 $\tan \delta$ は 7.7 以上であることから、ほぼ導電媒質とみなすことができる。図 5(a) は、2本の長さ 100 mm シース付きダイポールアンテナを液面に対して垂直配置し、その間の距離に対する S_{21} の大きさの変化の様子を示す。50 kHz では 200 mm 以上離れると $|S_{21}|$ の変化が平坦となる距離特性が現れる。これは、アンテナ間の食塩水中の直接波伝搬の寄与よりもアンテナ間の距離に依存しない寄与が優勢になるためである。実際、図 5(b) に示すアンテナ間距離が 300 mm であるときの S_{21} の時間領域波形からわかるように、直接波パルスの直後に、多重反射等の影響と思われる波形が観測されている。ゲーティング機能で直接波パルスだけを残すと、図 5(c) に示すように、周波数によらず $|S_{21}|$ の距離特性は同一となり、かつ、平坦な距離特性は消える。このように、ゲーティング機能を用いると直接波以外の成分を取り除くことができる。また、周波数によらず $|S_{21}|$ の距離特性が同一となるのは、アンテナ間距離が波長に比べて十分に短く、ダイポールアンテナの静電界的寄与のみ現れるためと考えられる[5]。

5.2. アンテナ間伝送特性の 3D スキャン

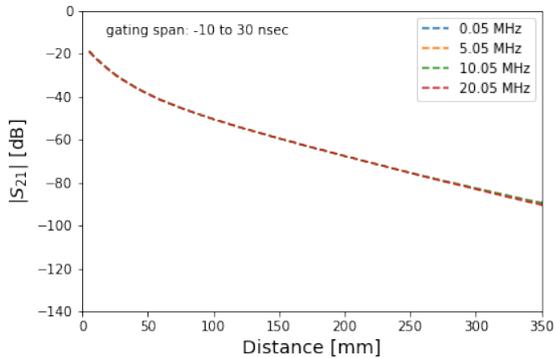
図 6 に示すように、水槽に濃度 2.46 %、液温 23°C の食塩水を注入し、その中で 2つのシース付きダイポールアンテナを対向させ、アンテナ間の位置関係を変化させて伝送特性の三次元分布を測定した事例を紹介



(a) $|S_{21}|$ の距離特性（ゲーティングなし）



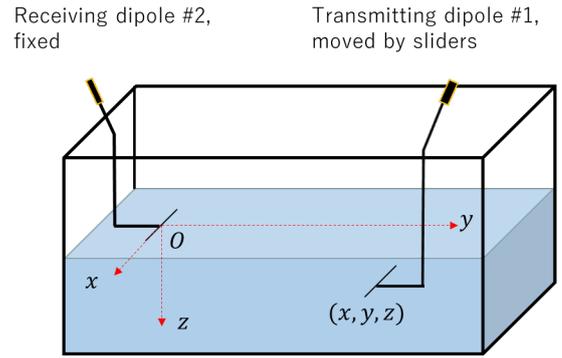
(b) 距離 300 mm における時間領域応答



(c) $|S_{21}|$ の距離特性（ゲーティング後）

図 5: 長尺水槽で長さ 100mm のシース付きダイポールアンテナ間の伝送特性を測定した例[9]

する[7]. 周波数は 398 MHz であり, アンテナ長はともに 10 mm としている. ダイポールの向きは液面に平行とし, 二つのダイポールも平行となるように配置している. 一方のアンテナを水槽内で三次元走査させ, もう一方のアンテナを液面直下に設置している. 図 7 は一方のアンテナを水面下 30 mm の平面内で走査した場合の伝送特性の等高線図を示す. $x = y = 0$ mm の位置を中心として直接波による分布が生じ, 一定の等高線間隔で変化する. その後, 等高線間隔が広がる分布に移行する. 後者はいわゆるラテラル波の振る舞いを示している. ここで注目しておきたいのは, ラテラル波領域の等高線分布の非対称性である. アンテナ配



Tank: 90cm × 45 cm × 45 cm
Solution: 2.46% salt water, 23 °C

図 6: アンテナ間の伝送特性の三次元走査に用いた測定系

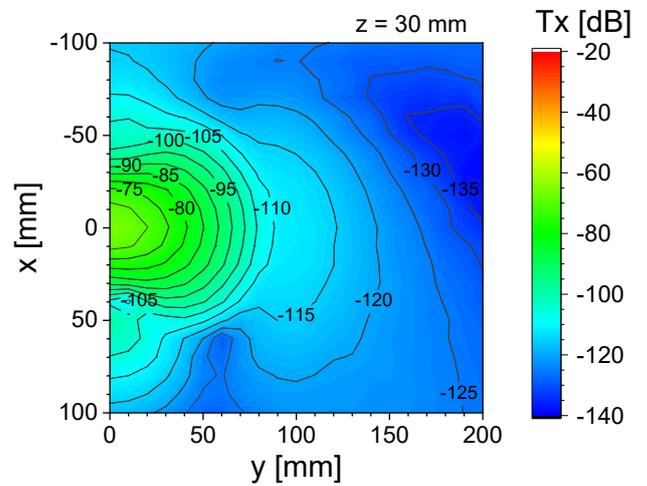


図 7: 液面下 30mm の平面における受信電力分布[7]

置をやり直すたびにこの非対称性は異なる. 設置精度の問題といえどもそれまでもかもしれないが, ラテラル波の発生は設置に非常にセンシティブであるといえるのかもしれない. この点はさらなる説明が必要と考えている.

6. まとめ

本稿では, 海中電磁波問題を実験室に設置できる水槽で行うための方法について, ノウハウの部分も織り交ぜながら解説した. 疑似スケールモデルを利用することになり, 長さを $1/n$ 倍するモデルを扱う場合は周波数を n^2 倍すればよい. その前提条件としては, 原問題と疑似スケールモデルにおいて導電率が同じであればよく, すなわち, 海中電磁波を扱う場合は同じ海水をそのまま使えばよい. 水槽実験系を構築する際の注意点を指摘するとともに, シース付きダイポールアンテナについての特徴について説明した. 測定例として, 直接波以外の成分が伝送特性に重畳される場合の対応,

アンテナを液面近傍に設置した場合に発生するラテラル波に関してコメントした。本稿が海中電磁波問題を実験的に取り組む際の一助となれば幸いである。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 19K04389 により実施されたものである。

文 献

- [1] 陳 他, “電波の海中応用へのアプローチ,” 信学技報, A・P2016-92, pp.25-28, つくば, Sep. 2016.
- [2] T. Tamir, “The later wave,” *Electromagnetic Surface Modes*, ed. A. D. Boardman Ed., chapter 13, John & Wiley & Sons, 1982.
- [3] R. W. P. King, et al., *Lateral Electromagnetic Waves*, Springer-Verlag, New York, 1992.
- [4] 石井 他, “浅海域における海中電磁波信号の海面受信に関する考察,” 信学技報, A・P2019-143, pp.7-12, 東京, Dec. 2019.
- [5] 石井 他, “導電媒質における微小ダイポールアンテナによる電界,” 2019 信学総大 (通信), B-1-118, p.118, 東京, Mar. 2019.
- [6] 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, 東京, Dec. 2016.
- [7] 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, 札幌, Aug. 2019.
- [8] H. Sato et al., “Dipole antenna with sheathed-cover for seawater use,” *Proc. ISAP 2017*, POS1, 1376, Phuket, Thailand, Oct. 2017.
- [9] 増田 他, “長尺水槽を用いた kHz 帯組織等価液剤中における送受信アンテナ間の伝送特性測定に関する検討,” 無線端末・アンテナシステム測定研究会資料, AMT2020-2, オンライン, Aug. 2020.
- [10] 石井 他, “海中疑似スケールモデルにおけるシールドループアンテナ間の伝送特性の距離依存性,” 2020 信学ソ大 (通信), B-1-119, p.119, オンライン, Sep. 2020.
- [11] チャカロタイ 他, “シース付ダイポールアンテナによる液剤中光電界プローブ校正,” 光応用電磁界計測研究会資料, PEM2019-3, pp.9-14, Jul. 2019.
- [12] F. C. Frischknecht, “Electromagnetic Scale Modeling,” *Electromagnetic Probing in Geophysics*, ed. J. R. Wait, The Golem Press, Boulder, Colorado, 1971.
- [13] Rec. ITU-R P.527-3, “Electrical Characteristics of the Earth,” ITU, Geneva, 1992.
- [14] A. Peyman et al., “Complex Permittivity of Sodium Chloride Solutions at Microwave Frequencies,” *Bioelectromagnetics*, vol. 28, pp.264-274, 2007.
- [15] R. W. P. King et al., *Antenna in Matter: Fundamentals, Theory, and Applications*, The MIT Press, Cambridge, MA, 1981.
- [16] 渡辺 他, “生体組織・材料の電気定数測定,” 計測と制御, vol. 53, no. 3, pp.181-186, Mar. 2014.
- [17] N. Ishii et al., “Probe Calibration in Lossy Liquid Using Small Dipole Antennas for MHz-Band Specific Absorption Rate Measurements,” *IEEE Trans. Inst. Meas.*, vol. 69, no. 6, pp.3078-3088, June 2020.
- [18] 陳 他, “海水中における送受信アンテナ間の伝送効率,” 2018 信学総大 (通信), B-1-133, p.133, 金沢, Sep. 2018.
- [19] 吉田, “海中でのアンテナのふるまいについての一考察,” 水中無線技術研究会資料, UWT2021-3, オンライン, June 2021.