

# 海中動作ダイポールアンテナによる電界強度測定のための 疑似スケールモデル

## A Pseudo Scale Model for Measuring Electric Field Intensity Produced by a Small Dipole Antenna Immersed in the Sea

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  
Niigata University

\*2 千葉大学  
Chiba University

\*3 東北大学  
Tohoku University

\*4 海洋研究開発機構  
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

### 1. まえがき

海中における電磁波利用は、海中における電磁波伝搬に伴う大きな減衰により阻まれているといっても過言ではない。しかしながら、近年の急速な電子機器を利用した通信・測定技術の飛躍的な進歩により、ニッチかもしれないが、電磁波の海中応用が再び脚光を浴びつつある。大きな減衰という問題を克服するためには、まず周波数を下げ、ある程度の通信が行えるまで海中における電磁波の減衰を小さくすることが現実的である[1]。このとき、研究開発上の大きな問題の一つとなるのは、周波数を下げたことにより、検証を行うための実験系の規模が大きくなり、大規模水槽や海洋での実験が余儀なくなる点である。いうまでもなく、準備に要するコスト・時間、また実験要員の確保など、このままでは手軽にアイデアを実験的に検証することが難しい。その意味で、多少の厳密性は損ねても、室内でスケール実験が行えるメリットは海中電磁波利用の研究・開発を進める上で計り知れない。電磁波の分野で知られているスケール則では、寸法を $1/n$ 倍にした場合、導電率を $n$ 倍にする必要がある。しかしながら、実際に室内で実験系を組むのに適したスケールファクタ $n$ に対して導電率が $n$ 倍となる食塩水は飽和限界を超えてしまい作製できないのが現実である。

本稿では、MHz帯よりも低い周波数において、海水が一般的な導電媒質とみなせることに着目し、疑似スケールモデル[2]を利用してスケールダウン測定系を構築した事例について紹介する。

### 2. 疑似スケールモデル

海中動作アンテナは、海中での減衰を小さくするために、例えば、kHz帯の周波数が利用される。機器の物理的寸法の制約から海中動作アンテナの寸法は波長に比べて十分に小さくなる。すなわち、微小ダイポールアンテナとみなすことができる。本稿では、マッチングが比較的取りやすいという理由から、電氣的微小ダイポールアンテナについて取り扱うことにする。一般的な導電媒質を考え、原点 $O$ に $x$ 向きの電流モーメント $Il$ の電氣的微小ダイポールアンテナを配置する。このとき、点 $P(x, y, z)$ における電界の成分は次のように与えられる[3]。

$$E_x = -\frac{j\omega\mu l e^{-\gamma r}}{4\pi r} \left[ 1 + \frac{1}{\gamma r} + \frac{1}{(\gamma r)^2} - \frac{x^2}{r^2} \left\{ 1 + \frac{3}{\gamma r} + \frac{3}{(\gamma r)^2} \right\} \right] \quad (1)$$

$$E_y = \frac{j\omega\mu l e^{-\gamma r}}{4\pi r} \frac{xy}{r^2} \left\{ 1 + \frac{3}{\gamma r} + \frac{3}{(\gamma r)^2} \right\} \quad (2)$$

$$E_z = \frac{j\omega\mu l e^{-\gamma r}}{4\pi r} \frac{xz}{r^2} \left\{ 1 + \frac{3}{\gamma r} + \frac{3}{(\gamma r)^2} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $\gamma^2 = j\omega\mu\sigma$  および  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  とする。 $\omega$  は各周波数、 $\mu$  は媒質の透磁率、 $\sigma$  は媒質の導電率である。(1)-(3)から、電界は $\gamma r$ の関数となっていることがわかる。いま、 $\mu$  および  $\sigma$  が周波数によらず一定であるならば、長さを $1/n$ 倍とすると、すなわち、 $r' = r/n$  とするとき

$$\begin{aligned} \gamma r &= (1+j) \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} r = (1+j) \sqrt{\frac{(n^2\omega)\mu\sigma}{2} \frac{r}{n}} \\ &= (1+j) \sqrt{\frac{\omega'\mu\sigma}{2}} r' = \gamma' r' \end{aligned} \quad (4)$$

と変形できることから、周波数を $n^2$ 倍すれば、スケールダウンする前と相似の電界分布を示すことがわかる[2]。

例えば、周波数 10 kHz における 20 m の距離は、周波数 400 MHz における 10 cm の距離に対応することになる。ただし、周波数 10 kHz および 400 MHz で導電媒質であり、かつ、同じ導電率を示すという仮定が成り立つことが前提である。20 m の距離を海水中で実験するためには、一辺が 20 m 以上の水槽が必要であり、あるいは、20 m のストロークが取れる海水上での実験系を構築する必要がある。これに対して、10 cm の距離は、例えば、600 mm × 300 mm × 300 mm 程度の大きさの市販の水槽内で実現でき、室内で実験系を組むことが可能となる。

上述の疑似スケールモデルの適用条件は一様でかつ導電媒質であることである。しかしながら、実際に取り扱う問題は、最も簡単な場合であっても、空気層と海水の二層問題を扱う必要がある。境界条件を境界面で厳密に適用しなければならぬところであるが、本稿では海水での電磁界の振る舞いを主たるターゲットとするため、境界面での境界条件が厳密な意味で成り立たないが、空気層もそのまま組み込んで実験を行うこととする。このような大胆な近似を行ってよい理由について、著者なりの見解を与えておく。空気層と海水の二層問題では、海中に沈められたアンテナ間の伝搬は、それらのアンテナ間の直接波伝搬と送信アンテナ直上の海面まで進み、海面を伝わって、受信アンテナ直上で海面から潜り、受信アンテナに伝わるラテラル波伝搬が知られている[3]。いうまでもなく、ラテラル波は、空気層の存在により境界条件を満たすべく発生する伝搬モードである。直接波よりも海中での減衰が小さいと、アンテナ間伝送はラテラル波が優勢となる。しかしながら、海中での受ける減衰に比べ、空気層（海面すれすれの空気の部分）での短距離にわたる空間的減衰は小さいので、境界条

件を厳密に適用するまでもなく、近似的に境界面における電磁界の振る舞いを模擬できると考えられる。

### 3. 疑似スケールモデルに基づく海中動作ダイポールアンテナによる電界強度測定

本稿で紹介する海水動作ダイポールアンテナ[4]間の伝送特性の実験系を図1に示す。二つのバズーカバラン付ダイポールアンテナは、一つは信号発生器に接続され、もう一つはプリアンプを介してスペクトラムアナライザに接続されている。また、ダイポールアンテナは、二本のセミリジッドケーブルの内導体を利用して構成されており、セミリジッドケーブルの外導体は半田付けされている[5]。ダイポールと反対側のケーブルは $180^\circ$  3dBハイブリッド結合器に接続される。この結合器のポートから見込んだ反射は、二つのダイポールアンテナとも約-9 dBであった。

長さ10 mmのダイポールアンテナ#1が食塩水中を3軸ステージにより3次的に走査できるようになっている。この可動ダイポールアンテナにより生じる電界を液面直下に固定された長さ10 mmのダイポールアンテナ#2により受信する。食塩水は海水を模擬しており、周波数400 MHzにおいて複素比誘電率の実部が60.1であり、導電率が4.01 S/mである(Speag, DAK-12にて測定)。このとき、 $\tan \delta$ は3.02であり、十分に導電媒質とはいえない。導電媒質の目安である $\tan \delta \geq 10$ を目指すには、周波数を低くする必要がある。なお、周波数400 MHzにおける食塩水中の波長は67.2 mmであり、ダイポールアンテナ#1,#2は微小ダイポールアンテナといえない。この実験では、工作精度の観点から、ダイポール長を10 mmと設定した。

測定では、ダイポールアンテナ#2の深さを変えながら、 $z$  = 一定となる面における受信電界分布を測定した。図2はその一例であり、 $z = 30$  mmの面内におけるダイポールアンテナ#1による $x$ 偏波成分の分布を測定したものである。ここで、アンテナに接続するケーブルを直結したときのスペクトラムアナライザの受信レベルを0 dB基準としている。図中の $x = y = 0$  mmはダイポールアンテナ#1がダイポールアンテナ#2の直下にある場合に対応しており、 $x, y$ を10 mm間隔で変化させている。 $x = y = 0$  mmを中心とする分布は、ダイポールアンテナ#1の直接波受信による分布である。これに対して、レベルが-110 dBより小さくなると、直接波の分布にみられる急激なレベル低下がみられず、徐々にレベルが小さくなる傾向に切り替わっている。

図3は $x = 0$  mm面( $yz$ 面)における受信電界分布を示している。左上の $x = y = 0$  mmの位置から遠ざかるにつれて、等レベル分布の形を維持しながらレベルが落ちていく様子が観測されている。しかしながら、 $y = 60$  mm以降においては、この傾向に取って代わり、境界面にある角度を持った直線的な等レベル分布が存在するようになっていくことがわかる。これはダイポールアンテナ#1からその直上の液面までの減衰分布に相当しており、 $y = 60$  mm以降では、直接波に代わってラテラル波が優勢な伝搬モードとなっていると考えられる。

### 4. まとめ

国内外において海中における電磁波利用に関する研究・開発は再挑戦が着々と進行している。FDTD法によるシミュレーションにより、海中における電磁界の振る舞いを理解することは既に可能である。しかしながら、依然として

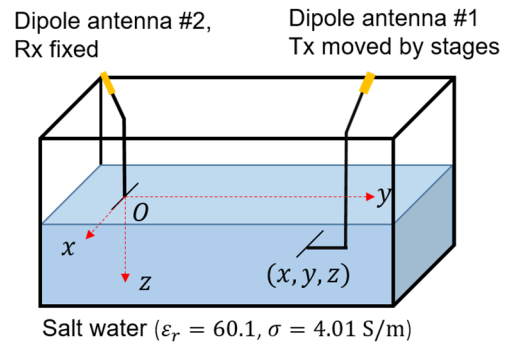


図1 疑似スケールモデル実験系

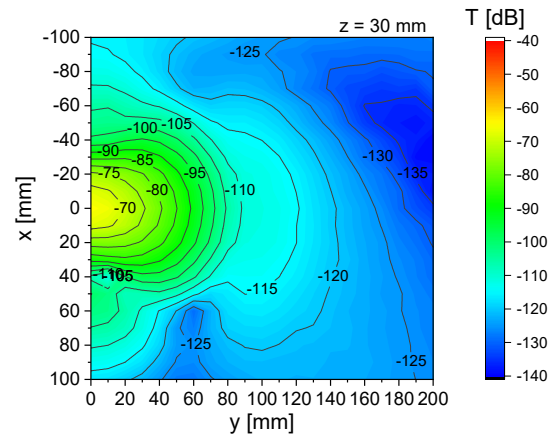


図2  $z = 30$  mm 面内における受信電界分布 ( $x$ 偏波受信)

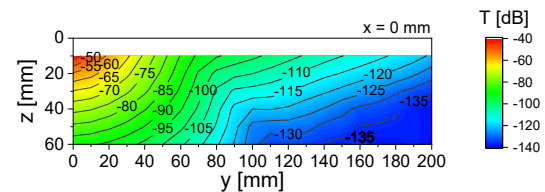


図3  $x = 0$  mm 面における受信電界分布 ( $x$ 偏波受信)

実験によりその現象が本当に起きるのかを確認することも重要なアプローチの一つである。大規模になりがちな海中電磁波利用の検証実験のコンパクト化を目指し、疑似スケールモデルという導電媒質特有のスケールモデルを導入し、室内での海中スケールモデル実験の可能性について論じた。空気層と海水の二層問題に対してもその物理現象(ラテラル波の存在)を確認する観点に立てば、疑似スケールモデル実験が有効であることを示唆した。

### 文献

- [1] 陳 他, “電波の海中応用へのアプローチ,” 信学技報, AP2016-92, pp.25-28, Sep. 2016.
- [2] 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, AP2016-125, pp.11-16, Dec. 2016.
- [3] R. W. P. King, Lateral electromagnetic waves, Springer-Verlag, 1992.
- [4] H. Sato et al., “Dipole antenna with sheath-cover for seawater use,” Proc. ISAP 2017, POS1, 1376, Phuket, Thailand, Oct. 2017.
- [5] 石井 他, “微小ダイポールアンテナによる液体中電界強度距離特性較正法の改良,” 信学技報, AP2018-62, pp.119-124, July 2018.