

平成 29 年度

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技術・人材育成推進事業

漏洩箇所特定とデブリ性状把握のための  
ロボット搬送超音波インテグレーション

成果報告書

平成 30 年 3 月

国立大学法人 東京工業大学

本報告書は、文部科学省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平成 27-29 年度「漏洩箇所特定とデブリ性状把握のためのロボット搬送超音波インテグレーション」の成果を取りまとめたものです。

## 目次

概略 .....	iv
1. はじめに.....	1
2. 業務計画.....	4
2.1 全体計画.....	4
2.2 各年度計画 .....	5
3. 業務の実施内容及び成果.....	10
3.1 超音波計測の開口合成適用研究（H27～H29） .....	10
3.1.1 三次元 UVP による漏洩箇所を検出高度化（H27～H29） .....	10
3.1.2 UVP と開口合成の融合（H27～H29） .....	16
3.1.3 開口合成の手法最適化（再委託先：岡山大学）（H27～H29） .....	18
3.1.4 超音波計測システムの統合化（H27～H29） .....	25
3.2 センサ搬送用移動ロボット・SLAM の研究開発（H27～H29） .....	29
3.2.1 ロボット・センサの位置決め・方向決め精度研究（H27～H29） .....	29
3.2.2 センサ搬送用移動ロボットの設計（H28～H29） .....	33
3.2.3 ロボット設計のための構造解析等の計算解析（再委託：エネルギー総合工学研究 所）（H27～H29） .....	35
3.3 英国側（Bristol 大学）の研究成果の概要（H27～H29） .....	38
3.4 研究推進（H27～H29） .....	40
4. 結言.....	44
4.1 研究成果のまとめ.....	44
4.2 今後の展望 .....	46

## 表一覧

表 2.1-1	日英共同研究としての全体計画	4
表 2.1-2	全体計画表（日本側）	5
表 2.2-1	業務項目と実施日程（日本側）	7
表 3.1-1	積算線量と反射波強度変化の関係	15
表 3.1-2	仕様表	29
表 3.2-1	SLAM による位置決め・方向決め精度計測実験結果	30
表 3.2-2	SLAM による位置決め・方向決め精度検証実験結果	31
表 3.2-3	Visual Odometry による位置決め・方向決め精度評価	33
表 3.4-1	学会等における口頭・ポスター発表の実績	43
表 3.4-2	学会誌・雑誌等における論文掲載の実績	43
表 4.2-1	今後の展望（ロードマップ）	48

## 図一覧

図 3.1-1	実験装置図	12
図 3.1-2	従来手法による速度ベクトル再構成結果	12
図 3.1-3	新たな信号処理手法による速度ベクトル再構成結果	12
図 3.1-4	檜葉遠隔技術開発センターでの評価試験結果	13
図 3.1-5	多相流計測 UVP の信号処理	14
図 3.1-6	垂直円管内気泡流の計測結果	14
図 3.1-7	ベクトル UVP 法の概略	14
図 3.1-8	ベクトル UVP センサ	14
図 3.1-9	ベクトル UVP による水平円管内旋回流の計測	15
図 3.1-10	Co-60 照射実験の外観	15
図 3.1-11	照射前の音響強度分布	15
図 3.1-12	照射後の音響強度分布	16
図 3.1-13	実験装置概略図	18
図 3.1-14	崩壊熱対流を模擬した実験における計測結果	18
図 3.1-15	リニアアレイセンサの搬送とスキャンに関して提案する手法	22
図 3.1-16	実験に用いたリニアアレイ探触子の仕様と計測条件	23
図 3.1-17	模擬デブリ試料からの反射エコー計測に用いた水浸超音波計測装置の構成	23
図 3.1-18	回転スキャンに基づく開口合成法によって再構成された模擬デブリ試料（No.1）の表面形状。	24
図 3.1-19	回転スキャン（左）と並進スキャン（右）に基づく開口合成法で再構成された、模擬デブリ試料（No.1）の表面形状	24
図 3.1-20	搬送用ロボットの試験運転	26
図 3.1-21	統合化システム外観	26
図 3.1-22	小型実験装置の概要	27

図 3.1-23	水槽での計測位置.....	27
図 3.1-24	水槽でのベクトル計測結果.....	27
図 3.1-25	JAEA 檜葉の試験用大型水槽.....	28
図 3.1-26	大型水槽上部の橋.....	28
図 3.1-27	実験中のロボット.....	28
図 3.1-28	計測位置.....	28
図 3.1-29	1次元速度分布計測結果.....	28
図 3.2-1	3次元レーザスキャナと調査装置.....	30
図 3.2-2	ロボット位置姿勢計測.....	30
図 3.2-3	移動環境.....	31
図 3.2-4	3次元スキャン結果の一例.....	31
図 3.2-5	SLAMにより生成された環境地図と Goal 地点（左から実験 1、2、3）灰色の線は車載レーザレンジファインダにより距離計測が行われた測定線.....	31
図 3.2-6	合成されたグレーチング地図とロボットの軌跡（左：直進、右：その場旋回）.....	33
図 3.2-7	ロボットシステムの改良：（左）カメラ固定フレーム、（中）ウィンチ機構と計測プーリ、（右）制御用統合ソフトウェア操作画面（センサ高さと向きを表示可能）.....	34
図 3.2-8	三次元データ表示検討のために構築した架空空間.....	37
図 3.2-9	改良した三次元インターフェイスの表示結果.....	37
図 3.2-10	Creo Parametric による構造解析.....	38
図 3.2-11	センサ周囲の微小な流動変化；x-y、y-z 二面の速度ベクトル図.....	38
図 3.3-1	波状サンプル.....	39
図 3.3-2	波状サンプルへの計測結果；（上）実形状、（中）再現形状、（下）誤差.....	39
図 3.3-3	コリウム模擬物質への計測結果、右図矢印はサンプル反対側の壁の位置を示す.....	39
図 3.3-4	スラグに対しての超音波周波数を変化させた反射波強度とその密度.....	39
図 3.4-1	第 4 回日英廃炉ワークショッププログラム.....	40
図 3.4-2	第 4 回日英廃炉ワークショップの様子.....	40
図 3.4-3	東京電力ホールディングス(株)福島第一・第二原子力発電所、日本原子力発電(株)東海第一原子力発電所、日本原子力研究開発機構高速増殖炉もんじゅ、日本原子力発電(株)敦賀第一・第二原子力発電所の視察（写真：各機関より提供）.....	41
図 3.4-4	第 5 回日英廃炉ワークショッププログラム.....	42
図 3.4-5	第 5 回日英廃炉ワークショップの様子.....	42

## 略語一覧

SLAM: Simultaneous Localization and Mapping; 周辺の地図を作成しながら自己位置同定をも行うロボットの技術

UVP: Ultrasonic Velocity Profiler, 超音波流速分布計測

VO: Visual Odometry, ビジュアルオドメトリ

## 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の廃炉に向けた最大の難関である溶融燃料デブリ取り出しに、我が国は全力を上げて挑み始めている。この燃料デブリは、どこにどのような状態で存在するかは未だに確認が出来ていないものの、東京電力ホールディングス(株)と IRID(国際廃炉研究開発機構)が中心となり、まずは原子炉格納容器下部に達したと見られる燃料デブリの調査が、ロボット搬送と光学可視化技術を用いて進められている。しかしながら、どことも分からぬ冷却水漏洩のある炉内環境では、不可視状態でかつ高放射線量下でのロボット搬送光学可視化計測はその困難を極めることも予想され、デブリ取り出しを加速させるためには新たな可視化計測技術を開発する必要があると考える。

そこで、本研究では米国スリーマイル島(TMI)原子力発電所事故で実績のある超音波エコー技術に着目するとともに、超音波を用いたデブリ性状把握技術と炉内冷却水漏洩箇所を特定する流体計測技術の開発に向けて、日英の第一線の超音波研究者が合い集い、新たな超音波計測技術を日英の英知をもって共同に開発するとともに、超音波センサの位置情報を正確に把握するためのロボット搬送技術も同時に開発し、さらには 40 年とも言われる廃炉工程に必要な国際的な人材を育成することを目的して、「漏洩箇所特定とデブリ性状把握のためのロボット搬送超音波インテグレーション」と題して国際共同研究を立ち上げ、この難題に挑むものである。

デブリ取り出しの実現に向けて、従来の超音波探傷技術と超音波流速分布計測技術とを応用し、開口合成超音波流速分布計測法(開口合成 UVP 法)を発展させ、フェイズドアレイ信号処理を用いた開口合成超音波ベクトルマップ法を開発し、これを用いることで、燃料デブリの性状・分布状態を把握し、炉内冷却水漏洩箇所を特定できる新しい計測技術の開発を行う。また、超音波センサの位置決め精度を向上させるため、SLAM(Simultaneous Localization And Mapping) 技術を応用したロボット搬送自己位置同定技術に関する研究を行うことで、デブリの性状把握のみばかりか、デブリ取り出し作業を行う際にも本研究成果は大きく寄与するものと考えられる。

炉内の格納容器内の状況把握のために、シミュレーション技術、遠隔操作技術、高線量下での可視化計測技術に関する研究を行い、超音波センサを搭載したロボットの遠隔操作技術と超音波センシング技術の融合開発を行う。超音波による燃料デブリセンシング技術に、英国の Bristol 大学の非線形信号処理を応用した開口合成技術を組み合わせることで、三次元空間でのより高精度な超音波センシングを実現する。また、ロボットの移動と自己位置同定に関する研究として、その位置決めと計測を同時に行う SLAM 技術に着目し、燃料デブリの性状・分布を推進し、福島第一原発の廃炉という課題の速やかな解決に資する基礎的・基盤的研究を実施する。

燃料デブリの計測に関して、探査装置として搬送ロボットが用いられるが、ロボットの位置認識には従来カメラ画像による計測すなわち光学的手法が用いられている。しかしながらカメラ画像は、簡易に方向は求まるものの、物体との距離を正確に求めることは困難である。そこで、レーザレンジファインダと超音波計測を応用し、炉内情報を正確に捉える基礎技術を構築する。

一方、炉内へのセンサ類の持ち込みに関しては、さまざまな障害が想定されるが、とりわけ、炉内に侵入できる経路に制限があり、そのために搬送用のロボットを含めた大きさやパワーの制限と、その搬送用ロボットによるセンサの位置・姿勢の精度が課題であると予想される。そこで、フェイズドアレイ技術を用いることでセンサ方向を変えることなくビーム方向を変化可能にする

ことでセンサの小型化が可能であるとともに、開口合成技術を組み合わせることで、詳細・高精度な可視化画像を得ることができる。炉内探査を前提として微弱となる超音波信号に対しても、開口合成技術を用いれば十分な精度の情報を得られる可能性がある。開口合成技術に関しては、共同提案者の英国 Bristol 大学 Drinkwater 教授が世界的第一人者であり、本提案の共同研究により、超音波アレイセンサを用いた原子炉内計測に関する技術開発への進展は大きいものと期待される。

また、従来の超音波アレイ技術は二次元での計測を行うことが多かったが、二次元の計測では、その計測線方向に超音波が反射するケースでは問題なく計測が行えるが、デブリの形状は不明であり、必ずしも計測線方向に超音波が返りやすい向きからの計測が可能であるとは限らない。そのため、本研究では三次元計測を行えるようにマトリックスセンサ、あるいはそれを簡略化した二方向成分を捉えることのできる 2 成分フェイズドアレイセンサを検証する。

また超音波センサの位置決め精度を向上させるため、移動ロボットによる SLAM 技術とグレーチング格子テクスチャを利用したビジュアル・オドメトリ (VO) を利用して環境計測ならびにロボットの自己位置同定を行う。ロボットから超音波センサをグレーチング上から降下させ、冷却水の微小流速・デブリ性状を計測する。センサの降下量はロボット本体に装備したリール機構による繰り出し量で制御し、センサの向きはロボット本体の向き、あるいはリール機構下部の回転機構により制御する。格納容器内グレーチング上で多点計測を行うことで広範囲の流速分布・デブリ形状把握が可能となる。福島第一原発の廃炉を目指したデブリ性状把握のためにはセンサのロボットによる搬送と位置同定技術の開発は必須と考える。

平成 27 年度は、原子炉格納容器からの冷却水漏洩に係わる漏洩箇所の特定に関して、フェイズドアレイ技術を適用するため、既存の超音波センサと新規購入した超音波パルサーレーザ (フェイズドアレイ仕様) を用いて、16CH フェイズド UVP による漏洩箇所検出計測の高度化について試験・検討した。T 字型の xy-yz 方向の多次元計測用超音波センサを開発・試作し、三次元フェイズドアレイベクトルマップ法の可能性を検討した。また、従来の 1 つの超音波センサを用いて流速分布を測定する UVP 法に、複数の素子からの信号を処理して物体表面を明確にする超音波アレイイメージング法(開口合成法)を融合させる信号処理方法を検討した。UVP 法に必要なある反射体からの微弱なエコー信号にはノイズ対策が必要であり、開口合成法との融合に必要な新たなアルゴリズムを構築するために、いくつかの種類開口合成法を適用し、それらが UVP 法に融合できるかどうかの結論を得た。既存の超音波センサと、新規に購入したマルチプレクサー (スイッチング装置) を用い、開口合成技術の高度化に向けた手法の最適化研究を行った。多数の素子から得られる信号をどう組み合わせると少ない計算負荷で正確な信号が得られるか試験した。また、フェイズド UVP と開口合成のシステムを、ロボットに搭載したうえで計測に用いることができるようにシステムを設計し、予備試験した。ロボットへの搭載に関しては、搭載試験を既存の汎用ロボットを使用して行った。ロボットの位置決め・方向決め技術として、VO の構築を行うために、新規に VO 用カメラシステムを構築し、グレーチングを通した超音波センサのデブリ計測可能性について検討するとともに、構築した VO システムによるロボット搬送の位置決め・方向決めを行い、その精度を試運転により調べた。ロボット設計上で必要

となる、応力分布やその構造に関するデータを、コンピュータ解析によって得て、それをロボット設計に生かすために、コンピュータ解析のためのサーバを購入し、他の拠点の技術者にもサーバが利用できるようなネットワーク環境を整備した。また、フリーの構造解析ソフトで、コンピュータの試運転を兼ねた計算を行った。

平成 28 年度は、三次元 UVP による漏洩箇所の検出高度化に関しては、パルスレーザを改良し、平成 27 年度に作製した xy-yz 多次元フェイズドアレイセンサに適応したシステムを製作した。そのパルスレーザを用いて試験を行い、計測精度を検証するとともに、音場の数値解析結果と比較して、その信号処理手法が妥当であることを示した。UVP と開口合成の融合に関しては、開口合成法の信号処理アルゴリズムの改良として、重み付き合成法に関して検討し、3 次元形状の再現精度を向上させるとともに、流れのある体系において開口合成画像の処理を試み、表面形状の取得に成功した。開口合成の手法最適化に関しては、4 軸スキャンシステムを開発し、それを用いた 3 次元開口合成法の実装に取り組むことで、斜面の向きによらず精度の良い表面検出が可能となったことを、製鉄スラグ塊を用いて検証した。超音波計測システムの統合化に関しては、センサ搬送用移動ロボットの要求事項をまとめ、それを考慮した計測ロボットを試作し、実炉での計測を模擬した多点からの超音波計測を行って、合成流速ベクトルマップを作成することに成功し、ロボット搬送を用いた超音波計測システムの有効性を示した。ロボット・センサの位置決め・方向決め精度に関しては、レーザレンジファインダを搭載したロボットシステムで SLAM の試験を行い、ロボット位置決め・方向決めの精度を調べ、課題を抽出した。ビジュアルオドメトリに関しても研究を進め、ロボットが回転する際に自動画像合成の精度が下がることを突き止め、その対処法に関して検討した。センサ搬送用移動ロボットの設計に関しては、ウィンチ機構の改良をスリップリングの追加等で行うとともに、ワイヤのねじれ防止のためにケーブルキャリアが適することを示した。また、ウィンチを用いたセンサ降下試験を行い、グレーチングの隙間にセンサを降ろすことに成功した。構造解析等の計算解析では、大変形が生じる条件での構造解析を行い、妥当な計算結果を得るとともに、フェイズドアレイセンサを用いた実験条件を再現した音場解析、センサの存在による流れ場への影響を検討する実験条件を再現した流動場解析を行い、それぞれ実験の精度解析に寄与した。

そして、最終年度（平成 29 年度）では、原子炉格納容器からの冷却水漏洩に係わる漏洩箇所の特定に関して、三次元フェイズドアレイベクトルマップ法の精度向上を行った。平成 28 年度に改良した xy-yz 方向の多次元計測用超音波ベクトルマップシステムに関して、ノイズ除去に係わる新たな信号処理手法を構築し、解析用のソフトウェアを改良してさらなる精度向上を図った。また、沸騰二相流のような多相流を計測可能な信号処理方法を UVP 計測に取り込むとともに、新たに 2 次元および 3 次元ベクトル UVP 法を考案し、新しいセンサを作製し実験に用いた。計測のためのソフトウェアを新たに開発し、システム全体を既存の小型試験設備内で試験した。超音波センサの耐放射線検討として、東工大の Co-60 施設を利用して評価した。また、実際の原子炉格納容器漏水検知への応用として JAEA 櫛葉遠隔技術開発センターの大型水槽装置にて評価実験を行った。UVP と開口合成の融合に関しては、溶融デブリを模擬した模擬デブリとし



て前年度採取した溶岩石を用いてサンプルを作製し、これを利用した。事故を起こした炉内で注水されている冷却水による強制対流を模擬した実験環境を製作し、UVPと開口合成の同時計測を行った。また、投げ込み式ヒーターを用いて崩壊熱対流を模擬した実験環境下での計測を行った。開口合成の手法最適化に関しては、ロボットの機構と炉内環境を考慮したセンサの搬送・移動方法の提案と計測の効率化を行った。平成28年度までの検討に基づいて、パルサレシーバと開口合成用のリニアアレイセンサを購入し、試験装置を完成させるとともに、最適化された開口合成技術の検証を行った。溶融デブリを開口合成技術で捉える際の精度と解析速度に関して検討し、実炉内で自立運転を行うロボットに搭載するのに適切な処理速度と計測精度をもつ様、開口合成手法を最適化した。溶融デブリを開口合成技術で捉える際の精度と解析速度に関して、一軸アレイセンサを用いて回転スキャンすることにより、センサを並進的に動かすことなく多数のデータを計測し、そのデータに開口合成法を適用する事で高精度な三次元計測を行うことができた。超音波計測システムの統合化に関しては、格納容器内を模擬した環境で超音波計測用センサを搭載した搬送用ロボットを試験した。搬送用ロボット単独での運転試験に続き、ロボットと超音波計測とを統合したシステムでの運転試験を行い、実炉内で運転可能な統合化ロボットの仕様をまとめた。試験設備として、平成28年度までに改良し製作した小型試験設備に、さらに複数個所での計測を模擬するための実験水槽を増設しこれを用いるとともに、日本原子力研究開発機構(JAEA)が管理する福島県楡葉町のJAEA 楡葉遠隔技術開発センターにある大規模試験設備を用いて模擬実験を行い、本ロボット搬送超音波統合システムの有効性を確認した。ロボット・センサの位置決め・方向決め精度に関しては、三次元レーザスキャナによる移動ロボットの位置決め精度を把握し、移動ロボットをより実運用に近い環境下で運用し、SLAMによる計測を行った。また、もう一つの位置計測技術であるVOの位置決め精度把握を行い、グレーチングの格子点のような十分な特徴点があれば、SLAMよりも精度の高い位置決めができる可能性が示された。センサ搬送用移動ロボットの設計に関しては、カメラ固定フレームの改良・センサ懸架長さ計測用プールの設置・移動ロボット制御用統合ソフトウェアの開発を行い、より実運用に近い環境下で運用して、いくつかの改善すべき点を洗い出した。構造解析等の計算解析では、三次元データの表示用インターフェイスの検討としてオープンソースのソフトウェアであるParaviewを選択し、架空の空間にて三次元SLAMを行った場合を想定して表示させ、その使い具合を検討することで、インターフェイスを改良した。

総じて、漏洩箇所特定のための流動計測とデブリ性状把握のための形状計測という二種類の異なる計測を、超音波を用いて同時に行うことを目指し、また、それをロボットに搭載して、高放射線量環境下等の過酷な環境下でも計測できることを目的としたセンサ搬送用ロボットおよびセンサの保持機構等に対して、研究開発を行った。これにより、例えば事故を起こした原子炉というような過酷な環境下に、小型ロボットを侵入させ、超音波センサによる計測でその状況を細かく把握し、その情報を廃炉に役立てるといった状況への道筋をつけることができた。

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災によって、東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所では前例の無い事態に陥った<sup>(1)</sup>。複数号機における同時事故、あるいは、地震によるインフラ、交通網の破壊等によって、福島第一原子力発電所では、当時運転状態にあった1号機から3号機において、冷却水の不足から炉心溶融が発生、その溶融した炉心燃料および炉内構造物の溶融したものの混合物であるデブリは、圧力容器を貫通して格納容器内に落下し、格納容器内のどこかに存在していると見られている<sup>(2)</sup>。福島第一原子力発電所に関しては、1号機から4号機までは2012年4月に、5・6号機に関しても2014年の1月に廃炉となった<sup>(3)</sup>一方、特に水素爆発を引き起こした4号機を含む事故を起こした1号機から4号機までの実際の廃止措置に関しては課題も多く<sup>(4)</sup>、その解決と廃止措置の実施が喫緊の課題となっている。

安全に廃止措置を実施するためには、そのデブリの位置や形状・成分組成を含む性状を知る必要がある。また、そのデブリから放出されている強烈な放射線から作業員を守るために、格納容器を水で満たす「冠水工法」が予定されているが<sup>(5)</sup>、そのためには格納容器からの漏水を止める必要がある。

デブリの性状を把握するための有望な手段としては、超音波による計測が挙げられる。超音波は物質を透過し、特に粒子の散乱等によって可視光線による光学測定が困難な状況での観測には有効であり、米国スリーマイル島(TMI)原子力発電所2号機の事故の後処理においても、超音波による計測が行われ、炉内の状況を明確に掴むことができた<sup>(6)</sup>。また、そのTMI2号機の場合においては単に炉心内の部分的に溶融した燃料の形状を計測したのみであったが、超音波による計測ではそのドップラー周波数を計算することによって、流動の様子をも知ることができる。その超音波による流速分布計測法(Ultrasonic Velocity Profiler method、UVP法)で、原子炉容器内の流動の様子を計測することによって、容器からの漏水に関する情報を得ることができる<sup>(7)</sup>。特に、一つの超音波センサから発信した一本の計測線のみからでは流速に関しても一次元的な情報が得られるのみだが、複数の方向から計測する、あるいはフェイズドアレイ法を用いた複数の計測線の情報を組み合わせることによって、二次元的・三次元的な流速情報を得られることができるようになり<sup>(8)</sup>、より正確な漏洩箇所特定ができるようになると思われる。

一方、2016年3月現在、事故を起こした原子炉の格納容器内は放射線量が1 Gy/h以上と高く<sup>(9)</sup>、作業員は格納容器内で長時間の作業をすることができない。従って、容器内で計測作業をするにはロボットを使うこととなる。一方、原子炉格納容器は厚い鋼鉄でできており、すぐ外側のさらに厚いコンクリート壁も合わせると、外側からの電波等によって位置計測・方向計測することは困難である。また、地震動により格納容器内に設置してあった設備が動いたことも考えられ、事故前の情報を基に地図をロボットにあらかじめ組み込んでその情報を基に動くこともリスクが高い。よって、ロボットは容器内で自立して周囲との位置関係を観測し、周囲の情報から自身の位置・方向を割り出し、活動することが求められる。

本研究では、事故を起こした格納容器内にロボットによって超音波センサを搬送し、ロボットの周囲の観測によって得られた情報から位置や方向を割り出し、超音波センサによる観測を行って、デブリの性状に関する情報を得るとともに、原子炉格納容器ならびに原子炉圧力容器からの漏水個所を容器内冷却水の流動挙動から特定する流体計測技術の開発に向けて、『超音波インテグレーション』として研究を行うことを目的とする。

ロボットの自己位置同定技術として、SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) 技術とビジュアル・オドメトリ (VO) 法を適用する。SLAM はレーザー光等を用いた距離計測を連続で行って距離データを含んだ画像を取得し、それを解析することで三次元的な形状データを取得しながらロボットが自走し、それを繰り返すことでロボット周辺の環境を計測しながら自己位置同定も行う技術である<sup>(10)</sup>。また、VO は画像解析から自己の移動量を推定する技術であり<sup>(11)</sup>、特に PCV 内部のグレーチング<sup>(12)</sup>上を移動する場合には、そのグレーチングを計測することで正確な移動量計測が期待できる技術である。これらの技術を適用し、ロボットとセンサの位置・方向同定を行う。

また、デブリ性状の取得に関して、超音波でデブリの形状取得を行うが、超音波は物質内を透過するので、微量ながらデブリ内部に浸透し、内部の情報を含んだ後反射して、また超音波センサに返ってくる成分もある。通常はその成分はごく微量であり、また、物質内部で乱反射する成分がノイズとなって働くため、そのデブリ内部の情報を抽出することは困難であるが、デブリの形状から乱反射によるノイズを予測し、それを差し引くことで、内部の情報を抽出できる可能性がある。この分野に関しては英国 Bristol 大学の Drinkwater 教授が第一人者であり<sup>(13)</sup>、その Drinkwater 教授と共同研究を行うことで、さらなるデブリ性状の所得に挑戦することとした。

以上の様に、超音波インテグレーションを英国と共同研究として行うことで、福島第一原子力発電所の廃炉に資する研究を行うことが本事業の目的である。

## 参考資料

- (1) 例えば 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会（通称 政府事故調）報告書 <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/post-2.html>, 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会（国会事故調）報告書 <http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3856371/naic.go.jp/>, 福島原子力事故調査委員会（東電事故調）報告書 [http://www.tepco.co.jp/cc/press/2012/1205628\\_1834.html](http://www.tepco.co.jp/cc/press/2012/1205628_1834.html) 他多数.
- (2) 東京電力, 「添付資料 1-8 熔融燃料の炉心下部への移行挙動」, [http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu15\\_j/images/151217j0118.pdf](http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu15_j/images/151217j0118.pdf).
- (3) 東京電力, 「福島第一原子力発電所 5 号機および 6 号機の廃炉について」, <https://www.nsr.go.jp/data/000051021.pdf>.
- (4) 廃炉・汚染水対策チーム会合資料, 「中長期ロードマップの進捗状況」, [http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/images1/images1/d160225\\_05-j.pdf](http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/images1/images1/d160225_05-j.pdf).

- (5) 原子力損害賠償・廃炉等支援機構, 「東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2015 ～2015年中長期ロードマップの改訂に向けて～」, [http://www.dd.ndf.go.jp/jp/strategic-plan/book/20150617\\_Technology\\_strategy\\_plan.pdf](http://www.dd.ndf.go.jp/jp/strategic-plan/book/20150617_Technology_strategy_plan.pdf).
- (6) Smithsonian National Museum of American History, “Three Mile Island: The Inside Story,” <http://americanhistory.si.edu/tmi/tmi07.htm>.
- (7) Y. Takeda, *Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow*, Springer (2012).
- (8) 福本拓哉, 塚田圭祐, 井原智則, 都築宣嘉, 木倉宏成, 「超音波フェイズドアレイ技術を用いた二次元流速分布計測法に関する研究」, 流体工学部門講演会講演論文集2014, GS04-2 (2014).
- (9) 東京電力, 福島第一原子力発電所サーベイマップ, <http://www.tepco.co.jp/decommision/news/data/sm/index-j.html>.
- (10) M. W. M. G. Dissanayake, P. Newman, S. Clark et al., “A Solution to the Simultaneous Localization and Map Building (SLAM) Problem,” *IEEE Trans. Robotics*, **17-3**, pp. 229-241 (2001).
- (11) D. Nister, O. Naroditsky, J. Bergan, “Visual Odometry,” *Proc. the 2004 IEEE Comp. Soc. Conf. Comp. Vis. Pat. Recog.*, **1**, pp. 1-652 – 1-659 (2004).
- (12) 東京電力, 「原子炉格納容器内部調査技術の開発」ペDESTAL外側\_1階グレーチング上調査(B1調査)の現地実証試験の結果について, [http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2015/images/handouts\\_150430\\_01-j.pdf](http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2015/images/handouts_150430_01-j.pdf) (2015).
- (13) B. W. Drinkwater, P. D. Wilcox, “Ultrasonic Arrays for Non-destructive Evaluation: A Review,” *NDT&E Int.*, **39-7**, pp. 525-541 (2006).

## 2. 業務計画

### 2.1 全体計画

溶融燃料デブリの取り出しの実現に向けて、英国の Bristol 大学との共同研究により、従来の超音波アレイ探傷法と超音波流速分布計測法(UVP 法)の信号処理技術を応用し、物体周りの形状と流れ場を同時計測可能な開口合成 UVP をさらに発展させた開口合成ベクトルマップ法を開発することで、燃料デブリの性状や分布状態を把握し、かつ炉内冷却水漏洩箇所を特定できる新しい超音波計測技術の開発を目的とする。また、SLAM (Simultaneous Localization And Mapping)技術を応用した搬送ロボットの自己位置同定技術と超音波計測を組み合わせたシステム開発を行い、小規模モックアップ施設にてその実現性を確かめることによって、超音波センサの位置決め精度を向上させることを目的とする。

英国側の研究内容も含めた日英共同研究としての全体計画を表 2.1-1 に、日本側の本業務の全体計画表を表 2.1-2 に示す。本業務では平成 27 年度から平成 29 年度までの三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 日英共同研究としての全体計画

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度
日本側 (東京工業大学、岡山大学、エネルギー総合工学研究所)	<ul style="list-style-type: none"> <li>超音波計測の開口合成適用研究               <ul style="list-style-type: none"> <li>-三次元 UVP による漏洩箇所の検出高度化</li> <li>- UVP と開口合成の融合</li> <li>- 開口合成の手法最適化</li> <li>- 超音波計測システムの統合化</li> </ul> </li> <li>センサ搬送用移動ロボット・SLAM の研究開発               <ul style="list-style-type: none"> <li>-ロボット・センサの位置決め・方向決め精度研究</li> <li>-ロボット設計のための構造解析等の計算解析</li> </ul> </li> <li>研究推進</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>超音波計測の開口合成適用研究               <ul style="list-style-type: none"> <li>-三次元 UVP による漏洩箇所の検出高度化</li> <li>- UVP と開口合成の融合</li> <li>- 開口合成の手法最適化</li> <li>- 超音波計測システムの統合化</li> </ul> </li> <li>センサ搬送用移動ロボット・SLAM の研究開発               <ul style="list-style-type: none"> <li>-ロボット・センサの位置決め・方向決め精度研究</li> <li>-センサ搬送用移動ロボットの設計</li> <li>-ロボット設計のための構造解析等の計算解析</li> </ul> </li> <li>研究推進</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>超音波計測の開口合成適用研究               <ul style="list-style-type: none"> <li>-三次元 UVP による漏洩箇所の検出高度化</li> <li>- UVP と開口合成の融合</li> <li>- 開口合成の手法最適化</li> <li>- 超音波計測システムの統合化</li> </ul> </li> <li>センサ搬送用移動ロボット・SLAM の研究開発               <ul style="list-style-type: none"> <li>-ロボット・センサの位置決め・方向決め精度研究</li> <li>-センサ搬送用移動ロボットの設計</li> <li>-ロボット設計のための構造解析等の計算解析</li> </ul> </li> <li>研究推進</li> </ul>
英国側 (Bristol 大学)	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉の構造および環境に関する理解</li> <li>模擬デブリの設計、作製</li> <li>水槽とコンピュータ、超音波アレイ計測システムの構築</li> <li>研究推進</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>小規模実験装置の製作</li> <li>超音波探査に関する数値モデルの作成、検証</li> <li>最適な計測条件の策定と、その条件に最適な超音波アレイ計測システムの選定</li> <li>研究推進</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>模擬デブリを使った計測のまとめ</li> <li>デブリ内部の計測に関する評価</li> <li>英国側と日本側のシステムの統合</li> <li>研究推進</li> </ul>

表 2.1-2 全体計画表（日本側）

項目	年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度
(1) 超音波計測の開口合成適用研究				
① 三次元UVPによる漏洩箇所の検出高度化		実験装置の設計・改修	装置作成・試験	評価・センサ設計最適化
② UVPと開口合成の融合		センサの設計・試作	実験・最適化	実験・評価
③ 開口合成の手法最適化（岡山大学）		アレイ探傷用設備の試作	実験およびアレイ探触子設計検討	システム高度化および計測精度の評価
④ 超音波計測システムの統合化		既存ロボットによる試験	ロボットシステムの試作および試運転	統合化・まとめ
(2) センサ搬送用移動ロボット・SLAMの研究開発				
① ロボット・センサの位置決め・方向決め精度研究		位置計測技術の検討	SLAM技術の試験	SLAM技術の改良および評価
② センサ搬送用移動ロボットの設計			装置の選定・評価および移動ロボットの試作	移動ロボットの改良および評価
③ ロボット設計のための構造解析等の計算解析（エネルギー総合工学研究所）		試算解析	解析コード評価、音場・流体解析	解析手法の最適化
(3) 研究推進		まとめ・評価	まとめ・評価	まとめ・評価

## 2.2 各年度計画

各年度の計画の概要を以下に示す。

平成27年度は、(1) 超音波計測の開口合成適用研究 ①三次元 UVP による漏洩箇所の検出高度化において、原子炉格納容器からの冷却水漏洩に係わる漏洩箇所の特定に関して、フェイズドアレイ技術を適用するため、既存の超音波センサと新規購入する超音波パルサーレーザ（フェイズドアレイ仕様）を用いて、16CH フェイズド UVP による漏洩箇所検出計測の高度化について試験・検討する。T字型の xy-yz 方向の多次元計測用超音波センサを開発・試作し、三次元フェイズドアレイベクトルマップ法の可能性を検討する。(1) ②UVP と開口合成の融合においては従来の1つの超音波センサを用いて流速分布を測定する UVP 法に、複数の素子からの信号を処理して物体表面を明確にする超音波アレイイメージング法(開口合成法)を融合させる信号処理方法を検討する。UVP 法に必要である反射体からの微弱なエコー信号にはノイズ対策が必要であり、開口合成法との融合に必要な新たなアルゴリズムを構築するために、いくつかの開口合成法を適用し、それらが UVP 法に融合できるかどうかの結論を得る。(1) ③開口合成の手法最適化（再委託先：岡山大学）においては、既存の超音波センサと、新規に購入するマルチプレクサー（スイッチング装置）を用い、開口合成技術の高度化に向けた手法の最適化研究を行う。多数の素子から得られる信号をどう組み合わせると少ない計算負荷で正確な信号が得られるか試験する。(1) ④超音波計測システムの統合化においては、フェイズド UVP と開口合成のシステムを、ロボットに搭載したうえで計測に用いることができるようにシステムを設計し、予備試験する。ロボットへの搭載に関しては、搭載試験を既存の汎用ロボットを使用して行う。(2)センサ搬送用移動ロボット・SLAMの研究開発 ①ロボット・センサの位置決め・方向決め精度研究においては、ロボットの位置決め・方向決め技術として、ビジュアル・オドメトリ (VO) 法の構築を行うため

に、新規に VO 用カメラシステムを構築し、グレーチングを通した超音波センサのデブリ計測可能性について検討するとともに、構築した VO システムによるロボット搬送の位置決め・方向決めを行い、その精度を試運転により調べる。(2) ③ロボット設計のための構造解析等の計算解析（再委託先：エネルギー総合工学研究所）においてはロボット設計上で必要となる、応力分布やその構造に関するデータを、コンピュータ解析によって得て、それをロボット設計に生かすために、コンピュータ解析のためのサーバを購入し、他の拠点の技術者にもサーバが利用できるようなネットワーク環境を整備する。また、フリーの構造解析ソフトで、コンピュータの試運転を兼ねた試算解析を行う。また、(3)研究推進においては研究代表者の下で各研究項目間および英国との連携を密にして研究を進める。

平成 28 年度は、(1) 超音波計測の開口合成適用研究 ①三次元 UVP による漏洩箇所の検出高度化において、原子炉格納容器からの冷却水漏洩に係わる漏洩箇所の特定に関して、三次元フェイズドアレイベクトルマップ法の実装を行う。平成 27 年度に作製した xy-yz 方向の多次元計測用超音波センサを十分に活用するために、超音波パルサーレシーバ(フェイズドアレイ仕様)を改良し、フェイズド UVP による漏洩箇所検出計測の高度化を行う。三次元フェイズドアレイベクトルマップ法を既存の試験設備内で試験し、計算解析結果等と比較してその精度を検証する。(1) ② UVP と開口合成の融合においては平成 27 年度に検討した、1つの超音波センサを用いて流速分布を測定する UVP 法に、複数の素子からの信号を処理して物体表面を明確にする超音波アレイイメージング法(開口合成法)を融合させる信号処理方法を適用して、UVP 法と開口合成の融合を進める。既存の三次元ステージを備えた水槽内で、実際に多チャンネルを用いて UVP 解析が可能なエコー信号を取得し、その信号を開口合成した場合の計測精度を検証する。(1) ③ 開口合成の手法最適化(再委託先：岡山大学)においては、平成 27 年度の検討に基づいて、開口合成技術の高度化に向けた手法の最適化を引き続き行う。既存の開口合成用超音波センサと試験装置を用いて実際に試験を行い、開口合成の手法最適化に関する基礎的な知見を得るとともに、平成 29 年度に購入予定のものを含めた最終的な仕様での試験に対して準備する。(1) ④ 超音波計測システムの統合化においては、フェイズド UVP と開口合成のシステムを搭載するロボットとして、平成 27 年度に設計した計測用のセンサ等の部品に関して現時点での要求事項等をまとめ、ロボット設計の制限等を考慮しながらシステム統合のための設計を行い、試作する。また、ロボットシステムを本試験するモックアップ施設を製作する。既存の設備を、実炉内での計測を模擬した設備に改良し、そこでのロボットシステム試運転を行う。(2) センサ搬送用移動ロボット・SLAM の研究開発 ①ロボット・センサの位置決め・方向決め精度研究においては、SLAM 技術の研究開発用のロボットに、既存のもので本用途に適用可能であると新たに判明したレーザレンジファインダを搭載し、その位置決め・方向決め精度を調べる。実炉を模擬した試験場所で SLAM 技術ならびに平成 27 年度に検討したビジュアルオドメトリ技術を応用

した搬送ロボットの自己位置同定技術の精度を明らかにし、その実用性を調べる。(2)  
 ② センサ搬送用移動ロボットの設計においては、センサ搬送用のロボットに関して、具  
 体的な設計を行う。ロボットの足回りやセンサを移動・保持させるウィンチ機構、セン  
 サの配線の仕方等を、位置決め・方向決めの精度や強度、ワイヤのねじれ等に留意しな  
 がら検討し、試作を行い、試運転を行う。(2) ③ ロボット設計のための構造解析等の計  
 算解析（再委託先：エネルギー総合工学研究所）においては、ロボット設計上で必要と  
 なる応力分布等の計算解析を引き続き行う。平成 27 年度に行った応力解析に関する試計  
 算の結果を活かして、商用 3D-CAD（Creo Parametric）を用いた本計算を行うとともに、  
 超音波計測で不可欠となる音場解析や、本事業で行う実験水槽の中での流動挙動に関し  
 て、それぞれ音場解析コード ComWAVE や 3D-CFD ANSYS FLUENT を用いた計算解析  
 を行う。(3) 研究推進においては、研究代表者の下で各研究項目間および英国との連携を  
 密にして研究を進める。

平成 29 年度の計画の概要は以下の通りとする。平成 29 年度の本業務の月別計画表  
 （日本側）を表 2.2-1 に示す。

表 2.2-1 業務項目と実施日程（日本側）

区分	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
(1) 超音波計測の開口合成適用研究												
① 三次元 UVP による漏洩箇所の検出高 度化	←											→
② UVP と開口合成の融合	←											→
③ 開口合成の手法最適化（岡山大学）	←											→
④ 超音波計測システムの統合化	←											→
(2) センサ搬送用移動ロボット・SLAM の 研究開発												
① ロボット・センサの位置決め・方向 決め精度研究	←											→
② センサ搬送用移動ロボットの設計	←											→
③ ロボット設計のための構造解析等の 計算解析（エネルギー総合工学研究所）	←											→
(3) 研究推進	←											→

(1)超音波計測の開口合成適用研究

①三次元 UVP による漏洩箇所の検出高度化

原子炉格納容器からの冷却水漏洩に係わる漏洩箇所の特定に関して、三次元フェ  
 イズドアレイベクトルマップ法の精度向上を行う。平成 28 年度に改良した xy-yz 方



向の多次元計測用超音波ベクトルマップシステムに関して、解析用のソフトウェアを改良しさらなる精度向上を図る。改良したソフトウェアを含むシステム全体を既存の小型試験設備内で試験するとともに、実際の原子炉格納容器漏水検知への応用について評価する。

#### ②UVP と開口合成の融合

溶融デブリを模擬したサンプル（模擬デブリ）を作製し、事故を起こした炉内で注水されている冷却水による強制対流の模擬、あるいは崩壊熱対流の模擬をした体系において、UVP と開口合成の同時計測を行い、本手法の利点と欠点に関して評価する。

#### ③開口合成の手法最適化（再委託先：岡山大学）

平成 27 年度・28 年度の検討に基づいて、パルスレーザと開口合成用のリニアアレイセンサを購入し、試験装置を完成させ、最適化された開口合成技術の検証を行う。溶融デブリを開口合成技術で捉える際の精度と解析速度に関して検討し、実炉内で自立運転を行うロボットに搭載するのに適切な処理速度と計測精度をもつ様、開口合成手法を最適化する。

#### ④超音波計測システムの統合化

格納容器内を模擬した環境で、上記のセンサシステムを搭載した搬送用ロボットを試験する。搬送用ロボット単独での運転試験に続き、ロボットと超音波計測とを統合したシステムでの運転試験を行い、実炉内で運転可能な統合化ロボットの仕様をまとめる。試験設備として、平成 28 年度までに改良し作製した小型試験設備に、さらに複数個所での計測を模擬するための実験水槽を増設しこれを用いるとともに、日本原子力研究開発機構(JAEA)が管理する福島県楡葉町の JAEA 楡葉遠隔技術開発センターにある大規模試験設備を用いて模擬実験を行い、本ロボット搬送超音波統合システムの有効性を示す。

### (2)センサ搬送用移動ロボット・SLAM の研究開発

#### ①ロボット・センサの位置決め・方向決め精度研究

センサ搬送用移動ロボットを用いて、位置決め・方向決めの手法を確立し、その精度に関して結論付けるとともに、格納容器内でのロボット・センサ位置決め精度を評価する。

#### ②センサ搬送用移動ロボットの設計

センサ搬送用の移動ロボットに関して、平成 29 年度も試運転を行い、改良を行う。ロボットの試作と試運転を完了させ、実炉内での運用に関して改善点があればそれを抽出する。

#### ③ロボット設計のための構造解析等の計算解析（再委託先：エネルギー総合工学研究所）

S L A Mや多次元フェイズドアレイによって得られる三次元データの表示方法に関して検討し、自作あるいは公開されている三次元表示用ソフトを用いてユーザーインターフェイスを改良する。また、ロボット設計上で必要な計算解析と、計測精度評価のための計算解析に関して計算サーバによる解析を行い、ロボットシステムの開発に寄与する。

### (3)研究推進

研究代表者の下で各研究項目間および英国との連携を密にして研究を進める。

### 3. 業務の実施内容及び成果

#### 3.1 超音波計測の開口合成適用研究 (H27~H29)

##### 3.1.1 三次元 UVP による漏洩箇所の検出高度化 (H27~H29)

平成27年度は原子炉格納容器からの冷却水漏洩に係わる漏洩箇所の特定に関して、フェイズドアレイ技術を適用するため、既存の超音波センサと新規購入した超音波パルサーレーバ(フェイズドアレイ仕様)を用いて、16CH フェイズド UVP による漏洩箇所検出計測の高度化について試験・検討した。T字型の xy-yz 方向の多次元計測用超音波センサを開発・試作し、三次元フェイズドアレイベクトルマップ法の可能性を検討した。新規に開発・試作した多次元計測用超音波センサを用いた計測装置を構築し、xy-yz の二方向へフェイズドアレイ技術を適用した超音波計測を行ったところ、流体の三次元的な挙動を計測することができ、三次元フェイズドアレイベクトルマップ法の有効性が示された。

平成28年度は原子炉格納容器からの冷却水漏洩に係わる漏洩箇所の特定に関して、三次元フェイズドアレイベクトルマップ法の実装を行った。平成27年度に作製した xy-yz 方向の多次元計測用超音波センサを十分に活用するために、超音波パルサーレーバ(フェイズドアレイ仕様)を改良し、フェイズド UVP による漏洩箇所検出計測の高度化を行った。三次元フェイズドアレイベクトルマップ法を既存の試験設備内で試験し、計算解析結果等と比較してその精度を検証した。多次元計測用超音波計測装置を拡張するとともに計測ソフトウェアを改良し、xy-yz の二方向へフェイズドアレイ技術を適用した超音波計測の高度化を行ったところ、流体の三次元的な挙動を計測することができ、数値流体解析結果と比較し三次元フェイズドアレイベクトルマップ法の精度を確認した。

平成29年度は xy-yz 方向の多次元計測用超音波ベクトルマップシステムに関して、さらなる精度向上を図るために、誤ベクトルの低減に取り組んだ。センサの可搬性を重視して小型フェイズドアレイセンサを構成した際には、走査対象に対して開口が10~100倍以上と小さくなる。ベクトルマップシステムにおいては超音波センサー素子の物理的離間距離を起因とするドップラー遷移周波数の差異に着目し、本来は1次元計測である UVP 計測を多次元計測へと拡張している。従って、開口が小さい時には必然的に計測誤差が増大する。この課題を低減させるべく、本研究においては新たにノイズモデルの導入を行った。これまでに、速度ベクトルは次の式を全素子に対して連立して求めている。

$$\begin{pmatrix} e'_{1x} & e'_{1y} \\ e'_{2x} & e'_{2y} \\ \vdots & \vdots \\ e'_{Nx} & e'_{Ny} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{pmatrix}$$

ただし、ここで再構成ベクトル $\vec{e}'$ は次式で定義される。

$$\vec{e}' \equiv (\vec{e}_T + \vec{e}_R)/2$$

本研究で開発した超音波アレイセンサを用いた場合においては、16 素子からのドップラー遷移周波数によって2つの未知速度成分を推定することとなる。従って、上式を見て分かる通り、本条件は数学的に優決定系となり、厳密解が定まらない。そこで、新たにノイズモデルを導入し、この解決を行った。ノイズを扱うエラー係数  $ER_i$  を次式のように定義する。

$$v_i = \vec{e}'_i \cdot \vec{v} + ER_i$$

ここで、計測される速度値の一部が雑音に転換されたと考え、さらに、素子の指向性  $D$  に比例して計測走査面内でもその値は変わると考え、信号対雑音比  $SNR$  を導入する。

$$\frac{1}{SNR} \cdot \vec{v} = \sum \vec{e}'_i \cdot ER_i \cdot D_T \cdot D_{Ri}$$

ここで、素子の指向性に関しては、素子ピッチ  $a$ 、中心周波数  $f_c$ 、音速  $c$  を用いて次式により求める。

$$D = \text{sinc}\left(\frac{\pi f_c a}{c}\right)$$

これらを連立することにより、再構成式を次式のように書き直すことが出来る。この式をLU分解等で解くことにより、それぞれの計測体積において  $N$  次のエラー係数と2成分速度値を求めることが出来る。

$$\begin{pmatrix} e'_{1x} & e'_{1y} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ e'_{2x} & e'_{2y} & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e'_{Nx} & e'_{Ny} & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -1/D_T \cdot SNR & 0 & e'_{1x} \cdot D_{R1} & e'_{2x} \cdot D_{R2} & \dots & e'_{Nx} \cdot D_{RN} \\ 0 & -1/D_T \cdot SNR & e'_{1y} \cdot D_{R1} & e'_{2y} \cdot D_{R2} & \dots & e'_{Ny} \cdot D_{RN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ ER_1 \\ ER_2 \\ \vdots \\ ER_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

本アルゴリズムを適用した結果を続いて示す。

図 3.1-1 に示す実験装置を用いて、漏洩箇所検出を行った。計測水槽サイズは直径 580 mm、高さ 1,500 mm で流出口径は 60 mm、流量は毎分 9 リットルである。従来手法による再構成結果を図 3.1-2 に、新たに提案した手法による再構成結果を図 3.1-3 に示す。これらを比べると、上述したアルゴリズムにより明確に誤ベクトルに起因するノイズが低減していることが確認出来る。

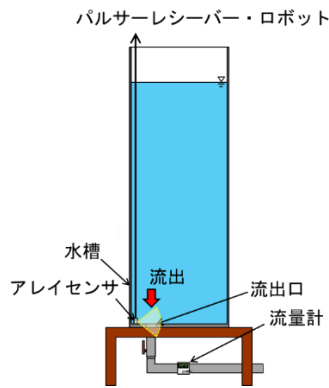


図 3.1-1 実験装置図

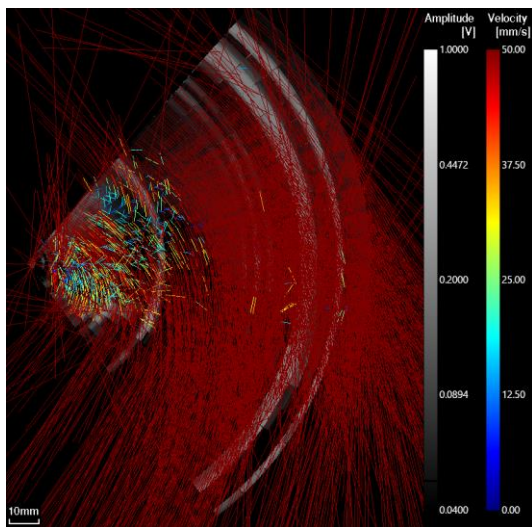


図 3.1-2 従来手法による速度ベクトル再構成結果

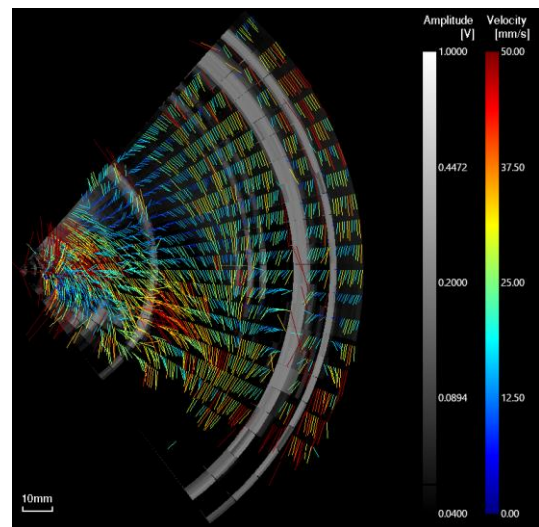


図 3.1-3 新たな信号処理手法による速度ベクトル再構成結果

これまでに開発したベクトルマップ法に関して、JAEA 檜葉遠隔技術開発センターの大型水槽装置（図 3.1-25）で評価試験を行った。水槽上部の流出口に向けて約 45 度の角度でセンサを垂下し、計測を行った。計測時の水温は 9°C で、水槽 80m<sup>3</sup> に対し、8 kg（体積比率 3.8×10<sup>-3</sup>%）のカオリナイトをトレーサとして投入している。計測結果を図 3.1-4 に示す。なお、誤ベクトル除去アルゴリズムに加えて、実験流体力学分野で広く用いられているメディアンフィルタ（3×3 カーネル）を適用している。開口合成結果により、水槽の側面の曲線が明確に計測されており、流出口に向けて、強い流れが見られる。流出口内については、多重反射等の影響により、流れが見られないものの、漏洩箇所検出という観点においては開発した技術の有効性が示される結果となったと言える。

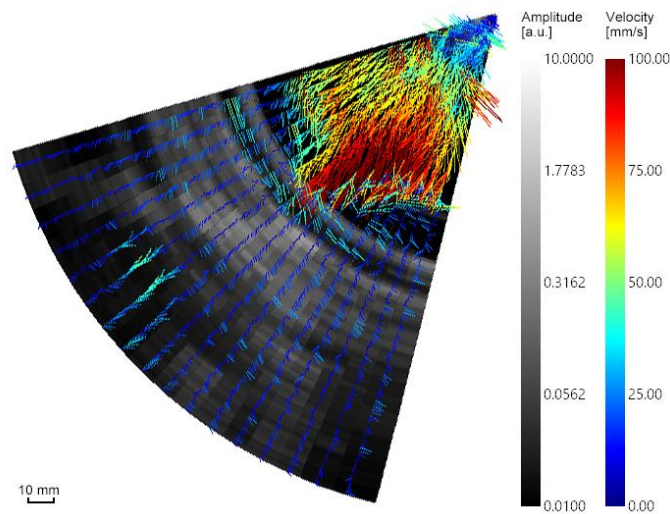


図 3.1-4 檜葉遠隔技術開発センターでの評価試験結果

沸騰二相流のような多相流を計測可能な信号処理手法を考案し、UVP 計測に取り込むとともに、新たに 2 次元および 3 次元ベクトル UVP 法を考案し、新規にセンサを設計・製作した。まず、多相流計測 UVP の検証として垂直円管内気泡流による気液二相流への適用を行った。図 3.1-5 に気相・液相流速分布の分離信号処理法の概要を示す。気相および液相は、水中に懸濁したナイロン粒子と気泡からのエコー信号強度差に基づき分離した。図 3.1-6 に本手法を用いた気泡流の計測結果を示す。各相の分離により気泡の影響が低減された。

次に、2 次元および 3 次元ベクトル UVP の検証として水平円管内旋回流の計測を行った。図 3.1-7 に多次元ベクトル UVP 法の概略図を示す。本手法は複数の受信素子を用い、各素子から観測した複数の速度成分に基づいたドップラー信号を取得することで、流速ベクトルを算出する。図 3.1-8 に製作した 3 次元ベクトル UVP センサの外観を、また、

(b) 計測結果に試験に用いた既存の小型試験設備の実験装置図と本手法による配管内旋回流の計測結果を示す。本計測結果から、本手法により複雑な流れ場の計測が可能となることを示した。

超音波計測の炉内適用の懸念事項として、超音波センサの耐放射線性が挙げられる。そこで、東京工業大学コバルト照射室実験施設を利用して、Co-60 を利用した照射実験を実施した (図 3.1-10)。本照射実験施設は、線量率最大 6.19 kGy/h でガンマ線を照射することが可能であり、線量率は線源との距離で調整が可能である。本実験では、一定時間照射中の超音波センサの性能を評価するために、Co-60 照射中のセンサを用いて、単純参照平面からのエコー信号を取得・観察しその影響を調査した。なお、照射はセンサおよび単純参照平面に対して行い、照射中の測定のためにセンサと同軸ケ

ケーブルを繋げ、操作機器類を照射室外に置いて遠隔で操作した。結果を表 3.1-1 に示す。最大積算線量 9600 Gy のガンマ線照射に対して、反射波強度に変化はなく、図 3.1-11、図 3.1-12 が示すように、照射前後のセンサの音響強度分布にも大きな影響は見られなかった。この実験から、超音波センサは高放射線環境下でも十分に機能することが実証された。

これら成果の一部を国際会議（本報告書 表 3.4-1 学会等における口頭・ポスター発表の実績[3]）にて発表した。

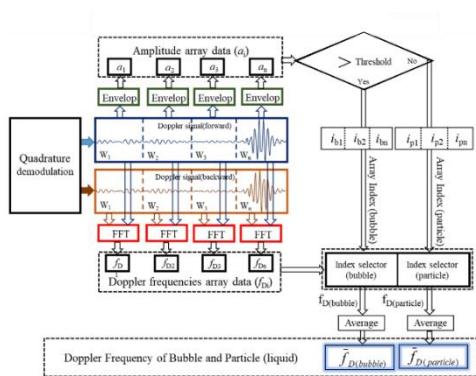


図 3.1-5 多相流計測 UVP の信号処理

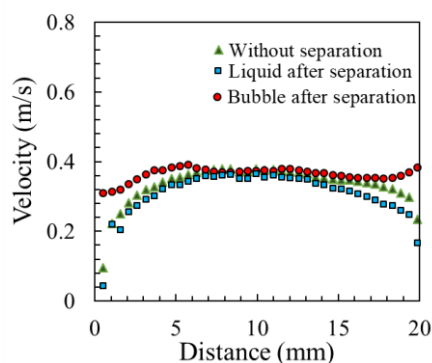


図 3.1-6 垂直円管内気泡流の計測結果

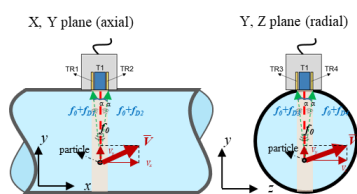


図 3.1-7 ベクトル UVP 法の概略

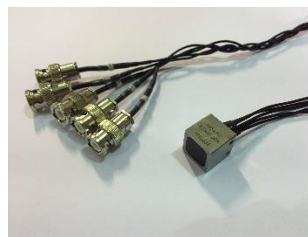
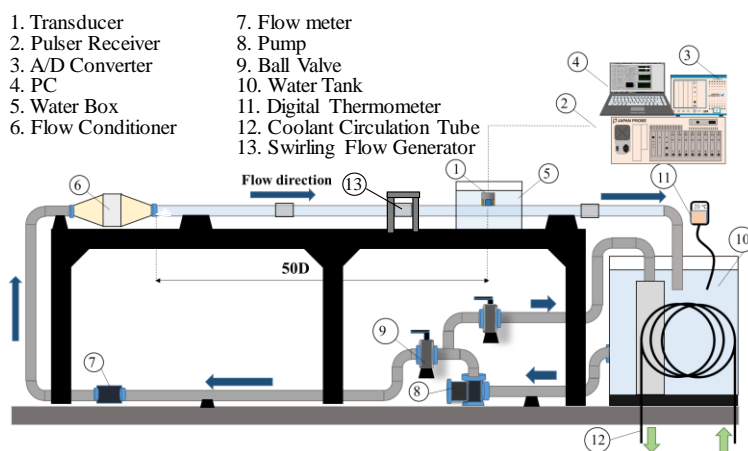
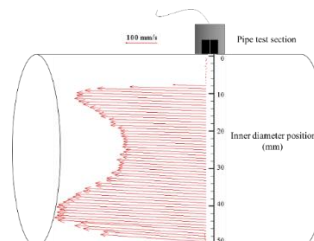


図 3.1-8 ベクトル UVP センサ



(a) 実験装置図



(b) 計測結果

図 3.1-9 ベクトル UVP による水平円管内旋回流の計測



図 3.1-10 Co-60 照射実験の外観

表 3.1-1 積算線量と反射波強度変化の関係

	照射時間(min)	線源との距離(mm)	積算線量(Gy)	反射波強度変化
実験 1	120	200	1280	なし
実験 2	120	200	2560	なし
実験 3	120	200	3840	なし
実験 4	120	200	5120	なし
実験 5	120	200	6400	なし
実験 6	120	200	7680	なし
実験 7	120	200	8960	なし
実験 8	60	200	9600	なし

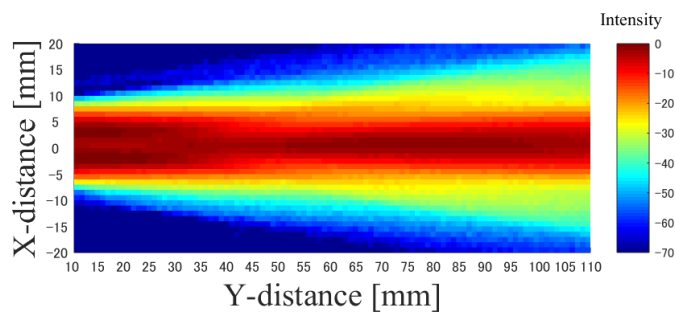


図 3.1-11 照射前の音響強度分布



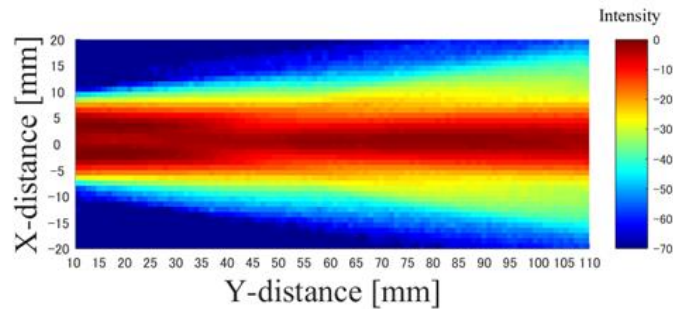


図 3.1-12 照射後の音響強度分布

### 3.1.2 UVP と開口合成の融合 (H27~H29)

平成 27 年度は従来の 1 つの超音波センサを用いて流速分布を測定する UVP 法に、複数の素子からの信号を処理して物体表面を明確にする超音波アレイイメージング法(開口合成法)を融合させる信号処理方法を検討した。UVP 法に必要である反射体からの微弱なエコー信号にはノイズ対策が必要であり、開口合成法との融合に必要な新たなアルゴリズムを構築するために、いくつかの種類 of 開口合成法を適用し、それらが UVP 法に融合できるかどうかの結論を得た。開口合成法および UVP 法において、各手法で競合する計測条件を抽出するとともに、フーリエイメージング法の枠組みで定式化し、開口合成法と UVP 法が融合可能であることを示した。

平成 28 年度は平成 27 年度に検討した、1 つの超音波センサを用いて流速分布を測定する UVP 法に複数の素子からの信号を処理して物体表面を明確にする超音波アレイイメージング法(開口合成法)を融合させる信号処理方法において、装置の改良を行いながら UVP 法と開口合成の融合を進めた。既存の三次元ステージを備えた水槽内で、多チャンネル UVP 解析が可能なエコー信号を取得し、その信号を開口合成した場合の計測精度を検証した。開口合成法と UVP 法の融合を行い、模擬デブリの形状とその周囲の流れ場を同時計測できる一次元開口合成 UVP 法を構築するとともに、三次元ステージを用いて形状測定精度を検証した。

平成 29 年度は溶融デブリを模擬したサンプル(模擬デブリ)を作製し、事故を起こした炉内で注水されている冷却水による強制対流の模擬、あるいは崩壊熱対流を模擬した実験体系において、UVP 法と開口合成法を用いた同時計測を行い、本手法の利点と欠点に関して評価した。

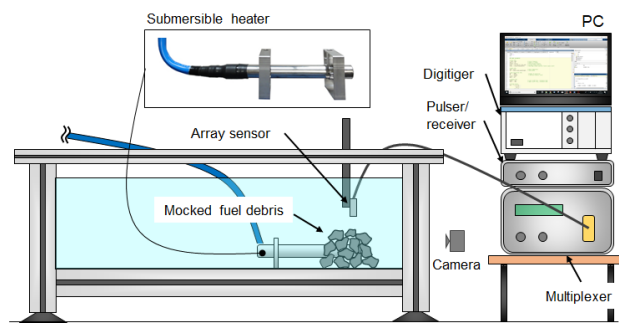
実験では、崩壊熱対流を模擬した実験体系で UVP 法と開口合成法を用いた同時計測手法の構築を行い、本手法の利点と欠点に関して評価した。図 3.1-13(a)に、本実験で使用した実験装置の全体図を示す。本装置は、水槽(縦: 1200 mm、横: 450 mm、高さ: 450 mm)とステンレス潜水型ヒーター(型番: YDS-11 (100V1 φ 1kW)、日本ヒーター株式会社)で構成されている。本実験では、崩壊熱を発する溶融デブリを模擬する

ために、図のように水槽底面に設置した潜水型ヒーターの上に小石を積み重ねた。この集積物体を模擬デブリと見立てて、崩壊熱による自然対流が無い場合と有る場合、つまり潜水型ヒーターOFF と ON の場合において計測を実施した。本計測では、上記の「事故を起こした炉内で注水されている冷却水」としてトレーサー粒子として平均粒径  $80\ \mu\text{m}$  のナイロン粒子を散布させた水道水を用いた。図 3.1-13(b)に、図 3.1-13(a)内のカメラで撮影した計測部の写真を示す。本図で示すように、アレイセンサは模擬デブリの頂点部から高さ  $100\ \text{mm}$  の位置に設置した。

本実験における実験条件およびデータ取得条件は、次の通りである。実験条件；水温： $17.0^\circ\text{C}$ 、印加電圧（潜水型ヒーター）： $50\ \text{V}$ 、データ取得；印加電圧（アレイセンサ）： $150\ \text{V}$ 、波数：8、ハイパスフィルタ： $4\ \text{MHz}$ 、ローパスフィルタ： $12\ \text{MHz}$ 、ゲイン： $40\ \text{dB}$ 、パルス繰り返し周波数： $2\ \text{kHz}$ 、パルス繰り返し数：128回。なお、開口合成法で用いるデータはパルス繰り返し回数 128回で取得した信号の平均で、UVP法ではパルス繰り返し回数 128回で1プロファイルを算出するとして1プロファイルのみの取得とした。

図 3.1-14 に本実験結果を示す。本実験結果は、既に報告した改良版開口合成アルゴリズムを用いてアレイセンサ開口幅内と深さ  $30\sim 150\ \text{mm}$  の領域を  $0.5\ \text{mm}$  ピッチで画像化した結果に、UVP 計測結果をベクトル表記で付け加えた結果である。なお、画像化における副開口幅は 17 素子で、ベクトルは表面形状と推定された深さ位置以上の結果のみをカラープロットしている。この結果、図 3.1-14(a)の潜水型ヒーターが OFF 時は、計測領域において統一性の無い流れが生じているのに対し、図 3.1-14(b)の ON 時は横軸の  $-10\sim +30\ \text{mm}$  の区間から上昇する一連の流れを捉えている。この流れは、潜水型ヒーターの加熱によって生じた自然対流であると推測される。従って、UVP と開口合成を融合した計測システムを用いることで、既に(3.1.1)内で報告したように漏洩位置特定に加え、本結果から溶融デブリの崩壊熱対流を計測でき、なおかつ、崩壊熱を有する構造物を識別できる可能性が示唆された。

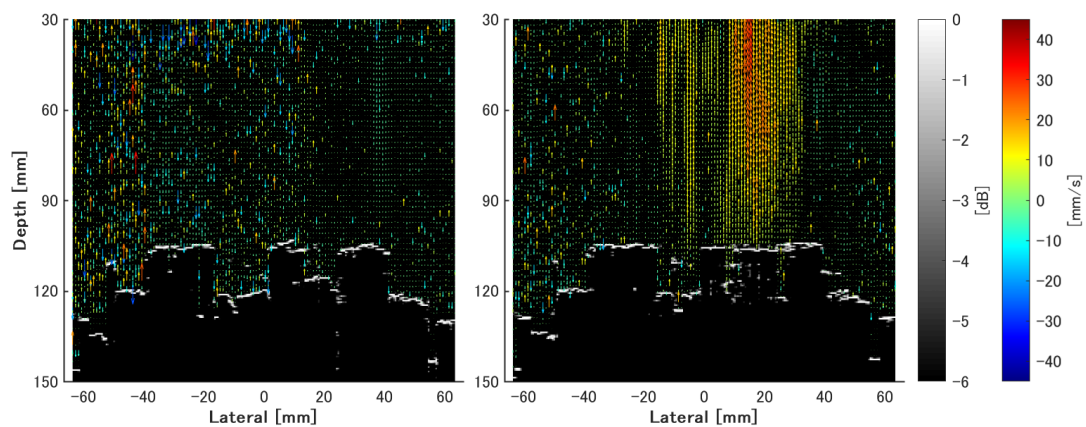
しかしその一方、本実験結果から潜水型ヒーターの加熱によってヒーター表面に気泡が形成されることに加えて、離脱した気泡がアレイセンサ表面に付着する現象が確認された。これらの気泡により、条件によっては計測精度の低下することが懸念される。よって、対策を練る必要があると考えられる。



(a) 全体

(b) 計測部

図 3.1-13 実験装置概略図



(a) スイッチ OFF

(b) スイッチ ON

図 3.1-14 崩壊熱対流を模擬した実験における計測結果

### 参考文献

- (1) Takuya KAWACHI, Hiroshige KIKURA, Robert MALKIN and Bruce W. DRINKWATER, Development of Simultaneous Measurement System for Flow Visualization and Surface Reconstruction using Ultrasonic Array Sensors, 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Iguazu Falls, Brazil (2017-6), pp.1-6, Paper No. OC.121.

### 3.1.3 開口合成の手法最適化（再委託先：岡山大学）（H27～H29）

平成 27 年度は既存の超音波センサと、新規に購入したマルチプレクサー（スイッチング装置）を用い、開口合成技術の高度化に向けた手法の最適化研究を行った。多数の素子から得られる信号をどう組み合わせると少ない計算負荷で正確な信号が得られるか試験した。超音波の計測は水浸法により、探触子を機械的に走

査して行う。その結果を用いて超音波画像を合成し、不規則な物体表面形状を再構成するうえで望ましい計測ラインやピッチのとり方について調べた。

平成 28 年度は平成 27 年度の検討に基づいて、開口合成技術の高度化に向けた手法の最適化を行った。既存の開口合成用超音波センサと試験装置を用いて実際に試験を行い、開口合成の手法最適化に関する基礎的な知見を得るとともに、平成 29 年度に購入計画しているパルサーレーザと開口合成用超音波リニアアレイセンサの最終的仕様を決定し、これらを用いた試験の準備を行った。現有の三次元 4 軸ステージを用いた二次元計測法による開口合成技術の高度化と検証を行うとともに、平成 29 年度に開発する開口合成システムの仕様を決定した。

平成 29 年度は平成 27 年度・28 年度の検討に基づいて、パルサーレーザと開口合成用のリニアアレイセンサを購入し、試験装置を完成させ、最適化された開口合成技術の検証を行った。溶融デブリを開口合成技術で捉える際の精度と解析速度に関して検討し、実炉内で自立運転を行うロボットに搭載するのに適切な処理速度と計測精度をもつ様、開口合成手法を最適化した。

平成 27 から 28 年度までの研究では、超音波探傷試験用の汎用探触子で得られた計測結果を、開口合成法により画像化処理することで、模擬デブリの複雑かつ三次元的な表面形状を再構成できることを示すことができた。ただし、画像化のための波形計測は、単一の圧電素子から成る探触子を機械的に走査し、試料上部から 500 点程度の計測点において行っていた。そのため、一つの三次元画像合成のために、数時間程度の計測時間を要し、この効率化が課題として残されていた。また、超音波探触子を並進移動させて一定の範囲をスキャンすることは、検査領域までのアプローチに関する制約を考慮すると現実的ではなく、本プロジェクトで開発したロボットシステムで実現可能な搬送とスキャン方法のものと利用できるよう、開口合成法を最適化する作業も、未検討の課題であった。以上を踏まえ、平成 29 年度は、ロボットの機構と炉内環境を考慮した、センサの搬送・移動方法の提案と、計測の効率化について検討を行った。以下、その成果について報告を行う。

#### (1) 超音波センサの搬送と移動方法の提案

炉内でのセンサの搬送は、本プロジェクトで開発を行ったウィンチ機構を有する自走ロボットによって行うことを想定している。また、検査領域近傍へのアクセスにおいては、センサ類をペDESTALの部材であるグレーチングを通して懸垂、降下させることが検討されている。従って、グレーチングの格子間隔がセンササイズの上限を決め、これは概ね 2~3 cm と見積もられる。一方、超音波による画像化の面からは、多数の素子をもつアレイ探触子の利用が画像化の精度、効率とも有利である。しかしながら、素子数の増加はセンササイズが大きくなることを意味し、画像化性能と搬送面からの要求は相反するものとなる。特に、三次元イ

メーキングに通常用いられる、マトリクスアレイ探触子では、グレーチング幅隔程度のごく小さなものでは、十分な画像化範囲をカバーすることはできない。そこで、本研究では、素子を一次元的に配置したリニアアレイ探触子を用い、これを図 3.1-15 に示すような方法で、搬送および走査することを提案した。図 3.1-15(a)に示すように、リニアアレイ探触子の開口面は、素子が整列する方向に細長い長方形状となるが、センサ筐体の高さとは幅は、素子サイズ程度のごく小さなものを制作することができる。よって、図 3.1-15(a)のように、センサの長手方向を鉛直に向けてウインチケーブルに取り付けることができれば、図 3.1-15(b)のようにグレーチングを十分に通過させることができる。また、センサが検査領域近傍に達した後は（図 3.1-15(c)）、自重を利用するなどしてデブリ方向に開口面が向くようセンサを回転させることで、対象物からのエコーを計測することができる（図 3.1 15(d)）。最後に、ウインチケーブル（鉛直軸）にトルクを加えてセンサを回転させれば、円形の領域をリニアアレイによって走査することができ、3次元画像合成に必要な超音波エコーの計測を行うことができる。

## (2) 超音波エコー計測の効率化（リニアアレイ探触子の利用）

上述した提案手法を実現するために、リニアアレイ探触子の仕様を、以下を根拠として、図 3.1-16 のように決定した。

### ① 素子数とピッチ

センサの開口幅は、素子数×素子ピッチ程度であり、これは概ねアレイセンサによる画像化可能範囲の幅にも等しい。そのため、回転スキャンにより直径 160 mm 程度の範囲の画像化を行うためには、その半分、約 80 mm のセンサ開口が必要となる。この条件を考慮して本研究では、ピッチを 8 mm、素子数を 11 とした。なお、目標とする画像化範囲の幅（160 mm）は、実験に用いた模擬デブリ試料の大きさ（幅が最大 160 mm）を基準とした。また、素子数を 11 とした理由は、送受信チャンネルを切り替えて、全素子の組み合わせで計測をした際の計測時間が 10 秒程度に収まることを目安とした。これにより、1 サイクルの回転スキャンによるデータ収集を 5~10 分程度で終了させることができる。

### ② 素子サイズと周波数

水中の懸濁物による散乱減衰の影響を受けにくくするためには、画像解像度に支障が無い範囲で、低い周波数を用いることが望ましい。一方、センサ素子の共振周波数を下げるにつれ、素子サイズとバックリング材は大きなものにする必要がある。ただし、素子サイズは、センサ筐体の大きさに関する制約か

ら最大でも 10 mm 程度であるため、これにより周波数の下限は 500 kHz 程度となる。以上の検討と、超音波探傷分野での豊富な使用実績があることから、リニアアレイ探触子の周波数を 1 MHz とした。なお、ビームの指向性の面からは、素子直径は波長程度であることが望ましいが、ここでは、計測の信頼性を優先して 4 波長程度の素子径を選択することで、十分な信号-雑音比が得られるようにした。

### (3) 提案手法の検証（実験と画像化）

以上の提案手法による画像化性能を調べるために、溶融デブリを模擬した模擬デブリとして平成 28 年度までに採取した 2 種類の溶岩石を用いた模擬デブリ試料を使い、超音波エコー計測と画像化を行った。実験に用いた装置の構成を図 3.1-17 に示す。同図(a)に示すように、超音波エコーの計測は、水浸法により水中下で行い、センサの位置を正確に決定、移動するために xyz- $\theta$  の 4 軸マニピュレータ（図 3.1-17(b)）を用いた。また、アレイ探触子の駆動と受信は、パルサーレーザとマルチプレクサの組み合わせによって行い、試料（図 3.1-17(c)）表面からの反射エコーを計測した。送受信の条件は、図 3.1-16 に示す通りであり、鉛直軸に対して 10 度刻みで全周方向を回転スキャンし、各方向において全素子の組み合わせにより 121 波形を取得した。以上の方法で計測した波形データを、開口合成法によって処理することで得られた三次元画像を図 3.1-18 に示す。この図は、三次元画像データを画素値の最大値で規格化し、ボリュームレンダリングによって可視化したものであり、精度確認のために SfM（Structure from Motion）による再構成結果と重ねて表示してある。なお、SfM とは、三次元写真測量の方法に基づき、複数の角度から撮影した対象物の写真から、物体の三次元的な形状を再構成する方法である。カラー表示された模擬デブリの開口合成画像は、SfM の結果とよく一致しており、回転スキャンによる計測と開口合成法により複雑な形状をした多孔質試料の表面形状をよく再現できることが示されている。最後に、正方格子状に並進スキャンにより計測した場合の結果（H28 年度の結果を再掲）と、回転スキャンによる今年度の結果の比較を図 3.1-19 に示す。この図には、リニアアレイ探触子でスキャンを行った範囲がオレンジ色の破線で示されており、回転スキャンの場合は円が、並進スキャンの場合は四角形によってスキャン範囲が示されている。回転スキャンの結果は、回転中心付近で、再構成像が欠落している部分があるものの、試料の全体的な形状は、並進スキャンの場合と大差は無い。回転中心付近の再構成画像の劣化は、センサ素子が回転中心に配置されていないことに起因したもので、アレイセンサと回転軸の相対位置を調整することで、容易に解消できるものである。以上を踏まえると、回転スキャンによる画像化は、並進スキャンの場合と比較して遜色の無い再構成能をもつと言え、今回提案する

センサの搬送、展開、計測と画像合成法の有効性を示す結果が得られたものと判断される。

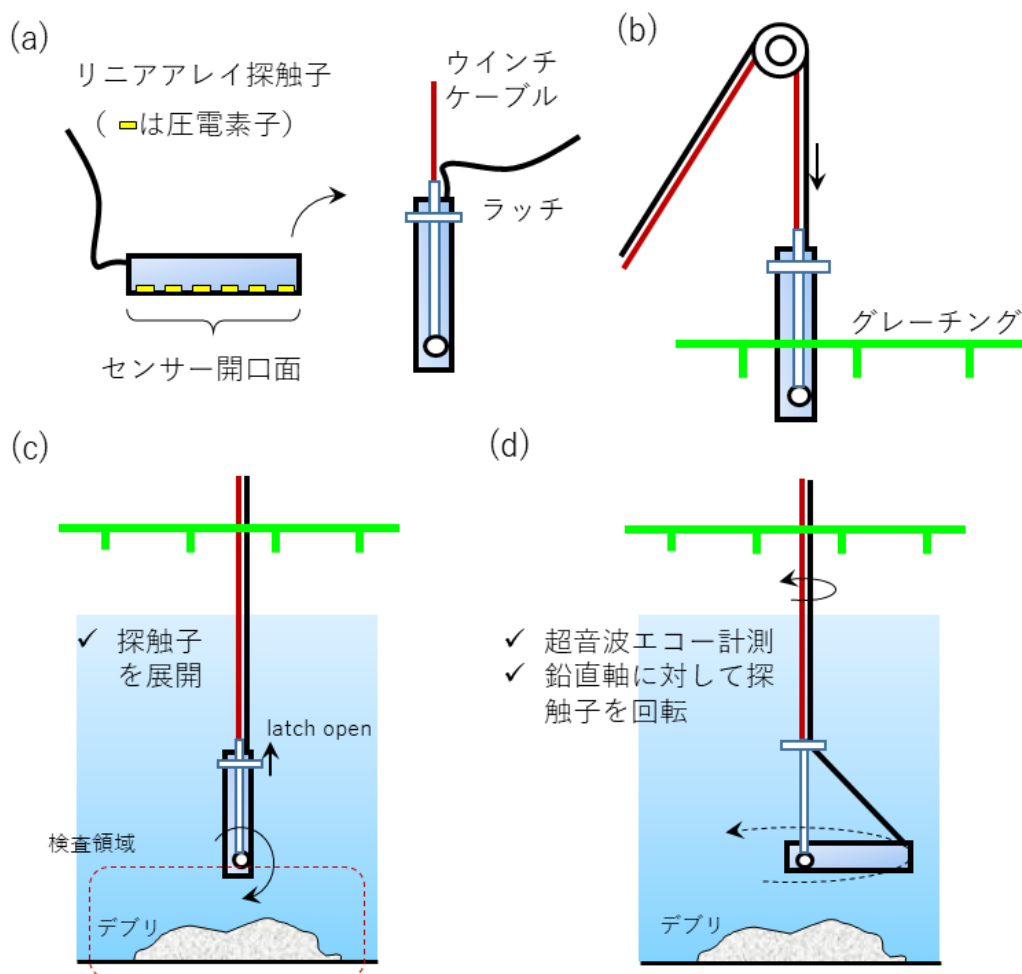


図 3.1-15 リニアアレイセンサの搬送とスキャンに関して提案する手法  
 (a) センサのウインチケーブルへの取り付け、(b) グレーチング通過時のセンサ向き、  
 (c) 検査領域近傍へ到達した時のイメージ、(d) センサの展開と回転スキャン

### 【仕様】

- 周波数：1MHz
- 素子数:11
- 素子ピッチ:8mm
- 素子径：6mm(円形素子)
- 製造:Japan Probe

### 【計測条件】

- 印加電圧:400V
- ゲイン：13.5dB
- 送受チャンネル設定：  
全素子使用⇒計測点毎に $11 \times 11=121$ 波形を取得
- 回転スキャンピッチ:10deg

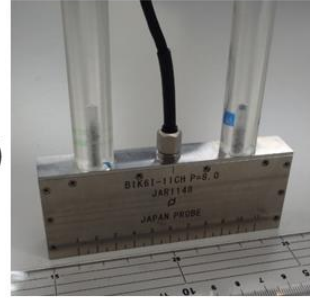


図 3.1-16 実験に用いたリニアアレイ探触子の仕様と計測条件

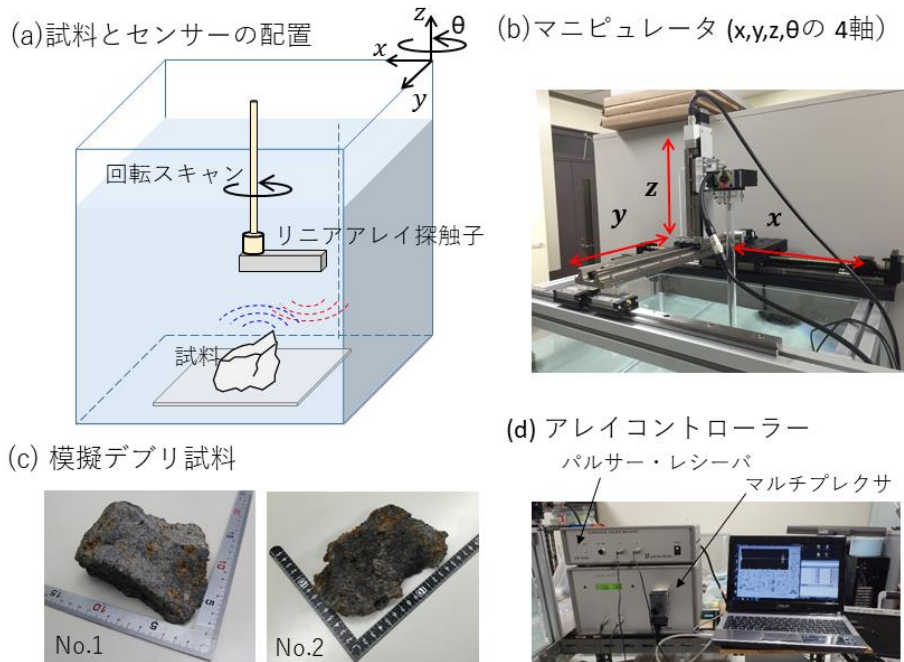


図 3.1-17 模擬デブリ試料からの反射エコー計測に用いた水浸超音波計測装置の構成



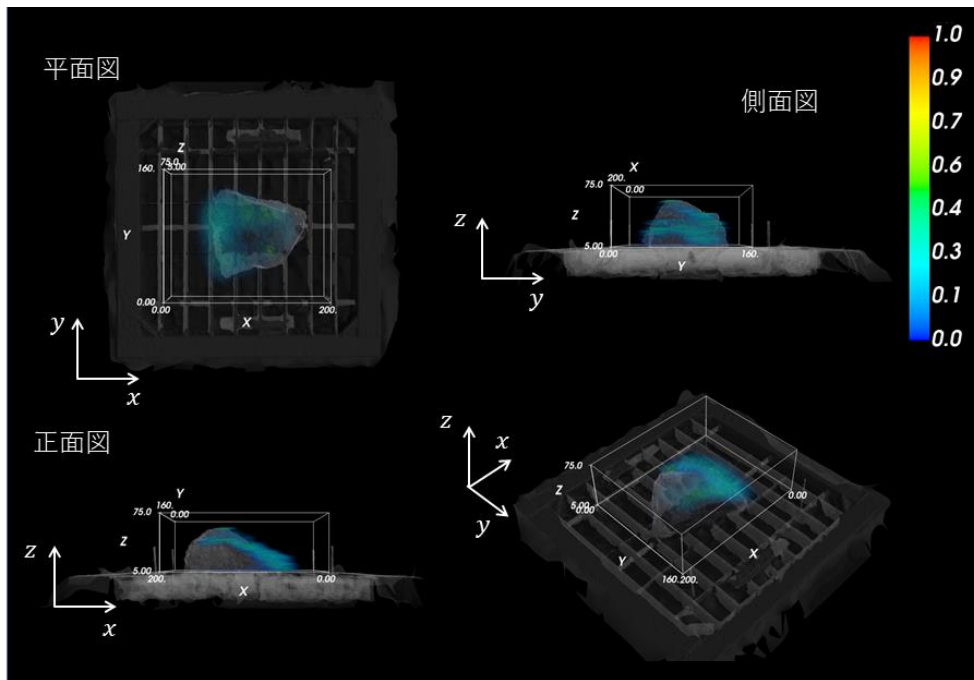


図 3.1-18 回転スキャンに基づく開口合成法によって再構成された  
模擬デブリ試料 (No.1) の表面形状。

カラーで表示された部分が超音波画像を、白で示されたものは背景を含めて再構成された SfM の結果を示す。

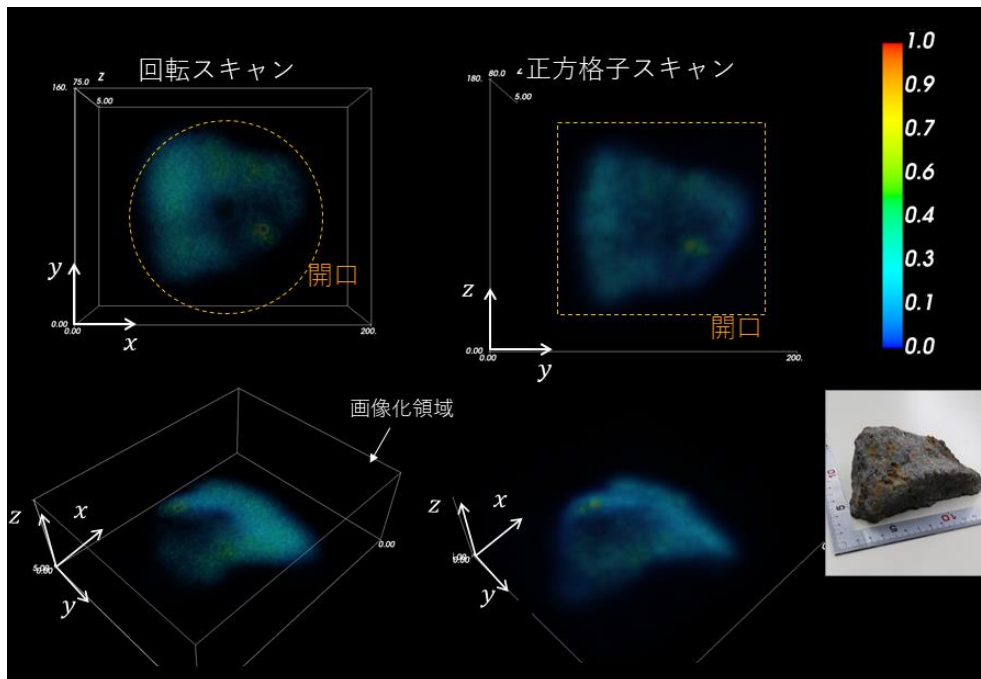


図 3.1-19 回転スキャン (左) と並進スキャン (右) に基づく開口合成法で  
再構成された、模擬デブリ試料 (No.1) の表面形状  
オレンジの破線はリニアアレイ探触子によるスキャン範囲 (合成開口) を表す。

### 3.1.4 超音波計測システムの統合化 (H27~H29)

平成 27 年度はフェイズド UVP と開口合成のシステムを、ロボットに搭載したうえで計測に用いることができるようにシステムを設計し、予備試験した。ロボットへの搭載に関しては、搭載試験を既存の汎用ロボットを使用して行った。既存のロボットにフェイズド UVP 計測用のシステムを融合した。ロボットを試験走行させ、開口合成法を適用可能なフェイズド UVP の計測を行うことに成功した。

平成 28 年度はフェイズド UVP と開口合成のシステムを搭載するロボットとして、平成 27 年度に設計した計測用のセンサ等の部品に関して現時点での要求事項等をまとめ、ロボット設計の制限等を考慮しながらシステム統合のための設計を行い、超音波計測を備えたロボットシステムを試作した。また、既存設備を実験室内での計測を模擬した設備に改良し、そこでのロボットシステム試運転を行った。多関節アームを搭載した車輪型搬送ロボットを試作しフェイズド UVP 計測システムと融合したロボットシステムを用いて、フェイズド UVP 計測による多点計測を行い模擬漏洩箇所特定に成功した。

平成 29 年度は (1) 小型試験装置を用いた複数箇所での模擬計測実験および (2) 大型試験設備を用いた模擬実験を行いシステムの有効性を検証した。

#### (1) 小型試験装置を用いた複数箇所での模擬計測実験

平成 29 年度試作したセンサ搬送用ロボット単独での運転試験 (図 3.1-20) を行った後、搬送用ロボットに超音波計測システムを搭載した新たな統合化システムを製作した (図 3.1-21)。統合化システムの仕様表は表 3.1-2 に示す通りである。このシステムを使用し、小型試験装置を用いた複数箇所での模擬計測実験を行った。試験装置の概要は図 3.1-22 に示す通りである。模擬計測実験では新たに作製した外形寸法 600×600×1200 の水槽 (以下水槽 A) と平成 28 年度より使用していた外形寸法 1200×450×450 mm の水槽 (以下水槽 B) との 2 つを実験檯一階部分に設置し、実験檯 2 階部で搬送用ロボットを走行させ、センサの位置制御を行い、実験を行った。A 水槽での内部に設けた内径 52 mm の模擬漏洩口からポンプを用いて 20 L/min で水を引き抜き、反対側から循環させた。B 水槽でも同様に内径 20 mm の模擬漏洩口をから 14 L/min で水を循環させた。なお、水槽内の水にはトレーサー粒子とし平均粒径 80 μm のナイロン粒子を混合させた。

搬送用ロボットは車体ロボットとロボットアームから構成され、水槽近傍まで車体ロボットを動かし接近し、ロボットアームで先端に取り付けた超音波センサの位置を制御しながら計測を行った。超音波計測システムは Japan Probe 社製パルサー・レシーバ (JPR-10C-16CH)、National Instrument 製 AD コンバータ (NI PXI-1033/PIX-5114)、8ch フェイズドアレイ (中心周波数 2 MHz) と制御用 PC により構成される。

2次元流速ベクトル計測は2つの水槽でそれぞれ3点ずつセンサをロボットアームで動かしながら行った。計測点は図 3.1-23 に示す通りであり、フェイズドアレイを用いて $-10^{\circ}$ ~ $10^{\circ}$ まで $5^{\circ}$ 間隔で走査しながら計5本の計測線で測定を行った。計測結果を図 3.1-24 に示す。いずれの結果も漏洩口正面の計測点で漏洩口へ向かう強い流れが計測され、漏洩口から離れた場所では正面に比べ弱い流れが計測され、漏洩口周辺の流動構造を明らかにすることができた。2次元ベクトルUVP法の計測システムおよび搬送用のロボットシステムの有効性を検証することができた。

## (2) 大型試験設備を用いた模擬実験

開発した計測システムの有効性をより大きなスケールで検証するために JAEA 榎葉遠隔技術センターにある大型試験設備 (図 3.1-25) を用いて模擬実験を行った。試験は大型水槽の上部に橋をかけ (図 3.1-26)、(図 3.1-27) のようにロボットアームを用いて超音波センサを模擬漏洩口の近傍へ配置し (図 3.1-28)、漏洩口へ向かう1次元流れの計測を行った。計測結果を図 3.1-29 に示す。センサと漏洩口の間距離は300mmであり、センサの表面を原点とし距離が大きくなるに連れて、模擬漏洩口に近づく。計測された速度分布も漏洩口に近づくに連れて流速が大きくなっていることが確認でき、漏洩箇所特定に向け開発した計測システムの有効性を検証することができた。



図 3.1-20 搬送用ロボットの試験運転



図 3.1-21 統合化システム外観

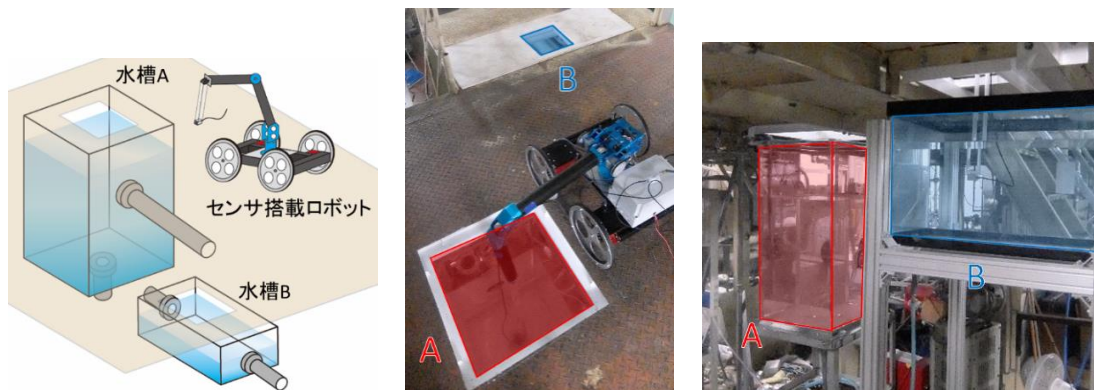


図 3.1-22 小型実験装置の概要

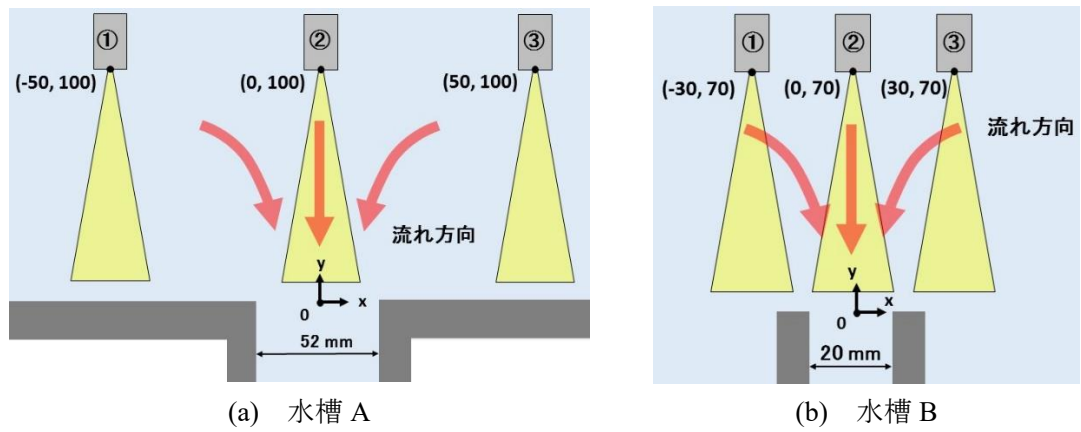


図 3.1-23 水槽での計測位置

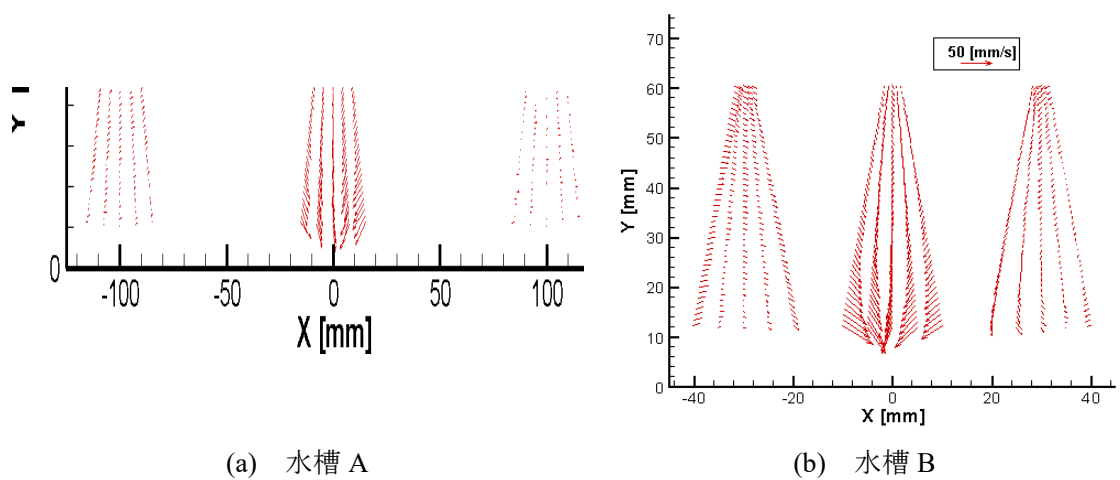


図 3.1-24 水槽でのベクトル計測結果



図 3.1-25 JAEA 檜葉の試験用大型水槽  
 主要寸法：直径 4.5m x 高さ 5.5m（水深 5m）  
 （写真：JAEA 檜葉遠隔技術開発センター提供）



図 3.1-26 大型水槽上部の橋

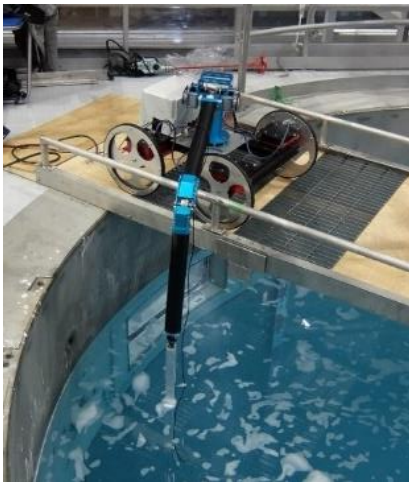


図 3.1-27 実験中のロボット

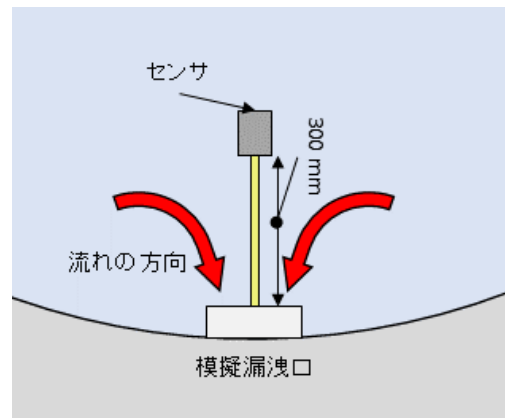


図 3.1-28 計測位置

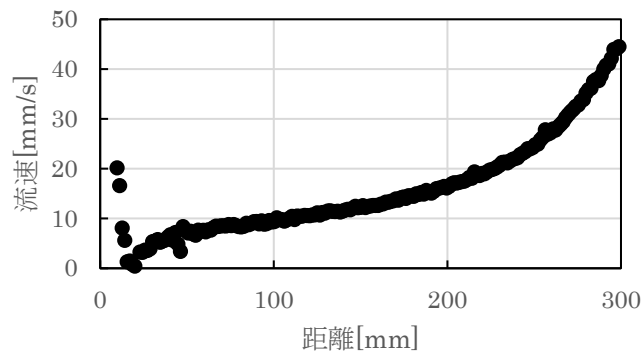


図 3.1-29 1次元速度分布計測結果

表 3.1-2 仕様表

ロボット重量	25 kg
アームペイロード	1 kg
センサ寸法	21×30×32 mm
センサ重量	194 g

### 3.2 センサ搬送用移動ロボット・SLAMの研究開発 (H27～H29)

#### 3.2.1 ロボット・センサの位置決め・方向決め精度研究 (H27～H29)

平成 27 年度はロボットの位置決め・方向決め技術として、ビジュアル・オドメトリ(VO)法の構築を行うために、新規に VO 用カメラシステムを構築し、グレーチングを通した超音波センサのデブリ計測可能性について検討するとともに、構築した VO システムによるロボット搬送の位置決め・方向決めを行い、その精度を試運転により調べた。購入したグレーチングを試験場に設置し、そのグレーチング上にロボットを走らせて、VO 法の適用試験を行った。その結果ロボットの自己位置同定に成功し、VO システムによるロボット搬送の位置決め・方向決めの有効性を示した。

平成 28 年度は SLAM 技術の研究開発用のロボットに、既存のもので本用途に適用可能であると新たに判明したレーザーレンジファインダを搭載し、その位置決め・方向決め精度を調べた。実炉環境を模擬した試験場所で SLAM 技術ならびに平成 27 年度に検討したビジュアルオドメトリ技術を応用した搬送ロボットの自己位置同定技術の精度を明らかにし、その実用性を調べた。レーザーレンジファインダを搭載したロボットシステムにより SLAM 試験を行い、ロボット位置決め・方向決め精度を調べた。また、ビジュアルオドメトリ(VO)では、ロボットを動かしながら撮影した連続画像を用いて自動画像合成を行い、自己位置同定精度を調べた。

平成 29 年度は「センサ搬送用移動ロボットを用いて、位置決め・方向決めの手法を確立し、その精度に関して結論付けるとともに、格納容器内でのロボット・センサ位置決め精度を評価した。具体的実施内容を以下に記す。まずセンサ搬送用移動ロボットの位置決め・方向決めの精度を計測するため、3次元レーザスキャナによる移動ロボットの計測法を確立し、これを真値と見做すこととした。用いたスキャナは現用の FARO Focus 3D X130 (図 3.2-1) であり、実際に福島第一建屋内の 1 階およびトーラス室調査に同種の装置が用いられている。本スキャナは球状の物体を認識し、その位置を自動で計測することが可能である。従ってロボット上に 2 個以上の球を設置すれば、スキャナからの絶対位置・姿勢を計測することができる。一方でロボットは広範囲を移動することから、スキャナから遠距離である場合には各々の球を分別して認識できなかつたり、計測誤差が大きくなつたりすることから、レーザスキャナの設置位置をスキャンごとに移動させることも必要になる。設置位置の異なるレーザスキャン結果はスキャナ付属のソフトウェアで統合することが可能であるが、統合の基準に

何を用いるかに依存して精度が異なることが明らかとなった。そこで図 3.2-2 に示すように、壁や天井などの固定点に4つ、移動ロボット上に4つの球を設置し、これらすべてがスキャンできる位置を原点として登録し、以後、スキャナを移動させた場合は固定点を基準に計測データをつなぎ合わせることで移動ロボットの位置・方向を計測すれば、精度の高いデータが得られることが分かった。図中緑の点は球として認識された物体である。

直線状の廊下をおよそ 2m、 4m、 10m の位置で任意の向きで停止させ、車載レーザレンジファインダを用いた SLAM による推定位置・推定方向の結果と、3次元レーザスキャナで計測した位置・方向の結果を比較した（表 3.2-1）。10m 移動しておよそ 0.15m 程度の誤差、方向決めについては積算でおよそ 135 度変化させた時、4.6 度の誤差であることが明らかになった。（ただし、これらの誤差は後述するように SLAM の性質上、同時生成される環境地図の精度に依存する。）

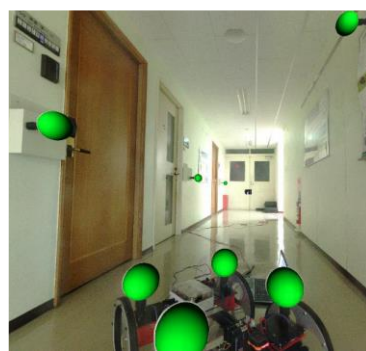


図 3.2-1 3次元レーザスキャナと調査装置 図 3.2-2 ロボット位置姿勢計測

表 3.2-1 SLAM による位置決め・方向決め精度計測実験結果

測定点	位置0 (原点)			位置1 (2m地点)			位置2 (4m地点)			位置3 (10m地点)		
	SLAM	3Dスキャナ	誤差	SLAM	3Dスキャナ	誤差	SLAM	3Dスキャナ	誤差	SLAM	3Dスキャナ	誤差
X (m)	0	0	0	2.1897	2.2032	-0.0135	4.6938	4.7023	-0.0085	10.772	10.622	0.15
Y (m)	0	0	0	-0.031608	-0.030025	-0.001583	0.037943	0.037698	0.000245	0.47363	0.46122	0.01241
向き (deg)	0	0	0	-34.20	-33.89	-0.31	46.84	46.10	0.74	-46.82	-42.18	-4.64

次に、より実運用に近い環境で SLAM の位置決め・方向決め精度の評価実験を行った。実験は JAEA 櫛葉遠隔技術開発センターの試験水槽上部、および東京工業大学で行った。図 3.2-3 に試験水槽上部の実験環境の上面図を示す。Start 地点から移動を開始し、水槽上部に架け渡された橋の一部に設置されたグレーチング上を Goal 地点とする。まず基準として水槽上部の構造物4か所に球を設置し、これらの位置を3次元スキャナで計測する。次に、センサ搬送ロボットの上に4つの球を設置し Start 地点に置き、固定点およびロボット上の球を3次元スキャンする。そしてロボットを操縦し、移動させることで環境地図の生成を行うと同時に、Goal 地点まで移動させる。

Goal 地点で SLAM による位置・方向推定結果を保存するとともに、3次元スキャンを行い、絶対空間上での位置・方向を計測する。3次元スキャンの結果の一例を図 3.2-4 に示す。実験に要する時間は、環境地図生成のためのロボット操作が4分程度、Goal 地点での位置・方向計測が8分程度必要であった。SLAM により生成された地図を図 3.2-5 に、位置・方向の測定結果を表 3.2-2 に示す。

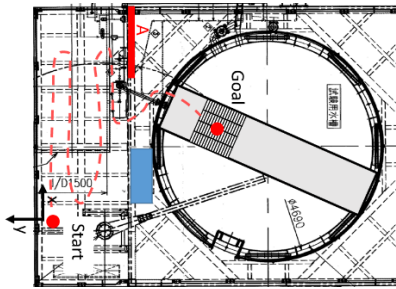


図 3.2-3 移動環境

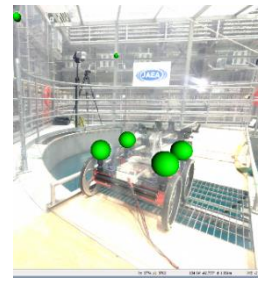
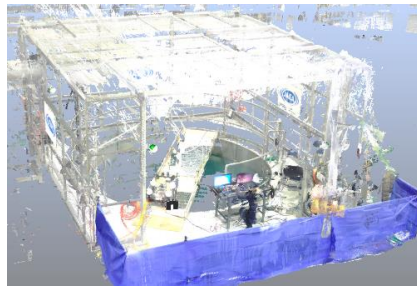


図 3.2-4 3次元スキャン結果の一例

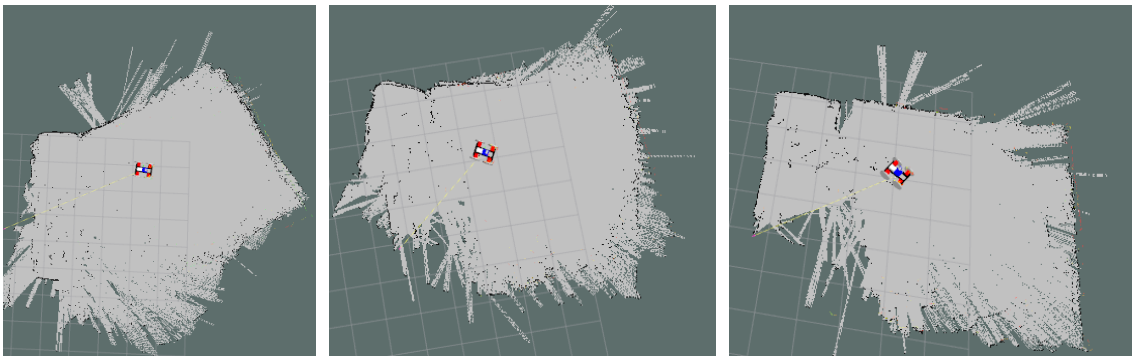


図 3.2-5 SLAM により生成された環境地図と Goal 地点 (左から実験 1、2、3) 灰色の線は車載レーザレンジファインダにより距離計測が行われた測定線

表 3.2-2 SLAM による位置決め・方向決め精度検証実験結果

実験番号	実験 1			実験 2			実験 3		
	SLAM	3Dスキャナ	誤差	SLAM	3Dスキャナ	誤差	SLAM	3Dスキャナ	誤差
x (m)	3.839	2.283	1.556	2.198	2.102	0.096	2.084	2.141	-0.057
y (m)	-3.353	-2.767	-0.586	-2.606	-2.783	0.177	-3.065	-2.837	-0.228
向き(deg)	96.902	122.662	-25.760	118.183	125.928	-7.745	118.250	123.558	-5.308

実験結果を見ると、実験 1 では x 方向の位置誤差が 1.5m 以上と非常に大きな誤差を生じているとともに、生成された地図も本来は長方形であるのに対し歪んでいる



ことが分かる。一方で実験3では誤差が小さくなっており、地図も長方形に近いものとなっている。これは図 3.2-3 の A 部の壁を適切に認識できたか否かに依存しているように推察される。つまり環境の地図生成の成否が最終的な位置・方向推定精度に非常に大きな影響を及ぼしていることが明らかになった。実際、レーザレンジファインダを用いた SLAM には壁などのように線として不動の構造物があることが重要であるため、本実験においては図 3.2-4 に示すように青い布を用いて壁を作っている。実際の実験環境では装備したレーザレンジファインダの計測域内にはパイプによる柵があるのみで、これを壁として認識することは出来ず、結果として環境地図を精度よく生成することが出来なかった。これはレーザレンジファインダによる SLAM 手法の限界を示すものである。

次に、カメラ画像を用いてグレーチングの特徴点の移動量を積算することで、ロボットの位置と方向を推定する Visual Odometry 手法 (VO) について述べる。実験は東京工業大学内で行い、 $2\text{m} \times 2\text{m}$  の大きさのグレーチング上をセンサ搬送ロボットが走行する際の位置決め・方向決め精度を SLAM と同様、3次元スキャナを用いて評価した。直進させた場合とその場でおよそ90度の右旋回を行った場合について精度を検証した。図 3.2-6 に直進実験で得られたグレーチングの合成画像と直進時の軌跡を示す。また VO の推定値と3次元スキャナの計測値を併せて表 3.2-3 に示す。この結果からおよそ1.2mの直進時は0.05m以内、方向も0.2度以内の精度で推定できていることが分かる。またおよそ90度の旋回をした場合、誤差は0.05度であることが分かった。

以上をまとめると、SLAMを用いて位置決め・方向決めを行う場合、地図作成に十分な構造物が計測できれば3.5m程度の移動距離において0.25m程度の位置誤差、7度程度の方向誤差となる。VOを用いた場合、カメラ視野内にグレーチング構造物などの十分な特徴点があれば、1.2m程度の移動距離において0.05m程度の位置誤差、0.2度程度の方向誤差、90度の旋回では0.05度の誤差となる。ただしVOの合成画像を見れば個別のグレーチングの格子が明確に理解できるため、グレーチング格子の大きさを既知として補正すれば、少なくとも格子1つ以内の位置・方向誤差を達成することが可能である。

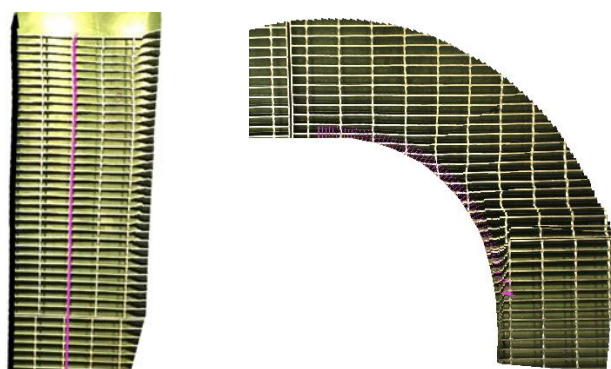


図 3.2-6 合成されたグレーチング地図とロボットの軌跡（左：直進、右：その場旋回）

表 3.2-3 Visual Odometry による位置決め・方向決め精度評価

実験 計測方法, 誤差	実験 1 (直進)			実験 2 (右旋回)		
	VO	3Dスキャナ	誤差	VO	3Dスキャナ	誤差
X (m)	1.279	1.23	0.049	-	-	-
Y (m)	0.021	0.017	0.004	-	-	-
向き (deg)	1.33	1.53	-0.2	-95.007	-94.956	-0.051

### 3.2.2 センサ搬送用移動ロボットの設計 (H28~H29)

平成 28 年度はセンサ搬送用の移動ロボット(一次ロボット)に関して、具体的な設計を行った。ロボットの足回りやセンサを移動・保持させるウインチ機構、センサの配線の仕方等を、位置決め・方向決めの精度や強度、ワイヤのねじれ等に留意しながら検討し、移動ロボットの試作を行い、試運転を行った。スリップリングを用いてウインチ機構を改良し、センサ搬送用移動ロボットの試作・試運転を行った。また、ウインチ機構においてワイヤのねじれ防止検討のための実験を行った。

センサ搬送用の移動ロボットに関して、平成 29 年度も試運転を行い、改良を行った。ロボットの試作と試運転を完了させ、実炉内での運用に関して改善点を抽出した。センサ搬送用の移動ロボットの改良点を以下にまとめる (図 3.2-7)。

#### (1) カメラ固定フレームの改良

本ロボットの位置決め・方向決めは車載レーザレンジファインダによる SLAM と、カメラ画像による VO の 2 種類の方法で行う。従ってハードウェアを変更することなしにこれらが実現できる必要がある。本年度はロボット前部に車載レーザレンジファインダを跨ぐように門型のフレームを設置し、それにカメラを取りつけるように改良することで 2 種類の計測方法を 1 台の移動ロボットで実現した。VO の推定にはカメラの振動がノイズとなるため、剛性の高いフレームを選定した。

## (2) センサ懸架長さ計測用プーリの設置

移動ロボットに搭載されたウィンチ機構により、超音波センサを下方に垂らすことで計測を行うが、超音波センサの高さを制御するためにはウィンチによりケーブルの繰り出し／巻き取り量を制御する必要がある。正確にケーブルの長さを計測するため、ケーブルに沿って受動的に回転するガイドプーリを設け、この回転量を計測することで、正確にセンサの高さを設定することが可能となった（図 3.2-7）。高さ決めの精度は 1m の距離を 0.05m 刻みで下降／上昇させた場合、およそ±10mm 程度であることを実験的に確かめた。なお、ケーブル軸周りの制御上の分解能は 0.078 度であり十分高い精度である。

## (3) 移動ロボット制御用統合ソフトウェアの開発

本ロボットシステムの移動とウィンチによるセンサの向きおよび高さを制御可能な統合ソフトウェアを開発した。ゲームコントローラを用いてマニュアルで操縦することが可能で、ウィンチ部については数値を直接入力することも可能である。

これらの改良したロボットシステムを用いて前節の実験を行い精度計測実験を完了した。



図 3.2-7 ロボットシステムの改良：（左）カメラ固定フレーム、（中）ウィンチ機構と計測プーリ、（右）制御用統合ソフトウェア操作画面（センサ高さと向きを表示可能）

実炉環境に近い檜葉遠隔技術開発センターでの実験および運用の結果、以下の点を改善する必要があることが新たに分かった。

- ① 計測・制御用有線ケーブルの延長および省配線
- ② 車載レーザレンジファインダの広角化
- ③ 超音波センサ底面形状の再検討と超音波センサ降下確認用カメラの設置
- ④ 既知構造物の位置情報の利用

①については、現在は超音波センサからの信号やロボット制御のための配線が多数あり、その長さも3～5m程度となっている。実炉環境では20m以上の配線を引き回すことが必要であるため、信号の劣化なども含めたさらなる検討が必要である。②については、SLAM環境地図作成のためにロボットがくまなく移動する必要があるため、リスクが大きい。レーザレンジファインダのみを回転させることで、ロボットを移動させずになるべく広域の情報を得ることが必要である。

③については、超音波センサがグレーチングを確実に通過できるためには目視確認が必要である。④については、特にVO時に既知の位置情報があれば、計測誤差の累積を防ぐことが出来るため、導入する必要がある。

### 3.2.3 ロボット設計のための構造解析等の計算解析（再委託：エネルギー総合工学研究所）（H27～H29）

平成27年度はロボット設計上で必要となる、応力分布やその構造に関するデータを、コンピュータ解析によって得て、それをロボット設計に生かすために、コンピュータ解析のためのサーバを購入し、他の拠点の技術者にもサーバが利用できるようなネットワーク環境を整備した。また、フリーの構造解析ソフトで、コンピュータの試運転を兼ねた試計算解析を行った。フリーの構造解析ソフトとして **Calculex** を選定し、新規購入のサーバ上にて計算を行い、ロボットとセンサをつなぐケーブルのねじれに関する応力計算を行うことで試計算とした。また、そのサーバ上でのネットワーク環境を整備して、外部からの計算実行を可能とした。

平成28年度はロボット設計上で必要となる応力分布等の計算解析を引き続き行うとともに、解析コードの評価を行った。平成27年度に行った応力解析に関する試計算の結果を生かして、商用3D-CADを用いた本計算を行うとともに、超音波計測で不可欠となる音場解析や、実験水槽中での流動挙動に関する数値解析(CFD)も行った。ワイヤのねじれ検討のために **Creo Parametric** を選定し構造解析を行った。また音場解析および流動解析に対して、**ComWAVE** および **ANSYS FLUENT** を用いた解析を行い、実験結果との比較に寄与した。

平成29年度はSLAMや多次元フェイズドアレイによって得られる三次元データの表示方法に関して検討し、公開されている三次元表示用ソフトを用いてユーザーインターフェイスを改良した。また、ロボット設計上で必要な計算解析と、計測精度評価のための計算解析に関して計算サーバによる解析を行い、ロボットシステムの開発に寄与した。

本事業で行うSLAMは試験的な意味合いが大きく、そのため平成28年度までのSLAMは主に二次元で行われ、結果は平面的に表示されている。一方、実際に炉心内にロボットが進入した場合には、SLAMも三次元で行われ、三次元の表示インターフェイスが必要となる。そこで、三次元データに対応するべくユーザーインターフェイス

の改良に関して検討した。

SLAM で得られるデータは、固定された一点から二次元的あるいは三次元的にレーザー発振装置の首を振り、その反射時間と発振装置の角度からレーザーが反射した位置を計算する。すなわち、レーザー発振点の位置と、その発振した角度、そして反射時間から計算した距離が SLAM で得られるデータである。これから三次元的に表示する方法を検討した。

三次元表示に関しては様々な方法が考えられるが、基本的に三次元形状は平面の静止画では把握しづらく、現状では二次元のスクリーン上で動かしながら表示することが三次元形状を一番効率よく把握する方法であると言えるだろう。ここでは、三次元表示用のソフトとして、公開されているフリーウェアである Paraview を選択した。Paraview は米国の Sandia 国立研究所と Kitware 社が主体となり、Los Alamos 研究所、Argonne 国立研究所などの協力の下、オープンソースでマルチプラットフォームに開発されている、三次元表示も可能なポストプロセス用のソフトである。Paraview はオープンソースの CFD である OpenFOAM にも Paraview は組み込まれているなど使用者が比較的多い点も、使いやすいユーザインターフェイスを目指すという点で有利であると考えた。

その検証として、物が置かれた架空の空間で SLAM による計測を行ったと仮定し、その時に得られるであろう、レーザー発振点の座標と発振した角度、そして反射点までの距離のデータを解析して、Paraview 上で表示することによって、三次元ユーザインターフェイスの検討を行った。

今回の検討に用いた架空の空間は図 3.2-8 の通り。大きな四角い部屋の隅付近に球と立方体が置かれている状況を想定した。その付近に適度に近づいた場所から、上下左右に 2 度ずつ、全体として中心から上下方向に  $\pm 10$  度、左右方向に  $\pm 44$  度ずつ首を振った状態を想定して、三次元 SLAM の想定結果データを作成した。そのデータを処理し、反射点を座標に変換して、Paraview にて表示させたものが図 3.2-9 である。想定した架空の空間をよく再現していると考えられる。また、レーザー反射点の座標を点（小さな球）で表示する事によって、異なる計測点からのデータを重ねて表示した際にも見やすいものと考えられる。

以上、現在二次元で表示されている SLAM データの表示方法改良のために、三次元でのユーザインターフェイスに関して検討し、仮想の三次元 SLAM データを表示させてその表示方法を改良した。

ロボット設計上で必要な計算解析に関しては、平成 28 年度に取得した Creo Parametric を用いて応力計算し、その結果をロボット設計に生かした(図 3.2-10 参照)。また、計測精度評価のための計算解析として、流れに対するセンサの影響を平成 29 年度は三次元で評価し、実験条件の設定に生かした (図 3.2-11 参照)。

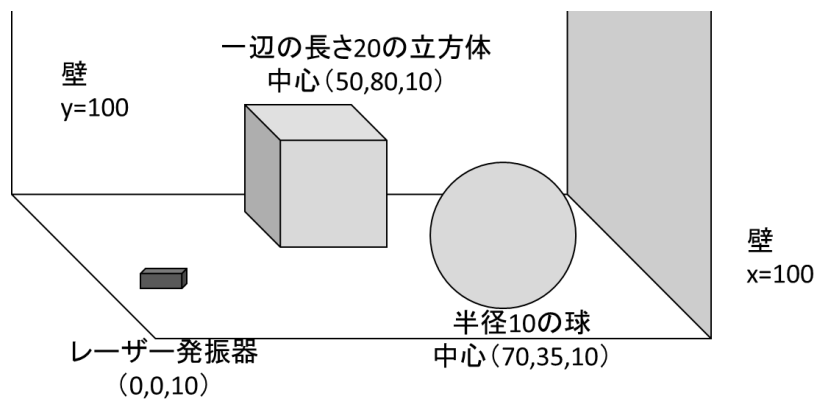


図 3.2-8 三次元データ表示検討のために構築した架空空間

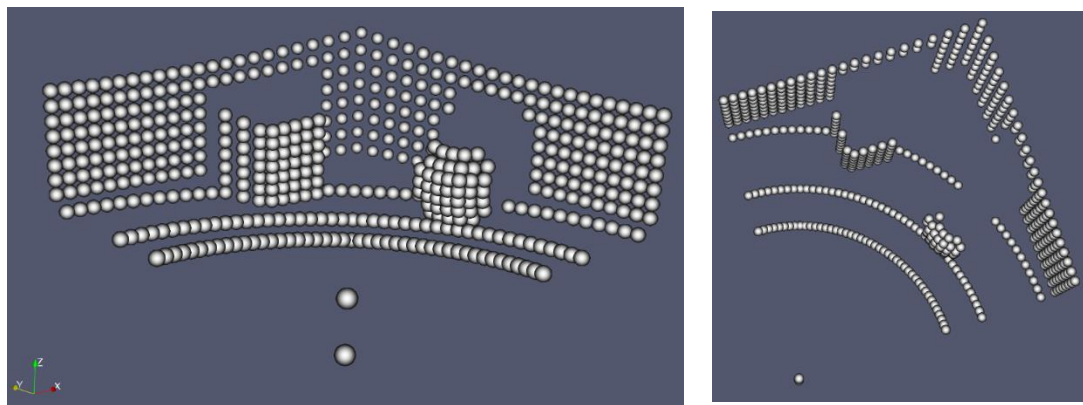


図 3.2-9 改良した三次元インターフェイスの表示結果

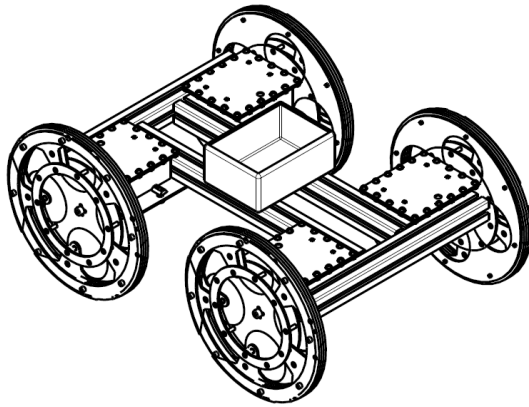


図 3.2-10 Creo Parametric による構造解析

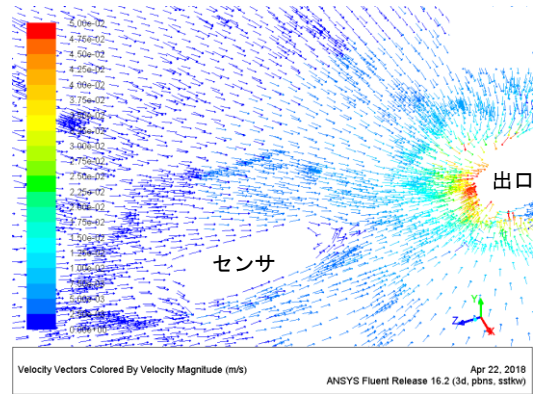


図 3.2-11 センサ周囲の微小な流動変化；  
x-y、y-z 二面の速度ベクトル図

### 3.3 英国側（Bristol 大学）の研究成果の概要（H27～H29）

本事業は日英共同研究であり、その共同研究先である英国 Bristol 大学では、平成 27 年度、平成 28 年度は模擬デブリを作製しそのイメージング技術の開発を行った。平成 29 年度に当たる時期の成果として、主に以下の四項目を挙げた。

- ① 表面形状再構成
- ② 3D TFM（Total Focusing Method）イメージングのアップデート
- ③ コリウム模擬物質のイメージング
- ④ 材料のキャラクタリゼーション

① 表面形状の再構成は、図 3.3-1 のような周波数が徐々に変化する波状の形状をした対象物に対して計測を行い、計測結果から再構成された形状と実形状とを比較する事で（図 3.3-2）、凹凸の細かさがどの程度計測精度に影響を及ぼすかを確認した。② 3D TFM イメージングのアップデートは、多数の素子を用いて受信し、その素子の位置関係からより多くの情報を得る TFM に関し、その信号処理方法を改良して、精度を向上させた。③ コリウム模擬物質のイメージングでは、コリウムを模擬した多孔性の金属物質を作製し、それに対して超音波計測を行うことで、超音波計測が困難になるといわれている多孔性物質中での計測精度の把握を行った。結果を図 3.3-3 に示すが、コリウム模擬物質のセンサから反対側の壁を検出することができず、多孔性物質の超音波計測には困難が伴う可能性が高い事が示された。④ 材料のキャラクタリゼーションは、超音波の周波数を変えながら計測を行うと、反射体の材料に応じて反射波の強度が変化する。その周波数応答性から対象物の材料を推測できないかという試みである。数種類の材料を対象に上記の計測を行った結果（図 3.3-4）、異なる応答性を示す可能性が示された。この応答性が実際に物質の密度に由来するものなのか、あるいは、空隙率等に影響されないかなどがさらなる検討課題として挙げられる。

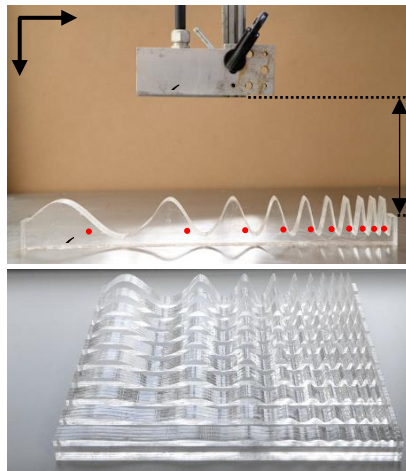


図 3.3-1 波状サンプル

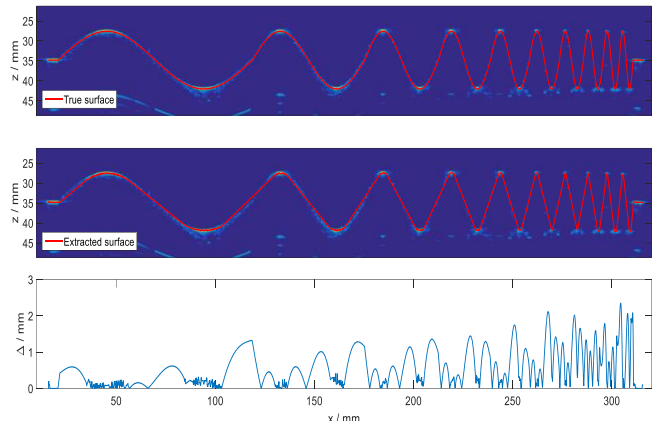


図 3.3-2 波状サンプルへの計測結果；(上) 実形状、(中) 再現形状、(下) 誤差

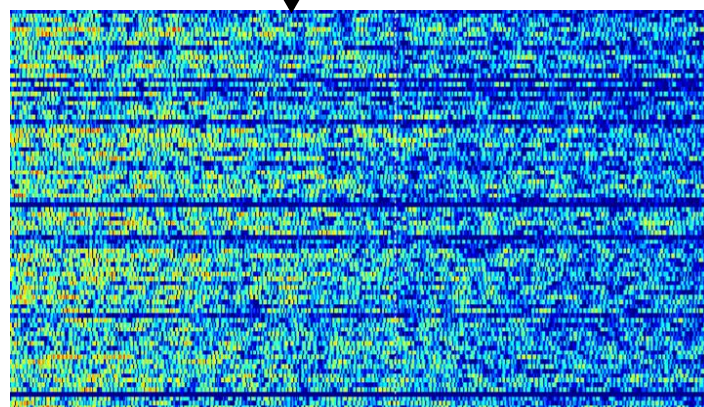


図 3.3-3 コリウム模擬物質への計測結果、右図矢印はサンプル反対側の壁の位置を示す

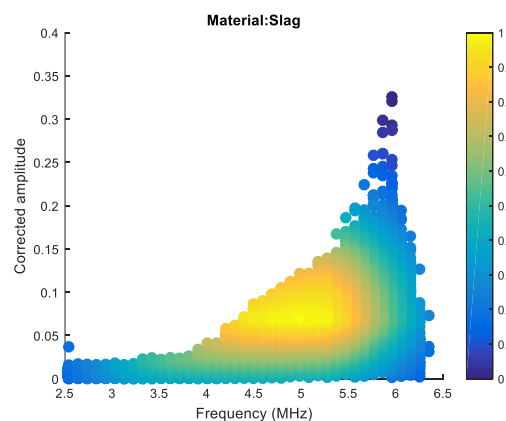


図 3.3-4 スラグに対しての超音波周波数を変化させた反射波強度とその密度



### 3.4 研究推進 (H27～H29)

平成 27 年度は研究代表者の下で各研究項目間および英国との連携を密にして研究を進めた。英国側との会合を 2015 年 12 月、2016 年 2 月の 2 回行い、日本側での研究目標・英国側での研究目標をお互いに理解して研究協力に関して議論するとともに、国内の関係者間でも 2 月に岡山大学で会合を開き情報交換・意見交換を行った。また、本委託事業の別研究課題の受託者である長岡技術科学大学側とも 3 月に会合をもち、プロジェクト間での情報交換あるいは協力関係の構築に関して議論した。

平成 28 年度は研究代表者の下で各研究項目間および英国との連携を密にして研究を進めた。英国側との会合を 2016 年 9 月、2017 年 1 月の 2 回行い、日本側での研究目標・英国側での研究目標をお互いに理解して研究協力に関して議論するとともに、国内の関係者間でも 5 月に岡山大学で会合を開き情報交換・意見交換を行った。

平成 29 年度は研究代表者の下で各研究項目間および英国との連携を密にして研究を進めた。7 月に英国側の研究者を訪問し、日英双方の研究計画の詳細を協議するとともに秋の日本開催ワークショップと原子力発電所視察についての詳細な打合せを行った。また、9 月には英国研究者が来日し、福島県のいわき産業創造館にて「4th workshop on UK-Japan Civil Nuclear Energy Collaboration (第 4 回日英廃炉ワークショップ)」(図 3.4-1、図 3.4-2)を開催し、研究成果の一部を報告し合うとともに、東京電力ホールディングス(株)福島第一・第二原子力発電所、日本原子力発電(株)東海第一原子力発電所、日本原子力研究開発機構高速増殖炉もんじゅ、および日本原子力発電(株)敦賀第一・第二原子力発電所の視察を行った(図 3.4-3)。日本側も研究分担者も含めてワークショップおよび視察に参加し、お互いの研究進捗状況・研究予定に関して確認するとともに、最新の廃炉状況に関する情報交換を行った。また、12 月には日本側研究者が訪英し、第 5 回日英廃炉ワークショップをブリストル大学で行い、最新の超音波計測技術に関する情報交換を行うとともに日英双方の研究の進捗を確認した(図 3.4-4、図 3.4-5)。3 月に英国側研究者が来日し、英国側の最新の進捗報告を受け概要をまとめた。

また、本研究における学会等発表実績に関して、学会等における口頭・ポスター発表の実績を表 3.4-1、学会誌・雑誌等における論文掲載の実績を表 3.4-2 にまとめた。

4th Workshop on UK-Japan Civil Nuclear Energy Collaboration (Ultra-sound/Electronic Integration for Detection of Leakage from Reactor Vessel and Ducts Inspection)		
Iwaki Business Innovation Center, Iwaki-shi, Fukushima 970-8528, Japan 19th September 2017		
Agenda		
14:30 - 14:35	Opening, Background and Objectives	Prof. Edson (Japan, Iwaki)
14:35 - 14:40	Opening and Introduction	All participants
14:40 - 14:55	Presentations by Participants	Dr. Clark, Dr. Marston, Dr. Hoshino (UK)
	(English/Japanese)	
14:55 - 14:55	Refreshment Break	Prof. Edson (Japan, Iwaki)
14:55 - 15:00	Discussion of research status by UK JEPF	Dr. Marston (UK)
15:00 - 15:05	Discussion of research status by JEPF	Dr. Marston (UK)
15:05 - 15:10	Development of electric heat for circumferential stress mapping of reactor vessel, IEP	Dr. Marston (UK)
15:10 - 15:15	Acoustic Imaging of Fuel Element Leakage	Dr. Marston (UK)
15:15 - 15:20	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
15:20 - 15:25	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
15:25 - 15:30	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
15:30 - 15:35	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
15:35 - 15:40	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
15:40 - 15:45	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
15:45 - 15:50	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
15:50 - 15:55	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
15:55 - 16:00	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
16:00 - 16:05	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
16:05 - 16:10	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
16:10 - 16:15	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
16:15 - 16:20	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
16:20 - 16:25	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
16:25 - 16:30	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
16:30 - 16:35	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
16:35 - 16:40	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
16:40 - 16:45	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
16:45 - 16:50	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
16:50 - 16:55	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)
16:55 - 17:00	Discussion of research status by IEPF	Dr. Marston (UK)



図 3.4-1 第 4 回日英廃炉ワークショップ プログラム 図 3.4-2 第 4 回日英廃炉ワークショップの様子



図 3.4-3 東京電力ホールディングス(株)福島第一・第二原子力発電所、日本原子力発電(株)東海第一原子力発電所、日本原子力研究開発機構高速増殖炉もんじゅ、日本原子力発電(株) 敦賀第一・第二原子力発電所の視察 (写真：各機関より提供)

5th workshop on UK Japan Civil Nuclear Energy Collaboration (Ultrasonic-Robotics Integration for Determination of Leakage From Reactor Vessel and Cores Inspection)	
David Smith Building, University of Bristol, Bristol BS8 1TP, England 09th November 2017	
Agenda	
12:00	Arrival to David Smith building
12:00 - 12:45	Lunch and sign-in
13:40 - 13:50	Opening and welcome speech Prof. Crabbtree (UK)
13:50 - 13:55	"Background and objectives" Prof. Akawa (JP)
13:55 - 14:05	"Research status in Japan" Dr. Takahashi (JP)
14:05 - 14:40	"Advanced ultrasonic Doppler method for vessel leak identification" Dr. Takahashi (JP)
14:40 - 15:15	Breakfast refreshment presentation Prof. Smith (UK)
15:15 - 15:45	Coffee break
15:45 - 16:15	"Ultrasonic measurement of air velocity" Dr. Machi (UK)
16:15 - 16:35	"Improvement of defect verification for phased array UT" Prof. Bero (Duke Marine Tech)
16:35 - 16:55	"Efficient imaging of simulated defects by 2D and 3D plane wave focusing technique" Prof. Akawa (Japan)
16:55 - 17:05	"Robotic systems with ultrasonic measurement for determining leakage" Prof. Smith (UK)
17:05 - 17:30	"New ideas for collaborations & 'The Future'" Prof. Akawa (JP)
17:30 - 17:45	Closing speech Prof. Crabbtree (UK)
20:00 - 22:00	Open at "The class bar" All participants

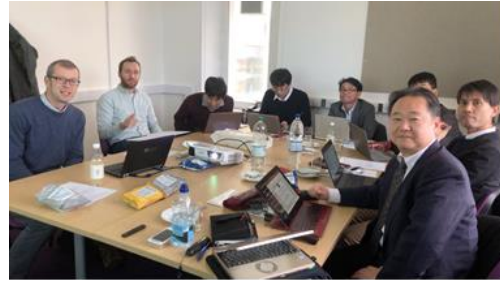


図 3.4-4 第 5 回日英廃炉ワークショップ  
プログラム

図 3.4-5 第 5 回日英廃炉ワークショップ  
の様子

表 3.4-1 学会等における口頭・ポスター発表の実績

No.	発表した成果（発表題目）	口頭・ポスター発表の別	発表者氏名	発表した学会等名、場所	発表月日等	国内・外の別
1	漏洩箇所特定とデブリ性状把握のためのロボット搬送超音波インテグレーション	口頭	木倉 宏成、Rob Malkin	日本原子力学会 2018年春の大会	2018年3月26日	国内
2	Integration of Ultrasonic Measurement and Robotic System for Measurement in NPP Decommissioning for Fukushima	口頭	Ari Hamdani, Nobuyoshi Tsuzuki, Gen Endo, Kazushi Kimoto and Hiroshige Kikura	2017 ANS Winter Meeting and Nuclear Technology Expo, Marriott Wardman Park, Washington DC, United States	2017年11月1日	国外
3	Design of New Ultrasonic Transducer with Two Elements for Flow Rate Measurement using Ultrasonic Doppler Method	口頭	Jevin Tanius Owen, Ari Hamdani, Tomonori Ihara, Hideharu Takahashi and Hiroshige Kikura	ASTECHNOVA 2017 International Energy Conference, Yogyakarta, Indonesia	2017年11月1日	国外
4	Status in Fukushima and Decommissioning Project (Ultrasonic-Robotics Integration for Determination of Leakage from Reactor Vessel and Debris Inspection)	口頭	Hiroshige Kikura	ASTECHNOVA 2017 International Energy Conference, Yogyakarta, Indonesia	2017年11月1日	国外
5	燃料デブリの形状再構築に向けた超音波可視化技術の開発	口頭	河野 隼也、木本和志、木倉 宏成	日本原子力学会 2017年秋の大会	2017年9月14日	国内
6	超音波流動計測とロボット搬送に関する基礎研究	口頭	西脇 良、木村駿、高橋 秀治、遠藤 玄、木倉 宏成	日本原子力学会 2017年秋の大会	2017年9月13日	国内
7	Fundamental study of telemetry system with phased array ultrasonic velocity profiler method for flow measurement	口頭	Ryo Nishiwaki, Keisuke Tsukada, Jiaju Zhou, Takuya Kawachi and Hiroshige Kikura	25th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE25), Shanghai, China	2017年7月4日	国外
8	Integration of Ultrasonic Measurement and Robotic System for Measurement in Nuclear Power Plant Decommission	口頭	Hiroshige Kikura	2017 China-Japan NDT Symposium 2017, Suzhou, China	2017年5月18日	国外
9	An Ultrasonic Measurement System and its Robotic Deployment into Vessels for the Combined Assessment of Debris Condition and Water Leakage	ポスター	Gen ENDO and Hiroshige KIKURA	英国-日本 国際共同研究マッチングのための研究ショーケース、東京	2017年3月26日	国内
10	超音波流動計測とロボット搬送に関する基礎研究	口頭	西脇良、木村駿、高橋秀治、木倉宏成	日本原子力学会 関東・甲越支部 第10回学生研究発表会、東京	2017年3月10日	国内
11	損傷原子炉内滞留汚染水の流れ場を計測するための超音波センサ搬送ロボットシステムの提案	口頭	柳瀬諒、古村博隆、中村吉秀、遠藤玄、難波江裕之、鈴森康一、木倉宏成、都築直嘉、木本和志	第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2016)、札幌	2016年12月15日	国内
12	Development of Two-dimensional Vector UVP with Phased Array Technique	口頭	Hiroshige KIKURA, Tomonori IHARA and Ari HAMDANI	The 10th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (ISUD10), Tokyo	2016年9月29日	国内
13	漏洩箇所特定と燃料デブリ性状把握のための超音波計測技術開発 溶融燃料デブリの取り出しに向けたロボット搬送超音波インテグレーション	ポスター	木村駿、木倉宏成	IRIDシンポジウム2016 in 東京～廃炉の未来を担う～、東京	2016年8月4日	国内
14	A Study on Ultrasonic Visualization Technique for Leakage and Fuel Debris Inspection	ポスター	Takuya KAWACHI, Tomonori IHARA and Hiroshige KIKURA	International Conference on Advancing the Global Implementation of Decommissioning of Environmental Remediation Programmes: IAEA, Madrid	2016年5月26日	国外
15	Imaging and Characterization of Nuclear Fuel Debris using Acoustic Arrays	口頭	Robert MALKIN, Takuya KAWACHI, Hiroshige KIKURA and Bruce W. DRINKWATER	8th European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR 2017), Warsaw	2016年5月18日	国外

表 3.4-2 学会誌・雑誌等における論文掲載の実績

No.	掲載した論文（タイトル、）	発表者氏名	発表媒体（学会誌・雑誌等名 巻号 ページ、発表日時 等）	発表した月	DOI（持っており分かれれば）	国内・外の別	査読の有無
1	Surface reconstruction accuracy using ultrasonic arrays: Application to non-destructive testing	Robert E. Malkin, Amanda C. Franklin, Rhodri L. T. Bevan, Hiroshige Kikura and Bruce W. Drinkwater	NDT and E International, Vol 96 (2018), pp. 26-34.	2018年3月	10.1016/j.ndteint.2018.03.004	国外	有

## 4. 結言

### 4.1 研究成果のまとめ

本研究では、熔融燃料デブリの取り出しの実現に向けて、英国の Bristol 大学との共同研究により、燃料デブリの性状や分布状態を把握し、かつ炉内冷却水漏洩箇所を特定できる新しい超音波計測技術の開発と、搬送ロボットの自己位置同定技術と超音波計測を組み合わせたシステム開発を行い、超音波センサの位置決め精度を向上させることを目的とする。超音波技術の研究開発と搬送ロボットの自己位置同定技術開発・システム開発のため、超音波計測の開口合成適用研究と、センサ搬送用移動ロボット・SLAM の研究開発を、以下のような項目に分けて実施している。

#### (1) 超音波計測の開口合成適用研究

- ① 三次元 UVP による漏洩箇所の検出高度化
- ② UVP と開口合成の融合
- ③ 開口合成の手法最適化
- ④ 超音波計測システムの統合化

#### (2) センサ搬送用移動ロボット・SLAM の研究開発

- ① ロボット・センサの位置決め・方向決め精度研究
- ② センサ搬送用移動ロボットの設計
- ③ ロボット設計のための構造解析等の計算解析

H27 年度は、超音波計測の開口合成適用化研究としては、漏洩箇所検出計測の高度化のために T 字型の多次元計測用超音波センサを開発・試作し三次元フェイズドアレイベクトルマップ法の可能性を検討するとともに、UVP と開口合成法を融合させるために必要な新たなアルゴリズムの構築に関して検討した。また、既存の超音波センサと新規に購入したマルチプレクサーを用い、開口合成技術の高度化に向けた手法の最適化研究を行い、フェイズド UVP と開口合成のシステムをロボットに搭載して予備試験した。

センサ搬送用移動ロボットの研究開発としては、ロボットの位置決め・方向決め技術開発として VO システムの構築を行い、グレーチングを通した超音波センサのデブリ計測可能性について検討するとともに、構築したシステムによるロボット搬送の位置決め・方向決め精度を調べた。また、ロボット設計上で必要となるコンピュータ解析のために新規のサーバを購入し、ネットワーク環境の整備を行うとともにフリーの構造解析ソフトで試運転を兼ねた試計算解析を行った。

平成 28 年度は、超音波計測の開口合成適用化研究としては、漏洩箇所検出計測の高度化のために超音波パルスレシーバの改良を行い、三次元フェイズドアレイベクトルマップ法の検証を行った。また、開口合成法の信号処理アルゴリズムの改良を行い、

流れ場中の物体に開口合成法を適用して、UVP を開口合成の融合に関して検証した。また、開口合成の手法最適化に関して 3 次元開口合成手法の実装を行った。また、多点からの計測による合成流速ベクトルマップの作成によって、ロボット搬送を用いた超音波計測システムの有効性を示した。センサ搬送用移動ロボットの研究開発としては、ロボットの位置決め・方向決め技術開発としてレーザレンジファインダを用いた SLAM システムの試作とそれを用いた検証や、引き続き VO の精度検証を行い、誤差の理由に関して検討するとともに、その改良法に関して検討した。また、センサ搬送用にウィンチ部や配線部に改良を施した。また、応力解析・音場解析・流動場解析を行い、ロボット開発・計測精度検証に寄与した。

平成 29 年度は、超音波計測の開口合成適用研究としては、三次元フェイズドアレイベクトルマップ法の精度向上を図るとともに、流れのある体系内において模擬デブリを用いた UVP と開口合成の同時計測を行い、また、その開口合成の手法最適化として一軸アレイセンサを用いた回転スキャンという新たな手法を開発・検討し、そういった開口合成技術が有効であるかどうかを、より実運用に近い実験施設と環境下にて技術検討した。また、センサ搬送用移動ロボット・SLAM の研究開発としては、SLAM と VO による位置決め精度を把握するとともに、ロボット自身に対しても様々な改良を行って、より実運用に近い環境下で運用することで、さらなる改良点を洗い出すとともに、三次元表示用インターフェイスの改良を行った。

また、その一方で、英国側では、3 年度にわたり、日英共同研究としての全体計画の通り、原子炉の構造および環境に関する理解、模擬デブリの設計・作製、水槽とマニピュレータ・超音波アレイ計測システムの構築、小規模実験装置の製作、超音波探査に関する数値モデルの作成・検証、最適な計測条件の策定とその条件に最適な超音波アレイ計測システムの選定、模擬デブリを使った計測のまとめ、デブリ内部の計測に関する評価、英国側と日本側のシステムの統合を行い、特に、超音波による燃料デブリセンシング技術に、英国の Bristol 大学の非線形信号処理を応用した開口合成技術を組み合わせることで、三次元空間でのより高精度な超音波センシングを実現することを目指した。

デブリ性状の取得に関して、超音波でデブリの形状取得を行うが、超音波は物質内を透過するので、微量ながらデブリ内部に浸透し、内部の情報を含んだ後反射して、また超音波センサに返ってくる成分もある。通常はその成分はごく微量であり、また、物質内部で乱反射する成分がノイズとなって働くため、そのデブリ内部の情報を抽出することは困難であるが、デブリの形状から乱反射によるノイズを予測し、それを差し引くことで、内部の情報を抽出できる可能性があり、この分野に関しては英国 Bristol 大学の Drinkwater 教授が第一人者であり、その Drinkwater 教授と共同研究を行う事で、さらなるデブリ性状の所得に挑戦することとした。本提案の共同研究により、超音波アレイセンサを用いた原子炉内計測に関する技術開発への進展は大きいもの

と期待され、表面形状の再構成、3D TFM イメージング、模擬デブリの作製、コリウム模擬物質のイメージング、材料のキャラクタリゼーションなどの研究開発がすすめられた。結果として、表面形状の再構成において計測結果から再構成された形状と実形状とを比較することで、凹凸の細かさがどの程度計測精度に影響を及ぼすかが明らかになり、3D TFM イメージングのアップデートを通して、多数の素子を用いて受信し、その素子の位置関係からより多くの情報を得る TFM に関し、その信号処理方法を改良して、精度を向上させることに成功した。また、種々の模擬デブリを作製し、特に、コリウム模擬物質のイメージングにおいてコリウムを模擬した多孔性の金属物質を作製し、それに対して超音波計測を行うことで、超音波計測が困難になるといわれている多孔性物質中での計測精度の把握を行い、その計測可能性および課題点を明らかにした。また、超音波の周波数を変えながら計測を行うことで反射体の材料に応じて反射波の強度が変化するため、今後の検討課題はあるものの、その周波数応答性から対象物の材料を推測可能な材料のキャラクタリゼーションに資する新しい計測手法が提案された。

総じて、漏洩箇所特定のための流動計測とデブリ性状把握のための形状計測という二種類の異なる計測を、超音波を用いて同時に行うことを目指し、また、それをロボットに搭載して、高放射線量環境下等の過酷な環境下でも計測できることを目的としたセンサ搬送用ロボットおよびセンサの保持機構等に対して、英国側と共同して、研究開発を行った。本事業における日英の共同研究の成果により、例えば事故を起こした原子炉というような過酷な環境下に、小型ロボットを侵入させ、超音波センサによる計測で原子炉格納容器からの冷却水漏洩箇所の特定やデブリ表面形状・デブリ内部構造などその状況を細かく把握し、その情報を廃炉に役立てるといった状況への道筋をつけることができた。

## 4.2 今後の展望

本事業をとおして、本事業の研究課題である「漏洩箇所特定とデブリ性状把握のためのロボット搬送超音波インテグレーション」の成立性については十分にその道筋をつけることはできたと思われるが、福島第一原子力発電所の廃止措置での実用化や、さらなる高度化にあたり、研究開発課題を以下に示す。また、研究開発のロードマップを表 4.2-1 に示す。今後、廃炉に関連する企業と共同して、本事業で得られた技術等の実機適用化を目指す。

### (1) 超音波計測の開口合成適用研究

#### ① 三次元 UVP による漏洩箇所の検出高度化

- ・ UVP に用いる超音波反射体への炉内堆積物や浮遊粒子の適用可能性の探索
- ・ 気液、固液など三次元 UVP の混相流計測への発展可能性の探索

② UVP と開口合成の融合

- ・ センサ表面付着物の影響検討
- ・ デブリの表面形状計測における計測範囲の長距離化

③ 開口合成の手法最適化

- ・ 回転式開口合成法におけるリニアアレイセンサの搬送、展開、回転スキャン機構の高度化

④ 超音波計測システムの統合化

- ・ 統合システムの耐放射線性評価
- ・ より実使用環境を模擬した環境下での実証試験、ロボット搬送経路の検討
- ・ 水中での搬送を鑑みた水中ロボットなど他のセンサ搬送形態の検討
- ・ 放射線検出器など超音波計測システム以外の計測器を含めた統合システムの検討

(2) センサ搬送用移動ロボット・SLAM の研究開発

① ロボット・センサの位置決め・方向決め精度研究

- ・ 三次元 SLAM への高度化
- ・ 超音波を用いた SLAM の開発

② センサ搬送用移動ロボットの設計

- ・ 計測・制御用有線ケーブルの延長および省配線
- ・ 車載レーザレンジファインダの広角化
- ・ 超音波センサ底面形状の再検討と超音波センサ降下確認用カメラの設置
- ・ 既知構造物の位置情報の利用

③ ロボット設計のための構造解析等の計算解析

- ・ より実使用環境を模擬した環境条件での音場解析、数値流体解析等の計算解析
- ・ ユーザインターフェイスの高度化

(3) 英国側の研究開発

- ・ 超音波を用いたデブリの内部構造把握、材料のキャラクタリゼーションの高度化



表 4.2-1 今後の展望（ロードマップ）

研究開発項目	第1フェーズ	第2フェーズ	第3フェーズ
(1) 超音波計測の 開口合成適用研究	本事業研究	より実環境を 模擬したモック アップ環境下で の実証試験	実用化 (福島第一 原子力発電所の 実機内での 実証試験・ 技術活用)
(2) センサ搬送用移動 ロボット・SLAMの研究開発		+	
(3)英国側の研究開発		本事業研究で 得られた知見の 高度化研究 (継続)	