

# 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>, 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。本研究ではダイバーに装備された送信アンテナの位置を海面に浮かべた受信アンテナで得られる受信電力強度 RSS (Received Signal Strength) [dB]によって推定する手法を検討している。筆者らの従来手法[2]では海面に浮かべた複数の受信アンテナの配置と姿勢関係を常に把握する必要があった。しかし波や潮汐などによって受信アンテナの固定は難しく、設置や回収にも非常に手間がかかってしまう。そこで、直交させた 3 つのダイポールアンテナを単一の受信装置としてまとめ、各アンテナ部で得られる RSS と送信アンテナからの水深と姿勢情報をもとに送信アンテナの位置を推定する手法を検討している[3]。提案手法の実装には機械学習モデルの一つであるガウス過程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。そこで、本検討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[4]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、実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ことから上記の「受信電力強度データセットの作成」では疑似スケールモデルを採用した。しかし実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「疑似スケールモデルの妥当性評価」を行うために受信電力強度データセットにおける水深 4.5 m 平面について、地球シミュレータを用いた実スケールモデルの解析を行い、疑似スケールモデルとの解析結果の比較を行った。最後に疑似スケールモデルにおける「提案手法の位置推定結果」を示す[3]。

## 2. 受信電力強度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。位置推定に用いる受信装置は独立した 3 つ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  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸方向を向いている。送信アンテナは 1 つ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、 $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸方向の 3 姿勢で海中に配置される。図 1(b)にガウス過程回帰に用いるデータセットのアンテナ配置を示す。位置推定領域は受信装置の  $z$  軸方向ダイポールアンテナを原点に設置した場合の 1/4 平面である。地球シミュレータを用いて作成した受信電力強度データセットのうち、訓練データには図 1(b)の格子点上各 3.0 m 間隔の計 64 地点、水深 2.0 ~ 8.0 m 整数値のデータを使用し、試験データには水深 2.5, 4.5, 6.5 m のデータを使用した。また、計測のダイナミックレンジを考慮して試験データの RSS 下限値を -150 dB とする前処理を行った。さらに、計算時間を削減するために疑似スケールモデル[4]を利用した。疑似スケールモデルでは寸法を  $1/n$  倍にした場合、周波数を  $n^2$  倍に設定する。よって実際に計算を行ったモデルは寸法が  $1/100$  倍、動作周波数は  $100^2$  倍の 100 MHz に設定されている。

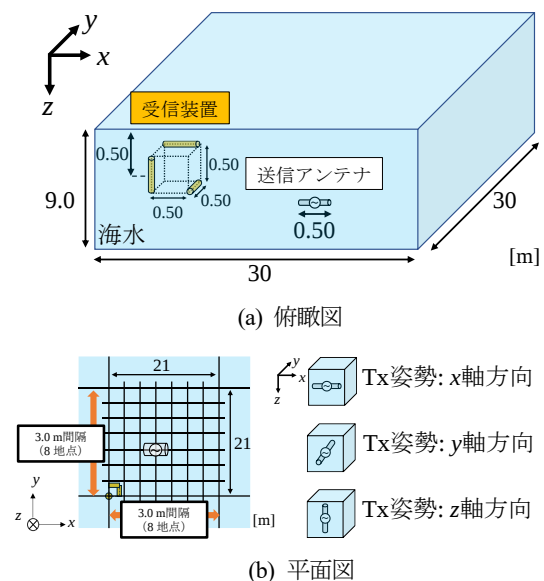


図 1 受信電力強度データセットの解析モデル

### 3. 疑似スケールモデルの妥当性評価

本検討における疑似スケールモデルの妥当性評価のために、受信電力強度データセットの水深 4.5 m 平面について地球シミュレータを用いた実スケールモデルの解析を行い、疑似スケールモデルとの解析結果の比較を行った。図 2 に疑似スケールモデルと実スケールモデルの RSS ヒートマップ比較を示す。全体的に RSS 値は実スケールモデルの方が小さいが減衰傾向は概ね一致していることが確認できた。RSS 値の差の原因については疑似スケールモデルと実スケールモデル共に同じ大きさの電圧を送信アンテナに入力しており、アンテナが大きい実スケールモデルの方が周囲の海水による減衰の影響を大きく受けたためと考えられる。

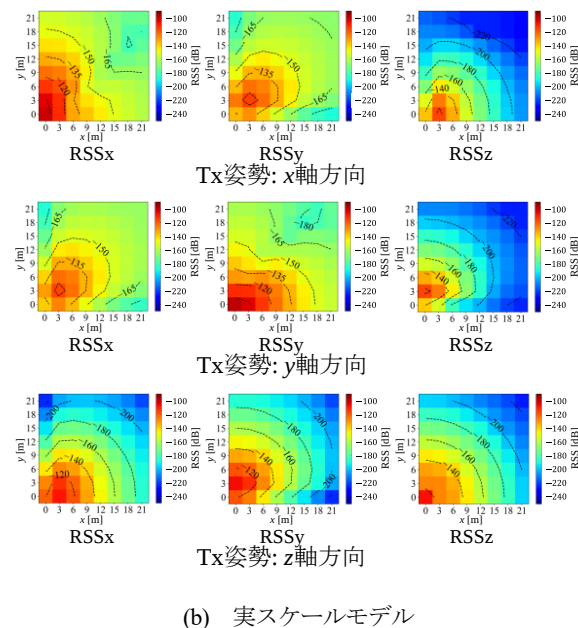
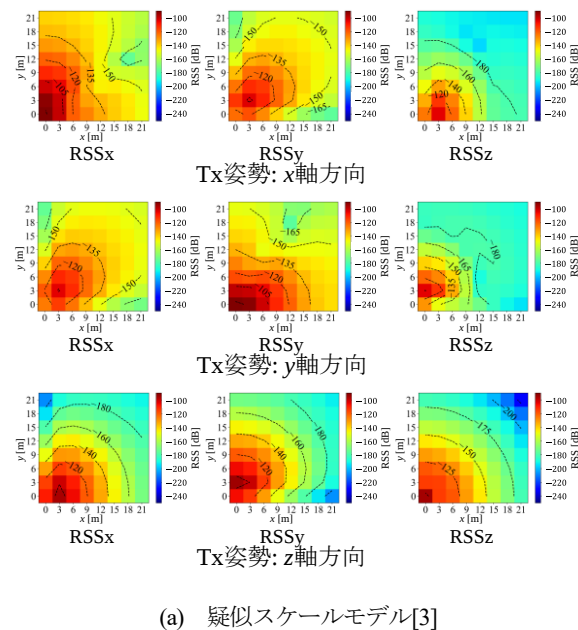
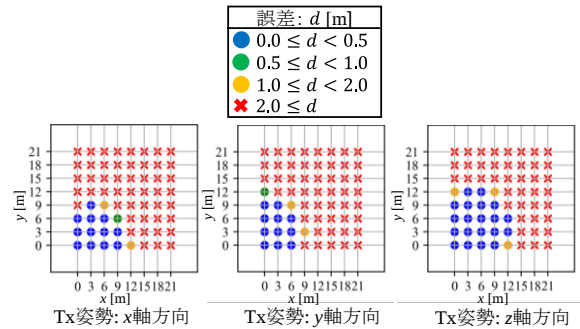


図 2 RSS ヒートマップ比較 (水深 4.5 m)

### 4. 提案手法の位置推定結果

試験データである水深 4.5 m 平面について、提案手法[3]を用いた場合の位置推定誤差を図 3 に示す。本検討での目標誤差は、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。提案手法では試験データにおける送信アンテナの全水深と全姿勢において受信装置を中心とした半径 6 m 程度の円内で目標誤差が達成可能であることを確認した[3]。図 2(a)より、目標誤差未達成の領域は RSS 下限値 (-150 dB) 以下の領域に対応していると考えられる。



### 5. まとめと今後の展望

本検討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評価」を行った。今後の展望としては、目標誤差未達成の領域が RSS 下限値 (-150 dB) 以下の領域に対応していることに注目し、位置推定精度を確保しつつ RSS 下限値以上の領域を広げられるような受信アンテナ配置の最適化を行う。また、海中無線通信などの検討も始める予定である。

### 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 4 年における水難の概況”, [https://www.npa.go.jp/publications/statistics/safetylife/r04suin\\_an\\_gaikou.pdf](https://www.npa.go.jp/publications/statistics/safetylife/r04suin_an_gaikou.pdf), Jun, 2023.
- [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] Shinnosuke Sakaya, Masaharu Takahashi (Chiba Univ.), “Basic study of undersea position estimation system using a single receiving device”, IEICE Communications Express, Vol.X13-B, No.6, pp.1-4, Jun.2024. DOI: 10.23919/comex.2024SPL0005
- [4] 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.