

令和元年6月12日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14187

研究課題名（和文）光音響効果を用いた空中音源の生成

研究課題名（英文）Sound source generation using photoacoustic effect in air

研究代表者

及川 靖広（OIKAWA, Yasuhiro）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70333135

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、光音響効果を用いた音源生成の理論を確立し、最終的にはそれを気体中に適用することで任意の音源を再生可能な空中音源の生成を目指した。まず、理論・シミュレーション・実験による基礎検討を重点的に行い、照射する固体の熱容量や熱伝導率と再生音圧の関係などを確認した。次に、物体表面を音源位置とする音の再生を目指し、システム構築、実験を進め、音の発生を確認した。また、レーザーを空中に散布した霧状の水滴等に照射することで、空中音源の実現を目指した。わずかな音ではあるが、音の発生を確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光音響効果に着目し、これまでにない新しい形の音源生成手法を理論的にもシステムとしても確立した他に類を見ない試みである。発音位置に駆動系も電気系も要さず空間の任意の位置に音源を生成することができ、システムの制約の少ない音場再生が可能となる。音響測定、模型実験等の音源として非常に有効であるばかりか、バーチャルリアリティ、拡張現実、高臨場感コミュニケーションシステム等の音場再生においても応用が可能である。

研究成果の概要（英文）：In this study, I established the theory of sound source generation using the photoacoustic effect, and finally applied it in the air to aim at the generation of an aerial sound source. First, I focused on basic studies based on theory, simulation and experiments, and confirmed the relationship between the heat capacity of the solid, the thermal conductivity, and the regenerated sound pressure. Next, I aimed at the reproduction of the sound from the object surface and a system construction and experiments were advanced to confirm the generation of sound. In addition, I aimed at the reproduction of the sound in the mist which is irradiated with the laser. Although it was a slight sound, I could confirm the generation of the sound.

研究分野：音響学、音響工学

キーワード：音響情報・制御 光音響効果 レーザ プロジェクション バーチャルリアリティ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

1880年、電話の発明で有名な A. G. Bell は、密閉されたセル内に設置した固体に音声信号で変調した太陽光を照射することで音波が発生することを光通信の実験中に発見した。この Bell の発見に触発されて、Tyndall や Rontgen はセル内に封入した気体に断続光を照射することでも音波が発生することを発見した。これが後に光音響効果と呼ばれる効果である。Bell の発見から半世紀の時を経て、1938年に Viengerov が混合ガス中のガス濃度の測定に応用したことから光音響効果は気体の分析方法として再注目されるようになった。さらに、1976年 Rosencwaig らによって固体試料の分光測定にきわめて有用であることが示されたことで、瞬く間に世界中の研究者の注目を集めることとなった。

そのような試料の測定には微弱な音波が発生すればよいが、一方で、日常生活で耳にする程度の音圧を発生することができれば、駆動系も電気系もない再生系や、空間の任意の位置に音源を生成する再生系の実現など、応用範囲は多岐にわたる。研究代表者らは、これまで固体光音響効果を用いた音の再生に関する原理の確認を行ってきた。より詳細に検討を加え、システムを構築することが望まれる。近年レーザによって気体の絶縁破壊を引き起こし、その際のパルス波を音源・超音波源として用いる研究もなされているが、パルス音源以外の任意の音源の再生に関しては未だ確立されていない状況である。

2. 研究の目的

光音響効果は、音響信号で変調した光を物質に照射すると、光エネルギーを吸収した分子が熱を放出し、近傍の空気が音響信号に同期して熱膨張することで音波が発生する現象である。1880年に A. G. Bell により発見され、近年では材料等の分析に広く用いられているが、音響システムとしての応用例はない。一方、発音位置に駆動系も電気系も要さない再生システムが実現されれば、空間の任意の位置に音源を生成できる可能性があり、その応用範囲は多岐にわたる。研究代表者らは、固体光音響効果を用いた音の再生に関して原理確認を行ってきたが、本研究では光音響効果を用いた音源生成の理論を確立し、最終的にはそれを気体中に適用することで任意の音源を再生可能な空中音源の生成を目指す。

光音響効果を用いた音源生成の理論を確立し、十分な音圧で任意の音を再生可能なシステムに必要な条件を明らかにし、そのシステムの構築、最適化を行う。照射対象としては固体および微粒子を用いる。いわゆるスピーカを用いて音を再生するのではなく、光を用いて空間の任意の位置に任意の音を再生可能な音源を生成するという、これまでにない音響再生手法を確立する。

3. 研究の方法

本研究では、光音響効果を用いた音の再生に関する理論を確立し、任意の音源を再生することのできるシステムを構築する。以下の(1)～(4)について取り組む。

(1) 理論・実験・シミュレーションによる基礎検討

理論・実験・シミュレーションによる基礎検討を行う。固体光音響効果の理論、サーモホンの理論、伝熱理論に基づき、光音響効果を利用した音響再生システムの実現に向けた統一的な理論の構築を行う。また、照射固体の検討、及び水の相変化による体積膨張を利用した音圧の向上について検討する。

(2) 再生可能なシステムの構築

基礎検討に基づき、物体表面を音源位置とする所望の音響信号の再生を目指す。まず、理論的および実験的知見に基づき対象とする物質を決め、さらに変調方式の違いが光音響効果に与える影響や音の再生に最適な条件などの検討を行う。さらに、任意の音源を再生可能なシステムを構築し、音響プロジェクトなどへの応用を検討する。

(3) 性能向上と高度化

さらに性能向上と高度化をし、レーザを空中に散布した霧状の水滴等に照射することで、空中音源の実現を目指す。

(4) 総括

(1)～(3)の研究内容をまとめ、本研究に関する知見をまとめ、残されている課題を示す。

4. 研究成果

(1)2016年度は、理論・シミュレーション・実験による基礎検討を重点的に行った。具体的には、以下の項目について研究を進めた。

①基礎理論の検証

A. Rosencwaig らの固体光音響理論と H. D. Arnold らのサーモホンの理論に基づき、固体の熱容量、熱伝導率と再生される音波の関係を検証した。特に、固体光音響理論とサーモホンの理論の間にある、音圧と周波数に関する矛盾点について、統一的な理論の構築に向けた理論的検討を行った。固体光音響理論とサーモホンの理論の間にある、音圧と周波数に関する矛盾点存在することを確認し、周波数と音圧が正の相関を持つことが確認できたことよりサーモホンの理論の方が状況を良く説明していることが確認された。

②数値解析を用いた検証

上記の先行研究における理論は単純化されたモデルを用いているので、それらに基づいて新

たに導出した理論もいくらかの単純化を伴う。そこで、単純化の度合いに応じていくつかの定式化を行い、それらを用いシミュレーションを行った。同時に、音響系および伝熱系を連成したより複雑なモデルに対してもシミュレーションを行った。これにより、照射する固体の熱容量や熱伝導率と再生音圧の関係などについて、音の再生に最適な条件があることを確認した。シミュレーションと実験結果より、熱容量と音圧の関係に関しては理論通り熱容量が小さいほど音圧が大きくなることが確認できた。一方で、熱伝導率はそれらの理論と異なり、単純に熱伝導率が小さいほど音圧が大きくなるという結果は得られず、熱伝導率と音圧の関係性には最適値が存在し、熱伝導率が大きすぎても小さすぎても音圧が小さくなってしまふことを示した。固体の光音響効果においては熱容量が小さい固体を選択することが第一であり、ついで熱伝導率の最適値を探ることが必要となってくると考えられる。

③実験による検証

数値解析と並行して、様々な特性を有する物質に機械的にチョップしたレーザ光を照射し、小さい音圧であるが音の再生を可能とした。その音響的・熱的応答の計測を行い、発生する音の音圧と周波数の関係、照射する固体の熱容量や熱伝導率との関係を調べた。シミュレーション結果との比較を行い、妥当性について検証した。

(2)2017年度は、初年度の成果に基づき、物体表面を音源位置とする音響信号の再生を目指し、システム構築、実験を行なった。光学的音響計測器を構築し、音波生成の様子を確認した。具体的には、以下の課題について取り組んだ。

①複数の周波数を再生可能なシステムの構築

初年度は光音響効果という物理現象の基礎的な特性を明らかにするため、正弦波などの単純な定常音の発生を対象としたが、レーザパルスの周波数を変えることにより複数の周波数の音を再生可能なシステムを構築した。レーザを金属、木材、炭化コルク等に照射して、音の発生を確認した。光を照射する物質との関係など、光音響効果に関わる様々な要因を実験により確認した。

②光学的音響計測による音源近傍の計測

研究を進める中で音源近傍の音場の瞬時定量計測することが必要であるとの認識に至った。そこで、我々がこれまで提案してきた位相シフト干渉法と偏光計測技術を組み合わせた空気の屈折率変調を定量的かつ高速高空間分解能で計測可能な計測システムを構築し、音波発生の様子を可視化計測可能とした。様々な音源近傍の観測を行ない、音波発生の様子を計測、考察を加えた。

③音源のプロジェクトンを目指した処理

可動式ミラーによりレーザ光照射位置を変えることができるシステムを構築し、光を照射した場所を音源とすることができることを確認した。このシステムにより移動音源を生成可能であることを確認した。

(3)2018年度は、これまでの成果に基づき、レーザを空中に散布した霧状の水滴等に照射することで、空中音源の実現を目指した。加湿器によって生成した霧を筒に満たし、そこに光を集光することで音の再生を試みた。筒の中を霧で満たした場合と霧を除いた場合について測定、比較を行ったところ、光の変調周波数及び倍音成分が霧に照射した場合のみで確認できた。

以上のように、本研究では光音響効果を用いた音源生成の理論を確立し、最終的にはそれを気体中に適用することでこれまでにない新しい形の音源生成を可能とした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

①Risako Tanigawa, Kenji Ishikawa, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, Takashi Onuma, Hayato Niwa, “Optical visualization of a fluid flow via the temperature controlling method,” Optics Letters, Vol. 43, No. 14, pp. 3273-3276, July. 2018.

<https://doi.org/10.1364/OL.43.003273>

査読あり

②Kohei Yatabe, Risako Tanigawa, Kenji Ishikawa, Yasuhiro 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, May. 2018.

<https://doi.org/10.1364/OE.26.013705>

査読あり

③Kenji Ishikawa, Risako Tanigawa, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, Takashi Onuma, and Hayato Niwa, “Simultaneous imaging of flow and sound using high-speed parallel phase-shifting interferometry,” Optics Letters, Vol. 43, No. 5, pp. 991-994, Mar. 2018.

<https://doi.org/10.1364/OL.43.000991>

査読あり

④Kohei Yatabe, Kenji Ishikawa, Yasuhiro Oikawa, “Hyper ellipse fitting in subspace method for phase-shifting interferometry: Practical implementation with automatic pixel selection,” , vol. 25, no. 23, pp. 29401-29416, Optics Express, Nov. 2017.

<https://doi.org/10.1364/OE.25.029401>

査読あり

⑤ Kohei Yatabe, Kenji Ishikawa, Yasuhiro Oikawa, “Acousto-optic back-projection: Physical-model-based sound field reconstruction from optical projections,” *Journal Sound and Vibration*, Vol. 394, No. 28, pp. 171-184, April. 2017.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2017.01.043>

査読あり

⑥ Kenji Ishikawa, Kohei Yatabe, Nachanant Chitanont, Yusuke Ikeda, Yasuhiro Oikawa, Takashi Onuma, Hayato Niwa, and Minoru Yoshii, “High-speed imaging of sound using parallel phase-shifting interferometry,” *Optics Express*, Vol. 24, No. 12, pp. 12922-12932, 2016. 6.

DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.24.012922>

査読あり

[学会発表] (計9件)

① Risako Tanigawa, Kenji Ishikawa, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, Takashi Onuma, Hayato Niwa, “Optical Visualization of Sound Source of Edge Tone using Parallel Phase-Shifting Interferometry,” *Proc. InterNoise2018*, in18_1494, Aug. 2018.

② Denny Hermawanto, Kenji Ishikawa, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, “Measurement of Sound Pressure inside Tube using Optical Interferometry,” *Proc. InterNoise2018*, in18_1688, Aug. 2018.

③ Kenji Ishikawa, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, Takashi Onuma, Hayato Niwa, “Optical Visualization of Sound Field inside Transparent Cavity using Polarization High-Speed Camera,” *Proc. InterNoise2018*, in18_1806, Aug. 2018.

④ Yasuhiro Oikawa, Kenji Ishikawa, Kohei Yatabe, Takashi Onuma, Hayato Niwa, “Seeing the sound we hear: Optical technologies for visualizing sound wave,” *Proc. SPIE*, vol. 10666, Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2018, pp. 106660C-1-106660C-8, April. 2018.

<https://doi.org/10.1117/12.2305323>

⑤ R. Tanigawa, K. Ishikawa, K. Yatabe, Y. Oikawa, T. Onuma and H. Niwa, “SIMULTANEOUS VISUALIZATION OF FLOW AND SOUND USING PARALLEL PHASE-SHIFTING INTERFEROMETRY,” *Proc. Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing*, PSFVIP11-031, Dec. 2017.

⑥ Kenji Ishikawa, Risako Tanigawa, Kohei Yatabe, Yasuhiro Oikawa, Takashi Onuma, Hayato Niwa, “Experimental Visualization of Flow-induced Sound using High-speed Polarization Interferometer,” *Proc. Int. Conf. Flow Dynamics*, pp. 746-747, Nov. 2017.

⑦ Kenji Ishikawa, Kohei Yatabe, Yusuke Ikeda, Yasuhiro Oikawa, Takashi Onuma, Hayato Niwa, Minoru Yoshii, “Optical sensing of sound fields: Non-contact, quantitative, and single-shot imaging of sound using high-speed polarization camera,” 5th Joint Meeting ASA/ASJ, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 140, No. 4, Pt. 2, p. 3087, Nov. 2016.

⑧ 杉山真望, 石川憲治, 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,” *日本音響学会秋季研究発表会講演論文集*, pp. 1107-1108, 2016. 9.

⑨ 石川憲治, 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,” *日本音響学会秋季研究発表会講演論文集*, pp. 343-344, 2016. 9.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：池田 雄介

ローマ字氏名：(IKEDA, Yusuke)

所属研究機関名：東京電機大学

部局名：未来科学研究科

職名：助教

研究者番号 (8桁)：80466333