

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	超音波流速分布計測法を用いた広ダイナミックレンジ三次元流動計測に関する研究
Title(English)	A Study on Wide Dynamic Range Three-Dimensional Flow Measurement by Ultrasonic Velocity Profiling
著者(和文)	莊司成熙
Author(English)	Naruki Shoji
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12278号, 授与年月日:2022年6月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:木倉 宏成,加藤 之貴,赤塚 洋,相樂 洋,筒井 広明
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12278号, Conferred date:2022/6/30, 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

論文要約

超音波流速分布計測法を用いた広ダイナミックレンジ三次元流動計測に関する研究 (A Study on Wide Dynamic Range Three-Dimensional Flow Measurement by Ultrasonic Velocity Profiling)

荘司 成熙

指導教員：木倉 宏成 准教授

東京工業大学 工学院 機械系 原子核工学コース

東京電力 HD 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、燃料デブリ分布や炉内の状態把握に加え、燃料デブリ冷却水漏洩の位置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における冷却水漏洩の位置特定を目指し、格納容器内における高放射線・暗所・濁水環境下においても適用が有望な超音波を用いた流動計測法である超音波流速分布計測法(Ultrasonic Velocity Profiler; UVP)に着目し、従来の UVP を広域計測に拡張することで、冷却水流動情報に基づく漏洩位置検出及び漏洩流量推定に応用した。低速から高速な流れを立体的に形成する漏洩流動の計測に向けて、広いダイナミックレンジを有する三次元流動計測法を開発した。まず、UVP における速度ダイナミックレンジ拡張のため、エコー信号の帯域内位相情報を用いた流速ダイナミックレンジ拡張アルゴリズムを開発し、その性能を検証した。加えて、超音波の距離減衰に伴うエコーの信号対雑音比低下による計測精度低下を改善するため、送信パルスとして変調波を用い、受信処理時に送信波形とのマッチングを行うパルス圧縮法を適用し、その有効性を検証した。さらに、従来一次元計測であった UVP を三次元計測に拡張するため、トランスデューサアレイシステムを構築し、全センサで取得したエコー信号から流速ベクトルを再構成する三次元ベクトル UVP 計測システムを開発した。以上、開発した計測手法を、漏洩を模擬した実験体系において試験し、開発した計測手法の有効性を示した。

以下に本論文各章の内容を概説する。

第1章 緒言

本章では、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原子炉格納容器内調査では、原子炉格納容器下部に存在するとされる燃料デブリの分布状況の把握に加え、冷却水漏洩の位置特定及び漏洩流量の把握が求められていることを述べ、高放射線量かつ濁水・暗所の格納容器内過酷環境下における適用可能性を鑑み、超音波計測が有望であることを述べた。特に、冷却水漏洩の位置特定において、冷却水漏洩によって発生する流動の計測が漏洩位置検出に有効であることを考察し、超音波による流動計測法である超音波流速分布計測法(Ultrasonic Velocity Profile method: UVP)による漏洩位置検出は実機適用性の観点から期待でき、一方で、UVP法を用いた漏洩流動計測による漏洩調査の高効率化を鑑みると、計測速度と計測距離のダイナミックレンジ拡大化及び流れ場の三次元ベクトル計測化が必要であることを述べ、本研究の位置づけ、意義及び目的を述べた。

第2章 広ダイナミックレンジ流速計測アルゴリズムの開発

本章では、低速から高速な流れを形成する漏洩流動を計測するため、従来 UVP による流速分布計測で課題であった、ナイキスト限界による計測可能速度範囲の制限を解決するべく、広いダイナミックレンジ流速計測が可能な流速算出アルゴリズムである超音波クロススペクトル法(Ultrasonic Cross-Spectrum method; UCS法)を開発した。本アルゴリズムは、トレーサ粒子から散乱した超音波エコー信号の周波数

帯域内位相分布情報を用い、パルス繰り返し間の位相差分布からナイキスト定理による速度エイリアシングを検出する。さらに、位相差分布からエイリアシング前の位相差分布を推定し、ナイキスト限界を超える広ダイナミックレンジ流速計測を可能とした。本アルゴリズム検証のため、UVP 計測システムに UCS 法による流速計測アルゴリズムを実装し、管内流量を変化させた円管流を計測することで、本手法による流速範囲拡張限界および計測精度について検証した。その結果、UCS 法により計測可能流速範囲を従来の約 10 倍拡張可能であることを明らかにした。また、流速と流向に応じた計測体積を設定することで計測誤差を低減し、精度良く計測可能であることを明らかにした。さらに、模擬漏洩流動を計測することで、ダイナミックレンジが広い漏洩流動による流速分布を、本手法により計測可能となることを示した。

第 3 章 パルス圧縮法による計測精度の改善

本章では、超音波伝搬に伴う距離減衰によるエコー信号の信号対雑音比低下および流速計測精度低下を改善するため、送信パルスとして変調波を用い、受信処理時に送信波形とのマッチングを行うことで信号対雑音比を向上させるパルス圧縮法を UVP に適用した。従来の UVP 計測装置では送信パルスとして数サイクル分の固定周波数波形であるトーンバースト波を送信し、トレーサ粒子から散乱したエコー信号を受信することで流速計測を行う。本章では UVP にパルス圧縮法を適用するため、送信パルスとして変調波形を送信可能なパルサ、および送信波形と受信波形とのマッチング処理を行うレシーバを備えた UVP 計測装置を開発した。本装置により取得したエコー信号に対して人工的に信号雑音を加え、パルス圧縮法におけるマッチング処理を行うことで、エコー信号と同程度のノイズレベルにおいても計測可能であることを示した。また、従来の UVP では計測が困難となる距離範囲において、本手法を用いることで計測精度が改善され、距離ダイナミックレンジが拡張されることを明らかにした。

第 4 章 三次元流速ベクトル分布計測システムの構築

本章では、格納容器内堆積物や構造物により複雑化される立体的な漏洩流動を計測するため、従来一次元計測である UVP を三次元計測に拡張するべく、超音波トランスデューサアレイを用いた三次元流速ベクトル分布計測システムを構築した。超音波ビーム軸上における三次元流速ベクトル分布計測を行うため、超音波トランスデューサアレイとして中央に送信トランスデューサを配し、またその周囲に受信トランスデューサを配したセンサシステムを構築した。また、第 3 章で開発した UVP 計測装置を用い、各受信エコー信号に対して第 2 章で開発した UCS 法を適用し、各トランスデューサで得られた速度情報から流速ベクトルを再構成することで、広いダイナミックレンジを有する三次元流速ベクトル分布計測を実現した。本計測システムの性能について、流れが既知である剛体回転流れを対象に計測を行い、本システムにおける流速計測精度を明らかにした。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において実験し、本システムにより計測した流速ベクトル分布から漏洩位置の特定及び漏洩流量の推定が可能であることを示した。以上により、本手法が格納容器内冷却水漏洩位置調査に対して有効であることを示した。

第 5 章 結言

本章では、各章で得られた成果を要約し総括するとともに、開発した計測法の実用化に向けた今後の展望を示した。以上より、本論文では広い周波数帯域におけるパルス間位相差を用いた広ダイナミックレンジ流速算出信号処理法及び距離レンジ拡張計測ハードウェアを新たに開発し、三次元速度ベクトル UVP 法に拡張することで、漏洩流動における漏洩箇所検出及び漏洩流量評価が可能となると結論付けた。