

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)	論文要旨
Type(English)	Summary

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 原子核工学	系 コース	申請学位(専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	荘司 成熙		指導教員(主)： Academic Supervisor(main)	木倉 宏成	
			指導教員(副)： Academic Supervisor(sub)		

### 要旨(和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx. 2000 Japanese Characters)

本論文は「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」と題し、全 5 章より構成した。本論文の各章における要旨を以下に示す。

第 1 章「緒言」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」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。本アルゴリズムでは、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、本アルゴリズム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」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ーザを備えた 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」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」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を行う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ことを示した。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 原子核工学	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	荘司 成熙		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	木倉 宏成	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

In the decommissioning of the Tokyo Electric Power Company HD Fukushima Daiichi nuclear power plant, investigations inside primary containment vessels (PCVs) have been conducted for fuel debris removal, and identification of contaminated water leakage location is required in addition to determining the fuel debris distribution. The objective of this dissertation is development of the system for detecting of the contaminated water leakage position in the PCVs. In this dissertation, the ultrasonic velocity profiler (UVP), which is a promising flow measurement method using ultrasonic waves even in a high radiation, dark, and turbid water environment in the PCVs, was used. By extending the conventional UVP to wide dynamic range measurement, the system was applied to leakage detection and flowrate estimation based on contaminated water flow information. For the measurement of a leakage flow that forms three-dimensional flow from low velocity to high velocity, a three-dimensional flow measurement method with a wide dynamic range was developed. To realize the wide velocity range measurement, a measurable velocity range extension algorithm using in-band phase information of echo signals was developed, and its performance was verified. In addition, to extend the measurable distance, a pulse compression method was applied to the UVP measurement. This method uses modulated pulses as the transmission pulse and conducts the matching process with the transmitted waveform and the received echo signals to enhance the signal-to-noise ratio that decreases due to distance attenuation of ultrasound. To apply this method to the UVP, a new UVP measurement hardware was developed, and its effectiveness for the long-distance measurement was verified. Furthermore, to extend the conventional one-dimensional UVP measurement to three-dimensional measurement, the three-dimensional vector UVP measurement system was developed. The system consisted of a transducer array system and the flow velocity vector reconstruction algorithm, and its validity for detection of leakage locations and estimation of flowrate was confirmed with the experiment of the simulated leakage flow measurement.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).