



障害物等による劣悪環境下でも通信可能な パッシブ無線通信方式の開発 (委託研究)

－令和5年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業－

Development of Passive Wireless Communication Systems Operatable under
Inferior-wireless Environment with Obstacles
(Contract Research)

－ FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource
Development Project –

福島廃炉安全工学研究所 廃炉環境国際共同研究センター
横浜国立大学

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research and Engineering Institute
Yokohama National University

October 2025

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

障害物等による劣悪環境下でも通信可能なパッシブ無線通信方式の開発
(委託研究)

—令和 5 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

日本原子力研究開発機構 福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター

横浜国立大学

(2025 年 5 月 12 日受理)

日本原子力研究開発機構 (JAEA) 廃炉環境国際共同研究センター (CLADS) では、令和 5 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 (以下、「本事業」という。) を実施している。

本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉等をはじめとした原子力分野の課題解決に貢献するため、国内外の英知を結集し、様々な分野の知見や経験を従前の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させた基礎的・基盤的研究及び人材育成を推進することを目的としている。

平成 30 年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築した。

本研究は、令和 4 年度に採択された研究課題のうち、「障害物等による劣悪環境下でも通信可能なパッシブ無線通信方式の開発」の令和 5 年度分の研究成果について取りまとめたものである。

本研究では、障害物が多い環境での無線通信システム実現を目指し、基地局やセンサノード (SN)、位置特定アルゴリズム、電磁波遮蔽領域に対応する無線エリア形成手法を開発した。以下に主要な成果をまとめる。

高機能アンテナを用いた方向探知性能評価として、3 点法を活用した位置推定性能を定量評価した。また、センサ情報の復調システムを構築した。SN は、周波数走査型アナログ方式と周波数固定デジタル方式を開発し、通信可能距離が 6~8 m、無線充電では 6 m で 1~2 V 充電を 3~15 分でできることを確認した。また、1,000 Gy の放射線照射によるダイオード特性変化がないことを実験的に確認した。

位置特定アルゴリズムの研究では、多重波電波トモグラフィイメージング法を検討し、高分解能測定系を構築して実験室環境での有効性を確認した。原子炉建屋の CAD 図面を用いたシミュレーションで必要なノード数や配置を検討した。

電磁波遮蔽領域への対応では、パッチアレーアンテナと導波路アンテナを組み合わせた複合アンテナにより、SN との通信距離を評価した。現状では通信可能距離が 1.5 m 程度であることを確認した。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、横浜国立大学が実施した成果を取りまとめたものである。

廃炉環境国際共同研究センター：〒979-1151 福島県双葉郡富岡町大字本岡字王塚 790-1

Development of Passive Wireless Communication Systems Operatable
under Inferior-wireless Environment with Obstacles
(Contract Research)

— FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research and Engineering Institute
Japan Atomic Energy Agency
Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

Yokohama National University

(Received May 12, 2025)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to “the Project”) in FY2023.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (TEPCO). For this purpose, intelligence was collected from all over the world, and basic research and human resource development were promoted by closely integrating/collaborating knowledge and experiences in various fields beyond the barrier of conventional organizations and research fields.

The sponsor of the Project was moved from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology to JAEA since the newly adopted proposals in FY2018. On this occasion, JAEA constructed a new research system where JAEA-academia collaboration is reinforced and medium-to-long term research/development and human resource development contributing to the decommissioning are stably and consecutively implemented.

Among the adopted proposals in FY2022, this report summarizes the research results of the “Development of passive wireless communication systems operatable under inferior-wireless environment with obstacles” conducted in FY2023.

This study aims to develop a wireless communication system for obstacle-dense environments by designing base stations, sensor nodes (SN), positioning algorithms, and wireless area formation methods for electromagnetic wave-shielded regions. Key outcomes are as follows:

For direction-finding with high-performance antennas, triangulation positioning accuracy was evaluated, and a sensor information demodulation system was built. SNs with frequency-scanning analog and frequency-fixed digital methods achieved communication distances of 6–8 meters and wireless charging of 1–2 V in 3–15 minutes at 6 meters. Diode characteristics remained unchanged after 1,000 Gy radiation.

Positioning algorithms using multipath tomography were validated with a high-resolution measurement system in the lab. Simulations with reactor building CAD diagrams optimized node numbers and arrangements.

Wireless coverage in electromagnetic wave-shielded regions was tested using a composite antenna (patch array and waveguide), achieving a range of approximately 1.5 meters.

Keywords: Antennas, RFID, Positioning Algorithms, Wireless Communications, DOA Estimation

This work was performed by Yokohama National University under contract with Japan Atomic Energy Agency.

目次

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要	1
2. 平成 30 年度 採択課題	2
3. 令和元年度 採択課題	5
4. 令和 2 年度 採択課題	8
5. 令和 3 年度 採択課題	10
6. 令和 4 年度 採択課題	12
7. 令和 5 年度 採択課題	14
付録 成果報告書	17

Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project	1
2. Accepted Proposal in FY2018.....	2
3. Accepted Proposal in FY2019.....	5
4. Accepted Proposal in FY2020.....	8
5. Accepted Proposal in FY2021.....	10
6. Accepted Proposal in FY2022.....	12
7. Accepted Proposal in FY2023.....	14
Appendix Result Report	17

This is a blank page.

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

文部科学省では、「東京電力（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン（平成 26 年 6 月文部科学省）」等を踏まえ、平成 27 年度から「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」（以下、「本事業」という。）を立ち上げ、「戦略的原子力共同研究プログラム」、「廃炉加速化研究プログラム」及び「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」を推進している。

具体的には、国内外の英知を結集し、国内の原子力分野のみならず様々な分野の知見や経験を、機関や分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることにより、原子力の課題解決に資する基礎的・基盤的研究や産学が連携した人材育成の取組を推進している。

一方、日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。）では、平成 27 年に廃炉国際共同研究センター（以下、「CLADS」という。現：廃炉環境国際共同研究センター）を組織し、「東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」等を踏まえ、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所廃炉（以下、「1F 廃炉」という。）に係る研究開発を進めている。

また、平成 29 年 4 月に CLADS の中核拠点である「国際共同研究棟」の運用を開始したことを踏まえ、今後は CLADS を中核に、廃炉の現場ニーズを踏まえた国内外の大学、研究機関等との基礎的・基盤的な研究開発及び人材育成の取組を推進することにより、廃炉研究拠点の形成を目指すことが期待されている。

このため、本事業では平成 30 年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することとし、従来のプログラムを、①共通基盤型原子力研究プログラム、②課題解決型廃炉研究プログラム、③国際協力型廃炉研究プログラム、④研究人材育成型廃炉研究プログラム（令和元年度より新設）に再編した。

2. 平成 30 年度 採択課題

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム	11 課題（若手研究 6 課題、一般研究 5 課題）
課題解決型廃炉研究プログラム	6 課題
国際協力型廃炉研究プログラム	2 課題（日英）

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
被災地探査や原子力発電所建屋内情報収集のための半自律ロボットを用いたセマンティックサーベイマップ生成システムの開発	河野 仁	東京工芸大学
汚染土壌の減容を目的とした重液分離による放射性微粒子回収法の高度化	山崎 信哉	筑波大学
ラドンを代表としたアルファ核種の吸入による内部被ばくの横断的生体影響評価	片岡 隆浩	岡山大学
炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発	大石 佑治	大阪大学
iPS 細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変異計測系の確立	島田 幹男	東京工業大学
レーザー共鳴イオン化を用いた同位体存在度の低いストロンチウム 90 の迅速分析技術開発	岩田 圭弘	東京大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
放射性核種の長期安定化を指向した使用済みゼオライト焼結固化技術の開発	新井 剛	芝浦工業大学
燃料デブリ取り出しを容易にするゲル状充填材の開発	牟田 浩明	大阪大学
レーザー蛍光法を用いた燃料デブリ変質相の同定	斉藤 拓巳	東京大学
過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発	岡本 保	木更津工業 高等専門学校
レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種同定手法の開発	長谷川 秀一	東京大学

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基盤研究	桐島 陽	東北大学
ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環境の画像化による定量的放射能分布解析法	谷森 達	京都大学
燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止技術の開発	鈴木 俊一	東京大学
アルファダストの検出を目指した超高位置分解能イメージング装置の開発	黒澤 俊介	東北大学
ナノ粒子を用いた透明遮へい材の開発研究	渡邊 隆行	九州大学
先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発	萩原 雅之	高エネルギー 加速器研究 機構

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
放射性微粒子の基礎物性解明による廃炉作業リスク低減への貢献	五十嵐 康人	茨城大学
放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発	三澤 毅	京都大学

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム 7 課題（若手研究 2 課題、一般研究 5 課題）

課題解決型廃炉研究プログラム 4 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 4 課題（日英 2 課題、日露 2 課題）

研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 課題

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一郎	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術 研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁 (～R2. 3. 31) 大曲 新矢 (R2. 4. 1～)	産業技術総合 研究所

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
Multi-Physics モデリングによる福島 2・3 号機ペDESTAL燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邊 大輔	日立GE ニュークリア・ エナジー
アパタイトセラミックスによる ALPS 沈殿系廃棄物の安定固化技術の開発	竹下 健二 (～R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1～)	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で効果的な固化	佐藤 努	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線FPGA システムの開発	渡邊 実	静岡大学 (～R3. 3. 31) 岡山大学 (R3. 4. 1～)

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化	小原 徹	東京工業大学
微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に関する評価研究	金井 昭夫	慶應義塾大学

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティックスを融合したデブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (～R2. 3. 31) 竹下 健二 (～R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1～)	東京工業大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

4. 令和2年度 採択課題

令和2年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和2年3月17日～令和2年5月14日（課題解決型）

令和2年5月13日～令和2年7月15日（国際協力型）

課題数：10 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題（若手研究 2 課題、一般研究 6 課題）

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

令和2年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れの調査	楊 会龍 (～R4. 7. 31) 村上 健太 (R4. 8. 1～)	東京大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	岡本 章玄	物質・材料 研究機構

課題解決型廃炉研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な臨界近接監視システム用ダイヤモンド中性子検出器の要素技術開発	田中 真伸	高エネルギー 加速器研究 機構
α / β / γ 線ラジオリシス影響下における格納容器系統内広域防食の実現:ナノバブルを用いた新規防食技術の開発	渡邊 豊	東北大学
β 、 γ 、X線同時解析による迅速・高感度放射性核種分析法の開発	篠原 宏文	日本分析 センター
合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄筋コンクリート長期状態変化の定量評価	丸山 一平	東京大学
溶脱による変質を考慮した汚染コンクリート廃棄物の合理的処理・処分の検討	小崎 完	北海道大学
マイクロ波重畳 LIBS によるデブリ組成計測の高度化と同位体の直接計測への挑戦	池田 裕二	アイラボ

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
革新的水質浄化剤の開発による環境問題低減化技術の開拓	浅尾 直樹	信州大学
無人航走体を用いた燃料デブリサンプルリターン技術の研究開発	鎌田 創	海上・港湾・ 航空技術 研究所

5. 令和3年度 採択課題

令和3年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和3年3月16日～令和3年5月17日（課題解決型）
令和3年4月13日～令和3年7月1日（国際協力型 日英共同研究）
令和3年7月12日～令和3年8月18日（国際協力型 日露共同研究）

課題数：12 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題
国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）、2 課題（日露）

令和3年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究	前田 匡樹	東北大学
燃料デブリ周辺物質の分析結果に基づく模擬デブリの合成による実機デブリ形成メカニズムの解明と事故進展解析結果の検証によるデブリ特性データベースの高度化	宇埜 正美	福井大学
ジオポリマー等による PCV 下部の止水・補修及び安定化に関する研究	鈴木 俊一	東京大学
世界初の同位体分析装置による少量燃料デブリの性状把握分析手法の確立	坂本 哲夫	工学院大学
アルファ微粒子の実測に向けた単一微粒子質量分析法の高度化	豊嶋 厚史	大阪大学
連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究	人見 啓太郎	東北大学
中赤外レーザー分光によるトリチウム水連続モニタリング手法の開発	安原 亮	自然科学研究機構

課題名	研究代表者	所属機関
福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価	中瀬 正彦	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一原子力発電所の廃止措置における放射性エアロゾル制御及び除染に関する研究	Erkan Nejdet (～R4. 1. 31) 三輪 修一郎 (R4. 2. 1～)	東京大学
燃料デブリ取り出しのための機械式マニピュレータのナビゲーションおよび制御	浅間 一	東京大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一発電所 2、3 号機の事故進展シナリオに基づく FP・デブリ挙動の不確かさ低減と炉内汚染状況・デブリ性状の把握	小林 能直	東京工業大学
非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化	小原 徹	東京工業大学

6. 令和4年度 採択課題

令和4年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和4年3月1日～令和4年5月6日（課題解決型）

令和4年4月7日～令和4年6月16日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：8 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 6 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

令和4年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
革新的アルファダスト撮像装置と高線量率場モニタの実用化とその応用	黒澤 俊介	東北大学
3次元線量拡散予測法の確立と γ 線透過率差を利用した構造体内調査法の開発	谷森 達	京都大学
α 汚染可視化ハンドフットクロスモニタの要素技術開発	樋口 幹雄	北海道大学
高放射線耐性の低照度用太陽電池を利用した放射線場マッピング観測システム開発	奥野 泰希	京都大学 (～R5.3.31) 理化学研究所 (R5.4.1～)
障害物等による劣悪環境下でも通信可能なパッシブ無線通信方式の開発	新井 宏之	横浜国立大学
無線 UWB とカメラ画像分析を組合せたリアルタイム 3D 位置測位・組込システムの開発・評価	松下 光次郎	岐阜大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
耐放射線プロセッサを用いた組み込みシステムの開発	渡邊 実	岡山大学
マイクロ・ナノテクノロジーを利用したアルファ微粒子の溶解・凝集分散に及ぼすナノ界面現象の探求	塚原 剛彦	東京工業大学

7. 令和 5 年度 採択課題

令和 5 年度は、2 つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和 5 年 3 月 1 日～令和 5 年 4 月 14 日（課題解決型）

令和 5 年 4 月 12 日～令和 5 年 6 月 15 日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：9 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 7 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。

その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議及びステアリングコミッティでの審議を経て、採択課題を決定した。

令和 5 年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な耐放射線性ダイヤモンド中性子計測システムのプロトタイプ開発	金子 純一	北海道大学
簡易非破壊測定に向けた革新的な $n \cdot \gamma$ シンチレーション検出システムの開発	鎌田 圭	東北大学
ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に向けた構成材料の物理・化学的変質に関する研究	五十嵐 豪	名古屋大学
動画像からの特徴量抽出結果に基づいた高速 3 次元炉内環境モデリング	中村 啓太	札幌大学
放射性コンクリート廃棄物の減容を考慮した合理的処理・処分方法の検討	小崎 完	北海道大学

課題名	研究代表者	所属機関
高バックグラウンド放射線環境における配管内探査技術の開発	鳥居 建男	福井大学
PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発	椎名 達雄	千葉大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
革新的分光画像解析による燃料デブリの可視化への挑戦と LIBS による検証	牟田 浩明	大阪大学
燃料デブリ除去に向けた様々な特性をもつメタカオリンベースのジオポリマーの設計と特性評価	Yogarajah Elakneswaran	北海道大学

本報告書は、以下の課題の令和 5 年度分の研究成果について取りまとめたものである。

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
障害物等による劣悪環境下でも通信可能な パッシブ無線通信方式の開発	新井 宏之	横浜国立大学

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

付録

成果報告書

This is a blank page.

令和 5 年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

障害物等による劣悪環境下でも通信可能な

パッシブ無線通信方式の開発

(契約番号 R05I058)

成果報告書

令和 6 年 3 月

国立大学法人横浜国立大学

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」による委託業務として、国立大学法人横浜国立大学が実施した「障害物等による劣悪環境下でも通信可能なパッシブ無線通信方式の開発」の令和5年度分の研究成果を取りまとめたものである。

目次

概略	x
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	2-1
2.1 全体計画	2-1
2.1.1 基地局とセンサノード開発に関する研究	2-1
2.1.2 センサ位置特定アルゴリズムに関する研究	2-2
2.1.3 電磁波遮蔽領域に対する無線エリア形成手法に関する研究	2-2
2.2 実施体制	2-4
2.3 令和5年度の成果の目標及び業務の実施方法	2-5
2.3.1 基地局とセンサノード開発に関する研究	2-5
2.3.2 センサ位置特定アルゴリズムに関する研究	2-5
2.3.3 電磁波遮蔽領域に対する無線エリア形成手法に関する研究	2-5
3. 実施内容及び成果	3-1
3.1 基地局とセンサノード開発に関する研究	3-1
3.1.1 高性能アンテナを駆使した無線測位手法の開発	3-1
3.1.2 センサノードの開発	3-11
3.2 センサ位置特定アルゴリズムに関する研究	3-21
3.2.1 高分解能測定系を用いたパッシブ測位法のハードウェア実装検討	3-21
3.2.2 ソフトウェア無線機の評価システムの構築	3-30
3.2.3 まとめ	3-32
3.3 電磁波遮蔽領域に対する無線エリア形成手法に関する研究	3-33
3.3.1 伝送距離評価	3-35
3.3.2 通信回路統合化	3-38
3.3.3 まとめ	3-43
3.4 研究推進	3-44
4. 結言	4-1
4.1 横浜国立大学	4-1
4.2 新潟大学	4-1
4.3 名古屋工業大学	4-2
参考文献	5-1

執筆者リスト

研究代表者

国立大学法人横浜国立大学

教授
准教授

新井 宏之
久我 宣裕

再委託先

国立大学法人新潟大学

准教授
助教

金 ミンソク
杉本 義喜

表一覧

表 2. 1-1	本事業の全体計画	....	2-3
表 3. 1. 1-1	近中距離の異なるケースについて方向推定性能を評価した結果	....	3-4
表 3. 2. 1-1	USRP X310+UBX160 の仕様	....	3-24
表 3. 2. 1-2	RF スイッチの仕様	....	3-24
表 3. 2. 1-3	各アンテナ配置パターンにおける座標	....	3-26
表 3. 2. 1-4	測位ターゲットの配置	....	3-26
表 3. 2. 1-5	各種パラメータ	....	3-27
表 3. 2. 2-1	使用機器	....	3-31
表 3. 2. 2-2	測定系の諸元	....	3-31
表 3. 3. 1-1	伝送距離評価実験の測定諸元	....	3-36
表 3. 3. 2-1	通信実験における測定諸元	....	3-40

図一覧

図 1-1	屋内多重波無線環境	....	1-1
図 1-2	有線による調査方式	....	1-1
図 1-3	本事業の概念図	....	1-2
図 1-4	パッシブ SN と高調波を用いた通信システム	....	1-2
図 1-5	RPV 内への無線エリア形成例	....	1-3
図 2. 1-1	パッシブ SN と高機能なアンテナを駆使した無線通信システム	....	2-2
図 2. 2-1	実施体制	....	2-4
図 3. 1. 1-1	耐電力試験に係わる実験回路	....	3-1
図 3. 1. 1-2	耐電力試験における受信電力特性	....	3-2
図 3. 1. 1-3	図 3. 1. 1-1 の点 1~6 における基本波及び高調波の電力レベル	....	3-2
図 3. 1. 1-4	方向探知性能の基礎的性能評価	....	3-4
図 3. 1. 1-5	スル走査特性が有する走査角度ごとの角度分解能の変化	....	3-4
図 3. 1. 1-6	三角測量計算モデル	....	3-6
図 3. 1. 1-7	三角測量の推定誤差結果 (a)-20 dB、(b)-30 dB	....	3-6
図 3. 1. 1-8	図 3. 1. 1-7 における推定誤差の累積確率分布	....	3-6
図 3. 1. 1-9	周波数領域での変調を可能とする変調・復調系システムの概要	....	3-8
図 3. 1. 1-10	SN の構成	....	3-8
図 3. 1. 1-11	電力周波数特性校正アルゴリズム	....	3-9
図 3. 1. 1-12	校正後データを用いた自動測定アルゴリズム	....	3-9
図 3. 1. 1-13	LabVIEW による自動測定実験装置	....	3-10
図 3. 1. 2-1	ハーモニック SN システム	....	3-11
図 3. 1. 2-2	周波数固定形 SN の構成	....	3-13
図 3. 1. 2-3	SN を複数用いて構成した立体 SN	....	3-14
図 3. 1. 2-4	周波数固定形 SN を用いた 6 面体 SN	....	3-14
図 3. 1. 2-5	周波数固定形 SN の通信実験	....	3-14
図 3. 1. 2-6	円板ダイポールアンテナを用いた広帯域 SN	....	3-15
図 3. 1. 2-7	センサ電圧により阻止周波数が変化するフィルタ (VCF)	....	3-15
図 3. 1. 2-8	校正によるセンサ電圧の抽出	....	3-15
図 3. 1. 2-9	円板ダイポールアンテナを用いた広帯域 SN のデータ伝送実験	....	3-16
図 3. 1. 2-10	無線充電キャパシタの端子電圧 V_{bc} をモニタする非線形回路	....	3-17
図 3. 1. 2-11	入力電力に対する充電電圧特性	....	3-17
図 3. 1. 2-12	SN 回路 (図 3. 1. 2-10) で発生する 2 次高調波の周波数特性	....	3-18
図 3. 1. 2-13	無線充電電圧の時間特性	....	3-18
図 3. 1. 2-14	2 次高調波で評価したダイオードの放射線照射の影響	....	3-19
図 3. 2. 1-1	送受信タイミング同期のイメージ	....	3-24
図 3. 2. 1-2	アンテナスイッチング処理のシーケンス図 (2×3 MIMO の場合)	....	3-24
図 3. 2. 1-3	測位環境及びアンテナ配置パターン (青はパターン 1、橙はパターン 2)	....	3-26
図 3. 2. 1-4	RT シミュレーションによる伝搬路	....	3-26

図 3.2.1-5	チャネル測定結果の例（凡例は送受信アンテナの素子番号）	....	3-26
図 3.2.1-6	生成した RTI イメージ及び位置推定結果	....	3-27
図 3.2.1-7	原子炉建屋の 3D モデル	....	3-28
図 3.2.1-8	各アンカーノード配置と RT シミュレーション結果	....	3-29
図 3.2.1-9	アンカーノード数・ボクセルサイズによる OSPA metric の比較	....	3-29
図 3.2.1-10	アンカーノード数・ボクセルサイズによる計算時間の比較	....	3-29
図 3.2.2-1	構築した測定系の概要図	....	3-30
図 3.2.2-2	構築した測定系の外観	....	3-30
図 3.2.2-3	マルチリンク測定系の制御シーケンス	....	3-32
図 3.3-1	PCV 及び内部への無線エリア形成	....	3-33
図 3.3-2	令和 4 年度に開発した導波路一体型アンテナ	....	3-34
図 3.3.1-1	伝送距離の基礎測定系	....	3-36
図 3.3.1-2	受信信号の 1 分間最大値周波数特性	....	3-37
図 3.3.1-3	アンテナ-センサ間距離に対する受信信号 1 分間最大値の関係	....	3-37
図 3.3.2-1	正面からの到来電波を同位相合成する受信アンテナ構成	....	3-39
図 3.3.2-2	通信距離評価のための実験系	....	3-40
図 3.3.2-3	SN の距離を変化させたときの受信アンテナにおける信号時間波形	....	3-41
図 3.3.2-4	通信実験時の受信信号最大値の距離特性	....	3-42

略語一覧

東電	: 東京電力ホールディングス株式会社	
1F	: 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所	
横国大	: 国立大学法人横浜国立大学	
新潟大	: 国立大学法人新潟大学	
名工大	: 国立大学法人名古屋工業大学	
GPS	: Global Positioning System	
BS	: Base Station	(基地局)
SN	: Sensor Node	(センサノード)
PCV	: Primary Containment Vessel	(原子炉格納容器)
RPV	: Reactor Pressure Vessel	(原子炉圧力容器)
SFP	: Spent Fuel Pool	(使用済燃料プール)
RB	: Reactor Building	(原子炉建屋)
高線量	: 高放射線量	
FP 法	: Finger-Print Techniques	(位置指紋法) 「用語の説明」 参照
RTI	: Radio Tomographic Imaging	(電波トモグラフィイメージング)
		「用語の説明」 参照
MPC	: Multipath Component	(多重波成分)
MIMO	: Multiple-Input and Multiple-Output	(MIMO 通信) 「用語の説明」 参照
SDR	: Software Defined Radio	(ソフトウェア無線機)
SBD	: Schottky Barrier Diode	(ショットキーバリアダイオード)
SG	: Signal Generator	(信号発生器)
LPF	: Low Pass Filter	(低域通過フィルタ)
BEF	: Band Elimination Filter	(帯域阻止フィルタ)
BPF	: Band Pass Filter	(帯域通過フィルタ)
RSS	: Receive Signal Strength	(受信信号強度)
RT	: Ray Tracing	(光線追跡法)
DBSCAN	: Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise	(ノイズを含むデータセットに対する密度準拠空間クラスタリング)
		「用語の説明」 参照
EIRP	: Equivalent Isotropic Radiation Power	(等価等方性放射電力)
ULA	: Uniform Linear Array	(線形配列)
LO	: Local Oscillator	(局部発信器)
CTF	: Channel Transfer Function	(チャンネル伝達関数)
Tx	: Transmitter	(送信機)
Rx	: Receiver	(受信機)
HPA	: High Power Amplifier	(大電力増幅器)
VCO	: Voltage Controlled Oscillator	(電圧制御発振器)
FVF	: Frequency Variable Filter	(周波数可変フィルタ)
ATT	: ATTenuator	(減衰器)

NLC	: NonLinear Circuit	(非線形回路)
VCS	: Voltage Controlled Switch	(電圧制御スイッチ)
DUP	: Duplexer	(送受信共用器)
ID	: IDentification	(識別子)
GND	: GRound	(接地)
VCF	: Voltage Controlled Filter	(電圧制御フィルタ)
VSWR	: Voltage Standing Wave Ratio	(電圧定在波比) 「用語の説明」 参照
SNS	: Sensor	(センサ)
SBD	: Schottky Barrier Diode	(ショットキーバリアダイオード)
VD	: Varactor Diode	(バラクタダイオード)
PIND	: PIN Diode	(PIN ダイオード)
AD	: Analogue to Digital conversion	(AD 変換)
CAD	: Computer Aided Design	(コンピュータ支援設計)
PPS	: Pulse Per Second	(パルス/秒) 「用語の説明」 参照
LAN	: Local Area Network	(ローカルエリアネットワーク)
TCP	: Transmission Control Protocol	(送信制御プロトコル)
FFT	: Fast Fourier Transform	(高速フーリエ変換)
DDADPS	: Double-Directional Angular Delay Power Spectrum	(双方向角度遅延電力スペクトル)
GPIO	: General-purpose Input/Output	(汎用入出力)
FPGA	: Field Programmable Gate Array	(フィールドプログラマブルゲート アレー) 「用語の説明」 参照
RF	: Radio Frequency	(高周波) 「用語の説明」 参照
DUT	: Device Under Test	(被測定装置)
dB	: Decibel	
USRP	: Universal Software Radio Peripheral	(ユニバーサルソフトウェア無線用 周辺装置) 「用語の説明」 参照
UHD	: USRP Hardware Driver	(ユニバーサルソフトウェア無線用 周辺装置用ハードウェアドライバ)
OMAT	: Optimal Mass Transfer	(最適物質移動)
OSPA	: Optimal Sub-Pattern Assignment	(最適サブパターン割当) 「用語の説明」 参照

用語の説明

No.	用語	説明
注1	RF (Radio Frequency)	無線による情報伝送ができるような高い周波数。
注2	電波トモグラフィイメージング (Radio Tomographic Imaging : RTI)	RFセンサネットワーク上の複数の無線リンクにおいて、ターゲットによる見通し波の遮蔽損失変化を地図上で可視化する方法。 対象エリアを均等に分割し画素 (voxel) として表し、各無線リンクで観測されたRSSが、見通し経路上の画素がもつ値の重みづけ和で表されると仮定し、画素ベクトルを観測したRSS値から逆に推定する手法である。対象エリア内の位置と画素の対応関係が既知であることから、人体遮蔽によりRSS の変化が生じた場合にその位置が同定できる。 ※RSS (Received Signal Strength) : 電波の受信強度 ※トモグラフィイメージング法 (Tomographic Imaging Techniques) : 対象エリアを取り囲む形で走査線を配置し、内部の物性の分布を調べる逆解析技術。物理探査や医療診断等で用いられている。
注3	USRP (Universal Software Radio Peripheral)	ソフトウェア無線の開発に使用される無線周波数信号の入出力装置ないし部品。オープンハードウェアとして回路図やFPGAプログラムが公開されており、ソフトウェア無線のために開発されたソフトウェアツールキットであるGNU Radioとも親和性が高い。
注4	Finger-Print法 (Finger-Print Techniques : 位置指紋法)	予め位置ごとに複数の基地局の電波の受信電力を測定した事前学習データ (位置指紋データ) を用意し、実運用時には各端末が測定した複数の基地局の受信電力をパターンマッチングすることにより位置を特定する位置推定手法。GPSを利用しない位置推定法の1つ。
注5	MIMO通信 (Multiple-Input and Multiple-Output communications)	無線通信において、送信機と受信機の双方で複数のアンテナを使い、通信品質を向上させるスマートアンテナ技術の1つ。複数の到来電波を分離して処理することができる。
注6	高調波 (Harmonics)	電気・電子回路において、電圧と電流が比例関係にない場合に発生する歪み波成分の1つ。特に、電源周波数の整数倍の周波数で発生する成分は、高調波と呼ばれる。例えば、1 GHzの電源に対し、2 GHzに発生する歪み波は2倍高調波、3 GHzに発生する歪み波は3倍高調波と呼ばれる。一般には通信品質の劣化や他の電子機器への干渉原因となるため、フィルタ等で除去されることが多い。

No.	用語	説明
注7	伝搬損失	アンテナから放射された電波は空間を伝搬する際に減衰し、その量は使用する電波の波長λとアンテナからの距離d [m]に依存する。これは自由空間の伝搬損失 (LOS) と呼ばれ、次式で計算できる。 $LOS [dB] = 10 \log(4\pi d/\lambda)^2$ 例えば$d=6$ m のとき、2.45 GHzでは56 dB、4.9 GHzでは62 dB減衰する。$d=10$ m のときは、2.45 GHzでは60 dB、4.9 GHzでは66 dB減衰する。
注8	FPGA (Field Programmable Gate Array)	内部の回路を何度でも繰り返し再構成することが可能なデジタル半導体集積回路で回路規模が大規模で複雑なもの。
注9	PPS (Pulse Per Second)	1秒に1パルスを出力することを、1 PPSと呼ぶ。タイミング用途のGNSS受信機などでは、この1 PPSのエッジをGPS時刻またはUTC時刻に正確に同期させることで、高精度な時刻情報を外部に提供する。
注10	ローパスフィルタ (Low-Pass Filter)	入力された電波のうち、低い周波数のみを通過させ、高い周波数を通過させないコンポーネント。
注11	Back-to-Back校正	送受信アンテナ端子間のシステム応答をケーブル直結で取得し、測定時にその特性を測定結果から排除する校正法。
注12	電圧定在波比 (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR)	高周波電力が電源から伝送線路を介して負荷 (例えばアンテナ) に伝送される際の伝送効率を表した指標の1つ。電源からの高周波電力が全てアンテナに伝送された場合には、VSWRは1となり、電源からの高周波電力がアンテナに全く伝送されない場合には、VSWRは ∞ となる。一般的なアンテナでは、 $VSWR < 2$ 程度が設計の目安とされることが多い。この場合、電源からの電力の9割以上がアンテナに伝送されていることを示している。
注13	Optimal Sub-Pattern Assignment (OSPA) metric (最適サブパターン割当メトリック)	ターゲットイメージの真値と予測値の一致度を評価するために使用される指標。予測値が真値の位置や数に完全に一致しなくても、部分的な一致を評価することができる。
注14	フレキシブル導波管 (Flexible Waveguide)	内部に電波を伝搬させられる導波路の一種である導波管を、屈曲可能な構造としたもの。通常の導波管は壁面が金属板で構成されるため屈曲できないが、一般的なフレキシブル導波管は壁面を蛇腹状の金属で構成することで屈曲が可能である。
注15	同軸-導波管変換器 (Coaxial to Waveguide Transition)	同軸ケーブルと導波管の間で電波を変換するコンポーネント。
注16	DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Nois)	任意の形状のクラスタ及びデータのノイズ (外れ値) を識別するアルゴリズム。半径内の点数で領域がクラスタであるか否かを判定し、近傍の密度が閾値を超えている限り、クラスタを成長させ続ける。低密度領域にある点はノイズとして判定する。

概略

本業務では、原子炉建屋（以下、「RB」と略す。）内及び原子炉格納容器（以下、「PCV」と略す。）の内部など、コンクリート壁等の障害物が乱立する見通しの悪い空間において、センサの放射線量データ等を無線で収集し、センサの位置情報を複数のアンテナを用いて特定するシステムを開発する。基地局（以下、「BS」と略す。）から送信される電波を異なる周波数の電波に変換したうえで、センサが取得した放射線量等のデータをBSに対して送り返すことが可能で、受信電力の一部をセンサ用の電源電力に変換できるノードを開発する。

BSとしては、無線電力伝送に必要な大電力を出力できる送信系と、信号処理技術による到来方向の推定が可能なアレーアンテナを用いた受信系を開発する。また、PCV内部など、電磁波の反射が激しい空間内でもセンサの位置と線量データを取得する技術を開発する。なお、センサノード（以下、「SN」と略す。）とBS間の通信には、ノイズ以下の信号強度でも通信可能な変調方式を導入する。これにより、原子炉圧力容器内を含むRB内全体のシームレスな無線通信環境を実現することを目的とする。

以下に、3ヵ年計画の1年目である令和4年度の業務実績を述べる。

(1) 基地局とセンサノード開発に関する研究(国立大学法人横浜国立大学(以下、「横国大」と略す。))

① 高機能アンテナを駆使した無線測位手法の開発

ダウンリンクに2.45 GHz、アップリンクに2倍高調波である4.9 GHzを想定したBSアンテナを開発した。ダウンリンク用2.45 GHz帯送信アンテナのビーム幅は60度とした。4.9 GHz帯アップリンク用受信アンテナは4素子ハイブリッドビーム成形アンテナとし、その指向性走査範囲を60度とした。送信・受信共に、アンテナは単一偏波で設計を行った。

アンテナの基礎設計には電磁界シミュレータを用い、性能試験はネットワークアナライザ、Radio Frequency (RF: 注1) 信号発生器(以下、「SG」と略す。)、スペクトラムアナライザを用いて行った。また、作成したアンテナの耐放射線性については、東京都立産業技術研究センターに測定を委託した。

② センサノードの開発

2.45 GHzのダウンリンク波を受信し、その2倍高調波である4.9 GHzをアップリンクとして送信するSN用アンテナを開発した。高調波を発生させるための非線形回路としてダイオードベースとした回路を用い、通信用の高調波発生性能という観点から特性を評価し、素子及び回路の選定を行った。また、選定したダイオードについて放射線照射試験を行い、高調波特性と整流特性の両面から特性変化及び耐放射線性を定量評価した。耐放射線性については、東京都立産業技術研究センターに測定を依頼した。

(2) センサ位置特定アルゴリズムに関する研究

(再委託先：国立大学法人新潟大学(以下、「新潟大」と略す。))

① パッシブ測位法のアルゴリズムの机上検討

RB内など対象エリア内のロボットや作業者の位置を可視化及び座標化するための電波トモグラフィイメーキング(Radio Tomographic Imaging: RTI)法(注2)を、計算機シミュレーションを用いて開発した。多重波経路情報に基づいてMultiple-Input and Multiple-Output (MIMO)ビームフォーミングを行うことにより各経路の電力変化を取得し、対象領域内におけるターゲットの位置をイメージングする手法を検討した。また、推定誤差の定式化を行い、測定条件(BS数や設置位置、対象領域の形状・規模)の変化による影響を定量化した。さらに、ベースライン測定と実測定で取得された多重波経路の紐づけ手法を検討し、単純な実験室環境での測定により提案手法の動作確認を行った。

② 高分解能測定系の構築とデータ処理手法の確立

8×8 MIMO 無線回路 (2.45 GHz または 4.85 GHz) を調達し、現有のチャネルサウンダ (高分解能電波伝搬測定装置) と組み合わせて高分解能測定系を構築した。また、高精度パッシブ測位法のために次の信号処理手法を開発した。8×8 MIMO チャネル測定により多重波伝搬路を抽出する方法を構築し、移動通信における通信路解析手法として開発された多重波の最尤パラメータ推定法を適用する方法を構築した。また、角度・遅延時間特性の類似した多重波成分 (MPC) 同士をグループ化するクラスタリング手法を開発し、その適用を検討した。さらに、求められたクラスタから電波伝搬メカニズムを同定し、多重波経路を求める手法を構築した。

(3) 電磁波遮蔽領域に対する無線エリア形成手法に関する研究

(再委託先：国立大学法人名古屋工業大学 (以下、「名工大」と略す。))

PCV 内のような無線 BS を容易に設置できない電波遮蔽領域に対して、簡素な方法で無線リンクを構築するため、ペネトレーション・ガイドパイプを無線リンク確立手段とした導波路及びアンテナ素子の開発を行った。伝送路・投入型アンテナの基礎設計は電磁界シミュレータを用いて行い、試作導波路・アンテナの性能評価を RF SG、スペクトラムアナライザ及びネットワークアナライザを用いて行った。

以下に、3 カ年計画の 2 年目である令和 5 年度の業務実績を述べる。

(1) 基地局とセンサノード開発に関する研究

高機能アンテナを利用した方向探知について伝送距離を含めた性能評価を行った。また、無線によるバッテリー充電特性についても、その性能を評価する。また、センサ情報変調回路の構成について検討する。放射線照射試験を経た各種回路・装置を用いた実験を行い、特性の変化を定量的に評価した。

① 高機能アンテナを駆使した無線測位手法の開発

アップリンク系については、令和 4 年度に開発したハイブリッドビームアンテナと電圧制御発振器を用いて、方向探知性能の基礎的性能評価を行った。方向探知だけでなく、複数の BS を用いる 3 点法を適用した際の位置推定性能を評価した。また、周波数領域での変調波に関する復調系システムを構築した。ダウンリンク系については、試作したアンテナの耐電力を実験により評価し、測位実験に利用できる送信電力範囲を決定した。また、令和 4 年度に開発した SN を用いて、通信可能範囲を評価した。上記の検討を経て、開発した SN を用いた方向探知性能及び測位性能を評価した。ここでは、無変調波にて実験を行った。

② センサノードの開発

令和 4 年度に開発した BS アンテナと SN 用アンテナを用いて、通信距離を評価した。この際、放射線照射試験が適用されたダイオードの特性変化を通信距離の観点から評価した。同軸管法のようなジグ等を用いた間接簡易測定の結果とアンテナ実装時の通信距離測定の結果について相関を評価した。これにより間接簡易測定の信頼性を高め、耐放射線試験の省力化を図った。また、変調回路を含めた設計回路の放射線照射試験を実施し、性能変化を評価した。

(2) センサ位置特定アルゴリズムに関する研究 (再委託先：新潟大)

① 高分解能測定系を用いたパッシブ測位法のハードウェア実装検討

令和 4 年度に机上検討した結果を、高分解能測定系 (現有の装置) を用いて評価し最適化を行った。多重波 RTI 法の設計のため、単純な実験室環境において人体を模擬した吸収体を移動しながら複数 MIMO チャネルを取得するマルチポイント測定を行った。RB などの対象環境へ適

用するために必要な条件を明らかにし、多重波 RTI システムの設計法を確立する。机上検討で得られた設計パラメータ（対象領域の形状・壁材、規模、BS 数及び設置位置）による依存性を実験的に確認した。

② ソフトウェア無線機の評価システムの構築

ローカル 5G や Wi-Fi6 を意識して実験試験局免許取得が可能である 2.45 GHz または 4.85 GHz バンドの周波数を対象に市販のソフトウェア無線機（Universal Software Radio Peripheral : USRP X310、米 Ettus Research 社製）を購入し、8×8 MIMO 構成で帯域幅 100 MHz まで柔軟に対応可能なマルチリンク測定システム（4 ノード）を構築した。USRP（注 3）の制御部と MIMO 構成における伝搬チャネル推定及び信号処理の手順とマルチリンク測定のためのネットワーク制御系の構築を行った。

(3) 電磁波遮蔽領域に対する無線エリア形成手法に関する研究（再委託先：名工大）

① 伝送距離評価、通信回路統合化

令和 4 年度に開発したアンテナを用いて横国大と連携し、本実施項目の開発アンテナ及び SN 用アンテナそれぞれを送受信アンテナとして用いたときの電波伝送距離を通信・無線給電の観点から実験的に評価した。

以上、3 ヶ年計画の 2 年目である令和 5 年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

前年度までの成果報告書：

- ・障害物等による劣悪環境下でも通信可能なパッシブ無線通信方式の開発（委託研究）

令和 4 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

JAEA-Review 2024-024

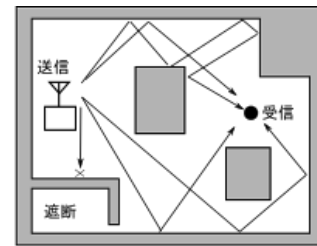
<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2024-024>

1. はじめに

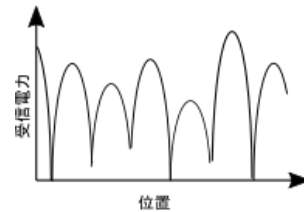
東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（以下、「1F」と略す。）廃炉を進めるために必要なプロセスの1つとして、「燃料デブリの取り出し」があり、そのために RB 内の汚染状況の把握を正確かつ効率的に行うことが求められている。そのために線源分布と空間的線量率分布とを把握し、そして、変化の影響等が予測できるような統合的環境把握システムの構築研究が進められている。このようなシステムを構築するためには、各種センサで得られた情報に加え、その位置情報を同時にデジタルデータ化し、ワイヤレスネットワークを介して収集できることが望ましい。特にロボットによる状況調査や、作業員による線量等の計測においては、その正確な位置情報を連続的かつリアルタイムに把握できることが望ましい。

GPS 信号が利用できない場所での位置推定（以下、「測位」と略す。）問題では、電波や光、超音波などを使った無線ネットワークが用いられる。この中で電波を用いた測位手法は、光や超音波に比して障害物による遮断に強く、利用しやすい特徴をもつ。現状でも多数の BS と、それを結ぶネットワークを配置可能な場合には、測位対象となる SN の位置を推定する手法は既に存在している。しかし、図 1-1(a)に示すような、無線 BS の設置制限と電波の多重反射（多重波環境）や遮断が発生するエリアでは、図 1-1(b)に示すように受信電力の変動も激しく、既存の手法を用いた高精度測位は難しい。また、SN が独自の無線装置や電子回路を搭載できる場合には測位は容易であるが、SN に利用できるバッテリーが搭載できない、もしくは何らかの制限がある場合には、既存手法による無線測位は難しくなる。

一方、1F-RB 内では、燃料デブリの存在する PCV や原子炉圧力容器（以下、「RPV」と略す。）など、高放射線量（以下、「高線量」と略す。）となる領域が存在する。このような領域は放射線防御の観点から非常に厚いコンクリート壁や鋼鉄壁で遮蔽されているため、周囲の無線 BS からの電波は届かない。また、これらの領域内部に耐放射線性の低い集積電子回路（以下、「CPU 等」と略す。）を含む機器、すなわち無線 BS は設置できない。よって、このような領域は有線通信に依存せざるを得ないのが現状である。例えば、PCV 内部の調査を行う際には図 1-2 に示すように、ペネトレーションと呼ばれる壁面貫通孔を介して調査機器の耐放射線性能を有する部分（調査機）のみが内部に投入される。これに数十から数百メートルの長さのケーブル束が接続され、低線量域に設置された情報処理装置から遠隔操作が行われている[1-1]。このような有線接続は、調査機器の可動域を大きく制限するため、その準備や運用に大きな労力と時間がかかる。よって、PCV や RPV などの高線量域に無線通信システムを導入することは、1F 廃炉推進の観点からも重要といえる。



(a) 多重波環境と遮断領域



(b) 多重波干渉による受信電力変動

図 1-1 屋内多重波無線環境

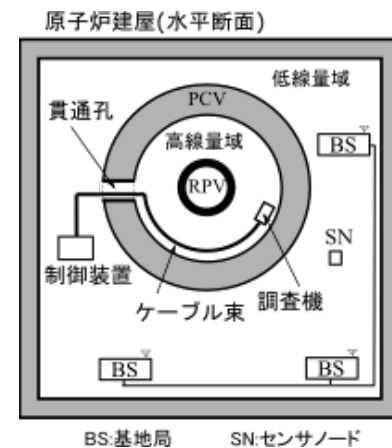


図 1-2 有線による調査方式

以上の背景より本研究開発は、PCV、RPV、使用済み燃料プール（以下、「SFP」と略す。）を含めた 1F-RB 内全ての領域に対して適用可能な無線エリア構築手段の提供を目的とする。これにより 1F 建屋内の汚染状況把握に関する労力と時間を削減できる。そのために、RB 内の多重電波環境や電波遮蔽環境下において、センサデータを位置情報と共にデジタル化して取得・収集できるワイヤレスネットワークを開発する必要がある。図 1-3 にその概念図を示す。具体的には、多重電波環境下で高精度な無線測位を実現するための信号処理技術とアルゴリズム（図 1-3④）を開発する必要がある。また、設備的かつ耐放射線性的に考えてアンテナ設置の自由度が高い領域

を対象として、高機能なアンテナを駆使した無線測位手法（図 1-3⑥）を開発する必要がある。さらに、無線 BS のみならずアンテナの設置自由度が著しく制限された遮蔽高線量域に対する無線エリア形成手法と無線測位手法（図 1-3③）を開発する必要がある。そして、それらに必要な周囲環境や設置方法によらず安定して動作する無線 SN（図 1-3④）を開発する必要があるといえる。

GPS を利用しない測位システムにおいては、SN が無線装置（デバイス）をもち、BS でその信号を受信するアクティブ方式が多い。しかし、人間の立ち入りが困難な場所等においては、バッテリー交換等、無線端末維持管理の観点から見ると、パッシブ（デバイスフリー）方式の方が作業効率が高い。

パッシブな測位法として現在提案されているものには、Finger-Print (FP) 法（注 4）や RTI 法をベースにしたものが多い。FP 法は学習データの構築及び更新に膨大なコストがかかることが難点である。また、狭帯域信号の受信電力情報のみを用いる方式のため、多重波環境で実用に耐える性能を実現することは難しい。一方、RTI 法も位置同定の分解能をある程度確保するためには膨大な数の BS が必要となる。そして、これらの手法には、多重波干渉により同定性能が大きく劣化するという問題がある。そのため、PCV、RPV そして SFP など、電磁波の多重波干渉が発生する電磁波遮蔽領域への適用は容易ではない。

これに対し本研究課題では、センサ位置特定アルゴリズムに関する研究として、ローカル 5G や Wi-Fi6 といった新しい無線伝送システムを意識した多重電波伝搬を利用する新方式の RTI 法（図 1-3④）を開発する。例えば、多重電波成分を分離し個別に扱うことができる MIMO 通信（注 5）をセンシングに積極的に取り込み、多重波の各経路における遮蔽損失変化を個別に扱うことで高精度測位を実現する。ここではまず、SN を携帯する作業員やロボットを想定した測位を検討する。なお、放射線照射の影響については、装置やアンテナの設置法を工夫して回避する方法を検討する。

ところで、アンテナは空間に対するフィルタとしての役割をもつ。よって、システム全体の性能や効率はアンテナの性能や効率に大きく左右される。よって、アンテナ設置の自由度が高い領

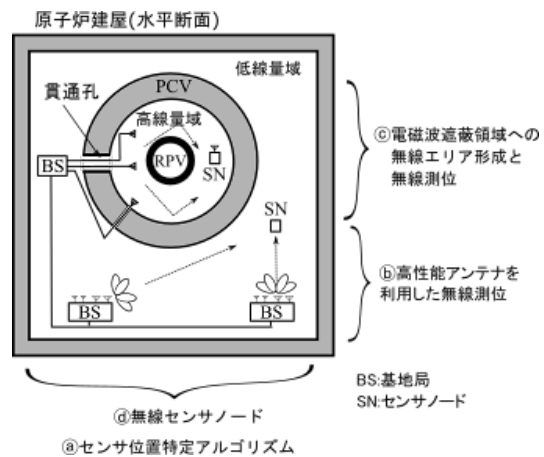


図 1-3 本事業の概念図

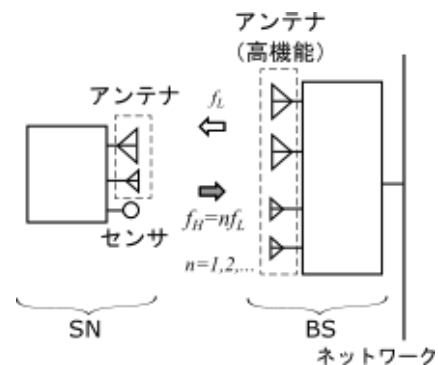


図 1-4 パッシブ SN と高調波を用いた通信システム

域に対しては、高機能アンテナを駆使した無線測位手法（図 1-3⑥）を開発し、放射線照射の影響を受けやすい信号処理装置への負担を軽減する。この場合は、SN からの発信信号に対して測位を行う。

一方で、PCV や RPV 内部のような電磁波が遮蔽される領域では、無線 BS を設置できず、アンテナの設置自由度も小さい。まず、このような電磁波遮蔽領域に対する無線エリア形成手法（図 1-3③）を開発する。なお、この遮蔽領域のような高線量環境となる可能性がある場所では、放射性物質の処理・管理技術の観点から、施設壁面に新たな貫通穴を設ける手法は容易には選択できない。そのため、ここでは既存の施設構造の特徴を最大限活かした無線エリア形成及び無線測位について検討する。具体的には、放射線耐性の低い集積回路を含む無線 BS は PCV 外部など、低線量域に設置し、そのうえで、PCV 等に存在する複数の貫通孔やガイドパイプを電波伝送路やアンテナとして利用した無線通信や無線測位方法について検討する。

また、これらに共通して必要となる周囲環境や設置方法によらず安定して動作する無線 SN（図 1-3④）を開発する。SN としては、耐放射線性が比較的良好なディスクリット型非線形素子を用いた構成を検討する。BS からの送信波との混信を避けるために、応答電波としては非線形素子で発生する高調波（注 6）を用いる（図 1-4）。なお、SN については耐放射線性を特に評価・考慮する必要がある。RFID の耐放射線性に関する研究例としては、放射線遮蔽構造の導入により 5,000 Gy 程度の耐放射線性を実現した例や [1-2]、250 Gy 程度の耐放射線性を有する汎用 RFID を用いた原子力施設作業者の安全管理用 RFID システムが報告されている [1-3]。これに対し 1F に関する実績としては、平成 24 年に実施された PCV の内部調査において耐放射線性 800 Gy の工業用内視鏡が使用された例や [1-4]、現在進行中の 3 号機 PCV 内の調査で 200 Gy の耐放射線性を有する水中探査機が利用された例がある [1-5]。このような例を参考として放射線照射試験を行い、SN の耐放射線性能を評価する。なお、高線量に耐えうる SN は、図 1-5 のように RPV 内などの人が近づけない場所に散布し、その環境情報を無線取得するなどの利用法も考えられる。

研究目標の達成により、線量値や位置データのデジタル化と無線取得が可能となる。また、高線量域における無線通信が可能になると、遠隔調査ロボットなどの調査装置の可動範囲が広がり、調査に要する労力や時間が削減される。PCV や RPV などの電波遮蔽環境などに対し、既存の開口と信号処理技術を利用して高度な無線システムを構築する手法は、アンテナ設置場所に空間的な制限が強く課される場合での通信品質改善に寄与する。導波路の作成方法等は本研究開発固有の問題といえるが、このような環境に適した無線通信システムの構築方法として、応用範囲の広い技術課題といえる。本研究開発で得られた装置の耐放射線性に関する知見は、宇宙通信システム等に直接的に活かすことができる。劣悪な電波環境における測位技術は、宇宙通信や廃炉問題以外にも広く利用が期待できる。このように本研究の成果は、原子力分野特有の基盤技術の向上をはじめ、他分野への波及効果も十分に期待できる。

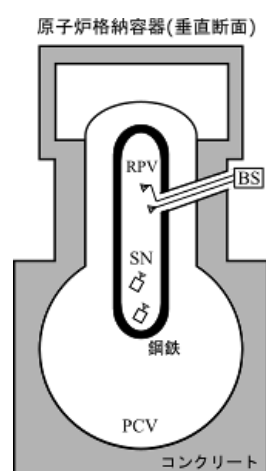


図 1-5 RPV 内への無線エリア形成例

2. 業務計画

2.1 全体計画

令和4年度は、SN及びそれと通信を行うためのBS用アンテナや導波路の開発を行う。また、測位アルゴリズムについてのシミュレーションを行い、高分解能測定系の構築とデータ処理手法を準備する。令和5年度は、アンテナの放射特性を利用した方向推定について伝送距離を含めた性能評価を行う。また、令和4年度に検討した測位アルゴリズムをハードウェア実装し、SNをもつ作業員を想定した最適化を行う。さらに、RB等の現場での利用を想定し、ソフトウェア無線機（以下、「SDR」と略す。）を用いた評価系を構築する。令和6年度は、SNが設置されたロボットを想定した最適化を行う。また、令和4年度までに得られた成果の統合を検討し、さらなる性能向上及び実用化を考慮したスケールダウン等を行う。そして、事前情報が取得できないケースに対する本成果の展開について検討する。

本事業の全体計画を表2.1-1に示す。本事業は、(1)BSとSNの開発に関する研究、(2)センサ位置特定アルゴリズムに関する研究、(3)電磁波遮蔽領域に対する無線エリア形成手法に関する研究で構成される。次に、実施体制を図2.2-1に示す。事業全体は横国大が受託し、項番(1)を横国大が担当し、項番(2)及び(3)は新潟大と名工大に再委託されている。本研究開発では、「高機能なアンテナを積極的に利用した無線測位手法」と「周囲環境や設置方法によらず安定して動作する無線SN」に関する検討というアンテナを中心とした研究開発を担当する横国大と、「センサ位置特定アルゴリズム」に関する研究を担当する新潟大、「電磁波遮蔽領域に対する無線エリア形成手法」の実現を目指す研究を担当する名工大が連携し、研究目標の達成を目指す。

2.1.1 基地局とセンサノード開発に関する研究

パッシブ型SNにより環境情報の収集を行い、高機能アンテナによって測位を行う。極低信号レベルでの情報伝送を含む。

(1) 高機能アンテナを駆使した無線測位手法の開発

本項目ではアンテナ設置の自由度が高い領域での利用を想定し、高機能なアンテナを駆使した無線測位手法を開発する。その概要を図2.1-1に示す。具体的には、BS用受信アンテナとして、ビーム（アンテナの最大感度方向）を用いた低精度な方向探知と、角度分解能の高いヌル（アンテナの最小感度方向）を用いた方向探知という2つの機能（ハイブリッドビームフォーミング機能）を有するアンテナを開発する。これを複数用いてSNを測位するシステムを構築する。

BS用送信アンテナにはSNに対する無線電力伝送用電力源としての機能が求められるため、大電力送信に耐えうる簡素な構成を想定し、方向探知用の高機能性は想定しないものとする。これに加え、SNとの電磁波的結合効率の改善に必要な施策（例：アンテナの複偏波化）について検討する。これは、受信アンテナ・送信アンテナ及び次項SNの開発に共通した課題である。

(2) センサノードの開発

電波の送受信に1次バッテリーが不要なパッシブ型SNを開発する。具体的には、BSからの送信波を受信し、それにより発生する高調波を利用してBSに応答する構成を検討する。また、センサタグの散布など、その設置状態を事前に決定・予知できない場合でも確実に動作させるための構成について検討する。なお、耐放射線性を考慮し、送受信の周波数変換にはダイオード等のディスクリット型非線形素子を利用する。

SN の受信電力を BS への応答電波生成以外に、センサの駆動や処理用のバッテリー充電に用いる構成（セミアクティブ SN）についても検討する。そのうえで、周波数変換回路に対する放射線照射試験を実施し、耐放射線寿命の観点から、アクティブタグとの性能比較を行う。また、耐放射線試験データを蓄積し、その高調波発振特性の変化データを線量観測に活用するための検討も行う。なお、ここでは平成 24 年の PCV 内部調査で利用された工業用内視鏡の仕様を参考に、200～1,000 Gy 程度で動作することを目標とする[1-4][1-5]。

2.1.2 センサ位置特定アルゴリズムに関する研究
コンクリート壁等が乱立するなどして見通しが悪い、もしくは電磁波の反射干渉が激しい環境下において、センサ位置を無線により推定・特定するためのアルゴリズムを開発する。

本研究課題では、ローカル 5G や Wi-Fi6 といった新しい無線伝送システムを意識した多重波伝搬を利用する RTI 法を用いたパッシブ測位法の開発を行う。すなわち、MPC を分離し個別に扱うことができると MIMO 通信をセンシングに積極的に取り組み、ターゲットの位置を通る多重波の各経路における遮蔽損失の変化を個別に扱うことにより高精度測位を実現する。

SN の到来方向を用いたアクティブ測位法の開発も実施する。また、ロボットや作業者が SN（デバイス）を携帯することが想定されるため、パッシブ・アクティブ測定法の併用による、さらなる高精度化を検討する。

2.1.3 電磁波遮蔽領域に対する無線エリア形成手法に関する研究

高線量となる PCV や RPV など、無線 BS を容易に設置できない領域に対して簡素な方法で無線リンクを実現し、BS レベルの高度な機能を実現する伝送路に関する研究を行う。

PCV に複数存在する貫通孔（ペネトレーション、ガイドパイプ）を電波伝送路として複数同時に利用した無線通信や無線測位を実現することを目指す。また、アンテナ工学の観点から理想的な貫通穴が実現された場合の特性について検討し、より効率的かつ妥当な手法を検証する。

これらの成果は、横国大及び新潟大における検討に用いるアンテナとして応用する他、ミリ波などでのイメージングも想定した検討を行う。PCV、RPV などの高放射線領域について、事前にその内部状況がわからない場合の初期情報を求めることも想定する。

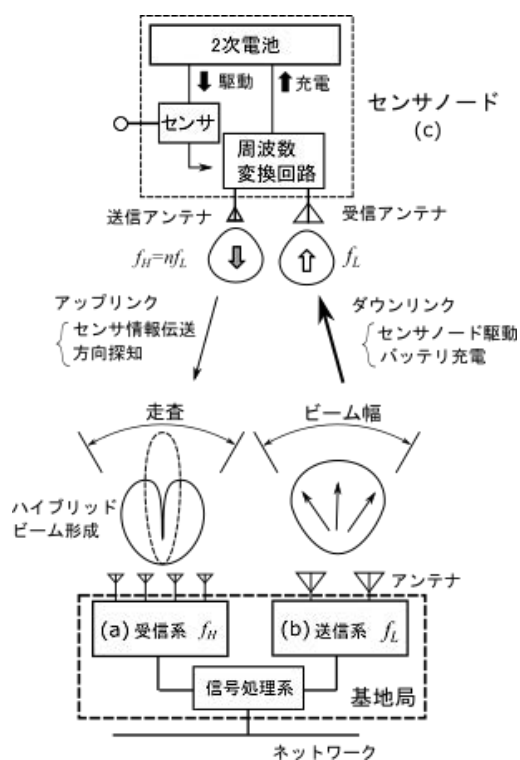


図 2.1-1 パッシブ SN と高機能なアンテナを駆使した無線通信システム

表 2.1-1 本事業の全体計画

実施項目	令和 4 年度			令和 5 年度			令和 6 年度		
(1)BS と SN の開発に関する研究 (横国大)									
①高機能アンテナを駆使した無線測位手法の開発			アンテナ開発	方向推定性能評価	位置推定性能評価		システム性能評価		
②SN の開発			アンテナ開発	伝送距離評価	通信回路開発		通信距離・品質改善検討		
(2)センサ位置特定アルゴリズムに関する研究 (新潟大)			アルゴリズムの机上検討など	ハードウェア実装検討	評価システム構築		高性能化検討	システム検証	
(3)電磁波遮蔽領域に対する無線エリア形成手法に関する研究 (名工大)			アンテナ開発	伝送距離評価	通信回路統合化		通信距離・品質改善検討		
(4)研究推進			進捗報告会	進捗報告会			進捗報告会		

2.2 実施体制

実施体制を図 2.2-1 に示す。

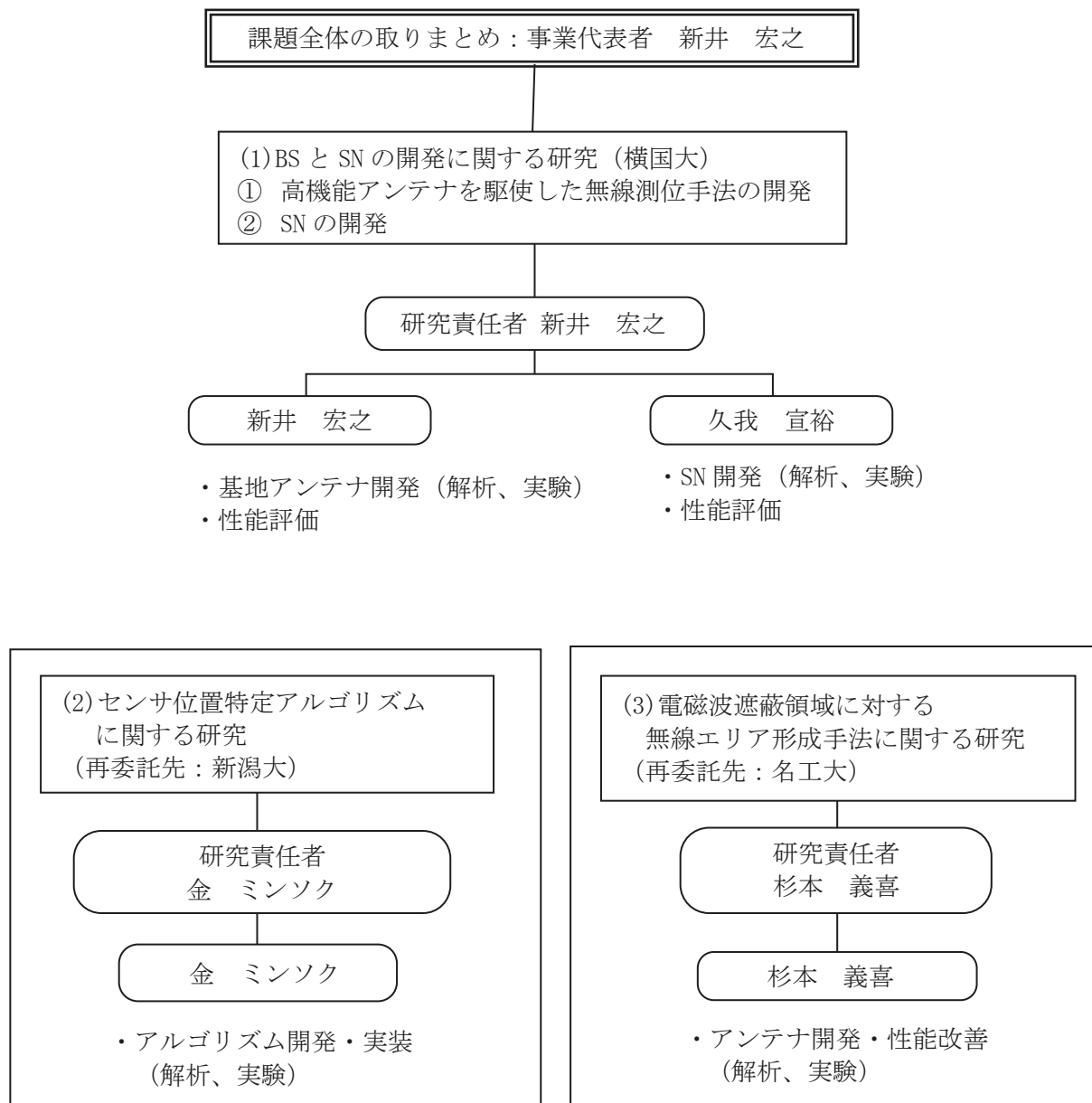


図 2.2-1 実施体制

2.3 令和5年度の成果の目標及び業務の実施方法

2.3.1 基地局とセンサノード開発に関する研究

高機能アンテナを利用した方向探知について伝送距離を含めた性能評価を行う。また、無線によるバッテリー充電特性についても、その性能を評価する。また、センサ情報変調回路の構成について検討する。放射線照射試験を経た各種回路・装置を用いた実験を行い、特性の変化を定量的に評価する。

(1) 高機能アンテナを駆使した無線測位手法の開発

アップリンク系については、令和4年度に開発したハイブリッドビームアンテナと電圧制御発振器を用いて、方向探知性能の基礎的性能評価を行う。方向探知だけでなく、複数のBSを用いる3点法を適用した際の測位性能を評価する。また、変調波に関する復調系システムを構築する。ダウンリンク系については、試作したアンテナの耐電力を実験により評価し、測位実験に利用できる送信電力範囲を決定する。また、令和4年度開発したSNを用いて、通信可能範囲を評価する。上記の検討を経て、開発したSNを用いた方向探知性能及び測位性能を評価する。ここでは、無変調波にて実験を行う。

(2) センサノードの開発

令和4年度に開発したBSアンテナとSN用アンテナを用いて、通信距離を評価する。この際、放射線照射試験が適用されたダイオードの特性変化を通信距離の観点から評価する。同軸管法のようなジグ等を用いた間接簡易測定の結果と、アンテナ実装時の通信距離測定の結果について相関を評価する。これにより間接簡易測定の信頼性を高め、耐放射線試験の省力化を図る。また、変調回路を含めた設計回路の放射線照射試験を実施し、性能変化を評価する。

2.3.2 センサ位置特定アルゴリズムに関する研究

(1) 高分解能測定系を用いたパッシブ測位法のハードウェア実装検討

令和4年度に机上検討した結果を、高分解能測定系（現有の装置）を用いて評価し最適化を行う。多重波RTI法の設計のため、単純な実験室環境において人体を模擬した吸収体を移動しながら複数MIMOチャネルを取得するマルチポイント測定を行う。RBなどの対象環境へ適用するために必要な条件を明らかにし、多重波RTIシステムの設計法を確立する。机上検討で得られた設計パラメータ（対象領域の形状・壁材、規模、BS数及び設置位置）による依存性を実験的に確認する。

(2) ソフトウェア無線機の評価システムの構築

ローカル5GやWi-Fi6を意識して実験試験局免許取得が可能である2.45 GHzまたは4.85 GHzバンドの周波数を対象にUSRP X310を購入し、8×8 MIMO構成で帯域幅100 MHzまで柔軟に対応可能なマルチリンク測定システム（4ノード）を構築する。USRPの制御部とMIMO構成における伝搬チャネル推定及び信号処理の手順と、マルチリンク測定のためのネットワーク制御系の構築を行う。

2.3.3 電磁波遮蔽領域に対する無線エリア形成手法に関する研究

令和4年度に開発したアンテナを用いて横国大と連携し、本実施項目での開発アンテナ及びSN用アンテナを、それぞれ送受信アンテナとして用いたときの電波伝送距離を通信・無線給電の観点から実験的に評価する。

3. 実施内容及び成果

3.1 基地局とセンサノード開発に関する研究

高機能アンテナを利用した方向探知について伝送距離を含めた性能評価を行った。また、無線によるバッテリー充電特性についても、その性能を評価した。さらに、センサ情報変調回路の構成について検討した。放射線照射試験を経た各種回路・装置を用いた実験を行い、特性の変化を定量的に評価した。

3.1.1 高機能アンテナを駆使した無線測位手法の開発

アンテナシステムはダウンリンク（2.45 GHz 帯）で SN への無線電力伝送を行い、アップリンク（4.9 GHz 帯）でセンシングと位置検出を行う。ダウンリンクでは大電力伝送を可能とする BS アンテナが重要である。令和 4 年度試作したアンテナの耐電力を評価し、最大送信電力における通信可能範囲を評価した。アップリンクでは、位置検出とセンシングを可能とする高機能アンテナ「ハイブリッドビームフォーミングアンテナ」が重要である。令和 4 年度から実験系を更改し、実際のバッテリーレス駆動を模擬した通信環境下で、令和 4 年度試作したアンテナの方向探知性能とセンシング性能を評価した。また、三角測量による計算モデルを導入し、高精度推定の可能性を検証した。さらに、センシングに関して復調用アルゴリズムを導入し、微弱電波のセンシングに有効な復調システムを構築した。

(1) ダウンリンク系：2.45 GHz 帯 BS アンテナ

図 3.1.1-1 はダウンリンク系を構築する送受信システムの回路図である。SG から出力される信号は、高調波を抑制する LPF を通過した後、HPA によって電力が大幅に増幅される。そして、16 素子ダイポールアレーアンテナで構成された BS アンテナ Tx

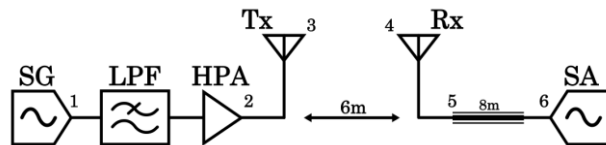


図 3.1.1-1 耐電力試験に係わる実験回路

から空間に電磁波が放射される。受信系はパッチアンテナが Rx に接続され、8 m の同軸ケーブルを通過した後、SA によって所望周波数における電力が観測される。観測信号は基本波（2.45 GHz）と高調波（4.90 GHz）の 2 波である。各周波数を観測することで、基本波を送信する際の電力範囲を明らかにし、アップリンク系に与える妨害波（スプリアス）のレベルを把握する。

小送信電力で基礎検討を実施した令和 4 年度は、Rx アンテナのみならず Tx アンテナについても理論考察の容易なウィルキンソン型電力分配器を用いてアレー給電回路を構成した。これに対し令和 5 年度は、送信電力の大電力化に対応させるために、送信用アンテナ用給電回路に用いられる電力分配器をアイソレーション抵抗が不要な T 型分配器に変更した。この送信アンテナを用いた際の伝送電力特性を図 3.1.1-2 に示す。ここでは、Tx での送信電力 P_{in} を 0 dBm から 43 dBm まで増幅した際の Rx での受信電力 P_{out} を示した。これにより基本波・高調波共に入力波に対して線型な特性が得られていることが確認できた。したがって、送信電力範囲の上限を少なくとも 43 dBm に設定することが可能であることが確認できた。

送信系のスプリアス高調波は SN からのアップリンク波を妨害するため、その受信レベルが実質的な通信下限レベルとなる。そのため、測定系のスプリアス高調波レベルを実験により評価した。図 3.1.1-3 に、 $P_{in}=43$ dBm、 $d=6$ m のときの図 3.1.1-1 内の点 1～6 における基本波及

び高調波の電力レベルを示す。このとき、SA（点6）での受信電力は基本波が13 dBm、高調波が-78 dBmである。よって、このときの通信下限レベルは-78 dBmとなる。このときの高調波の伝搬損失 LOS （注7）は62 dBである。これを $d=10$ mに換算すると、 $LOS=66$ dBとなるため、通信下限レベルは-83 dBmと予測できる。このように、通信下限レベルは送信電力 P_{in} に依存する値となる。なお、この送信系スプリアス高調波レベルは送信系フィルタの高性能化によりさらに低減できるが、それについては今後の課題とする。

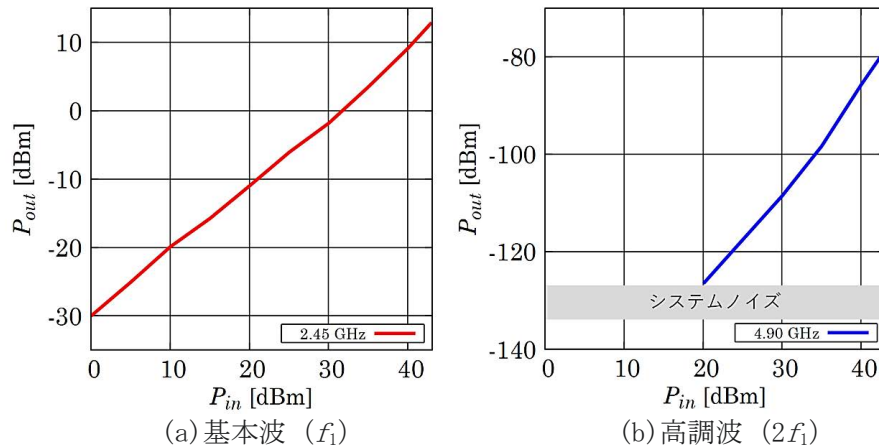


図 3.1.1-2 耐電力試験における受信電力特性

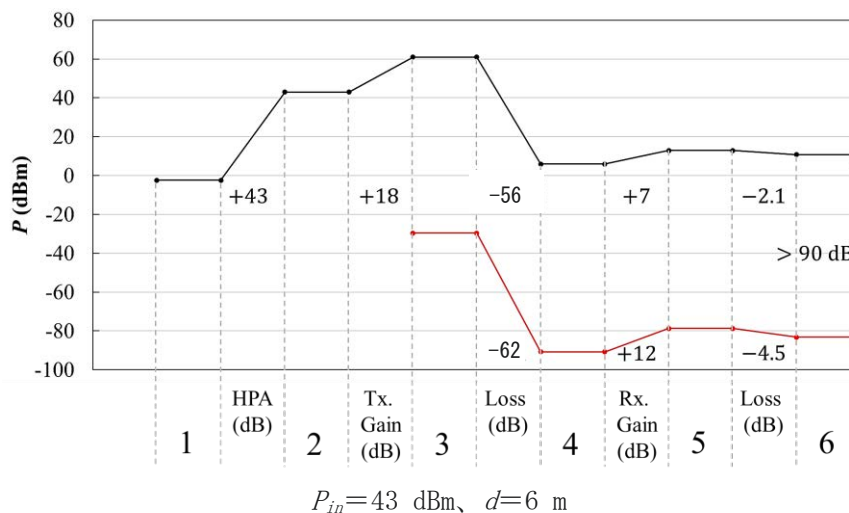


図 3.1.1-3 図 3.1.1-1 の点 1～6 における基本波及び高調波の電力レベル

(2) アップリンク系：4.9 GHz 帯 BS アンテナ

① 方向探知性能の基礎的性能評価

令和4年度に、4.9 GHz 帯ハイブリッドビームフォーミングアンテナを試作し、ビームパターンとヌルパターンの特性把握が完了している。そして、このアンテナが無線信号を検出できることを確認した。しかし、SN の代わりに SG を用いたため、大型な電源が必要である。また、電波暗箱内で評価を行ったため通信距離が 70 cm と限定され、中距離以上での使用可能性が未調査であった。令和5年度は、実際の SN に酷似するアンテナモデルを Voltage Controlled Oscillator (VCO) を用いて製作した。また、十分離れた位置で、製作アンテナがセンシング及び方向探知できることを明らかにした。さらに、使用する高機能アンテナはビーム走査回路を実装する。このとき、ビーム走査で生じる方向探知性能の変化について基礎的性能評価を行った。

図 3.1.1-4 に 4.9 GHz 帯 BS アンテナがもつ方向探知性能の評価方法を示す。(a)は令和4年度の実験系である。SA に BS アンテナが接続され、ノードを模擬したダイポールアンテナには SG が接続されて、信号が送信される。この距離は 70 cm であった。(b)は令和5年度のモデルである。受信系に変化はない一方、送信系に VCO (MiniCircuit 社製、ROS-5150-119+) が接続され、アンテナはプリントダイポールアンテナを用いている。これにより、場所に制約なく設置でき、大型電源不要なノードを模擬している。そして、距離は 7 倍程伸長し、大型暗室内で測定を行った。

表 3.1.1-1 に結果の比較を示す。距離差に変化なくビームピークとヌルピークの間に高い差を確認できた。令和4年度は、ピーク差が 31 dB 生じた一方、令和5年度は 27 dB であった。4 dB ほど減少したが、ヌル走査時のヌル点が推定対称方向からわずかにずれたことが原因と推察する。パターン測定では、33 dB まで深いヌルが得られていることを確認できているため、ローテータや自動回転台を用いた精密測定で解消できる。

ヌル点を電子走査する際の走査角度ごとによる誤差変化を検討した。図 3.1.1-5(a)は、通信距離 10 m を仮定した際の推定誤差である。例えば、ヌル点の有する角度誤差が 1 度の場合、最大 17 cm 程の推定誤差が生じる。一方、10 度の場合は 2 m 近い誤差が生じる。ハイブリッドビームフォーミングアンテナが有するビームの分解能は約 30 度であるため、ビームを用いた精確な測位は難しいことがわかる。一方、角度分解能が高い推定処理には高精度なヌル点が必要である。(b)はヌルの深さ別に、各走査角度で角度分解能が変化する様子を示す。ヌル点の精度が 15 dB のとき、視野角 60 度の範囲で最高 30 度まで誤差が拡大する。一方、30 dB の場合、ヌル点は 3 度から 8 度程度までのばらつきで抑制される。今回のハイブリッドビームフォーミングアンテナは、30 dB 程度のヌル点を有するため、3 度と極めて高精度な推定を可能とする。また、実測値は 2 度のため、解析結果と等しい傾向を確認している。

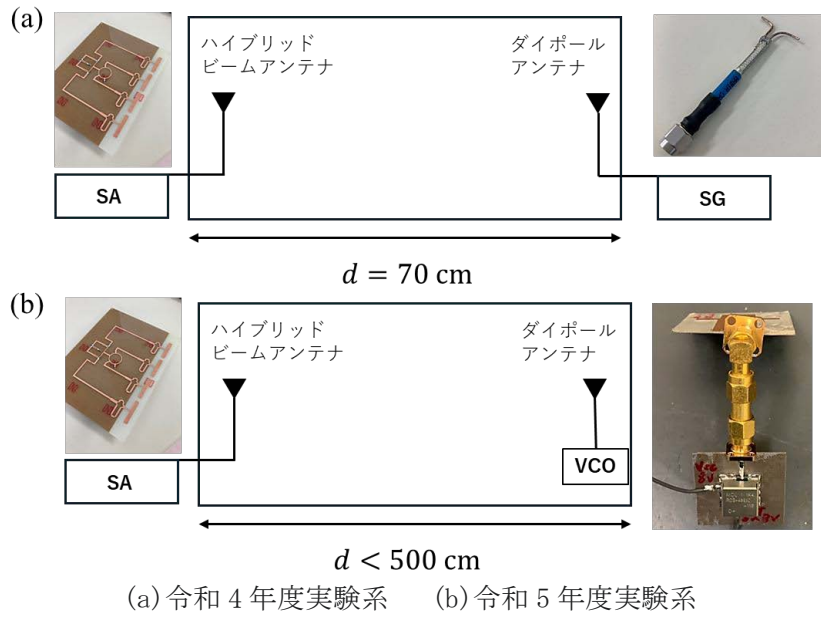
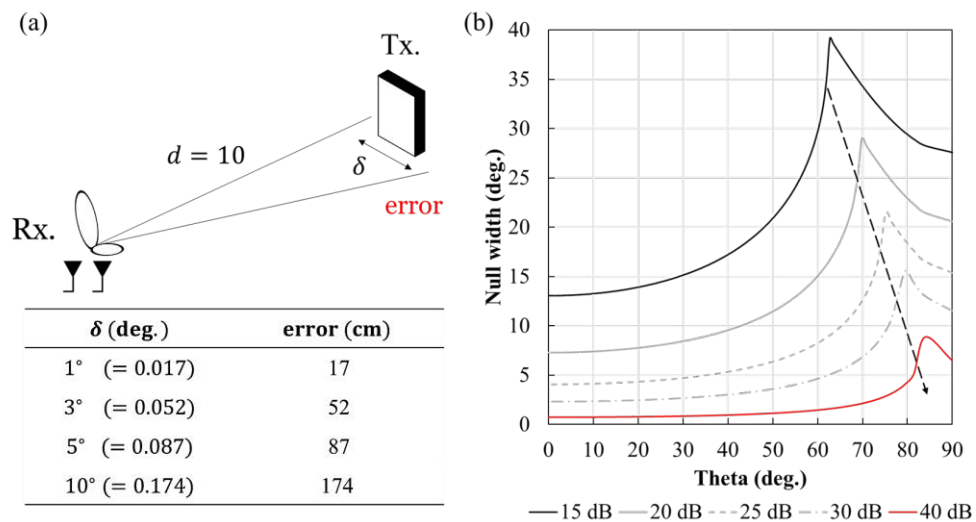


図 3. 1. 1-4 方向探知性能の基礎的性能評価

表 3. 1. 1-1 近中距離の異なるケースについて方向推定性能を評価した結果

	走査モード	送受信距離	受信電力 (dBm)
Case1 (小型暗室内)	ビーム走査	70 cm	-54.0
	ヌル走査		-85.0
Case2 (大型暗室内)	ビーム走査	4.0 m	-50.5
	ヌル走査		-77.8



(a) 通信距離 10 m を仮定した際の推定誤差 (b) 走査角度による角度誤差の変化

図 3. 1. 1-5 ヌル走査特性が有する走査角度ごとの角度分解能の変化

② 複数の BS を用いる 3 点法を適用した際の測位性能評価

図 3.1.1-6 に、受信アンテナを 2 つ用いて位置を推定する際の計算モデルを示す。送信点 P に SN を配置して、 P_1 , P_2 に受信アンテナであるハイブリッドビームフォーミングアンテナが配置される。受信アンテナは、2 素子ダイポールアレーアンテナによるヌル走査で方向推定を行う。この際、図 3.1.1-5 で明らかにしたように、走査角度が変化すると対応するヌル点が有する分解能が変化する。受信アンテナの位置を $(-1, 0)$ 及び $(1, 0)$ とし、ヌル走査角度を θ_1 、 θ_2 、分解能を δ_1 、 δ_2 に対応させたとき、4 本の基線座標が求まる。

$$x_n = -1 + y_n \tan(\theta_1) \quad (3.1.1 - 1)$$

$$y_n = \frac{\sin(\phi_1) \sin(\phi_2)}{\sin(\phi_1) + \sin(\phi_2)} \times |P_1 P_2| \quad (3.1.1 - 2)$$

$$\phi_i = \frac{\pi}{2} - \theta_i \pm \delta_i \quad (3.1.1 - 3)$$

これらの座標で生じる四角形の面積 S の平方根を求め、推定誤差として議論を行う。図 3.1.1-7 は幅 8 m、奥行き 5 m の空間に受信アンテナを配置し、推定誤差を調査した結果である。(a) はヌルの深さが -20 dB のときの三角測量計算結果である。ヌルの深さに対する推定誤差の変化 δ_i は、図 3.1.1-5 (b) より求めている。斜め方向にも最大誤差を有することが明らかである。この方角は 60 度に相当し、ヌルの分解能が最も劣化する角度帯に匹敵する。一方、(b) のヌル点の深さが -30 dB の結果では、方向推定誤差が大幅に改善されることから、推定誤差が軽減され、誤差分布が均一に近いことが読み取れる。

図 3.1.1-8 は、誤差分布について定量的に評価するため、確率密度分布を示した結果である。ヌル点の深さが -20 dB のときは、最大誤差が 3 m を超える箇所が存在する。また、推定誤差が 1 m 程度になる確率は 50% である。一方、-30 dB のときは推定誤差が 1 m 程度になる確率が、およそ 90% を占め、センチメートル級の推定が行えることが明らかである。したがって、ヌル走査の際は全方角に -30 dB を超えるヌルを走査できることが望ましい。製作したハイブリッドビームフォーミングアンテナは、0 度方向に -33 dB のヌルを形成する。この深いヌルによる高精度な方向推定結果は実験で確認されている。

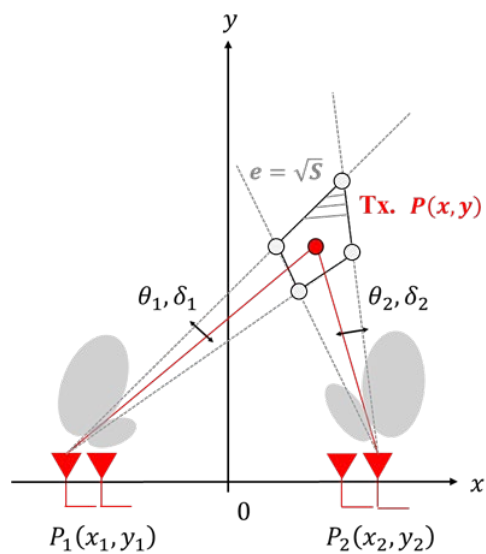


図 3. 1. 1-6 三角測量計算モデル

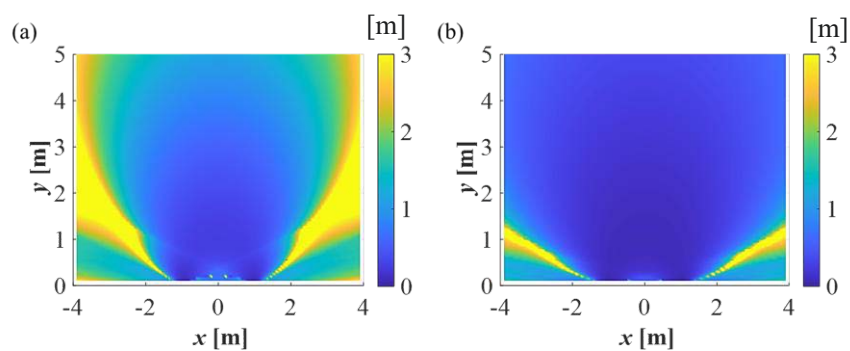


図 3. 1. 1-7 三角測量の推定誤差結果 (a)-20 dB、(b)-30 dB

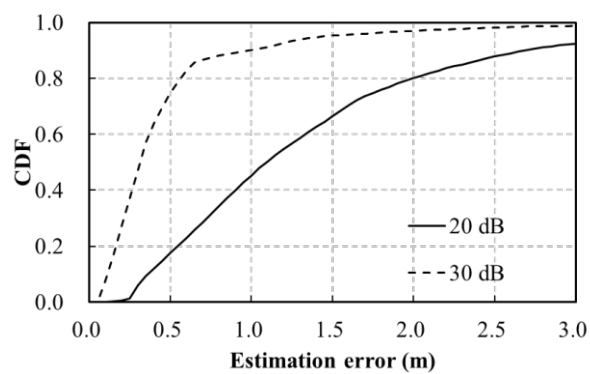


図 3. 1. 1-8 図 3. 1. 1-7 における推定誤差の累積確率分布

③ 復調系システムの構築

図 3.1.1-9 は周波数領域での変調を可能とする変調・復調系システムである。送信アンテナから 2.4 GHz 帯の信号が送信された後、SN の NonLinear Circuit (NLC) で高調波が生成される。その後、周波数特性が Frequency Variable Filter (FVF) によって生成され（変調）、アップリンク系にあるハイブリッドビームフォーミングアンテナのビームパターンで受信される（ヌルパターンは前節の測位アルゴリズムに使用される。）したがって、この変調における重要なデバイスは、SN に搭載された周波数可変フィルタである。このフィルタがもつ周波数特性を受信アンテナが明瞭に確認できれば、正しくセンシング情報を復調できる。

復調系システムを構築する際の課題は、1：周波数可変フィルタの周波数特性が大きく変化すること、2：受信信号の振幅特性を広帯域で測定することである。図 3.1.1-10 は SN の構成である。各特性について、FVF の有無によって特性変化があることが明らかになった。特に、2 次高調波を発生させる NLC は周波数に依存する変換損失をもつため、FVF で変調される場合に信号の振幅特性の変化を引き起こす。そのため、広帯域受信の際の正確な復調に支障が生じる。そこで、受信時の振幅変化を校正し、自動測定するプログラムを LabVIEW で構築した。

図 3.1.1-11(a)は、周波数領域での変調を可能とする復調系システムのフローチャートである。ここでは、(b)に示される NLC の変換損失の変化の影響を抑制する。校正用電力を予め定義して、21 点の周波数を掃引して各周波数で目標値の受信電力に達成するか確認する。達成していない周波数では、送信電力を微増させていき、目標値が得られる送信電力を設定する。そして、設定周波数と該当する送信電力を記録し、以後の自動測定で設定した値が読み出せるようにする。(c)は、送信電力の補正と受信電力の結果である。(b)で生じた NLC の変換損失を解消するために、送信機の出力は周波数ごとに最適化されている。また、受信機における電力は周波数に依存しない一定状態を保持している。

図 3.1.1-12(a)は、校正後データを用いて受信電力を測定するためのフローチャートである。キャリブレーション時の送信周波数と送信電力のデータを読み込み、SG の送信周波数に対応する電力を制御する。そして、受信 BS に設置される SA で受信した 2 次高調波の周波数と受信電力を測定する。出力結果はテキストファイルに保存され、21 点の周波数全てで測定後、プログラムが終了する。(b)は、図 3.1.1-10 にある model C を利用して電圧を 0 V に設定した場合の変化である。Attenuator (ATT) の値を適切に設定し校正を適用することで、0 V における周波数特性を正しく出力できることを確認した。

図 3.1.1-13 に LabVIEW による自動測定アルゴリズムを適用した変復調の結果を示す。(a)は、製作した実験回路である。各回路は 3 端子を介する送受信共用器 Duplexer (DUP) を中心に、ダウンリンク系受信ポート、NLC、FVF に接続される。そして、それぞれの回路間には適切な ATT が挿入されている。ここでは、NLC に接続される ATT2 のみ 4 dB の減衰特性を有する。(b)は、0 V、2 V、4 V を FVF に与えたときの周波数対受信電力特性である。測定値と解析値で同様の傾向が得られることを確認した。また、赤・青・緑の楕円で示された箇所は復調の指標となる特性である。各箇所は受信時の振幅特性の変化が顕著であるため、復調で求めるべき電圧値の判別が可能である。以上より、LabVIEW を用いた校正手法によって本変調が正しく行えることを確認した。

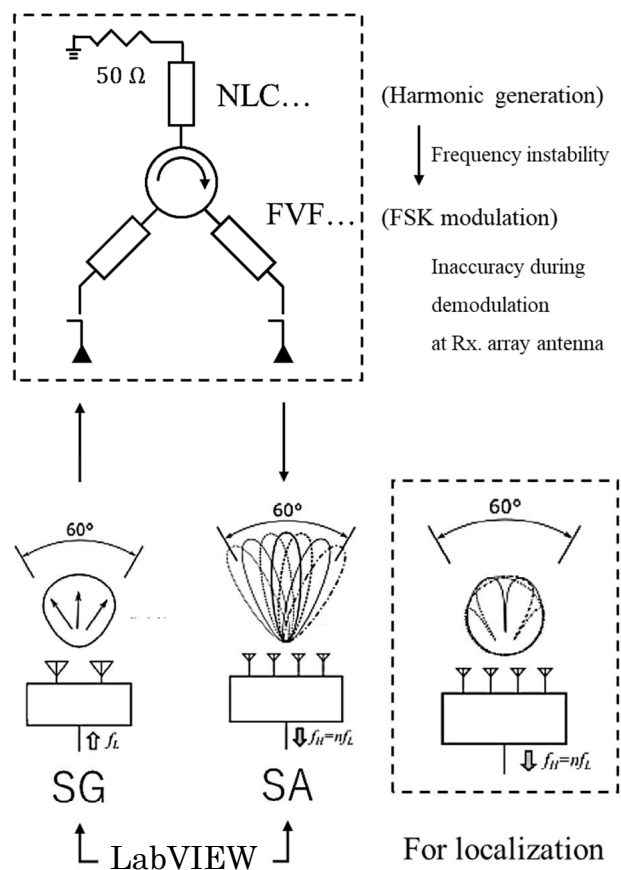


図 3.1.1-9 周波数領域での変調を可能とする変調・復調系システムの概要

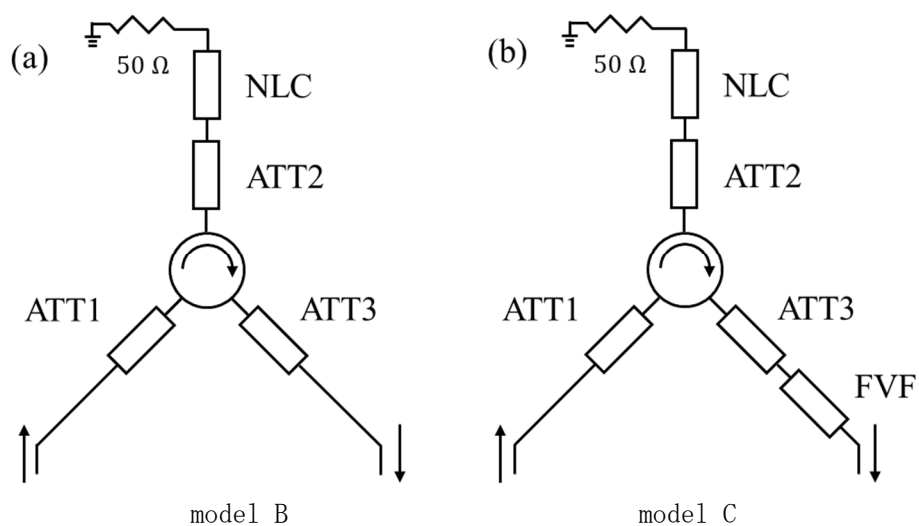
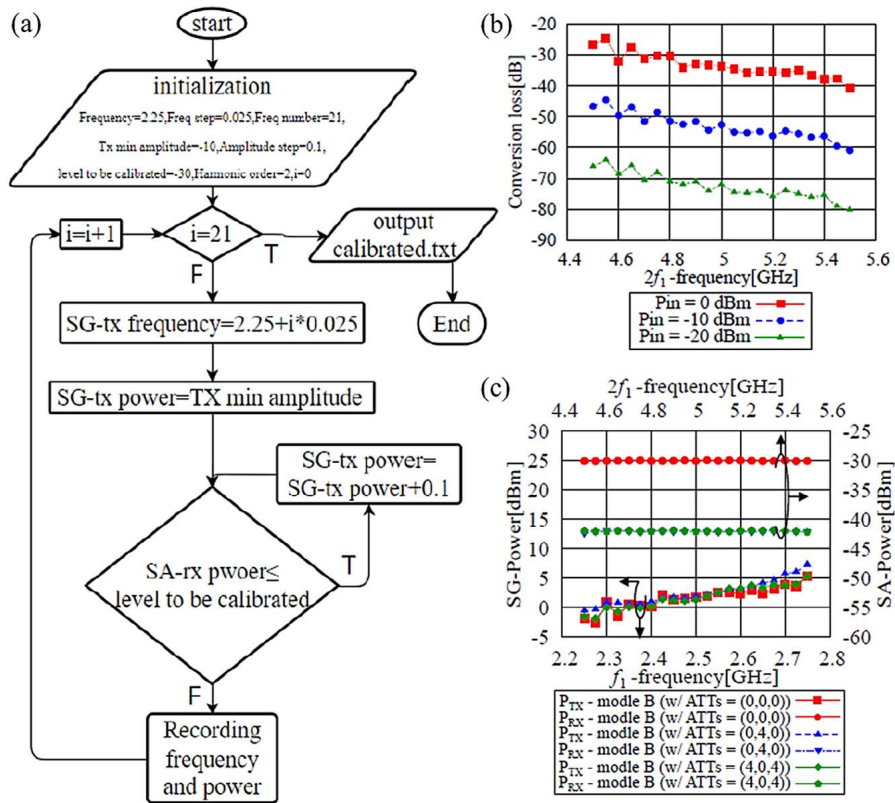
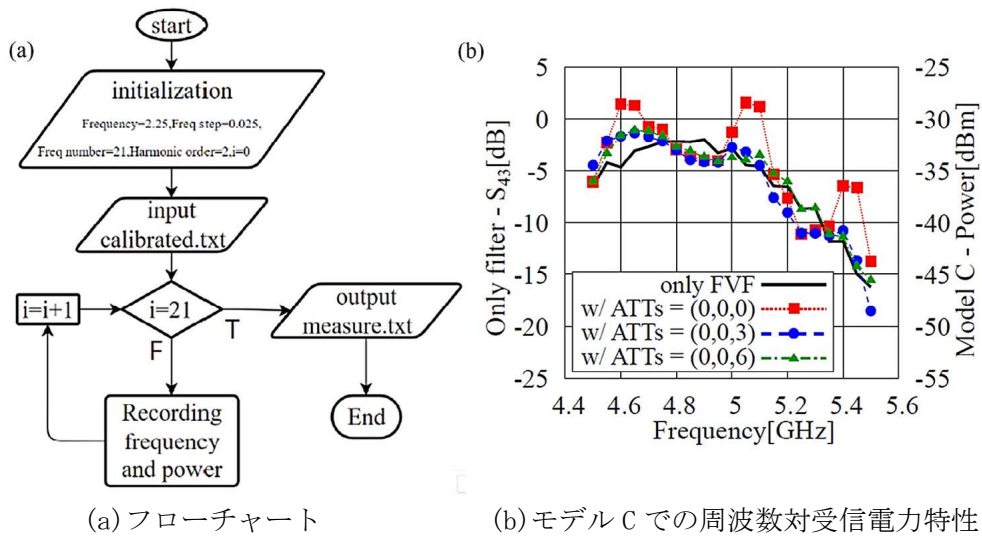


図 3.1.1-10 SN の構成



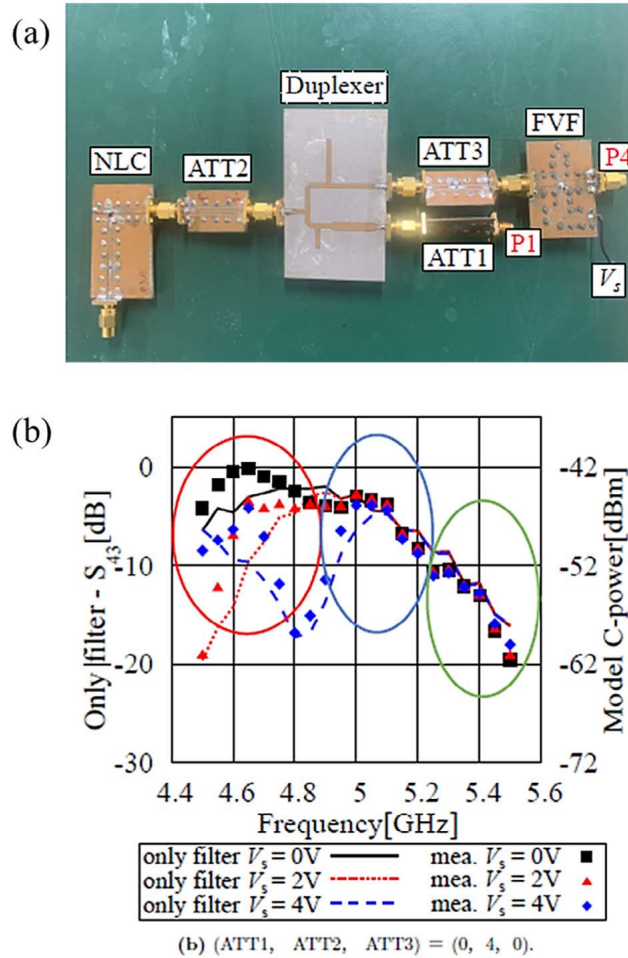
(a) フローチャート (b) モデル B における NCL 周波数対変換損失特性
(c) 校正適用後の周波数対送信電力・受信電力特性

図 3.1.1-11 電力周波数特性校正アルゴリズム



(a) フローチャート (b) モデル C での周波数対受信電力特性

図 3.1.1-12 校正後データを用いた自動測定アルゴリズム



(a) SN 回路の製作写真

(b) SN 電圧 V_s を変化したときの周波数対受信電力特性

図 3. 1. 1-13 LabVIEW による自動測定実験装置

(3) まとめ

高機能アンテナを利用した方向探知について伝送距離を含めた性能評価を行った。アップリンク系については、令和 4 年度に開発したハイブリッドビームアンテナと電圧制御発振器を用いて、方向探知性能の基礎的性能評価を行った。方向探知だけでなく、複数の BS を用いる 3 点法を適用した際の測位性能を評価した。また、周波数領域でセンサ情報の復調を行うシステムを構築した。ダウンリンク系については、試作したアンテナの耐電力を実験により評価し、最大 43 dBm までは実験に利用できる送信電力範囲であることを確認した。さらに、令和 4 年度開発した SN を用いて、通信可能範囲を評価した。上記の検討を経て、開発した SN を用いた方向探知性能及び測位性能を評価した。

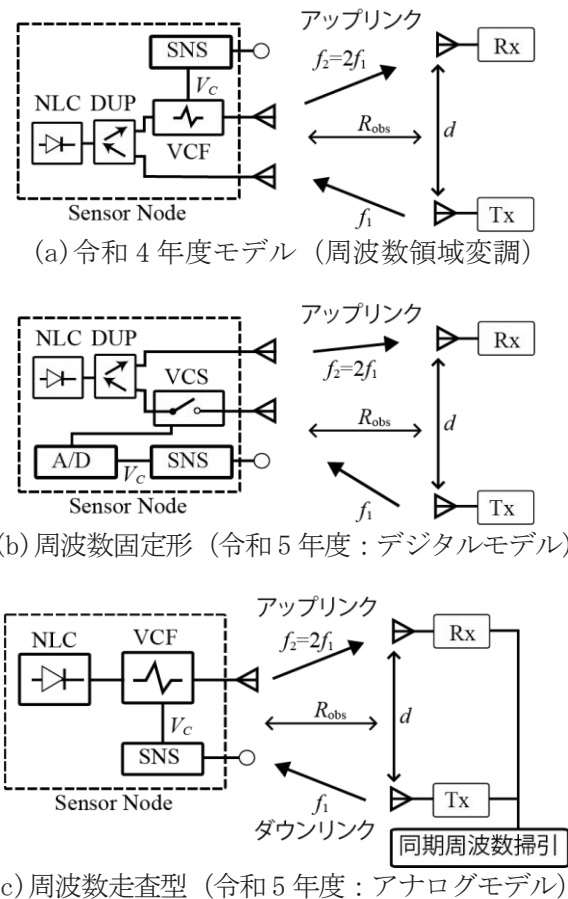
3.1.2 センサノードの開発

令和 4 年度に開発した BS アンテナと SN 用アンテナを用いて、通信距離を評価する。その際、放射線照射試験が適用されたダイオードの特性変化を通信距離の観点から評価する。同軸管法のようなジグ等を用いた間接簡易測定の結果とアンテナ実装時の通信距離測定の結果について相関を評価することにより耐放射線試験の省力化を図る。また、変調回路を含めた設計回路の放射線照射試験により性能変化を評価する。

(1) システム構成

令和 4 年度は、図 3.1.2-1(a)に示す 2.45 GHz 帯をダウンリンク波 f_1 とし、その 2 次高調波（ハーモニクス）である $2f_1$ をアップリンク波 f_2 とするハーモニック SN システムを構築した。その際 SN のアンテナは送受信、すなわち、アップリンクとダウンリンクで独立したアンテナを用いていた。また、センサ出力電圧を電圧制御フィルタ Voltage Controlled Filter (VCF) を介してアップリンク波に変調するための基礎検討を実施した。ここで、BS では送信 (Tx) アンテナと受信 (Rx) アンテナを間隔 d で独立設置するものとし、それらの中心位置と SN の間隔を R_{obs} としている。これに対して令和 5 年度は、データ変調方式の異なる 2 つの方式を検討した。1 つは、図 3.1.2-1(b)に示すようなデジタル IC を用いた方式であり、センサ出力電圧を AD 変換し、これにより電圧制御スイッチ Voltage Controlled Switch (VCS) を開閉してデジタル変調する。ここでは、令和 4 年度の検討結果を踏襲し、送受信で独立したアンテナを有する SN を用いた。

もう 1 つは、デジタル回路を使わないアナログ方式であり、図 3.1.2-1(c)に示すように VCF によりアップリンク波の周波数特性を変調する方式である。この構成は、令和 4 年度に基礎検討した方式を発展させたものであるが、単一のアンテナを送受信で共用することで送受信共用器 DUP を不要としていることが特徴である。また、令和 5 年度の検討では、SN で変調された信号の抽出方法を新たに考案した。すなわち、図 3.1.2-1(c)に示すように、BS 送信機の送信周波数と受信機の受信周波数の間で同期的周波数掃引を行い、これに加えて、新たに導入した後述の校正作業を適用する。これにより SN のセンサ電圧を無線により遠隔抽出できるようになった。



Tx : 送信機、Rx : 受信機、NLC : 非線形回路
 SNS : センサ、DUP : 送受信共用器
 VCS : 電圧制御スイッチ
 A/D : アナログデジタル変換器
 VCF : 電圧制御フィルタ

図 3.1.2-1 ハーモニック SN システム

(2) 周波数固定センサノード（デジタル変調型）

図 3.1.2-2 に周波数固定 SN の構成を示す。図 3.1.2-2(a) は、給電回路が物理的に接続される給電素子基板#2 と、それと電磁氣的に結合して動作する無給電素子が構成された無給電素子基板#3 及び#4 である。給電素子基板#2 の表面には、ダウンリンク用アンテナとしてのパッチアンテナが 1 素子、アップリンク用アンテナとしてのパッチアンテナ 2 素子が構成されており、基板の裏面全面を覆う銅箔はグラウンドとして動作する。無給電素子基板#3 及び#4 の裏面には、ダウンリンク用及びアップリンク用の無給電素子が構成され、これによりアンテナインピーダンスの広帯域化が実現される。図 3.1.2-2(b) は、周波数変換とセンサ信号の変調回路が形成される基板であり、本報告ではこれを回路基板#1 と呼ぶ。回路基板#1 の表面には、ダウンリンク波とアップリンク波を分離する分波回路と情報変調用の電子スイッチ及び周波数変換用の非線形回路が設置されている。令和 4 年度は、分波回路としてサーキュレータを用いたが、令和 5 年度はマイクロストリップ線路による平面型分波器を用いて小型軽量化を行った。回路基板#1 の裏面には、無線充電用バッテリーとセンサの出力電圧の AD 変換や電子スイッチ制御を行うためのマイコンが設置されている。これらアンテナ基板#2、#3、#4 を回路基板#1 上に積層したものが周波数固定形 SN であり、その様子を図 3.1.2-2(c) 及び(d)に示す。ところで、SN の散布による遠隔無線センシングを想定した場合、アンテナ面が壁面や床面に接すると SN が動作不良となる。また、センサタグのアンテナが最適な通信方向となとも限らない。これを回避するために、図 3.1.2-3 に示す立体 SN を検討した。図 3.1.2-2 に示した SN を複数個用いて構成されたもので、(a)は 2 面体、(b)は 4 面体、(c)は 6 面体の場合を示している。このような構成により、使用環境によらず必ず動作する SN が実現できる。本報告では、図 3.1.2-4 に示す 6 面体構成の SN を製作し、その特性を評価した。

次に、本 SN の通信距離を評価するためのデータ伝送実験を行った。現時点では基本検討のため、ノードに具体的なセンサを搭載していない。そのため、マイコンにより 8 ビットの既知ビット列を Identification (ID) として生成させ、これを遠隔値で受信することで情報伝送性能を評価した。実験においては、図 3.1.2-4 に示す 6 面体 SN を用いた。この際、隣接する SN の ID は互いに異なる値に設定した。また、今後の無線充電機能搭載を想定し、電気 2 重層キャパシタを回路駆動用のバッテリーとして採用し、商用安定化電源により充電した後にタグにセットした。

図 3.1.2-5(a) は、壁面が電波吸収体で覆われた電波暗室内で実施した伝送実験における受信レベルの時間チャートである。面 A 及び面 B の ID は、それぞれ「10110101」「11110001」に予め設定されており、面 A、面 B とも、これに応じた時間チャートが遠隔受信できていることが確認できる。ここでは、SN と BS アンテナの距離 R_{obs} は 6 m、送信電力は 33 dBm、送信アンテナの利得は 18 dBi、受信アンテナの利得は 20 dBi である。

図 3.1.2-5(b) は、電波吸収体のない壁面での電波反射が無視できない多重波環境内で実施測定した時間チャートであり、SN の ID は「01001010」に設定されている。ここでは、 R_{obs} が 8 m、送信電力は 20 dBm である。送信アンテナの利得は 18 dBi、受信アンテナの利得は 20 dBi であるが、SN は BS の主ビーム方向からずれた位置に設置されており、障害物も存在する環境である。このときの受信レベル及び SN は、電波暗室内での結果に比べて劣化しているものの、必要な情報伝送は実現できていることが確認できる。

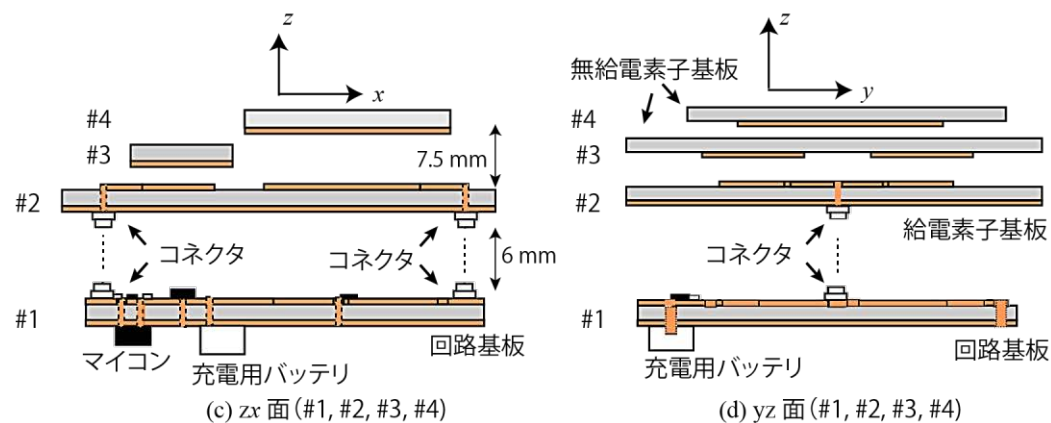
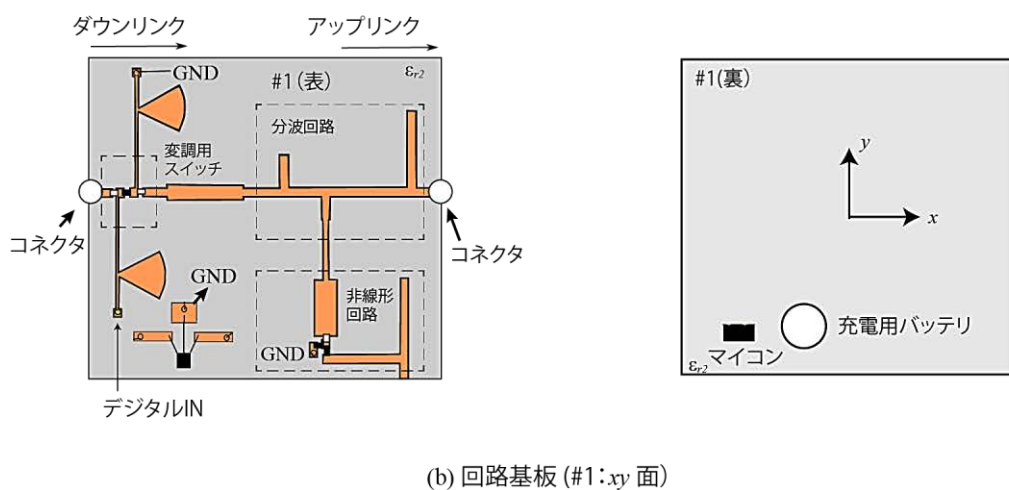
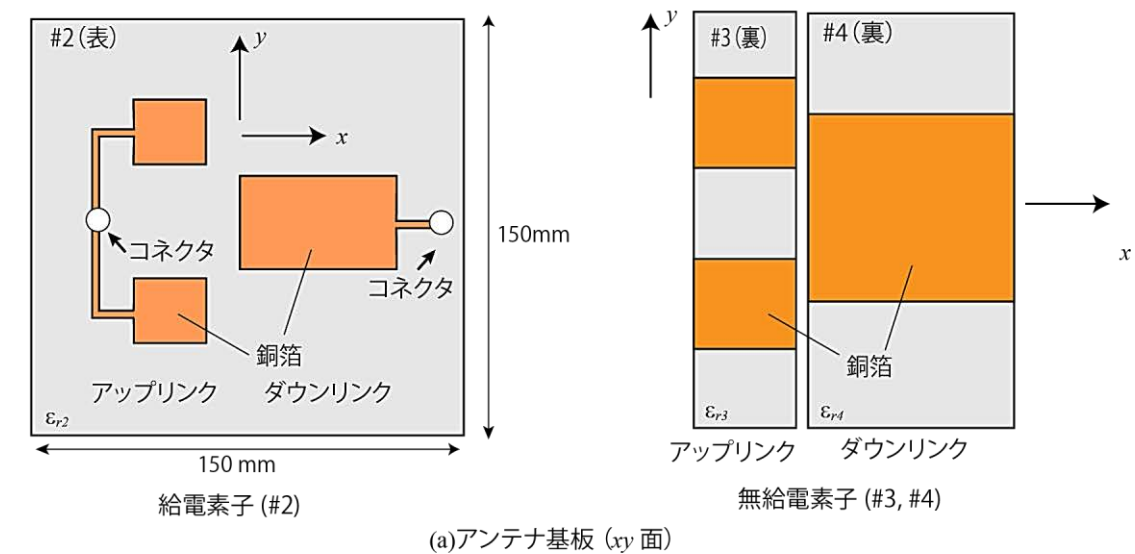


図 3.1.2-2 周波数固定形 SN の構成

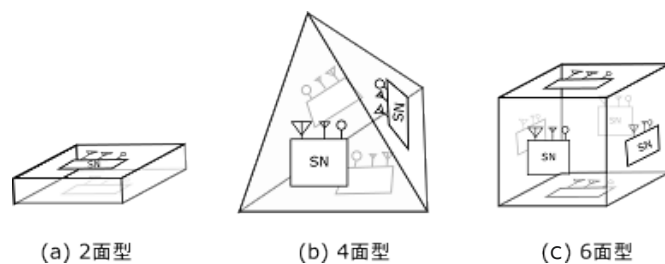


図 3.1.2-3 SN を複数用いて構成した立体 SN

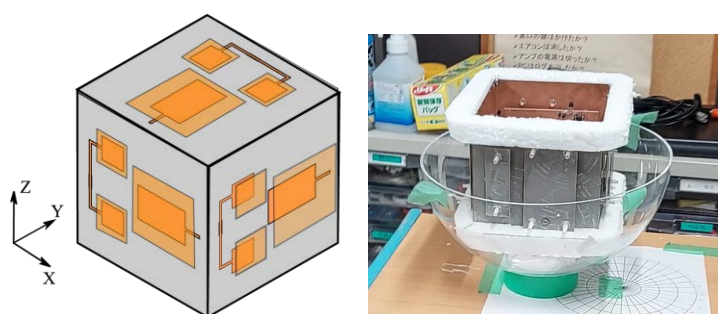
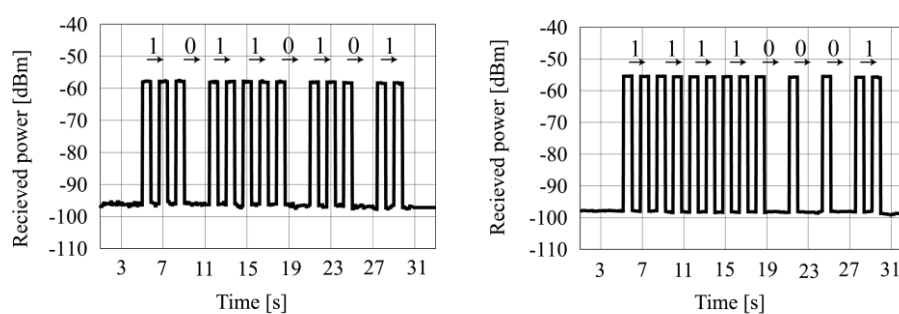


図 3.1.2-4 周波数固定形 SN を用いた 6 面体 SN



面 A

面 B

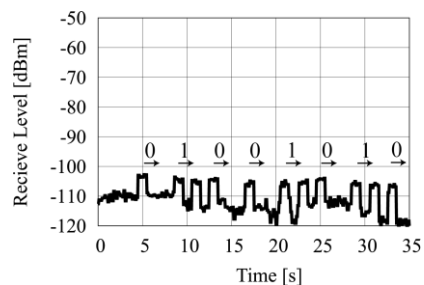
(a) 電波暗室内 ($R_{\text{obs}}=6$ m、 $d=0.65$ m)(b) 多重波環境 ($R_{\text{obs}}=8$ m、 $d=0.65$ m)

図 3.1.2-5 周波数固定形 SN の通信実験

令和4年度は、VCFとして通過帯域が可変するフィルタを用いた。これに対して令和5年度は、図3.1.2-7に示すような特性を有する帯域阻止フィルタをVCFとして用いた。このフィルタは、図中の構成図で示すように、Port1とPort2を入出力端子とするマイクロストリップ線路とバラクタダイオードで構成される。そして、図中のグラフにおけるレベルが下がるほど、伝送量が減少することを示す。3つの化することで、フィルタの阻止周波数が変調レーション結果、オレンジ色の線は実験一致していることが確認できる。

図 3.1.2-8 校正によるセンサ電圧の抽出

このような VCF が搭載された SN では、センサ電圧に対応する周波数において回線減衰量が最大になる。よって、図 3.1.2-8(a) に示すように、BS での受信レベルが周波数によらず一定値になるように送信電力を調整しながら周波数掃引を行うと、図 3.1.2-8(b) に示すように、センサ電圧に相当する周波数で送信電力が最大となる。よって、これよりセンサ電圧を抽出することができる。これが本研究で新たに導入する校正手続きの原理である。この校正手法では、対象となる受信レベルを限定することができるため、受信装置への要求性能を著しく低減することができる。また、令和 4 年度の検討で示したような非線形回路の周波数変換効率やアンテナ間の空間伝搬損失のもつ大きな周波数依存性も除去できる。なお、図 3.1.2-8(b) では $R_{\text{obs}} = 1.0 \text{ m}$ 、 1.5 m 、 2.0 m の 3 通りの検討結果を示している。これにより BS と SN の間隔 R_{obs} によらず、送信電力のピーク周波数が一定値として抽出できていることがわかる。

この SN を用いた実験結果の一例について説明する。図 3.1.2-9(a) は、実験に用いた SN であり、これを図 3.1.2-9(b) に示すような電波暗室内の環境にて評価した。 R_{obs} は 6 m である。ここでは、基本検討のためセンサの搭載はせず、バッテリーと電圧レギュレータ及びポテンショメータによりセンサ出力電圧を模擬した。そのときのダウンリンク周波数に対する送信電力の関係を示したのが図 3.1.2-9(c) である。黒線はシミュレーション結果であり、センサ電圧が送信電力のピーク周波数から明瞭に抽出できることを示している。一方でオレンジ色の線は実験結果であり、センサ出力電圧に応じて送信電力のピーク周波数が可変していることが確認できる。このように原理は確認されたが、その精度には問題がある。これについては、今後の課題とする。

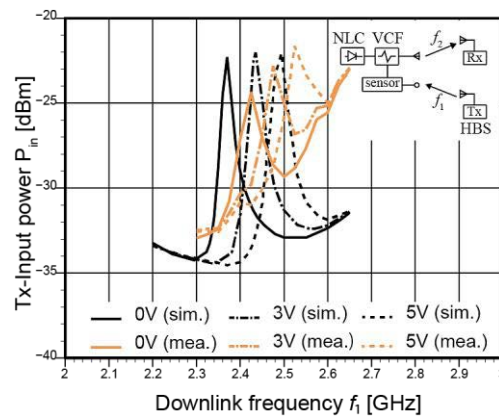
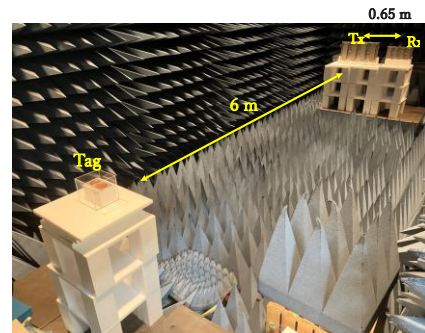
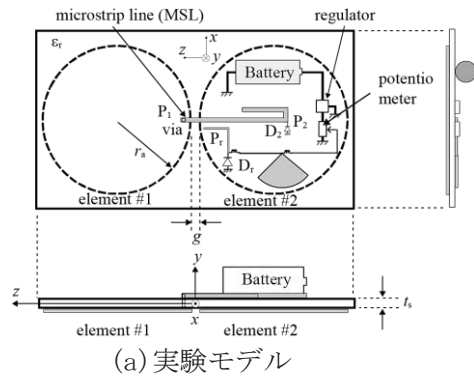


図 3.1.2-9 円板ダイポールアンテナを用いた広帯域 SN のデータ伝送実験

(4) 無線充電試験

本 SN にセンサ回路駆動用電源としてキャパシタ C_c を搭載し、その無線充電性能を評価した [3.1.2-1]。図 3.1.2-10 はそのための実験回路である。ここでは、回路の左端に高周波電力 P_{in} が印加することでキャパシタ C_c を充電し、その際の端子電圧 V_{DC} を、VCF の阻止周波数変化として検出する。この回路に入力電力 P_{in} を印加したところ、充電電圧 V_{DC} は図 3.1.2-11 のようになった。 $P_{in}=6$ dBm のとき 1 V、 $P_{in}=13$ dBm のとき 2 V、 $P_{in}=20$ dBm のとき 4 V 以上の充電電圧 V_{DC} が得られた。

図 3.1.2.1-10 の回路に高周波電力 P_{in} を入力し、かつ周波数 f を掃引したとき、高調波出力電力 P_{out} は図 3.1.2-12 のようになった。各線は $V_{DC}=0$ V、2 V、4 V となるような電力 P_{in} を印加したときの結果である。キャパシタ電圧 V_{DC} に応じた阻止周波数のシフトが $f=2.4\sim 2.6$ GHz の範囲で観測されており、充電電圧が素子電圧の周波数シフトによりモニタリングできていることが確認できた。

この回路に、図 3.1.2-2 に示した SN のアンテナを接続した際のキャパシタ電圧 V_{DC} の充電時間特性を図 3.1.2-13 に示す。実験は電波暗室内で実験し、 $R_{obs}=6$ m、周波数 2.335 GHz、Tx アンテナへの入力電力を 43 dBm として実施した。このとき $V_{DC}=1$ V を得るのに 3 分、 $V_{DC}=2$ V を得るのに 15 分要した。また、昇圧器により 5 V 程度への昇圧が可能であることも確認できた。

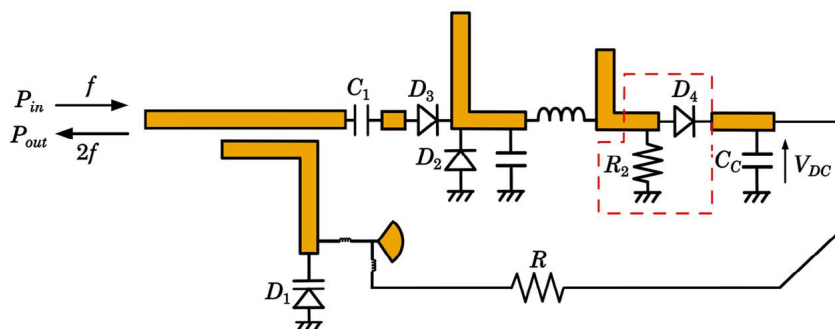


図 3.1.2-10 無線充電キャパシタの端子電圧 V_{DC} をモニタする非線形回路

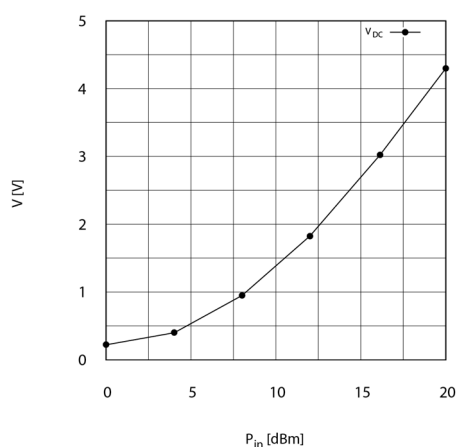


図 3.1.2-11 入力電力に対する充電電圧特性

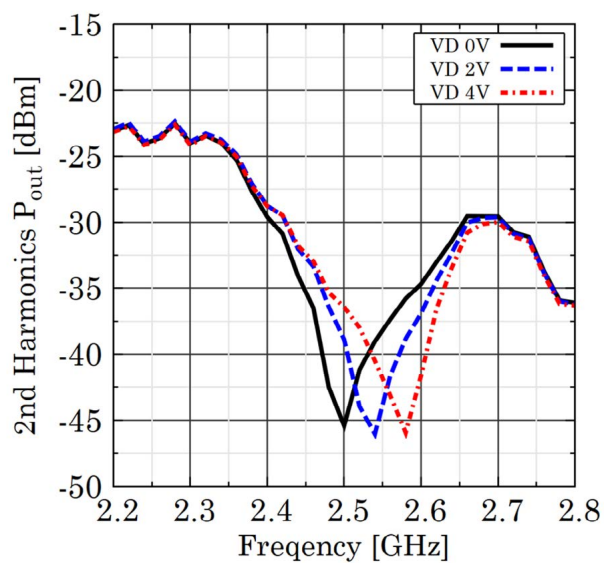
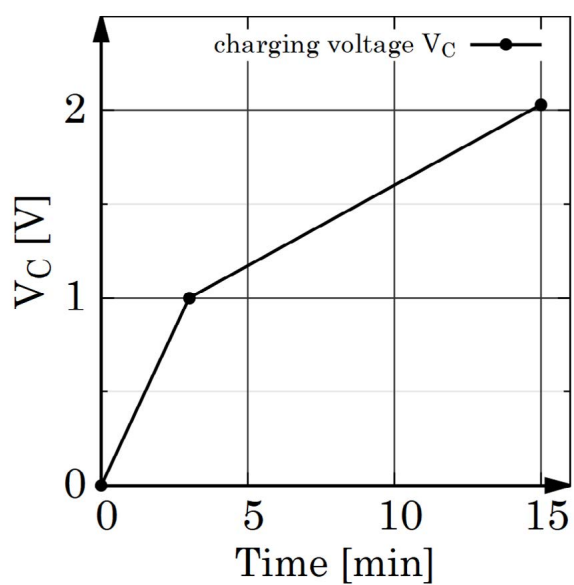


図 3.1.2-12 SN 回路（図 3.1.2-10）で発生する 2 次高調波の周波数特性



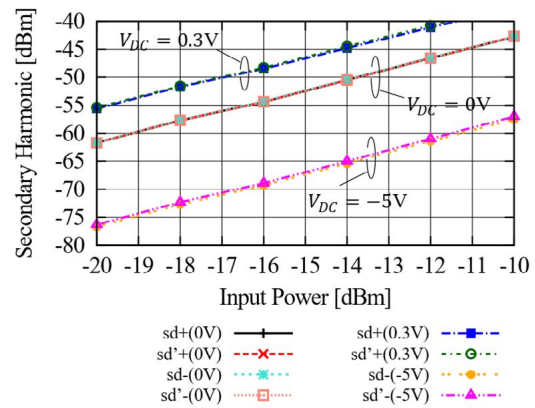
$R_{\text{obs}}=6 \text{ m}$ 、周波数 2.335 GHz、Tx アンテナの入力電力 43 dBm

図 3.1.2-13 無線充電電圧の時間特性

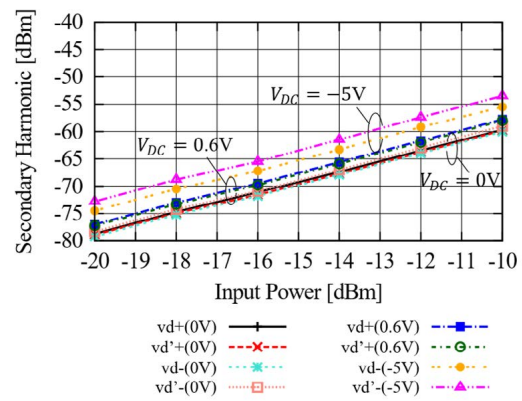
(5) 放射線照射試験

本研究では、SN 内における非線形素子として 3 種類のダイオードが用いている。具体的にはショットキーバリアダイオード schottky barrier diode (sd)、バラクタダイオード varactor diode (vd)、PIN ダイオード PIN diode (PIN) である。この 3 種のダイオードについて、ガンマ線照射がダイオード特性に与える影響を、周波数変換効率を指標にして評価した。放射線照射試験は東京都立産業技術センターにて、セシウム 137 線源から 260 Gy/h となる位置に試料を配置し、積算 1,000 Gy となるまで実施した。当初の目的では、ダイオード特性の変化を通信距離の観点から評価する予定であったが、距離をパラメータにした評価は限られたスペースしかない電波暗室内では現実的でないため、本報告ではダイオードの周波数変換効率を代替評価指標とした。

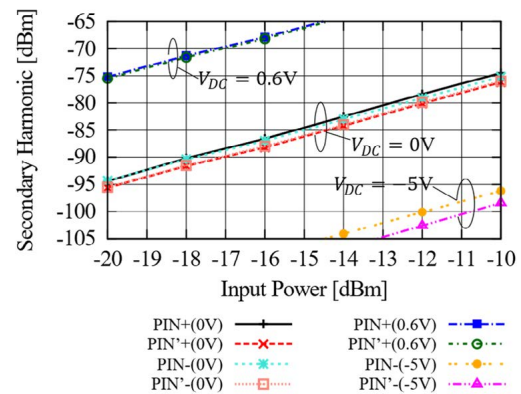
図 3.1.2-14 は各ダイオードの 2 次高調波発生レベル、すなわち、周波数変換効率に対する放射線照射の影響を示す実験結果である。ここでは、ダイオード素子自身の耐放射線性能を評価するために、素子のみに対して放射線照射を行い、これを伝送線路の終端として回路基板に実装したものをサンプルとして扱った。図 3.1.2-14(a) は、主に周波数変換に用いられる sd の特性である。実際の使用状況を模擬する 3 種類のバイアス電圧に対する評価を行ったが、放射線照射の影響は見られなかった。図 3.1.2-14(b) は vd の特性である。sd に比べると観測値に差が見られるが、顕著な放射線照射の影響は見られていない。図 3.1.2-14(c) は PIN の特性である。準バイアス時の影響は無視できるほど小さく、逆バイアス時に数 dB の差が見られている。



(a) ショットキーバリアダイオード



(b) バラクタダイオード



(c) PIN ダイオード

図 3.1.2-14 2 次高調波で評価したダイオードの放射線照射の影響

(6) まとめ

センサ情報変調回路として、情報電圧を阻止周波数として広帯域に変調する周波数走査型回路と、AD変換（Analogue to Digital conversion）の後にキャリアを電子スイッチでオンオフする周波数固定形デジタルスイッチ方式を開発した。令和4年度に開発したBSアンテナとSNを用いて、通信距離を評価し6 m～8 m程度の距離での通信を確認した。また、SNに搭載したバッテリーの無線充電実験を行い、6 mの距離において3分ないし15分で1 Vないし2 Vまで充電できることを確認した。

さらに、1,000 Gyの放射線照射（260 Gy/h）を周波数変換用ダイオードと可変容量用ダイオード及びスイッチ用ダイオードに対して実施し、それらによる顕著な特性変化がないことを確認した。同軸管を用いた高調波の非接触測定についても検討をしたが、試料特性における特筆するような変化は検出されなかった。これについては、さらにデータを集めた後、令和6年度にまとめて結果を示すこととする。

3.2 センサ位置特定アルゴリズムに関する研究

3.2.1 高分解能測定系を用いたパッシブ測位法のハードウェア実装検討

多重波 RTI 法の実現に向けて、ソフトウェア無線機を用いた MIMO チャネル測定系を開発し、1 対抗の測定系を用いてマルチポイント測定を行った。また、レイトレーシング (Ray Tracing: RT) により計算された多重波経路情報を測位に適用する方法の有効性を検証した。さらに、RB の Computer Aided Design (CAD) 図面を入手し、測位法の計算機シミュレーションを通じて必要ノード数・ノード配置などの設計パラメータを検討した他、計算コストを比較した。

(1) RT を用いた伝搬経路情報推定手法

多重波 RTI 法実現のために、実在する伝搬経路を抽出し、その受信電力を推定する必要がある。本研究では、各アンカーノードで複数の素子をもつアレイアンテナを使用し、個々の伝搬経路の受信電力をビームフォーミングにより抽出する。具体的には、各アンテナリンク間の伝搬経路は、測定環境の部屋モデルを使用した RT シミュレーションにより事前に推定される。その後、シミュレーション結果に基づいて、測定された MIMO チャネル行列 $\mathbf{h}$ に対する時空間ビームフォーミングにより、次式のように各リンクの受信電力変化ベクトル $\Delta \mathbf{y}$ (dB) を得ることができる。

$$\Delta y(\phi_{Tx}, \phi_{Rx}, \tau) = |\mathbf{a}^H(\phi_{Tx}, \phi_{Rx}, \tau) \mathbf{h}|^2 - |\mathbf{a}^H(\phi_{Tx}, \phi_{Rx}, \tau) \mathbf{h}_0|^2 \quad (3.2-1)$$

ここで、 $\mathbf{h}_0$ は測位対象領域にターゲットが存在しない場合に測定された MIMO チャネル行列である。また、 $\mathbf{a}(\phi_{Tx}, \phi_{Rx}, \tau)$ は、放射角 (AoD)、到来角 (AoA) 及び遅延時間 (DTtoA) に対するステアリングベクトルである。送信機と受信機の両方で K 素子の半波長間隔のリニアアレイアンテナを使用した MIMO 構成を考える。AoD、AoA がそれぞれブロードサイド方向に対して ϕ_{Tx} 、 ϕ_{Rx} 及び遅延時間 τ で到来する場合、受信信号の振幅を Γ とすると、各リンクの MIMO チャネル行列は、次のように表される。

$$\mathbf{h} = \mathbf{A}(\boldsymbol{\Omega}) \boldsymbol{\Gamma} \in \mathbb{C}^{K^2 N \times 1} \quad (3.2-2)$$

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\Omega}) = [\mathbf{a}(\boldsymbol{\Omega}_1), \dots, \mathbf{a}(\boldsymbol{\Omega}_L)] \in \mathbb{C}^{K^2 N \times L} \quad (3.2-3)$$

$$\boldsymbol{\Gamma} = [\Gamma_1, \dots, \Gamma_L] \in \mathbb{C}^{L \times 1} \quad (3.2-4)$$

$$\boldsymbol{\Omega} = [\boldsymbol{\Omega}_1, \dots, \boldsymbol{\Omega}_L] \in \mathbb{C}^{L \times 1} \quad (3.2-5)$$

$$\boldsymbol{\Omega}_l = [\phi_{Tx,l}, \phi_{Rx,l}, \tau_l] \quad (3.2-6)$$

$$\mathbf{a}(\boldsymbol{\Omega}_l) = \mathbf{a}_T(\phi_{Tx,l}) \otimes \mathbf{a}_R(\phi_{Rx,l}) \otimes \mathbf{a}_\tau(\tau_l)$$

ここで、 N と L は、遅延時間ビンの数と伝搬経路の数を表す。また、 $\otimes$ はクロネッカー積演算子である。さらに、送受信及び遅延時間のステアリングベクトルは次のように表される。

$$\mathbf{a}_R(\phi_{Rx}) = [1, \exp(-j\pi \sin \phi_{Rx}), \dots, \exp(-j\pi(K-1) \sin \phi_{Rx})]^T \quad (3.2-7)$$

$$\mathbf{a}_T(\phi_{Tx}) = [1, \exp(-j\pi \sin \phi_{Tx}), \dots, \exp(-j\pi(K-1) \sin \phi_{Tx})]^T \quad (3.2-8)$$

$$\mathbf{a}_\tau(\tau) = [a_\tau(\tau_0 - \tau), \dots, a_\tau(\tau_{N-1} - \tau)]^T \quad (3.2-9)$$

$$a_\tau(\tau) = \frac{1}{N} \exp(-j\pi \Delta_f \tau) \frac{\sin \pi N \Delta_f \tau}{\sin \pi \Delta_f \tau} \quad (3.2-10)$$

ここで、 Δ_f は周波数サンプリング間隔である。

(2) ソフトウェア無線機を用いた MIMO チャネル測定系の開発

本手法では、各アンカーノード間リンクにおけるインパルス応答 h から各伝搬路の受信電力を推定する。伝搬路測定装置としては、チャネルサウンダや Vector Network Analyzer (VNA) が一般的である。しかし、チャネルサウンダは大型で校正が頻繁に必要であり、VNA は比較的安価だが、周波数掃引に時間がかかり、送受信回路が一体化しているために動的な変動の測定や移動の測定が難しいという問題がある。これらの課題と本手法における背景を考慮すると、低コストで柔軟性のある測定装置が必要となる。また、伝搬路の空間特性を評価するためには、アンテナ回転方式、仮想アレー方式、フルアレー方式の 3 つの方式が主に使用される。アンテナ回転方式は、指向性アンテナを回転させて測定を行う方式で、測定時間が長いという欠点があるが、角度領域の信号処理（ビームフォーミング）が不要である。仮想アレー方式は、アンテナをポジションナーに設置し、測定ごとにアンテナの位置を変更して測定を行う方式で、アンテナ回転方式と同様に測定時間が長いが、アンテナの開口を大きくすることができるため、分解能の向上が可能である。フルアレー方式は、フル MIMO 方式とアンテナスイッチング方式の 2 つの方式に分けられる。フル MIMO 方式は送受信アンテナを複数配置し、それぞれのアンテナと送受信回路を接続することで、複数の送受信経路を同時に測定する。アンテナスイッチング方式は、単一の送受信回路を複数のアンテナに切り替えて使用することで、複数の送受信経路を順次測定する。送信信号はアンテナ間で区別するために、時間分割、周波数分割、符号分割多重化手法が用いられる。フル MIMO 方式は測定時間が短い一方、アンテナ数分の送受信回路が必要であるため開発コストが高く、また、回路構成の複雑さが問題になる。アンテナスイッチング方式は、切り替えに時間を要し複数経路の同時測定ができないため、高速移動測定には不向きだが、低速または静的な環境における測定には有効である。さらに、それぞれ 1 系統の送受信回路で測定できるため、校正が簡易で低コストである。これらの要素を考慮し、本研究では、比較的安価に入手できるソフトウェア無線機に着目し、アンテナスイッチング方式を採用することで、低コストかつ柔軟性の高い Sub-6 GHz 帯 MIMO チャネルサウンダを開発した。

ソフトウェア無線機 Software Defined Radio (SDR) は、無線通信システムの機能をソフトウェアで実装することにより、ハードウェアの変更を必要とせずに多様な無線通信方式を実現可能にし、高い柔軟性をもつ通信技術である。特に、USRP はその回路図や Field Programmable Gate Array (FPGA：注 8) プログラムが公開されていること、オープンソースのソフトウェアプラットフォームである GNU Radio を使用して多種多様な無線通信方式を実現できることから、広範に利用されている。USRP の開発には、GNU Radio だけでなく、LabVIEW や MATLAB/Simulink などのソフトウェアも活用されている。加えて、USRP Hardware Driver (UHD) と呼ばれるドライバ及び Application Programming Interface (API) が提供されており、これを利用することで、C/C++や Python などのプログラミング言語を使って、より高度な制御を実現することが可能である。

本研究では、Ettus Research 社製の USRP X310 を送受信機として採用している。USRP X310 は、マザーボードと 2 つのドーターボードで構成され、ドーターボードを交換することで、Direct Current (DC) から 6GHz までの周波数範囲と、最大 160 MHz のパスバンド帯域幅をもつ送受信機として機能する。本研究では、10 MHz から 6 GHz の周波数帯と 160 MHz のパスバンド帯域幅をもつ UBX160 ドーターボードを使用する。この USRP の主要な仕様を表 3.2.1-1 に示す。USRP とホスト PC の間の接続インターフェースとしては 10 ギガビット・イーサネットを採用し、最大で 200 MS/s (最大パスバンド帯域幅：200 MHz) のデータ転送が可能である。したがって、本構成における USRP の最大帯域幅はドーターボードの Low Pass Filter (LPF) により制限される。

電波伝搬路測定を複数の無線機で行うには、送信側と受信側が周波数とタイミングで同期することが必要である。USRP は REF 端子と Pulse Per Second (PPS : 注 9) 端子をもち、これらは複数の機器を同期するためのインターフェースとして機能する。本研究では、ルビジウム発振器からの同期信号を各ノードの USRP の REF 端子と PPS 端子に供給し、送信側と受信側の周波数とタイミングの同期を実現する。UHD API は PPS に同期して USRP のデバイス時間を設定する関数を提供している。この関数を使用してデバイスとホスト PC 間の通信が確立したときにデバイス時間を 0 に設定すると、USRP のデバイス時間が PPS 信号と同期する。これにより、送受信機間の内部時間 (PPS からの経過時間) が同期される。図 3.2.1-1 は、同期した送受信タイミングのイメージを示している。この図によると、送信機は 0.1 秒ごとに送信を行う。受信機は、送信周期に合わせて任意のタイミングで受信を行う。送受信のタイミングは、UHD API が提供する関数を使用して送受信を開始するデバイス時間を設定することで指定できる。

アンテナスイッチング方式 MIMO を実現するために、RF スイッチを使ってドーターボードのアンテナ端子と接続するアンテナを切り替える。RF スイッチには、SR-J030-8S (Universal Microwave Components Corp.) を使用する。RF スイッチの詳細な仕様は、表 3.2.1-2 に示す。USRP X310 の特性として、ドーターボードとは独立してマザーボード自体に 15 ピンの汎用 General Purpose Input/Output (GPIO) 端子が搭載され、FPGA により直接制御される。UHD API は、これらの GPIO ピンを操作するための関数を提供している。本研究では、この GPIO を使って RF スイッチの制御を行う。図 3.2.1-2 にアンテナスイッチングの制御シーケンス図を示す。送信側は、受信アンテナ素子数の 2 倍分の送信信号を送信した後で、送信アンテナを切り替え、受信側は、送信信号長の 2 倍分の時間でアンテナ切り替えを行う。これにより、スイッチングによる遅延を考慮したアンテナスイッチングが可能となる。

正確な伝搬路測定を達成するためには、ローパスフィルタ (注 10) やアンプ・減衰器の周波数特性等のハードウェア特性を除去する必要がある。これらの特性は、Back-to-Back 校正 (注 11) を施すことで除去可能である。Back-to-Back 測定は、キャリブレーションキットを用いて、送信機と受信機を接続することで実施される。キャリブレーションキットは、内部制御により各送信ポートと受信ポートの接続を切り替えることができるため、手動で接続を変更することなく、8×8 全チャネルに対して Back-to-Back 測定を行うことが可能である。送信信号 $X(f)$ による Back-to-Back 測定から得られる周波数領域の受信信号は次式で示される。

$$Y_{\text{B2B}}(f) = H_{\text{RX}}(f)H_{\text{C}}(f)H_{\text{TX}}(f)X(f) \quad (3.2-11)$$

ここで、 $Y_{\text{B2B}}(f)$ は Back-to-Back 測定によって得られる受信信号、 $H_{\text{RX}}(f)$ は受信機の周波数特性、 $H_{\text{C}}(f)$ はキャリブレーションキットの伝達特性、 $H_{\text{TX}}(f)$ は送信機の周波数特性である。一方、実際の伝搬路測定での受信信号は次式で表される。

$$Y(f) = H_{\text{RX}}(f)H(f)H_{\text{TX}}(f)X(f) \quad (3.2-12)$$

ここで、 $H(f)$ は伝搬路の周波数特性、 $Y(f)$ は実際の伝搬路測定での受信信号である。() 式と () 式を比較して $X(f)$ 、 $H_{\text{TX}}(f)$ 、 $H_{\text{RX}}(f)$ を消去することで、ハードウェア特性を除去した伝搬路の周波数特性 $H(f)$ が得られる。

$$H(f) = \frac{Y(f)}{Y_{\text{B2B}}(f)} H_{\text{C}}(f)$$

$H(f)$ を逆フーリエ変換することで、ハードウェア特性を除去した伝搬路のインパルス応答 $h(\tau)$ が得られる。

表 3.2.1-1 USRP X310+UBX160 の仕様

項目	仕様
FPGA	Xilinx Kintex-7 XC7K410T
Xilinx Kintex-7 XC7K410T	10 MHz～6 GHz
対応周波数帯	160 MHz
10 MHz～6 GHz	16 bit、800 MS/s
最大パスバンド帯域幅	14 bit、200 MS/s

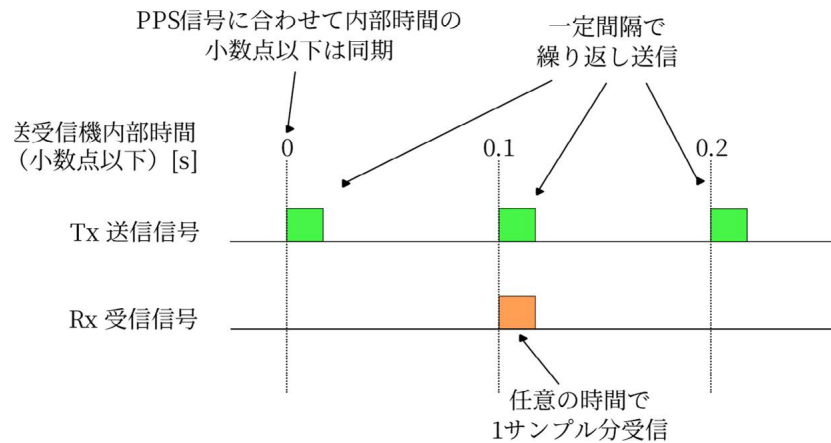


図 3.2.1-1 送受信タイミング同期のイメージ

表 3.2.1-2 RF スイッチの仕様

項目	仕様
動作周波数帯	0.5 GHz～12.4 GHz
挿入損失	3.0 dB Max
アイソレーション	0.5～6 GHz : 60 dB Min 6 GHz～12.4 GHz : 50 dB Min
VSWR (オン状態) (注 12)	1.8 : 1 Max
立ち上り/立ち下り時間 (10% to 90% RF、90% to 10%RF)	40 ns Max
On/Off 時間 (50% TTL to 90% RF、50% TTL to 10%RF)	90 ns Max

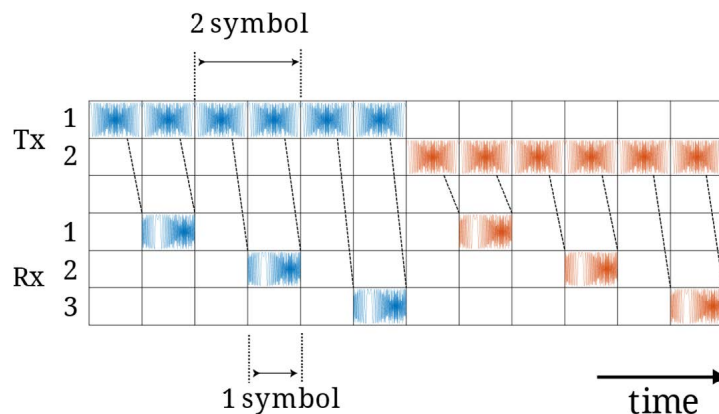


図 3.2.1-2 アンテナスイッチング処理のシーケンス図 (2×3 MIMO の場合)

(3) マルチポイント測定

前節の MIMO チャネルサウンダを用いて、マルチポイント測定を行った。図 3.2.1-3 に示すように、1 対抗のチャネルサウンダを用いてアンテナ位置を移動しながら 4 ノード 6 リンクのチャネル測定を 2 回行い、計 12 リンクのチャネルインパルス応答を取得した。具体的には、図中の丸印がアンカーノード配置であり、同じ色の組み合わせ内でアンテナを移動して 6 リンクずつ測定した。図 3.2.1-4 に RT シミュレーションによって得た、12 リンクの伝搬路を示す。各ノードには等間隔リニアアレーアンテナを用いており、素子間隔は半端長である。表 3.2.1-3 にアンカーノードの座標を、表 3.2.1-4 に測位ターゲットの座標を示す。測位ターゲットは半径 0.3 m の電波吸収体を使用した。チャネル測定は、測位ターゲットが存在しない場合（ベースライン測定）と、測位ターゲットが各配置に存在する場合について行い、後処理により Relative Thermal Index (RTI) 画像の生成と測位を行った。

図 3.2.1-5 に、アンテナ配置パターン 1 におけるアンカーノード 1 を送信、アンカーノード 3 を受信とするリンクのチャネル測定結果を抜粋して示す。このリンクの直線距離は 6.17 m であるため、遅延時間の理論値は 20.6 ns である。また、自由空間伝搬損失は 62 dB で、送受信アンテナの利得は 4 dBi であるため、伝搬損失の理論値は 54.0 dB である。図 3.2.1-5(b) を見ると、遅延時間 20 ns 付近にピークが存在し、受信電力は -50~-60 dB 程度と確認できる。構築した系の遅延時間分解能が 10 ns であることから、理論値と照らしても妥当な結果が得られていることがわかる。

続いて、測定した各リンクのチャネルインパルス応答から双方向角度遅延時間電力スペクトル (DDADPS) を構築した。

$$\text{DDADPS}(\phi_{\text{Tx}}, \phi_{\text{Rx}}, \tau) = \mathbf{A}_{\text{R}}^H(\phi_{\text{Rx}}) \mathbf{h}(\tau) \mathbf{A}_{\text{T}}^*(\phi_{\text{Tx}}) \quad (3.2-13)$$

ここで、 $\mathbf{h}(\tau)$ は測定した MIMO チャネル行列であり、 $\mathbf{A}_{\text{T}}(\phi_{\text{Tx}})$ 、 $\mathbf{A}_{\text{R}}(\phi_{\text{Rx}})$ はそれぞれ送受信アンテナのアレーマニフォールドである。さらに、導出した DDADPS から 100 ns まで遅延時間軸について足し合わせた DDAPS を構築した。

図 3.2.1-6 に測定結果から生成した RTI イメージを示す。比較のために、シミュレーションによって生成した RTI イメージも併せて示す。ここで、RTI イメージの生成及び測位に用いた各種パラメータを表 3.2.1-5 に示す。図中の黄色の丸印は、測位ターゲットの実際の位置を表し、赤色の×印は測位の結果を表す。測定による結果を見ると、概ね実際のターゲット位置の近傍に推定されていることがわかる。Pos. E については、シミュレーションによる結果においてもアーチファクトイメージが存在し、理論上推定が困難であるため、測定結果においても他の Pos. と比較して推定精度が低下している。一方、Pos. B はシミュレーションでは測位ターゲットの半径内で測位ができているが、測定結果で離れた位置に推定されている。これは Pos. B では直接波経路を遮っておらず、反射波の RSS 推定の影響が他の Pos. と比較して大きいためであると考えられる。また、実際の伝搬路と RT シミュレーションによる伝搬路の差異により、推定精度が低下している可能性が考えられる。すなわち、実際には存在しない経路を RT シミュレーションによって生成している場合やその逆の場合が考えられる。これを解決するためには、測定結果と RT シミュレーションの結果を比較し、実際に存在しない経路を除去する必要がある。さらに、測定値から MPC 抽出を行い、RT シミュレーションの結果と紐づけることで、より正確な RTI イメージの生成が可能となることが期待される。

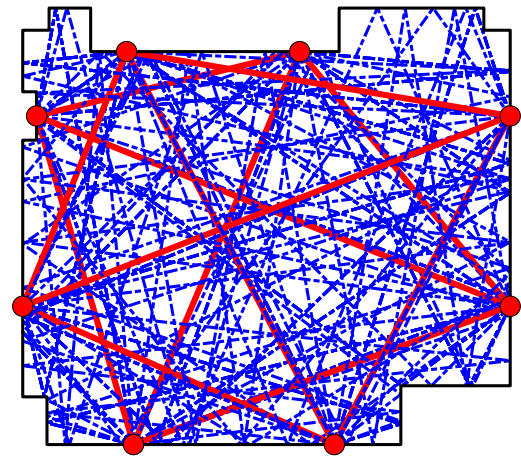
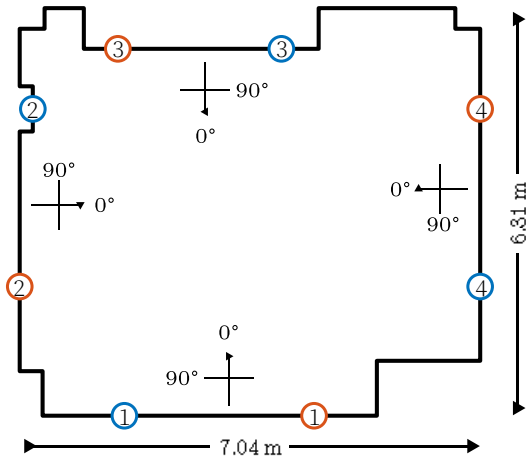


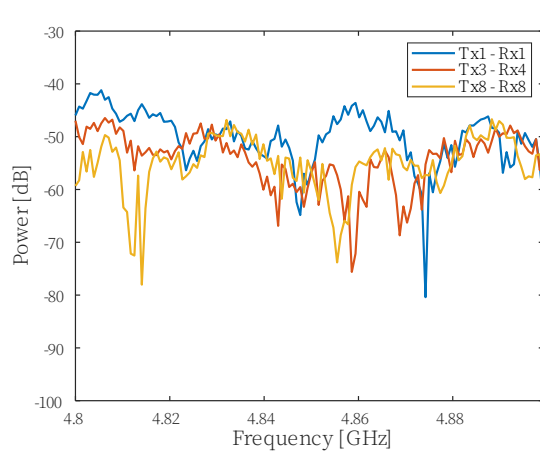
図 3.2.1-3 測位環境及びアンテナ配置パターン 図 3.2.1-4 RT シミュレーションによる伝搬路
(青はパターン1、橙はパターン2)

表 3.2.1-3 各アンテナ配置パターンにおける座標

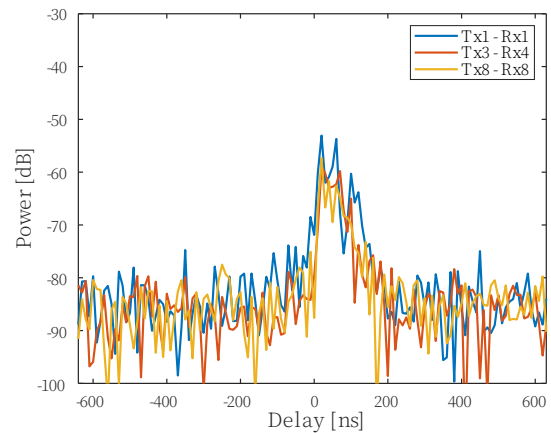
アンカーノード	パターン 1 (x,y) [m]	パターン 2 (x,y) [m]
1	(1.6,0.0)	(4.5,0.0)
2	(0.2,4.75)	(0.0,2.0)
3	(4.0,5.68)	(1.5,5.68)
4	(7.04,2.0)	(7.04,4.75)

表 3.2.1-4 測位ターゲットの配置

Pos.	ターゲット座標 (x,y) [m]
A	(3.52,3.15)
B	(3.00,1.40)
C	(1.40,4.50)
D	(5.50,3.15)
E	(5.50,5.00)



(a) 伝達関数



(b) インパルス応答

図 3.2.1-5 チャンネル測定結果の例 (凡例は送受信アンテナの素子番号)

表 3.2.1-5 各種パラメータ

パラメータ	値
RTI ボクセルサイズ	0.05 m
RTI 楕円パラメータ γ	0.05 m
正則化パラメータ λ	5 分割交差検証により決定
正則化パラメータ α	0.25
DBSCAN ϵ	0.5 m
DBSCAN $N_{\min Pts}$	3

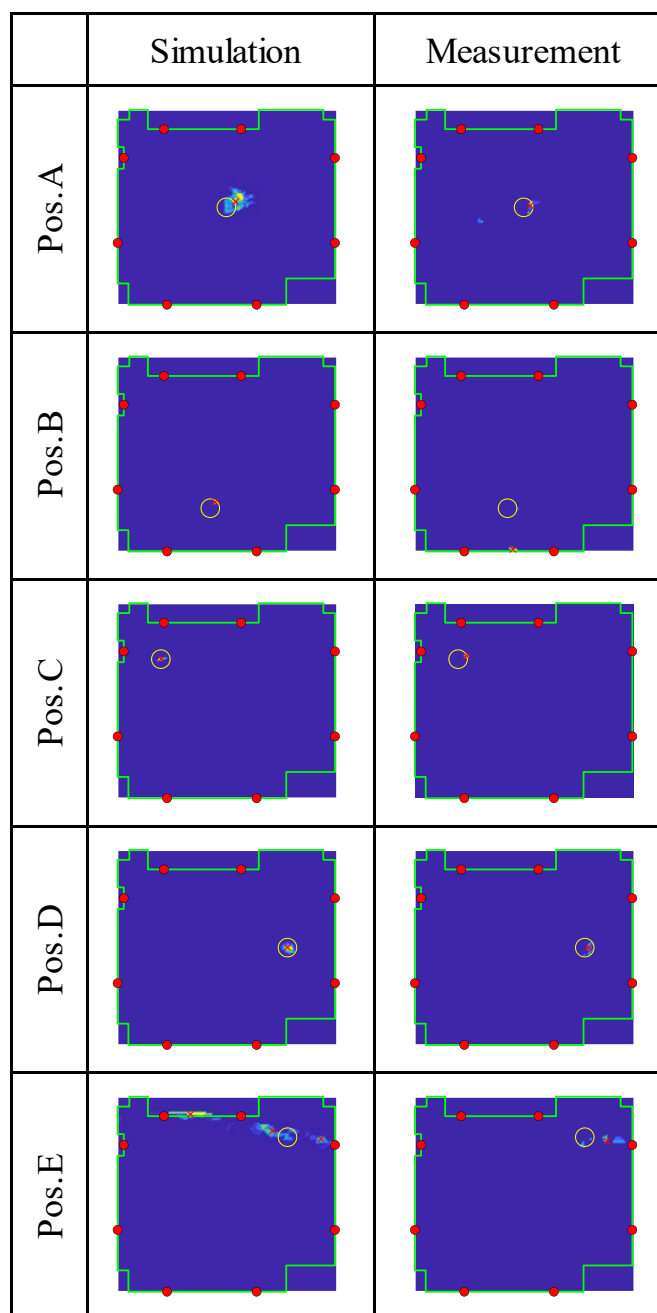


図 3.2.1-6 生成した RTI イメージ及び位置推定結果

(4) 設計パラメータの検討

シミュレーションにより、必要ノード数などの各種設計パラメータの検討を行った。シミュレーションは、計算時間の短縮のために入手した RB の CAD 図面を単純化したモデルを作成した。図 3.2.1-7 に元の 3D モデルと単純化した 3D モデルを示す。このモデルを用いて、ノードの数とボクセルサイズ (RTI イメージの解像度) を変更して、測位精度及び計算時間を比較した。測位精度には、次式で表される Optimal Sub-Pattern Assignment (OSPA) metric を用いた。

$$\text{OSPA}(\mathcal{T}, \mathcal{Z}) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M d_c^2(t_i, z_{\pi(i)}) + \frac{N-M}{N} c^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.2-14)$$

ここで、 $\mathcal{T} = \{t_1, \dots, t_M\}$ は真のターゲットの座標の集合、 $\mathcal{Z} = \{z_1, \dots, z_N\}$ は推定座標の集合、 $z_{\pi(i)}$ は真のターゲット座標 t_i に割り当てられた推定ターゲット座標、 c はカットオフ距離である。また、 d_c は次式で定義されるカットオフベースの距離関数である。

$$d_c(t, z) = \min(d_b(t, z), c) \quad (3.2-15)$$

ここで、 d_b は真のターゲット座標 t と推定ターゲット座標 z のユークリッド距離である。上式は $N \geq M$ の場合であり、 $N < M$ の場合 $\mathcal{T}$ と $\mathcal{Z}$ を互いに入れ替えて計算する。OSPA metric (注 13) は、推定座標と真のターゲット座標の対応付けを考慮した指標であり、実際のターゲット数と推定ターゲット数が異なる場合にも対応できる。ここで、カットオフ距離 c は 3 m とした。

図 3.2.1-8 にアンカーノード配置ごとに実施した RT シミュレーション結果から得た伝搬路を示す。この配置において RTI 画像を生成し、測位を実施した。図 3.2.1-9 に各条件での測位精度を、図 3.2.1-10 に計算時間の比較を示す。図 3.2.1-9 では、8 ノードと比べて 16 ノードの場合の測位精度は明らかによい結果を示しており、ノード数が測位精度に与える影響は大きいことが確認できる。一方、ボクセルサイズは 1.0 m 四方の場合のみ、他の結果と比べて精度が低く、0.2 m～0.5 m の範囲では大きな差は見られない。対して図 3.2.1-10 では、計算時間はボクセルサイズが小さくなるに伴って大きく増加している。これらのトレードオフを勘案すると、精度劣化が許容できる程度に大きなボクセルサイズを指定することが必要であると考えられる。

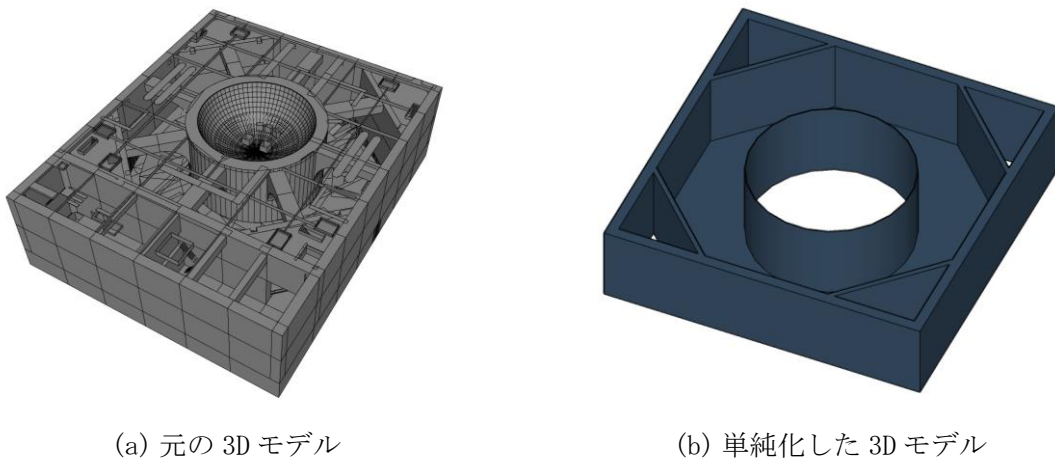


図 3.2.1-7 原子炉建屋の 3D モデル

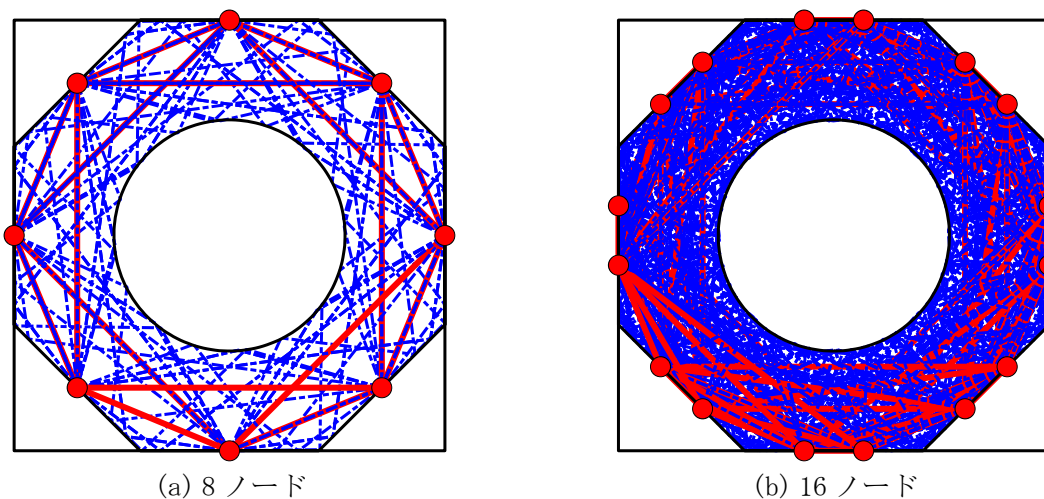


図 3.2.1-8 各アンカーノード配置と RT シミュレーション結果

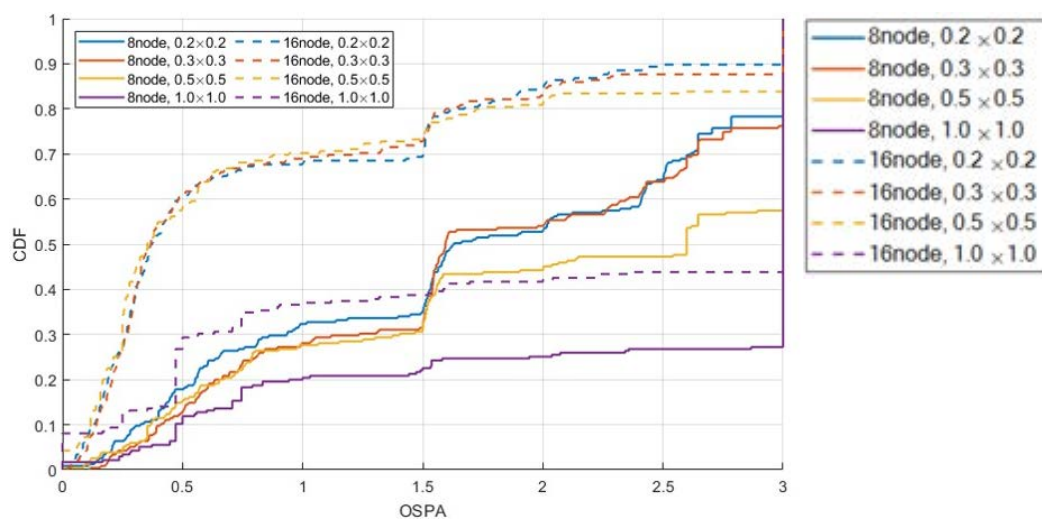


図 3.2.1-9 アンカーノード数・ボックスサイズによる OSPA metric の比較

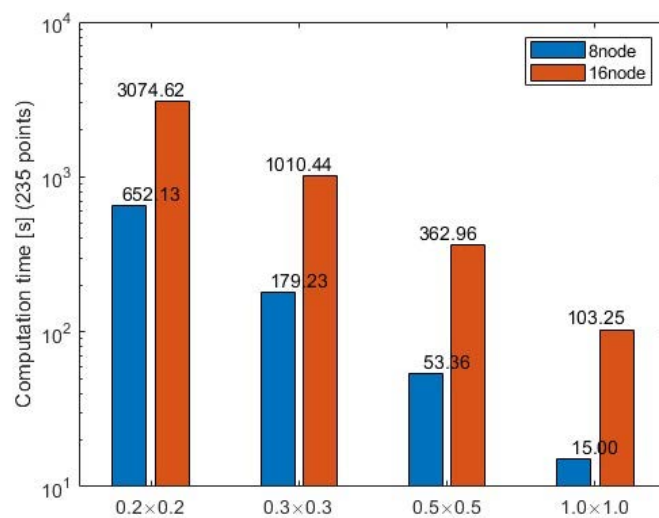


図 3.2.1-10 アンカーノード数・ボックスサイズによる計算時間の比較

3.2.2 ソフトウェア無線機の評価システムの構築

USRP を用いて、2.45 GHz 及び 4.85 GHz バンドで動作する測定系を開発した。USRP の制御部と MIMO 構成における伝搬チャネル推定及び信号処理の手順と、マルチリンク測定のためのネットワーク制御系の構築を完了した。

令和 4 年度開発された 8×8 MIMO 無線回路を基に、既存設備の USRP2942R 及び USRP2954、新規調達した 2 台の USRP X310 を用いて、4 ノード 6 リンクの測定が可能なマルチリンク測定系を構築した。構築した測定系の概要図を図 3.2.2-1 に、外観を図 3.2.2-2 に示す。また、測定系の構築に使用した機器を表 3.2.2-1 に、測定系の諸元を表 3.2.2-2 に示す。各ノードには USRP と、USRP の制御を行う Slave PC が搭載されている。そして、Slave PC に対して送受信命令を行い、全体の制御を行う Master PC がネットワーク (Local Area Network : LAN) を介して接続されている。Master PC から Slave PC への送受信命令は Transmission Control Protocol (TCP) 通信により行われる。各 Slave PC で受信されたデータは Slave PC 内のストレージに保存、もしくは UDP 通信により Master PC に転送することが可能である。

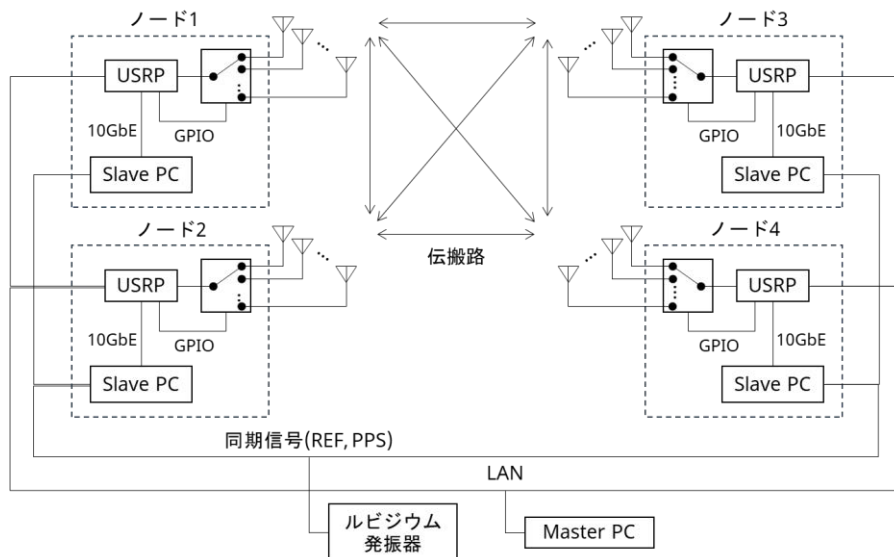


図 3.2.2-1 構築した測定系の概要図



図 3.2.2-2 構築した測定系の外観

表 3. 2. 2-1 使用機器

名称	メーカー	型番
ソフトウェア無線機	Ettus Research	USRP X310
ドーターボード	Ettus Research	UBX-160
RF スイッチ	Universal Microwave Components Corp.	SR-J030-8S
基準発振器	Stanford Research Systems	FS725

表 3. 2. 2-2 測定系の諸元

項目	仕様
搬送波周波数	4.85001 GHz
サンプリング周波数	200 MS/s
信号帯域幅	100 MHz
送信信号	マルチトーン信号
FFT 点数	256
サブキャリア数	128
遅延時間分解能	10 ns
8×8 MIMO 測定時間	164 μ s

複数の無線機を使用して電波伝搬路測定を行うためには、送信側と受信側で周波数及びタイミングの同期を行う必要がある。USRP には、これらの同期インターフェースとして REF 端子と PPS 端子が備えられている。REF 信号は周波数が 10 MHz のクロック信号であり、USRP 内部の局部発振器の基準となる信号である。この REF 信号を送受信機で共有することにより周波数同期を行う。PPS 信号は、1 秒あたり 1 パルスを発生するクロック信号である。UHD には、PPS 信号に合わせて USRP の内部時間を設定する関数が提供されており、この関数を用いて USRP の内部時間を 0 に設定することで送受信機の内部時間が PPS 信号と同期した状態となる。また、UHD の機能として送受信の開始時刻を設定することができる。これを利用し、送信側は 0.1 秒おきに信号を送信し、受信側はそれに合わせて受信を開始することで、送受信タイミングを同期することが可能となる。今回構築した測定系では、ルビジウム発振器を基準発振器として用い、全ての USRP の REF 端子と PPS 端子に同期信号を供給することで周波数同期及びタイミング同期を行う。

マルチリンク測定系においては、Master PC から複数のノードに同時に送受信命令を送出した場合であっても、ネットワークでの遅延や PC の負荷状況によって同じタイムスロットで送受信が行われるとは限らない。そのため、まず送信ノードに送信開始コマンドを送出し、送信開始を確認した後に各受信ノードに受信開始命令を送出するようにした。これにより、受信ノードがどのタイムスロットで受信を開始しても確実に測定することが可能となった。マルチリンク測定系における通信とタイミングの制御を図 3. 2. 2-3 に示す。

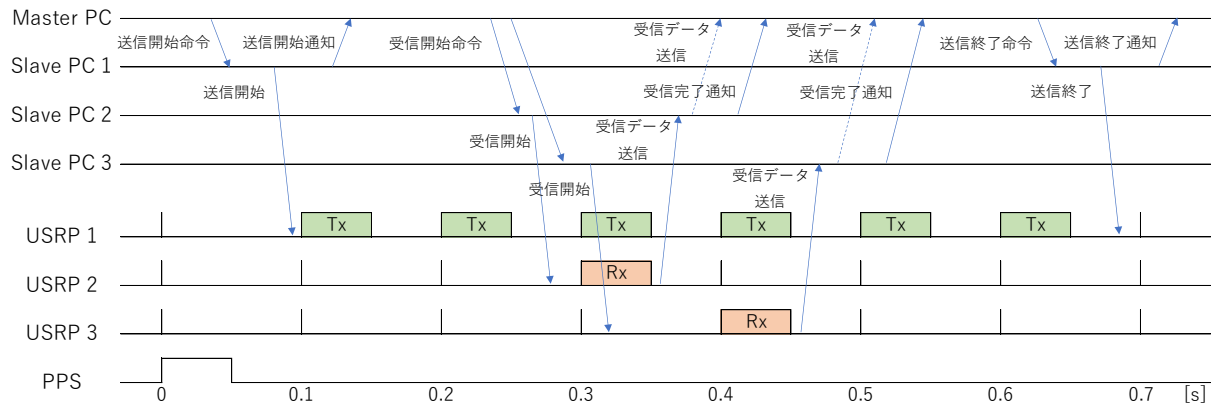


図 3.2.2-3 マルチリンク測定系の制御シーケンス

3.2.3 まとめ

令和 5 年度は、令和 4 年度に机上検討した多重波 RTI 法の実現に向けて、RT により計算された多重波経路情報を測位に適用する手法を開発した。ソフトウェア無線機を用いた高分解能測定系を構築し、1 対抗の測定系を用いて実験室環境でマルチポイント測定を行い、開発した手法の有効性を確認した。さらに、RB の CAD 図面を用いて測位法の計算機シミュレーションを通じて必要ノード数・ノード配置などの設計パラメータを検討した他、計算コストを比較した。

また、ローカル 5G や Wi-Fi6 を意識して実験試験局免許取得が可能である 2.45 GHz または 4.85 GHz バンドの周波数を対象に市販のソフトウェア無線機を調達し、柔軟に対応可能なシステムを構築した。USRP の制御部と MIMO 構成における伝搬チャネル推定及び信号処理の手順とマルチリンク測定のためのネットワーク制御系の構築を行った。

3.3 電磁波遮蔽領域に対する無線エリア形成手法に関する研究

【令和4年度までの概要】

令和4年度は、PCVに設けられたペネトレーションを通じてPCV内部あるいはRPVまで図3.3-1のように電波導波路を形成し、PCV壁面に位置する導波路先端部からPCV内部の放射線センサを駆動させるための2.45 GHz波を放射し、一方で放射線センサからの返送2倍高調波である4.9 GHz波を受信可能なアンテナ開発を行った。図3.3-2に示すように、フレキシブル導波管（注14）を用いて給電し、ダウンリンク1素子、アップリンク8素子の導波管-パッチ統合アンテナを設計し、試作したアンテナの特性を評価した。アンテナ前方への広角な指向性をもつことから、PCVのような電磁波が遮断された領域に対して無線エリアを形成し、SNの測位を行うためのアンテナとして適した性能をもつことを示した。

令和5年度は、横国大と連携し、令和4年度に開発したアンテナ及びSN用アンテナそれぞれを送受信アンテナとして用いたときの電波伝送距離を通信・無線給電の観点から評価する。

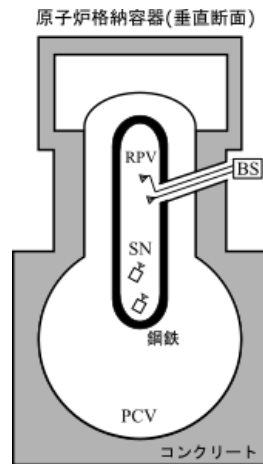
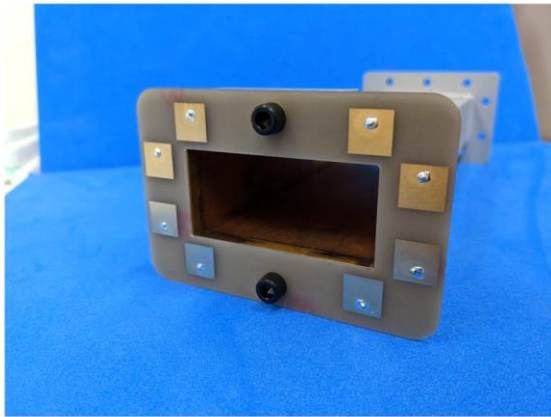
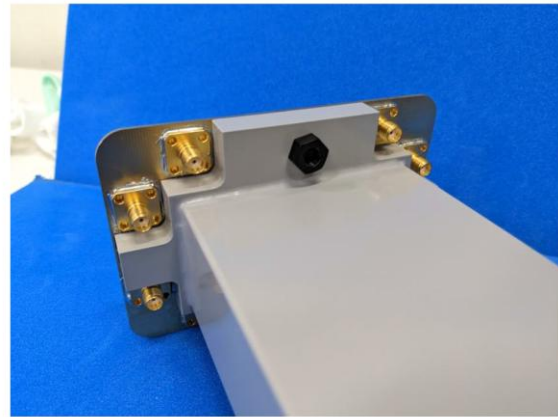


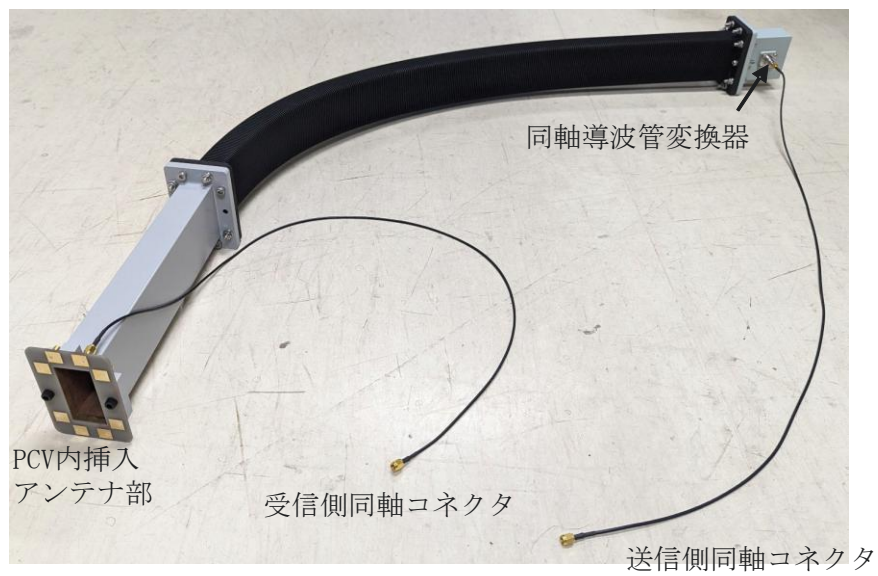
図 3.3-1 PCV 及び内部への無線エリア形成



(a) アンテナ部全面



(b) アンテナ部背面



(c) アンテナ素子とフレキシブル導波管を組み合わせた状態

図 3.3-2 令和4年度に開発した導波路一体型アンテナ

3.3.1 伝送距離評価

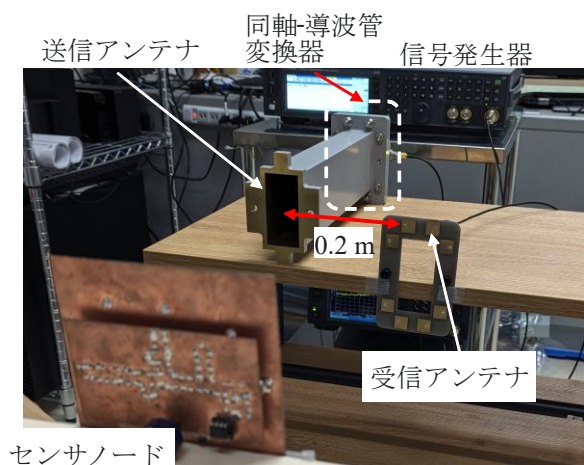
開発したアンテナを用いてセンサ位置を推定するためには、センサが駆動し、かつ返送波である高調波を受信できる必要がある。まずは、アンテナ-センサ間での通信基礎動作の確認のため、図 3.3.1-1 のように令和 4 年度開発のアンテナに対してフレキシブル導波管を介さずに給電し、8 素子受信アンテナアレーの内の 1 素子のみからの信号応答を測定した。ここでは、SG から十分に大きな電力を送信アンテナから放射して電波暗室内で実験を行った。

実験において SN には、令和 4 年度に横国大にて開発された 2 倍高調波を返送する SN を用いた。SG 等で発生した高調波が送信アンテナから受信アンテナに対して漏れこむ量を減衰させるため、送信アンテナと受信アンテナは分離して別体配置している。

SG で発生させた 2.45 GHz の信号が長さ 1 m の同軸ケーブルを通じて送信アンテナ後部の同軸-導波管変換器（注 15）によって導波管内の電波に変換され送信アンテナに給電される。給電された電波は送信アンテナの開口部から SN に向けて放射され、SN において高調波に変換、再放射され、その再放射を受信アンテナで受信する。受信信号は、長さ 1 m の同軸ケーブルを通じてスペクトラムアナライザで測定した。測定における諸元を表 3.3.1-1 に示す。

SN には、コンデンサからの給電で駆動するマイコンが取り付けられており、SN 内スイッチのオンオフを切り替えることで返送高調波の振幅を時間変調する。本評価においては、SN からコンデンサを取り外してマイコン動作をオフにしたときの受信アンテナでの受信信号と、コンデンサを取り付けたときの受信信号の 1 分間最大レベルを比較し、十分な受信電力差分がある場合に信号伝送が可能であると評価する。アンテナ-センサ間距離を 0.3 m としたときの受信信号の 1 分間最大値周波数特性を図 3.3.1-2 に示す。マイコンが動作していない場合であっても、送信アンテナから直接受信アンテナに漏れこむ高調波及び送信アンテナから放射しセンサで反射される高調波成分が存在する。そのため、マイコンが動作していない場合であっても受信信号の観測周波数である 4.9 GHz においては一定の受信信号レベルが存在する。一方で、マイコンによるスイッチオン時には、センサからの返送波強度が高いため、受信信号周波数である 4.9 GHz での受信強度が高い。

コンデンサの有無によって、SN マイコンの動作を切り替えた際のアンテナ-センサ間距離に対する 4.9 GHz での受信信号 1 分間最大値の関係を図 3.3.1-3 に示す。アンテナ-センサ間距離が大きいほどセンサからの返送波強度が小さくなり、一方で、送信アンテナから直接漏れこむ高調波成分の強度は変化しないため、SN マイコン ON 時の受信電力と OFF 時の電力差が小さくなる。ON 時の受信電力が、OFF 時電力を下回った場合には SN の変調信号を識別できないため、これがセンサ位置を推定できる距離の限界である。アンテナ-SN 間距離 1 m までセンサマイコンが ON 時の受信電力の方が OFF 時の受信電力より大きいことから、開発アンテナを用いて 1 m までの距離の伝送が確認できた。



(a) 開発アンテナの配置



(b) センサ-アンテナ間距離

図 3. 3. 1-1 伝送距離の基礎測定系

表 3. 3. 1-1 伝送距離評価実験の測定諸元

送信機出力電力	19 dBm
送信アンテナ動作利得	6 dBi
送信ケーブル損失	2 dB
同軸-導波管変換損失	0.5 dB
受信アンテナ動作利得	3 dBi
受信ケーブル損失	2 dB

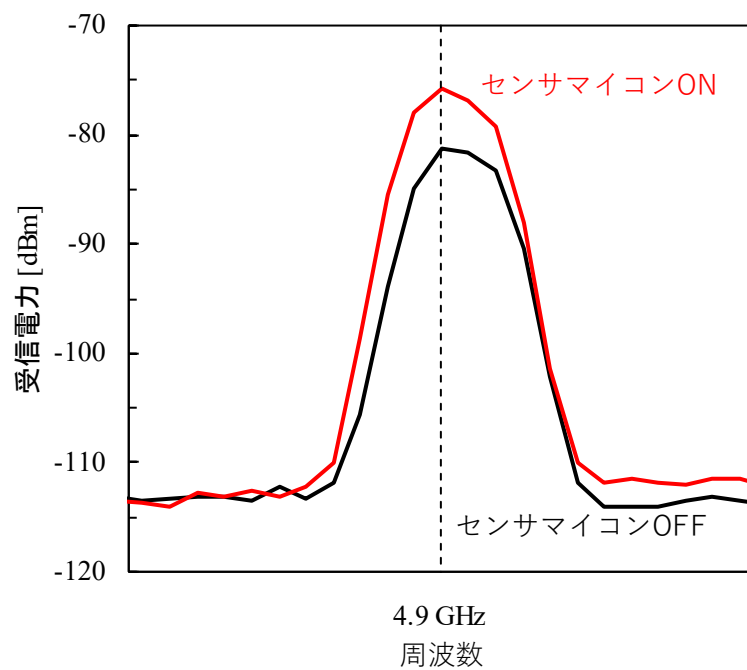


図 3.3.1-2 受信信号の1分間最大値周波数特性

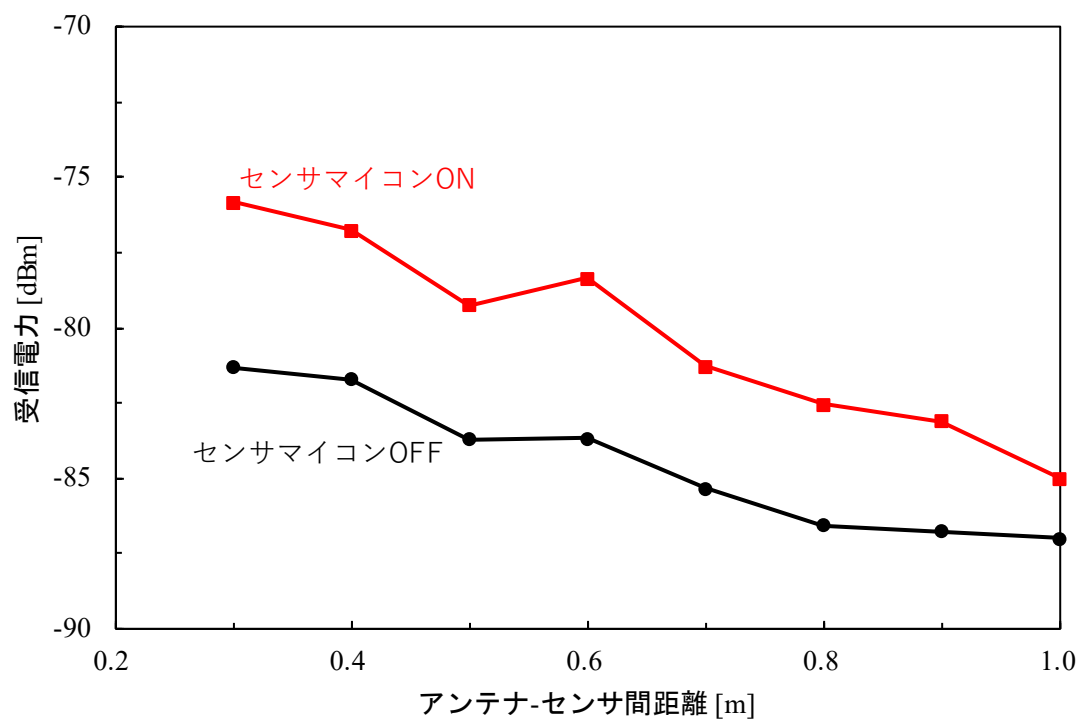


図 3.3.1-3 アンテナ-センサ間距離に対する受信信号1分間最大値の関係

3.3.2 通信回路統合化

次に、開発アンテナを通信回路に統合することを想定し、フレキシブル導波管を通じてPCV、RPV内に導波路を形成し、その先端部アンテナから電波を放射、受信アンテナ8素子を全て用いて受信信号を合成受信し、SNとの通信が可能な距離を評価した。

受信アンテナの構成を図3.3.2-1に示す。受信アンテナアレーはアンテナ右側と左側でパッチ素子の給電点位置が線対称となっている。したがって、アレーアンテナ正面からの受信信号が右側4素子と左側4素子で逆位相となって受信される。そこで、8素子の全ての同軸コネクタに同位相調整されたセミリジッドケーブルを接続し、右側4素子のみと左側4素子のみでそれぞれ4ポート電力分配器を用いて受信信号を同相合成する。その後、逆位相調整されたセミリジッドケーブル2本を用いて4ポート電力分配器からの信号を2ポート電力分配器に接続することで受信信号を右側素子と左側素子で同位相となるように調整し、8素子の受信信号を同位相合成した。

この受信アンテナとフレキシブル導波管を介して給電される送信アンテナを用いて通信実験した測定系を図3.3.2-2に示す。3.3.1項の場合と同様に、送信アンテナから受信アンテナに直接漏れこむ高調波成分を低減するため、送受別体配置とし、送信アンテナにはフレキシブル導波管と、そこに接続された同軸-導波管変換器を介して給電する。また、SGからの高調波成分を低減するため、SGと同軸-導波管変換器の間にローパスフィルタを2段挿入した。このときの測定諸元を表3.3.2-1に示す。フレキシブル導波管を用いるため3.3.1項の場合よりも大規模な評価系を組む必要があり、通信実験は電波暗室外で行った。通信実験を電波暗室外で行うために送信アンテナEIRPが10 dBmとなるように調整して実験を行った。

送受アンテナとSN間の通信距離を1.5 m及び2.0 mとしたときの受信信号の時間波形を図3.3.2-3に示す。通信距離が1.5 mの場合は、SNによる振幅の時間変調波形が確認でき、この距離においても通信が可能であることがわかる。一方で、通信距離が2.0 mの場合、センサマイコンがON時の信号は雑音に埋もれており、変調信号を認識することは困難である。5秒、7秒及び9秒付近にわずかに変調信号と思しき立ち上がりは確認できるものの、センサとの通信は不可能である。これは送信アンテナ利得の不十分性によりSNまでに伝達される電力が不十分であることや、SNの駆動時間に応じてコンデンサが放電し、SNにおける高調波変換強度が低下したためと考えられる。

次に、センサON状態とOFF状態それぞれにおける受信電力1分間最大値の距離特性及びON時受信電力に対するOFF時受信電力の比の距離特性を図3.3.2-4に示す。通信距離によって送受信アンテナからSNの見込み角が変わるため、送受信アンテナそれぞれの指向性によって多少の変動はあるものの、通信距離が遠いほど受信電力は小さい。また、受信電力の比率も通信距離が遠いほど小さい傾向がある。センサONとOFF状態で、受信電力比に3 dB以上の比がある場合を通信可能であると定義した場合、1.5 m以内の距離において通信可能であった。

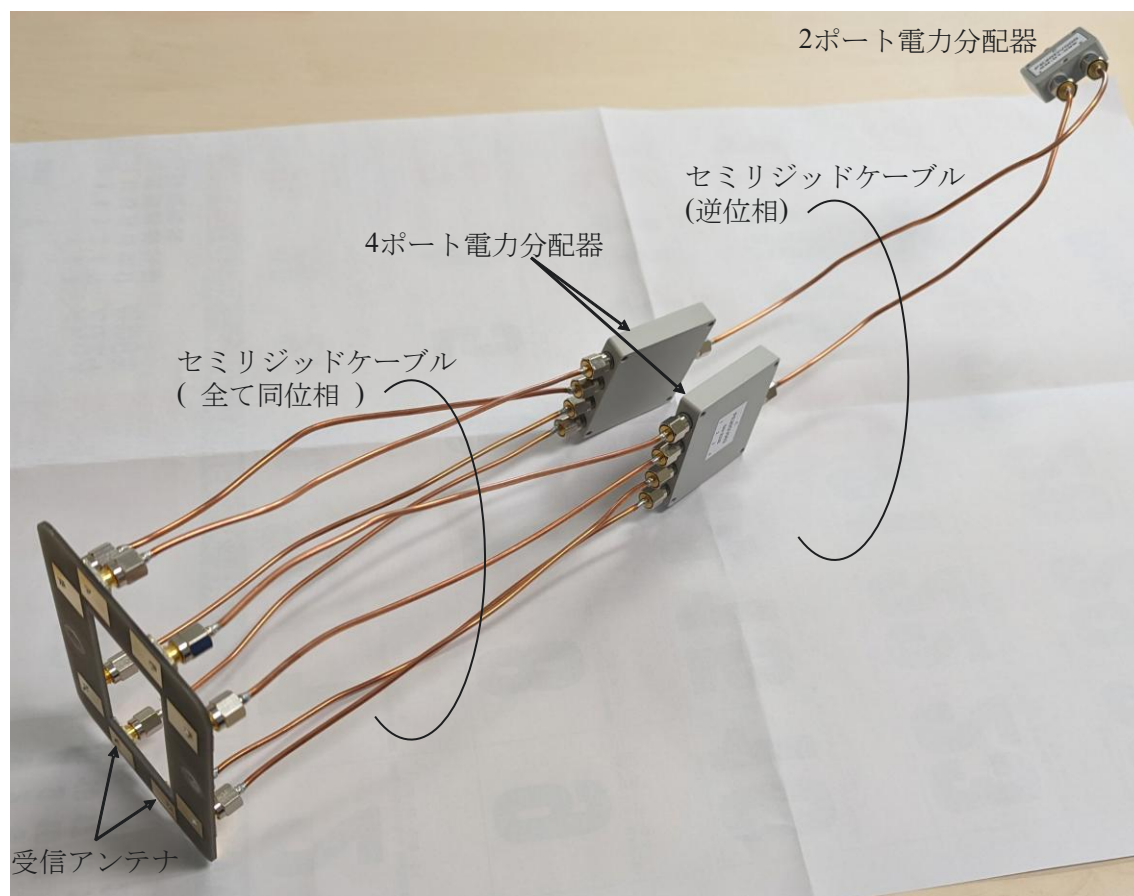


図 3.3.2-1 正面からの到来電波を同位相合成する受信アンテナ構成

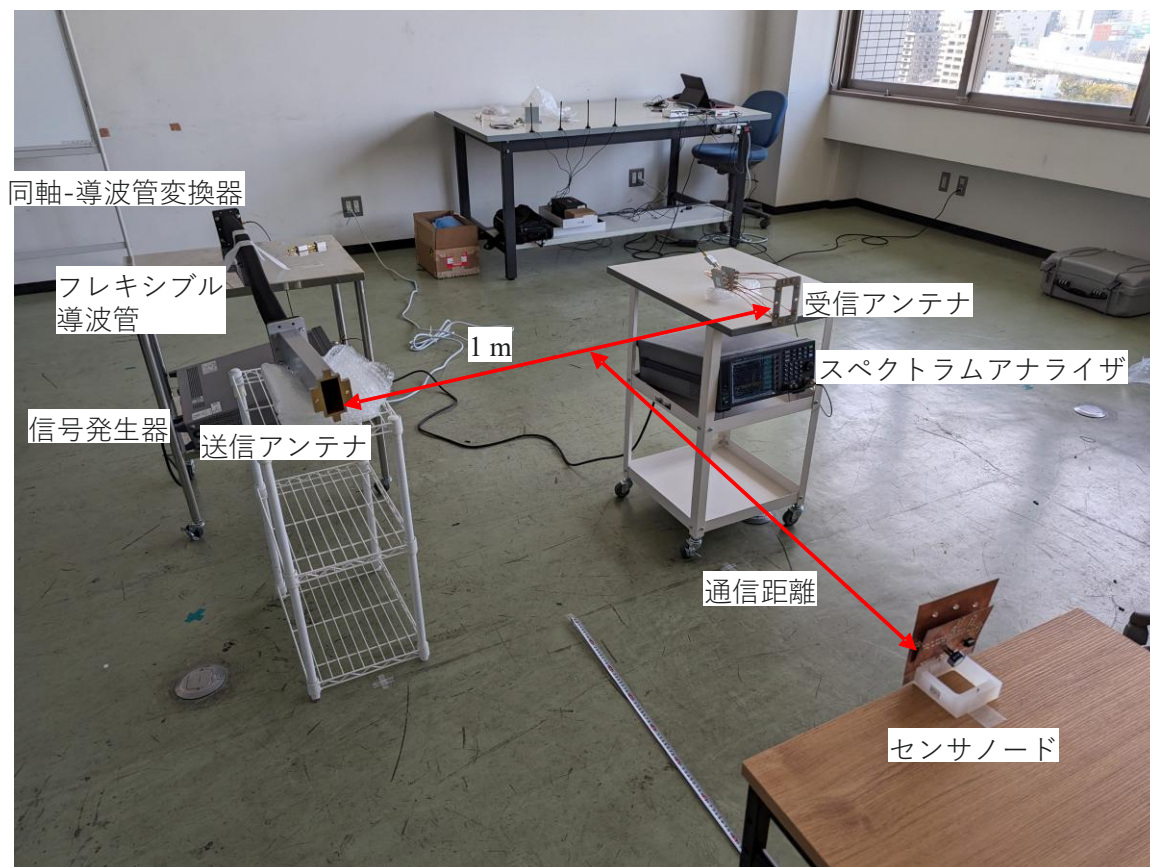
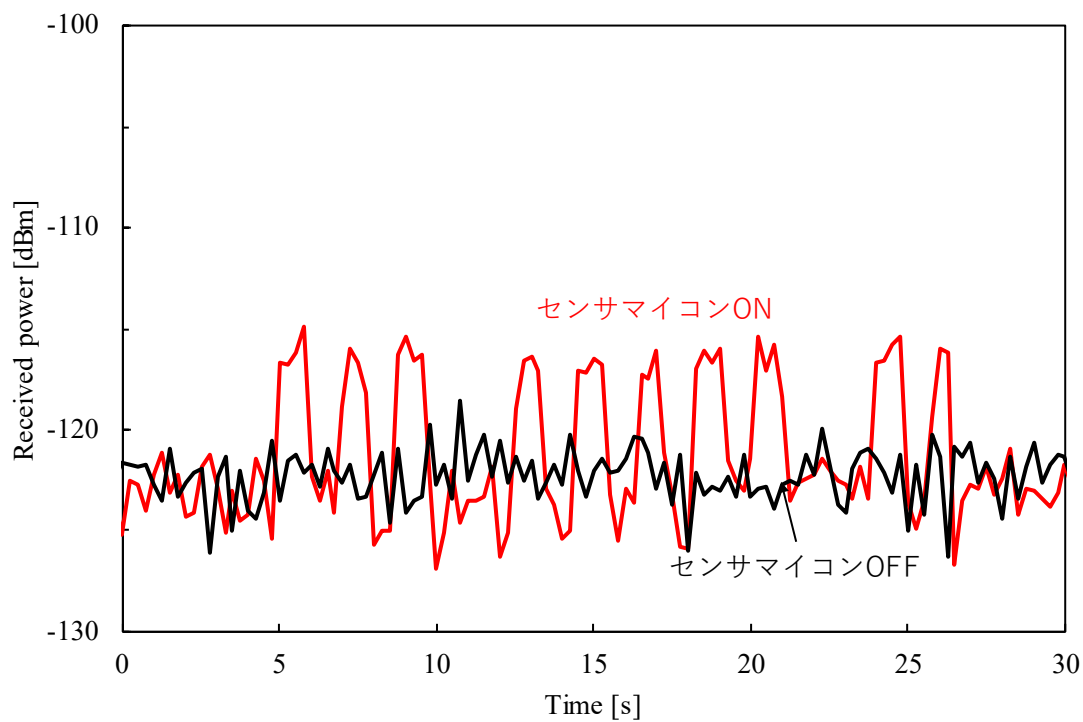


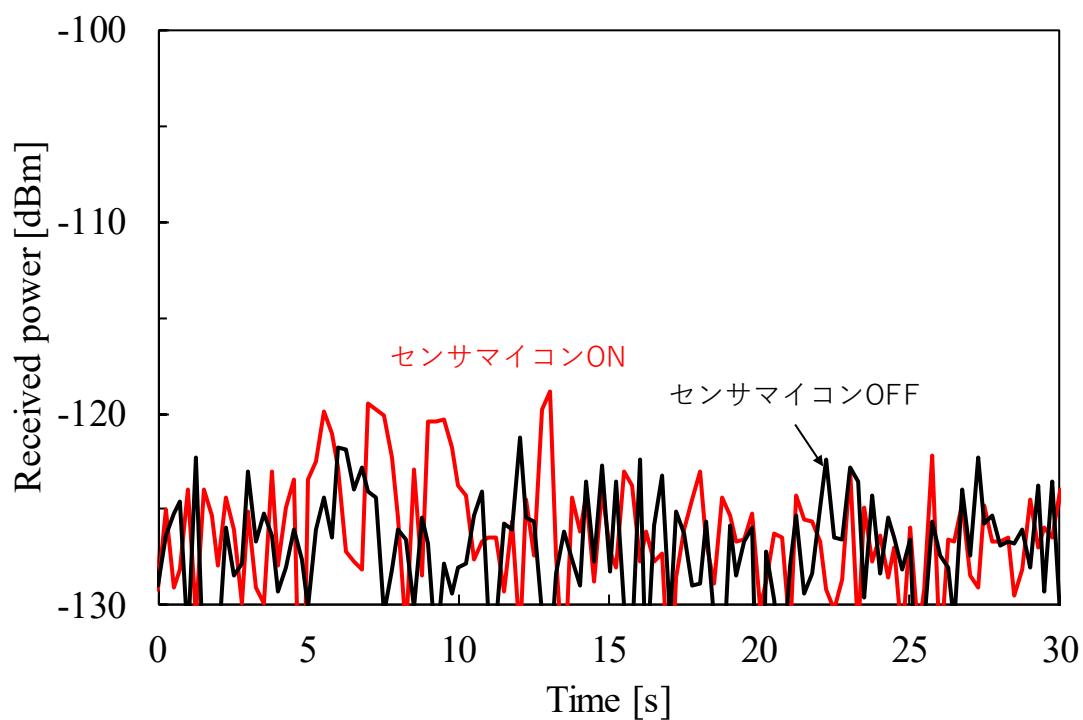
図 3. 3. 2-2 通信距離評価のための実験系

表 3. 3. 2-1 通信実験における測定諸元

送信機出力電力	13 dBm
送信アンテナ動作利得	6 dBi
送信ケーブル損失	2 dB
ローパスフィルタ損失 (2 段分)	6 dB
同軸-導波管変換損失	0.5 dB
フレキシブル導波管損失	0.5 dB
受信アレーアンテナ動作利得	11 dBi
分配器損失 (4 分配及び 2 分配合計)	3 dB
受信ケーブル損失	2 dB

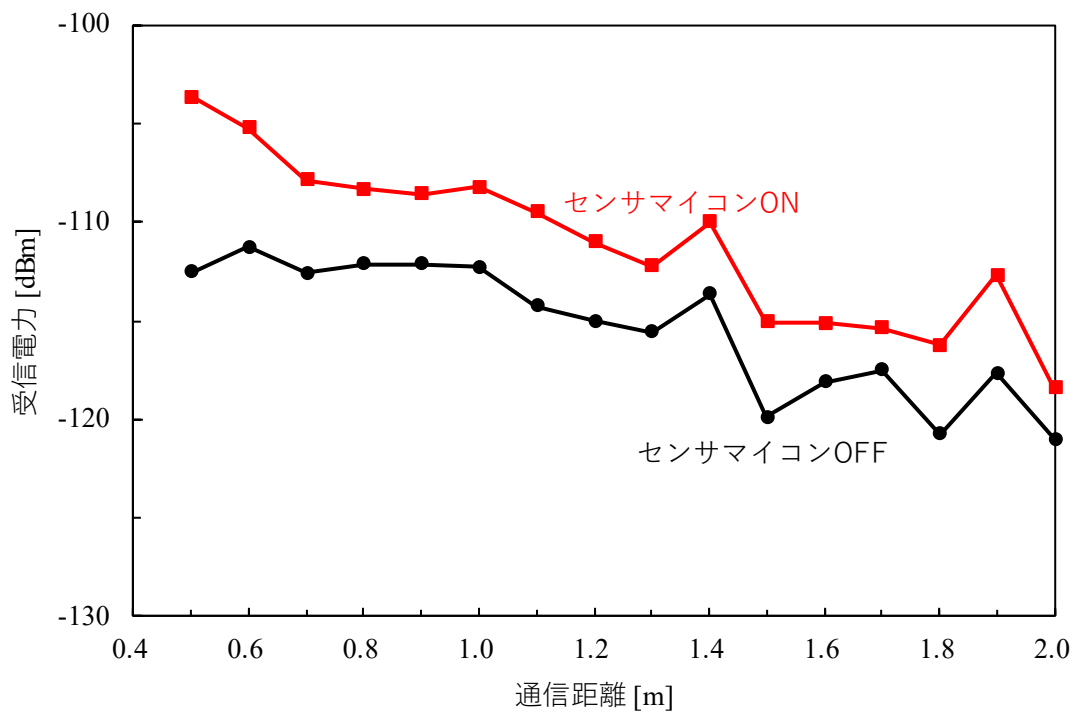


(a) 通信距離1.5 m

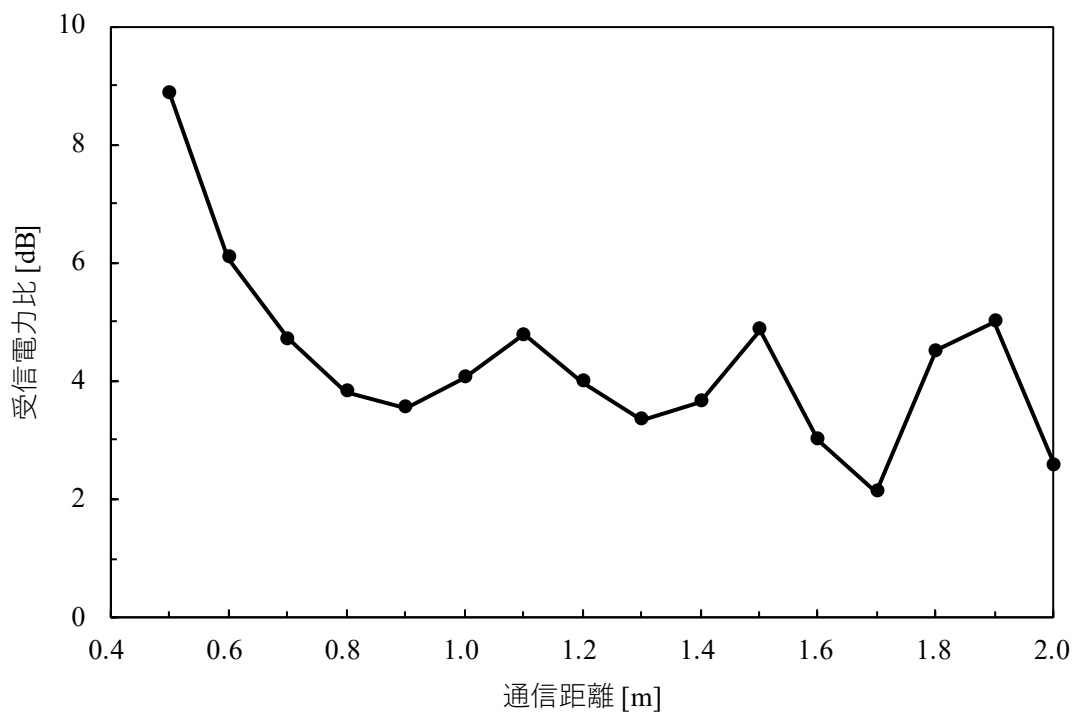


(b) 通信距離2.0 m

図 3.3.2-3 SN の距離を変化させたときの受信アンテナにおける信号時間波形



(a) 通信実験における受信電力の距離特性



(b) センサ ON 状態と OFF 状態の受信電力比率

図 3.3.2-4 通信実験時の受信信号最大値の距離特性

3.3.3 まとめ

横国大と連携し、令和4年度に開発したアンテナ及びSN用アンテナそれぞれを送受信アンテナとして用いたときの、電波伝送距離を通信・無線給電の観点から評価した。

令和4年度に取得した、RF SG で発生した 2.45 GHz の電波を開発した導波路アンテナに給電し、導波路アンテナから SN に向けて電波を放射した。その後、SN からの 4.9 GHz 返送波を開発したパッチアレーアンテナで受信し、受信電力を令和5年度に取得したスペクトラムアナライザで評価した。評価実験の結果、1.5 m までの距離で SN からの返送波を開発アンテナで受信できることを確認した。

3.4 研究推進

本研究を通じて、下記の発表を行うことができた。貴重な研究の機会と人材育成の機会を与えていただいたことに心より感謝申し上げる。

(YNU-1)

講演タイトル：広視野な位置推定を可能とするモノパルスビーム走査アンテナ

形 式：口頭

発表者：田村成、新井宏之

場 所（学会名）：名古屋大学（電子情報通信学会・通信ソサイエティ大会）

発表日：令和5年9月

(YNU-2)

講演タイトル：周波数可変フィルタ付ハーモニックタグ内の整合状態の影響評価

形 式：口頭

発表者：肖琨、久我宣裕

場 所（学会名）：名古屋大学（電子情報通信学会・通信ソサイエティ大会）

発表日：令和5年9月

(YNU-3)

講演タイトル：円板ダイポールアンテナを用いた広帯域ハーモニックタグとセンサ電圧検出用校正

形 式：口頭

発表者：芹澤伊織、肖琨、久我宣裕

場 所（学会名）：名古屋大学（電子情報通信学会・通信ソサイエティ大会）

発表日：令和5年9月

(YNU-4)

講演タイトル：キーイングによりセンサ情報を変調するハーモニックタグの構成法

形 式：口頭

発表者：内山実則、久我宣裕

場 所（学会名）：名古屋大学（電子情報通信学会・通信ソサイエティ大会）

発表日：令和5年9月

(YNU-5)

講演タイトル：ハーモニックタグ用レトロディレクティブアレーの検討

形 式：口頭

発表者：村田翔、白川武蔵、久我宣裕

場 所（学会名）：名古屋大学（電子情報通信学会・通信ソサイエティ大会）

発表日：令和5年9月

(YNU-6)

講演タイトル：A Planar Monopulse-Beam Steering Antenna With Wide Field-Of-View for
Indoor Localization

形 式：口頭

発表者：Jo Tamura、Hiroyuki Arai

場 所（学会名）：Kuala Lumpur、Malaysia（2023 International Symposium on Antennas and Propagation：ISAP）

発表日：令和5年11月

（YNU-7）

講演タイトル：A Parasitic Element Technique for Deep Null Synthesis and the Application to Received Signal Strength (RSS)-Based Localization

形 式：口頭

発表者：Jo Tamura、Hiroyuki Arai

場 所（学会名）：Glasgow、Scotland（2024 European Conference on Antennas and Propagation：EuCAP）

発表日：令和6年3月

（YNU-8）

講演タイトル：放射線被曝した非線形素子の非線形性変化に関する検討

形 式：口頭

発表者：小川公基、久我宣裕

場 所（学会名）：広島大学（電子情報通信学会・総合大会）

発表日：令和6年3月

（YNU-9）

講演タイトル：ハーモニックタグのアレー化における有効通信角度拡大の検討

形 式：口頭

発表者：村田翔、白川武蔵、久我宣裕

場 所（学会名）：広島大学（電子情報通信学会・総合大会）

発表日：令和6年3月

（YNU-10）

講演タイトル：通過帯域幅測定で電圧値を識別できる広帯域ハーモニックタグ

形 式：口頭

発表者：肖琨、久我宣裕

場 所（学会名）：広島大学（電子情報通信学会・総合大会）

発表日：令和6年3月

（YNU-11）

講演タイトル：広帯域ハーモニックタグにおける f1 制御方式を用いたセンサ電圧検出用校正の識別度改善

形 式：口頭

発表者：芹澤伊織、肖琨、久我宣裕

場 所（学会名）：広島大学（電子情報通信学会・総合大会）

発表日：令和6年3月

(YNU-12)

講演タイトル：周波数走査型パッシブ無線センサタグに関する研究

形 式：ポスター

発表者：芹澤伊織、久我宣裕

場 所（学会名）：福島県富岡町（第9回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス）

発表日：令和6年3月

(YNU-13)

講演タイトル：環境にロバストな立体型パッシブ無線センサタグの開発

形 式：ポスター

発表者：内山実則、久我宣裕

場 所（学会名）：福島県富岡町（第9回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス）

発表日：令和6年3月

(YNU-14)

講演タイトル：Passive broadband harmonic sensor-tag using circular disk dipole antenna

形 式：oral

発表者：Nobuhiro Kuga、Iori Serizawa、Kun Xiao

場 所（学会名）：Grand Hyatt San Antonio、Texas、USA（2024 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks, pp.69-72）

発表日：令和6年1月

(NU-1)

講演タイトル：ソフトウェア無線機を用いたアンテナスイッチング方式MIMOチャネルサウンダの開発

形 式：口頭

発表者：池上十五、金ミンソク

場 所（学会名）：北海道札幌市（電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会、AP2023-30）

発表日：令和5年7月12日

(NU-2)

講演タイトル：多重波伝搬を用いたパッシブ型屋内測位法における複数ターゲット検出の性能評価と改善手法の検討

形 式：口頭

発表者：池上十五、金ミンソク

場 所（学会名）：名古屋市（電子情報通信学会ソサイエティ大会、B-1-97）

発表日：令和5年9月12日

(NU-3)

講演タイトル：Preliminary Study of AOA-Based Indoor Localization Methods Using Distributed MIMO Sensors

形 式：口頭

発表者：Koularp Thongsavanh、Togo Ikegami、Minseok Kim

場 所（学会名）：岩手県盛岡市（電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会、AP2023-91）

発表日：令和5年10月19日

(NU-4)

講演タイトル: Development of a Passive Localization Method Using Multi-Link MIMO Sensor Network

形 式: 口頭

発表者: Togo Ikegami, Minseok Kim

場 所 (学会名): Kuala Lumpur, Malaysia (2023 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP))

発表日: 令和 5 年 10 月 19 日

(NU-5)

講演タイトル: マルチリンク 8×8MIMO 測定系の構築と評価実験 形 式: 口頭

発表者: 池上十五、佐藤正宗、トンサヴァン クーラープ、金ミンソク

場 所 (学会名): 東京都港区 (電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会、AP2023-156)

発表日: 令和 5 年 12 月 14 日

(NU-6)

講演タイトル: Experimental Evaluation of Angle-of-Arrival based Indoor Localization Methods using Distributed Sensors

形 式: 口頭

発表者: Koularp Thongsavanh, Togo Ikegami, Minseok Kim

場 所 (学会名): 広島県東広島市 (電子情報通信学会総合大会、B-1C-01)

発表日: 令和 6 年 3 月 6 日

(NU-7)

講演タイトル: Multipath RTI: Millimeter-Wave Radio Based Device-Free Localization

形 式: 論文

発表者: Togo Ikegami, Minseok Kim, Yuto Miyake, Hibiki Tsukada

雑 誌: IEEE Access, vol. 12, pp. 42042-42054

発表日: 令和 6 年 3 月 19 日

DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3379317

国外、査読あり

(NITech 1)

講演タイトル: A shared aperture antenna composed on rectangular waveguide flange with steerable beam

形 式: 口頭

発表者: Yoshiki Sugimoto

場 所 (学会名): NH Collection Genova Marina Hotel, Genoa, Italy (2023 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications)

発表日: 令和 5 年 11 月 15 日

4. 結言

本業務では、RB 内及び PCV の内部など、障害物が乱立する空間において、センサの放射線量データ等を実線で収集し、センサの位置情報を複数のアンテナを用いて特定するシステムの開発を目標とする。これにより、RPV 内を含む RB 内全体にシームレスな無線通信環境を実現することを目的とする。これに対して、下記を実施した。

4.1 横浜国立大学

高機能アンテナを利用した方向探知について伝送距離を含めた性能評価を行った。アップリンク系については、令和 4 年度に開発したハイブリッドビームアンテナと電圧制御発振器を用いて、方向探知性能の基礎的性能評価を行った。方向探知だけでなく、複数の BS を用いる 3 点法を適用した際の測位性能を評価した。また、周波数領域でセンサ情報の復調を行うシステムを構築した。ダウンリンク系については、試作したアンテナの耐電力を実験により評価し、測位実験に利用できる送信電力範囲を決定した。さらに、令和 4 年度開発した SN を用いて、通信可能範囲を評価した。上記の検討を経て、開発した SN を用いた方向探知性能及び測位性能を評価した。

今後は、測位とセンサ情報の無線取得という当初目標に対して、構築したシステムの全体性能を実験により評価する。SN としては、変調回路用に汎用バッテリーを搭載したセンサノード（汎用バッテリー式）と、本計画で開発したセンサノード（無線充電バッテリー式）の 2 種類を評価対象とする。さらに、本計画で開発したアンテナを電波遮蔽空間に適用する検討を行い、その可否及び問題点を検証する予定である。

センサ情報変調回路として、情報電圧を阻止周波数として広帯域に変調する周波数走査型回路と、AD 変換の後にキャリアを電子スイッチでオンオフする周波数固定形デジタルスイッチ方式を開発した。令和 4 年度に開発した BS アンテナと SN を用いて、通信距離を評価し 6 m～8 m 程度の距離での通信を確認した。また、1,000 Gy の放射線照射（260 Gy/h）を周波数変換用ダイオードと可変容量用ダイオード及びスイッチ用ダイオードに対して実施し、それらによる顕著な特性変化がないことを確認した。同軸管を用いた高調波の非接触測定を実施し、回路に物理的に実装した場合の特性と比較した。また、SN に搭載したバッテリーの無線充電実験を行い、6 m の距離において 3 分ないし 15 分で 1 V ないし 2 V まで充電できることを確認した。

今後は、変調回路のセンサノードに実装し、そのうえで汎用バッテリー式センサノードと無線充電バッテリー式センサノードの 2 種類を開発する。無線によるバッテリー充電について、電波暗箱等を利用した実験により効果を行う。そのうえでシステムの全体性能の見地から、センサノードの問題点・改善事項を総括する

4.2 新潟大学

開発した手法では、生成されたトモグラフィー画像からターゲットの領域を同定するために Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN：注 16) クラスタリング法を導入し、その領域の中心をターゲットの位置として特定する。ここで、推定性能評価のために Optimal Mass Transfer (OMAT) や、OSPA などの評価量の定式化を行い、さまざまな部屋の形状（小さい部屋：3.0×4.0 m、中部屋：4.5×6.0 m、大部屋：6.0×8.0）とアンカーノードの数（4、6、8 ノード）に対する性能評価を行った。その結果、対象領域内にターゲットが 1 つ存在する場合において、推定誤差が数十 cm 程度となり、非常に高精度な測位が可能であることを確認した。また、現有の測定装置を用いた実測を行い、開発した手法の基本動作（推定誤差<30 cm）を確認した。

今後は、令和 5 年度までに開発した測位法において、さらなる性能向上を図る。具体的には、パッシブ測位法においては多重波経路を遮蔽しその電力変化を発生させる必要があるため、ロープロファイルロボットにおいても有効に適用できるよう、BS の設置位置や吸収体の搭載などについて検討する。また、ロボットや作業者のセンサから送信された無線信号を用いて、BS でセンサノードの到来方向推定を用いたアクティブ測定法の併用による高精度化を検討する。

また、提案手法を実験により検証するため、令和 4 年度までに購入した 4 台のソフトウェア無線機（USRP X310、米 Ettus Research 社製）を組み合わせ、8×8 MIMO 構成で 6 つの MIMO チャネル取得が可能なシステムを構築する。具体的には、①MIMO アンテナ数や信号帯域幅と測位性能の検証及びシステムパラメータの最適化を行う。②送受信機特性が測位精度に及ぼす影響を検討し、なるべく安価で汎用的な回路構成で良好な性能を達成する方法を検討する。③性能と実現性のトレードオフ関係を明らかにし、実用化を考慮したスケールダウンを検討する。

4.3 名古屋工業大学

横国大と連携し、令和 4 年度に開発したアンテナ及び SN 用アンテナそれぞれを送受信アンテナとして用いたときの電波伝送距離を通信・無線給電の観点から評価した。令和 4 年度に取得した RF SG で発生した 2.45 GHz の電波を、開発した導波路アンテナに給電し、導波路アンテナから SN に向けて電波を放射した。その後、SN からの 4.9 GHz 返送波を開発したパッチアレーアンテナで受信し、受信電力を令和 5 年度に取得したスペクトラムアナライザで評価した。評価実験の結果、1.5 m までの距離で SN からの返送波を開発アンテナで受信できることを確認した。

今後は、複数のガイドパイプ及び 2 種類の PCV 内部無線アクセス手段を併用することを想定し、アンテナ素子及びガイドパイプ導波路の形状を工夫し、性能を改善する。また、設計した導波路とアンテナ投入路をミリ波帯へ転用し、高分解能イメージング技術によって PCV 内部状況の可視化及びセンサ位置測位アルゴリズムのための初期情報収集技術への応用性について検討する。

参考文献

- [1-1] 川妻伸二, 浅間一, 市販 CPU 等半導体素子を使用したロボット及び無人建設重機の耐放射線評価と放射線環境下での管理方法, 日本ロボット学会誌 Vol.34, No.8, 2016, pp.552-557.
- [1-2] Teraura, N. et al., Evaluation of gamma ray durability of RF tag and application to the radiation environment, 2015 IEEE Int' l Conf. on RFID-TA, 2015, pp.147-152.
- [1-3] Tormo, V. et al., Design of an RFID-based positioning system for safety of personnel in nuclear facilities, 2021 Int' l Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2021, pp.1-8
- [1-4] 東京電力株式会社, 1F-2 格納容器(PCV)内部調査結果, JAN. 2012, p.10.
https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_120121_02-j.pdf
 (参照: 2023 年 4 月 3 日) .
- [1-5] 国際廃炉研究開発機構 (IRID) 奥住直明, 福島第一原子力発電所の「廃炉」の現状 - 「見えてきたもの」と取り組むべき課題・続報, Mar. 2019, p.14.
https://irid.or.jp/_pdf/20190313.pdf (参照: 2023 年 4 月 3 日) .
- [3.1.2-1] 濱田清空, 横浜国立大学理工学部数物・電子情報系学科卒業論文, Mar. 2024.

