

氏名	黒山 喬 允		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第 7711 号		
学位授与年月日	平成 28 年 3 月 25 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
審査研究科	システム情報工学研究科		
学位論文題目	レーザ回折法を用いる音響キャビテーションの粒子分布 および周辺音圧の同時計測に関する研究		
主査	筑波大学 教授	工学博士	水谷 孝一
副査	筑波大学 教授 (数理物質科学研究科)	工学博士	伊藤 雅英
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	若槻 尚斗
副査	筑波大学 助教	博士(工学)	海老原 格
副査	筑波大学 助教	博士(工学)	前田 祐佳
副査	防衛大学校 講師	博士(工学)	大淵 武史

論文の要旨

本論文の目的は、強力水中超音波によって生じる音響キャビテーションと呼ばれる直径 100 μm 以下の気泡の粒度分布と、気泡を発生させる超音波の音圧振幅を同時かつ非接触で計測する手法を確立することである。この目的を達成するため、計測対象にレーザビームを入射し、生じた回折光の光強度から対象の光学的性状を計測するレーザ回折法が用いている。回折光強度の理論式が導かれ、計測した光強度を元に逆解析を行うことで粒度分布と音圧振幅を計測する手法が考案され、その妥当性が実験によっても示されている。論文は 7 個章で構成されており、概要は次に示す通りである。

第 1 章では、本研究の背景として、音響キャビテーションの基本的な性質とその発生機構が示され、この音響キャビテーションを用いる汚染物質の除去といった応用例がまとめられている。また、音響キャビテーションは、気泡と音場が相互に作用を及ぼし合うため、これを応用する上では気泡の粒度分布と気泡周辺の音圧振幅を計測する必要があることが示されている。従来の粒度分布と音圧振幅の計測法の利点と欠点をまとめ、それらの手法では超音波の周期で変化する粒度分布と音響キャビテーションを伴う音場の音圧振幅を計測できないことが示され、本研究の目的である粒度分布・音圧振幅の同時計測の実現に対する動機付けがなされている。

第 2 章では、音響キャビテーションを伴う音場の光透過率を考慮し、レーザ回折法に用いる Fourier 光学系において計測される回折光強度の理論式が導かれている。まず、音場に入射した光が音圧に比例する屈折率変化に応じた位相遅延のみ受けるものとして音場の光透過率が求められている。入射光としてガウシアンレーザビームを仮定し、音波の波長よりも十分にビーム直径が小さいと仮定して、

(博甲)

音場を通過したビームの回折光振幅が理論的に導かれている。次に、気泡は不透明な円形遮光板とみなせ、また多数の気泡による回折光が個々の気泡による回折光強度の足しあわせとなることについて触れ、音場と気泡による回折光強度の理論式が導かれている。その結果、光軸付近の回折光振幅の絶対値プロファイルは楕円ガウス分布状となり、超音波の進行方向に偏向、拡幅することが明らかにされた。また、光軸から離れた領域の光強度は気泡の粒度分布に支配されることが明らかになっている。

第3章では、光軸から離れた領域の回折光強度から気泡の粒度分布を求める手法を示し、その手法の妥当性が実験的に示されている。また、音場は光軸付近の回折光強度に影響を与えるため、その影響が実験によって評価されている。その結果、第2章において明らかになった、光軸近傍の回折光強度が音場の影響を受ける現象が確認され、この領域の回折光強度は気泡の粒度分布を求める上で用いることができず、本手法によって計測可能な気泡の直径は $193 \mu\text{m}$ 以下であることを明らかになっている。また、音場の影響を受ける光軸付近の回折光強度を用いないことで、粒度分布を平均誤差 11% で計測できることが画像計測によるリファレンス計測結果との比較によって示され、気泡の体積基準直径が $30 \mu\text{m}$ から $100 \mu\text{m}$ の間で周期的に変化していることが明らかになっている。

第4章では、イメージセンサを用いることで回折光強度の計測を高速化する手法が考案されている。第3章における光強度の計測では、高い時間分解能を持つ単一素子のフォトディテクタを機械走査することで超音波の周波数で変化する回折光強度を計測している。このため、機械走査に多くの時間を要していた。イメージセンサは時間分解能が低く、高い周波数で変化する光強度を計測することができないため、レーザービームを短いパルス状に変調して気泡を照射する計測系が導入された。計測実験の結果、機械走査を不要とし、またイメージセンサを用いて広い面積で取得した回折光強度分布を光強度の対称性に基づいて平均化することでノイズの影響を低減できたため、1回の計測に要する時間を 1 s 以下と第3章の手法に比べて $1/100$ の時間での計測が実現できている。

第5章では、光軸付近の回折光強度から1次元定在波の音圧振幅を求める手法を考案し、その手法の妥当性が実験的に示されている。第2章で明らかにされたように、光軸付近の回折光強度は楕円ガウス分布状のプロファイルを持ち、超音波の波面と直行方向に偏向および拡幅する。レーザービームを1次元定在波の音圧の節に入射した場合は、回折光強度は偏向のみを、腹に入射した場合は拡幅のみを起こす。本章では、この拡幅と偏向の振幅から、レーザービーム入射点と腹・節の関係を表すパラメータと、音圧振幅を求める理論式が導かれている。この手法の妥当性を示すために、 $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 水槽の底面から超音波を入射し水面で反射させ、水面を音圧の節とする1次元定在波を形成し、計測が行われた。計測結果は、ハイドロフォンを機械走査して計測した結果とよく一致し、提案手法の妥当性が示されている。

第6章では、第5章までに確立した気泡の粒度分布計測法と音圧振幅計測法を同時に用い、1次元定在波中に形成した音響キャビテーションの振る舞いが解析により明らかになっている。音圧振幅の計測に用いる光軸付近の回折光と光軸から離れた領域で計測される気泡の回折光では光強度が 10^4 から 10^5 程度異なる。これらの光強度を計測するために、回折光をビームサンプラを用いて2分し、イメージセンサを2台用いて回折光強度を計測する系が考案している。計測の結果、音圧の腹を挟むように分布した気泡が計測され、気泡が非線形的に振動している様子が確認されている。このような気泡の状態は、音圧が十分に高い場合に理論的に考えられる状態と一致していることが説明されている。以上から、提案手法によって音響キャビテーションを伴う音場の音圧振幅と気泡の粒度分布が同

時に計測する手法が実現できたと結論付けられたと言える。

第7章では、得られた成果をまとめるとともに、本研究の課題について示され、提案手法を用いる音響キャビテーションの振る舞いの解析に向けた展望が述べられている。

審 査 の 要 旨

【批評】

本論文は、近年様々な分野に応用が期待されている音響キャビテーションの振る舞いを解析するために、音響キャビテーションを伴う音場の音圧振幅と超音波の周期で変化する気泡の粒度分布を同時に計測する手法を実現したものである。気泡の寸法は100 μm 以下であり、超音波の周期で振動するためこれまではその気泡粒度分布の計測は困難であった。このため、これまでに信頼できる粒度分布は報告されていなかったが、本研究による粒度分布計測法の実現によって、音響キャビテーションの振動態様を詳細に解析できるようになった。また、音響キャビテーションはハイドロフォンなどのセンサを損傷するため、音響キャビテーションを伴う音場の音圧振幅を計測する手法は確立されていなかったが、本研究ではレーザ回折法を用いることでその計測を可能とした。このように、従来は計測が困難であったパラメータを同時に非接触計測が可能な本手法は、音響キャビテーションの応用を実用化する上で重要なツールとなり得る、以上の事より、本研究の成果は、当該分野の発展への寄与が期待できることから高く評価できる。

【最終試験の結果】

平成28年1月25日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。