

疑似スケールモデルを利用した模擬海中における 微小ダイポールアンテナ間の位相分布測定

石井 望[†] 高橋 応明[‡] 加藤 涼介[‡] 陳 強^{††} 吉田 弘^{†††}

[†]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

^{†††}海洋研究開発機構 〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2 番地 15

E-mail: nishii@eng.niigata-u.ac.jp

あらまし 著者らは、海洋における電磁波応用の一つとして、電磁波を利用した海中における位置推定問題について取り上げている。海中では、高周波における電磁波の減衰が大きいいため、kHz 帯の周波数を用いた比較的近接距離での電磁波による通信の可能性について検討している。測定のダイナミックレンジの観点から、位相測定に比べて振幅測定が有利であり、海中および海面における振幅減衰に着目すべきである。著者らは、比較検討の意味で、海中位置推定問題に特化して、位相測定の可能性について検討を行った。本稿では、疑似スケールモデルを利用して実験的にその検証を行ったので報告する。

キーワード 海水、電磁界、疑似スケールモデル、位相、水槽、計測

Measurement of Phase Distribution between Small Dipole Antennas Immersed in Simulated Sea Water Using Pseudo Scale Model

Nozomu ISHII[†] Masaharu TAKAHASHI[‡] Ryusuke KATO[‡] Qiang CHEN^{††} Hiroshi YOSHIDA^{†††}

[†]Niigata University 8050 Ikarashi 2-nocho, Nishi-ku, Niigata, 950-2181 Japan

[‡]Chiba University 1-33 Yayoicho, Inage-ku, 263-8522 Japan

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

^{†††}Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, 237-0061 Japan

E-mail: nishii@eng.niigata-u.ac.jp

Abstract The authors deal with the problem of position estimation in the sea using electromagnetic waves as one of the applications of electromagnetic waves in the sea. The attenuation of electromagnetic waves at high frequencies is large in the sea, so we are investigating the possibility of communication by electromagnetic waves at relatively close distances using frequencies in the kHz band. From the viewpoint of measurement dynamic range, amplitude measurement is advantageous compared to phase measurement, and our attention should be paid to amplitude attenuation in the sea and at sea level. The authors examined the possibility of phase measurement, focusing on the problem of undersea location estimation, as a comparative study. In this paper, we report our experimental verification for the phase measurement using a pseudo-scale model.

Keywords Sea Water, Electromagnetic Field, Pseudo Scale Model, Phase Distribution, Water Container, Measurement

1. まえがき

著者らは、海中での電磁波応用例として、水難事故において海中を潜水するダイバーが発する電磁波を海面ブイで受信するという、海中位置センシング問題を検討している[1]-[5]。電子回路および通信技術の目覚ましい進歩により、半世紀前に諦めかけていた海中での電磁波利用が再び脚光を浴びている[6]-[8]。著者らも海中電磁波応用について検討を開始しており、その中で位置センシングは、海中電磁波の研究・開発に必

要となる要素技術を拾い上げるためのパイロット的な検討課題として位置づけている。周知のとおり、海水は電磁波にとって高損失媒質であり、海水中での電磁波によるやりとりは、導電率が総じて海水よりも小さい生体組織よりも厳しいと考えられる。このため、測定系のダイナミックレンジを考慮すると、振幅減衰に着目した位置センシングが有望視できると著者らは思考した[1]。また、振幅減衰に着目した位置推定については、カプセル内視鏡の生体内での位置検出を目的に

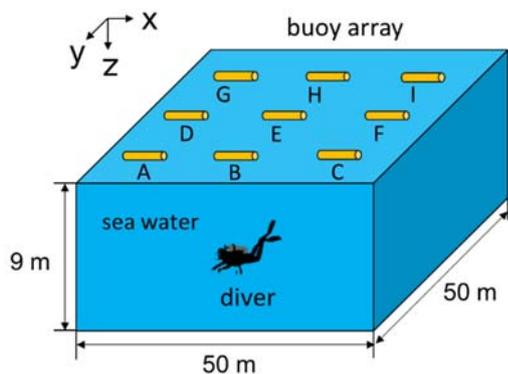


図1 位置推定システムのFDTD計算モデル
(オリジナルモデル) [4],[5]

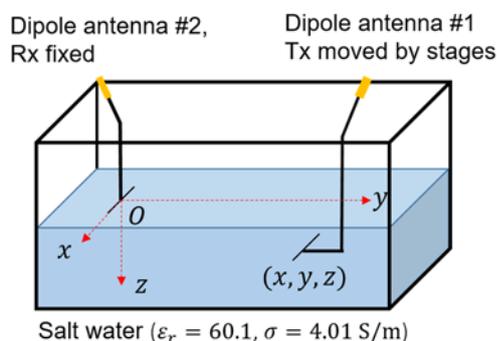


図2 疑似スケールモデル実験系[11]

検討されている[9]. 著者らはそのアルゴリズムの骨格は維持しつつも、海水と空気との境界で生じるラテラル波の影響を含めた、水深 10 m 以内の浅瀬でのダイバー位置検出システムの原理検証を FDTD 計算により実施している[3]-[5].

本稿では、著者らが提唱した疑似スケールモデル[10],[11]を利用して、海水と空気の二層問題におけるアンテナ間の伝送特性 S_{21} を実測した結果を示す. 振幅のみならず位相分布も同時に測定した結果により、海中位置推定において、振幅分布に比べて位相分布の利用が不向きである点について取りまとめる.

2. 疑似スケールモデルにおける振幅・位相分布の三次元計測

2.1. オリジナルモデルと疑似スケールモデル

図1に示すように、水深 10 m 以内のダイバーから発信される電磁波を海面に設置されたブイにより受信する場合を考える. 本稿では、位置推定の際に利用する微小ダイポールアンテナ間の伝送特性(電力強度、位相差)のみに着目する. なお、位置推定アルゴリズムの詳細は文献[4],[5]を参照されたい. 使用周波数は 10 kHz とし、ダイポールアンテナの長さは 2m とする.

海水の導電率は 4 S/m とする. 以降、この設定をオリジナルモデルと称する.

2.2. 疑似スケールモデル実験系[11]

スケールファクタを $n = 200$ とし、疑似スケールモデルを考える. 疑似海水の導電率は変わらず 4 S/m である. しかし、アンテナの長さは 10 mm となり、周波数は 400 MHz となる.

疑似スケールモデル実験系の概略を図2に示す. 図1のオリジナルモデルにおいて、ダイバーを送信アンテナに対応させ、ブイBを受信アンテナに対応させる. 疑似スケールモデル実験では、二つのバズーカバラ付ダイポールアンテナがネットワークアナライザの二つのポートに接続されている. バズーカ内の導体以外の媒質は空気であり、バラ長を 18.5mm としている. ダイポールアンテナはセミリジッドケーブルを介して 180° ハイブリッド結合器に接続されている.

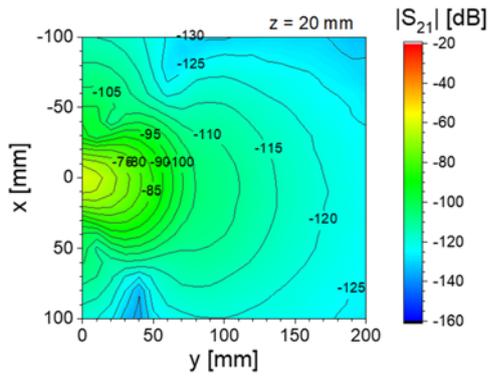
ダイポールアンテナ#1は三軸ステージにより海水模擬食塩水中を三次元的に走査できる. この可動ダイポールアンテナ#1により発した信号を液面直下の固定ダイポールアンテナ#2により受信する. 実験に使用した水槽は $900\text{mm} \times 450\text{mm} \times 450\text{mm}$ であり、その底面から 170 mm までを食塩水で満たした. 周波数 400 MHz において、食塩水の複素比誘電率の実部は 60.1 であり、導電率は 4.01 S/m であった (Speag DAK-12 にて測定).

2.3. 測定例

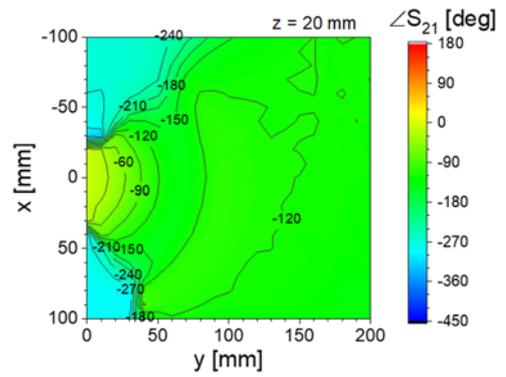
ダイポールアンテナ#2の深さ z を変化させながら、 $z = \text{一定}$ となる面における S_{21} の分布を測定した. ここで、ダイポールアンテナ#1, #2とも x 向きとし、周波数は 398 MHz とした. 図5は測定結果の一部であり、 $z = 20\text{ mm}, 40\text{ mm}$ 面内における S_{21} の振幅分布および位相分布である. ここで、ネットワークアナライザの参照面は 180° ハイブリッド結合器のディファレンシャルポートとしている. すなわち、振幅、位相とも 180° ハイブリッド結合器、セミリジッドケーブル等の影響を受けており、純粋なダイポールアンテナ間の S_{21} 分布ではないことに注意されたい.

振幅分布については、アンテナ設置のずれなどの影響により、完全という訳にはいかないが、信号発振器、プリアンプ、スペクトラムアナライザを利用する測定系で得られた結果[11]とほぼ同一の結果が得られている. すなわち、 $x = y = 0\text{ mm}$ のまわりでは直接波の寄与が優勢であり、急激な振幅レベル低下が観測されるが、あるレベルより小さくなると、徐々にレベルが小さくなっていく傾向に切り替わる. 後者は、海面まで垂直上昇し、その後、液面上(空気内)を進行し、再び海面から垂直沈降するラテラル波の寄与である.

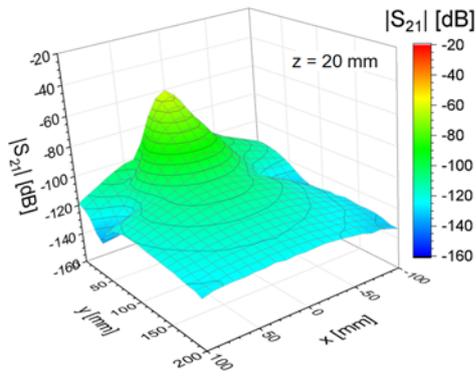
さて位相分布に転じると、まず $x = y = 0\text{ mm}$ よりホイヘンスの原理の如く、位相分布が拡大していく様子



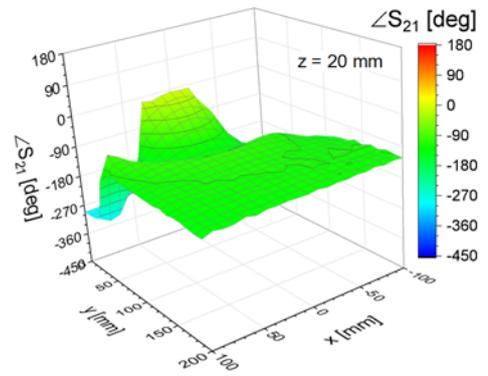
(a) 振幅分布 $z = 20$ mm (等高線図)



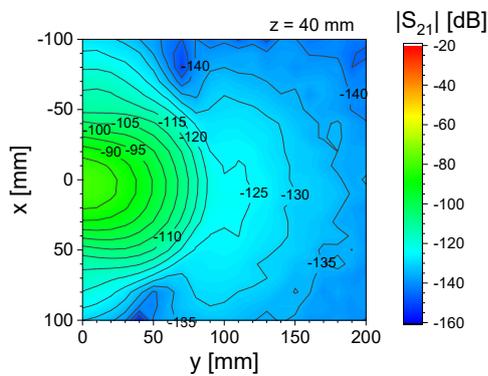
(e) 位相分布 $z = 20$ mm (等高線図)



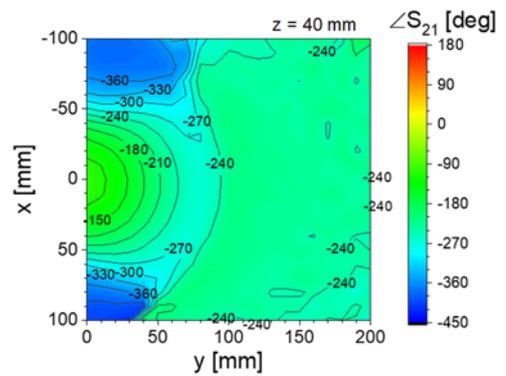
(b) 振幅分布 $z = 20$ mm (鳥瞰図)



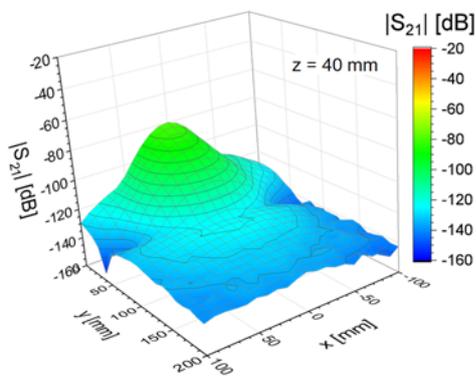
(f) 位相分布 $z = 20$ mm (鳥瞰図)



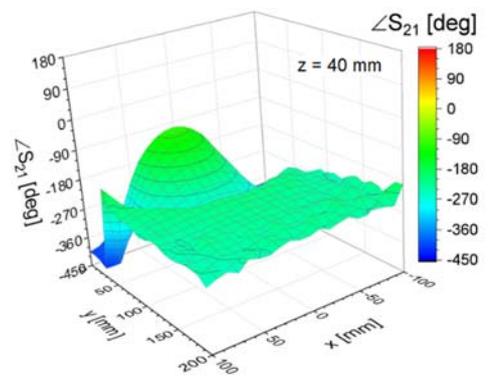
(c) 振幅分布 $z = 40$ mm (等高線図)



(g) 位相分布 $z = 40$ mm (等高線図)

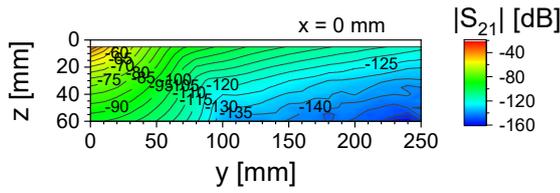


(d) 振幅分布 $z = 40$ mm (鳥瞰図)

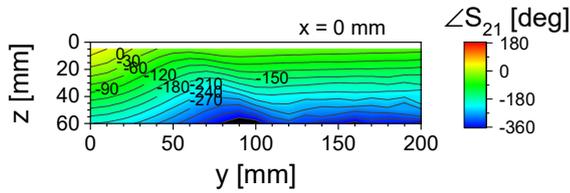


(h) 位相分布 $z = 40$ mm (鳥瞰図)

図3 xy 面に平行な面内 S_{21} 分布 (疑似スケールモデル)



(a) 振幅分布 $x = 0$ mm (yz 面)



(b) 位相分布 $x = 0$ mm (yz 面)

図 4 yz 面内 S_{21} 分布 (疑似スケールモデル)

がわかる。直接波の領域では、位相が距離とともに減じていくが、その範囲は振幅分布に比べると限定的である。さらに、ある距離 (例えば、 $y = 80$ mm 前後) に達すると、その変化はほとんどなくなり、等位相となることがわかる。なお、直接波の領域外では、振幅レベルが小さいため、位相の値にそれほど意味がない。強いて言えば、等位相領域との解析的接続の観点から、その値が決定していると思われる。なお、 $z = 40$ mm の面で、 $y \geq 150$ mm において、位相にランダム的な変動成分が含まれるようになる。これは、対応する振幅レベルが -130 dBm 以下となる領域に対応しており、測定系のノイズフロアに起因すると考えてよい。

図 4 は yz 平面内における S_{21} の分布を示す。 $y = z = 0$ mm を中心として直接波が等振幅面、等位相面を形成している。ラテラル波が優勢な領域では、液面に対してある角度をなす等振幅面、液面に対して水平な等位相面を形成する。後者は損失媒質に対して斜め入射する平面波の性質と同一である [12],[13]。

3. FDTD 計算結果との比較

疑似スケールモデル実験による S_{21} の測定結果をオリジナルモデルに対する FDTD 計算結果と比較する。なお FDTD 計算は、アンテナ長 2.6 m のデータである。以下では、疑似スケールモデル実験との相対レベル差が比較しやすいように、FDTD 計算結果のリファレンス値を調整している。図 3 の $z = 20$ mm, 40 mm に対応するのは、図 5 の $z = 4$ m, 8 m に関する FDTD 計算結果である。

振幅分布については、FDTD 計算、疑似スケールモデル実験とも、 $x = y = 0$ m を中心として直接波の寄与があり、ある程度離れると徐々にレベルが小さくなるラテラル波の寄与が優勢になる様子は同一である。す

なわち、ピークレベルを合わせると、ラテラル波の裾野レベルがほぼ一致すること、 $y = 0$ m の面での振幅分布が深さ毎に振幅の値が枝分かれし、かつ、その変化がほぼ一致するなど、両者のレベルはよく一致している。また FDTD 計算では $\phi = \pm 55^\circ$ の方向にヌルが生じているが、疑似スケールモデル実験においても $x = 100$ mm, $y = 75$ mm および $x = 100$ mm, $y = 50$ mm を中心にヌルが観測される。なお、直接波のしぼみの大きさ (図 3 (b), (d) 図 5 (b), (d) の円錐状の太さ) は疑似スケールモデル実験の方が大きい。この理由としては、実測では、アンテナの工作精度により、 x 成分以外の成分が受信されているなどの要因が挙げられる。

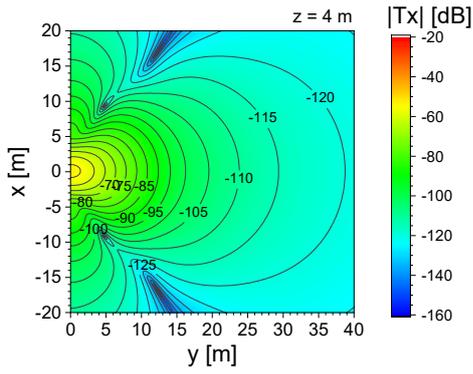
位相分布について、直接波は、振幅分布に比べて極めて狭い範囲で優勢であり、その後、等位相領域となる。図 3 (f), (h) と図 5 (f), (h) を比較すると、直接波と等位相となる領域の位相分布は、FDTD 計算と疑似スケールモデル実験は一致しているといえる。しかしながら、疑似スケールモデル実験では、 y が大きくなって等位相のままであるが、FDTD 計算では、等位相の領域が存在し、さらに y が大きくなるにつれて位相が徐々に減じる傾向にある。この違いとしては、疑似スケールモデル実験では、測定される振幅レベルが小さく、実験系に関する別の要因、例えば、コモンモード電流の寄与により、位相が支配されている可能性が考えられる。

以上のように、ラテラル波が優勢となる領域での位相分布の完全な再現とはならないものの、疑似スケールモデル実験と FDTD 計算はよく対応しているといえる。すなわち、疑似スケールモデル実験により、実際の海水オリジナルモデルを疑似できることがわかる。

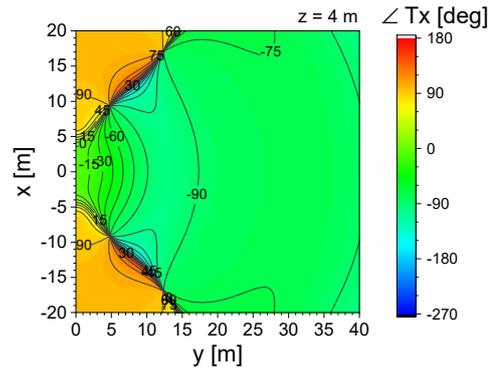
4. 海中位置推定における振幅分布と位相分布

著者らは、海中での位置推定において、送受信アンテナ間の振幅分布に着目している [1]-[5]。当初、海中での平面波を仮定し、振幅減衰の距離特性を利用することとした [1]。これは、位相測定よりも振幅測定の方が測定のダイナミックレンジが確保できることに基づく。一方、自由空間での位置推定においては、海中と違い、媒質損失が無視でき、かつ、遠方界領域での適用となることが多いため、専ら位相に着目する。そこで、海中における位置推定において、位相利用の可能性を調べることにした。理想的な導電媒質では、減衰定数と位相定数は等しいので、一見すると、振幅・位相とも同じように利用できるのではないかと錯覚しがちである。

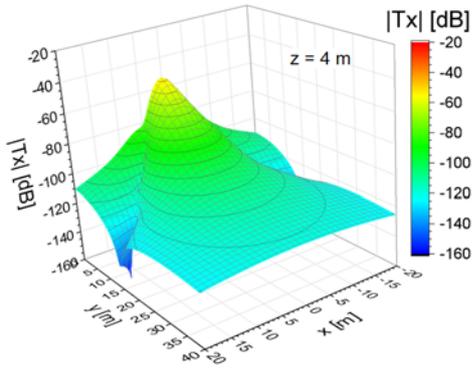
著者らは、周波数 10 kHz において、海中で深さ 8 m まで位置を変化させて送信アンテナより電磁波を発生し、それを海面上の受信アンテナで受けるという FDTD 計



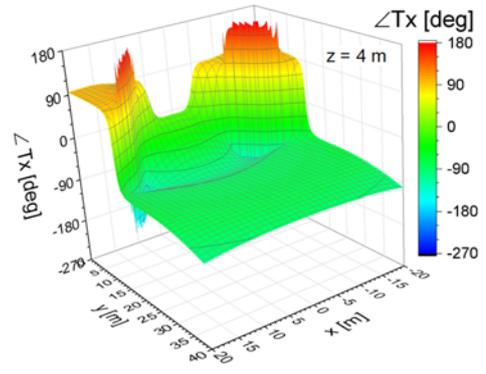
(a) 振幅分布 $z = 4$ m (等高線図)



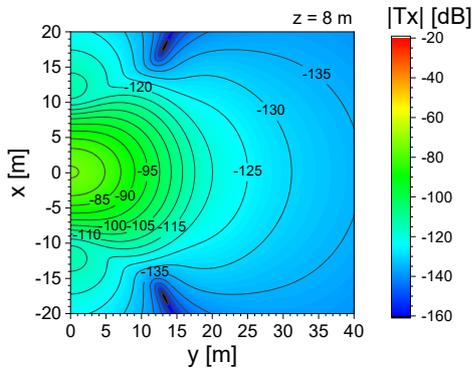
(e) 位相分布 $z = 4$ m (等高線図)



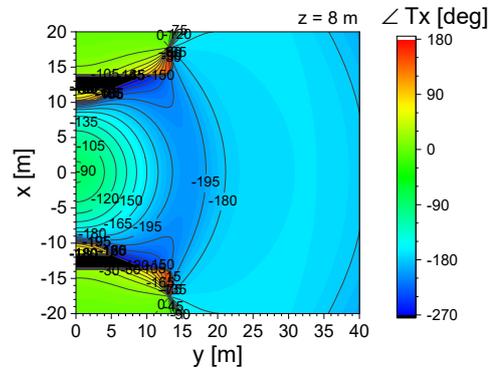
(b) 振幅分布 $z = 4$ m (鳥瞰図)



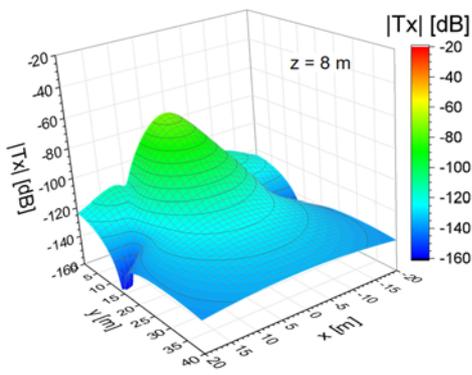
(f) 位相分布 $z = 4$ m (鳥瞰図)



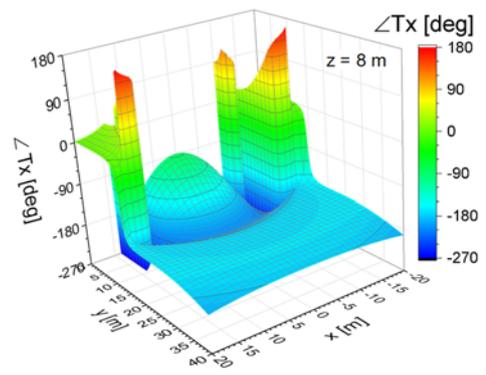
(c) 振幅分布 $z = 8$ m (等高線図)



(g) 位相分布 $z = 8$ m (等高線図)

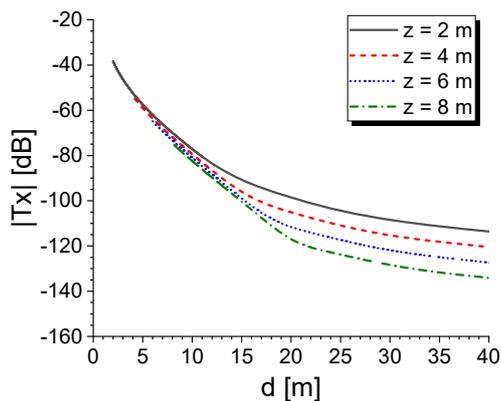


(d) 振幅分布 $z = 8$ m (鳥瞰図)

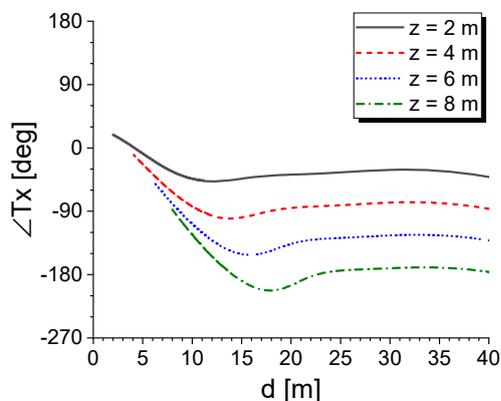


(h) 位相分布 $z = 8$ m (鳥瞰図)

図5 xy 面に平行な面内の複素伝送特性(FDTD計算)



(a) アンテナ間距離と振幅との関係



(b) アンテナ間距離と位相との関係

図 6 アンテナ間距離 d と振幅, 位相との関係[4],[5]

算を行っている[4],[5]. その結果, ラテラル波の影響により, 位相差に着目した場合, 一意的にアンテナ間の距離を換算できるのは 15 m までであるのに対して, 測定系のダイナミックレンジを考慮すると, 振幅では 30 m 以上まで可能という結果が得られている. 図 6 はその一例である. ここで, アンテナ間の距離は, 図 2 を参照すると, $d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ により与えられる. 15 m までというのは, 直接波の変化が優勢な領域までということを意味する. ほぼ一定となる領域に達すると, 深さを与えたとしても距離に対する変化がないように, 位置を特定することができないことになる. これに対して, 振幅に着目する場合, 直接波の変化がほぼ終了する 15 m よりも遠方では, 深さ毎の振幅枝分かれ曲線が距離に対して変化することから, 振幅の測定限界まで測定可能ということになる.

さらに, S_{21} 分布の測定結果から, 振幅に比べて位相は扱いづらい特性をもつことがわかる. すなわち, 振幅レベルが小さいと位相に意味がなくなるため, 位相は周囲の影響を大きく受けやすい. また, 位相変化を追従できる範囲が振幅に比べて極めて限定的である.

さらに, 専用のルーチンを用いても, 位相折り返しを二次元的に解きほぐすことは意外と厄介な作業である.

以上の理由により, 海中位置センシングにおいては, 位相よりも振幅に着目すべきである.

5. まとめ

浅海での海中位置検出を目的として, 送受信アンテナ間の S_{21} の振幅および位相分布についての検討を行った. 測定は疑似スケールモデルにより, 計算は FDTD 法によった. S_{21} の振幅および位相分布ともに, 疑似スケールモデル実験, FDTD 計算において, 傾向は, 数値を含めて, 概ねよく一致することがわかった. また, 位相分布は距離に対して変化がみられる領域が限定的であるなどの理由で, 海中での位置センシングの用途に不向きであることを明らかにした.

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, “海洋中における電磁波を利用した位置測距の検討,” 2018 信学ソ大, BI-9-2, Sep. 2018.
- [3] 高橋 他, “海中位置推定へのアプローチ,” 信学技報, AP2016-188, pp.59-62, Mar. 2017.
- [4] 高橋 他, “電磁波による 3 次元海中ポジショニングシステム,” 2019 信学ソ大, ABS-1-6, Sep. 2019.
- [5] R. Kato et al, “Investigation of a 3D undersea positioning system,” Proc. ICECOM 2019, Dubrovnik, Croatia, Oct. 2019 (to be presented).
- [6] A. I. Al-Shamma'a, et al., “Propagation of electromagnetic waves at MHz frequencies through seawater,” IEEE Trans. Ant. & Propagat., vol. 52, no. 11, pp. 2843-2849, Nov. 2004.
- [7] U. M. Cella et al., “Electromagnetic wave wireless communication in shallow water coastal environment: theoretical analysis and experimental results,” Proc. the Fourth ACM International Workshop on Under Water Networks (WUWNet'09), no. 9, Berkeley, California, Nov. 2009.
- [8] X. Che et al., “Re-evaluation of RF electromagnetic communication in underwater sensor networks,” IEEE Communications Magazine, vol. 48, no. 12, pp. 143-151, December 2010.
- [9] D. Hiyoshi et al., “Localization method using received signal strength for wireless power transmission of the capsule endoscope,” IEICE Trans. Commun., vol. E102-B, no. 8, pp. 1660-1667, Aug. 2019.
- [10] 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.
- [11] 石井 他, “疑似スケールモデルを用いた海中ダイポールアンテナの 3D パターン計測,” 信学技報, AP2019-61, pp.73-78, Aug. 2019.
- [12] J. A. Stratton, Electromagnetic Theory, McGraw-Hill, 1941.
- [13] C. A. Balanis, Advanced Engineering Electromagnetics 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 2012.