

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)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	荘司 成熙		
論文審査 審査員		氏名	職名		氏名	職名
	主査	木倉 宏成	准教授		筒井 広明	准教授
	審査員	加藤 之貴	教授	審査員		
		赤塚 洋	准教授			
相楽 洋		准教授				

論文審査の要旨 (2000 字程度)

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、5章より構成されている。

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において、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ている。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箇所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の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ている。

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、従来のUVPにおいて計測可能な速度範囲は、データのサンプリング理論であるナイキスト定理による計測可能最大速度の制限と、これに起因する速度の折り返し現象であるエイリアシングが発生することにより限定されることを示した上で、従来の速度推定信号処理において、単一周波数情報のみを用いたドップラー位相シフト検出ではエイリアシングの判定が困難であることを述べている。これを踏まえ、パルスエコー信号が一定の周波数帯域を有することを利用して、帯域内複周波数成分におけるドップラー位相シフトを用いた新たな速度推定信号処理法を提案している。本論文では流れに追従するトレーサ粒子の移動によって生じる2時刻間におけるエコー信号位相差が、周波数領域において粒子速度に比例した勾配を有することを導出し、位相差勾配がエイリアシングの影響を受けないことから、位相差勾配を検出することで従来の計測可能速度を拡張した速度計測が可能であることを述べている。また、本手法により拡張可能な速度範囲の限界は、計測体積サイズと流れ方向によって決定されることを明らかにしており、これを考慮すると従来の計測可能最大速度2m/sの約10倍まで計測速度範囲拡張が可能であることを水平配管内流速分布計測により明らかにしている。

第3章「パルス圧縮法による計測精度の改善」では、UVP計測において超音波伝搬距離が増加するに従い、音波減衰が生じることから、長距離におけるエコー信号SN比(Signal-to-Noise ratio)が低下しUVP計測が困難となることを述べ、計測可能距離拡張のため、エコー信号SN比向上と距離分解能改善を同時に可能なパルス圧縮法に着目し、UVPにパルス圧縮法を適用した新たな計測ハードウェアシステムの開発を行っている。パルス圧縮法適用のため、送信パルスとして周波数変調パルスを送信可能なパルサ回路および相互相関関数によるマッチング処理を実装している。流動計測に先立ち、周波数変調パルスの周波数掃引幅を、パルス圧縮後の波形幅を評価することで最適化し、人工的にエコー信号にノイズを加えた波形に対し本手法を適用することでSN比が向上することを示している。また、模擬漏洩流動における流速分布計測を行うことで、従来のUVPと比較し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ている。

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、三次元流速ベクトル計測の必要性を示した上で、1つの送信トランスデューサとこれを等間隔で囲む3つの受信トランスデューサからなるトランスデューサアレイを開発し、第2章で開発した計測速度ダイナミックレンジ拡張アルゴリズムと第3章で開発した計測距離拡張を行う計測ハードウェアとを組み合わせるとともに、受信した信号から三次元流速ベクトルを再構成するアルゴリズムを適用することで、三次元速度ベクトルUVP計測システムを構築している。そして、流れの流速及び流向が既知である剛体回転流れを計測することで、本手法の計測精度が速度絶対値で±15%、ベクトル角度で±20%であることを明らかにしている。さらに、原子炉格納容器内漏洩を単純模擬した実験体系に対し本手法を適用し、漏洩箇所検出への有効性を示すとともに、光学的死角となる漏洩箇所の検出が可能であることを示すことで、三次元計測の有用性を明らかにしている。また、三次元流速ベクトル分布から漏洩流量を算出し参照流量と比較することで、本手法により漏洩流量の評価が可能であることを示している。

第5章「結言」では、各章において得られた成果を総括し、結論としてまとめている。これを要するに本論文は、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法に適用させ、漏洩流動における漏洩箇所検出及び漏洩流量評価への有効性を示しており、工学上及び工業上貢献するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として十分価値あるものと認められる。

注意:「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポータル(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。