

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04496

研究課題名（和文）海中電波利用技術の確立

研究課題名（英文）Technology Development of Radio Wave in Sea Water

研究代表者

陳 強 (Chen, Qiang)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：30261580

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高損失媒質の海洋における電波利用の要素技術開発として、海中の電波伝搬特性（周波数特性、数値モデル）および海水中で動作するアンテナの設計方法を明らかにし、低周波電磁波を利用した海中測位法を開発した。特に、海水とアンテナ間の絶縁構造を取り入れたハーフシースダイポールアンテナ及びハーフシースループアンテナの動作解明と設計・測定法の開発や、疑似スケールモデル実験による海水中における電波伝送効率測定法の開発、海面ラテラル波を考慮した海中測位アルゴリズムの開発と改良などに多くの研究成果を上げており、多くの研究論文と学会発表を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海水の電波伝搬の損失が極めて高いため、海中の電波利用が非常に難しいとされている。近年、高周波デバイス技術や、高速な計算機を用いた電磁界シミュレーション技術などの著しい発展により、高損失媒質の海洋における電波利用を再度本格的に検討すべき時期となったと認識している。我々研究グループでは、資源、安全・安心をキーワードとする海洋における電波技術について研究を再訪し、その研究の裾野を広げることとした。海洋国家である日本では、資源調査、資源管理は国策として推進されているなか、本研究成果の海中センサーネットワーク、船舶監視、津波監視などへの展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, to develop the technologies for radio wave applications in highly lossy media, specifically in the ocean, we clarified the wave propagation characteristics in sea water, and the design methods for antennas operating in sea water. We developed an underwater positioning method using low-frequency radio waves. Particularly, we achieved significant research results on the operation principles and design/measurement methods of the half-sheath dipole antennas and the half-sheath loop antennas, which incorporate an insulation structure between seawater and the antennas. We also developed a measurement method for evaluating the propagation loss in sea water using pseudo-scale model experiments that consider lateral waves on the sea surface. Additionally, we made progress in the development and improvement of underwater positioning algorithms taking into account lateral waves. These accomplishments have been published in numerous journal and conference papers.

研究分野：電磁波工学

キーワード：電波 海水 アンテナ 高損失媒質 位置推定 電波計測 アンテナ計測 電波の海中利用

1. 研究開始当初の背景

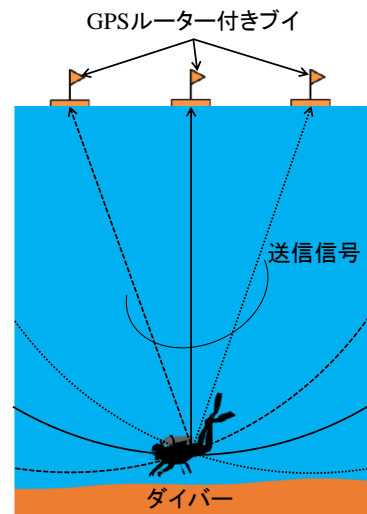
2014年4月の韓国フェリー転覆事故をはじめ、痛ましい水難事故が発生している。我が国でも年間約1500件の水難事故発生が報告されている。ダイバーによって多くの人命が救助される一方で、捜索遅れで命を落とす人も多い。このため、海中測位法の確立が必須と考えられる。

海中測位法で最も実用化されているのは音波を用いたソナーであるが、音波の伝播速度は海流や海水温の影響で大きく変化し、ダイバーと遭難者の絶対位置を高精度で知ることは困難である。減衰の小さい可視光を用いる方法もあるが、濁りによる測定距離の不安定さや浮遊物による散乱が大きいという問題がある。これに対して、電磁波は海中での減衰が大きいことから、これまで海中測位に用いられることはなかった。しかしながら、低周波に限れば減衰量は音波と大差なく(0.5 dB/m@1 kHz)、海流や海水温の変化にも強いという利点がある。

低周波電磁波の利点を生かし、GPS技術と組み合わせればダイバーの絶対位置を素早く知るための測位法が構築でき、水難事故の発生から救助までの時間を短縮することが期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、kHz帯の低周波電磁波による新たな海中測位法を構築することを目的としている。本研究で構築する測位法の概要を図1に示す。ダイバーが海面下におり、海面の変動が小さいことを想定する。まず、ブイに付けた複数のGPSルーターを一定の間隔で海面上に散布する。次に、GPSルーターへダイバーの持つ送信機から低周波信号を送る。GPSルーターに取り付けられた受信機において、低周波電磁波信号を受信し、その受信レベルからダイバーの位置を推定する。理想的には、ダイバーの位置は、中心がGPSルーター、半径が受信レベルに応じた球面上に限定される。このことから、三つのルーターでダイバーからの信号を受信することで、三つの球面の交点としてダイバーの位置を特定できる。GPSシステムによりGPSルーターの絶対位置は既知となるので、ダイバーの絶対位置が割り出せることになる。



3. 研究の方法

本研究では、高損失媒質の海洋における電波利用の要素技術開発として、海中の電波伝搬特性(周波数特性、数値モデル)および海水中で動作するアンテナの設計方法を明らかにし、低周波電磁波を利用した海中測位法を開発した。

図1 海中ダイバーの位置推定

4. 研究成果

本研究では、(1)海中アンテナ設計法の確立、(2)海中電波測位法の確立、及び(3)擬似スケールモデルによるアンテナ設計・測定法の三つのサブテーマで実施しており、これらのテーマの研究結果以下の通りである。

- (1) 海中アンテナを設計するため、損失媒質中のアンテナによる電波伝搬の実験と電磁界シミュレーションを行い、妥当性を検証した。また、海水とアンテナを絶縁するシース付きダイポールアンテナやループアンテナ、及びフェライト挿入ループアンテナの各種アンテナを作成し、損失媒質中のアンテナ入力インピーダンスを測定し、解析的にインピーダンスを求める式を導出した。さらに、図2のように、設計したアンテナの損失媒質中の電波伝搬の実験を行い、アンテナの送受信伝搬特性を実験により検証した。これらの結果から、ダイポールアンテナでは、ハーフシース構造にしてダイポールの先端を露出させることで送受信ダイポールアンテナ間の結合が強くなることが分かった。また、フルシースのループアンテナは、より強い磁界結合が実現でき、送受信ループアンテナ間の結合が大きくなることも分かった。以上のことから、海中アンテナにシースを装荷することによるアンテナ間結合増加の有効性

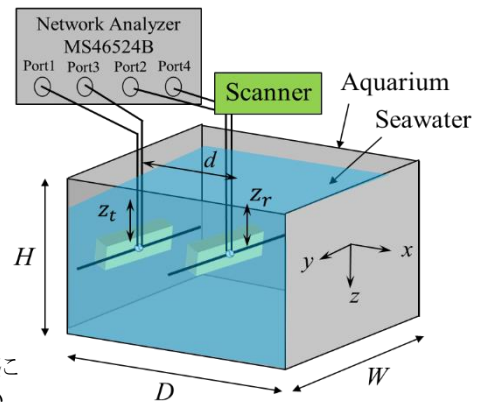


図2 水槽内伝搬特性の測定

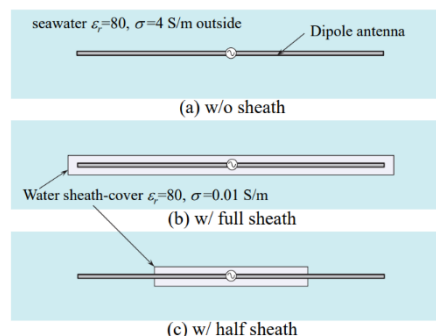


図3 シース付きダイポール

を明らかにし、フルシーズ付きループアンテナによって海中アンテナの高感度化を達成することができた (図 3)。

- (2) 海中のアンテナ位置推定について、海面のラテラル波を考慮した海中アンテナ推定アルゴリズムを開発し、機械学習を用いたアルゴリズムの改良を行なった。海水による電波の減衰が極めて大きいため、送受信アンテナ間の直接波が非常に弱く、一方、図 4 に示すように、伝搬損失の小さい海面に沿って伝搬するラテラルは、相対的に伝搬損失が小さく、ラテラル波の受信強度が強いことがある。その結果、従来のように伝搬位相 (時間の遅延) により、送受信間の距離を推定することが困難である。本研究では、水中の圧力情報から変換した海面からの深度情報を利用することを前提とし、ラテラル波の伝送を考慮した海中位置の水平面 2 次元位置推定法を提案した。また、位置推定について、機械学習を用いたアルゴリズムの検討を引き続き行ない、受信電力強度の低いエリアにおいて、推定精度が劣化する問題について詳細な検討を行った。その結果、優位性が同じ複数の推定候補が存在することに因って、位置推定精度が劣化していることが判明した。そこで、受信アンテナの角度特性の改善や配置の工夫で推定精度の改善ができた。さらに、従来のダイポールアンテナをループアンテナに変更し位置推定制度を検討した。その結果、ダイポールアンテナと比べ、アンテナの角度特性がほぼ一定であるため、位置推定のアルゴリズムにおいて、角度特性を補正しなくても、位置推定がほぼ同程度の精度でできることがわかった。図 5 に水深 4 メートルの深さで得られた位置推定の精度を示す。すべての場所において、位置推定の誤差を 2 メートル以内に抑えることができた。

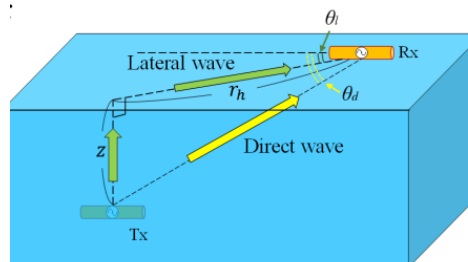


図 4 直接波とラテラル波

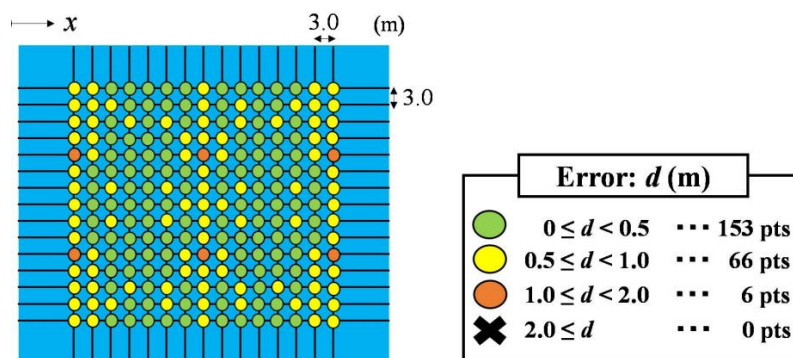


図 5 水深 4m の位置推定精度

- (3) 海中電波の伝搬損失を減らすために、kHz 帯の低周波を利用される。低周波で、大きなアンテナを用いて、スケールの大きい海中で電波の伝搬実験の実施は非常に困難である。そこで、海水の導電性に着目し、海水中での疑似スケールモデル法を提案した。図 6 に示すように、 $n$  倍のスケールモデルでは、アンテナ長や伝送距離などの寸法を  $1/n$  にし、周波数が  $n^2$  にすれば、電波の伝搬損失が同じである。この手法を利用すれば、小形の水槽で、より高い周波数での伝搬実験により、実環境の伝搬損失を測定できるようになった。図 7 に海中電波伝搬損失の測定システムを示す。2MHz の海中測定モデルに対する  $1/200$  疑似スケールモデルを想定し、400MHz 帯における水槽内測定を実施するために、180 度ハイブリッド結合器、2 本のセミリジッドケーブルを利用した部分シーズ付ダイポールアンテナの試作を行った。海水と同程度の濃度の食塩水内で、部分シーズ付ダイポールアンテナを同一偏波対向させて、ダイポールアンテナ間の距離を変化させ、その間の伝送特性を測定した。その結

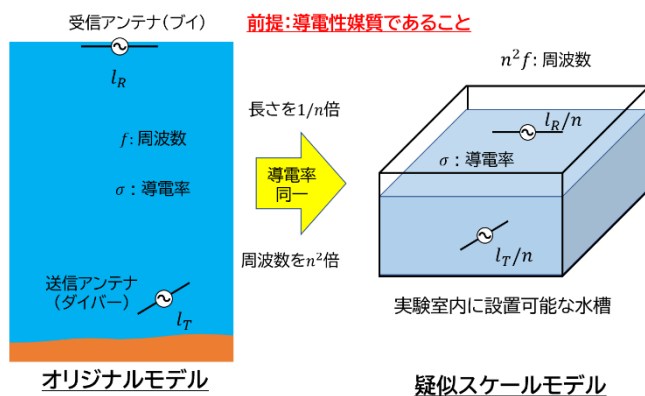


図 6 海水中でのスケールモデル

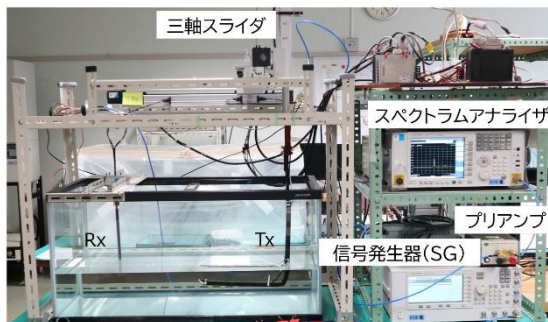


図 7 海水中の電波伝搬測定システム (新潟大学石井研究室)

果、直接波とラテラル波の寄与のゾーンが現れることを確認した。

以上のことから、本研究の目的として掲げていた(1)海中アンテナ設計法の確立、(2)海中電波測位法の確立、及び(3)擬似スケールモデルによるアンテナ設計・測定法の検討をすべて達成し、VLF帯域における実用可能な海中用シーブ型アンテナの開発、2メートル以下の誤差まで低減できた海中位置推定手法の開発、及び実験的に応用が可能な高損失媒質中の擬似スケールモデルの開発に成功した。これらの研究成果は、2023年に開始した基盤研究(B)「高効率海中・海上混合電磁波伝送路の構築」の研究においてさらに発展される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kato Ryosuke, Takahashi Masaharu, Suga Ryotaro, Matsuda Takashi, Ishii Nozomu	4. 巻 10
2. 論文標題 Measurement of an undersea positioning system using radio waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 409 ~ 414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2021XBL0092	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kato Ryosuke, Takahashi Masaharu, Ishii Nozomu, Chen Qiang, Yoshida Hiroshi	4. 巻 69
2. 論文標題 Investigation of a 3-D Undersea Positioning System Using Electromagnetic Waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Antennas and Propagation	6. 最初と最後の頁 4967 ~ 4974
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAP.2020.3048584	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kobayashi Hiroki, Kato Ryosuke, Takahashi Masaharu	4. 巻 10
2. 論文標題 Investigation of sea wave countermeasures in undersea position estimating system using electromagnetic waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 786 ~ 791
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2021XBL0135	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakaya Shinnosuke, Takahashi Masaharu	4. 巻 10
2. 論文標題 Basic study on 3D undersea position estimation system using electromagnetic waves by machine learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 930 ~ 935
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2021COL0037	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計39件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 佐藤脩太郎, 佐藤弘康, 陳強
2. 発表標題 海中アンテナの偏波特性に関する実験的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会水中無線技術特別研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤脩太郎, 佐藤弘康, 陳強
2. 発表標題 海中アンテナを用いた魚群の生育判定
3. 学会等名 第627回伝送工学研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阪谷新之助, 高橋応明
2. 発表標題 機械学習による電磁波を用いた海中位置推定システムの基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会水中無線技術特別研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田弘, 野一色崇志, 高橋応明, 屋比久怜, 菅良太郎, 米倉達郎, 只野竣也
2. 発表標題 海中アンテナの開発とその極域探査ロボットへの応用
3. 学会等名 電子情報通信学会水中無線技術特別研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋応明, 石井望, 陳強, 吉田弘
2. 発表標題 海中および海面の電磁波伝搬
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋応明
2. 発表標題 (招待講演) 電磁波による海中位置推定
3. 学会等名 Microwave Workshop & Exhibition MWE2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神谷 安璃, 石井 望
2. 発表標題 大気・海水2層問題の疑似スケールモデルのFDTD法による検証
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 若林 大雅, 佐瀬 亮太, 石井 望
2. 発表標題 受信電力プロファイルの対称性が海中位置推定に与える影響
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井 望, 高橋 応明, 陳 強, 吉田 弘
2. 発表標題 海中電磁界応用における研究動向とポイント
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐瀬 亮太, 石井 望
2. 発表標題 クロスダイポール受信アレーを用いた海中位置推定に関する疑似スケールモデル実験
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神谷 安璃, 石井 望
2. 発表標題 大気・海水2層問題における疑似スケールモデルの周波数特性
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐瀬 亮太, 石井 望
2. 発表標題 海中位置推定のための疑似スケールモデル実験におけるフェライトコアの効果
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 若林 大雅, 佐瀬 亮太, 石井 望
2. 発表標題 海中位置推定システムにおける使用受信アンテナ数の最適化
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryota Sase, and Nozomu Ishii
2. 発表標題 An Attempt of Underwater Position Estimation in Pseudo-Scale Model Using Cross-Dipole Array
3. 学会等名 2021 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐瀬 亮太, 石井 望
2. 発表標題 海中位置推定の位置検出精度を向上するための 疑似スケールモデル実験の改良
3. 学会等名 電子情報通信学会水中無線技術特別研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 若林 大雅, 石井 望
2. 発表標題 2.45GHzにおける水中動作ダイポールアンテナの 距離および角度特性の測定結果について
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神谷 安璃, 石井 望
2. 発表標題 大気・海水2層問題の疑似スケールモデル実験系における水槽の影響について
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹内 元信, 石井 望
2. 発表標題 .45 GHzにおける水中動作ダイポールアンテナの距離および角度特性の測定結果について
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Sakaya and M. Takahashi
2. 発表標題 Basic study on 3D undersea position estimation using curved surfaces by machine learning
3. 学会等名 2021 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shuangyue Xu, Hiroyasu Sato and Qiang Chen
2. 発表標題 Theoretical Analysis of Slightly Exposed Sheath Dipole Antenna for Seawater Use
3. 学会等名 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋 応明
2. 発表標題 電磁波を用いた海中位置推定技術
3. 学会等名 電子情報通信学会水中無線技術特別研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shuangyue Xu, Hiroyasu Sato and Qiang Chen
2. 発表標題 Theoretical Analysis of Slightly Exposed Sheath Dipole Antenna for Seawater Use
3. 学会等名 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐瀬 亮太, 石井 望, 高橋 応明, 陳 強, 吉田 弘
2. 発表標題 水平2成分受信電力プロファイルに基づく海中微小垂直ダイポール位置推定の疑似スケールモデル実験
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐瀬 亮太, 石井 望, 高橋 応明, 陳 強, 吉田 弘
2. 発表標題 受信電力プロファイルを利用した海中位置推定法の検討と疑似スケールモデルに基づく実験への適用
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐瀬 亮太, 石井 望, 高橋 応明, 陳 強, 吉田 弘
2. 発表標題 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
3. 学会等名 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shuangyue Xu, Hiroyasu Sato and Qiang Chen
2. 発表標題 Theoretical Analysis of Sheathed Dipole Antenna with PVC-cover for Seawater Use
3. 学会等名 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryota Sase, Nozomu Ishii, Masaharu Takahashi, Qiang Chen, and Hiroshi Yoshida
2. 発表標題 Verification of Underwater Position Estimation Using Received Power Profile Through Pseudo-Scale Model
3. 学会等名 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Kato, H. Kobayashi, M.Takahashi, N. Ishii, Q. Chen and H. Yoshida
2. 発表標題 Undersea positioning using electromagnetic wave in consideration of sea wave effects
3. 学会等名 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阪谷新之助, 加藤涼介, 高橋応明
2. 発表標題 機械学習による電磁波を用いた3次元海中位置推定システムの基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤涼介, 高橋応明, 菅良太郎, 松田隆志, 石井望
2. 発表標題 電磁波を用いた3次元海中位置推定システムの実測
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤脩太郎, 許双悦, 佐藤弘康, 陳強
2. 発表標題 海中電波伝搬損失計算法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Sakaya and M. Takahashi
2. 発表標題 Evaluation of undersea position estimation using curved surfaces generated by machine learning
3. 学会等名 2022 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Wakabayashi, N. Ishii, M. Takahashi and Q. Chen
2. 発表標題 An experimental system based on pseudo-scale model of air-sea two-layer problem operated at 100 MHz
3. 学会等名 2022 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Yoshida, Masaharu Takahashi, Nozomu Ishii, Qiang Chen, Tatsuro Yonekura and Ryotaro Suga
2. 発表標題 Electromagnetic under-the-ice localization and communication
3. 学会等名 OCEANS 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S.Sakaya and M.Takahashi
2. 発表標題 Basic study of the placement and number of receiving antennas in undersea positioning
3. 学会等名 The 2022 International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Anri Kamiya, Nozomu Ishii, Masaharu Takahashi, and Qiang Chen
2. 発表標題 Numerical Evaluation on Tank Effect in a Pseudo-Scale Air-Sea Two-Layer Experimental Model
3. 学会等名 Proc. 2022 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神谷 安璃, 石井 望
2. 発表標題 水槽周囲空気を考慮した大気・海水2層問題の疑似スケール実験系における水槽効果の評価
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神谷 安璃, 石井 望
2. 発表標題 送信アンテナの向きを考慮した大気・海水2層問題の疑似スケール実験系における水槽効果の評価
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神谷 安璃, 石井 望
2. 発表標題 大気・海水2層問題の水槽付き疑似スケールモデルの数値シミュレーション
3. 学会等名 電子情報通信学会水中無線技術研究会資料
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	佐藤 弘康  (Sato Hiroyasu)  (20302234)	東北大学・工学研究科・助教    (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	今野 佳祐  (Konno keisuke)  (20633374)	東北大学・工学研究科・准教授    (11301)	
研究分担者	石井 望  (Nozomu Ishi)  (50232236)	新潟大学・自然科学系・准教授    (13101)	
研究分担者	高橋 応明  (Tahahashi Masaharu)  (70267342)	千葉大学・フロンティア医工学センター・准教授    (12501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関