

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

(研究期間) 平成27年度～29年度

1. 研究の背景とねらい

東京電力福島第一原子力発電所での過酷事故において、当時運転状態にあった1号機から3号機では冷却水の不足から炉心溶融が発生した。その溶融した炉心燃料および炉内構造物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。事故を起こした号機に対する実際の廃止措置に関しては課題も多く、その解決と廃止措置の実施が喫緊の課題となっている。また、作業時に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、そのためには格納容器からの冷却水漏洩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る。また、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。超音波による流速分布計測法 (Ultrasonic Velocity Profiler method, UVP 法) を用いる事で、原子炉容器内の流動の様子を計測し、容器からの漏水に関する情報を得ることができる。

一方、事故を起こした原子炉の格納容器内は放射線量が高く、容器内で計測作業をするにはロボットを使う事となる。原子炉核の容器内の作業では、ロボットは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、活動する事が求められる。

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箇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。

2. これまでの研究成果

2. 1 超音波計測の開口合成適用研究

2. 1. 1 三次元 UVP による漏洩箇所の検出高度化

格納容器からの冷却水漏洩箇所を検知するにあたっては、流体の三次元的な動きをとらえる必要があると考えられる。一列に素子が並ぶアレイセンサを用いた UVP 法では平面内の流動挙動をとらえることが可能であるが、三次元的な流動挙動をとらえるという超音波フェイズドアレイ法計測システムの高度化に向け、高度化フェイズドアレイ UVP システムの試験・検討を行った。多次元計測を実現するために、図1、図2のような2方向にそれぞれ16素子を配向したアレイセンサを作成した。このセンサを用いて三次元フェイズドアレイベクトルマップ法の適用可能性について基礎検討を行った。

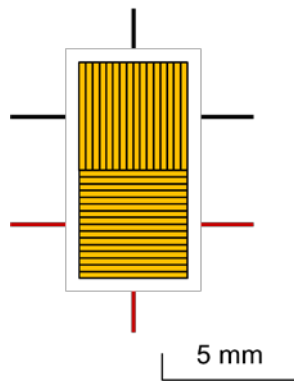


図1 素子配向図

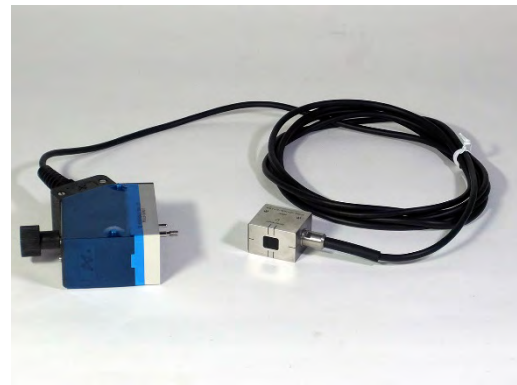


図2 試作センサ外観

ベクトルマップの再構成結果からは、一部過誤ベクトルも見られるが、概ね実験装置での流動が観察されたことが確認され、妥当な計測結果を得ることが可能であることが明らかとなった。これらの結果から、三次元フェイズドアレイベクトルマップ法は水中の三次元流動を可視化するにあたり、有用であるとの見通しを得た。

2. 1. 2 UVP と開口合成の融合

本事業での目的は漏洩箇所推定のためのUVP法と、デブリ計測のための超音波イメージング法を同一の超音波センサで行う。一方、通常1つのセンサで流動挙動を計測するUVP法に対して、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）は複数の素子からの信号を処理する。この両者を融合させる信号処理方法に関して検討した。

UVP法と開口合成法では、それぞれの方法に適したセンサや送受信条件において超音波計測が行なわれている。UVP法に関しては、比較的高い周波数（5～10 MHz程度）を用い、波数も8波程度必要となることがこれまでの研究で明らかとなっている。一方、開口合成法は周波数や波数は比較的柔軟に設定することができる。以上を考慮し、溶融燃料デブリ模擬体に対する計測を行い、UVP法のために設計されたリニアアレイセンサを用いた場合に、開口合成法による物体形状のイメージングが可能かどうかについて検討を行った。

溶融デブリ模擬体からのエコー信号が微弱なため、パルスエコーモードによる合成画像においては、十分な明度と空間分解能は得られないものの、模擬デブリの表面形状を捉えることができた。一方、マトリクスキャプチャモードによる画像合成では、明度と空間分解能に改善が見られ物体表面が明確に捉えられることが出来た。以上の画像化は、全てUVPが適用可能な条件において行われたもので、このことは、UVPと開口合成が融合可能であることを実験的に支持する結果である。

2. 1. 3 開口合成の手法最適化（再委託先：岡山大学）

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信号処理す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。

予備試験として超音波での計測方法最適化に関して、計測ラインやピッチのとり方による合成画像の変化について調べた。また、開口合成法では、複数の素子で受信した信号を処理して表

面形状の空間分解能を向上させることができるため、ピッチ間隔を大きくした場合の空間分解能の低下を防ぐことが期待される。そこで、マルチプレクサーとリニアアレイセンサを組み合わせ、使用素子数を減らし計測ピッチを大きくした場合にも、十分な品質の合成画像を得ることができることを明らかにした。

2. 1. 4 超音波計測システムの統合化

センサ搬送用ロボットと超音波計測システムを統合化するために、図3のようなロボットアームの先端に既存の 8CH フェイズドアレイ超音波センサを設置し、ロボットアームにより超音波センサを水槽内に設置した流出口付近へと搬送し流れ場計測を実施した。

流動場計測ではフェイズドアレイにより超音波ビームをステアリングし、 -10° から $+10^{\circ}$ の領域での流動場を計測した。計測結果から、流出口に向かった流れをとらえることができたことが示され、センサ搬送用ロボットにより、フェイズドアレイセンサを移動させ、水槽内での配管から流出する流れ計測を実施し、流動構造をとらえることを可能とした。

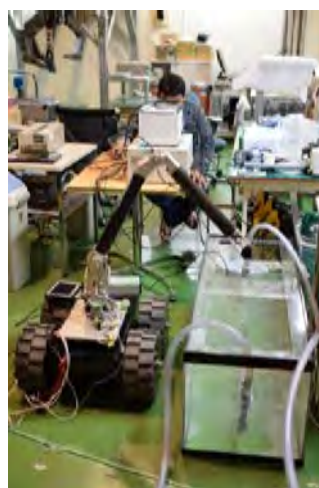


図3 センサ搬送用ロボットを使用した UVP による水槽流出口付近の流れ場計測

2. 2 センサ搬送用移動ロボット・SLAM の研究開発

2. 2. 1 ロボット・センサの位置決め・方向決め精度研究

超音波センサによりデブリ形状やその位置・方向、漏えい個所特定のための流速計測を行うためには、センサの位置決め・方向決めを精度よく把握することが必要である。また PCV 内部のような高線量かつ広範な場所で計測を実現するためには、移動ロボットによるセンサの搬送が必須である。これを実現するために、本事業では、(1) PCV 内に設置されたグレーチング上を車輪型ロボットにより移動し、自己位置姿勢を同定する、(2) ロボット上に設置されたリール機構により超音波センサを吊り下げ、グレーチング直下の貯留冷却水の流速並びに内部構造物形状を計測することを提案している

ロボットの自己位置決め・姿勢決めを行うため、H27 年度は主に V0 法による自己位置決め・姿勢決めの検討を行った。撮影したグレーチングの画像をグレースケールに変換したもの図4から、図5のようにロボットの自己位置と向きを、格子間隔を基準として同定することが出来た。

また、超音波センサを吊り下げるリール機構についても、吊り下げるセンサの高さと鉛直軸周りの向きの2自由度を制御することが必要であることを示した。

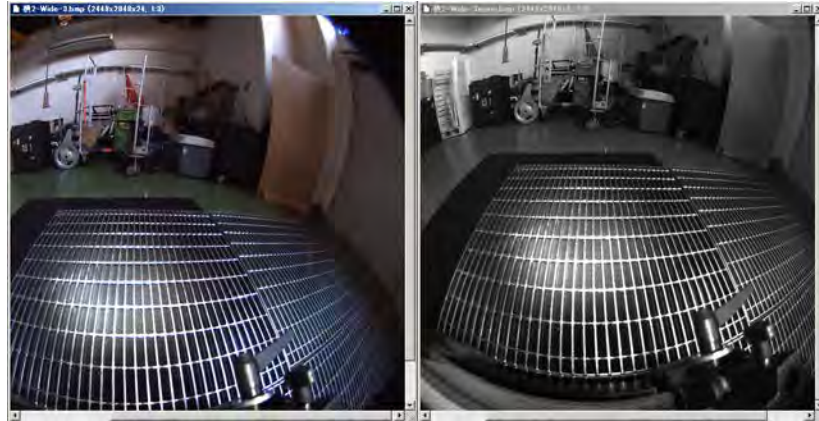


図4 VO法検証用グレーチング画像（左：撮像カラー画像，右：モノクロ画像）

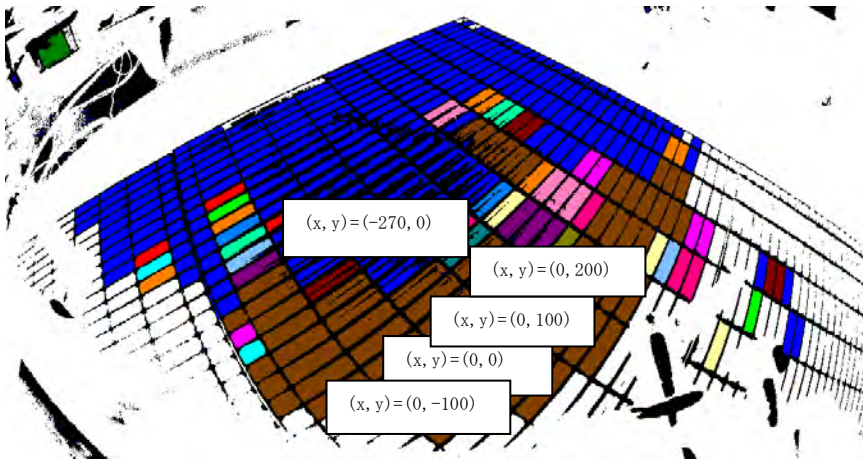


図5 斜めからの座標算出

2. 2. 2 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）

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ワイヤのねじれに関する試計算解析を行った。

3. 今後の展望

実験用設備のさらなる改装と装置の設置を行うとともに、UVP と開口合成の技術融合をさらに進め、高品質な超音波信号を得るための手法最適化を行う。ロボットをシステム全体の搭載に向けて、また、センサの位置決め・方向決めに向けて、改修するとともに、SLAM や VO によるロボットの位置同定・それを生かした移動に向けての試行を行い、開口合成、UVP の双方を実現するためのアレイ探触子設計方法について検討する。また、ロボット設計に向けての構造解析や、計測装置内での流動挙動を CFD による計算結果と比較し、センサや信号処理の精度解明に役立てる。