

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	超音波を用いた流動及び物体形状の同時可視化に関する研究
Title(English)	A Study on Simultaneous Visualization of Flow Behavior and Object Shape by Ultrasound
著者(和文)	河内拓也
Author(English)	Takuya Kawachi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11189号, 授与年月日:2019年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:木倉 宏成,赤塚 洋,筒井 広明,相樂 洋,近藤 正聡
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11189号, Conferred date:2019/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

超音波を用いた流動及び物体形状の同時可視化に関する研究
(A Study on Simultaneous Visualization of Flow Behavior and Object Shape by Ultrasound)

論文要約

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において、燃料デブリ取り出しに向けた格納容器内調査が実施されており、燃料デブリ分布状況の把握と冷却水漏洩位置の特定が求められている。そこで、本論文では格納容器内下部の燃料デブリ分布状況の把握及び冷却水漏洩位置の特定を目指し、超音波を用いた物体形状と流動の同時可視化手法を開発した。まず、超音波リニアセンサを用いた開口合成法を物体形状計測に向けて最適化し、適用性を確認した。さらに、本手法を超音波流速分布計測法（UVP 法）と融合して開口合成ベクトル UVP を開発した。また、格納容器内調査の効率化を目指し、超音波エコー画像から物体形状計測を行うとともに流速ベクトルを算出するエコー粒子画像流速計測法（エコー-PIV 法）を広範囲計測向けに開発した。以上、開発した 2 種の同時可視化手法を模擬環境下において試験し、開発した手法の有効性を示すとともに、状況に応じて適宜用いる事で効率的に格納容器内を調査できる可能性を示した。

以下に本論文各章の内容を概説する。

第 1 章では「緒言」と題して、研究背景、東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所・廃止措置の格納容器内調査に採用された計測技術について紹介するとともに、現在の斯かる状況下における格納容器内調査への超音波計測技術の適用可能性を示し、本論文の目的と概要を述べた。

第 2 章では「超音波アレイセンサを用いた開口合成法の物体形状計測への適用」と題し、近年、超音波非破壊検査で利用されている開口合成法のうち、Total Focusing Method (TFM) に着目し、非破壊検査と物体形状計測における相違点を明確化することで、物体形状計測に適した TFM アルゴリズムを提案した。本提案では、使用する超音波アレイセンサの素子サイズが大型化することで送信ビームの指向性が鋭くなることから送信ビームの指向性を考慮した。さらに、送信波とエコー信号の伝播可能範囲を考慮するとともに、TFM の画像化処理に掛かる計算負荷を低減させるために各送信素子を中心にして副開口幅を設ける事を適用した。提案した TFM アルゴリズムを実装可能な計測システムを構築し、格納容器内下部の堆積物を想定して長方形、三角形、円筒形の単純形状物体と、燃料デブリを模擬した 2 種の火山石の複雑形状物体を計測した。その結果、提案した TFM アルゴリズムの計測精度は従来型の TFM と比べて著しく高く、送信ビーム幅と計測路程に応じて副開口幅を変更することで精度良く計測できることが判明した。以上から、提案した TFM アルゴリズムの物体形状計測への適用は可能であると結論付けた。

第3章では「開口合成ベクトル UVP の開発」と題し、前章で提案した TFM アルゴリズムと超音波流速分布計測法（UVP 法）を融合した物体形状と流動の同時可視化手法を開発した。開発では、前章の超音波アレイセンサを用いた開口合成法の走査内の一送信素子に対して複数の素子で受信した信号に対して UVP 処理を行うことで、物体形状と流速ベクトルマップの同時取得を実現させた。開発後、本手法を実装可能な計測システムを構築し、流速ベクトルの計測精度を評価するために光学的な粒子画像流速測定法（PIV 法）と比較する流動計測実験を実施した。その結果、送信素子と受信素子間の距離に応じた計測精度のばらつき程度と、流動計測における最適な送受信素子の組み合わせを確認した。また、燃料デブリと漏洩箇所を単純化して格納容器内を模擬した実験体系で実験を行った。その結果、物体形状計測結果から模擬燃料デブリの形状を精度良く把握できるとともに、流速ベクトルマップの示す流向から漏洩位置を特定できることを確認した。以上により、開発した開口合成ベクトル UVP の有効性を示した。

第4章では「広範囲計測に向けたエコー粒子画像分布計測法の開発」と題し、格納容器内調査に適したエコー粒子画像分布計測法（エコーPIV）を開発した。第2章と第3章を通して開発した開口合成ベクトル UVP は、精度良く物体形状と流動を可視化できる一方、TFM 走査により計測時間は長く、計測領域は使用する超音波アレイセンサの開口幅程度であるために、局所の高精度マッピング向きであった。そこで、格納容器内調査の効率化を図るために、全体マッピング法として広範囲を高速に同時可視化できる可能性のある手法としてエコーPIV 法に着目し、実現化に向けて広範囲のエコー画像を高速に取得可能な発散波送信（Diverging wave: DW）と開口合成法（Delay-and-sum method: DAS）を組み合わせた DW-DAS 画像化手法を考案した。本画像化手法を用いたエコーPIV 法を実装できる計測システムを構築し、まずは本計測システムの性能を調査し最適化するために、送信発散波の可視化、画像化分解能と流速ベクトル算出精度の検証を実施した。調査の結果、送信発散波の伝播上における画像化分解能と流速ベクトル算出精度の関連性を明らかにした。次に、第3章と同様、燃料デブリと漏洩箇所を単純化して格納容器内を模擬した実験体系で実験を行った。その結果、計測した物体形状と流動から模擬燃料デブリの形状把握と漏洩位置の特定が可能であることを確認し、開発したエコーPIV 法の有効性を示した。さらに、開発したエコーPIV のスキャン時間は開口合成ベクトル UVP に比べて著しく速く、後処理の画像化と PIV 画像処理を高速化することで、広範囲のリアルタイム計測を実現できる可能性を示した。

第5章では「結言」と題して、各章で得られた成果を要約するとともに、開発した2種の同時可視化手法の実用化に向けた可能性と検討課題を示し、総括した。以上より、開発した同時可視化手法が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における燃料デブリの取り出しに向けた格納容器内調査の促進に寄与できる可能性が高いと確信する。