

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 (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－

Challenge to Investigation of Fuel Debris in RPV
by an Advanced Super Dragon Articulated Robot Arm
(Contract Research)

-FY2021 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
東京工業大学

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development
Tokyo Institute of Technology

February 2023

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 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, 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.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

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
(委託研究)

ー令和3年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業ー

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

東京工業大学

(2022年11月1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(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(1F)の廃炉等を始め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、研究課題のうち、令和元年度に採択された「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」の令和元年度から令和3年度の研究成果について取りまとめたものである。本課題は令和3年度が最終年度となるため3年度分の成果を取りまとめた。

令和元年度から令和3年度の本研究を通して、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、1F現場に実機適用すべく、現場との意見/情報交換を行いながら、研究を進めた。研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催し、ペデスタル上部に位置する圧力容器底部の状況把握を可能とする技術の実現を目指して、長尺の多関節ロボットアームにより、手先の位置姿勢の制御をしながら、カメラのSfM技術および超音波計測技術と組み合わせてアーム先端部の自己位置を把握しつつ、炉内構造物の状況把握を行う。また、レーザーを用いたLIBS技術により核物質の分布状況把握を行う遠隔探査手法のアームへの実装技術を開発した。さらには、櫛葉遠隔技術開発センター等を活用し実証試験を行い、その実現性を確かめた。以上、3カ年計画の3年目である本年度の業務項目を実施し、3カ年計画の所期の目標を達成し、本報告書にとりまとめた。

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、東京工業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

Challenge to Investigation of Fuel Debris in RPV
by an Advanced Super Dragon Articulated Robot Arm
(Contract Research)

— FY2021 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

Tokyo Institute of Technology

(Received November 1, 2022)

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 FY2021.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (1F), 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 FY2019, this report summarizes the research results of the “Challenge to investigation of fuel debris in RPV by an advanced Super Dragon articulated robot arm” conducted from FY2019 to FY2021. Since the final year of this proposal was FY2021, the results for three fiscal years were summarized.

Through this research from FY2019 to FY2021, we will closely cooperate with each research item under the principal investigator as well as with CLADS, etc., to advance the research while exchanging opinions/information with the site and promote the research implementation plan in order to apply the technology to the actual equipment at the 1F site. Meetings and conferences were held to promote the research implementation plan, with the aim of realizing a technology that enables the status of the pressure vessel bottom located at the top of the pedestal to be monitored, and the long-articulated robot arm was developed to monitor the status and the self-position of the arm tip with camera SfM technology and ultrasonic measurement technology while controlling the position and posture of the tip of the hand. We have also developed a remote exploration technique for the arm using the LIBS technique with lasers, which enables us to determine the distribution of nuclear materials. In addition, we conducted a demonstration test using the Naraha Center for Remote Control Technology Development and other facilities to confirm the feasibility of these technologies. As described above, we have achieved the desired goals of the three fiscal years plan by carrying out the work items in the three years of the plan and have summarized them in this report.

Keywords: Robot Arm, Ultrasound, SfM, LIBS, Remote Sensing

This work was performed by Tokyo Institute of Technology 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
付録 成果報告書	13

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
Appendix Result Report	13

This is a blank page.

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

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

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

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

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

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

2. 平成 30 年度 採択課題

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

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

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

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

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム 7 課題（若手研究 2 課題、一般研究 5 課題）
 課題解決型廃炉研究プログラム 4 課題
 国際協力型廃炉研究プログラム 4 課題（日英共同研究 2 課題、日露共同研究 2 課題）
 研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 課題

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一朗	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

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

課題解決型廃炉研究プログラム

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

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

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

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

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発と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 (R2. 4. 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

本報告書は、以下の課題の令和元年度から令和 3 年度の研究成果を取りまとめたものである。本課題は令和 3 年度が最終年度となるため 3 年度分の成果を取りまとめている。

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
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

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 3 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

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

(契約番号 R03I027)

成果報告書

令和 4 年 3 月

国立大学法人東京工業大学

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、国立大学法人東京工業大学が実施した「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」の令和元年度から令和3年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略	viii
1. はじめに	1
2. 業務計画	2
2.1 全体計画	2
2.1.1 全体計画概要と全体計画表	2
2.2 実施体制	3
2.3 令和3年度の成果の目標及び業務の実施方法	4
2.3.1 計画概要及び月別年間計画表	4
3. 実施内容及び成果	6
3.1 長尺多関節アームの開発とRPV下部へのアクセス検討	6
3.1.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）	6
3.1.2 令和3年度実施内容及び成果	9
3.1.3 まとめ	16
3.2 多関節アーム実装型LIBSプローブの開発	17
3.2.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）	17
3.2.2 令和3年度実施内容及び成果	25
3.2.3 まとめ	40
3.3 パラメトリック超音波による形状再構成技術の開発	40
3.3.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）	40
3.3.2 令和3年度実施内容及び成果	47
3.3.3 まとめ	56
3.4 研究推進	57
3.4.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）	57
3.4.2 令和3年度実施内容及び成果	58
3.4.3 まとめ	59
4. 結言	60
参考文献	64

表一覧

表 2.1-1	全体計画表.....	2
表 2.3-1	月別年間計画表.....	4
表 3.2-1	作製した模擬試験体の写真.....	24
表 3.2-2	加熱前混合試料の混合比率と写真.....	35
表 3.2-3	混合試料の加熱条件.....	35
表 3.2-4	作製した多成分系模擬試験体の写真（加熱温度 2000 °C の例）	35
表 4-1	今後の展望（ロードマップ）	63

図一覧

図 2.1-1	本課題における実施体制図.....	3
図 3.1-1	長尺多関節アームの開発と RPV 下部へのアクセスの概念図.....	6
図 3.1-2	①穴を見つける、②昇る、③調べるの 3 つの段階的なアプローチの提案.....	6
図 3.1-3	試作した改良ロボットアーム部品の一部（材料：A5052）.....	7
図 3.1-4	檜葉遠隔技術開発センターの簡易的な模擬環境施設における多関節アームを用いた基礎実験（探索動作検証及び手先位置の測定）.....	7
図 3.1-5	テレスコピックブームの伸展の様子.....	8
図 3.1-6	設計した機構の全体概要.....	9
図 3.1-7	ケーブルを配置した機構概要.....	9
図 3.1-8	試作したケーブル収納機構の動作の様子.....	9
図 3.1-9	テレスコピック型多関節アームを長尺多関節アームへ統合化させた拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアーム.....	10
図 3.1-10	ロボットアーム制御系向上のための改良結果.....	12
図 3.1-11	エンドエフェクタの動作検証を含むワイヤ駆動関節機構の操作性確認.....	13
図 3.1-12	ロボットシミュレータ試作.....	13
図 3.1-13	テレスコピックアームの位置安定を目指した構造体に対する柔軟な固定法検討例.....	14
図 3.1-14	エンドエフェクタの設計.....	15
図 3.1-15	エンドエフェクタの試作.....	16
図 3.2-1	ガス・光ファイバー導入系の概要.....	17
図 3.2-2	整備したガス・光ファイバー導入系.....	18
図 3.2-3	マイクロチップレーザーLIBS プローブの概要.....	18
図 3.2-4	試作したマイクロチップレーザーLIBS プローブ（外景、カバー内部）.....	19
図 3.2-5	市販のドライバーアームを利用した模擬アーム.....	19
図 3.2-6	模擬アームに取り付けた従来の LIBS プローブの可動状況例.....	19
図 3.2-7	模擬アームに取り付けたマイクロチップレーザーLIBS プローブの可動状況例.....	20
図 3.2-8	実験装置の概要.....	20
図 3.2-9	レーザー入射角度を変えた場合の発光線強度比の Z 軸位置依存性.....	22
図 3.2-10	令和元年度に新規購入した卓上型高周波誘導加熱装置 MU-mini.....	23
図 3.2-11	セラミック YAG コンポジットを実装・改良した簡易分光光学系システム.....	25
図 3.2-12	エンドエフェクタの概要.....	26
図 3.2-13	先端位置決め精度の評価実験体系.....	27
図 3.2-14	先端位置決め精度の評価結果.....	27
図 3.2-15	可搬型光ファイバーLIBS 装置とプローブ部の概観写真.....	28
図 3.2-16	床面、壁面、天井面に配置した試料の LIBS 計測適用例.....	29
図 3.2-17	床面での酸化物試料に対する LIBS 計測適用例.....	30
図 3.2-18	Gd、Zr のスペクトルと Gd/Zr 比の検量線.....	31
図 3.2-19	スペクトル強度の焦点位置依存性.....	32

図 3.2-20	スペクトル強度のレーザー照射角度依存性.....	32
図 3.2-21	評価重量比の焦点位置依存性.....	33
図 3.2-22	評価重量比の角度依存性.....	33
図 3.2-23	超音波による形状計測等との統合化を鑑みた LIBS 計測光学系基礎システム.....	36
図 3.2-24	加熱前混合試料 A、加熱前混合試料 B、加熱前混合試料 C を金属製輪形状構造物 に圧入した試料.....	37
図 3.2-25	加熱前混合試料 A、加熱前混合試料 B、加熱前混合試料 C を金属製輪形状構造物 に圧入した試料の LIBS 計測結果と超音波計測結果.....	38
図 3.2-26	多成分系模擬試験体を金属製輪形状構造物に圧入した試料の LIBS 計測結果.....	39
図 3.3-1	パラメトリック超音波センサ.....	41
図 3.3-2	試作小型超音波送受信系外観および既存超音波計測装置との寸法比較.....	41
図 3.3-3	超音波センサの耐放射線性確認試験概略.....	41
図 3.3-4	超音波センサの耐放射線性確認試験結果.....	42
図 3.3-5	改良小型超音波送受信系.....	43
図 3.3-6	改良小型超音波送受信系を用いた空中超音波物体形状計測実験概略.....	43
図 3.3-7	改良小型超音波送受信系を用いた空中超音波物体形状計測結果.....	44
図 3.3-8	実験装置概要図.....	44
図 3.3-9	簡易模擬構造物 (50 mm×50 mm×50 mm).....	45
図 3.3-10	照明環境が SfM 技術による形状再構成に与える影響.....	45
図 3.3-11	SfM 技術と超音波計測技術による形状再構成情報を ICP 技術により整合させた 画像例.....	46
図 3.3-12	ロボットアーム先端のエンドエフェクタに搭載するために改良したアレイ型 空中超音波センサ.....	47
図 3.3-13	空中超音波による模擬デブリ・模擬構造物の形状再構成評価試験概要.....	48
図 3.3-14	空中超音波による模擬デブリ・模擬構造物の形状再構成評価試験結果.....	48
図 3.3-15	改良小型超音波送受信系.....	49
図 3.3-16	超音波距離減衰補償機能検証の実験体系.....	50
図 3.3-17	超音波距離減衰補償の有無によるエコー信号比較.....	50
図 3.3-18	ロボットアーム先端部に超音波センサを実装するために試作したエンドエフェ クタ部.....	51
図 3.3-19	超音波センサの耐放射線性確認試験結果 (線量率 約 3 kGy/h).....	52
図 3.3-20	カメラ・アレイ型空中超音波センサ複合ユニット.....	53
図 3.3-21	相互補完技術ブロック図.....	53
図 3.3-22	通常環境・霧環境対象物を対象としたカメラ画像 SfM 技術と超音波計測技術の 相互補完技術の適用例.....	54
図 3.3-23	ロボットアーム先端部にカメラを実装するために試作したエンドエフェクタ部 (カメラ取り付け治具).....	55
図 3.3-24	試作したエンドエフェクタ部 (カメラ取り付け治具) から得られたカメラ撮影 画像の例.....	55
図 3.4-1	令和 2 年度第 2 回研究推進委員会 (令和 3 年 3 月).....	57

図 3.4-2	令和 3 年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業成果報告会 プログラム（令和 4 年 3 月）	58
図 3.4-3	令和 3 年度第 1 回研究推進委員会（令和 3 年 6 月）	59
図 4-1	本事業開発コンセプトの実現性確認.....	63

執筆者リスト

事業代表者

国立大学法人東京工業大学

助教

高橋秀治

教授

遠藤 玄

准教授

木倉宏成

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 ディビジョン長 若井田育夫

略語一覧

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)
CLADS	: Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (廃炉環境国際共同研究センター)
東電	: 東京電力ホールディングス株式会社
1F	: 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所
SfM	: Structure from Motion (ストラクチャーフロムモーション; 複数の視点で撮影した画像から、被撮影対象の3次元形状を推定する手法)
LIBS	: Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (レーザーブレイクダウンスペクトロスコピー; 対象にレーザーをフォーカスすることによりレーザー照射部位を微粒子化及び励起(プラズマ化)し、発生する原子線、イオン線を用いて発光分光により元素組成の分析を行う手法)
CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Plastic (炭素繊維強化プラスチック)
RPV	: 原子炉圧力容器

概略

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（以下、「1F」と略す。）の廃炉に関しては、未だに様々な技術的な課題が残されている。その中の大きな課題の1つとして、炉内状況の把握がある。事故を起こした原子炉の廃炉に関しては前例が無く、できる限りの情報を集めて、作業での危険性をできるだけ減らして廃炉を行うしかないが、今の炉内探査の状況はグレーチングの上を走るロボットが撮影した映像によるところが大きい。号機によってはグレーチング上を走るロボットではなく、貫通部からのレールの上や、ペDESTAL内にてテレスコピック式調査装置や水中を泳ぐロボットからの写真画像はあるが、基本的には現状はグレーチング周辺にロボットが行き、その周囲を計測している。一方、実際に燃料が存在していたはずの炉心該当部や上部に関しては情報が少ない。実際の廃炉作業の際には、作業の振動によって上から物が落ちてくる可能性、作業によって舞い上がった放射性物質が格納容器外に漏れ出す可能性等を含め、炉の上部をも含めた全体の情報が必要となる。

これまで国立大学法人東京工業大学（以下、「東京工業大学」と略す。）では1Fの廃炉に向けた様々な技術研究を行っており、既に基礎開発が終わった技術も存在している。その中の1つに、東京工業大学の遠藤らの試作したスーパードラゴン[4]がある。軽量高張力の耐放射線性化学繊維ワイヤで駆動することで多関節を自在に操作することができる全長10 mの長尺多関節アームであり、この方式であれば、狭い貫通部からでも計測用センサ含むアームを炉内に侵入させることができる可能性がある。また、長尺アームによって必要なところに近づきながらの計測が可能である。ロボットアームの関節の配置を工夫することにより、アーム先端を3次元に動かすことも可能であり、上下 ± 10 m、左右 ± 4 mの大きな可動範囲を持っていることから、圧力容器の底部にも近づくことができると考えられる。一方、そのアーム先端には設計上、最大10 kg程度のものが載せられる。しかしながら、そのアームに動きを制限するような、例えば、いくつかの計測器をアーム先端部に取り付けることを想定し、耐放射線性の計測機用の送電用電線、光ファイバー、ガス供給配管などをアーム内部に通した場合に、それら送電機能や供給機能などを損なうことなく、どの程度アームが操作できるかは未知数である。長尺アームにより炉心の外から操作できる事の利点は、電源用や通信用のケーブルをそのアームの中に格納できる点にある。アーム自体には比較的断面積があるので、太いケーブルを格納できる余裕があり、センサ・機械を先端に付けて動作させることができる可能性がある。

かかる状況下、制御棒（Control Rod；以下、「CR」と略す。）ガイドチューブや燃料集合体上部タイプレートが原子炉格納容器底部に発見されていることから圧力容器底部に直径数十 cmの穴が開いている可能性が高いとの報告を受けて、本研究では、「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」と題して、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。）と共同研究を立ち上げ、ペDESTAL上部から①穴を見つける、②昇る、③調べる、の3つの段階的なアプローチの提案に向けた基礎研究開発・概念検討を行う。

本研究においては、廃炉の加速化のためには圧力容器内部の損傷炉内構造物や燃料デブリの状況把握が重要となるため、ペDESTAL上部に位置する圧力容器底部の状況把握を可能とする技術の実現を目的として、長尺の多関節ロボットアームにより、手先の位置姿勢の制御をしながら、カメラのStructure from Motion（以下、「SfM」と略す。）技術及び超音波計測技術を組み合わせることでアーム先端部の自己位置を把握しつつ炉内構造物の状況把握を行うとともに、レーザーを用い

た Laser-Induced Breakdown Spectroscopy（以下、「LIBS」と略す。）技術により核物質の分布状況把握を行う遠隔探査手法のアームへの実装技術を開発する。さらには、櫓葉遠隔技術開発センサー等を活用し実証試験を行い、その実現性を確かめることを目的とし、令和元年度から令和 3 年度までの 3 年間の研究期間を通して目的を達成する。

初年度である令和元年度は、長尺多関節アームの開発と原子炉压力容器（以下、「RPV」と略す。）下部へのアクセス検討については、既存の長尺多関節アームを活用し、压力容器底部へのアクセスを可能とする技術の実現を目指して、曲げにくいケーブルを内包することが可能なワイヤ駆動関節機構を有するロボットアームの設計、改良ロボットアーム部品の試作を行った。また、アーム先端に計測用の機器を設置できる長尺多関節アームへと構造改良を行うため、既存の長尺多関節アームを活用して、関節配置の設計を行った。多関節アーム実装型 LIBS プロブの開発については、既存の可搬型 LIBS 装置を活用し、多関節アーム実装を前提とした長尺光ファイバーを接続するため、多関節アーム用 LIBS プロブ部を試作した。また、試作した LIBS プロブ部に既存装置及び長尺光ファイバーを接続し、模擬試料からの LIBS 信号が得られることを確認した。そして、多関節アームに実装可能な LIBS プロブ部の光学系改良に資する単一成分系・多成分系模擬試験体の仕様及び作製方法を決定するとともに、電気炉を新規に購入し、単一成分系模擬試験体を試作した。また、LIBS プロブ部の光学系改良に資する簡易分光光学系システムを試作した。パラメトリック超音波による形状再構成技術の開発については、単一素子の空中超音波センサを試作し、パラメトリック超音波の音圧分布・指向性の把握を行い、炉内構造物やデブリの形状の把握に適したセンサの仕様をとりまとめた。さらには、多関節アームへの超音波計測装置の実装にあたり、既存の超音波送受信系の実装可能性を調べるとともに、多関節アーム実装に適する小型の超音波送受信系の設計・試作を行った。カメラ画像を用いた SfM 技術による形状再構成の課題点の抽出、及び、超音波計測技術による形状再構成の課題点の抽出を行うとともに、カメラ画像を用いた SfM 技術と超音波計測技術による形状再構成の長所・短所を補う補完手法の構築に資する基礎データを取得した。

令和 2 年度は、長尺多関節アームの開発と RPV 下部へのアクセス検討については、RPV 下部の開口部を発見することが可能かを確かめるために、先端にカメラを装備した既存の長尺多関節アームを用いて模擬環境下で実験を実施した。また、LIBS プロブ部を上方に可搬可能なテレスコピック型多関節アームを試作し、基本的動作を確認した。また、アーム先端に計測用の機器を設置可能な長尺多関節アームの関節部分を設計・試作し、基本的動作を確認した。また、長尺多関節アームの駆動に適した駆動ワイヤの仕様をまとめた。多関節アーム実装型 LIBS プロブの開発については、多関節アームへの実装を模擬するため、簡易型模擬アームを準備した。令和元年度に試作した LIBS プロブを改良するとともに、マイクロチップレーザー LIBS プロブを試作し、模擬アームに取り付けて、屈曲・伸展等の動きに対する可動状況を調べた。また、アームに取り付けたプロブの固定状態の許容範囲を明確化するため、取得されるスペクトルのレーザー光焦点深度依存性、試料に対するレーザー照射角度依存性を取得した。そして、多関節アームに実装可能な LIBS プロブ部の光学系改良に資する単一成分系模擬試験体を試作するとともに、令和元年度に試作した簡易分光光学系システムを改良した。パラメトリック超音波による形状再構成技術の開発については、コバルト照射施設を利用して超音波センサの耐放射線性を確認した。また、アレイ型空中超音波センサを試作し、音圧分布・指向性の把握を行い、炉内構造物やデブリの形状の把握に適したセンサの仕様をとりまとめた。さらには、多関節アームへの超音波計測装置の

実装にあたり、多関節アーム実装に適する小型の超音波送受信系の改良を行うとともに、ペDESTAL上部のみならず下部の状況把握を鑑み、固体だけではなく液体への超音波計測適用性について調べとりまとめた。そして、模擬構造物を対象に、カメラ画像を用いた SfM 技術による形状再構成及び超音波計測技術による形状再構成を行い、3 次元形状データの比較を行った。カメラ画像を用いた SfM 技術と超音波計測技術による形状再構成の長所・短所を補う相互補完を行う技術を開発した。

令和 3 年度は、長尺多関節アームの開発と RPV 下部へのアクセス検討については、ロボットアームを改良するとともに、計測用の送電ケーブル・センサ等をロボットアームに実装し、ロボットアームの操作性を確認した。また、テレスコピック型多関節アームの長尺多関節アームへの適用性を把握し、1F 現場に実機適用すべく、実用化に必要な課題を抽出した。そして、関節配置、駆動ワイヤ、センサ取り付け、ケーブルの巻取り、耐荷重等を考慮し、アーム先端に計測用の機器を設置可能な長尺多関節アームの最適な構造を調べとりまとめた。多関節アーム実装型 LIBS プロブの開発については、多関節アームに LIBS プロブを実装し、アームの操作によりプロブを任意の位置に搬送可能であることを確認した。また、多関節アームの遠隔操作により模擬試料の LIBS 計測が可能であることを確認し、実装の可能性を評価した。そして、多関節アームに実装可能な LIBS プロブ部の光学系改良に資する多成分系模擬試験体を作製するとともに、簡易分光光学系システムを改良し LIBS 計測に最適な光学系について調べとりまとめた。パラメトリック超音波による形状再構成技術の開発については、アレイ型空中超音波センサにより、模擬デブリや模擬構造物の形状を計測し、その有効性を評価した。また、超音波送受信系の改良を行うとともに、ロボットアームに超音波センサを実装するための取り付け治具を作製し、ロボットアーム先端部への実装適用性を確認した。さらには、コバルト照射施設を利用して超音波センサの耐放射線性を確認した。また、令和 2 年度に引き続き、模擬構造物を対象に、カメラ画像を用いた SfM 技術による形状再構成及び超音波計測技術による形状再構成を行い、カメラ画像を用いた SfM 技術と超音波計測技術による形状再構成の長所・短所を補う相互補完を行う技術を開発した。そして、ロボットアーム先端部にカメラを実装するための取り付け治具を作製し、ロボットアームへの実装適用性を確認した。

以上から、3 カ年計画の 3 年目である令和 3 年度の業務項目を実施し、3 カ年計画の所期の目標を達成した。令和元年度から令和 3 年度の本研究を通して、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（以下、「CLADS」と略す。）等との連携を密にして、1F 現場に実機適用すべく、現場との意見/情報交換を行いながら、研究を進め、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、ペDESTAL上部に位置する圧力容器底部の状況把握を可能とする技術の実現を目的として、長尺の多関節ロボットアームにより、手先の位置姿勢の制御をしながら、カメラの SfM 技術及び超音波計測技術を組み合わせてアーム先端部の自己位置を把握しつつ炉内構造物の状況把握を行うとともに、レーザーを用いた LIBS 技術により核物質の分布状況把握を行う遠隔探査手法のアームへの実装技術を開発した。さらには、櫛葉遠隔技術開発センター等を活用し実証試験を行い、その実現性を確かめた。

令和2年度までの成果報告書：

- ・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（委託研究）；令和元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 2020-040

<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2020-040>

- ・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（委託研究）；令和2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 2021-045

<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2021-045>

1. はじめに

1F の廃炉に関しては未だに様々な技術的な課題が残されており、その中の課題の 1 つとして炉内状況の把握がある。炉内探査の状況はグレーチングの上を走るロボットが撮影した映像によるところが大きい。号機によってはグレーチング上を走るロボットではなく、貫通部からのレールの上や、ペDESTAL 内にてテレスコピック式調査装置や水中を泳ぐロボットからの写真画像はあるが、基本的には現状はグレーチング周辺にロボットが行き、その周囲を調査している。実際の廃炉計画策定にあたっては炉心にあった燃料デブリが熔融してどこに移動したかを正確に把握することが必要である。かかる状況下、CR ガイドチューブや燃料集合体上部タイププレートが原子炉格納容器底部に発見されていることから号機によっては压力容器底部に直径数十 cm の穴が開いている可能性が高いとの報告[1]があり、ペDESTAL 床上に落下したデブリは確認されているが、RPV 内については未だ明らかになっていない。一方、東京工業大学では 1F の廃炉に向けた様々な技術研究を行っており、既に基礎開発が終わった技術も存在している。その中の 1 つに、東京工業大学の遠藤らの試作したスーパードラゴン[4]がある。軽量高張力の耐放射線性化学繊維ワイヤで駆動することで多関節を自在に操作することができる全長 10 m の長尺多関節アームであり、この方式であれば、狭い貫通部からでも計測用センサを含むアームを炉内に侵入させることができる可能性がある。

そこで、本研究では、「拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる压力容器内燃料デブリ調査への挑戦」と題する研究を立ち上げ、廃炉の加速化のためには RPV 内部の損傷炉内構造物や燃料デブリの状況把握が重要となるため、ペDESTAL 上部に位置する RPV 底部の状況把握を可能とする技術の実現を目的として、令和元年度から令和 3 年度までの 3 年間の研究期間を通して、長尺の多関節ロボットアームにより、手先の位置姿勢の制御をしながら、カメラの SfM 技術及び超音波計測技術を組み合わせてアーム先端部の自己位置を把握しつつ炉内構造物の状況把握を行うとともに、レーザーを用いた LIBS 技術により核物質の分布状況把握を行う遠隔探査手法のアームへの実装技術を開発する。

レーザーと超音波を用いた炉内構造物把握と物質分析の遠隔検査技術に関する研究開発を行う。既に基礎開発が完成している長尺多関節アームの中に、電源・計測用のケーブルや光ファイバー等を収めた上で、計測に適した手先の位置姿勢の制御ができるように改良し、さらには計測用センサをアーム手先に設置して、アームの実機適用性開発を行う。アーム先端に付ける計測用センサとして、本研究ではレーザー／光ファイバーと超音波センサを選定した。レーザー／光ファイバーセンサでは、レーザー光を光ファイバーで搬送し、対象物に集光照射することで得られるプラズマ発光から対象物の組成をその場で明らかにする LIBS 法のアームへの実装技術を開発する。超音波センサについては、光学カメラでは観測困難な周囲炉内構造物や炉内形状を可視化するとともに、研究分担者が平成 27～29 年度の日英原子力共同研究（代表：東京工業大学 木倉宏成）で技術開発した、超音波による流体測定の実用可能性についても検討する。これらの炉心容器内部を調査する長尺多関節アームの開発と計測技術を開発し、安全・確実に問題発生の少ない廃炉作業に寄与する。さらには、檜葉遠隔技術開発センター等を活用し実証試験を行い、その実現性を確かめる。

以上の多関節ロボットアーム技術・計測技術を東京工業大学と原子力機構とで協働して開発することで、1F の廃炉に資する研究を行うことが本研究の目的である。

2. 業務計画

2.1 全体計画

2.1.1 全体計画概要と全体計画表

廃炉の加速化のためには圧力容器内部の損傷炉内構造物や燃料デブリの状況把握が重要となるため、ペDESTAL上部に位置する圧力容器底部の状況把握を可能とする技術の実現を目的として、長尺の多関節ロボットアームにより、手先の位置姿勢の制御をしながら、カメラのSfM技術及び超音波計測技術によりアーム先端部の自己位置を把握しつつ炉内構造物の状況把握を行うとともに、レーザーを用いたLIBS技術により核物質の分布状況把握を行う遠隔探査手法のアームへの実装技術を開発する。さらには、櫛葉遠隔技術開発センター等を活用し実証試験を行い、その実現性を確かめる。

本業務の全体計画表を表2.1-1に示す。本業務では令和元年度から令和3年度までの3年間の研究期間を通して上述の目的を達成する。

表 2.1-1 全体計画表

項目	年度	令和元年度	令和2年度	令和3年度
(1)長尺多関節アームの開発と 原子炉圧力容器下部へのアクセス検討 ①改良ロボットアームの試験 (東京工業大学)		設計改良	模擬環境実験・ 改良アームの試作	改良機作製・試験
		関節配置改良	関節部分の試作・ 駆動ワイヤの仕様検討	耐荷重改良・センサ取付
(2)多関節アーム実装型LIBSプローブの開発 ①実装型LIBSプローブの開発 (原子力機構)		多関節アーム用 LIBS試験	改良LIBSプローブ試作	多関節アームに実装・性能試験
		単一成分系模擬 試験体の試作	LIBS光学系改良検討	多成分系模擬試験体作製
(3)パラメトリック超音波による形状再構成 技術の開発 ①専用パラメトリック超音波センサの開発 (東京工業大学)		単一素子空中超音波 センサ試作・試験、 超音波送受信系の改良検討	耐放射線性能試験・ アレイセンサ試作	アレイセンサ・パラメトリック 超音波試験
		SfM技術・超音波計測技術による 形状再構成の課題点抽出、 補完手法検討	SfM応用による超音波3次元画像 再構成手法開発	3Dデータ最大利用
(4)研究推進		研究推進のための打合せ、会議等の開催	研究推進のための打合せ、会議等の開催	研究推進のための打合せ、会議等の開催
		研究推進委員会 まとめ・評価	研究推進委員会 まとめ・評価	研究推進委員会(予定) まとめ・評価

2.2 実施体制

本課題における実施体制図（従事者のみ記載）を図 2.1-1 に示す。令和 3 年度の実施体制は東京工業大学従事者 14 名、原子力機構従事者 10 名、その他、協力者等から構成されている。

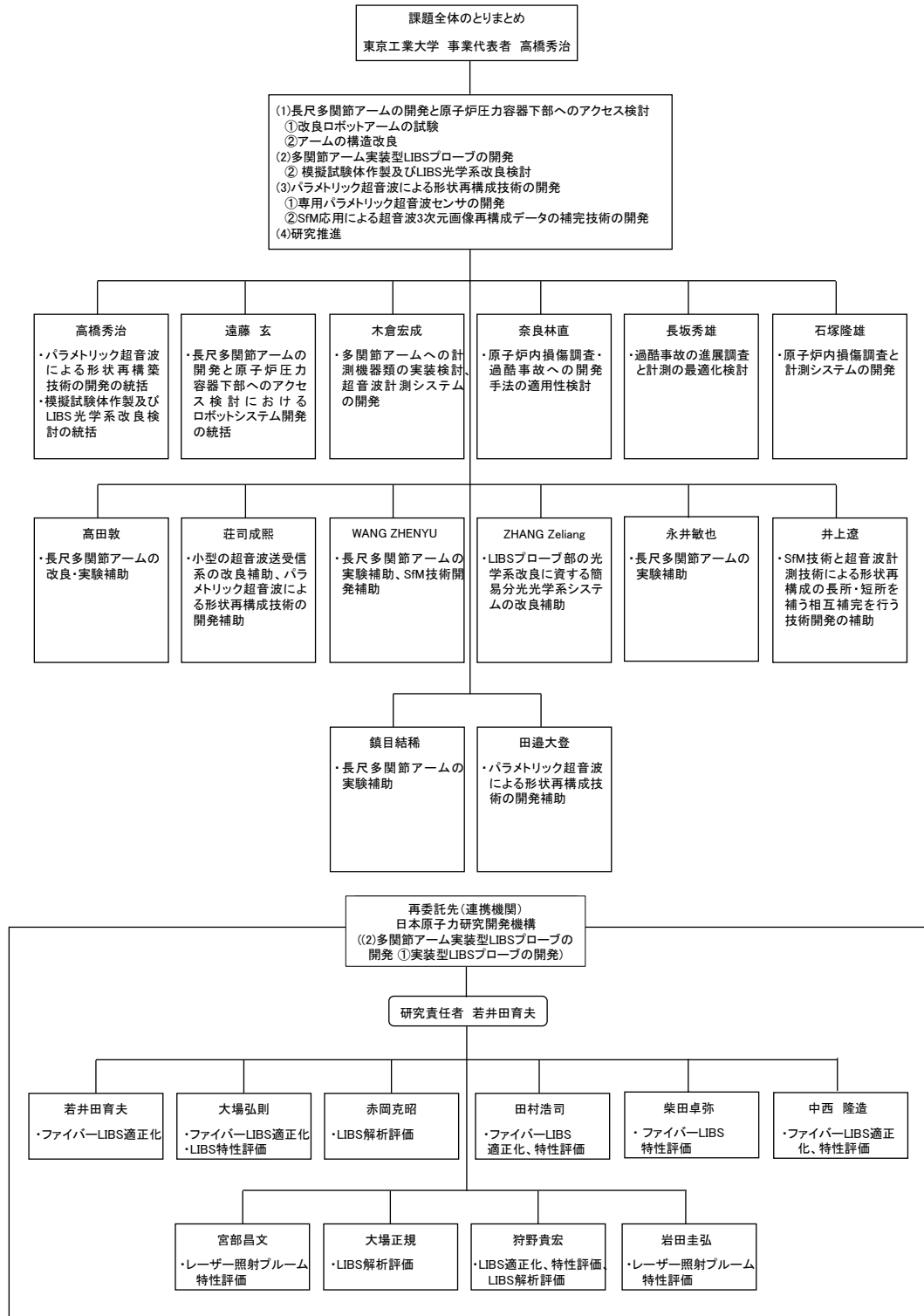


図 2.1-1 本課題における実施体制図

2.3 令和3年度の成果の目標及び業務の実施方法

2.3.1 計画概要及び月別年間計画表

令和3年度の計画の概要は以下の通りとする。

令和3年度の本業務の月別年間計画表を表2.3-1に示す。

表2.3-1 月別年間計画表

項目	年度	2021年 4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	2022年 1月	2月	3月
(1)長尺多関節アームの開発と 原子炉圧力容器下部への アクセス検討		ロボットアーム改良、ロボットアームの操作性確認、テレスコピック型多関節アームの長尺多関節アームへの適用性把握、 実用化に必要な課題抽出											まとめ
①改良ロボットアームの試験 (東京工業大学)		アーム先端に計測用の機器を設置可能な長尺多関節アームの最適な構造の検討											まとめ
②アームの構造改良 (東京工業大学)													
(2)多関節アーム実装型LIBS プローブの開発													
①実装型LIBSプローブの開発 (原子力機構)		多関節アームへのLIBSプローブ実装・搬送可能性確認、模擬試料のLIBS計測の可能性確認、実装可能性評価											まとめ
②模擬試験体作製及びLIBS光学 系改良検討 (東京工業大学)		多成分系模擬試験体の作製、簡易分光光学系システムの改良、LIBS計測に最適な光学系の検討											まとめ
(3)パラメトリック超音波による 形状再構成技術の開発		アレイ型空中超音波センサによる形状計測における有効性評価、超音波送受信系の改良、センサ取付治具作製、 超音波センサの耐放射線性確認											まとめ
①専用パラメトリック超音波 センサの開発 (東京工業大学)													
②SfM応用による超音波3次元 画像再構成データの補完技術 の開発 (東京工業大学)		模擬構造物を用いたSfM技術・超音波計測技術による形状再構成、3次元画像再構成の補完手法の開発、カメラ 取付治具作製											まとめ
(4)研究推進													
			△ 研究推進 委員会(6月)	△ 研究推進 委員会(7月)			△ 研究推進 委員会(10月)		△ 研究推進 委員会(12月)	△ 研究推進 委員会(1月)			全体のまとめ

(1)長尺多関節アームの開発とRPV下部へのアクセス検討

① 改良ロボットアームの試験

ロボットアームを改良するとともに、計測用の送電ケーブル・センサ等をロボットアームに実装し、ロボットアームの操作性を確認する。また、テレスコピック型多関節アームの長尺多関節アームへの適用性を把握し、1F現場に実機適用すべく、実用化に必要な課題を抽出する。

② アームの構造改良

関節配置、駆動ワイヤ、センサ取り付け、ケーブルの巻取り、耐荷重等を考慮し、アーム先端に計測用の機器を設置可能な長尺多関節アームの最適な構造を調べとりまとめる。

(2)多関節アーム実装型LIBSプローブの開発

① 実装型LIBSプローブの開発（連携先：原子力機構）

多関節アームにLIBSプローブを実装し、アームの操作によりプローブを任意の位置

に搬送可能であることを確認する。

多関節アームの遠隔操作により模擬試料のLIBS計測が可能であることを確認し、実装の可能性を評価する。

② 模擬試験体作製及びLIBS光学系改良検討

多関節アームに実装可能なLIBSプローブ部の光学系改良に資する多成分系模擬試験体を作製するとともに、簡易分光光学系システムを改良しLIBS計測に最適な光学系について調べとりまとめる。

(3) パラメトリック超音波による形状再構成技術の開発

① 専用パラメトリック超音波センサの開発

アレイ型空中超音波センサにより、模擬デブリや模擬構造物の形状を計測し、その有効性を評価する。また、超音波送受信系の改良を行うとともに、ロボットアームに超音波センサを実装するための取り付け治具を作製し、ロボットアーム先端部への実装適用性を確認する。さらには、コバルト照射施設を利用して超音波センサの耐放射線性を確認する。

② SfM応用による超音波3次元画像再構成データの補完技術の開発

令和2年度に引き続き、模擬構造物を対象に、カメラ画像を用いたSfM技術による形状再構成及び超音波計測技術による形状再構成を行い、カメラ画像を用いたSfM技術と超音波計測技術による形状再構成の長所・短所を補う相互補完を行う技術を開発する。また、ロボットアーム先端部にカメラを実装するための取り付け治具を作製し、ロボットアームへの実装適用性を確認する。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびにCLADS等との連携を密にして、1F現場に実機適用すべく、現場との意見/情報交換を行いながら、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. 実施内容及び成果

3.1 長尺多関節アームの開発と RPV 下部へのアクセス検討

3.1.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）

以下に、令和2年度までの実施内容及び成果（概要）を示す。

① 改良ロボットアームの試験

令和元年度は、既存の長尺多関節アームを活用し、RPV底部へのアクセスを可能とする技術の実現を目指して、曲げにくいケーブルを内包することが可能なワイヤ駆動関節機構を有するロボットアームの設計、改良ロボットアーム部品の試作を行った。また、RPV底部へのアクセスを可能とする技術の実現を目指して、既存の長尺多関節アームの可動範囲確認試験を行うとともに、曲げにくいケーブルを内包することが可能なワイヤ駆動関節機構を有するロボットアームの設計として直動機構を提案した。

提案のなかで、CRガイドチューブや燃料集合体上部タイプレートが原子炉格納容器底部に発見されていることから、RPV底部に直径数十cmの穴が開いている可能性が高いとの報告を受けており、本研究では、図3.1-1に示すような長尺多関節アームの開発とRPV下部へのアクセスの概念を掲げ、ペダスタル上部から①穴を見つける、②昇る、③調べる、の3つの段階的なアプローチの提案（図3.1-2）に向けた基礎研究開発・概念検討を行った。

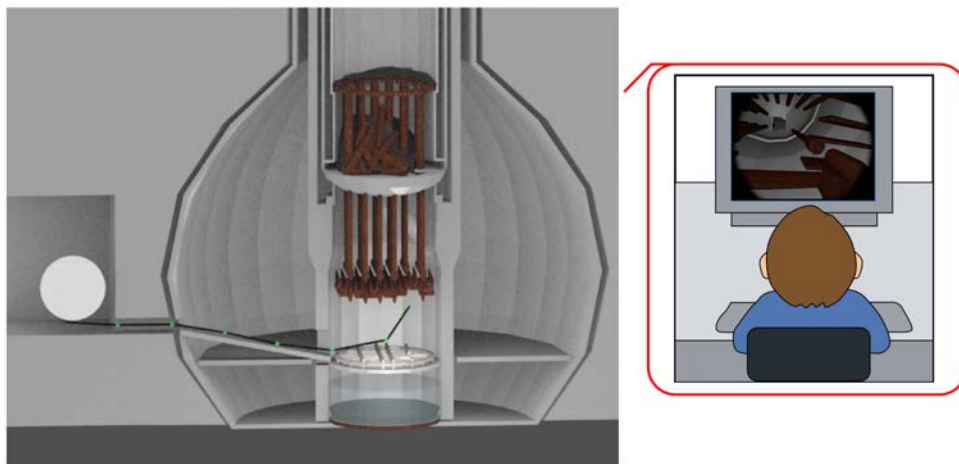


図 3.1-1 長尺多関節アームの開発と RPV 下部へのアクセスの概念図[2]

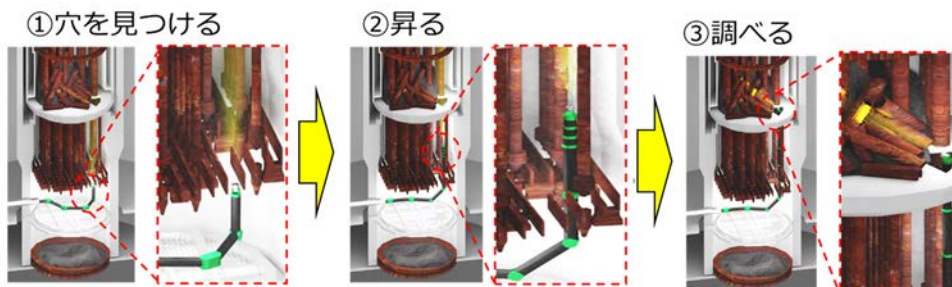


図 3.1-2 ①穴を見つける、②昇る、③調べるの3つの段階的なアプローチの提案[2]

試作した改良ロボットアーム部品を図 3.1-3 に示す。改良前は軽量化のためエンジニアリングプラスチックであるポリアセタール樹脂を用いてプーリを試作していたが、高張力時に面外方向に撓み、フランジが破損することによりワイヤが度々脱落していた。これを改善するため、材料を高力アルミニウム（A5052）に変更し、フランジ高さをより高くする改良を施した。

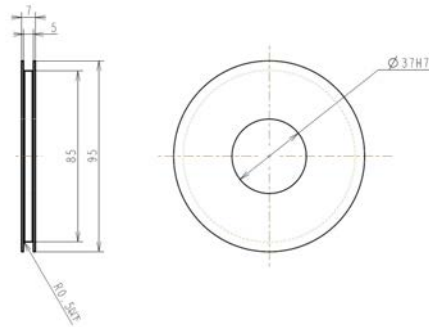


図 3.1-3 試作した改良ロボットアーム部品の一部（材料：A5052）[2]

令和2年度は、RPV下部の開口部を発見することが可能かを確かめるために、先端にカメラを装備した既存の長尺多関節アームを用いて模擬環境下で実験を実施した。また、LIBSプローブ部を上方に可搬可能なテレスコピック型多関節アームを試作し、基本的動作を確認した。東京工業大学内及び檜葉遠隔技術開発センターの簡易的な模擬環境施設においてカメラを装備した既存の多関節アームを用いた基礎実験を実施し、RPV下部の開口部を発見することが可能かを確かめることを目指して、長尺多関節アームの基礎的な上下左右動作を調べとりまとめた。また、3本のワイヤにより駆動されるテレスコピック型多関節アームを試作し、伸展・収縮の基本的動作を確認した。

既存の多関節アームを用いた基礎実験については、東京工業大学内において多関節アームの基礎的な上下左右動作の検証をしたのち、檜葉遠隔技術開発センターへ多関節ロボットアームを輸送し、簡易的な模擬環境施設として、檜葉遠隔技術開発センターの試験水槽を模擬の探索対象とし、長尺多関節アームの上下左右動作を調べ、予め設置したマーカを、超長尺多関節アームスーパードラゴンの手先部に装着した小型カメラによって撮影することが可能か、実験により検証した（図3.1-4）。



図3.1-4 檜葉遠隔技術開発センターの簡易的な模擬環境施設における多関節アームを用いた基礎実験（探索動作検証及び手先位置の測定）[3]

さらに、テレスコピック型多関節アーム試作、伸展・収縮の基本的動作の確認については、伸展をテレスコピック構造で満たしつつ、検査器具を含めた合計重量を10 kg以内として長尺多関節ロボットアームの先端に搭載することを想定し、ロープによる駆動で鉛直方向に伸縮ができるテレスコピック型多関節アームの設計・試作を行った。狭空間高所部を調査するため、細径で伸縮比の高い軽量の機構を提案、試作し、伸展・収縮の基本的動作の確認をした（図3.1-5）。

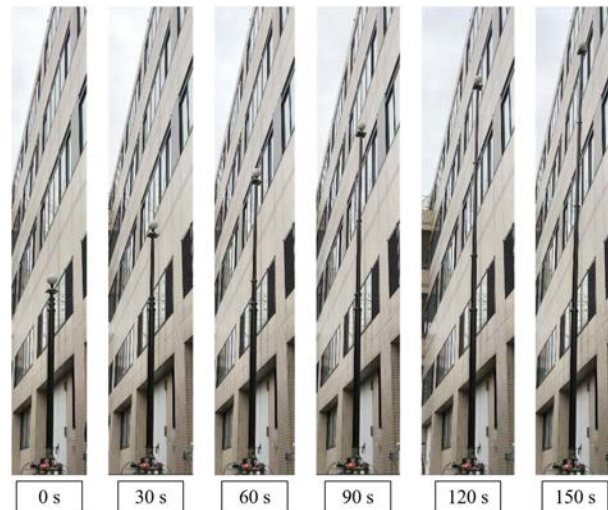


図 3.1-5 テレスコピックブームの伸展の様子[3]

② アームの構造改良

令和元年度は、アーム先端に計測用の機器を設置できる長尺多関節アームへと構造改良を行うため、既存の長尺多関節アームを活用して、関節配置の設計を行った。また、アーム先端に計測用の機器を設置できる長尺多関節アームへと構造改良を行うにあたり、計測器配線・光ファイバーの取り回しのためにダクトホース・回転接手を利用した設計を考案した。

令和2年度は、アーム先端に計測用の機器を設置可能な長尺多関節アームの関節部分を設計・試作し、基本的動作を確認した。また、長尺多関節アームの駆動に適した駆動ワイヤの仕様をまとめた。そして、また、アーム先端に計測用の機器を設置可能な長尺多関節アームの関節部分の設計・試作として、計測機器用のケーブル類をテレスコピック型多関節アームの伸展・収縮に同期して、ケーブルの巻き取り・繰り出しの機能を実現するケーブル収納機構を設計・試作し、基本的動作を確認した。

計測機器用のケーブル類をテレスコピック型多関節アームの伸展・収縮に同期して、ケーブルの巻き取り・繰り出しの機能を実現するケーブル収納機構として設計した機構の全体概要を図3.1-6に示す。テレスコピックブームの伸縮を行うためのアクチュエータを用いて、伸縮に同期してケーブル収納部分を回転させ、ケーブルを繰り出し・巻き取る機構となっている。また、ケーブルを配置した機構概要を図3.1-7に示す。かさ歯車を用い、駆動ワイヤの巻き取りに用いた動力をケーブルのリールに回転伝達し、少ない要素でねじれが生じない巻き取りを実現する設計となっている。直径10 mmの模擬ケーブルを用いて試作したケーブル収納機構の動作の様子を図3.1-8に示す。

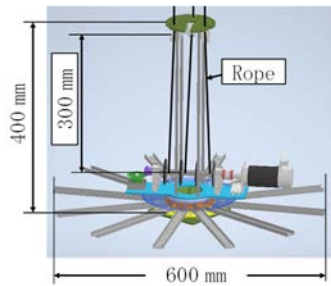


図 3.1-6 設計した機構の全体概要[3]

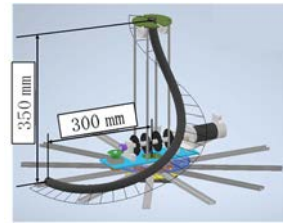


図 3.1-7 ケーブルを配置した機構概要[3]

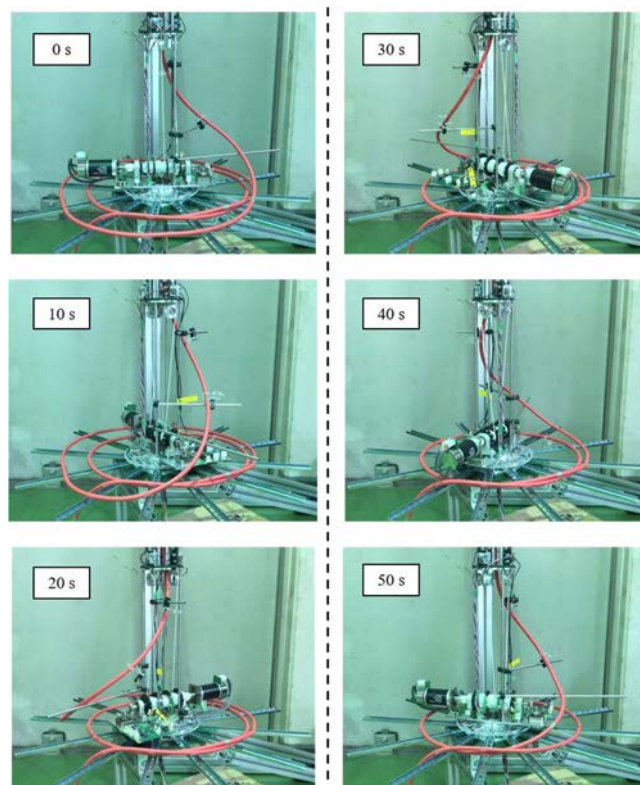


図 3.1-8 試作したケーブル収納機構の動作の様子[3]

3.1.2 令和3年度実施内容及び成果

以下に、令和3年度の実施内容及び成果を示す。

① 改良ロボットアームの試験

ロボットアームを改良するとともに、計測用の送電ケーブル・センサ等をロボットアームに実装し、ロボットアームの操作性を確認した。また、テレスコピック型多関節アームの長尺多関節アームへの適用性を把握し、1F現場に実機適用すべく、実用化に必要な課題を抽出した。

ロボットアーム制御系向上のための改良を行った。また、計測用の送電ケーブル・センサ等をロボットアームに実装し、ロボットアーム先端におけるエンドエフェクタの動作検

証を含むワイヤ駆動関節機構の操作性を確認した。そして、令和2年度までに試作したテレスコピック型多関節アームを長尺の多関節ロボットアームへと統合（図3.1-9）し、拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームとしての上方進展適用性を把握した。さらには、1F現場に実機適用すべく、実用化に必要な課題を抽出しとりまとめるとともに、簡易仮想環境3Dデータを含むロボットシミュレータの試作やテレスコピックアームの位置安定を目指した構造体への柔軟な固定法検討を行い、将来開発技術について概観した。

テレスコピック型多関節アームは、全4本のCFRPパイプで構成されており、質量6.3 kg、収縮時長さ2100 mm、最大展開時長さ6300 mm、展開部の最外径82 mm、先端のパイプ外径52 mmとなっている。駆動方式はワイヤ駆動であり、3本の高強度化学繊維ロープが120°に等配されている。ロープ経路は根元と先端を往復して配置され、収縮時が経路長最大、最大展開時が経路長最小となっている。展開時にはロープを巻き取って展開させ、収縮時にはロープを送り出して自重により収縮させることが可能となる。令和3年度は、テレスコピック型多関節アームを長尺多関節アームへ統合化させて、拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームの開発ができた。なお、ペイロードは2.5 kgまでかけられることを確認した。RPV底部に到達するためには、格納容器内に水平に侵入し、ペDESTALから垂直上方に測定機器を運搬する必要があるが、本研究成果から、ペDESTALからRPV底部に侵入する姿勢が機構的に実現可能であることを確認し、当初提案のRPV下部へのアクセス概念コンセプトにおけるペDESTAL上部から①穴を見つける、②昇る、③調べる、の段階的なアプローチに必要なロボットアーム姿勢の機構的実現性を確認した。



図 3.1-9 テレスコピック型多関節アームを長尺多関節アームへ統合化させた
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアーム

そして、ロボットアーム制御系向上のための改良を行った。自重負荷トルクは機構の耐荷重、腱の強度にとって重要であるだけでなく、腱の大きな弾性伸びを引き起こし、関節角制御の課題となる。具体的には、自重負荷トルクが関節角の三角関数で変化するため、特にアーム体幹が上向きの姿勢では関節角制御を不安定化させる。腱の伸びが全く無視できる場合では自重負荷トルクの不安定性は問題にならない。一方、長尺な腱駆動ロボットアームでは、全長が長いほど腱の剛性が低くなり、関節角制御の不安定性が顕在化する。このような場合での関節角制御方式として、腱を巻き取るアクチュエータはローカルに変位制御され、アームは力のつり合いをほぼ保ったままゆっくりと動作させる方式を採用している。すなわち、アクチュエータが動いていないとき、アームの関節角は自重負荷トルクと腱の弾性力がつり合った場所、すなわち平衡点となる。問題は、関節角目標値が安定な平衡点ではなく、不安定な平衡点であると、たとえその関節角目標値が平衡点となるアクチュエータ変位であっても、外乱によって、近接する別の安定平衡点に落ち込んでいき、意図した関節角目標値には収束できないことである。

そこで、このような不安定平衡点となる関節角を避けながら目標手先位置に到達する経路計画法を開発した。本手法では、不安定平衡点となる姿勢を避けてゴール地点まで手先位置を辿り着かせる関節角の経路を探索するものである。

障害物を回避しながら経路計画を行う場合では、スタート地点からゴール地点の間にある様々な地点について、周囲の障害物と干渉なく手先位置をその地点に位置決めできる姿勢が存在するか逆運動学で判別し、干渉なく到達できる地点をスタートからゴールまで連ねるとし、関節角の不安定な姿勢を回避できるかを逆運動学で判別しながら経路を探索する。冗長逆運動学を多数の地点に対して解くことで、その地点が到達可能であるか判別する。そして、経路探索アルゴリズム RRT (Rapidly exploring Random Trees) を用いて、腱張力が設計強度を超えない、かつ、安定な姿勢が存在する手先位置の経路を探索した。

ロボットアーム制御系向上のための改良結果として、長尺多関節アームに本手法を適用し、制御指令値に対して関節センサ測定値がゴール地点に経路計画を用いることで到達できることを確認した (図 3.1-10)。

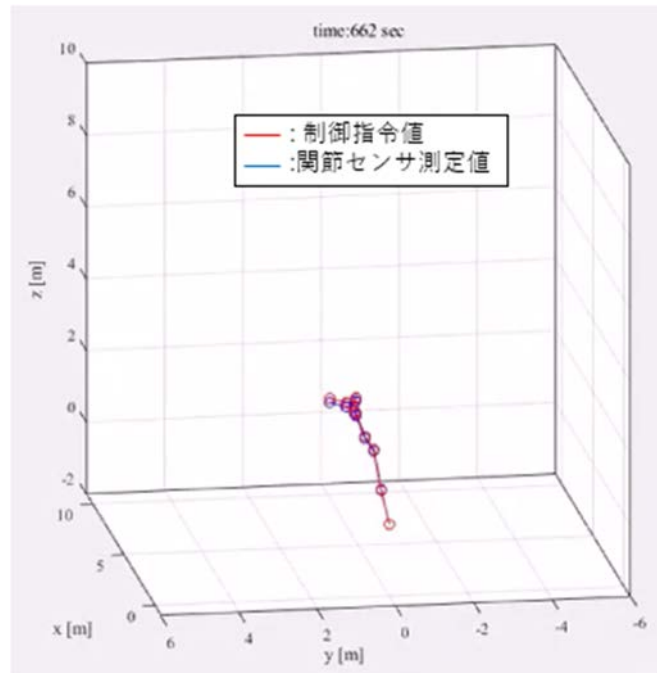


図 3. 1-10 ロボットアーム制御系向上のための改良結果

また、計測用の送電ケーブル・センサ等をロボットアームに実装し、ロボットアーム先端における3. 1. 2②で詳細を示す、エンドエフェクタの動作検証を含むワイヤ駆動関節機構の操作性を確認した（図3. 1-11）。さらには、1F現場に実機適用すべく、実用化に必要な課題を抽出しとりまとめるとともに、簡易仮想環境3Dデータを含むロボットシミュレータの試作を行った（図3. 1-12）。シミュレータでは機能として仮想環境3Dデータとして、簡易1Fモデル、簡易檜葉遠隔技術開発センターモデル、基礎構造物自由配置モデルを選択できるようにし、障害物衝突解析、俯瞰カメラ・手先カメラ機能搭載、超音波距離計測シミュレータ等を機能として組み込んだ。そして、テレスコピックアームの位置安定を目指した構造体に対して、風船型の柔軟な固定法検討を行った（図3. 1-13）。

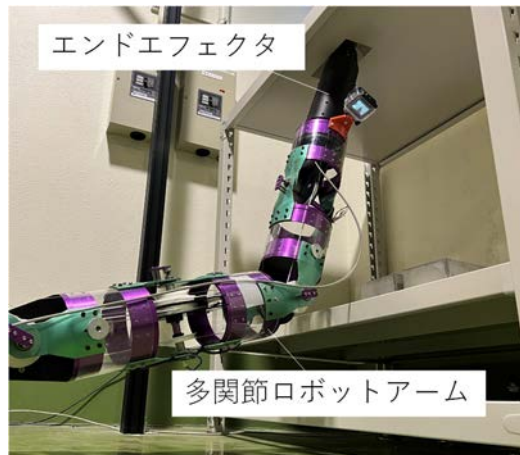


図 3.1-11 エンドエフェクタの動作検証を含むワイヤ駆動関節機構の操作性確認

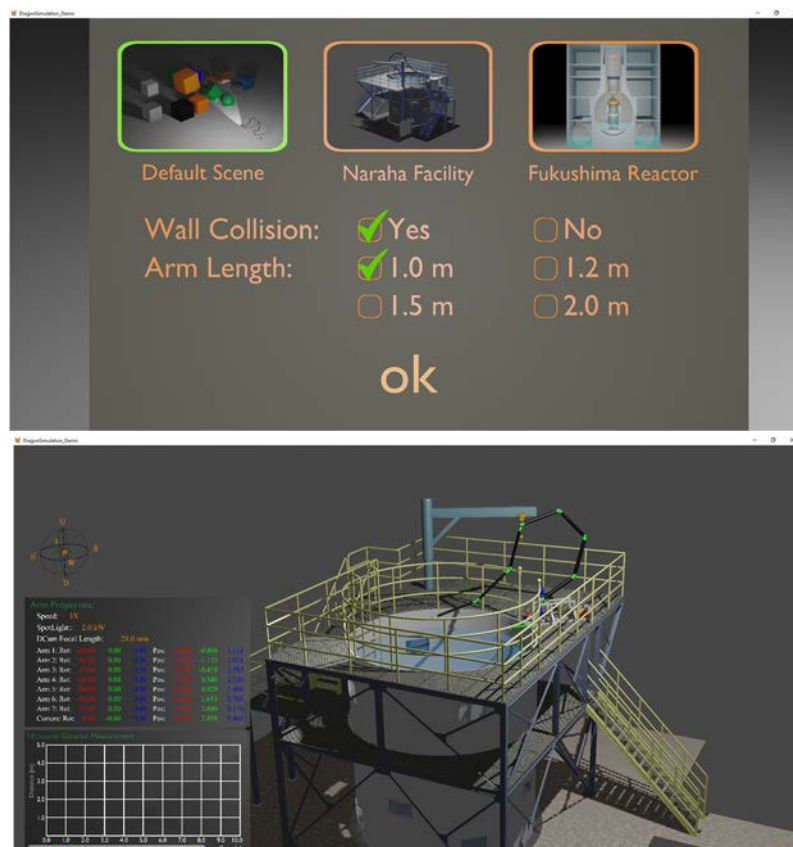


図 3.1-12 ロボットシミュレータ試作

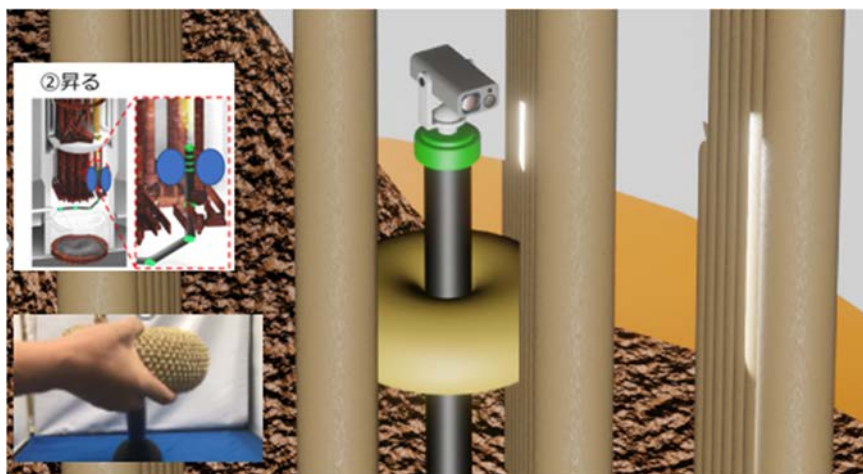


図 3.1-13 テレスコピックアームの位置安定を目指した構造体に対する柔軟な固定法検討例

後述する計測手法開発と併せて、令和元年度から令和3年度にわたる本課題の研究開発を通じて、当初の本課題開発コンセプトの実現性を確認し、CR ガイドチューブやRPV 底部へアクセスして先端に積んだ計測器による各種調査を行うポテンシャルを示唆する成果が得られ、その道筋をつけることはできたと思われる。一方で、各種計測器の小型化による適用範囲は確認できたものの、現状では自由空間において先端部の対象箇所への搬送可能性について明示した範囲にとどまっており、今後、実機適用に向けては、廃炉に関連する電力関係機関・研究機関・メーカー企業等と連携して、実環境を模擬した過酷なモックアップ環境での実証試験、本研究で得られた知見の高度化研究を行い、本研究で得られた技術等の実機適用化を目指すことが重要である。実用化に必要な課題として、以下の将来技術開発が求められる。

- ・多関節ロボットアーム収納・展開・メンテナンス方法検討：PCV ペネトレーション部との接続室等の検討(接続室の大きさ、気密維持機構、アーム侵入前後メンテナンス機構収納等)、侵入前・侵入後のメンテナンス法検討。
- ・多関節ロボットアーム内部プーリからのワイヤ脱落防止機構の強化検討。
- ・狭隘地探索のための関節制御法：3 次元的に存在する複雑な支障物を避けつつ狭隘地に進入するための運動制御法の検討。カメラ画像等による有視界誘導を考慮した各関節へのカメラや接触センサー設置検討。事前に3次元座標系で全関節と関節間の腕を含めた移動経路のプログラム化検討。自動航法のためのレーザースキャナーや接近センサーの考案検討。アーム全体の重量や分布変化を考慮した動作制御イタレーション作業検討。
- ・防塵・防水性：格納容器内部での放射線以外の劣悪な環境に耐えうる機構設計。
- ・故障時・耐用年数を超えた場合の汚染されたロボットの取り扱い検討。
- ・操作用ユーザインタフェース開発：デジタルツイン利用など。
- ・電源ケーブルの耐屈曲性・耐放射性評価試験、光ファイバーケーブル耐屈曲性評価：破断可能性、伝送効率性評価など。
- ・折損頻度を低減するためのアーム内外に使用する各種ケーブルの仕様など、周辺機器の詳細化(被覆の強度や防水性、水が浸入した際の措置などの検討)。
- ・超音波、レーザー、カメラ等の計測データの高速可視化処理。

等

② アームの構造改良

関節配置、駆動ワイヤ、センサ取り付け、ケーブルの巻取り、耐荷重等を考慮し、アーム先端に計測用の機器を設置可能な長尺多関節アームの最適な構造を調べとりまとめた。

アーム先端に計測用の機器を設置可能な長尺多関節アームの最適な構造を調べとりまとめ、エンドエフェクタの設計・試作を行った（図3. 1-14）。

本研究で使用するLIBS分析法では、焦点距離や焦点角度が重要であり、測定する対象は、ある程度面積をもった平面と仮定した場合でのエンドエフェクタを試作した。LIBSプローブと対象物との距離は10 mm、レーザー照射角度は 30° 以内と想定した。測定対象平面との距離誤差を許容する直動機能、LIBSプローブの姿勢誤差を許容し測定対象平面に対してLIBSプローブを垂直配置させる倣い機能の2つの機能を持つエンドエフェクタを設計・試作した。なお、本研究で使用する超音波センサやカメラの取り付けも可能となる設計としている。姿勢誤差を吸収するため、Remote Center Mechanismを利用した。Remote Center Mechanismとは、回転軸が1点に交わることで、位置は一定のままでその点周りの回転が可能とする手法である。したがって、LIBSプローブの焦点をRemote Center Mechanismの回転中心とすることで、角度誤差のみを吸収することができる。試作したエンドエフェクタでは、測定対象面に押し付けることで、測定対象に倣うことが可能となっている。つまり、測定対象からのLIBSプローブの距離を一定にしつつ回転する。球面であるため固定されたLIBSプローブは回転するが、測定対象からの距離は一定とすることが可能である。また倣い機構は弾性体で支持させておき、先端が測定対象面から離れると中立姿勢に戻るようになっている（図3. 1-15(a)）。

また、倣い機構は測定対象面に倣うために、エンドエフェクタを押し付ける必要があり、エンドエフェクタだけを直動させ測定対象面に押し付ける直動機構が必要である。ワイヤ2本をエンドエフェクタに接続し、バネによる反発力と拮抗させることでエンドエフェクタを伸縮することができるようにしている（図3. 1-15(b)）。

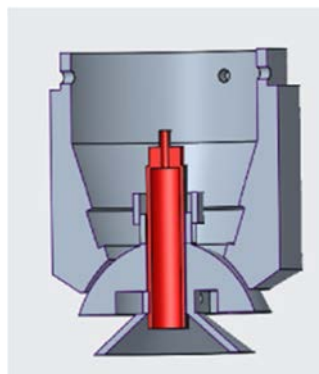
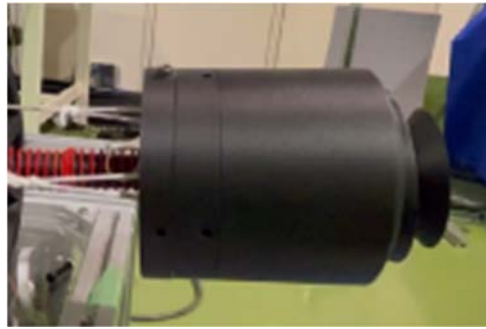


図 3. 1-14 エンドエフェクタの設計



(a)測定対象面倣い機構



(b)測定対象面距離直動調整機構

図 3.1-15 エンドエフェクタの試作

3.1.3 まとめ

令和元年度から令和3年度の本研究を通じて、長尺多関節アームの開発とRPV下部へのアクセス検討にあたり、表2.1-1全体計画表に沿って、①改良ロボットアームの試験、②アームの構造改良を実施した。

令和元年度には、既存の長尺多関節アームを活用し、RPV底部へのアクセスを可能とする技術の実現を目指して、曲げにくいケーブルを内包することが可能なワイヤ駆動関節機構を有するロボットアームの設計、改良ロボットアーム部品の試作や、アーム先端に計測用の機器を設置できる長尺多関節アームへと構造改良を行うため、既存の長尺多関節アームを活用して、関節配置の設計を行った。令和2年度には、RPV下部の開口部を発見することが可能かを確かめるために、先端にカメラを装備した既存の長尺多関節アームを用いて模擬環境下で実験を実施した。また、LIBSプローブ部を上方に可搬可能なテレスコピック型多関節アームを試作し、基本的動作を確認することや、アーム先端に計測用の機器を設置可能な長尺多関節アームの関節部分を設計・試作し、基本的動作を確認した。また、長尺多関節アームの駆動に適した駆動ワイヤの仕様をまとめた。令和3年度には、ロボットアームを改良するとともに、計測用の送電ケーブル・センサ等をロボットアームに実装し、ロボットアームの操作性を確認した。また、テレスコピック型多関節アームの長尺多関節アームへの適用性を把握し、1F現場に実機適用すべく、実用化に必要な課題を抽出した。さらには、関節配置、駆動ワイヤ、センサ取り付け、ケーブルの巻取り、耐荷重等を考慮し、アーム先端に計測用の機器を設置可能な長尺多関節アームの最適な構造を調べとりまとめた。

以上は、長尺多関節アームの開発とRPV下部へのアクセス検討の実施項目の計画を満足するものであり、本研究成果より、ペDESTALからRPV底部に侵入する姿勢が機構的に実現可能であることを確認し、図3.1-1、図3.1-2に示す当初提案のRPV下部へのアクセス概念コンセプトにおけるペDESTAL上部から①穴を見つける、②昇る、③調べる、の段階的なアプローチに必要なロボットアーム姿勢の機構的实现性を確認した。

3.2 多関節アーム実装型 LIBS プローブの開発

3.2.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）

以下に、令和2年度までの実施内容及び成果（概要）を示す。

① 実装型 LIBS プローブの開発（連携先：原子力機構）

令和元年度は、既存の可搬型LIBS装置を活用し、多関節アーム実装を前提とした長尺光ファイバーを接続するため、多関節アーム用LIBSプローブ部を試作した。そして、試作したLIBSプローブ部に既存装置及び長尺光ファイバーを接続し、模擬試料からのLIBS信号が得られることを確認した。また、ガス搬送チューブと光ファイバーを一体化した多関節アーム用LIBSプローブ部の試作仕様をまとめ、試作を行い、模擬試料を用いた試作LIBSプローブ部の動作確認試験によりLIBS信号が得られることを示した。

令和2年度は、多関節アームへの実装を模擬するため、簡易型模擬アームを準備した。マイクロチップレーザーLIBSプローブを試作し、模擬アームに取り付けて、屈曲・伸展等の動きに対する可動状況を調べた。また、アームに取り付けたプローブの固定状態の許容範囲を明確化するため、取得されるスペクトルのレーザー光焦点深度依存性、試料に対するレーザー照射角度依存性を取得した。

簡易型模擬アームを構築し、試作したLIBSプローブを模擬アームに取り付けて、屈曲・伸展等の動きに対する可動状況を調べとりまとめた。また、アームに取り付けたプローブの固定状態の許容範囲を明らかにするために、レーザーの照射角度に対して試料の設置ステージの高さを変化させ、照射痕を観察しスペクトルの測定を行うことで、照射痕跡の深さやスペクトル強度から焦点深度依存性や照射角度依存性を調べ整理した。また、外径6 mmのガス導入チューブ内に光ファイバーを導入し、同軸構造として一体化できることを確かめた。光ファイバーを包含したガス・光ファイバー導入系の概要を図3.2-1に、実際に整備した導入系の写真を図3.2-2に示す。ロボットアーム搭載用に試作したマイクロチップレーザーLIBSプローブの概要を図3.2-3に、試作したプローブ部の写真を図3.2-4に示す。

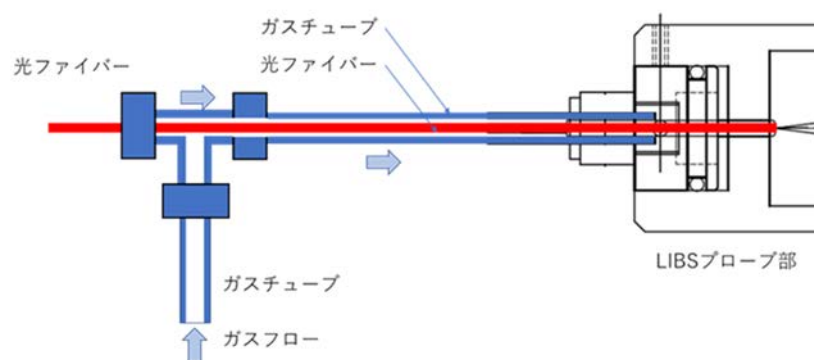
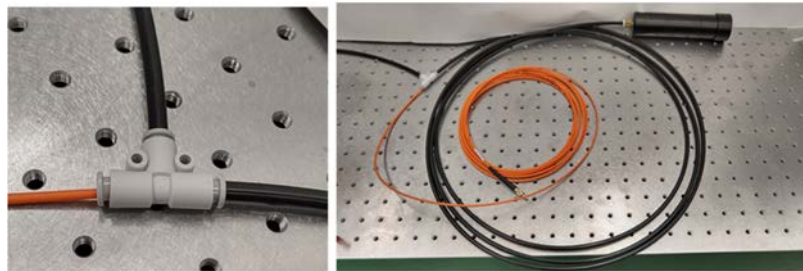


図3.2-1 ガス・光ファイバー導入系の概要[3]



ガス・光ファイバー導入部

全体図

図3. 2-2 整備したガス・光ファイバー導入系[3]

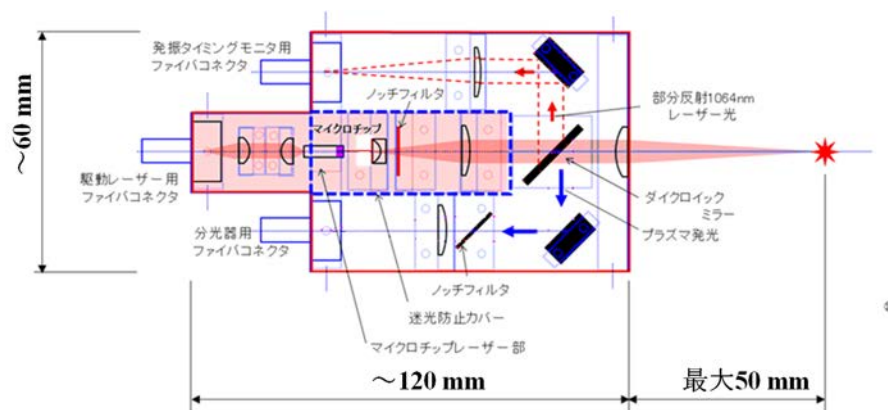


図3. 2-3 マイクロチップレーザーLIBSプローブの概要[3]



図3.2-4 試作したマイクロチップレーザーLIBSプローブ（外景、カバー内部） [3]

ロボットアームに搭載した際のプローブ部の動き、アーム部分の屈曲等の動きに対する光ファイバーの可動状態を模擬するため、模擬アームを準備した。準備したアームは、小型の電動ドリルや電動ドライバーを垂直に保持したまま、任意の位置で上下に動かせるドライバーアームを選定した。模擬アームを図3.2-5に示す。従来のLIBSプローブを取り付けた場合を図3.2-6に示す。マイクロチップレーザーLIBSプローブを取り付けた場合を図3.2-7に示す。



図3.2-5 市販のドライバーアームを利用した模擬アーム
（実験室の光学定盤に固定した様子） [3]

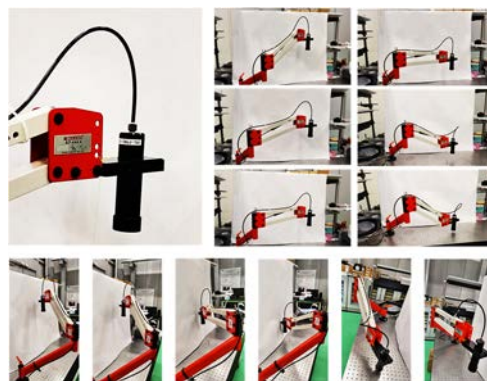


図3.2-6 模擬アームに取り付けた従来のLIBSプローブの可動状況例 [3]

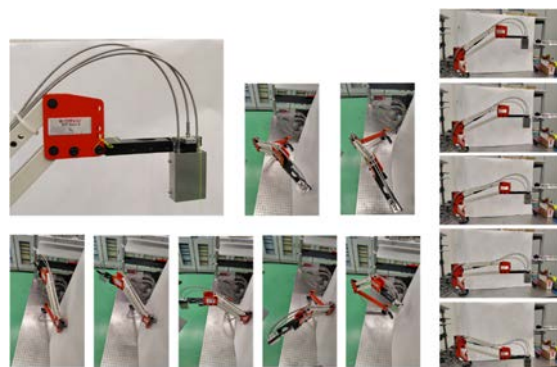


図3.2-7 模擬アームに取り付けたマイクロチップレーザーLIBSプローブの可動状況例[3]

途中支点を持たない片持梁のような多関節ロボットアームでは、その先端は、アーム自体のたわみや歪み、あるいは、駆動体の伸縮等により完全に固定することは困難である。こういったアームの先端にLIBSプローブを取り付けた場合は、レーザー光の焦点位置や試料面に対するレーザー照射角度が意図しない条件となることが十分予想される。そこで、LIBS計測において、その裕度がどの程度あるのかを知っておくことは極めて重要である。そこでここでは、基礎的な状況を確認するため、レーザー照射体系が固定されたLIBS装置において、金属表面を試料として、取得されるスペクトルの焦点距離依存性、レーザー照射角度依存性について調べた。

実験装置の概要を図3.2-8に示す。試料には、分光特性が把握されており、かつ複数の元素を含むSUS304を用いた。大気中で試料を装着したゴニオステージをXYZステージに固定し、一定角度を保持したまま集光レンズとの距離を変化させるZステージを操作して、出現するスペクトルを比較した。レーザー光の入射角度は、試料面の法線に対して 0° （垂直入射）、 15° 、 30° とした。

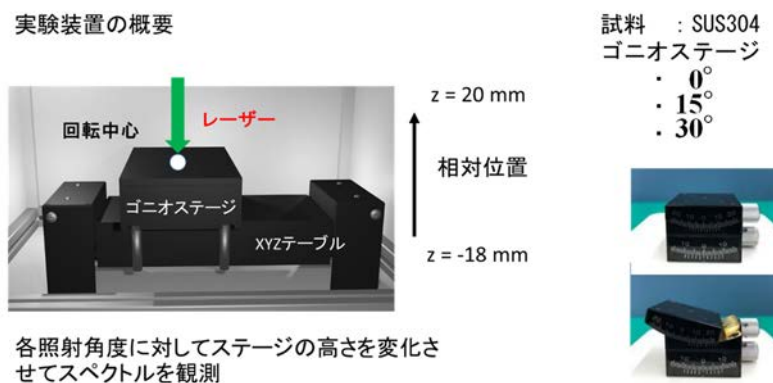


図3.2-8 実験装置の概要[3]

LIBS 分析では、装置固有の感度は別として、パルスレーザーによるレーザー誘起プラズマ発光では、プラズマ生成条件が表面状態に強く依存すること、過渡現象の緩和過程を活用して分光しており安定性に欠ける。このため、レーザー照射に対するショットごとの再現性が乏しく、一般に、発光強度の絶対値から存在量の絶対値を分析することは得意ではなく、主要元素量に対する相対量から組成比を導出することを得意とする。そこで、今回の実験においても、発光線強度ではなく、発光線強度比に着目し、発光強度比に対する入射角度、焦点位置依存性について調べた。結果を図 3.2-9 に示す。この解析では、試料である SUS304 の主成分である鉄に注目し、鉄の発光スペクトルである、Fe I : 532.8 nm を基本として、Cr I : 449.7 nm、同じく鉄ではあるが、より高励起状態からの発光ラインである Fe I : 557.3 nm に対する発光強度比について比較した。なお、比較結果が分かりやすいように、焦点位置の強度比の平均で規格化して示した。

図 3.2-9 は、光強度比は、入射角度を変えても、焦点位置を変えても、変化が見られないことが判明した。特に、焦点方向については、±20 mm においても、その比はほぼ一定であることが分かる。この結果は、発光強度比から組成比を評価する場合にあっては、角度や焦点位置は、発光スペクトルが一定量以上出現している状況であれば、照射角度や焦点位置に強く依存しない可能性を示唆した結果であり、LIBS 計測での組成比評価の有効性を示しているものと考えられる。この結果はまた、アームの先端位置が定まりにくい多関節ロボットアームに取り付けた場合でも、ある程度分析できることも示唆したものと考えられる。

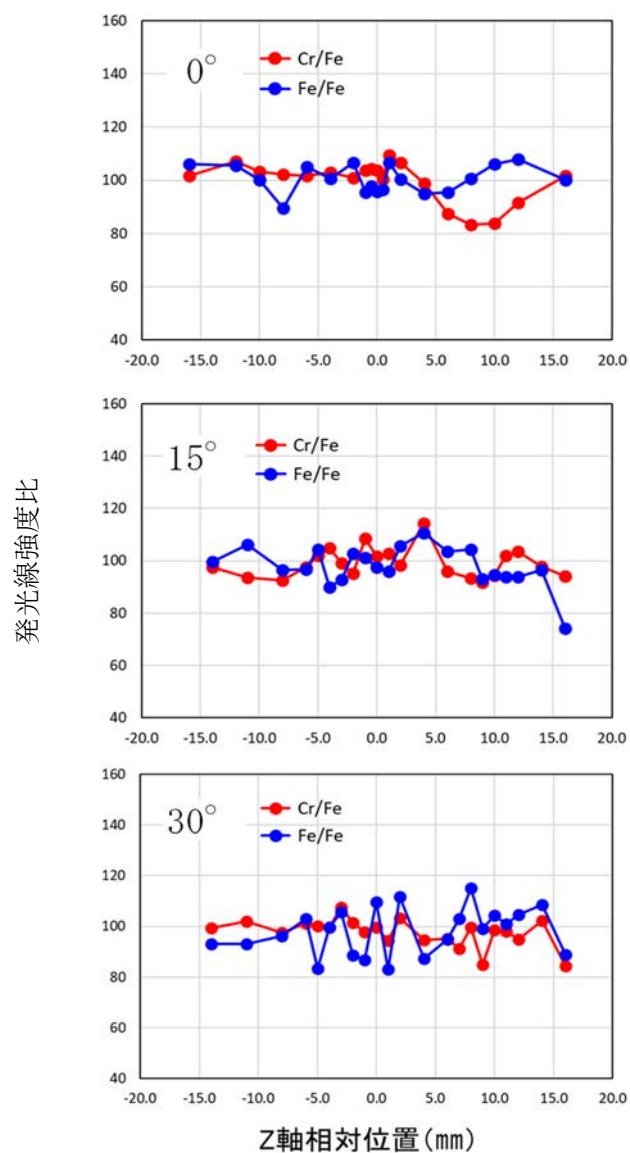


図3.2-9 レーザー入射角度を変えた場合の発光線強度比のZ軸位置依存性
(発光強度比の平均値で規格化して比較) [3]

② 模擬試験体作製及び LIBS 光学系改良検討

令和元年度は、多関節アームに実装可能なLIBSプローブ部の光学系改良に資する単一成分系・多成分系模擬試験体の仕様及び作製方法を決定するとともに、電気炉を新規に購入し（図3.2-10）、単一成分系模擬試験体を試作した。また、LIBSプローブ部の光学系改良に資する簡易分光光学系システムを試作した。単一成分系模擬試験体の試作にあたっては圧力容器内部に存在する可能性のある単一成分（Fe、Ce、Zr：それぞれ単独）の酸化物を選定し加熱したのち冷却し模擬試験体とした（表3.2-1）。また、マイクロチップレーザーの実装を目指した簡易分光光学系システムを構築した。

令和2年度は、多関節アームに実装可能なLIBSプローブ部の光学系改良に資する単一成分系模擬試験体を試作するとともに、令和元年度に試作した簡易分光光学系システムを改良した。

また、単一成分系模擬試験体の試作を行う中で、令和2年度はセシウム（Cs）の単一成分系模擬試験体の試作を行った。そして、令和元年度に試作した簡易分光光学系システムの改良を行い、セラミックYAGコンポジットを実装した簡易分光光学系システムを構築した。

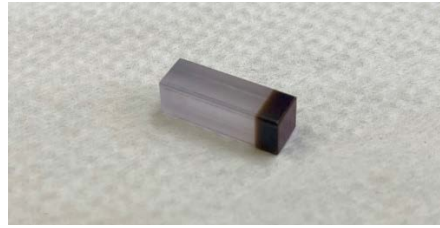
セラミック YAG コンポジットを実装した簡易分光光学系システムは、レーザーコントローラ、分析器（分光器）、ダイオードレーザー、オシロスコープ、パーソナルコンピュータ等から構成され、ダイオードレーザーをレーザー光源として、Nd:YAG/Cr:YAG コンポジットがマイクロチップレーザーコンポジットとして構成されている（図 3.2-11）。



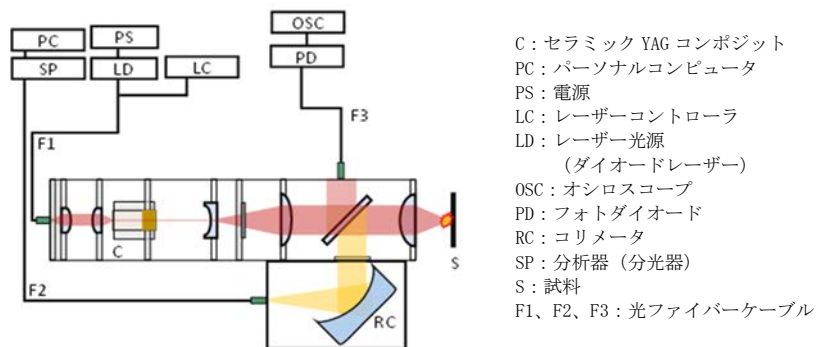
図 3.2-10 令和元年度に新規購入した卓上型高周波誘導加熱装置 MU-mini[2]

表 3.2-1 作製した模擬試験体の写真[2]

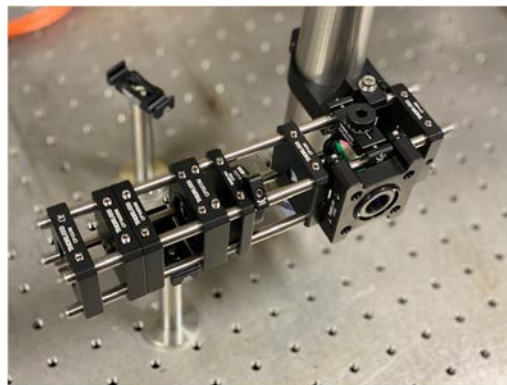
	A	B	C
使用材料	酸化鉄(Ⅲ) Fe_2O_3	酸化セリウム CeO_2	二酸化ジルコニウム ZrO_2
試薬写真			
加熱前			
加熱・冷却後			



(a) セラミックYAGコンポジット



(b) 簡易分光光学系システム概要図



(c) 簡易分光光学系システム

図 3.2-11 セラミック YAG コンポジットを実装・改良した簡易分光光学系システム[3]

3.2.2 令和3年度実施内容及び成果

以下に、令和3年度の実施内容及び成果を示す。

① 実装型 LIBS プローブの開発 (連携先：原子力機構)

多関節アームにLIBSプローブを実装し、アームの操作によりプローブを任意の位置に搬送可能であることを確認した。

多関節アームの遠隔操作により模擬試料のLIBS計測が可能であることを確認し、実装の

可能性を評価した。

ワイヤ駆動関節機構を有する多関節アーム先端のエンドエフェクタにLIBSプローブを実装し、プローブを計測対象位置へアームの操作により搬送可能であることを確認した。

多関節アームの遠隔操作により、ステンレス・酸化ジルコニウム・模擬デブリ等の模擬試料のLIBS計測が可能であることを確認し、LIBS計測の遠隔探査手法としての実装可能性を評価した。また、アームに取り付けたプローブの固定状態の許容範囲を確認するために、焦点距離・レーザー照射角度のLIBS半定量性への影響をとりまとめ評価した。

(1) 多関節アームへのLIBSプローブ装着

エンドエフェクタ：

多関節アームにLIBSプローブを取り付け、有効な分光信号を取得するために重要な条件は

- a) 分析対象とする任意の位置にプローブが搬送可能であること
- b) LIBSプローブを試料に対してソフトタッチ可能であること（機器損傷がないこと）
- c) 試料面に対して一定の角度（垂直が望ましい）でレーザーが照射されること
- d) 試料が適正な焦点距離位置に位置していること

が上げられる。

このうち、a)については、アーム自体の性能で左右されるため、ここでは言及しない。b)については、一般的な剛性の高いロボットアームの場合、タッチミスによって、LIBSプローブ（アーム先端を含む）の損傷に結びつくため、その動作には極めて繊細な制御が求められる。これに対して、今回装着を前提としているワイヤ操作型の多関節アームでは、ワイヤの伸縮性から、アーム先端の外力に対して無理のない範囲で一定自由度（可動範囲）が存在する。これは、リジッドな動きができない欠点とも考えられるが、LIBSプローブの装着に関しては、逆に極めて有効性の高い性能となる。つまり、LIBSプローブを試料に接触させることで計測が可能となるように設計すれば、接触に対する位置決め精度は、アームの自由度で吸収でき、接触動作に関する複雑かつ緻密な制御は無用、という利点である。

以上の考察から、LIBSプローブのアームへの装着では、プローブの一部を試料面に接触させる手法を選定した。アームの試料に対する確度の自由度を持たせるために、c)に対してはジンバル機構を、d)については、試料への接触位置でレーザー焦点が一致する機構をエンドエフェクタとして提案し、東京工業大学にその準備を依頼した。エンドエフェクタの概要を図3.2-12に示す（詳細は3.1.1②アームの構造改良を参照のこと）。



図3.2-12 エンドエフェクタの概要

先端位置決めの評価：

同一形態の模擬のLIBSプローブを、エンドエフェクタを介して多関節アームに取り付け、目標位置に対する操作指令に対する実際のアーム先端部の位置情報をモーションキャプチャーで計測し、先端位置と姿勢の誤差を評価した。図3.2-13に実際の評価試験の様子を、目標姿勢とのずれを評価した結果を図3.2-14に示す。

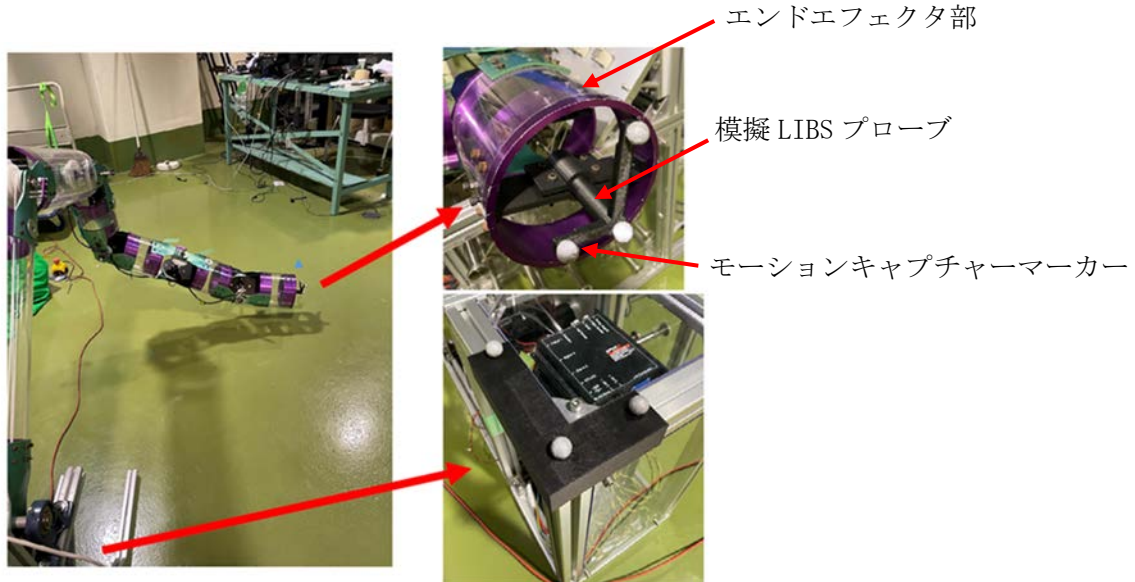


図3.2-13 先端位置決め精度の評価実験体系

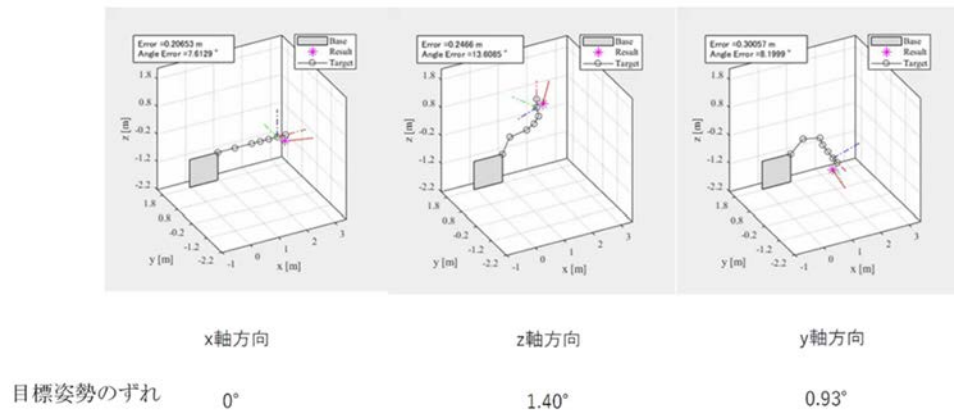


図3.2-14 先端位置決め精度の評価結果

本結果から、多関節アームによる位置決め偏差は十分小さいこと、エンドエフェクタの自在許容角度である $\pm 20^\circ$ に比較しても十分小さいことから、先端位置決め求められる一定の性能を有していることが確認できた。

以上により、ジンバル型エンドエフェクタを介してLIBSプローブを多関節アームに実装することで、アームの操作によりプローブを任意の位置に搬送可能であることが示された。

(2) 多関節アームの遠隔操作による模擬試料のLIBS計測

多関節アームの遠隔操作による模擬試料のLIBS計測：

実験装置：

本LIBS計測では、簡便性、軽量性、実績から評価し、原子力機構で自主開発した可搬型の光ファイバーLIBS装置を東京工業大学に運搬し、多関節アーム先端に装着したエンドエフェクタに取り付け、床、壁、天井などの位置を模擬した分光試験や、混合酸化物による模擬デブリに対する試験を実施した。

使用した可搬型光ファイバーLIBS装置とプローブ部の概観写真を図3. 2-15に示す。

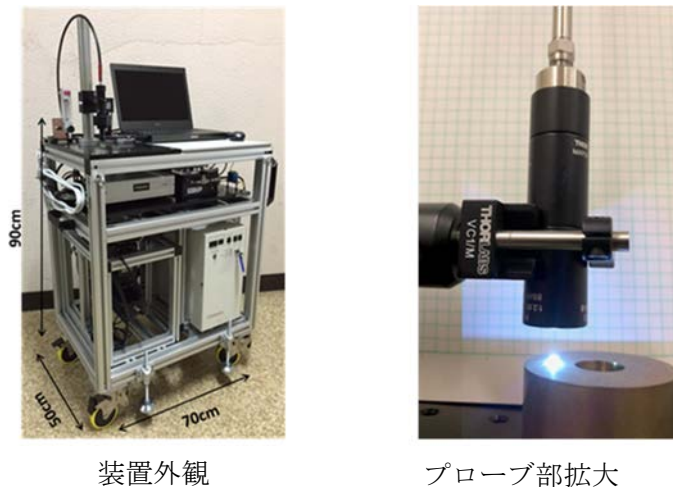


図3. 2-15 可搬型光ファイバーLIBS装置とプローブ部の概観写真

分析測定試験：

分析対象の位置として、床、壁、天井を模擬した分光実証試験を実施した。試料にはステンレス板を用いた。ロボットアームを操作し、LIBSプローブを装着したエンドエフェクタを試料位置に移動させるとともに密着させ、LIBS計測を行った。試験の様子と得られたステンレスの発光スペクトル観測結果を図3. 2-16に示す。

試験結果から、床、壁、天井のいかなる位置においても、ステンレスの代表的スペクトルが取得でき、その強度もほぼ同等となることが示された。この結果は、エンドエフェクタ付きの多関節ロボットアームが、LIBSプローブの搬送機構として優れた性能を有していることを示している。

次に、試料を酸化物とした場合のスペクトル取得性能を確認した。試料の位置は床面とした。用いた試料は、酸化ジルコニウム焼結体、Ce、Zr、Fe、Gd混合酸化物（模擬燃料デブリ）焼結試料とした。結果を図3. 2-17に示す。

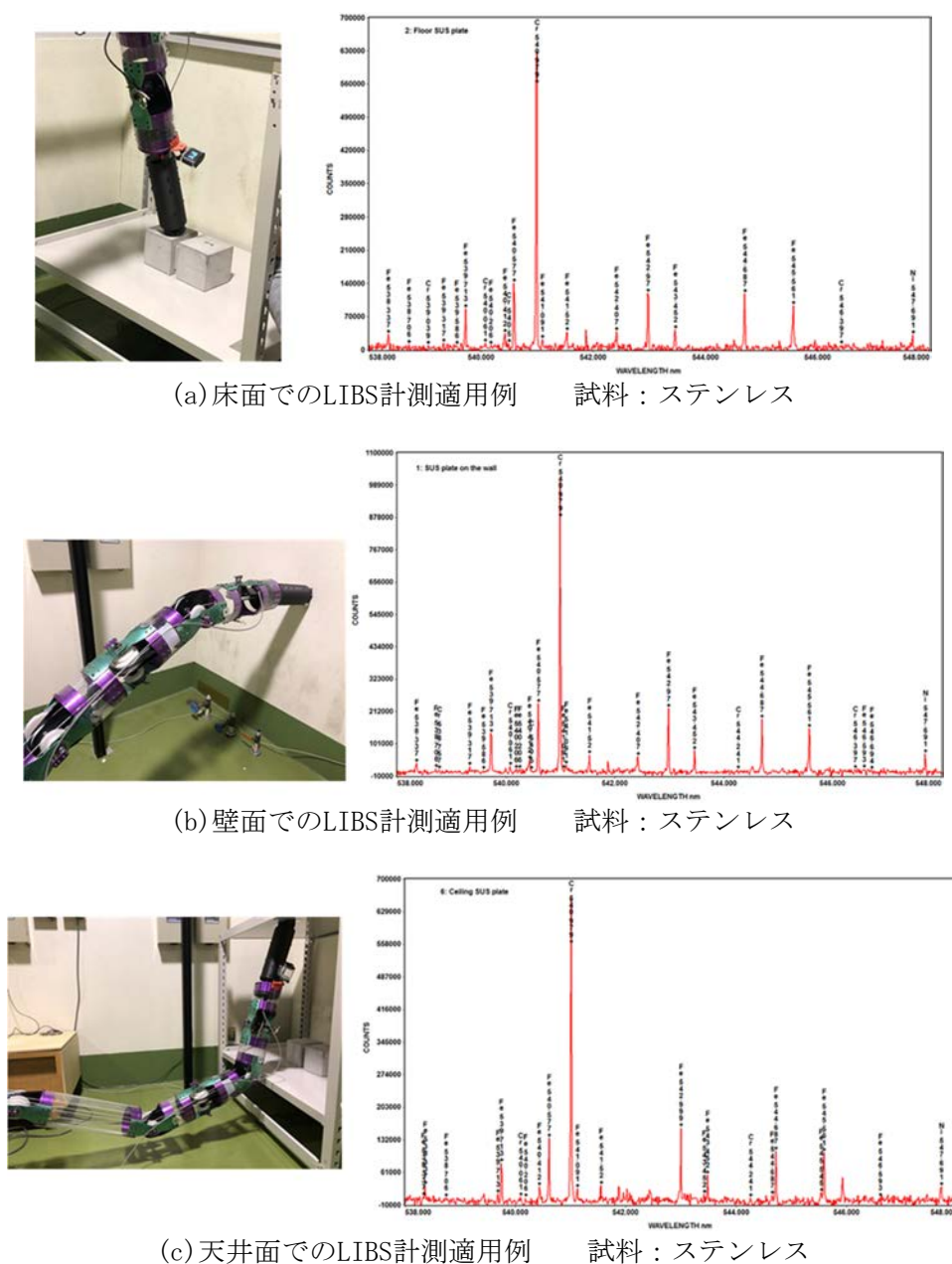
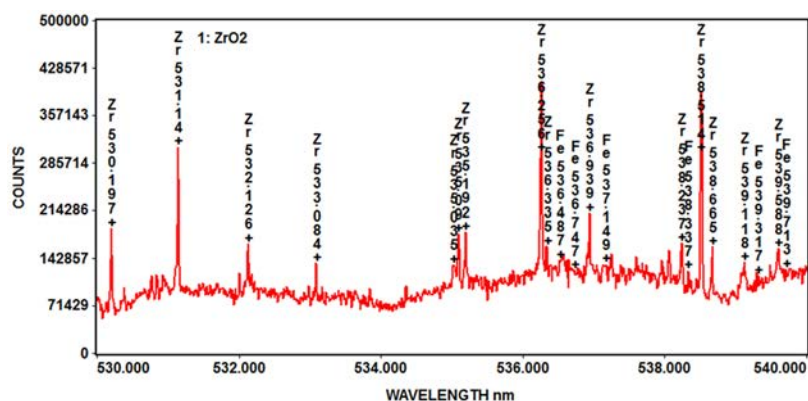
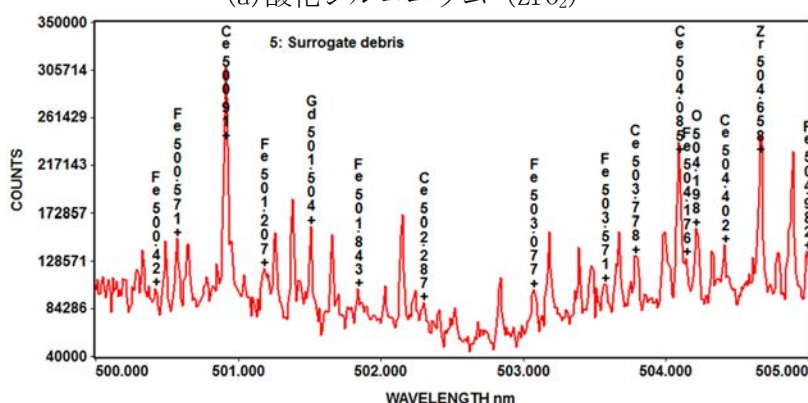


図3.2-16 床面、壁面、天井面に配置した試料のLIBS計測適用例

(a) 酸化ジルコニウム (ZrO_2)

(b) 模擬燃料デブリ (Ce、Zr、Fe、Gd酸化物焼結)

図3. 2-17 床面での酸化物試料に対するLIBS計測適用例

以上の試験結果から、ロボットアームに装着した場合であっても、従来から取得している酸化物試料のスペクトルと同等のスペクトルが取得でき、元素同定が可能であることが示され、多関節アームの遠隔操作により、床、壁、天井に位置する試料や、模擬デブリ等に対するLIBS計測が可能であることが実証された。

(3) プローブ固定状況がLIBS計測に及ぼす影響評価

アームの先端にLIBSプローブを取り付けた場合は、レーザー光の焦点位置や試料面に対するレーザー照射角度が意図しない条件となることが十分予想されることから、LIBS計測において、その裕度がどの程度あるのかを知っておくことは極めて重要である。そこでここでは、基礎的な状況を確認するため、レーザー照射体系が固定されたLIBS装置において、酸化物混合焼結試料を利用して、取得されるスペクトルの焦点距離依存性、レーザー照射角度依存性について調べた。

令和2年度には、ステンレスを試料とし、主成分であるFeの発光スペクトル強度に対する、Crの発光スペクトル強度の比（組成比に相当）に着目し、この比が焦点距離、照射角度に対して変化量は少なく、分析に大きな影響が及ばないことを定性的に確認した。令和3年度は、定量的にどの程度の依存性があるかについて評価することとした。

本評価では、

- 1) Zr酸化物粉末に、Gd酸化物粉末を、濃度を変えて混入させ、焼結させた試料によるスペクトルからGd/Zr比の検量線を取得する。
- 2) 焦点距離、角度を変えて、スペクトル強度比を取得する。
- 3) スペクトル強度比から検量線により組成比を導出する。

といった手順で焦点距離・照射角度依存性を半定量的に評価した。

検量線の取得：

焦点位置で試料の傾きが無い条件での着目スペクトルと、得られた検量線を図3. 2-18に示す。

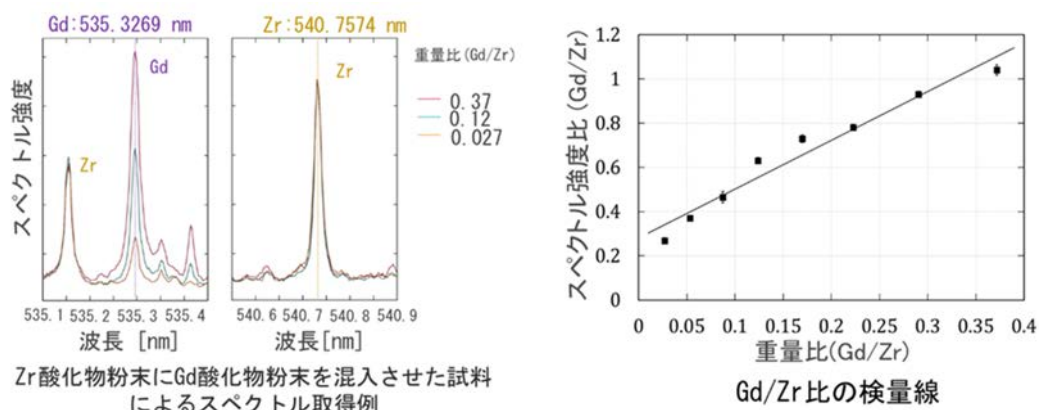


図3. 2-18 Gd、ZrのスペクトルとGd/Zr比の検量線

スペクトル強度の焦点位置、レーザー照射角度依存性：

酸化ジルコニウムに酸化ガドリニウムを混入させた試料のうち、元素重量比Gd/Zr=0.1698の場合について、スペクトル強度の焦点位置依存性、レーザー照射角度依存性を取得した。利用した発光線は、Gd : 535.3269 nm、Zr : 540.7574 nmである。スペクトル強度の焦点位置依存性を図3. 2-19に、レーザー照射角度依存性を図3. 2-20に示す。

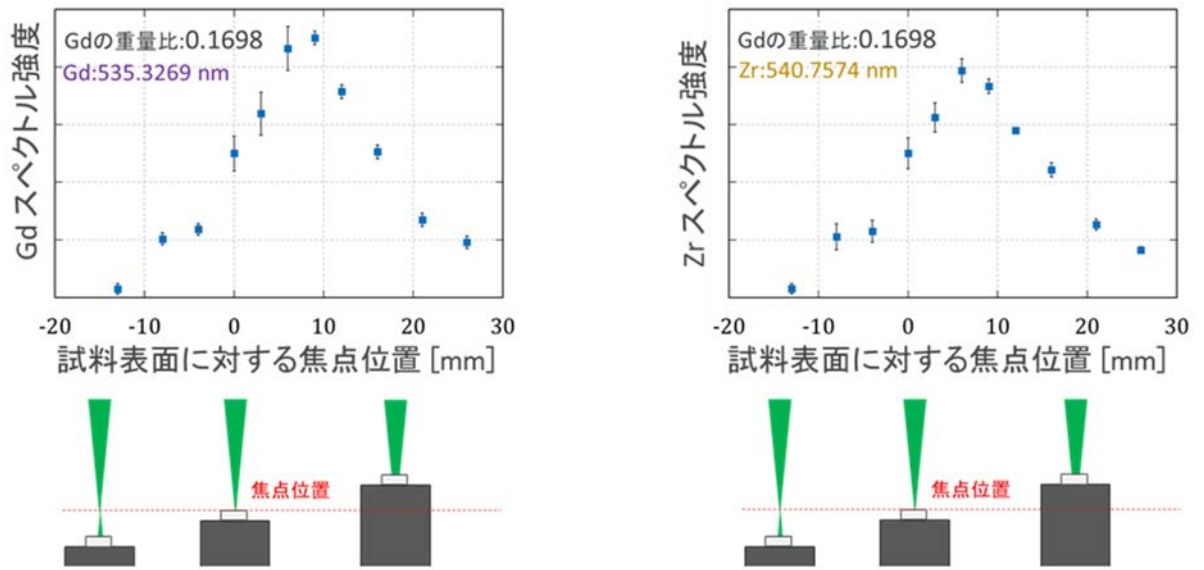


図3.2-19 スペクトル強度の焦点位置依存性

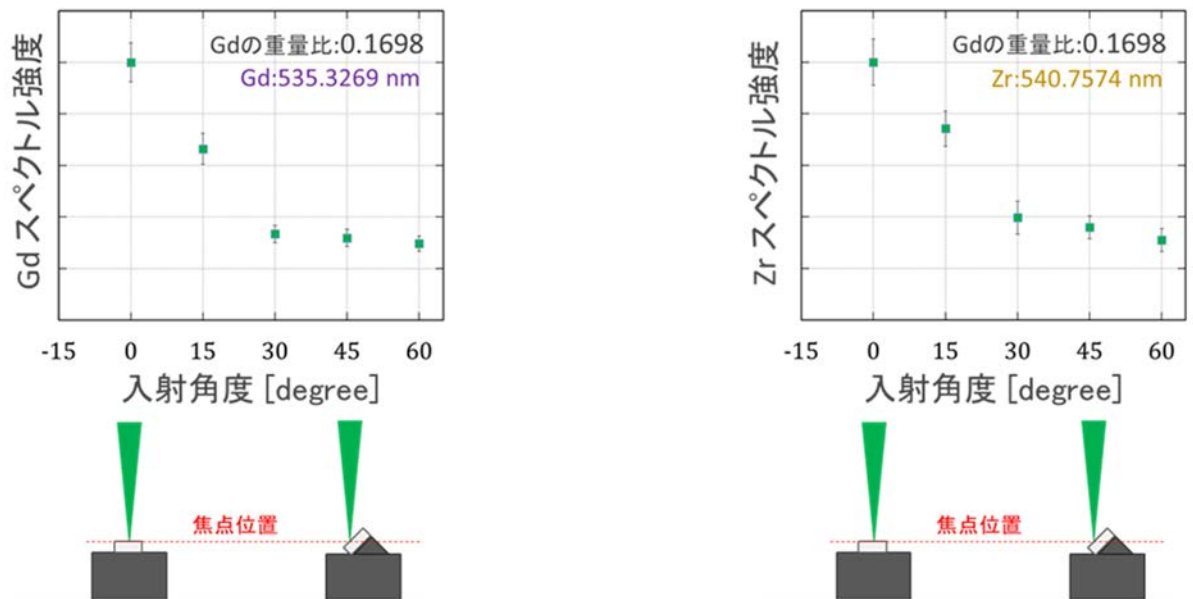


図3.2-20 スペクトル強度のレーザー照射角度依存性

評価重量比の焦点位置、レーザー照射角度依存性：

まず、令和2年度の評価と同様に、主成分であるZrの発光線強度に対するGdの発光線強度の比を求め、定性的な評価を実施した。令和3年度は、さらにこのスペクトル強度比から、予め導出した検量線（図3.2-18）を用いて、Zrに対するGdの元素重量比に換算することで半定量的な評価を行った。評価重量比の焦点位置依存性を図3.2-21に、レーザー照射角度依存性を図3.2-22に示す。

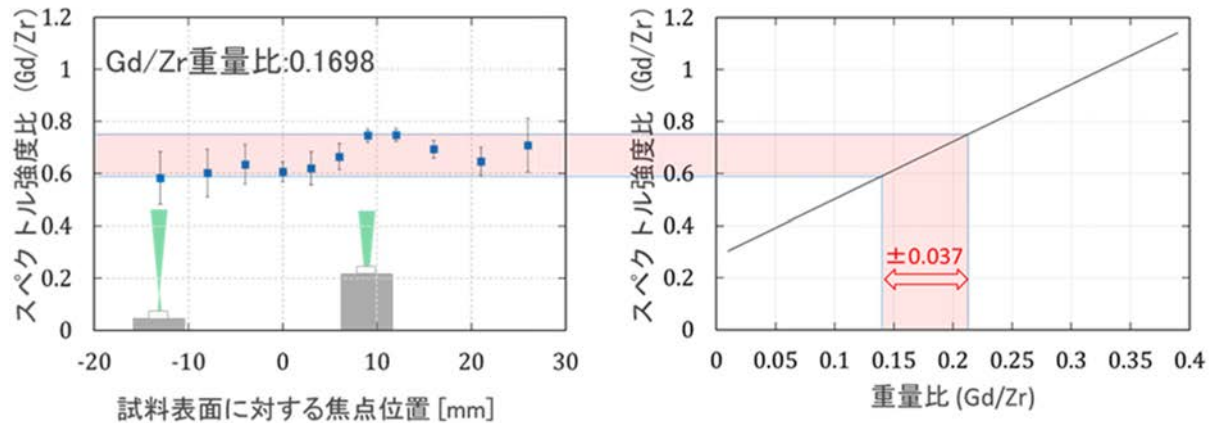


図3.2-21 評価重量比の焦点位置依存性

（スペクトル強度比の変化は、重量比で ± 0.037 、これは相対偏差で $\pm 20\%$ 程度に相当）

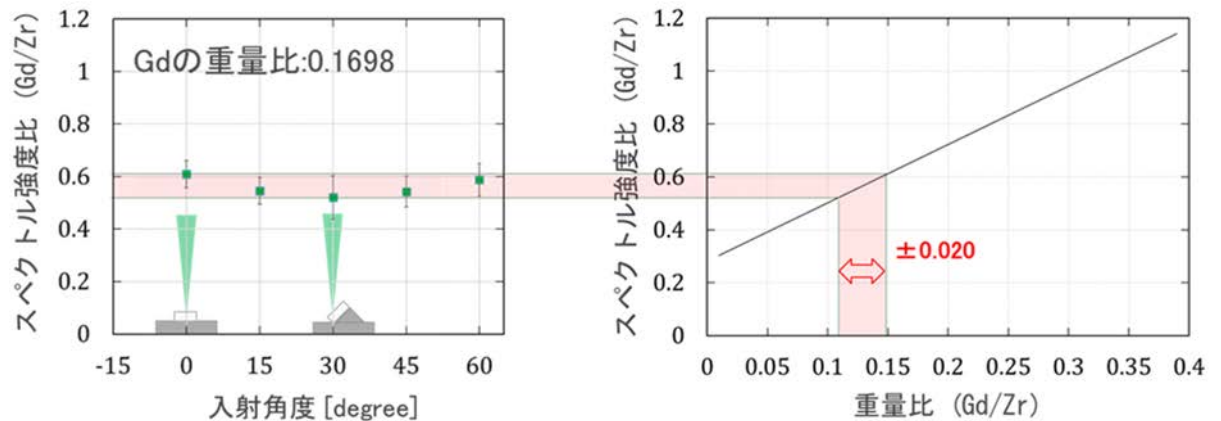


図3.2-22 評価重量比の角度依存性

（スペクトル強度比の変化は、重量比で ± 0.020 、これは相対偏差で $\pm 15\%$ 程度に相当）

以上の解析から、焦点位置依存性、レーザー照射角度依存性の相対的な偏差を、元素重量比の偏差に換算した結果、焦点位置依存性ではGd/Zr比で約 $\pm 20\%$ 、レーザー照射角度依存性では約 $\pm 15\%$ であることが確認できた。

以上から、多関節アームにLIBSプローブを実装し、アームの操作によりプローブを任意の位置に搬送可能であることを確認し、多関節アームの遠隔操作により模擬試料のLIBS計測が可能であることを確認し、実装の可能性を評価した。また、ワイヤ駆動関節機構を有する多関節アーム先端のエンドエフェクタにLIBSプローブを実装し、プローブを計測対象位置へアームの操作により搬送可能であることを確認した。多関節アームの遠隔操作により、床面、壁面、天井面等に位置する試料のLIBS計測が可能であることを示すとともに、ステンレス、酸化ジルコニウム、模擬デブリ等を試料としたLIBS計測結果が、従来から得られている計測結果と同等な性能が得られることを確認し、LIBS計測の遠隔探査手法としての実装可能性が実証された。また、アームに取り付けたプローブの固定状態の許容範囲を確認するために、焦点距離・レーザー照射角度のLIBS半定量性への影響を評価した結果、その影響は概ね20%程度であることが確認された。

② 模擬試験体作製及びLIBS光学系改良検討

令和3年度は、多関節アームに実装可能なLIBSプローブ部の光学系改良に資する多成分系模擬試験体を作製するとともに、簡易分光光学系システムを改良しLIBS計測に最適な光学系について調べとりまとめた。

酸化物を含む多成分系模擬試験体を作製するとともに、令和2年度までに試作した簡易分光光学系システムの改良を行い、超音波による形状計測等との統合化を鑑みた最適なLIBS計測光学系について基礎システムを構築し調べとりまとめた。

令和元年度は文献調査を行い、模擬試験体作製には、燃料デブリに含まれるとされる構造材料(もしくは類似の模擬物質)の粉末材料を1000～2000℃程度で加熱させて回収する方法を、多関節アームに実装可能なLIBSプローブ部の光学系改良に資する単一成分系・多成分系模擬試験体の作製方法として決定した。本研究では、多関節アームに実装可能なLIBSプローブ部の光学系改良に資する単一成分系・多成分系模擬試験体を、仕様としてはLIBS信号を検出するに十分なgオーダーの規模で作製することを定め、令和元年度から令和3年度にわたり、高周波誘導加熱炉を用いて、一成分系模擬試験体の試作を行っており、令和元年度は、酸化鉄(Ⅲ) Fe_2O_3 (富士フイルム和光純薬株式会社製)、酸化セリウム CeO_2 (富士フイルム和光純薬株式会社製)、二酸化ジルコニウム ZrO_2 (富士フイルム和光純薬株式会社製)の粉末を使用して、それぞれの単一成分模擬試験体を作製してきた。令和2年度は、塩化セシウム CsCl (富士フイルム和光純薬株式会社製)の粉末を使用して、単一成分模擬試験体を作製した。令和3年度は、これら過去の知見を活かして、多成分系模擬試験体を以下の手順で作製した。

- a) 酸化鉄(Ⅲ) Fe_2O_3 (富士フイルム和光純薬株式会社製)、酸化セリウム CeO_2 (富士フイルム和光純薬株式会社製)、二酸化ジルコニウム ZrO_2 (富士フイルム和光純薬株式会社製)、塩化セシウム CsCl (富士フイルム和光純薬株式会社製)、塩化ストロンチウム SrCl_2 (富士フイルム和光純薬株式会社製)の粉末を表3.2-2の比率で混合し、混合試料A～Cを作成した。

表 3. 2-2 加熱前混合試料の混合比率と写真

混合試料番号	含有元素	元素重量比[-]	写真
混合試料A	Fe:Ce:Zr	1:1:1	
混合試料B	Fe:Ce:Zr	6:1:20	
混合試料C	Fe:Ce:Zr:Cs:Sr	1:1:1:1:1	

b) 炉心内にカーボンフェルトで保温断熱を施したカーボンルツボに各混合試料約 2 g を入れ、不活性雰囲気 (N_2 フロー 2 L/min) にて加熱 (各混合試料の詳細な加熱条件は表 3. 2-3 に記載)。温度は、放射温度計にてカーボンフェルトの蓋穴からルツボ蓋表面温度を測定した。また、加熱方法は、発熱体の温度を確認しながら装置前面の出力ボリューム (電流制御) にて手動調整した。

c) 室温まで冷却後、多成分系模擬試験体としてルツボ内の試料を回収した。

本手順で作製し、得られた酸化物を含む多成分系模擬試験体の例 (2000 °C で加熱した場合の例) を表 3. 2-4 に示す。いずれの試料においても加熱前の粉体と回収した固体では色の変化が見られた。

表 3. 2-3 混合試料の加熱条件

	混合試料A	混合試料B	混合試料C
使用材料	Fe_2O_3 、 CeO_2 、 ZrO_2	Fe_2O_3 、 CeO_2 、 ZrO_2	Fe_2O_3 、 CeO_2 、 ZrO_2 、 $CsCl$ 、 $SrCl_2$
加熱方法	2000 °C (加熱装置出力 5 A) 10分保持		
冷却方法	自然冷却		

表 3. 2-4 作製した多成分系模擬試験体の写真
(加熱温度 2000 °C の例)

加熱温度 条件[°C]	加熱後混合試料 A (多成分系模擬試験体 A)	加熱後混合試料 B (多成分系模擬試験体 B)	加熱後混合試料 C (多成分系模擬試験体 C)
2000			

簡易分光光学系システムを改良にあたり、令和3年度は、令和2年度までに試作した簡易分光光学系システムを3次元自動ステージと超音波センサを含む超音波形状計測システムとを組み合わせて、超音波計測系との統合化を鑑みた LIBS 計測光学系について調べとりまとめ、基礎システムを構築した（図 3.2-23）。簡易工学系システムはケージで囲まれた構造となっており、多種多様な部品の組み合わせなどで光学系システムの改良がし易いことがメリットであるが、構築した基礎システムを使って、セシウム（CsCl）やストロンチウム（SrCl）などの単一成分の粉体を金属製輪形状構造物に圧入した試料、及び、前述した加熱前混合試料 A を金属製輪形状構造物に圧入した試料、そして、多成分系模擬試験体を金属製輪形状構造物に圧入した試料を対象として、空中超音波による形状計測と LIBS 計測を行い、3次元自動走査ステージを用いた遠隔操作により、対象物領域の環境形状と元素情報（本検証においては、分光器波長域の都合上、Zr 以外の Fe、Ce、Cs、Sr）をとらえることができ、それら情報をマッピングすることができる手法の成立性検証を行うことができた（図 3.2-24、図 3.2-25、図 3.2-26）。加熱前の混合割合や加熱温度によって、スペクトルピークの形状や強度が異なることが見て取れる。

原子力機構で開発を進めてきた従来型 LIBS プローブシステムとマイクロチップレーザー利用型 LIBS プローブシステムの両手法においても、本手法で示すように超音波計測システムとの統合化が可能であり、拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる搬送を行うことで、超音波による周囲環境計測を行いながら、LIBS 計測により対象領域の元素情報を明らかにすることが原理上可能であり、将来的な圧力容器内燃料デブリ調査技術へと期待が寄せられるものである。

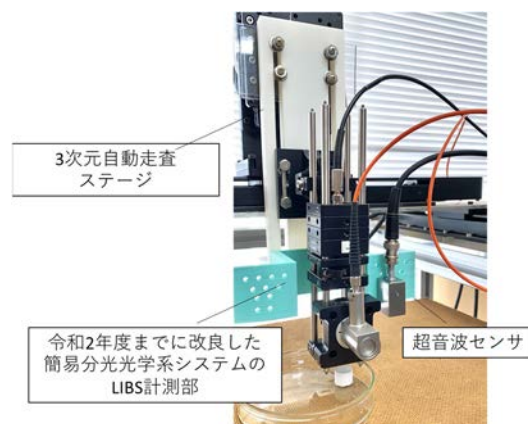
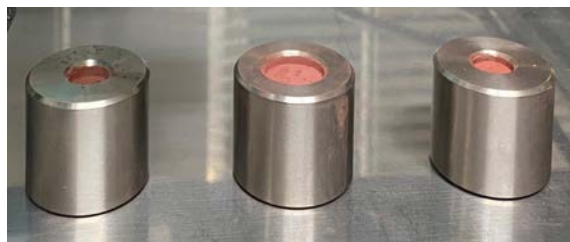
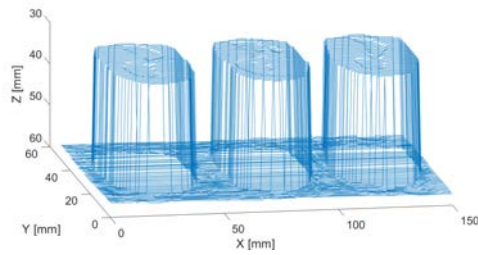


図 3.2-23 超音波による形状計測等との統合化を鑑みた LIBS 計測光学系基礎システム

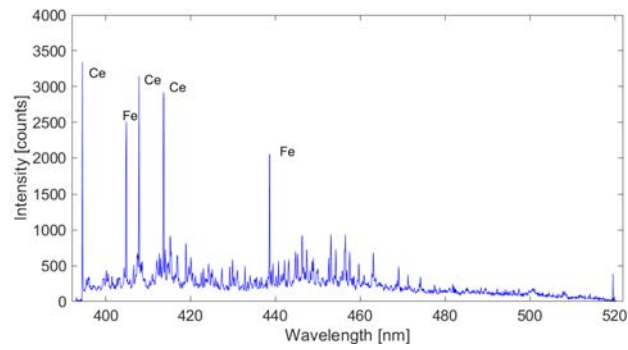


(a)加熱前混合試料 A (b)加熱前混合試料 B (c)加熱前混合試料 C

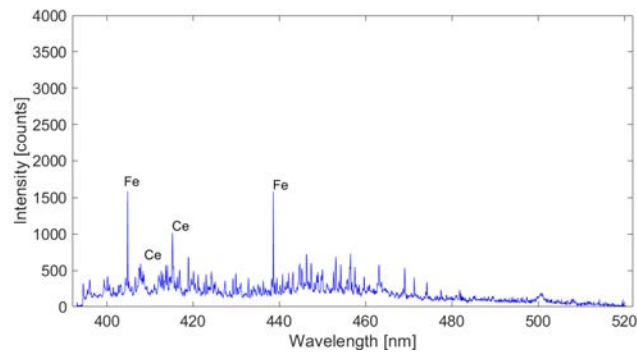
図 3.2-24 加熱前混合試料 A、加熱前混合試料 B、加熱前混合試料 C を
金属製輪形状構造物に圧入した試料
(金属製輪形状構造物外径：30 mm、金属製輪形状構造物高さ 25 mm、
加熱前混合試料 B 金属製輪形状構造物：内径 15 mm、
加熱前混合試料 A&C 金属製輪形状構造物：内径 10 mm)



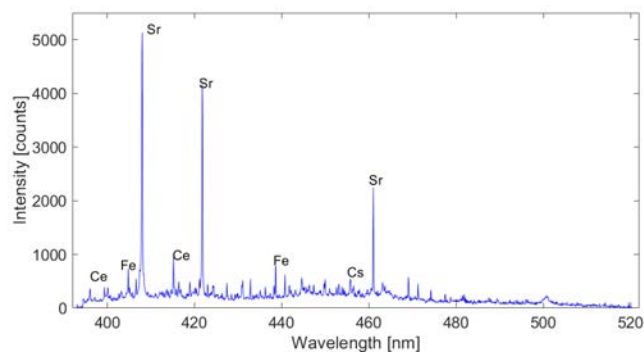
(a) 超音波による形状計測結果



加熱前混合試料 A
(Fe、Ce のピーク確認)



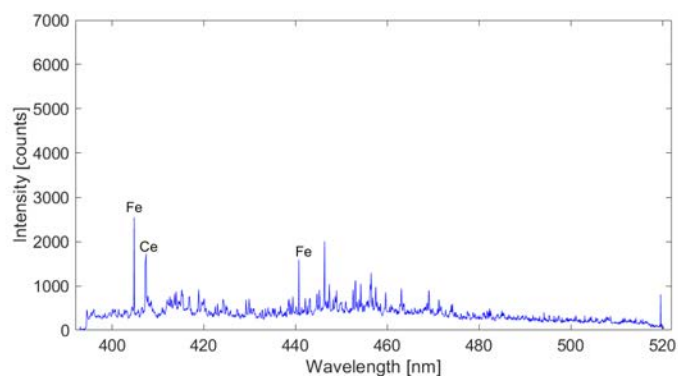
加熱前混合試料 B
(Fe、Ce のピーク確認)



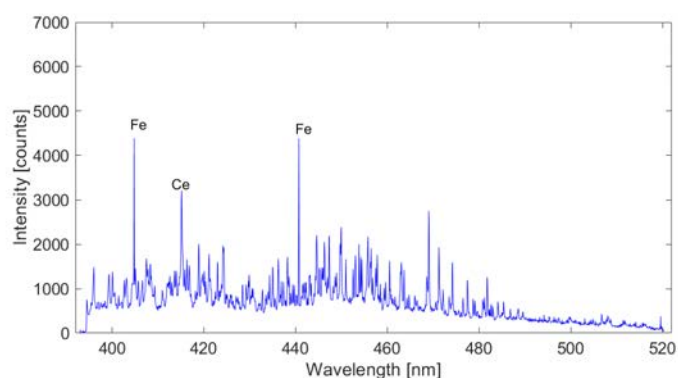
加熱前混合試料 C
(Fe、Ce、Cs、Sr のピーク確認)

(b) LIBS 計測結果

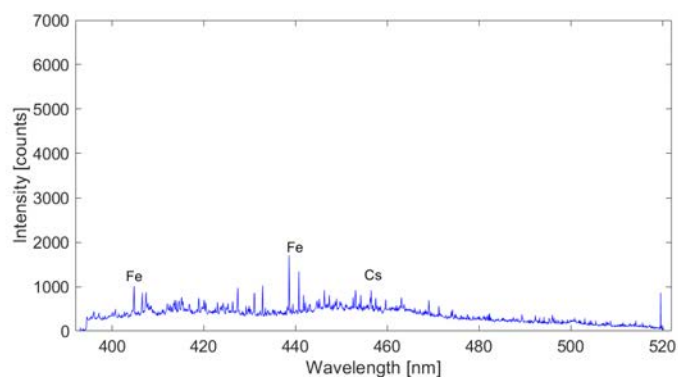
図 3.2-25 加熱前混合試料 A、加熱前混合試料 B、加熱前混合試料 C
を金属製輪形状構造物に圧入した試料の LIBS 計測結果と超音波計測結果



(a) 多成分系模擬試験体 A
(Fe、Ce のピーク確認)



(b) 多成分系模擬試験体 B
(Fe、Ce のピーク確認)



(c) 多成分系模擬試験体 C
(Fe、Cs のピーク確認)

図 3.2-26 多成分系模擬試験体を金属製輪形状構造物に圧入した試料の
LIBS 計測結果

3.2.3 まとめ

令和元年度から令和3年度の本研究を通じて、多関節アーム実装型LIBSプローブの開発にあたり、表2.1-1全体計画表に沿って、①実装型LIBSプローブの開発、②模擬試験体作製及びLIBS光学系改良検討を実施した。

令和元年度には、既存の可搬型LIBS装置を活用し、多関節アーム実装を前提とした長尺光ファイバーを接続するため、多関節アーム用LIBSプローブ部を試作することや、試作したLIBSプローブ部に既存装置及び長尺光ファイバーを接続し、模擬試料からのLIBS信号が得られることを確認した。また、多関節アームに実装可能なLIBSプローブ部の光学系改良に資する単一成分系・多成分系模擬試験体の仕様および作製方法を決定するとともに、電気炉を新規に購入し、単一成分系模擬試験体を試作し、LIBSプローブ部の光学系改良に資する簡易分光光学系システムを試作した。令和2年度には、多関節アームへの実装を模擬するため、簡易型模擬アームを準備した。令和元年度に試作したLIBSプローブを改良するとともに、マイクロチップレーザーLIBSプローブを試作し、模擬アームに取り付けて、屈曲・伸展等の動きに対する可動状況を調べた。また、アームに取り付けたプローブの固定状態の許容範囲を明確化するため、取得されるスペクトルのレーザー光焦点深度依存性、試料に対するレーザー照射角度依存性を取得した。そして、多関節アームに実装可能なLIBSプローブ部の光学系改良に資する単一成分系模擬試験体を試作するとともに、令和元年度に試作した簡易分光光学系システムを改良した。令和3年度には、多関節アームにLIBSプローブを実装し、アームの操作によりプローブを任意の位置に搬送可能であることを確認し、多関節アームの遠隔操作により模擬試料のLIBS計測が可能であることを確認し、実装の可能性を評価した。また、多関節アームに実装可能なLIBSプローブ部の光学系改良に資する多成分系模擬試験体を作製するとともに、簡易分光光学系システムを改良しLIBS計測に最適な光学系について調べとりまとめた。

以上は、多関節アーム実装型LIBSプローブの開発の実施項目の計画を満足するものであり、本研究成果より、図3.1-1、図3.1-2に示す当初提案のRPV下部へのアクセス概念コンセプトにおける③調べる、の段階的なアプローチに必要なLIBS計測技術の実現性を確認した。

3.3 パラメトリック超音波による形状再構成技術の開発

3.3.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）

以下に、令和2年度までの実施内容及び成果（概要）を示す。

① 専用パラメトリック超音波センサの開発

令和元年度は、単一素子の空中超音波センサを試作し（図3.3-1）、パラメトリック超音波の音圧分布・指向性の把握を行い、炉内構造物やデブリの形状の把握に適したセンサの仕様をとりまとめた。さらには、多関節アームへの超音波計測装置の実装にあたり、既存の超音波送受信系の実装可能性を調べるとともに、多関節アーム実装に適する小型の超音波送受信系の設計・試作を行った（図3.3-2）。また、既存及び小型の超音波送受信系の多関節アームへの実装可能性については、計測用センサ、パルス・レシーバの積載可能性を評価した。

本研究で試作した超音波送受信系を現有の送受信系 UVP-Duo（流体計測用）と比較して図3.3-2に示す。本超音波送受信系は主に高電圧パルス発生回路、受信信号の増幅及びフィルタリング回路、A/D コンバータからなる。試作した超音波送受信系の寸法は 130 mm×180 mm

であるが、これは実装するロボットの部位形状に合わせ柔軟に再設計可能であり、また重量は約 200 g 程度と多関節アームの最大積載重量の 2%程度である。よって、ロボットへの実装は十分可能であることが示された。



図 3.3-1 パラメトリック超音波センサ[2]

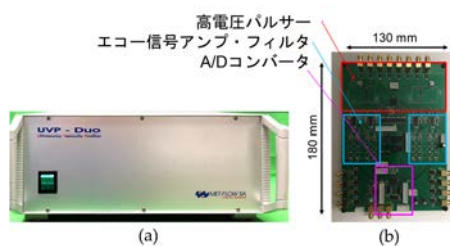
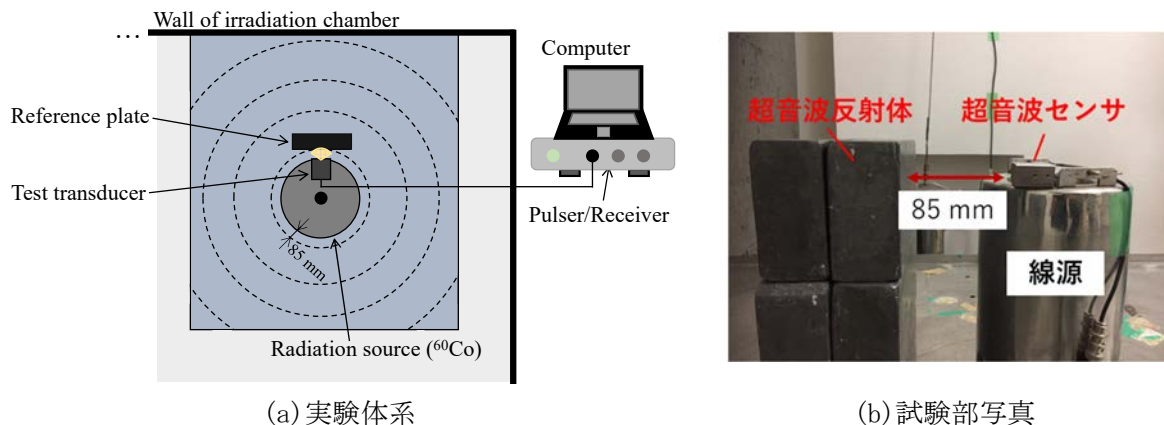


図 3.3-2 試作小型超音波送受信系外観および既存超音波計測装置との寸法比較
(a)UVP-Duo (MET-FLOW) (b)試作小型超音波送受信系[2]

令和2年度は、コバルト照射施設を利用して超音波センサの耐放射線性を確認した。また、アレイ型空中超音波センサを試作し、音圧分布・指向性の把握を行い、炉内構造物やデブリの形状の把握に適したセンサの仕様をとりまとめた。

超音波センサの耐放射線性の確認として、東京工業大学が有するコバルト照射実験施設において、模擬構造物へ空気を介して超音波を送受信し、放射線環境下における模擬構造物からの超音波の反射特性を評価することで超音波センサの耐放射線性を確認した。図 3.3-3 に本実験における実験体系を示す。



(a) 実験体系 (b) 試験部写真
図 3.3-3 超音波センサの耐放射線性確認試験概略[3]

超音波センサ及び模擬構造物（鉛ブロック）をコバルト照射実験施設の照射室中心にある ^{60}Co 線源中心付近に設置し、超音波センサから模擬構造物へ向け超音波を送受信した。本実験では超音波センサとして中心周波数 400 kHz の空中超音波センサを用い、0.1 秒間隔で超音波の送受信を繰り返した。受信した超音波信号は同軸ケーブルを介して照射室外にあるパルサ・レシーバ（JPR-10CN、ジャパンプローブ株式会社）に送られ増幅・フィルタリングされたのち、A/D コンバータ（USB-5133、National Instruments Corp.）により PC に信号データを送信・記録した。照射の開始と同時に、線源の ^{60}Co から 1.17 MeV 及び 1.33 MeV の γ 線が円状に照射される。このとき、超音波センサと反射体である鉛ブロックとの距離は 85 mm であり、線量率に換算するとおよそ 3000 Gy/h であった。本実験では、各積算線量における超音波反射信号の記録を行い、初期の超音波反射信号と比較することで、超音波計測へ線量が及ぼす影響を評価した。 ^{60}Co - γ 線の照射開始と同時に、超音波反射信号の記録を開始した。このとき、反射信号の波形データの記録は 30 秒毎とした。各線量における超音波波形変化の評価として、記録されたデータに対し、各積算線量における超音波反射信号と、初期の超音波反射信号間での正規化相互相関関数を計算することで評価した。つまり、初期波形と一致するとき 1 に近づき、無相関の場合は 0 に近づく。各積算線量に対する相互相関係数をプロットした結果を図 3.3-4(a)に示す。また、図 3.3-4(b)に各線量時における実際の超音波波形を示す。線量が 1 MGy 時点で相互相関係数は 0.9 以上を示し、また実際の波形を確認しても、波形の劣化は確認できなかった。従って本実験により、超音波センサの十分な耐放射線性を確認でき、超音波計測が PCV 内部調査における有望な手段であることが示唆された。

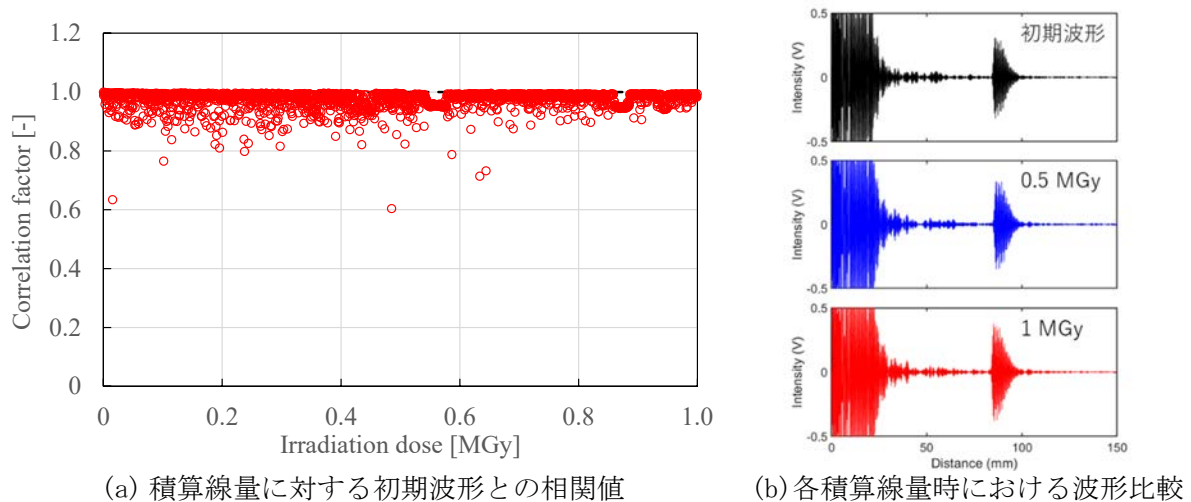
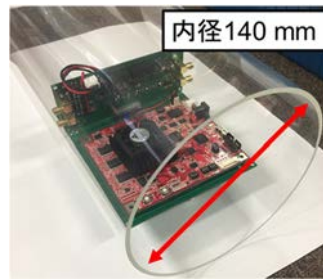
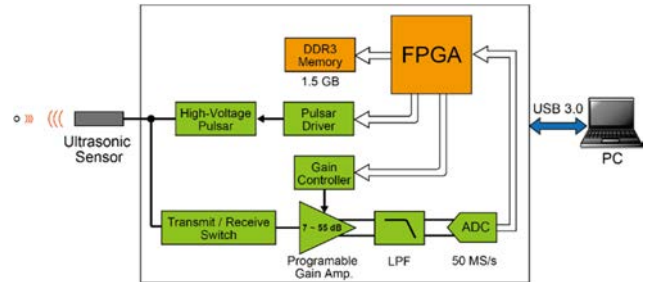


図 3.3-4 超音波センサの耐放射線性確認試験結果[3]

さらに、多関節アーム実装を鑑み、令和元年度に引き続き小型超音波送受信系の改良を行った。図 3.3-5 に改良した超音波送受信系の外観及び内部ブロック図を示す。



(a) 改良小型超音波送受信系外観



(b) 内部ブロック図

図 3.3-5 改良小型超音波送受信系[3]

本超音波送受信系の寸法は幅 150 mm×奥行 110 mm×高さ 60 mm、重量は 120 g 程度であり、図 3.3-5(a)に示すように、多関節アームのような中空円筒内への実装が可能である。また、従来のパラメトリック超音波送受信装置においては寸法 483 mm×432 mm×127 mm であり、重量 16 kg である。従来装置と比較し、96.3%のサイズ縮小と 99.3%の重量軽減を達成した。本装置を用いて空中パラメトリック超音波による物体形状再構成が可能か実験的に検証した。センサとして中心周波数 400 kHz の送信センサ 1 つ及び 50 kHz の受信センサ 2 つを送信センサの両隣に 50 mm 間隔で配し、空間断面について開口合成法により物体形状再構成を行った。図 3.3-6 に本実験の概略を示す。

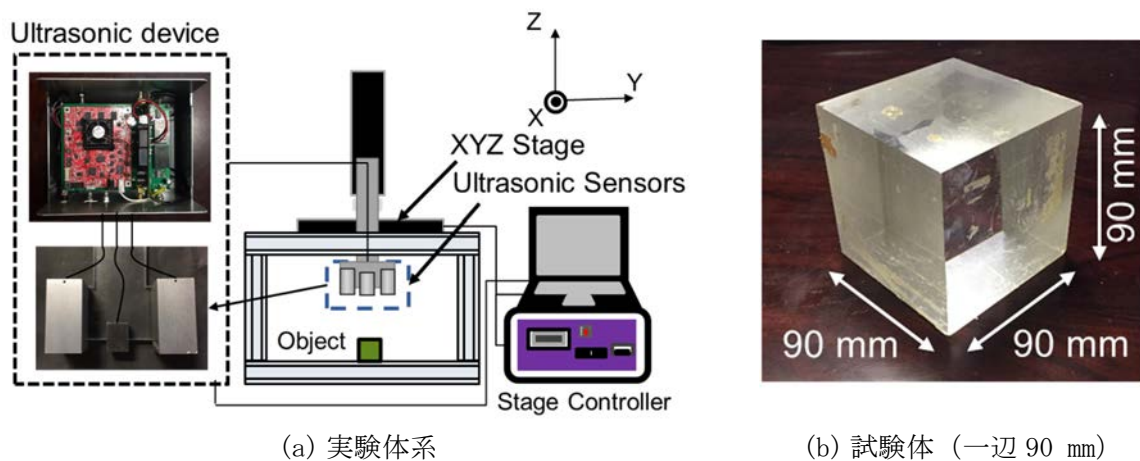


図 3.3-6 改良小型超音波送受信系を用いた空中超音波物体形状計測実験概略[3]

本実験においては試験体として一辺 90 mm のアクリル立方体を用いた。図 3.3-7 に本実験における 3 次元物体形状再構成結果を示す。実際の表面積に対し、計測誤差 2.2%程度となり、また高さ方向についても 1.9%程度の誤差と、高精度計測を達成可能であることを確認した。

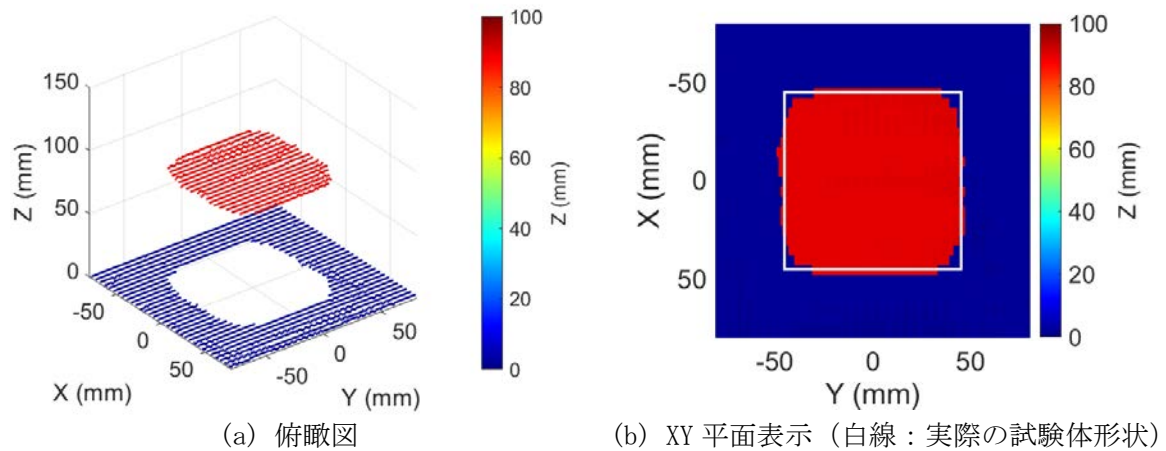


図 3.3-7 改良小型超音波送受信系を用いた空中超音波物体形状計測結果[3]

② SfM 応用による超音波 3 次元画像再構成データの補完技術の開発

令和元年度は、カメラ画像を用いたSfM技術による形状再構成の課題点の抽出、及び超音波計測技術による形状再構成の課題点の抽出を行うとともに、カメラ画像を用いたSfM技術と超音波計測技術による形状再構成の長所・短所を補う補完手法の構築に資する基礎データを取得した。

令和2年度は、模擬構造物を対象に、カメラ画像を用いたSfM技術による形状再構成及び超音波計測技術による形状再構成を行い、3次元形状データの比較を行った。カメラ画像を用いたSfM技術と超音波計測技術による形状再構成の長所・短所を補う相互補完を行う技術を開発した。

また、模擬構造物を対象として、カメラ画像を用いたSfM技術による形状再構成及び超音波計測技術による形状再構成を実施し、照明環境が3次元形状の再構成に与える影響を調べるとともに、ICP (Iterative Closest Point) 技術を活用し、カメラ画像を用いたSfM技術と超音波計測技術による形状再構成の点群データを整合させ、それぞれの形状再構成技術の長所・短所を補う相互補完技術を開発した。

実験体系を図3.3-8に示す。

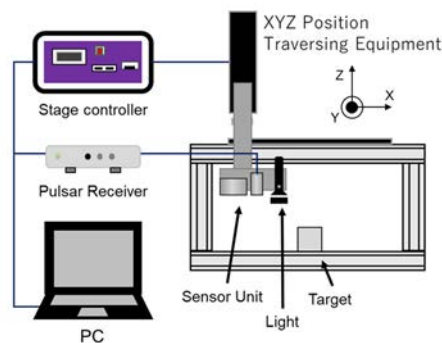


図 3.3-8 実験装置概要図[3]

カメラ（ソニー株式会社、DSC-RX0M2）、センサユニット用小型照明（Ledlenser、T7M LEDフラッシュライト）、超音波の送受信のための空中超音波送受信用センサ（ジャパンプローブ株式会社、中心周波数400 kHz）からなるセンサユニットを構成し、パルス・レシーバ（ジャパンプローブ株式会社、JPR-600C）を用いて超音波信号の送受信を行った。なお、カメラ画像を用いたSfM技術による形状再構成には3DF Zephyr（3Dflow）を使用した。自動ステージを用いてセンサユニットをx方向、y方向に走査した。パルスエコー法により、受信した超音波信号を解析し、超音波パルスの伝搬時間と空気中の音速から対象物表面までの距離を求め、センサユニットを走査することで対象物表面の3次元構造再構成を行った。ICP技術を活用し、カメラ画像を用いたSfM技術と超音波計測技術による形状再構成の点群データを整合させる際には、3次元イメージの最近傍点を対応点とし、対応点間の距離を最小にする剛体変換パラメータを求め、この変換を一方の3次元イメージに適応させ、整合させた。本実験では簡易模擬構造物として立方体形状の構造物（50 mm×50 mm×50 mm、SS400材）を使用した（図3.3-9）。センサユニットの超音波センサ表面と簡易模擬構造物の底面の距離は300 mmとした。

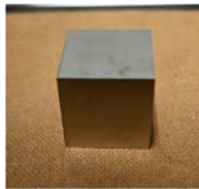


図 3.3-9 簡易模擬構造物（50 mm×50 mm×50 mm）[3]

照明環境がSfM技術による形状再構成に与える影響を調べた例を図3.3-10に示す。測定空間全体に均一な照明条件の場合、カメラ画像を用いたSfM技術による形状再構成が行えている一方で、局所的な不均一照明条件の場合、カメラ画像を用いたSfM技術による形状再構成が困難となる可能性があることが分かった。



(a) 均一照明条件



(b) 不均一照明条件

図3.3-10 照明環境がSfM技術による形状再構成に与える影響[3]

また、模擬構造物を対象として、カメラ画像を用いたSfM技術による形状再構成及び超音波計測技術による形状再構成を実施し、ICP技術を活用し、カメラ画像を用いたSfM技術と超音波計測技術による形状再構成の点群データを整合させ、それぞれの形状再構成技術の長所・短所を補う相互補完技術を開発した。均一な照明条件の場合においてSfM技術と超音波

計測技術による形状再構成情報をICP技術により整合させた画像例を図3.3-11に示す。



図 3.3-11 SfM 技術と超音波計測技術による形状再構成情報を
ICP 技術により整合させた画像例[3]

カメラ画像を用いたSfM技術による形状再構成及び超音波計測技術による形状再構成の点群データが、概ね整合されていることが分かり、整合後に超音波計測データから対象物寸法を得て実際の寸法へと補正することで、カメラ画像を用いたSfM技術の長所である3次元形状情報とカラー情報を維持しつつ、超音波計測技術による形状再構成の長所である照明の影響を受けずに対象物寸法情報を得られる技術となっている。ICP技術により、照明環境の影響を受けやすいカメラ画像によるSfM技術の短所を超音波の計測情報で補いつつ、カラー情報が得られない超音波計測技術の短所をカメラ画像によるSfM技術の再構成情報で補うことで、それぞれの形状再構成技術の長所・短所を補う相互補完技術を開発した。

3.3.2 令和3年度実施内容及び成果

以下に、令和3年度の実施内容及び成果を示す。

① 専用パラメトリック超音波センサの開発

アレイ型空中超音波センサにより、模擬デブリや模擬構造物の形状を計測し、その有効性を評価した。また、超音波送受信系の改良を行うとともに、ロボットアームに超音波センサを実装するための取り付け治具を作製し、ロボットアーム先端部への実装適用性を確認した。さらには、コバルト照射施設を利用して超音波センサの耐放射線性を確認した。

アレイ型空中超音波センサにより、模擬デブリや模擬構造物の形状を計測し、空中超音波による形状再構成法の有効性を評価した。また、超音波送受信系の改良を行うとともに、ロボットアームに超音波センサを実装するための取り付け治具作製として、ロボットアーム先端におけるエンドエフェクタ部の設計・試作を行い、ロボットアーム先端部への実装適用性を確認した。さらには、超音波センサ及び模擬構造物をコバルト照射施設内に設置し、模擬構造物へ空気を介して超音波を送受信し、放射線環境下における模擬構造物からの超音波の反射特性を評価することで超音波センサの耐放射線性を確認した結果、線量率約3 kGy/hの条件で積算線量約2.38 MGy程度までの耐性があることが分かった。令和3年度は、令和2年度までに作製したアレイ型空中超音波センサをロボットアーム先端のエンドエフェクタに搭載するために構成される超音波センサを分離し、これら複数の空中超音波センサにより、模擬デブリや模擬構造物の形状を計測し、開口合成法による形状再構成を行った（図3.3-12）。



(a) 令和2年度試作したアレイ型
空中超音波センサ

(b) 令和3年度に改良したアレイ型
空中超音波センサ

(送信用センサ×1、受信センサ×8)

(送信用センサ×1、受信センサ×4)

図3.3-12 ロボットアーム先端のエンドエフェクタに搭載するために改良した
アレイ型空中超音波センサ

図3.3-13に本実験の概略図を示す。センサユニットはカメラ (GoPro, Inc.、HER08 Black)、超音波の送信のための空中超音波送信用センサ (ジャパンプローブ株式会社、中心周波数400kHz)、超音波受信用センサ (RS Group plc、動作周波数40 kHz) から構成される。また、パラメトリック超音波送信系としてファンクションジェネレータ (AFG-31051、アールエスコンポーネンツ株式会社) 及び高出力アンプ (RPR-4000、RITEC Inc.) を用い、受信系として8チャンネル超音波レシーバ (JPR-10C-8CH、ジャパンプローブ株式会社) 及びA/Dコンバータ (PXI-5105、National Instruments Corp.) からなる計測システムを用いた。3次元自動走査ステージを用いてセンサユニットをx方向、y方向に走査した。得られた受信信号を用いて開口合成処理を施すことで、3次元物体形状を再構成した結果、図3.3-14で示すように、通常環境及び霧環境でも、およその概形ではあるが模擬デブリ・模擬構造物環境の3次元再構成画像を得ることができ、霧が存在するなど難視野下での空中超音波による形状

再構成法の有効性を確認した。将来的には、アレイ型空中超音波センサの構成超音波センサ数を増やすことや配置を工夫することで概形の再構成精度の向上が期待されるものの、ロボットアーム先端のエンドエフェクタへの搭載を鑑み、本研究では同様の送信超音波センサ1個、受信超音波センサ4個の組み合わせとすることにした。

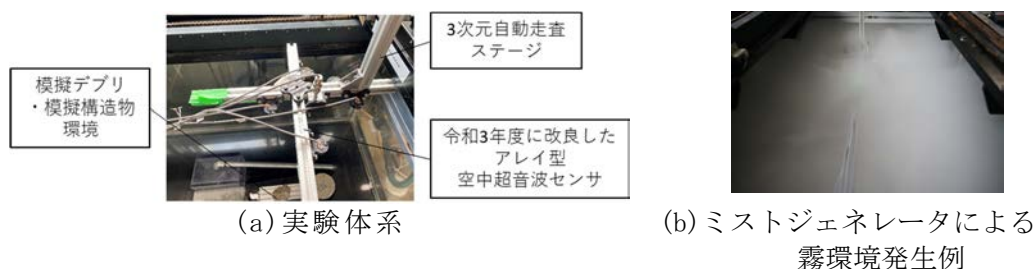


図3.3-13 空中超音波による模擬デブリ・模擬構造物の形状再構成評価試験概要

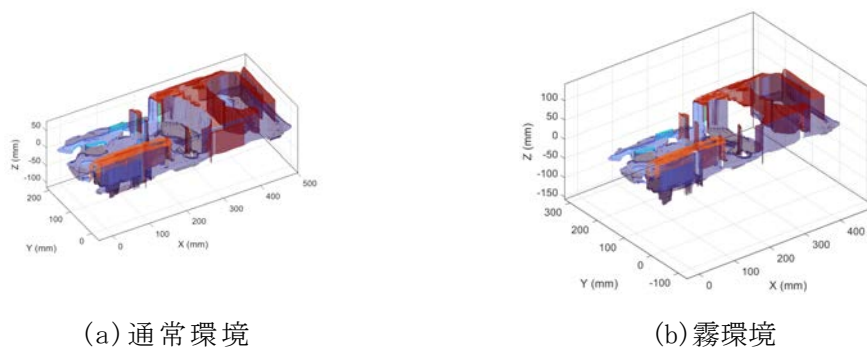


図3.3-14 空中超音波による模擬デブリ・模擬構造物の形状再構成評価試験結果

また、令和3年度には、超音波センサの耐放射線性の検証及びパラメトリック超音波における小型の超音波送受信系の改良を実施した。本研究では長距離伝搬が可能なパラメトリック超音波法に着目し、パラメトリック超音波を用いた物体形状再構成技術の開発を行った。令和3年度においては、令和2年度に引き続き、多関節アーム実装を鑑みた小型超音波送受信系の改良を行った。

ここで、パラメトリック超音波とは超音波伝搬における非線形性を利用した超音波であり、次の波動方程式(3.3-1)に従う。

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_0^2} \left(1 - \frac{\delta}{c_0^2} \right) \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{\beta}{\rho_0 c_0^4} \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2} \quad (3.3-1)$$

なお、 p は音圧、 c_0 は音速、 β は非線形性パラメータ、 ρ_0 は伝播媒体の密度である。式(3.3-1)第2項の非線形項より、超音波伝搬過程において p^2 成分（音波波形の2乗成分）が発生する。つまり、音圧波形 $p = \sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t)$ とすると、 p^2 成分は

$$p^2 = 1 - \frac{1}{2}\sin(2\omega_1 t) - \frac{1}{2}\cos(2\omega_2 t) - \cos\{(\omega_1 + \omega_2)t\} + \cos\{(\omega_1 - \omega_2)t\} \quad (3.3-2)$$

となる。ここで、 ω は超音波の角周波数である。式(3.3-2)より、2種の超音波周波数を合成した波形を伝搬させると、その2倍音、和音及び差音が発生する。パラメトリック超音波はこの差音成分を抽出し利用する。このように、パラメトリック超音波はもとの超音波周波数の差音（低周波数）を利用することから減衰率が低く、また従来の高周波数の超音波ビームのような鋭い指向性を有することから、長距離に渡り高空間分解能計測が可能である。

本研究を通じて令和2年度開発した、パラメトリック超音波の送受信が可能な小型超音波送受信系の外観及び内部ブロック図を図3.3-15に示す。本超音波送受信系の寸法は幅150 mm×奥行120 mm×高さ60 mm、基板重量は120 g程度である。

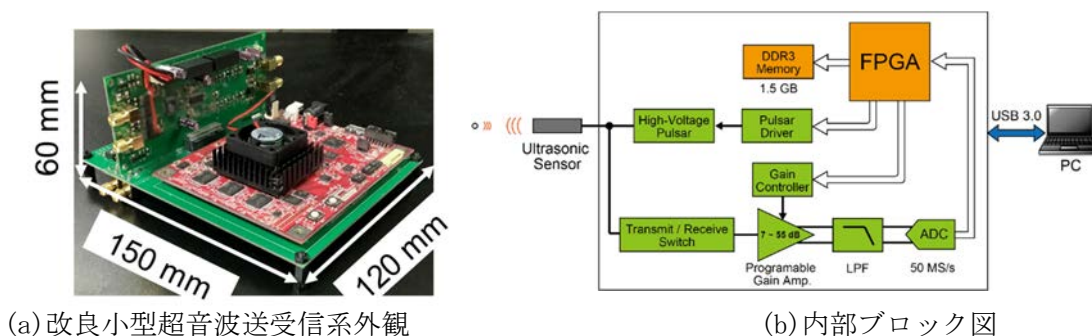


図 3.3-15 改良小型超音波送受信系

令和3年度において、超音波送受信系の改良として、エコー信号の受信回路に、超音波距離減衰補償機能を実装した。超音波はその伝播距離が増加するに従い、拡散し、超音波音圧が低下する。伝搬距離 x における音圧 $P(x)$ は次式(3.3-3)で表される。

$$P(x) = P_0 \exp(-\alpha f^2 x) \quad (3.3-3)$$

ここで、 P_0 は最大音圧、 α は吸収係数、 f は超音波周波数である。つまり、伝搬距離に対して指数関数的に超音波は減衰する。そのため、超音波センサからの距離が遠い程、得られるエコー信号が小さくなる。特に、空気中における減衰率は水などの液体中よりも高く、減衰による信号強度への影響は顕著となる。これにより物体形状計測において、計測領域内に比較的近距离に存在する物体と遠距離に存在する物体があるとき、近距离物体から反射するエコー信号が大きく見え、一方で遠距離物体からのエコー信号は微小となり、形状計測結果から除外される可能性がある。そこで、遠距離に存在する物体表面形状の検出率を向上させるため、超音波減衰に伴うエコー信号の微小化を補償する超音波距離減衰補償機能をエコー信号の受信回路に実装した。つまり、従来は信号増幅率を一定にして受信していたが、令和3年度においては超音波伝搬距離が増加するほど、信号受信増幅率も増加する仕様とした。本機能検証のため、図3.3-16に示す

ように、空中超音波センサ（ジャパンプローブ株式会社）に対向する反射板に対し超音波パルスを照射し、そのエコー信号を、超音波距離減衰補償機能を用いない場合及び用いた場合それぞれで取得した。このとき、距離減衰の影響が顕著となるよう、空中超音波センサの周波数は1 MHzとした。図 3.3-17 にエコー信号の取得結果を示す。図 3.3-17(a)のように、増幅率一定の場合は伝搬距離増加に伴い、エコー強度が低下する。そのため、遠距離からの反射と近距離における多重反射との識別が困難となる。一方で、図 3.3-17(b)に示すように、距離減衰補償機能を用いることで、遠距離からの反射と近距離からの反射信号強度が同程度となり、遠距離物体からの信号識別が容易となる。なお、本実験では距離減衰補償として0.24 dB/mmの増幅率で距離減衰補償を行った。本結果より、空中超音波計測において、距離減衰補償機能を用いることで、遠距離物体の検出率向上が見込めることを確認した。

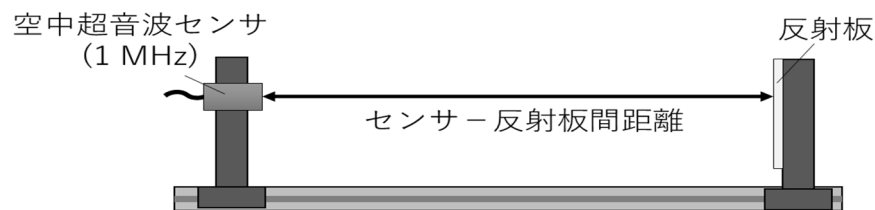
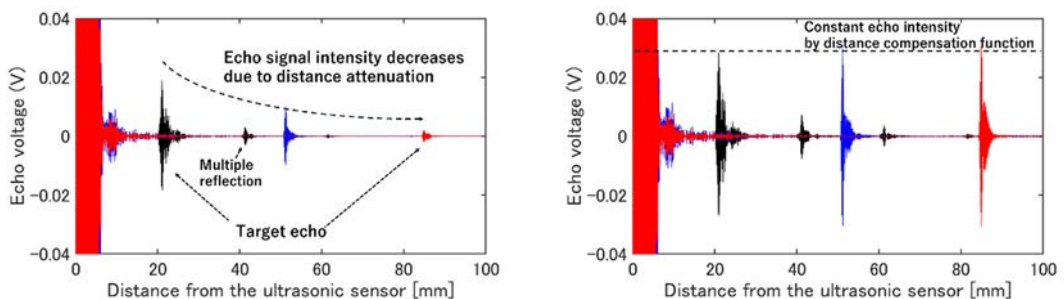


図 3.3-16 超音波距離減衰補償機能検証の実験体系



(a) 距離減衰補償無し

(b) 距離減衰補償有り

図 3.3-17 超音波距離減衰補償の有無によるエコー信号比較

そして、ロボットアーム先端部にアレイ型空中超音波センサ配置として複数の超音波センサを実装するための取り付け治具作製として、ロボットアーム先端におけるエンドエフェクタ部の設計・試作を行い（図 3.3-18）、ロボットアームを遠隔操作し、超音波センサの実装適用性を確認した。

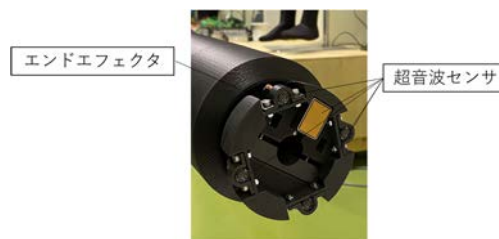
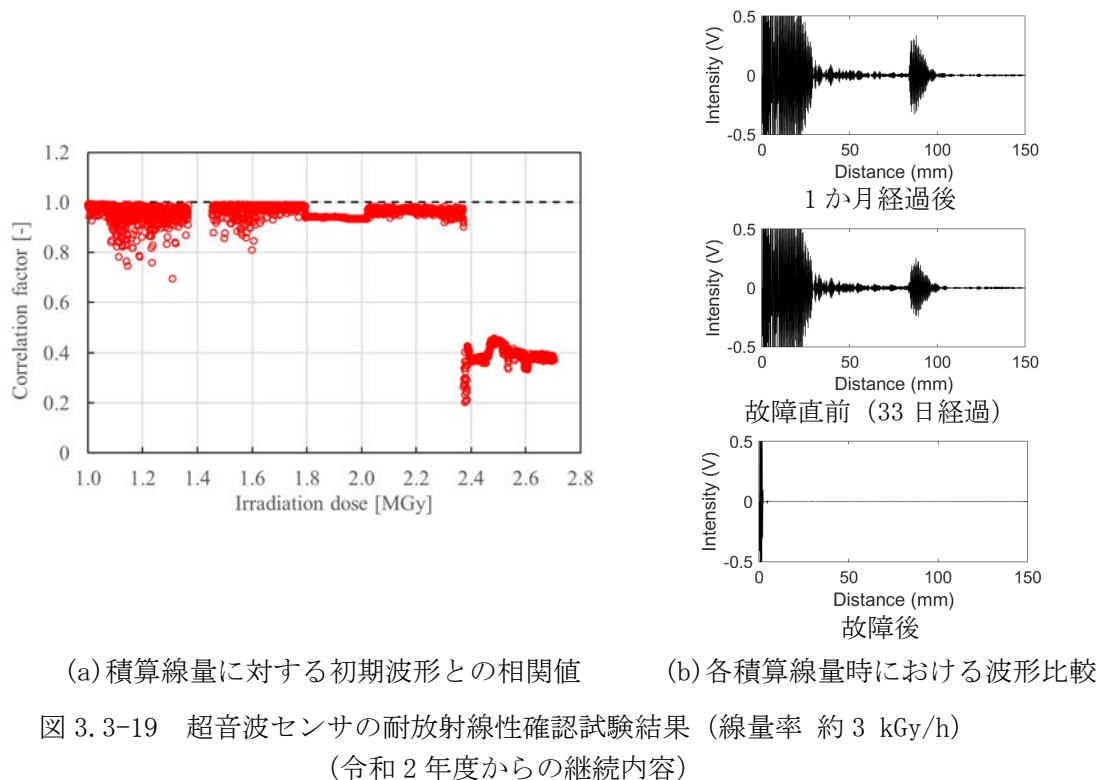


図 3.3-18 ロボットアーム先端部に超音波センサを実装するために
試作したエンドエフェクタ部

さらには、コバルト照射施設を利用して超音波センサの耐放射線性を令和2年度に引き続き、確認した。超音波センサの耐放射線性の確認として、東京工業大学が有するコバルト照射実験施設において、模擬構造物へ空気を介して超音波を送受信し、放射線環境下における模擬構造物からの超音波の反射特性を評価することで超音波センサの耐放射線性を確認した。実験体系は令和2年度に実施した体系と同様とした（図3.3-3）。本実験では令和2年度と同様に、超音波センサ及び模擬構造物（鉛ブロック）をコバルト照射実験施設の照射室中心にある ^{60}Co 線源中心付近に設置し、超音波センサから模擬構造物へ向け超音波を送受信した。超音波センサとして中心周波数400 kHzの空中超音波センサを用い、0.1秒間隔で超音波の送受信を繰り返した。パルサ・レシーバ、A/Dコンバータ、PC等は令和2年度と同様の機材を使用した。令和2年度と同様に、線量率は約3 kGy/hの条件として、各積算線量における超音波反射信号の記録を行い、初期の超音波反射信号と比較することで、超音波計測へ線量が及ぼす影響を評価した。

各線量における超音波波形変化の評価として、記録されたデータに対し、各積算線量における超音波反射信号と、初期の超音波反射信号間での正規化相互相関関数を計算することで評価した。つまり、初期波形と一致するとき1に近づき、無相関の場合は0に近づく。各積算線量に対する相互相関係数をプロットした結果を図3.3-19(a)に示す。また、図3.3-19(b)に各線量時における実際の超音波波形を示す。令和2年度は、線量が1 MGy時点で相互相関係数は0.9以上を示し、また実際の波形を確認しても、波形の劣化は確認できなかった。令和3年度に実施した継続実験により、超音波センサ及び模擬構造物をコバルト照射施設内に設置し、模擬構造物へ空気を介して超音波を送受信し、放射線環境下における模擬構造物からの超音波の反射特性を評価することで超音波センサの耐放射線性を確認した結果、線量率約3 kGy/hの条件で積算線量約2.38 MGy程度までの耐性があることが分かった。従って本実験により、超音波センサの十分な耐放射線性を確認でき、超音波計測が格納容器内部調査における有望な手段であることが示唆された。



② SfM 応用による超音波 3 次元画像再構成データの補完技術の開発

令和2年度に引き続き、模擬構造物を対象に、カメラ画像を用いたSfM技術による形状再構成及び超音波計測技術による形状再構成を行い、カメラ画像を用いたSfM技術と超音波計測技術による形状再構成の長所・短所を補う相互補完を行う技術を開発した。また、ロボットアーム先端部にカメラを実装するための取り付け治具を作製し、ロボットアームへの実装適用性を確認した。

カメラ画像を用いたSfM技術による形状再構成及び超音波計測技術による模擬構造物の形状再構成を実施し、ICP技術を活用した形状再構成点群データの整合により、カメラ画像を用いたSfM技術による形状再構成及び超音波計測技術による形状再構成のそれぞれの形状再構成技術の長所・短所を補う相互補完技術を開発し、形状再構成性を確認した。また、ロボットアーム先端部にカメラを実装するための取り付け治具作製として、ロボットアーム先端におけるエンドエフェクタ部の設計・試作を行い、ロボットアームへの実装適用性を確認した。

模擬構造物を対象に、カメラ技術を用いたSfM技術による形状再構成及び超音波計測技術による形状再構成を行い、カメラ画像を用いたSfM技術と超音波計測技術による形状再構成の長所・短所を補う相互補完を行う技術を開発した。図3.3-20に本実験で用いたカメラ・アレイ型空中超音波センサ複合ユニットの写真を示す。模擬構造物環境は図3.3-13の実験と同様である。

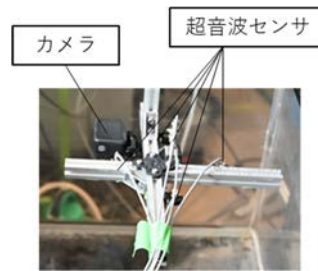


図 3.3-20 カメラ・アレイ型空中超音波センサ複合ユニット

センサユニットはカメラ（GoPro, Inc.、HERO8 Black）、超音波の送信のための空中超音波送信用センサ（ジャパンプローブ株式会社、中心周波数400 kHz）1個、超音波受信用センサ（RS Group plc、動作周波数40 kHz）4個から構成される。なお、カメラ画像を用いたSfM技術による形状再構成にはAgisoft Metashape（株式会社オーク）を使用した。

自動ステージを用いてセンサユニットをx方向、y方向に走査した。得られた受信信号を用いて開口合成処理を施すことで、3次元物体形状を再構成した。また、得られた動画データについてガウシアンフィルタによる平滑化を行ったうえでフレームを切り出した画像を用いてSfM処理によって3次元物体形状を再構成した。相互補完技術のシステム図を図3.3-21に示す。まず初めに位置推定結果より粗く候補を絞り込み、次に形状計測結果より位置合わせを行った。粗い絞り込みでは、SfMによる位置推定結果と無次元化した指令軌道を比較することで平滑化、外れ値の除去を行いその結果と実際の軌道を合わせることにによりおおよその縮尺値と移動値を求め、SfM結果を修正した。細かな位置合わせではICP技術を用いた。ICPによる位置合わせは3次元イメージの最近傍点を対応点とし、対応点間の距離を最小にする剛体変換パラメータを求める手法である。この手法の課題として位置合わせを行う2つの点群の参照領域の大きさによって誤差が生じること、縮尺込みの位置合わせができないという2つの課題が存在する。そのため様々な縮尺、及びそれに対応した領域トリミングを行った点群に対しICPマッチングを適応し、位置合わせの偏差を評価関数とすることでそれらの課題に対処し、3次元画像再構成データを得ることができる。本実験においてはセンサユニットをXY方向に6 mm間隔で走査し、各位置で超音波送形状計測を行った。

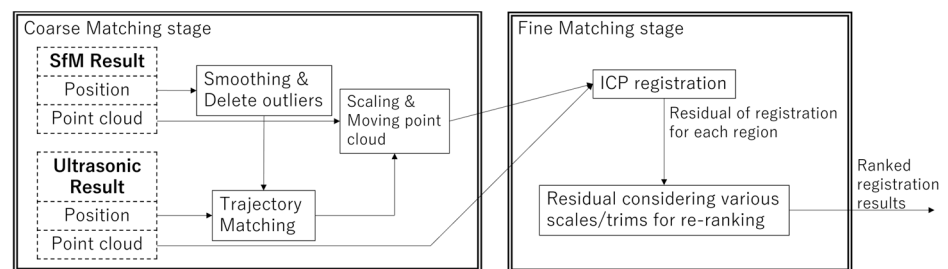


図 3.3-21 相互補完技術ブロック図

図 3.3-22 に位置合わせ結果を示す。はじめに従来手法であるスケーリング補正のみの ICP マッチング結果を図 3.3-22(a)、(b)に示す。黄色・オレンジ色・緑色・青色の部分が超音波計測による形状再構成データを示している。また、今回の開発した手法でのマッチング結果を図 3.3-22(c)、(d)に示す。従来手法であるスケーリング補正のみの ICP マッチング結果では、通常環境においても、X、Y 位置のマッチングが困難であった。さらに、霧環境では、カメラ単体による撮影が困難な環境であり、カメラ画像を基にした 3 次元再構成画像は強く歪んでおり、超音波計測結果とのマッチングがほぼできていない。一方で、令和 3 年度、開発した手法を用いることで計測結果の重ね合わせが改善されていることが確認され、通常環境において、X、Y 位置のマッチングが適切に行われ、さらに、霧環境においても、カメラによる環境撮影・3 次元再構成化が困難な状況下でカメラ単体による 3 次元再構成画像が歪んだ状況であっても、超音波センサーで得られた計測情報を用いて、3 次元再構成画像の改善に資する位置合わせ向上を行うことができた。

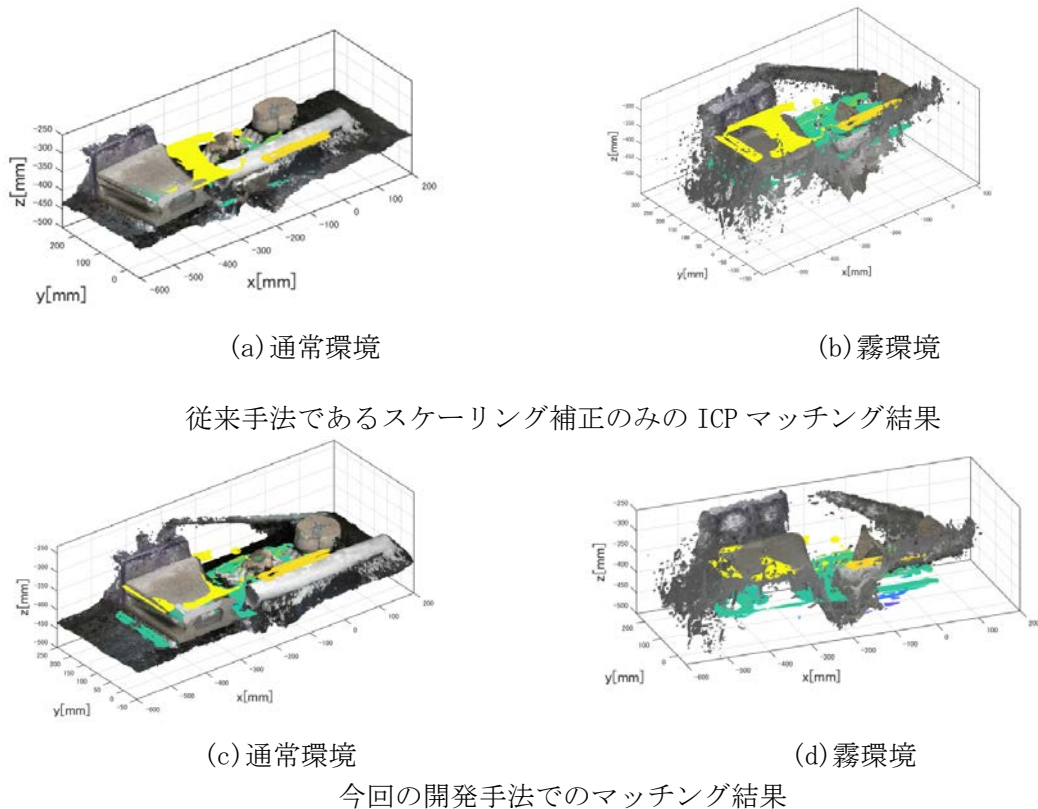


図 3.3-22 通常環境・霧環境対象物を対象とした
カメラ画像 SfM 技術と超音波計測技術の相互補完技術の適用例

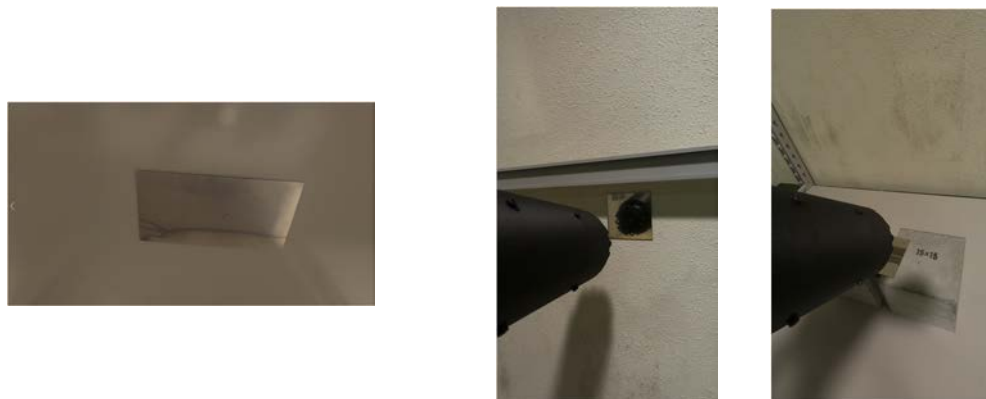
カメラ画像を用いた SfM 技術による形状再構成及び超音波計測技術による形状再構成の点群データの整合を行うことができ、SfM 技術の長所である詳細な 3 次元形状情

報とカラー情報を維持しつつ、超音波計測技術による形状再構成の長所である光学的条件に左右されずに安定性を活かした技術となっている。このようにそれぞれの形状再構成技術の長所・短所を補う相互補完技術を開発した。

また、ロボットアーム先端部にカメラを実装するための取り付け治具作製として、ロボットアーム先端におけるエンドエフェクタ部の設計・試作を行い（図 3.3-23）、実際に実機適用の際には使用する環境にあわせて耐放射線性カメラを選定しそのカメラの形状寸法・ケーブル等の取り回しを考慮してエンドエフェクタ部のカメラ取り付け治具の修正を必要とするが、本研究の撮影系において、エンドエフェクタ周囲にカメラ取り付け治具を取り付けてロボットアームを遠隔操作し撮影ができるといった実装適用性を確認した（図 3.3-24）。



図 3.3-23 ロボットアーム先端部にカメラを実装するために
試作したエンドエフェクタ部（カメラ取り付け治具）



(a) 取り付け治具（小）による撮影画像の例 (b) 取り付け治具（大）による撮影画像の例
図 3.3-24 試作したエンドエフェクタ部（カメラ取り付け治具）から
得られたカメラ撮影画像の例

3.3.3 まとめ

令和元年度から令和3年度の本研究を通じて、パラメトリック超音波による形状再構成技術の開発にあたり、表2.1-1全体計画表に沿って、①専用パラメトリック超音波センサの開発、②SfM応用による超音波3次元画像再構成データの補完技術の開発を実施した。

令和元年度には、単一素子の空中超音波センサを試作し、パラメトリック超音波の音圧分布・指向性の把握を行い、炉内構造物やデブリの形状の把握に適したセンサの仕様をとりまとめ、多関節アームへの超音波計測装置の実装にあたり、既存の超音波送受信系の実装可能性を調べるとともに、多関節アーム実装に適する小型の超音波送受信系の設計・試作を行った。また、カメラ画像を用いたSfM技術による形状再構成の課題点の抽出、及び超音波計測技術による形状再構成の課題点の抽出を行うとともに、カメラ画像を用いたSfM技術と超音波計測技術による形状再構成の長所・短所を補う補完手法の構築に資する基礎データを取得した。令和2年度には、コバルト照射施設を利用して超音波センサの耐放射線性を確認した。また、アレイ型空中超音波センサを試作し、音圧分布・指向性の把握を行い、炉内構造物やデブリの形状の把握に適したセンサの仕様をとりまとめ、多関節アームへの超音波計測装置の実装にあたり、多関節アーム実装に適する小型の超音波送受信系の改良を行うとともに、ペDESTAL上部のみならず下部の状況把握を鑑み、固体だけではなく液体への超音波計測適用性について調べとりまとめた。また、模擬構造物を対象に、カメラ画像を用いたSfM技術による形状再構成及び超音波計測技術による形状再構成を行い、3次元形状データの比較を行い、カメラ画像を用いたSfM技術と超音波計測技術による形状再構成の長所・短所を補う相互補完を行う技術を開発した。令和3年度には、アレイ型空中超音波センサにより、模擬デブリや模擬構造物の形状を計測し、その有効性を評価した。また、超音波送受信系の改良を行うとともに、ロボットアームに超音波センサを実装するための取り付け治具を作製し、ロボットアーム先端部への実装適用性を確認した。さらには、コバルト照射施設を利用して超音波センサの耐放射線性を確認した。そして、令和2年度に引き続き、模擬構造物を対象に、カメラ画像を用いたSfM技術による形状再構成及び超音波計測技術による形状再構成を行い、カメラ画像を用いたSfM技術と超音波計測技術による形状再構成の長所・短所を補う相互補完を行う技術を開発した。また、ロボットアーム先端部にカメラを実装するための取り付け治具を作製し、ロボットアームへの実装適用性を確認した。

以上は、パラメトリック超音波による形状再構成技術の開発の実施項目の計画を満足するものであり、本研究成果より、図3.1-1、図3.1-2に示す当初提案のRPV下部へのアクセス概念コンセプトにおける①穴を見つける、③調べる、の段階的なアプローチに必要な超音波計測技術及びカメラによる観察・環境把握技術の実現性を確認した。

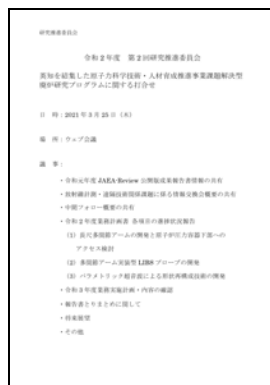
3.4 研究推進

3.4.1 令和2年度までの実施内容及び成果（概要）

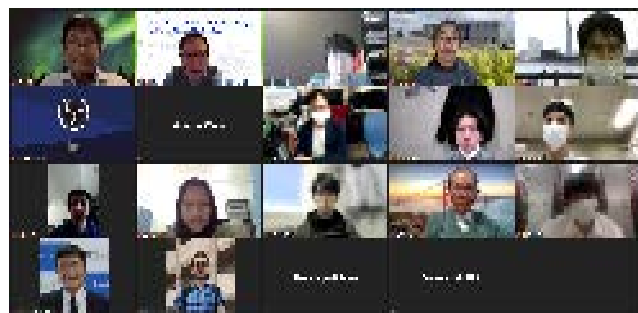
以下に、令和2年度までの実施内容及び成果（概要）を示す。

令和元年度は、研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、研究を進めた。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。また、令和元年度12月に原子力機構側の研究者とともに、研究推進委員会を開催し、東京工業大学・原子力機構双方の令和元年度研究実施計画、また、研究成果の一部を報告・協議するとともに令和2年度研究実施計画についての詳細な打合せを行った。また、令和元年度2月に日本側 P0 中間フォローにてコメントを受けて、反映させ研究を推進するとともに、報告書に向けた協議を行った。

令和2年度は、研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、研究を進めた。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。また、令和2年9月に原子力機構プログラムオフィサー（J-P0）と研究代表の打合せにて、英知事業の研究フォロー体制や新型コロナウイルスの影響、研究の進捗状況に関して、P0、J-P0 と意見交換し、研究に反映させた。また、令和2年12月に英知事業の放射線計測・遠隔技術関係課題に係る情報交換会にて、放射線計測・遠隔技術関係課題に係る英知事業の研究代表者らや J-P0、CLADS 等と放射線計測・遠隔技術の観点で技術議論を行い、本研究推進に役立つ知見を得た。そして、令和2年12月に P0 中間フォローにて研究実施状況の報告を行い、P0、J-P0 からコメントを得て、本研究へ反映させ、研究を推進した。さらに、令和2年11月と令和3年3月に研究推進委員会（図 3.4-1）を計2回開催し、東京工業大学・原子力機構双方の研究成果を報告し、令和2年度実施計画・内容、報告書とりまとめへ向けた協議を行うとともに最終年度にあたる令和3年度の研究実施計画に関して議論した。



(a) 議事内容



(b) 委員会開催風景

（個人情報保護の観点から低解像度表示）

図 3.4-1 令和2年度第2回研究推進委員会（令和3年3月）[3]

3.4.2 令和3年度実施内容及び成果

以下に、令和3年度の実施内容及び成果を示す。

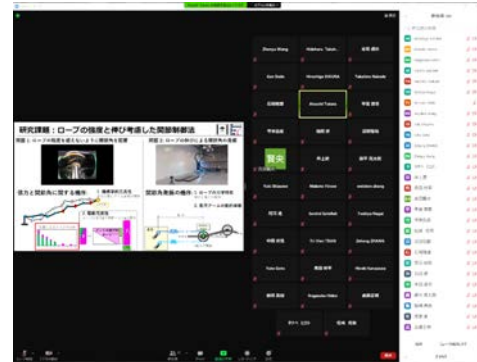
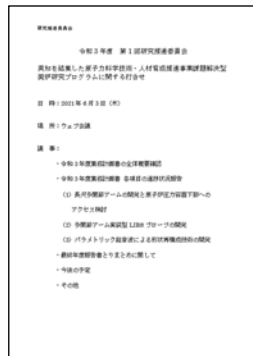
新型コロナウイルス感染症のまん延防止を考慮し、オンラインでの打合せを有効活用しつつ、研究代表者の下で各研究項目間ならびにCLADS等との連携を密にして、1F現場に実機適用すべく、現場との意見/情報交換を行いながら、研究を進めた。研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。現場との意見/情報交換の観点から、現場に精通する関係者とのディスカッションを通して、研究の進捗状況に関して、令和4年1月にP0中間フォローにて研究実施状況の報告を行い、本研究計画内容の研究実施状況のみならず、1F現場への実機適用の観点からも、P0、J-P0と意見/情報交換を行い、本研究へ反映させ、研究を推進した。

また、令和4年3月に開催された、令和3年度英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業成果報告会（図3.4-2、【2】テーマ：計測・遠隔技術関連 パネリスト）にて、令和元年度から令和3年度にわたる本研究の研究成果を報告するとともに、パネルディスカッションを通じて、廃炉に関わる研究機関関係者や現場に精通する関係者らと計測・遠隔技術関連の研究開発テーマの観点から技術議論を行い、本研究推進に役立つ知見を得た。さらに、令和3年度6月（図3.4-3）・7月・10月・12月・1月に研究推進委員会を計5回開催し、各研究項目の研究成果を報告し、令和3年度実施計画・内容を確認するとともに、報告書のとりまとめへ向けて協議した。さらには、本研究で得た研究成果の一部をとりまとめ、国内・国際学会会議等において報告した。

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 成果報告会	
開催日 令和4年3月10日(木) 1300~1700 会場 オンライン形式	
プログラムの概要	
1300 開会・挨拶	祝詞 豊田（公益財団法人原子力科学技術・人材育成推進事業） 山田（公益財団法人原子力科学技術・人材育成推進事業） 謝辞 豊田（公益財団法人原子力科学技術・人材育成推進事業）
1310 研究を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業について	司会 豊田（公益財団法人原子力科学技術・人材育成推進事業） 報告 豊田（公益財団法人原子力科学技術・人材育成推進事業）
1330 ひびくディスカッション1	テーマ：廃炉関連の研究開発 ・研究紹介（5分×3 演者） ・研究代表者とコーディネーターとの質疑応答（20分） ・参加者との質疑応答（5分）
1410 休憩（10分）	
1420 ひびくディスカッション2	テーマ：計測・遠隔技術関連の研究開発 ・研究紹介（5分×3 演者） ・研究代表者とコーディネーターとの質疑応答（20分） ・参加者との質疑応答（5分）
1500 休憩（10分）	
1510 研究を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業について	
1540 休憩（10分）	
1550 ひびくディスカッション3	テーマ：廃炉関連の研究開発 ・研究紹介（5分×3 演者） ・研究代表者とコーディネーターとの質疑応答（20分） ・参加者との質疑応答（5分）
1630 閉会挨拶	
1655 閉会挨拶	
※実施要綱は、JAEA 各所定	

ひびくディスカッション参加要綱	
【1】テーマ：廃炉関連	
課題名	研究代表（所属機関）
レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種特定手続の確立	長谷川氏（東京大学）
燃料デブリ取出し時に発生す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的とした超高分解能イメージング装置の開発	栗澤 俊介（東京大学）
【2】テーマ：計測・遠隔技術関連	
課題名	研究代表（所属機関）
廃炉計画段階での廃炉で発生する放射性核種飛散防止技術の開発	松本 隆之（高エネルギー加速器研究機構）
廃炉計画段階での放射性核種飛散防止技術の開発	高橋 実（岡山大学）
廃炉計画段階での放射性核種飛散防止技術の開発	高橋 実（岡山大学）
廃炉計画段階での放射性核種飛散防止技術の開発	高橋 実（岡山大学）
【3】テーマ：廃炉関連	
課題名	研究代表（所属機関）
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃炉物のフッ化技術の開発	渡邊 大輔（日立 GE ニュークリア・エナジー）
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃炉物のフッ化技術の開発	村下 健二（東京工業大学）
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃炉物のフッ化技術の開発	村下 健二（東京工業大学）
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃炉物のフッ化技術の開発	村下 健二（東京工業大学）

図 3.4-2 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
成果報告会プログラム（令和4年3月）
（【2】テーマ：計測・遠隔技術関連パネルディスカッションにて成果報告・
意見交換：東京工業大学）



(a) 議事内容

(b) 委員会開催風景

図 3.4-3 令和3年度第1回研究推進委員会（令和3年6月）

3.4.3 まとめ

令和元年度から令和3年度の本研究を通じて、本研究における研究推進を表2.1-1全体計画表に沿って実施した。

令和元年度から令和2年度には、研究代表者の下で各研究項目間ならびにCLADS等との連携を密にして、研究を進めた。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。令和3年度には、研究代表者の下で各研究項目間ならびにCLADS等との連携を密にして、1F現場に実機適用すべく、令和2年度までと同様にして、現場との意見/情報交換を行いながら、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。

以上は、本研究における研究推進の実施項目の計画を満足するものであり、新型コロナウイルス感染症の影響等により出張が必要な実験等を学内実験で代替するなどして、オンラインでのウェブ会議を効果的に駆使することで、本研究の研究実施項目全てを網羅的に不足なく推進することができた。

4. 結言

本研究では、廃炉の加速化のためには压力容器内部の損傷炉内構造物や燃料デブリの状況把握が重要となるため、ペデスタル上部に位置する压力容器底部の状況把握を可能とする技術の実現を目的として、長尺の多関節ロボットアームにより、手先の位置姿勢の制御をしながら、カメラの SfM 技術及び超音波計測技術によりアーム先端部の自己位置を把握しつつ炉内構造物の状況把握を行うとともに、レーザーを用いた LIBS 技術により核物質の分布状況把握を行う遠隔探査手法のアームへの実装技術を開発する。さらには、檜葉遠隔技術開発センター等を活用し実証試験を行い、その実現性を確かめることを目的としている。

上述の目的を達成するために、長尺多関節アームの開発と RPV 下部へのアクセス検討、多関節アーム実装型 LIBS プローブの開発、パラメトリック超音波による形状再構成技術の開発について、以下のような項目に分けて実施している。

- (1) 長尺多関節アームの開発と RPV 下部へのアクセス検討
 - ① 改良ロボットアームの試験
 - ② アームの構造改良
- (2) 多関節アーム実装型 LIBS プローブの開発
 - ① 実装型 LIBS プローブの開発
 - ② 模擬試験体作製及び LIBS 光学系改良検討
- (3) パラメトリック超音波による形状再構成技術の開発
 - ① 専用パラメトリック超音波センサの開発
 - ② SfM 応用による超音波 3 次元画像再構成データの補完技術の開発

令和元年度は、長尺多関節アームの開発と RPV 下部へのアクセス検討については、既存の長尺多関節アームを活用し、压力容器底部へのアクセスを可能とする技術の実現を目指して、曲げにくいケーブルを内包することが可能なワイヤ駆動関節機構を有するロボットアームの設計、改良ロボットアーム部品の試作を行った。また、アーム先端に計測用の機器を設置できる長尺多関節アームへと構造改良を行うため、既存の長尺多関節アームを活用して、関節配置の設計にあたり既存の長尺多関節アームの先端に搭載可能な直動多関節アーム部の設計を行った。

多関節アーム実装型 LIBS プローブの開発については、既存の可搬型 LIBS 装置を活用し、多関節アーム実装を前提とした長尺光ファイバーを接続するため、多関節アーム用 LIBS プローブ部を試作した。また、試作した LIBS プローブ部に既存装置及び長尺光ファイバーを接続し、模擬試料からの LIBS 信号が得られることを確認した。そして、多関節アームに実装可能な LIBS プローブ部の光学系改良に資する単一成分系・多成分系模擬試験体の仕様及び作製方法を決定するとともに、電気炉を新規に購入し、単一成分系模擬試験体を試作した。また、LIBS プローブ部の光学系改良に資する簡易分光光学系システムを試作した。

パラメトリック超音波による形状再構成技術の開発については、単一素子の空中超音波センサを試作し、パラメトリック超音波の音圧分布・指向性の把握を行い、炉内構造物やデブリの形状の把握に適したセンサの仕様をとりまとめた。さらには、多関節アームへの超音波計測装置の実装にあたり、既存の超音波送受信系の実装可能性を調べるとともに、多関節アーム実装に適する小型の超音波送受信系の設計・試作を行った。そして、カメラ画像を用いた SfM 技術による形状再構成の課題点の抽出、及び超音波計測技術による形状再構成の課題点の抽出を行うとともに、

カメラ画像を用いた SfM 技術と超音波計測技術による形状再構成の長所・短所を補う補完手法の構築に資する基礎データを取得した。

さらには、研究推進のために、研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、研究を進めた。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。

総じて、令和元年度は、ペDESTAL上部に位置する圧力容器底部の状況把握を可能とする技術の実現を目的として、長尺の多関節ロボットアームにより、手先の位置姿勢の制御をしながら、カメラの SfM 技術及び超音波計測技術によりアーム先端部の自己位置を把握しつつ炉内構造物の状況把握を行うとともに、レーザーを用いた LIBS 技術により核物質の分布状況把握を行う遠隔探査手法のアームへの実装技術を開発することに着手した。

令和2年度は、長尺多関節アームの開発と RPV 下部へのアクセス検討については、RPV 下部の開口部を発見することが可能かを確かめるために、先端にカメラを装備した既存の長尺多関節アームを用いて模擬環境下で実験を実施した。また、LIBS プローブ部を上方に可搬可能なテレスコピック型多関節アームを試作し、基本的動作を確認した。また、アーム先端に計測用の機器を設置可能な長尺多関節アームの関節部分を設計・試作し、基本的動作を確認した。また、長尺多関節アームの駆動に適した駆動ワイヤの仕様をまとめた。

多関節アーム実装型 LIBS プローブの開発については、多関節アームへの実装を模擬するため、簡易型模擬アームを準備した。令和元年度に試作した LIBS プローブを改良するとともに、マイクロチップレーザーLIBS プローブを試作し、模擬アームに取り付けて、屈曲・伸展等の動きに対する可動状況を調べた。また、アームに取り付けたプローブの固定状態の許容範囲を明確化するため、取得されるスペクトルのレーザー光焦点深度依存性、試料に対するレーザー照射角度依存性を取得した。そして、多関節アームに実装可能な LIBS プローブ部の光学系改良に資する単一成分系模擬試験体を試作するとともに、令和元年度に試作した簡易分光光学系システムを改良した。

パラメトリック超音波による形状再構成技術の開発については、コバルト照射施設を利用して超音波センサの耐放射線性を確認した。また、アレイ型空中超音波センサを試作し、音圧分布・指向性の把握を行い、炉内構造物やデブリの形状の把握に適したセンサの仕様をとりまとめた。さらには、多関節アームへの超音波計測装置の実装にあたり、多関節アーム実装に適する小型の超音波送受信系の改良を行うとともに、ペDESTAL上部のみならず下部の状況把握を鑑み、固体だけではなく液体への超音波計測適用性について調べとりまとめた。そして、模擬構造物を対象に、カメラ画像を用いた SfM 技術による形状再構成及び超音波計測技術による形状再構成を行い、3次元形状データの比較を行った。カメラ画像を用いた SfM 技術と超音波計測技術による形状再構成の長所・短所を補う相互補完を行う技術を開発した。

さらには、研究推進のために、研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、研究を進めた。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。

総じて、令和2年度は、ペDESTAL上部に位置する圧力容器底部の状況把握を可能とする技術の実現を目的として、模擬環境でのロボットアームの基本的動作確認、テレスコピック型多関節アーム試作、アームの構造改良としてのケーブル収納機構試作、駆動ワイヤ仕様の調査・整理、LIBS プローブの改良、マイクロチップレーザーLIBS プローブ試作、簡易型模擬アームでのプローブ可動状況把握、レーザー光焦点深度依存性・レーザー照射角度依存性調査、単一成分系模擬試験体の試作、簡易分光光学系システム改良、超音波センサの耐放射線性評価、アレイ型空中超音波センサ試作・音圧分布-指向性把握、センサ仕様整理、小型超音波送受信系改良、超音波液体

適用性評価、SfM 技術・超音波計測技術による形状再構成の相互補完技術の基礎開発などを行い、令和 3 年度における計測系とロボットとの統合等へ向けた要素技術開発を推進した。

令和 3 年度は、長尺多関節アームの開発と RPV 下部へのアクセス検討については、ロボットアームを改良するとともに、計測用の送電ケーブル・センサ等をロボットアームに実装し、ロボットアームの操作性を確認した。また、テレスコピック型多関節アームの長尺多関節アームへの適用性を把握し、1F 現場に実機適用すべく、実用化に必要な課題を抽出した。そして、関節配置、駆動ワイヤ、センサ取り付け、ケーブルの巻取り、耐荷重等を考慮し、アーム先端に計測用の機器を設置可能な長尺多関節アームの最適な構造を調べとりまとめた。

多関節アーム実装型 LIBS プローブの開発については、多関節アームに LIBS プローブを実装し、アームの操作によりプローブを任意の位置に搬送可能であることを確認した。また、多関節アームの遠隔操作により模擬試料の LIBS 計測が可能であることを確認し、実装の可能性を評価した。そして、多関節アームに実装可能な LIBS プローブ部の光学系改良に資する多成分系模擬試験体を作製するとともに、簡易分光光学系システムを改良し LIBS 計測に最適な光学系について調べとりまとめた。

パラメトリック超音波による形状再構成技術の開発については、アレイ型空中超音波センサにより、模擬デブリや模擬構造物の形状を計測し、その有効性を評価した。また、超音波送受信系の改良を行うとともに、ロボットアームに超音波センサを実装するための取り付け治具を作製し、ロボットアーム先端部への実装適用性を確認した。さらには、コバルト照射施設を利用して超音波センサの耐放射線性を確認した。また、令和 2 年度に引き続き、模擬構造物を対象に、カメラ画像を用いた SfM 技術による形状再構成及び超音波計測技術による形状再構成を行い、カメラ画像を用いた SfM 技術と超音波計測技術による形状再構成の長所・短所を補う相互補完を行う技術を開発した。そして、ロボットアーム先端部にカメラを実装するための取り付け治具を作製し、ロボットアームへの実装適用性を確認した。

さらには、研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、1F 現場に実機適用すべく、現場との意見/情報交換を行いながら、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。

総じて、令和 3 年度は、3 カ年計画の 3 年目のとりまとめの年度として、ロボットアーム改良、ロボットアーム操作性確認、テレスコピック型多関節アームの長尺多関節アームへの適用性把握、実用化に必要な課題抽出、簡易仮想環境 3D データを含むロボットシミュレータ試作、テレスコピックアーム位置安定を目指した構造体への柔軟な固定法検討、計測用機器設置用エンドエフェクタ試作、LIBS プローブの実装・搬送・計測可能性評価、焦点距離・レーザー照射角度の LIBS 半定量性への影響評価、多成分系模擬試験体作製、超音波による形状計測等との統合化を鑑みた最適な LIBS 計測光学系基礎システム構築、アレイ型空中超音波センサによる形状計測有効性評価、超音波送受信系改良、超音波センサの耐放射線性確認、SfM 技術と超音波計測技術による形状再構成相互補完技術の開発などを行った。

令和元年度から令和 3 年度の本研究を通して、研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、1F 現場に実機適用すべく、現場との意見/情報交換を行いながら、研究を進め、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、ペDESTAL 上部に位置する圧力容器底部の状況把握を可能とする技術の実現を目的として、長尺の多関節ロボットアームにより、

手先の位置姿勢の制御をしながら、カメラの SfM 技術及び超音波計測技術を組み合わせてアーム先端部の自己位置を把握しつつ炉内構造物の状況把握を行うとともに、レーザーを用いた LIBS 技術により核物質の分布状況把握を行う遠隔探査手法のアームへの実装技術を開発した。さらには、櫛葉遠隔技術開発センター等を活用し実証試験を行い、その実現性を確かめた。

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

当初の本研究課題開発コンセプトの実現性を確認し（図 4-1）、十分にその道筋をつけることはできたと思われるが、実機適用に向けては、今後、下記ロードマップ展開で（表 4-1）、廃炉に関連する電力関係機関・研究機関・メーカー企業等と連携して、実環境を模擬した過酷なモックアップ環境での実証試験、本研究で得られた知見の高度化研究を行い、本研究で得られた技術等の実機適用化を目指すことが重要である。



図 4-1 本事業開発コンセプトの実現性確認

表 4-1 今後の展望（ロードマップ）

第1フェーズ	第2フェーズ	第3フェーズ
本事業研究	実環境を模擬した過酷なモックアップ環境での実証試験 + 本事業研究で得られた知見の高度化研究	実用化（福島第一原子力発電所実機での実証試験・技術活用）

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁 原子力発電所事故収束対応室, 第7回廃炉研究開発連携会議(2018年06月18日), (資料1-2) 経済産業省の廃炉に関する研究開発の取組状況,
<https://www.dd.ndf.go.jp/files/user/pdf/decommissioning-research/dr-committee/materials/07/doc1-2.pdf> (参照 2022-03-31) .

- [2] 廃炉環境国際共同研究センター, 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(委託研究); 令和元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 2020-040, 2021, 55p.,
<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2020-040>.

- [3] 廃炉環境国際共同研究センター, 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(委託研究); 令和2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 2021-045, 2022, 65p.,
<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2021-045>.

- [4] Gen Endo, Atsushi Horigome and Atsushi Takata, Super Dragon: A 10-m-Long-Coupled Tendon-Driven Articulated Manipulator, IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 4, no.2, 2019, pp.934-941, <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2894855>.

This is a blank page.

