

## 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

石井 望<sup>†</sup> 高橋 応明<sup>‡</sup> 陳 強<sup>††</sup> 吉田 弘<sup>†††</sup>

<sup>†</sup>新潟大学 〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町 8050

<sup>‡</sup>千葉大学 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

<sup>††</sup>東北大学 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

<sup>†††</sup>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** 海中での電磁波を利用するシステムを検討するにあたり、海中における電磁界計測は必須の検討事項である。しかしながら、海中での電磁波の伝搬減衰を考慮すると、使用される周波数は 10 kHz 以下と想定されるため、大掛かりな準備と多くの人手を要する実験となってしまう。本稿では、低周波数帯で海水が導電媒質であることに着目して、疑似スケールモデルにより、海中電磁界計測を実験室内に設置できる水槽で擬似的に実施した結果を紹介する。実験室レベルでの計測が可能となったことから、開発サイクルの迅速化が見込まれると考えている。

**キーワード** 海水, 電磁界, 疑似スケールモデル, 実験室, 水槽, 計測

## 3D Pattern Measurement of an Underwater Dipole Antenna Using Pseudo Scale Model

Nozomu ISHII<sup>†</sup> Masaharu TAKAHASHI<sup>‡</sup> Qiang CHEN<sup>††</sup> Hiroshi YOSHIDA<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> Niigata University 8050 Ikarashi 2-nocho, Nishi-ku, Niigata, 950-2181 Japan

<sup>‡</sup> Chiba University 1-33 Yayoicho, Inage-ku, 263-8522 Japan

<sup>††</sup> Tohoku University 6-6-05, Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579 Japan

<sup>†††</sup> 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** Electromagnetic field distribution in the sea should be essentially measured when developing a system that uses electromagnetic waves in the sea. However, due to the propagation decay of electromagnetic waves in the sea, the frequency to be used is assumed to be 10 kHz or less, resulting in an experiment requiring a large amount of preparation and a lot of human resources. In this report, focusing on the fact that seawater is a conducting medium in the low frequency band, we introduce the results of simulating underwater electromagnetic field measurement in a water container that can be installed in the laboratory using our proposed pseudo-scale model. Since the measurement in the laboratory has become possible, it is expected that the development cycle will be accelerated.

**Keywords** Sea Water, Electromagnetic Field, Pseudo Scale Model, Laboratory, Water Container, Measurement

### 1. まえがき

海中における電磁波利用の大きな障害は、海中での大きな伝搬減衰である。電子機器を利用した通信・測定技術の進歩に伴い、海中における電磁波利用は近年再び注目を集めている[1]。大きな減衰を回避するためには、低い周波数帯を利用し、通信範囲を限定する必要がある。その一例として、著者らは水難事故の救命活動におけるダイバー支援を目的とした海中電波測位

システムを検討している[1]-[4]。この際、研究開発を進める上で大きな問題となるのが、周波数が低いため、検証実験系の規模が実験室内に収まらなく、大規模水槽や海中で展開せざるを得ないという点である。それに付随して、準備に要するコスト、時間、実験要員の確保などの問題もある。手軽にアイデアを実験で検証するためには、多少厳密性は損ねても実験室内でスケール実験を行えるメリットは大きい。

自由空間でよく利用されるスケールモデルでは、寸法を  $1/n$  倍とした場合、周波数を  $n$  倍にするだけでなく、導電率も  $n$  倍にしなければならない。しかしながら、現実問題として、実験室内で実験系を組むのに適したスケールファクタ  $n$  に対して、元の導電率の  $n$  倍となる食塩水は、その飽和限界を超え、実現できない。

本稿では、これまでに著者らが提案した、導電媒質に特化された疑似スケールモデル[5]を利用して、10 kHz 帯で検討している海中電波応用システムに対して、海中における電界分布を測定できるスケールダウン測定系を構築した事例について説明する。

## 2. 疑似スケールモデル

海中アンテナは、海中での伝搬損失を抑えるために、減衰定数が小さい、低い周波数帯、例えば、kHz 帯で利用される。一方、1 GHz より低い周波数では、典型的な海水の複素比誘電率の実部  $\epsilon_r$  および導電率  $\sigma$  は一定値を示すことが知られている[6]。本節での数値検討においては、 $\epsilon_r = 80$ 、 $\sigma = 4 \text{ S/m}$  の値を用いる。このため、海水の誘電正接  $p = \tan \delta = \sigma / \omega \epsilon$  は周波数が低くなると非常に大きな値を示すようになり、変位電流の存在を無視できる完全導電媒質とみなすことができる。ここで、 $\omega$  は角周波数であり、 $\epsilon$  は海水の複素誘電率の実部とする。いま、変位電流の寄与を含めた複素導電率を

$$\sigma_e = \sigma + j\omega\epsilon \quad (1)$$

により定義する。このとき、海中を無限大の一樣損失媒質とみなすと、海中における源なしのマクスウェルの方程式は

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu_0\mathbf{H} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma_e\mathbf{E} \quad (3)$$

と与えられる。ここで、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$  は電界、磁界であり、 $\mu_0$  は透磁率である。厳密には  $\sigma_e$  は  $\omega$  に依存するが、ここでは  $\sigma_e$  が  $\omega$  により変化しないと仮定する。このとき、寸法を  $1/n$  倍すると、スケールダウン後の寸法は  $l' = l/n$  と与えられ、ナブラ演算子  $\nabla$  は  $n\nabla'$  と変換される。ここで、 $'$  はスケールダウン後の量を表すものとする。 $\mathbf{E}' = n\mathbf{E}$ 、 $\omega' = n^2\omega$  とおくと、(2)、(3)は

$$\nabla' \times \mathbf{E}' = -j\omega'\mu_0\mathbf{H} \quad (4)$$

$$\nabla' \times \mathbf{H} = \sigma_e\mathbf{E}' \quad (5)$$

となる。すなわち、電界を  $n$  倍し、周波数を  $n^2$  倍とすることで、スケールダウン前後のマクスウェル方程式は同形となる。疑似スケールモデルとは、このスケール変換則に基づき、一樣な導電媒質内での電磁界の振る舞いを、周波数を上げ、寸法を小さくして測定するためのモデルを指す[5]。スケールダウン前後で、媒質が完全導電媒質であることが望まれるが、実際には周波数が高くなると誘電正接  $p$  が小さくなるため、完全

導電媒質とみなせない。しかしながら、海中で kHz 帯において動作するアンテナの物理的寸法は、屋外あるいは海中での試験を余儀なくさせるものであり、スケールダウンにより屋内に設置された水槽内で近似的に試験代用できるメリットは大きい。

疑似スケールモデルを検討する際のオリジナルモデルとして kHz 帯で動作する海水アンテナを想定すると、海水は完全導電媒質とみなせるので、その伝搬定数は

$$\gamma = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\sigma}{2}}(1+j) \quad (6)$$

と与えられる。スケールダウン後の角周波数  $\omega' = n^2\omega$  における誘電正接を  $p'$  と表すことにすれば、対応する伝搬定数は

$$\gamma' = n\gamma[f(1/p') + jg(1/p')] \quad (7)$$

と与えられる。ここで

$$f(p) = \left[ \sqrt{1+p^2} + 1 \right]^{1/2} / \sqrt{2} \quad (8)$$

$$g(p) = \left[ \sqrt{1+p^2} - 1 \right]^{1/2} / \sqrt{2} \quad (9)$$

とする。また、スケールダウン後の減衰定数  $\alpha'$ 、位相定数  $\beta'$  は

$$\alpha' = n\alpha\sqrt{2/p'}g(p') \quad (10)$$

$$\beta' = n\beta\sqrt{2/p'}f(p') \quad (11)$$

と与えられる。ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$  はオリジナルモデルの減衰定数、位相定数とする。表 1 にいくつかの  $p'$  の値に対する  $\sqrt{2/p'}f(p')$  などの数値を記載する。スケールダウン後の媒質が完全導電媒質であるときを基準としたときの、海水の疑似スケールモデルとの差異は、減衰定数、位相定数について、100MHz において 5%~6% であり、400MHz において 20%~24% である。このように、周波数が 100MHz 程度以上になると、完全な疑似スケールモデルは実現できないが、海水は導電媒質の性質が優勢であるため、オリジナルモデルにおける電磁界の振る舞いをよく近似することになる。

表 1 海水 ( $\epsilon_r = 80$ 、 $\sigma = 4 \text{ S/m}$ ) の疑似スケールモデルに関する諸量

周波数	10 kHz	100 MHz	400 MHz
$n$	1	100	200
$p' (= \tan \delta_1)$	$8.99 \times 10^4$	8.99	2.25
$\gamma_1 [1/\text{m}]$	$0.397 + 0.397j$	$37.6 + 42.0j$	$64.1 + 98.6j$
$\lambda_1 [\text{m}]$	15.8	0.150	$6.37 \times 10^{-2}$
$\gamma_2 [1/\text{m}]$	$2.10 \times 10^{-4}j$	2.10j	8.38j
$\lambda_2 [\text{m}]$	$3.00 \times 10^4$	3.00	0.749
$f(1/p')$	1.000	1.002	1.023
$g(1/p')$	0.000	0.055	0.217
$\sqrt{2/p'}g(p')$	1.000	0.946	0.806
$\sqrt{2/p'}f(p')$	1.000	1.057	1.240

上述の疑似スケールモデルの適用条件は一様かつ導電媒質であることである。しかしながら、実際に取り扱う問題は、最も簡単な場合であっても、空気と海水の二層問題である。この問題に疑似スケールモデルを適用するため、周波数がオリジナルモデルの  $n^2$  倍となるようなスケールダウンを施す。このとき、海水領域では、寸法が  $1/n$  倍となるのに対して、空気領域では、寸法が  $1/n^2$  となる。すなわち、二つの領域でスケールファクタが異なるにもかかわらず、海水と空気の境界面で境界条件を課さねばならない。このように、厳密な意味で、疑似スケールモデルは二層問題には適用できない。しかしながら、波長に比べて短い範囲での電磁界の振る舞いを検討する際は、近似的に疑似スケールモデルを適用してよい。定性的に、波長より短い範囲では、位相変化が小さく、電磁界は静電界もしくは静磁界と類似した分布となるためである。事実、10 kHz 海水オリジナルモデルにおいて、20 m は  $6.67 \times 10^4 \lambda_0$  に対応し、スケールファクタ  $n = 200$  の 400 MHz 疑似スケールモデルにおいて、0.1 m (= 20 m/200) は  $0.133 \lambda_0$  に対応している。ここで、 $\lambda_0$  は自由空間波長とする。本稿のように、波長に比べて短い範囲を扱う場合、空気領域における電磁界は距離の逆 2 乗もしくは逆 3 乗に比例する分布であり、 $\lambda_0$  にほぼ依存しないことから、オリジナルモデルの空気領域と同形の電磁界分布とみなしてもよい。このため、条件付きではあるが、海水内の疑似スケールモデルを、空気領域を含めた二層問題全体に適用できると考えられる。

### 3. 疑似スケールモデルによる海中ダイポールアンテナによる電界強度測定

海水動作ダイポールアンテナ間の伝送特性を測定するための室内設置可能な疑似スケールモデル実験系の概略を図 1 に示す。二つのバズーカバラ付ダイポールアンテナは、一方は信号発生器 (SG) に接続され、もう一方はプリアンプを介してスペクトラムアナライザ (SA) に接続されている。ダイポールアンテナは、図 2 に示すように、二本のセミリジッドケーブルの内導体を利用して構成されており、外導体は半田付けされている。これらの外導体には、長さが  $\lambda_0/4$  であるようなバズーカバラが装着されている。通常、ダイポールアンテナの付け根の折れ曲げ部分を開放状態とするが、食塩水内に沈めて使用するため、その部分にシリコン・シーラントを埋め込み、防水対策を施している。さらにバズーカバラの後段に 180° 3dB ハイブリッド結合器が接続されており、平衡成分のみを SG もしくはプリアンプへ伝達している。ハイブリッド結合器を含めたダイポールアンテナの反射量は約 -9 dB であった。

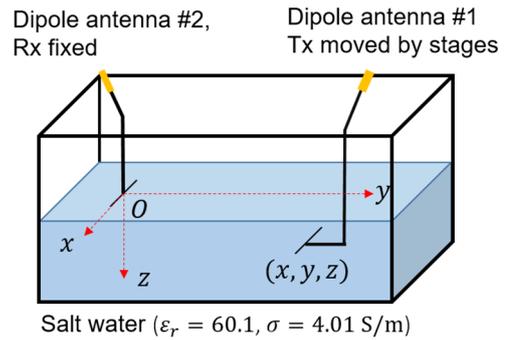


図 1 疑似スケールモデル実験系

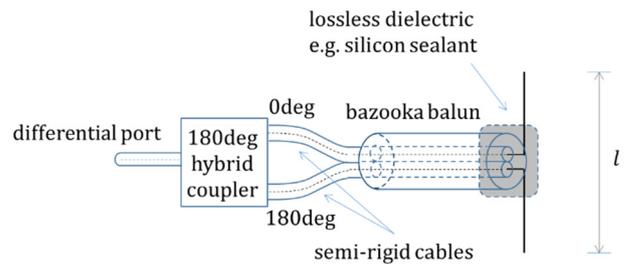


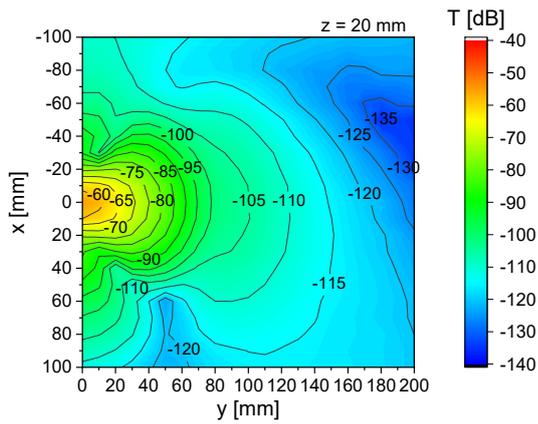
図 2 バラン付平衡ダイポールアンテナ

長さ 10 mm のダイポールアンテナ#1 は、三軸ステージにより食塩水中を三次元的に走査できるようになっている。この可動ダイポールアンテナ#1 により生じる電界を液面直下に固定された長さ 10 mm のダイポールアンテナ#2 により受信する。実験に利用した水槽の寸法は 900mm×450mm×450mm であり、その底面から 170 mm まで海水模擬食塩水を満たした。この食塩水は、周波数 400 MHz において複素比誘電率の実部が 60.1 であり、導電率が 4.01 S/m であった (Speag DAK-12 にて測定)。このとき、 $\tan \delta$  は 3.02 であり、完全導電媒質ではない。食塩水内での波長は  $\lambda_1=67.2$  mm であり、ダイポールアンテナ#1, #2 の長さ 10 mm は波長換算で  $0.149 \lambda_1$  であり、微小ダイポールアンテナでない。

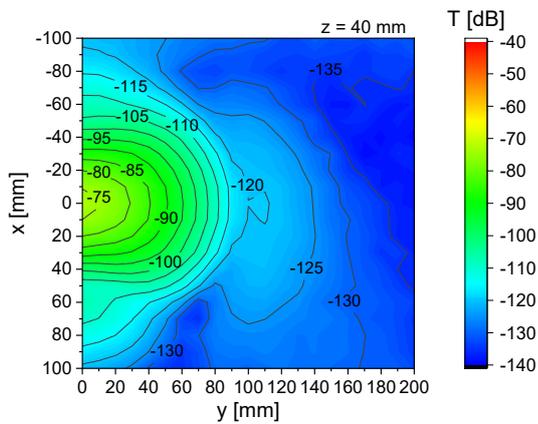
#### 3.1. 三次元測定の例

ダイポールアンテナ#2 の深さ  $z$  を変化させながら、 $z =$  一定となる面における受信電界分布を測定した。ここで、ダイポールアンテナ#1, #2 は  $x$  方向を向いている。図 3 はその一例であり、 $z = 20$  mm, 40 mm 面内における受信分布である。ここで、アンテナに接続するケーブルを直結したときの SA の受信レベルを 0 dB 基準としている。図中の  $x = y = 0$  mm はダイポールアンテナ#1 がダイポールアンテナ#2 の直下に位置するときに対応しており、 $x, y$  は 10 mm 間隔で変化させている。 $x = y = 0$  mm を中心とする分布は、ダイポールアンテナ#1 の直接波受信による分布である。

これに対して、あるレベルより小さくなると、直接



(a)  $z = 20 \text{ mm}$



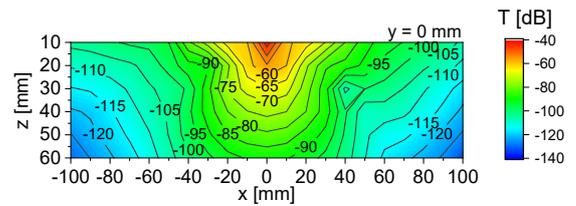
(b)  $z = 40 \text{ mm}$

図3  $xy$ 面に平行な面内における受信電界分布 ( $x$  偏波受信)

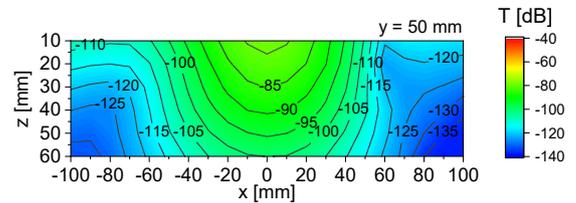
波の分布にみられる急なレベル低下がみられなくなり、徐々にレベルが小さくなる傾向に切り替わる。 $z = 20 \text{ mm}$  のとき、図 3(a)からレベルが約  $-100 \text{ dB}$  において、 $z = 40 \text{ mm}$  のとき、図 3(b)からレベルが約  $-115 \text{ dB}$  において、レベル変化の傾向の切替が観測される。

図 4 は  $xz$  面に平行な面  $y = 0 \text{ mm}$ ,  $50 \text{ mm}$ ,  $100 \text{ mm}$  における受信電界分布を示す。 $y = 0 \text{ mm}$  面 ( $xz$  面) では、図 4(a)から、 $x = 0 \text{ mm}$  かつ  $z = 10 \text{ mm}$  の位置で最大となる直接波が分布しており、その周辺に直接波とは異なる形態の分布、すなわち、ラテラル波による分布が観測される。 $y = 50 \text{ mm}$  の面では、さらにレベルが低くなるものの、ダイポールアンテナ#2 の近くではまだ直接波の寄与が優勢であり、それを取り囲むようにラテラル波と思われる分布が存在している。これに対して、 $y = 100 \text{ mm}$  面では、直接波の寄与はほとんどなくなり、液面に対して平行に近い等レベル面が観測されるようになる。これはラテラル波が大きく関与していると考えられる。

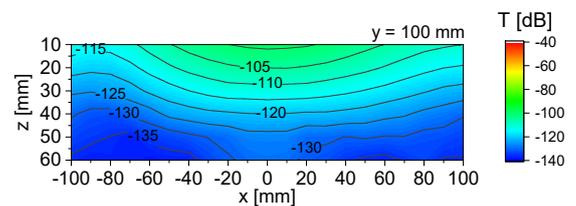
図 5 は  $yz$  面に平行な  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $50 \text{ mm}$ ,  $100 \text{ mm}$  にお



(a)  $y = 0 \text{ mm}$



(b)  $y = 50 \text{ mm}$



(c)  $y = 100 \text{ mm}$

図 4  $xz$ 面に平行な面内における受信電界分布 ( $x$  偏波受信)

ける受信電界分布を示す。 $x = 0 \text{ mm}$  面 ( $yz$  面) では、図 5(a)から、 $y = 0 \text{ mm}$ ,  $z = 10 \text{ mm}$  の位置を最大とする直接波が分布しており、それとは別の性質をもつ分布、すなわち、液面に対してある角度をなす等レベル面を構成するラテラル波の分布が存在することがわかる。 $x = 50 \text{ mm}$  面、 $x = 100 \text{ mm}$  面とダイポールアンテナ#2 から離れると、直接波の寄与は小さくなり、ラテラル波の寄与が優勢となっていく様子がわかる。

### 3.2. 直接波とラテラル波の切替現象

直接波とラテラル波の切替の様子を調べるために、 $yz$  平面内分布について検討を加える。図 6 に、 $yz$  面における受信電界分布を示す。図 6(a)は、横軸をアンテナ間の水平距離  $y$  としており、図 6(b)は、横軸をアンテナ中心間の距離  $d = \sqrt{y^2 + z^2}$  としている。図 6 から、ダイポールアンテナ#2 の近くでは、直接波の寄与が優勢で、その後、ラテラル波の寄与が現れることがわかる。図 6(b)は、ダイポールアンテナ#1 の深さ  $z$  に関係なく、直接波の寄与はアンテナ中心間の距離  $d$  に関してすべて同一直線上にプロットされることを意味している。これに対してラテラル波領域では、深さ  $z$  により枝分かれ、すなわち、別の曲線となる。これは、ラテラル波が被る伝搬損失 ( $\text{dB}$  値) が深さ  $z$  に比例するためである。図 6(a)からわかるように、各深さ  $z$  にお

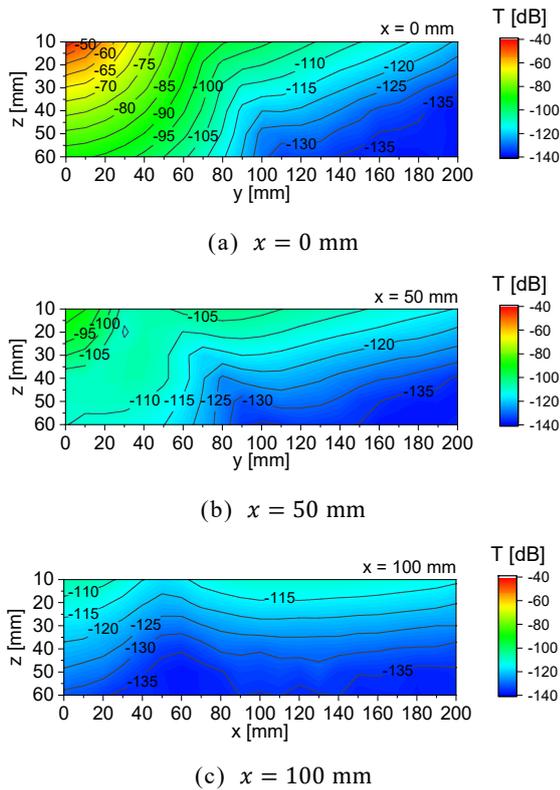
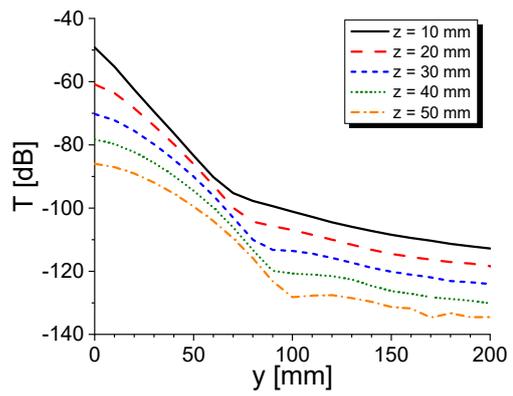


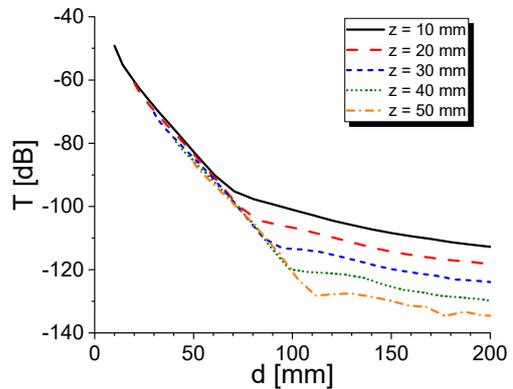
図 5  $yz$  面に平行な面内における受信電界分布 ( $x$  偏波受信)

ける受信電界分布は、深さ  $z$  の違いによる損失分を除いて、同じ傾きの曲線となっている[2][4].

図 7 に、 $yz$  面における受信電界分布の測定値、微小ダイポールアンテナを仮定したときの電界分布のうち直接波による寄与、ラテラル波による寄与の近似値、ならびにモーメント法 (MoM) により計算された受信電界分布の直接波成分の距離特性を示す。ラテラル波による寄与については Moore の近似式[7][8]を利用し、MoM 計算は Richmond の一様損失媒質中での線状アンテナに対するモーメント法[9]による。微小ダイポールアンテナによる直接波およびラテラル波の寄与については、 $y = 0 \text{ mm}$  での直接波のレベルが MoM 計算で得られる受信レベルと同じになるように補正してある。図 7(a)では  $z = 20 \text{ mm}$  面、図 7(b)では  $z = 40 \text{ mm}$  面における結果が示されている。まず、微小ダイポールアンテナの直接波寄与と MoM 計算値はほぼ一致することがわかる。すなわち、 $10 \text{ mm}$  ダイポールアンテナは、微小ではないが、その近傍における電界の振る舞いは微小ダイポールアンテナと類似している。測定値との比較では、直接波領域では、測定値と直接波の厳密式はよく一致している。直接波とラテラル波の遷移領域を外れると、ラテラル波領域では、測定値とラテラル波の近似式はほぼ一致している。なお、ラテラル波の近似式の適用範囲から外れているためと考えられるが、



(a) アンテナ間の水平距離  $y$  の関数として表示



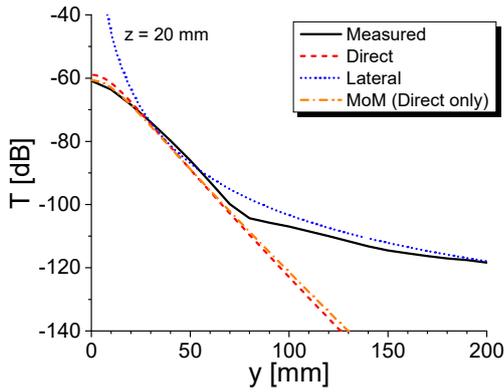
(b) アンテナ中心間の距離  $d$  の関数として表示

図 6  $yz$  面内における受信電界分布

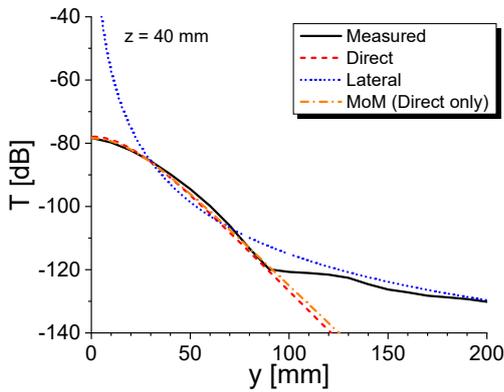
直接波の厳密式とラテラル波の近似式を合成した結果は、直接波領域において測定値より大きく外れてしまう。このように、適用したラテラル波の近似式には適用限界があるものの、測定値の直接波およびラテラル波の距離特性は対応する近似式等で追従することができる。このことは、測定値が本質的には直接波の寄与とラテラル波の寄与の和により構成されていることを強く示唆するものである。

### 3.3. 受信ダイポールアンテナのアジマス角度特性

図 1 において、ダイポールアンテナ#2 を角度ステータジで  $z$  軸を中心に回転させるようにし、同軸ロータリージョイントを介して、 $180^\circ$  3dB ハイブリッド結合器に接続することにより、ダイポールアンテナ#2 のアジマスパターンを測定した。図 8 にその結果を示す。ダイポールアンテナ#1 は  $yz$  面内で移動させることとし、まずその深さ  $z$  を固定して、続けてダイポールアンテナ#1 からの距離  $y$  を固定して、パターンを取得している。図からわかるように、ダイポールアンテナ#1 のアジマスパターンはほぼ  $\sin \phi$  に従っていることがわかる[4]。すなわち、微小ダイポールアンテナの放射パターンに類似していることがわかる。アンテナ中心間の距離  $d$  が



(a)  $z = 20$  mm



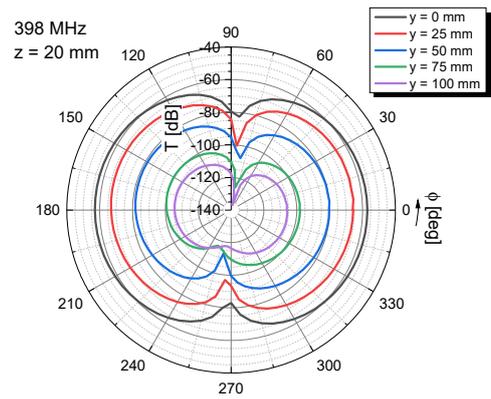
(b)  $z = 40$  mm

図7  $yz$  面内における受信電界分布の直接波・ラテラル波の寄与

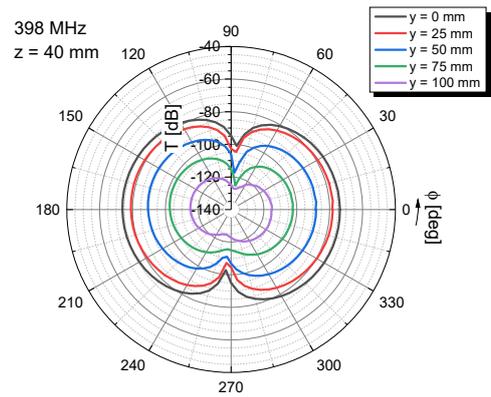
大きくなると、それに応じてレベルが小さくなること  
がわかる。またレベルが  $-100$  dB を下回ると、 $\sin \phi$  の  
ヌルによるくびれが消失していく傾向になる。これは  
ラテラル波領域で生じるが、図3からわかるように、  
この領域における三次元パターンは対称性を崩す傾向に  
あることと関連すると考えられる。

#### 4. まとめ

海中での電磁波利用に関する研究・開発において、  
実験室内でスケールモデルによる測定系を組めるメリ  
ットは大きい。本稿ではまず、疑似スケールモデルに  
ついて、海水は完全な導電媒質でないが、近似的にオ  
リジナルモデルの電磁界分布を模擬できること、また  
波長よりも短い範囲に限定すれば、空気・海水からな  
る二層問題にも適用できることを考察した。続いて、  
10 kHz 海水オリジナルモデルに対する 400MHz 疑似ス  
ケールモデルの室内実験系を構築し、ダイポールアン  
テナ間の伝送特性の三次元分布を測定し、直接波とラ  
テラル波の二つの伝搬要因により分布が構成されてい  
ることを明らかにした。今後、著者らが検討している



(a)  $z = 20$  mm



(b)  $z = 40$  mm

図8 受信ダイポールアンテナのアジマスパターン

海中電波測位システムに関する原理確認実験を疑似ス  
ケールモデルにより実施する予定である。

#### 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] 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.
- [3] H. Sato et al., “Dipole antenna with sheath-cover for seawater use,” Proc. ISAP 2017, POS1, 1376, Phuket, Thailand, Oct. 2017.
- [4] R. Kato et al, “Investigation of a 3D undersea positioning system,” Proc. ICECOM 2019, Dubrovnik, Croatia, Oct. 2019 (accepted).
- [5] 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中電磁界,” 信学技報, AP2016-125, pp.11-16, Dec. 2016.
- [6] Rec. ITU-R P.527-3, “Electrical characteristics of the surface of the earth,” ITU, Geneva, 1992.
- [7] 藤井 他, “海中無線通信用アンテナと伝搬モデルに関する研究,” 信学技報, AP2018-5, pp.23-28, Apr. 2018.
- [8] R. K. Moore et al., “Dipole radiation in a conducting half space,” J. Res. Nar. Bur. Std. D Radio Propagation, vol. 65, no. 6, pp. 547-563, Nov.-Dec. 1961.
- [9] J. H. Richmond, Radiation and scattering by thin-wire structures in complex frequency domain, NASA CR-2396, National Technical Information Service, 1974.