

擬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

石井 望[†] 高橋 応明^{††} 陳 強^{†††}

[†]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: †nishii@eng.niigata-u.ac.jp, ††omei@m.ieice.org, †††chenq@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 本報告では、実験室内で海洋中における電磁界伝搬を模擬した実験を行うための基本原理である疑似スケール則について議論する。伝搬定数と距離の積に着目し、電気的あるいは磁氣的微小ダイポールアンテナの電磁界において、疑似スケール則を類推する。疑似スケール則を適用するための条件、すなわち、媒質の損失正接に着目した導電媒質の条件を確認し、波長および1波長あたりの減衰量について検討する。また、すべての導電媒質において一般に疑似スケール則が成り立つことを確認する。

キーワード 疑似スケールモデル, 微小ダイポール, 導電媒質, 海水, 電磁界

Pseudo Scale Model for Electromagnetic Fields Produced by Infinitesimal Electric and Magnetic Dipoles in Seawater

Nozomu ISHII[†], Masaharu TAKAHASHI^{††}, and Qiang CHEN^{†††}

[†] Niigata University, 8050 Ikarashi2-cho, Nishi-ku, Niigata 950-2181 Japan

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

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

E-mail: †nishii@eng.niigata-u.ac.jp, ††omei@m.ieice.org, †††chenq@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract In this report, we discuss the pseudo-scale rule which is the basic principle for laboratory experiments simulating electromagnetic field propagation in the ocean. Focusing on the product of the propagation constant and the distance, the pseudo scale rule can be found in the electromagnetic field of the electrical or magnetic dipole antenna. We also check the conditions for applying the pseudo scale rule, that is, the condition of the conducting medium described by using the loss tangent of the medium, and examine the wavelength and attenuation per wavelength. In addition, we confirm that the pseudo scale rule generally holds in all conducting medium.

Key words pseudo scale model, infinitesimal dipole, conducting medium, seawater, electromagnetic fields

1. はじめに

海洋は第二の宇宙といわれて久しい。宇宙探査では電波を使った通信が利用されているのは周知のとおりであるが、海洋中では電波を使った通信を始めとするアプリケーションは数少ない。これは、海洋中において電波の減衰が大きいためであり、海洋中における電波利用は不可避な減衰への試みである。歴史を紐解くと、1960年代までに、海洋中に沈められたアンテナからの放射特性に関する種々の検討が行われていた[1]。当然のことながら、周波数が低いと、海洋中における減衰は小さく、より遠方まで電波は届く。しかしながら、この減衰は距離に対して指数関数的に減衰しており、遠方において、その減衰は $1/r^2$,

$1/r^3$ などの距離の逆べき項による減衰よりもシビアであることが多い。また、図1に示すように、海面の下に送受信アンテナを配置した場合にラテラル波が海面を伝搬することが知られている[2]~[4]。すなわち、送受信アンテナ間で海洋中を電波が直接伝搬するだけでなく、送信アンテナから垂直に海面まで達し、境界条件によりその一部が海面上の大気内に再放射され、その波が受信アンテナ直上の海面で再び海水内に侵入し、受信アンテナに垂直に到達するという伝搬路である。図1のように、送受信アンテナ間の距離を d 、海面からの深さを h 、海水中における減衰定数を α とし、海洋中および海面上の大気内で平面波伝搬を仮定するとすると、直接波の減衰は $e^{-\alpha d}$ であり、間接

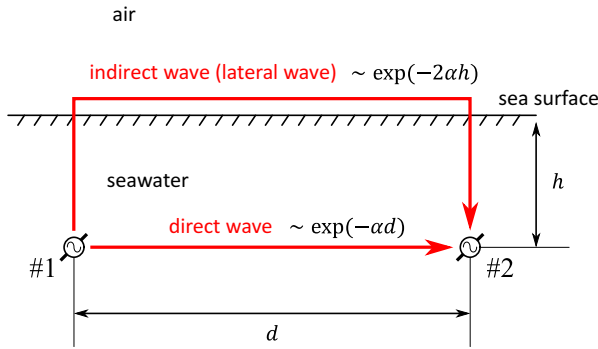


図1 海洋中における送受信アンテナの配置

波の減衰は e^{-2ah} である。 $d > 2h$ のとき、間接波、すなわち、ラテラル波の伝搬路での減衰が送受信アンテナ間の減衰として観測される。これは電波による海洋中での長距離通信を実現するための方法として知られている。しかしながら、これらの研究に関する論文は1970年以降すっかりと鳴りをひそめた。

2004年以降、MHz帯における海洋中における電波伝搬実験の結果が発表されるようになった[5]~[8]。室内実験施設あるいは岸壁等において、海水中に沈めた二つのループ間の伝達距離特性が測定されており、多くの場合、ある距離までは急速に減衰するが、ある距離を超えるとその減衰が緩やかになるという結果が得られている。これは前述のラテラル波伝搬のためと考えられる。このような実験が実施された背景には、1960年代に比べて飛躍的にデジタル通信技術が発展し、1960年代では実現が困難と思われていた無線システムの構成が可能になったことが背景にある。さらに、海洋底にあるとされているレアアースなどの資源開発などのムーブメントの高まりなどがあり、従来の音波通信ではなく、より高速な通信が可能となる電波による通信技術の開発が切望されているという面もある。

このような背景の下、著者らは今こそ海洋中における電波技術へ再チャレンジを始める時期ととらえ、海洋中における電波伝搬特性の確認を端緒として、具体的なアプリケーションを設定した検討を開始している[9]。そのパイロット的な検討として、kHz帯からMHz帯の周波数帯の電波を利用した水中測位システムについての簡単なシミュレーションを行った。実際にダイバーによる遭難者救援の場面を想定し、伝搬させるべき距離(十数m)に対して、平面波伝搬を仮定して、周波数をパラメータとした減衰距離特性より使用すべき周波数帯の検討を行った。さらには、GPSルーターを海面に設置し、3つ以上のルーターにおけるダイバー送信機から受信振幅レベルからダイバーの位置推定が可能であることを指摘した。

このシステムの実現に際しては、ルーターを海洋ブイに固定させることになるが、そのブイが波や潮位で常に一定の位置にないことの補償、ラテラル波伝搬による受信振幅レベルに基づく位置推定アルゴリズムの誤動作の問題などを解決しなければならない。また、ダイバーとルーター間における海洋中における伝搬特性も明らかにしておく必要がある。このためには、FDTDによる数値シミュレーションが最も有力な方法と目されるが、実際には海洋の塩分濃度の違いにより、海洋中にお

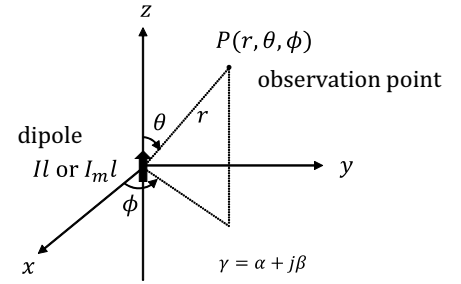


図2 微小ダイポールアンテナ

る減衰距離特性の変化などが起こりうるため、実験によっても伝搬特性を確認する必要がある。しかしながら、特にkHz帯の周波数では、海洋中における波長は非常に長く、実験室内の水槽に海水を満たして、その中で伝搬実験することは現実的でない。すなわち、実際の海洋中に送受信アンテナを挿入し、伝搬実験を行わなければならない、準備、費用、時間の面で大がかりとなる。

本報告では、実験室内で海洋中における伝搬を模擬した実験を行うための基本原理である疑似スケール則について議論する。この疑似スケール則は自由空間内でよく知られたスケール則[10]とは異なる。著者らは、まず電気的もしくは磁氣的微小ダイポールから放射電磁界の式の形から疑似スケール則を見出したが、マクスウェル方程式にさかのぼって考察し、導電媒質内での電磁界全般に対して成り立つ性質であることを確認する。以下、一様損失媒質内における伝搬を仮定し、ラテラル波伝搬については考慮しない。また、導電媒質内における平面波の性質を調べ、導電媒質であるための条件を損失正接 $\tan \delta$ を用いて定量的に明らかにするとともに、1波長あたりの減衰量についても考察を行う。

2. 導電媒質内における微小ダイポールによる電磁界に関する疑似スケール則

いま、誘電率 ϵ 、透磁率 μ 、導電率 σ の一様媒質を考える。ここで、媒質の伝搬定数 γ は

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(j\omega\mu)(\sigma + j\omega\epsilon)} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 ω は角周波数とし、 α および β は媒質の減衰定数および位相定数とする。図2に示される \hat{z} 方向を向いた電流モーメント Il の電氣的微小ダイポールによる電磁界は、球座標系 (r, θ, ϕ) を用いて

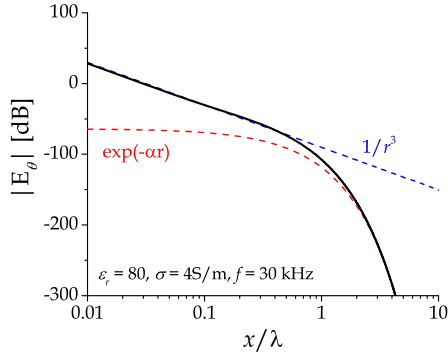
$$E_r = 2j\omega\mu_0 Il \cos\theta \left\{ \frac{1}{\gamma r} + \frac{1}{(\gamma r)^2} \right\} \frac{e^{-\gamma r}}{4\pi r} \quad (2a)$$

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

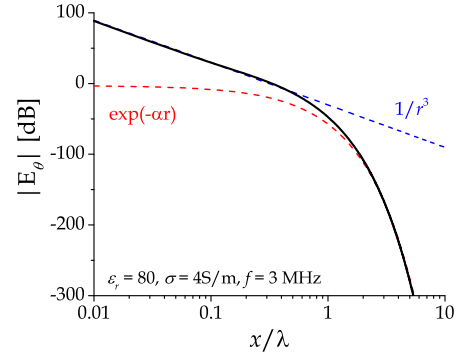
$$H_\phi = \gamma Il \sin\theta \left(1 + \frac{1}{\gamma r} \right) \frac{e^{-\gamma r}}{4\pi r} \quad (2c)$$

$$E_\phi = H_r = H_\theta = 0 \quad (2d)$$

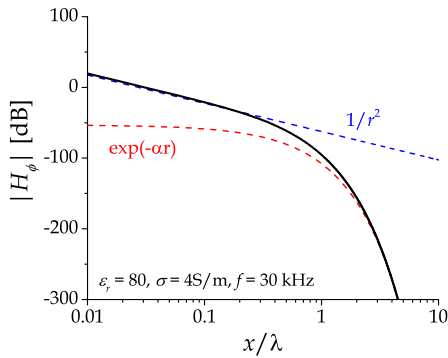
と記述できる[1]。このように、電氣的微小ダイポールの場合、



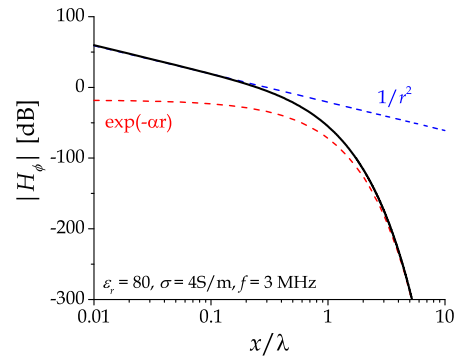
(a) $|E_\theta|$ (x 軸上)



(a) $|E_\theta|$ (x 軸上)



(b) $|H_\phi|$ (x 軸上)



(b) $|H_\phi|$ (x 軸上)

図 3 導電媒質内における電氣的微小ダイポールによる電磁界の距離特性 (30kHz, $\epsilon_r = 80, \sigma = 4\text{S/m}, Il = 1\text{Am}$)

図 4 導電媒質内における電氣的微小ダイポールによる電磁界の距離特性 (3MHz, $\epsilon_r = 80, \sigma = 4\text{S/m}, Il = 1\text{Am}$)

その電磁界の距離特性は γr の関数となることがわかる。

導電媒質においては、 $\sigma \gg \omega\epsilon$ の近似が成り立ち

$$\alpha \approx \beta \approx \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (3)$$

となるから、 γr は

$$\gamma r \approx \beta(1+j)r = 2\pi(1+j)\frac{r}{\lambda} \quad (4)$$

と近似できる。ここで、 λ は損失媒質内における波長であり、 $\lambda = 2\pi/\beta$ により与えられる。式 (4) は、 γr は波長で正規化した距離 r/λ に定数 $2\pi(1+j)$ を乗じたものであることを示す。このことは、波長で正規化した距離に着目すると、導電媒質条件を満足する媒質内では、定数倍を除いて距離減衰特性が同じであることを示唆している。

同様に、 \hat{z} 方向を向いた磁流モーメント I_{ml} の磁氣的微小ダイポール (図 2 参照) による電磁界は、球座標系 (r, θ, ϕ) を用いて

$$H_r = \frac{2\gamma^2 I_{ml} \cos \theta}{j\omega\mu} \left\{ \frac{1}{\gamma r} + \frac{1}{(\gamma r)^2} \right\} \frac{e^{-\gamma r}}{4\pi r} \quad (5a)$$

$$H_\theta = \frac{\gamma^2 Il \sin \theta}{j\omega\mu} \left\{ 1 + \frac{1}{\gamma r} + \frac{1}{(\gamma r)^2} \right\} \frac{e^{-\gamma r}}{4\pi r} \quad (5b)$$

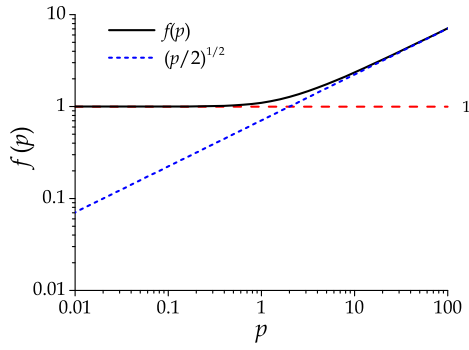
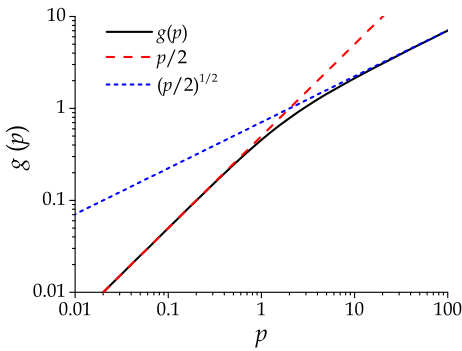
$$E_\phi = -\gamma I_{ml} \sin \theta \left(1 + \frac{1}{\gamma r} \right) \frac{e^{-\gamma r}}{4\pi r} \quad (5c)$$

$$H_\phi = E_r = E_\theta = 0 \quad (5d)$$

と記述できる [1]。このように、磁氣的微小ダイポールの場合も、電磁界の距離特性は γr の関数となることがわかる。

kHz 帯での伝搬実験を想定すると、我々が試作できるアンテナの大きさ (最大寸法 2m 程度) は、波長に比べて十分に小さい。アンテナがダイポールタイプであれ、ループタイプであれ、導電媒質内では、上述のように、波長で正規化された距離 r/λ の関数として電磁界の距離特性が記述できる。この性質を利用すると、kHz 帯で十分に長い距離の測定を必要とする伝搬特性を、周波数を高くして (波長を短くして)、例えば、MHz 帯で実験室に設置した水槽内に満たされた導電媒質内における測定により確認することが可能となる。これは自由空間におけるスケール則と類似する性質であり、以降、本報告ではこの性質を疑似スケール則と呼ぶことにする。

図 3 および図 4 に、海水を模擬した導電媒質 ($\epsilon_r = 80, \sigma = 4\text{S/m}$) 内における電氣的微小ダイポールによる $|E_\theta|$ および $|H_\phi|$ の x 軸に沿った距離特性を示す。海水の導電率は周波数によらず一定であると前提する。図 3 は 30kHz、図 4 は 3MHz の場合である。図 3 と図 4 を比較すると、周波数が 100 倍も異なるにもかかわらず、定数倍を除いて距離減衰特性が類似することがわかる。この相似性が疑似スケール則の本質である。図 3(a) および図 4(a) より、 $|E_\theta|$ は $x < 0.5\lambda$ において $1/r^3$ に従い、 $x > 3\lambda$ において $e^{-\alpha r}$ に従うことがわかる。一方、図 3(b) および図 4(b) より、 $|H_\phi|$ は $x < 0.2\lambda$ において $1/r^2$

(a) $f(p)$ (b) $g(p)$ 図5 $f(p)$ および $g(p)$ の p 依存性

に従い、 $x > 3\lambda$ において $e^{-\alpha x}$ に従うことがわかる。

3. 導電媒質内における平面波の性質

本節では、疑似スケール則を適用するための導電媒質条件 $\sigma \gg \omega\epsilon$ に関する定量的な評価指標を確認するとともに、1 波長あたりの減衰量などの導電媒質内の平面波の性質についてまとめておく。

まず、一様損失媒質の複素誘電率 $\hat{\epsilon}$ は

$$\hat{\epsilon} = \epsilon - j\frac{\sigma}{\omega} = \epsilon_0\epsilon_r(1 - j\tan\delta) = \epsilon(1 - jp) \quad (6)$$

と記述される。ここで、 ϵ_0 は自由空間の誘電率、 ϵ_r は媒質の複素比誘電率の実部、 $p = \tan\delta$ は媒質の損失正接である。このとき、伝搬定数 γ は

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\hat{\epsilon}} = j\omega\sqrt{\mu\epsilon}\sqrt{1 - jp} \quad (7)$$

と記述できる。これから、位相定数 β および α は

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon} f(p) \quad (8)$$

$$\alpha = \omega\sqrt{\mu\epsilon} g(p) \quad (9)$$

と与えられる。ここで

$$\sqrt{1 - jp} = f(p) - jg(p) \quad (10)$$

であり

$$f(p) = \left[\frac{\sqrt{1+p^2} + 1}{2} \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$g(p) = \left[\frac{\sqrt{1+p^2} - 1}{2} \right]^{1/2} \quad (12)$$

とする [4]。

図 5 に、 $f(p)$ および $g(p)$ の p 依存性を示す。同図には、低損失媒質および導電媒質条件を適用した場合の近似曲線を併せて示す。低損失媒質では、 $\sigma \ll \omega\epsilon$ により、 $f(p), g(p)$ は

$$f(p) \approx 1 \quad (13)$$

$$g(p) \approx \frac{p}{2} \quad (14)$$

と近似され、導電媒質では、 $\sigma \gg \omega\epsilon$ により、 $f(p), g(p)$ は

$$f(p) \approx g(p) \approx \sqrt{\frac{p}{2}} \quad (15)$$

と近似される。

図 5 から、 $f(p)$ および $g(p)$ は、 $p = 0.6$ から $p = 10$ の間で傾きが徐々に変化し、 $p < 0.6$ では低損失媒質の性質を、 $p > 10$ では導電媒質の性質を示す。このことから、前節で説明した疑似スケール則を利用するためには、媒質の損失正接 $\tan\delta$ が 10 よりも大きいことが目安になる。

損失媒質の波長 λ は

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\mu\epsilon}} \frac{1}{f(p)} \quad (16)$$

と与えられ、低損失媒質では

$$\lambda \approx \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (17)$$

となり、導電媒質では

$$\lambda \approx \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\frac{2}{p}} = 2\pi \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (18)$$

となる。よく知られたことであるが、これから、自由空間あるいは低損失媒質では、波長は周波数に反比例するが、導電媒質では、もし透磁率 μ および導電率 σ が周波数によらず一定であるならば、波長は周波数の平方根に反比例することがわかる。具体的には、導電媒質では、周波数を 100 倍にすると、波長が 1/10 倍になる。例えば、30kHz の波長は 3MHz の波長の 10 倍であるという具合である。別の言い方をすれば、30kHz の伝搬特性で要する距離範囲は 3MHz ではその 1/10 となる。図 6 に、 p と $1/f(p)$ の関係を示す。同図には、低損失媒質および導電媒質条件を適用した場合の近似曲線を併せて示す。1/f(p) は、 $p = 0.6$ から $p = 10$ の間で傾きが徐々に変化し、 p が 10 より大きくなると、 $\sqrt{2/p}$ に近づく。

1 波長あたりの減衰量は

$$\alpha\lambda = \alpha \frac{2\pi}{\beta} = 2\pi \frac{g(p)}{f(p)} \quad (19)$$

と与えられ、低損失媒質では

$$\alpha\lambda \approx 2\pi \frac{p}{2} = \pi p \quad (20)$$

となり、導電媒質では

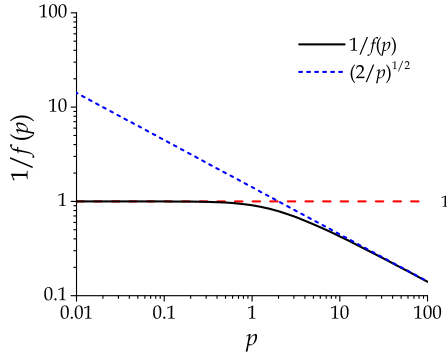


図6 $1/f(p)$ の p 依存性

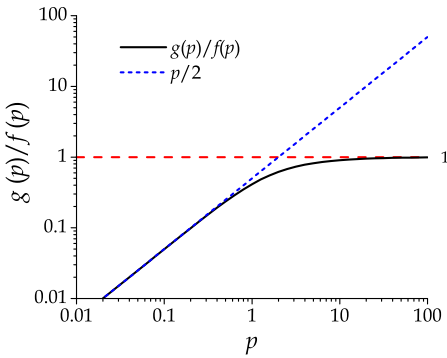


図7 $g(p)/f(p)$ の p 依存性

$$\alpha\lambda \approx 2\pi \frac{\sqrt{p/2}}{\sqrt{p/2}} = 2\pi \quad (21)$$

となる。1 波長あたりの減衰量は、低損失媒質では、媒質の損失正接 $\tan\delta$ に比例するが、導電媒質では、媒質の定数や周波数に関係なく、一定の値 2π (54.57dB) となる。これから、損失媒質における距離 r あたりの減衰量 αr は

$$\alpha r = (\alpha\lambda) \frac{r}{\lambda} \approx 2\pi \frac{r}{\lambda} \quad (22)$$

と与えられ、波長で正規化された距離 r/λ に比例し、その比例係数は 2π である。図 7 に p と $g(p)/f(p)$ の関係を示す。同図には、低損失媒質および導電媒質条件を適用した場合の近似曲線を併せて示す。 $g(p)/f(p)$ は、 $p = 0.6$ から $p = 10$ の間で傾きが徐々に変化し、 p が 10 より大きくなると、1 に収束する。

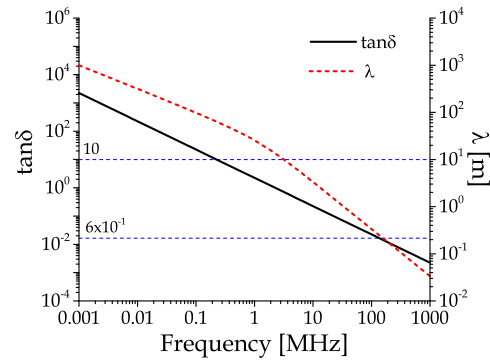
具体的に、典型的な淡水中および海水中の電気特性の周波数依存性の例を示しておく。淡水は、比誘電率 $\epsilon'_r = 80$ および導電率 $\sigma = 10^{-2}$ S/m を仮定し、海水は、比誘電率 $\epsilon'_r = 80$ および導電率 $\sigma = 4$ S/m を仮定する。表 1 および図 8 に、淡水の電気特性、すなわち、損失正接 $\tan\delta$ 、減衰定数 α 、位相定数 β ならびに波長 λ の周波数依存性を示す。表 2 および図 9 に、海水の電気特性、すなわち、損失正接 $\tan\delta$ 、減衰定数 α 、位相定数 β ならびに波長 λ の周波数依存性を示す。図 8 により、淡水の場合、225kHz を境に波長 λ 、減衰定数 α の曲線の傾きが変わる。図 9 により、海水の場合、9MHz を境に波長 λ 、減衰定数 α の曲線の傾きが変わる。これらの周波数より低い周波数

表 1 淡水の電気特性の周波数依存性 ($\epsilon'_r = 80, \sigma = 10^{-2}$ S/m)

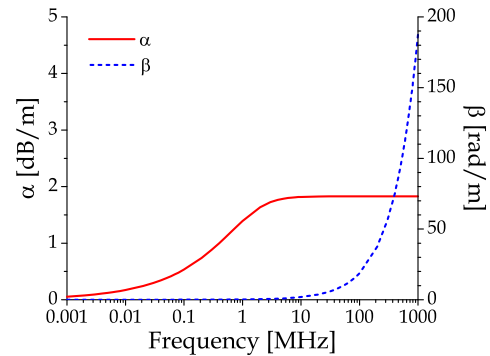
f [Hz]	p	α [dB/m]	β [rad/m]	λ [m]
3k	7.5×10^2	0.09	0.0109	577
10k	2.2×10^2	0.17	0.0199	316
30k	75	0.30	0.0346	181
100k	22	0.53	0.0642	97.8
300k	7.5	0.88	0.116	54.0
1M	2.2	1.4	0.247	25.5
3M	0.75	1.7	0.596	10.5
10M	0.22	1.8	1.89	3.33

表 2 海水の電気特性の周波数依存性 ($\epsilon'_r = 80, \sigma = 4$ S/m)

f [Hz]	p	α [dB/m]	β [rad/m]	λ [m]
3k	3.0×10^5	1.9	0.218	28.9
10k	9.0×10^4	3.5	0.397	15.8
30k	3.0×10^4	6.0	0.688	9.13
100k	9.0×10^3	10.9	1.26	5.00
300k	3.0×10^3	18.9	2.18	2.89
1M	90	34.5	3.98	1.58
3M	30	59.7	6.87	0.911
10M	9	108.5	12.6	0.497



(a) 損失正接 $\tan\delta$ 、波長 λ の周波数特性



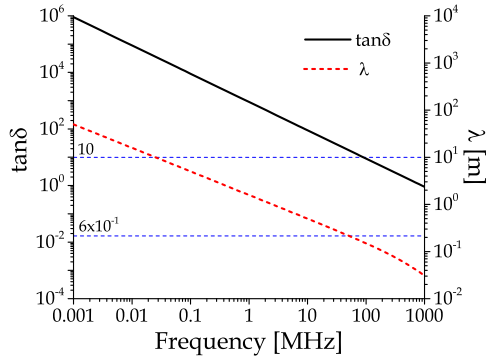
(b) 減衰定数 α 、位相定数 β の周波数特性

図 8 淡水の電気特性の周波数依存性 ($\epsilon'_r = 80, \sigma = 10^{-2}$ S/m)

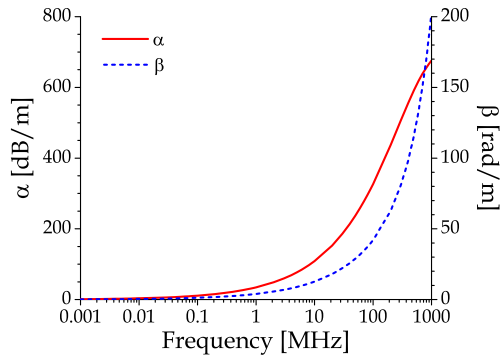
では、 $\tan\delta > 10$ となり、導電媒質に対応する。

4. 導電媒質内における疑似スケール則の一般化

電磁界のスケールモデルとして、長さ l を $l' = l/n$ と縮小す



(a) 損失正接 $\tan \delta$, 波長 λ の周波数特性



(b) 減衰定数 α , 位相定数 β の周波数特性

図9 海水の電気特性の周波数依存性 ($\epsilon_r = 80, \sigma = 4 \text{ S/m}$)

る場合、 $\omega' = n\omega, \sigma' = n\sigma, \epsilon' = \epsilon, \mu' = \mu$ と設定すればよいことが知られている [10]。ここで、長さを $1/n$ 倍した量をプライム' を付けて表した。しかしながら、このスケールモデルでは、長さを $1/n$ 倍した際に導電率が n 倍する必要があり、3. で議論したように、周波数によらず導電率が一定である場合に対応していない。

導電媒質内では、 $\sigma \gg \omega\epsilon$ の条件より、マクスウェルの回転方程式は

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (23)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma\mathbf{E} \quad (24)$$

と近似できる。長さ l を $l' = l/n$ に縮小するとき、導電率 σ および透磁率 μ が不変であるとして、 $\nabla' = n\nabla$ の関係により

$$\mathbf{E}' = n\mathbf{E} \quad (25)$$

$$\omega' = n^2\omega \quad (26)$$

という疑似スケール則が得られる。このとき、減衰定数および位相定数に関する疑似スケール則は

$$\alpha' = \sqrt{\frac{\omega'\mu\sigma}{2}} = n\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = n\alpha \quad (27)$$

$$\beta' = \sqrt{\frac{\omega'\mu\sigma}{2}} = n\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = n\beta \quad (28)$$

となり、波長および1波長あたりの減衰量に関しては

$$\lambda' = \frac{2\pi}{\beta'} = \frac{2\pi}{n\beta} = \frac{\lambda}{n} \quad (29)$$

$$\alpha'\lambda' = (n\alpha)\frac{\lambda}{n} = \alpha\lambda \quad (30)$$

となる。すなわち、波長は長さと同じスケール則に従い、1波長あたりの減衰量は不変量となる。このように、3. で議論したように、導電媒質において周波数を100倍にすると波長が1/10倍となることが確認できる。

5. まとめ

本報告では、まず電氣的あるいは磁氣的微小ダイポールアンテナの電磁界の式の中の距離特性 γr に着目し、疑似スケール則を類推した。続いて、海水中における電氣的微小ダイポールによる電磁界距離特性に関する計算例を示し、微小ダイポールに関する疑似スケール則の性質、すなわち、距離を媒質中の波長で正規化することにより、距離特性が相似となることを確認した。また、疑似スケール則を適用するための条件、すなわち、媒質の $\tan \delta$ に着目した導電媒質の条件を確認し、波長および1波長あたりの減衰量について検討した。最後に、微小ダイポールにかかわらず、導電媒質内において疑似スケール則が成り立つことを確認した。

今後、本報告で確認した疑似スケール則を利用し、実験室内の水槽において海水内の電磁界距離特性の測定を行い、実スケールでの海水内の電磁界距離特性との比較を行う予定である。

文 献

- [1] J. R. Wait, "Electromagnetic fields of sources in lossy media," in R. E. Collin and F. J. Zucker eds., *Antenna Theory part 2*, Chapter 24, pp.438-514, McGraw-Hill, 1969.
- [2] R. K. Moore, "Radio communication in the sea," *IEEE Spectrum*, vol. 4, no. 11, pp. 42-51, Nov. 1967.
- [3] M. Siegel and R. King, "Electromagnetic propagation between antennas submerged in the ocean," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 21, no. 4, pp. 507-513, Jul. 1973.
- [4] R. W. P. King and Glenn Smith, *Antennas in Matter, Fundamentals, Theory, and Applications*, The MIT Press, 1981.
- [5] A. I. Al-Shamma'a, A. Shaw and S. Saman, "Propagation of electromagnetic waves at MHz frequencies through seawater," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 11, pp. 2843-2849, Nov. 2004.
- [6] J. Lucas and CK Yip, "A Determination of the propagation of electromagnetic waves through seawater," *International Journal of the Society for Underwater Technology*, vol. 27, no. 1, pp. 1-9, 2007.
- [7] C. Uribe and W. Grote, "Radio Communication Model for Underwater WSN," 2009 3rd International Conference on New Technologies, Mobility and Security, Cairo, 2009, pp. 1-5.
- [8] H. Yoshida, "Underwater electromagnetics and its application to unmanned underwater platforms," 2013 IEEE International Underwater Technology Symposium (UT), March 2013.
- [9] 陳強, 高橋 応明, 石井 望, "電波の海中応用へのアプローチ — 振幅減衰を利用した測位システムに向けて —," *信学技報*, AP2016-92, pp.25-28, つくば, Sep. 2016.
- [10] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design, Fourth Edition*, John Wiley & Sons, 2016.