

疑似スケールモデル実験系による 複数海面位置受信電力プロファイルを利用した海中位置推定法の検証

佐瀬 亮太[†] 石井 望[†] 高橋 応明[‡] 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、kHz帯において動作させる浅海における海中位置推定システムについて検討を行っている。本稿では、海面に複数の受信ポイントを設置し、それらの受信電力プロファイルから、海中のダイバーに設置された送信機の位置を特定する方法について述べる。主要な送受信形態、すなわち、送信と受信アンテナの向きが同じ場合について、疑似スケールモデル実験系を利用して、提案する位置推定法について評価を行う。

キーワード 海水、電磁波、位置推定、受信電力プロファイル、疑似スケールモデル

Verification of undersea position estimation method using received power profile at multiple sea surface positions by experimental pseudo scale model

Ryota SASE[†] 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 have investigated an underwater position estimation system in shallow water that operates in the kHz band. In this paper, we describe how to set multiple receiving points on the sea surface and identify the position of the transmitter installed on the diver under the sea from their received power profiles. For the main transmission/reception modes, that is, when the directions of the transmission and reception antennas are the same, the proposed position estimation method is evaluated using an experimental system based on the pseudo-scale model.

Keywords Sea water, electromagnetic waves, location estimation, received power profile, pseudo scale model

1. まえがき

セウォル号沈没事故や東方之星沈没事故など、これまでに多くの海難事故が発生してきた。一方、本邦では年間 1300 件前後の海難事故が発生している[1]。海難事故の原因は濃霧による視程低下や竜巻などの自然的なものから、船員の経験不足などさまざまであるが、海難事故による死亡原因は搜索の遅れによるものがほとんどである。搜索の遅れの理由として、海中における測位法が未熟であることが挙げられる。

海中での測位法で実用化されているものは音波を使ったソナーである。音波は水中での減衰が小さいため、海中にいるダイバーと遭難者の距離を測定する方法に使われる。しかし、音波の伝搬速度や海流、海水温の影響を受けやすいため、高精度の位置推定は難し

い。ほかの測位法として、光波を使う方法があるが、濁りによって測定できる距離が不安定、海中の物体による散乱が大きいという問題がある[2]。音波と光波が、減衰が小さいという理由で海中での測位に使われてきた一方、減衰の大きい電磁波を利用する方法について検討の余地がある。電磁波は、低周波に限ると減衰量は音波とあまり変わらない一方、海流や海水温の変化にも強いという特徴がある[3]。このような電磁波の特徴を生かした海中でのダイバーの測位法が確立できれば、海中における遭難者の位置を素早く知ることができ、海難事故の発生から救助までの時間を大幅に短縮することができる。また、搜索作業員が搜索活動中や救助活動中に海難して死亡してしまう事故も防げるだろう。

著者らは海中動作ハーフシースアンテナ[6][8]、電氣的微小ダイポールアンテナによる電磁界を利用した位置推定法の検討[4][9]、海モデルを屋内実験スケールに変換する疑似スケールモデル検証実験[5][10]について報告している。とりわけ、低周波数電磁波を利用した浅海におけるダイバー位置推定システムでは、近傍領域における微小ダイポールアンテナによる電磁界について、直接波領域の厳密式、ラテラル波領域の近似式を考慮した位置推定アルゴリズムを提案している[4][9]。基本的な動作を確認するため、送受信ダイポールアンテナの偏波面は一致させて検討を行っているが、実際問題では、偏波面を一致させることは難しい。また、近似式の限界、定式化モデルの限界により、想定している厳密式・近似式では、アンテナ周囲のラテラル波の振る舞いをトレースすることが難しくなる場合も考えられる。

そこで本稿では、電磁波を利用した浅瀬海中でのダイバーの位置推定について、事前に供給された受信電力プロファイルに基づく方法を提案し、ダイバーが装備した送信ダイポールアンテナと、海面に設置した9つの受信アンテナ間の送受信により得られる受信電力の値とダイバーの深度計の値からダイバーの位置を推定する方法を検討する。受信電力プロファイルは、海モデルに疑似スケール則を適用した疑似スケールモデルを使用した実験により供給される受信電力分布を使用する。

2. 海中探索モデルと疑似スケールモデル実験

2.1. 海中探索モデル

図1に海中位置推定モデルを示す。海モデルとして、横・奥行きがともに50m、深さが9mの様な海水を想定する。海面には等間隔に9つのブイが設置され、個々のブイには受信ダイポールアンテナが設置される。ダイバーは送信ダイポールアンテナを装着し、海中での救助・捜索活動を行う。

2.2. 疑似スケール則

海洋中における電磁波の伝搬を模擬した実験を行うため、海中モデルを実験室内で扱える測定環境に変換する必要がある。電磁波の分野で知られている従来のスケール則は、寸法を $1/n$ 倍にしたとき、媒質の導電率を n 倍にする必要がある[11]。しかし、海中モデルを実験室内で実験が行えるスケールに変換したとき、海水を模擬する食塩水はその飽和限界を超えて作製できない。そこで、媒質が導電性媒質であるという前提のもと、疑似スケール則を適用して実験を行う。疑似スケール則を適用した実験系では、スケールを $1/n$ 倍にしても、周波数を n^2 倍とすれば、スケール変換の前後で導電率を変換せず実験を行うことができる[5][10]。

2.3. 疑似スケールモデル実験

図2に、海中位置推定モデルに対する $n=200$ とした疑似スケール則を適用した、食塩水中でのアンテナ間の伝送特性を計測するための実験系を示す。水槽に食塩水を満たし、海モデルを模擬する。食塩水の導電率は、海水の導電率に近くなるように設定する。本実

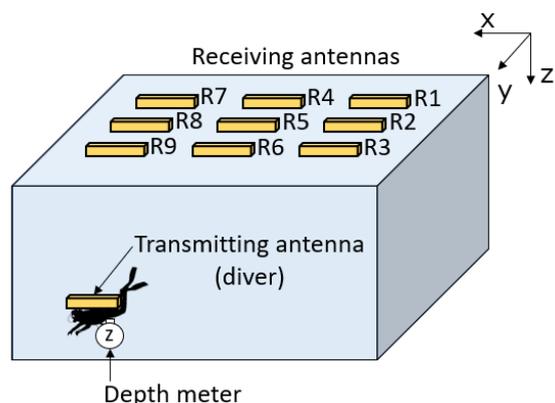


図1 海中位置推定モデル[4][9]

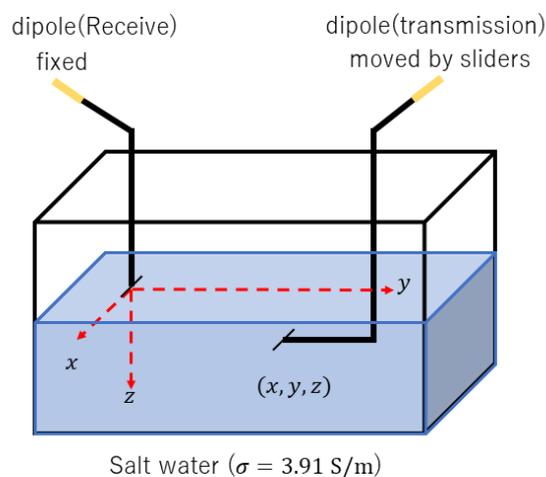


図2 疑似スケールモデル実験系の概略[10]

験時の導電率の測定値は $\sigma = 3.91 \text{ S/m}$ であった。疑似スケールモデル実験系で用いる電磁波の周波数は、実スケールモデルの10 kHzを40000倍した400 MHzとした。

送受信シース付きダイポールアンテナの長さは10 mmとし、アンテナ本体を食塩水内に設置する。設置した海面受信ダイポールアンテナと海中送信ダイポールアンテナの向きはともにx方向に固定する。海面受信ダイポールアンテナは波や風の影響により、海中送信ダイポールアンテナはダイバーの姿勢により向きが変わることが想定されるが、主要な受信形態、すなわち、送受信ダイポールアンテナが同じ向きである場合を調べるためである。

受信アンテナはxおよびy方向に10 mmの間隔で移動させ、9カ所で測定した。送信アンテナは、 $|x| \leq 100 \text{ mm}$, $0 \text{ mm} \leq y \leq 200 \text{ mm}$, $5 \text{ mm} \leq z \leq 50 \text{ mm}$ の測定範囲を3次的に走査できるようにスライダに取り付けた。送信アンテナを測定範囲のxおよびy方向に10 mmずつ移動させ、z方向に5 mmずつ沈める動作を繰り返す。送信アンテナが測定ポイントに移動し、停止した後に電磁波の送受信を行い、アンテナに接続したコンピュータは送信アンテナの位置情報(x,y,z)

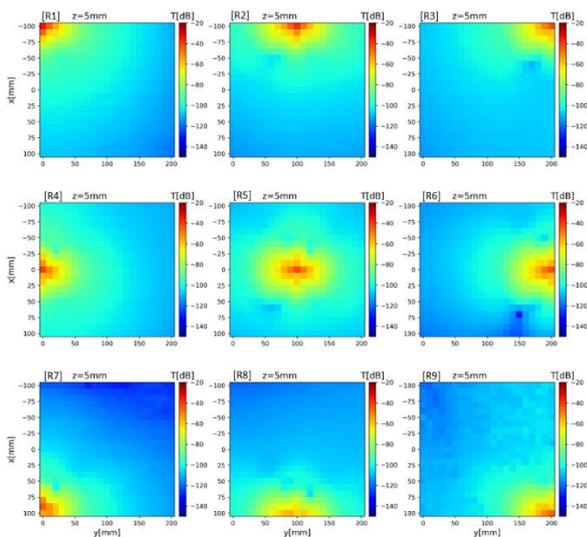


図3 疑似スケールモデルにおける9つの受信アンテナでの受信電力プロファイル測定値 ($z = 5 \text{ mm}$) [10]

とその測定ポイントでの各受信アンテナが受信した電力を記録し、送信アンテナを次の測定ポイントに移動させる。以上の動作を繰り返し、合計4410点の測定ポイントを走査し、各測定ポイントの位置情報 (x, y, z) と各受信アンテナが記録した受信電力強度の関係を受信電力プロファイルとして使用する。すなわち、海中送信アンテナに対する海面受信アンテナの受信電力プロファイル $p_f(x, y, z)$ がダイバーの位置 (x, y, z) の関数として与えられる。

2.4. 受信電力分布の特徴

図3に、深さ $z = 5 \text{ mm}$ で送信アンテナを走査したときの、9つの受信アンテナによる受信電力分布を示す。繰り返しになるが、9つの受信アンテナは個別に送信アンテナから受信している。受信アンテナ周囲における電力分布は必ずしも等方的な角度特性でなく、 x 方向よりも y 方向の方が強く分布するほか、FDTD 計算でも確認されるヌル特性が観測される[9][12]。また、アンテナ間距離が一定以上離れると、受信電力分布の勾配が緩やかになり、直接波からラテラル波へ切り替わっていることがわかる。

3. 海中位置推定法

3.1. システムの入力

図1の海モデルにおいて9つの受信アンテナを R_n ($n = 1, 2, \dots, 9$) と記述する。測定系により、送信アンテナの位置毎に、受信アンテナ R_n における受信電力 T_n を記録する。このとき、ダイバーに装着した深度計の値 z_d も受信する。このように、送信アンテナの深度 z_d 、受信アンテナ R_n の位置、受信電力 T_n が位置推定システムへの入力となる。

3.2. 位置推定アルゴリズム

本位置推定システムは、9つの受信アンテナのうち、受信電力の強い3つの受信アンテナの位置情報とその受信アンテナが計測した受信電力を用いる。

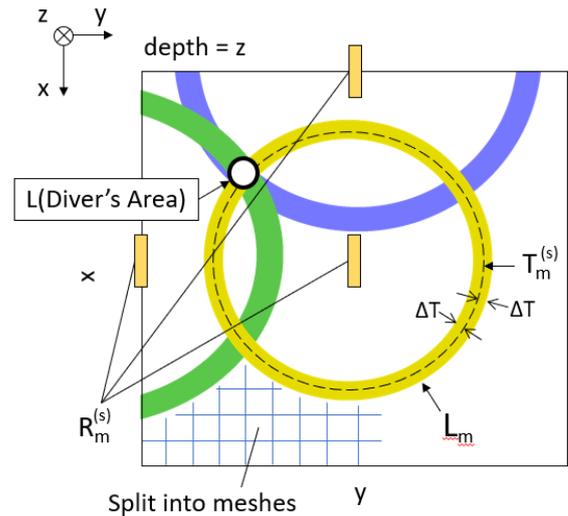


図4 深度固定時の位置推定法の概図

図4に、位置推定法の概図を示す。ダイバーの深度 z_d は既知と仮定する。9つの受信アンテナが同時に受信した9つの受信電力 T_n のうち、 T_n が大きい順に3つの受信アンテナを選び、 $R_m^{(s)}$ ($m = 1, 2, 3$) の順に記す。また、受信アンテナ $R_m^{(s)}$ での受信電力を $T_m^{(s)}$ と表す。

位置推定システムは、送信アンテナの深度 z_d 、受信アンテナ $R_m^{(s)}$ の位置、受信電力 $T_m^{(s)}$ を用い、事前には供給された受信電力プロファイル p_f からダイバーが存在する可能性のある領域を3つ抽出し、その積集合を最終的な推定結果とする。

受信電力プロファイル $p_f(x, y, z)$ はダイバーの位置 (x_d, y_d, z_d) と受信アンテナ R_n での受信電力 T_n の関係を示す。したがって、受信アンテナ R_n を特定し、その受信電力 T_n を入力とすることにより、逆算的にダイバーの位置 (x_d, y_d, z_d) を推定することができる。

ダイバーの深度 z_d と受信アンテナ $R_m^{(s)}$ に対応する受信電力プロファイル p_f から、深さ z_d における xy 平面における、受信電力範囲 $B(T_m^{(s)}, \Delta T) = [T_m^{(s)} - \Delta T, T_m^{(s)} + \Delta T]$ に含まれる xy 領域 L_m を抽出する。 ΔT は受信電力マージンであり、例えば、 $\Delta T = 1 \text{ dB}$ と設定する。3つの領域 L_m はダイバーの位置 (x_d, y_d, z_d) が含まれる領域であることから、これらの領域の積集合 $L = L_1 \cap L_2 \cap L_3$ にダイバーの位置が含まれると推定され、領域 L をダイバーの存在する最終的な推定領域として決定する。

4. 位置推定法の評価

4.1. メッシュの設定

図1のモデルにおけるダイバーの位置推定では、誤差 2 m 以内を目標とする。実スケールモデルの 2 m は $n = 200$ の疑似スケールモデルにおいて 10 mm に対応する。このことから、疑似スケール実験モデルにおいて測定範囲を一辺 10 mm の、測定ポイントを中心点とする正方形メッシュに区切る。深さ z_d における xy 平面上のメッシュの数 N は、深さ z_d における xy 平面上の測定ポイントと同数の 441 個である。

測定ポイントをメッシュに置き換えるとき、受信電力プロファイル p_f において1つのメッシュが持つ情報は、メッシュの中心点である測定ポイントでの受信電力の値とメッシュの中心点の x と y の位置情報であ

る。つまり、メッシュの中心から x 方向および y 方向 5 mm に広がる正方形の範囲でその中心と等しい電力を受信するとみなす。このようなメッシュの設定により、測定ポイントの受信電力は測定ポイントの周辺 5 mm の範囲の受信電力を代表していると考えられる。

4.2. 各メッシュに対する位置推定評価法

受信電力プロファイルには、ダイバー位置 (x_l, y_l, z_d) に対する 9 つの受信アンテナ R_n における受信電力 T_n が記録されている。ダイバー位置を自然数 I で表すことにし、この位置に対する受信電力セットを $\{T_n(I)\}$ と表記する。 $n = 1, 2, \dots, 9$ とする。いま、ダイバー位置 I をブランドして、記録されている受信電力セット $\{T_n(I)\}$ のみを用いて、3.2 節の手順に従い、ダイバー位置を推定する。すなわち、ダイバーが位置するのは、ダイバーが存在する可能性があるメッシュから構成される領域 L 内部であると推定する。このとき、領域 L を構成するメッシュの数を $C(L)$ と定義する。 $C(L)$ が取り得るのは非負整数 $0, 1, 2, \dots$ である。

以上は、1 つのダイバー位置 I に関連した受信電力セット $\{T_n(I)\}$ を用いた場合であった。この推定を深度 z_d に対して受信電力セットを変えながら実施する。つまり、深度 z_d における測定ポイントの数、すなわち、メッシュの数 N だけ受信電力セットに基づき $C(L)$ を評価する。このとき、 $C(L) = k$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) となる受信電力セットの数を N_k とし、比 $q_k = N_k/N$ によりダイバー位置推定の精度を見積もる。いうまでもなく、各ダイバー位置 I に対して $C(L) = 1$ となる、すなわち、推定されるメッシュの数が 1 個であることが望ましい。 $k = 2, 3, \dots$ の場合、推定領域 L は $2, 3, \dots$ 個のメッシュから構成されることになり、1 個のメッシュで推定領域 L を特定できない。なお、4.1 節のようにメッシュを設定するとき、推定領域 L には 1 個以上のメッシュが含まれるようになる。

5. 位置推定評価の結果

5.1. 受信電力マージンの効果

深度 z_d を固定し、4.2 節で述べた評価法により提案した位置推定法を評価した。深度 z_d は、 $5\text{ mm}, 10\text{ mm}, \dots, 50\text{ mm}$ の 10 通りとし、受信電力マージンを $\Delta T = 1\text{ dB}$ と設定した。このとき、推定領域 L を構成するメッシュの数 $C(L)$ は 1 から 5 までの整数を示した。表 1 に各深度の受信電力セットの総数 N に対する特定の数 k を示す $C(L)$ の個数 N_k の割合 q_k を示す。表 1 から、例えば、深度 $z_d = 45\text{ mm}$ におけるすべて位置入力 I のうち 93.4% が $C(L) = 1$ となることがわかる。

$C(L) \geq 2$ となる入力位置 I に対しては、その位置で計測される $T_m^{(s)}$ に対応する受信電力範囲 $B(T_m^{(s)}, \Delta T)$ を受信する領域 L_m がラテラル波領域まで含まれるため、直接波領域で機能した受信電力マージン ΔT の値を選択したのでは対応できない。その対策としては、 ΔT の値を 0.5 dB に変更すればよく、このとき、 $C(L)$ の値は最大 3 であり、 $C(L) = 1$ となる割合 q_1 はすべての深度で 96% 以上となった。 ΔT の値を減じることは $C(L)$ の値を小さくする効果、すなわち、推定メッシュを限定できるという傾向が見いだせる。

メッシュで区切った位置推定システムの評価では、測定ポイントの位置 I を用いて受信電力プロファイル

を参照し、受信電力が大きい 3 つの受信アンテナ $R_m^{(s)}$ を特定し、その受信電力 $T_m^{(s)}$ を得る場合、 $\Delta T = 0\text{ dB}$ としたときに $C(L) = 1$ となる割合 q_1 がすべての深度で 100% になる。これは、例えるなら機械学習において、教師データで教師データを試験することに等しい。実際の位置推定では、受信プロファイルと全く同じ位置 (x, y, z) での受信電力を予め得られることはない。

本位置推定システムに受信電力マージン ΔT というパラメータを持たせたのは、海水の濁りによる減衰や波の影響などに対応する柔軟性をもたせるためである。例えば、実際の位置推定において何らかの原因で 0.8 dB 減衰してしまった受信電力で位置推定をするとき、 1.0 dB の誤差を許容する位置推定システムを作成すればダイバーの位置推定は達成される。

また、システムは 2 m の誤差を達成するためにメッシュを設定したが、実際は測定ポイントにダイバーが存在するかどうかということしか判定できない。測定ポイントの間隔を無限に細かくすることが理想だが、実用的には実現は不可能である。このため、既存受信電力プロファイルの補間または電磁界シミュレーションによる受信電力プロファイルの生成が有効である。

5.2. エラーメッシュ

位置推定システムにとって、受信電力プロファイルが等方的な受信電力分布となっていることが理想的だが、実験により得られた受信電力分布はダイポールアンテナの指向性等により等方的な角度分布でない。これにより、本来推定すべき位置のメッシュと連結せず、本来から離れた位置のメッシュを推定することがある。以降、そのようなメッシュをエラーメッシュと呼ぶ。

電力マージン $\Delta T = 1\text{ dB}$ と設定したとき、 $C(L) \geq 2$ を出力した入力位置 I は 440 カ所であった。このうち 87 カ所の入力位置 I に対して、メッシュ同士が連結しない出力があった。図 5 に一例を示す。この例では入力位置 I を $x = -50\text{ mm}, y = 180\text{ mm}, z = 5\text{ mm}$ と選択したとき、推定領域 L として、ダイバーが本来存在するメッシュの他に、 $x = -30\text{ mm}, y = 90\text{ mm}, z = 5\text{ mm}$ のエラーメッシュも推定された。

表 1 深度 z_d における、受信電力セットの総数 N に対する $C(L) = k$ となる受信電力セットの数 N_k の比 $q_k = N_k/N$

	$k=0$	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$
5mm	0	94.1	5.4	0.5	0	0
10mm	0	94.6	5	0.5	0	0
15mm	0	93.9	5.9	0.2	0	0
20mm	0	90.9	7.9	1.1	0	0
25mm	0	87.3	11.8	0.9	0	0
30mm	0	85.9	12.5	1.6	0	0
35mm	0	90.2	7.7	2	0	0
40mm	0	87.5	9.5	2.5	0.5	0
45mm	0	88.2	7.5	2	1.8	0.5
50mm	0	87.5	9.1	2.7	0.7	0

(単位：%)

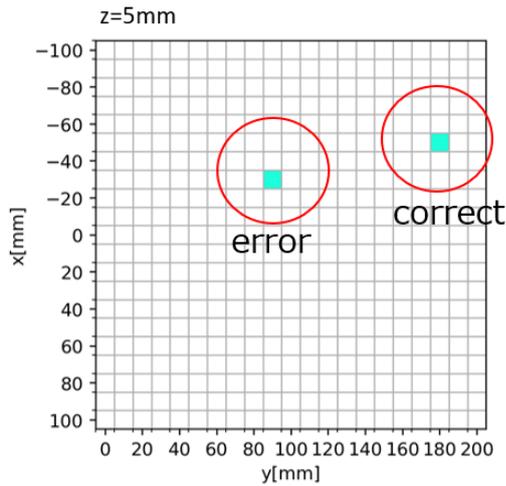


図5 $x = -50$ mm, $y = 180$ mm, $z = 5$ mmでの受信電力セットを選択したときの推定領域 L が本来と離れた位置に推定される現象の例

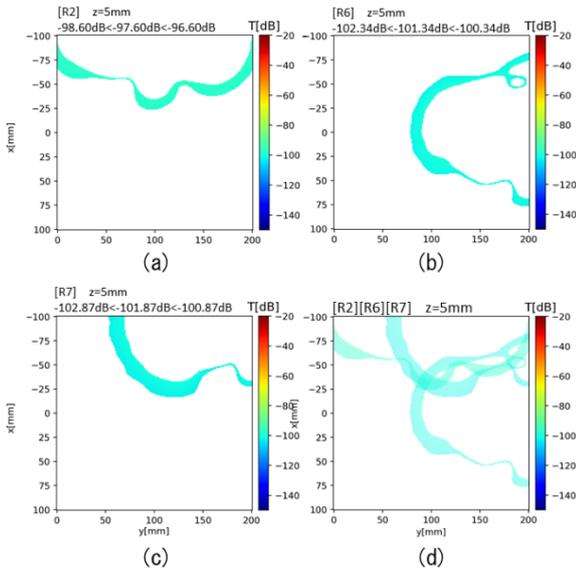


図6 $x = -50$ mm, $y = 180$ mm, $z = 5$ mmでの受信電力セット (1mm 補間) に対する各受信アンテナでの推定存在領域 L_m (a) L_1 (b) L_2 (c) L_3 (d) $L_1 \cup L_2 \cup L_3$

推定領域 L を構成するメッシュの一部が本来と離れた位置に推定される原因を探るため、図6に3.2節の位置推定システムのプロセスを可視化した。可視化にあたって、受信アンテナ $R_m^{(s)}$ の受信電力範囲 $B(T_m^{(s)}, \Delta T)$ に対する領域 L_m を連続的に描画するために、受信電力プロファイルに3次スプライン補間を適用し、1mm間隔で表示できるようにした。補間によって、4.1節で述べたメッシュは一辺が1mmの正方形になり、連続した受信電力分布に近い可視化が期待できる。図6(a), (b), (c)に入力位置 I を $x = 50$ mm, $y = 180$ mm, $z = 5$ mmと選択したときの位置推定に使用した受信アンテナ $R_m^{(s)}$ に対する推定存在領域 L_m を示す。図6(d)にはそれらの和集合 $L_1 \cup L_2 \cup L_3$ を可視化した。図6

(b)に示される L_2 は、おおよそ帯状に分布しているが、 $x = 50$ mm, $y = 180$ mm付近で輪のように飛び出している部分が観測される。入力位置 I に選択した点 $x = 50$ mm, $y = 180$ mm, $z = 5$ mmはこの飛び出した部分に存在し、受信アンテナ $R_2^{(s)}$ に対応する $B(T_2^{(s)}, \Delta T)$ 範囲内の電力を受信する領域 L_2 には、エラーメッシュの中心 $x = -30$ mm, $y = 90$ mm, $z = 5$ mmの測定ポイントが含まれる。このようにして、 L_m が帯状に分布していないときに、 $L = L_1 \cap L_2 \cap L_3$ の操作により本来と離れた位置にエラーメッシュが出力される。

5.3. エラーメッシュを出力しやすい位置

分散エラーメッシュが出力された全ての入力位置 I のうち、 $|x| \leq 20$ mmかつ 100 mm $\leq y \leq 140$ mmの範囲内にあるものが46カ所であった。つまり、エラーメッシュを出力するダイバー位置 I の87カ所のうち52%が上記の x, y の範囲内にある。すなわち、この領域にダイバーが存在したとき、エラーメッシュが出力しやすい。そして、この範囲内に入力位置 I を設定したとき、 x 軸対称にエラーメッシュが推定されやすい。図7に1mm間隔で補間した受信電力プロファイルを使用したときの位置推定システムの動作を可視化した。入力位置 I は $x = 10$ mm, $y = 110$ mm, $z = 10$ mmとした。図7(a), (b), (c)に選択された受信アンテナに係わる推定領域 L_m を示す。図7(d)には、それらの和集合 $L_1 \cup L_2 \cup L_3$ を可視化した。図から、楕円状の L_1 が $L_2 \cap L_3$ の領域を横断することで、 x 軸に関して対称に2カ所の推定領域 L を形成していることがわかる。

図8に特定の領域にダイバーが存在するとき本来と離れた位置でエラーメッシュが推定される原因を表すモデルを示す。受信アンテナ $R_2^{(s)}$ と $R_3^{(s)}$ の推定存在領域 L_2 と L_3 により y 軸方向に帯状に伸びる領域 $L_2 \cap L_3$ が形成され、楕円状の領域 L_1 が領域 $L_2 \cap L_3$ を横断することによって推定領域 $L = L_1 \cap L_2 \cap L_3$ が本来と離れた位置に推定される。この領域にダイバーが存在するとき使用される受信アンテナ $R_m^{(s)}$ として R_4, R_5, R_6 が選択される傾向にある。

5.4. 4つの受信アンテナによるエラーメッシュ除去

エラーメッシュを回避する方法として、4番目に強い受信電力を受信する領域 L_4 を受信電力プロファイルから抽出し、ダイバーが存在する可能性のある4つの $L_{m'}$ ($m' = 1, 2, 3, 4$)の積集合 $L = L_1 \cap L_2 \cap L_3 \cap L_4$ として最終的なダイバーの推定領域を決定する方法が考えられる。実際に、受信アンテナ $R_m^{(s)}$ および受信電力 $T_m^{(s)}$ を設定し検証したところ、エラーメッシュを出力するダイバー位置 I は87カ所から8カ所に減少した。このとき、 $C(L)$ は全ての入力位置 I に対して1から4までのいずれかの整数を示した。以上から、位置推定に使用する受信アンテナを4つに増やすことによりエラーメッシュを減らす効果があることがわかる。

位置推定に使用する受信アンテナの数を増やすことは、図8のモデルにも有効である。位置推定に使用した受信アンテナの数が3つの場合では、 -20 mm $\leq x \leq 20$ mm, かつ 100 mm $\leq y \leq 140$ mmの範囲内にある I が46カ所でエラーメッシュを出力していたが、使用する受信アンテナを4つにした場合、上記の範囲内に入力位置 I があったときはエラーメッシュを出力し

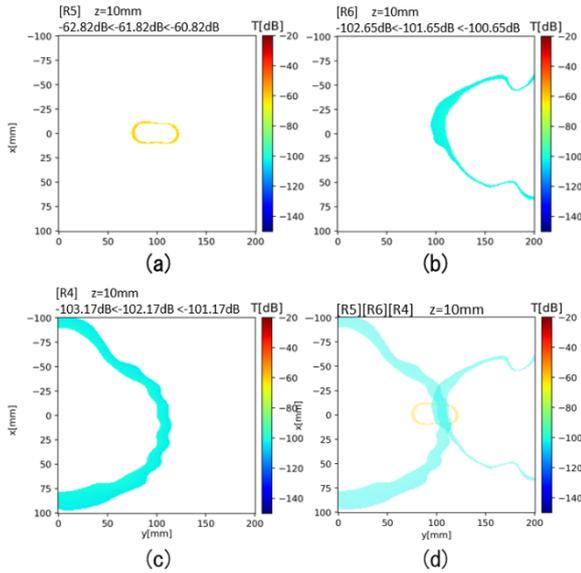


図7 $x = 10\text{mm}$, $y = 110\text{mm}$, $z = 10\text{mm}$ での受信電力セット (1mm 補間) に対する各受信アンテナでの推定存在領域 L_m (a) L_1 (b) L_2 (c) L_3 (d) $L_1 \cup L_2 \cup L_3$

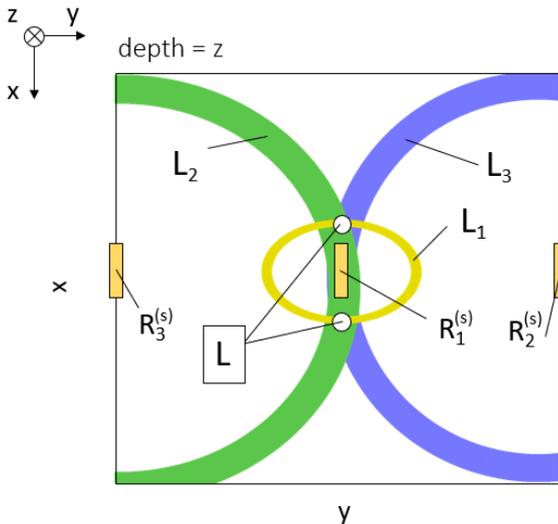


図8 x 軸対称にエラーメッシュが推定される受信電力分布モデル

なかった. このように, 使用する受信アンテナの数を 3 から 4 に増やすことで, エラーメッシュを除去できる効果が見いだせる.

6. まとめ

本稿では, 事前に与えられた離散的な受信電力プロファイルに基づく海中ダイバーの位置推定法に対して, 疑似スケールモデル実験で得られた測定値を用いて試験した結果を紹介した. 深度計によりダイバーの深さが既知であるとし, 受信電力に 1 dB のマージンを設定した場合, 試みたすべての深さで 85 % 以上の割合で推定位置メッシュが 1 カ所に限定できることを明らかにした. 疑似スケールモデル実験による非等方的な受信電力分布プロファイルを位置推定システムに用いたと

き, 本来位置から離れた区画も推定されることを示した. このような区画の除去には, ダイバーの存在する可能性のある区画を限定すればよく, 受信電力マージンを小さくする, または, より多くの受信アンテナを使用することで対応できることを明らかにした.

今後の課題としては, ラテラル波領域と直接波領域の区別や受信電力マージンの取り方を評価すること, あらゆる送受信アンテナの向きへの対応が挙げられる.

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 20K04496 による.

文献

- [1] 警察庁生活安全企画課, 令和元年における水難の概況, https://www.npa.go.jp/publications/statistics/safetylife/chiiki/R01suinan_gaikyou.pdf
- [2] X. Che et al., "Re-evaluation of RF electromagnetic communications in underwater sensor networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol.48, no.12, pp.143-151, Dec. 2012.
- [3] 陳 他, "電波の海中応用へのアプローチ," 信学技報, A・P2016-92, pp.25-28, Sep. 2016.
- [4] 高橋 他, "海中位置推定へのアプローチ," 信学技報, A・P2016-188, pp.59-62, Mar. 2017.
- [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水中電磁界," 信学技報, A・P 2016-125, pp.11-16, Dec. 2016.
- [6] H. Sato et al., "Dipole antenna with sheathed-cover for seawater use," *Proc. ISAP 2017*, POS1, 1376, Phuket, Thailand, Oct. 2017.
- [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, A・P2018-5, pp.23-28, Apr. 2018.
- [8] S. Xu, et al., "Design of sheathed dipole antennas for seawater use," 2019 信学ソ大, 通信 1, ABS-1-13, pp. S-54 - S-55, Sep. 2019.
- [9] R. Kato et al., "Investigation of a 3D undersea positioning system," *Proc. ICECOM 2019*, Dubrovnik, Croatia, Oct. 2019.
- [10] 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 パタン計測," 信学技報, A・P 2019-61, pp.73-78, Aug. 2019.
- [11] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, 4th ed., Wiley, 2016.
- [12] 石井 他, "浅海域における海中電磁波信号の海面受信に関する考察," 信学技報, A・P2019-143, pp. 7-12, Dec. 2019.