



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
(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 and Evaluation of a Real-time 3D Positioning Embedded System
Combining Wireless UWB and Camera Image Analysis
(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
東海国立大学機構

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research and Engineering Institute
Tokai National Higher Education and Research System

November 2025

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

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

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
(委託研究)

ー令和 5 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業ー

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

東海国立大学機構

(2025 年 5 月 7 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、「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」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。

本研究は、原子炉建屋内の空間線量計測における人やロボットによる 10 cm 精度未満での簡易リアルタイム 3D 位置測位を目標とし、最新普及技術である『無線 UWB (Ultra Width Band)』と『複数カメラ物体認識』の 2 種類を組合せた組込システムの実現を目指している。その中で、岐阜大学・福島高専がカメラ撮影機能・カメラ分析機能・無線通信機能を有する組込装置を開発し、それら複数装置を用いて、カメラ画像群の分析に基づくリアルタイム 3D 位置測位の実現を目指す。また、東京大学・LocationMind (株) が、UWB リアルタイム位置測位技術の原子炉建屋内へ適用を行い、安定性向上技術の開発を試みる。なお、名古屋大学が電磁波吸収材料を使用して、ハード面からの無線 UWB 安定化の検証を担当し、耐放射線評価は JAEA・福島高専が協力して行う。

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、東海国立大学機構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 and Evaluation of a Real-time 3D Positioning Embedded System
Combining Wireless UWB and Camera Image Analysis
(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

Tokai National Higher Education and Research System

(Received May 7, 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 and evaluation of a real-time 3D positioning embedded system combining wireless UWB and camera image analysis” conducted in FY2023.

The present study aims to realize an embedded system that combines two of the latest popular technologies, "wireless UWB (Ultra Width Band)" and "multi-camera object recognition" with the goal of simple real-time 3D positioning with less than 10 cm accuracy by a human or robot for measuring air doses in nuclear reactor buildings. In this research, Gifu Univ. and National Institute of Technology, Fukushima College have developed an embedded system with camera shooting function, camera analysis function, and wireless communication function, in order to realize real-time 3D positioning based on the analysis of camera images by using these multiple devices. The Univ. of Tokyo and LocationMind Inc. will apply UWB real-time positioning technology to the inside of nuclear reactor buildings and attempt to develop technology to improve stability. Nagoya Univ. will be in charge of verifying wireless UWB stability from the hardware side by using electromagnetic wave absorbing materials. The radiation resistance evaluation will be conducted in cooperation with the JAEA and National Institute of Technology, Fukushima College.

Keywords: 3D Position Estimation, UWB, Camera Image Analysis, Embedded Device

This work was performed by Tokai National Higher Education and Research System 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・ エネルギー
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）

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
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	東海国立大学機構 (岐阜大学)

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

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

(契約番号 R05I059)

成果報告書

令和 6 年 3 月

国立大学法人東海国立大学機構

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、国立大学法人東海国立大学機構が実施した「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」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	vii
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 研究目標	2-1
2.1.2 研究体制及び研究遂行能力	2-2
2.2 実施体制	2-3
2.3 令和5年度の成果の目標及び業務の実施方法	2-4
2.3.1 カメラ画像計測分析・組込装置に基づくリアルタイム 3D 位置測位システム の開発及びシステム統合・検証（岐大）	2-4
2.3.2 無線 UWB を用いたリアルタイム 3D 位置測位手法の開発（再委託先：東大、麗澤大）	2-4
2.3.3 無線 UWB を用いたリアルタイム 3D 位置測位システムの開発と実験・改良 （再委託先：LM）	2-4
2.3.4 カスケード接続俯瞰画像方式位置計測の研究開発及び計測機器等の耐放射線性評価 （再委託先：福島高専）	2-4
2.3.5 UWB 位置測位の精度向上を目指した電磁波抑制材の配置・構造に関する検証（名大）	2-4
2.3.6 組込装置「Spresense」及び無線通信回路「UWB」の耐放射線並びに無線通信の 検証試験（連携先：原子力機構）	2-5
3. 実施内容及び成果	3-1
3.1 カメラ画像計測分析・組込装置に基づくリアルタイム 3D 位置測位システムの開発 及びシステム統合・検証（岐大）【令和4年度～令和5年度】	3-1
3.1.1 第1次システム試作【令和4年度～令和5年度】	3-1
3.1.2 第2次システム試作&システム統合【令和5年度】	3-1
3.1.3 まとめ	3-5
3.2 無線 UWB を用いたリアルタイム 3D 位置測位手法の開発（再委託先：東大・麗澤大） 【令和4年度～令和5年度】	3-6
3.2.1 信号強度とレンジデータの解析によるマルチパス環境下での測位アルゴリズムの 改善【令和4年度～令和5年度】	3-6
3.2.2 まとめ	3-7
3.3 無線 UWB を用いたリアルタイム 3D 位置測位システムの開発と実験・改良（再委託先：LM） 【令和4年度～令和5年度】	3-9
3.3.1 プラントライクな環境を再現し、多数の UWB デバイスを配置して位置精度を 解析するフィールド実験【令和4年度～令和5年度】	3-9
3.3.2 アンカーを迅速に展開し、校正するための方法論の開発【令和5年度】	3-12
3.3.3 UWB モジュールと IMU、Wi-Fi、Bluetooth などのセンサーを統合した新しい UWB デバイスの開発【令和5年度】	3-14
3.3.4 まとめ	3-21

3.4	カスケード接続俯瞰画像方式位置計測の研究開発及び計測機器等の耐放射線性評価 (再委託先：福島高専)【令和4年度～令和5年度】	3-22
3.4.1	カスケード接続俯瞰画像位置計測【令和4年度～令和5年度】	3-22
3.4.2	耐放射線性評価【令和4年度～令和5年度】	3-24
3.4.3	まとめ	3-24
3.5	UWB位置測位の精度向上を目指した電磁波抑制材の配置・構造に関する検証(名大) 【令和4年度～令和5年度】	3-25
3.5.1	UWB位置測位の精度向上を目指した電磁波抑制材の配置・構造の開発 【令和4年度～令和5年度】	3-25
3.5.2	まとめ	3-25
3.6	組込装置「Spresense」及び無線通信回路「UWB」の耐放射線並びに無線通信の 検証試験(連携先：原子力機構)【令和4年度～令和5年度】	3-26
3.6.1	照射場の整備及びモニタシステムの改良【令和4年度～令和5年度】	3-26
3.6.2	照射試験及び無線通信試験【令和4年度～令和5年度】	3-27
3.7	研究推進	3-29
4.	結言	4-1

執筆者リスト

研究代表者

国立大学法人東海国立大学機構岐阜大学		
准教授	松下	光次郎

委託先

国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学		
助教	上野	智永

再委託先

国立大学法人東京大学	特任准教授	マナnder・ディネス
------------	-------	-------------

再委託先

学校法人廣池学園麗澤大学	副学長	柴崎 亮介
--------------	-----	-------

再委託先

LocationMind 株式会社	マネージャー	大平 亘
-------------------	--------	------

再委託先

独立行政法人国立高等専門学校機構福島工業高等専門学校		
教授	鈴木	茂和
特命教授	川妻	伸二

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構		
課長	田上	進

表一覧

表 3.1-1	オフィス内での精度検証結果	....	3-4
表 3.4-1	第 2 次試験結果	....	3-23
表 3.4-2	耐放射線性評価（照射試験）結果	....	3-24
表 3.6-1	「カメラ画像分析組込装置」及び「UWB 通信回路」へのガンマ線照射	....	3-27
表 3.6-2	マイクロ SD カードへのガンマ線照射	....	3-28

図一覧

図 2.2-1	実施体制図	....	2-3
図 3.1-1	第1次システムの検証の様子	....	3-2
図 3.1-2	第2次システムのハードウェア構成	....	3-2
図 3.1-3	第2次システムのソフトウェア構成	....	3-3
図 3.1-4	第2次システムの「AR マーカーを用いた新規・組込装置の自動位置登録」機能	....	3-3
図 3.1-5	オフィス内での精度検証	....	3-4
図 3.1-6	模擬環境（東海村施設）における実験の様子	....	3-5
図 3.2-1	屋内空間のマルチパス概略	....	3-6
図 3.2-2	FW のパラメータ設定	....	3-7
図 3.2-3	測位アルゴリズム改善フロー	....	3-8
図 3.3-1	位置精度に関係する要因分析のための試験計測の概略	....	3-9
図 3.3-2	CIR データで見る直接波と遅延波の遅延状況（PL と PRF の組合せ別）	....	3-10
図 3.3-3	LSTF 試験計測エリア設定	....	3-11
図 3.3-4	計測された位置座標のバラツキ（地点 A、B、C、D）	....	3-11
図 3.3-5	アンカーセットアップキット方法の概念図	....	3-12
図 3.3-6	測位システムのための UWB デバイス開発フロー	....	3-14
図 3.3-7	開発した UWB デバイス外観	....	3-15
図 3.3-8	UWB DWM3001CDK Device	....	3-15
図 3.3-9	UWB RTLS システムの構造	....	3-16
図 3.3-10	FW 書き込みによるデバイスセットアップ画面	....	3-16
図 3.3-11	UWB-Device のコマンドの遷移	....	3-17
図 3.3-12	Tag・Anchor 設定プロセス	....	3-18
図 3.3-13	データ取得プロセス	....	3-19
図 3.4-1	2 段カスケード接続俯瞰画像方式位置計測システム	....	3-22
図 3.4-2	第1次試験の状況	....	3-22
図 3.4-3	第2次試験の状況	....	3-23
図 3.4-4	3 段カスケード接続試験の機器整備状態	....	3-23
図 3.5-1	配置・構造の工夫を施した超軽量材料の試作	....	3-25
図 3.6-1	ガンマセルのガンマ線照射線量率の評価システム	....	3-26
図 3.6-2	ガンマセルの高さ方向の線量分布測定・実験構成	....	3-26
図 3.6-3	ガンマセル試料室内の線量分布	....	3-27
図 3.6-4	ガンマセルによる照射時の対象物配置	....	3-27
図 3.6-5	実証実験場所	....	3-28

略語一覧

CLADS	: Collaborative Laboratories for (廃炉環境国際共同研究センター) Advanced Decommissioning Science
原子力機構	: Japan Atomic Energy Agency (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
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
岐大	: 国立大学法人東海国立大学機構岐阜大学
名大	: 国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学
東大	: 国立大学法人東京大学
麗澤大	: 学校法人廣池学園麗澤大学
LM	: LocationMind 株式会社
福島高専	: 独立行政法人国立高等専門学校機構福島工業高等専門学校
FW	: Firmware (ファームウェア)
PL	: Preamble Length (プリアンブル長)
PRF	: Pulse Repetition Frequency (パルス繰り返し周波数)
UWB	: Ultra Width Band (超広帯域)
JAXA	: 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

概略

現在、原子炉建屋内の線量計測において、リアルタイム 3D 位置測位技術は利用されておらず、作業員／ロボットは目算に近い方法で線量計測位置の記録を付けている状態といえる。そのため、今後の人／ロボットによる精緻な空間線量計測の実現のためには、線量計の位置精度が約 10 cm 程度であるため、10 cm 精度未満での簡易リアルタイム 3D 位置測位システムの実装が急務な課題となっている。一方、近年リアルタイム屋内位置測位技術は発展・普及し始めており、特に、『無線 UWB (Ultra Width Band)』と『複数カメラ物体認識 (深層学習とフォトグラメトリ／光学式モーションキャプチャ)』の 2 種類の最新普及技術が有望といえる。そこで、我々はこれら 2 つの技術を組合せ、原子炉建屋内に対して簡単に設置でき、安定にリアルタイム位置測位可能な組込システムの実現を目指す。具体的には、国立大学法人東海国立大学機構岐阜大学（以下、「岐大」と略す。）がカメラ撮影機能・カメラ分析機能（エッジコンピューティング）・無線通信機能を有する組込装置を開発し、それらを複数装置用いて、カメラ画像群の分析に基づくリアルタイム 3D 位置測位の実現を目指す。なお、原子炉建屋内カメラ画像分析法は廃炉プロジェクトにおいて先行研究を行っている、独立行政法人国立高等専門学校機構福島工業高等専門学校（以下、「福島高専」と略す。）とともに、作業員用装置は岐大、ロボット用装置は福島高専が担当する。また、国立大学法人東京大学（以下、「東大」と略す。）・LocationMind 株式会社（以下、「LM」と略す。）は、先行研究で培った UWB リアルタイム位置測位技術の原子炉建屋内へ適用を行い、安定性向上技術の開発を試みる。なお、建屋内は悪通信環境と想定されるため、国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学（以下、「名大」と略す。）が、先行研究の国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（以下、「JAXA」と略す。）の衛星内通信のための電磁波吸収材料を使用し、ハード面からの無線通信の安定化のシステム構築・検証を担当する。最終的に、岐大が令和 6 年度に上記技術のシステム統合した組込装置を開発し、原子炉建屋を想定したコンクリートで覆われた閉空間で性能評価を行う。また、実用化のためには耐放射線評価も重要であるため、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」と略す。）・福島高専が協力して行う。

令和 4 年度までの成果報告書：

- ・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（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 2024-027

<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2024-027>

1. はじめに

本研究は3年間であり、令和4年度は、各再委託先が保有する知識技術を本研究に適用するための立ち上げ及び連携の強化を進める。令和5年度は、令和4年度の成果物の性能向上に努めて結果を出し、本研究に関連する連携を模索することも含める。令和6年度は、最終的なシステム性能を実現するために成果を統合して結果を出し、他と連携し、実装の段階へ移行することを目指すものである。

そのために令和5年度は、岐大はカメラ画像分析機能・無線通信機能に基づくリアルタイム3D位置測位・組込装置（第2次試作）を開発、その上で模擬環境において計測エリアを拡張する実証実験も行った。東大・LMは、無線UWBに基づくリアルタイム3D位置測位・組込装置（第2次試作）の開発と模擬環境における特性分析を行った。名大は、無線UWB通信の改善につながる電磁波吸収材料に基づくシールド構造設計プロセスを構築、岐大と協力して構造政策・検証実験までを行った。福島高専は、俯瞰画像方式位置計測法のシステム検証を行った。また、原子力機構とも協力し、組込装置の構成要素（カメラ・コンピュータ・無線通信）の耐放射線評価を行った。本報告書は、上記内容を詳述するものである。

2. 業務計画

2.1 全体計画

2.1.1 研究目標

現在、原子炉建屋内では、リアルタイム屋内位置測位技術は実装されておらず、作業員／ロボットによる線量計測時の位置情報は目算に近い状態である。特に、今後は人／ロボットによる精緻な空間線量計測が重要課題であるために、数 cm～10 cm 精度での簡易リアルタイム 3D 位置測位システムの実装が急務な課題となっている。それに対して近年、リアルタイム屋内位置測位技術は発展・普及し始めており、特に、無線 UWB とカメラ物体認識・組込装置の 2 種類が有望な最新普及技術といえる。無線 UWB は、対象空間内にアンカーと呼ばれる UWB 通信機を網羅的に複数設置することで、その環境内で UWB デバイスを保有する作業員／ロボットの誤差 10 cm 未満の精度でのリアルタイム位置測位を実現できる可能性を有する。ただし、UWB デバイス間の精密測距によって測位することから、UWB デバイス同士の無線通信（伝搬）状態に精度が左右される。原子炉建屋内の電波伝搬状況を把握し、その環境に特化したリアルタイム位置測位アルゴリズム構築が不可欠となる。また、無線通信電波の不要な反射など起こさないよう、電磁波吸収材料を適切にシステムデザインに組込むことも課題といえる。一方、カメラ物体認識・組込装置に基づくリアルタイム位置測位法も、UWB と同様に位置測位環境を網羅するように取り付けることが不可欠である。その上で、各カメラ画像分析デバイスが物体認識（エッジコンピューティング）を行い、分析で得られた情報をローカルネットワーク通信し、空間内の特定物体の位置測位が可能となる。すなわち、視界が悪くても動作する UWB 測位技術、信号の多重反射など生じて位置計測できるカメラ物体認識システムを組み合わせることで、より安全・安定なリアルタイム 3D 位置測位が可能な組込システムの実現を目指す。また、最新普及技術の利用が前提とあるため、特に運用検証を重視しており、既に行っている事前ヒヤリングにおいて、1 回の作業期間が 2 週間であると前提条件を確認していることから、低消費電力である UWB や組込装置を選定、1 回の簡易的なバッテリー交換で 2 週間の持続を想定している。その上で、本課題の要件として耐放射線検証が避けられないため、カメラなどの耐放射線検証の豊富な経験を有する申請者とともに、今回用いる組込装置や無線通信回路 UWB の耐放射線検証を原子力機構にて行う。

最終的に原子炉建屋内を想定する 20 m×3 m×3 m の閉空間にて、カメラ・UWB・バッテリーを搭載した組込装置 Spresense にて、約 10 cm 未満の精度にて 3D 自己位置推定を可能とし、1 個の電池で 2 週間持続可能であり、バッテリーを交換すれば繰り返し使える耐久性を有するシステムを作り上げることが最終目標である。なお、取付／バッテリー交換時は、1 アンカーデバイスにつき 15 秒未満での取付／バッテリー交換が可能であることも運用上の目標に含める。

2.1.2 研究体制及び研究遂行能力

本研究は、岐大・東大・学校法人廣池学園麗澤大学（以下、「麗澤大」と略す。）・LM・福島高専・名大・原子力機構の7機関で行われる。

- (1) 岐大は、先行研究で農業 IoT などの実績があり、カメラ画像分析・無線通信機能に基づくリアルタイム 3D 位置測位組込装置の開発を行う。
- (2) 東大・麗澤大・LM は、先行研究において無線 UWB を用いたリアルタイム位置測位の実績を有しており、無線 UWB 通信に基づくリアルタイム 3D 位置測位組込装置の開発を行う。
- (3) 福島高専は、屋内カメラ画像分析に基づくリアルタイム位置測位ロボットの実績を有しており、開発した組込装置のロボットを用いた検証を行う。
- (4) 原子力機構は、福島高専とともに、これまでカメラ・ラズパイ等の装置の耐放射線試験を経験しているため、開発する組込装置の耐放射線試験を行う。
- (5) 名大は、JAXA など衛星の電磁波抑制材料として使用実績があり、無線 UWB 通信の状態改善のための電波抑制部品設計・造形を行う。
- (6) 上記の情報や要素技術を取りまとめて統合システムを実現させる役割を岐大が担う。

2.2 実施体制

実施体制を図 2.2-1 に示す。

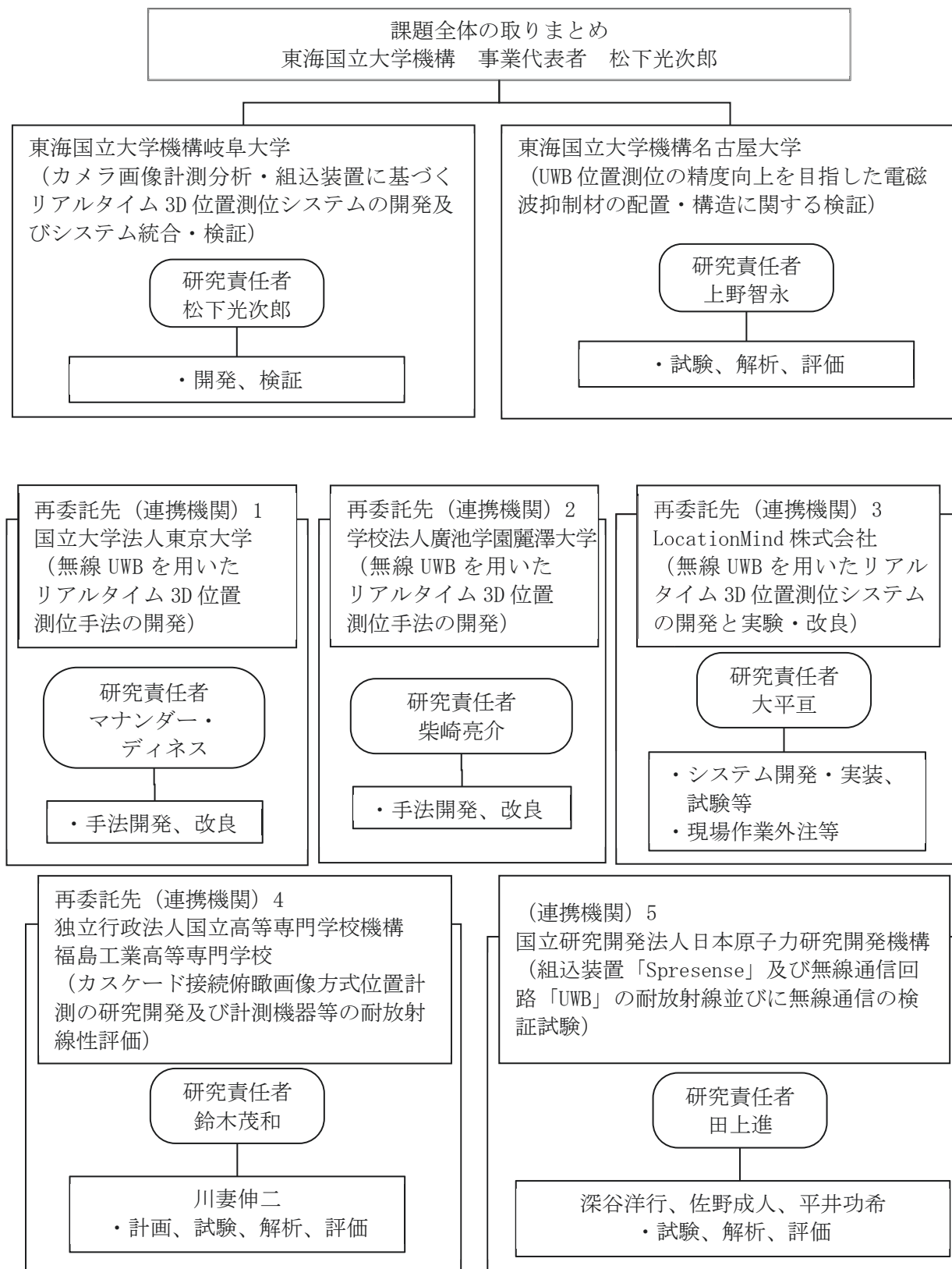


図 2.2-1 実施体制図

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 カメラ画像計測分析・組込装置に基づくリアルタイム3D位置測位システムの開発及びシステム統合・検証（岐大）

(1) 第1次システム試作

令和4年度にケース設計・カメラ画像分析プログラミング・無線通信機能プログラミングを行った1次試作の位置測位システムの検証を継続して行う。

(2) 第2次システム試作&システム統合

第2次システムを試作し、位置測位システムの模擬環境での精度向上、システムの増産法の検討及びUWBシステムとの統合仕様の検証を行う。

2.3.2 無線UWBを用いたリアルタイム3D位置測位手法の開発（再委託先：東大、麗澤大）

信号強度とレンジデータの解析による、マルチパス環境下での測位アルゴリズムの改善を行う。

2.3.3 無線UWBを用いたリアルタイム3D位置測位システムの開発と実験・改良（再委託先：LM）

プラントライクな環境を再現し、多数のUWBデバイスを配置して位置精度を解析するフィールド実験を実施する。また、アンカーを迅速に展開し、校正するための方法論を開発する。さらに、UWBモジュールとIMU、Wi-Fi、Bluetooth等のセンサーを統合した新しいUWBデバイスを開発する。

2.3.4 カスケード接続俯瞰画像方式位置計測の研究開発及び計測機器等の耐放射線性評価（再委託先：福島高専）

(1) カスケード接続俯瞰画像位置計測

これまでに実施してきた高線量下での「俯瞰画像方式位置計測の研究開発」の成果をもとに、見通しの効かない場所でも位置計測できるカスケード接続俯瞰画像位置計測の研究開発のため、令和4年度に整備した2段カスケード接続試験に必要な機材を用いて試験装置の組立てを行い、カスケード試験を実施して計測精度を評価する。必要に応じて計測精度補正のためのマーカー改良等を行い試験、評価を行う。また、令和6年度に計画している3段カスケード接続に必要な機材の整備を行う。

(2) 耐放射線性評価

令和4年度に岐大及び東大等と連携してリストアップしたUWB及びカメラ画像計測・分析に必要な機器で、耐放射線性の評価が必要となる電子部品について、原子力機構と連携してCo-60照射試験を行い、耐放射線性を評価する。

2.3.5 UWB位置測位の精度向上を目指した電磁波抑制材の配置・構造に関する検証（名大）

電磁波遮蔽・吸収材料を作製し、通信環境の改善のため配置・構造の工夫を行う。

2.3.6 組込装置「Spresense」及び無線通信回路「UWB」の耐放射線並びに無線通信の検証試験
(連携先：原子力機構)

(1) 照射場の整備及びモニタシステムの改良

廃棄物安全試験施設（WASTEF）でガンマセルを用いた予備照射試験として、組込装置 Spresense 等を用いた照射試験を繰り返し、積算吸収線量の測定及び評価手法を確認するとともに、常時表示システムとするためのモニタシステムの構築・改良を進める。

(2) 照射試験及び無線通信試験

バックエンド研究施設（BECKY）で、令和 4 年度に整備した試験条件の下、無線通信試験を継続し、試験結果に応じて試験条件を再検討する。

3. 実施内容及び成果

3.1 カメラ画像計測分析・組込装置に基づくリアルタイム 3D 位置測位システムの開発及びシステム統合・検証（岐大）【令和 4 年度～令和 5 年度】

3.1.1 第 1 次システム試作【令和 4 年度～令和 5 年度】

【令和 4 年度までの概要】

令和 4 年度には、第 1 次試作としてソニー社製の組込装置 Spresense を基盤とし、黄色い球体を対象としてカメラ画像分析（画像内・物体重心点算出）して、その重心結果を無線通信 Wi-Fi ネットワークにてホスト PC にデータ転送し、ホスト PC が 3 台以上の位置が既知の組込装置から得られる黄色い球体の重心の 3D 位置測位を算出するシステム開発を行った。実証検証としては、組込装置 5 台を用いて、計測対象 60 mm の球体に対する画像解像度・分析時間・検出力に関する精度検証を行った。また、開発した組込装置の消費電力計測を確認して、迅速にバッテリー交換が可能なケース設計を行った。

【令和 5 年度実施内容及び成果】

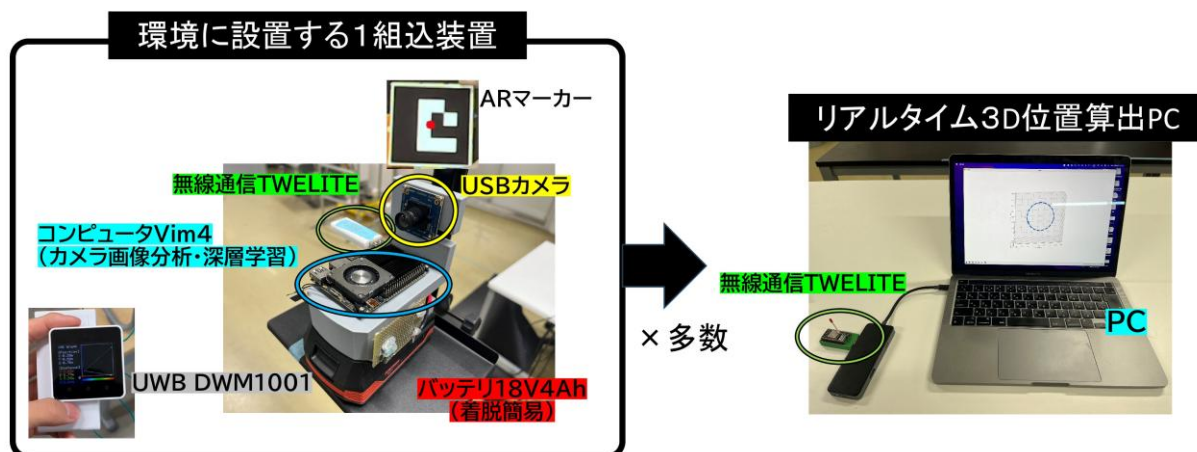
令和 4 年度からの第 1 次システム継続検証結果については、組込装置 Spresense のカメラ画像分析性能は、令和 4 年度の実証検証で行った黄色い球体の物体認識レベル（図 3.1-1）では問題はないが、今後の発展性を含めた場合、異なる複数物体を同時に認識させることができないとわかったため、組込装置 Spresense からシングルコンピュータ Khadas 社製 Vim4（OS：Ubuntu）・ELP 社製 USB カメラ（視野角 20 度～180 度のレンズに変更可能、260 fps、200 万画素）に仕様変更となった。また、無線通信に関しても、少量データを効率良くネットワーク通信させることを実現する無線通信方式が重要と判断し、消費電力が高く大量データ通信を行う Wi-Fi ではなく、センサネットワーク通信用 TWELITE の無線通信回路への仕様変更となった。

3.1.2 第 2 次システム試作&システム統合【令和 5 年度】

第 2 次システム試作&システム統合については、ハードウェア（図 3.1-2）はシングルコンピュータ Vim4（OS：Ubuntu）、USB カメラ、AR マーカー、無線通信 TWELITE、リチウムバッテリー（容量 18V4Ah、着脱簡易、4 時間以上稼働可能）、UWB DWM1001、ホスト PC（3D 位置測位ソフト）で構成される。なお、基礎精度検証用と実証検証用の 2 種類があり、実証検証用が装置の簡易増産法の検討も含めた最終的構成の位置づけである。ソフトウェア構成（図 3.1-3）としては、Vim4 及びホスト PC には Ubuntu が OS としてインストールされ、Python プログラム開発環境上にて、Vim4 にはカメラ画像分析（二値化／深層学習／AR マーカー認識）、位置・姿勢算出及びデータ送信アルゴリズムが構築され、ホスト PC には各組込装置の位置・姿勢及び画像分析結果データが周期的に送られ、それら全てのデータからリアルタイム 3D 位置算出を行うアルゴリズムを構築している。特に、第 2 次システム試作では各組込装置に AR マーカーを搭載することで、初期設置 3 台以外の新規設置位置・姿勢の自動登録（図 3.1-4）を可能にしておき、3D 位置測位空間の拡張を実現している。また、令和 6 年度に東大の UWB システムとの統合仕様の検証として、独自に UWB DWM1001 システムとの連携機能も構築し、基本的なリアルタイム 3D 位置測位を実現している。



図 3.1-1 第1次システムの検証の様子



(a) 基礎精度検証用システム



(b) 実証検証用・初期設置型 3 台



(c) 実証検証用・追加設置型 3 台



(d) 実証検証用・ホスト PC

図 3.1-2 第2次システムのハードウェア構成

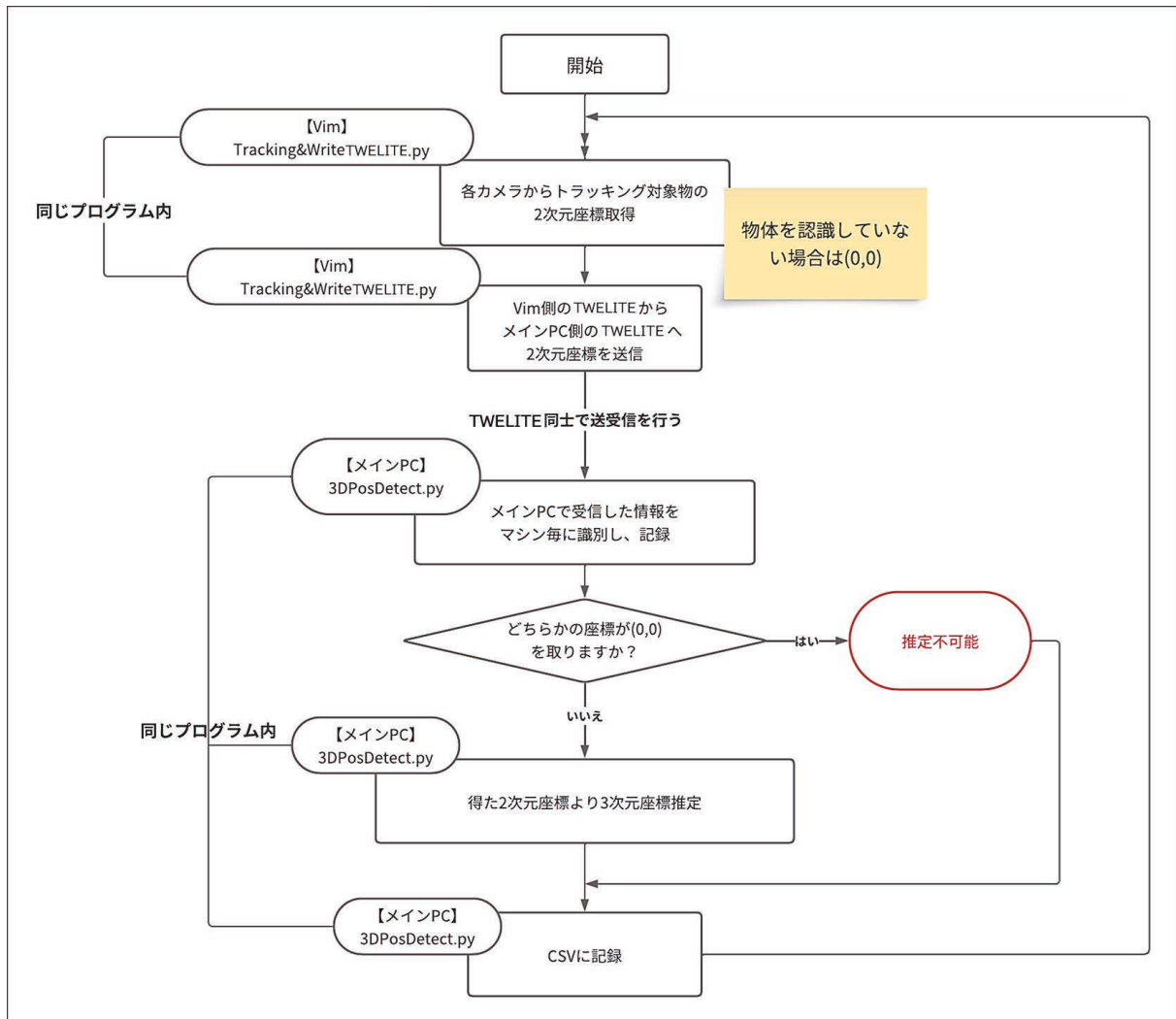


図 3.1-3 第2次システムのソフトウェア構成

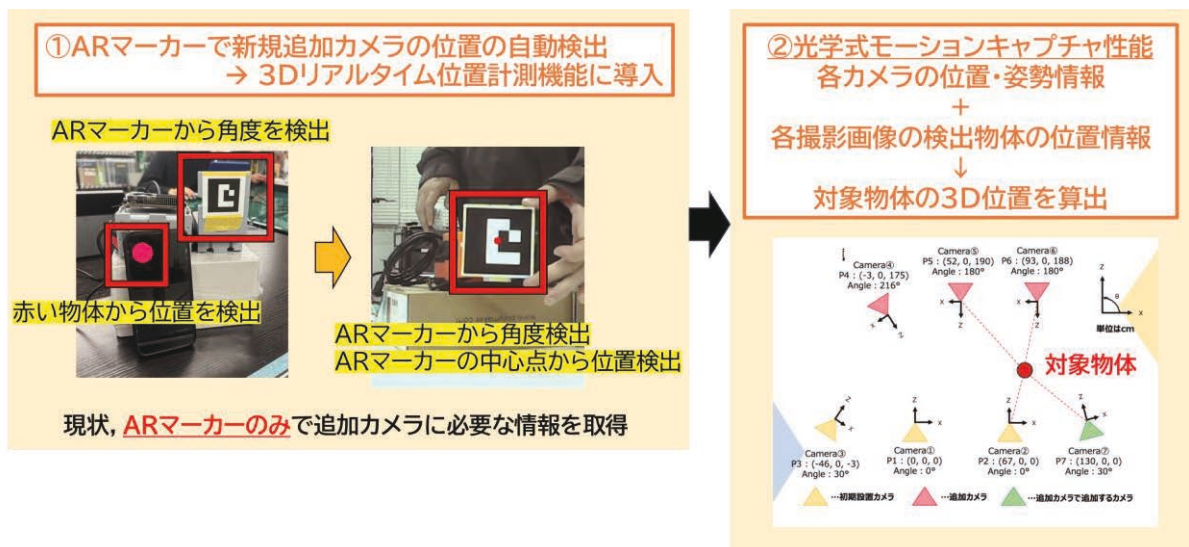
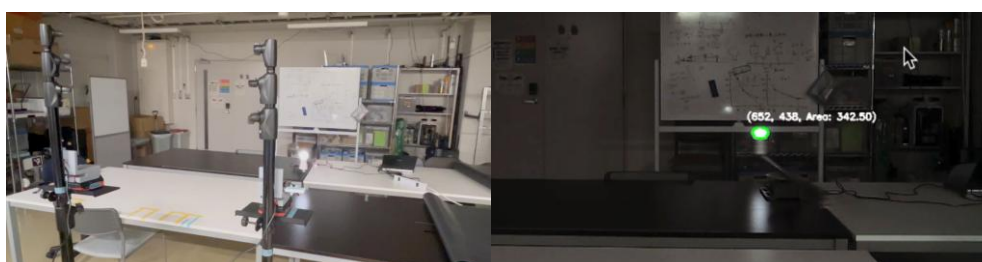
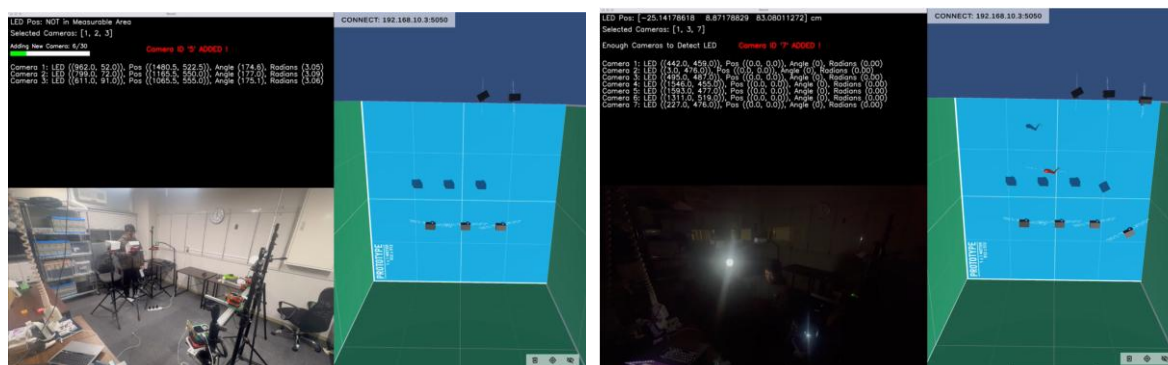


図 3.1-4 第2次システムの「AR マーカーを用いた新規・組込装置の自動位置登録」機能

第2次システムの実証検証については、オフィス環境及び模擬環境での実証検証を行った。まずオフィス環境においては、組込装置2台を用いた移動体に対するリアルタイム3D位置精度の検証(図3.1-5(a))、組込装置の初期設置3台から新規に組込装置4台の自動登録・計測範囲拡大検証(図3.1-5(b))、組込装置7台を用いた対象物のリアルタイム3D位置検出精度検証(図3.1-5(c))を行った。結果として、移動体0.5 m/sに対する認識が有効であり、初期設置3台から新規4台を追加して計測範囲を増やせることも確認、最終的に表3.1-1に示すように、10 cm精度でのリアルタイム3D位置計測が可能であることを示した。次に、パイプが乱雑に配置されている模擬環境で実験(図3.1-6)を行い、オフィス環境と同様に10 cm精度でのリアルタイム3D位置計測が可能であることを確認した。また、UWBによるリアルタイム3D位置計測も簡易試行し、10 cm精度での計測が可能であることを確認した。



(a) 移動体 (例: 0.5 m/s) の認識



(b) 初期3台からの新規・組込装置の登録 (c) リアルタイム3D位置測位<暗所光源認識>

図3.1-5 オフィス内での精度検証

表3.1-1 オフィス内での精度検証結果

ID	Angle (測定値)	Angle (実際)	Angle (誤差)	Position (測定値)	Position (実際)	Position (誤差)
1	0	—	—	(0, 0, 0)	—	—
2	0	—	—	(67, 0, 0)	—	—
3	30	—	—	(-46, 0, -3)	—	—
4	214.6	216	1.4	(0.5, -4.9, 182.0)	(-3.0, -2.5, 175.0)	(3.5, 2.4, 7.0)
5	177.6	180	2.4	(59.0, -5.2, 191.4)	(52.0, -2.5, 190.0)	(7.0, 2.7, 1.4)
6	176.8	180	3.2	(101.0, -4.5, 188.8)	(93.0, -2.5, 188.0)	(8.0, 2.0, 0.8)
7	27	30	3.0	(123.8, 11.0, -1.5)	(130.0, 7.0, 0)	(6.2, 4.0, 1.5)

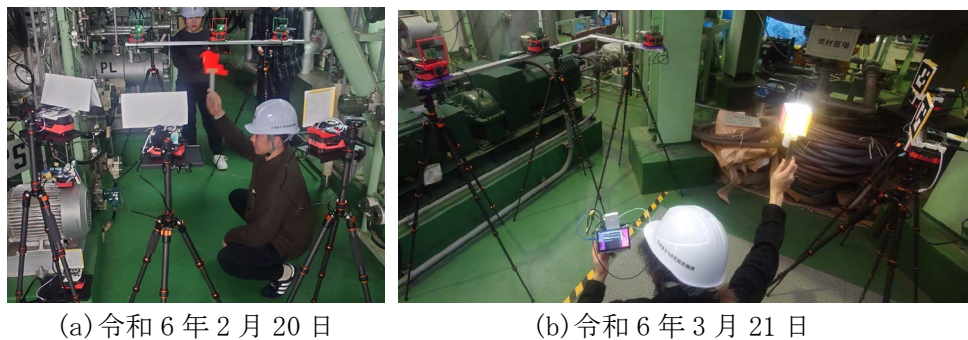


図 3.1-6 模擬環境（東海村施設）における実験の様子

3.1.3 まとめ

令和 5 年度は、第 1 次システムの検証の結果を受け、目的に適合した上で、拡張性能を有する要素で第 2 次システムを開発した。その結果、カメラ画像分析に基づく物体認識（組込装置と対象物体の位置検出）、各組込装置とのネットワーク通信、ホスト PC で新規組込装置の自動認識による計測範囲拡大、対象物体のリアルタイム 3D 位置検出が可能であることを例証した。その上で更なる技術改善点として、カメラのレンズ（視野角）・分解能の調整、暗所では AR マーカー認識が困難であったことに対する改善、本実験では三脚を利用しているため環境に簡単設置できるケースの改良が必要であることを確認した。

3.2 無線 UWB を用いたリアルタイム 3D 位置測位手法の開発（再委託先：東大・麗澤大）

【令和 4 年度～令和 5 年度】

3.2.1 信号強度とレンジデータの解析によるマルチパス環境下での測位アルゴリズムの改善

【令和 4 年度～令和 5 年度】

【令和 4 年度までの概要】

令和 4 年度は、UWB デバイスの仕様書から取り出せる信号の種類や出力構造などを検討し、ファームウェアの改良を行い、計測データ CIR (Cumulative Impulse Response) を記録できるようにした。

【令和 5 年度実施内容及び成果】

(1) マルチパス環境下の信号と CIR

電波信号により正しい距離を測定するためには、最初に到達する信号 (first path) を計算する必要がある。屋内環境下での電波信号の伝播の特徴は、散乱、回折のほか、床や天井、障害物などからのマルチパス（複数の反射波）の影響が大きい（図 3.2-1）。そのため UWB デバイスを使った計測では、マルチパスの影響を把握するため CIR を計測した。CIR は、信号が最初に到達する直接波 LoS (Line of Sight) やそれに続く反射波、散乱波などの遅延波が含まれ、信号の伝播状況、各経路での反射、散乱、障害物の回折などの影響を見ることで、通信システムの性能を分析することができる。特に CIR は、信号の伝送路における時間経過に対する周波数応答を示し、信号の波形の振幅や位相（時間の遅れ）などの時間的変化から反応の遅れを定量的に評価することができることから、マルチパスの影響度合いを算出し、その軽減手法の検討を行った。

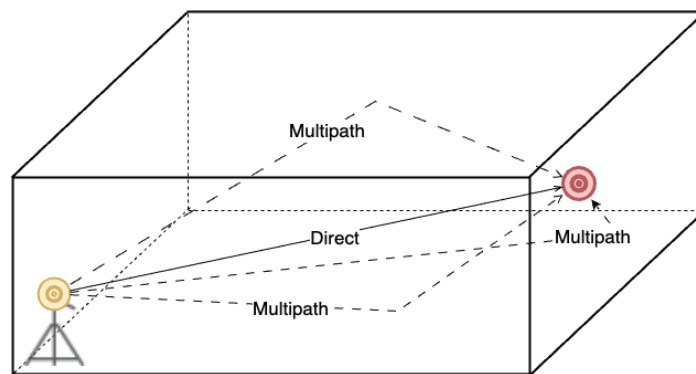


図 3.2-1 屋内空間のマルチパス概略

(2) 直接波と遅延波

タグと各アンカー間の距離は、最初に到達する信号を計算することで求められる。通常、最初に到達する信号が直接波であり、遅れて到達する信号は遅延波となる。また、最初に到達する信号の強度は、遅延波信号よりも大きい値を示す。この特徴をもとに、直接波を判別することでマルチパスがあっても直接波を検出できる。

(3) 直接波判別のための FW（ファームウェア）改善

UWB の FW は、マルチパスがあっても最初に到達する信号を選択するように設計されているが、直接波が減衰し回折や反射波の強度が大きい場合などは、直接波が正しく判別されない場合がある。計測環境に合わせて判別する信号の閾値を検討し、このような誤判別を少なくする必要がある。適切な信号閾値はプリアンプル長 PL（Preamble Length）とパルス繰り返し周波数 PRF（Pulse Repetition Frequency）を変更することで求められることがわかった。これらのパラメータを変更して計測ができるように、FW を改善した（図 3.2-2）。そして、試験計測結果から以下のことがわかった。

- ・ マルチパス環境では PL は高い方がよい。
- ・ PL を高くする場合、PRF も高くする必要がある。
- ・ 日本国内の電波法規制に適合する 8 GHz 帯（Channel 9）を選択（DW3000CDK シリーズ）。
- ・ スクランブル・タイムスタンプ・シーケンス（STS）は、オプションで使用する。
- ・ 他のパラメータは、データ転送にセキュリティが必要な場合（IEEE802.15.4z で定義）に使用される。

FW の直接波信号と遅延信号を識別し、直接波信号から信号ピーク電力を識別するアルゴリズムの中で、信号レベル閾値はモジュールメーカーにより 12 dB に固定設定されている。このため、これまでの計測試験、フィールドテストはこのデフォルト値で行われている。マルチパスの影響が大きい環境下で直接波を正しく検出する（計測精度を高める）ためには、今後、信号レベルの閾値の変更も検討する。

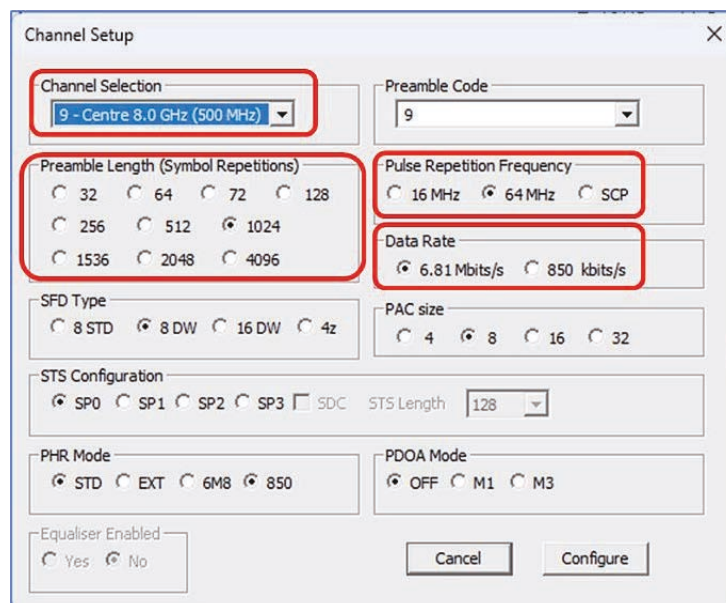
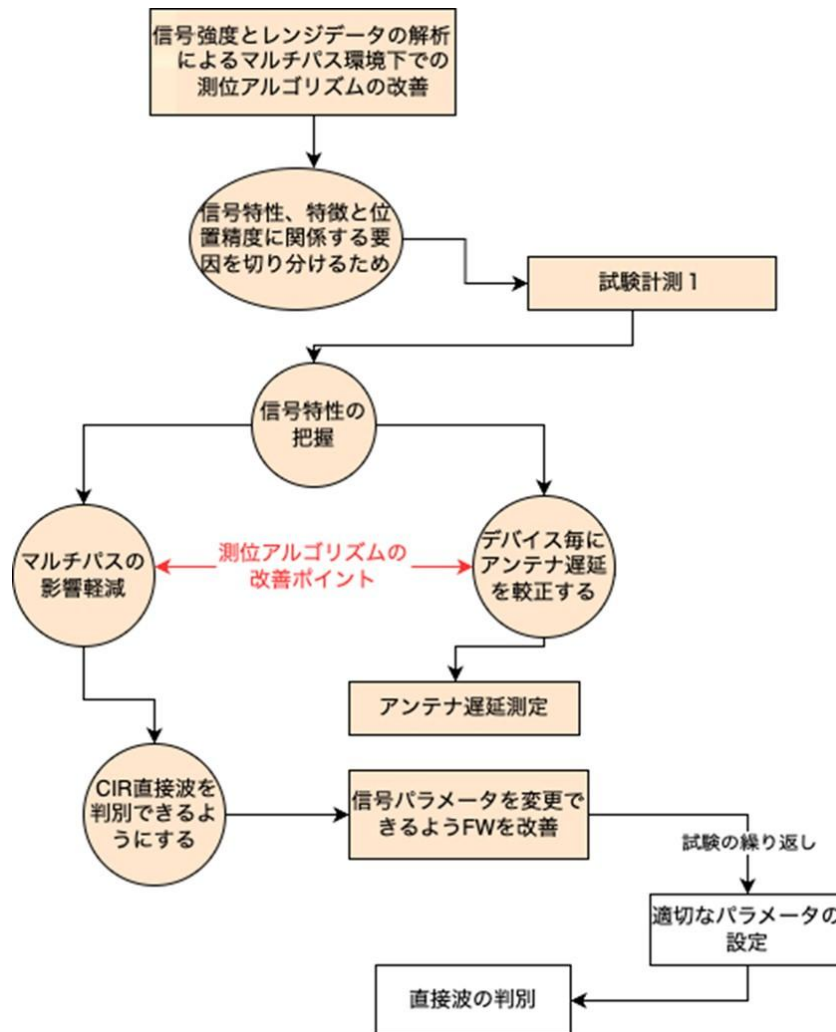


図 3.2-2 FW のパラメータ設定

3.2.2 まとめ

実証検証データから、図 3.2-3 に示すフローで信号特性とその計測方法、測位精度の影響を及ぼす要因を切り分け、その要因別に精度向上につながる手法を検討し、マルチパスの影響を軽減する計算アルゴリズムを改善した。



(デバイス毎のアンテナ遅延に関しては、3.3 節で説明)

図 3.2-3 測位アルゴリズム改善フロー

3.3 無線UWBを用いたリアルタイム3D位置測位システムの開発と実験・改良（再委託先：LM）

【令和4年度～令和5年度】

3.3.1 プラントライクな環境を再現し、多数のUWBデバイスを配置して位置精度を解析するフィールド実験【令和4年度～令和5年度】

【令和4年度までの概要】

令和4年度は、東大・空間情報科学研究センター研究棟ラウンジにおいて、位置精度の実験的な解析を行うために、UWBデバイスを使用した測位精度の検討とUWBアンカーの配置と設置の方法をフィールド試験により検証し、改良を行った。

【令和5年度実施内容及び結果】

(1) CIR試験計測（東大・空間情報科学研究センター研究棟ラウンジ）

信号特性、特徴と位置精度に関する要因を切り分けるためのCIR試験計測を行った。デバイスの1つをアンカー（青）に、2つをタグ（緑と赤）に設定した。タグ（赤）は反射信号を捉えるよう水平設置した（図3.3-1）。計測は、信号パラメータの設定を以下のように変えて行った。

- ・ PL : 128、1024、4096
- ・ PRF : 16、64 MHz

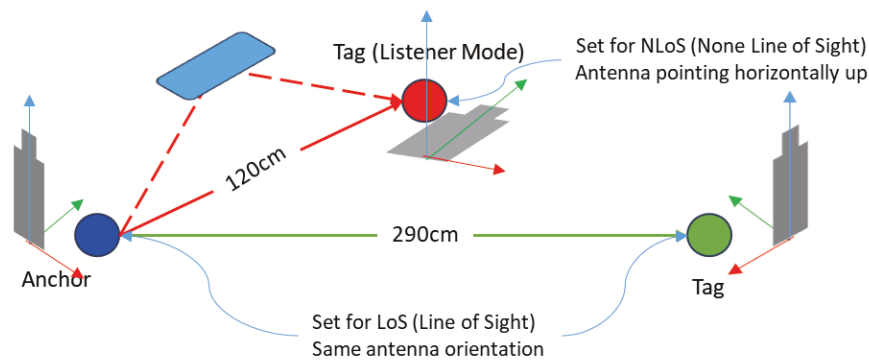


図 3.3-1 位置精度に関する要因分析のための試験計測の概略

赤色は複数のピークを持つ反射信号（非直接波）を、緑色、青色は直接波を示している。相対時刻 750 nsec 付近のピーク信号で、これら 3 波の分離が大きいことが望ましい。その結果、PL : 1024 または 4096、PRF : 64 MHz の組合せが、CIR データで反射信号の最初のパス（赤色）を識別するのに適していることがわかった。しかし、垂直方向のアンカー（青）とタグ（緑）については、どちらも機器間の視認性があることから直接波であるため、PL を高くしても信号に大きな違いは見られなかったが、マルチパスの激しい環境では、PL と PRF を高くした方が良い結果が得られる可能性があると考え（図 3.3-2）。PL と PRF が高いほど、遅延信号の CIR ピークが明確になる。PL と PRF が低いと、CIR ピークが平坦になり、ノイズの多い環境ではピーク信号を正しく識別することが難しくなる可能性が考えられた。このため、最適なパラメータ設定を選択するために、実際のプラントに似た空間環境 Large Scale Test Facility (LSTF) でのフィールドテストでの計測試験を行った。なお、令和 6 年度には、電波暗室での計測試験も予定している。

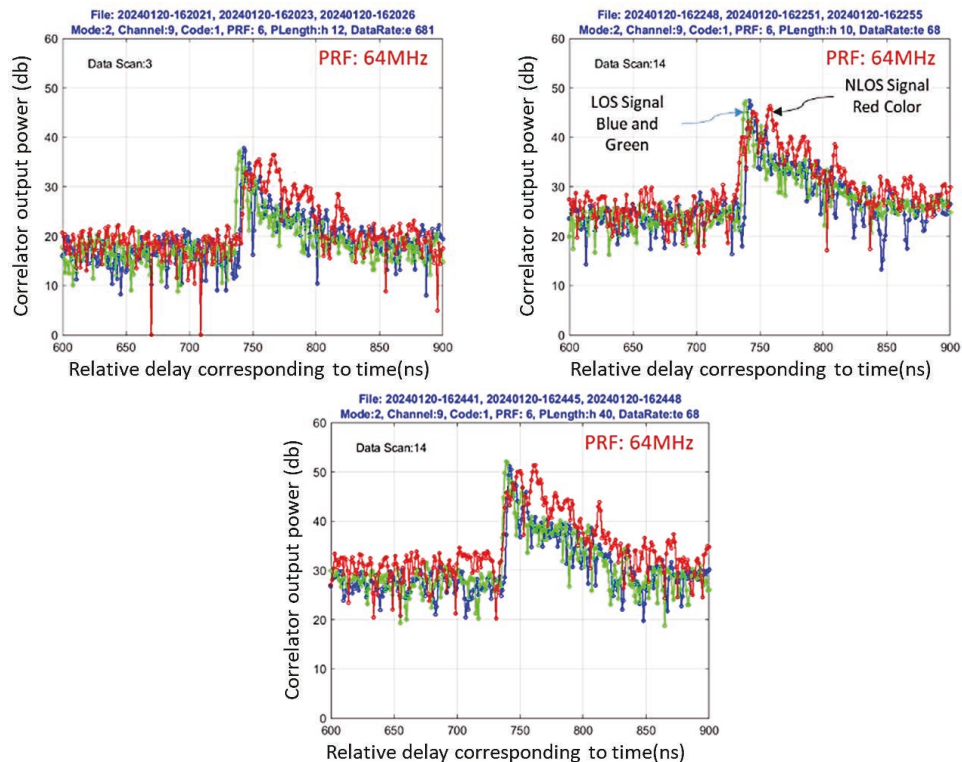
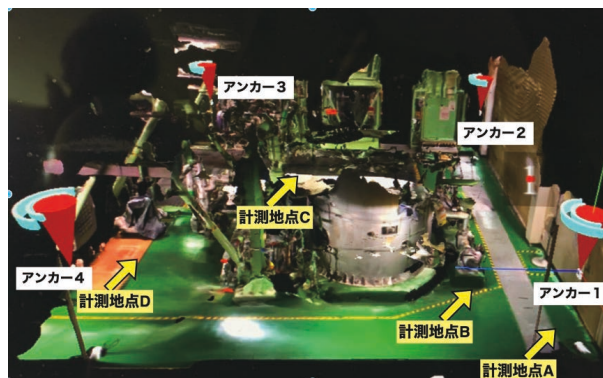


図 3.3-2 CIR データで見る直接波と遅延波の遅延状況 (PL と PRF の組合せ別)

(2) プラントライクな環境での試験計測 (原子力機構・大型非定常ループ実験棟：LSTF)

実際のプラントの状況に近い LSTF において、一階の一部エリアに 4 つのアンカーを設置 (図 3.3-3(a)) し、アンカーに囲まれた範囲内数箇所でタグ位置を測定し、開発したデバイスと計測システムの動作確認を行い、タグ位置の精度解析を行った。LSTF は、4 つのアンカーに LoS を持つことはかなり難しい空間である。タグが測位を行うためには、少なくとも 3 つのアンカーとの距離が必要であり、位置精度を高めるためには、アンカーとの見通しが確保され直接波を受信できるが必要となる。

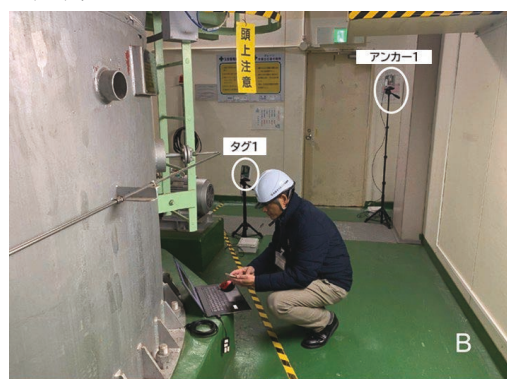
4 つのアンカーデバイスの設置は、三脚を用いて床から 120 cm の高さで、約 8 m の正方形の配置とした。計測地点 A は、アンカー 1 の前 (図 3.3-3(a))。計測地点 B 付近は、少し距離を開けた 2 箇所の位置を計測した (図 3.3-3(b))。計測地点 C 付近も、少し距離を開けた 2 箇所の位置を計測した (図 3.3-3(c))。位置計測では三脚にタグを設置し、数分間の座標を記録した。また、試験時には現場を事前に簡易撮影した 3 次元画像を背景に表示させ、計測位置をリアルタイムで確認した。測定値には非常に大きな誤差を示すデータがあったが、これらは外れ値フィルター (位置誤差 > 100 m) で除去した。計測地点 A と B における水平方向の位置のバラツキを図 3.3-4 に示す。計測地点 C と D の Y 軸で高さ方向のバラツキを示す。測定精度は X-Y 方向で約 20~30 cm、Z 方向で 30~40 cm であった。この試験では、アンカー位置の座標取得を事前撮影した 3 次元画像から求めたが、3 次元画像の幾何補正精度を検証できなかった。アンカー座標の計測精度を高めることで、タグの測位精度は向上するため、今後はアンカー座標の計測精度を検証した上で試験を行う必要がある。



(a) アンカー設置位置と計測地点



(b) 計測地点Cとアンカー位置の状況



(c) 位置計測地点B（画像左に障害物）

図 3.3-3 LSTF 試験計測エリア設定

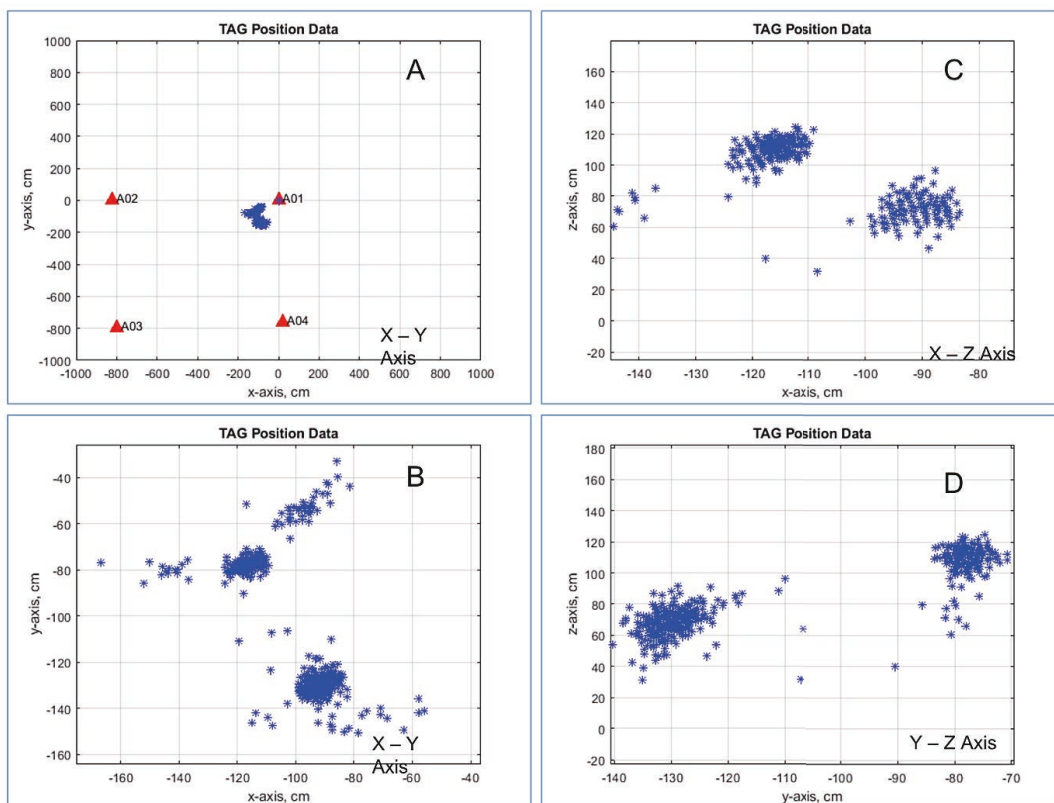


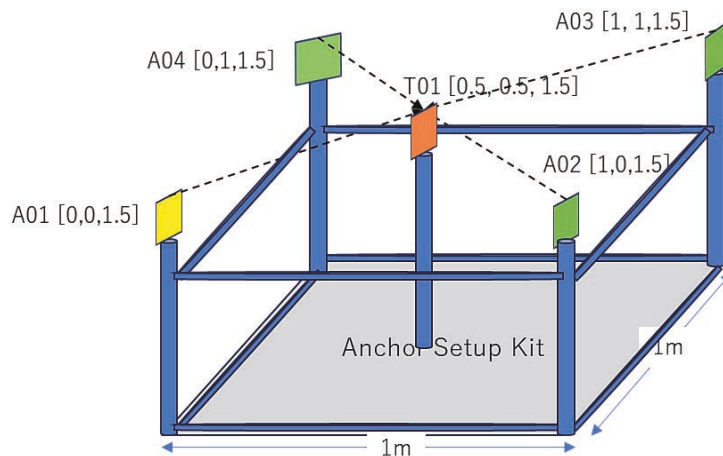
図 3.3-4 計測された位置座標のバラツキ（地点A、B、C、D）

3.3.2 アンカーを迅速に展開し、校正するための方法論の開発【令和5年度】

UWB 信号を利用した測位計算では、3 つ以上のアンカーとタグの間の距離をもとにして、タグの位置座標を計算する。タグの位置座標を求めるには、アンカーの座標が事前に把握されている必要がある。UWB システムの評価キット (DECAWAVE DWM1001) には、アンカーを自動展開するための Android API が搭載されている。しかし、このアルゴリズムの精度は 10~30 cm 程度と低く、適切な測位精度を確保することができなかった。さらに、このプログラムの API ソースが非公開であるため、モジュールのファームウェアのバージョンアップに伴い、このアルゴリズムを対応させることができなかった。そのため、異なる場所の状況に応じて選択できるように、アンカーの位置座標を把握するための新しい手法を 3 つ開発した。

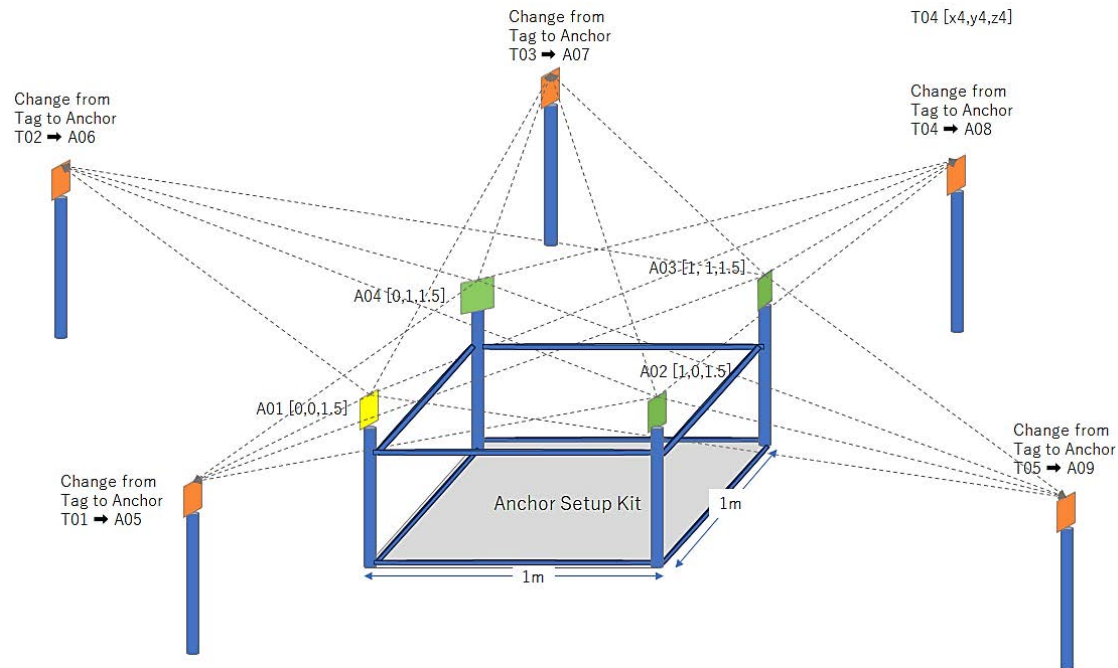
(1) アンカーセットアップキット ASK (Anchor Setup Kit) 方法

- ① 簡易フレーム (1 m×1 m) とポール (1.5 m) 4 本で構成される「アンカー設置キット」を準備する。ポールの先端に UWB デバイスをアンカーモードで仮アンカーとして取り付ける (図 3.3-5(a))。
- ② 仮アンカーの 1 つを A01、座標 $[x=0, y=0, z=1.5]$ のプライマリ・アンカー (原点) とし、ポール間の距離は既知 (一定) であることから、各アンカー (A02、A03、A04) の相対的な座標を求める。
- ③ プライマリアンカーの座標を手動で設定する (PC と USB 接続)。
- ④ プライマリアンカーから UWB 通信で各仮アンカーの座標を割り振る。
- ⑤ 4 つの仮アンカー座標を設定したアンカー設置キットを計測場所に仮置きする。
- ⑥ 測位対象範囲にアンカーとなるデバイスを設置する。デバイスはタグモードに設定する。
- ⑦ UWB の測距機能を使いアンカーセットアップキットの仮アンカーとタグとの距離をそれぞれ計測し、その距離と仮アンカー座標から各タグの座標を算出する (図 3.3-5(b))。
- ⑧ タグをアンカーモードに変更し、プライマリアンカーから UWB 通信で各アンカーの座標を割り当てる。
- ⑨ 計測場所からアンカーセットアップキットを取り除く。



(a) 仮アンカーセットの構成

図 3.3-5 アンカーセットアップキット方法の概念図 (1/2)



(b) 最終構成

図 3.3-5 アンカーセットアップキット方法の概念図 (2/2)

(2) 平面図利用方法

計測対象場所のフロアマップ（平面図）が利用できる場合は、フロアマップを使用してアンカーを設定することができる。

- ① 測定対象空間フロアマップ上で同定できる位置にアンカー（複数）を設置する。
- ② フロアマップをデジタル画像化（3次元データ、推奨 GLB フォーマット）し、その画像上にアンカー位置を標定する（任意の3次元画像アプリケーションを使用）。
- ③ 画像上アンカーの1つをプライマリーアンカーとして座標 $[x=0, y=0, z=1.5]$ （原点）とする。
- ④ 他のアンカー座標を3次元画像から自動的に求める。
- ⑤ 設置したプライマリーアンカーの座標を手動で設定し、UWB通信で各アンカーの座標を割り当てる。

(3) 3次元スキャン画像利用法

計測対象場所空間を事前に3次元スキャンできる場合、その3次元画像を利用してアンカー設定ができる。

- ① 対象空間にアンカー（複数）を設置する。
- ② LiDAR センサーなどによる3次元計測によって対象空間の3次元データ（推奨 GLB フォーマット）を作成する。
- ③ 3次元画像上で標定されるアンカーの1つをプライマリーアンカーとして座標 $[x=0, y=0, z=1.5]$ （原点）とする。
- ④ 他のアンカー座標を3次元画像から自動的に求める。
- ⑤ 実際に設置したプライマリーアンカーの座標を手動で設定し、UWB通信で各アンカーの座標を割り当てる。

3.3.3 UWB モジュールと IMU、Wi-Fi、Bluetooth などのセンサーを統合した新しい UWB デバイスの開発【令和 5 年度】

(1) UWB デバイスの概要

開発 UWB デバイスは、リアルタイムに高精度な屋内測位データを出力するほかに、設置（設置に要する時間の制約）、運用（少ない操作）、保守（少ないバッテリー交換頻度）などが求められている。これらの機能要件に近づけるために、デバイスの開発を行った（図 3.3-6）。

測位精度に関連する主要な要因として、UWB 信号の内部処理方法を検討・改良した。主にマルチパスの影響を軽減させるために、適切な信号を判別して処理する手法の開発が必要である。このために必要な信号を取り出し、Bluetooth でスマートホンへ転送し、そこからクラウドへデータを送り、データの状況を確認するデータモニタリングシステムを開発した。これによりデバイスからデータを取得し、空間の環境による信号状況の違いを把握できるようになり、FW で処理できる内容を確認し、試験用に信号パラメータを変更ができるように、また処理アルゴリズムのパラメータを変更できるよう FW の開発を行った。Bluetooth でデータ転送を行うため、消費電力の多い Wi-Fi によるデータ転送は行わない。また、アンカーデバイスの位置座標が重要な要因の 1 つであることから、アンカー座標計測の手法について改善を行った。その中で、アンテナ内部の回路で生じる信号の遅延の影響を調整（校正）する必要性を見つけた（calibration デバイス毎に必要）。デバイスの運用面からは、アンカーデバイスの設置方法を検討し、設置からその位置計測、座標設定が簡易になる手法を開発した。保守面からは、放射線下で使用できるバッテリーを選定し、長期運用ができるようにバッテリー容量と稼働時間の関係を調べた。また、バッテリー交換時にアンカーの位置が変わることがないようにセンサー本体と分離したバッテリー構造とした。

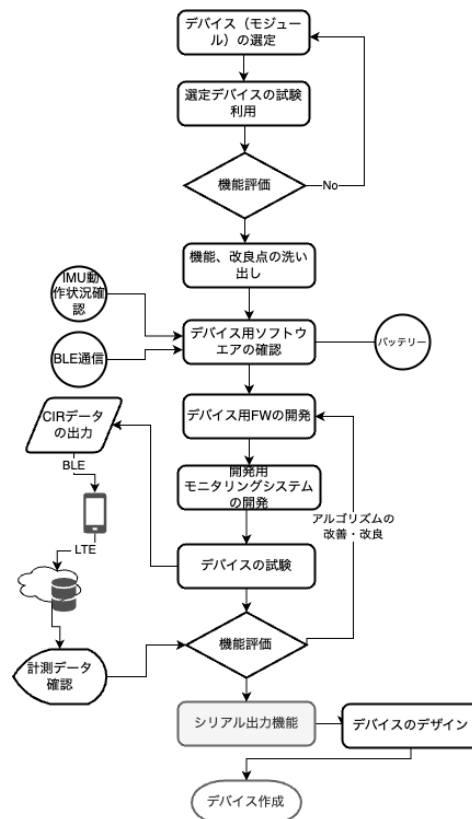


図 3.3-6 測位システムのための UWB デバイス開発フロー

(2) UWB デバイスの詳細

これまでに DWM1001、DWM3000、DWM3001CDK を使用してフィールド試験検証を行った上、これらの中で日本国内電波法の技適（技術基準適合証明）を取得している Qorvo 社製の DWM3001C モジュールを搭載した UWB デバイス DWM3001CDK を選択し、システム開発を行った（図 3.3-7）。DWM3001CDK は、技適に適合する UWB RF チャンネル 5（6.5 GHz）と 9（8 GHz）を利用できる。このボードには、SoC BLE 5.2、FPU 付き 64 MHz Arm Cortex-M4、512 KB フラッシュ、128 KB RAM を搭載したマイクロコントローラー nRF52833 が搭載されており、UWB チップ・アンテナと BLE チップ・アンテナもモジュールに含まれている。また、図 3.3-8 に UWB DWM3001CDK デバイスの詳細を、図 3.3-9 に UWB RTLS システムの構造を示す。

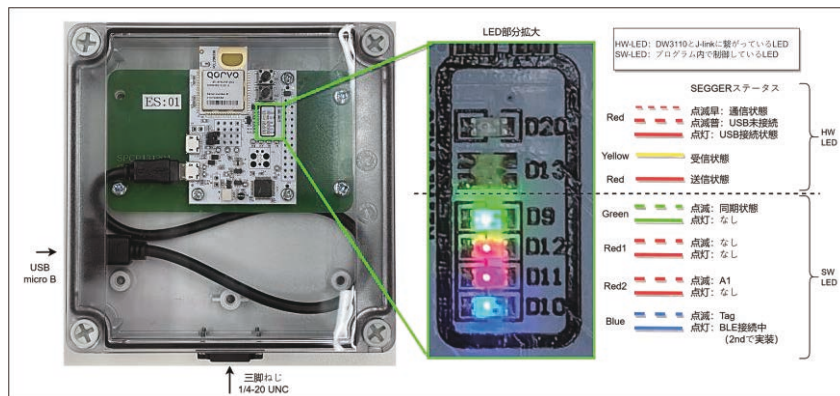


図 3.3-7 開発した UWB デバイス外観

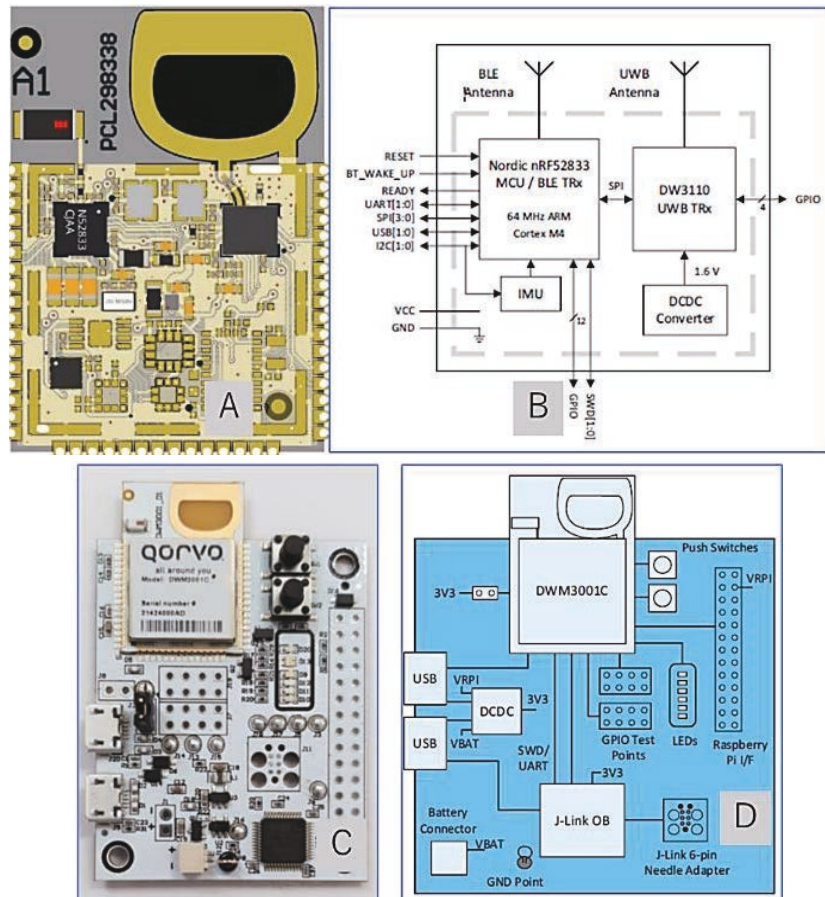


図 3.3-8 UWB DWM3001CDK Device

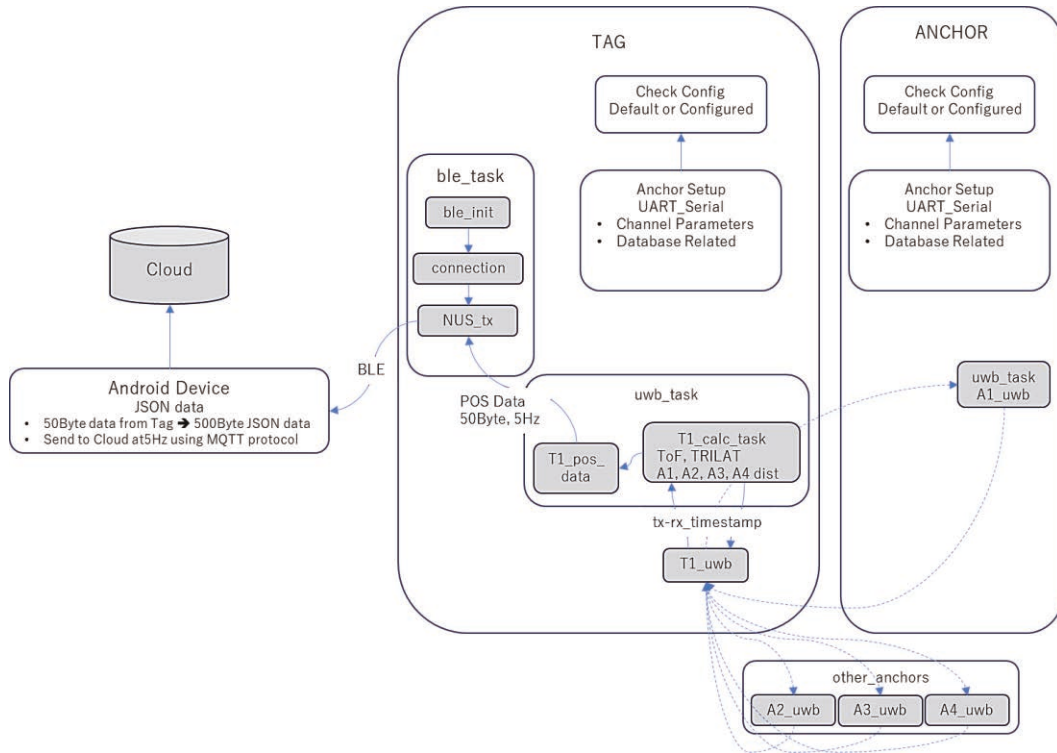


図 3.3-9 UWB RTLS システムの構造

(3) UWB デバイスにおける FW レベルの実装手順

デバイスセットアップで初回のみ、図 3.3-10 に示す手順で FW 書き込みが必要となる。

- 1) デバイスと PC を USB で接続し、J-Flash Lite を起動してデバイス「nRF52833」「SWD」「4000 kHz」を選択、FW のファイルを指定。2) 「Program Device」を選択し FW を書き込む。
- なお、「Erase Chip」を実行すると、アンテナディレイの設定値が初期化されるので、調整済みの場合は要注意である。また、複数同時接続している場合は順番に書き込む必要がある。

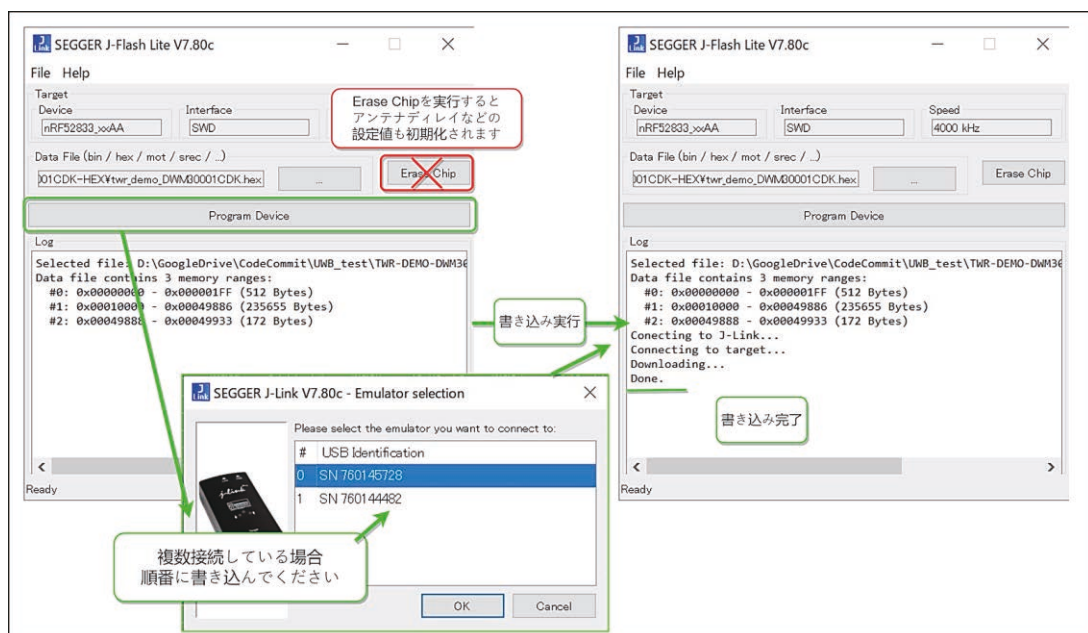


図 3.3-10 FW 書き込みによるデバイスセットアップ画面

(4) Tag・Anchor 設定のためのコマンド入力

Tag・Anchor の設定を行うためには、シリアルターミナルソフト（Tera Term）を通して、UWB-Device のコマンド入力が必要となる。コマンド入力の遷移図を図 3.3-11 に示す。初期状態は「Idle_mode」で起動し、「anc」「tag」「trilat」「save」を送信すると次回起動時に同様の状態で起動することができる。また、具体的な手順を①～③にて下記に示す。

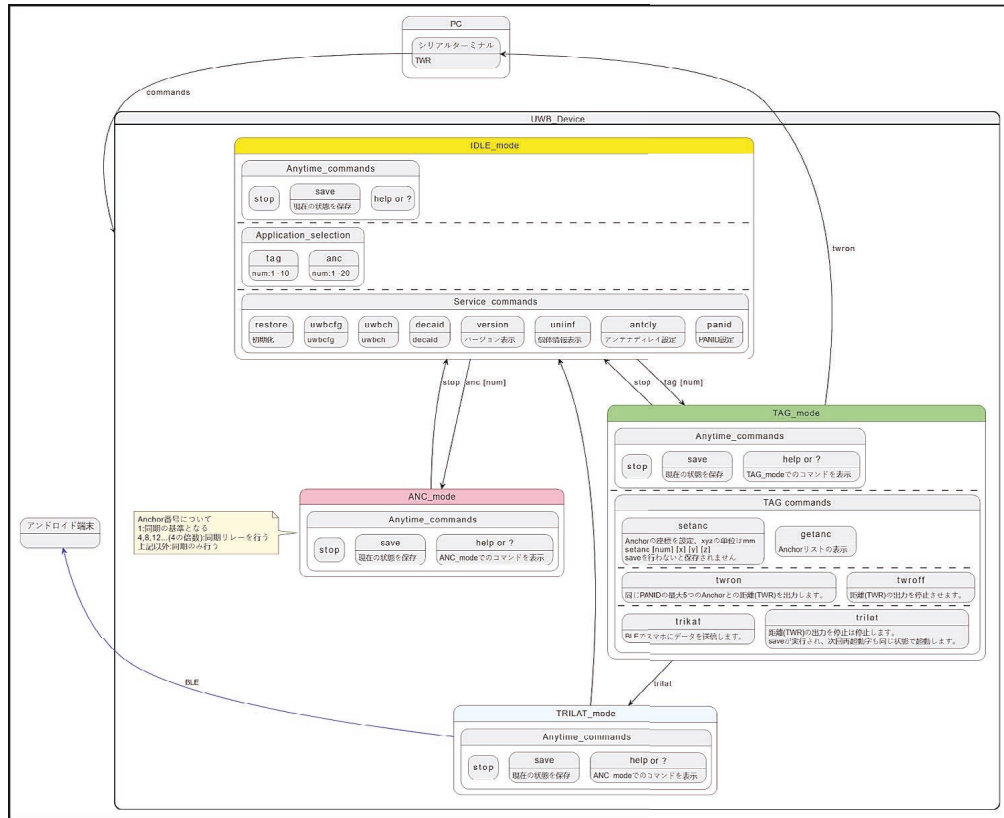
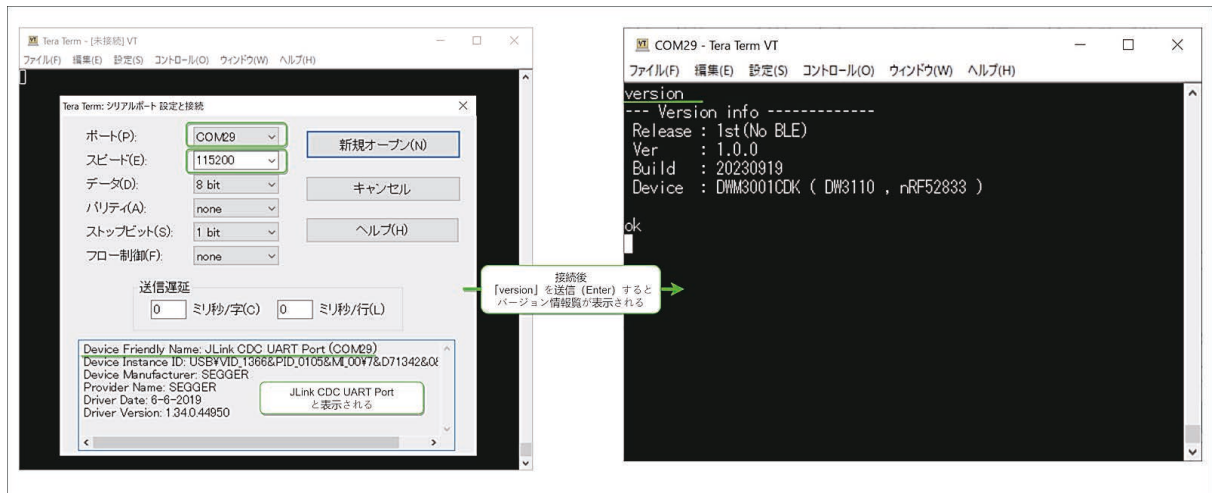
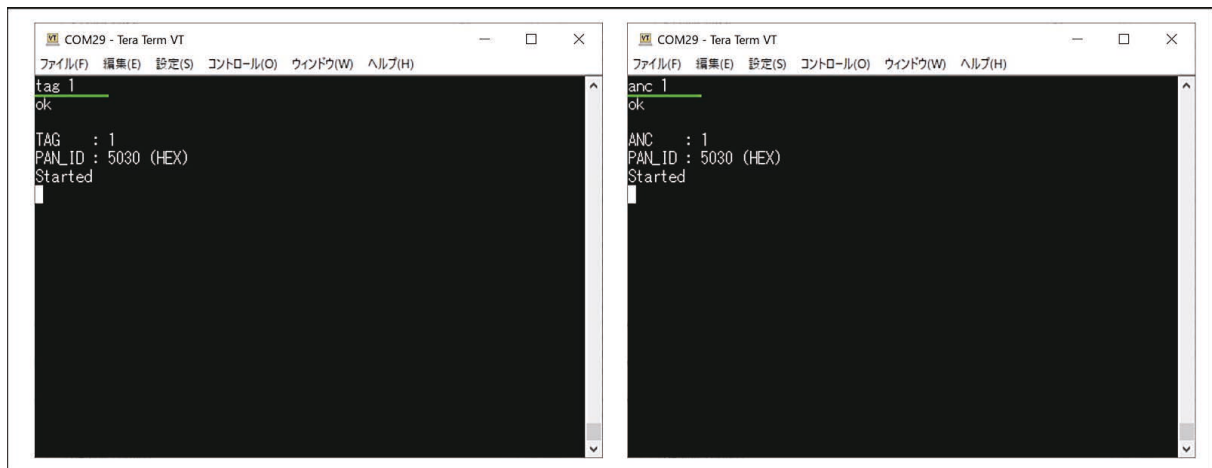


図 3.3-11 UWB-Device のコマンドの遷移

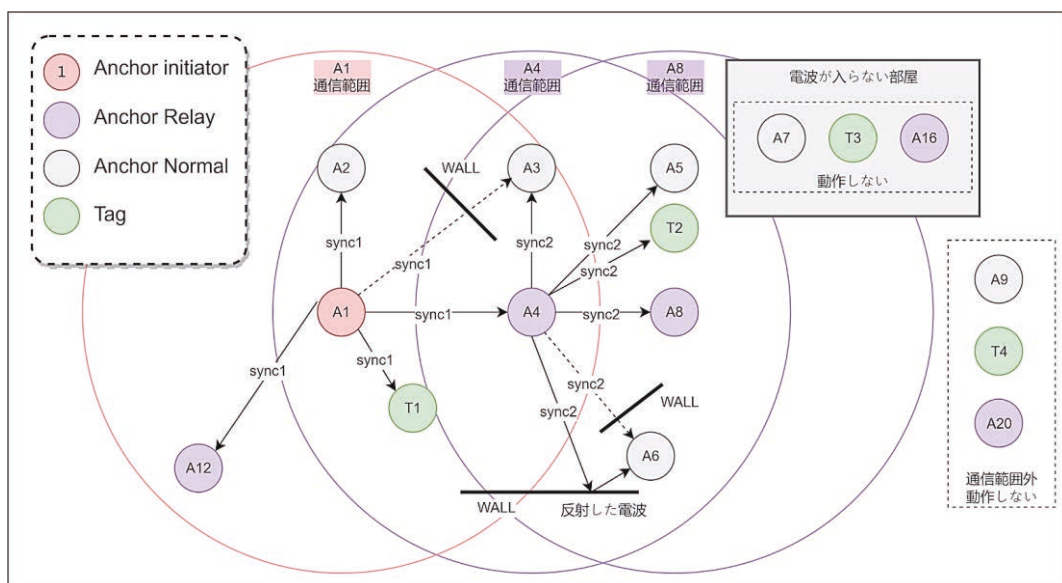
- ①「Tera Term」を起動して「設定」から「シリアルポート」を選択する。ポートからデバイス名「JLink CDC UART Port」を指定し、通信速度を「115200」に指定する。そして、接続後に「version」とコマンド入力すれば、バージョン情報が表示される（図 3.3-12(a)）。
- ②Tag・Anchor 設定は、「tag [num]」num: 1～10「anc [num]」num: 1～20 とコマンド入力すれば設定できる。なお、同じ役割・番号を設定すると RTLS は適切に動作しないので注意（図 3.3-12(b)）。
- ③同じ UWB ネットワーク内（同じ PAN ID）で Anchor を同期させるためには、A1 を基準として Anchor 設置作業を行い、同期させていく必要がある（図 3.3-12(c)）。広い範囲で同期を実現するため、4 の倍数の Anchor（A4、A8、A12、A16、A20）を使って同期リレーを行う。設置は UWB 通信範囲を考慮して配置する必要がある。なお、同期信号を受信できないと動作しないので注意が必要である。同期できているデバイスは緑色 LED が点滅する。図にデバイス状態に対応する LED の点灯パターンを示す。なお、全ての Anchor に同期リレーを実装していないのは、時間（5 Hz:200 ms）内で送信タイミングが限られるためである。また、Anchor の設置高さについては、座標計算として三角測量（Trilateration）を用いるため、Anchor の設置高さが同じ場合、高さ方向の精度は期待できない。高さ方向の精度を高めるために、アンカーの高さに高低差を設けて設置することが望ましい。



(a) ターミナル接続方法



(b) Tag・Anchor 設定画面



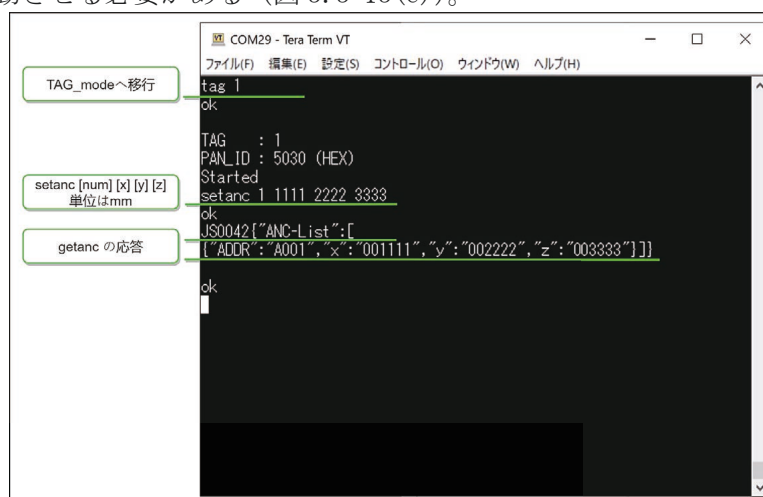
(c) Anchor 設置空間のイメージ

図 3.3-12 Tag・Anchor 設定プロセス

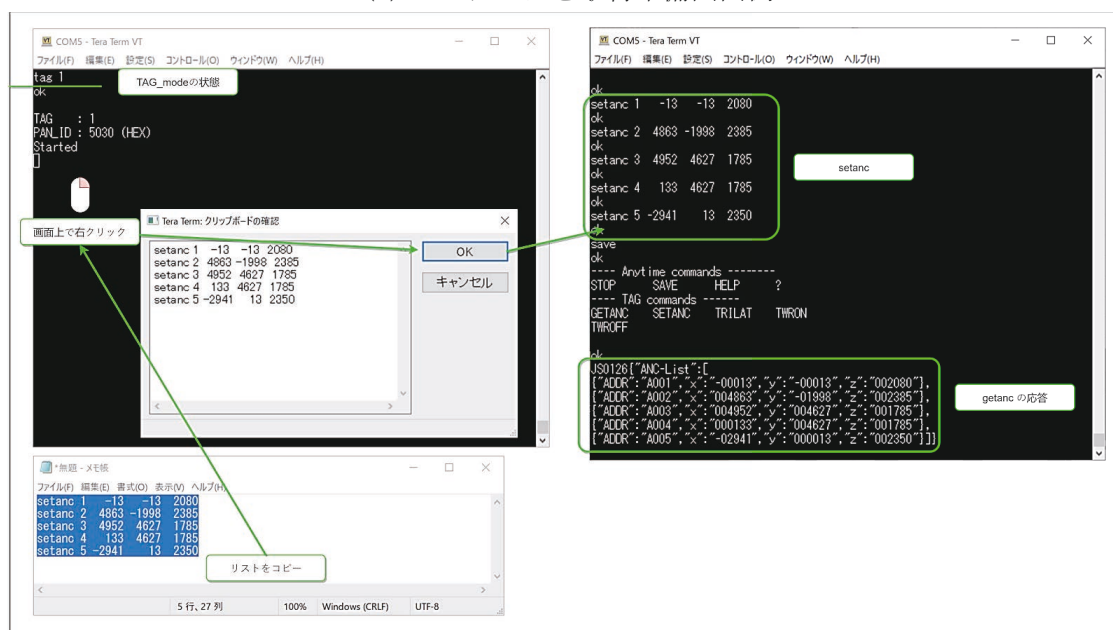
(5) 3D 位置データ取得方法

特定 TAG の 3D 位置データを取得するには、まずは Tag への Anchor リストの設定が必要であり、その後にスマホアプリで TAG データを取得が可能となる。具体的は以下の①～③のプロセスで進める。

- ① コマンド入力「TAG_mode」で「setanc [num] [x] [y] [z]」から TAG に Anchor の座標を登録することで、特定 Tag への Anchor リスト設定が可能となる。なお、xyz の単位は mm（ミリメートル）で int32 の範囲（[-2, 147, 483, 648]～[2, 147, 483, 647] getanc 表示は 6 桁）。なお、「save」「trilat」送信前の状態で再起動を行うとリストは初期化されるので気を付けること。また、間違った値を入力した場合は、再度入力することで上書きすることが可能である（図 3.3-13(a)）。
- ② データは、ターミナルソフト「Tera Term」に表示されるため、最も簡易的に記録するには、クリップボード機能での一括保存が可能である（図 3.3-13(b)）。
- ③ 「trilat」コマンドを送信することで BLE 通信を通してデータ取得が可能となる。なお、コマンド送信時にスマホアプリでは「UWB-RTLS-NO_SET」が表示される場合は、USB を抜き挿して再起動させる必要がある（図 3.3-13(c)）。

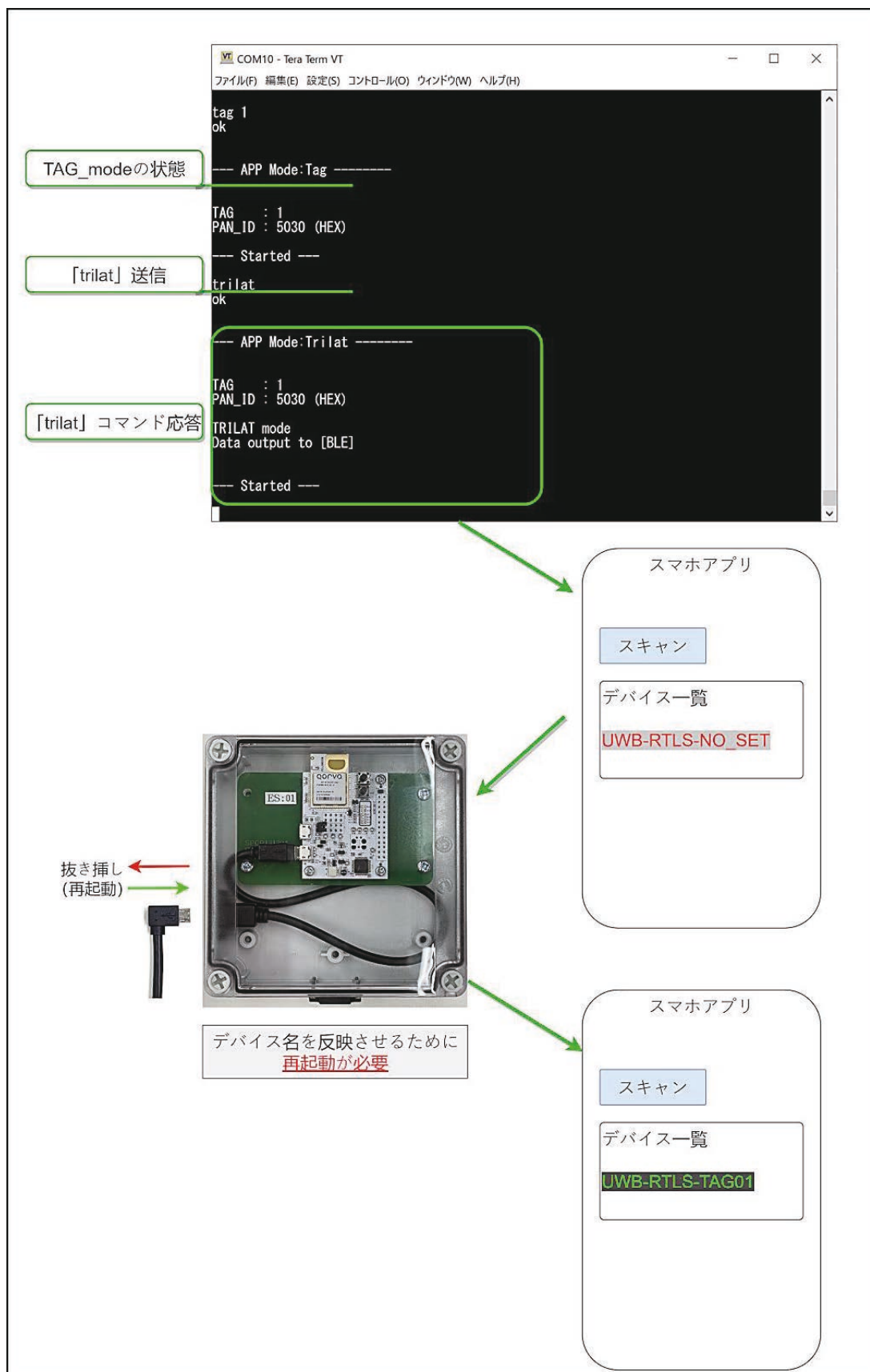


(a) TAG データを取得準備画面例



(b) ターミナルソフト・クリップボードを利用したデータ保存例

図 3.3-13 データ取得プロセス (1/2)



(c) 「trilat」 コマンドの送信例
 図 3.3-13 データ取得プロセス (2/2)

3.3.4 まとめ

令和5年度は、計測データを簡単に取得し、確認できるようにデバイスとシステムの開発を行った。そして、東大・麗澤大が開発したアルゴリズムの評価のために、実利用空間でのマルチパスの状況を想定し、LSTFで試験計測を行い、静止状態で30 cm～40 cm程度の位置精度のバラツキを確認した。さらに、この試験から位置精度をさらに向上させるための可能性がわかった。また、UWB測位に必要なアンカーの簡易設置に関連する手法も開発・改良した。令和6年度は、岐大が開発しているシステムと統合するため、位置情報を伝えるシリアル通信機能を実装するほか、デバイスから適切な計測信号を判別するパラメータを確定する予定である。

3.4 カスケード接続俯瞰画像方式位置計測の研究開発及び計測機器等の耐放射線性評価 (再委託先：福島高専)【令和4年度～令和5年度】

3.4.1 カスケード接続俯瞰画像位置計測【令和4年度～令和5年度】

【令和4年度までの概要】

令和4年度は、先行研究として福島高専で実施してきた高線量下での「俯瞰画像方式位置計測の研究開発」の成果をもとに、見通しの効かない場所でも位置計測できるように中継ロボットを配置して、中継ロボットに搭載した俯瞰カメラで対象ロボットの位置を計測するための「2段カスケード接続俯瞰画像方式位置計測」のシステム開発を行った(図3.4-1)。

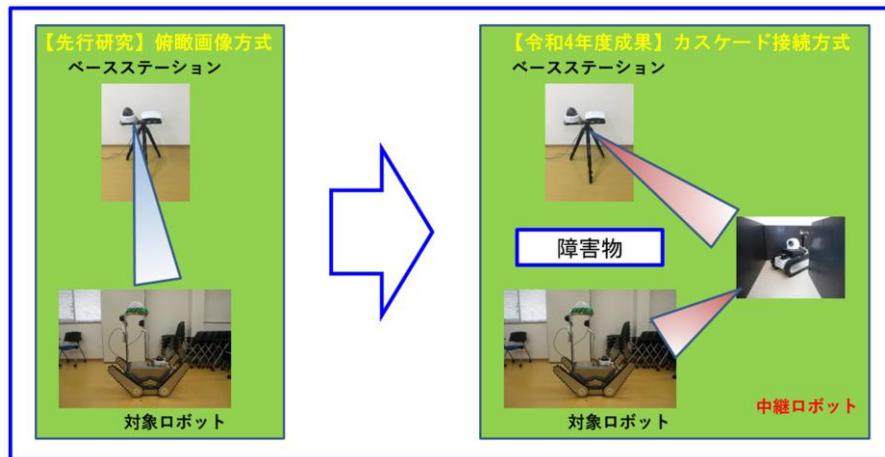


図 3.4-1 2 段カスケード接続俯瞰画像方式位置計測システム

【令和5年度実施内容及び成果】

令和4年度に試作したカスケード接続用中継ロボットシステムを用いて、障害物があり、ベースステーションから対象ロボットを直視できない模擬環境下で、2段カスケード接続俯瞰画像方式位置計測・第1次試験(図3.4-2)を行った。その結果、中継ロボットがベースステーションから2～3 m 離れると、ベースステーションのカメラで中継ロボットのマーカの姿勢(向きの角度)を認識できなくなる現象が発生した。カメラ画像を処理して頂点の角度を計測していたが、検討の結果、カメラとマーカの距離が離れると頂点部分を捉えているカメラ画像上の画素数が少なくなり、正確に測れなくなるものと推定した。そのため、角度を直接計測するのではなく、縦方向の距離と横方向の距離を計測してその比から中継ロボットの姿勢(向きの角度)を計測する方法を試すこととした。



図 3.4-2 第1次試験の状況

そのため、2次元バーコード型のマーカーを試作して、縦の距離と横の距離の比から、中継ロボットの姿勢（向きの角度）を算出する機能に変更し、2段カスケード接続俯瞰画像方式位置計測・第2次試験（図3.4-3）を実施した。その結果（表3.4-1）、ベースステーションから2～6 m程度離れた位置からでも、中継ロボットが正対（真正面を向いているとき以外の姿勢）向きの角度を $-8 \sim +1^{\circ}$ 、距離で $-0.07 \sim -0.22$ mの誤差とし、精度を向上することができた。

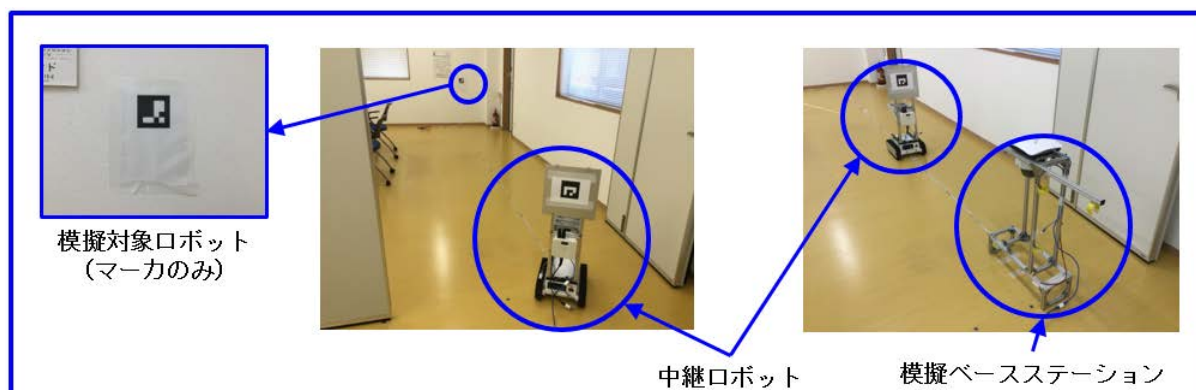


図 3.4-3 第2次試験の状況

表 3.4-1 第2次試験結果

計測地点	2m		4m		6m		
計測角度	距離[m]	角度[度]	距離[m]	角度[度]	距離[m]	角度[度]	角度平均誤差[度]
0度	1.93	-3	3.86	-6	5.78	10	6
15度	1.92	13	3.86	18	5.90	15	2
30度	1.94	26	3.85	24	5.92	31	4
60度	1.94	52	3.90	57	5.90	60	4
距離平均誤差[m]	0.07		0.13		0.13		

また、図3.4-4に示すように、小型クローラ型標準モジュール等の3段カスケード接続に必要な機器の整備を行った。令和6年度は、角度及び距離の誤差の原因を究明するとともに、3段カスケード接続試験を実施する。

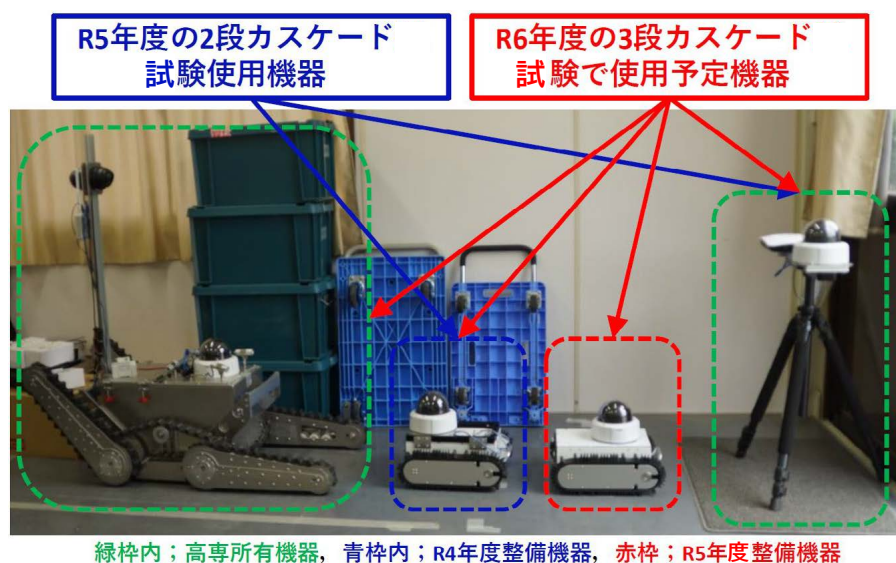


図 3.4-4 3段カスケード接続試験の機器整備状態

3.4.2 耐放射線性評価【令和4年度～令和5年度】

【令和4年度までの概要】

令和4年度は、岐大及び東大と連携して耐放射試験用電子部品のリストアップを行った。また、岐大・原子力機構と連携し、組込装置 Spresense 一式の耐放射試験を行った。

【令和5年度実施内容及び成果】

高速（高周波回路）素子や多層集積素子であるカメラ（固体撮像素子）、メモリ（MicroSD カード）などの Co-60 による照射試験を行った結果（試験詳細は 3.6.2 項を参照）、表 3.4-2 に示されるように、いずれも集積線量 100 Sv オーダー以上の耐放射線性を有することを確認した。

表 3.4-2 耐放射線性評価（照射試験）結果（青字：R4 年度，赤字：R5 年度）

種類	製品名	照射線量値[Sv]					
		60	120	180	240	480	720
Micro SD	TS32GUSD220I						
USB Camera	ELP	〇〇	〇〇	〇〇	××	××	××
Single Computer	VIM4	――	――	――	〇〇	〇〇	〇〇
Zigbee Board	TWELITE	――	――	――	〇〇	〇〇	〇〇
UWB Board	DWM3001CDK	――	――	――	〇〇	〇〇	〇〇

○：正常 △：異常兆候 ×：異常

この値は位置計測装置を作業員が装着し、原子炉建屋内での作業を 50 mSv（原子炉従事者の最大許容線量）下で、200 人が順々に行うと仮定しても 10 年以上の耐放射線性を有していると評価できる。

令和6年度は、原子力機構で整備中の Cs-137 照射試験設備を用いて、Co-60 照射と Cs-137 照射による耐放射線性の違いを評価するとともに、ロボットに搭載する位置計測装置の照射試験と耐放射線性評価を行う。

3.4.3 まとめ

中継ロボットを介した2段カスケード接続俯瞰画像方式位置計測試験では、正対したときの姿勢（向きの角度）を除き、姿勢及び距離ともに、概ね目標を達成することができた。

耐放射線試験においては、これまでの照射試験結果等から耐放射線性が低い可能性のある部品等について照射試験を行った結果、最も耐放射線性が低そうと評価された Micro SD card についても、100 Sv オーダーの耐放射線性を有していることを確認し、作業員が身に着ける位置計測装置としては、十分な耐放射線性を有していることを確認した。

3.5 UWB 位置測位の精度向上を目指した電磁波抑制材の配置・構造に関する検証（名大）

【令和4年度～令和5年度】

3.5.1 UWB 位置測位の精度向上を目指した電磁波抑制材の配置・構造の開発

【令和4年度～令和5年度】

【令和4年度までの概要】

令和4年度は、電磁波遮蔽・吸収材料を試作し、UWB 位置測位の精度向上にどのように寄与するかを検証した。材料の組成を制御することで導電率などを調整し、電磁波吸収性能の高い材料を試作した。これを UWB 位置測位のためのデバイス後部に配置し、電磁波吸収材料の有無が測位シグナルに与える影響を評価し、ノイズが少なくなることを確認した。

【令和5年度実施内容及び結果】

電磁波遮蔽・吸収材料の配置・構造の工夫として、東大で使用する UWB 基盤のサイズを指標として、岐大と協力して電磁波遮蔽・吸収構造を凍結乾燥プロセスで作るための成型型を3DCADにて設計し、3DプリンタにてABS樹脂部品として出力、その上で電磁波遮蔽・吸収構造体の作製を試みた。結果として図3.5-1に示すように、UWB 通信デバイスの後方に部材を配置する3種類の①平板タイプ、②コの字タイプ、③角度45度タイプの作製に成功した。これにより成型型を用いることで、任意の形状のサンプルを作ることができることを確認し、岐大が作製する組込装置用の電磁波遮蔽ケースに適合させる開発方針が立った。また、UWB DWM1001 による通信検証も行い、通信可能であることを確認した。

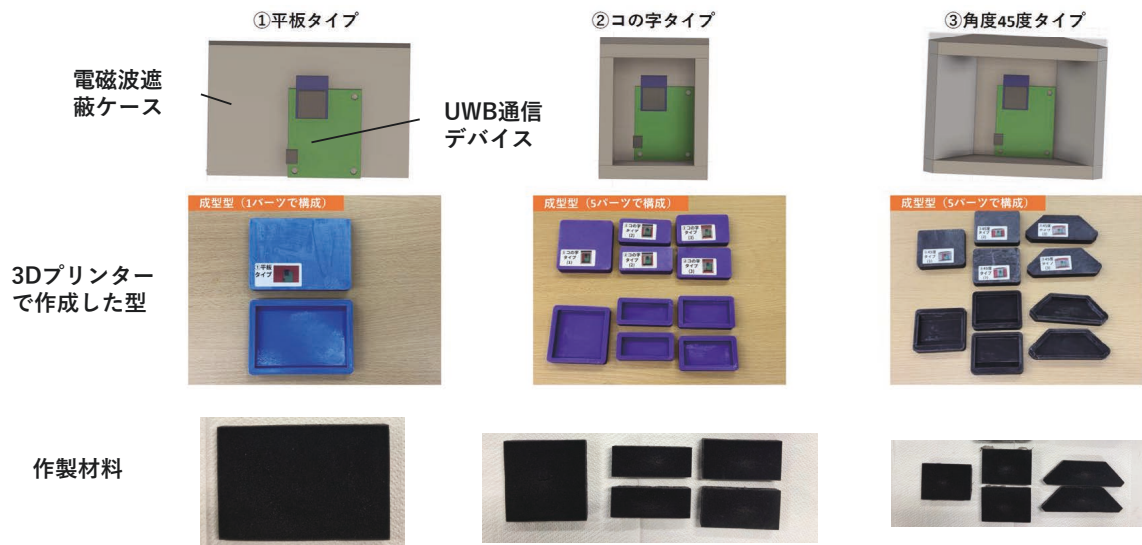


図 3.5-1 配置・構造の工夫を施した超軽量材料の試作

3.5.2 まとめ

令和5年度は、3種類の電磁波遮蔽・吸収構造体の作製に成功し、組込装置用ケースに適合する開発方針を明らかにした。また、通信精度に有効となる構造体の検証システムを令和6年度に行い、最適なケース設計を実現する予定である。

3.6 組込装置「Spresense」及び無線通信回路「UWB」の耐放射線並びに無線通信の検証試験 (連携先：原子力機構)【令和4年度～令和5年度】

3.6.1 照射場の整備及びモニタシステムの改良【令和4年度～令和5年度】

【令和4年度までの概要】

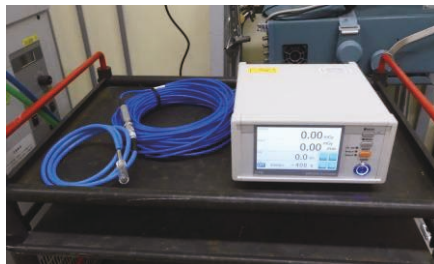
令和4年度は、ガンマセルを用いた予備照射試験として、吸収線量率の測定を行った。

【令和5年度実施内容及び結果】

原子力機構の WASTEF において、ガンマセルによる照射における吸収線量率評価を実施した。ガンマセルは密封の Co-60 線源を内蔵しており、照射対象物を放射性同位元素で汚染させることなく高線量率のガンマ線照射試験を実施することが可能な装置である。照射試験の準備として、EMF521 型電位計 (EMF ジャパン社製) による吸収線量率の測定を実施した (図 3.6-1)。特に、ガンマセルの試料室における組込装置等の照射位置が異なることから、高さ方向の線量分布の測定可能な実験構成 (図 3.6-2) を構築し、その特性を確認した (図 3.6-3)。



(a) ガンマセル

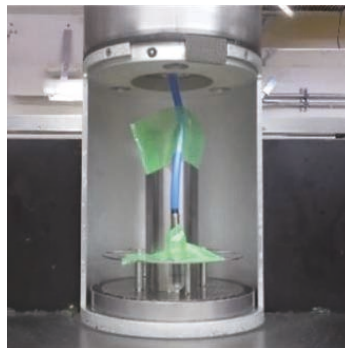


(b) EMF521 型電位計

図 3.6-1 ガンマセルのガンマ線照射線量率の評価システム



(a) ガンマセル試料室



(b) 高さ方向の線量分布測定

図 3.6-2 ガンマセルの高さ方向の線量分布測定・実験構成

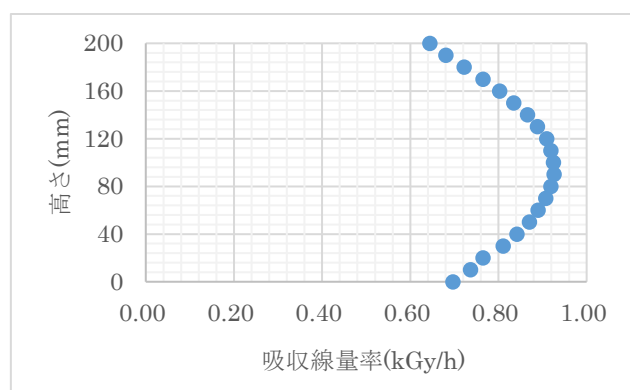


図 3.6-3 ガンマセル試料室内の線量分布

3.6.2 照射試験及び無線通信試験【令和4年度～令和5年度】

【令和4年度までの概要】

令和4年度は、福島高専とともにガンマセルを用いた組込装置 Spresense の照射試験及び岐大・東大とともに検証試験場所の検討を行った。

【令和5年度実施内容及び結果】

(1) 照射試験

ガンマセルを用いて、「カメラ画像分析組込装置」「UWB 通信回路」「マイクロ SD カード」の照射試験（図 3.6-4）を実施した。カメラ画像分析組込装置及び UWB 通信回路の積算吸収線量は、令和4年度と同様に 240 Gy、480 Gy、720 Gy を目安とした。令和4年度に 240 Gy でも不良となったマイクロ SD カードの積算吸収線量は、60 Gy、120 Gy、180 Gy を目安として実施した。照射試験の仕様を、表 3.6-1、表 3.6-2 に示す。結果として照射線量率は、カメラ画像分析組込装置及び UWB 通信回路において 0.83 kGy/h（試料室高さ 40 mm）、マイクロ SD カードにおいて 0.88 kGy/h（試料室高さ 100 mm）であった。また、照射試験の評価結果は、3.4.2 項の耐放射線性評価に記載している。



(a) カメラ画像分析組込装置 (b) UWB 通信回路 (c) マイクロ SD カード

図 3.6-4 ガンマセルによる照射時の対象物配置

表 3.6-1 「カメラ画像分析組込装置」及び「UWB 通信回路」へのガンマ線照射

試料 No.	目標値(Gy)	照射時間(min)	積算照射線量(Gy)
1, 2	0	0	0
3, 4	240	17	235.9
5, 6	480	35	485.6
7, 8	720	52	721.5

表 3.6-2 マイクロ SD カードへのガンマ線照射

試料 No.	目標値(Gy)	照射時間(min)	積算照射線量(Gy)
1, 2	0	0	0
3, 4	60	4	58.5
5, 6	120	8	116.9
7, 8	180	12	175.4

(2) 組込装置の検証試験

岐大・東大と協力して、図 3.6-5 に示す原子力機構 BECKY の廃液貯槽室(Ⅲ)及び LSTF を用いた組込装置の検証試験を実施した。廃液貯槽室(Ⅲ)は、幅約 5 m×奥行約 5 m×高さ約 6 m の床面がステンレスライニングされた室であり、室の中央に約 10 m³ のステンレス製縦型円筒の廃液貯槽が 2 基設置されている。LSTF は、加圧水型原子炉 (PWR) を模擬した世界最大の熱水力総合試験装置であり、PWR 事故時の冷却材挙動に関する研究試験を行う施設である。コンクリート壁、貯槽、配管等による UWB 反射の影響を考慮する必要が考えられ、令和 6 年度も引き続き検証を実施する。



図 3.6-5 実証実験場所

3.7 研究推進

令和 5 年度は、原子力機構と協力して模擬環境における検証試験を重視し、現場で運用しやすいシステム開発に注力した。また、令和 6 年度が最終年度であることから、開発成果物の普及を目指し、廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）を訪問して企業や他のプロジェクトとの連携の可能性を議論した。

また、岐大の研究内容を令和 6 年 3 月 21 日（木）～22 日（金）の福島県双葉郡富岡町で開催された「第 9 回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス（NDEC-9）」にて研究発表し、発表者である博士課程 3 年生・岩田君彦さんが、最優秀賞を受賞した。

4. 結言

本研究では、原子炉建屋内に対して簡単に設置でき、安定にリアルタイム位置測位可能な組込システムの実現を目指している。令和5年度において、岐大がカメラ画像分析に基づくリアルタイム3D位置計測組込装置（第2次試作）を行い、計測範囲拡張が可能で10 cm精度での位置計測が可能であることをオフィス環境で確認した上で、原子力機構と協力して模擬環境における検証試験を行った。また、東大・LMもリアルタイム3D位置計測・UWB装置の開発（第2次試作）し、原子力機構と協力して模擬環境における検証実験を行い、その環境特性を把握し、性能向上への方針を確認した。名大は、組込装置に適する電磁波吸収構造体の設計開発プロセスを構築した。福島高専は、カスケード接続俯瞰画像位置計測のシステム検証実験を行った。また、原子力機構と協力して、カメラ画像分析・組込装置（第2次試作）、UWB通信回路、マイクロSDカードの耐放射線評価を行い、想定する作業に対して使用可能であることを確認した。

令和6年度は、岐大がカメラ画像分析組込装置に東大・LMが開発したUSB装置を連動させ、原子力機構と協力して模擬環境でのリアルタイムでの実証実験を行う予定である。また、東大・LMも、原子力機構と協力して模擬環境にてUWB装置の更なる3D位置測位の性能向上を行う予定である。名大は、組込装置に適合する電磁波吸収構造体を作製する予定である。福島高専は、カスケード接続俯瞰画像方式位置計測法の検証を行い、性能向上を目指す。また、引き続き原子力機構と協力し、UWBを含めた他の組込装置の耐放射線評価を行う予定である。

This is a blank page.

