

FDTD 法による電磁界解析を用いた海中位置推定システムの検討

課題責任者

高橋 応明

千葉大学フロンティア医工学センター

著者

阪谷 新之助*¹, 高橋 応明*²

*¹ 千葉大学融合理工学府, *² 千葉大学フロンティア医工学センター

キーワード: FDTD 法, 海中電磁波伝搬, 位置推定, 機械学習, 疑似スケールモデル

1. はじめに

著者らは海水中における電波利用の 1 つとして水難救助の補助技術を検討している。水難事故は世界中で発生しており、日本では毎年約 1400 件の水難事故が発生している[1]。特に海難事故において、救助を行う際はダイバーの活躍が期待されるが、海中の浮遊物や低体温症など様々な危険が伴う。そこで、海中におけるダイバーの位置の特定によって救助活動を支援することを想定し、kHz 帯の電波を用いた海中位置推定システムの検討を JAMSTEC、東北大学、新潟大学などとの共同研究として行っている。本研究の提案システムでは、ダイバーに装備された送信アンテナ (Tx) の位置を海面に浮かべた複数の受信アンテナ (Rx) の受信電力強度 (RSS [dB]) を用いて推定する。著者らは実環境におけるこの提案システムの設置と回収を容易にするために 12 個の Rx を単一の受信装置としてまとめる手法を提案した[2]。これによって、海面に受信装置を一台投入するだけでダイバーのモニタリングを可能とすることを目指している。

提案システムにおける位置推定アルゴリズムの実装には機械学習モデルの一つであるサポートベクトル回帰を利用しており、実環境で十分に有効な推定精度を得るには学習させる訓練データセットの充実が必須である。しかし、海上を含んだ海モデルの kHz 帯電波を解析するには膨大な計算時間が必要である。そこで、計算時間を削減するために、実際の海洋における電波伝搬実験を水槽サイズで行える手法である疑似スケールモデル[3]を利用した。この疑似スケールモデルを有限積分法や FDTD 法などの電磁界シミュレーションで実装すると、実スケールの場合よりも少ない時間ステップ数で計算が可能である。

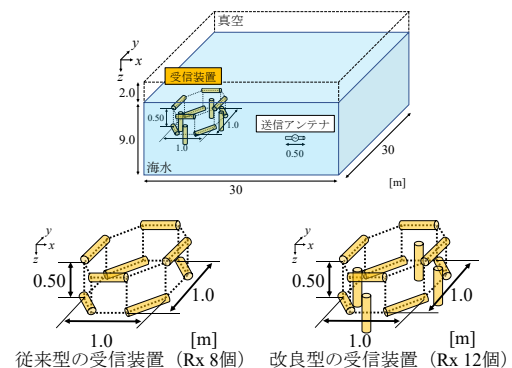
昨年度の検討では、8 個の Rx で構成された受信装置について「疑似スケールモデルの妥当性調査」を行い、疑似スケールモデルで作成した訓練データセットを使用して、実スケールモデルで作成したデータセットの位置推定が可能かを検討した。本検討では、改良型である 12 個の Rx で構成された受信装置[2]について同様の調査を行い、8 個の Rx で構成された従来型の受信装置との比較を行った。

疑似スケールモデルの実装には有限積分法が計算可能な CST Studio Suite (Dassault Systèmes) を使用し、実スケールモデルの実装には FDTD 法のプログラムを使用して地球シミュレータ上で計算を実行した。

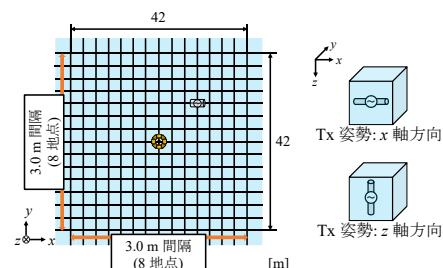
2. 解析モデルとデータセットの作成

図 1 に解析モデルの俯瞰図と平面図を示す。解析モデルは真空と海水 ($\epsilon_r = 80$, $\sigma = 4.0 \text{ S/m}$) で構成されている。改良型の受信装置は独立した 12 個のダイポールアンテナ (全長 0.50 m) で構成され、各アンテナは図 1(a)に示すように八角柱の辺上に配置される[2]。Tx は 1 個のダイポールアンテナ (全長 0.50 m, 動作周波数 10 kHz) であり、x, z 軸方向の 2 姿勢で海中に配置される。

図 1(b)に位置推定に用いるデータセットのアンテナ配置を示す。受信装置はその八角柱の幾何中心を水深 0.5 m の xy 座標平面の原点 (中心) に配置される。Tx はある水深において図 1(b)の格子点上各 3.0 m 間隔の計 225 地点に配置される。疑似スケールモデルで作成される訓練データセットには水深 2.0 ~ 7.0 m 整数値のデータを使用し、実スケールモデルで作成される試験データには水深 4.5 m のデータを使用した。



(a) 俯瞰図



(b) 平面図

図 1 解析モデル (実スケール)

疑似スケールモデルでは図1の寸法は1/100倍、動作周波数は100²倍の100 MHzに設定された。また、実スケールモデルの試験データは疑似スケールモデルにおける水深4.5 mのデータと最大値が等しくなるように正規化され(約15 dBを加算)、さらに計測のダイナミックレンジを考慮してRSS下限値を-150 dBとする前処理を行った。

3. 実スケールにおける受信装置の比較と評価

著者らの疑似スケールモデルを用いた検討では、提案システムのサービス範囲はRSS下限値に依存していた[2]。そこで、図2にRSS下限値(-150 dB)以上になるRSS値をもつRxの個数ヒートマップを示す。図2において、Rxが1個以下の領域では原理的にTxの位置推定は不可能であるが、Rxが3個以上の領域では三点測位と同様に安定した位置推定結果が期待できる。図2(b)と図2(c)を比較すると、実スケールモデルと疑似スケールモデルでRSS下限値以上のRx個数分布が異なる。原因としては、疑似スケール則による電界の増大[3]や、Txから海面上へ垂直に伝搬した後に海面付近を伝搬するラテラル波[4]の影響などが考えられる。また、図2(a)と図2(b)を比較すると、従来型よりも改良型の方がRSS下限値以上のRx個数が多い。これは、図1(a)に示すように、改良型は従来型に4個のRx(姿勢:z軸方向)を追加したものである。

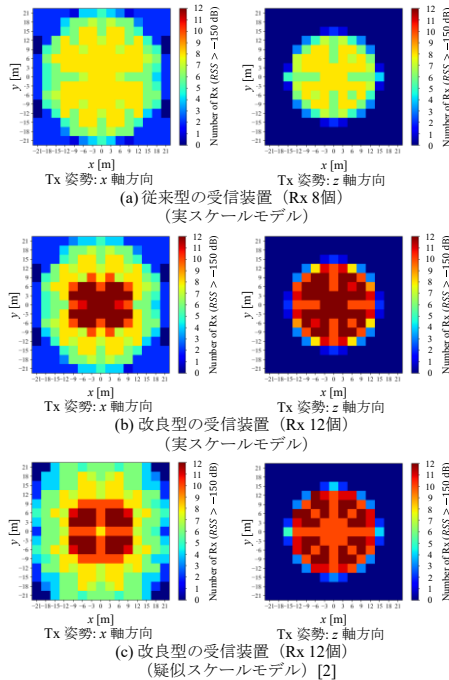


図2 Rxの個数ヒートマップ(水深4.5 m)

実スケールモデルの位置推定誤差を図3に示す。訓練データ作成には疑似スケールモデルを使用し、位置推定手法には著者らの提案手法[2]を使用した。目標誤差は、成人が手足を広げた際の範囲を考慮し2.0 m未満とした。改良型では、Tx姿勢がx軸方向の場合、原点が中心の半径15 mの円内の大部分、Tx姿勢がz軸方向の場合、原点が中心の半径12 mの円内の大部分で目標誤差を達成できた。また、従来型よりも改良型の方が目標誤差達成地点が多

かった。原因としては、改良型のRx追加によってRSS下限値以上のRx個数が増加し、位置推定に利用できるRSSの情報が増加したためと考えられる。

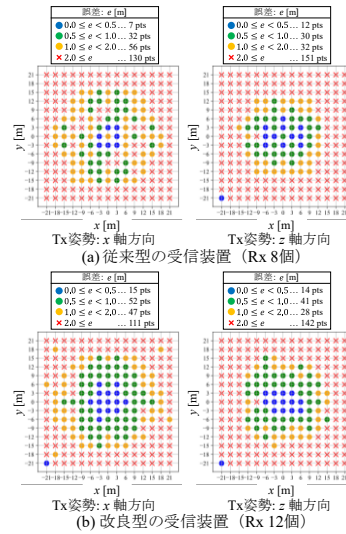


図3 実スケールモデルの位置推定結果(水深4.5 m)

4. まとめと今後の展望

本検討では実スケールモデルにおける提案システムの場合、従来型と改良型の受信装置を比較するために、地球シミュレータを用いてFDTD法によるシミュレーションを行った。疑似スケールモデルのデータセットを使用した実スケールモデル中の位置推定は原点が中心の半径約12 mの円内の大部分で可能であった。また、実スケールモデルにおいて、従来型よりも改良型の方が位置推定性能に優れていた。今後の展望としては、目標誤差未達成地点を改善するために位置推定手法の改良を進める予定である。

謝辞

本研究は科研費(22H01485)の助成、JST次世代研究者挑戦的研究プログラムJPMJSP2109の支援を受けた。

文献

- [1] 警察庁生活安全局生活安全企画課, “令和6年における水難の概況”, https://www.npa.go.jp/publications/statistics/safetylife/r06_suinan_gaikyou.pdf, Jun. 2025.
- [2] S. Sakaya and M. Takahashi, “Investigation of VLF Electromagnetic Undersea Positioning System Using Receiving Antenna Array in a Simulation,” *IEEE Access*, Vol. 13, pp. 133958-133970, Jul. 2025.
- [3] 石井望, 高橋応明, 陳強 “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.
- [4] R. Kato, M. Takahashi, N. Ishii, Q. Chen, and H. Yoshida, “Investigation of a 3D undersea positioning system using electromagnetic waves,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 69, no. 8, pp. 4967-4974, Aug. 2020.