



JAEA-Review

2024-024

DOI:10.11484/jaea-review-2024-024

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—

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

-FY2022 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource  
Development Project-

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 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 Institute, Sector of Fukushima Research and Development  
Yokohama National University

November 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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](mailto: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](mailto: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—

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点  
廃炉環境国際共同研究センター

横浜国立大学

(2024年3月29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(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4年度分の研究成果について取りまとめたものである。

本研究は、上記無線通信システム実現のための基地局とセンサノード、センサ位置特定アルゴリズム、電磁波遮蔽領域に対する無線エリア形成手法を開発した。

基地局アンテナとしては、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を用いる基地局アンテナを開発した。またこれに対応するセンサノードを開発した。また開発した回路およびアンテナが放射線の影響を受けずに動作することを確認した。

センサ位置特定アルゴリズムに関する研究としては、原子炉建屋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および座標化するための多重波電波トモグラフィー法を計算機シミュレーションにより開発し、単純な実験室環境での測定による動作確認を行った。また高分解能測定系構築と信号処理手法として、伝搬特性の類似した到来波同士をクラスタ化する手法を開発し、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。

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として、原子炉格納容器内のような電波遮蔽領域に対してペネトレーションを無線リンク確立手段とした導波路およびアンテナ素子を開発した。

---

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)

— FY2022 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

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

Yokohama National University

(Received March 29, 2024)

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 FY2022.

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 FY2022.

The present study aims to develop a wireless system, sensor positioning algorithms, and wireless area formation technology for electromagnetically shielded areas.

We developed a base station antenna and a sensor node that use 2.45 GHz for downlink and 4.9 GHz, which is the second harmonic, for uplink. We also confirmed that the developed circuit and antenna operate in a strong radioactive environment.

As sensor positioning algorithms, we developed a multipath radio tomography method using computer simulations to visualize and coordinate the positions of robots and workers in target areas, such as nuclear reactor buildings. We validated this method in a simple laboratory environment through experiments. Furthermore, for high-resolution measurement system construction and signal processing, we developed a method to cluster arrival waves with similar propagation characteristics, identified the radio wave propagation mechanism from the clusters found, and developed a method to identify multiple wave paths.

As wireless area formation methods for electromagnetic shielded areas, we developed waveguides and antenna elements that use penetration as wireless links in electromagnetic shielded areas, such as inside nuclear reactor containment vessels.

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
付録 成果報告書 .....	15

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
Appendix Result Report .....	15

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（日英共同研究）

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（日英共同研究 2 課題、日露共同研究 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 康一朗	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号機ペダスタル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

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クスを融合したデブリ性状把握手法の開発とティアップ型人材育成	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（日英共同研究）

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）会議での審議を経て、採択課題を決定した。

#### 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
$\alpha$ / $\beta$ / $\gamma$ 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
$\beta$ 、 $\gamma$ 、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）

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・日露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

課題名	研究代表者	所属機関
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
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）

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 $\gamma$ 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
$\alpha$ 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
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

課題名	研究代表者	所属機関
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

本報告書は、以下の課題の令和4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 4 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 R04I120)

成果報告書

令和 5 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4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4年度の成果の目標および業務の実施方法 .....	2-5
2.3.1 基地局とセンサノードに関する研究 .....	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 .....	2-6
3. 令和4年度の実施内容および成果.....	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 高機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
3.1.3 まとめ .....	3-14
3.2 センサ位置特定アルゴリズムに関する研究 .....	3-23
3.2.1 パッシブ測位法のアルゴリズムの机上検討 .....	3-23
3.2.2 高分解能測定系の構築とデータ処理手法の確立 .....	3-31
3.2.3 まとめ .....	3-36
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 .....	3-37
3.3.1 アンテナ開発（令和4年度） .....	3-37
3.3.2 まとめ .....	3-46
3.4 研究推進 .....	3-47
4. 結言 .....	4-1
参考文献 .....	5-1

執筆者リスト

事業代表者

国立大学法人横浜国立大学	教授	新井	宏之
	准教授	久我	宣裕

再委託先

国立大学法人新潟大学	准教授	金	ミンソク
------------	-----	---	------

国立大学法人名古屋工業大学	助教	杉本	義喜
---------------	----	----	----

表一覧

表 2. 1-1	本事業の全体計画	.....	2-3
表 3. 1. 2. 3-1	放射線照射と周波数変換回路の直流出力（端子 P2）	.....	3-22
表 3. 2. 1-1	BS（センサノード）座標	.....	3-25
表 3. 2. 1-2	ターゲット座標	.....	3-25
表 3. 2. 1-3	シミュレーション諸元	.....	3-25
表 3. 2. 1-4	部屋モデルの寸法	.....	3-28
表 3. 2. 1-5	人体モデル位置ごとの測位誤差	.....	3-31
表 3. 2. 2-1	DUT 測定シミュレーション諸元	.....	3-33
表 3. 2. 2-2	伝搬路測定諸元	.....	3-33
表 3. 3. 1-1	フレキシブル導波管の内径と最低遮断周波数	.....	3-38

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. 1-1	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 2. 3. 2-1	アルゴリズム開発用高分解能測定系 (MIMO チャネルサウン ダ)	.....	2-6
図 2. 3. 3-1	ペネトレーションを利用した無線リンクの構築	.....	2-6
図 3. 1. 1-1	基地局アンテナの指向性	.....	3-1
図 3. 1. 1. 1-1	ダウンリンク用アンテナの構成 (サブアレーユニット)	.....	3-4
図 3. 1. 1. 1-2	立体型バルン (非接触コネクタ付き)	.....	3-4
図 3. 1. 1. 1-3	ダウンリンク用 BS アンテナの特性 (2. 45 GHz 帯 8 素子ア レーアンテナ)	.....	3-5
図 3. 1. 1. 2. 1-1	アップリンク用 BS ハイブリッドビームアンテナの構成	.....	3-6
図 3. 1. 1. 2. 1-2	アップリンク用 BS ハイブリッドビームアンテナの入力特性	.....	3-6
図 3. 1. 1. 2. 1-3	アップリンク用 BS ハイブリッドビームアンテナの指向性	.....	3-7
図 3. 1. 1. 2. 1-4	アップリンク用 BS ハイブリッドビームアンテナのセンサノ ード検出効果確認実験	.....	3-8
図 3. 1. 1. 2. 2-1	アップリンク回線評価用 BS アンテナの特性 (4. 9 GHz 帯 16 素子アレーアンテナ)	.....	3-9
図 3. 1. 1. 3-1	放射線試験用パッチアンテナ	.....	3-10
図 3. 1. 1. 3-2	放射線照射前後におけるパッチアンテナの反射係数特性	.....	3-10
図 3. 1. 2-1	センサ電圧を検出する SN のシステム構成	.....	3-11
図 3. 1. 2. 1-1	チップ型 LPF 回路の入力特性	.....	3-16
図 3. 1. 2. 1-2	周波数変換回路	.....	3-16
図 3. 1. 2. 1-5	周波数変換用非線形回路の 2 次高調波特性 (実験)	.....	3-17
図 3. 1. 2. 2-1	周波数可変フィルタ	.....	3-18
図 3. 1. 2. 2-2	周波数可変フィルタの伝送特性	.....	3-18
図 3. 1. 2. 2-3	電波暗箱内でモノポールアンテナを用いた SN の応答実験	.....	3-19
図 3. 1. 2. 2-4	周波数変換回路の反射特性 (端子 P1)	.....	3-19
図 3. 1. 2. 2-5	アンテナの周波数特性を含めた SN の応答特性	.....	3-20
図 3. 1. 2. 2-6	ダウンリンク波の周波数特性を無視した SN の応答特性	.....	3-20
図 3. 1. 3-1	アクリル台上に設置された評価サンプル	.....	3-21
図 3. 1. 3-2	放射線照射前後の周波数変換回路の反射特性 (P1)	.....	3-21
図 3. 1. 3-3	放射線照射前後の周波数変換特性 ( $P_{FI} = 0$ dBm)	.....	3-21
図 3. 1. 3-4	放射線照射前後の周波数可変フィルタの伝送特性	.....	3-22
図 3. 2. 1-1	重みづけ行列の決定	.....	3-24

図 3.2.1-2	シミュレーション環境	.....	3-25
図 3.2.1-3	伝搬路 (ベースライン)	.....	3-26
図 3.2.1-4	RTI シミュレーション結果	.....	3-26
図 3.2.1-5	座標推定法	.....	3-27
図 3.2.1-6	移動物体位置	.....	3-28
図 3.2.1-7	座標推定結果: ノード数 4 ( $\alpha = 0.9, \epsilon = 0.3, \text{minPts} = 4$ )	.....	3-28
図 3.2.1-8	座標推定結果: ノード数 6 ( $\alpha = 0.8, \epsilon = 0.3, \text{minPts} = 5$ )	.....	3-28
図 3.2.1-9	座標推定結果: ノード数 8 ( $\alpha = 0.7, \epsilon = 0.3, \text{minPts} = 5$ )	.....	3-28
図 3.2.1-10	遮蔽物位置に対する測位誤差 (ノード数: 4)	.....	3-29
図 3.2.1-11	遮蔽物位置に対する測位誤差 (ノード数: 6)	.....	3-29
図 3.2.1-12	遮蔽物位置に対する測位誤差 (ノード数: 8)	.....	3-29
図 3.2.1-13	多重波 RTI 実行結果 (ミリ波実験)	.....	3-30
図 3.2.2-1	MIMO 測定系	.....	3-32
図 3.2.2-2	伝搬路特性 (校正前)	.....	3-32
図 3.2.2-3	伝搬路特性 (校正後)	.....	3-32
図 3.2.2-4	DUT 測定の構成図	.....	3-33
図 3.2.2-5	DUT 測定結果	.....	3-34
図 3.2.2-6	到来方向推定測定環境	.....	3-34
図 3.2.2-7	到来方向推定結果	.....	3-34
図 3.2.2-8	真値を用いて生成された RTI 画像	.....	3-35
図 3.2.2-9	MIMO チャネル行列を用いて生成された RTI 画像	.....	3-35
図 3.3.1-1	WR284 および WR187 フレキシブル導波管	.....	3-38
図 3.3.1-2	導波管アンテナの構成	.....	3-40
図 3.3.1-3	導波管アンテナの S11 の周波数特性	.....	3-40
図 3.3.1-4	導波管アンテナのダウンリンク指向性	.....	3-41
図 3.3.1-5	導波管アンテナのアップリンク指向性	.....	3-41
図 3.3.1-6	導波管-パッチ統合アンテナの構成	.....	3-43
図 3.3.1-7	統合アンテナの S11 の周波数特性	.....	3-43
図 3.3.1-8	統合アンテナの 2.45 GHz 指向性	.....	3-44
図 3.3.1-9	統合アンテナの 4.9 GHz 指向性	.....	3-44
図 3.3.1-10	試作した導波管-パッチ統合アンテナ	.....	3-44
図 3.3.1-11	試作した統合アンテナの S11 の周波数特性	.....	3-45
図 3.3.1-12	試作した統合アンテナのアップリンク指向性	.....	3-45

略語一覧

JAEA	: Japan Atomic Energy Agency	(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
CLADS	: Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science	(廃炉環境国際共同研究センター)
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)
RTI	: Radio Tomographic Imaging	(電波トモグラフィイメージング法) 「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)
SG	: Signal Generator	(標準信号発生器)
SBD	: Schottky Barrier Diode	(ショットキーバリアダイオード)
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	: Raytracing	(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)
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) (フィールドプログラマブルゲートア レー)
FPGA	: Field Programmable Gate Array	「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

No.	用語	説明
注1	Finger-Print法 (Finger-Print Techniques、位置指紋法)	<p>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一つ。</p>
注2	電波トモグラフィイメーjing法 (Radio Tomographic Imaging: RTI)	<p>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。</p> <p>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持つ値の重みつ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。</p> <p>※RSS (Received Signal Strength) : 電波の受信強度。</p> <p>※トモグラフィイメーjing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。</p>
注3	MIMO通信 (Multiple-Input and Multiple-Output Communications)	<p>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一つ。複数の到来電波を分離して処理することができる。</p>
注4	高調波 (Harmonics)	<p>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一つ。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、1GHzの電源に対し、2 GHzに発生する歪み波は2倍高調波、3GHz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。</p>

No.	用語	説明
注5	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一つ。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 $\infty$ 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6	DBSCAN: (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Nois)	任意の形状のクラスタおよびデータのノイズ（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。
注7	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8	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9	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。

## 概略

本業務では、原子炉建屋（RB）内および原子炉格納容器（PCV）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（BS）から送信される電波を異なる周波数の電波に変換した上で、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（SN）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原子炉建屋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年目である本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

#### 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°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°とした。送信・受信ともに、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、RF信号発生器、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、東京電力ホールディングス株式会社（東電）、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（Japan Atomic Energy Agency : JAEA）／廃炉環境国際共同研究センター（Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science : CLADS）と連携した上で検討を行った。

#### 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、素子およ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および耐放射線性を定量評価した。耐放射線性については、東電、JAEA/CLADSと連携した上で検討を行った。

### (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 パッシブ測位法のアルゴリズムの机上検討

原子炉建屋内（RB）など対象エリア内のロボットや作業者の位置を可視化および座標化するための電波トモグラフィイメージング（Radio Tomographic Imaging : RTI）法を、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付け手法を検討し、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、既存のチャンネルサウンダ（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 チャン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 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：名工大）

### ① アンテナ開発

原子炉格納容器内のような無線 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およ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 信号発生器、スペクトラムアナライザおよびネットワークアナライザを用いて行った。

## (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、研究を進めた。研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。

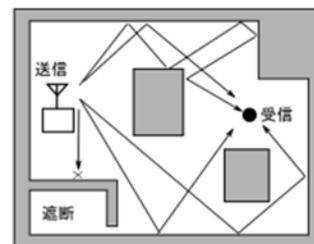
以上、3 ヶ年計画の 1 年目である本年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

1. はじめに

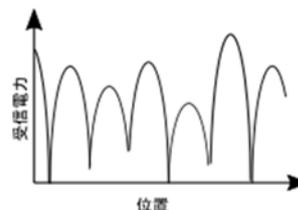
東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（1F）廃炉を進めるために必要なプロセスの一つとして、「燃料デブリの取り出し」があり、そのためにRB内の汚染状況の把握を正確かつ効率的に行うことが求められている。そのために、線源分布と空間的線量率分布とを把握し、そして変化の影響等が予測できるような統合的環境把握システムの構築研究が進められている。このようなシステムを構築するためには、各種センサで得られた情報に加え、その位置情報を同時にデジタルデータ化し、ワイヤレスネットワークを介して収集できることが望ましい。特にロボットによる状況調査や、作業員による線量等の計測においては、その正確な位置情報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（測位）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持つ。現状でも、多数の基地局（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（RPV）など、高放射線量（高線量）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（CPU 等）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

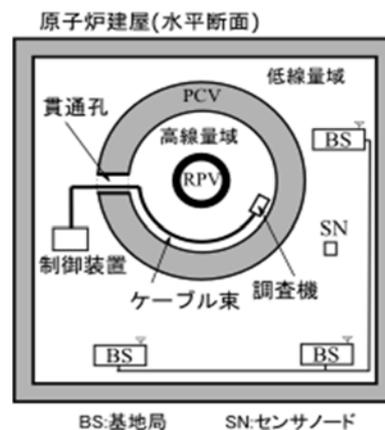


図 1-2 有線による調査方式

以上の背景より本研究開発は、PCV、RPV、使用済み燃料プール（SFP）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とも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 1-3⑤）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。

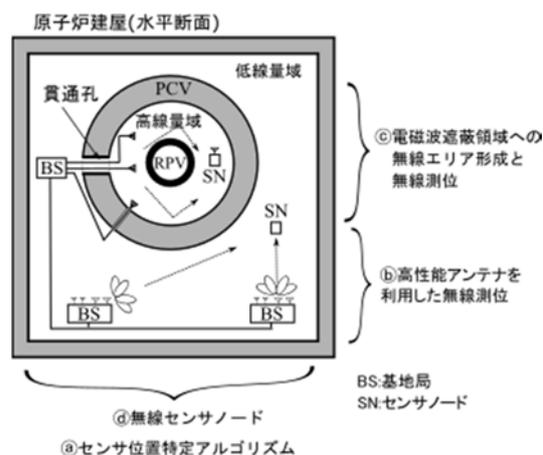


図 1-3 本事業の概念図

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）を持ち、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みると、パッシブ（デバイスフリー）方式の方が作業効率が良い。

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 1）や電波トモグラフィイメージング (RTI) 法（注 2）をベースにしたものが多い。FP 法は学習データの構築およ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-Fi 6 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 3）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、放射線障害については、装置やアンテナの設置法を工夫し、放射線障害を回避する方法を検討する。

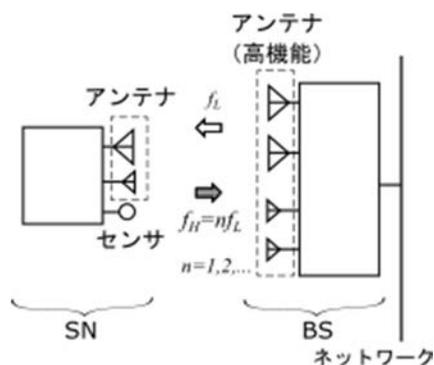


図 1-4 パッシブ SN と高調波を用いた通信システム

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持つ。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 1-3⑤）を開発し、放射線障害に弱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 1-3⑥）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およ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、その上で、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 4）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員の安全管理用 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。

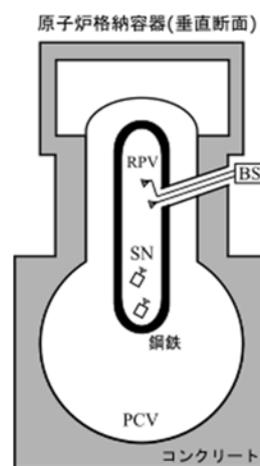


図 1-5 RPV 内への無線エリア形成例

## 2. 業務計画

### 2.1 全体計画

令和4年度は、SN およ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、位置推定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、前年度検討した位置推定アルゴリズムをハードウェア実装し、SN を持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 (SDR) 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、前年度までに得られた成果の統合を検討し、さらなる性能向上およ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)および(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、そして「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位置推定を行う。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 2.1.1-1 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・送信アンテナおよび次項 SN の開発に共通した課題である。なお、パッシブ SN を通信に用いる場合、極低信号レベルでの通信を行う必要がある。そのために雑音よりも低い信号の検出が可能な通信方式の利用を検討する。

(2) センサノードの開発

電波の送受信に1次電池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に回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ート型非線形素子を利用する。また、極低信号レベルでの通信システムへの適用についても検討する。

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。その上で、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]。

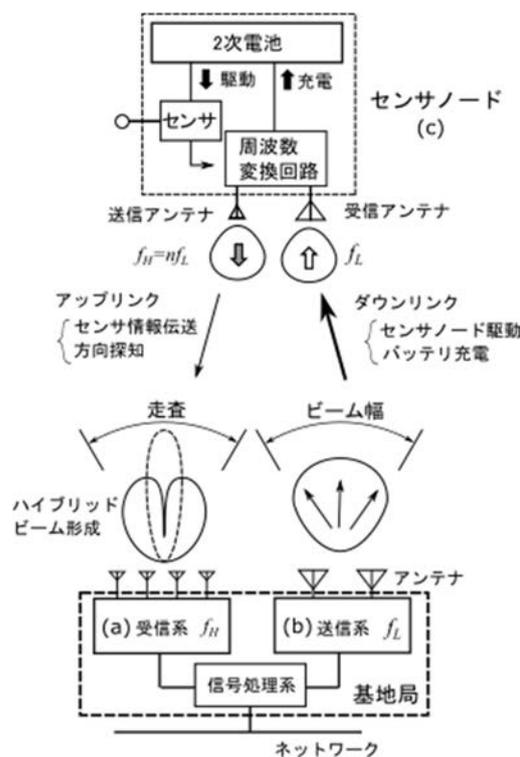


図 2.1.1-1 パッシブ SN と高性能なアンテナを駆使した無線通信システム

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-Fi 6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、多重波成分(MPC)を分離し個別に扱うことができる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の遮蔽損失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、横国大およ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ほか、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。

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 ←→
	② SN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。

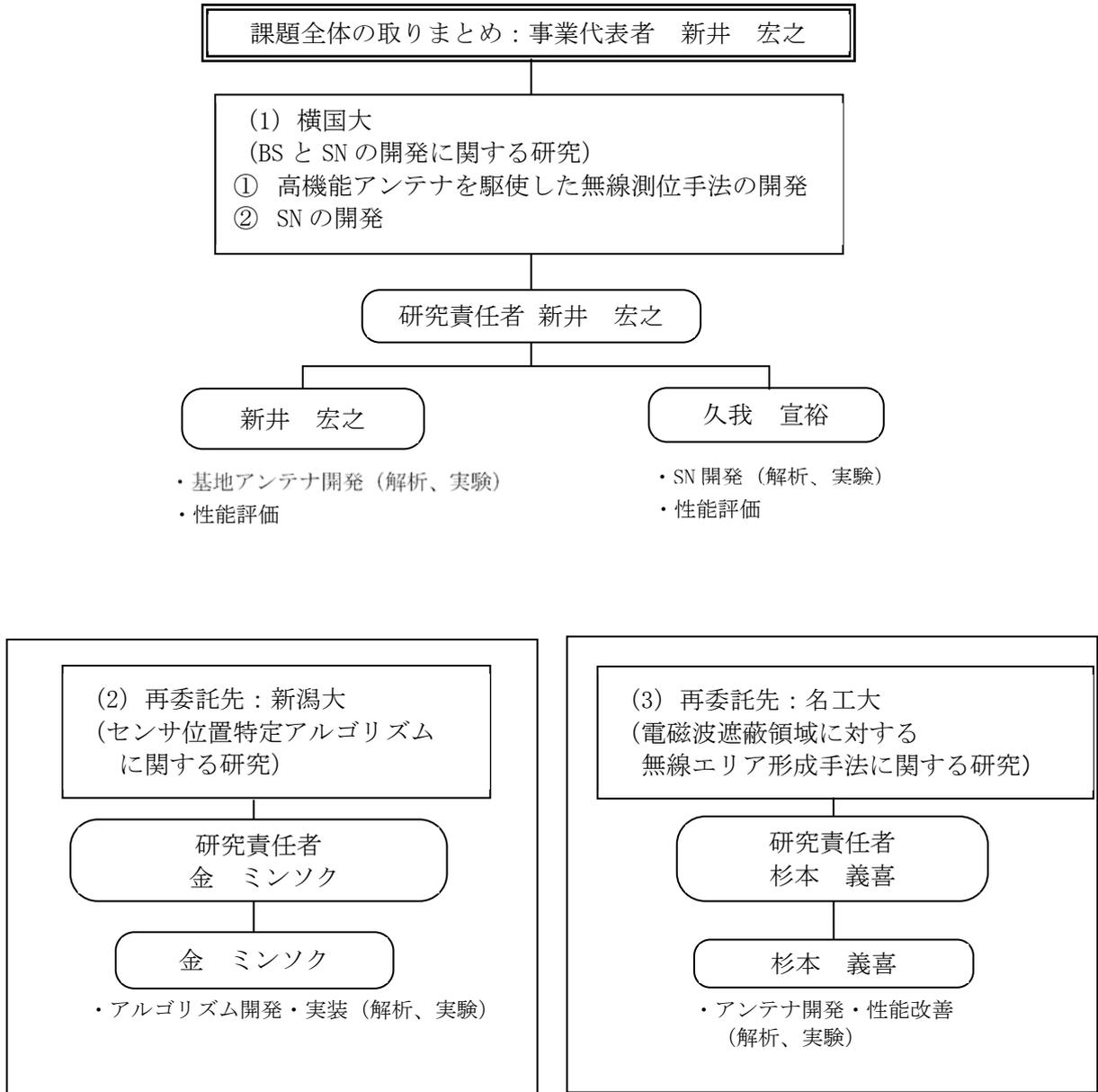


図 2.2-1 実施体制

## 2.3 令和4年度の成果の目標および業務の実施方法

### 2.3.1 基地局とセンサノードに関する研究

#### (1) 基地局の開発

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 アンテナを開発する。ダウンリンク用 2.45 GHz 帯送信アンテナのビーム幅は 60° とする。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° とする。送信・受信ともに、アンテナは単一偏波で設計を行う。

アンテナの基礎設計には電磁界シミュレータを用いて、性能試験はネットワークアナライザ、RF 信号発生器、スペクトラムアナライザを用いて行う。また、作成したアンテナの耐放射線性については、東電、JAEA/CLADS と連携した上で検討を行う。

#### (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 用アンテナを開発する。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、素子および回路の選定を行う。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および耐放射線性を定量評価する。耐放射線性については、東電、JAEA/CLADS と連携した上で検討を行う。

### 2.3.2 センサ位置特定アルゴリズムに関する研究

#### (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および座標化するための多重波電波トモグラフィー法を、計算機シミュレーションを用いて開発する。多重波経路情報に基づいて 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する。また、推定誤差の定式化を行い、測定条件（基地局数や設置位置、対象領域の形状・規模）の変化による影響を定量化する。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付け手法を検討し、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う。

#### (2) 高分解能測定系の構築とデータ処理手法の構築

8×8 MIMO 無線回路（2.45 GHz または 4.85 GHz）を調達し、既存のチャンネルサウンダ（高分解能電波伝搬測定装置：図 2.3.2-1）と組み合わせて高分解能測定系を構築する。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する。8×8 MIMO チャン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する。また、角度・遅延時間特性の類似した MPC 同士をグループ化するクラスタリング手法を開発し、その適用を検討する。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する。

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

図 2.3.3-1 に示すように、PCV 内のような無線基地局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およびアンテナ素子の開発を行う。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 信号発生器、スペクトラムアナライザおよびネットワークアナライザを用いて行う。

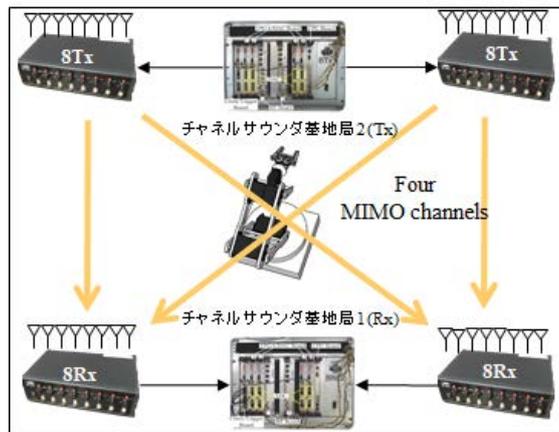


図 2.3.2-1 アルゴリズム開発用高分解能測定系（MIMO チャンネルサウンダ）

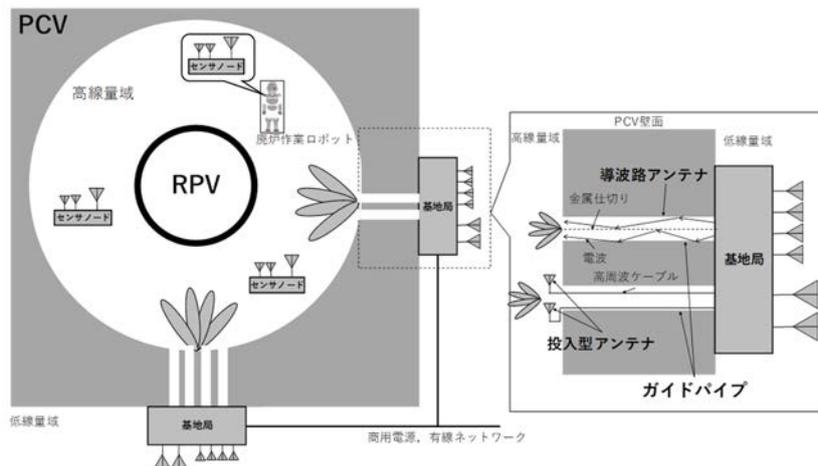


図 2.3.3-1 ペネトレーションを利用した無線リンクの構築

3. 令和4年度の実施内容および成果

3.1 基地局とセンサノード開発に関する研究

3.1.1 高性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 帯、アップリンクに 2 倍高調波である 4.9 GHz 帯を想定した BS アンテナを開発した。図 3.1.1-1(a)に示すように、ダウンリンク用 2.45 GHz 帯送信アンテナのビーム幅は  $60^\circ$  とした。図 3.1.1-1(b1) (b2)に示すように、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  $60^\circ$  とした。送信・受信ともに、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て、性能試験はネットワークアナライザ、RF 信号発生器、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、東電、JAEA/CLADS と連携した上で検討を行った。

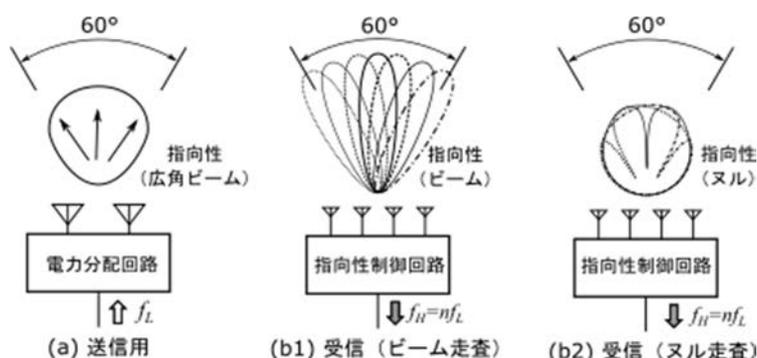


図 3.1.1-1 基地局アンテナの指向性

3.1.1.1 2.45 GHz 帯基地局アンテナ

ダウンリンク用に開発した 2.45 GHz 帯アンテナの構成 (4 素子サブアレー) を図 3.1.1.1-1 に示す。アンテナおよび給電回路は PTFE 基板上に構成した。図中(a)はアンテナ素子基板であり、無給電素子を装荷することで広帯域化された平衡給電型ダイポールアンテナ 4 素子で構成した。図中(b)は平衡給電線路であり、特性インピーダンスが  $100 \Omega$  となるように設計した。図中(c)はアレー用の給電回路であり、リングハイブリッドを用いた平衡不平衡変換器 4 基とコーポレート型 4 分配給電回路により構成した。また基礎検討のため、給電回路分岐部分にはウィルキンソン型電力分配器を導入した。なお、図中(a)と(b)では点 A、B、C、D を、また図中(b)と(c)では点 A'、B'、C'、D' をそれぞれ接続した。

図 3.1.1.1-2 は本研究にて開発された立体型バルンである。本立体型バルンを用いることで、給電回路基板とアンテナ基板を平衡給電線路により立体的に接続できる。これにより、アンテナの設計自由度を増加した。なお、本図ではアンテナに接続される平衡ストリップ線路とリングハイブリッドを金属接触なく接続するための非接触コネクタを導入した。この非接触コネクタの導入により、各誘電体基板上の金属パターンの接触不良や、それにより発生するノイズを低減することができる。また、半田接続のような物理的な固定が不要となることから、アンテナの組み立てや素子の交換が容易になるという利点もある。本非接触コネクタを有する立体型バルンについては、電子情報通信学会総合大会にて概要と基本性能を公表した。

図 3.1.1.1-3(a) にダウンリンク用 BS アンテナの外観を示す。この例では高さ 735 mm のスタンドと長さ 1.82 m のマストにサブアレーアンテナ 2 ユニートを設置し、アンテナ背面に別途設置した電力 2 分配器とセミリジッド線路を介して給電した。なお、本アンテナは全長 660 mm の 8 素子等分配アレーアンテナであり、主偏波は水平偏波、かつアレー正面方向が主放射方向となるように設計した。図 3.1.1.1-3(b) にダウンリンク用 BS アンテナの VSWR (注 5) 特性を示す。VSWR は 2.2 GHz~2.57 GHz の範囲で 1.67 以下となった。図 3.1.1.1-3(c) (d) は水平面および垂直面内の指向性である。図 3.1.1.1-3(c) より、水平面ビーム幅は約  $66^\circ$  となっており、所望のビーム幅が実現された。図 3.1.1.1-3(d) に示す垂直面内指向性では半値幅は  $9.5^\circ$  であり、第 1 サイドローブレベルは約 -13 dB となった。このときの指向性利得は約 17 dBi であり、本構成としては妥当な特性が得られた。

### 3.1.1.2 4.9 GHz 帯基地局アンテナ

#### 3.1.1.2.1 ハイブリッドビームアンテナ

図 3.1.1.2.1-1 にアップリンク用 BS アンテナである 4.9 GHz 帯ハイブリッドビームアンテナの構成を示す。このアンテナでは基礎特性把握のため FR4 基板を用いた。同図 (a) はアンテナ基板の回路パターン面であり、E 面配列された 4 素子プリントダイポールアンテナアレーと、バルンおよびビーム成形回路により構成した。同図 (b) は地板面の構成を示している。本アンテナは  $\Sigma$  ポートと  $\Delta$  ポートの 2 出力端子を有し、 $\Sigma$  ポートからの高利得ビームパターン出力と、 $\Delta$  ポートからはヌルパターン出力を同時に取得することができる。これら 2 端子の出力差が最大となる方向から到来波の方向を推定することができる。

図 3.1.1.2.1-2 にハイブリッドビームアンテナの入力特性を示す。図中 (a) は  $\Sigma$  ポート (端子 1) の特性であり、実線が実験結果、丸点ないし四角点がシミュレーション結果である。反射特性 S11 については概ね両者の傾向は一致した。設計中心周波数である 4.9 GHz では実験・シミュレーションとも S11 が -15 dB と良好な特性が得られた。一方で図 3.1.1.2-2 (b) には、 $\Delta$  ポートの入力特性を示す。反射係数 S22 は実験・シミュレーションともに 10 dB 以下の良好な特性が得られた。なお、図 3.1.1.2-2 (a) および (b) において、 $\Sigma$  ポートと  $\Delta$  ポートの間の相互結合量はともに 30 dB 以下と良好な特性となった。

図 3.1.1.2.1-3 にハイブリッドビームアンテナの指向性を示す。図中 (a) (b) はそれぞれ  $\Sigma$  ポートおよび  $\Delta$  ポートの指向性であり、両者とも実験結果とシミュレーションの結果は良く一致した。

開発したハイブリッドビームアンテナの SN 検出効果を確認するために、標準信号発生器が接続された半波長ダイポールアンテナにより SN をモデル化した実験を実施した。その様子を図 3.1.1.2.1-4 に示す。このとき、標準信号発生器 (SG) からの入力電力は -10 dBm とし、ハイブリッドビームアンテナから 700 mm の位置にダイポールアンテナを設置した。この際、ビーム時およびヌル時の受信電力はそれぞれ -54 dBm および -85 dBm となった。すなわち、本実験において 31 dB の良好な検出利得が得られた。

### 3.1.1.2.2 回線評価用アレーアンテナ

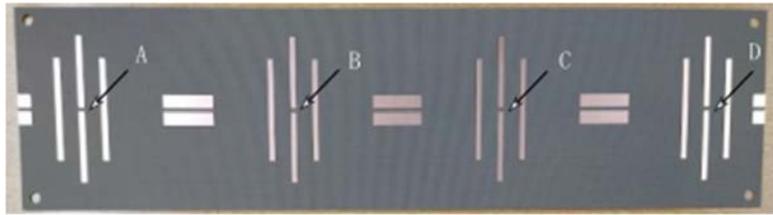
アップリンク回線評価用に 4.9 GHz 帯 16 素子アレーアンテナを開発した。アンテナおよび給電回路は図 3.1.1.1-1 に示す 2.45 GHz 帯アンテナとほぼ等価な設計とした。ただし、2.45 GHz 帯アンテナと同一厚みの PTFE 基板上に構成されているため、完全なスケールモデルではなく、かつ、製作上の都合から素子間隔も異なるため、利得も 2.45 GHz 帯アンテナとは異なっている。

図 3.1.1.2.2-1(a)にこのアンテナの外観を示す。この例では高さ 735 mm のスタンドと長さ 1.82 m のマストにサブアレーアンテナ 4 ユニットを設置し、アンテナ背面に別途設置された電力 4 分配器とセミリジッド線路を介して給電した。なお、本アンテナは全長 720 mm の 16 素子等分配アレーアンテナであり、主偏波は水平偏波、かつアレー正面方向が主放射方向となるように設計した。図 3.1.1.2.2-1(b)にアップリンク回線評価用 BS アンテナの VSWR 特性を示す。4.4 GHz～5.38 GHz の範囲で VSWR は 1.58 以下と良好な特性が得られた。図 3.1.1.2.2-1(c) (d)は水平面および垂直面内の指向性である。図 3.1.1.2.2-1(c)より水平面ビーム幅は約 66° となっており、所望のビーム幅が実現された。図 3.1.1.2.2-1(d)に示す垂直面内指向性では半値幅は 3.9° であり、第 1 サイドローブレベルは約 -13 dB となった。このときの指向性利得は約 21 dBi となり、本構成としては妥当な特性が得られた。

### 3.1.1.3 放射線照射試験

本研究では、ダウンリンク用 BS アンテナに低損失な PTFE 性基板を用いた。一方で、アップリンク用 BS ハイブリッドビームアンテナではガラスエポキシ性基板を用いたが、これは基礎検討のためであり、最終的には PTFE など低損失な誘電体基板を用いる。そこで最終的な使用が想定される PTFE 材料について、耐放射線性を評価した。本研究では、比誘電率 2.6 の PTFE 基板で、図 3.1.1.3-1 に示すような 5 GHz 帯パッチアンテナを作成し、その共振周波数変化により評価することとした。放射線照射は東京都立産業技術研究センターに外注し、そこでの照射試験の前後におけるアンテナの共振周波数変化をネットワークアナライザにより評価した。放射線照射は総照射量 1,000 Gy を実現するために、約 290 Gy/h のセシウム 137 ガンマ線を 3 時間 45 分照射した。

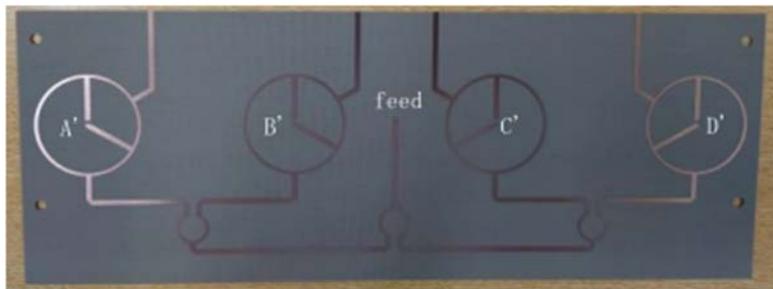
図 3.1.1.3-2 に放射線照射前後におけるパッチアンテナの反射係数特性を示す。3 つの基板それぞれを 1、2、3 とし、放射線照射前後の特性をそれぞれ-before と-after と表記している。この結果よりわかるように、放射線照射による反射係数の変化はなかった。



(a) アンテナ（裏面銅箔なし）



(b) 平衡給電線路（表裏同一パターン）



(c) アレー給電回路（裏面地板）

図 3. 1. 1. 1-1 ダウンリンク用アンテナの構成（サブアレーユニット）

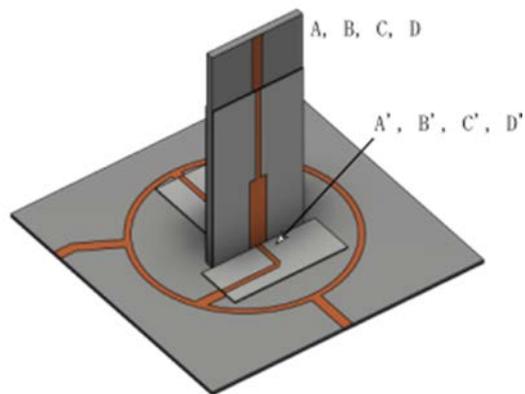
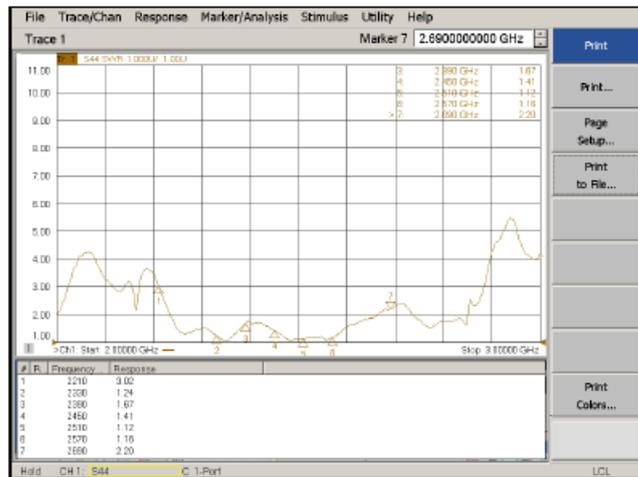


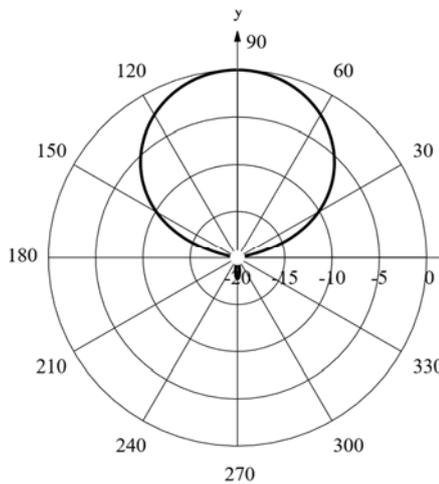
図 3. 1. 1. 1-2 立体型バルン（非接触コネクタ付き）



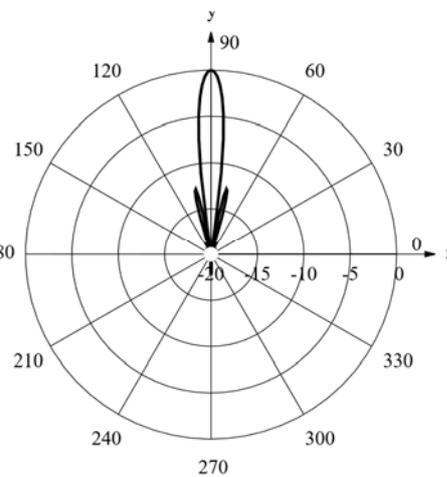
(a) アンテナの外観



(b) VSWR 特性



(c) 水平面内指向性



(d) 垂直面内指向性

図 3.1.1.1-3 ダウンリンク用 BS アンテナの特性 (2.45 GHz 帯 8 素子アレーアンテナ)

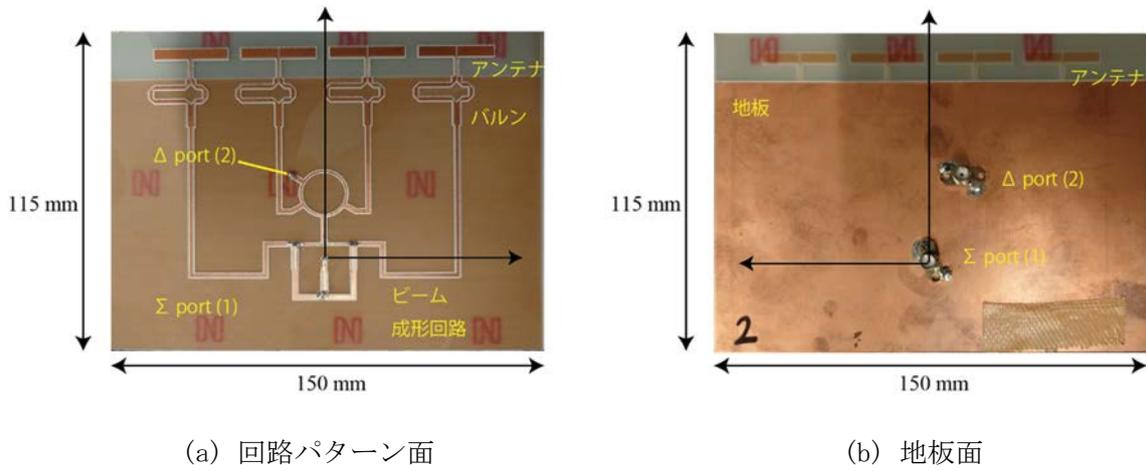


図 3. 1. 1. 2. 1-1 アップリンク用 BS ハイブリッドビームアンテナの構成

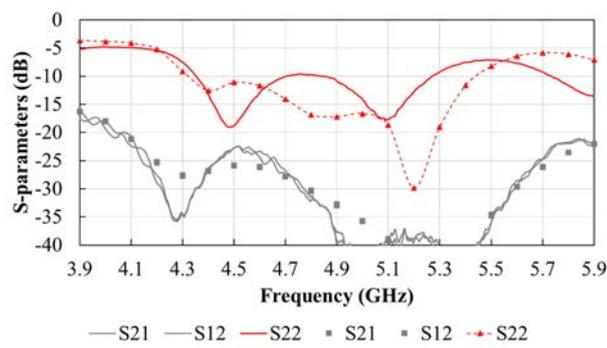
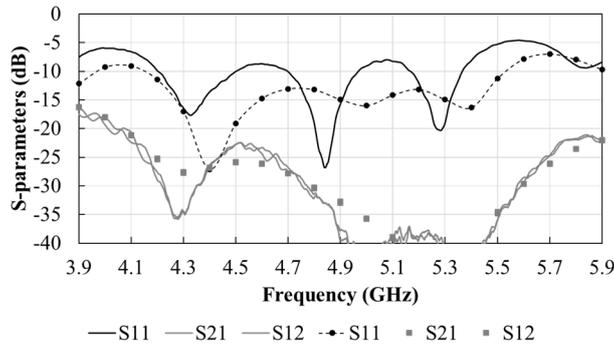
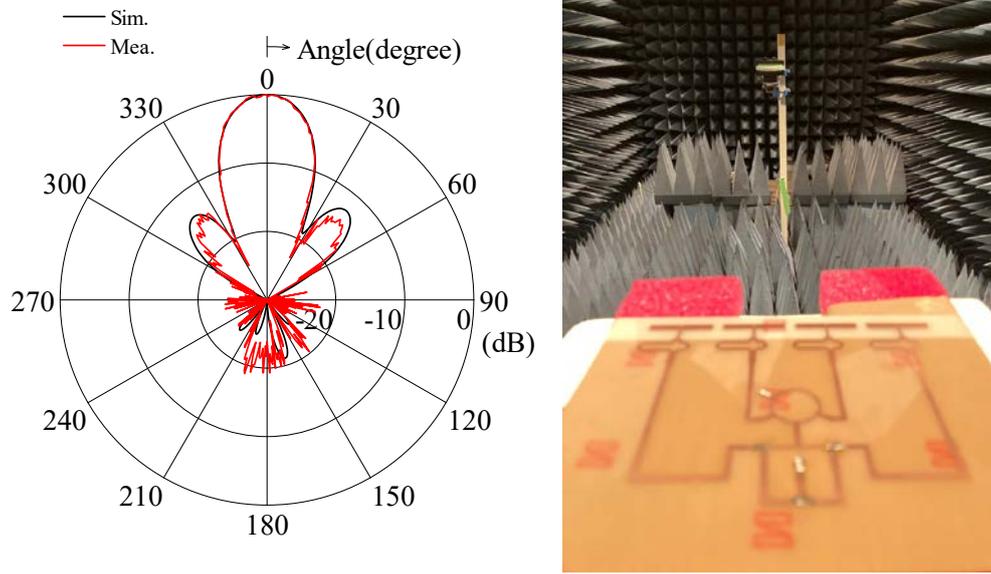
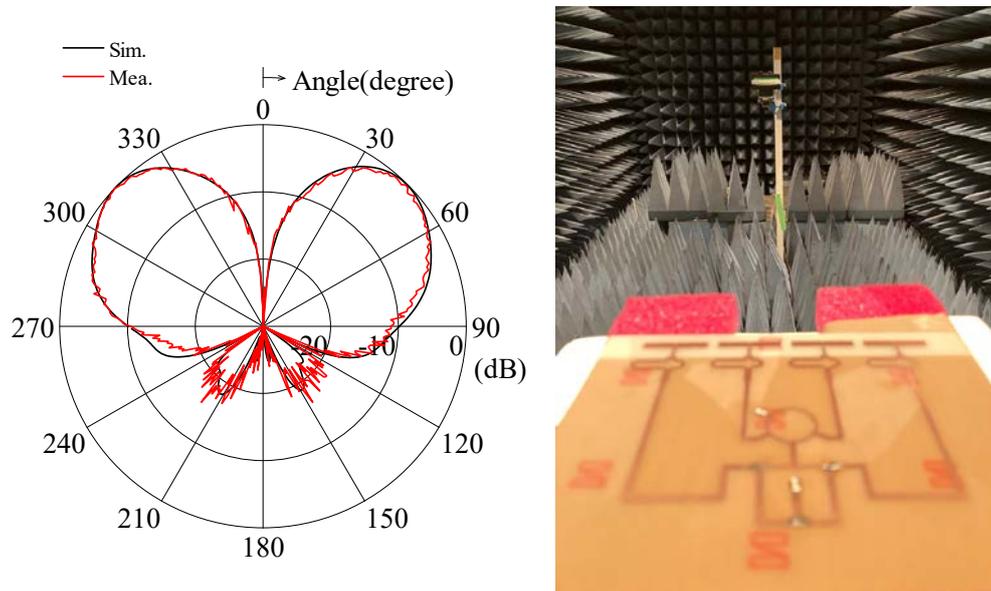


図 3. 1. 1. 2. 1-2 アップリンク用 BS ハイブリッドビームアンテナの入力特性

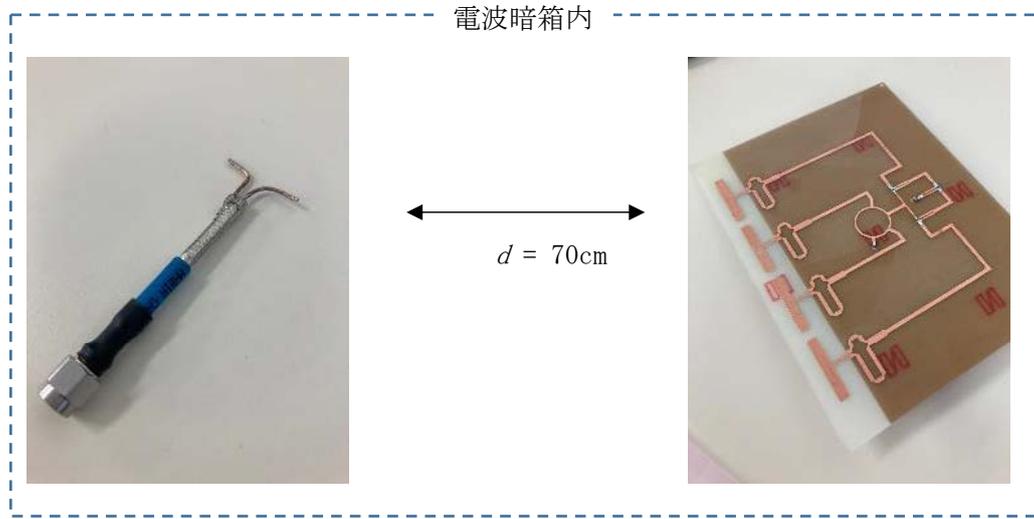


(a)  $\Sigma$ ポート

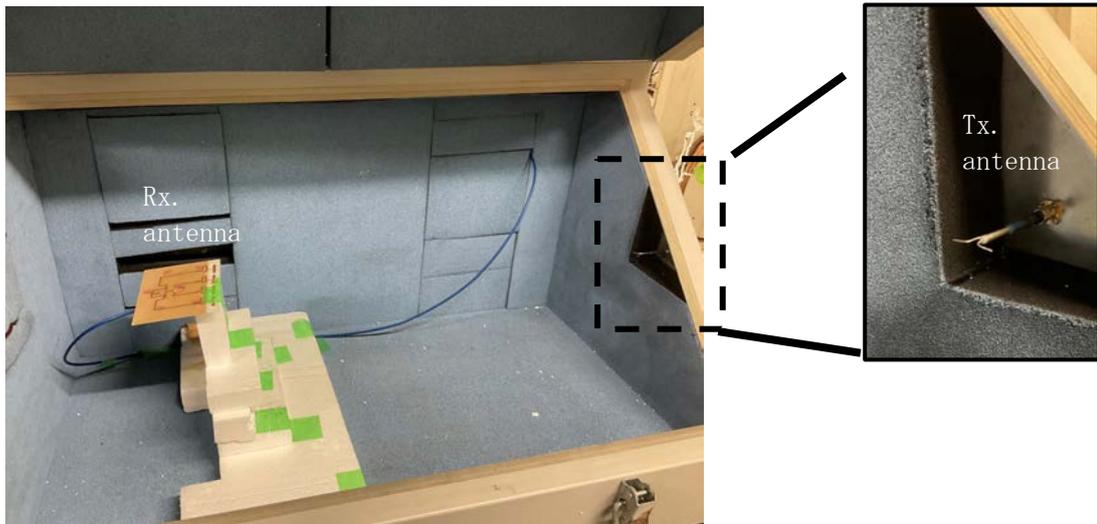


(b)  $\Delta$ ポート

図 3. 1. 1. 2. 1-3 アップリンク用 BS ハイブリッドビームアンテナの指向性

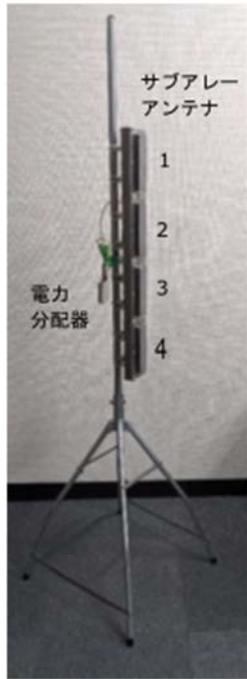


(a) 概念図

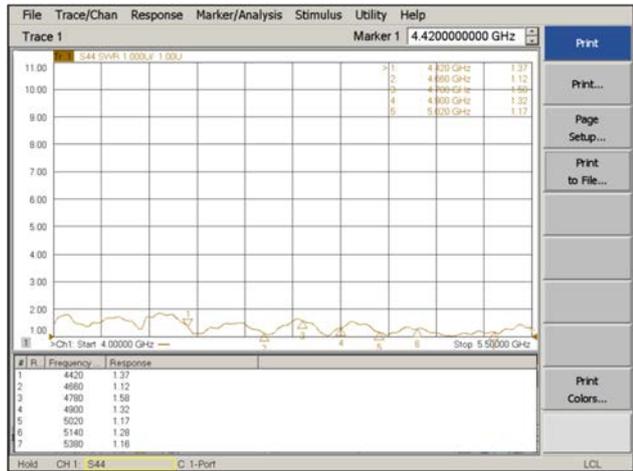


(b) 電波暗箱内での実験

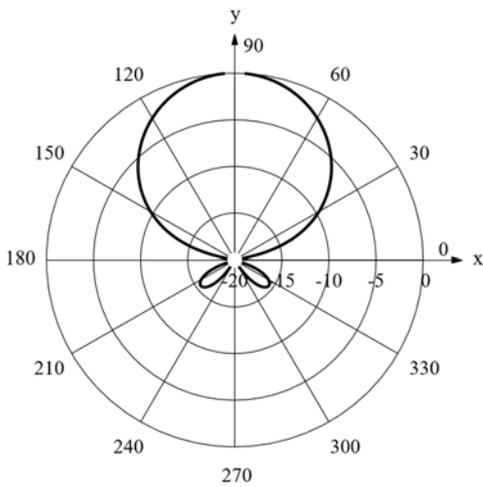
図 3.1.1.2.1-4 アップリンク用 BS ハイブリッドビームアンテナの  
センサノード検出効果確認実験



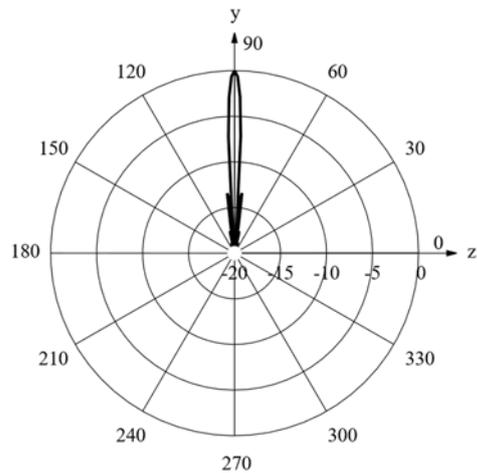
(a) アンテナの外観



(b) VSWR 特性



(c) 水平面内指向性



(d) 垂直面内指向性

図 3.1.1.2.2-1 アップリンク回線評価用 BS アンテナの特性  
(4.9 GHz 帯 16 素子アレーアンテナ)

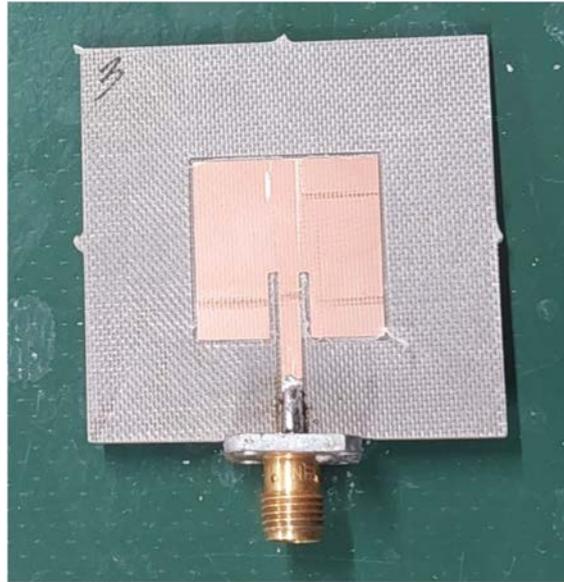


図 3.1.1.3-1 放射線試験用パッチアンテナ

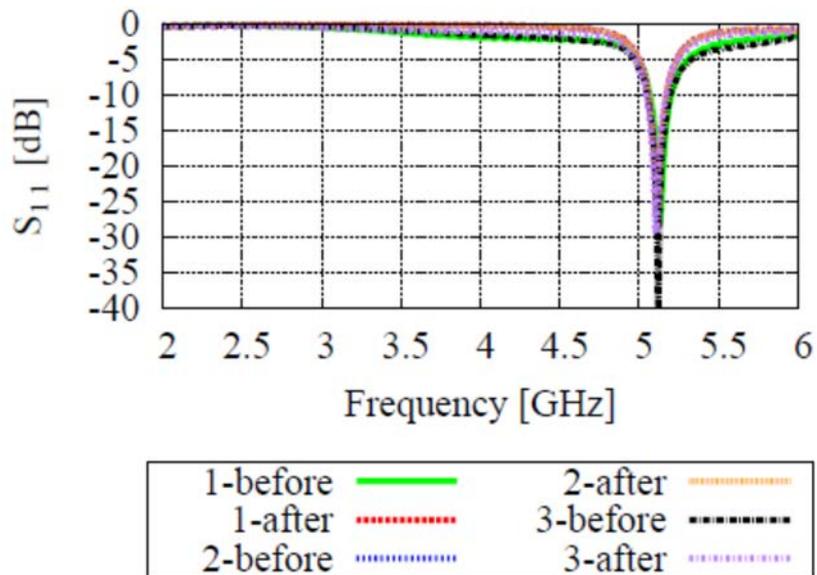
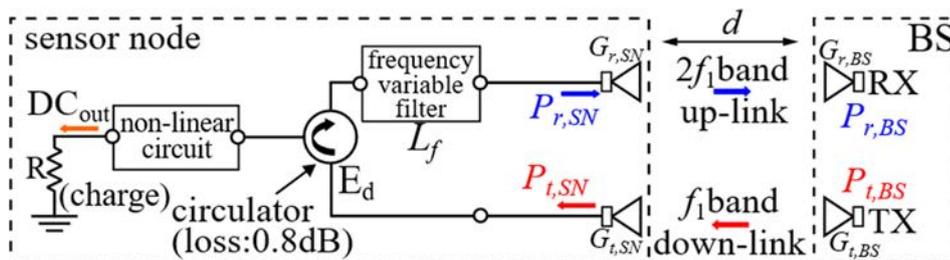


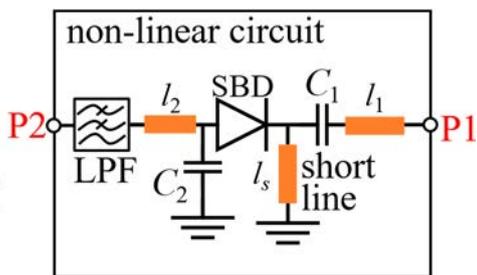
図 3.1.1.3-2 放射線照射前後におけるパッチアンテナの反射係数特性

3.1.2 センサノードの開発

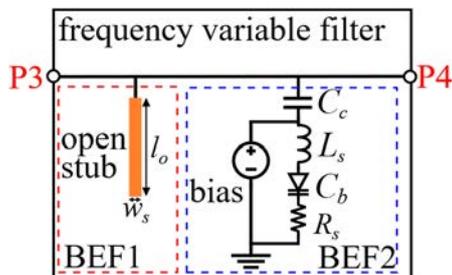
2.45 GHz のダウンリンク波を受信し、その2倍高調波である4.9 GHz をアップリンクとして送信するSNを開発した。図3.1.2-1に示すようなシステム構成を有するSNを構成し、通信用の高調波発生性能という観点から特性を評価し、素子および回路の選定を行った。また、選定した素子および回路に対して放射線照射試験を行い、高調波特性と整流特性の両面から特性変化および耐放射線性を定量評価した。耐放射線性については、東電、JAEA/CLADSと連携した上で検討を行った。具体的には、JAEA/CLADSより紹介のあった東京都立産業技術研究センターに放射線照射試験を外注し、セシウム137ガンマ線照射を実施した。



(a) 系全体のシステムブロック図



(b) 周波数変換回路（非線形回路）



(c) 周波数可変フィルタ

図3.1.2-1 センサ電圧を検出するSNのシステム構成

3.1.2.1 周波数変換回路

図3.1.2-1(b)にダウンリンク波をアップリンク周波数および直流(DC)に変換する回路の構成を示す。この回路は[3.1.2.1-1] [3.1.2.1-2]のレクテナ回路を基本に設計した。端子P2には、長さ $l_2$ の伝送線路とチップ型低域通過フィルタ(LPF)を介してDC成分が出力される。ここでLPFの特性は図3.1.2.1-1に示すとおりである。なお、このときの評価回路は、比誘電率 $\epsilon_r=2.6$ 、板厚 $h=0.73$  mm、銅箔厚 $t=0.018$  mmのPTFE基板上に構成された50  $\Omega$ コプレーナ線路を利用した。700 MHz以上の周波数で15 dBの遮断効果があることが確認できた。図3.1.2.1-2に、PTFE基板上に実装した周波数変換回路を示す。なお本節では測定装置の制限から、2.45 GHzよりも若干低い周波数帯、すなわち2.25 GHzを中心とした検討結果を示したが、採用した部品の特性は、この程度の周波数差に対してクリチカルとならぬように選定した。よって、図3.1.2.1-2に示す回路の $l_s$ 、 $l_2$ を適宜修正することで2.45 GHz帯においても同等の特性を得ることができる。

チップ型低域通過フィルタ (LPF) ; DEA160710LT-5023B1 (TDK 製)  
 ショットキーバリアダイオード (SBD) ; RB751VM-40TE-17  
 コンデンサ ( $C_1$ ) ; GQM1875C2E1R0BB12D (村田製作所製)  
 コンデンサ ( $C_2$ ) ; GQM22M5C2H5R0CB01L (村田製作所製)

本検討では基礎検討として、この周波数変換回路にサーキュレータを介してダウンリンク信号を印加し、かつ、アップリンク信号の取り出しを行った。ここでは 2 GHz ~ 6 GHz の範囲において伝送損失 0.8 dB、アイソレーション 14 dB で動作するサーキュレータを用いた。

サーキュレータ ; PE8432 (Pasternack 製)

図 3.1.2.1-3(a) に非線形回路の入力電力に対する高調波特性を示す。入力周波数  $f_1 = 2.10$  GHz、2.25 GHz、2.40 GHz は実線、点線、破線にそれぞれ対応している。入力電力  $P_{in}$  が -20 dBm ~ -5 dBm の間でパワースロープ  $c$  は 2 [dBm/dBm] 程度であり、この区間の周波数変換効率はシミュレーションと一致した。入力電力  $P_{in}$  が -5 dBm 以上の区間では、非線形回路の変換効果が減少した ( $c < 2$ )。なお、入力電力  $P_{in}$  が -25 dBm 以下では、SG による 2 次高調波の影響により、測定感度が劣化した。図 3.1.2.1-3(b) に非線形回路の変換率の周波数特性を示す。これより今回使用する周波数変換回路は、その変換効率に周波数特性があり、2.1 GHz から 2.4 GHz の間で 10 dB 程度の差があった。また周波数が高くなると、周波数変換効率が減少した。

### 3.1.2.2 電圧制御周波数可変フィルタを用いたセンサノードの基礎検討

放射線センサなど、情報源をアップリンク波に重畳するための変調回路について考える。ここでは情報源信号を伝送路の周波数特性として変調する手法について原理的検討を行った。具体的には、周波数が固定された帯域阻止フィルタ (BEF) と周波数可変 BEF を組み合わせて通過域を構成し、その伝送特性を情報信号に合わせて変調した。図 3.1.2-1(c) に示す回路では、周波数固定 BEF (BEF1) として開放伝送線路スタブを、周波数可変 BEF (BEF2) としてバラクタダイオードの直列共振を利用した。

今回の検討で用いたバラクタダイオードは、逆バイアス  $V_b$  が 0 ~ 5 V の変化範囲において、 $C_b$  が 5.1 ~ 1.2 pF の範囲で変化した。これに対し、 $C_c = 0.8$  pF、 $L_s = 2.5$  nH、 $R_s = 1.2$   $\Omega$  とすると、バラクタダイオードの直列共振周波数  $f_{02}$  は 3.83 ~ 4.59 GHz となる。また、バイアス  $V_b$  が 0 V、2.5 V、5 V の場合には、 $C_b$  は 5.1 pF、2.4 pF、1.2 pF となった。なお、回路シミュレーションでは、BEF2 による阻止域可変域は約 18% (3.83 ~ 4.59 GHz) となった。

バラクタダイオード ; SMV1233-079LF (Skyworks 製)

図 3.1.2.2-1 に実験に用いた周波数可変フィルタの構成を示す。P3 から P4 までの線路の左側は BEF1、右側は BEF2 である。BEF2 における逆バイアス電圧は、センサ電圧を模擬するための直流電圧源より供給した。バイアス回路中の  $C_1$  はチップコンデンサであり、DC カットとして機能する。

図 3.1.2.2-2 にバイアス電圧  $V_b$  に対する周波数可変フィルタの伝送特性を示す。BEF1 由来の中心周波数  $f_{01}$  に誤差が生じた。原因としては基板誘電率の誤差、オープンスタブ  $l_0$  の誤差およびオープンスタブ部分のギャップ変化における相互結合量の変化などが考えられる。BEF1 の阻止帯域幅は、実測においてシミュレーションより広がった。原因は 2 つ考えられ、1 つは基板加工機の製造精度の問題で、極めて細い幅を持つスタブの製造が設計通りできていないことである。もう 1 つは線路の損失で、回路シミュレ

ーションは線路の導体損失を考慮していない。細い線路では特に伝送損失が大きいため、阻止帯域幅が大きくなったと考えられる。BEF2 による阻止帯域は、センサ電圧に対して、シミュレーションと実験で同様な傾向で変化した。バラクタダイオードの直列共振周波数 $f_{02}$ にずれがあるが、センサ電圧の推定において影響はない。一方、BEF2 の帯域幅および谷のレベルが異なる原因は、線路の伝送損失とチップ部品の損失が  $R_s = 1.2 \Omega$  より大きいためであると考えられる。また、電圧が高くなると損失が大きくなるため、4.6 GHz 付近で、谷が高くなり、帯域も広がってしまった。透過部分については、中心周波数のピークに誤差が生じた。これにより測定精度が低下する恐れがあるため、これを改善することが今後の課題である。

図 3.1.2.2-3 に電波暗箱内でモノポールアンテナを用いた伝送実験の様子を示す。ここで SG から発生する 2 次高調波の影響をなくするため、SG とアンテナ 1 の間にアイソレーション-60 dB の同軸型 LPF を挿入した。

同軸型低域通過フィルタ (LPF) ; ZLSS-A2R8G-S+ (Minicircuit 製)

なお、ここで用いられている周波数変換回路の端子 P1 における反射特性を図 3.1.2.2-4 に示す。これよりダウンリンク周波数帯では  $S_{11} = -5\text{dB} \sim -2\text{dB}$ 、アップリンク周波数帯では  $S_{11} = -2\text{dB}$  と、整合状態が悪いが、この改善は今後の課題である。図 3.1.2.2-5 にシステム全体時のセンサノードの応答特性を示す。このとき SG の出力電力  $P_{F1}$  は 20 dBm に設定し、 $f_1$  を 2.2 GHz、2.25 GHz、2.3 GHz の 3 点にして測定を行った。図中、右縦軸がスペクトラムアナライザによるアップリンク波 (4.9 GHz 帯) の受信レベルであり、-100 dBm から -80 dBm の範囲で SN からのアップリンク波が受信できた。

次にセンサ情報の変調回路である周波数可変フィルタの有効性を確認するために、アンテナ 1、2 を外すことでダウンリンク信号の周波数特性を無視した検討を行った。すなわち、周波数変換回路に SG からのダウンリンク信号を直接印加して実験を行った。このときの結果を図 3.1.2.2-6 に示す。ここではアンテナ 1、2 の結合量の分印加電力を下げた。すなわち、印加電力  $P_{F1}$  を 0 dBm とし、 $f_1$  を同様に 2.2 GHz、2.25 GHz、2.3 GHz の 3 点周波数で測定を行った。図 3.1.2.2-4 の周波数変換回路の反射特性が示すように、実測の  $2f_1$  周波数帯のインピーダンス不整合により、高い周波数ときのレベルがシミュレーション結果より低いことが予測できる。これを考慮すると、センサ電圧が変化したときの周波数に対する出力電力の変化傾向は概ね検出できたといえる。

### 3.1.2.3 放射線照射試験

本研究で開発する SN に対しては高線量環境下での安定動作が求められる。そのため、SN の整合特性および周波数変換効率および周波数可変フィルタの伝送特性という観点で、放射線照射前後の特性変化を評価した。放射線照射試験は、東京都立産業技術センター・計測分析技術グループの自己遮蔽型セシウム 137 ガンマ線照射装置を用いて測定した。

放射線源に最も近い 180 mm ステージに試料を設置し、約 290 Gy/h の照射実験を実施した。被測定試料は、図 3.1.3-1 に示すように、厚さ約 10 mm 程度のアクリル台上に設置した。ここでは線量の最も高い円板中心部付近に周波数変換回路#A1、#A2 および周波数可変フィルタ#B1、#B2 を配置した。なお、日程上の都合により、放射線照射は 3 回に分けて実施した。第 1 回と第 2 回は、それぞれ、3.5 時間の放射線照射を実施した。これによりそれぞれ約 1,000 Gy の放射線照射を実施した。第 3 回は 24 時間、約 6,000 Gy の放射線照射を実施した。すなわち、第 1 回までは合計 1,000 Gy のガンマ線、第 2 回までは総計約 2,000 Gy のガンマ線、第 3 回までは総計約 8,000 Gy のガンマ線照射試

験を実施したことになる。図 3.1.3-2 に放射線照射前後の周波数変換回路#A1 と#A2 の端子 P1 における反射特性変化を示す。このように、3 回の実験後、周波数変換回路の整合状態は、本検討で用いる周波数において顕著な変化はなかった。図 3.1.3-3 は、放射線照射前後の周波数変換回路#A1 と#A2 の周波数変換効率の変化を示している。なお、ここでは  $P_{f1}=0$  dBm の場合の評価結果を示している。3 回の放射線照射の後、周波数変換効特性には約 0.5 dB 程度の変化はみられるが、現状では人為的な測定誤差に比して有為な差異とは言えない。このように、1,000 Gy、2,000 Gy、8,000 Gy のガンマ線照射でも周波数変換回路の直流出力はほとんど変わらず、放射線の直流出力への影響はなかった。一方で、放射線照射による周波数変換回路の整流特性について評価した結果を表 3.1.2.3-1 に示す。ここでは端子 P2 の開放電圧によって放射線照射の影響を評価した。表中 (a) (b) が総量 8,000 Gy の放射線照射後の特性であり、(c) が放射線未照射回路の特性である。これらの中で小数点第 1 位のレベルでの差はない。よって、2 次電池への充電性能と言う観点では、放射線照射の影響はなかった。

図 3.1.3-4 は、放射線照射前後の周波数可変フィルタ#B1 と#B2 の伝送特性を示している。この結果のように、周波数可変フィルタも、1,000 Gy、2,000 Gy、8,000 Gy のガンマ線照射での伝送特性における放射線の影響はなかった。

### 3.1.3 まとめ

基地局とセンサノード開発に関する研究を実施した。

#### (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。アンテナの基礎設計には電磁界シミュレータを、性能試験はネットワークアナライザ、RF 信号発生器、スペクトラムアナライザを用いた。ダウンリンク用 2.45 GHz 帯送信アンテナとしては水平偏波を主偏波とした 8 素子ダイポールアレーアンテナを開発し、水平面ビーム幅が約  $60^\circ$ 、指向性利得が 17 dBi 程度の性能が得られることを確認した。4.9 GHz 帯アップリンク用受信アンテナとして水平偏波を主偏波とした 4 素子ハイブリッドビーム成形アンテナを開発した。電波暗箱内での実験により、到来方向において  $\Sigma$  端子と  $\Delta$  端子の出力差が 30 dB 程度得られることを確認した。また、アンテナに用いられる材料の耐放射線性を評価するため、東電、JAEA/CLADS より紹介された東京都立産業技術研究センターのセシウム 137 ガンマ線照射設備を外注利用した。290 Gy/h、総量 1,000 Gy の放射線を 5GHz 帯パッチアンテナに照射し、その共振周波数を評価した結果、放射線照射前後において、有為な特性変化はみられないことが確認された。

今後は、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等を用いて、方向探知性能の基礎的性能評価等を行っていく。また、複数の基地局を用いる 3 点法を適用した際の位置推定性能を評価する。また、FSK 変調波に関する復調系システムを構築していく。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 年度に開発した SN を用いて、通信可能範囲を評価していく。

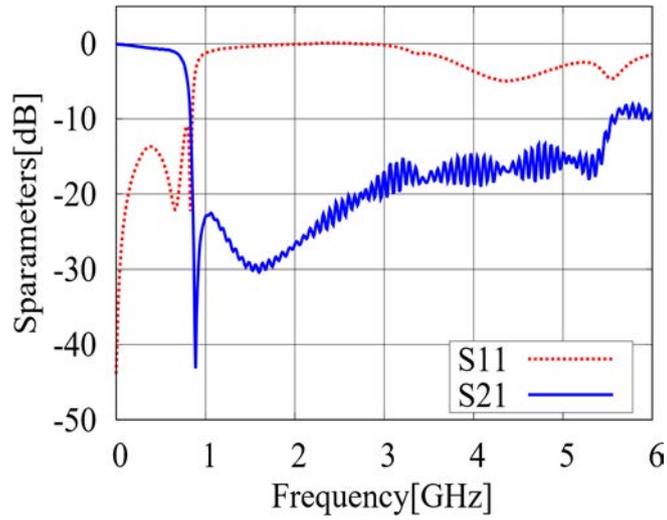
#### (2) センサノードの開発

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 を開発した。基礎検討として、通信用の高調波発生性能という観点からシ

ショットキーバリアダイオードを用いた周波数変換回路とサーキュレータで構成される回路構成を採用した。電波暗箱内でモノポールアンテナを利用した実験により SN の応答特性を評価した結果、20 dBm のダウンリンク波に対して-80 dBm から-100 dBm 程度のアップリンク波が検出できることが確認できた。これにより SN の基本的動作は確認できた。

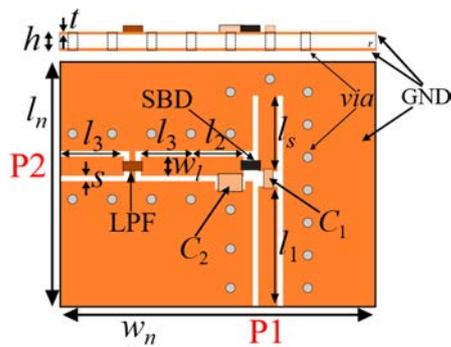
また、センサ電圧情報をアップリンク信号に変調するために、BEF を用いた可変周波数フィルタを開発した。これについてもモノポールアンテナを利用した実験により、上記 SN とともに実験的に評価した。その結果、センサ情報を取得するにあたり、アンテナや周波数変換回路の周波数特性の影響が無視できないことを確認した。

選定した素子および回路に対する放射線照射試験は、JAEA/CLADS より紹介のあった東京都立産業技術研究センターに外注した。具体的には、周波数変換回路および周波数可変フィルタに対して最大 8,000 Gy のセシウム 137 ガンマ線を照射し、各回路の端子反射係数として評価した。その結果、最大 8,000 Gy の放射線量に対する回路特性の変化は、実用上無視できるレベルであることを確認した。今後は、令和 4 年度に開発した基地局アンテナとセンサノード用アンテナを用いて、通信距離を評価していく。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ていく。また、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することにより、耐放射線試験の省力化を図り、さらに FSK 変調回路を含めた設計回路の放射線照射試験により、性能変化を評価していく。



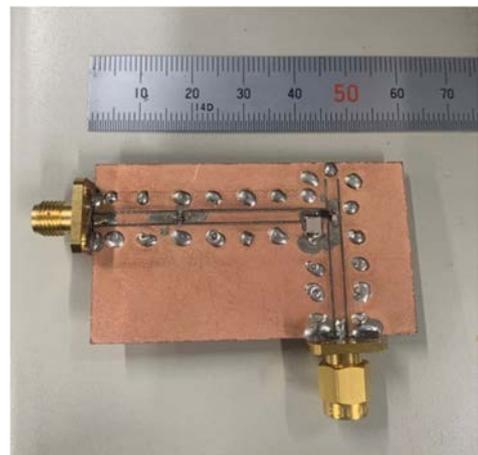
伝送特性（実験）

図 3. 1. 2. 1-1 チップ型 LPF 回路の入力特性



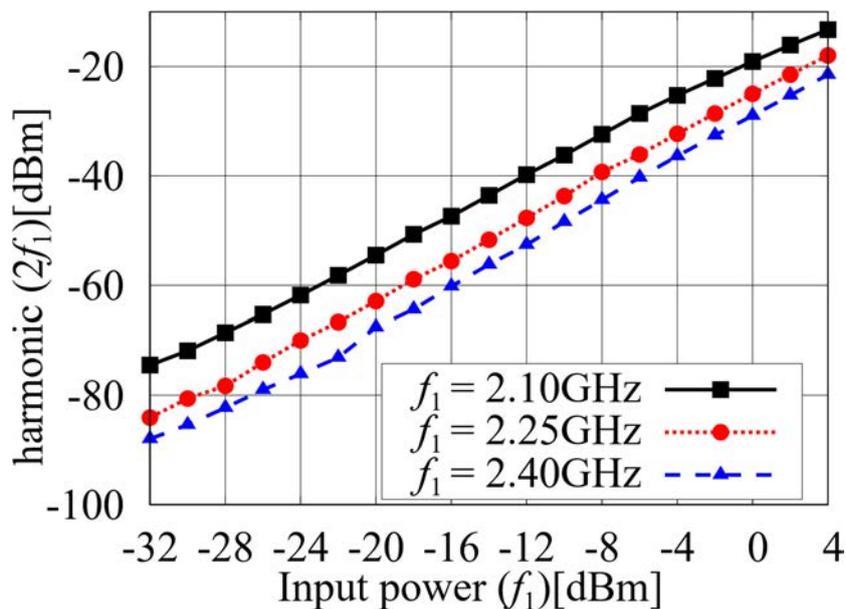
$l_1 = 20, l_2 = 10, l_3 = 14.3, l_s = 7.5, l_n = 35$   
 $w_n = 56.1, s = 0.5, w_l = 1.8, h = 0.73$  [Unit: mm]  
 $C_1 = 1 \text{ pF}, C_2 = 5 \text{ pF}, \epsilon_r = 2.6$

(a) 構成

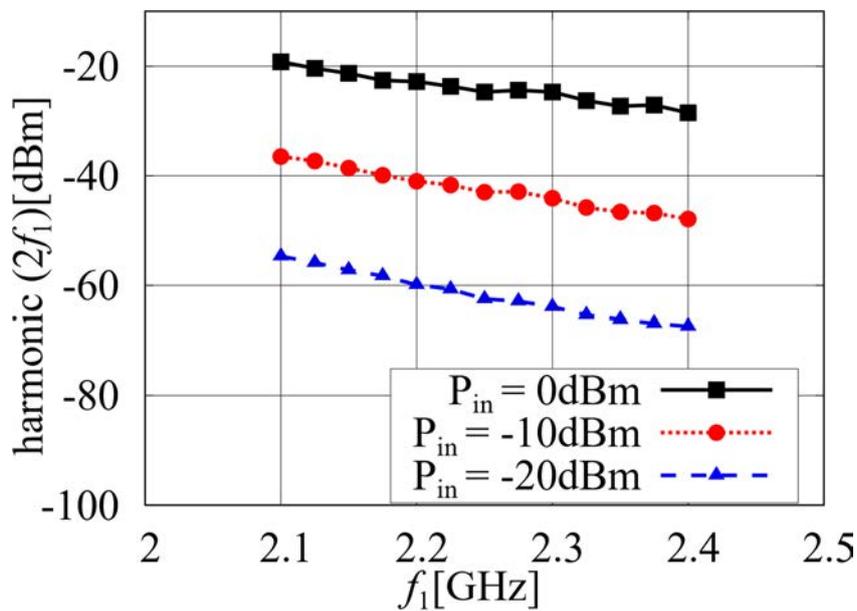


(b) 実験用サンプル

図 3. 1. 2. 1-2 周波数変換回路

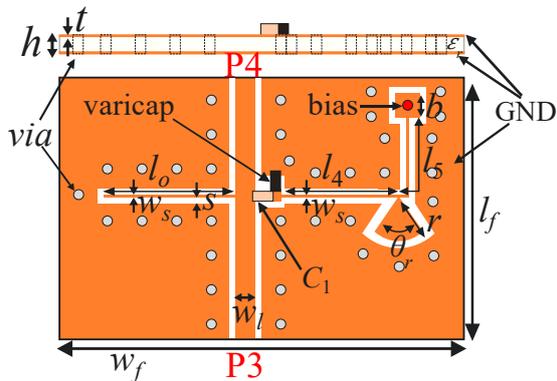


(a) 入力電力に対する依存性



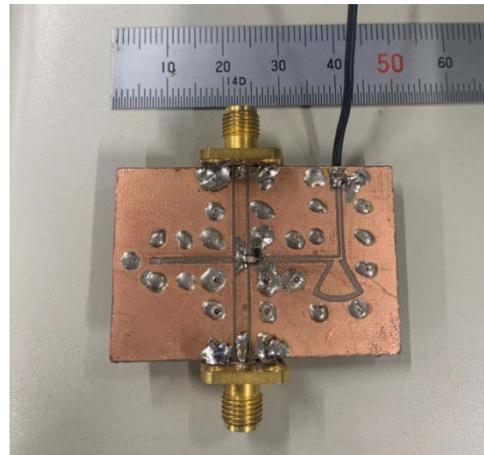
(b) 2次高調波の周波数特性

図 3.1.2.1-3 周波数変換用非線形回路の2次高調波特性 (実験)



$l_4 = 12.4, l_5 = 12.4, l_0 = 13, l_f = 30, w_f = 35$   
 $w_l = 1.8, s = 0.5, h = 0.73, r = 5.6, b = 2$  [Unit: mm]  
 $C_1 = 1 \text{ pF}, \theta_r = 60^\circ, \epsilon_r = 2.6$

(a) 構成



(b) 実験用サンプル

図 3. 1. 2. 2-1 周波数可変フィルタ

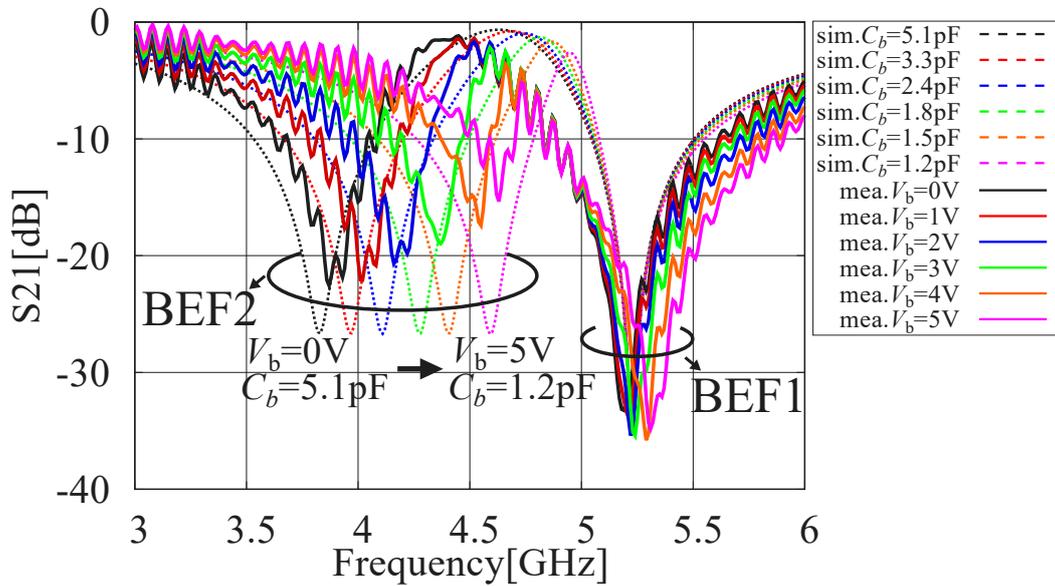


図 3. 1. 2. 2-2 周波数可変フィルタの伝送特性

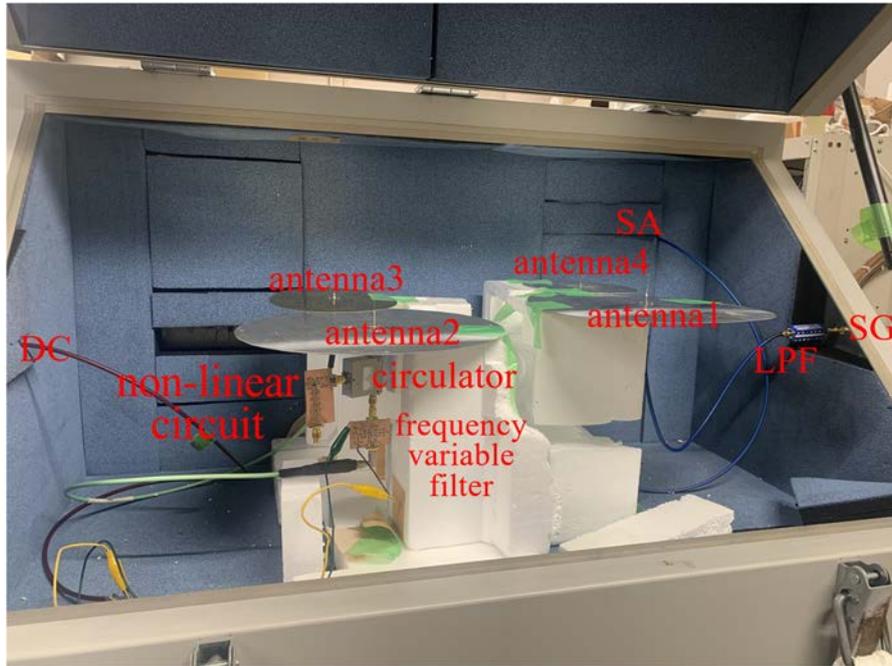


図 3.1.2.2-3 電波暗箱内でモノポールアンテナを用いた SN の応答実験

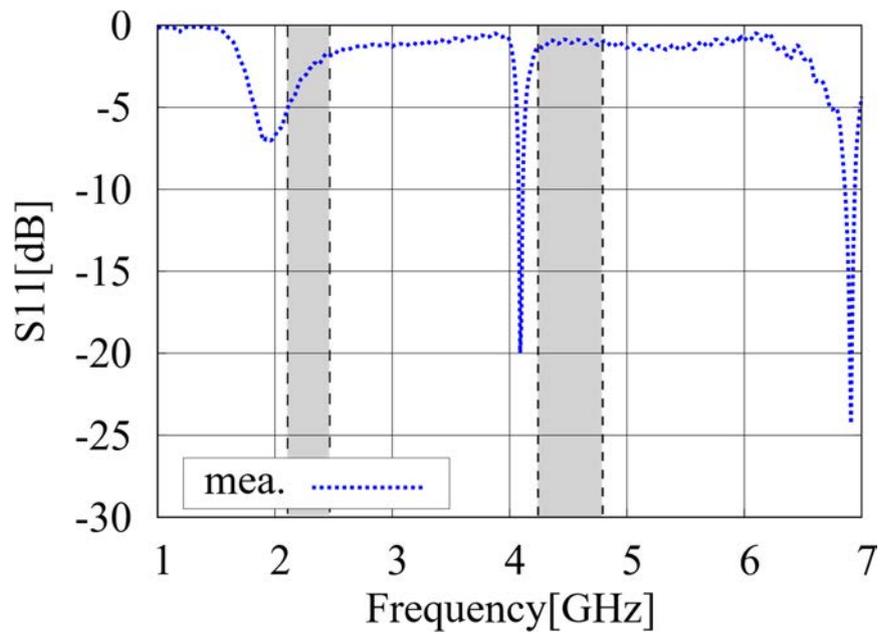


図 3.1.2.2-4 周波数変換回路の反射特性 (端子 P1)

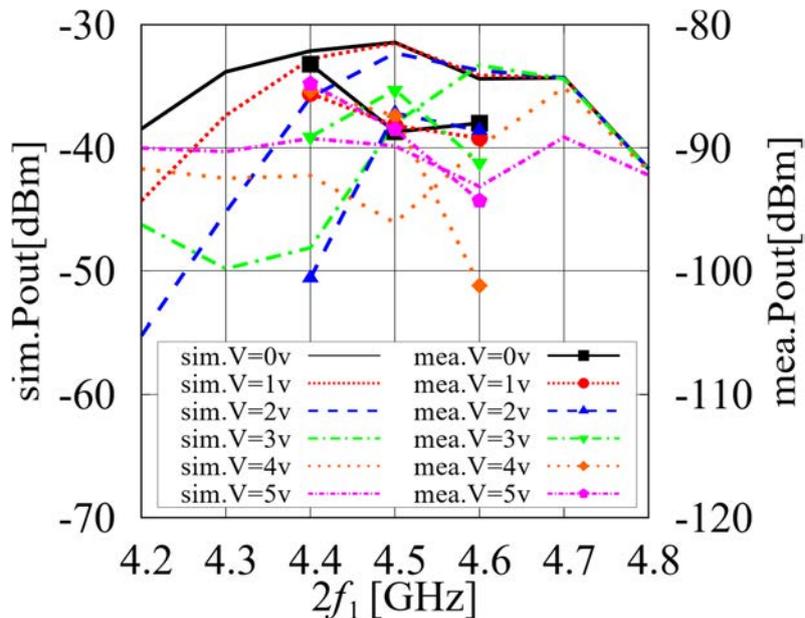


図 3.1.2.2-5 アンテナの周波数特性を含めた SN の応答特性

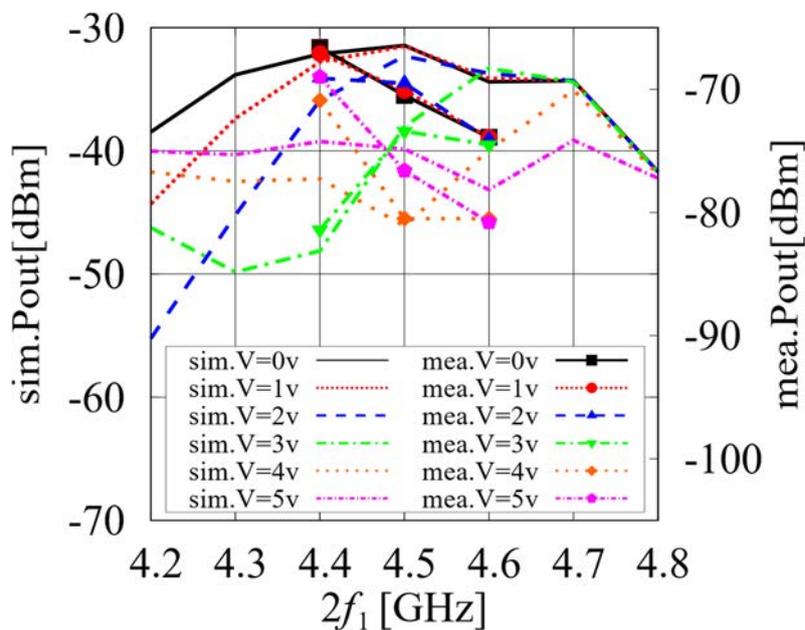


図 3.1.2.2-6 ダウンリンク波の周波数特性を無視した SN の応答特性

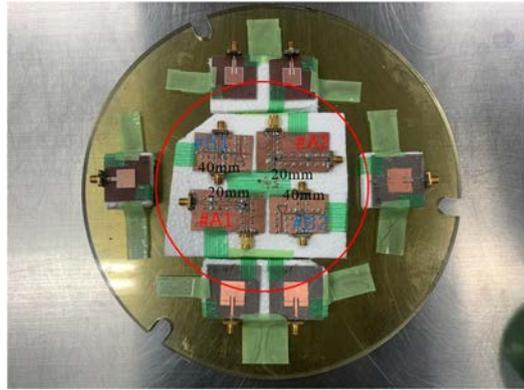


図 3. 1. 3-1 アクリル台上に設置された評価サンプル

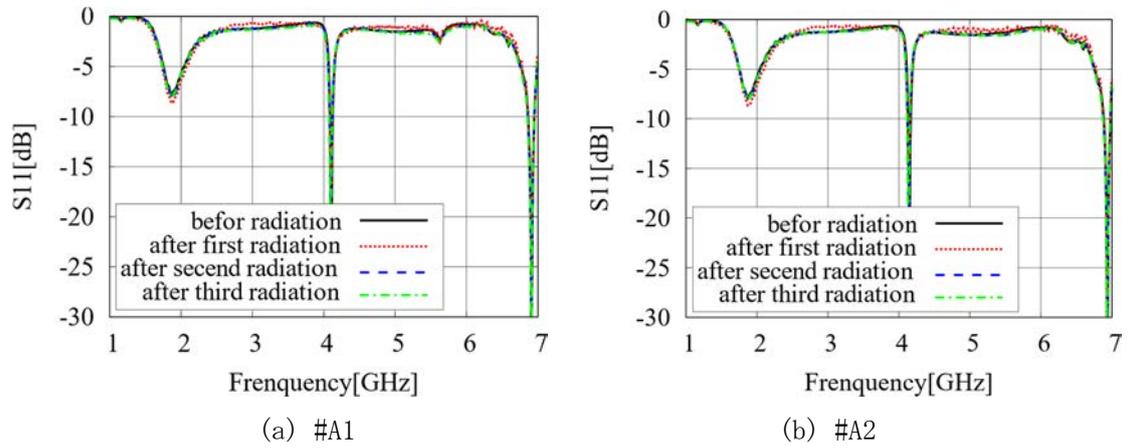


図 3. 1. 3-2 放射線照射前後の周波数変換回路の反射特性 (P1)

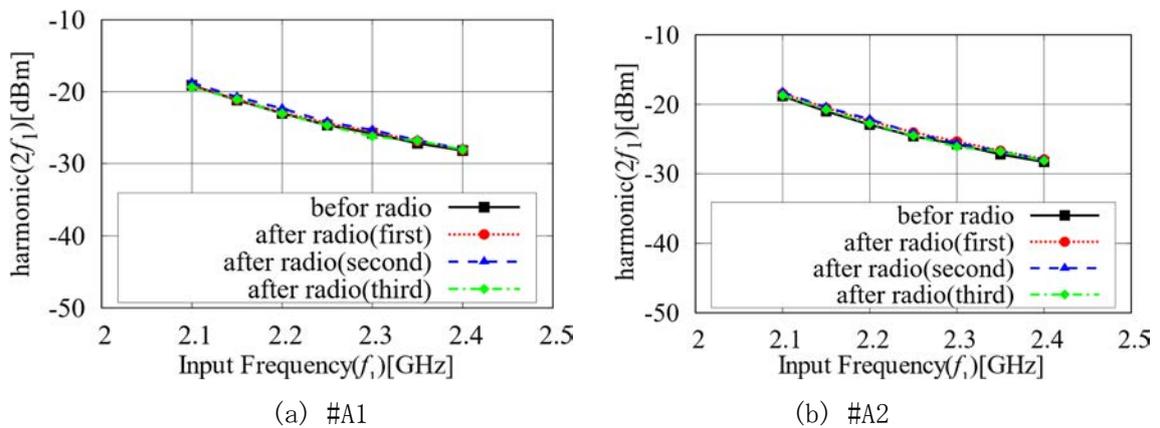


図 3. 1. 3-3 放射線照射前後の周波数変換特性 ( $P_{I1} = 0$  dBm)

表 3.1.2.3-1 放射線照射と周波数変換回路の直流出力 (端子 P2)

周波数 [GHz]	P <sub>in</sub> [dBm]		
	0	-10	-20
2.10	0.93	0.38	0.26
2.25	0.79	0.34	0.24
2.40	0.46	0.34	0.27

周波数 [GHz]	P <sub>in</sub> [dBm]		
	0	-10	-20
2.10	0.94	0.38	0.27
2.25	0.75	0.33	0.23
2.40	0.45	0.28	0.22

(c) 放射線未照射

周波数 [GHz]	P <sub>in</sub> [dBm]		
	0	-10	-20
2.10	0.87	0.37	0.26
2.25	0.84	0.36	0.25
2.40	0.49	0.34	0.28

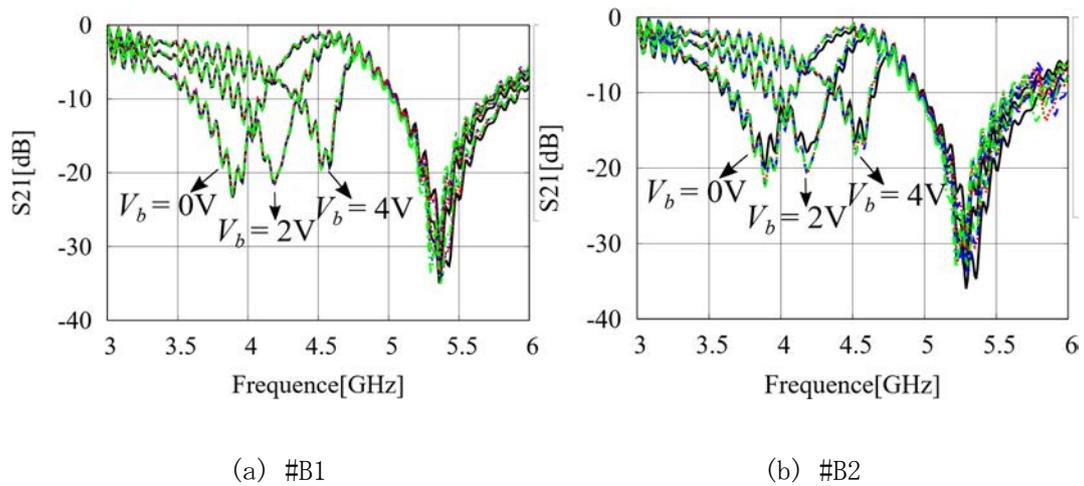


図 3.1.3-4 放射線照射前後の周波数可変フィルタの伝送特性

### 3.2 センサ位置特定アルゴリズムに関する研究

#### 3.2.1 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および座標化するための多重波電波トモグラフィ法を、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。

##### 3.2.1.1 多重波 RTI 法を用いた測定法の開発

多重波 RTI 法では、各伝搬経路における RSS (Received Signal Strength: 受信信号強度) 値  $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^N$  は伝搬経路上のボクセル値の線形和として以下のように表される。

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (3.2.1 - 1)$$

ここで  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^M$  は測位対象領域におけるボクセル値、 $\mathbf{n} \in \mathbb{R}^N$  は平均が 0 の白色ガウス雑音過程である。時刻  $t$  において遮蔽により電力減衰が発生した際の RSS 変化は、

$$\Delta\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}\Delta\mathbf{x}(t) + \Delta\mathbf{n}(t) \quad (3.2.1 - 2)$$

ここで  $\Delta\mathbf{y}(t) = \mathbf{y}(t) - \mathbf{y}_0$ 、 $\Delta\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_0$ 、 $\Delta\mathbf{n}(t) = \mathbf{n}(t) - \mathbf{n}_0$  である。また、 $\mathbf{y}_0$ 、 $\mathbf{x}_0$ 、 $\mathbf{n}_0$  は、ベースライン測定（初期値）の各値である。 $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{N \times M}$  は、図 3.2.1-1(a) に示すように、直接波経路に沿ったボクセルに重みづけを行うための行列であり、以下の式で定義される。

$$[\mathbf{W}]_{ij} = w_{ij} = \begin{cases} 1/\sqrt{d_l}, & d_{l,s}^m + d_{l,d}^m < d_l + \gamma \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3.2.1 - 3)$$

ここで、 $d_l$  は  $l$  番目のリンクのノード間距離、 $d_{l,s}^m$  と  $d_{l,d}^m$  は  $m$  番目のボクセルと送信側ノード、受信側ノードとのそれぞれの距離を示す。また、 $\gamma$  は重みづけを行う幅に作用するパラメータである。

多重波 RTI 法においては、直接波に加え、2 回反射までの反射波を分離して利用する。具体的には、反射波が測位対象領域外の仮想センサノードによって生成されているものとみなし、重みづけ行列にこれを考慮した条件を追加する。図 3.2.1-1(b) は、1 回反射波の伝搬経路に対するボクセルの重みづけ判定の様子である。

$$[\mathbf{W}]_{ij} = w_{ij} = \begin{cases} 1/\sqrt{d_l}, & d_{l,s}^m + d_{l,r}^m < d_{l,1} + \gamma \\ 1/\sqrt{d_l}, & d_{l,r}^m + d_{l,d}^m < d_{l,2} + \gamma \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3.2.1 - 4)$$

ここで、 $d_l$  は  $l$  番目の経路の経路長、 $d_{l,s}^m$ 、 $d_{l,r}^m$ 、 $d_{l,d}^m$  は  $m$  番目のボクセルと送信側ノード、反射点、受信側ノードとのそれぞれの距離を示す。

測定によって得られた RSS の変化からボクセル値を導くために、式(3.2.1-1)を用いて  $\Delta\mathbf{x}$  を求める。しかし、重みづけ行列  $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{N \times M}$  は  $N = M$  でないため、逆行列は存在しない。したがって、この問題において一意の解を求めることができない。このような場合、一般に最小 2 乗法や正則化を用いて推定解を導出する。本研究では、次式の ElasticNet と呼ばれる正則化手法を用いて推定解導出を行った。

$$\Delta \hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} \left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{W}\mathbf{x} - \Delta \mathbf{y}\|_2^2 + \lambda P_{\alpha}(\mathbf{x}) \right\} \quad (3.2.1-5)$$

ここで、ペナルティ項は次式のように表される。

$$P_{\alpha}(\mathbf{x}) = \frac{(1-\alpha)}{2} \|\mathbf{x}\|_2^2 + \alpha \|\mathbf{x}\|_1 \quad (3.2.1-6)$$

式(3.2.1-4)における  $\lambda$  は正則化の強度を決定するパラメータ、式(3.2.1-5)における  $\alpha$  は  $L_2$  ノルムと  $L_1$  ノルムの相対的な寄与度を決定するパラメータである。

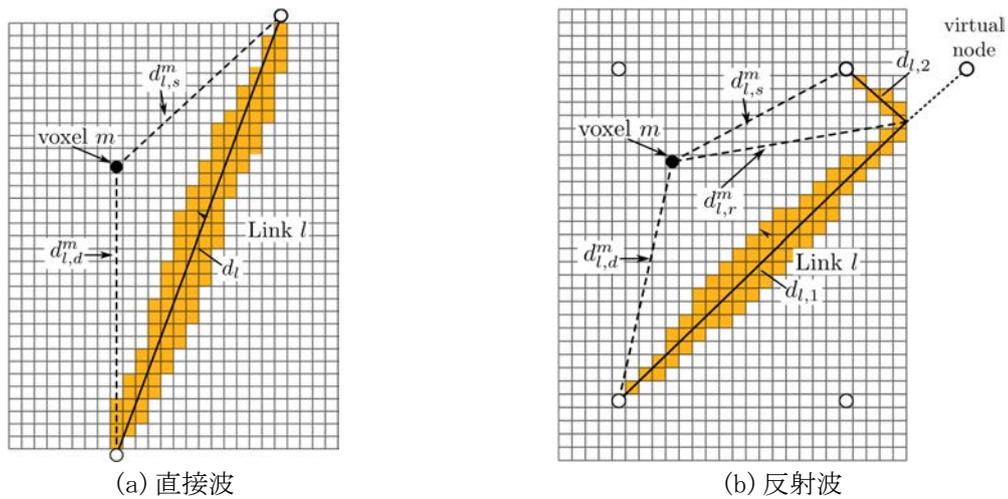


図 3.2.1-1 重みづけ行列の決定

### 3.2.1.2 計算機シミュレーション

多重波 RTI 法の計算機シミュレーションを実施した。シミュレーションには電波を光線に見立てて直接波や正規反射・回折のパスで近似する手法であるレイトレーシング

(Raytracing: RT) 法を用いた。図 3.2.1-2 にシミュレーション環境の間取り図および BS (センサノード)・ターゲット位置を示す。青の四角印で表された点が BS の設置位置、赤の丸印で示された点がターゲットの位置である。また、表 3.2.1-1 に BS の座標、表 3.2.1-2 にターゲットの座標を示す。ここで、ターゲットは人体に模擬した半径 0.3 m の電波吸収体を用いており、通過する電波を完全に遮断する。さらに、多重波 RTI 法における各種パラメータを表 3.2.1-3 に示す。

図 3.2.1-3 にベースライン (測位領域内にターゲットなし) でのレイトレーシングシミュレーションにより求めた伝搬路を、図 3.2.1-4 に各ターゲット位置での RTI シミュレーション結果を示す。この結果から、Pos. 5 のようにターゲットの位置によって虚像が現れる場合があるものの RTI イメージからターゲットの位置が同定できることがわかる。

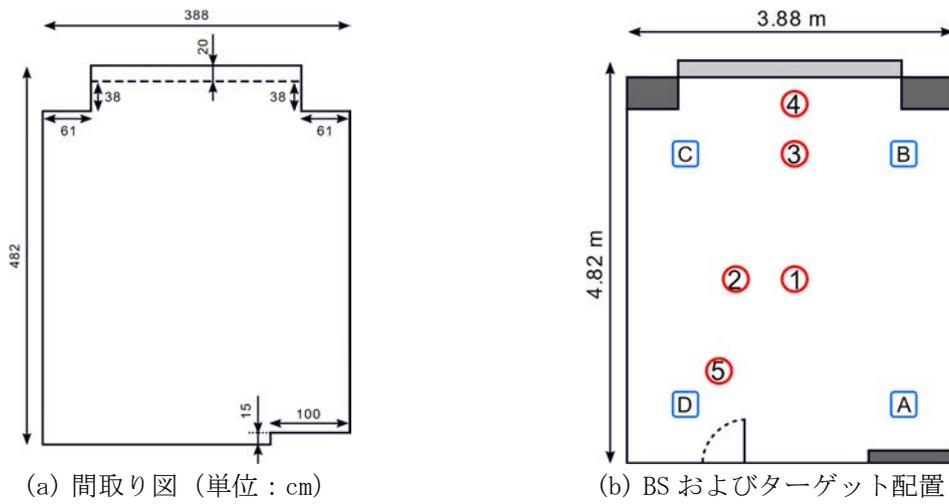


図 3.2.1-2 シミュレーション環境

表 3.2.1-1 BS (センサノード) 座標

BS	座標 (m)
A	(3.3, 0.7)
B	(3.3, 3.7)
C	(0.7, 3.7)
D	(0.7, 0.7)

表 3.2.1-2 ターゲット座標

ターゲット	座標 (m)
Pos. 1	(2.0, 2.2)
Pos. 2	(1.3, 2.2)
Pos. 3	(2.0, 3.7)
Pos. 4	(2.0, 4.3)
Pos. 5	(1.1, 1.1)

表 3.2.1-3 シミュレーション諸元

パラメータ	値
ボクセルサイズ	0.1 m
楕円パラメータ $\gamma$	0.1 m
正則化パラメータ $\lambda$	5 分割交差検証により決定
正則化パラメータ $\alpha$	0.8

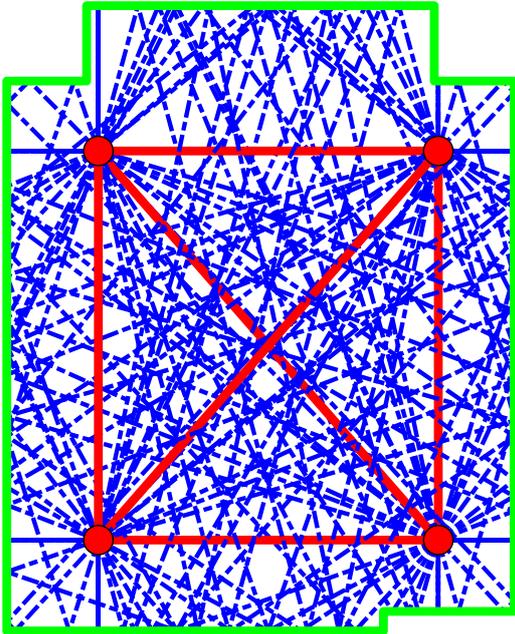


図 3.2.1-3 伝搬路 (ベースライン)

	Ray Paths	Simulation Result
Pos.1		
Pos.2		
Pos.3		
Pos.4		
Pos.5		

図 3.2.1-4 RTI シミュレーション結果

### 3.2.1.3 座標推定法

測定誤差の定式化のために、3.2.1.2の手法で求められるボクセル値から、ターゲットの数および座標を推定する手法の確立およびシミュレーションによる実験を行った。

図 3.2.1-5 (a) に示すように、多重波 RTI により得られた画像 (ボクセル値) は連続値であり、相対的に小さな値を持つボクセルはノイズとみなされる。これらを位置推定に盛り込むと誤差が大きくなるため除外し、位置推定を容易にするために 2 値化を行う。具体的には、得られたボクセル値を 0~1 の範囲でスケールした RTI イメージを、大津の 2 値化法により図 3.2.1-5 (b) のようにバイナリイメージへと変換する。このバイナリイメージにおいて、値が 1 となるボクセルの中心座標をデータ点として、Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) により 2 次元平面でのクラスタリングを行う。クラスタリングの様子を、図 3.2.1-5 (c) に示す。DBSCAN 法におけるハイパーパラメータは  $\epsilon$ 、 $\text{minPts}$  である。距離が  $\epsilon$  以下の 2 つのデータ点は同じクラスターに所属し、所属するデータ点が  $\text{minPts}$  以下である場合は、それらのデータ点はノイズとして扱われる。このため、正確にターゲット数・位置を推定するためには、 $\epsilon$  と  $\text{minPts}$  を適切に設定する必要がある。これらの適切な値は、ボクセルサイズやターゲットの大きさ、測定対象領域の大きさやノード数、正規化パラメータなどに依存する。

RT シミュレーションをもとに多重波 RTI およびターゲット数・位置推定を行い、その性能を確認した。シミュレーションは縦横比が等しくサイズの異なる 3 種類の部屋モデルを対象として行った。各部屋モデルの寸法を、表 3.2.1-4 に示す。また、BS 座標は各部屋に合わせて 4 点・6 点・8 点の 3 種類を定義した。図 3.2.1-6 に示すように半径 0.3 m の電波吸収体をターゲットとして A~C の移動物体を定義した。各移動物体

はそれぞれ対象領域内において Pos. 1~Pos. 16 の計 16 点を移動する。これらの移動物体を全ての部屋モデルに定義し、各測定点において位置推定を行い、その誤差を測定した。また、ターゲット数が 2 点同時に存在する場合として移動物体 A と B、A と C、B と C を、3 点同時に存在する場合として全ての移動物体を組み合わせで位置推定を行い、その誤差を測定した。各点における測位誤差は以下の式で示される。

$$\text{Error}(\tilde{\mathbf{P}}, \hat{\mathbf{P}}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \min_{\hat{\mathbf{p}}} \|\tilde{\mathbf{p}}_i - \hat{\mathbf{p}}\|_2 \quad (3.2.1 - 7)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{P}} = \tilde{\mathbf{p}}_1, \tilde{\mathbf{p}}_2, \dots, \tilde{\mathbf{p}}_n$  は実際のターゲット座標、 $\hat{\mathbf{P}} = \hat{\mathbf{p}}_1, \hat{\mathbf{p}}_2, \dots, \hat{\mathbf{p}}_m$  は推定ターゲット座標である。また、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は、推定失敗としてカウントし、測位誤差は求めていない。

各部屋モデルを対象に、式 (3.2.1-5) における  $\alpha$  を 0.7~0.9、DBSCAN における  $\epsilon$  を 0.3~0.5 m、minPts を 3~5 の範囲で変化させ、それぞれの組み合わせにおいて、測位誤差を求めた。また、それらを BS 数 4・6・8 点の場合について比較した。図 3.2.1-7~9 に、部屋モデル Medium・ターゲット数 3 において推定失敗率が最も低いパラメータ設定での各部屋モデルにおける推定失敗率と測位誤差の平均を示す。なお、推定失敗率が最も低いパラメータ設定が複数存在する場合には、その中で測位誤差の平均が最も低いパラメータ設定を選択した。ここで、推定失敗率は対象となる全ての測定点数に対して推定失敗としてカウントされた測定点数の割合である。これらの図を見ると、ターゲット数が増えると推定失敗率が有意に増加することが確認できる。特に、部屋のサイズが小さい場合に顕著である。これは、部屋サイズが小さい場合にはターゲット同士が近く、複数のターゲットをまとめてひとつのターゲットとしてクラスタリングを行っているためである。

続いて、ターゲットと BS との位置関係や部屋形状に対する測位誤差の関係を確認するために、ターゲットを 0.5 m 間隔で対象領域内にグリッド状に配置し、各点における測位誤差を求めた。なお、BS とターゲットが重なる点は除外した。対象となる部屋モデルは表 3.2.1-4 の 3 種類とし、それぞれにおいて BS を 4、6、8 点配置した。また、各パラメータは  $\alpha = 0.8$ 、 $\epsilon = 0.5$  m、minPts = 3 とした。図 3.2.1-10~図 3.2.1-12 に、各 BS 数におけるターゲット位置に対する測位誤差を示す。なお、図中の×印は推定失敗となった点である。図より、ノード数の増加に伴い、測位精度が向上することを確認できる。特に、BS を 4 点から 6 点に増やした際に、部屋の左右において測位誤差の減少が顕著に現れている。これは、BS がノード間の伝搬経路が疎であった点にノードが配置されたためであり、効果的に精度の向上を図ることができたといえる。このため、より複雑な形状の部屋においては伝搬経路の疎密を考慮して、より有効的なノード配置を行う必要がある。



図 3.2.1-5 座標推定法

表 3.2.1-4 部屋モデルの寸法

名称	幅 (x) [m]	奥行 (y) [m]
Small	3.0	4.0
Medium	4.5	6.0
Large	6.0	8.0

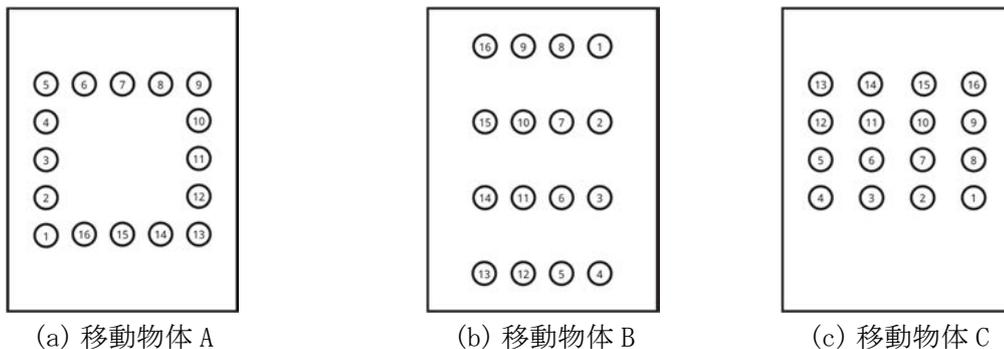


図 3.2.1-6 移動物体位置

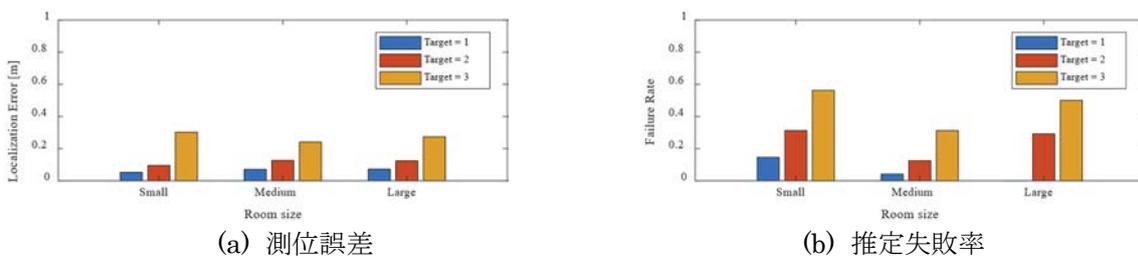


図 3.2.1-7 座標推定結果：ノード数 4 ( $\alpha = 0.9, \epsilon = 0.3, \text{minPts} = 4$ )

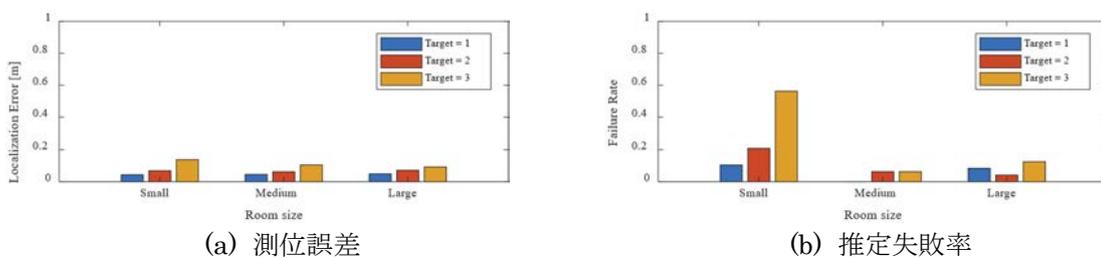


図 3.2.1-8 座標推定結果：ノード数 6 ( $\alpha = 0.8, \epsilon = 0.3, \text{minPts} = 5$ )

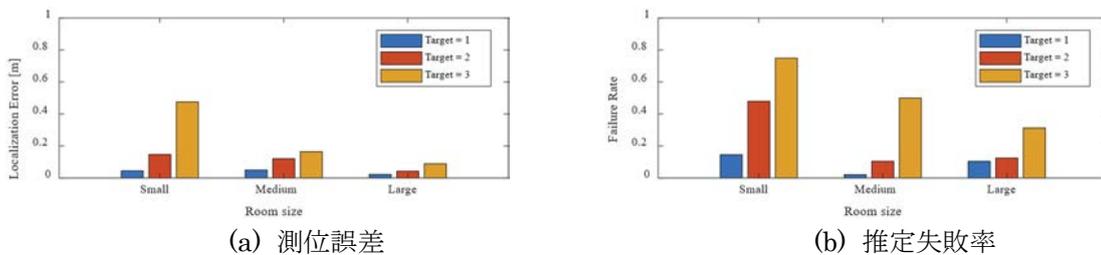


図 3.2.1-9 座標推定結果：ノード数 8 ( $\alpha = 0.7, \epsilon = 0.3, \text{minPts} = 5$ )

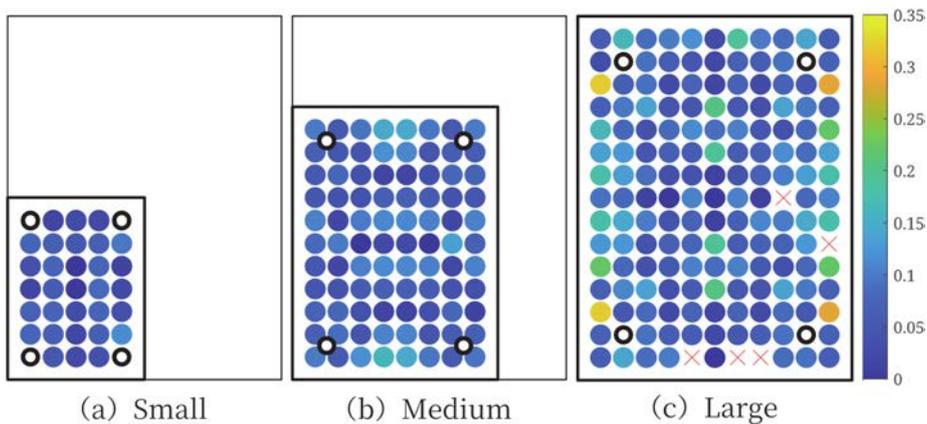


図 3.2.1-10 遮蔽物位置に対する測位誤差 (ノード数 : 4)

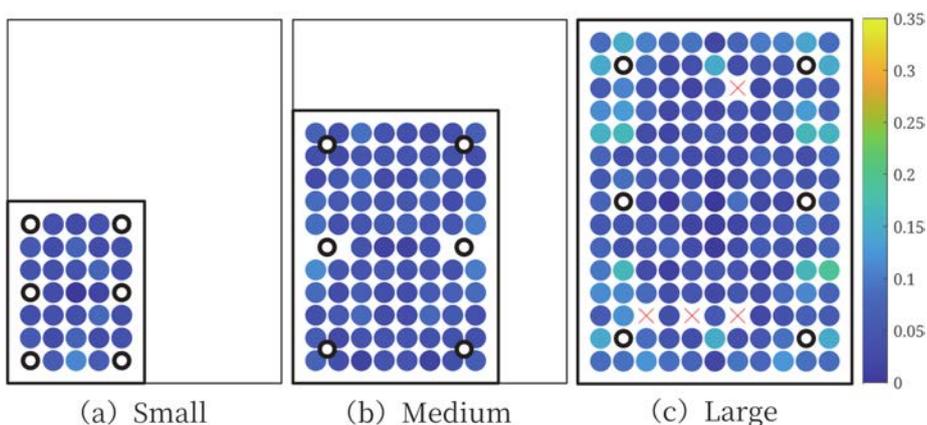


図 3.2.1-11 遮蔽物位置に対する測位誤差 (ノード数 : 6)

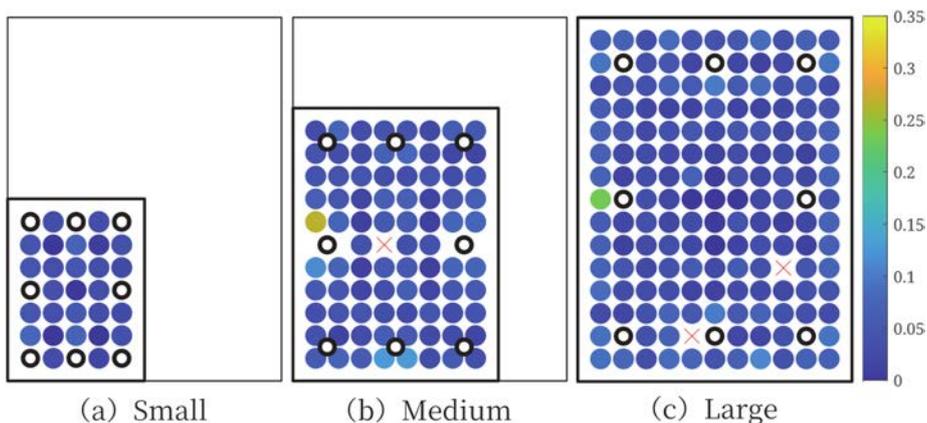


図 3.2.1-12 遮蔽物位置に対する測位誤差 (ノード数 : 8)

#### 3.2.1.4 実験による動作確認

既存の双角度チャンネルサウンダを用いて動作確認を行った。使用したチャンネルサウンダは、ベースバンド回路と市販のフェーズドアレイアンテナ (EVK06002、SiversIMA) で構成されている。送受信機では、パッチ素子 16 本を半波長間隔に並べた線形アレイアンテナ (ULA) を使用して、水平面の鋭いビームを形成する。送信電力は等価等方性放射電力 (EIRP) に換算して約 31 dBm で、ビームフォーミングの利得 12 dB とアンテナ利得 7 dBi を含めた総合指向性利得は 19 dBi となる。送信機の局部発振器 (LO) は 58.32 GHz (WiGigCH1) のキャリ

ア信号を生成する。各ビームの HPBW は、方位角で送受信ともに約 6°、仰角では受信側で 18°、送信側で 45° となっている。今回の測定では、方位角に対する双方向の角度遅延チャンネル応答である  $\phi_T$  と  $\phi_R$  が得られた。また、送信側、受信側においてそれぞれ 180° 走査、全方位角走査を実現するために、2×4 の MIMO 測定構成 (1 アレーアンテナ当たり 90 度範囲でビーム走査可能) を採用した。Tx では、前後に向けて 2 セットの 180° の方位角走査を行うことで、全方位角チャンネルの取得を実現した。また、半径 0.3 m の円柱状の発泡スチロールに電波吸収帯を巻き付けたものを人体モデルとし、測位の対象とした。

測位実験は 3.2.1.2 の計算機シミュレーションと同様に、図 3.2.1-2 の物のおかれていない部屋でミリ波の双方向チャンネル測定を行った。A、B、C、D の位置にチャンネルサウンダ、1～5 の位置に人体モデルを配置した。測定においては 1 組のチャンネルサウンダの送信機 (Tx) と受信機 (Rx) を使って 6 つのリンクのチャンネルを 1 つずつ測定した。また、マルチリンクの測定は、人体モデルがない場合 (Pos0) や、人体モデルがいる場合 (Pos1～Pos5) など 6 つのケースに分けて測定した。アンテナの高さは、送信側と受信側で 1.5 m とした帯域制限されたチャンネルインパルス応答 (CIR) は、測定されたチャンネル伝達関数 (CTF)  $H_{k,n_T,n_R}$  を離散逆フーリエ変換することにより、次のように得られる。

$$h_{n,n_T,n_R} = \mathcal{F}^{-1}\{H_{k,n_T,n_R}\} \tag{3.2.1-8}$$

ここで、 $n$  は遅延軸のインデックスを、 $n_T$  と  $n_R$  は角度方向のインデックスをそれぞれ表している。また、 $\mathcal{F}^{-1}$  は逆フーリエ変換を表す。遅延軸のインデックスは、 $\Delta\tau = 1/\Delta f$  として、 $\{n\Delta\tau \mid n = 0, \dots, N - 1\}$  で表される。ここで、 $N = 1024$ 、 $\Delta f = 400\text{MHz}$  である。角度方向のインデックスは  $\{n_T\Delta n_T \mid n_T = 0, \dots, N_T - 1\}$ 、 $\{n_R\Delta n_R \mid n_R = 0, \dots, N_R - 1\}$  のように表す。ここで、 $\Delta n_T$  と  $\Delta n_R$  は、それぞれ送信側と受信側のビームの間隔を表すがビームステアリングにおいては凡そ 6 度 (不等間隔) である。双方向角度時間パワースペクトル (DDADPS : Double-Directional Angular Delay Power Spectrum) は次のようにして得られる。次に、Sub-grid CLEAN アルゴリズムを適用し、角度分解能が 0.1°、遅延時間分解能が 0.01 ns で MPC を抽出した。この実験では、時空間分解能の高いミリ波を用いているため抽出した MPC パラメータと事前に行った計算機シミュレーションの結果を比較し、紐づけを行うことで伝搬経路情報を取得した。

図 3.2.1-13 は本実験により得られた伝搬路・受信電力変化をもとに多重波 RTI を実行した結果である。ここで、正規化パラメータ  $\lambda$  はシミュレーションと同様に  $K$  分割交差検証法 ( $K = 5$ ) で自動決定し、そのほかのパラメータは  $\alpha = 0.5$ 、 $\epsilon = 0.5$ 、 $\text{minPts} = 5$  とした。赤い○印は実際の人体モデルの位置、黄色の×印が推定位置である。表 3.2.1-5 に測位誤差 (実際の人体モデルの中心位置と推定位置の距離) を示す。遮蔽する伝搬路が少ない Pos4 では測位精度が悪化したが、その他の位置では 0.3 m 以内の測位精度を実現した。

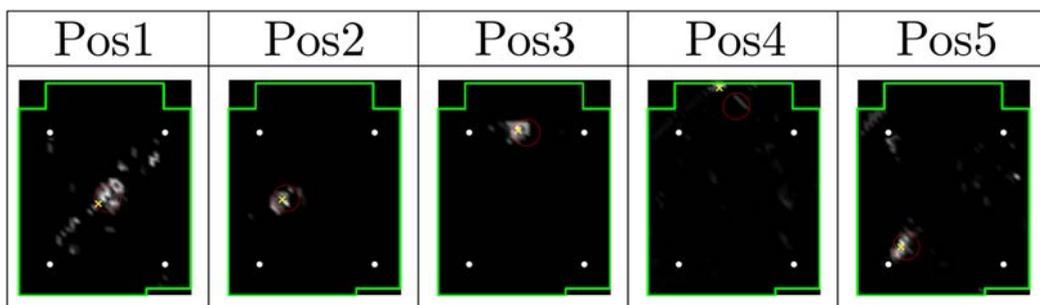


図 3.2.1-13 多重波 RTI 実行結果 (ミリ波実験)

表 3. 2. 1-5 人体モデル位置ごとの測位誤差

Pos.	測位誤差 (m)
Pos1	0. 24
Pos2	0. 09
Pos3	0. 20
Pos4	0. 57
Pos5	0. 12

### 3. 2. 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、現有のチャンネルサウンダ (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、高精度パシッブ測位法のために次の信号処理手法を開発した。8×8 MIMO チャンネル測定により多重波伝搬路を抽出する方法を構築し、多重波推定法を適用する方法などを検討した。また、角度・遅延時間特性の類似した MPC 同士をグループ化するクラスタリング手法を開発し、その適用方法を検討した。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検討した。

#### 3. 2. 2. 1 測定系の構築

8×8 MIMO 無線回路として、Ettus Research 社の SDR である USRP X310 シリーズ互換の National Instruments 社製 USRP2942R (既存設備) および USRP2954 (新規調達) を用いて、測定系の開発を行った。アンテナには 8 素子線形アレイアンテナを用い、RF スイッチを介して SDR と接続することで 1 素子ずつ送受信を行う。RF スイッチの制御には SDR に搭載されている汎用入出力 (GPIO : General-purpose input/output) ポートを利用し、内部 FPGA (Field Programmable Gate Array) による制御を検討している。図 3. 2. 2-1 に構築した MIMO 測定系を示す。

正確な伝搬路測定を行うためには、SDR 内部のローパスフィルタ、電力増幅器、減衰器等のハードウェア特性を除去することが重要になる。これらの特性は Back-to-Back 校正によって除去することが可能である。Back-to-Back 校正は、送信ポートと受信ポートをケーブルと減衰器を介して直接繋ぐことにより行う。図 3. 2. 2-2 に校正前のハードウェアの伝搬路特性を、図 3. 2. 2-3 に校正後のハードウェアの伝搬路特性を示す。減衰と遅延が Back-to-Back 校正により取り除かれていることが確認できる。

続いて、構築した伝搬路測定装置の動作を検証するために、DUT (Device Under Test) 測定を実施した。ここで、マルチパス環境をシミュレーションするために、送信ポートと受信ポートの間に非整合の T-ジャンクションを介して接続することで反射波を発生させている。また、比較のために、終端抵抗を接続しインパルス応答の比較を行った。シミュレーション諸元と伝搬路測定諸元をそれぞれ表 3. 2. 2-1、表 3. 2. 2-2 に、構成を図 3. 2. 2-4 に示す。また、結果を図 3. 2. 2-5 に示す。仕様により、ケーブルの波長短縮率は 77%、搬送波周波数 3 GHz における挿入損失は測定により 1 m あたり -0. 4547 dB であることがわかっている。したがって、ケーブル内の減衰量 [dB] と信号遅延量 [ns] は光速  $v_c$ 、ケーブル内伝搬速度  $v_{cab}$  を用いて、次式により計算できる。

$$\text{ケーブル減衰量 [dB]} = 15 \cdot 2 \cdot -0.4547 = -13.6 \quad (3.2.2 - 1)$$

$$v_{\text{cab}} = v_c \cdot 0.77 = 2.3084 \cdot 10^8 \quad (3.2.2 - 2)$$

$$\text{遅延量 [ns]} = \frac{15 \cdot 2}{v_{\text{cab}} \cdot 10^{-9}} = 129.9 \quad (3.2.2 - 3)$$

上式は第 1 反射波のものであり、第  $N$  反射波の減衰と信号遅延はそれの  $N$  倍で求められる。図 3.2.2-5 より、ケーブル端を開放したとき、直接波、第 1 反射波、第 2 反射波の 3 パスが確認できた。反射波は理論値では 129 ns、248 ns に到来するが、図 3.2.2-5 からは 130 ns、260 ns に到来していることを確認した。ケーブル端に終端抵抗を接続すると、反射波が抵抗により吸収され、マルチパス成分が観測できなくなる。終端の有無による差異が、130 ns、260 ns の箇所において、顕著に観測された。これは終端により減衰が抑えられたことによるものだと考えられる。計算値と測定値の誤差としては、構成したチャネルサウンダの遅延分解能が 10 ns であり、それより小さい遅延を観測することができないためであると考えられる。

SDR を用いた伝搬路測定系構築のために、到来方向推定実験を実施した。SDR は USRP 2954R のみを使用し、送信側に無指向性アンテナ、受信側に 8 素子線形アレイアンテナを用いて GPIO はソフトウェア経由で制御した。また、SDR の制御には Ettus 社によって提供されている UHD Python API を用いた。図 3.2.2-6 に測定環境を示す。アンテナの取り付け高さは送受信ともに 1.6 m、到来角は約  $18^\circ$  である。図 3.2.2-7 に到来角  $18^\circ$  におけるビーム形成結果を示す。実験の結果、到来角  $18^\circ$  付近で最も強い出力のピークが確認できた。一方で、 $40^\circ$  付近でもピークが存在しており、サイドローブの影響が考えられる。今後、伝搬チャネル測定プログラムの実装および RF スイッチ制御のための FPGA 開発を行う予定である。

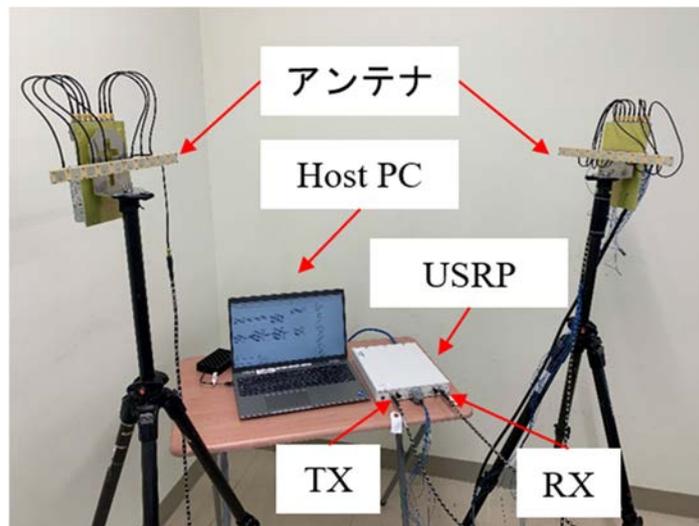


図 3.2.2-1 MIMO 測定系

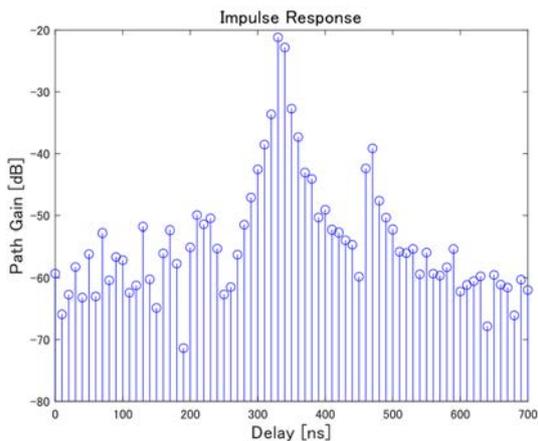


図 3. 2. 2-2 伝搬路特性 (校正前)

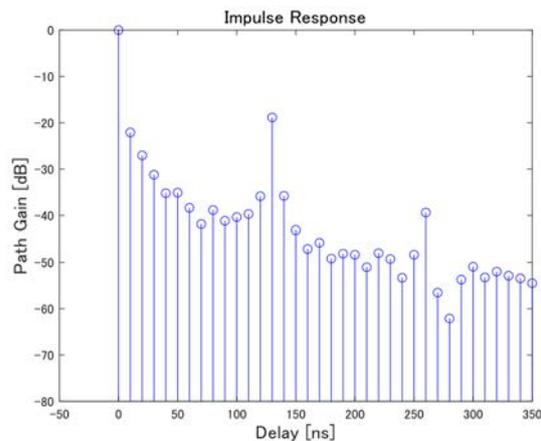


図 3. 2. 2-3 伝搬路特性 (校正後)

表 3. 2. 2-1 DUT 測定シミュレーション諸元

パラメータ	値
ADC サンプル周波数	200 MS/s
搬送波周波数	3 GHz
帯域幅	100 MHz
副搬送波数	256
副搬送波間隔	390.625 kHz
FFT 点数	256
遅延分解能	10 ns
送信信号	マルチトーン信号

表 3. 2. 2-2 伝搬路測定諸元

パラメータ	値
ADC サンプル周波数	200 MS/s
搬送波周波数	3 GHz
帯域幅	100 MHz
副搬送波数	256
副搬送波間隔	390.625 kHz
FFT 点数	256
遅延分解能	10 ns

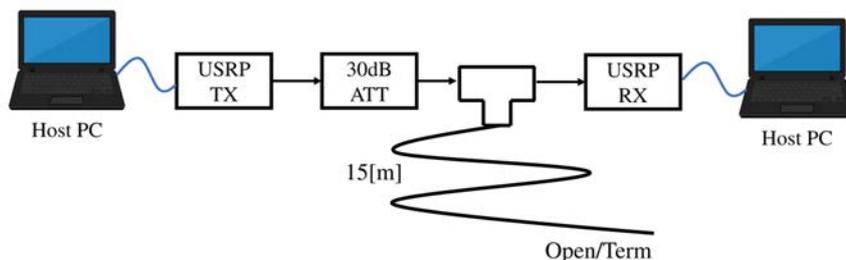


図 3. 2. 2-4 DUT 測定の構成図

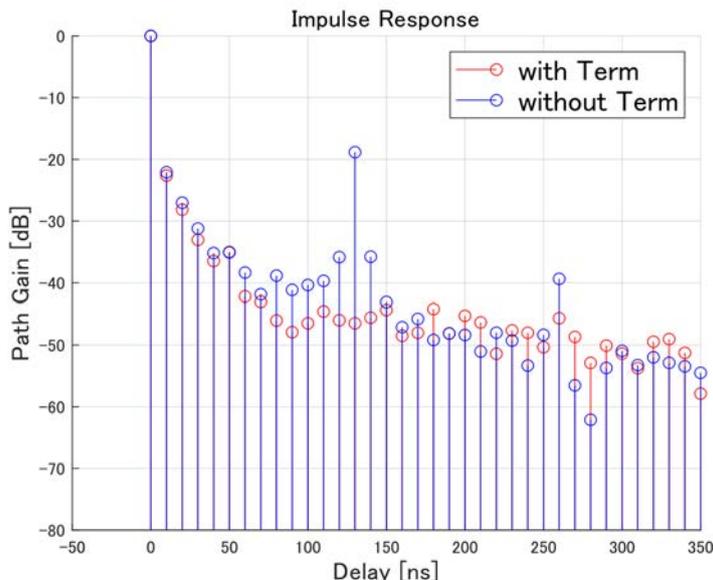


図 3. 2. 2-5 DUT 測定結果

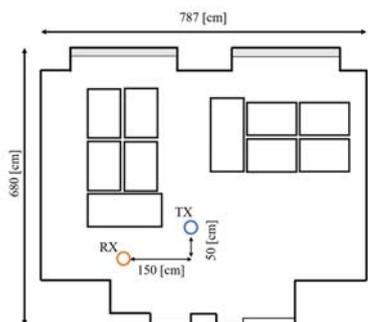


図 3. 2. 2-6 到来方向推定測定環境

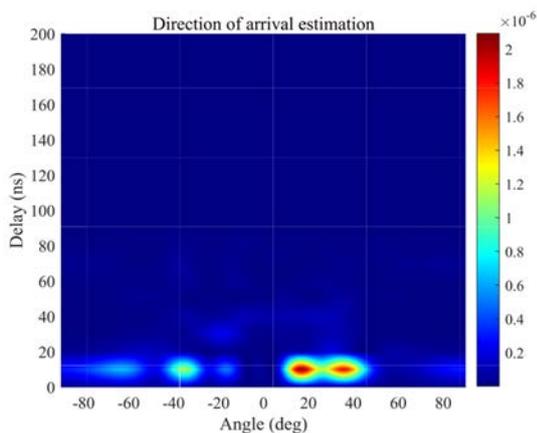


図 3. 2. 2-7 到来方向推定結果

3. 2. 2. 2 多重波伝搬路抽出・経路同定手法の構築

伝搬路ごとの受信電力変化の取得は、複数の素子を持つアレイアンテナを各 BS に対して用い、各リンク（1 対の送受信 BS 間）における伝搬路をビームフォーミングにより捉えることで実現する。具体的には、事前に測定環境の部屋モデルを用いたレイトレーシングシミュレーションにより各リンク間の伝搬経路の推定を行う。その後、シミュレーション結果をもとに各リンクにおける伝搬経路に合わせて送受信角を設定し、測定により MIMO チャネル行列  $\mathbf{h}$  を得る。これを用いて、各リンクにおける RSS 変化ベクトルが導出できる。

$$\Delta \mathbf{y}(\phi_{\text{Tx}}, \phi_{\text{Rx}}, \tau) = \mathbf{w}^H(\phi_{\text{Tx}}, \phi_{\text{Rx}}, \tau) \Delta \mathbf{h} \tag{3.2.2-4}$$

ここで、 $\Delta \mathbf{h}$  は対象領域内にターゲットが存在しない状態（ベースライン）での MIMO チャネル行列  $\mathbf{h}(0)$  とターゲットが存在する時刻  $t$  での MIMO チャネル行列  $\mathbf{h}(t)$  の差分である。また、 $\mathbf{w}(\phi_{\text{Tx}}, \phi_{\text{Rx}}, \tau)$  は後述する送受信角・遅延時間を反映したステアリングベクトルである。

素子数  $K$ 、素子間隔  $d$  の線形アレイアンテナにおいて、電波がブロードサイド方向から角度  $\phi_{\text{Rx}}$ ・遅延時間  $\tau$  で到来し、同様に送信アンカーノードから角度  $\phi_{\text{Tx}}$  で電波が放射されてい

る場合を考える。受信信号を $\mathbf{\Gamma}$ とすれば、リンクごとの MIMO チャネル行列は以下の式で表される。

$$\mathbf{h} = \mathbf{A}(\mathbf{\Omega})\mathbf{\Gamma} \in \mathbb{C}^{K^2N \times 1} \quad (3.2.2 - 5)$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{\Omega}) = [\mathbf{a}(\Omega_1), \dots, \mathbf{a}(\Omega_L)] \in \mathbb{C}^{K^2N \times L} \quad (3.2.3 - 6)$$

$$\mathbf{\Gamma} = [\Gamma_1, \dots, \Gamma_L] \in \mathbb{C}^{L \times 1} \quad (3.2.2 - 7)$$

$$\mathbf{\Omega} = [\Omega_1, \dots, \Omega_L] \in \mathbb{C}^{L \times 1} \quad (3.2.2 - 8)$$

$$\Omega_l = [\phi_{Tx,l}, \phi_{Rx,l}, \tau_l] \quad (3.2.2 - 9)$$

$$\mathbf{a}(\Omega_l) = \mathbf{a}_T(\phi_{Tx,l}) \otimes \mathbf{a}_R(\phi_{Rx,l}) \otimes \mathbf{a}_\tau(\tau_l) \quad (3.2.2 - 10)$$

ここで、 $N$ は遅延時間ビーム数、 $L$ は伝搬経路数である。 $\otimes$ は Kronecker 積演算子である。また、送受信および遅延時間ステアリングベクトルは次式で表される。

$$\mathbf{w}(\phi_{Tx}, \phi_{Rx}, \tau) = \mathbf{a}(\phi_{Tx}, \phi_{Rx}, \tau) \quad (3.2.2 - 11)$$

$$\mathbf{a}_R(\phi_{Rx}) = \left[ 1, \exp\left(-j\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \phi_{Rx}\right), \dots, \exp\left(-j\frac{2\pi d}{\lambda} (K-1) \sin \phi_{Rx}\right) \right]^T \quad (3.2.2 - 12)$$

$$\mathbf{a}_T(\phi_{Tx}) = \left[ 1, \exp\left(-j\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \phi_{Tx}\right), \dots, \exp\left(-j\frac{2\pi d}{\lambda} (K-1) \sin \phi_{Tx}\right) \right]^T \quad (3.2.2 - 13)$$

$$\mathbf{a}_\tau(\tau) = [a_\tau(\tau_0 - \tau), \dots, a_\tau(\tau_{N-1} - \tau)]^T \quad (3.2.2 - 14)$$

$$a_\tau(\tau) = \frac{1}{N} \exp(-j\pi\Delta_f\tau) \frac{\sin \pi N \Delta_f \tau}{\sin \pi \Delta_f \tau} \quad (3.2.2 - 15)$$

この手法の有効性を確認するために、計算機シミュレーションを行った。部屋モデルは 3 m × 4 m の障害物のない部屋として、ターゲットは半径 0.3 m の電波吸収体を仮定した。図 3.2.2-8 は真値（レイトレーシングによって得られた各伝搬路ごとの遮蔽損失の値）を用いた場合の結果、図 3.2.2-9 は真値から MIMO チャネル行列を導出し、上述の手法により求めた値を用いた結果である。ここで、線形アレイアンテナにおける素子数 $K$ は 8、素子間隔は半波長とし、図の赤マーカーで記した点に配置した。この結果より、MIMO チャネル行列を用いた場合においても、真値を用いた場合と比較して大きく劣化することなく多重波 RTI を実現することが確認できた。

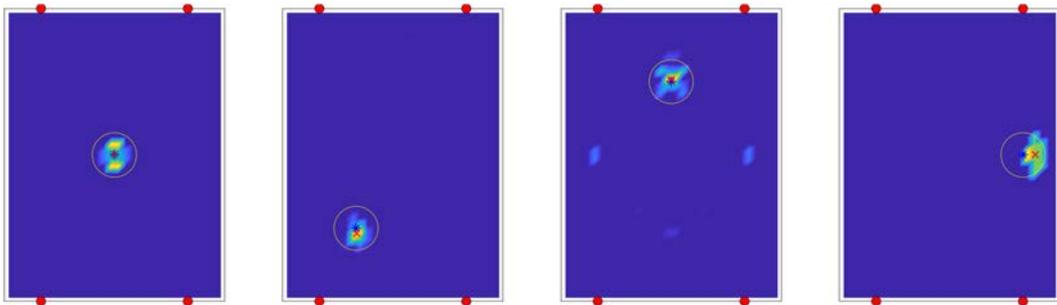


図 3.2.2-8 真値を用いて生成された RTI 画像

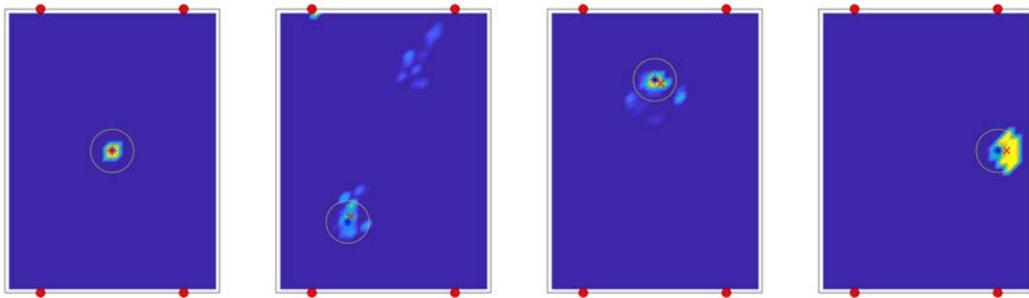


図 3.2.2-9 MIMO チャネル行列を用いて生成された RTI 画像

### 3.2.3 まとめ

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 DBSCAN 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、Optimal Sub Pattern Assignment (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 m）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。

また、100 MHz 程度の広帯域幅が確保できる 4.85 GHz 帯において 8×8 MIMO 送受信システムを構築した。送受信機は対向の構成であるが、RF スイッチにより 8 素子のアンテナ素子を高速に切り替えながら MIMO チャンnel行列を取得するアンテナスイッチング型のフル MIMO 方式となっている。また、MIMO チャンnel行列からトモグラフィー画像を生成する信号処理を実装し、シミュレーションにより本手法の有効性を確認した。また、多重波伝搬経路同定をベースとしたアプローチを検討し、実用性や計算効率を考慮してレイトレーシング法による計算結果を用いた手法が有効であることを確認した。

### 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

#### 3.3.1 アンテナ開発（令和4年度）

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およびアンテナ素子の開発を行う。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 信号発生器、スペクトラムアナライザおよびネットワークアナライザを用いて行う。

#### (1) 令和4年度の実施内容および成果の詳細

##### ① 高線量領域内への電波伝送路の構築

PCV 内のような電波遮蔽領域内のセンサに対して駆動電力を送電し、センサの位置推定を行うためには、遮蔽領域内に設置されたアンテナ素子が放射するための電力を遮蔽領域外から供給でき、かつアンテナ素子の受信電力を遮蔽領域外まで伝送できる電波伝送路が必須である。そこで本研究では、PCV に設けられているペネトレーションやガイドパイプ内に伝送路を構築し、その伝送路を用いて PCV 内外間で電波を伝送させる。

ペネトレーションやガイドパイプは必ずしも直線状ではなく、場合によっては屈曲していることもあるため、伝送路も柔軟に湾曲させられなくてはならない。また、閉鎖領域内に存在するセンサに対して無線電力伝送によって駆動電力を供給しなくてはならないため、ダウンリンクでは大電力伝送にも耐え、かつ放射線に対する高い耐性を持つ必要がある。そこで本研究では、図 3.3.1-1 のように湾曲可能なフレキシブル導波管を遮蔽領域内のアンテナ素子に対する伝送路として用いる。フレキシブル導波管はその電気的特性が一般的な矩形導波管に準拠するため、広帯域、大電力伝送が可能なメリットがある。また、全体が金属で構成されているため、放射線に対しても非常に高い耐性を持つ。

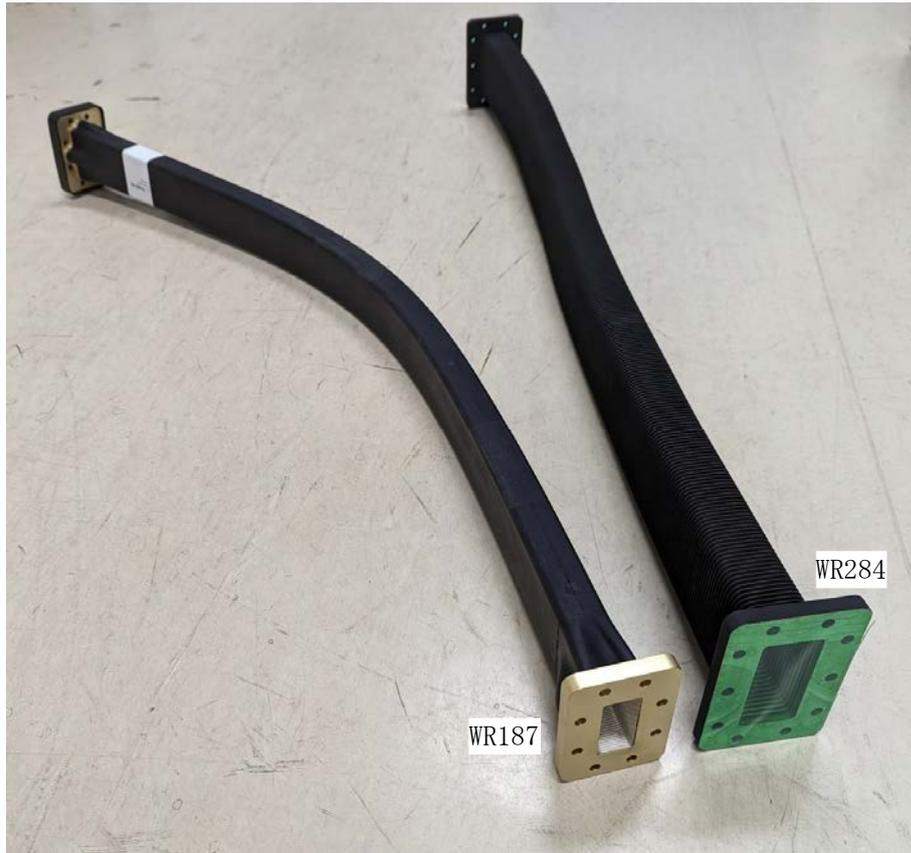


図 3.3.1-1 WR284 および WR187 フレキシブル導波管

本研究では、システムダウンリンクの 2.45 GHz 帯用として Lieder Development 社製の WR284 矩形フレキシブル導波管と、システムアップリンクの 4.9 GHz 帯用として Flexguide 社製の WR187 矩形フレキシブル導波管を調達した。それぞれの導波管内径、および最低遮断周波数を表 3.3.1-1 に示す。表 3.3.1-1 からわかるように、ダウンリンク用の導波管の方が低い周波数を伝送する必要があるため導波管の内径は大きく、通過可能なペネトレーションやガイドパイプの制約に最も影響が大きい。本業務で調達した WR284 のフレキシブル導波管は、動作周波数内の平均定格電力は 10 キロワットであり、電界面内で 1 m 未満の曲率半径で屈曲させることができる。

表 3.3.1-1 フレキシブル導波管の内径と最低遮断周波数

導波管 EIA 規格	開口内径 [mm × mm]	最低遮断周波数 [GHz]
WR284	72.14 × 34.04	2.08
WR187	47.55 × 22.15	3.15

## ② 高線量領域内アンテナ素子の設計と評価

フレキシブル導波管によって基地局から伝送された電力を、電波遮蔽領域内に設置されたセンサに対して効率よく放射し、さらにセンサからの受信信号を遮蔽領域外の基地局に効率よく伝送するためには、遮蔽領域内のフレキシブル導波管の先端にアンテナ素子を接続し、伝送電力と遮蔽領域内の電波を効率的に変換する必要がある。そこで本研究ではフレキシブル導波管の先端に接続可能なアンテナ素子として、以下に述べる 2 種類のアンテナを設計した。

### 1) 導波管アンテナ

本業務ではまず基本アンテナとして、アップリンク、ダウンリンクともにフレキシブル導波管から直接給電することを想定し、図 3.3.1-2 に示す導波管アンテナを設計した。

導波管アンテナはダウンリンクとアップリンクを共用する WR284 導波管開口と、アップリンク用の WR187 導波管開口で構成されており、これらは伝送路のフレキシブル導波管のフランジをそのまま用いている。高線量領域内に露出するフランジ部分は全面が金属で構成されるため、極めて高い耐放射線性を持つ。アンテナ配置は、WR284 導波管を中心としてそれら 3 つの導波管が水平面内で配列されており、それぞれのフランジを用いて固定することを想定している。本アンテナは水平偏波の電波を主偏波として放射、受信する。

導波管アンテナの特性を Altair 社製電磁界シミュレータ FEKO によって解析した。ダウンリンク帯、アップリンク帯それぞれの S11 の周波数特性を図 3.3.1-3 に示す。導波管アンテナは基本的にはその特性は矩形の切り離し導波管と同一であり、広帯域にわたってよい S11 特性を持つ。次に、図 3.3.1-4 に 2.45 GHz における WR284 導波管アンテナの指向性を示す。SR284 を基準にすると導波管アンテナは上下左右に対して完全対称形であるため、交差偏波である  $E_{\theta}$  成分はほとんど表れない。正面方向の利得に対する垂直面内の電力半値幅は約  $68^{\circ}$ 、水平面では約  $152^{\circ}$  であり、水平面内においてビームパターンが割れているものの、概ねアンテナ正面に向けて指向性を持っている。水平面内の指向性も幅広であり、遮蔽領域内の広い角度範囲に電力伝送を行うアンテナ素子として適している。さらに、図 3.3.1-5 に WR284、WR187 導波管アンテナの指向性を示す。WR187 アンテナの Port2、Port3 は水平面内で対称構造であり、指向性は水平面で対称パターンとなるため、ここでは Port2 についてのみ示している。水平面内指向性では若干のリップルがあるものの、WR284、WR187 導波管のどちらにおいても概ねアンテナ正面への指向性を持っている。WR187 導波管に着目すると、水平面内で非対称構造であるため、交差偏波である  $E_{\theta}$  成分が表れている。水平面内における正面利得の電力半値幅は、WR284 導波管で  $108^{\circ}$ 、WR187 導波管で約  $128^{\circ}$  であり、幅広の素子指向性を持つことから、センサからの信号をもとに到来方向推定を行うアンテナとして適している。

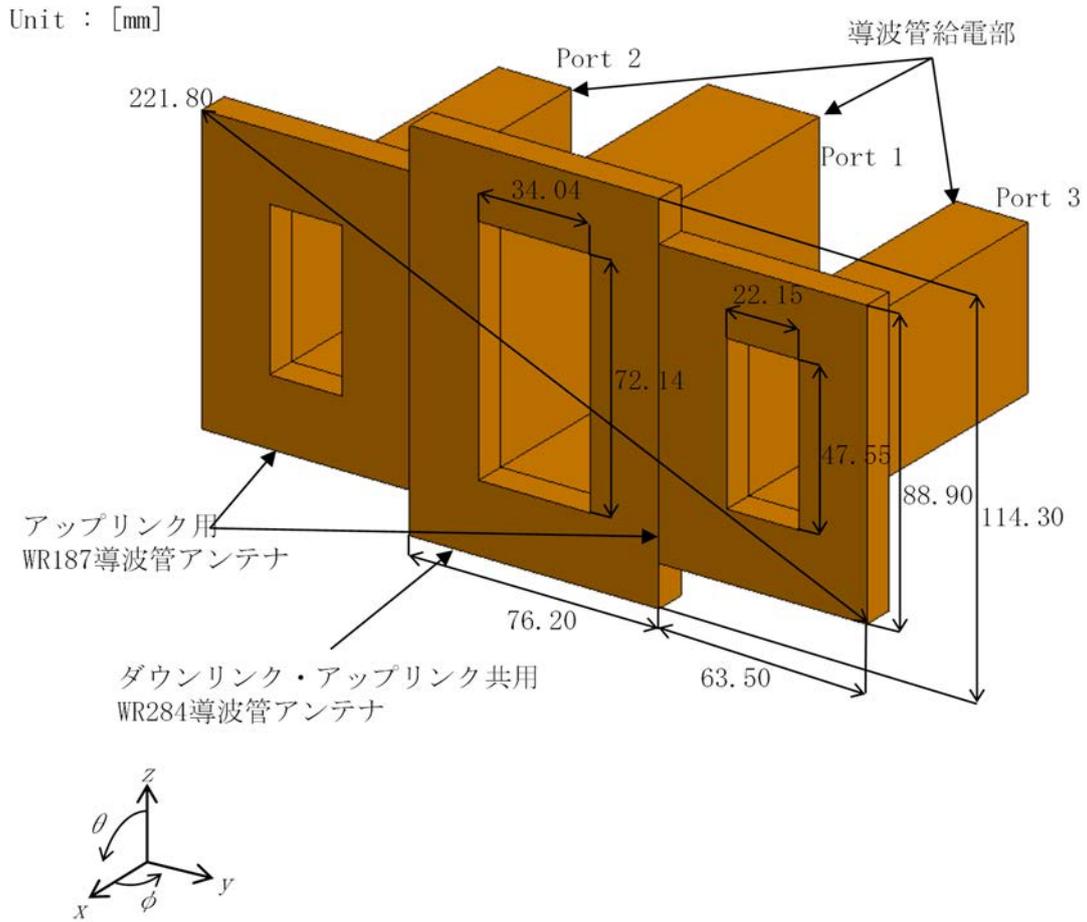


図 3. 3. 1-2 導波管アンテナの構成

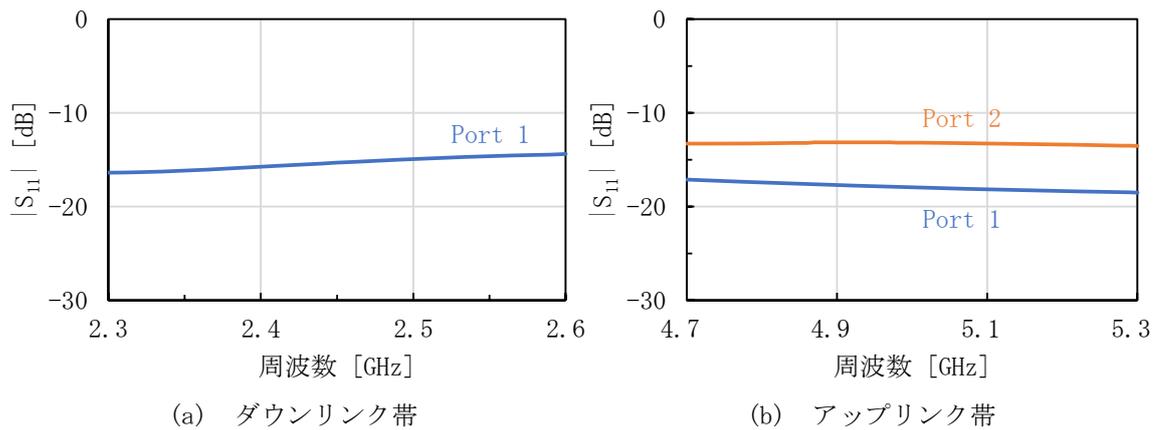


図 3. 3. 1-3 導波管アンテナの S11 の周波数特性

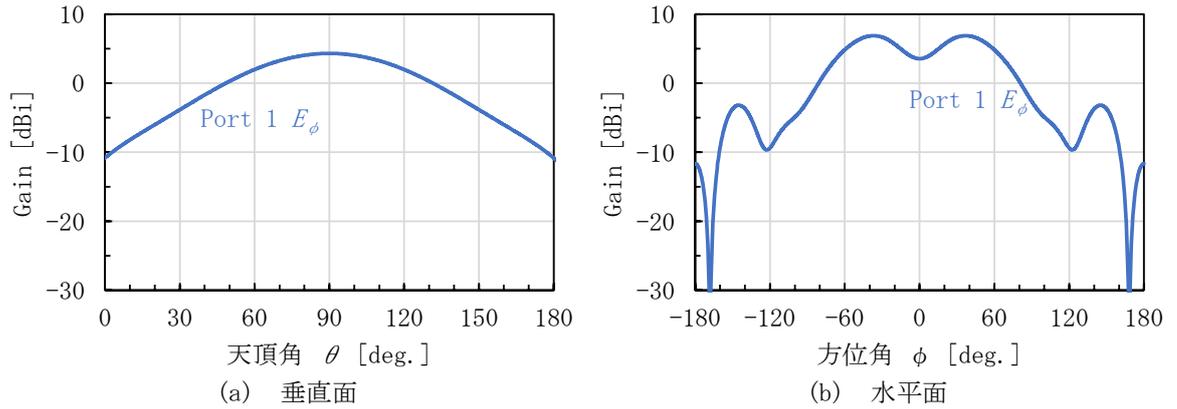


図 3.3.1-4 導波管アンテナのダウンリンク指向性

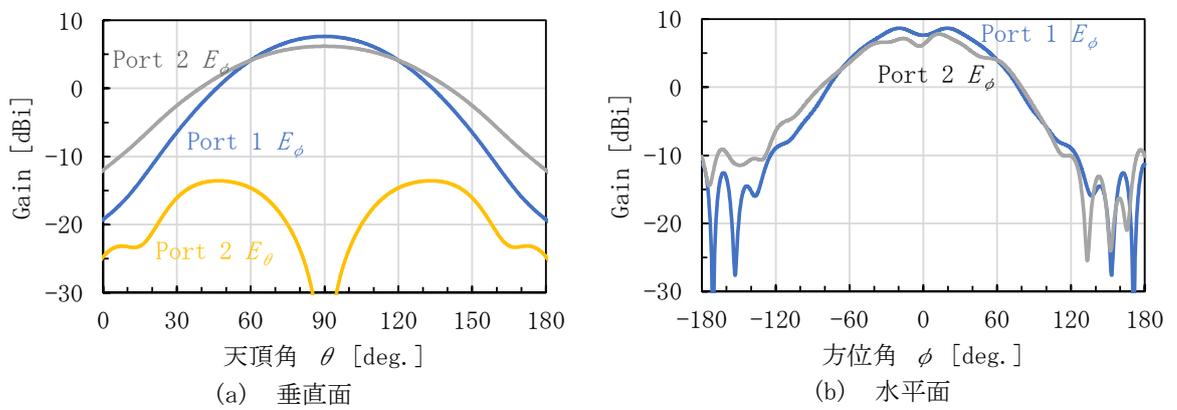


図 3.3.1-5 導波管アンテナのアップリンク指向性

## 2) 導波管-パッチ統合アンテナ

ダウンリンクではセンサノードの駆動電力を無線で供給するために大電力の給電に耐え、一方でアップリンクではセンサノードの位置を高分解能、高精度に推定するため、多数の素子が必要である。これらの条件を考慮した上で、ペネトレーションやガイドパイプ内に通すことができる程度にアンテナ直径を細径化する必要がある。そこで、図 3.3.1-6 に示すように、WR284 の導波管のみの直径でアップリンクとダウンリンクの機能を共有する導波管-パッチ統合アンテナを設計した。

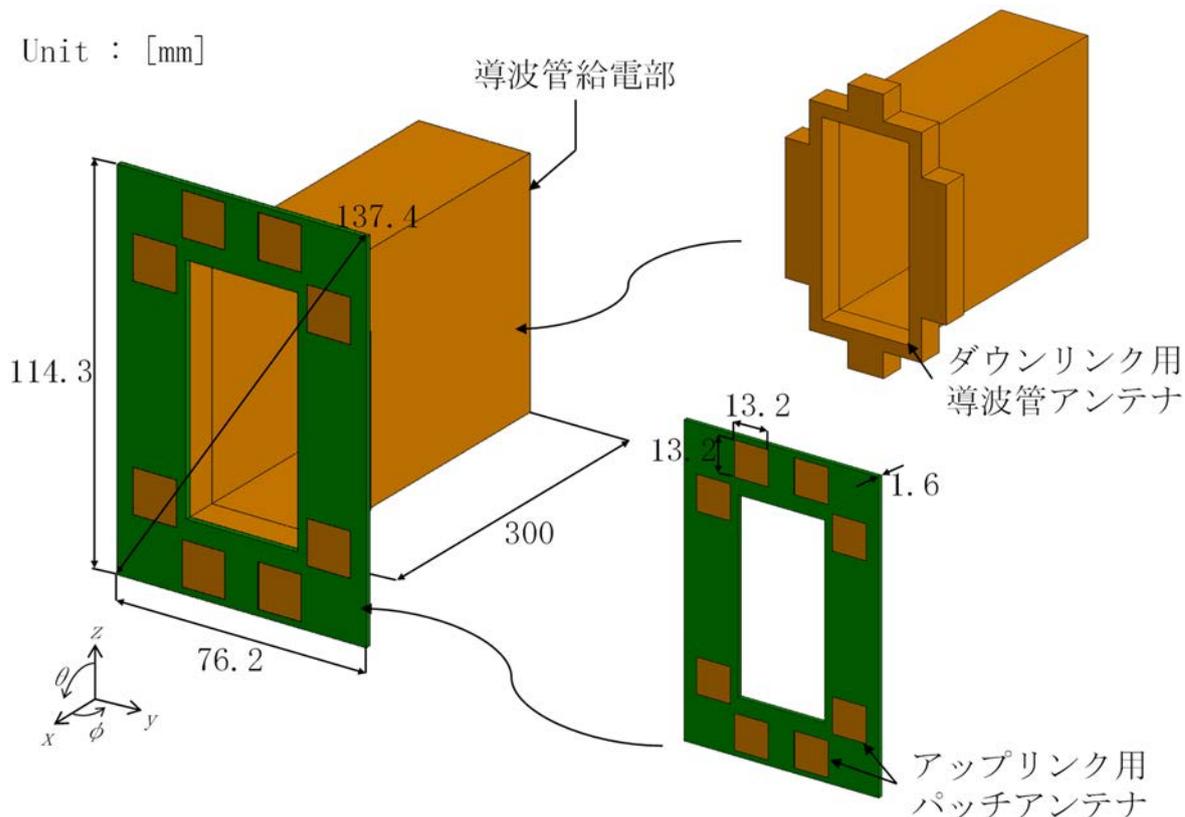
導波管-パッチ統合アンテナは、ダウンリンク用アンテナとしての WR284 導波管と、そのフランジに取り付けられた 8 素子のアップリンク用パッチアンテナによって構成される。アップリンクのパッチアンテナは受信信号を背面から同軸ケーブルを通じて基地局まで伝送する。本アンテナも水平偏波を主偏波として放射、受信することを想定している。統合アンテナは図 3.3.1-2 の導波管アンテナと異なり、全面金属ではなくパッチの構成基板として FR-4 を用いている。ただし、これはあくまでパッチと地導体間の導通を切るためのものであるため、厚み分の絶縁スペースさえ確保できればよく、耐放射線性は必要ないため、実施項目(1)の放射線試験結果でも述べられているのと同様に、アンテナ特性に対する放射線の影響はないと考えられる。

ダウンリンク波を放射する導波管アンテナは図 3.3.1-1 の WR284 フレキシブル導波管から直接給電し、センサノードに無線で駆動電力を供給する。後述するパッチアンテナの給電部が SMA コネクタとコンタクトするため、物理的に干渉しないようフランジ部の四隅を削っている。アップリンク用のパッチアンテナは、厚さ 1.6 mm の FR-4 基板上に構成されており、基板の比誘電率は 4.5、誘電正接は 0.017 を想定して設計した。パッチ素子は 2 次元の方位推定ができるように水平面内で 4 素子、垂直面内でも 4 素子の座標配列となるように異種の矩形配列されており、各素子の給電点位置が WR284 フランジのネジ穴位置に一致する。

統合アンテナの特性を Altair 社製電磁界シミュレータ FEKO によって解析した。ダウンリンク用導波管アンテナ、アップリンク用パッチアンテナそれぞれの S11 の周波数特性を図 3.3.1-7 に示す。ダウンリンク用アンテナは、基本的な構成が導波管であるため、1)の導波管アンテナと同様に広帯域でよい S11 特性を持つ。次に、2.45 GHz におけるダウンリンク用導波管アンテナの指向性を図 3.3.1-8 に示す。交差偏波成分はほとんど表れておらず、垂直面内の電力半値幅は約  $68^\circ$ 、水平面内の電力半値幅は約  $94^\circ$  であり、アンテナ前方の幅広い角度範囲に電力を放射できる。さらに、アップリンク用パッチアンテナの指向性を図 3.3.1-9 に示す。アップリンク用パッチアンテナは導波管アンテナと異なり、給電系まで含めた構造が非対称であるため、交差偏波である  $E_\theta$ 成分が発生しているが、約 10 dB の交差偏波識別度が得られている。また、アンテナ前方に対して広角な指向性が得られているため、これらのパッチアンテナ素子を用いたセンサノード位置の推定に適していることが確認できる。

この導波管-パッチ統合アンテナを試作し、その特性を評価した。試作したアンテナ素子を図 3.3.1-10 に示す。本試作ではダウンリンク用の導波管として 300 mm の直管導波管を用いたが、導波路として用いるフレキシブル導波管のフランジ部分を加工し、そのままアンテナ素子として用いることもできる。試作アンテナの 4.9 GHz 帯の S11 周波数特性を図 3.3.1-11 に示す。試作アンテナは解析と比較して共振周波数が高周波数側に推移しているが、これは試作に用いた基板の比誘電率を 1 GHz のカタログ値を用いたのに対し、4.9 GHz では比誘電率の値が低く、約 4.1 程度であったためと考え

られる。アップリンク用パッチアンテナの 4.9 GHz における測定指向性を図 3.3.1-12 に示す。主偏波の利得が約 2 dB 低下しているが、これは先述した共進周波数のずれによる反射損失である。利得としての低下量は大きくなく、広角な指向性が得られており、交差偏波については電磁界シミュレーションと同程度の低い発生レベルであることから、2.45 GHz でセンサノードに対する無線給電、4.9 GHz でセンサノードの位置推定を行うアンテナを細径に実現できた。



SS

図 3.3.1-6 導波管-パッチ統合アンテナの構成

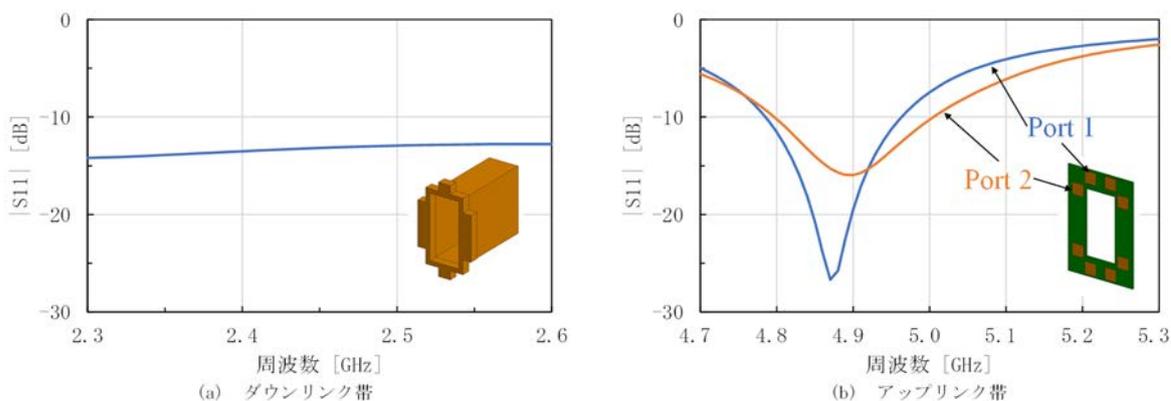


図 3.3.1-7 統合アンテナの S11 の周波数特性

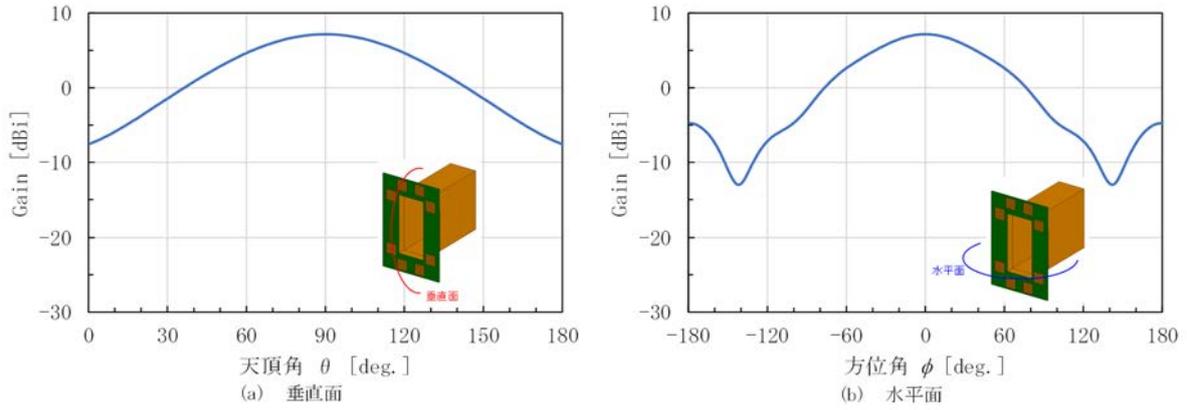


図 3.3.1-8 統合アンテナの 2.45 GHz 指向性

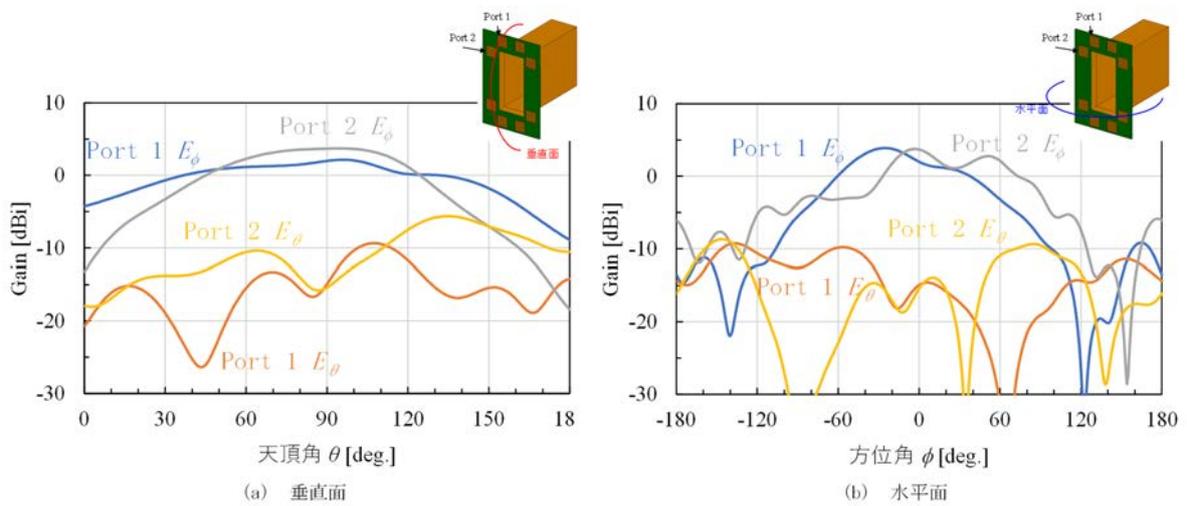
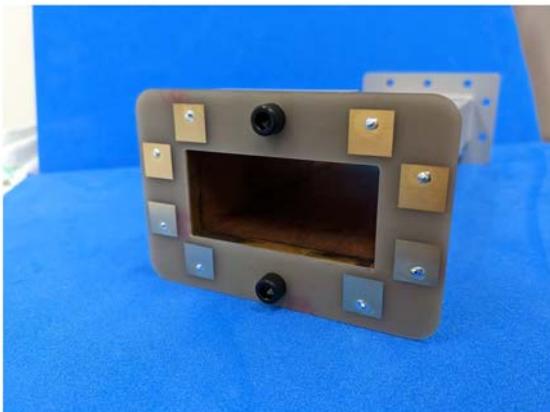


図 3.3.1-9 統合アンテナの 4.9 GHz 指向性



(a) アンテナ前面



(b) アンテナ背面

図 3.3.1-10 試作した導波管-パッチ統合アンテナ

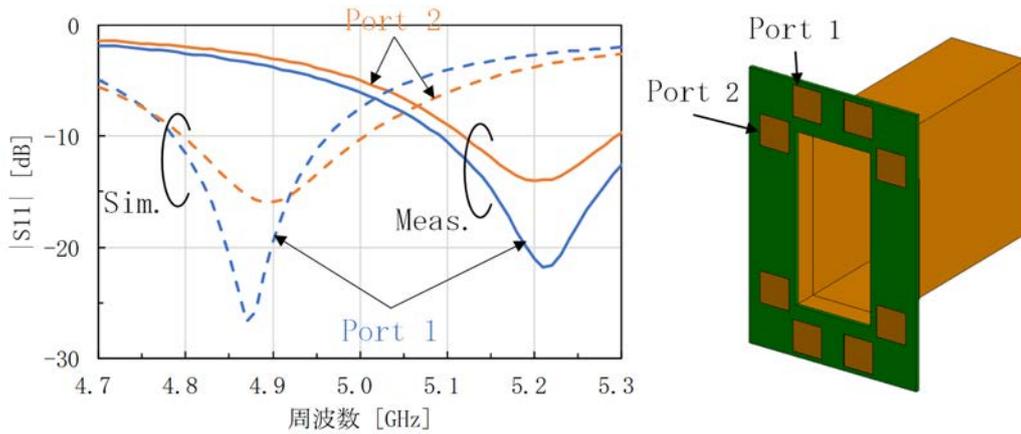


図 3.3.1-11 試作した統合アンテナの S11 の周波数特性

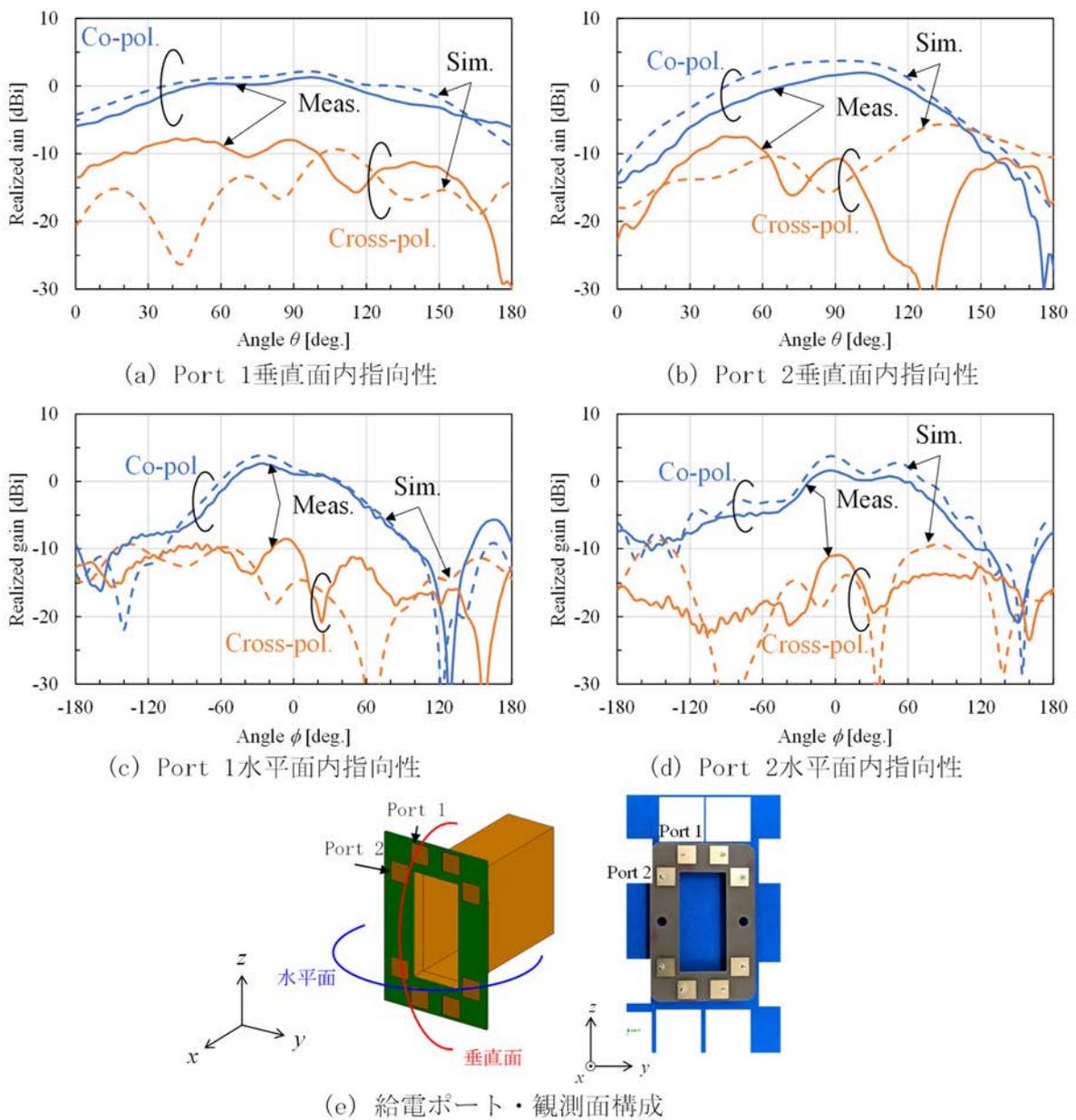


図 3.3.1-12 試作した統合アンテナのアップリンク指向性

### 3.3.2 まとめ

ペネトレーション、ガイドパイプ内を通すことのできる細径な電波導波路としてフレキシブル導波管に着目し、ダウンリンク 2.45 GHz とアップリンク 4.9 GHz に対応する 2 種類のフレキシブル導波管を調達し、1 m 未満の曲率半径で屈曲できることから、機械的な形状が導波路としての使用に耐えることを確認した。

また、フレキシブル導波管を導波路として利用することを前提とした、遮蔽領域内に展開するアンテナ素子の設計を行った。フレキシブル導波管の開口をそのまま利用する、ダウンリンク 1 素子、アップリンク 3 素子の導波管アンテナを設計し、広帯域な S11 特性と、アンテナ前方への広角な放射指向性が得られることを確認した。さらにアンテナ素子を細径化するため、ダウンリンク用導波管アンテナのフランジを用いてパッチアンテナを構成した、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 RF 信号発生器、スペクトラムアナライザおよびネットワークアナライザを用いて評価した。実測ではアップリンク周波数帯で電磁界解析と比べて共振周波数にずれが生じたものの、動作利得の低下としては 2 dB 程度であり、アンテナ前方への広角な指向性を持つことから、センサノードの位置推定に適していることを確認した。

今後は令和 4 年度に開発した導波路とアンテナを組み合わせ、センサノードに対する駆動電力の伝送距離の評価、センサノード位置推定の検討と、BS 通信回路との統合化を行っていく。

### 3.4 研究推進

本研究を推進するにあたり、東電および JAEA/CLADS 等との連携を密にして、研究を進めた。具体的には、定期的な研究進捗状況の情報・意見交換、CLADS 研究発表会等への参加等を実施した。研究責任者・研究分担者による研究討論会を、令和 4 年 9 月 2 日（横国大）、令和 5 年 1 月 30 日（オンライン）、令和 5 年 3 月 18 日（新潟大）に実施した。

また、本研究を通じて下記の成果を発表した。

#### <学会発表（国内会議）>

(1)

講演タイトル：分散 MIMO センサを用いたパッシブ測位システム構築の机上検討

形式：口頭

発表者：池上十五、金ミンソク

場所（学会名）：岐阜市文化センター（2023 年 電子情報通信学会アンテナ・伝搬研究会）

発表日：令和 4 年 10 月 19 日

(2)

講演タイトル：An indoor device-free localization technique using multipath wireless channel characteristics

形式：口頭

発表者：Togo Ikegami, Minseok Kim

場所（学会名）：SONO CALM、Yeosu, South Korea (IEEE/IEIE ICCE-Asia 2022)

発表日：令和 4 年 10 月 27 日

(3)

講演タイトル：リングハイブリッドを用いた非接触接続可能な立体型バルンの

形式：口頭

発表者：小川公基、白川武蔵、久我宣裕

場所（学会名）：芝浦工業大学・大宮キャンパス（2023 年 電子情報通信学会総合大会）

発表日：令和 5 年 3 月 7 日

(4)

講演タイトル：上り回線の周波数特性によりセンサ電圧を検出する 2 次高調波パッシブ RFID の検討

形式：口頭

発表者：肖琨、室伏竜之介、久我宣裕

場所（学会名）：芝浦工業大学・大宮キャンパス（2023 年 電子情報通信学会総合大会）

発表日：令和 5 年 3 月 8 日

(5)

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遮蔽物追跡法の検討  
形式：口頭

発表者：池上十五、金ミンソク

場 所（学会名）：芝浦工業大学・大宮キャンパス（2023年 電子情報通信学会総合大会）

発表日：令和5年3月8日

#### 4. 結言

本業務では、RB 内および 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。

BS から送信される電波を 2 倍高調波に変換して BS に送り返すことが可能な SN を開発し、さらに BS 送信系用に、無線電力伝送に必要な大電力を出力できる送信系アンテナを開発した。また BS 受信系用として、簡素な構成で到来方向の推定が可能なハイブリッドビームアンテナと、通信距離評価に適した高利得アレーアンテナを開発した。今後はセンサ情報をアップリンク波に効率よく変調する手法を検討し、かつ通信可能距離の評価等を行っていく。

パッシブ測位法に関するアルゴリズムの机上検討を実施した。センサ位置特定アルゴリズムに関する研究として、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および座標化するための多重波電波トモグラフィ法を、計算機シミュレーションを用いて開発した。また、 $8 \times 8$  MIMO 無線回路を調達し、現有の装置と組み合わせた高分解能測定系を構築した。 $8 \times 8$  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た。次年度には無線回路を追加し 4 つの基地局まで拡張させ、センサネットワークを構成する予定である。

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としては、下記を実施した。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およ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 信号発生器、スペクトラムアナライザおよびネットワークアナライザを用いて行った結果、アンテナ前方への広角な指向性を持つことが確認でき、センサノードへの電力供給、位置推定に適した導波路、アンテナ素子を実現した。今後は令和 4 年度に開発した導波路とアンテナを組み合わせ、センサノードに対する駆動電力の伝送距離の評価、センサノード位置推定の検討と、BS 通信回路との統合化を行っていく。

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およ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, 平成 24 年 1 月 21 日, [https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts\\_120121\\_02-j.pdf](https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_120121_02-j.pdf), 10p. (参照: 2023 年 4 月 3 日) .
- [1-5] 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, 平成 31 年 3 月 13 日, [https://irid.or.jp/\\_pdf/20190313.pdf](https://irid.or.jp/_pdf/20190313.pdf), p. 14 (参照: 2023 年 4 月 3 日) .
- [3.1.2.1-1] Yamamoto, T. et al., Design of Highly Efficient and Compact RF-DC Conversion Circuit at mW-class by LE-FDTD Method, IEICE Trans. Electron., vol. E-93-C, no. 8, 2010, pp. 1323-1332.
- [3.1.2.1-2] Yoo, T.W., Chang, K., Theoretical and experimental development of 10 and 35 GHz rectennas, IEEE Trans. MTT, vol. 40, no. 6, 1992, pp. 1259-1266.



