

令和 4 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 02301

研究開発課題名 海中・水中 IoT における無線通信技術の研究開発

(1) 研究開発の目的

Beyond 5G 時代には陸上に整備される IoT 環境を海中・水中にも拡張するための革新的な電波通信技術を開発し、海中土木作業機械、AUV、海中ドローン、センサ群、カメラ等の IoT 機器からのデータ収集や遠隔操作を可能とし、運用コストの低減や作業の安全性に寄与することで、海中・水中での経済活動の拡大に貢献する。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 6 年度 (4 年間)

(3) 受託者

国立大学法人九州工業大学 <代表研究者>  
パナソニックホールディングス株式会社

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 3 年度から令和 4 年度までの総額 189 百万円 (令和 4 年度 124 百万円)  
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1: 中距離電波伝搬の理論解析とアンテナの開発

- 研究開発項目 1-a) 海中・水中における電波伝搬の基礎評価 (九工大)
- 研究開発項目 1-b) 高効率なアンテナの開発と評価 (九工大・パナ)
- 研究開発項目 1-c) 海中・水中 MIMO 技術の開発と評価 (九工大・パナ)
- 研究開発項目 1-d) 大型水槽、海洋でのアンテナの評価 (九工大・パナ)

研究開発項目 2: 通信システム・装置の開発と評価

- 研究開発項目 2-a) 水中通信用通信装置の設計開発 (パナソニック)
- 研究開発項目 2-b) 近距離高速・長距離通信シームレス化 (パナソニック)
- 研究開発項目 2-c) 水中通信用通信装置の小型水槽評価 (九工大・パナ)
- 研究開発項目 2-d) 大型水槽におけるシステム評価 (九工大・パナ)
- 研究開発項目 2-e) 海洋・淡水湖での実証実験 (九工大・パナ)

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	6	6
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	12	10
	標準化提案・採択	8	6
	プレスリリース・報道	2	1
	展示会	0	0
	受賞・表彰	1	1

## (7) 具体的な実施内容と成果

### 研究開発項目1：中距離電波伝搬の理論解析とアンテナの開発

本開発項目は、中距離（4m 以内、1 Mbps 以上）での海中通信技術の確立を行うものである。本年度は、海中における電波伝搬の特性評価、高効率アンテナの開発、海中・水中 MIMO 技術の基礎の開発を行った。以下に項目ごとの成果を記載する。

- 研究開発項目 1-a) 海中・水中における電波伝搬の基礎評価：
  - 浅い深度のアンテナにおいて、ラテラル波による伝搬に関する知見
    - 0.7m 以下ではアンテナ深度によって伝送特性が異なることを実験で確認
    - 電磁界シミュレータにより表面を伝搬するラテラル波を確認
  - 水中アンテナからの海上漏洩に関する知見
    - 海上への漏洩磁界強度を測定
    - 測定値から漏洩磁界を無視できるアンテナ深度を外挿推定
    - 3m 以上のアンテナ深度で漏洩磁界強度が測定限界以下
- 研究開発項目 1-b) 高効率なアンテナの開発と評価：
  - アンテナの大型化、整合回路により低域の伝送特性が 20dB 改善
    - 送信側ループアンテナの直径を 1m から 2m へ大型化
    - 変成器によるインピーダンス変換
    - 低周波帯における伝送特性を最大 20dB 改善
  - アンテナ間伝送特性から Wavelet OFDM 通信速度の推定法の確立
    - 測定もしくはシミュレーションで得られた伝送特性（Sパラメータ）による通信速度推定法
    - 通信が不可能となる距離の推定
    - 最終目標(4m で 1Mbps)を達成しうるアンテナの周波数特性を策定可能
- 研究開発項目 1-c) 海中・水中 MIMO 技術の開発と評価：
  - 海水水槽による 2x2 海中 MIMO 通信の基礎特性評価
    - 対向するアンテナ間の結合が強く、独立した 2ch の通信路として考えることが可能
    - 送受信アンテナ群の位置ずれは次年度(2023 年度)の課題
  - 海中 MIMO 通信により約 2 倍の通信速度向上を達成
    - 2-28MHz 帯を用いる通信モデムにより通信速度を測定
    - アンテナ間距離が 0.5m において、MIMO なしでは 16Mbps なのに対して、MIMO ありでは約 30Mbps となり、約 2 倍の速度向上を達成
- 研究開発項目 1-d) 大型水槽、海洋でのアンテナの評価：
  - 大型海水水槽（縦横 5.4×深さ 4.8m）および海洋実験で用いるための防水タンクなどを目的とした、小型水槽用の防水タンクの改良
  - 実海域での実験は 2023 年以降に計画している。

### 研究開発項目2 通信装置・システムの開発と評価

本開発項目は、Wavelet OFDM での高帯域通信やマルチホップ技術を活用した水中での長距離通信システムの構築することであり、本年度はその基本的な開発を行った。なお研究開発項目 2-e) は 2023 年度より実施する。

- 研究開発項目 2-a) 水中通信用通信装置の設計開発：
  - **通常モード比2倍超の長距離モードの機能実装を達成**
    - 1/64 モードの開発・実装および評価完了
    - 最大16ホップまでの段数拡張の仕様追加・チューニングを実施
    - AGC 動作範囲拡張の動作検証を実施

- 通信速度向上および通信安定化に関する以下の仕様完成と機能実装を達成
  - 時間スケジューリング、同期ブロードキャスト通信機能の通信装置への実装を実施
  - パケットロス率削減・低遅延化を含む通信安定化についての仕様検討、実装および評価を実施
  - 海中通信に最適なプロトコルの調査を継続
  - IEEE802.1X のサーバー認証を組み合わせた Wavelet OFDM 通信ネットワークの認証方式の実装および機能評価を実施
- IEEE 国際標準化において PHY 仕様のドラフトを WG で承認
  - NesCom(New Standard Committee)において PAR(Project Authorization Request)の内容が確認され、2022 年 5 月に IEEE-SA Standards Board が P1901c の発足を承認。2022 年 7 月には WG のキックオフ会議を実施。
  - 本研究開発課題で開発している内容について順次提案書を作成し、WG において議論を実施
  - PHY 仕様のドラフトについて WG の承認を完了。Draft Standard v0.2 として承認済み。
- 研究開発項目 2-b) 通信モード切替えのシームレス化：本内容の特許出願完了
  - 近距離高速通信モードから長距離モードへの自動切替えについての機能を開発中
    1. 任意の通信 CH で動き出した機器同士が、フレームをやりとりする仕組み
    2. 通信 CH を評価し、結果を共有する仕組み
    3. 評価結果をもとに、通信 CH を決定する仕組み
    4. 決定した通信 CH を機器間で共有し、通信 CH を切替える仕組み
  - 上記主たる機能のうち、4を IEEE1901c 規格案として選定し、機能仕様書を作成

#### 研究開発項目 2-c) 水中通信用通信装置の小型水槽評価

- 研究開発項目 1 にて開発したアンテナ、および研究開発項目 2 にて開発した通信装置を結合し、直径 1.6m・深さ 1.6m の小型塩水水槽において、ループアンテナやハーフスペースアンテナなど、アンテナの組み合わせの違い等による基礎的な通信速度測定を実施。その結果、ループアンテナと通信装置の 1/16 モードの組合せにおいて、1m で 4.7Mbps を達成した。

#### 研究開発項目 2-d) 大型水槽におけるシステム評価

- 日本サルヴェージの 5m×5m×深さ 4.8m の大型塩水水槽内にて、研究開発項目 1 および 2 にて開発したアンテナおよび通信装置を、実際の AUV に搭載し、通信実験を実施。ループアンテナと通信装置 1/64 モードの組合せで、2.7m で 1Mbps を達成した。また、AUV に通信装置を内蔵しループアンテナを接続した状態で、水中電波通信経路で、AUV 搭載カメラの映像を地上に受信し、かつ地上から AUV の LED の ON/OFF および発光色の変更の制御を実現した。
- 九州工業大学の 10m×5m×深さ 3m の大型淡水水槽にて、日本サルヴェージ同様の実験を実施。ループアンテナと通信装置 1/1 モードの組合せで 9m で 18Mbps の通信を達成した。

### (8) 今後の研究開発計画

#### 研究開発項目 1：中距離電波伝搬の理論解析とアンテナの開発

本開発項目は中距離（4m 以内、1 Mbps 以上）での海中通信技術の確立を行うものである。2023 年度はアンテナの伝送特性改善のために、最適なアンテナ形状の模索、効率調整回路の設計試作、送受信アンプの導入および 3x3 以上の海中 MIMO 通信システムの開発を行

う。実験場所は大型水槽の他、実海洋における電波伝送特性および通信特性の評価を行う。

#### 研究開発項目 2 通信装置・システムの開発と評価

Wavelet OFDM 技術の高帯域通信特性やマルチホップ技術を活用した水中での長距離通信システムの構築することを目標とする。2023 年度は本機能の開発・実装や評価、性能改善を行う。研究開発項目 1 で検討した水中アンテナと、本通信装置を結合させ、水槽内や実海洋において通信可能距離と通信速度の実験を実施する。また、研究開発項目 1 で開発したアンテナおよび本通信装置を AUV に搭載し、大型水槽および実海洋において、水中電波通信経路で AUV 制御実験を行う。