

Graduate School of Fundamental Science and Engineering  
Waseda University

博士論文概要  
Doctoral Thesis Synopsis

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  
(Applicant name)

Kenji	ISHIKAWA
石川	憲治

Department of Intermedia Studies  
Research on Communication Acoustics

December 2018

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測定される。音は媒質中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るが、すなわち音場の計測が重要である。マイクロホンを用いて瞬時に音圧分布を測定するためには、一般にマイクロホンアレイを用いる。マイクロホンアレイは広く利用されており、例えば音源位置の特定、音の空間情報を利用した音声強調および雑音除去、近距離場音響ホログラフィ法などが挙げられる。これらは、複数のマイクロホンを用いて音場の空間的な特徴を抽出することができるが、場全体の圧力分布そのものを記録することは困難である。実際、場を完全に記録するためには3次元空間の至る所で物理量を測定する必要があるため、センサが有限の大きさを持ち設置によって場を乱してしまう接触型のセンサでは、原理的な困難さが存在する。

そ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。光学的手法の特徴は、測定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。光ビーム内のあらゆる点で光が音の影響を受けるため測定光が存在する領域全体がセンサであると考えることができ、測定光を拡大して音場に放射した場合、物理的には空間的に連続なセンシングが可能である。したがって、光を用いた音響計測手法は場の計測に関して優位な特徴を持っている。

光による音の測定は、1867年に Töpler によって放電によって生じる衝撃波の観測が報告されたのが最初とされており、以降多数の研究者によって研究されている。1922年に Brillouin によって音響光学効果の存在が理論的に予測されて以降、まず超音波の可視化が盛んに研究された。人が聞くことのできる可聴域においては、1990年代の Television Holography 法に続いて、光学干渉に基づく手法やシュリーレン法などが提案されている。光による音場の可視化は、レーザ光を走査して複数回の同期計測により可視化する手法、および測定光を拡大してカメラによって撮影する手法に大別される。レーザ光を走査する手法では、測定対象音場が繰り返し再現可能な場に限定されてしまう。カメラを用いる手法では、2次元位相分布を瞬時に取得可能である。可聴域においては、シュリーレン法による可視化が報告されているが、撮影画像は定性的な値である。また、シュリーレン法は音圧の空間勾配に比例した測定感度を持っているため、超音波に比べて可聴音は低感

度である．これまでに，可聴音場の瞬時定量可視化計測は実現されていない．

本研究では，可聴音場および空気中超音波音場に対する非接触・瞬時・定量かつ2次元の可視化計測手法を提案する．並列位相シフト干渉法および偏光高速度カメラを用いることによって，2次元光位相分布の瞬時定量計測が実現される．測定光を音場に放射することによって，光路上の音圧の線積分値が測定される．提案システムでは最大測定点数  $512 \times 512$ ，最大測定範囲  $100 \text{ mm}$ ， $1 \text{ mm}$  以下の測定点間隔，および毎秒10万枚以上の高速撮影を実現した．

第1章では，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る．第2章では光を用いた音響計測手法のこれまでの研究について述べる．第3章では光を用いた音響計測の原理について，物理的側面から記述する．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について明らかにする．それによって空気中の音波による光の変調は位相に現れ，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を示す．

第4章では，可聴音場の瞬時・定量計測を実現するための光学計測装置について述べる．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る．センサに偏光高速度カメラを用いることによって光位相を毎秒10万枚以上の高速撮影が実現でき，それによって音波伝搬を高い時間分解能で観測できるようになる．光学系の計測性能および雑音特性の評価および，マイクロホンとの比較計測を行い，提案した測定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測定していることを示す．

可聴音場に対する2次元可視化計測手法が実現したことは，ふた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ができなかった音場測定が可能となり，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．もう一点は，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なったことである．測定対称音場が単純な特性を持っていれば単一の測定のみから3次元の音圧分布を推定することができ，場全体の精密記録や将来的な計測標準への適用が見込まれる．

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る．第5章では，計測法のトランスデューサ評価への応用について述べる．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測定は，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．提案手法を用いれば瞬時に可視化計測が実現できるため，これらの問題は解決される．わずかに構造の異なる超音波トランスデューサ放射音の比較およびアクリル

板で作成したスピーカボックス内の音場観測を行い、光による観測結果から筐体構造が放射音場にもたらす影響について議論した。

第6章では、計測法の楽器放射音解析への応用について述べる。音楽は文化的小よび社会的に欠かせないものあり、その中核を担う楽器の発音原理の解明は音楽音響分野における重要な研究課題のひとつである。しかし、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。これまでの放射音測定では、複数のマイクロホンによって音圧や周波数スペクトル、指向性等の観測を行っているが、楽器音放射の瞬間を直接観測することは出来ていない。そこで提案手法を用いて楽器周囲の音場を観測し、楽器近傍における放射音の観測・解析を行った。カスタネットにおいて、3つの異なる周波数帯域での異なる音場の振る舞いが観測され、詳細な解析によってその放射原理を明らかにした。

第7章では、流れと音の同時計測について述べる。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ひとつであるが、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。そこで提案した計測法を用いて、流れおよび流れ場中の音場を同時に可視化する手法を提案する。音を発生させる流れに空気と密度の異なるガスを流入することによって、ガス流れを干渉計で観測可能にした。観測された画像に含まれる流れ場の振幅は音場の振幅に対して非常に大きいため、時間フィルタリングによって音場成分を強調し、同時可視化を実現した。この手法によって、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が可能であるため、空力音発生メカニズムの解明などに有効である。

第8章では、計測法によって取得された線積分値から3次元音場を復元する手法について扱う。提案手法による測定データは音圧の線積分値であるため、そのままでは単一点の音圧を知ることはできない。一般に場の投影データから元の場の物理量を推定する逆解析技術はトモグラフィと呼ばれており、医療、地震波、水中音響などの分野で盛んに研究されている。通常の場合を投影データから復元する場合、対象領域を取り囲むような複数の角度からの測定が必要である。そこで本章では、測定対象を軸対称場に限定することで、単一の測定のみによって3次元定量音場を復元する手法を提案する。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確認した。本手法によって、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記録することに成功した。

本研究では、可聴音場のための非接触・瞬時・定量かつ2次元の可視化計測手法を提案し、複数の音響分野において、その有効性を実証した。第9章では、本研究の総括を行い、残された研究課題や今後の展望について述べる。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 石川 憲治 印

(2018年10月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	R. Tanigawa, <u>K. Ishikawa</u> , K. Yatabe, and Y. Oikawa, T. Onuma, and H. Niwa, “Optical visualization of a fluid flow via the temperature controlling method,” Optics Letters, vol.43, no.14, pp.3273–3276, 2018.
論文	K. Yatabe, R. Tanigawa, <u>K. Ishikawa</u> , and Y. Oikawa, “Time-directional filtering of wrapped phase for observing transient phenomena with parallel phase-shifting interferometry,” Optics Express, vol.26, no.11, pp.13705–13720, 2018.
○論文	<u>K. Ishikawa</u> , R. Tanigawa, K. Yatabe, Y. Oikawa, T. Onuma, and H. Niwa, “Simultaneous imaging of flow and sound using high-speed parallel phase-shifting interferometry,” Optics Letters, vol.43, no.5, pp.991–994, 2018.
論文	K. Yatabe, <u>K. Ishikawa</u> , and Y. Oikawa, “Hyper ellipse fitting in subspace method for phase-shifting interferometry: Practical implementation with automatic pixel selection,” Optics Express, vol.25, no.23, pp.29401–29416, 2017.
論文	K. Yatabe, <u>K. Ishikawa</u> , and Y. Oikawa, “Acousto-optic back-projection: Physical-model-based sound field reconstruction from optical projections,” Journal of Sound and Vibration, vol.394, pp.171–184, 2017.
論文	K. Yatabe, <u>K. Ishikawa</u> , and Y. Oikawa, “Simple, flexible and accurate phase retrieval method for generalized phase-shifting interferometry,” Journal of Optical Society of America A, vol.34, no.1, pp.87–96, 2017.
論文	N. Chitanont, K. Yatabe, <u>K. Ishikawa</u> , and Y. Oikawa, “Spatio-temporal filter bank for visualizing audible sound field by Schlieren method,” Applied. Acoustics, vol.115, pp.109–120, 2017.
論文	K. Yatabe, <u>K. Ishikawa</u> , and Y. Oikawa, “Improving principal component analysis based phase extraction method for phase-shifting interferometry by integrating spatial information,” Optics Express, vol.24, no.20, pp.22881–22891, 2016.
○論文	K. Yatabe, <u>K. Ishikawa</u> , and Y. Oikawa, “Compensation of fringe distortion for phase-shifting 3D shape measurement by inverse map estimation,” Applied Optics, vol.55, no.22, pp.6017–6024, 2016.
総説	<u>K. Ishikawa</u> , K. Yatabe, N. Chitanont, Y. Ikeda, Y. Oikawa, T. Onuma, H. Niwa, and M. Yoshii, “High-speed imaging of sound using parallel phase-shifting interferometry,” Optics Express, vol.24, no.12, pp.12922–12932, 2016.
総説	及川靖広, <u>石川憲治</u> , 大沼隼志, “偏光高速度カメラによる音のイメージング計測,” O plus E, vol. 39, no. 3, pp. 264–268, 2017.
○講演	<u>石川憲治</u> , 矢田部浩平, 池田雄介, 及川靖広, “光を用いた音場可視化装置,” 日本音響学会誌, vol. 72, no. 7, pp. 430–431, 2016.
講演	<u>K. Ishikawa</u> , K. Yatabe, Y. Oikawa, T. Onuma, and H. Niwa, “Optical visualization of sound field inside transparent cavity using polarization high-speed camera,” 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (inter-noise), Illinois, Aug. 2018.
講演	R. Tanigawa, <u>K. Ishikawa</u> , K. Yatabe, Y. Oikawa, T. Onuma, and H. Niwa, “Optical visualization of sound source of edge tone using parallel phase-shifting interferometry,” 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (inter-noise), Illinois, Aug. 2018.
講演	D. Hermawanto, <u>K. Ishikawa</u> , K. Yatabe, and Y. Oikawa, “Measurement of sound pressure inside tube using optical interferometry,” 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (inter-noise), Illinois, Aug. 2018.
	Y. Oikawa, <u>K. Ishikawa</u> , K. Yatabe, T. Onuma, and H. Niwa, “Seeing the sound we hear: Optical technologies for visualizing sound wave,” Three-dimensional Imaging, Visualization, and Display, Florida, Apr. 2018.

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	R. Tanigawa, <u>K. Ishikawa</u> , K. Yatabe, Y. Oikawa, T. Onuma, and H. Niwa, “Simultaneous visualization of flow and sound using parallel phase-shifting interferometry,” 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP), Kumamoto, Dec. 2017.
講演	<u>K. Ishikawa</u> , R. Tanigawa, K. Yatabe, Y. Oikawa, T. Onuma, and H. Niwa, “Experimental visualization of flow-induced sound using high-speed polarization interferometer,” 14th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2017), Sendai, Nov. 2017.
○講演	<u>K. Ishikawa</u> , K. Yatabe, Y. Ikeda, Y. Oikawa, T. Onuma, H. Niwa, and M. Yoshii, “Interferometric imaging of acoustical phenomena using high-speed polarization camera and 4-step parallel phase-shifting technique,” Proc. SPIE 10328, Selected Papers from the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, 103280I (2017).
○講演	<u>K. Ishikawa</u> , K. Yatabe, Y. Ikeda, Y. Oikawa, T. Onuma, H. Niwa, and M. Yoshii, “Optical sensing of sound fields: Non-contact, quantitative, and single-shot imaging of sound using high-speed polarization camera,” 5th Joint Meeting of Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, Hawaii, Nov. – Dec. 2016.
講演	K. Yatabe, <u>K. Ishikawa</u> , and Y. Oikawa “Signal processing for optical sound field measurement and visualization,” 5th Joint Meeting of Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan, Hawaii, Nov. – Dec. 2016.
講演	Y. Oikawa, K. Yatabe, <u>K. Ishikawa</u> , and Y. Ikeda, “Optical sound field measurement and imaging using laser and high-speed camera,” 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (inter-noise), Hamburg, Aug. 2016.
講演	<u>K. Ishikawa</u> , K. Yatabe, Y. Ikeda, and Y. Oikawa, “Numerical analysis of acousto-optic effect caused by audible sound based on geometrical optics,” 12th Western Pacific Acoustics Conference, pp.165–169, 2015.
講演	石川憲治, 谷川理佐子, 南翔汰, 矢田部浩平, 及川靖広, “早稲田大学本庄キャンパスに構築した音響光計測実験室,” 日本音響学会講演論文集, Sep. 2018.
講演	谷川理佐子, <u>石川憲治</u> , 矢田部浩平, 及川靖広, “光学的可視化における空間周波数フィルタを用いた流れと音の分離,” 日本音響学会講演論文集, Sep. 2018.
講演	今枝文彦, <u>石川憲治</u> , 矢田部浩平, 及川靖広, “1万チャンネル音響データに対する部分空間法を用いたノイズ除去,” 日本音響学会講演論文集, Sep. 2018.
講演	<u>石川憲治</u> , 矢田部浩平, 及川靖広, 大沼隼志, 丹羽隼人, “偏光高速度干渉計を用いた軸対称音場の3次元・瞬時・定量可視化計測,” 日本音響学会講演論文集, Mar. 2018.
講演	谷川理佐子, <u>石川憲治</u> , 矢田部浩平, 及川靖広, 大沼隼志, 丹羽隼人, “偏光高速度干渉計を用いた空力音の可視化,” 日本音響学会講演論文集, Mar. 2018.
講演	矢田部浩平, <u>石川憲治</u> , 及川靖広, “レーザ干渉計による音圧分布の非接触計測 ～これまでの動向と近年の発展～,” 信学技報, vol.117, no.399, pp.33–40, 2018.
講演	<u>石川憲治</u> , 谷川理佐子, 矢田部浩平, 及川靖広, 大沼隼志, 丹羽隼人, “偏光高速度干渉計を用いた音場イメージング計測法の原理と応用,” 日本音響学会アコースティックイメージング研究会資料, AI-2017-24, Oct. 2017.
講演	<u>石川憲治</u> , 谷川理佐子, 矢田部浩平, 及川靖広, 大沼隼志, 丹羽隼人, “偏光高速度干渉計を用いた透明管体内部音場の2次元イメージング計測,” 日本音響学会講演論文集, pp.489–490, Sep. 2017.
講演	D. Hermawanto, <u>K. Ishikawa</u> , K. Yatabe, and Y. Oikawa, “Very near field sound pressure visualization of MEMS microphone by optical interferometer,” 日本音響学会講演論文集, pp.633–634, Sep. 2017.

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	谷川理佐子, <u>石川憲治</u> , 矢田部浩平, 及川靖広, 大沼隼志, 丹羽隼人, “流れと音の光学的可視化のための流体温度調節法,” 日本音響学会講演論文集, pp. 1257–1258, Sep. 2017.
講演	<u>石川憲治</u> , 矢田部浩平, 池田雄介, 及川靖広, 大沼隼志, 丹羽隼人, “光による音場イメージング計測法の楽器計測への応用,” 日本音響学会講演論文集, pp. 1323–1324, Mar. 2017.
講演	谷川理佐子, <u>石川憲治</u> , 矢田部浩平, 池田雄介, 及川靖広, 大沼隼志, 丹羽隼人, “偏光高速度干渉計を用いた流れと音の同時可視化,” 日本音響学会講演論文集, pp. 1125–1126, Mar. 2017.
講演	矢田部浩平, <u>石川憲治</u> , 及川靖広, “音の光干渉計測のための干渉縞解析,” 日本音響学会講演論文集, pp. 633–634, Mar. 2017.
講演	<u>石川憲治</u> , 矢田部浩平, 池田雄介, 及川靖広, 大沼隼志, 丹羽隼人, “偏光高速度干渉計によるスピーカ放射音場の 1mm 分解能イメージング計測,” 日本音響学会講演論文集, pp. 343–344, Sep. 2016.
講演	矢田部浩平, <u>石川憲治</u> , 及川靖広, “Herglotz 波動関数の球面調和関数展開による光学的測定データからの三次元音場復元,” 日本音響学会講演論文集, pp. 387–388, Sep. 2016.
講演	<u>石川憲治</u> , 矢田部浩平, Nachanant Chitanont, 池田雄介, 及川靖広, 大沼隼志, 丹羽隼人, “偏光高速度干渉計を用いた定量的かつサブミリメートルの空間分解能を持つ光学的音場計測法,” 日本音響学会講演論文集, pp. 593–594, Mar. 2016.
講演	<u>石川憲治</u> , 矢田部浩平, 池田雄介, 及川靖広, “空気中可聴音場による光波変調のモデル化に関する検討,” 日本音響学会講演論文集, pp. 559–560, Sep. 2015.
講演	矢田部浩平, <u>石川憲治</u> , 池田雄介, 及川靖広, “光を使って音を録る ～光学的音響測定とその信号処理～,” 情報処理学会研究報告, vol. 2015-MUS-107, no. 11, pp. 1–6, May 2015.
業界誌	及川靖広, 矢田部浩平, <u>石川憲治</u> , “音を撮影するカメラ～偏光高速度干渉計,” Shake Hands, vol. 5, pp. 8–9, Sep. 2017.
その他 (講演)	竹内大起, 山中悠勢, <u>石川憲治</u> , 池田雄介, 及川靖広, “三次元音場創生を目的とした 256ch 高速 1bit スピーカシステム,” 日本音響学会講演論文集, pp. 633–634, Mar. 2017.
その他 (講演)	杉山真望, <u>石川憲治</u> , 矢田部浩平, 池田雄介, 及川靖広, “回転非対称の素子からなる音響メタマテリアルの特性の可視化,” 日本音響学会講演論文集, pp. 1107–1108, Sep. 2016.
その他 (講演)	中村歩己, 矢田部浩平, <u>石川憲治</u> , 池田雄介, 及川靖広, “フリーリード楽器における空気流出側の構造が発音に与える影響,” 日本音響学会講演論文集, pp. 691–692, Sep. 2016.
その他 (論文)	<u>K. Ishikawa</u> , Y. Oikawa, and Y. Yamasaki, “Non-intrusive sound pressure measurement using light scattering,” Acoustical Science and Technology, vol.36, no.5, pp.408–418, 2015.