

研究概要報告書

(/)

研究題目	光波マイクロホンの開発研究	報告書作成者	園田 義人
研究従事者	園田 義人		
研究目的	<p>音の代表的な検出法であるマイクロホンは1世紀以上に亘る開発の歴史があるが、その基本方式(振動膜を用いて音を電気信号に変換する原理)は変わっていない。音センサ部に物体を用いているため、音場そのものを乱す、高周波応答が悪いなど、応用上種々の制約や限界が出るのが避けられない。他方、光で音を直接検出する方法として、音響光学の分野では光回折法が古くから研究されているが、これらは波長が非常に短い固体中の高周波超音波を主対象としており、空气中可聴音の検出は困難で、これまで可聴音マイクとして研究された例は見当たらない。</p> <p>一方、研究代表者等は光により可聴音を直接検出する方法を提案し、開発研究を行っている。これは、音(空気密度の変動)による微弱な光位相変調から生じる極微弱回折光を検出し、音を再生しようとする試みである。信号光から音を再生するには、光情報処理の基本技術の一つである光学的フーリエ変換を用いている。従来からの振動膜方式に光反射検出を組み合わせたものが光マイクロホンと呼ばれているため、著者は波動光学的音検出法という意味を含めて、これには光波マイクロホンという別称を用いている(図1、図2、図3参照)。同法は、元々はプラズマ核融合分野で電磁波やレーザー光を用いて長波長のプラズマ波動(電子密度揺動)や乱流を計測する方法に起源がある。これまでに、計測基礎理論確立、理論検証実験、基本的な音受信特性の解明、部分的な応用研究等を行ってきており、実用化という視点から見ると現状での最大の課題は感度及びSN比の改善に絞られてきている(図4参照)。</p> <p>本研究は、振動膜等の物体を一切使わずレーザー光を用い波動光学的に可聴音を直接検出する光波マイクロホンの実用化を最終目標とするもので、特に本研究では実用化の課題解決に向けて感度(信号増大化)やSN比の改善を目的とした。具体的には、信号増大化及びノイズ低減の解決のためには、光波マイクロホンの主要部を構成する光処理部(光学系)及び信号処理部(光検出器、電子回路)を最適化する必要があり、ここではこれらの検討と改善を行った。また、光波マイクロホンの関連技術の開発も併せて実施した。</p>		

研究概要報告書

(/)

研究内容

光波マイクロホンは、空中音波(屈折率が微弱に変化する波動)の光位相変調作用によって発生した極微弱回折光を光学的フーリエ変換し、これを光検出器に入力することにより可聴音を電気信号に変換する。これまで理論検証及び基本技術の確立などの基礎的実験を主体にしてきたが、本研究では、S/N比の改善、特に信号増大の方法に関する研究を中心に行った。信号増大のためには、光波マイクロホンを構成する「レーザ光源部」「音受信部(レーザビームアンテナ部)」「光情報処理部(光学的フーリエ変換部)」「光検出器と光検出回路部」「電気信号処理部」を総合的に検討し最適化する必要がある。

以下に、信号増大及びS/N比の改善のために実施した検討内容(光学的方法、電子回路的方法)、及び、関連研究内容を示す。

< 光源部及び音受信用光ビームアンテナ部の検討 >

入射レーザパワーと信号強度の関係、特に入射レーザパワーと信号強度の飽和の関係について調べ、最適条件を示す。

多重反射光学系(レーザ共振器型光学系を含む)による音信号増大方法の可能性を検討する。

< 光情報処理部の検討 >

微弱回折光(信号光)の光学的フーリエ変換を行う光学情報処理部を、信号増大の視点から再考察する。

< 光検出部及び信号処理回路部の検討 >

現在用いている光検出回路は市販のフォトダイオード用基板を利用しているが、大きな直流成分に微弱な交流信号成分が入った光波マイクロホンの光測定には適していない。この部分を最適化した回路を作成することで、信号強度増大を図ることができるが、ここではその基礎データとして、光検出部の検出抵抗やバイアス電圧と信号強度との関係を調べ、それらの最適条件、信号増大可能値等を明らかにする。

光音相互作用により生じる観測面上の位相反転した2つの回折像を2分割フォトダイオードで差動検出することにより、信号倍増作用及びノイズ低減効果を実験的に調べる。(図7, 図8参照)

< その他の関連技術の開発研究 >

上記の他、2レーザビーム相関法による音場計測、光波マイクロホンとコンピュータトモグラフィによる音場の可視化法、フォトレシーバ形光波マイクロホン、ノイズキャンセラー形光波マイクロホン、マルチ光ファイバによる音方向分離等の関連技術の検討を並行して実施した。

研究概要報告書

(/)

<p>研究のポイント</p>	<p>実際の音録音に光波マイクロホンを適用する試験的実験を行い、60dB 程度の背景雑音の環境下で、音圧 80～100dB 程度の音楽であれば光検出器の出力信号を家庭用ステレオに入力することで十分試聴できることを確認している。(図4参照;ただし70dB 前後で SN 比 2～5 程度である。)光波マイクロホンの実用化の視点からは、主要課題はSN比の改善に絞られてきた。光波マイクロホンを構成する光学系及び信号処理回路部でどの程度まで信号強度が増大できるか、あるいはノイズを低減できるかがポイントである。本研究では、特に信号増大の方法について検討する。</p>
<p>研究結果</p>	<p>本年度は、主として光学系(レーザ光源部、音検出部にあたるレーザビーム部、光検出部)の検討を行ったが、具体的な結果は以下の通りである。</p> <p>(1)レーザ光源と光検出器回路の検討: 信号出力は入射レーザパワーに比例すること、レーザパワー増大(28mW)で従来値より4倍以上の信号強度改善が得られ、逆バイアス電圧を上げればさらに増大できること、等を示した。一方、信号回折光検出について、検出抵抗の上昇により従来値より10倍以上の信号増大が可能なことを示した。(2)音受信用レーザビーム部の構成法による信号増幅の検討: 基本要素的な反射形ダブルビームによる音信号増倍効果やレーザビーム間隔と信号強度との関係などを明らかにした。光共振器形の反射光学系による信号増幅の試験も着手したが、本年度は装置の設計試作に留まり、性能試験は今後の課題となった。(3)光学情報処理部の検討: 信号増大という視点から、光学情報処理部(受光側の光学システム)を再検討した。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、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が適していることを示した。(4)回折像の差動検出による信号増倍の検討: 2分割フォトダイオードを使用して回折光信号の差動増幅が可能なこと、信号が増倍されること等を明らかにした。同法によれば、同相ノイズを打ち消すことができるためSN比の改善も期待できるが、この検討は今後の課題となった。</p>
<p>今後の課題</p>	<p>(1)ノイズ源の特定と低減化検討: 今回の研究では、光波マイクロホンの信号強度増大(感度増大)を中心に検討を行ったが、ノイズの検討が課題として残った。外部騒音及び電氣的ノイズ等の除去対策をした無響室(箱)において、現在の光波マイクロホンのSN比の正確な実力値を調べ、ノイズ源(周囲電磁ノイズ、電源&信号ラインノイズ、振動ノイズ、光検出器ノイズ、レーザノイズなど)の特定とその低減化を検討することが必要である。</p> <p>(2)信号処理回路部の最適化: 現在用いている光検出回路は市販のフォトダイオード用基板を利用しているが、レーザマイクロホン特有の信号(微弱な交流信号成分が大きな直流成分中に存在する)処理には適していない。レーザマイクロホン特性に合致した回路を開発することが必要である。</p> <p>(3)総合性能改善: 以上の検討結果を総合化して、全体性能の向上を図り、実用化プロトタイプ試作に展開する。</p>

光波マイクロホンの概要説明

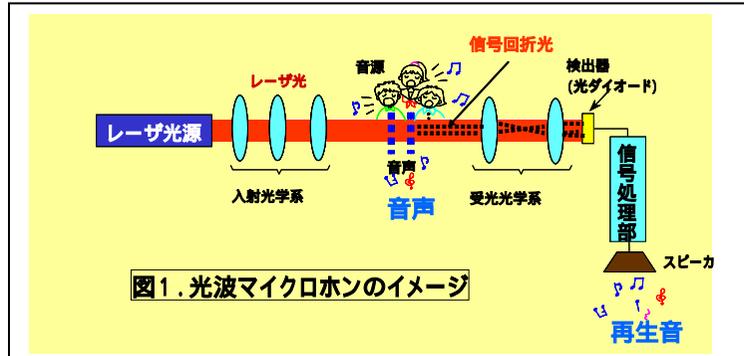


図1. 光波マイクロホンのイメージ

図1. 光波マイクロホンのイメージ図

レーザー光を測定用ビームとし、空中を伝搬する音波の位相変調作用によって生じる極微弱回折光を透過光と共に光学的フーリエ変換した後、光検出器で電気信号に変換して音を再生する。

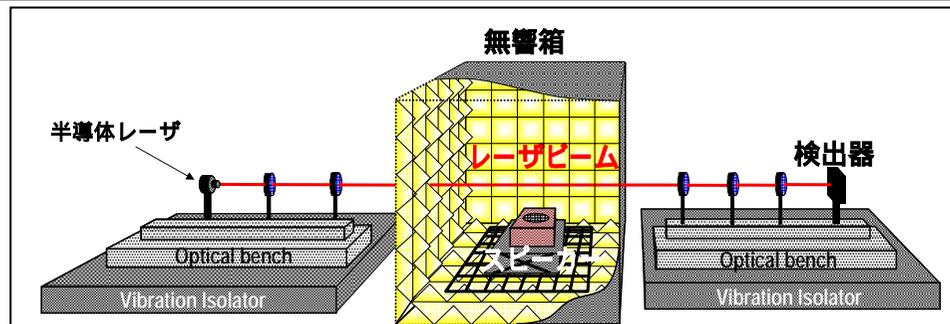


図3. 理論検証及び受信基本特性測定のための基礎実験装置

理論モデルをそのまま実験装置にしたものであり、基礎研究に用いている。ただし、実際の応用時にはこの形に限定されず、目的に合わせ1次元から3次元の立体ビームを用いることが可能であり、かつ、コンパクトマイクから超大型の音モニター装置(マクロホン)まで作成できる。

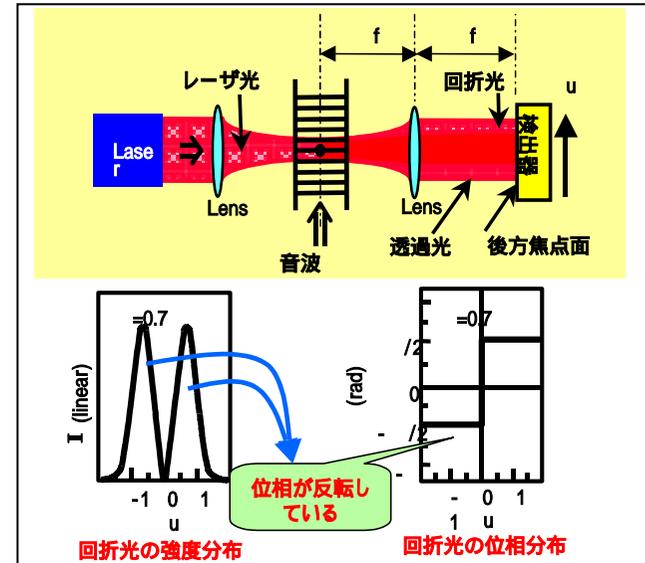


図2. 計測理論モデルと音による光回折像の計算例

音による微弱回折光と透過光は受光側レンズでフーリエ変換する。観測面上には音周波数で振動する2山形の回折像が現れる。2山の回折像は相互に時間的位相が反転しているため、差動検出すると信号強度が2倍になる。両者を同一の検出器に入射すると信号は得られない。なお、可聴帯では回折像ピーク点は周波数が変化してもシフトせず、任意の複合音が1個の光検出器で再生できる。

光波マイクロホンの特徴と利点

光波マイクロホンの利点として、(1)音場を乱さない、(2)レーザを用いる場合、ビーム伝搬により立体マイクロホンを構成し、様々な指向性を実現可能、コンパクトなマイクロホンから従来存在しなかった超大型音波アンテナまで作成可能、(3)従来型マイクロホンが設置困難な条件下や危険場所（高電磁界下、防爆区域、等）でも測定が可能、密閉容器（室）内の音も窓があれば外部から検出可能、(4)分割型光検出器（または光ファイバ束）を利用することにより、音進入方向毎の分離測定や指向性の手元制御が可能（図6参照）、(4)装置が非常にシンプルで、たとえばCD（コンパクトディスク）の光ピックアップ部よりも簡単に安価に製作できる、等々その他多くの特徴がある。また、本研究等によりコヒーレント長の短い一般の光から音情報を取得する方法に関する基本的知見も得られ、将来的には、例えば風景を写すイメージセンサの各光素子に対応した音の情報取得（イメージマイクロホン）等への展開も期待できるなど、一般生活や工業分野に密着し音分野に貢献度の大きい新技術が展開できると期待される。

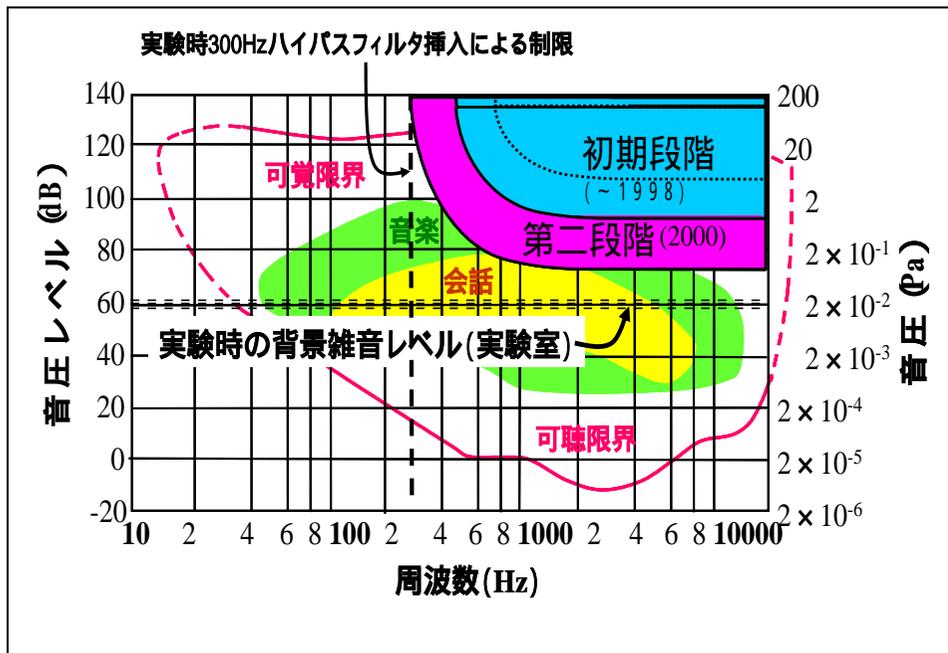


図4. 音の利用範囲と光波マイクロホンの実験領域、及び、実用化の課題

現状で測定可能な対象音の範囲(SNR 2~5以上;室内騒音約60dB時/ハイパスフィルタ挿入:300Hz)を示す。80dB程度以上の音楽であれば、家庭用ステレオに入力することで比較的きれいに聞くことができる。実用化のためには、低音圧レベルの音の検出を良好なSN比で行えるようにする必要がある。

研究結果(追加説明)：

(1) レーザ光源と光検出器回路の検討について：

光検出回路の検出抵抗(従来値 1 k)を 10k 以上まで大きくすることで、10 倍上の信号増大が可能であることを明らかにした(図5)。逆バイアス電圧を調整すれば、さらに抵抗増大による信号増大が期待できる。一方、光源については入射レーザーパワーを4倍程度に増大(28mW)し、これに比例して信号が増大する事を確認した。検出器飽和は起こらずさらに増大が可能である。

(2) 光回折像の差動検出による信号増倍の検討：

観測面上で音による2山回折像の位置は音の入射角に応じて回転する(図6)。したがって、分割型検出器を用いることにより、音の入射方向毎の分離測定や受信指向特性の手元制御などが原理的に可能である。位相反転した2山の回折像に2分割フォトダイオードを設置し差動をかけると音信号を増倍すると共に、同位相ノイズを低減することが期待できる(図7)。図8は検出面内で2つの光検出素子を独立して空間掃引したときの回折光分布の測定結果を示す。図9は2分割検出器の差動検出信号強度の変化を示すが、この最大出力値は単一検出器による出力(600mV)の約2倍となっている。これより、2分割フォトダイオードを使用して回折光信号の差動増幅が可能で、信号が増倍されること等が明らかとなった。なお、差動法による同相ノイズ低減の検討は今後の課題となった。

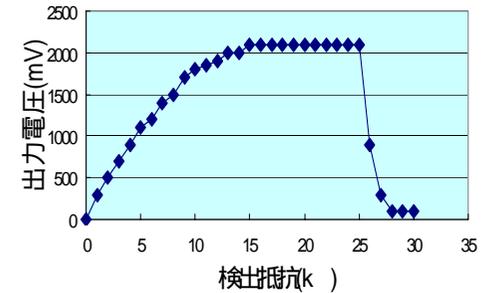


図5. 検出抵抗と出力電圧の関係

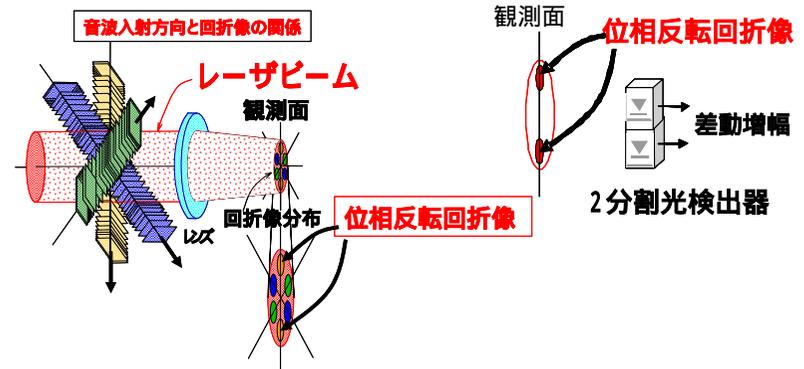


図6. 音入射方向と回折像の関係

図7. 回折像と2分割検出器

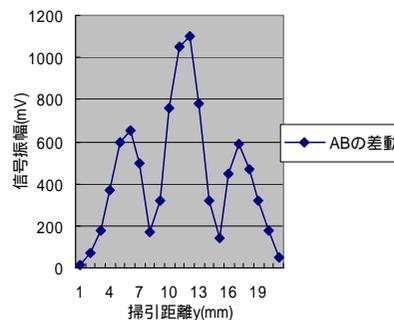
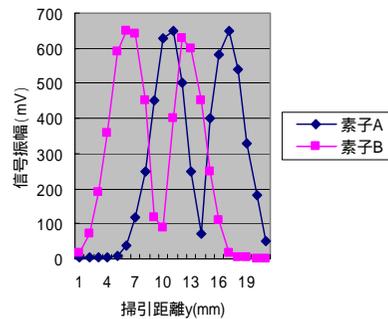


図8. 2つの単独検出素子による回折光分布測定 図9. 差動検出結果

(3) 音受信レーザービーム部の構成法による信号増幅の検討について：

図2に示す装置を整備し、ダブルビームの音受信特性を実験的に検討した。また、多重反射ビーム(6回反射=7ビームまで)による信号増幅の可能性を検討した結果、反射回数に比例して信号増倍が可能なことを明らかにした。共振形の光波マイクロホンについては、装置の設計と試作に留まり、本格的な実験は今後の課題となった。

(4) 光学情報処理部の検討：

光信号処理部(多段フーリエ光学系)を信号増大の観点から理論及び実験により検討した。従来の研究では、回折像の分解能を得るために、3枚のレンズを用いて信号光の光学処理(光学的フーリエ変換)を行っていた。本実験では、他の光学機器等で用いられている変則的な光学系の採用を検討したが、結局、従来型の単純配位(レンズ間の距離=焦点距離の和)が最適であることを確認した。また、微小光回折像に対し検出器位置を高精度で設定すれば、1枚のレンズによるフーリエ光学系でも同じ性能で音検出ができることを確認した。この使用レンズ数削減や検出器サイズの最適化などで、さらに20%以上の信号増大が期待できる。

(5) その他の関連技術の開発研究：

2つの交差するレーザービーム信号の相関を取ることでSN比を改善する実験や、光波マイクロホンとコンピュータトモグラフィを組み合わせる音源とノイズ源を分離する実験なども行ったが、計測可能性を実証するに留まりノイズの検討は今後の課題となった。