

博士論文審査報告書

Doctoral Thesis Screening Results Report

論 文 題 目

Thesis Theme

Studies on Imaging of Sound Field using High-speed Polarization Interferometry

偏光高速度干渉計を用いた
音場可視化計測に関する研究

申 請 者

| | |
|-------|----------|
| Kenji | ISHIKAWA |
| 石川 | 憲治 |

Department of Intermedia Studies, Research on Communication Acoustics

February 2019

音は媒質中を伝搬する弾性波であり、媒質の性質や音源および媒質中の物体の力学的特徴など様々な情報を伝達する。音の計測はこれらの情報を取得するための重要な手段であり、一般にマイクロホンを用いて計測される。音は媒質の圧力の時間空間変動であるが、マイクロホンによる計測では空間中の一点の時間変動のみが記録される。音響物理現象を詳細に理解するためには音の空間分布も知る必要があり、すなわち音場の計測が重要である。一般に音場計測は複数のマイクロホンを用いて行われるが、マイクロホンが接触型のセンサであるという制約上、センサ自身による測定対象場の乱れやセンササイズに起因する空間分解能の限界などの課題がある。

このようなマイクロホンによる音場計測の課題を克服する計測手法として、光による音の計測が注目されている。光による音の計測は、音によって生じた光の変化を通じて音響情報を取得する。この特徴は、対象となる音場内に機器を設置することなく測定可能であるという点にあり、したがって非接触型センサとみなすことができる。これによって非接触かつ高空間分解能を有する計測が可能であり、音場の計測において非常に有効な手法である。しかし現状において、以下に挙げる2つの課題を有している。1点目は、可聴音場に対する瞬時定量可視化計測が実現されていない点である。可聴音場は水中音場や超音波音場に比べて屈折率変動および屈折率勾配が微弱であるので、高度な性能が光学計測装置に求められる。2点目は、光による計測手法の応用研究が限定的な点である。非接触性・高空間分解能性など、従来の計測手法にはない利点を有している光学的手法であるが、その用途のほとんどがトランスデューサ放射音場計測であり、実在の複雑な音響現象への適用は十分になされていない。そのため、様々な音響分野において計測法の有効性を実証することは分野の発展のために極めて重要である。本論文では、上記2つの課題に対して、偏光高速度干渉計を用いた音響計測の提案および諸分野での応用手法の確立が試みられている。

本論文は全9章から構成されている。以下に各章の概要および評価について述べる。

第1章は、音響計測の重要性および光を用いた音響計測のこれまでの研究について扱い、本研究の目的および意義について述べている。第2章では光を用いた音響計測手法の歴史と先行研究について述べており、当該分野の現状および課題について詳細に記述されている。第3章では光を用いた音響計測の原理について、物理学的側面から記述されている。音響光学効果について扱い、空気中音場内を伝搬する光を幾何光学理論で記述できることが明らかにされている。それによって、光の位相を測定することによって音圧の線積分値が測定可能であることが示されている。

第4章では、可聴音場の瞬時かつ定量計測を実現するための光学計測手法が提案されている。2次元光位相分布を瞬時に測定するために並列位相シフ

ト干渉法が有効であることを示し、それを実現するための光学系について述べられている。センサに偏光高速度カメラを用いることによって毎秒 10 万枚以上の高速撮影が実現でき、音波伝搬を高い時間分解能で観測できるようになる。光学系の計測性能の評価およびマイクロホンの比較計測を行い、提案したシステムの特性を明らかにするとともに、提案手法が音場の線積分値を定量計測可能であることが示されている。本章の内容によって実現された可聴音場に対する 2 次元可視化計測手法は、2 つの観点から重要な意義を持っている。1 点は、物体極近傍や流体中の音波伝搬などこれまで観測困難であった音場計測を可能とし、観測可能な音場を拡大したことである。特に人間にとって重要な可聴音場を対象としている点は、学術的、産業的および社会的にも意義が大きい。もう 1 点は、物理量として音圧線積分値の絶対量を、校正なしに直接かつ瞬時に計測可能としたことである。この特徴は場全体の精密記録や将来的な計測標準への応用が見込まれる。

第 5 章から第 8 章では、提案手法を用いた応用計測について述べられている。第 5 章は、トランスデューサ評価への応用について述べられている。繰り返し同一の音場を再現可能なトランスデューサ放射音の計測は、従来の走査型光学計測手法でも行われてきたが、走査には時間を要し、環境変動の影響が含まれてしまう。申請者は提案手法を適用することにより瞬時に可視化計測を実現し、この問題を解決した。また、わずかに構造の異なる超音波トランスデューサからの放射音やアクリル板で作成したスピーカボックス内の音場の計測を行い、筐体構造が放射音場に及ぼす影響を観測可能であることを示した点は、電気音響分野において非常に優れた成果であると高く評価できる。

第 6 章では、楽器放射音解析への応用について述べられている。楽器は仕組み・構造・演奏方法が非常に多岐に渡っており、現象の正しい理解のためには理論解析や数値解析とともに、実験による観測が不可欠である。申請者は提案手法を楽器近傍の音場観測に適用し、放射音の計測・解析を行った。特に、カスタネットにおいてシェル内部の音場を世界で初めて可視化計測し、その解析によって放射原理を明らかにした点は、音楽音響分野において非常に斬新なものであると高く評価できる。

第 7 章では、流れと音の同時計測について述べられている。流れから発生する音は、楽器音および騒音の主要な音源の 1 つであるが、流れ場中においてはマイクロホンによる音圧計測は困難である。そこで提案法を用いて、流れおよび流れ場中の音場を同時に可視化計測する手法を提案している。空気と密度の異なるガスを流入することによって音を発生させる流れを干渉計で観測可能にし、流れと音の物理的性質の違いを利用し時間フィルタリングによって音場成分を強調する手法を提案した。振幅の大きな流れ場の中の非常に小さな音場を同時に可視化計測可能とする手法を確立した。流れとそれによって生じる音波の双方を同時に観測することを可能とした点は、騒音・振

動分野において空力音発生メカニズムの解明に寄与するものとして高く評価できる。

第8章では、計測法によって取得された音圧の線積分値から3次元音場を復元する手法を提案している。偏光高速度干渉計による測定データは音圧の線積分値であるので、そのままでは単一点の音圧を知ることはできない。申請者は、測定対象を軸対称音場に限定することで、単一の測定のみから3次元定量音場を復元する手法を提案している。校正されたマイクロホンとの比較計測によって、5 kHz から 20 kHz において 1 dB 以下の音圧レベルのずれで音場を復元可能なことを示している。軸対称という限定された場ではあるが、3次元可聴音場を瞬時に定量計測・記録することに初めて成功した点は、度量衡分野における新たな計測方法として高く評価できる。

第9章では、本論文の総括を行い、残された研究課題や今後の展望について記述されている。

以上要するに、本論文は偏光高速度干渉計を用いた可聴音場に対する瞬時定量可視化計測を確立し、電気音響、音楽音響、騒音・振動、度量衡の4つの分野における実在の複雑な音響問題に対し有効性を実証した。これらの研究成果は、音響現象の新しい計測法を確立しただけでなく、屈折率変動を通じた複数の物理現象の相互作用計測や複合物理現象の解明をも可能とするものである。さらに本論文の内容は、工学分野にとどまらず、教育分野、芸術分野において広く応用可能な画期的な成果として位置づけられ、今後の表現工学の発展に寄与するところが大きい。よって本論文は、博士（工学）早稲田大学の学位論文として十分に価値のあるものと認める。

2019年2月

審査員

主査 早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 及川 靖広

早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 尾形 哲也

早稲田大学教授 博士（人間科学）早稲田大学 河合 隆史

早稲田大学名誉教授 工学博士 早稲田大学 山崎 芳男