

# 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

(受託者) 国立大学法人東京工業大学

(研究代表者) 木倉宏成 科学技術創成研究院先導原子力研究所

(再委託先) 国立大学法人岡山大学、一般財団法人エネルギー総合工学研究所

(共同研究相手) ブリストル大学(英国)

(研究期間) 平成27年度～29年度

## 1. 研究の背景とねらい

東京電力(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、我が国は全力を挙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できていないものの、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、どこともわ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、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 を更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。

## 2. これまでの研究成果

溶融燃料デブリの取り出しの実現に向けて、本事業では、計測に関する(1)超音波開口合成適用研究と、その搬送用ロボットの開発に関する(2)センサ搬送用移動ロボット・SLAM の研究開発の2つの大項目に分けて研究を行っている。また、それぞれの項目はさらに細分化され、(1)超音波計測の開口合成適用研究では、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)センサ搬送用ロボット・SLAM の研究開発では、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設計、③ロボット設計のための構造解析等の計算解析に分けて研究を行った。

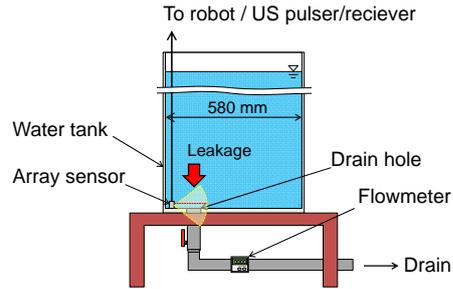
### (1) 超音波開口合成適用研究

#### ① 三次元 UVP による漏洩箇所の検出高度化

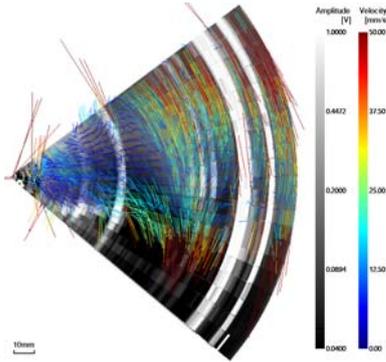
xy-yz 方向の多次元計測用超音波センサを開発するとともに、それを用いた三次元フェイズドアレイベクトルマップ法の実装を行った(図1)。超音波エコー信号の特徴点を実験装置の点と結び付けてそれぞれ説明できることから、開口合成処理方法の妥当性が検証された。その結果からベクトルマップを作成し、まだ最適化する箇所は残されているものの、妥当な三次元ベクトルマップを再現することができた。



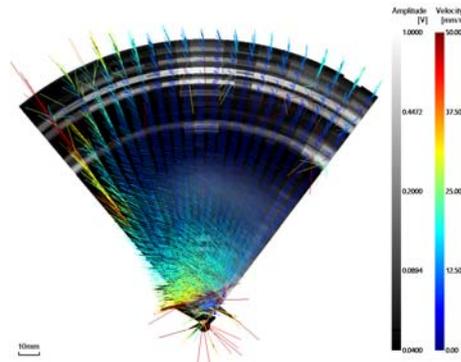
(a) 試作センサ外観



(b) 漏洩箇所検出計測実験装置



(c) ベクトルマップ・垂直面

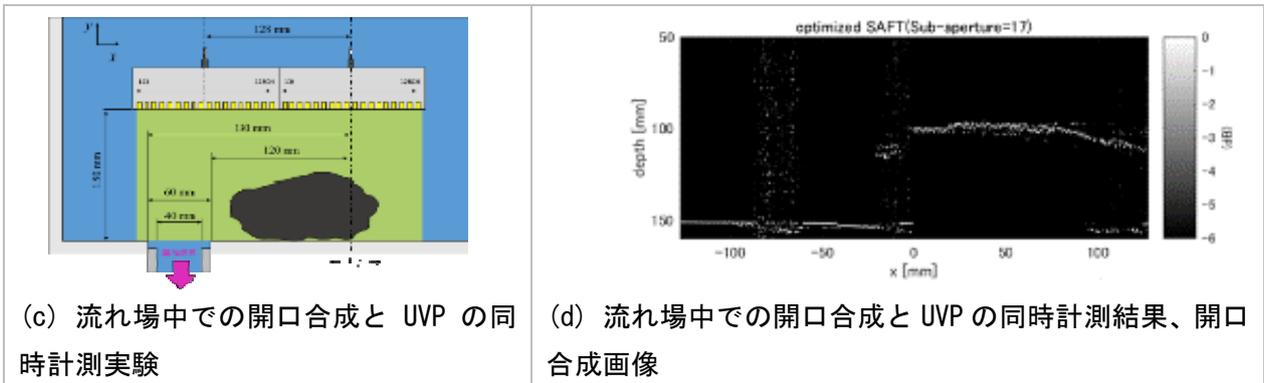


(d) ベクトルマップ・水平面

図1 三次元UVPによる漏洩箇所検出実験

### ② UVP と開口合成の融合

開口合成の処理法を最適化し、特に燃料デブリと似た特性を持つと想定される製鉄スラグに対して、その表面形状の計測に適している処理方法を検討した。その結果、合成画像の空間分解能の向上を目的とした超音波エコー強度に重み付けを行うとともに合成に使用する受信素子を選定する「重み付き合成法」を開発し、その合成画像を作成した。また、開口合成がと UVP 計測の同時計測を検証のために、UVP 用のシステムを用いて流れ場中での試験片の形状を開口合成を用いて取得する実験を行った（図2）。その結果、UVP 用の超音波信号から開口合成を行うことができ、開口合成法と UVP 法の融合が可能であるとの見通しを得た。



(c) 流れ場中での開口合成と UVP の同時計測実験

(d) 流れ場中での開口合成と UVP の同時計測結果、開口合成画像

図2 開口合成と UVP の融合のための検証実験

### ③ 開口合成の手法最適化

製鉄スラグのような3次的に凹凸のある複雑な形をした試料での形状取得最適化を目指して、室内水浸超音波計測のための4軸スキャナシステムを作成し、また、それによる開口合成を試み

た。計測は、一探触子法により 2 次元正方格子状（計測点間隔 5 mm）に試料から概ね 100 mm 程度の距離に配置した計 777 点において行い、送信位置やセンサの特性に応じて各々の波形に重み付けを行って画像合成を行った結果、製鉄スラグの複雑な表面形状をうまく計測する事ができた（図 3）。

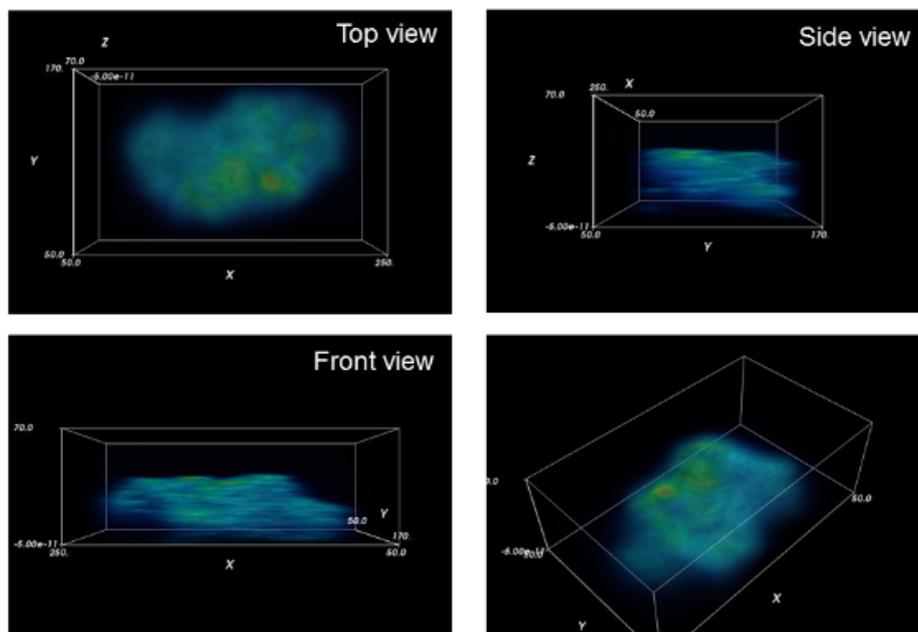


図 3 開口合成法による合成した模擬デブリの 3 次元画像（ボリュームレンダリングにより可視化）

#### ④ 超音波計測システムの統合化

超音波計測システムを搭載した車輪型のロボットを試作し（図 4）、そのロボットを用いて炉内での計測を模擬したグレーチングを設置した実験設備での超音波計測を試みた。ここではセンサの詳細な位置決めは多関節アームによって行った。多関節アームの先端にフェイズドアレイ超音波センサを設置し、図 5 のような流れのある水槽内で、多点からのフェイズドアレイ UVP 計測を行い、その結果をまとめて一枚の流速ベクトルマップを合成した。図 6 にその結果を示す。多点からの計測による流速ベクトルマップから、模擬漏洩箇所である流出口の方向を容易に推定することができ、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すことができた。



図 4 改良ロボット

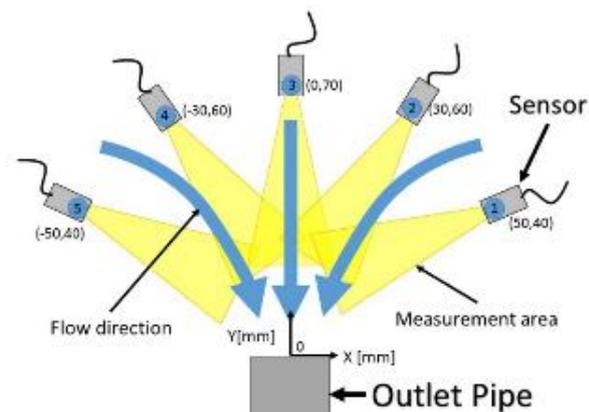


図 5 多点計測実験概要

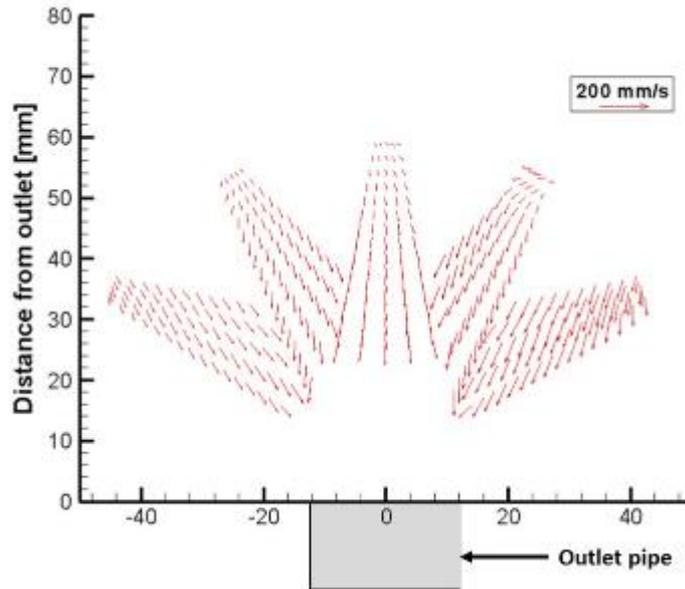


図6 多点計測実験による合成流速分布ベクトルマップ

(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

レーザレンジファインダを用いたSLAM試験と、ビジュアルオドメトリ技術を応用した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。

SLAM試験に関しては、本年度はロボット制御プログラムとしてモジュール化された汎用性を持ったシステムを用い、その中でSLAMアルゴリズムをパッケージして試験を行った。

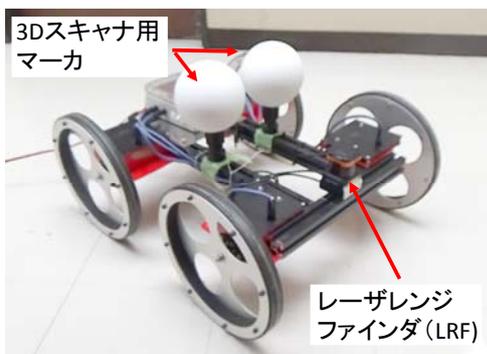


図7 実験機概観

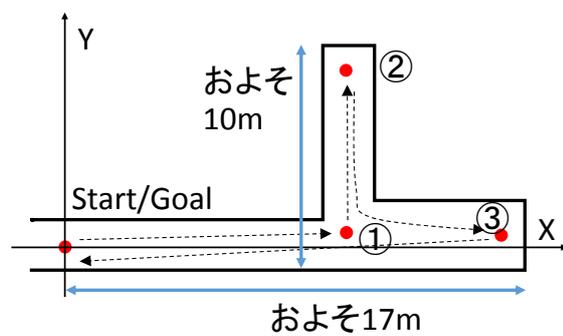


図8 実験経路

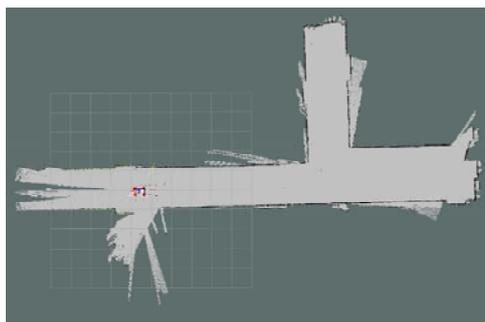


図9 生成された環境地図

レーザレンジファインダとホイールを持ったロボット（図7）を用いて、図8のように実験経路を設定し、レーザレンジファインダの計測結果に基づき地図を生成しつつ、自己位置の同定を行った。図9に作成された環境地図を示す。設定パラメータの調整が不十分であったせいか、作成された地図はわずかに傾いているが、今回の結果から今後の検討課題を明確化することができた。また、ビジュアルオドメトリに関しては、格子状であるグレーチング上の移動の際に、そのグレーチングの格子を特徴点としてビジュアルオドメトリ技術を応用した自己位置同定を行ったが、直線移動に関しては十分に精度を持った同定ができたものの、旋回移動を行うと誤差が大きくなることが認められた。これに対しては、グレーチングが格子状で直角を保っているという先見情報を与える事で精度が向上できる可能性がある。

### ② センサ搬送用移動ロボットの設計

図7のようにレーザレンジファインダを搭載して実際のSLAM実験を行ったほか、ウィンチ機構の搭載、その改良としてのスリッピング機構の適用や、センサを垂直降下させる際のケーブルのよじれを防ぐためのケーブル機構の検討などを行った。統合的なロボットシステム検証として、円筒水槽の上部にグレーチングを嵌めた実験装置での計測を行った。開発したロボットシステムは所定のグレーチング場所からウィンチ機構により超音波センサをグレーチングの間隙から降下させ（図10）、円筒水槽内の流速を計測することに成功した。

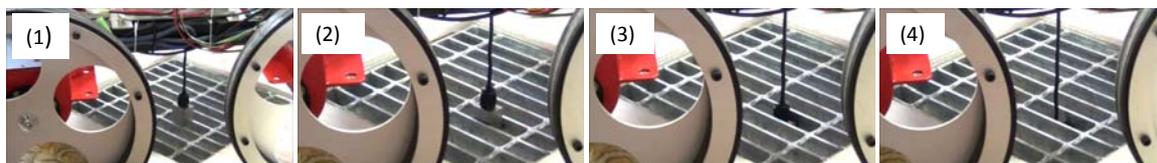


図10 グレーチング隙間から超音波センサを降下する様子

### ③ ロボット設計のための構造解析等の計算解析

センサを降下させる際のケーブルに関して回転が生じた場合の応力解析や、音場解析を行うとともに、CFDによる流れ場解析を行い実験結果と比較検証する事で、実験結果だけでは検証しづらい詳細な箇所の推定を行うことができた。

また、英国側は、超音波計測によって物体の表面の情報だけではなく、物質内部の情報をも得られる技術を持っており、それをを用いた燃料デブリ内の情報を得る超音波計測に関して研究を行っている。初年度には簡易的な模擬デブリとして様々な形状・表面粗さ・空隙率を持つ岩石を用い、それに対して英国側の持つ技術で試計測を行い、その結果を示すとともに、事故を起こした炉心の模擬として、様々な材料の上から溶かした鉛をかけ、その鉛中の材料が彼らの持つ技術でどのように捉えられるかに関して示した。また、2年目には、燃料デブリの計測用に最適化されたモデルに関して検討するとともに、それを実装した。初年度に用いた模擬デブリに対して実験を行い、最適化されたモデルによってさらに精細な内部情報が得られることを確認した。また、さらに大きな規模で実験を行うべく、実験装置の拡充を行った。

### 3. 今後の研究

これまでに得られた結果をさらに発展させて、ロボットによるセンサ搬送と超音波計測のインテグレーションを行う。多次元フェイズドアレイ UVP 計測、開口合成と UVP の融合および開口合成の手法最適化に関しては、引き続き実際に原子炉内で計測を行うことを鑑みた条件での研究開発に取り組み、各計測手法の精度向上と評価・検証を行うとともに、実炉内でのロボット計測を鑑みて、原子炉格納容器を模擬した環境でのロボットシステム試験を行う。実験用設備のさらなる改装を行うとともに、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。また、ロボット・センサの位置決め・方向決め精度研究を行うことでセンサ搬送用ロボットシステム全体の完成を目指すとともに、各種計算解析も引き続き行い、また 3 次元データの表示方法に関する検討・開発を行う。