

海中の電波の伝搬損失の測定

藤井 直道, 佐藤 弘康, 陳 強 (東北大学大学院工学研究科),
石井 望 (新潟大学工学部福祉人間工学科),
高橋 応明 (千葉大学大学院工学研究科)

概要: 近年, 海中通信や海中のダイバーの位置推定に電波を利用することが検討されている. 海中通信に電波を利用する利点として, 音波に比べ雑音や多重反射が少ない点や, 光波に比べて水の濁りの影響を受けないこと, 送受信機を向かい合わせなくても通信できる点が挙げられる. 電波を用いて海水面近くで海中通信を行う場合, アンテナ間を最短距離で伝搬する直接波と海水面を経由するラテラル波の合成波が受信アンテナに到達する. 本報告では, 2つのダイポールアンテナを用いて海中での電波の伝搬損失を測定した結果と FDTD 法によるシミュレーションの結果を比較した結果を示す.

キーワード: ダイポールアンテナ, 海中通信, ラテラル波

1. まえがき

これまで海中通信にはもっぱら音波が用いられてきており, 電波は潜水艦通信などごく限られた用途にしか利用されていなかった. 海中において, 音波は電波や光波と比べて遠距離まで伝搬させることができるためである. しかし, 音波では海面や海中の物体でよく反射するため, フェージングが通信の品質を劣化させる場合がある. 加えて海中は波や生物の発する音, 船のエンジン音などが通信におけるノイズとなり, 通信障害の要因となる. また, 海中での音波の伝搬速度は約 1.5 km/s と低速であるため, 電波や光波と比べて通信遅延が大きい問題, および通信帯域を最大でも 100 kHz 程度しか確保できないため通信速度が遅いという問題もある.

海中通信に電波を利用する際に最も大きな問題となるのが, 海水の持つ $4 \sim 6 \text{ S/m}$ の高い導電率による伝搬損失である. この伝搬損失のため海中における電波は距離に対して指数関数的に減衰する. また, 通信帯域幅を確保するためにはできるだけ高い周波数帯の使用が望まれるが, 高周波を利用するほど高損失となるため帯域幅と通信距離にはトレードオフの関係が存在する. しかし送受信アンテナが海面から浅い位置にあるとき, 電波は海面を経由して低損失で伝わるということが知られており [1], ラテラル波と呼ばれている. 海中における電波伝搬の測定において, 直接波のみであれば理論的には計測器のダイナミックレンジを下回る測定限界以下のレベルまで信号が減衰してしまう遠距離にあっても, 測定限界を下回らないレベルの信号を観測できたことがいくつか報告されており [2][3], これらもラテラル波が存在していたためと考えられている. このように海表面を伝搬するラテラル波を利用すれば浅い海中の電波は水平方向に遠くまで届くようになる. これは, 通信用途にとっては一般的に有利に働くが, 海中における波源の位置を推定するためには電波の振幅と位相を正確に予測しなければならないため, ラテラル波を含む電波伝搬の性質を詳細に調査する

必要がある.

本報告では, 海中通信に用いる送受信ダイポールアンテナおよび整合回路を製作し, 2016年10月14日に海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 横須賀本部の岸壁において実施した海中通信実験の結果を報告する. 使用周波数として, $10, 30, 100 \text{ kHz}$ の3周波数の電波の伝搬特性を測定した. 送受信ダイポールアンテナが海面付近に置かれた場合について測定した結果, および実験環境をモデル化して FDTD 法で伝搬特性を求めた結果についても合わせて報告する.

2. 岸壁実験

2.1 アンテナと整合回路

実験に使用したダイポールアンテナを図1に示す. 製作したアンテナは2種類あり, 1つはアンテナ導体が蒸留水のシースに覆われたシース付ダイポールアンテナで, もう1つは線状導体の半分を海水に露出させた半露出型ダイポールアンテナである. アンテナ導体の長さはいずれも 2 m である. アンテナ導体だけの入力インピーダンスのシミュレーション値を図2, 図3にそれぞれ示す. シース付アンテナの入力インピーダンスは容量性の高インピーダンス, 半露出型アンテナは誘導性の低インピーダンスであった. これらのアンテナを 50Ω の特性インピーダンスを有する測定機器に整合するための整合回路がアンテナの給電部に内蔵されている. シース付アンテナの整合回路は狭帯域であるため, 測定に使用する $10, 30, 100 \text{ kHz}$ の3周波数に合わせた整合回路を内蔵したアンテナを2本ずつ合計6本用意した. 半露出型アンテナの整合回路は広帯域であり, 2本ですべての周波数を測定可能である.

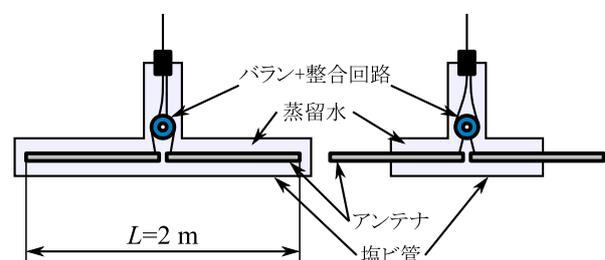


図1: 水中アンテナ (左:シース付, 右:半露出型)

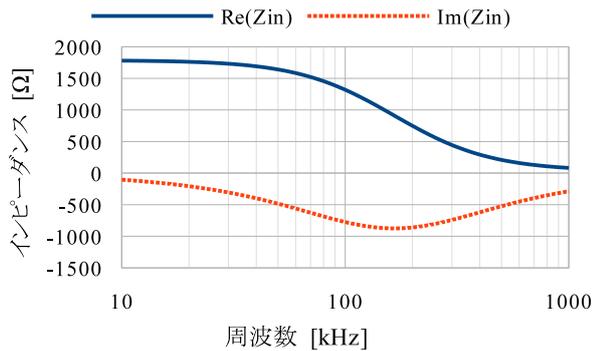


図 2: シース付アンテナの入力インピーダンス

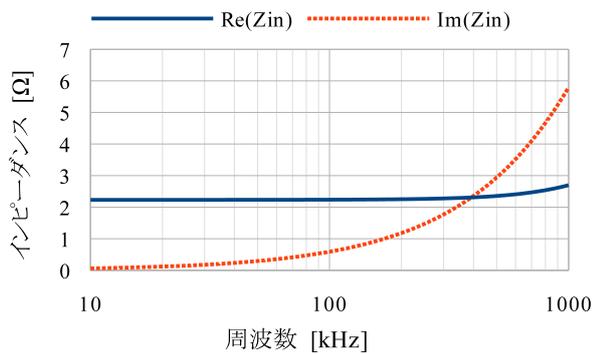


図 3: 半露出型アンテナの入力インピーダンス

2.2 岸壁での距離特性の測定

送受信アンテナ間の距離に対する受信電力の特性測定は JAMSTEC 横須賀本部の岸壁にて行った。CTD 計の測定結果によると実験開始時の海水温は 22.3 で塩分濃度は 37.6 ‰であった。このときの海水の導電率は式 (1) より $\sigma = 5.49 \text{ S/m}$ である [4]。

$$\sigma = 0.18C^{0.93} (1 + 0.02(T - 20)) \text{ [S/m]} \quad (1)$$

ここで C は塩分濃度 [%], T は温度 [] である。

図 4 に測定系を示す。ファンクションジェネレータ (FG) の出力をパワーアンプ (PA) で増幅し、送信アンテナ (#1) に 10 W を入射した。受信アンテナ (#2) で受信した信号をスペクトラムアナライザ (SA) で観測し受信電力を記録した。なお、送受信アンテナには同種類のものを用いる。一方のアンテナは岸壁に固定し、もう一方をフォークリフトのアームに固定して距離特性および深度特性を測定した。2 つのアンテナの方向は水平偏波と垂直偏波の 2 通りについて測定を行った。ここで、水平偏波とはダイポール素子の軸が海面に対して水平でかつ送受素子間の方向を向いていない状態で、垂直偏波とはダイポール素子の軸が海面に対して垂直でかつ天頂方向を向いた状態とする。

まず 100 kHz 用整合回路を内蔵したシース付アンテナを用いて測定を行ったところ、海中で送受信アンテナを密接させた状態でも信号を観測することができず、距離

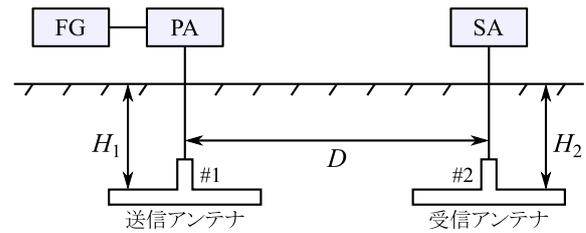


図 4: 距離特性の測定系

特性を測定することができなかった。そのため今回の測定結果はすべて半露出型アンテナによるものである。

水平偏波、および垂直偏波での測定値を図 5、図 6 にそれぞれ示す。水平偏波について測定したときのアンテナの給電部の深さは $H_1 = H_2 = 2.8 \text{ m}$ 、垂直偏波について測定したときは潮位が変動したため $H_1 = H_2 = 3.1 \text{ m}$ である。また、このときの背景雑音は約 -100 dBm であった。近距離においては両偏波で高周波ほど減衰が激しいという結果が得られており、これは誘電率と導電率から算出される減衰定数の値から予想される結果と一致する。遠距離においては近距離と比べて減衰が緩やかになるという、ラテラル波の影響と考えられる現象がすべてのケースで見られた。

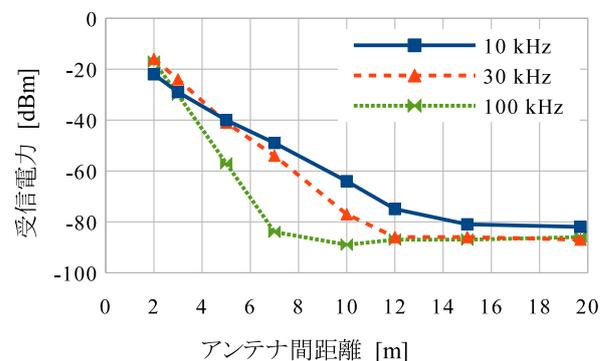


図 5: 距離特性の測定値 (水平偏波)

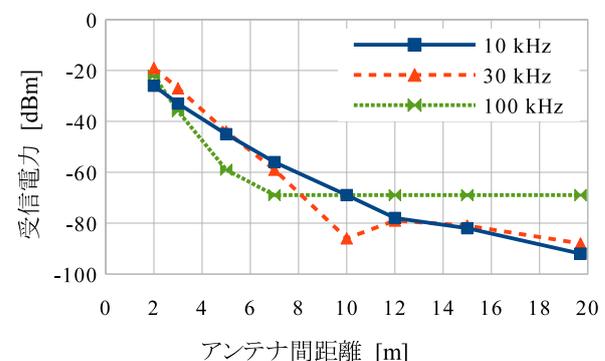


図 6: 距離特性の測定値 (垂直偏波)

3. シミュレーション

岸壁での実験結果を検証するため図7のモデルのFDTD法でのシミュレーションを行い、アンテナ間距離 D を変化させたときの透過係数 S_{21} を求めた。アンテナ給電部の深さは水平偏波の場合は $H_1 = H_2 = 2.8$ m, 垂直偏波の場合は $H_1 = H_2 = 3.0$ m, 海水の比誘電率は70, 導電率は実験時と同じ5.49 S/mとした[4]。

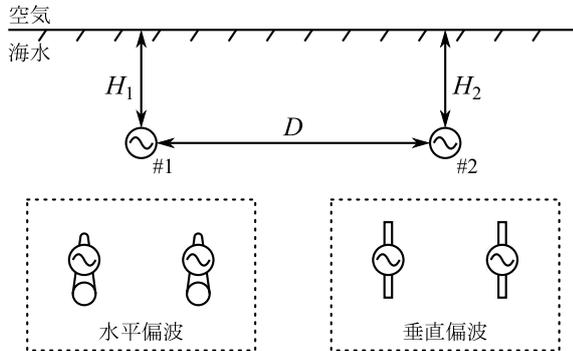


図7: シミュレーションモデル

シミュレーションの結果と実測値を比較したの結果を図8, 図9に示す。図8は水平偏波, 図9は垂直偏波の場合である。これらのグラフは2 m地点での受信電力と S_{21} がいずれも0 dBとなるように正規化している。この結果から, 近距離におけるグラフの傾きが実験とシミュレーションではほぼ一致していることがわかる。しかし, 水平偏波の場合は傾きが変化するまでの距離が実験とシミュレーションで一致せず, 垂直偏波の場合, ラテラル波の影響がシミュレーションでは確認されなかった。

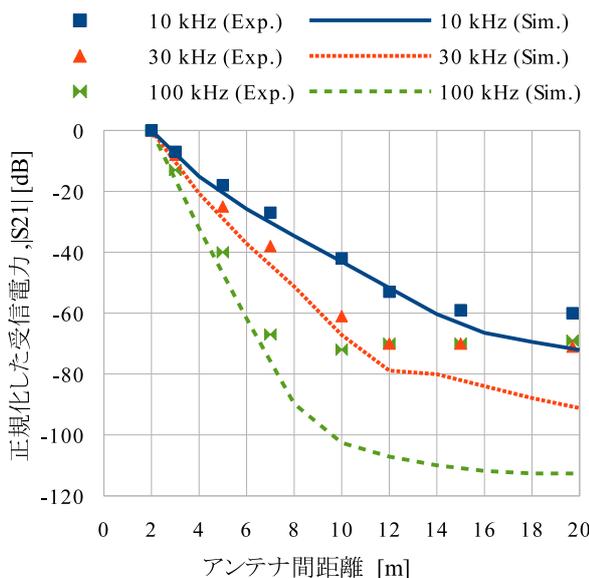


図8: 距離特性の解析値と測定値の比較 (水平偏波)

このシミュレーションモデルと実際の岸壁での実験の構造の違いは, 岸壁および海底の有無である。実験時の

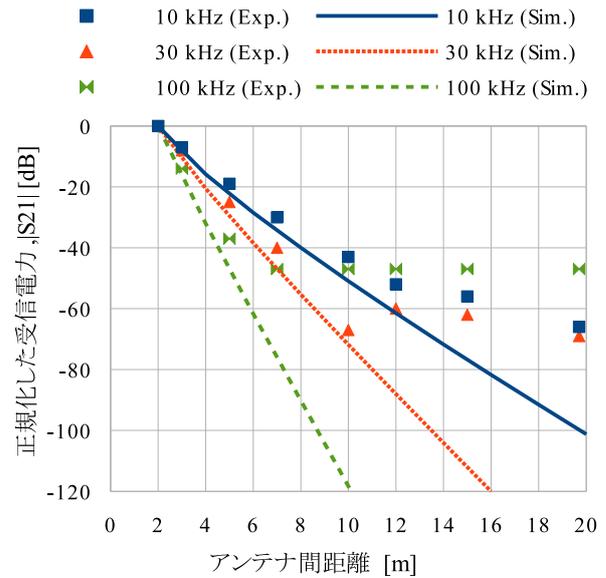


図9: 距離特性の解析値と測定値の比較 (垂直偏波)

アンテナと海底の距離はアンテナと岸壁の距離より大きいため, 岸壁だけをモデルに加えたシミュレーションを行い実験電得られた結果に近づくが検討した。岸壁のシミュレーションモデルは柵状の導体であり, 2つのアンテナの給電部から横に3 m離れた位置に設置されている。岸壁の有無によるシミュレーション結果の違いは図10に示す水平偏波の場合の100 kHzの伝搬特性にのみ現れ, 8 m以遠で $|S_{21}|$ がほぼ一定値となった。この伝搬特性は, 実験結果と大きさが異なるものの傾向が一致する。シミュレーションでこのような結果が得られた原因は, 岸壁が伝搬経路の一部となったためと考えられる。しかし, 水平偏波の10, 30 kHzと垂直偏波の場合の距離特性に変化はほとんど見られなかった。水平偏波の10, 30 kHzで岸壁の影響が見られなかったのは, 海中を直接伝搬するときの損失が岸壁を経由するときの損失より小さいためだと考えられる。また, 垂直偏波のシミュレーションで岸壁の影響が確認できなかったのは岸壁とアンテナが平行であるため岸壁が導電電流の経路とならないからだと考えられる。

これらのシミュレーションの結果より, 実験結果のグラフの傾きの変化にはラテラル波以外に岸壁など周囲の物体の存在が影響していたと考えられる。

4. むすび

本報告では海面付近で海中通信を行う場合の伝搬特性を岸壁で測定した結果とシミュレーション結果の比較を行った。アンテナ間の距離に対する受信電力を測定した結果, 一定距離離れたところで伝搬損失の傾きが変化した。この変化はラテラル波の影響が確認できたことを意味している。しかし, シミュレーション結果によるとラテラル波の影響は実験結果ほど小さくなく, アンテナの近くにある物体が伝搬特性に影響を与えていることがわ

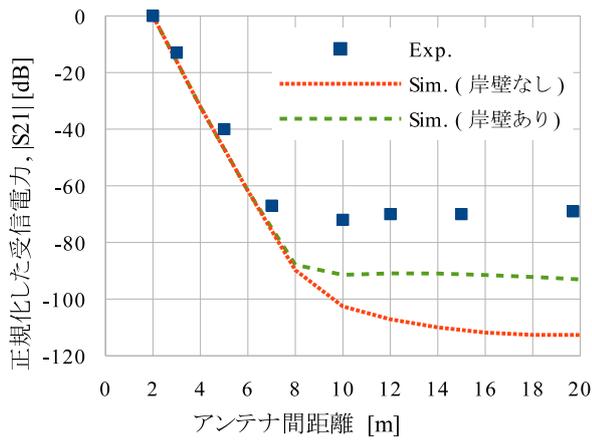


図 10: 岸壁モデルの有無による距離特性の比較 (100 kHz, 水平偏波)

かった .

参考文献

- [1] M. Siegel and R.W.P. King, Electromagnetic Propagation Between Antennas Submerged in the Ocean, IEEE Transactions Antennas and Propagation, vol.21, pp.507-513, 1973.
- [2] A. Shaw, A.I. Al-Shamma'a, S.R. Wylie and D. Toal, Experimental Investigations of Electromagnetic Wave Propagation in Seawater, European Microwave Conference, 2006.
- [3] Hiroshi Yoshida, Underwater electromagnetics and its application to unmanned underwater platforms, IEEE International UT, pp.1-5, 2013.
- [4] ITU, Electrical characteristics of the surface of the Earth, ITU-R P.527-3, pp.1-5, 1992.