

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Study on Non-invasive Flowrate Measurement of High Temperature Liquid and Steam Flow by Air-coupled Ultrasound
著者(和文)	塚田圭祐
Author(English)	Keisuke Tsukada
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10495号, 授与年月日:2017年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:木倉 宏成,加藤 之貴,千葉 敏,赤塚 洋,相樂 洋
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10495号, Conferred date:2017/3/26, 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

論文要約

Study on Non-invasive Flow Rate Measurement of

High Temperature Liquid and Steam Flow by Air-coupled Ultrasound

(空中超音波を用いた配管内の高温液体および蒸気を対象とした非侵襲流量計測に関する研究)

原子力発電所などのプラントでは、出力管理のために流量の監視が行われている。流量の管理はエネルギー効率の改善可能である一方、高温液体や蒸気に対する非侵襲な計測手法が求められている。そこで本論文では、空中超音波を応用することで高温液体計測へ向けて配管に非接触に流量計測が可能な空中超音波流量計を開発するとともに、蒸気配管の流量計測のためにクランプオン式蒸気流量計を開発した。両流量計では、気体-固体界面における超音波の透過率を改善するために理論的、実験的に超音波入射角度を最適化した。また、配管を伝搬するガイド波に起因するノイズを除去する手法を考案し、流量計に実装し、開発した流量計を高温環境下において試験することで有効性を示した。

以下に本論文各章の内容を概説する。

第1章では“Introduction”と題して、研究背景、流量計測に関する従来技術を紹介するとともに超音波流量計の高温環境下への適用事例について紹介し、本論文の目的と概要を述べた。

第2章では“Acoustic transmission between gas and liquid through a plate and prevention of guided wave”と題し、空中超音波流量計とクランプオン式蒸気流量計の開発で課題となる固体-気体界面における音響透過率について理論的に調査するとともに、ノイズとなる配管を伝搬するガイド波を抑制する手法を開発した。まず、薄板で区切られた気体から液体への音波の透過率は、音波の周波数、薄板の厚みさらには入射角度により決定することを理論的に導いた。さらには入射角度と周波数を制御することで音響透過率を改善することを可能となることを示した。前記3つの変数に対して音響透過率を算出するコードを作成し、理論的音響透過率が妥当であることを示すために液中および気中における薄板音響透過率を求め、他の研究者の計算結果と一致を見た。さらには音波の気中から薄板を通り液中への超音波透過率を求め、有限要素法を用いた超音波透過率の評価と比較することで開発したコードの妥当性を示した。音響透過率評価コードにより空中超音波流量計およびクランプオン式蒸気流量計における最適入射角度の検討を行った。一方でガイド波は両流量計における主なノイズ源であり、本章では機械的にガイド波の励起を抑制する曲率センサの設計を有限要素法により行い、JIS G 3459, 50A 配管計測では曲率センサは従来の平面型

センサよりも，空中超音波流量計において 2 dB，クランプオン式超音波流量計において 4 dB 程度，ガイド波の励起を抑制することが可能であることを示した。

第 3 章では“Development of air-coupled ultrasonic flowmeter for liquid”と題し，空中超音波による非接触型流量計の開発を行った。従来の超音波流量計に採用されている伝搬時間差式流量計測法に着目し，流量計測原理の導出を行った。空中超音波流量計を実現するために第 2 章で設計した曲率センサを試作し，その音場を計測することで超音波が設計通りに集束していることを確認した。曲率センサを使用し JIS G 3459, 50A アルミニウム配管において予備試験として，実験的に入射角度に対する音響透過率を計測し理論値と比較した。結果，理論値と実験値は入射角 6°以下でよく一致した。一方で入射角度が大きな場合には，配管の曲率と曲率センサでの超音波入射角度が一定でなくなるため，2次元モデルである理論値から外れると考えられる。実験的な音波透過率計測から，空中超音波流量計における 50A アルミニウム配管への最適入射角度は 4°とした。また，その際の音響透過率は，垂直入射の場合よりも 4 dB 改善された。一方，予備実験では曲率型センサは平面型よりもガイド波の励起を抑制することは確認できたが，アルミニウムやステンレス配管では，受信信号中のガイド波による信号は透過波信号と同程度の強度であった。そこでガイド波信号除去のために，ガイド参考波形を予め取得し受信信号と差分を取る参考波形法を開発した。開発した空中超音波流量計による流量計測実験を水平配管流れで行い，比較用の電磁流量計に対してフルスケール 5%以下の計測結果を得ることができ，本流量計の有効性を示した。

第 4 章では“Development of clamp-on ultrasonic flowmeter for steam measurement”と題し，クランプオン式蒸気流量計の開発を行った。第 2, 3 章の結果より，配管から蒸気に対しての音響透過率を上げるには入射角度を大きく取る必要があるが，曲率センサが有効な範囲は 6°以下である。そのため，クランプオン式蒸気流量計には配管に対して垂直に超音波を入射することで流量計測が可能な超音波タフト法を採用した。ガイド波を抑制するために設計した曲率センサを試作し音場計測を行うことでセンサの焦点を確認した。さらには超音波センサから配管壁を透過した超音波ビームの音場計測を行い，平面型よりもビーム幅が狭まることを確認した。予備試験として中空配管における超音波透過実験を行い，配管内部を透過する信号が計測できることを示した。さらには，ガイド波を信号処理によって処理する手法としてガイド波の分散特性に着目した周波数分散フィルタを開発し，蒸気配管において周波数分散フィルタを適用することで蒸気中を透過する信号を抽出することができた。以上，開発した蒸気流量計を 0.3 MPa-G の蒸気配管流計測適用性について検証した。クランプオン蒸気流量計は，参照用の渦流量計に対してフルスケール 10%での計測が可能であった。

第5章では”Application of air-coupled ultrasonic flowmeter to molten salt measurement“と題し、第3章で開発した空中超音波流量計を600°Cの溶融塩流れ計測への適用を試みた。溶融塩として取扱が容易なLiCl-KClの共晶溶融塩を使用した。空中超音波流量計を適用するにあたり、流量計測に必要な物性値である溶融塩の音速を導波棒による反射エコー法により計測した。LiCl-KCl共晶溶融塩の音速は400°Cから600°Cの範囲での減少率は1°Cあたり1.02 m/sである。また、600°Cの高温配管から超音波センサを保護するのに十分な距離を評価するために、配管から超音波センサへの熱輻射と超音波センサ周りの空気へ放熱の熱収支を計算し超音波センサと配管壁との距離を決定した上で、溶融塩流れへの適用を行った。超音波センサによる受信信号はガイド波信号によるノイズが支配的であるため、第4章で開発した周波数分散フィルタを適用することで透過波形の抽出を行った。抽出した波形の受信時間は、溶融塩の音速から計算される伝搬時間と一致するため、透過波形であると結論づけた。また、実験中に超音波センサは最高使用温度を超えることはなく空気による断熱は有効であった。高温場における空中超音波流量計の適用可能性を示した。

第6章では“Application of clam-on steam flowmeter to industrial steam measurement”と題し、第4章で開発したクランプオン式超音波蒸気流量計を実際の生産施設内にある蒸気配管へ適用した。生産施設内で使用される蒸気は0.8MPa-Gと高圧、高温な条件であるため、超音波センサを高温配管から保護する目的で超音波センサと配管の間に温度緩衝材としてスペーサを配置し、さらには超音波センサをヒートシンクで冷却することにより適用可能とした。蒸気流量計測実験では、超音波センサの温度による感度低下により計測困難となるという知見が得られ、温度による感度補正を行うことで計測結果の補正を行った。補正後の流量計測結果は、参考とした渦流量計に対して10%以内の誤差で計測することが可能であった。開発したクランプオン式超音波蒸気流量計の現場適用可能性を示した。

第7章では、”Conclusions”と題し、各章で得られた成果を要約するとともに、実際の製品化に向けた課題点を挙げることで今後の高温環境における非侵襲計測技術の展望についてまとめ総括とした。以上より、空中超音波流量計技術とクランプオン式超音波蒸気流量計技術が、原子力発電所のみならず生産設備における安全性および効率の向上に寄与すると確信する。