

# FDTD 法による海中電磁界解析を用いた 3 次元海中位置推定の検討

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\*<sup>1</sup>, 屋比久 怜\*<sup>1</sup>, 高橋 応明\*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup> 千葉大学融合理工学府, \*<sup>2</sup> 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[1]の水難事故が発生している。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、VLF 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。

著者らは海難救助を行うダイバーに送信アンテナを装備してもらい、その位置を海面に浮かべた複数の受信アンテナの受信電力強度によって推定するアルゴリズムを開発してきた。独自性として高精度な位置推定と外乱への対処を両立するために機械学習の導入を提案している[2]。しかし、実環境で十分に有効な機械学習モデルを構築す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。そこで、本研究では地球シミュレータを用いて FDTD 法 (Finite Difference Time Domain Method) による海中電磁波伝搬シミュレーションを行い、「受信電力強度データセットの作成」を行った。

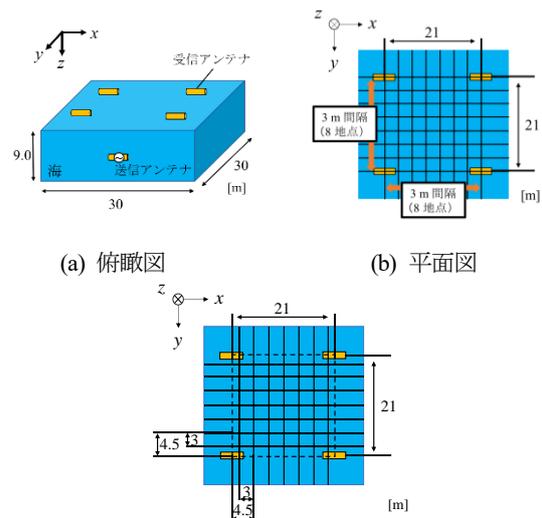
また、実際の海洋における電磁波伝搬実験を水槽サイズで行える手法として疑似スケールモデル[3]が提案されている。この疑似スケールモデルを FDTD 法による海中電磁波伝搬シミュレーションで実装するとリアルスケールの場合よりも少ない時間ステップで解析が可能である。しかし、リアルスケールモデルの解析結果と異なる出力を得てしまう危険性がある。よって本研究では「疑似スケールモデルの妥当性調査」を行うために、海中に微小ループアンテナを設置した場合について、地球シミュレータを用いたリアルスケールモデルの解析を行い、リアルスケールモデルと疑似スケールモデルの解析結果の比較を行った。

## 2. 受信電力強度データセットの作成

受信電力強度データセット (RSS[dB]) の作成のために行った電磁界シミュレーションにおける解析モデルについて、図 1(a)にその俯瞰図、図 1(b)にその平面図を示す。解析モデルは自由空間と海水 ( $\epsilon_r = 80, \sigma = 4.0S/m$ ) から

構成されている。海面に全長 2.0m の受信アンテナ、海中に全長 0.70m の送信アンテナ (動作周波数: 10kHz) をそれぞれ平行になるように配置し、共にダイポールアンテナとした。本研究では既に作成済みである受信電力強度データセット (送信アンテナを図 1(b)の格子点上各 3.0m 間隔、計 64 地点にずらしながら配置した、水深 1.0m ~ 8.0m の 8 平面、計 512 地点のデータ) に新たな訓練データを追加し、推定精度の変化を観察する。

図 1(c)に地球シミュレータを用いて作成した追加データにおける送信アンテナの配置を示す。格子点上各 3.0m 間隔、計 49 地点にずらしながら配置した、水深 2.0m, 3.0m, 6.0m, 7.0m の 4 平面、計 196 地点のデータである。この追加データは従来の訓練データ配置の隙間を等間隔に埋めるように配置されており、この追加済み訓練データを機械学習モデルに学習させることで従来の訓練データを学習させた場合よりも高い位置推定精度を期待できる。また、本研究では Python の機械学習ライブラリである Scikit-learn で実装されているガウス過程回帰を用いた位置推定アルゴリズム[2]による海中位置推定を行った。



(c) 追加訓練データの送信アンテナ配置  
図 1 受信電力強度データの作成用の解析モデル

位置推定精度の評価には図 1(c)の格子点上各 3.0m 間隔、計 49 地点にずらしながら配置した、水深 2.5m, 4.5m, 6.5m の 3 平面、計 147 地点における位置推定結果を使用

した。本研究では海中におけるダイバーの位置推定を想定している。よって送信アンテナの実際の座標と推定座標との距離を位置推定誤差として評価した。目標誤差は、成人が手足を広げた際の範囲を考慮し 2.0m 未満とした。

海中位置推定誤差分布の比較を図 2 に示す。目標誤差 2.0m 未満を達成できていない地点の数は本検討で作成したデータセットを追加することで合計 9 地点から合計 7 地点に減少した。また、全体の位置推定誤差に注目すると全体の約 83%の地点で誤差の改善が確認された。よって本研究で追加したデータセットにより機械学習モデルの推定精度が向上したと考えられる。

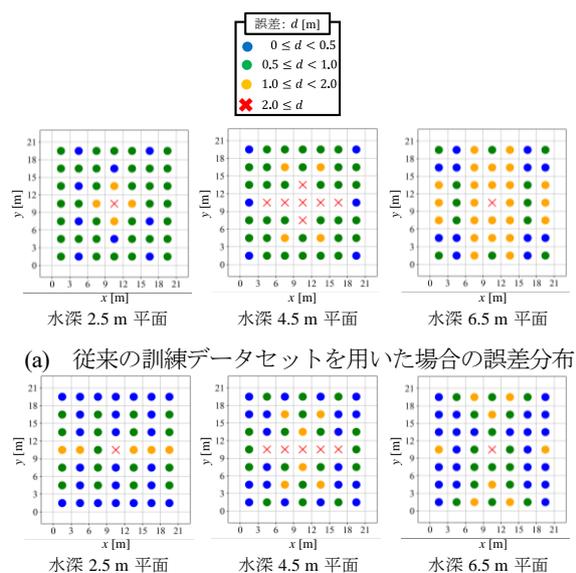


図 2 海中位置推定誤差分布の比較

### 3. 疑似スケールモデルの妥当性調査

次に疑似スケールモデルの妥当性調査のために行った電磁界シミュレーションにおける解析モデルについて、図 3(a)にその俯瞰図、図 3(b)にその平面図を示す。解析モデルは自由空間と海水 ( $\epsilon_r = 80$ ,  $\sigma = 4.0S/m$ ) で構成されている。海面に受信アンテナ、海中に送信アンテナとしてループアンテナ ( $0.30m \times 0.30m$ ) を配置し、動作周波数 10kHz とした。送信アンテナは水深 4.0m における図 3(b)の格子点上各 3.0m 間隔、計 64 地点中、左下の範囲 16 地点にずらしながら配置した。また、比較対象である疑似スケールモデルは、リアルスケールモデルである図 3 の寸法を 1/100 倍に縮小したモデルを使用した。本研究で使用した疑似スケールモデル[3]とは、スケール変換則に基づき、一様な導電媒質内での電磁界の振る舞いを実寸よりも小さい寸法で再現するモデルであり、寸法を  $1/n$  倍にした場合、導電率を変化させずに周波数を  $n^2$  倍にする。よって本研究における動作周波数は 100MHz とした。

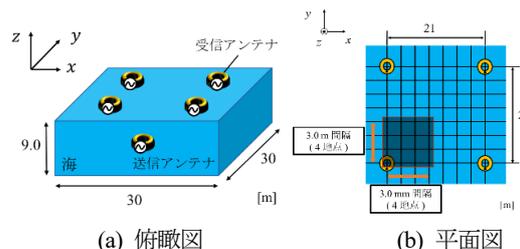


図 3 疑似スケールモデルの妥当性調査用の解析モデル

アンテナ間距離による受信電力強度の変化を図 4 に示す。リアルスケールモデル (地球シミュレータ) と疑似スケールモデルの分布を比較すると、受信電力強度は異なるが、距離に応じた減衰傾向は概ね一致していることが確認できた。受信電力強度の差の原因については、リアルスケールモデルと疑似スケールモデル共に同じ大きさの電流を送信アンテナに入力したため、スケールの小さい疑似スケールモデルの方が漏れ電流の影響を大きく受け、受信電力強度が大きくなったと考えられる。

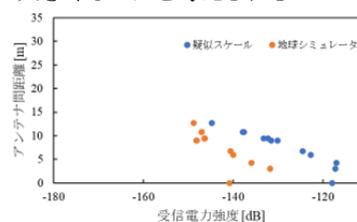


図 4 アンテナ間距離による受信電力強度の変化

### 4. まとめと今後の展望

本研究では地球シミュレータを用いて FDTD 法による海中電磁波伝搬シミュレーションを行い、「受信電力強度データセットの作成」と「疑似スケールモデルの妥当性調査」を行った。今後はハードウェアの工夫を含めたシミュレーションを行い海中位置推定システム全体の検討を進める予定である。

### 謝辞

本研究は科研費(20K04496, 22H01485)の助成を受けた。

### 文献

- [1] 警察庁生活安全局生活安全企画課, “令和 2 年における水難の概況”, [https://www.npa.go.jp/publications/statistics/safetylife/chiiki/R02suinan\\_gaikyou.pdf](https://www.npa.go.jp/publications/statistics/safetylife/chiiki/R02suinan_gaikyou.pdf), Jun, 2021.
- [2] Shinnosuke Sakaya, Masaharu Takahashi (Chiba Univ.), “Basic study of the placement and number of receiving antennas in undersea positioning”, 2022 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2022), Oct. 2022.
- [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中電磁界”, 信学技報, AP2016-125, pp.11-16, Dec.2016.