

海中無線通信用アンテナと伝搬モデルに関する研究

藤井 直道[†] 佐藤 弘康[†] 陳 強[†] 石井 望^{††} 高橋 応明^{†††}
吉田 弘^{††††} 菅 良太郎^{††††}

[†] 東北大学 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

^{††} 新潟大学

^{†††} 千葉大学

^{††††} 海洋研究開発機構

E-mail: †{fujii-n,sahiro,chenq}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 海中無線通信を行う海中アンテナには低周波でインピーダンス整合が取りやすいことや内部損失が少ないこと、伝送効率が良いことが求められる。本報告では3種類の海中アンテナについてそれらの特性をFDTD(Finite Difference Time Domain)法によって計算し、どのアンテナが海中での使用に適しているのかを明らかにする。また、海水中に浅く沈められたダイポールアンテナからの放射電磁界の近似式を示し、シミュレーションや実験結果と比較してその妥当性を確かめる。

キーワード 海中通信, ダイポールアンテナ, ループアンテナ

A Study of Antennas for Wireless Communication and Propagation Model in Seawater

Naomichi FUJII[†], Hiroyasu SATO[†], Qiang CHEN[†], Nozomu ISHII^{††}, Masaharu TAKAHASHI^{†††},
Hiroshi YOSHIDA^{††††}, and Ryotaro SUGA^{††††}

[†] Tohoku University Aoba 6-6-05, Aramaki, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

^{††} Niigata University

^{†††} Chiba University

^{††††} Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

E-mail: †{fujii-n,sahiro,chenq}@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract For antennas for underwater wireless communication, easy of impedance matching at low frequency, less internal loss and good transmission efficiency are required. In this report, what kind of antenna is suitable for seawater use will be clarified through FDTD simulations. Moreover, the approximation of radiated field from a shallowly submerged antenna in seawater will be shown. The validity of approximation will be tested by comparing with the result of the simulation and the experiment.

Key words Underwater communication, Dipole antenna, Loop antenna

1. ま え が き

海中無線通信の方式としては現在、主に音波が用いられている。これは海水中での音波の減衰が電波や光と比べて小さく、遠距離通信が可能であるためである。しかしながら音波は海水中の物体や海面、海底などによってよく反射される性質があり、マルチパスフェージングの影響を強く受けてしまう問題がある。この問題は浅い海や浮遊物や障害物の多くある環境で顕著にな

ると考えられ、このような状況で安定して海中通信を行える手段が望まれている。そこで電波や光を用いた海中通信についての研究が現在進められている。電波は海水の持つ4~6 S/mという導電率により極めて大きな損失を受ける。しかし音波と比べて高周波を利用できるため広帯域な通信が実現可能であり、伝搬速度も速いため遅延も少ない。また、電波は金属以外の物体を透過でき安定した海中通信を実現できる。それに加え、音波は海上と海中の直接通信が困難であるが、電波にはそれが実

現可能である。このような電波の性質は浮遊物の多い災害救助現場でのダイバーとの通信やセンサーネットワークの構築に役立つと期待されている他、流水の下に無人潜水機 (AUV) を送り込んで操縦をしたり現在位置の推定をすることも可能となると期待されている。

電波を用いた海中通信の研究としては過去に空気と海水の 2 層媒質中のアンテナからの放射電磁界が解析的に求められている [1]。また、同様の状況でアンテナ間の伝搬特性の測定が実施されている [2]。これらの研究では空気と海水の境界面を伝わるラテラル波の存在が示されている。ラテラル波は海水中を進む波と比べてはるかに低損失で遠くまで届くため、これを活用することで水平方向への通信距離を飛躍的に伸ばすことが可能である。また、近年ではループアンテナを用いて短波帯の伝搬実験を港で行った結果 [3] [4] や同じく短波帯の伝搬特性の測定を岸壁や外洋で測定した結果 [5] が報告されている。

さて、これらの先行研究で使用されたアンテナはダイポールアンテナやループアンテナなどまちまちで、果たしてどのようなアンテナが海中での使用に適しているのか結論付けられていない。また、Moore らの論文 [1] や Siegel らの論文 [2] では海水中のアンテナから放射された電波のうち、海中を進む波は完全に減衰してしまうものとして扱われているが、アンテナに十分近い範囲では海上を経由する波と海中を進む波の両方が届くと考えられる。海中アンテナの実使用環境としてはアンテナ近傍で通信が行われることも想定され、その場合にどの程度の信号強度になるのか事前に計算できる必要がある。

本報告ではまず海中アンテナに求められる特性について述べ、露出ダイポールアンテナ、シース付ダイポールアンテナ、ループアンテナの 3 種類の海中アンテナについてそれらのアンテナ単体の特性、アンテナ間の伝搬特性、整合回路の挿入損失など評価し、海水中での使用に適したアンテナを明らかにする。次に海水と空気との 2 層媒質中での伝搬問題に対し 3 波モデルに基づいた近似式を立て、その計算結果をシミュレーションおよび伝搬実験の結果と比較してモデルの妥当性を示す。

2. 海中アンテナの基本特性と整合回路

2.1 海水中の電波の性質

電気的に海水は比誘電率 ϵ_r が約 70、導電率 σ が約 5 S/m という高損失性媒質である [6]。このような媒質中に入射した電波は波長が短縮されるとともに指数関数的な減衰を受ける。

仮に海水が $\epsilon_r = 70$ 、 $\sigma = 5$ S/m であるとする 1 GHz 以下では海水中の電波の実効波長 λ_g と伝搬損失 α_p について以下の近似が成り立つ。

$$\lambda_g \approx 1.41 \times 10^3 \div \sqrt{f} \text{ [m]} \quad (1)$$

$$\alpha_p \approx 3.86 \times 10^{-2} \times \sqrt{f} \text{ [dB/m]} \quad (2)$$

近似を使わず代表的な周波数で λ_g 、 α_p を計算した結果を表 1 に示すが、式 (1)、(2) の計算結果とはほぼ一致していることがわかる。実際にはアンテナから放射された電波は球面波となるため、指数関数的な減衰に加えて自由空間損失が存在するが式 (2) によって海水中の電波の減衰量を甘く見積もることができる。

表 1 主な周波数での伝搬損失 α_p 、実効波長 λ_g

周波数 f [Hz]	実効波長 λ_g [m]	伝搬損失 α_p [dB/m]
1 k	44.7	1.22
10 k	14.1	3.86
100 k	4.47	12.2
1 M	1.41	38.6
10 M	0.445	122

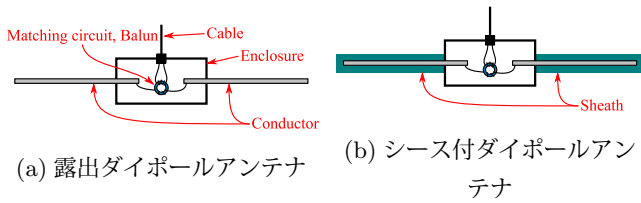
2.2 海中アンテナの基本

電波を用いた海中通信では帯域を確保しつつ通信距離を延ばすため周波数は 1 kHz から 100 kHz 程度が使用されることが見込まれる。この周波数帯の波長は海水中で 4.47 m から 44.7 m と短縮されるが、それでもこの長さのアンテナを海水中で運用することは取り回しが悪いため難しい。そのため海中アンテナのサイズは波長に対して短くせざるを得ず、アンテナの基本形は微小ダイポールアンテナや微小ループアンテナとなる。

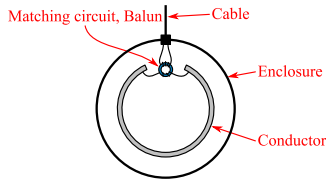
まず初めにダイポールアンテナを海中アンテナとして使用することを考える。陸上で使用するようなダイポールアンテナを海中にそのまま沈めるとアンテナへの入力電流は導電電流として海水にそのまま流れる。このように導体と海水が接触するダイポールアンテナを本報告では露出ダイポールアンテナと呼称する。露出ダイポールアンテナの構造を図 1(a) に示す。このアンテナはダイポールを構成する 2 本の導体棒が絶縁体の容器から伸びていて、容器の中に給電部と整合回路およびバランが内蔵されている。露出ダイポールアンテナは後述する 2 種類のアンテナより構造が簡単で電気特性も素直で扱いやすいという特徴がある。ただし導体が露出しているため実用上は耐食性のある素材を用いる必要がある。

次に腐食防止のため図 1(b) に示すようにダイポールアンテナを絶縁体で覆ったアンテナが考えられる [7]。本報告ではこの絶縁体の覆いのことをシースと呼び、アンテナをシース付ダイポールアンテナと呼称する。このアンテナはシースで覆われているため海水と容量結合して動作し、結合を強くするためにシースの厚みをできる限り薄く、誘電率を大きくすることが求められる。また、シースでの損失を抑えるためシースの材質には漏れ電流や誘電体損失が小さいことが求められる。もしシースが導電率を持ちアンテナ導体から海水へ導電電流が流れるような構造である場合、これはシース付ダイポールアンテナというよりむしろ露出ダイポールアンテナに近い動作機構となる。

最後にループアンテナを海中アンテナとして用いる場合を考える。もしループアンテナの導体を露出させたまま海水中に沈めると電流がループの途中から漏れてループとしての働きが弱くなってしまいうため、図 1(c) に示すようにアンテナ導体は絶縁体の容器で覆うことになる。本報告ではこのアンテナをシース付ループアンテナと呼称する。ループアンテナは磁界型アンテナであるためシースの厚みや誘電率の影響を受けづらい。ループアンテナから出た磁束は海水に渦電流を生じさせ、それによって他方と通信を行う。また、他のループアンテナが近接しているときにはアンテナ間で磁界結合が起き、効率の改善を期

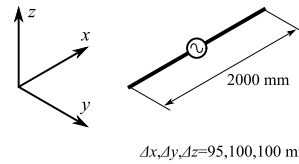


(a) 露出ダイポールアンテナ (b) シース付ダイポールアンテナ

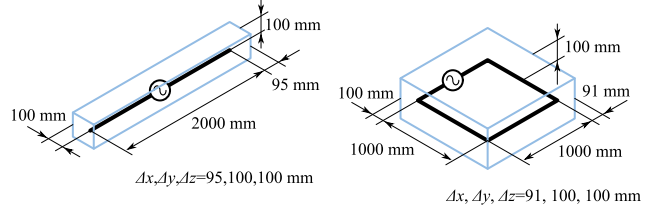


(c) ループアンテナ

図 1 海中アンテナの構造



(a) 露出ダイポールアンテナ



(b) シース付ダイポールアンテナ

(c) ループアンテナ

図 2 海中アンテナのシミュレーションモデル

待できる。

ここで示したように、基本的に海中アンテナは海水に電流を流し、流された電流を検知することで通信を行う。いかに無駄なく海水に電流を流して相手方に届けるかがアンテナとしての優劣を決めることになる。

2.3 入力インピーダンス

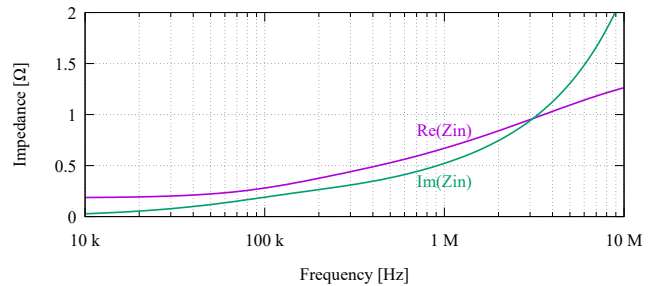
次に各アンテナの海中における入力インピーダンスを FDTD 法によって計算した結果について図 3 にそれぞれ示す。図 2 にそれぞれのアンテナのシミュレーションモデルを示す。アンテナの寸法は露出ダイポールアンテナおよびシース付ダイポールアンテナの長さについては 2 m とし、ループアンテナはモデルを簡単にするため一辺 1 m の正方形ループとした。海水の比誘電率は 70、導電率は 5 S/m とし、導体は完全導体 (PEC) である。シース付ダイポールアンテナとループアンテナのシース厚みはともに約 100 mm、導電率は 0 S/m だが、比誘電率はシース付ダイポールアンテナが 80、ループアンテナが 1 である。

図 3(a) の露出ダイポールダイポールの入力インピーダンスは海水の持つ導電性のために実部・虚部ともに 0. 数 Ω 程度の誘導性のインピーダンスとなった。

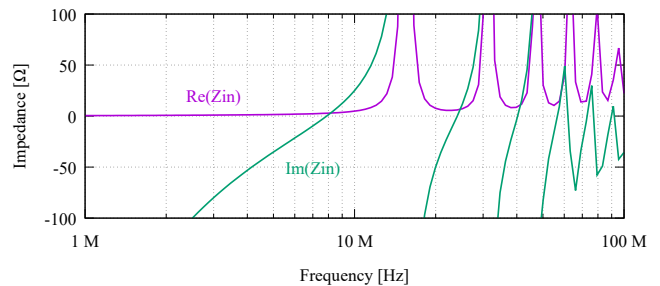
次にシース付ダイポールアンテナの入力インピーダンスは、導体がシースに覆われているため海中においても図 3(b) に示すように共振を確認できた。低周波ではシース付ダイポールアンテナの入力インピーダンスの実部は極めて小さく、それゆえグラフでは共振が見られる 1 MHz から 100 MHz の範囲を示した。比誘電率 80 のシース中で 2 m ダイポールアンテナが共振する周波数を計算すると約 8.4 MHz となるが、図より第一共振周波数は約 7.9 MHz であり波長短縮の効果を確認できた。シースをさらに薄くすると海水との容量結合が大きくなり共振周波数が下がると考えられる。

ループアンテナはシース中で微小ループアンテナと見なすことができ、図 3(c) に示すように入力インピーダンスは誘導性となった。

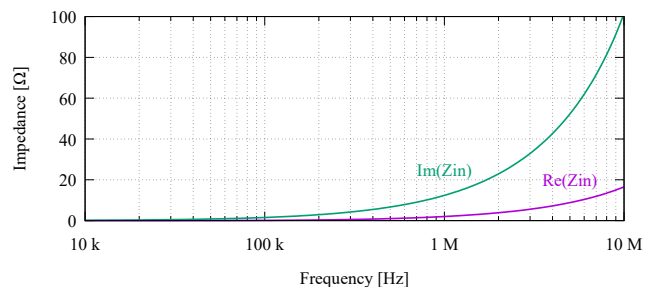
この計算結果よりいずれのアンテナも 50 Ω 系と直接接続することが難しいインピーダンスであることがわかる。そのため



(a) 露出ダイポールアンテナ



(b) シース付ダイポールアンテナ



(c) ループアンテナ

図 3 海中アンテナの入力インピーダンス

これらのアンテナは整合回路を介して送受信機と接続する必要がある。

2.4 伝送効率

本小節では 2 本のアンテナを海中で向い合せたときの伝送

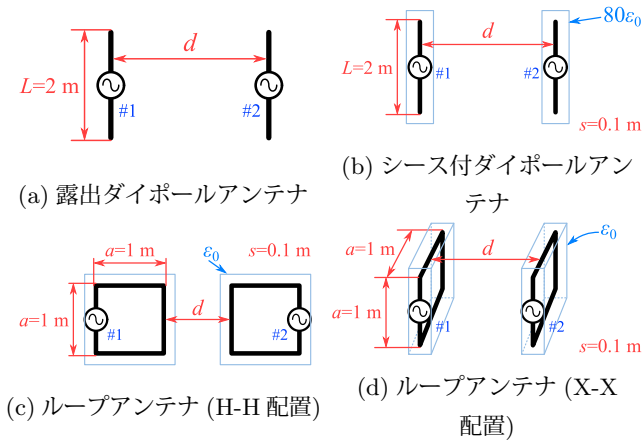


図 4 伝搬シミュレーションモデル

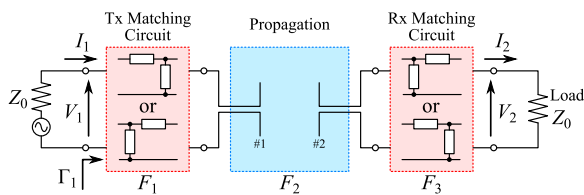


図 5 整合回路損失を含めた伝送効率の計算

効率の計算を行い、アンテナや向きを変えたときの効率の比較を行う。計算は図 4 に示す 4 つのアンテナ・偏波の組み合わせで行う。アンテナの詳細なモデルは前小節で用いた図 2 のモデルと同一である。また、伝送効率の計算の際には理想的な伝送効率に加え、現実的に達成しうる伝送効率でアンテナを比較するため図 5 に示すように送受信アンテナに有損失の整合回路をそれぞれ接続して整合回路損失を含めた伝送効率の計算を行う。

図 6 にアンテナ間距離 $d = 2$ m としたときの伝送効率の周波数特性の計算結果を示す。整合回路の損失は L 型整合回路を構成する各素子の Q 値という形で与えた。破線が $Q = \infty$ 、すなわち整合回路に損失が無い場合の理想的な伝送効率で、実線が $Q = 100$ の損失を与えたときの伝送効率である。

無損失の場合では低周波でループアンテナ、シース付ダイポールアンテナ、露出ダイポールアンテナの順に効率が良いという結果が得られた。しかし有損失の場合、ループアンテナとシース付ダイポールアンテナは整合回路に負荷がかかるため無損失の場合と比べて効率が大きく低下していることがわかる。特にシース付ダイポールアンテナの効率悪化が著しいが、ループアンテナはそれでも露出ダイポールアンテナより高効率を維持している。この結果から $Q = 100$ 程度の損失を与えてもループアンテナが最も効率が良いということがわかった。

3. 海中での電波伝搬

3.1 伝搬モデル

深度の浅い海中アンテナ間で通信を行うとき、主に図 7 に示す 3 つの経路で電波が伝搬する。1 つめがアンテナ間の海水中を最短距離で届く直接パス①で、2 つめが海面に達した波が海水表面を伝搬し再び海水中に戻るラテラルパス②、3 つめが海水

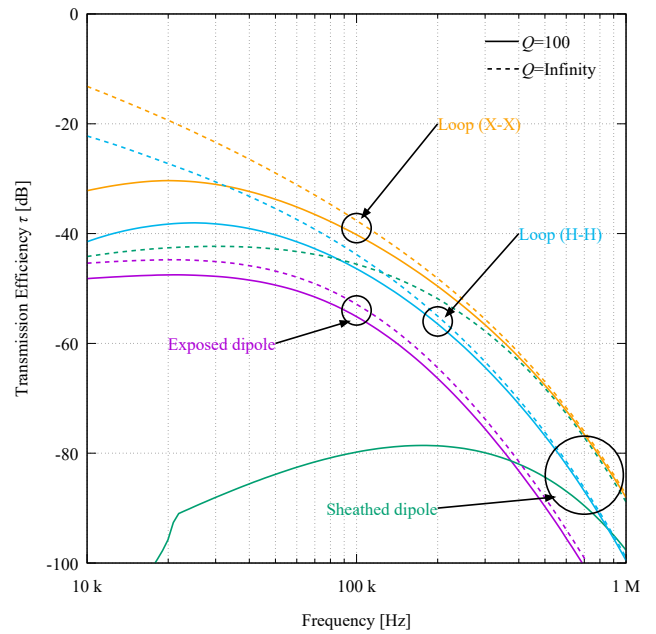


図 6 整合回路損失を含めた伝送効率 ($d = 2$ m)

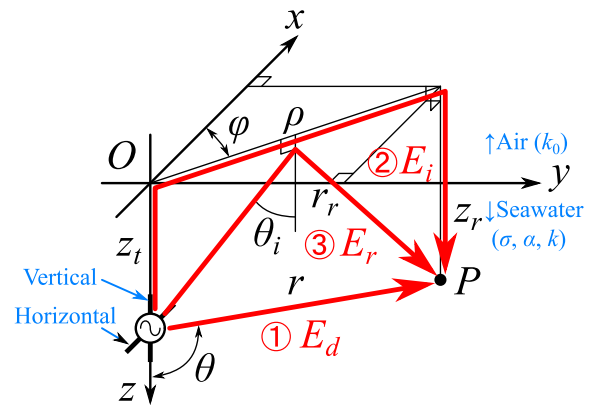


図 7 3 波モデル

面で全反射する反射パス③である。アンテナ間の水平距離が十分に遠いときラテラルパスの伝搬損失は直接パス、反射パスと比べて非常に小さいため Moore らによって示された近似式 [1] によって送信アンテナから受信アンテナに届く電磁界を計算できる。しかし海中通信はアンテナ間水平距離が近い領域で使用されることも考えられ、その場合は 3 つの経路を辿った波の合成波が受信アンテナに届く。

直接パスは均一媒質中の微小電気ダイポールの作る電界を計算することで求められる。ダイポールが海面に対して水平のとき、その放射電界は次式で計算できる。ここで、 I はダイポールに流れる電流、 l はダイポールの長さ、 $r = \sqrt{\rho^2 + (z_t - z_r)^2}$ はダイポールと受信点 P との直線距離である。

$$E_{dr}^{he} = \frac{I\ell}{2\pi\sigma} e^{-jkr} \left(\frac{jk}{r^2} + \frac{1}{r^3} \right) \sin\theta \cos\phi \quad (3)$$

$$E_{d\theta}^{he} = -\frac{I\ell}{4\pi\sigma} e^{-jkr} \left(-\frac{k^2}{r} + \frac{jk}{r^2} + \frac{1}{r^3} \right) \cos\theta \cos\phi \quad (4)$$

$$E_{d\phi}^{he} = \frac{I\ell}{4\pi\sigma} e^{-jkr} \left(-\frac{k^2}{r} + \frac{jk}{r^2} + \frac{1}{r^3} \right) \sin\phi \quad (5)$$

$$E_{d\rho}^{he} = E_{dr}^{he} \sin\theta + E_{d\theta}^{he} \cos\theta \quad (6)$$

$$E_{dz}^{he} = E_{dr}^{he} \cos\theta - E_{d\theta}^{he} \sin\theta \quad (7)$$

式 (3), (4), (5) はダイポールを中心とした極座標系における式で、それを円筒座標系に変換する式が式 (6), (7) である。同様にダイポールが垂直の場合についても計算すると

$$E_{dr}^{ve} = \frac{I\ell}{2\pi\sigma} e^{-jkr} \left(\frac{jk}{r^2} + \frac{1}{r^3} \right) \cos\theta \quad (8)$$

$$E_{d\theta}^{ve} = \frac{I\ell}{4\pi\sigma} e^{-jkr} \left(-\frac{k^2}{r} + \frac{jk}{r^2} + \frac{1}{r^3} \right) \sin\theta \quad (9)$$

$$E_{d\phi}^{ve} = 0$$

$$E_{d\rho}^{he} = E_{dr}^{he} \sin\theta + E_{d\theta}^{he} \cos\theta \quad (10)$$

$$E_{dz}^{he} = E_{dr}^{he} \cos\theta - E_{d\theta}^{he} \sin\theta \quad (11)$$

となる。

ラテラルパスは Moore らの近似式 [1] に海水中での位相変化を加えて以下の式で計算できる。 E_i^{he} が水平ダイポール, E_i^{ve} が垂直ダイポールの放射電界である。

$$E_{i\rho}^{he} \approx \frac{I\ell}{2\pi\sigma} e^{-jk(z_t+z_r)} \left(-\frac{k_0^2}{\rho} + \frac{jk_0}{\rho^2} + \frac{1}{\rho^3} \right) \cos\phi \quad (12)$$

$$E_{i\phi}^{he} \approx \frac{I\ell}{\pi\sigma} e^{-jk(z_t+z_r)} \left(\frac{jk_0}{\rho^2} + \frac{1}{\rho^3} \right) \sin\phi \quad (13)$$

$$E_{iz}^{he} = 0$$

$$E_{i\rho}^{ve} \approx \frac{I\ell}{2\pi\sigma} \cdot \frac{k_0}{k} e^{-jk(z_t+z_r)} \left(-\frac{k_0^2}{\rho} + \frac{jk_0}{\rho^2} \right) \quad (14)$$

$$E_{i\phi}^{ve} = E_{iz}^{ve} = 0$$

反射パスは以下の式で計算できる。ここで $r_r = \sqrt{\rho^2 + (z_t + z_r)^2}$, $R_{TE} \approx e^{-j2\theta_i}$, $R_{TM} \approx -1$ である。

$$E_{ir\theta}^{he} = \frac{I\ell}{4\pi\sigma} e^{-jkr_r} \left(-\frac{k^2}{r_r} + \frac{jk}{r_r^2} + \frac{1}{r_r^3} \right) \cos\theta_i \cos\phi \quad (15)$$

$$E_{ir\phi}^{he} = \frac{I\ell}{4\pi\sigma} e^{-jkr_r} \left(-\frac{k^2}{r_r} + \frac{jk}{r_r^2} + \frac{1}{r_r^3} \right) \sin\phi \quad (16)$$

$$E_{r\rho}^{he} = R_{TM} E_{ir\theta}^{he} \cos\theta_i \quad (17)$$

$$E_{r\phi}^{he} = R_{TE} E_{ir\phi}^{he} \quad (18)$$

$$E_{rz}^{he} = -R_{TM} E_{ir\theta}^{he} \sin\theta_i \quad (19)$$

$$E_{ir\theta}^{ve} = \frac{I\ell}{4\pi\sigma} e^{-jkr_r} \left(-\frac{k^2}{r_r} + \frac{jk}{r_r^2} + \frac{1}{r_r^3} \right) \sin\theta_i \quad (20)$$

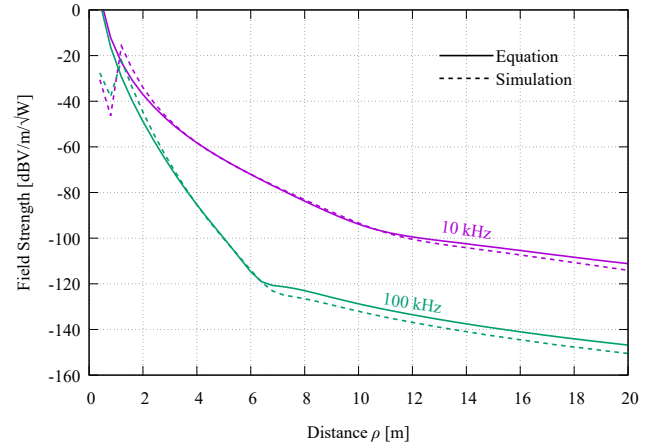
$$E_{r\rho}^{ve} = R_{TM} E_{ir\theta}^{ve} \cos\theta_i \quad (21)$$

$$E_{r\phi}^{ve} = 0$$

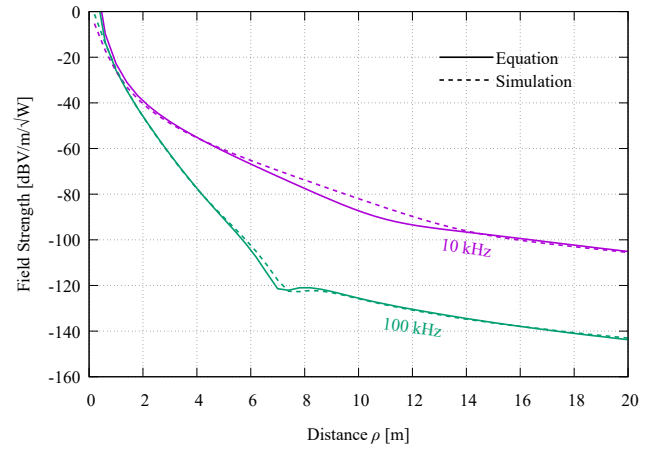
$$E_{rz}^{ve} = -R_{TM} E_{ir\theta}^{ve} \sin\theta_i \quad (22)$$

3.2 シミュレーション結果との比較

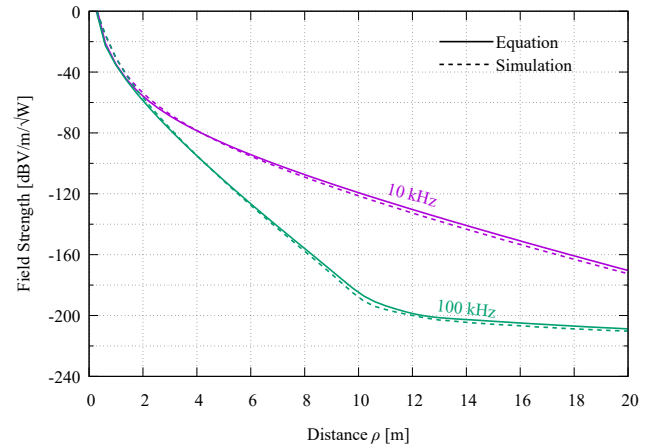
本小節では FDTD 法によるシミュレーション結果と前小節で示した 3 波モデルに基づいた近似式の計算結果を比較する。シミュレーションで使用するアンテナモデルは図 2(a) と同じ長さ 2m の露出ダイポールアンテナとする。



(a) 水平ダイポール (軸方向)



(b) 水平ダイポール (径方向)



(c) 垂直ダイポール

図 8 近似式とシミュレーションとの比較

始めに水平ダイポールの放射電界の比較する。ダイポールの深さ z_t と受信点 P の深さ z_r はともに 2 m とし 10 kHz と 100 kHz における軸方向および径方向への放射電界強度の計算結果を図 8(a)(b) に示す。図より近似式とシミュレーションの電界強度の距離特性がほぼ一致していることがわかる。また図 8(a) において 10 kHz では 11 m 地点, 100 kHz では 6 m 地点, 図 8(b) においては 10 kHz では 12 m 地点, 100 kHz では 7 m 地

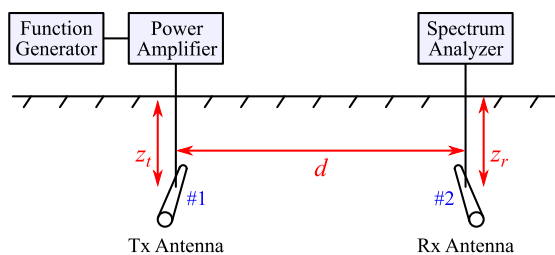


図 9 伝搬実験の測定系

点で曲線の傾きが急に変化しているのは直接パスとラテラルパスの電界強度の大小がこれら地点を境に入れ替わっているためである。

次に垂直ダイポールの放射電界の比較を行う。垂直ダイポールのラテラルパスは $\frac{k_0}{k}$ という係数のため水平ダイポールと比べて非常に弱い。そこでダイポールと受信点の深さをともに $z_t = z_r = 0.5 \text{ m}$ に引き上げて電界強度を計算した結果を図 8(c) に示す。曲線はよく一致しており、3 波モデルに基づく近似式で海中の微小ダイポールアンテナの放射電界が十分に計算可能であることがわかる。

3.3 測定結果との比較

最後に海水中で伝搬特性の測定を行い、その測定結果と近似式およびシミュレーションの計算結果との比較を行う。この伝搬実験では図 9 に示した測定系のように 2 本の露出ダイポールアンテナを海水中に沈め、アンテナ間距離 d を変えながら送信側アンテナに 10 W の信号を入力し、受信側アンテナの受信電力を測定することで伝搬特性の距離特性の測定を行った。岸壁の水深はおよそ 8 m で、海水の導電率は 5.49 S/m であった。どちらのアンテナも海水面から 2.8 m に沈め、アンテナの径方向を向い合せて測定を行った。

10 kHz における測定結果と近似式およびシミュレーション結果との比較を図 10 に示す。シミュレーションと近似式の計算結果は 2 m 地点において実験結果と一致するように正規化されている。グラフより近距離においては測定結果とシミュレーション結果、近似式の計算結果はよく一致しているが遠距離では測定結果と全く一致していないことがわかる。測定結果では遠距離において伝搬特性がほぼ変化しなくなったことからこの不一致は測定器やケーブルからの信号の漏れが原因だと考えられる。

4. むすび

本報告では海水中での使用に適したアンテナについて述べ、水中に沈めたダイポールアンテナからの放射電界の近似式について示した。

始めに 3 種類の海中アンテナの特性をシミュレーションによって求め比較したところ、ループアンテナは整合回路の損失を考慮しても他のダイポールアンテナと比べて伝送効率に優れており、整合も比較的容易であることから海中アンテナとしてはループアンテナが優れていると考えられる。

次に海面近くに沈めたアンテナからの放射電磁界を計算する

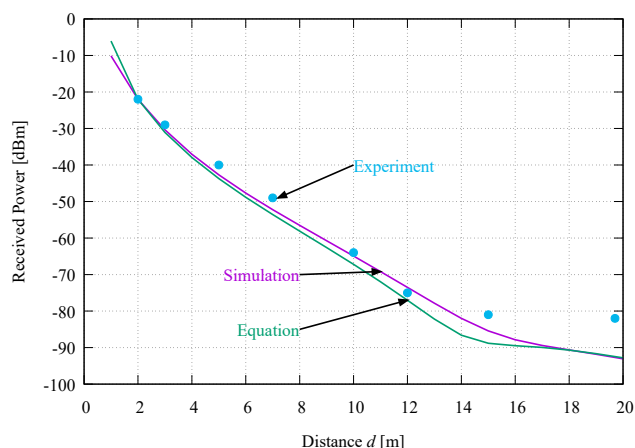


図 10 伝搬特性の比較

ために 3 波モデルに基づいて近似式を立てたところ近似式の計算結果はシミュレーション結果と一致し近似式の有効性が示された。また、伝搬実験を行ってその測定値との比較も行い、近距離では一致が確認された。

文 献

- [1] R.K. Moore and W. E. Blair, "Dipole Radiation in a Conducting Half Space," JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards - D. Radio Propagation, vol. 65D, no. 6, pp. 547-563, Nov.-Dec. 1961.
- [2] Marvin Siegel and Ronald W. P. King, "Electromagnetic Propagation Between Antennas Submerged in the Ocean," IEEE Transactions Antennas and Propagation, vol. AP-21, no. 4, pp. 507-513, July 1973.
- [3] A. Shaw, A. I. Al-Shamma'a, S. R. Wylie and D. Toal, "Experimental Investigations of Electromagnetic Wave Propagation in Seawater," 36th European Microwave Conference, pp. 572-575, Sept. 2006.
- [4] J. Lucas and C. K. 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, Feb. 2007.
- [5] Hiroshi Yoshida, "Underwater Electromagnetics and Its Application to Unmanned Underwater Platforms," Underwater Technology Symposium, pp. 1-5, 2013.
- [6] Recommendation ITU-R P.527-4, Electrical characteristics of the surface of the Earth, ITU, 2017.
- [7] C.K. Yip, A. Goudevenos and J. Lucas, "Antenna design for the propagation of EM waves in seawater," International Journal of the Society for Underwater Technology, vol. 28, no. 1, pp. 1120, Nov. 2008.