

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19560432

研究課題名（和文） 光の中から音情報を取り出す方法と光波マイクロホンの実用化研究

研究課題名（英文） Study of optical method extracting sound information included in light and establishment of optical wave microphone

研究代表者

園田 義人 (SONODA YOSHITO)

東海大学・産業工学部・教授

研究者番号：90117143

研究成果の概要（和文）：

本研究は、振動膜等の物体を一切使わずレーザー光により音を直接検出する方法、あるいは光の中から音情報を取り出す方法（「光波マイクロホン」と総称）を提案し、この方法の技術を確認することを目的とした。光波マイクロホンの性能を改善するための理論的及び実験的検討を行い、レーザー光源と光検出回路の最適化、光情報処理部の構成法、音受信用のレーザービームアンテナの構成法、音による信号回折光の差動検出によるSN比の改善法、等を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

An optical wave microphone with no diaphragm, which can detect sound waves by the optical information processing method, is proposed. The theoretical and experimental studies to improve the performance of the system are carried out, which reveal the optimum balanced condition between a laser power and a light detection circuit and establish the fundamental methods to construct an optical information processing system and to configure a laser beam antenna for sound detection.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測、音、光マイクロホン、レーザー応用計測、超音波、光情報処理、センサ

### 1. 研究開始当初の背景

音の検出手段として、種々のマイクロホンが用いられている。それらは1世紀以上に亘る開発の歴史があるが、その基本方式（振動

膜の利用）は変わっておらず、応用上種々の制約や限界が出るのが避けられなかった。

本研究は、振動膜等の物体を一切使わずレーザー光により音を直接検出する方法、あるいは

は光の中から音情報を取り出す方法(以下、「光波マイクロホン」と総称)を開発しようとするものである。本研究では、これまで光波マイクロホンの基盤となる基礎理論及び基礎技術をおよそ確立してきており、ここでは実用化を目指した技術開発を行うこととした。

## 2. 研究の目的

本研究では、光波マイクロホンの実用化を目指し、光波マイクロホンを構成する各部(光源、レーザビーム音受信部、光信号処理部、光検出器部、電気信号処理部)の改善や最適化による信号増大の可能性、S/N比の改善の可能性を理論及び実験の両面から検討すると共に、高機能化を検討する。これらの理論及び実験の両面から検討した結果を総合化し、光波マイクロホンの基盤技術としてまとめることを目的とした。

## 3. 研究の方法

[本計測法の基本説明]

本計測法は、図1に示すように光を音測定領域に入射し、そこを伝搬する音波の位相変調作用によって生じる極微弱の光回折波と透過波との合成光波を、光ビーム出口側で光学情報処理系(フーリエ光学系)を通した後、光検出器で検出して音波の情報(周波数、強度、波長、位置等)を得ようとするものである。特に、レーザビーム径より波長が長い長波長波長の測定に優れ、可聴音波の検出に適している。図2は図1の原理図をそのまま実験に移す形で組んだ基礎実験装置で、原理検証実験、基礎特性測定実験を行うのに用いる。

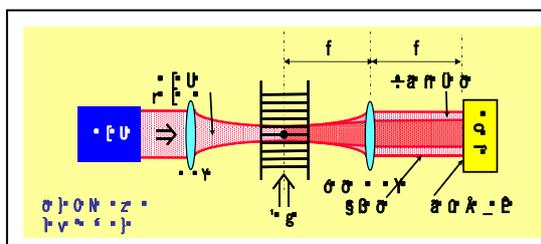


図1. 光波マイクロホンの理論モデル

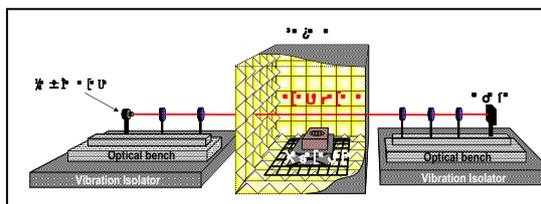


図2. 基礎実験用装置

### (1) レーザ光源と光検出器回路の最適化の検討

信号出力は入射レーザパワー(5~10mW 出力を使用)に比例することは従来の基礎研究

で理論的及び実験的に明らかにしているが、使用レーザパワーと検出器回路とを整合させた総合的な評価は未解決であるので、本実験では信号最大化・システム最適化を検討する。また、振幅変調光を検波する汎用回路は大振幅の直流成分(透過光)に微弱な交流信号成分(音による極微弱変調光)が混在する光波マイクロホンの信号処理には最適の形とはなっておらず、回路的には未だ信号強度を増大させ得る余地があると予測される。ここでは光波マイクロホンの検波に最適の回路を試作し信号強度を増大させることを検討する。

### (2) 光学情報処理部(受光側光学系)の検討

信号増大という実用化の要請に沿って、光学情報処理部(受光側の光学システム)の最適化を理論及び実験の両面から検討する。具体的には、音波波長に対する入射レーザビーム径選択・フーリエ変換レンズ系構成と集光径・光検出素子サイズの3者のフィッティングによる信号強度増大の最適条件を調べる。

### (3) 2分割光検出器の差動増幅方式の検討

光検出面に生じる時間的位相が反転した2つの回折像を2分割光検出器で測定し、その出力信号を差動増幅にかけ信号増倍作用を検証する実験を実施する。(図3参照)さらに、2つの検出器回路に同位相で入る光ノイズ(蛍光灯など)・電氣的ノイズ・振動ノイズ・固体伝搬ノイズなどの低減効果を実験的に検討する。これらにより、差動増幅方式を用いた場合の総合的なS/N比改善効果を明らかにする。

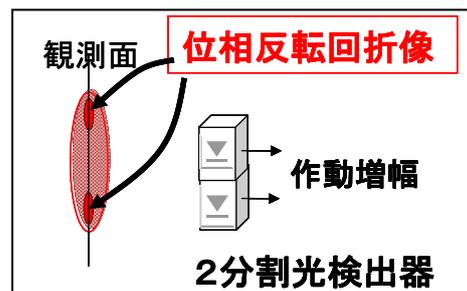


図3. 位相反転回折像と2分割光検出器

### (4) 音受信用レーザビーム部の構成法と指向特性、信号増幅特性の検討

音受信用のアンテナの基本要素の一つと考えられるプリズム反射形ダブルビームによる音信号増倍効果は従来の研究で検証しているが、ここでは指向性の検討を行う。また、多重反射ビーム形の音波受信方式の中で

最も高感度な光学系として期待されるレーザー共振器形の光波マイクロホンを提案し、その理論計算を行う。また、その有効性を確認する初期実験を行う。

#### (5) 交差する2つの光ビームを用いた相関測定

光波マイクロホンはレーザービームに沿って音による屈折率変化（光変調）を積分するため光軸方向の空間分解能が低い。ここでは、測定音場内で適当な角度で交差させた2つのレーザービーム光学系を用い、両者から得られる出力信号の相互相関処理を行い、空間分解能の改善効果を調べる。また、S/N比改善性能を調べる。

#### (6) 戻り光、反射光の低減によるノイズ改善

光波マイクロホン内のレーザービーム伝搬過程で光学部品による反射光、戻り光によりノイズが生じやすい。ここでは、反射光や戻り光によるノイズの低減法を検討する。

#### (7) 音の進入方向毎の分離測定、指向性制御

音の入射方向により観測面内での回折像の位置が変わるので、多分割形の光検出器を用いることにより音の進入方向毎の分離測定が可能となる。また、全ての検出器出力を1本にまとめれば全指向性の音検出となる。ここでは、通常の指向特性の測定に加え、光ファイバ束（またはマルチ光検出器）による音の進入方向毎の分離測定（立体録音）及び高指向性化、全指向性化について基礎的な検討を行う。

### 4. 研究成果

得られた主な結果の要約を以下に記す。

(1) レーザ光源と光検出器回路の最適化の検討： 信号出力は入射レーザーパワーに比例すること、レーザーパワー増大(28mW)で従来値より4倍以上の信号強度改善が得られること、等を示した。一方、信号回折光検出について、フォトダイオードの検出抵抗値を大きくし、かつ適切なバイアス条件に設定することにより従来値より10倍以上の信号増大が可能であることを示した。このとき信号に含まれるノイズに関する検討と低減化は今後の課題として残った。

(2) 光学情報処理部の検討： 多数のレンズから成るフーリエ光学系を用いた研究で、光検出面に対し光学的フーリエ変換の関係にある位置に入射した音波が検出されるという原理面での光学系作成法を明らかにしている。さらに信号増大という視点からみると、

音検出領域に入射するスポットサイズが大きいほど感度が上昇すること、光検出素子サイズは大きい方が信号強度も増大するが、光回折像の空間分布を考慮してバランスを取る方がS/N比は良くなるため結像と検出器とのバランスの取れた最適値を光学系毎に決定する必要があること、一般光学機器で用いられている各種光学系について光波マイクロホンの光信号処理への適用性や信号増大改善性等を検討したが、従来から用いている標準的なフーリエ光学系の方が適していること、等を示した。

#### (3) 2分割光検出器の差動増幅方式の検討：

光検出面に生じる時間的位相が反転した2つの回折像を2分割光検出器で測定し、その出力信号を差動増幅にかける方式により、信号が増倍されること、同位相ノイズ（蛍光灯など）をキャンセルできること、これらによりS/N比改善が得られること等を示した。2分割型光検出器の出力差動方式による信号増幅効果と信号処理法としての有効性を実験的に明らかにできたが、ノイズ低減の詳しい検討は今後の課題として残った。

(4) 音受信用レーザービーム部の構成法による指向特性、信号増幅特性の検討： 音受信アンテナとして基本要素的なプリズム反射形ダブルビーム（左右反転ビーム）について、シングルビームアンテナと比較しながら、音信号増倍効果やレーザービーム間隔と信号強度との関係、指向性の変化などを明らかにした。また、信号増幅に関して、平面ミラー多重反射方式で10倍程度の信号増大は容易に実現できることを示した。さらに、光共振器形の反射光学系により音信号の増幅の可能性を理論的に考察した。ただし、光共振器形の反射光学系による信号増幅の検証実験は今後の課題となった。

#### (5) 2つの光ビームによる相関測定方式の検討：

測定音場内で90°の角度で交差させた2つのレーザービーム光学系を用いて、両出力信号の相互相関処理により空間分解能が改善されることを実験により確認した。相関値等から音信号に変換再生する方法については今後の課題となった。

(6) 光波マイクロホン光学系における戻り光、反射光によるノイズの低減の検討： レーザ光源への戻り光や光学系中での反射光の影響などをノイズ低減の視点から検討した。特に、光検出面に生じる反射光干渉縞がノイズに

大きく影響していることを明らかにし、対応策を示した。特に光波マイクロホンをコンパクト化する場合にこの対策が重要である。

(7) 音の進入方向毎の分離測定、指向性制御：光ファイバ束（12チャンネル）により音の進入方向毎の分離測定ができることを実験的に示した。ただし、音による光回折像はレーザビーム断面上である程度の広がりを持つため、小角度での分離は困難であった。光ファイバ出力を合成することにより双指向性から全指向性への手元制御は容易であるが、高性能の分離測定や高指向性化の実現は今後の課題として残った。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 17 件）

- ① 岩原基樹・佐松崇史・大内可人・中園与一・中宮俊幸・園田義人：「光波マイクロホンにおける音波検出の物理的解釈に関する論理的考察」東海大学・紀要 産業工学部（学外査読有）Vol. 2, pp. 89-96, 2009.
  - ② Y. Sonoda, T. Samatsu and M. Iwahara: "Development of Nodal Sound Detection Method Using Optical Information Processing (Optical Wave Microphone)" ICIC Express Letters, 査読有, Vol. 4, No. 4(A), pp. 989-994, 2009.
  - ③ 光木文秋, 陶山翔大, 池上知顕, 中宮俊幸, 園田義人: 「光波マイクロホンによる沿面放電音の測定と解析」レーザー研究(レーザー学会誌), 査読有, Vol. 37, No. 5, pp. 379-383, 2009.
  - ④ T. Nakamiya, Y. Sonoda, T. Ikegami, F. Mitsugi, K. Ebihara, R. Tsuda: "Measurement of electric discharge sound by Fraunhofer diffraction and analysis" Przelad Elektrotechniczny (Electrical Review), 査読有, Vol. 85, No. 5, pp. 143-147, 2009.
  - ⑤ 中園与一・園田義人・楠田正博: 「光マイクロホンの音響特性と空力騒音への応用」日本産業技術教育学会誌, 査読有, 50 巻, 第 2 号, pp. 85-93, 2008.
  - ⑥ Y. Nakazono, Y. Sonoda, Y. Ouchi, Y. Nasu: "Near-field acoustic characteristics of screech jet exhausted from a nozzle with a hard reflecting plate" Journal of Visualization, 査読有, Vol. 11, No. 2, pp. 153-162, 2008.
  - ⑦ T. Sakoda, Y. Sonoda: "Visualization of sound field with uniform phase distribution using laser beam microphone coupled with computerized tomography method" Acoustical Science and Technology, 査読有, 29, 4, pp. 295-299, 2008.
  - ⑧ T. Nakamiya, Y. Sonoda, T. Ikegami, F. Mitsugi, K. Ebihara, R. Tsuda: "The Acoustic Signal Measurement and Analysis in Atmospheric Pressure Plasma" 11th International Symposium on High Pressure, Low Temperature Plasma Chemistry, 査読有, Vol. 1, pp. 198-202, 2008.
- 〔学会発表〕（計 32 件）
- ① 園田義人: 「光波マイクロホンにおける音の空間サンプリングと検出」日本音響学会, 2009 年秋季研究発表会, 2009 年 9 月 (郡山・日大) .
  - ② 田中啓一, 寺菌信一, 園田義人: 「光波マイクロホンの周波数特性とダイナミックレンジに関する検討」日本音響学会 2009 年秋季研究発表会, 2009 年 9 月 (郡山・日大) .
  - ③ Y. Sonoda, T. Samatsu, M. Iwahara: "Development of Nodal Sound Detection Method Using Optical Information Processing (Optical Wave Microphone)", The 2nd International Symposium on Intelligent Informatics, 2009 年 9 月 (QinHuangDao, China).
  - ④ 青木俊治, 中園与一, 園田義人, 岩崎洋一郎, 高坂祐顕: 「光マイクロホンによって計測した V ノッチ型超音速ジェット騒音の近距離場特性」日本機械学会流体工学部門講演会, 2009 年 11 月 (名古屋, 名工大) .
  - ⑤ 岩原基樹, 佐松崇史, 園田義人: 「信号処理による光波マイクロホンをを用いたノイズの除去」第 11 回日本知能情報ファジィ学会九州支部学術講演会, 2009 年 12 月 (福岡, 九工大) .
  - ⑥ 田中啓一, 寺菌信一, 園田義人: 「光波マイクロホンにおける音波受信部のレーザービーム径と周波数特性に関する検討」日本音響学会 2009 年春季研究発表会, 2009 年 3 月 (東京, 東工大) .
  - ⑦ 園田義人: 「光波マイクロホンの光検出構成による音受信指向性の変化」日本音響学会 2009 年春季研究発表会, 2009 年 3 月 (東京, 東工大) .
  - ⑧ Y. Sonoda and Y. Nakazono: "Development of Wave-Optical Sound Detection Method (Optical Wave Microphone)" Inter Noise 2008 (The 37th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering), 2008 年 10 月 (Shanghai, China)
  - ⑨ 田中啓一, 寺菌信一, 園田義人: 「光波マイクロホンによる可聴域から超音波領域の測定可能性の検討」日本音響学会秋期研究発表会, 2008 年 9 月 (福岡, 九大) .

⑩園田義人：「波動光学的音検出法（光波マイクロホン）の受信特性」日本音響学会秋期研究発表会，2008年9月（福岡、九大）。

⑪園田義人：「波動光学的音検出法（光波マイクロホン）の開発」日本音響学会2008年春季研究発表会講演論文集，2008年3月（千葉、千葉工大）。

⑫白水かなみ，園田義人，河原一彦，澤田泰輔：「レーザービームマイクロホンによる音場の相関測定」平成19年度電気関係学会九州支部連合大会，2007年9月（沖縄、琉球大）。

⑬園田義人，中園与一，大内可人，佐松崇史：光波マイクロホンにおける回折光信号の差動検出、平成19年度電気関係学会九州支部連合大会，2007年9月（沖縄、琉球大）。

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.u-tokai.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

園田 義人 (SONODA YOSHITO)  
東海大学・産業工学部・教授  
研究者番号：90117143

### (2) 研究分担者

佐松 崇史 (SAMATSU TAKASHI)  
東海大学・産業工学部・准教授  
研究者番号：60299667