



連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究 (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 a Cooperative Operation Robot System
for Radiation Source Exploration
(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
東北大学

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development
Tohoku University

March 2024

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 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒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 Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

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

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

連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究
(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

東北大学

(2023年10月13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3年度に採択された研究課題のうち、「連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究」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、ガンマ線の飛来方向を検出可能な検出器を開発し、これを搭載した複数のロボットの連携により、単一センサーでは得られない広視野・迅速・安価な放射線源探査を実現するロボットシステム(Cooperative Operation Robot system for RAdiation Source Exploration: CORRASE、コラッセ)を開発することを目的とする。東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の現場への投入に資することを目的として、線源探査を行う小型ロボットに放射線計測機器を搭載したシステムを3年間の計画終了時に完成させるための研究を行う。

令和4年度は以下の成果を得た。多面体型とコーデットキューブ型のガンマ線イメージャーの製作を行い、点線源の位置推定に成功した。LiDARを用いた周囲環境測定結果に基づく環境地図作成システムの開発および環境地図上に放射線源分布推定結果を融合して表示するシステムの開発を行った。環境地図と粗い放射線源分布推定結果に基づき、検出器の特性に応じて複数台のロボットが指定した箇所の詳細な測定を行うための観測地点計画手法の開発を行った。小型ロボットに搭載する放射線測定器の評価のために検出器姿勢自動制御システムを製作した。また、多面体型検出器による線源探査のシミュレーションを行った。複数の線源がある場合でもほぼ線源位置を特定することができた。

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、東北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 a Cooperative Operation Robot System for Radiation Source Exploration
(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

Tohoku University

(Received October 13, 2023)

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 FY2021, this report summarizes the research results of the “Development of a cooperative operation robot system for radiation source exploration” conducted in FY2022.

The present study aims to develop a Cooperative Operation Robot system for RAdiation Source Exploration (CORRASE). The multiple robot system provides radiation source exploration with wide field of view, rapidity, and low cost. The radiation source exploration is realized with multiple robots carrying directional gamma-ray detectors determining the incident direction of the incoming gamma-rays. We will develop the system by the final year of this proposal aiming for application in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. The results obtained from this study in FY2022 are summarized as follows: Coded cube type and polyhedral type gamma-ray imagers were fabricated. Position estimation of a point gamma-ray source was successfully demonstrated with the imagers. An environmental mapping system based on ambient environment measurements using a LiDAR and a system for displaying estimated radiation source distributions fused on an environmental map were developed. Based on an environmental map and rough estimates of radiation source distributions, an observation planning method was developed for detailed measurements of the spot specified by robot-carried radiation detectors. An automatic attitude control system was developed for detector testing. A simulation of radiation source survey using a polyhedral type gamma-ray imager was performed, and the radiation source positions were almost identified even in the case of multiple sources.

Keywords: Directional Gamma-ray Detector, Cooperative Operation Robot, Scintillation Detector

This work was performed by Tohoku 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 康一郎	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

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

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タイアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (~R2. 3. 31) 竹下 健二 (~R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1~)	東京工業 大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

4. 令和2年度 採択課題

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

公募期間：令和2年3月17日～令和2年5月14日（課題解決型）
令和2年5月13日～令和2年7月15日（国際協力型）

課題数：10 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題（若手研究 2 課題、一般研究 6 課題）
国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英共同研究）

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
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）

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・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
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
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 啓太朗	東北大学

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

連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究

(契約番号 R04I031)

成果報告書

令和 5 年 3 月

国立大学法人東北大学

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、国立大学法人東北大学が実施した「連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究」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	vii
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	2-1
2.1 全体計画	2-1
2.2 実施体制	2-2
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
3. 実施内容および成果	3.1-1
3.1 指向性検出器開発（令和3年度～令和4年度）	3.1-1
3.1.1 シミュレーションによる検出器設計（令和3年度～令和4年度）	3.1-1
3.1.2 指向性検出器の製作と評価（令和3年度～令和4年度）	3.1-13
3.1.3 まとめ	3.1-22
3.2 画像・情報処理技術開発（令和3年度～令和4年度）	3.2-1
3.2.1 LiDARを用いた周囲環境測定結果に基づく環境地図作成システムの開発 （令和3年度～令和4年度）	3.2-1
3.2.2 まとめ	3.2-6
3.3 ロボット制御システム開発（令和3年度～令和4年度）	3.3-1
3.3.1 複数台ロボットによる放射線源の探索（令和3年度～令和4年度）	3.3-1
3.3.2 まとめ	3.3-4
3.4 実証試験（令和3年度～令和4年度）	3.4-1
3.4.1 実証試験（令和3年度～令和4年度）	3.4-1
3.4.2 まとめ	3.4-13
3.5 研究推進（東北大学）（令和3年度～令和4年度）	3.5-1
3.5.1 会議の開催	3.5-1
4. 結言	4-1
参考文献	5-1

執筆者リスト

事業代表者

国立大学法人東北大学

准教授

人見 啓太郎

准教授

田村 雄介

助手

野上 光博

再委託先

独立行政法人国立高等専門学校機構富山高等専門学校

教授

高田 英治

准教授

金子 慎一郎

国立大学法人福島大学

特任教授

鳥居 建男

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

研究系職員

北山 佳治

表一覧

表 3.1-1	シンチレータ特性評価の結果	3.1-3
---------	---------------	------	-------

図一覧

図 2.1-1	全体計画図	....	2-1
図 2.2-1	実施体制図	....	2-2
図 3.1-1	検出器の概略図 (a)多面体型 (b) コーデットキューブ型	....	3.1-1
図 3.1-2	多面体型検出器におけるガンマ線入射角度と有効イベント数の関係	....	3.1-2
図 3.1-3	(a) 製作したフレキシブル基板およびバイアス電源回路並びに購入した多チャンネル信号処理回路 (Cosmo-Z) の写真 (b) 測定された ^{22}Na のスペクトル	....	3.1-3
図 3.1-4	製作した回路のガンマ線スペクトル測定の実験体系	....	3.1-4
図 3.1-5	C3-G の概略図	....	3.1-4
図 3.1-6	キューブ配置	....	3.1-5
図 3.1-7	3 m 先に置かれた 10 MBq の ^{137}Cs 線源を 10 分間測定した際の全方位ガンマ線イメージングシミュレーション結果	....	3.1-6
図 3.1-8	購入した SiPM 用ヘッドアンプユニットと設計した単一結晶イメージャー	....	3.1-6
図 3.1-9	ピクセル番号 (X, Y) = (3, 8) に ^{137}Cs のガンマ線を照射した時の応答	....	3.1-7
図 3.1-10	製作した C3-G	....	3.1-7
図 3.1-11	実験体系	....	3.1-8
図 3.1-12	実験室内の実験結果	....	3.1-10
図 3.1-13	コンプトンカメラで撮影した画像	....	3.1-11
図 3.1-14	屋外試験の様子	....	3.1-11
図 3.1.15	屋外試験の実験結果	....	3.1-12
図 3.1-16	製作した最小単位の多面体型指向性検出器	....	3.1-13
図 3.1-17	LYSO(Ce) シンチレータを用いて計測した ^{137}Cs のエネルギースペクトル	....	3.1-14
図 3.1-18	LYSO(Ce) シンチレータの自己発光 BG エネルギースペクトル	....	3.1-14
図 3.1-19	各入射角度の ROI 内カウント数の変化	....	3.1-15
図 3.1-20	90° 毎にずらした各入射角度の ROI 内カウント数の変化	....	3.1-15
図 3.1-21	製作した 4 ch version の多面体型指向性検出器	....	3.1-15
図 3.1-22	各 ch の線源の入射角度毎の ROI 内カウント数 (BG 差し引き後) の変化	....	3.1-16
図 3.1-23	未知の角度 (35°、65°、170°) に置かれた ^{137}Cs 線源の位置推定結果	....	3.1-17
図 3.1-24	製作した 8 ch version の多面体型指向性検出器	....	3.1-18
図 3.1-25	3 m 先に 10 MBq の ^{137}Cs 線源が $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$ の位置にある際の線源位置推定をシミュレーションにより計算した結果	....	3.1-20
図 3.1-26	8 ch version の多面体型指向性検出器の線源位置推定結果	....	3.1-21
図 3.2-1	システムの構築方針	....	3.2-1

図 3.2-2	試験用ロボットの外観	....	3.2-1
図 3.2-3	試験環境のスタート地点周囲の様子と全体経路	....	3.2-1
図 3.2-4	環境地図の生成結果	....	3.2-2
図 3.2-5	自己位置推定の結果	....	3.2-2
図 3.2-6	IMU の外観	....	3.2-2
図 3.2-7	改良した環境地図の生成結果	....	3.2-2
図 3.2-8	改良した自己位置推定の結果	....	3.2-3
図 3.2-9	深度カメラ搭載後の先行ロボット外観	....	3.2-3
図 3.2-10	環境色を反映させた環境地図	....	3.2-3
図 3.2-11	環境色を反映させた場合の比較	....	3.2-4
図 3.2-12	環境色付き地図におけるずれ	....	3.2-4
図 3.2-13	放射線源分布情報の例	....	3.2-5
図 3.2-14	放射線源分布情報の反映の原理	....	3.2-5
図 3.2-15	放射線源分布情報の環境地図への反映結果	....	3.2-6
図 3.3-1	放射線源の探索戦略	....	3.3-1
図 3.3-2	複数台ロボットによる対象空間全体の探索	....	3.3-1
図 3.3-3	2台のロボットを用いた観測による線源位置の絞り込み	....	3.3-2
図 3.3-4	簡易的な配置シミュレーション	....	3.3-3
図 3.3-5	目標位置・姿勢までの自律走行の様子	....	3.3-4
図 3.4-1	制御システムの概要	....	3.4-2
図 3.4-2	データの観測および逆解析のイメージ	....	3.4-3
図 3.4-3	解析対象の空間とメッシュ代表点の位置	....	3.4-5
図 3.4-4	線源条件（主要な線源条件およびバックグラウンド線源）	....	3.4-5
図 3.4-5	測定条件	....	3.4-6
図 3.4-6	再構成結果（コンター図） 線源条件（1）	....	3.4-7
図 3.4-7	再構成結果（コンター図） 線源条件（2）	....	3.4-8
図 3.4-8	再構成結果（コンター図） 線源条件（3）	....	3.4-9
図 3.4-9	再構成結果（断面図） 線源条件（1）	....	3.4-10
図 3.4-10	再構成結果（断面図） 線源条件（2）	....	3.4-11
図 3.4-11	再構成結果（断面図） 線源条件（3）	....	3.4-12
図 3.4-12	測定値の再現性	....	3.4-12
図 3.4-13	再構成結果に見られる偽のピーク	....	3.4-13

略語一覧

富山高専	: 独立行政法人国立高等専門学校機構富山高専専門学校
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)
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
VPC	: Virtual Pinhole Camera (バーチャルピンホールカメラ)
多脚型 ロボット	: 移動手段として複数本(4本、6本)の脚を用いて動作し、障害物でも乗り越え移動することを目的としたロボット
LiDAR	: Light Detection And Ranging
SiPM	: Silicon Photomultiplier
SLAM	: Simultaneous Localization And Mapping
C3-G	: Coded Cube Camera for Gamma-ray

概略

東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所（以下、1Fという）の建屋内作業環境で廃炉作業を円滑に進めるためには、高線量率環境下において放射線源の位置分布を詳細に把握する必要がある。しかし、放射線分布を計測する現状のガンマカメラは、厚い遮蔽体を要するため大型で重量物になったり（ピンホールカメラ）、高線量率環境では散乱体検出器と吸収体検出器の偶発同時計数によって線源位置の特定が困難だったり（コンプトンカメラ）と、高線量環境下での線源分布の把握が困難であり、大型重量で迅速性に欠けるものとなっている。このため、従来型のガンマカメラで撮影しても汚染源の特定には至らないことも少なくなかった。

本研究はガンマ線の飛来方向を検出可能な検出器を開発し、これを搭載した複数のロボットの連携により、単一センサーでは得られない広視野・迅速・安価な放射線源探査を実現するロボットシステム（Cooperative Operation Robot system for RAdiation Source Exploration: CORRASE、コラッセ）を開発することを目的とする。1F現場への投入に資することを目的として、線源探査を行う小型ロボットに放射線計測機器を搭載したシステムを3年間の計画終了時に完成させるための研究を行う。

令和3年度および令和4年度の成果概要を以下に記載する。

(1) 指向性検出器開発

① シミュレーションによる検出器設計（JAEA）

令和3年度はシミュレーションにより多面体型検出器とコーデットキューブ型検出器の2種類の検出器ジオメトリについて検討を行い、ともに全方位イメージングが可能であることを示した。また、検出器の信号読み出し回路およびバイアス電源回路の設計と実装を行い、動作を確認した。さらに、検出器に採用するシンチレータ結晶（非潮解無機シンチレータ14種）の比較検討を行い、その結果、今回の用途ではGAGG（Ce）、GFAG（Ce）、LYSO（Ce）が適していると結論付けた。

令和4年度にJAEAが掲げた目的は、実機に近いガンマ線イメージャーの試作機を製作し実験によりその特性を評価することと、実験結果を基に改良を重ねることであった。実際に試作機を製作しその特性を評価し、全方位ガンマ線イメージャーとして良好な特性が得られることを確認した。加えてその結果を検出器設計段階にフィードバックし細かな改良を重ねるとともに、令和5年度以降に取り組むべき課題も抽出できた。よって、令和4年度の目標は達成されたと結論する。

② 指向性検出器の製作と評価（東北大学）

令和3年度はロボットに搭載することを念頭において、指向性検出器の重量やガンマ線イメージング性能等の検討をJAEAと連携して行った。多面体型検出器の最小単位の指向性検出器を製作し、その特性評価を行った。今回製作した指向性検出器の特性評価結果はシミュレーション結果と良い一致を示した。

令和4年度では、ロボットに搭載する指向性検出器のプロトタイプを製作することとロボットに搭載する指向性検出器システムの仕様を検討することを目的としていた。実際にロボットに搭載することを念頭においた8 ch version 多面体型指向性検出器システムの設計・製作・評価を行った。製作した8 ch versionの多面体型指向性検出器を用いて、点線源の位置推定が可能であることを確認した。8 ch version 多面体型指向性検出器システムは遮光性、サイズ、重量の要件を満たしており、ロボットに搭載することが可能である。今後としては、8 ch version 多面体

型指向性検出器の性能向上および検出器システム全体の構成についてさらなる検討を実施していく。

(2) 画像・情報処理技術開発（富山高専）

令和3年度は放射線検出器による測定結果とLiDAR（Light Detection And Ranging）による自己位置推定結果を基に、対象とする領域の放射線源分布を推定するための基本的な考え方について整理し、測定を2段階に分け、1段階目で環境地図作成と大まかな放射線強度分布を測定し、その結果を基に絞り込んだ領域において詳細測定することとした。自己位置推定および周囲環境測定システムの試作においては、広視野型および狭視野型LiDARをそれぞれ搭載したロボットによる周囲環境のスキャン結果を共有参照することによって、環境地図生成およびロボットの自己位置推定を行うシステムを構築し、評価試験を行った。環境地図生成においては、大きな歪みや破綻なく良好な結果が得られた。一方で、自己位置推定に関しては、推定結果全般で俯瞰すれば順当な結果を得たが、推定結果が安定しない事例が生じたため、処理方法について再検討を行うこととした。また、並列処理やGPUの活用を検討し処理速度向上を図ることとした。

令和4年度はLiDARを用いた周囲環境測定結果に基づく環境地図作成システムにおいては、令和3年度に引き続き開発を推進し、環境地図生成精度の向上および処理速度の向上、さらに環境色を反映させることによる視認性向上を達成した。また、自己位置推定について、後続ロボット搭載のLiDARを先行ロボットと同機種のものに変更するとともに、マルチスレッド並列処理を実装することにより自己位置推定の安定性向上と処理時間の大幅短縮化を達成した。

環境地図上に放射線源分布推定結果を融合して表示するシステムにおいては、放射線源分布情報の融合反映方法を考案、実装し、サンプルデータを用いて適用を試み、想定通りの融合結果を得た。このことから、多地点、多方向からの放射線源分布情報を重ね合わせ処理に対する考案実装の見通しが得られ、汚染部位の絞り込みイメージング実現に期待が持たれる。

(3) ロボット制御システム開発（東北大学）

令和3年度は複数台のロボットに探索タスクを割り当てる手法ならびに各ロボットの経路を計画する手法の開発を行った。また、複数台のロボットを遠隔から操作するシステムの構築を行った。複数台ロボットへの探索タスク割り当てについては、LiDARベースの環境地図を基に、環境をグラフ構造化し、グラフ分割の手法を用いることで複数台のロボットの負担が均等になるような探索領域分割手法を開発した。また、割り当てられた各探索領域を各ロボットが効率よく探索する経路を計画する手法を開発し、シミュレーションによってその有効性を確認した。

令和4年度は環境地図と粗い放射線源分布推定結果に基づき、検出器の特性に応じて複数台のロボットが指定した箇所の詳細な測定を行うための観測地点計画手法の開発を行った。

環境地図において指定した箇所に対して、より多くの情報を得るための複数台ロボットの配置手法を構築し、その配置に対してロボットが障害物を回避しながら移動する手法を構築した。

(4) 実証試験（福島大学、東北大学、富山高専、JAEA）

令和3年度は検出器遮蔽体等のツール類の整備、実証試験に向けて線源位置探査ツールの基本設計解析を中心に実施した。小型ロボットに搭載した指向性検出器の情報により、3次元空間内の線源位置を探査するツールの基本設計の解析を行った。そこでは、 ^{137}Cs を対象とし、662 keVのピークについて解析した結果、線源の方位とカウント数のHigh/Lowの対応付けが明瞭であった。

令和4年度は線源分布の全体像を俯瞰するために、小型軽量の測定器とそれを搭載できる汎用性の高い小型ロボットの開発を行った。本作業では、小型ロボットに搭載する放射線測定器の位置・方向を認識するために使用する検出器姿勢自動制御システムを製作した。また、画像作成に向けて適切な配置にロボットが移動する手法を構築し、いくつかのケースについてシミュレーションにより線源探査を行った。複数の線源がある場合でもほぼ線源位置を特定することができた。しかし、バックグラウンド線源が存在する場合には明瞭にはならないことがわかった。これらの研究成果は(1)指向性検出器開発、(2)画像・情報処理技術開発、(3)ロボット制御システム開発を結びつけるものであり、研究目的である連携計測による線源探査の実現可能性を明らかにするものである。令和5年度は実機を用いて実証試験を行う。

前年度までの成果報告書：

連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究(委託研究)；令和3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 2022-041

<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2022-041>

1. はじめに

1Fの建屋内作業環境で廃炉作業を円滑に進めるためには、高線量率環境下において放射線源の位置分布を詳細に把握する必要がある。

散乱線が多い環境で線源分布を求めるために、研究代表者らは「高線量率環境下における小型半導体を用いたバーチャルピンホールカメラの開発（文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業：平成29年度～令和元年度）」において高指向性検出器を開発し、大型の遮蔽体が不要な放射線イメージャー（バーチャルピンホールカメラ、VPC）の開発を進めてきた。本研究では、VPCを発展させ、ガンマ線の飛来方向を検出可能な検出器を開発し、これを搭載した複数のロボットの連携により、単一センサーでは得られない広視野・迅速・安価な放射線源探査を実現するロボットシステムを開発する。

従来のガンマカメラは全体を覆う大型遮蔽体による重量、偶発同時計数による偽線源分布、長時間の収集時間といった欠点がある。この問題を解決するために本プロジェクトでは先行研究のVPC用の指向性検出器を3次元に拡大し、遮蔽体の窪みに小型検出器を配置する新しい指向性検出器を開発する。本システムでは、センサーの計数比から迅速に線源の方向を求めることができる。1台の指向性検出器では空間分解能が低いが、この検出器を複数台のロボットに搭載し、ロボットが相互に連携しながら作業環境内を移動することで空間分解能を上げ、迅速に線源位置を割り出すことができる。さらに、その移動経路上の計数から線量率のマップも形成できる。本計測システムは比較的単純な計測系の組み合わせで放射線分布のイメージングを実現する画期的なアプローチである。

本研究では小型多脚ロボットに上記検出器を搭載する。ロボットは、現場投入に際し重機や台車を必要とせず、人が持ち運べる重さで、狭隘部へのアクセスも容易な小型のものを採用する。多脚型ロボットは、階段の昇降やその場での回転、ロボット本体の上下動による段差の乗り越えや構造物の潜り抜けが可能な他、クローラー型では難しいガレキの乗り越えも可能である。本研究では耐荷重5kgのロボットを使用し、搭載計測システムを1.5kgと軽量にすることでバッテリーの負荷を減らし、長時間の計測が可能なものとするを目標としている。

これまで、放射線イメージャーを搭載したロボット単体での放射線計測は多くの試みがなされてきたが、ロボットを複数台使用した例は多くない。本研究では、センサー自体は小型で単純な機能のものを使うが、複数台のロボットを用いて連携動作させることで、単体では実現できない広視野で迅速な線源探査と位置認識を可能とするシステムの構築に挑む。

本研究ではVPCの原理を応用した比較的単純な計測系を用いることで、ピンホールカメラやコンプトンカメラと異なりシステムの軽量化と簡素化が図れる。また、開発した指向性検出器を多脚式の小型ロボットに搭載することにより、狭隘部や段差があるところでも計測が可能となる。さらに、複数のロボットを用いて連携走行することにより、これまで計測が困難であった場所でも迅速に線源分布を計測できるという学術的特色がある。

また、本検出器システムは高バックグラウンド環境下での計測という特長を有しており、本研究で培われた技術は、様々な放射線環境で適用可能であると考えている。1F廃炉作業だけでなく、様々な原子力環境や核セキュリティ分野での放射線計測、人工衛星搭載による宇宙計測にも応用できる可能性がある。

2. 業務計画

2.1 全体計画

全体計画を図 2.1-1 に示す。

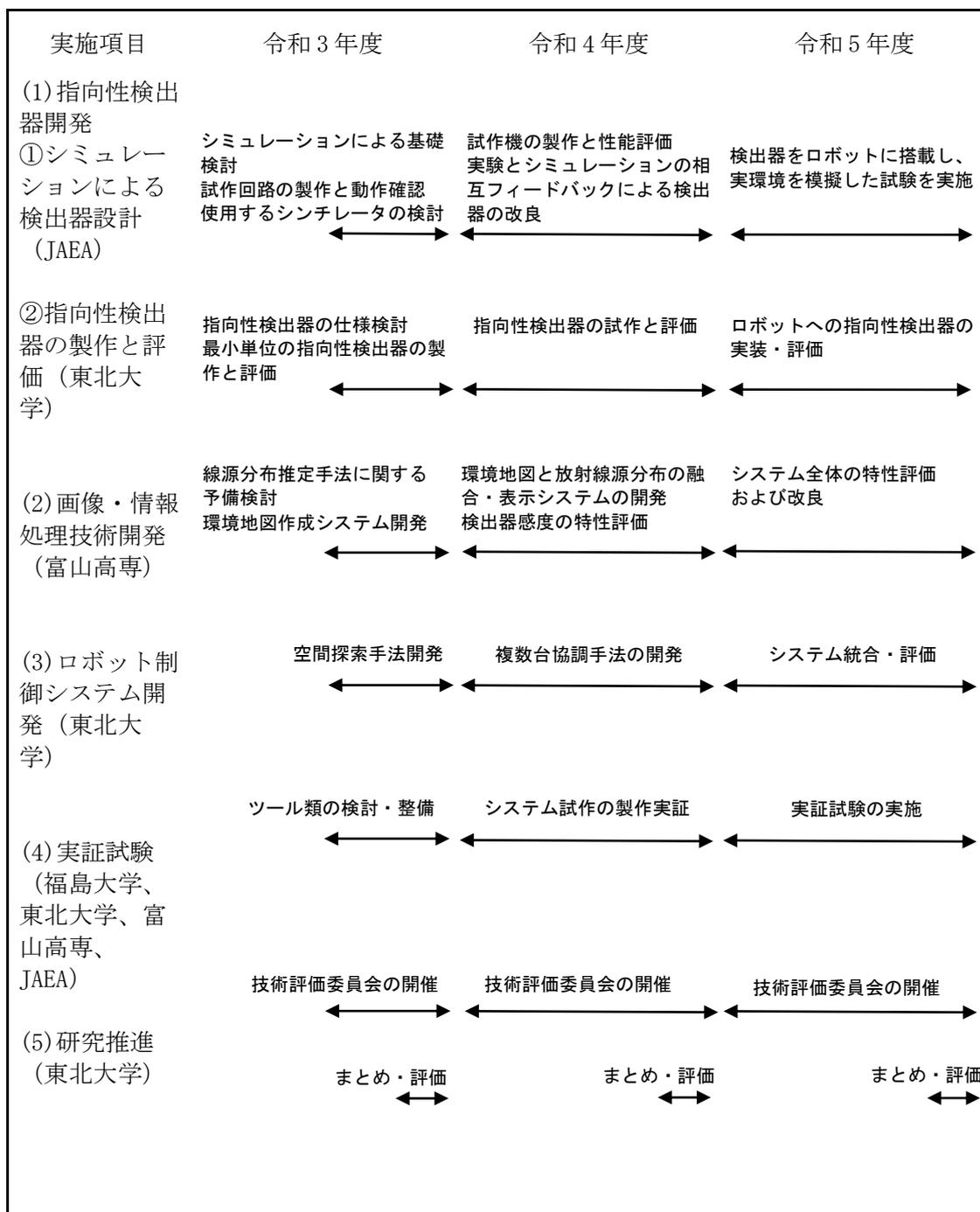


図 2.1-1 全体計画図

2.2 実施体制

実施体制図を図 2.2-1 に示す。

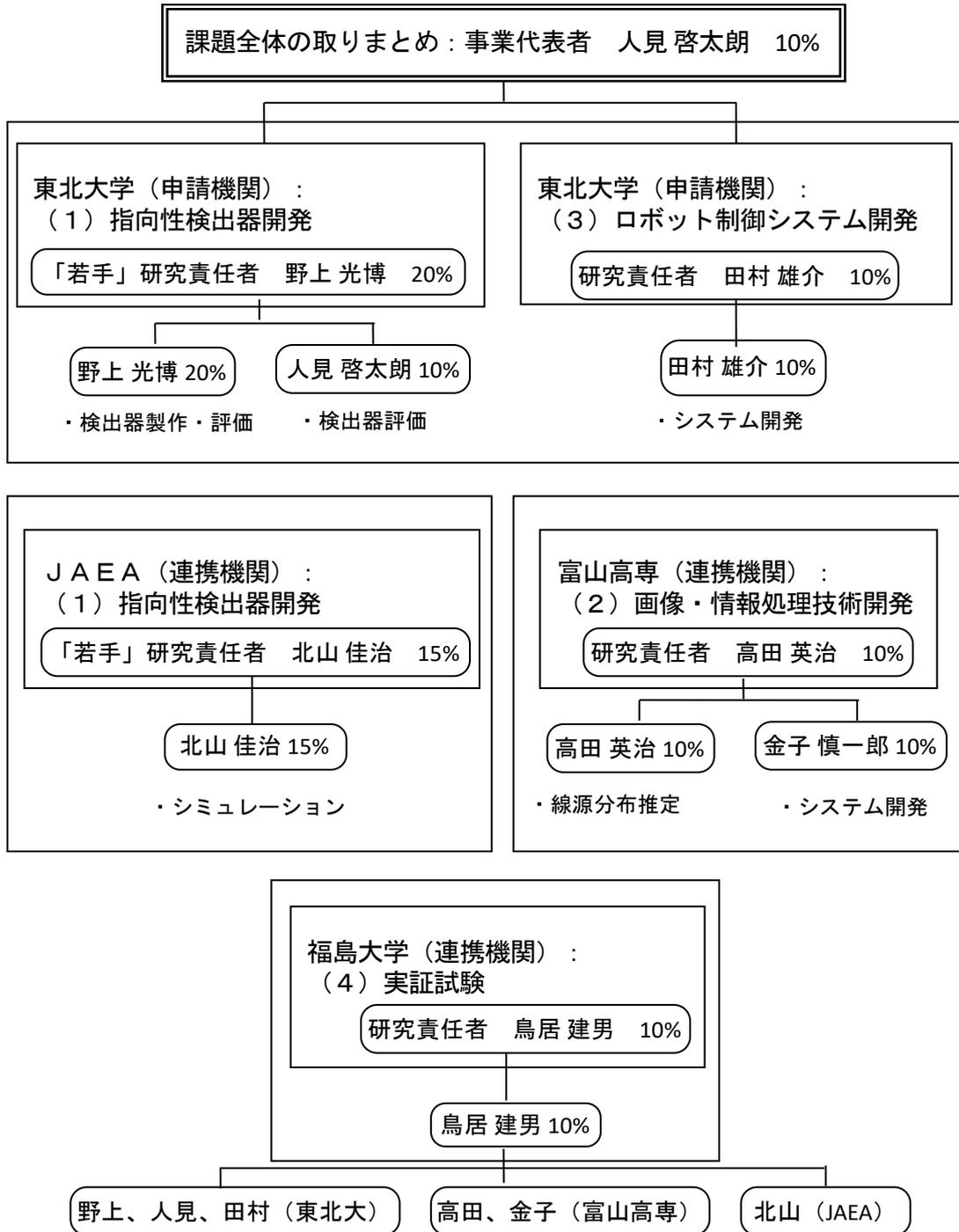


図 2.2-1 実施体制図

2.3 令和4年度の成果の目標および業務の実施方法

(1) 指向性検出器開発

① シミュレーションによる検出器設計（連携先：JAEA）

令和3年度の結果を基に、鉛遮蔽体と複数のシンチレータ結晶で構成される実験体系を製作し、より実機に近い構成で性能評価試験を実施する。課題を抽出し、検出器設計段階へフィードバックを行う。目標とする性能の実現に向けて、得られたデータから検出器の改良を行う。

② 指向性検出器の製作と評価

令和3年度に引き続き、指向性検出器の製作と開発を行う。原子力機構と連携して、プロトタイプとなる指向性検出器の検討および製作を実施する。また、令和5年度に製作を予定しているロボットに搭載する検出器システムの仕様を検討する。

(2) 画像・情報処理技術開発（再委託先：富山高専）

令和3年度に引き続き、LiDARを用いた周囲環境測定結果に基づく環境地図作成システムの開発を進め、環境地図上に放射線源分布推定結果を融合して表示するシステムを開発する。密封 γ 線源を対象に、単一のロボット・センサーによる周囲環境・放射線分布推定の検証確認を行う。

(3) ロボット制御システム開発

環境地図と粗い放射線源分布推定結果に基づき、検出器の特性に応じて複数台のロボットが指定した箇所の詳細な測定を行うための観測地点計画手法の開発を行う。

(4) 実証試験（再委託先：福島大学、東北大学、富山高専、JAEA）

令和3年度の結果を基に、システム化に向けた試作モデルの製作・整備を行う。検出器の状況に応じて、線源を用いた感度試験、角度分布特性、エネルギー特性等の解析調査を実施する。指向性検出器の特性、実験データに応じて機械学習技術による画像のパターン認識手法をソフトウェアに組み込み、画像作成に向けて適切な配置にロボットが移動する手法を構築する。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）等との連携を密にして、研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

3. 実施内容および成果

3.1 指向性検出器開発（令和3年度～令和4年度）

3.1.1 シミュレーションによる検出器設計（令和3年度～令和4年度）

(1) 令和3年度までの概要

① シミュレーションによる検出器特性の評価

令和3年度にモンテカルロシミュレーションツールキット Geant4 を用いて、検出器の応答をシミュレーションし最適な検出器のジオメトリを検討した。シミュレーションに用いた検出器を図 3.1-1 に、得られた検出器応答の例を図 3.1-2 に示す。

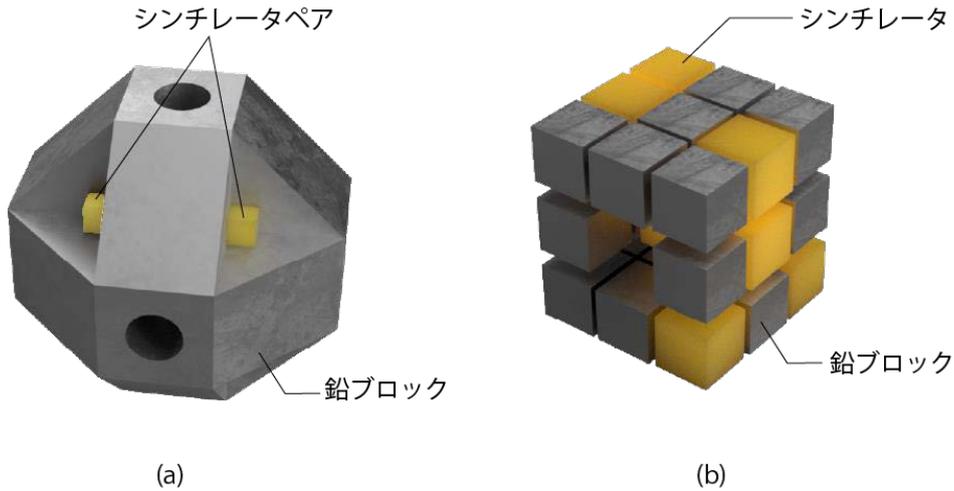


図 3.1-1 検出器の概略図 (a)多面体型 (b) コーデットキューブ型

以下に図 3.1-2 のデータを取得した際のシミュレーションの条件を記述する。

- ・シンチレータ

材料：GAGG (Ce)

サイズ：5 mm × 5 mm × 5 mm

エネルギー分解能：8.4%@662 keV

- ・遮蔽体

材料：鉛

シンチレータ間の鉛厚：20 mm（全高および全幅：60 mm）

- ・ガンマ線源

エネルギー：662 keV

線源サイズ：60 mm × 60 mm の平面線源

- ・照射条件

照射方向：平面線源に垂直にガンマ線を並行照射

測定点：仰角 θ を 90 度に固定し、方位角 ϕ を 0 度から 355 度まで 5 度ずつ変化させ、合計 72 点で測定

照射数：各測定点で 10^7 イベント

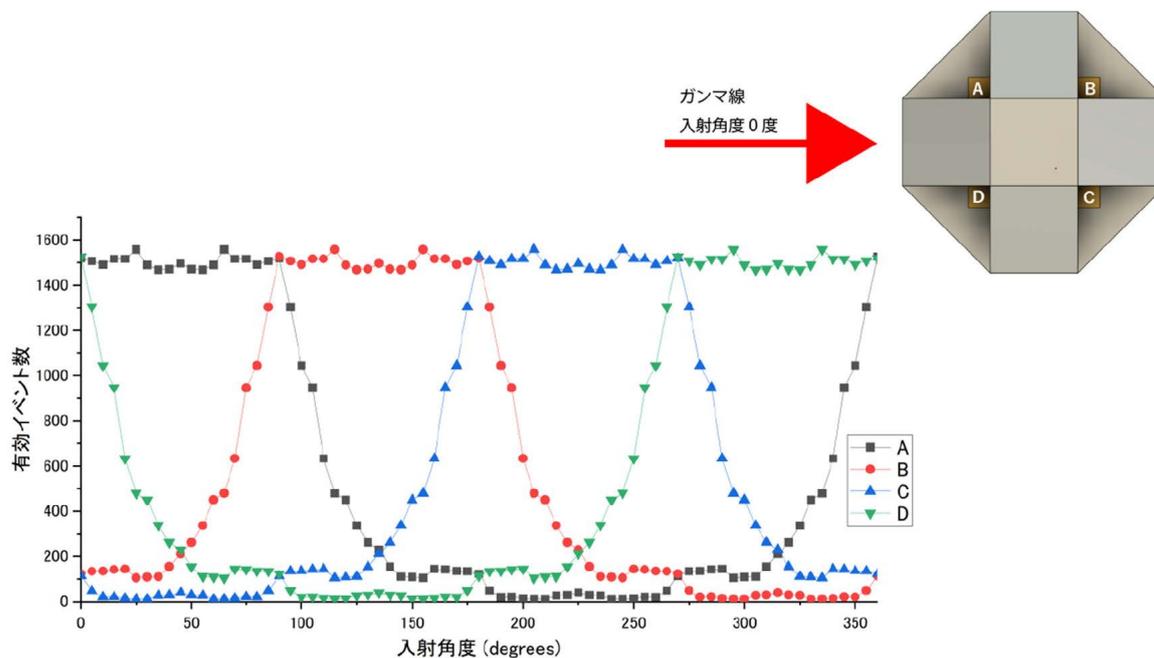


図 3.1-2 多面体型検出器におけるガンマ線入射角度と有効イベント数の関係

② シンチレータの比較検討

また、多チャンネル信号処理回路や多チャンネル波高分析器を整備し、検出器に採用するシンチレータ結晶を比較検討した。図 3.1-3 に整備した多チャンネル信号処理回路と、その回路によって測定された ^{22}Na のガンマ線スペクトルを載せる。検出器に採用するシンチレータは、実験の行いやすさを考慮して、非潮解性の無機シンチレータに限定した。比較したシンチレータは、 BaF_2 、 BGO 、 CdWO_4 、 CeF_3 、 $\text{GAGG}(\text{Ce})$ 、 $\text{GFAG}(\text{Ce})$ 、 $\text{LuAG}(\text{Ce})$ 、 $\text{LuAG}(\text{Pr})$ 、 $\text{LYSO}(\text{Ce})$ 、 PbF_2 、 PbWO_4 、 $\text{YAG}(\text{Ce})$ 、 $\text{YAP}(\text{Ce})$ そして $\text{YSO}(\text{Ce})$ の14種類である。減衰時間、明るさ、感度、エネルギー分解能、価格の5要素の特性から総合的に評価した結果、 $\text{LYSO}(\text{Ce})$ 、 $\text{GFAG}(\text{Ce})$ そして $\text{GAGG}(\text{Ce})$ の3種類が候補となった。有力な候補シンチレータの特性を表 3.1-1 にまとめる。

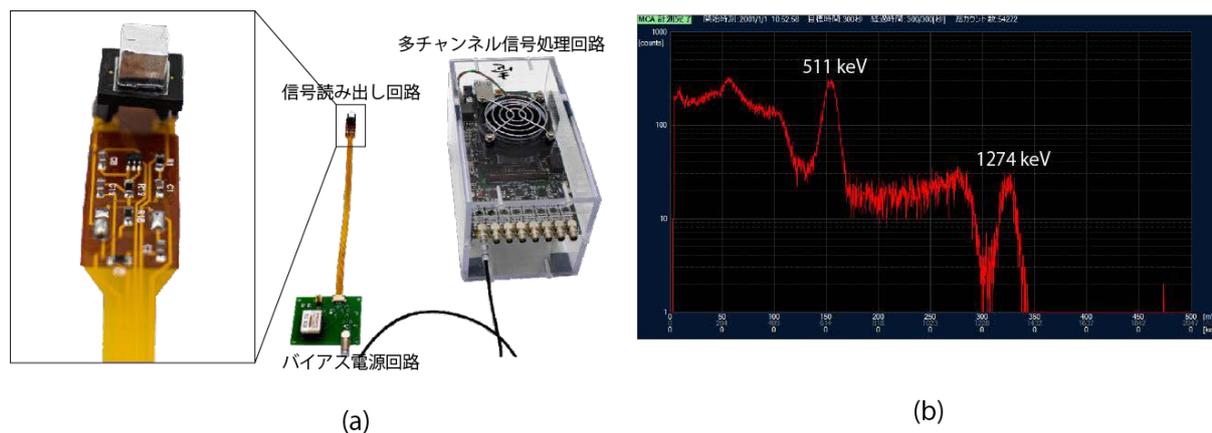


図 3.1-3 (a) 製作したフレキシブル基板およびバイアス電源回路並びに購入した多チャンネル信号処理回路 (Cosmo-Z) の写真 (b) 測定された ^{22}Na のスペクトル

表 3.1-1 シンチレータ特性評価の結果

	減衰時間 [ns] ※カタログ値	明るさ [ch]	感度@511 keV [count]	エネルギー分解 能@511 keV [%]	価格 [¥]
BGO	317	46	27902	16.4	5280
GAGG (Ce)	90	391	9711	10.8	18400
GFAG (Ce)	40	345	10310	10.3	18400
LuAG (Ce)	60	166	17116	12.3	42500
LuAG (Pr)	22	85	18144	15.6	52000
LYSO (Ce)	42	417	19624	14.6	6530

③ 回路の設計と特性評価

加えて、実際に信号読み出し回路やバイアス電源回路を設計、実装し密封線源を用いて動作の確認を行った。図 3.1-4 に製作した回路を用いた実験の様子を載せる。実験の結果、良好な動作特性が確認されたため、本回路を令和 4 年度に製作するガンマ線イメージャーの基本的なコンセプトとして採用することを決定した。

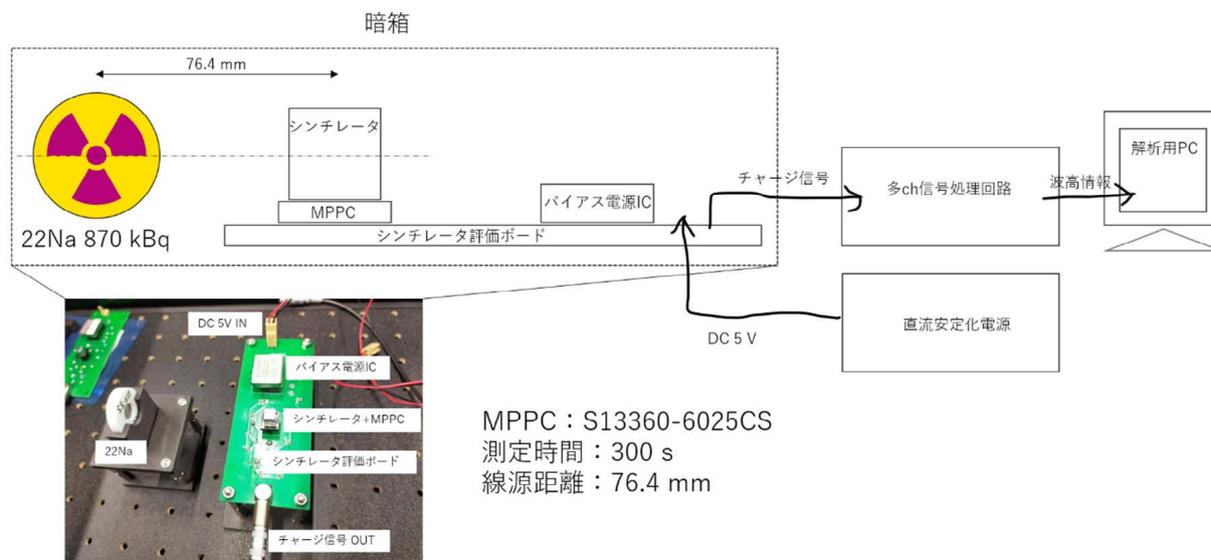


図 3.1-4 製作した回路のガンマ線スペクトル測定の実験体系

(2) 令和4年度実施内容および成果

① 試作ガンマ線イメージャーの設計

令和3年度に設計した回路を基に、ガンマ線イメージャーを設計した。設計したガンマ線イメージャーCoded Cube Camera for Gamma-ray (C3-G) の概略図を図 3.1-5 に示す。用いている回路や、検出器ジオメトリなどの基本コンセプトは令和3年度に考案したものをベースにしている。使用したシンチレータは令和3年度の比較検討の結果から、これまでも使用実績の多くある GAGG (Ce) とした。一方で、LYSO シンチレータも減衰時間や価格など魅力的な特性をもっているため、後述する多面体型イメージャーでは LYSO を採用し、特性を比較することとした。C3-G は 8 個の GAGG (Ce) シンチレータキューブと 18 個の鉛キューブ、1つの空乏キューブで構成されており、それぞれのキューブは 10 mm × 10 mm × 10 mm である。キューブ群の配置を図 3.1-6 に示す。

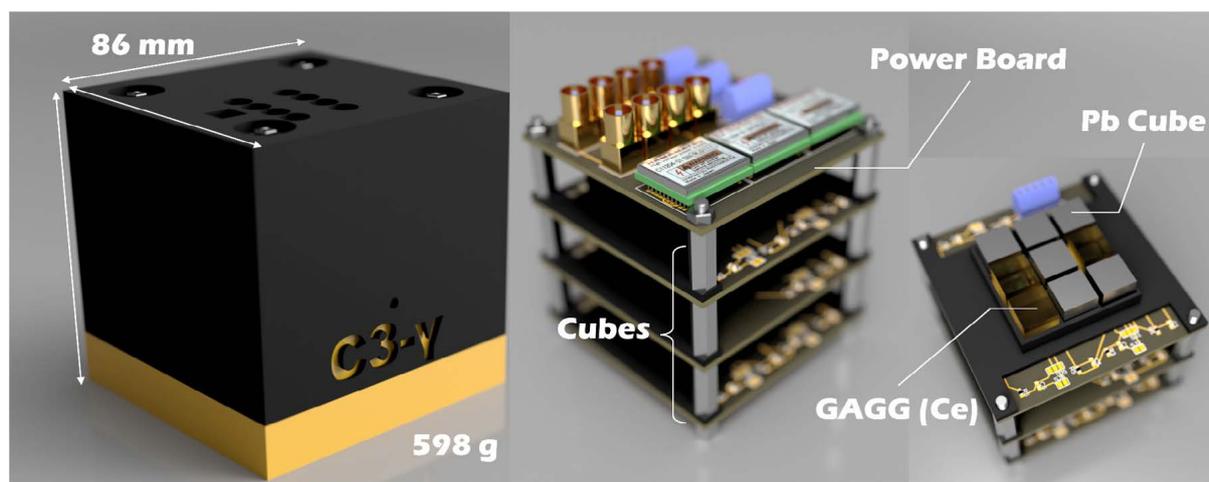


図 3.1-5 C3-G の概略図

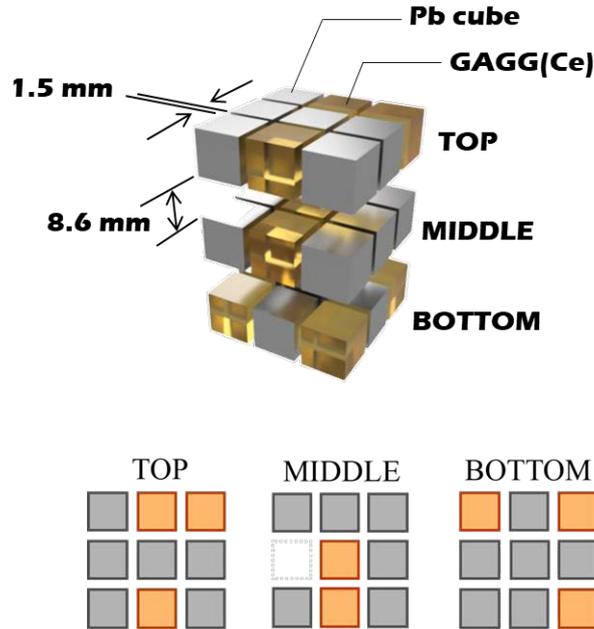


図 3.1-6 キューブ配置

まずは、設計した C3-G の特性をシミュレーションによって検証した。シミュレーションはモンテカルロシミュレーションツールキットである Geant4 [1] を用いて行った。シミュレーションで得られた検出器応答は、令和 4 年度予算で購入した大規模計算用パソコンと、TensorFlow [2] , Keras [3] といった機械学習ライブラリによってコーディングした画像再構成プログラムによって画像再構成を行った。画像再構成プログラムに使用したアルゴリズムとして、勾配降下法と呼ばれる回帰解析手法と、ニューラルネットワークを用いた分類アルゴリズムの 2 種類を比較検討した。検討の結果、勾配降下法は多線源などの複雑な線源分布に対しても高い精度で画像再構成ができるものの一度の計算に数分の時間がかかってしまうという特徴があり、ニューラルネットワークを用いた分類アルゴリズムは一度の計算が数 ms と非常に高速であるが、複雑な線源分布に対応するためには膨大なパターンの教師データが必要になるという特徴があることを確認した。令和 4 年度は、時間がかかっても多線源イメージングが可能である勾配降下法を用いた画像再構成プログラムを使用することとした。図 3.1-7 にシミュレーションによる全方位ガンマ線イメージングの結果を示す。シミュレーションは、3 m 先に置かれた 10 MBq の ^{137}Cs 線源の 10 分間測定を仮定している。以上の内容は現在特許申請中（特願：2023-007015）である。

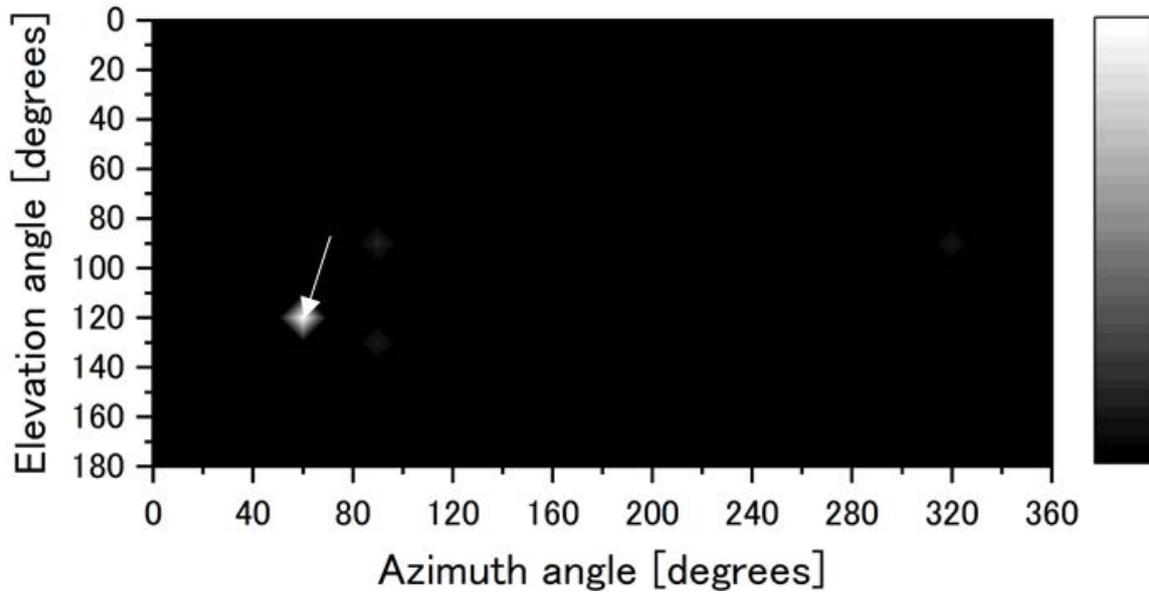


図 3.1-7 3 m 先に置かれた 10 MBq の ^{137}Cs 線源を 10 分間測定した際の全方位ガンマ線イメージングシミュレーション結果

さらに C3-G に用いた原理と画像再構成プログラムを応用して、単一結晶で 4π ガンマ線イメージングを実施可能なガンマ線イメージャーを設計した。図 3.1-8 にその概略図を示す。このガンマ線イメージャーは、令和 4 年度に購入した SiPM 用ヘッドアンプユニットにマルチピクセル SiPM と 1 つのシンチレータ結晶を固定し、その周囲に無作為に設けた複数のピンホールの開いたタングステンコリメータを配置した構造になっている。SiPM 用ヘッドアンプユニットに SiPM を接続し、 ^{137}Cs を用いた基礎試験を実施した。その結果を図 3.1-9 に示す。

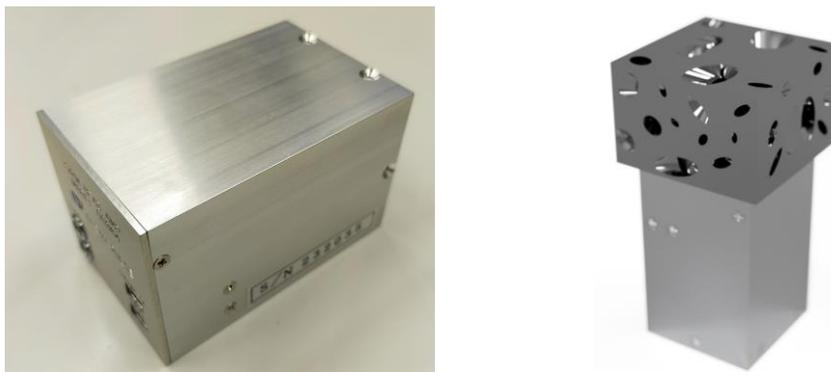


図 3.1-8 購入した SiPM 用ヘッドアンプユニットと設計した単一結晶イメージャー

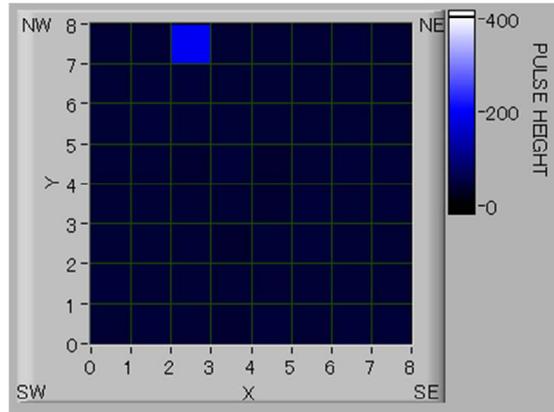


図 3.1-9 ピクセル番号 (X, Y) = (3, 8) に ^{137}Cs のガンマ線を照射した時の応答

② 試作ガンマ線イメージャーの製作と実験による性能評価試験

設計した C3-G はシミュレーションで良好な特性が得られたため、実際に製作し、実験的にその特性を評価した。製作した C3-G の写真を図 3.1-10 に示す。

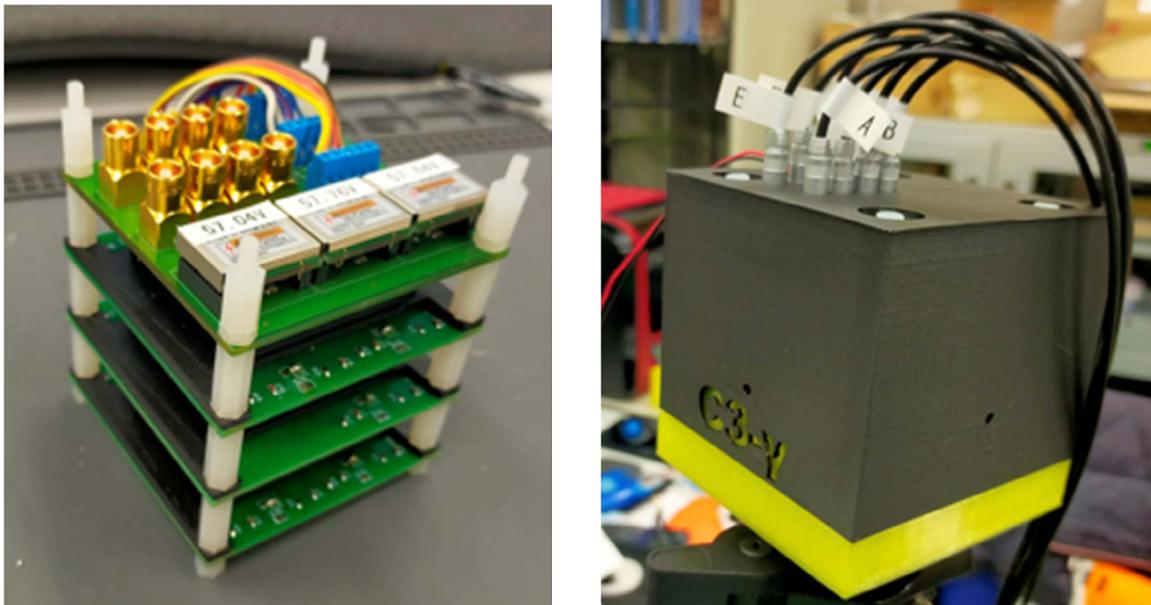


図 3.1-10 製作した C3-G

筐体は 3D プリンターで印刷した。シンチレータは GAGG (Ce) を用いており、受光素子として浜松ホトニクス製の MPPC を用いた。外部から直流 5 V を供給し、C3-G 内部の電源 IC で安定した直流 HV に昇圧している。各検出器からの信号は、C3-G の読み出し回路によって電圧信号に変換され、信号処理回路を經由して、外部の多チャンネル信号処理基板へと送られる。多チャンネル信号処理基板はイーサネットにて制御用パソコンと接続されており、パソコンから測定の START/STOP 信号を C3-G へ送信する。

実験セットアップを図 3.1-11 に示す。C3-G と 10 MBq の ^{137}Cs 線源の距離は 3 m 離れた。C3-G の後段には令和 3 年度に購入した多チャンネル信号処理基板が接続されている。

る。C3-Gには可視光カメラが付いていないため、RICOH製のthetaという360度カメラをC3-Gと同じ場所に設置し、別途可視光画像を取得した。線源の位置は固定したまま、C3-Gを90度ずつ回転させ、合計4回測定を行った。各測定の測定時間は10分間である。実験室内で行った実験結果を図3.1-12に示す。

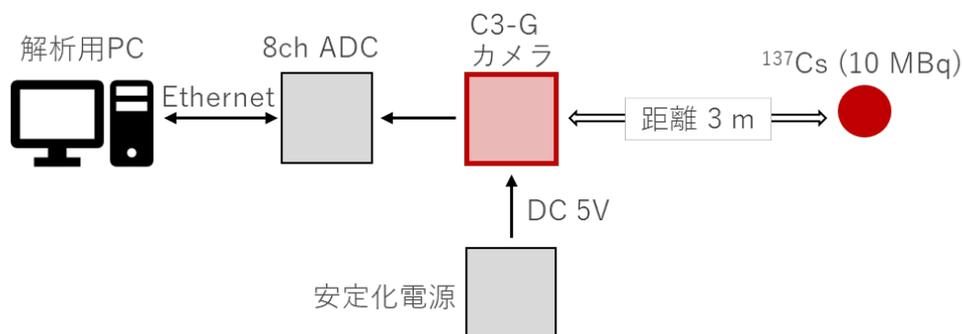


図 3.1-11 実験体系

白矢印の先が真の線源位置である。図よりわかるように、C3-Gの結像位置は真の線源位置を中心に高い位置分解能で収束している。角度分解能は±5度であり、これは持ち運び型のガンマ線イメージャーとしては非常に高い角度分解能である。また、±5度という値は、今回の応答関数（仰角、方位角ともに10度間隔）で得られる限界性能であり、応答関数をより細やかに取ればさらなる角度分解能向上も見込めると考えられる。過去に、同じ実験室で同様の実験をコンプトンカメラでも実施した。比較のためにその際の実験結果を図3.1-13に載せる。このようにコンプトンカメラを用いると真の線源位置以外の場所に多くのノイズが乗ってしまい、画像が不鮮明になる。また、視野も±70度しかないため、全方位をイメージングするには多数回の撮影か、複数台のカメラが必要になる。一方で、我々が開発した手法は、コンプトンカメラのようなノイズが乗らず、さらに一度で全方位のイメージングが可能である。

同様の試験を屋外でも実施した。CLADS駐車場に停められた車の中の1台に10 MBqの¹³⁷Cs線源を配置し、C3-Gでイメージングを行った。実験の様子を図3.1-14に示す。解析用パソコンとして令和4年度に購入したフィールド用パソコンを用いた。また、各装置の電源としてポータブル電源を使用した。10分間測定の結果を図3.1-15に示す。屋外においても高い精度でイメージングが行え、線源が搭載された車両だけでなく、車両のどこに線源が搭載されているかまではっきりと可視化できていることがわかる。

③ フィードバックおよび改良

シミュレーションから基礎試験、全方位ガンマ線イメージング試験を通して、フィードバックおよび改良をその都度繰り返し実施した。複数の改良点の中でも主な改良点としては・電源回路および信号処理回路の小型化・回路のバグ修正・キューブホルダーの改良・遮光性能の向上・C3-Gの固定方法の改良・画像再構成プログラムの自動化・応答関数シミュレーションの高度化などが挙げられる。

また令和4年度の成果により以下の課題が抽出できた。

- ・時間経過によるガンマ線スペクトルのピークシフト
- ・ポータブル電源使用時の回路の不安定性

・信号処理回路と画像再構成プログラムの接続

ガンマ線スペクトルのピークシフトは、SiPMの温度依存性によるところが多いため、実用化モデルには温度補償回路が必須である。ポータブル電源使用時の回路の不安定性は、各モジュールのグラウンドレベルをより安定に統一する必要がある。現状、信号処理回路と画像再構成プログラムへの接続は、データ成形や受け渡し処理に手動作業が多分に含まれている。そのため、得られた信号から再構成画像を取得するまでに多くの時間を要している。現場での実用性を考えると、ハードからソフトまでを統一したシステム化が必須である。これらの課題を令和5年度の研究テーマとする。



図 3.1-12 実験室内の実験結果
白矢印の先が真の線源位置。

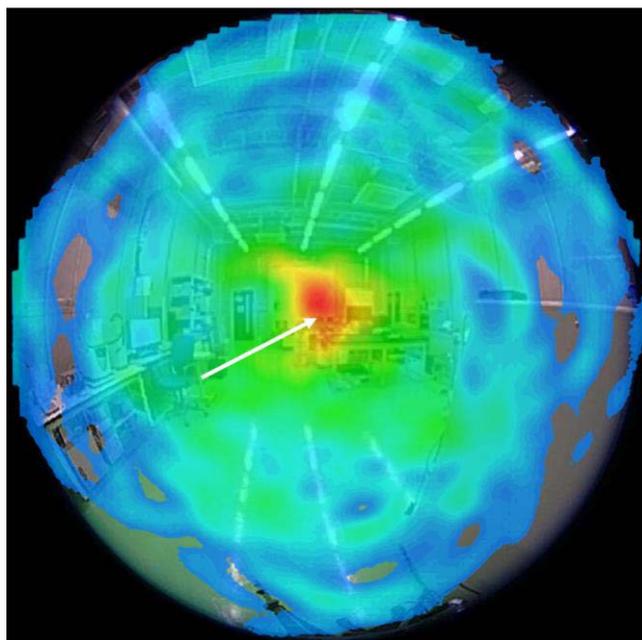


図 3.1-13 コンプトンカメラで撮影した画像
視野は±70度。



図 3.1-14 屋外試験の様子



図 3.1-15 屋外試験の実験結果

3.1.2 指向性検出器の製作と評価（令和3年度～令和4年度）

(1) 令和3年度までの概要

① 最小単位の指向性検出器の製作

本プロジェクトでは、JAEAと共同でロボットに搭載することを念頭においた指向性検出器の開発を行っている。令和3年度では、多面体型指向性検出器（図3.1-1(a)）の最小単位の指向性検出器を製作し、その特性評価を行った。製作した指向性検出器は主にシンチレータ、シンチレータ読み出し回路、検出器用遮蔽体から構成される。3.1.1のシミュレーションによる検出器設計では、シンチレータの候補として、LYSO(Ce)、GFAG(Ce)、GAGG(Ce)が有力な候補として挙げられていたが、今回製作した最小単位の指向性検出器では、高い発光量および高い感度を併せもち、かつ減衰時間が42 nsと短いために高線量場でのガンマ線計測に適した特性をもつLYSO(Ce)シンチレータを用いることにした。製作した最小単位の多面体型指向性検出器では、シンチレータに $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ のLYSO(Ce)、シンチレータ読み出し回路に浜松ホトニクス製のMPPC(S13360-6025PE)、信号処理回路としてクリアパルス製の8チャンネルSiPM読み出し回路(80470型)、検出器用遮蔽体として鉛アンチモンをそれぞれ採用した。製作した最小単位の多面体型指向性検出器を図3.1-16に示す。この最小単位の指向性検出器はJAEAのシミュレーションの体系と同じとした。

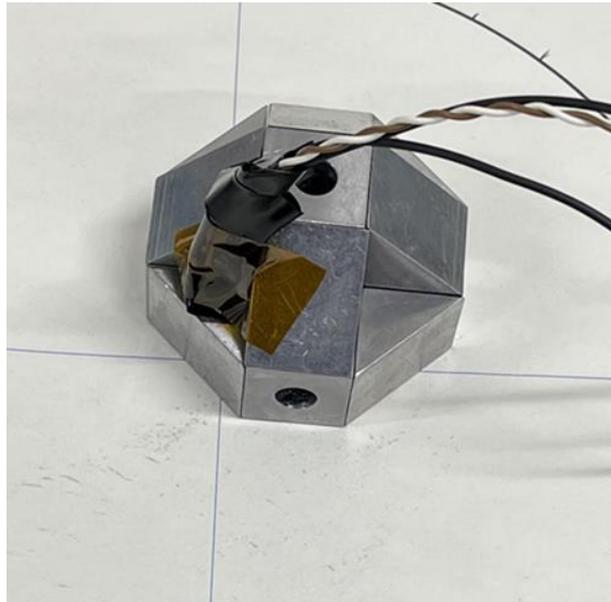


図 3.1-16 製作した最小単位の多面体型指向性検出器

② 最小単位の指向性検出器の評価

製作した最小単位の指向性検出器の評価を ^{137}Cs の密封線源を用いて行った。はじめに、 ^{137}Cs のエネルギースペクトル計測を行った（図3.1-17）。多面体型指向性検出器を構成するLYSO(Ce)シンチレータから見えような662 keVの全吸収ピークが得られることがわかった。 ^{137}Cs の662 keVのガンマ線のピークがはいるように、関心領域(region of interest:ROI)を400～600 chと設定した。LYSO(Ce)シンチレータを構成するLuには放射性同位体である ^{176}Lu が含まれるため、 ^{176}Lu 由来の自己発光BGがある。そのため、今回設定したROI内に ^{176}Lu の自己発光BGの影響がどの程度あるかを自己発光BGのエネ

ルギースペクトルを計測し、評価した（図 3.1-18）。その結果、ROI 内にカウントされたカウント数の平均値は 611.5 counts (1.02 counts/sec) であった。このカウント数の平均値を LYSO(Ce) の自己発光由来の BG として取り扱うこととした。

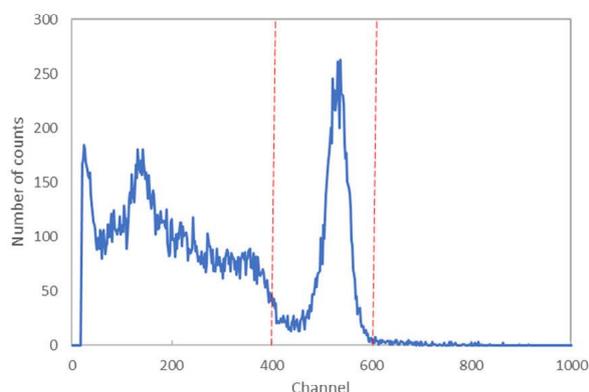


図 3.1-17 LYSO(Ce)シンチレータを用いて計測した ^{137}Cs のエネルギースペクトル

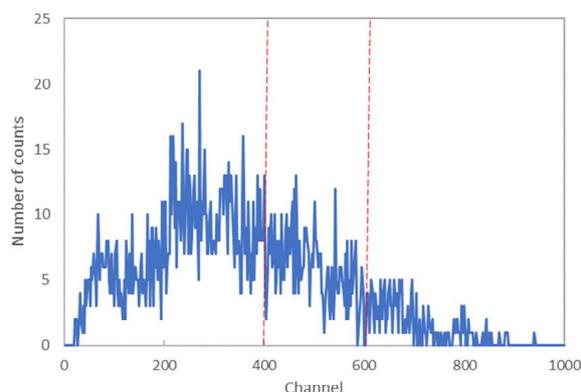


図 3.1-18 LYSO(Ce) シンチレータの自己発光 BG エネルギースペクトル

③ 最小単位の指向性検出器の性能評価

製作した最小単位の多面体型指向性検出器の性能を評価するために、線源と指向性検出器の相対角度を変化させながら、ROI (400~600 ch) 内のカウント数に変化を評価した。実験内容は以下にまとめる通りである。

実験内容

使用した線源： ^{137}Cs (1 MBq)

使用したシンチレータ：LYSO ($5 \times 5 \times 5\text{mm}^3$)

中心から線源までの距離：10 cm

線源と指向性検出器の相対角度： 10° 刻みで 360° (合計 36 点)

計測時間：各角度で 60 sec

ROI の範囲：400~600 ch

各入射角度の ROI 内カウント数 (Lu 自己発光 BG を差し引き後) の変化を図 3.1-19 にまとめる。線源の入射角度により ROI 内カウント数に変化し、またシンチレータ線源の間に遮蔽体がある角度 (特に $50^\circ \sim 300^\circ$) では大きく ROI カウント数が減少したことが確認できた。これらの結果より、今回製作した指向性検出器が多面体型指向性検出器の設計コンセプトを満たしていることがわかった。また、多面体型指向性検出器は対称形状であるため、カウント数の変化を 90° 毎にずらすことにより、遮蔽体の他の窪みに同サイズの LYSO (Ce) シンチレータを配置した際の ROI 内カウント数の推定を行える。 90° 毎にずらした際の ROI カウント数の変化を図 3.1-20 にまとめた。 90° 毎にずらした各入射角度の ROI カウント数の変化は、図 3.1-2 にあるシミュレーション結果と良い一致を示した。

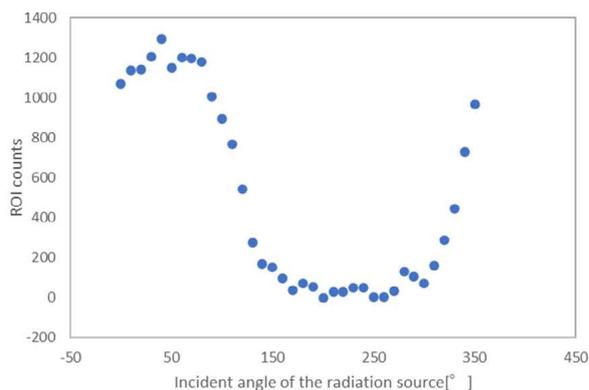


図 3.1-19 各入射角度の ROI 内
カウント数の変化

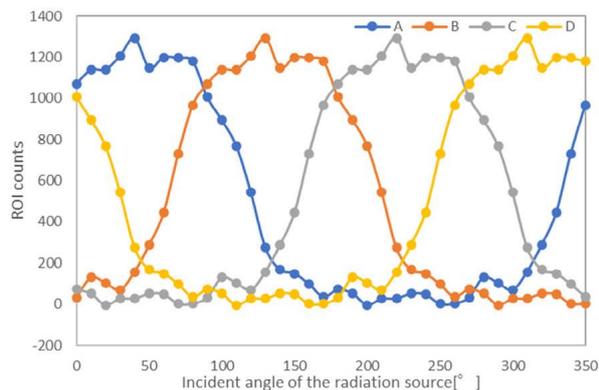


図 3.1-20 90° 毎にずらした各入射角度
の ROI 内カウント数の変化

(2) 令和 4 年度実施内容および成果

令和 3 年度に引き続き、指向性検出器の製作と開発を行った。JAEA と連携して、プロトタイプとなる指向性検出器の検討および製作を実施した。また、令和 5 年度に製作を予定しているロボットに搭載する検出器システムの仕様を検討した。

① 4 ch version の多面体型指向性検出器の製作と評価

はじめに、令和 3 年度で製作した最小単位の多面体が指向性検出器を 4 ch に拡張した 4 ch version の多面体型指向性検出器の製作と評価を行った。製作した 4 ch version の多面体型指向性検出器を図 3.1-21 に示す。今回製作した 4 ch version の指向性検出器は、令和 3 年度に製作した最小単位の指向性検出器と同様に $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ の LYSO(Ce) シンチレータ、シンチレータ読み出し回路である浜松ホトニクス製の MPPC (S13360-6025PE)、信号処理回路であるクリアパルス製の 8 チャンネル SiPM 読み出し回路 (80470 型)、検出器用遮蔽体である鉛アンチモンからなる。LYSO シンチレータと MPPC は 3D プリンターで製作した ABS 製の治具を用いて検出器遮蔽体に設置し、遮光用に黒いテープで固定した。

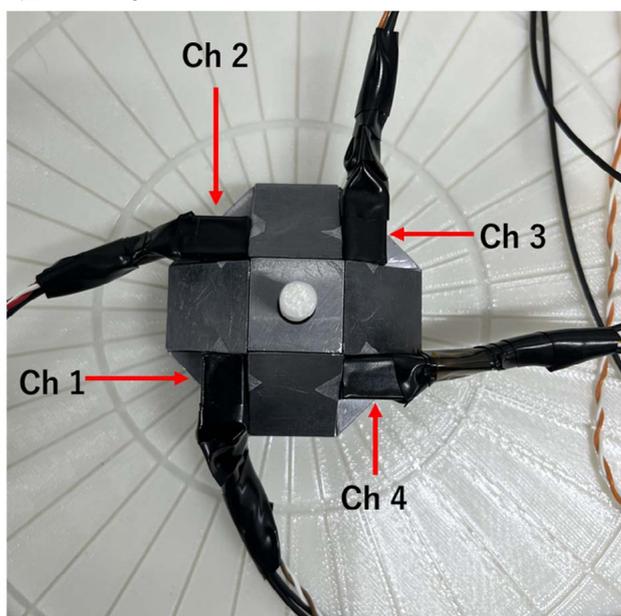


図 3.1-21 製作した 4 ch version の多面体型指向性検出器

次に製作した 4 ch version の多面体型指向性検出器の性能評価を行うために、線源と検出器の相対角度を変えながら ROI 内のカウント数の変化を評価した。4 ch version の多面体型指向性検出器の性能評価実験の内容を以下にまとめる。

4 ch version の多面体型指向性検出器の性能評価実験内容

- 使用した線源： ^{137}Cs (1 MBq)
- 中心から線源までの距離：10 cm
- 線源と指向性検出器の相対角度： 10° 刻みで 360° (合計 36 点)
- 計測時間：各角度で 5 min
- ROI の範囲：400~600 ch

各入射角度での各 ch の ROI 内カウント数の変化を図 3.1-22 にまとめた。各 ch で線源の入射角度に対応して、ROI 内カウント数が変化することを確認した。また、図 3.1-2 にあるシミュレーション結果とも良い一致を示している。

今回得られた各 ch の線源の入射角度毎の ROI 内カウント数の変化 (図 3.1-22) を応答関数にし、勾配降下法を用いることで、未知の場所に置かれた線源と検出器の相対角度を 2 次元内で推定することができる。そこで、 ^{137}Cs 線源を 35° 、 65° 、 170° の位置に配置し、それぞれ 5 分間の計測を行い、その際に得られた各 ch の ROI 内カウント数から勾配降下法により ^{137}Cs 線源の位置を推定した。線源位置の推定結果を図 3.1-23 にまとめる。推定結果は、概ね真の入射角度の方向を示しており、勾配降下法を用いることにより、単一线源の場合において照射角度推定を行えることがわかった。

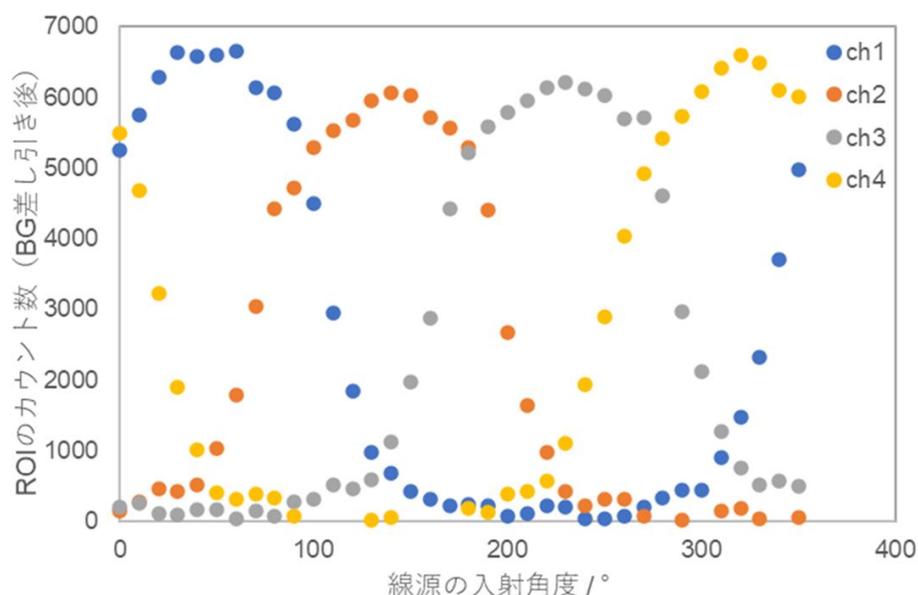


図 3.1-22 各 ch の線源の入射角度毎の ROI 内カウント数 (BG 差し引き後) の変化

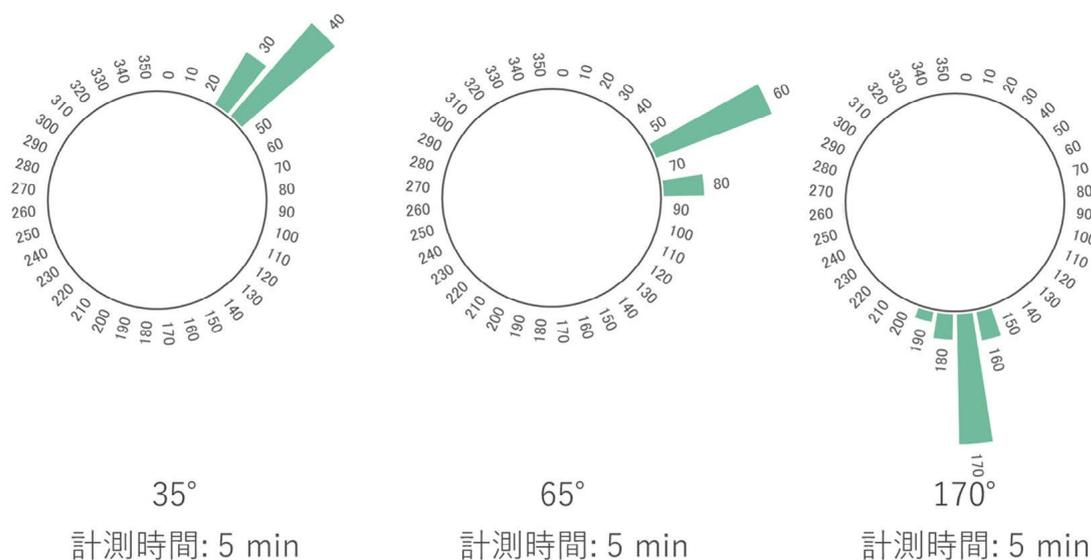


図 3.1-23 未知の角度 (35°、65°、170°) に置かれた ¹³⁷Cs 線源の位置推定結果

② 8 ch version の多面体型指向性検出器の製作

現在までは、最小単位および 4 ch version の多面体型指向性検出器の製作ならびに評価を行ってきたが、いずれも線源の位置を 2 次元でしか推定することが構造上できなかった。しかしながら、本プロジェクトで開発が行う指向性検出器は 3 次元の空間内にある線源位置の推定を行うことが求められており、かつロボットに搭載するにあたり、遮光性、サイズ、重量の要件（仕様）を満たす必要がある。このような要件を満たす指向性検出器として 8 ch version の多面体型指向性検出器を製作し、その評価を行った。

今回製作した 8 ch version の多面体型指向性検出器を図 3.1-24 に示す。はじめに、下部治具（溝付き）に検出器用遮蔽体である鉛アンチモンを設置した。シンチレータを放射線検出部として使用しているため、放射線検出部の遮光が大変重要となる。そのため、今回から治具は黒色の ABS を材料として 3D プリンターを用いて製作を行った。次に、シンチレータを検出器用遮蔽体の溝部分に計 8 個設置した。以前までの指向性検出器では、LYSO(Ce)シンチレータに反射材としてテフロンテープを手で巻いていたが、手作業のためシンチレータ毎に個体差が生じることが危惧されていた。そこで、令和 4 年度では、あらかじめ BaSO₄ と Al の反射膜が光取り出し面以外の 5 面に付いている 5 × 5 × 5 mm³ LYSO(Ce)シンチレータを購入し、使用した。シンチレータと MPPC はロボットに搭載した際に位置がずれないようにカプトンテープで固定した。その後、遮光用の上蓋治具を下部治具の溝に挿入した。最後にこれらの指向性検出器を 100 × 100 × 100 mm³ のアルミケースに収納した。上蓋治具およびアルミケースにはあらかじめ、信号線を通すための直径 30 mm の穴が通してあり、そこから MPPC の信号線を通して、外部にある信号処理回路へとつなぐことができる。今回は MPPC として浜松ホトニクス製の S13360-6025PE、信号処理回路としてクリアパルス製の 8 チャンネル SiPM 読み出し回路 80470 型を以前と同じく採用した。本プロジェクトでは、ロボットに搭載する検出器のペイロードエリアは 132 mm × 150 mm、ペイロードは 2 kg 以下がロボット側から要望であるが、今回製作した 8 ch version の多面体型指向性検出器は必要ペイロードエ

リアが約 100 mm × 100 mm、読み出し回路も含めたペイロードが約 1.65 kg といずれの要件も満たしている。

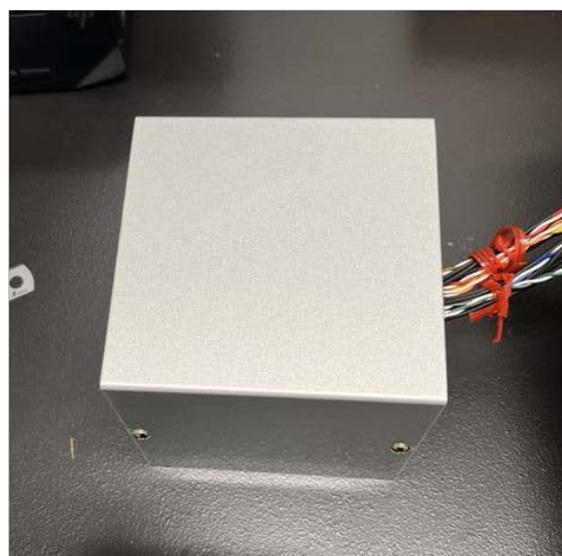
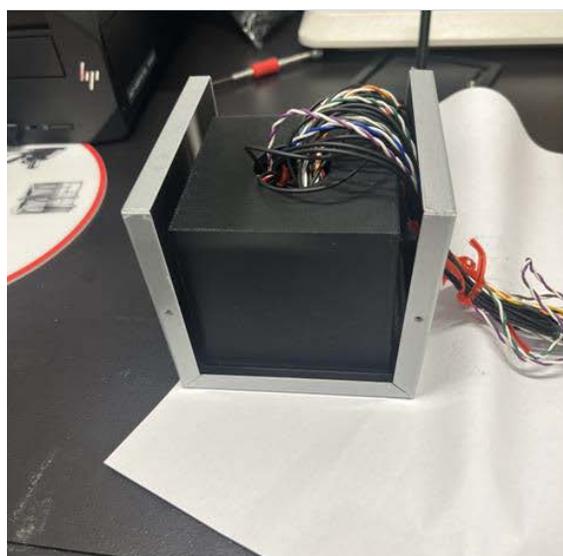
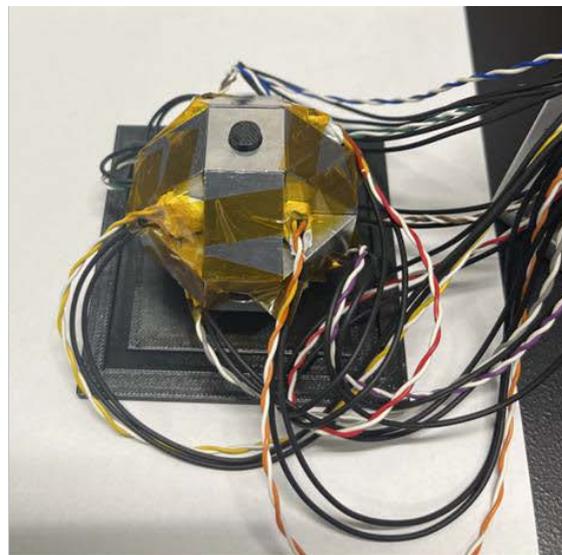
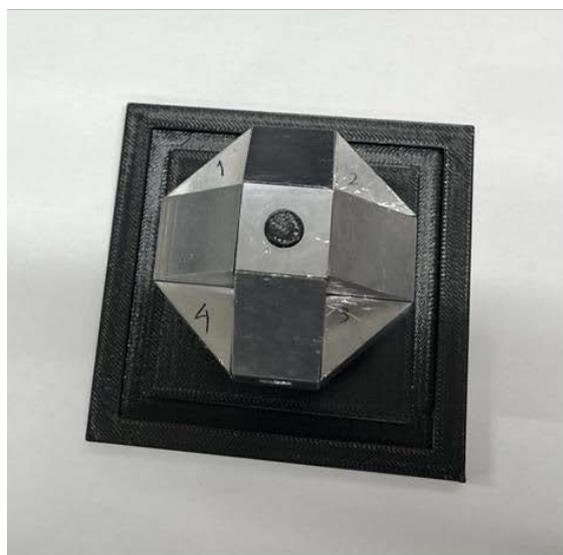


図 3.1-24 製作した 8 ch version の多面体型指向性検出器
(左上) 下部治具に検出器用遮蔽体設置後、(右上) LYSO(Ce)シンチレータ設置後
(左下) 上部治具 (遮光用) を設置後、(右下) アルミケースに収納後

③ 8 ch version の多面体型指向性検出器の評価実験

はじめに、3 m 先に 10 MBq の ^{137}Cs 線源が仰角 $\theta = 90^\circ$, 方位角 $\phi = 0^\circ$ の位置にある際に 8 ch version 多面体型指向性検出器で 30 分間計測を行った際の線源位置推定結果をシミュレーションにより計算した結果を図 3.1-25 に示す。計算上では、8 ch 多面体型指向性検出器により、未知の場所にある線源位置を推定できることが示された。そこで、実際に製作した 8 ch version の多面体型指向性検出器を用いて未知の場所に置いた線源の位置推定実験を行った。線源の位置推定実験に関する情報を以下にまとめる。

線源の位置推定実験内容

線源位置：1 カ所目 $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$

2 カ所目 $\theta = 135^\circ$, $\phi = 0^\circ$

3 カ所目 $\theta = 135^\circ$, $\phi = 315^\circ$

それぞれの線源位置から検出器中心までの距離は 30 cm で固定

線源： ^{137}Cs (1 MBq)

計測時間：各線源位置でそれぞれ 2000 sec

今回の実験では応答関数については、実験で求めると膨大な時間がかかり、現実的ではないので、シミュレーション計算により求めている。それぞれの線源の位置推定実験の結果を図 3.1-26 にまとめる。全ての角度において、線源のある位置に近い場所を推定できているものの、シミュレーションで計算した結果より線源位置推定の精度が低くなってしまった。これについては、LYSO(Ce)シンチレータの自己発光 BG の影響が考えられる。今回の実験では、1 MBq の ^{137}Cs を線源に使用しており、ROI 内に占めるカウント数の割合が線源由来の信号より LYSO(Ce)シンチレータの自己発光 BG 由来の信号が約 3 倍（線源と検出器の間に遮蔽体がない場合）～30 倍（線源と検出器の間に遮蔽体がある場合）ほどあり、その LYSO(Ce)シンチレータの自己発光 BG の揺らぎに本来計測したい線源由来の信号が埋もれてしまっている。そもそもなぜ、自己発光 BG をもつ LYSO(Ce)シンチレータを使用しているかということ、早い信号速度と比較的高い感度を持ち、高線量場での使用に適した特性をもっているからである。しかし、一般の実験室での実験では強い線源を使うことができず、自己発光 BG の揺らぎによる線源位置推定結果の曖昧さが生じてしまった。例えば、1 MBq から 10 MBq に線源を変えることができれば、ROI 内に占める LYSO(Ce)シンチレータの自己発光 BG の割合が 0.3 倍～3 倍に軽減されるため、より線源位置推定の精度が向上すると予想される。

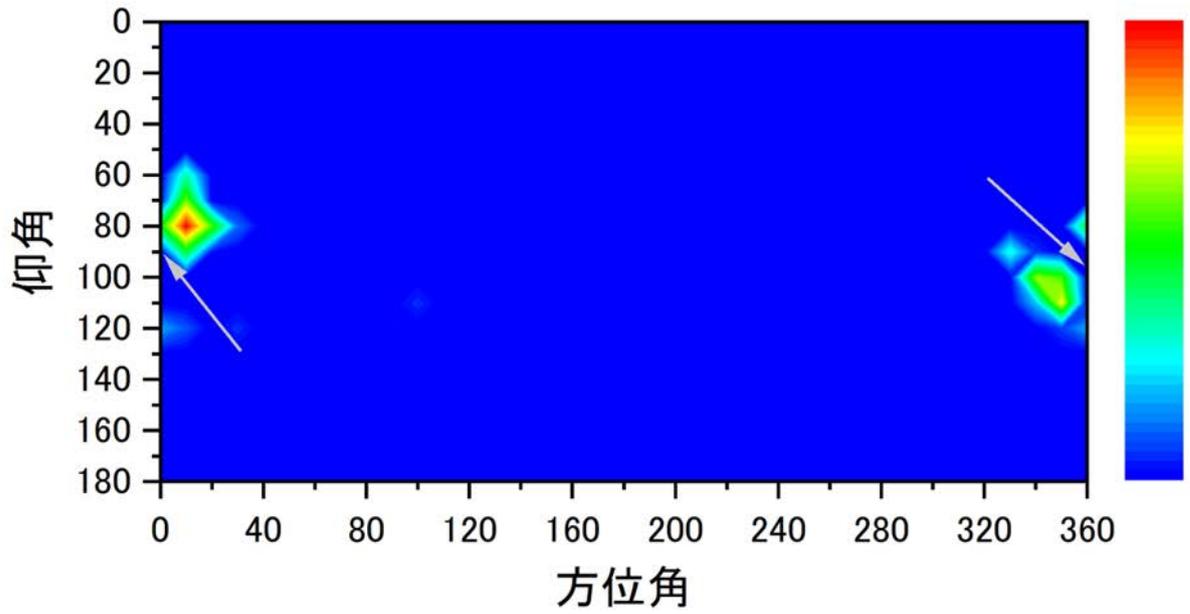


図 3.1-25 3 m 先に 10 MBq の ^{137}Cs 線源が $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$ の位置にある際の線源位置推定をシミュレーションにより計算した結果

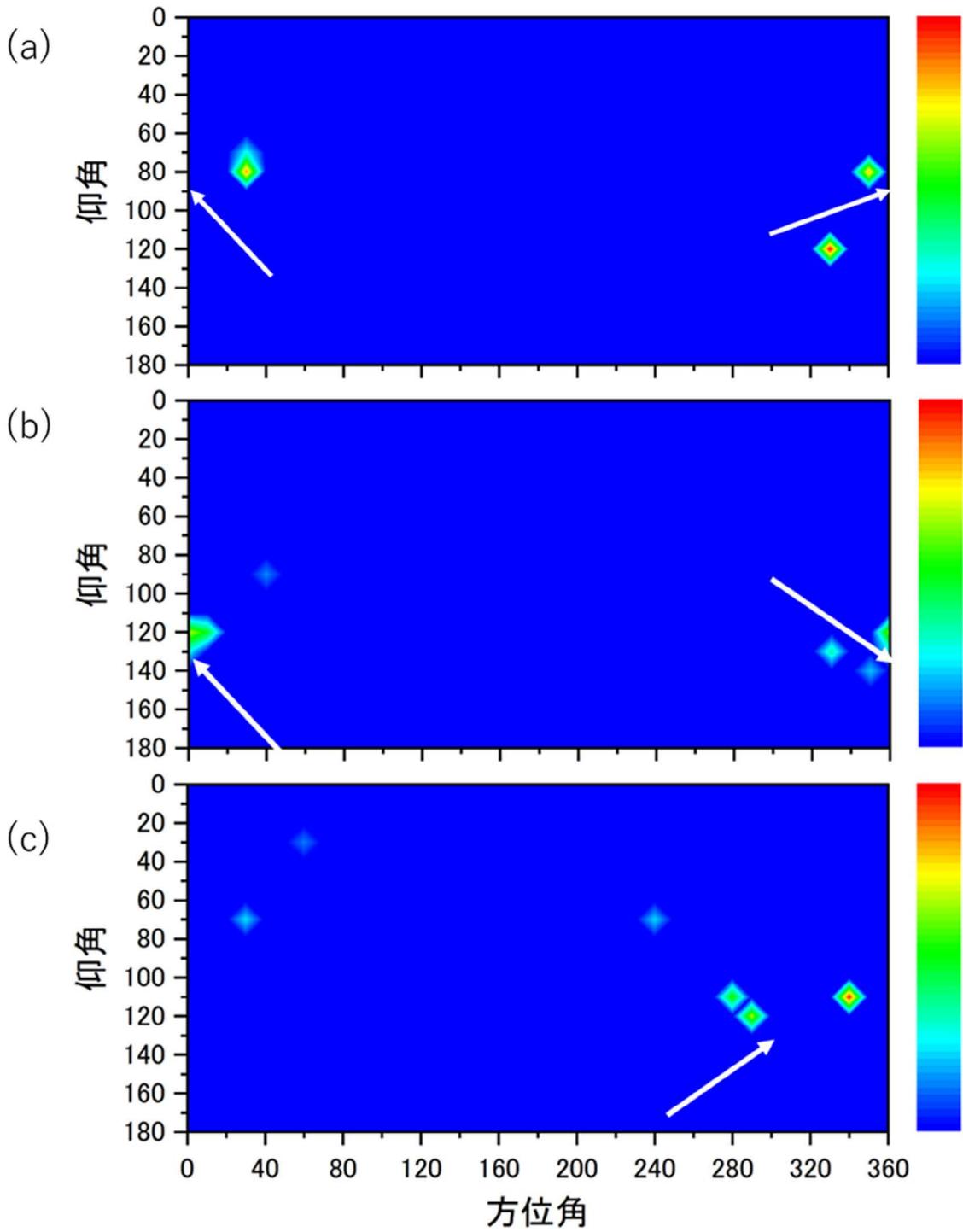


図 3.1-26 8 ch version の多面体型指向性検出器の線源位置推定結果
 (a) $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$ 、 (b) $\theta = 135^\circ$, $\phi = 0^\circ$ 、 (c) $\theta = 135^\circ$, $\phi = 315^\circ$

3.1.3 まとめ

シミュレーションによる検出器設計

令和3年度の結果を基に、鉛遮蔽体と複数のシンチレータ結晶で構成される実験体系を製作し、より実機に近い構成で性能評価試験を実施した。課題を抽出し、検出器設計段階へフィードバックを行った。目標とする性能の実現に向けて、得られたデータから検出器の改良を行った。

指向性検出器の製作と評価

令和3年度に引き続き、JAEAと連携して指向性検出器の製作と評価を行った。ロボットに搭載することを念頭において遮光性・サイズ・重量の要件を満たす8 ch versionの多面体型指向性検出器システムを設計・製作・評価した。製作した8 ch versionの多面体型指向性検出器を用いて、点線源の位置推定が可能であることを確認した。

3.2 画像・情報処理技術開発（令和3年度～令和4年度）

3.2.1 LiDARを用いた周囲環境測定結果に基づく環境地図作成システムの開発（令和3年度～令和4年度）

(1) 令和3年度までの概要

- ① 実施事項：測位システム LiDAR と SLAM による自己位置推定および周囲環境測定システムの試作

本課題におけるロボットシステムは、環境地図作成を行う先行ロボットと、線源探査を行う後続ロボットからなる（図3.2-1）。線源位置のイメージングには、先行ロボットによる高精度な環境地図生成と、後続ロボットの高精度な位置・方位情報が不可欠となる。このため、令和3年度は、3D-LiDARを用いた未知の調査対象領域の環境地図生成と、得られた環境地図を参照して自己位置推定を行うシステムの検討を行い、環境地図生成および自己位置推定システムのソフトウェアを試作し、試験用ロボット（図3.2-2）により予備的検証を行った。

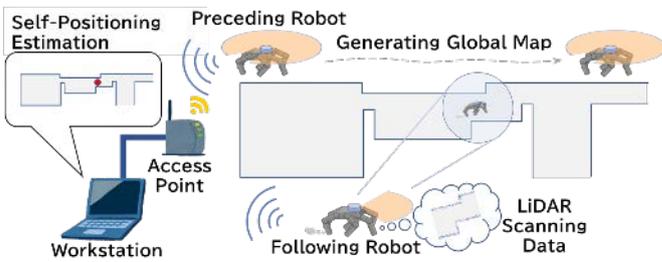
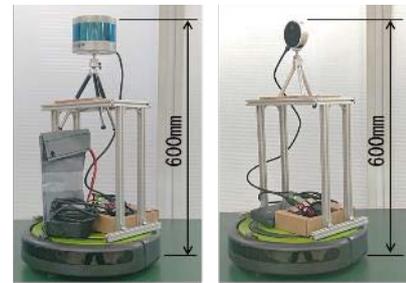


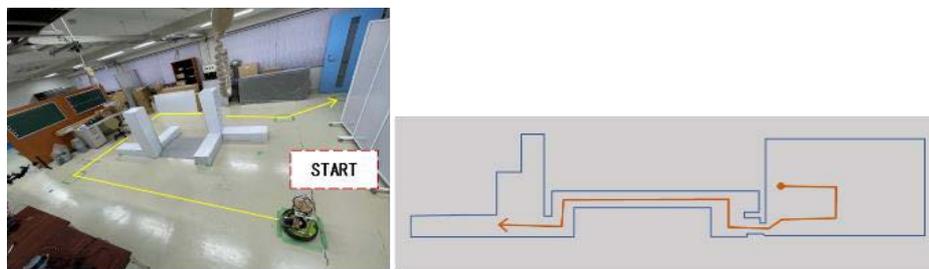
図 3.2-1 システムの構築方針



(a) Preceding Robot (b) Following Robot

図 3.2-2 試験用ロボットの外観

先行ロボットに 3D-LiDAR（VLP-16、Velodyne 社製）、後続ロボットに深度カメラ（RealSense L515、Intel 社製）を搭載し、有線 LAN 環境において、各ロボットをジョイパッドにより手動遠隔操作した。試験環境（図 3.2-3、富山高等専門学校本郷キャンパス内の実験室および廊下、全体経路長：約 35m 程度）において、先行ロボットにより事前収集した 3D-LiDAR スキャンデータをワークステーション内でオフライン処理した結果、大きな破綻なく室内および廊下の 3次元幾何学的形状を捉えた良好な結果を得た（図 3.2-4）。また、先行ロボットで作成した環境地図と後続ロボットによる 3D-LiDAR スキャンデータを照合するこ



(a) Starting point surroundings and indoor route

(b) Overall route map

図 3.2-3 試験環境のスタート地点周囲の様子と全体経路

とで、後続ロボットの自己位置推定が可能かをオフライン実験により検証した（図 3.2-5）。狭隘部通過時の推定結果が不安定となることや、処理時間が3時間超と極めて長くなることが問題となっており、今後、原因調査および対策が必要であることがわかった。

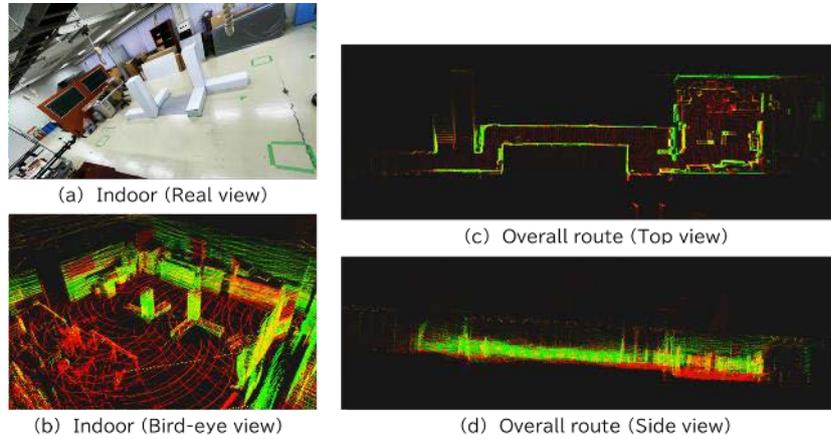


図 3.2-4 環境地図の生成結果

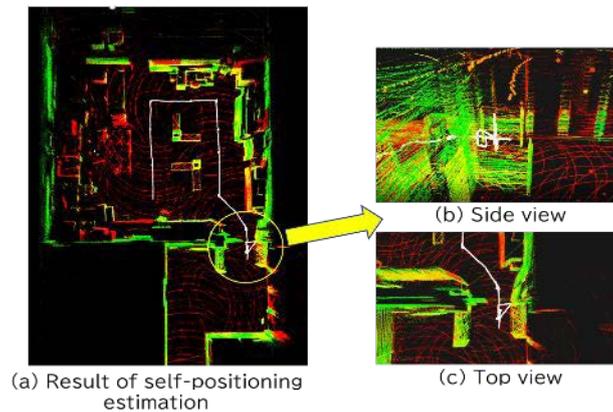


図 3.2-5 自己位置推定の結果

(2) 令和4年度実施内容および成果

① LiDARを用いた周囲環境測定結果に基づく環境地図作成システムの開発

令和3年度に引き続き、環境地図作成システムの開発を推進した。地図生成精度向上のため、500Hzで高速サンプリング可能なIMU（慣性計測ユニット、3DM-GX5-AHRS、Lord MicroStrain社）を新たに追加搭載した（図3.2-6）。また、ROS（Robot Operating System）

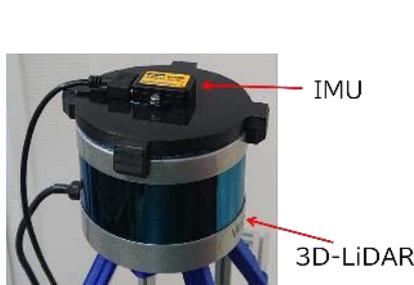


図 3.2-6 IMUの外観

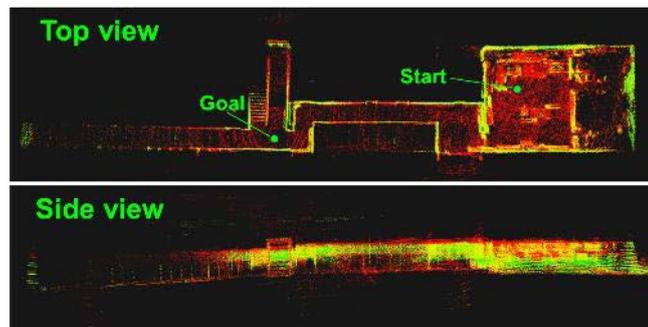


図 3.2-7 改良した環境地図の生成結果

3.2-2

パッケージにおける LiDAR と慣性オドメトリを用いて移動ロボットの軌跡推定と地図作成を行うフレームワークである LIO-SAM[4]を使用して環境地図を生成した（図 3.2-7）。無線 LAN 環境下において、図 3.2-4 と同様に良好な環境地図をリアルタイムで生成可能であることを確認した。

後続ロボットの自己位置推定については、令和 3 年度の結果を踏まえて調査検討を行い、NDT アルゴリズム[5]のマルチスレッド並列処理を実装することで実時間の 1.5 倍程度まで高速化した。狭隘部において自己位置推定が不安定となる現象は、3D-LiDAR と深度カメラのスキューニング方式の違い（取得点群データ分布状態の違い）が原因であることが明らかとなったため、後続ロボットにも 3D-LiDAR を搭載し、検証により改善を確認した（図 3.2-8）。

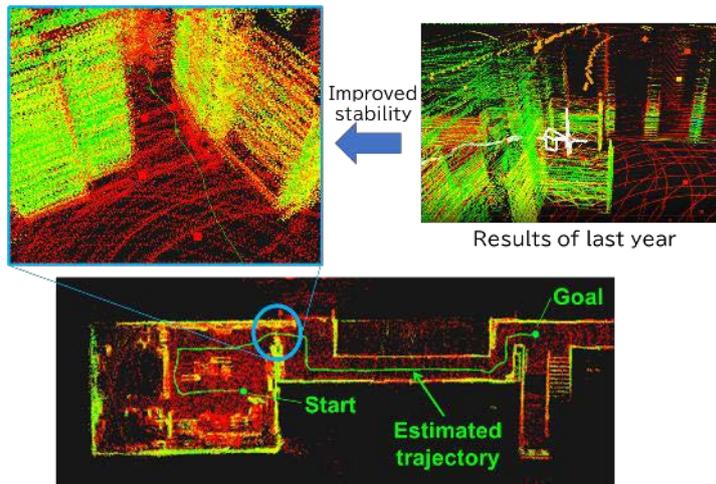


図 3.2-8 改良した自己位置推定の結果

一方で、3D-LiDAR で生成された環境地図は幾何学的特徴の反映に優れるが、環境色が伴っていないため地図としての視認性に乏しい。そのため、後続ロボットに搭載している深度カメラを先行ロボットにも搭載し（図 3.2-9）、RGB 情報付きの点群データを並行してサンプリ

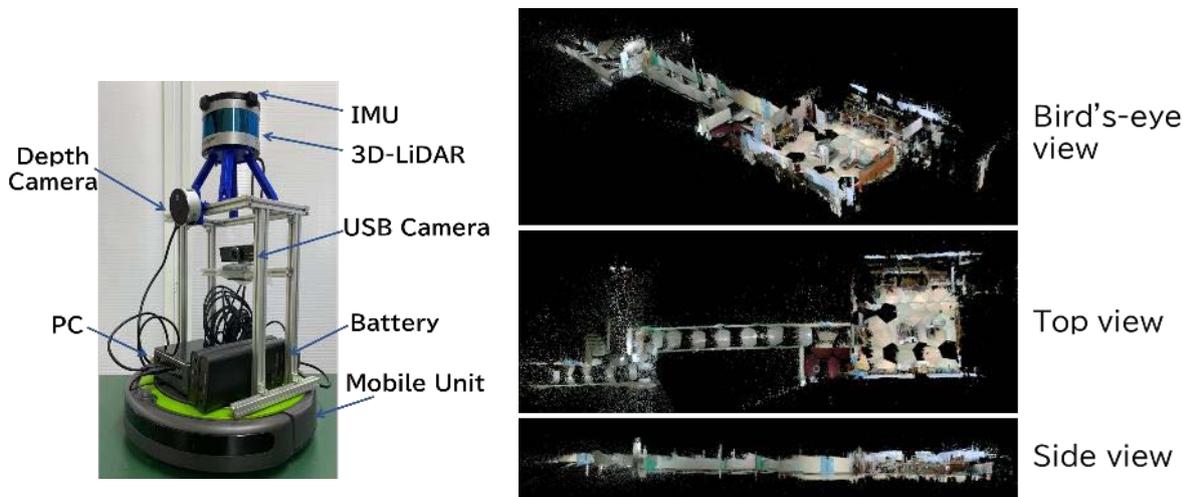


図 3.2-9 深度カメラ搭載後の先行ロボット外観

図 3.2-10 環境色を反映させた環境地図

3.2-3

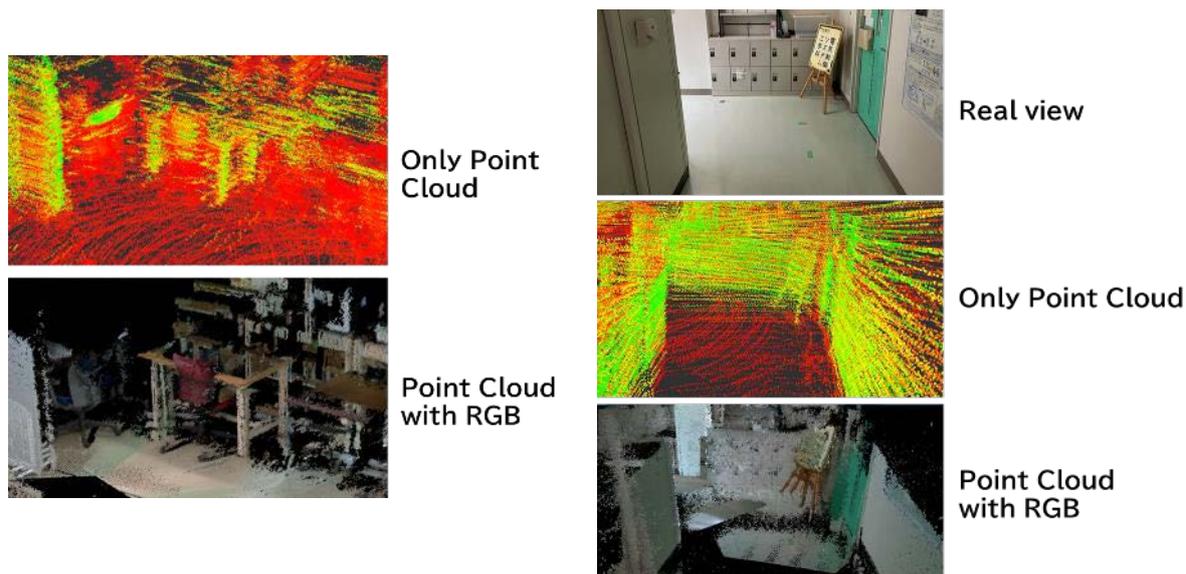


図 3.2-11 環境色を反映させた場合の比較



図 3.2-12 環境色付き地図におけるずれ

ングするとともに、環境地図生成に同期させることで、環境色付きの環境地図を別途生成させた（図 3.2-10）。3D-LiDAR と深度カメラではそれぞれのもつ視野範囲、サンプリングレートが異なるため、図 3.2-10 では若干の歯抜け部が生じているが、図 3.2-11 に示す通り、物体の識別性が格段に向上していることがわかる。しかしながら、細部を見れば図 3.2-12 のような合成ずれが散見される。これについては、深度カメラのスキャン方式の違いやキャリブレーション誤差、3D-LiDAR との同期誤差、環境地図合成時の方位誤差などが要因として考えられ、今後改善が必要である。一方、図 3.2-10 の地図の幾何学的なクオリティは図 3.2-7 と同様に保たれていることから、環境色付与の処理による図 3.2-12 にみられるような合成ずれが 1 行程を通じて蓄積される現象（すなわち、地図の歪み）は観測されておらず、本手法により顕著な誤差の増加無しに視認性向上を実現できることが示された。

以上の結果より、本システムでは先行ロボットには 3D-LiDAR および深度カメラ、後続ロボットには 3D-LiDAR をそれぞれ搭載する構成とした。

② 環境地図上に放射線源分布推定結果を融合して表示するシステムの開発

密封ガンマ線源を対象に、単一のロボット・センサーによる周囲環境・放射線分布推定の検証確認を行った。開発中の新型放射線計測器から得られる放射線源分布情報は、図 3.2-13

に示すような方位角および仰角（天頂を 0 度とする）を座標軸として、存在確率強度を表すものである。そのため、計測器の座標原点から仰ぎ見た方向に存在する点群を、存在確率強度に応じて識別する必要がある。

基本的な考え方は、観測点を原点とする仮想球面を用意し、方位角および仰角を 10 度刻みでセグメント化する。次に、セグメント重心へのベクトルを基軸に四角錐を高さ方向（仮想球面の半径方向）に伸展させ、四角錐に含まれる点群をベクトル計算により求める。このとき、四角錐に含まれる点群数が一定閾値を超えた段階で処理を停止し、強度により色を分けてマーキングする（図 3.2-14）。これにより、奥行き方向に対する重複判定を回避することができる。

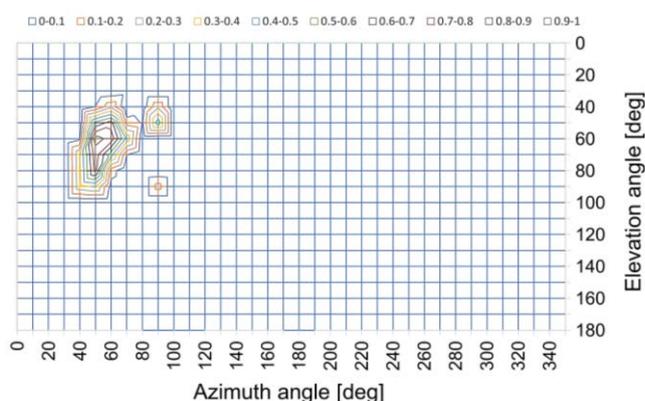


図 3.2-13 放射線源分布情報の例

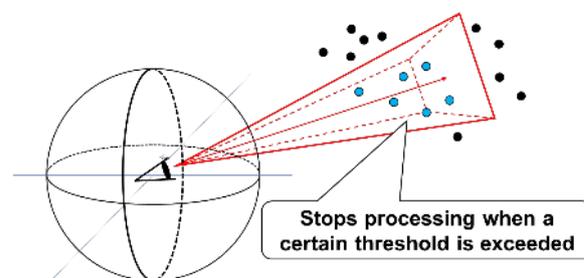


図 3.2-14 放射線源分布情報の反映の原理

図 3.2-15 は図 3.2-13 の放射線分布情報サンプルを融合反映させた結果である。存在確率強度 50%以上（緑）から 90%（橙）までを 4 段階で色分けし、プロットした。図 3.2-13 と比較すると、おおよその放射線源の存在する方位と位置および分布状況が把握できる。オブジェクト後背部へのプロットは抑制されており、重複判定が有効に機能していることも確認された。一方で実際の処理では、処理速度の観点から環境地図を構成する点群に対して約 1/10 のダウンサンプリングを施している。そのため、点群削減によって閾値を超えないセグメントが増加し、奥行き方向へ貫通してプロットしてしまうケースが生じることがある。また、点群中に存在するノイズなども判別対象として処理されるため、閾値の調整、点群密度によるノイズ判定などの検討が今後の課題である。

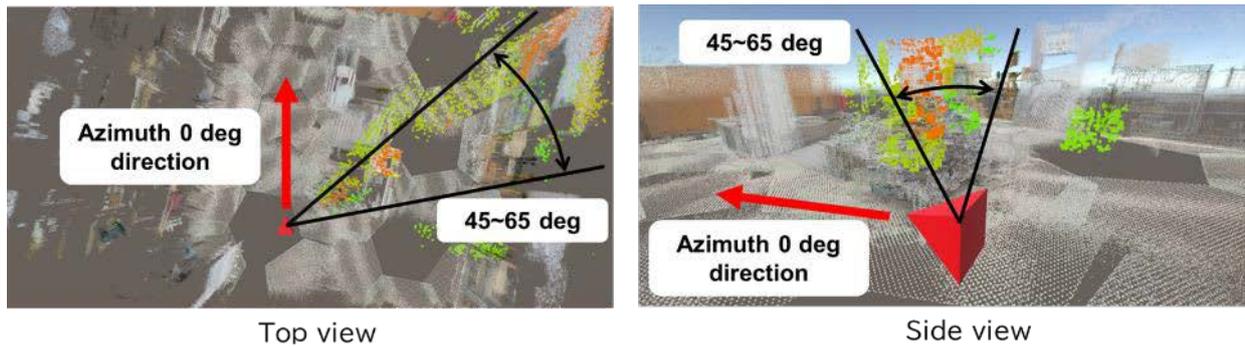


図 3.2-15 放射線源分布情報の環境地図への反映結果

3.2.2 まとめ

LiDAR を用いた周囲環境測定結果に基づく環境地図作成システムにおいては、令和 3 年度に引き続き開発を推進し、環境地図生成精度の向上および処理速度の向上を達成し、さらに環境色を反映させることによる視認性向上を確認した。また、自己位置推定について、後続ロボット搭載の深度カメラを 3D-LiDAR に変更し、マルチスレッド並列処理実装により自己位置推定の安定性向上および処理時間の大幅短縮化を達成した。

環境地図上に放射線源分布推定結果を融合して表示するシステムにおいては、放射線源分布情報の融合反映方法を考案実装し、サンプルデータ適用の結果、想定通りの融合結果を得た。このことから、多地点、多方向からの放射線源分布情報を重ね合わせ処理に対する考案実装の見通しが得られ、汚染部位の絞り込みイメージング実現に期待が持たれる。

3.3 ロボット制御システム開発（令和3年度～令和4年度）

本研究では、対象空間内の放射線源の3次元分布を効率的に推定するための探索手法の構築を行うことを目指している。ここでは、放射線源の探索を、(a)対象空間全体の大まかな探索と、その探索によって得られた予備的な放射線源分布推定結果を利用した(b)特定箇所の詳細な探索、の2段階で行うというアプローチをとる（図3.3-1）。

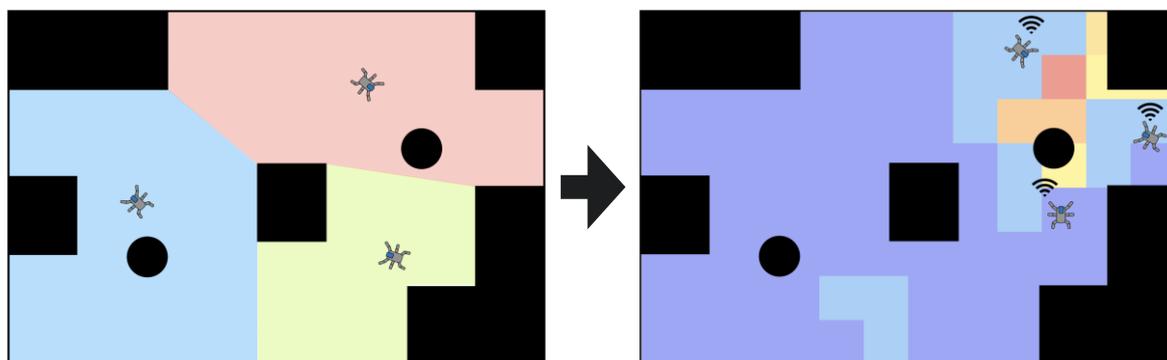


図 3.3-1 放射線源の探索戦略

令和4年度は、環境地図と粗い放射線源分布推定結果に基づき、検出器の特性に応じて複数台のロボットが指定した箇所の詳細な測定を行うための観測地点計画手法の開発を行った。

3.3.1 複数台ロボットによる放射線源の探索（令和3年度～令和4年度）

(1) 令和3年度までの概要

① 複数台ロボットによる対象空間全体の探索

令和3年度には、複数台のロボットによって対象空間全体を大まかに探索する手法の開発を行った。

提案手法では、LiDARによって得られた環境地図をグリッドマップ化し、そのマップをロボットの台数に応じて分割することで、複数台のロボットに対して各々が探索すべき領域を割り当てる。その後、各ロボットが割り当てられた領域内を探索する経路を生成し、探索を実行する（図3.3-2）。シミュレーション実験によって提案手法の有効性を示した。



図 3.3-2 複数台ロボットによる対象空間全体の探索

② 遠隔操作システムの基盤構築

令和3年度には複数台のロボットを遠隔から操作するシステムの構築を行った。

Robot Operating System (ROS) を用いて無線 LAN 経由での遠隔操作を行うシステム基盤の構築を行った。

(2) 令和4年度実施内容および成果

① 詳細測定のための観測地点計画手法の開発

令和4年度は、環境地図において指定した箇所に対して、より詳細な情報を得るための複数台ロボットの配置手法を構築し、その配置に対してロボットが障害物を回避しながら移動する手法を構築・実装した。

(i) 環境地図と粗い放射線源分布推定結果に基づく観測箇所の指定

令和3年度に開発した手法で、複数台のロボットにより対象空間全体を大まかに探索することで、粗い放射線源分布が推定される。ユーザは、これを用いてより詳細に観測すべき箇所を検討・決定し、その位置を指定する。

(ii) 観測箇所の詳細情報を得るための複数台ロボットの配置

観測すべき対象の位置が既知である場合、単一のロボットが移動しながらそれを取り囲むような複数箇所計測することで、最終的な線源分布推定結果の精度は向上することが知られている[6]。複数台のロボットにおいても同様に、観測すべき箇所を取り囲むような位置から計測をすることで、推定結果の精度が向上し、その箇所の情報もより多く得ることができると考えられる。また、複数台のロボットを利用することで、計測や移動に要する時間の短縮も期待される。

本研究で開発を進めている検出器は 4π [sr] 方向に感度をもつものである。簡単のために、全ての方向に対して等しい分解能をもつと仮定すると、ロボットの姿勢に関わらず、ある計測可能範囲をもった検出器が観測対象箇所の方を向いていることと等価とみなすことができる。

2台のロボットが観測対象箇所から等距離に配置された場合に、線源の位置をどの程度絞り込めると期待できるかを表す概念図を図3.3-3に示す。観測領域の重なり部分が小さいほど、線源の位置を絞り込むことができることを意味する。

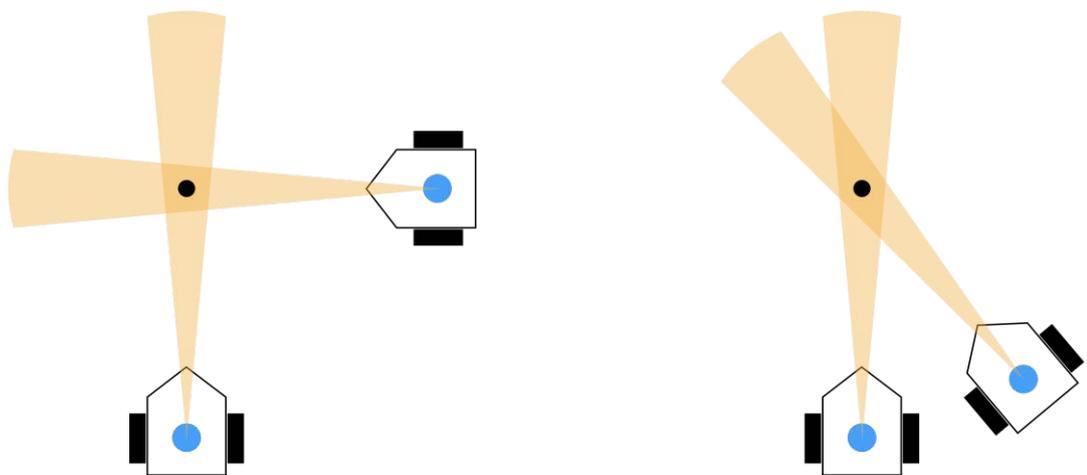


図 3.3-3 2台のロボットを用いた観測による線源位置の絞り込み

図 3.3-3 左は、観測対象箇所を中心として 2 台のロボットの配置が 90 度ずれている例であり、図 3.3-3 右は、30 度ずれている例である。図からわかるように、この例の場合、90 度ずらした配置にすることで、より精度の高い観測が可能になると期待できる。

ロボットが 3 台以上の場合も同様に考えると、上記の重なり部分の大きさを評価指標とし、それが小さくなるような配置をとれば良い。当然、観測対象からの距離を短くすることでこの重なり部分を小さくすることができる。一方で、観測対象からの距離が短すぎると、それ以外の場所の情報をあまり得ることができない。そのため、ここでは観測対象からの距離は一定の値を指定するものとする。

図 3.3-4 に、3 台のロボットを用いた場合の 2 次元平面環境での簡易的な配置シミュレーションの結果を示す。

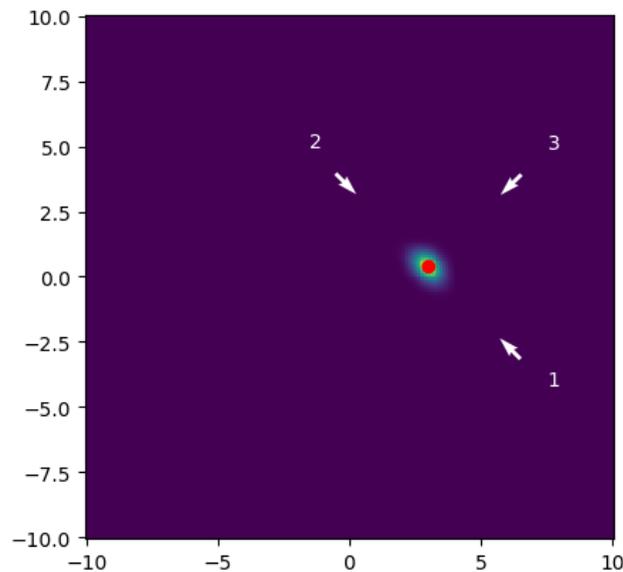


図 3.3-4 簡易的な配置シミュレーション

シミュレーションの結果、妥当な配置が算出されていることを確認した。現段階では障害物等の存在を考慮していないため、ロボットが実際には移動できない場所を観測地点として算出する可能性がある。今後は、障害物等の存在を考慮に入れたより現実的な配置を算出するように改良する必要がある。

(iii) 算出された配置へのロボットの移動

(ii)で算出した各ロボットの配置を目標位置・姿勢として、ロボットの自律移動を行う。初期位置・姿勢から目標位置・姿勢までの経路については、A*アルゴリズム [7][8]によって最適な経路を求める。移動ロボットは、この経路に沿って移動するが、もし事前の地図上に存在しない障害物が検出された場合は、Timed Elastic Band (TEB) Controller [9]によって障害物を回避する経路を生成する。また、移動中の自己位置推定には、Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL) [10]を用いる。

ここでは、これらの実装として ROS2 (Robot Operating System 2) に対応した自律走行パッケージである Navigation2 [11]を用いることとした。

シミュレータ Gazebo と Rviz2 を用いて、ロボットの自律走行を確認した（図 3.3-5）。各図の左は Gazebo の画面で、ロボットによる自己位置推定の様子を示している。緑色の点群は、ロボットの自己位置推定における複数の仮説を表すパーティクル群であり、赤線は、ロボットの将来経路を表している。環境中の中心部にある正方形の障害物を回避する経路が生成されていることがわかる。また、右は Rviz2 の画面であり、ロボットとそのセンシングの様子を示している。青いエリアは LiDAR によるセンシング範囲を表しており、その中心に移動ロボットが存在している。シミュレーションでは、2 次元の LiDAR を搭載した Turtlebot3 Waffle をロボットとして使用した。

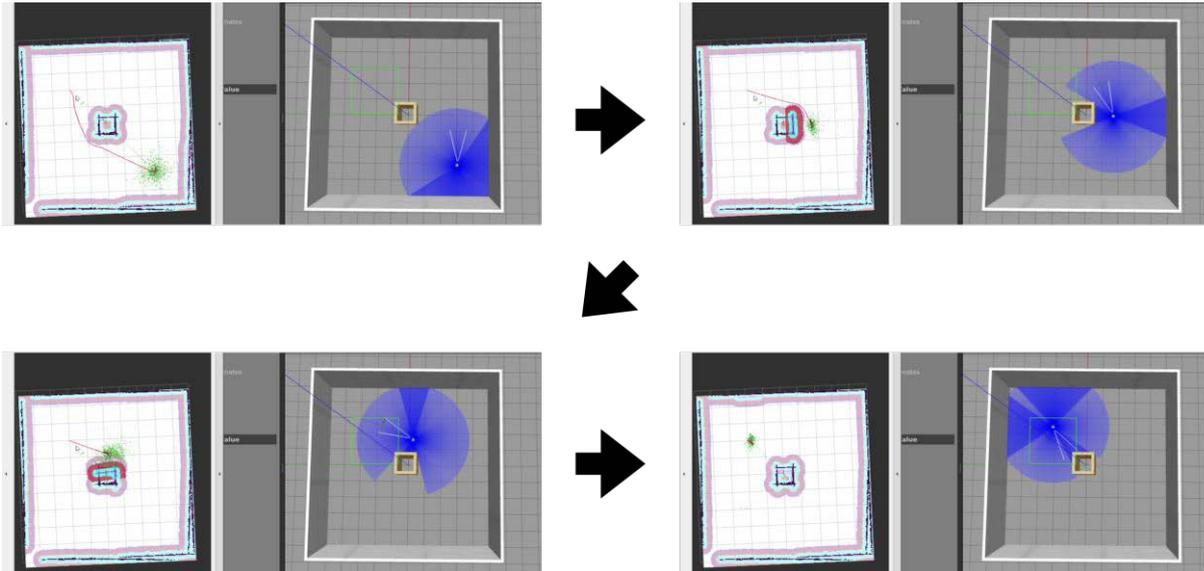


図 3.3-5 目標位置・姿勢までの自律走行の様子

3.3.2 まとめ

以上、令和4年度は、環境地図と粗い放射線源分布推定結果に基づき、検出器の特性に応じて複数台のロボットが指定した箇所の詳細な測定を行うための観測地点計画手法の開発を行った。

環境地図において指定した箇所に対して、より多くの情報を得るための複数台ロボットの配置手法を構築し、その配置に対してロボットが障害物を回避しながら移動する手法を構築した。

3.4 実証試験（令和3年度～令和4年度）

3.4.1 実証試験（令和3年度～令和4年度）

(1) 令和3年度までの概要

検出器遮蔽体等のツール類の整備、実証試験に向けて線源位置探査ツールの基本設計解析を中心に実施した。小型ロボットに搭載した指向性検出器の情報により、3次元空間内での線源位置を探査するツールの基本設計の解析を行った。そこでは、 ^{137}Cs を対象とし、662 keVのピークについて解析した結果、線源の方位とカウント数のHigh/Lowの対応付けが明瞭であった。

(2) 令和4年度実施内容および成果

令和3年度の結果を基に、令和4年度は以下を実施した。システム化に向けた試作モデルの製作・整備を行った。検出器の状況に応じて、線源を用いた感度試験、角度分布特性、エネルギー特性等の解析調査を実施した。指向性検出器の特性、実験データに応じて機械学習技術による画像のパターン認識手法をソフトウェアに組み込み、画像作成に向けて適切な配置にロボットが移動する手法を構築した。以上のように令和4年度は本研究実証のため、シミュレーションによる線源探査を行った。

① 検出器姿勢自動制御システムの製作

線源分布の全体像を俯瞰するために、床付近（平面）だけでなく、天井側も含めた縦方向も測ることができる小型軽量の測定器とそれを搭載できる汎用性の高い小型ロボットの開発を行っている。本作業では、小型ロボットに搭載する放射線測定器の位置・方向を認識するために使用する検出器姿勢自動制御システムを製作した。

図3.4-1に、製作した検出器姿勢自動制御システムを用いた実験の概要を記す。図3.4-1左下が製作した検出器姿勢自動制御システムの写真である。検出器姿勢自動制御システムは仰角回転ステージおよび方位角回転ステージの2つの回転ステージ、検出器重心調整機構ならびに回転ステージコントロールシステムから構成される。設置する検出器重心を、仰角回転中心軸と方位角回転中心軸の交点に合わせることで、検出器重心を固定したまま仰角および方位角方向へ回転させることができる。図3.4-1に検出器姿勢自動制御システムを用いた実験体系の模式図を示す。今回はC3-Gを固定し、70 cm離れた場所の10 MBq、 ^{137}Cs 線源のイメージングを試みた。C3-Gから見た線源の相対位置は仰角90度、方位角280度に設定した。図3.4-1右下に10分間測定の結果を載せる。白矢印の先が真の線源位置である。図よりわかるように適切な位置に結像していることがわかる。製作した検出器姿勢自動制御システムを用いることで、線源ならびに検出器の位置を変更することなく、任意の線源位置のイメージング実験を実施することが可能であることを確認した。

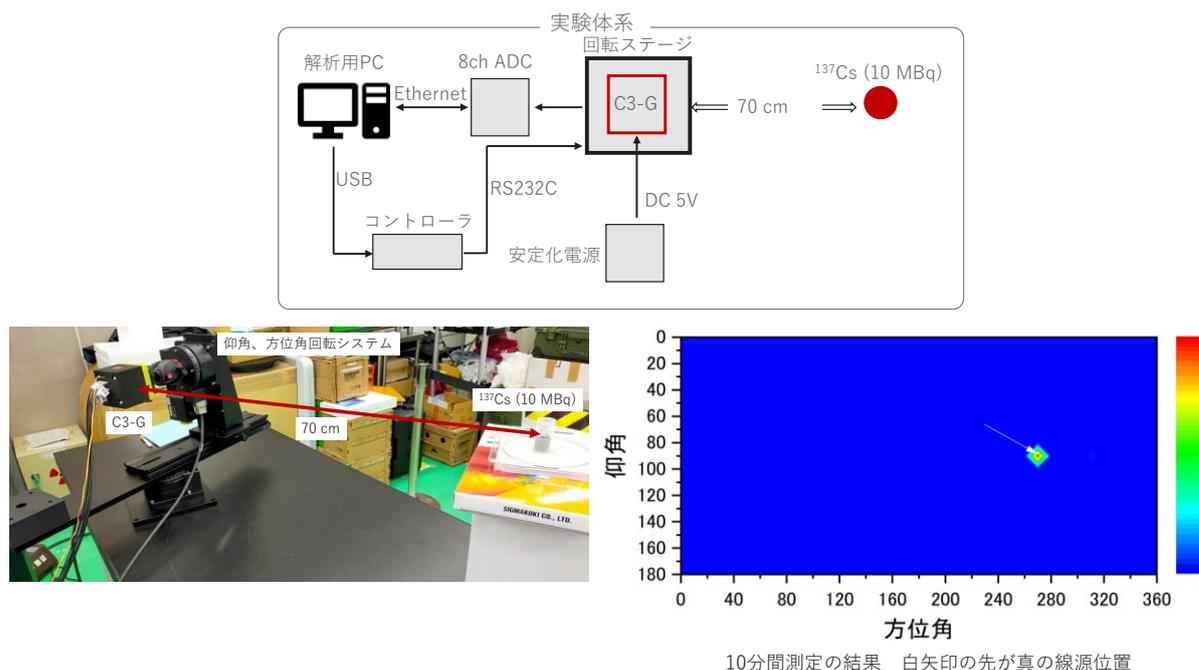


図 3.4-1 制御システムの概要

② システム化に向けた試作モデルの解析

開発中の指向性検出器のイメージを図 3.1-1 (a) に示す。遮蔽体の 8 個の窪みそれぞれにシンチレータが搭載されている。検出器のサイズは縦・横・高さ 6 cm と小型軽量であり、同じく開発中の小型ロボットに搭載可能である。複数台の小型ロボットに検出器を搭載して線源位置探査を行う。

③ 逆解析の方法

(1) 内容

測定地点の個数や位置は現場の状況に応じて定まることが想定されるため、逆解析の手法は、任意の測定地点数や測定位置に対して適用可能であることが望ましい。本研究では、測定データと線源分布の関係を式に表し、数値的に解くことで 3 次元空間内の線源分布を再構成する手法について検討した。

データの観測および逆解析のイメージを図 3.4-2 に示す。本項では、多面体型検出器の観測データを入力として 3 次元空間における未知の線源分布を求める逆問題を解くことに資するため、逆問題の定式化を行う。観測データは、 ^{137}Cs の全エネルギー光電ピークを想定した 662 [keV] のピークカウント数を使用する。

部屋のサイズ

縦 6m x 横 6m x 高さ 4m

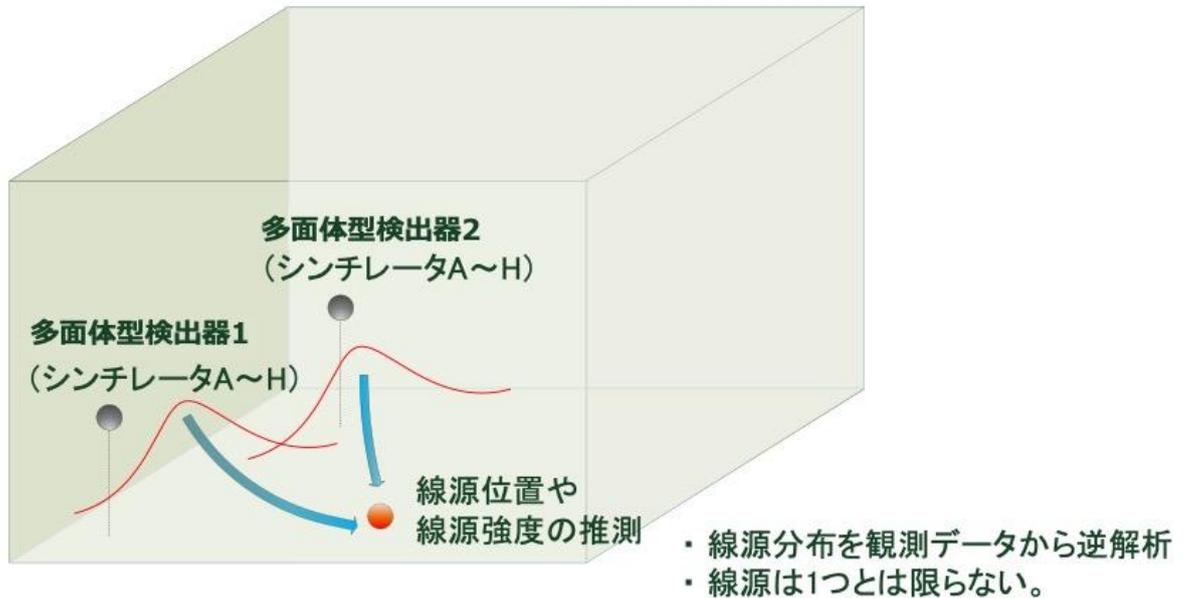


図 3.4-2 データの観測および逆解析のイメージ

(2) 使用する測定データ

本研究では、指向性検出器の測定データのうち、 ^{137}Cs の全エネルギー光電ピークを想定した 662 [keV] のピークカウント数を解析に用いる。

(3) 線源強度と測定データの関係式

本研究の対象とした指向性検出器にはシンチレータが 8 個搭載されている。以下では各シンチレータを個別の検出器として扱う。

線源強度と測定データの関係式は 3 次元空間での積分を用いて表現されるが、本研究では空間をメッシュに分割して離散化した式で表現する。空間を n_{mesh} 個のメッシュに分割し、各メッシュの代表点（以下、メッシュ代表点）を $P_1, \dots, P_{n_{\text{mesh}}}$ とする。メッシュ代表点 P_i に強度 1 の線源があるときの検出器 j のピークカウント数が $r_{(i, j)}$ であるとする。 n_{mesh} 個のメッシュに、強度 $s_1, \dots, s_{n_{\text{mesh}}}$ の線源があるとき、検出器 1, \dots , n_{det} のピークカウント数 $c_1, \dots, c_{n_{\text{det}}}$ は、式 (3.4.1) で表される。右辺には、測定および空間の離散化に起因する誤差を加えている。

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_{ndet} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{1,1} & \cdots & r_{nmesh,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1,ndet} & \cdots & r_{nmesh,ndet} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_{nmesh} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} err_1 \\ \vdots \\ err_{ndet} \end{pmatrix} \quad (3.4.1)$$

ここで、

$ndet$	: 検出器の個数
$nmesh$	: 空間をメッシュに分割した分割数
c_j	: 検出器 j のピークカウント数の測定値, $j = 1, \dots, ndet$
err_j	: 検出器 j の測定値と右辺計算値の誤差, $j = 1, \dots, ndet$
s_i	: メッシュ i の線源強度, $i = 1, \dots, nmesh$
$r_{i,j}$	: メッシュ i の代表点に強度 1 の線源があるときの検出器 j のピークカウント数

係数 $r_{i,j}$ は輸送計算などによってあらかじめ得ることが可能である。

測定回数は限定されるため、「メッシュ代表点の個数」 \gg 「式の個数」であることが想定される。また、方程式には測定や離散化に伴う誤差が含まれる。このため、式 (3.4.1) は一般に厳密に解くことはできない。その一方で、係数は全て非負であり、解にも非負であるという制約が存在する。このため、「メッシュ代表点の個数」 \gg 「式の個数」であっても、発散することなく解が求められることが期待される。

(4) 数値計算の方法

逆解析は、連立一次方程式 (3.4.1) の非負数値解を求めることによって行う。数値計算の方法は、JAERI-Tech 2002-041 [12]に掲載された計算方法を参考にした。スペクトル荷重関数法の G 関数を求める計算方法として掲載されているが、本質的には連立一次方程式の非負数値解を求める方法であり、本研究の目的に応用可能である。

本研究において計算を行う際は、逐次近似の重み行列の計算式に、一部、変更を加えている。変更前と変更後の式を式 (3.4.2) および式 (3.4.3) に示す。

変更前の式

$$W_{i,1}^k = \frac{(5R_{i,1}^t \cdot G_1^k + 2R_{i,2}^t \cdot G_2^k - 5R_{i,3}^t \cdot G_3^k)}{(6R_{i,j}^t \cdot G_j^k)} \quad (j = 1)$$

$$W_{i,j}^k = \frac{(R_{i,j}^t \cdot G_j^k + R_{i,j-1}^t \cdot G_{j-1}^k)}{(2R_{i,j}^t \cdot G_j^k)} \quad (j = 2, \dots, m-1) \quad (3.4.2)$$

$$W_{i,1}^k = \frac{(5R_{i,m}^t \cdot G_m^k + 2R_{i,m-1}^t \cdot G_{m-1}^k - 5R_{i,m-2}^t \cdot G_{m-2}^k)}{(6R_{i,j}^t \cdot G_j^k)} \quad (j = m)$$

本作業の逆解析に用いた数式

$$W_{i,j}^k = \frac{R_{i,j}^t \cdot G_j^k}{(2R_{i,j}^t \cdot G_j^k)} \quad (j = 1, \dots, m) \quad (3.4.3)$$

④ 試解析 [13]

(1) 解析対象の空間

幅 6 m × 奥行 6 m × 高さ 4 m の部屋を試解析の対象とした。壁・床・天井の面上に 50 cm 間隔で 674 個のメッシュ代表点をとる。解析対象の空間とメッシュ代表点の位置のイメージを図 3.4-3 に示す。

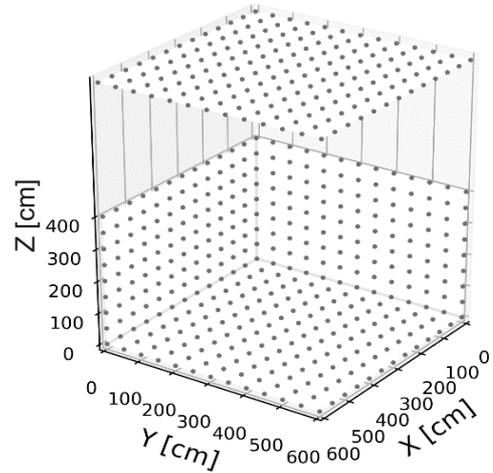


図 3.4-3 解析対象の空間とメッシュ代表点の位置

(2) 線源条件

線源条件は、主要な線源 3 通りとバックグラウンド線源の有無を組み合わせた計 6 通りを設定した。設定した線源条件を図 3.4-4 に示す。

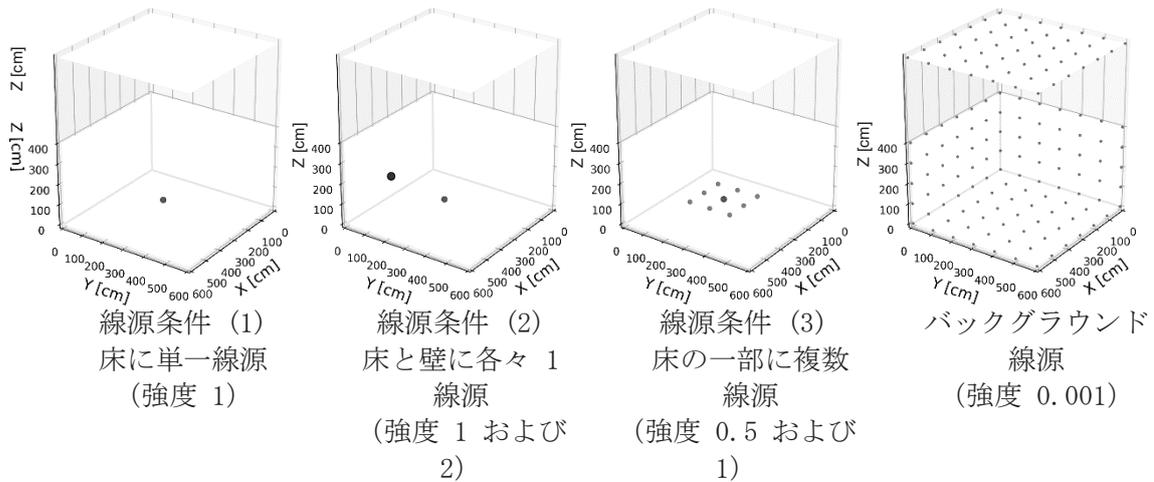


図 3.4-4 線源条件 (主要な線源条件およびバックグラウンド線源)

(3) 測定条件

部屋の内部に測定地点を設け、それらの地点における測定値を入力として逆解析を行う。測定地点は、地点数 1、2、4、5 の 4 通りとした。測定地点の高さはいずれも床から 50 cm とした。測定条件のイメージを図 3.4-5 に示す。指向性検出器の配置位置は星印で示している。

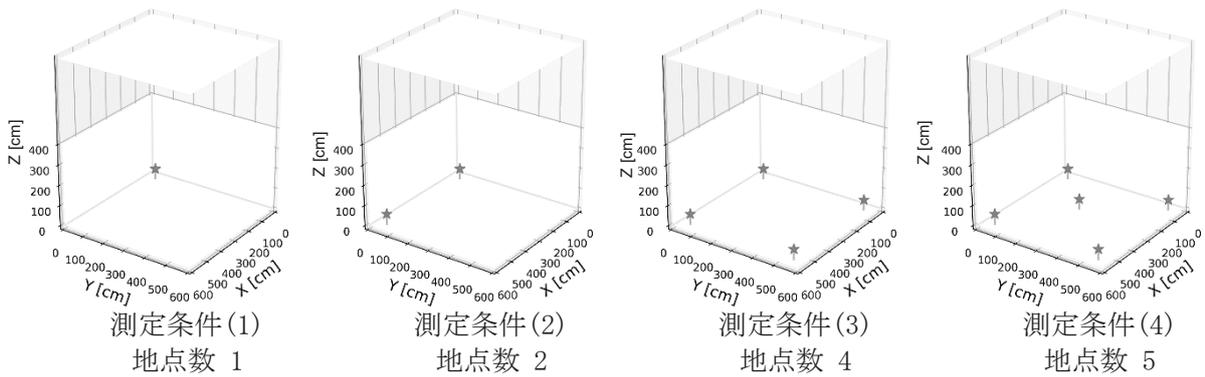


図 3.4-5 測定条件

(4) 測定データ

後述の輸送計算の結果を用いて式(3.4.1)の右辺第1項 $\{r_{(i,j)}\} \cdot (s_i)$ を計算し、これを測定データ (c_j) として用いた。

(5) 応答関数の計算

式(3.4.1)の係数および上記(4)節の測定データの算出に用いるため、応答関数の計算を行った。計算には、粒子・重イオン輸送計算コードPHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) [14]を用いた。吸収エネルギーの計算には、T-DEPOSIT タリーを用いた。検出器の半値幅等のパラメータは実測値が得られていないため暫定的な値を用いた。

(6) 解析結果

再構成結果のコンター図を図 3.4-6 から図 3.4-8 に示す。再構成結果の断面図を図 3.4-9 から図 3.4-11 に示す。断面図は線源条件において共通な点 (200, 200, 0) における強度 1.0 の線源を含むようにとっている。

再構成結果が式 (3.4.1) を満たす確認として、測定値の再現性を図 3.4-12 に示す。いずれの解析結果も測定値をよく再現しているため、ここでは1例のみを示す。

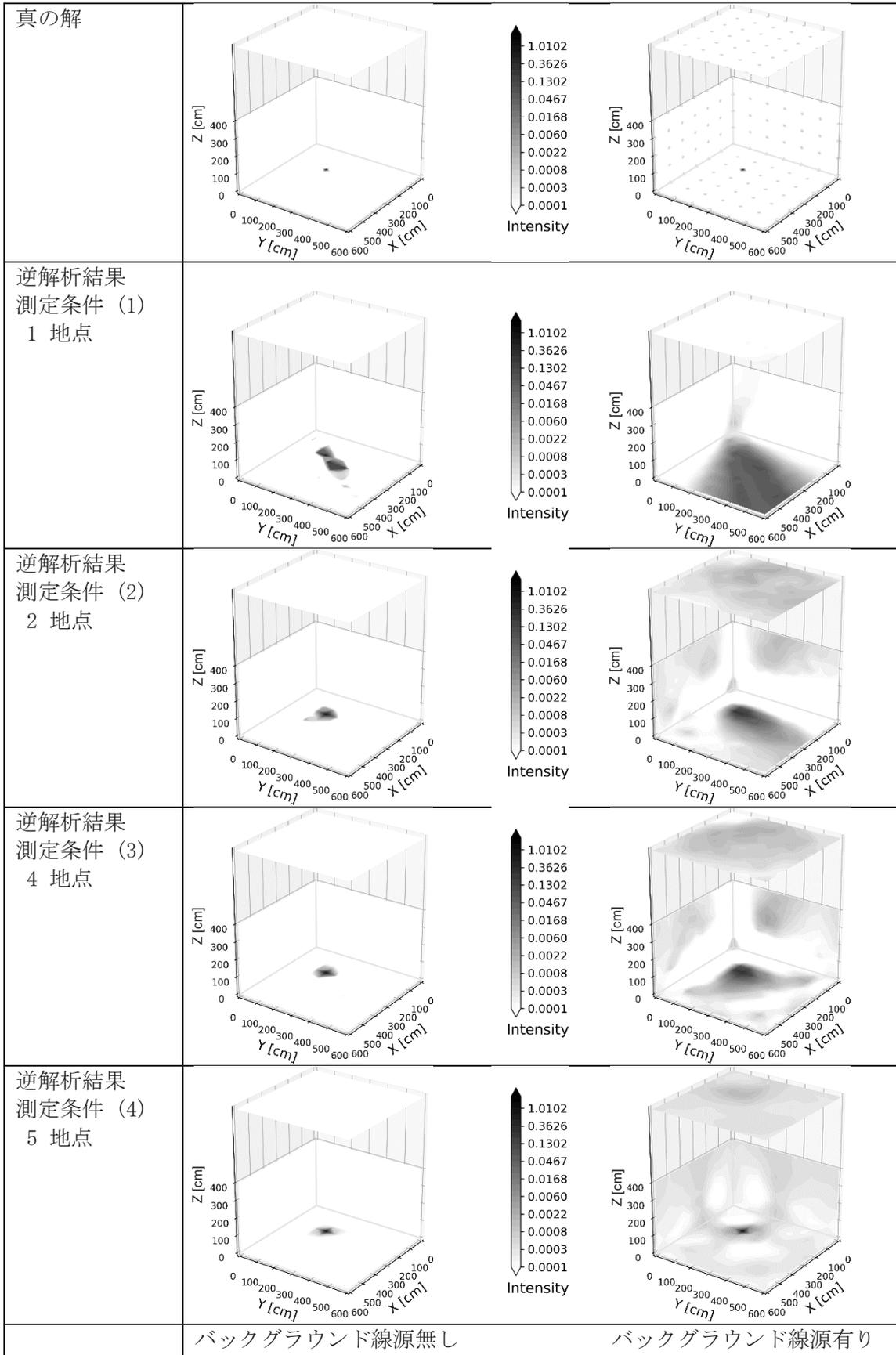


図 3.4-6 再構成結果 (コンター図) 線源条件 (1)

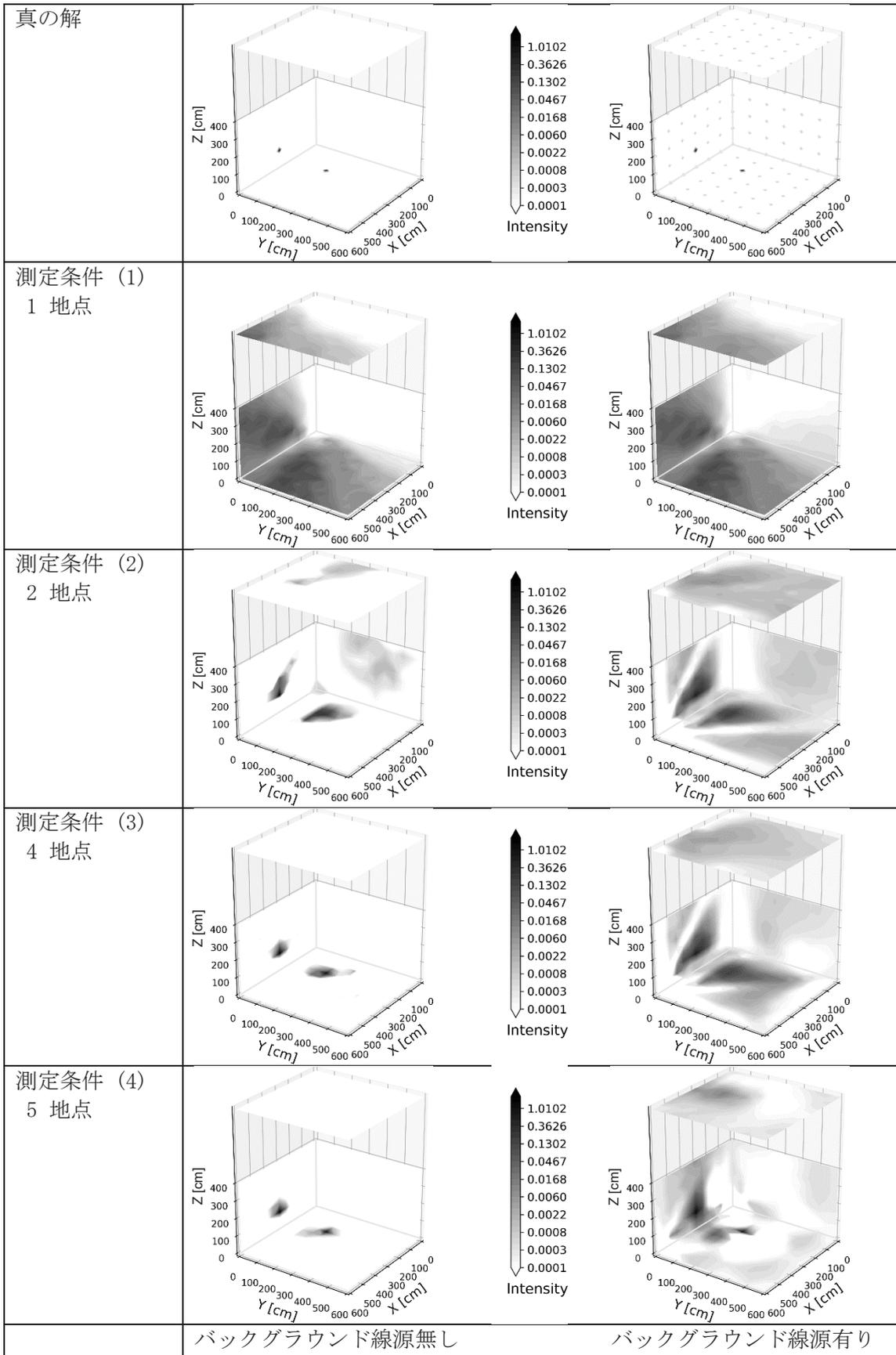


図 3.4-7 再構成結果 (コンター図) 線源条件 (2)

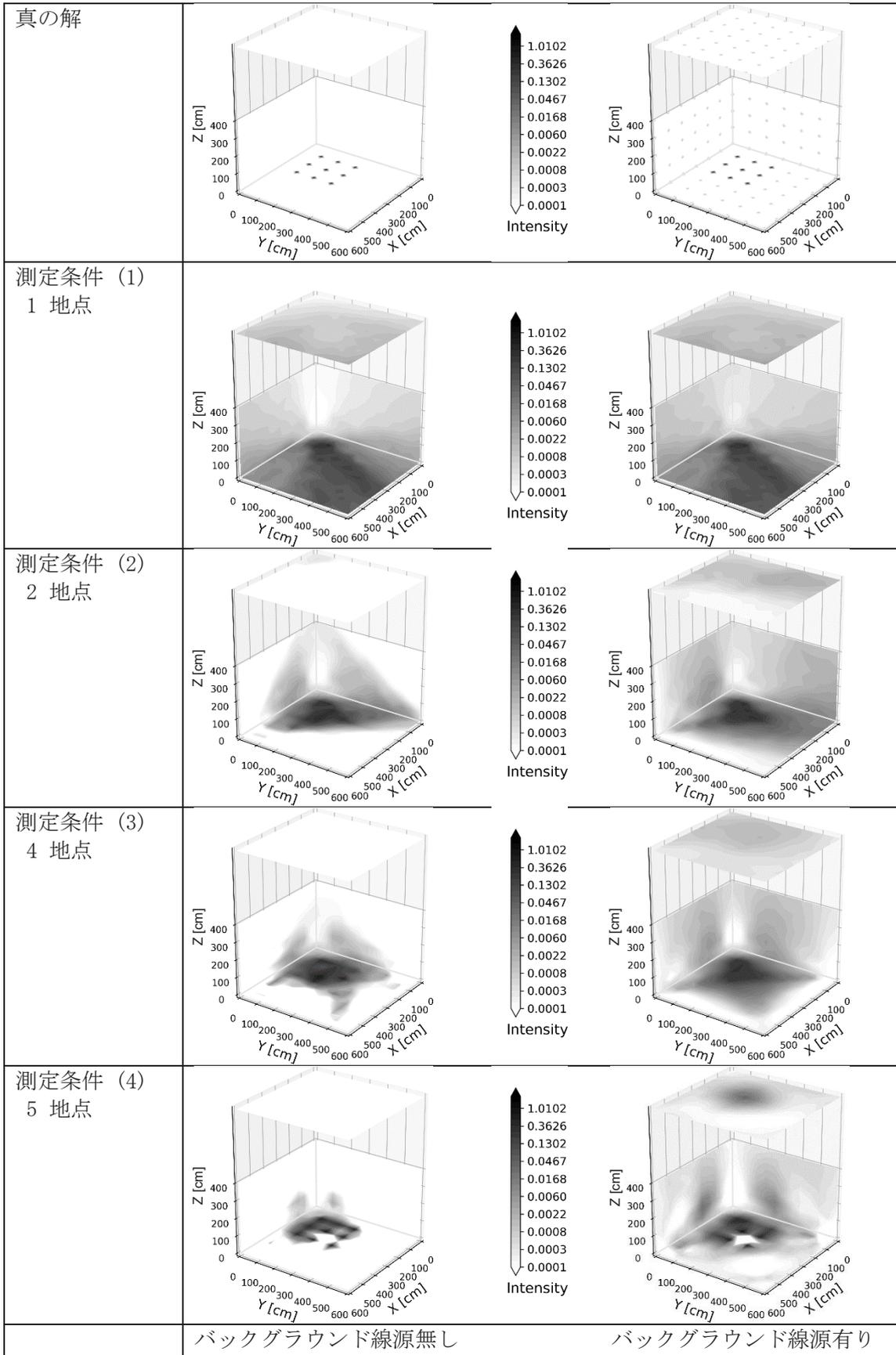


図 3.4-8 再構成結果 (コンター図) 線源条件 (3)

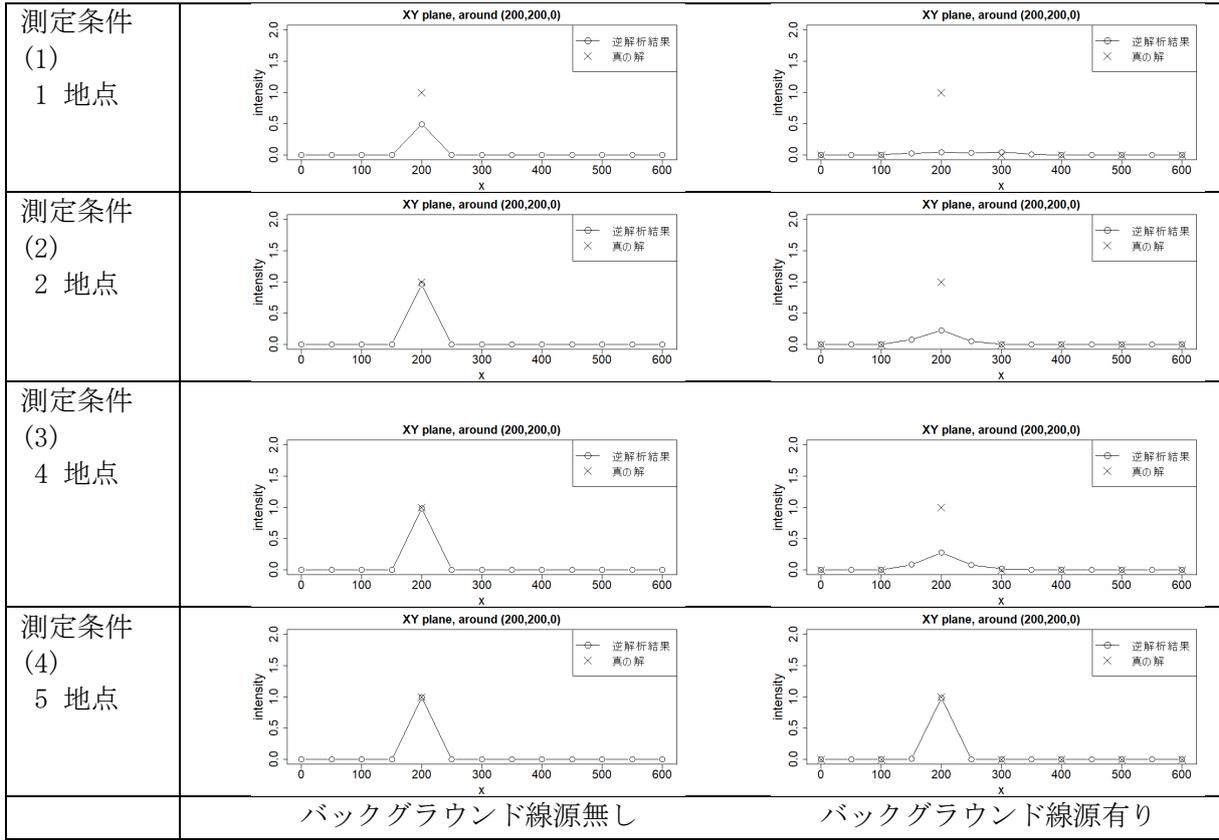


図 3.4-9 再構成結果 (断面図) 線源条件 (1)

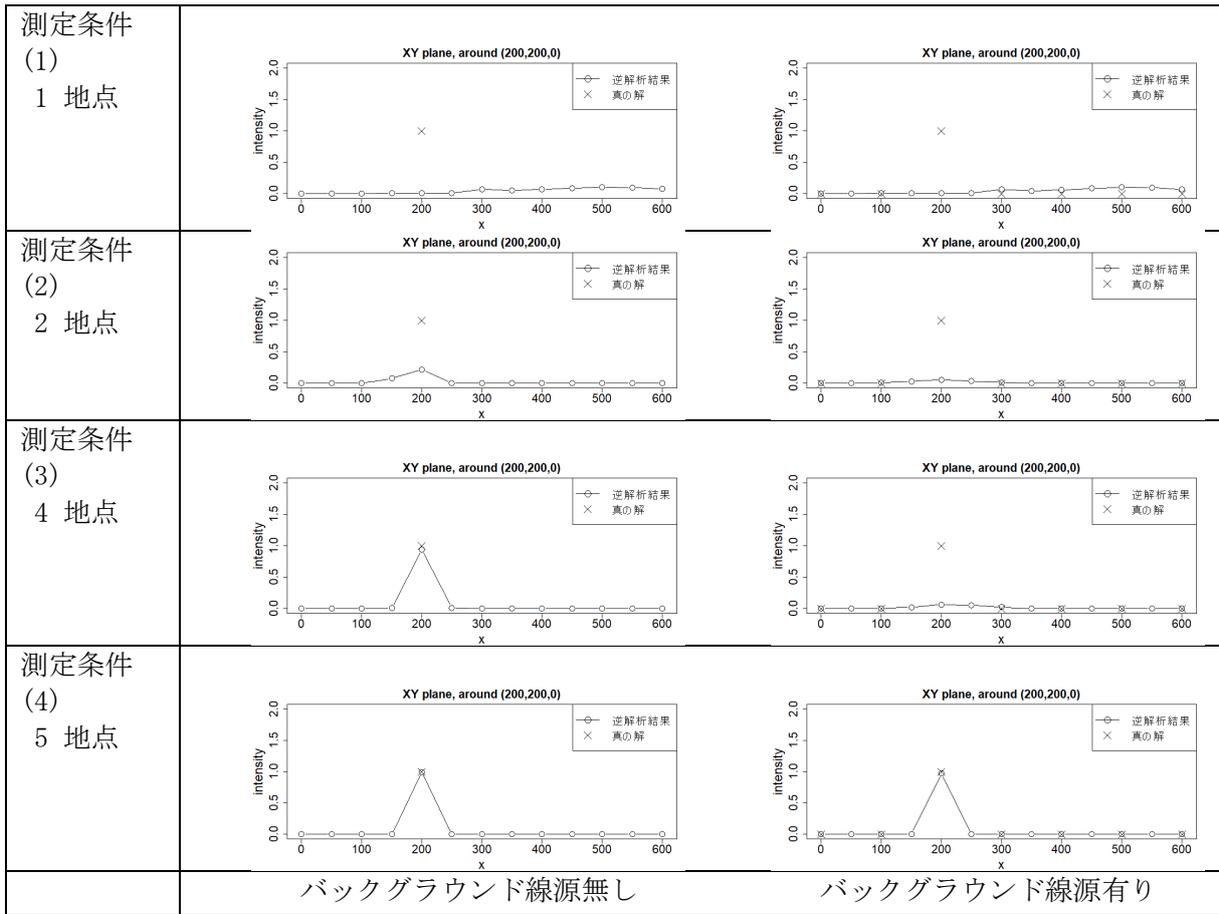


図 3.4-10 再構成結果 (断面図) 線源条件 (2)

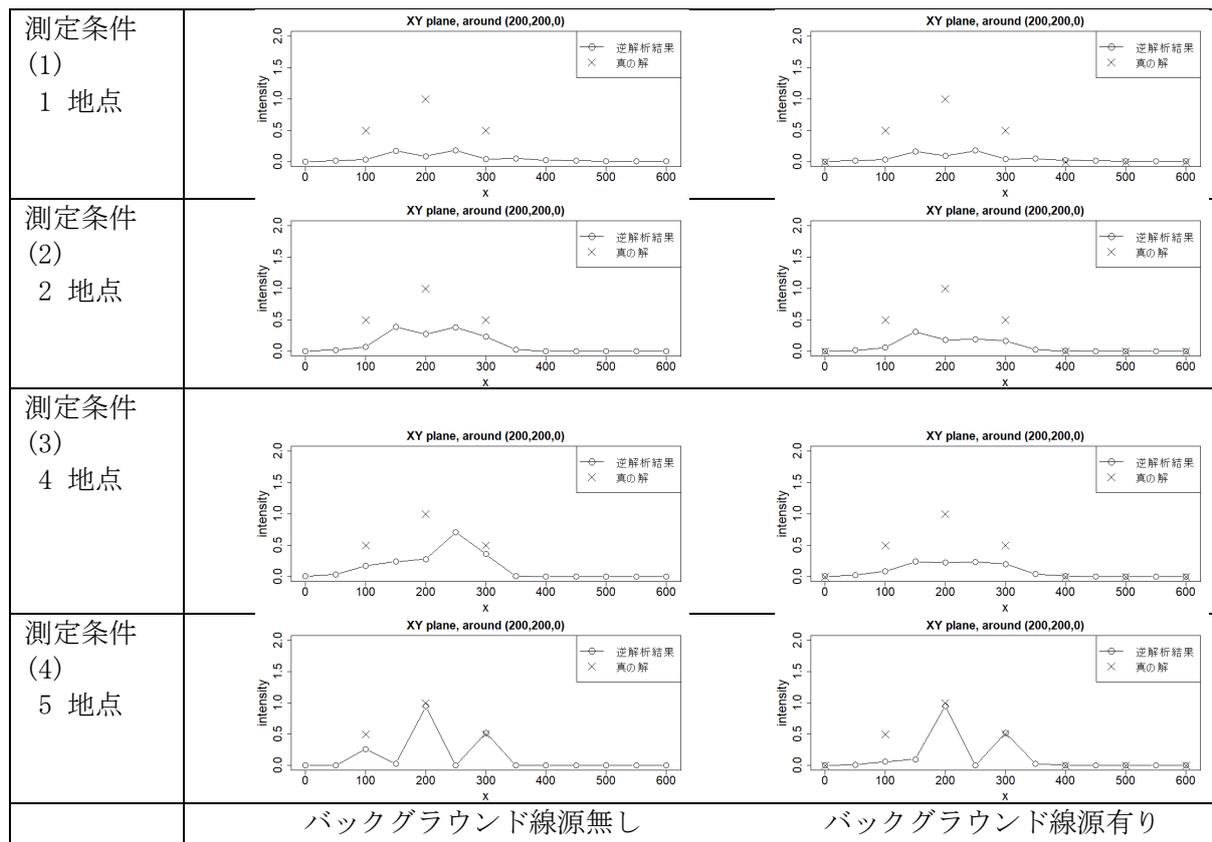


図 3.4-11 再構成結果（断面図） 線源条件 (3)

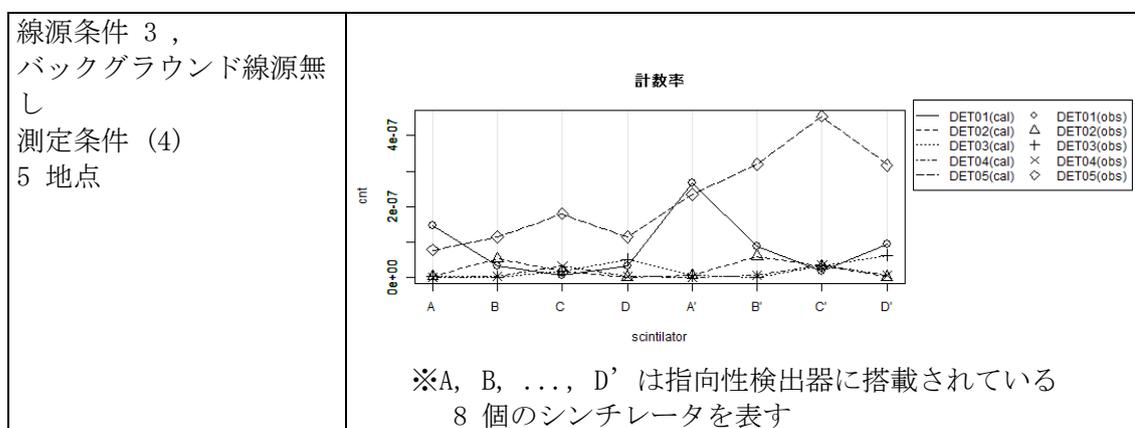


図 3.4-12 測定値の再現性

⑤ 考察

線源条件 1 および 2 のバックグラウンド線源がないケースでは、測定条件(3)および(4)の測定データから真の解に近い線源分布が再構成された。一方で、主要線源の個数が多い場合やバックグラウンド線源が存在する場合、真の解の再現性は大きく低下した。例として、線源条件 1、バックグラウンド線源有り、測定条件(2)の断面図（図 3.4-9）では、線源分布の裾が広くなり線源強度のピークが過小評価されるケースが確認された。別の例として、線源

条件 3、バックグラウンド線源有り、測定条件(4)のコンター図 (図 3.4-8) では、線源のない天井に偽のピークが生じていることが確認される。該当箇所を断面図を図 3.4-13 に示す。

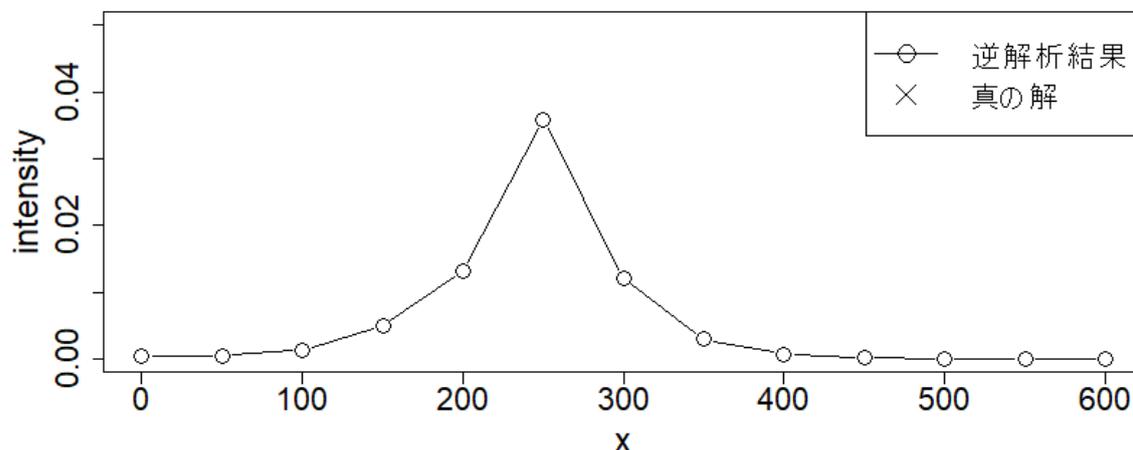


図 3.4-13 再構成結果に見られる偽のピーク

再構成結果が必ずしも線源分布を再現しない理由は、本手法で得た線源分布は式 (3.4.1) を満たす無数に存在する解の一つに過ぎないことにある。実用化のためには、この手法を発展させて、真の線源分布の取り得る上限値や下限値といった情報を得る手法を開発することが必要と考えられる。

3.4.2 まとめ

線源分布の全体像を俯瞰するために、小型軽量の測定器とそれを搭載できる汎用性の高い小型ロボットの開発を行っている。本作業では、小型ロボットに搭載する放射線測定器の位置・方向を認識するために使用する検出器姿勢自動制御システムを製作した。また、画像作成に向けて適切な配置にロボットが移動する手法を構築し、いくつかのケースについてシミュレーションにより線源探査を行った。複数の線源がある場合でもほぼ線源位置を特定することができた。しかし、バックグラウンド線源が存在する場合には明瞭にはならないことがわかった。これらの研究成果は(1)指向性検出器開発、(2)画像・情報処理技開発、(3)ロボット制御システム開発を結びつけるものであり、研究目的である連携計測による線源探査の実現可能性を明らかにするものである。次年度は実機を用いて実証試験を行う。

3.5 研究推進（東北大学）（令和3年度～令和4年度）

研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）等との連携を密にして、研究を進めた。また、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。

3.5.1 会議の開催

① 研究推進会議

日時：令和4年9月13日

場所：オンライン

内容：各研究項目の研究進捗に関する報告および検討。今後の研究計画検討。

② 研究推進会議

日時：令和4年10月18日

場所：富山高専、オンライン

内容：各研究項目の研究進捗に関する報告および検討。今後の研究計画検討。

③ 研究推進会議

日時：令和4年11月18日

場所：オンライン

内容：各研究項目の研究進捗に関する報告および検討。今後の研究計画検討。

④ 研究推進会議

日時：令和5年1月10日

場所：一橋講堂

内容：各研究項目の研究進捗に関する報告および検討。今後の研究計画検討。

4. 結言

本研究ではガンマ線の飛来方向を検出可能な検出器を開発し、これを搭載した複数のロボットの連携により、単一センサーでは得られない広視野・迅速・安価な放射線源探査を実現するロボットシステム（Cooperative Operation Robot system for RAdiation Source Exploration: CORRASE、コラッセ）を開発することを目的として研究を行っている。1F 現場への投入に資することを目的として、線源探査を行う小型ロボットに放射線計測機器を搭載したシステムを 3 年間の計画終了時に完成させるための研究を行う。以下に 3 カ年計画の 2 年目である令和 4 年度の結果をまとめる。

(1) 指向性検出器開発

① シミュレーションによる検出器設計

令和 4 年度に JAEA が掲げた目的は、実機に近いガンマ線イメージャーの試作機を製作し実験によりその特性を評価することと、実験結果を基に改良を重ねることであった。実際に試作機を製作しその特性を評価し、全方位ガンマ線イメージャーとして良好な特性が得られることを確認した。加えてその結果を検出器設計段階にフィードバックし細かな改良を重ねるとともに、来年度以降に取り組むべき課題も抽出できた。よって、今年度の目標は達成されたと結論する。

② 指向性検出器の製作と評価

令和 4 年度では、ロボットに搭載する指向性検出器のプロトタイプを製作することとロボットに搭載する指向性検出器システムの仕様を検討することを目的としていた。実際にロボットに搭載することを念頭においた 8 ch version 多面体型指向性検出器システムの設計・製作・評価を行った。製作した 8 ch version の多面体型指向性検出器を用いて、点線源の位置推定が可能であることを確認した。8 ch version 多面体型指向性検出器システムは遮光性、サイズ、重量の要件を満たしており、ロボットに搭載することが可能である。今後としては、8 ch version 多面体型指向性検出器の性能向上および検出器システム全体の構成についてさらなる検討を実施していく。

(2) 画像・情報処理技術開発

LiDAR を用いた周囲環境測定結果に基づく環境地図作成システムにおいては、令和 3 年度に引き続き開発を推進し、環境地図生成精度の向上および処理速度の向上、さらに環境色を反映させることによる視認性向上を達成した。また、自己位置推定について、後続ロボット搭載の LiDAR を先行ロボットと同機種のものに変更するとともに、マルチスレッド並列処理を実装することにより自己位置推定の安定性向上と処理時間の大幅短縮化を達成した。

環境地図上に放射線源分布推定結果を融合して表示するシステムにおいては、放射線源分布情報の融合反映方法を考案、実装し、サンプルデータを用いて適用を試み、想定通りの融合結果を得た。このことから、多地点、多方向からの放射線源分布情報を重ね合わせ処理に対する考案実装の見通しが得られ、汚染部位の絞り込みイメージング実現に期待が持たれる。

(3) ロボット制御システム開発

環境地図と粗い放射線源分布推定結果に基づき、検出器の特性に応じて複数台のロボットが指定した箇所の詳細な測定を行うための観測地点計画手法の開発を行った。

環境地図において指定した箇所に対して、より多くの情報を得るための複数台ロボットの配置手法を構築し、その配置に対してロボットが障害物を回避しながら移動する手法を構築した。

(4) 実証試験

線源分布の全体像を俯瞰するために、小型軽量の測定器とそれを搭載できる汎用性の高い小型ロボットの開発を行っている。本作業では、小型ロボットに搭載する放射線測定器の位置・方向を認識するために使用する検出器姿勢自動制御システムを製作した。また、画像作成に向けて適切な配置にロボットが移動する手法を構築し、いくつかのケースについてシミュレーションにより線源探査を行った。複数の線源がある場合でもほぼ線源位置を特定することができた。しかし、バックグラウンド線源が存在する場合には明瞭にはならないことがわかった。これらの研究成果は(1)指向性検出器開発、(2)画像・情報処理技開発、(3)ロボット制御システム開発を結びつけるものであり、研究目的である連携計測による線源探査の実現可能性を明らかにするものである。令和5年度は実機を用いて実証試験を行う。

参考文献

- [1] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, et al., “GEANT4 - a simulation toolkit,” Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A, vol.506, no.3, pp.250-303, 2003, DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8
- [2] M. Abadi, A. Agarwal, P. Barham, et al., “TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Systems,” tensorflow2015-whitepaper. 2015.
- [3] C. Francis, et al., “Keras,” <https://keras.io>. (参照: 2023/4/1) .
- [4] T. Shan, B. Englot, D. Meyers, et al., “LIO-SAM: Tightly-coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.5135-5142, 2020.
- [5] 田窪朋仁, 上撫琢也, 前泰志, 新井健生, 大原賢一, “高解像度 NDT グリッドマップを用いた環境地図生成”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.78, no.793, pp.3186-3201, 2012.
- [6] F. Cong, Y. Tamura, K. Shimazoe, et al., “Radioactive Source Recognition with Moving Compton Camera Imaging Robot using Geant4,” Nuclear Instruments And Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol.953, 163108, 2020.
- [7] P. E. Hart, N. J. Nilsson, B. Raphael, “A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths,” IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics, Vol.4, No.2, pp.100-107, 1968.
- [8] K. Konolige, “A Gradient Method for Realtime Robot Control,” Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.639-646, 2000.
- [9] C. Rsmann, F. Hoffmann, T. Bertram, “Timed-elastic-bands for time-optimal point-to-point nonlinear model predictive control,” 2015 European Control Conference, pp.3352-3357, 2015.
- [10] F. Dellaert, D. Fox, W. Burgard, S. Thrun, “Monte Carlo Localization for Mobile Robots,” Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1322-1328, 1999.
- [11] S. Macenski, F. Martín, R. White, J. Clavero, “The Marathon 2: A Navigation System,” Proceedings of the 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2718-2725, 2020.
- [12] 金ウンジュほか, 広帯域エネルギー中性子モニタ用検出器の開発 (共同研究), JAERI-Tech 2002-041, 2002.
- [13] H. Hayashi, H. Kido, R. Kurosawa, et al., 指向性検出器による多地点観測データを用いた線源位置探査手法の検討, KEK Proceedings, 2023-1, pp.1-12, 2024.
- [14] S. Nakayama, O. Iwamoto, Y. Watanabe, and K. Ogata, JENDL/DEU-2020: deuteron nuclear data library for design studies of accelerator-based neutron sources, J. Nucl. Sci. Technol., vol.58 no.7, 2021, pp.805-821, DOI:10.1080/00223131.2020.1870010

