

海中アンテナの偏波特性に関する実験的検討

佐藤 脩太郎^{†a)} 佐藤 弘康[†] 陳 強[†]

[†]東北大学大学院工学研究科通信工学専攻 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: a) shutaro.sato.p8@dc.tohoku.ac.jp

あらまし 海水のような高損失媒質における使用に適したアンテナの設計法を確立するために、ハーフシース型ダイポールアンテナおよびシース型ループアンテナが検討されている。海表面におけるダイバー間の通信を考えた場合、ダイバーの姿勢に応じて変化する偏波と受信電力の関係を明らかにする必要がある。本研究では、偏波に対する伝搬特性および受信電力特性について実験的に検討した結果を報告する。

キーワード 海中, シース, 偏波, ダイポールアンテナ, ループアンテナ

Experimental Study on Polarization Characteristics of Antennas for Seawater Use

Shutaro SATO^{†a)}, Hiroyasu SATO[†] and Qiang CHEN[†]

[†]Graduate School of Engineering, Tohoku University, 6-6-5 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Miyagi, 980-8579 Japan

E-mail: a) shutaro.sato.p8@dc.tohoku.ac.jp

Abstract A half-sheath dipole antenna and a sheath loop antenna have been investigated to establish a design method of antennas suitable for use in high-loss media such as seawater. It is required to clarify that the relationship between the polarization and the received power, which changes according to the diver's attitude. In this report, the results of experimental investigation on the propagation characteristics and received power with changing the polarization between transmitting and receiving antennas are presented.

Keywords Seawater, Sheath, Polarization, Dipole antenna, Loop antenna

1. まえがき

高損失媒質中におけるアンテナの設計法の確立を目的として海水のような高損失媒質における使用に適したアンテナの設計が望まれている。海表面におけるダイバー間の通信を考えた場合、ダイバーの姿勢に応じて変化する偏波と受信電力の関係を明らかにする必要がある。

筆者らはこれまでハーフシース型ダイポールアンテナを提案し[1], 送受アンテナ間の良好な受信電力特性が得られることを3次元電磁界解析および岸壁における伝搬実験により明らかにした。一方、海水のような電氣的損失媒質において、ダイポールアンテナとループアンテナのどちらが有効かについて明らかにすることが望まれる。

従来研究として、波長に対して微小なアンテナに関する理論解析が古くから行われている[2, 3]。しかしながら、受信アンテナにおける受信電力を求めること、送受アンテナ間の偏波関係が変化したときの伝搬特性、

および受信電力特性を得ることは容易ではない[4]。また、ラテラル波が主成分となる遠距離において、送受アンテナ間の偏波関係が受信電力に及ぼす影響を明らかにすることは、ダイバー間通信のみならず、AUVの走行方向と受信電力の関係、ダイバーシティアンテナの必要性を議論する上で意義が少なくないと思われる。

そこで本報告では、海面がある場合の電波伝搬において、アンテナ構造と偏波を変えたときの送受アンテナ間の受信電力を実験により評価した結果について示すとともに、考察を加えた結果を述べる。

2. 海中アンテナの構造と実験系

2.1 構造

ハーフシース型ダイポールアンテナ(Half sheath dipole antenna, HSDA)の構造を図1に示す。全長 $2L$ のダイポールアンテナの給電点を含む領域が、長さ L の円柱状誘電体シースで覆われている。誘電体シースは、純水(ϵ_{r1} , σ_1)を塩ビ(ϵ_{r2} , σ_2)に入れて両端をポリエチレンで封止した構造で構成されている。ダイポールアン

テナの入力インピーダンス及び送受アンテナ間の受信電力特性を実験的に評価するためには通常バランが必要となるが、広帯域にわたり高精度に評価するためにSパラメータ法を利用した。そのため、写真に示したようにダイポールを2ポートで給電している。このとき S_{dd21} は

$$S_{dd21} = \frac{1}{2}(S_{21} - S_{23} - S_{41} + S_{43}) \quad (1)$$

で表される。

シース型ループアンテナ (Sheath loop antenna, SLA) の構造を図2に示す。周長 $4L$ のシールドドループアンテナが、方形誘電体シースで覆われている。ダイポールアンテナと同様に誘電体シースは純水 (ϵ_{r1}, σ_1) をアクリルケース (ϵ_{r2}, σ_2) で封止した構造で構成されている。ループアンテナをアクリルケースの中央に固定するため、ポリプロピレン製の中空シート (写真中の黄色部分) を利用した。

図1に示したようにHSDAの全長は $2L=100$ mm としているが、この寸法は文献[1]で行った岸壁におけるkHz帯伝搬実験で用いた全長 $2L=2$ m の1/20スケールのモデルを想定しており、岸壁実験で使用した周波数100 kHzの400倍にあたる40 MHz帯において、水槽を使用して伝搬実験を行った[5]。

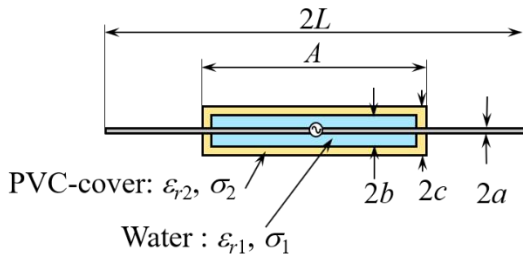


図1 ハーフシース型ダイポールアンテナの構造 ($2a=3$ mm, $2b=13$ mm, $2c=18$ mm, $2L=100$ mm, $A=60$ mm)

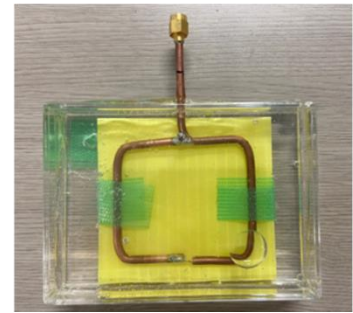
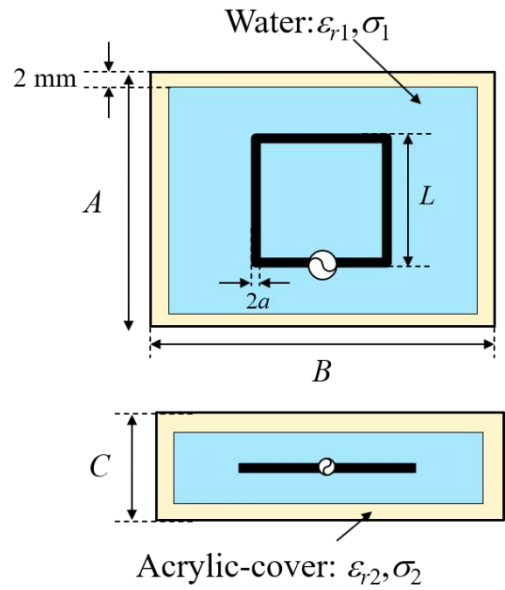


図2 シース型ループアンテナの構造 ($2a=3$ mm, $4L=200$ mm, $A=78$ mm, $B=108$ mm, $C=32$ mm)

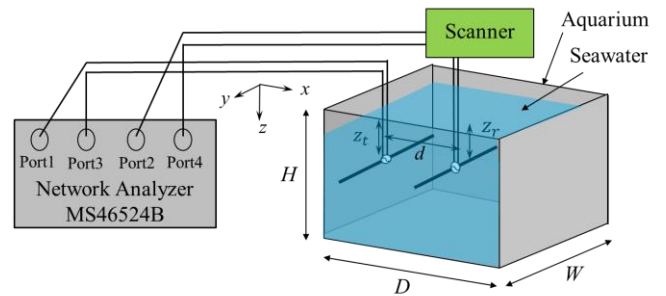


図3 伝搬実験の実験系

2.2 実験系

伝搬実験の実験系と写真を図 3 に示す．この図は S パラメータ法を使用する HSDA を送受アンテナとした場合の構成である．ベクトルネットワークアナライザ MS46524B のポート 1 およびポート 3 で給電されたアンテナを深さ z_t の海水中に固定し，ポート 2 およびポート 4 で給電されたアンテナは深さ z_r を維持し，スキャナーで x 方向に走査して S パラメータを測定した．ここで，素子間距離 d は各アンテナの給電点間の距離とする．水槽の内寸の寸法は，長さ，高さ及び幅がそれぞれ $(D, H, W)=(520, 305, 375)$ mm である．

送受アンテナの偏波を変えたときの伝搬特性について検討した．海面近傍に置かれた送受 HSDA の偏波関係を図 4 に示す．ダイポールが水平偏波でかつ送受アンテナの軸が平行な場合を H-H，アンテナの軸が直線上にある場合を O-O，ダイポールが垂直偏波の場合を V-V と定義する．この他，図に示したような H-O，V-O のケースについても検討した．偏波関係が O-O の場合の伝搬特性の測定では，水槽の長さ $D=520$ mm に制限があることにより給電点間距離が $(100 < d < 300)$ mm の範囲のみの走査とした．偏波関係が V-V の場合の伝搬特性の測定では，図 3 に示した水槽の 6 面ある海面のうち xz 面を海面とし， z 方向に深く沈め xy 面からのラテラル波成分を受信し難くする工夫をして測定した．当然ながら 6 面の海面がある本実験系では厳密にはどの面においてもラテラル波成分が発生してしまう問題があるが，定性的に議論がしやすくなるように，ある 1 つの面に送受アンテナが共に近くなる場合のみ評価した．

海面近傍に置かれた送受 SLA の偏波関係を図 5 に示す．ループの中心軸が直線上にある場合を H-H，中心軸が平行でかつ海面に平行な場合を O-O，中心軸が平行で海面に垂直な場合を V-V と定義する．この他，図に示したような H-O のケースについても検討した．偏波関係が O-O および V-V の場合の伝搬特性の測定についてはシースを構成するアクリルケースの幅 108 mm，高さ 78 mm が最小の素子間距離 d を決めるため，O-O は $120 < d < 300$ mm，V-V は $80 < d < 250$ mm の範囲でのみ測定した．また，V-V については $z_t=z_r=z_d=50$ mm のときにアンテナ導体が海面に達するため $z_d > 50$ mm について測定した．

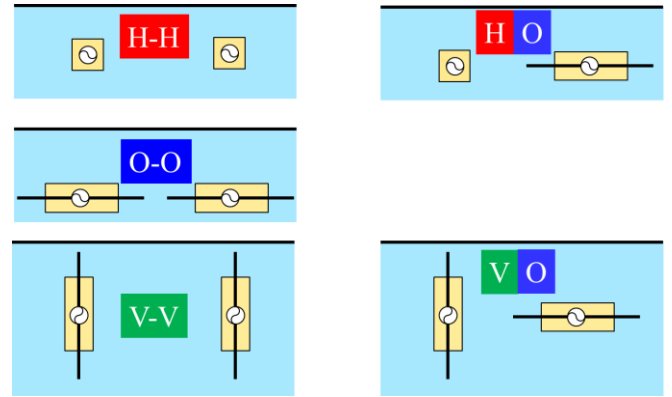


図 4 送受ハーフシース型ダイポールアンテナの偏波関係（海面は黒実線）

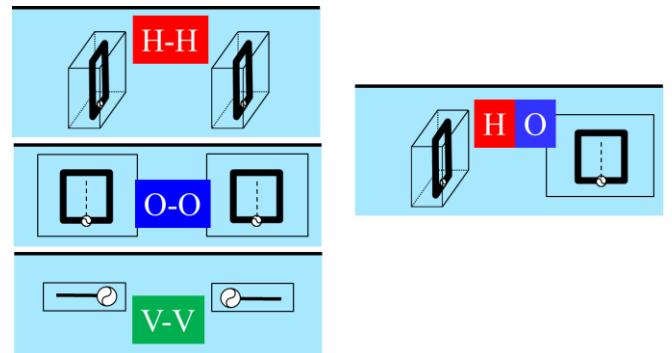


図 5 送受シース型ループアンテナの偏波関係

3. 偏波特性の実験結果

3.1 伝搬特性

HSDA の場合の $|S_{dd21}|$ の距離特性を図 6 に示す．H-H，V-V，O-O いずれの場合も d が増加すると減衰が緩やかになり，遠距離では減衰の傾きを維持したまま低い値にカーブがオフセットしている．これは，近距離では直接波，遠距離ではラテラル波が主成分となることを示している．以下 $d < 150$ mm を近距離， $d > 150$ mm を遠距離として結果を考察する．近距離における減衰の傾きは $O-O \gg V-V > H-H$ であった．O-O の場合， $d=100$ mm でアンテナ先端が接触することを考慮すると，近距離ではダイポール周囲の磁界による強い結合が生じて高い受信電力が得られるものの，距離が増加するにつれてこの結合が弱くなったものと考えられる．V-V $>$ H-H の結果については，近距離では直接波成分が支配的，すなわち減衰の傾きが等しくなるとの予測とは異なり，H-H の減衰がわずかに緩やかとなった．

SLA の場合の $|S_{21}|$ の距離特性を図 7 に示す．ダイポールの場合とは異なり，H-H のみ， d が増加すると減衰が緩やかになり，遠距離では減衰の傾きを維持したまま低い値にカーブがオフセットするとのラテラル波の寄与が観測された．V-V，O-O は d の測定範囲の都

合上ラテラル波への移行が観測されなかった．近距離における減衰の傾きに顕著な違いがみられず， $V-V > O-O > H-H$ となった．本実験では水槽サイズの都合上，長距離における $O-O$, $V-V$ のラテラル波領域の観測ができなかったが， $O-O$, $V-V$ はラテラル波が出難いため深さを変えた際の受信電力の変化が小さかったものと考えられる．

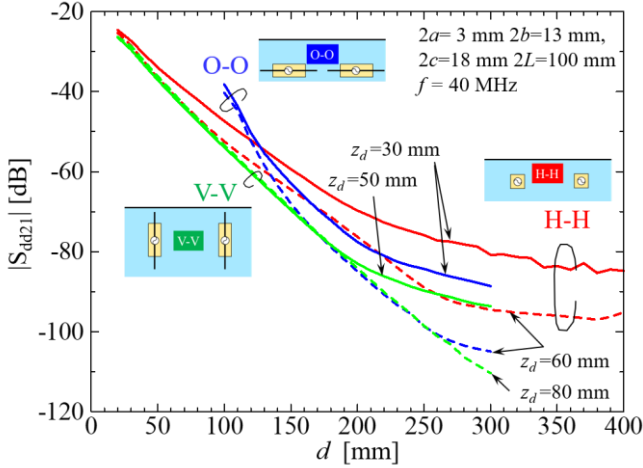


図6 $|S_{dd21}|$ の距離特性
(ハーフシース型ダイポールアンテナ)

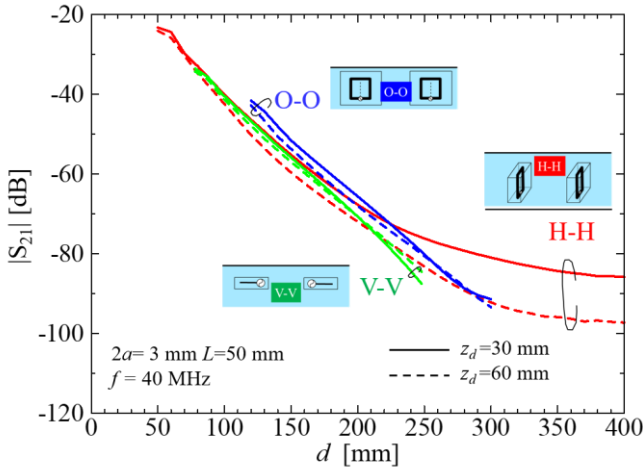


図7 $|S_{21}|$ の距離特性
(シース型ループアンテナ)

3.2 受信電力特性

次に各種偏波における受信電力について評価する．距離 d および深さ $z_d (=z_r = z_t)$ を変えたときの HSDA の S_{dd21} ，SLA の S_{21} について表1，表2にそれぞれ示す．偏波を変えたときの受信電力の変化を示すため，どちらも偏波が $H-H$ ， $d=100$ mm， $z_d=30$ mm における透過係数の値 -50 dB で規格化しており，それぞれ ΔS_{dd21} ， ΔS_{21} とした．まず表1，HSDA の $O-O$ ， $H-O$ について検討する． $d=100$ mm の近距離における $O-O$ は，深さ z_d によらず $H-H$ よりも $5 \sim 10$ dB 増加した．この距離の $O-O$ ではダイポールの先端が数 mm 隔てて近接しており，

強い磁界結合が現れた特別な場合と考えられる．浅い $z_d=30$ mm の場合， $d=300$ mm の長距離における $O-O$ は $H-H$ に対して 10 dB 低下しているが，深い $z_d=60$ mm 場合は同一の -45 dB に留まっている．ところが $H-O$ の場合は $d=200$ mm で 45 dB も減少し， $d=300$ mm では信号が観測できなかった．これらの結果から $O-O$ は，直接波主体の近距離では $H-H$ に劣るが，ラテラル波主体の距離では $H-H$ に劣らない．海面に対して平行な面内でダイバーが回転した場合を考えると， $H-O$ 構成のみ受信電力が大きく低下するものと考えられる．次に $V-V$ ， $V-O$ について検討する． $d=100$ mm の近距離における $V-V$ は，深さ z_d によらず $H-H$ と同程度の受信電力が得られたが，距離が $d=300$ mm の場合は $H-H$ よりも大幅に低下した．これは， V がラテラル波を励振しにくいとの Moore らによる理論的考察[2]と合致している．近距離ではラテラル波成分が小さいためダイバーが近距離で向かい合っている $V-V$ 構成は受信電力上問題がないものと考えられる．ところが，近距離 $d=100$ mm における $V-O$ は $H-H$ よりも受信電力が大幅に低下し，遠距離 $d=300$ mm での減少幅は $V-V$ より大きくなかった．以上のことから，ダイバーが海面に対して垂直な V 構成の場合は近距離で受信電力が大幅に低下するものの，ラテラル波を受信しやすい H 構成のダイバーとの遠距離通信は問題が少ないものと考えられる．

表2，SLA の場合について検討する． $d=100$ mm の近距離における $O-O$ は，深さ z_d によらず $H-H$ よりも $5 \sim 10$ dB 増加した．浅い $z_d=30$ mm の場合， $d=300$ mm の長距離における $O-O$ は $H-H$ に対して 15 dB 低下しているが，深い $z_d=60$ mm 場合は同一の -40 dB に留まっている．ところが $H-O$ の場合は $d=200$ mm で既に 40 dB も減少した．これらの結果から $O-O$ は，直接波主体の近距離では $H-H$ に優るが，ラテラル波主体の距離では $H-H$ に劣り， $H-O$ の構成になると大幅に低下してしまうと考えられる． $V-V$ についても近距離では $H-H$ よりも受信電力が高いが遠距離になるとラテラル波成分が弱く， $H-H$ より劣ると考えられる．以上の結果から，ダイバーが海面に対して水平に泳いでいる場合，ループの軸が海面に対して平行となるように，例えばベルトをループアンテナにするといった構成が良いと考えられる．

ダイバーが水平面内で回転した場合の偏波の変化を想定し， $H-H$ から $H-O$ に偏波を回転したときのパターン特性を測定した．これを図8に示す．近距離の $d=100$ mm の場合， $\theta=0, 180$ deg の $H-H$ 偏波において -50 dB 程度であった S_{21} が， $\theta=90$ deg の $H-O$ 偏波では大幅に減少した．減少幅は SLA の方が大きい，遠距離の $d=300$ mm の場合は両者とも同程度の -15 dB であった．

$\Delta S_{dd21}(\text{dB})$	$z_d=30 \text{ mm}$			$z_d=60 \text{ mm}$		
$d \text{ (mm)}$	100	200	300	100	200	300
H-H	0	-20	-30	0	-25	-45
H-O	-15	-45	/	-15	-45	/
O-O	5	-25	-40	10	-30	-45
	$z_d=50 \text{ mm}$			$z_d=70 \text{ mm}$		
V-V	-5	-35	-55	0	-25	-55
V-O	-20	-40	-50	-25	-35	-45

表 1 距離 d および深さ z_d を変えたときの S_{dd21}
(ハーフシース型ダイポールアンテナ)

$\Delta S_{21}(\text{dB})$	$z_d=30 \text{ mm}$			$z_d=60 \text{ mm}$		
$d \text{ (mm)}$	100	200	300	100	200	300
H-H	0	-20	-30	0	-20	-40
H-O	-10	-40	-60	-15	-40	-60
O-O	5	-15	-45	10	-20	-40
	$z_d=10 \text{ mm}$			$z_d=40 \text{ mm}$		
V-V	10	-20	-50	10	-20	-45

表 2 距離 d および深さ z_d を変えたときの S_{21}
(シース型ループアンテナ)

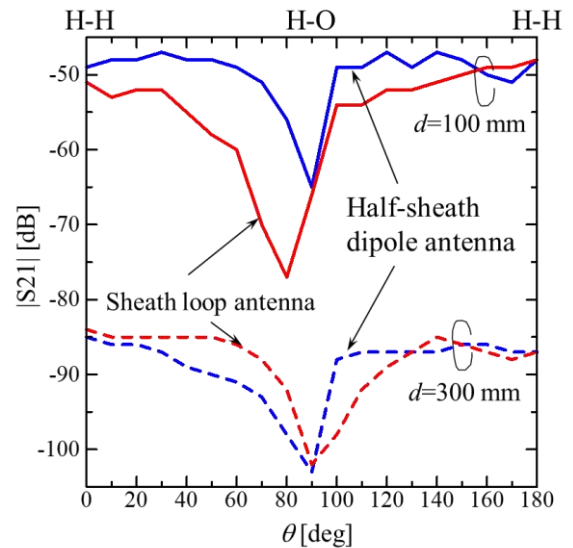
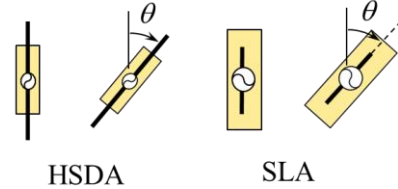
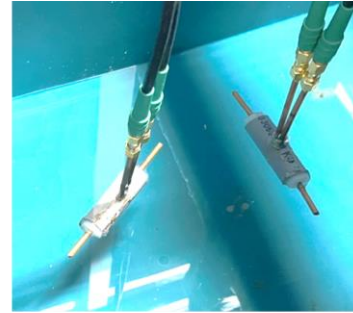


図 8 HH から HO に偏波を回転したときの
パターン特性

4. 結論

海中アンテナの偏波特性について実験的に検討した。海中アンテナとして、HSDA および SLA について評価した。その結果、伝搬特性に関する偏波依存性は HSDA が SLA よりも大きいものの、受信電力特性について両者の差は小さいことが明らかとなった。ラテラル波が主成分となる遠距離では、HSDA, SLA 共に H-H 偏波の受信電力が高いことが明らかとなった。この結果から、H-H 偏波がラテラル波成分を励振・受信しやすい構造であると考えられる。一方、近距離では HSDA, SLA 共に O-O の受信電力が大きくなることが明らかとなった。これは磁界結合が現れたものと考えられる。今後、水槽のサイズを大型化した場合の実験、微小ダイポール、微小ループにおける理論解析、3次元電磁界解析による検証を進める予定である。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 20K04496 の助成を受けて行われた。

文 献

- [1] H. Sato, N. Fujii, Q. Chen, N. Ishii, M. Takahashi, R. Suga, K. Uesaka and H. Yoshida, "Dipole Antenna With Sheath-Cover for Seawater Use," 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2017), 1376, pp.1-2, 30 Oct.- 2 Nov. 2017, Phuket, Thailand.
- [2] 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, November-December 1961.
- [3] R. King, "Theory of the terminated insulated antenna in a conducting medium," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 12, no. 3, pp. 305-318, May 1964.
- [4] S. Xu, H. Sato and Q. Chen, "Theoretical Analysis of Sheathed Dipole Antenna with PVC-cover for Seawater Use," ICETC, Nov. 2020.
- [5] 石井望, 高橋応明, 陳強, "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内電磁界," 信学技報, vol. 116, no. 345, AP2016-125, pp. 11-16, 2016年12月.