

同軸多重反射形光波マイクロホンの特性

本田和也* 佐松崇史** 園田義人***

Property of Optical Wave Microphone with Coaxial Multi-Reflection Optical System

by

Kazuya HONDA, Takashi SAMATSU and Yoshito SONODA

(Received: September 28, 2011, Accepted: February 24, 2012)

Abstract

The optical wave microphone with no diaphragm, the theory of which is based on the wave-optics and derived from physics of interaction between light and sound, uses a laser beam as a sensor and can measure sound field with no disturbance. In this method, the transduction from sound signal to electric is done by detecting diffraction light, which is generated from phase modulation by sound. In the present study, the signal amplification by using a coaxial multi-reflection system is theoretically and experimentally examined. It is theoretically shown that the signal amplification factor can be controlled by average reflectivity of two laser-mirrors used in the coaxial reflecting system. When the average reflectivity is set at 0.9, the amplification factor is about 1900 for an optical resonance condition and about 19 for a non-resonance condition. Experiments to verify the effect of coaxial multi-reflection system with non-resonance system are carried out, showing that the amplification factor larger than 10 can be easily obtained.

1. はじめに

本研究で扱う音計測法は、振動膜等の物体振動を全く用いず、音を波動光学的原理に基づいて非接触で検出する方法(総称:光波マイクロホン)である。これは、光が音波による位相変調を受けた結果生じる極微弱回折光を光学情報処理過程(光フーリエ変換¹⁾⁻³⁾)により結像し、ここに光検出器を置いて電気信号に変換し、音を再生しようとする試みである。同法では、光ビーム部(音波アンテナ)の構成・形状を変えることで音検出特性(指向性、増幅特性など)を変化させることが可能である等の利点を持つ⁴⁾⁻⁷⁾。

ただし、現在、同法により広帯域での音測定を行う場合、60dB程度までが測定限界となっている。フィルタをかけて狭帯域にすればさらに低音圧レベルが検出可能であるが、可聴音及び超音波に関わる広範な工学分野へ応用展開するためにはさらにSN比改善を行って低音圧の検出を可能にする必要がある。その方法としては光学的方法、電子回路的方法、情報処理的方法などいろいろな方

法が考えられるが、実現可能性が高い有力な方法の一つとして、2枚の一部透過型ミラー(レーザミラー)を対向させた同軸多重反射光学系を音検出部に用いて信号増幅を図る方法が考えられる。もし、この光学システムで光共振状態(2枚のミラー間に光定在波を成立させる)を達成すれば、高感度光波マイクを実現できる可能性がある。ただし、完全共振状態を作るには、周波数安定化レーザや高精度かつ温度変化にも耐えられる高安定な対向ミラー装置などが必要となり高価になるのが欠点である。

一般にレーザ発振器における光増幅には光共振状態の成立が不可避であるのに対し、音信号増幅では必ずしも光共振状態を必要としない。汎用機器としては共振が外れた単純な多重反射光学系を用いる方がかえって好ましい面もあり、その有効性を検討することは有意義である。

本報では、まず共振状態での音信号増幅の可能性を理論的に考察する。また、共振状態をはずした単純な多重反射光の重ね合わせによる信号増幅効果を考察する。

検証実験では、共振状態を達成する装置は高価で準備できなかったため、比較的簡単な装置により容易に作成でき安定性にも優れる非共振状態の同軸多重反射光学系による音信号増大効果について検討した。

* 大学院 産業工学研究科 生産工学専攻 修士2年生

** 産業工学部 機械システム工学科 准教授

*** 産業工学部 電子知能システム工学科 教授

2. 原理

光波マイクロホンの基本的な理論はすでに確立され既知の内容であるが^{8),9)}、ここでは信号増幅の理論的検討及び実験結果の解釈に必要な範囲に限定して概要を述べる。Fig. 1 に光波マイクロホンの理論計算のためのモデル図を示す。同図で音場の左側のレンズは入射ビーム調整用のレンズで、右側のレンズが信号処理（光学的フーリエ変換）用のレンズである。ただし、レーザ光源から所定のビーム直径が射出されていれば入射用レンズは不要であり、本研究の実験でも用いていない。音場にレーザビームを入射すると、音場の位相変調作用によって、音周波数だけドップラーシフトした微弱回折光が生じる。これを透過光と共にレンズ（焦点距離： f_1 [m]）に通してフーリエ変換した後、光回折像（光強度分布）として観測面で検出することにより、音場の情報（周波数、強度など）を得ることができる。受光レンズによる光学的フーリエ変換過程により、回折光が集光されると共に、微弱なドップラー回折光と強度の強い透過光との干渉が可能となり、光検出器でのヘテロダイン検波により音周波数の出力電気信号が得られる。

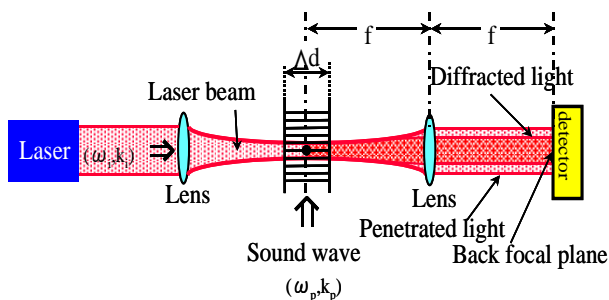


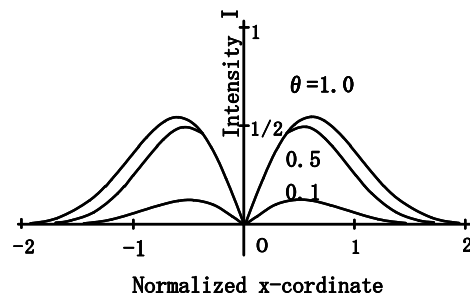
Fig. 1 Theoretical model

Fig. 1 のように、レーザ光のビームウェストに音波が入射角 90° で交差する場合、観測面における信号強度 I_{ac} [W/m²] は、次式で与えられる^{9),10)}。

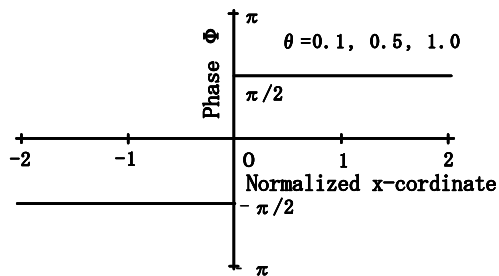
$$I_{ac} = I_0 \Delta \phi_0 \left[\exp\{-(u^2 + (u - \theta)^2)\} + \exp\{-(u^2 + (u + \theta)^2)\} \right] \sin \omega t \quad \dots (1)$$

ここで、 I_0 : レーザ光強度分布、 u : 観測面の規格化 x 座標、 $\theta (=kw_0/2)$: 規格化波数、 (ω, k) : 音波の角周波数および波数、 w_0 : レーザスポットサイズ、 $\Delta \phi_0 (=k_1 d (n_0 - 1) \Delta p / \gamma_a p)$: 位相変化の時間変動成分、 n_0 : 空気の屈折率、 Δp : 音圧、 γ_a : 比熱比、 p : 大気圧、 λ_i, k_i : レーザの波長と波数、である。

式(1)を用いて回折光分布を計算した結果の一例を Fig. 2 に示す。同図(a)は強度分布で、(b)は位相分布である。横軸は上述の観測面の規格化 x 座標 (u) である。規格化波数 θ をパラメータとしているが、 $\theta \ll 1$ の条件では $\theta \propto \omega$ (音波の角周波数) の関係となる。 $\theta = \pi w_0 / \lambda$ であるので、この条件は音波波長に対してレーザビーム直径が十分小さいことに対応する。回折強度分布(a)は左右2つの山形分布からなっているが、位相分布(b)からわかるように両者は位相差が π で反転している。



(a) Intensity distribution



(b) Phase distribution

Fig. 2 Theoretical calculation of diffraction

このように、音場による光回折像の強度分布は2つの山形分布をし、それぞれの山の部分は相互に位相が反転している。どちらか片方の山形部分に、光検出器(フォトダイオード)を設置することにより音が電気信号に変換される。

なお、音場による光位相変調作用で生じた光回折像(2山分布)の位置は、Fig. 3 に示したイメージ図のように音進入方向により変化する。すなわち、レーザビームに垂直な断面内でレーザ光軸を中心軸として音入射方向が回転すると、観測面での回折像も光軸の周りを回転する。

この特性は音の進入方向毎の分離測定を可能とし非常に有用であるが、本研究のような同軸光学系で多重反射を行う場合は、それらの反射往復の過程でレーザービームの回転が生じないように光学系を精密に調整する注意が必要である。

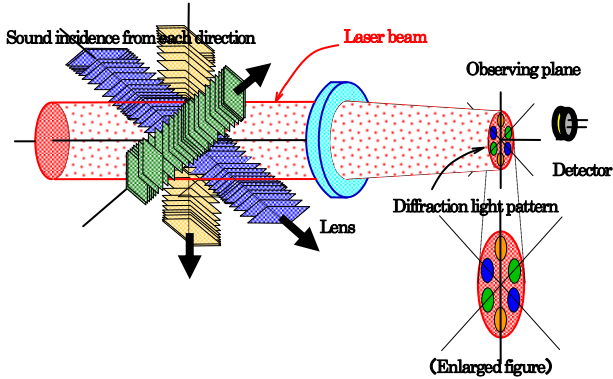


Fig.3 Relation between sound incidence angle and spatial position of diffraction light pattern.

3. 研究開発の現状と目標

光波マイクロホンの開発の現状(実験進展状況)を Fig. 4 に示す。ただし、同図はあくまで概略を示した図で、開発領域(検出可能)の境界線はおおよそ SN 比が 2~3 程度で大まかに表している。現状では 60~70dB 程度の音圧レベルが検出可能限界となっており、広汎な応用展開のためにはさらに SN 比改善を行って低音圧の検出を可能にする必要がある。当面の開発目標としては、20dB 程度の音圧レベルの検出、かつ、応用時の計測目的に応じた十分な SN 比で検出できる技術レベルの確立を考えている。

SN 比改善についてはこれまであまり検討されておらず、改善方法は沢山存在している。前述のように、本研究では光学的方法の一つとして、同軸多重反射光学系による信号増大効果を以下で検討した。

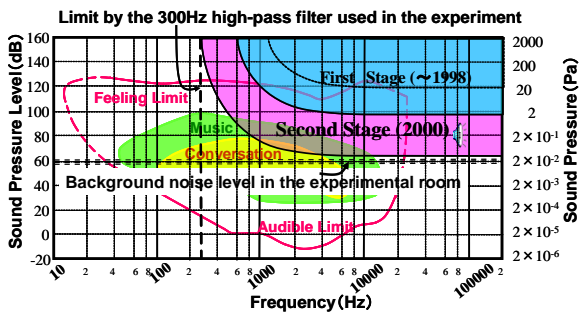


Fig. 4 Present status of development

4. 信号増大の方法と理論的考察

音検出部に 2 枚のレーザーミラー(パワー反射率: α 及び β)により構成される同軸多重反射構造を考える。Fig. 5 に対向した 2 枚の透過ミラーの間で反射と透過を繰り返す多重反射の光伝搬を分解して描いたイメージ図を示している。2 枚の反射鏡間に光定在波が立てば共振状態となる。レーザー発振では 2 枚のミラー間での光共振状態すなわち定在波の成立が必須の条件であるが、音検出(増幅)では光波の位相整合条件は緩和され、共振状態でなくても音信号増幅が可能である。同図で、 P_0 : 入力(レーザー光源パワー)、 P_{in} : 共振器空洞部入力(入力側ミラー透過パワー)、 P_{out} : 共振器出力パワーである。

検出器側で見た出力レーザーパワー P_{out} (または検出器に入力されるパワー) と等しいプローブ光を用いたときの信号を基準とすると、ヘテロダイン検波時の信号増倍度 η_H は、

$$\eta_H = \{1 + 3(\sqrt{\alpha}\sqrt{\beta}) + 5(\sqrt{\alpha}\sqrt{\beta})^2 + \dots\} \cdot \{1 + (\sqrt{\alpha}\sqrt{\beta}) + (\sqrt{\alpha}\sqrt{\beta})^2 + \dots\} = \frac{1 + \sqrt{\alpha\beta}}{(1 - \sqrt{\alpha\beta})^3} \quad \dots (2)$$

で与えられる。

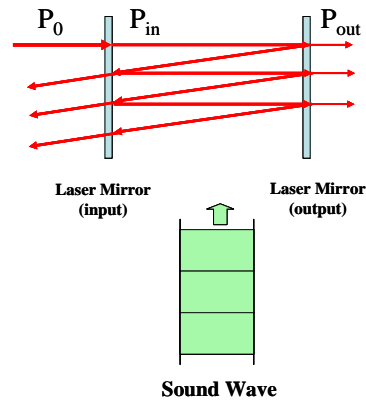


Fig. 5 Sound wave incidence to coaxial multi-reflection system.

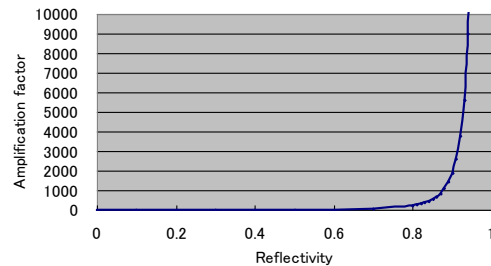


Fig. 6 Multiplication factor vs. reflectivity at optical resonance

簡単のため、 $\alpha=\beta$ とした場合の計算結果を Fig. 6 に示す。理想的な共振構造が作成できれば、 $\alpha=\beta=0.99$ で約 1990000 倍 (126dB)、 $\alpha=\beta=0.95$ で約 15600 倍 (84dB) の増幅度が期待できる。ただし、このような高反射率では共振器ミラーの調整開始時の初期透過パワーが小さくなって確認しにくい上に、ミラーの並行度及びミラー間隔の調整なども厳しくなる。そこで、光学条件を緩和して $\alpha=\beta=0.9$ とすると 1900 倍程度 (66dB) になる。共振形は比較的小型の光波マイクロホンに限定され長距離レーザービーム伝送型には適用できないが、共振形により Fig. 4 の測定限界が大幅に改善できることが分かる。

ただし、共振状態にするには、レーザー発信器(共振器)作成に準じる高度の技術と装置が要求されるので、ここでは完全共振ではない部分共振あるいは単純多重反射光の重ね合せによる信号増幅の可能性を検討した。

すなわち、単純に 2 回反射光、4 回反射光、等を現実的に可能なだけ集光することで音信号の増大を図ることを試みる。参考までに、多重反射光が大きくなったときの光点の目視観測の実例を Fig. 7 に示す。



Fig. 7 Example of multi-deflection light

1 次透過光、2 次透過光(2 回反射)、3 次透過光(4 回反射)、等を重ね合わせると、増幅率は以下の式となる
非共振時の多重反射光の有限項重ね合せの式:

$$\eta = 1 + 3(\sqrt{\alpha\beta})^2 + 5(\sqrt{\alpha\beta})^4 + 7(\sqrt{\alpha\beta})^6 + \dots \quad (3)$$

実際の簡易な装置では、不完全さにより有限個の透過光が重ね合わされて検出される。式(3)より得られる有限項数と増幅率の関係を Fig. 8 に示す。

5 次項まで重ね合わせができるとすると、 $\alpha=\beta=0.9$ では約 14 倍 (23dB)、 $\alpha=\beta=0.95$ では約 19 倍 (26dB)、 $\alpha=\beta=0.99$ では約 24 倍 (28dB) の増幅率が得られることになる。さらに 10 次項まで重ね合わせができるとすると、 $\alpha=\beta=0.9$ では約 31 倍 (30dB)、 $\alpha=\beta=0.95$ では約 55 倍 (35dB)、 $\alpha=\beta=0.99$ では約 88 倍 (39dB) の増幅率が得られ

ることになる。ただし、非共振状態では透過率が悪く出射光そのものが小さくなるので、光検出器の能力を十分働かせるためには共振形に比べレーザー光源の出力を相対的に大きく取ることが望ましい。

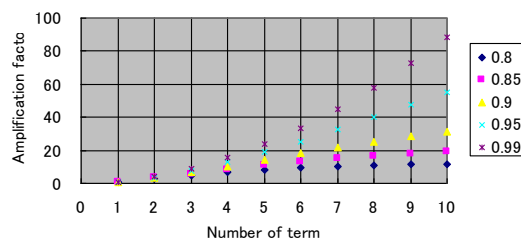
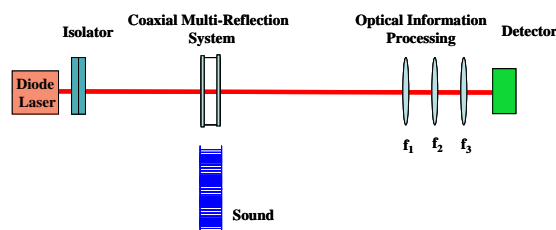


Fig. 8 Relationship between number of term and amplification factor

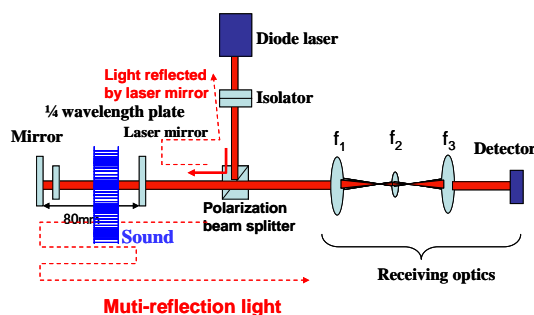
5. 実験装置と方法

理想に近い共振器構造は費用の関係で作成できなかったが、比較的簡易な汎用的な装置を用いて同軸多重反射形の実験装置を作成した。また、今回は基礎実験として、以下に述べるように光学系の構成が若干異なる 2 つの装置を作成した。

Figure 9(a), (b) に 2 つの実験装置の概要を示す。ここで、(a) は in-line 形(直線形)装置 A で、(b) は off-axis 形(直交形)装置 B をそれぞれ示している。



(a) apparatus A (in-line type)



(b) apparatus B (off-axis type)

Fig. 9 Experimental apparatus

装置Aはレーザ光源と光検出器を一直線状に配置した標準的な構成である。装置Bはレーザ光源と光検出器を直角方向に配置した構成である。

装置Bの構成は、Fig. 10に示すような実用的なコンパクトタイプとして設計した光波マイクロホンモデル構造を想定し、その基礎実験用として作成したものである。同図で、レーザビームは水平方向から入射し、偏光ビームスプリッタで上方に反射し音センサ部へ入る。音センサ部を通過したレーザ光は、さらに最上部の全反射ミラーで反射され、最下部の受光用レンズ及び光検出器に到達する。

これに対応して、装置Bでは、光源から出たレーザビームは偏光ビームスプリッタで反射し対向ミラーに入射する。対向ミラー間には1/4波長板を設定しており、多重反射光だけが光検出器に到達する。この1/4波長板を対向ミラー (Fig. 9(b)の対向ミラーの右側のミラー) の外部に設置すると、レーザビーム入射側のミラーによる反射光を光検出の局発成分として利用することもできる。また、光源からのレーザ光が対向ミラー部に入射する段階で、最初の(第1番目)のレーザミラーで反射された光はレーザ光源側に戻し、アイソレータでカットするか、光源に帰還しないようにわずかに反らして除去している。

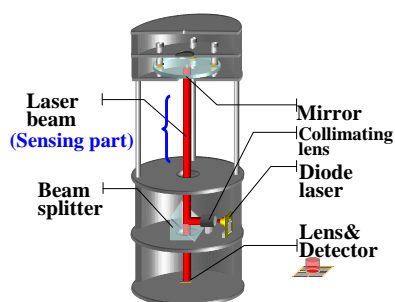


Fig. 10 Example of compact type

In-line形では、光源には半導体レーザA(定格出力25mW、中心波長635nm)を用いた。光源への戻り光対策のため、偏光板と1/4波長板を組み合わせたアイソレータを用いた。レーザビームの直径は4mmである。共振部の2枚のミラー(間隔20mm)は共に反射率90%で、それぞれ独立に3次元的な振れと移動調整が可能である。音による回折信号光の光学処理(光学的フーリエ変換)には3枚のレンズ(焦点距離; $f_1=50\text{mm}$, $f_2=3\text{mm}$, $f_3=50\text{mm}$)を用いた。光検出器にはPINフォトダイオード(0.8mm Φ)を用い、信号が最大となる点に固定した。音の発振には低周波超音波発振素子(25kHz、直径16mm)を用いた。音は水平方向からレーザビームに垂直に入射した。音圧レベルはレーザ

ビームの地点で100dBに設定した。

直交形では、光源には半導体レーザB(定格出力28mW、中心波長685nm)を用いた。2枚のミラー間に1/4波長板を設置するため、ミラー間隔は80mmとした。受光光学系はin-line形と同じものを用いた。音発振系も同じものである。

光検出器の出力は、プリアンプ、バンドパスフィルタを通した後、デジタルオシロスコープまたはFFTアナライザにより測定し、パソコンに保存した。

6. 実験結果と検討

6.1 光回折像の測定

実験装置Aで対向ミラーを設置していない従来形の状態で測定した光回折像の測定結果をFig. 10に示す。同図では、光回折像(赤点)とレーザパワー分布(青点)の両方を示している。レーザパワーが大きいため、レーザパワー分布の測定プロファイルは中央部が飽和し平坦な形となっている。また、回折像もこの直流成分の飽和により中央部が凹んだ分布になっている。

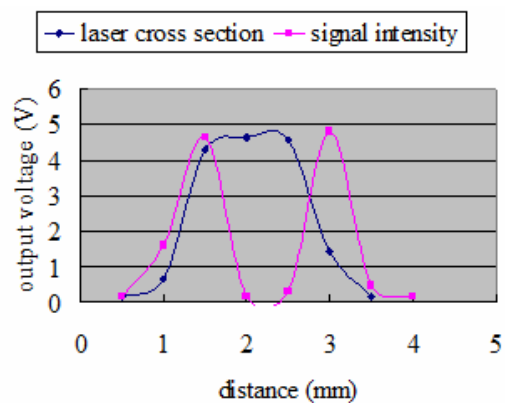


Fig. 11 Cross section of laser beam and optical diffraction pattern without coaxial multi-reflection system

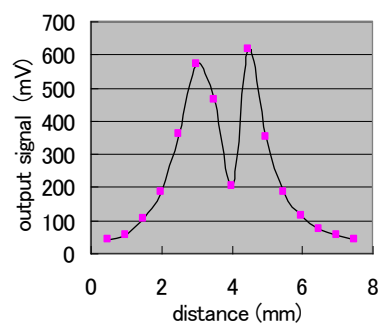


Fig. 12 optical diffraction pattern with coaxial multi-reflection system (apparatus A)

次に、実験装置 A で対向ミラーを設定した状態で測定した光回折像の測定結果を Fig. 12 に示す。この分布は Fig. 2 に示した理論計算のように 2 つの山形分布となっていることが分かる。以下の実験では、同図の右側のピーク点に光検出器を設定した。

6.2 音入射位置の軸方向掃引に伴う信号変化

装置 A で音入射位置を光軸方向(レーザビーム伝搬方向)に移動した場合の信号強度の変化を Fig. 13 に示す。対向ミラー間(間隔 20mm)に音が入射したときに出力信号が最も大きいことが分かる。ミラーの外部でもミラーに近い領域では出力信号が少し大きくなっているが、これは音場の音圧分布の半値全幅(FWHM)が 100mm 程度あるためと予想される。

静電マイクロホンで音場の拡がり測定した結果を Fig. 14 に示すが、音発振素子表面とレーザビーム中心軸との間隔が 100mm の距離で、半値全幅で 100mm 程度であることが分かる。したがって、音発振部が対向ミラー部から 100mm 程度離れても、音の一部は対向ミラー部に入ってしまったっており、実際より高めの信号となっていると予測される。

ここで、同軸多重反射部に音を入射した場合とその外の領域に入射した場合とで信号強度の変化を定量的に調べた。音の幅を合わせるため、ミラー外部の領域では、厚紙で壁を作り 20mm 幅で音が入射するようにした。Fig. 13 の値と若干異なるが、20mm 対向ミラー間での音入射時の出力信号が最大で約 800mV に対し、対向ミラー外部での音入射時の出力電圧は約 80mV であった。ただし、音のない状態でノイズが約 50mV 存在した。これらの結果から、単純に比を取るとミラー間では 10 倍程度の信号増大になる。ノイズ分を単純に差し引いて比を取ると約 25 倍となる。従って、大まかに評価して、ミラー間では 10 ~ 25 倍程度の信号増大が得られていると概評価できる。

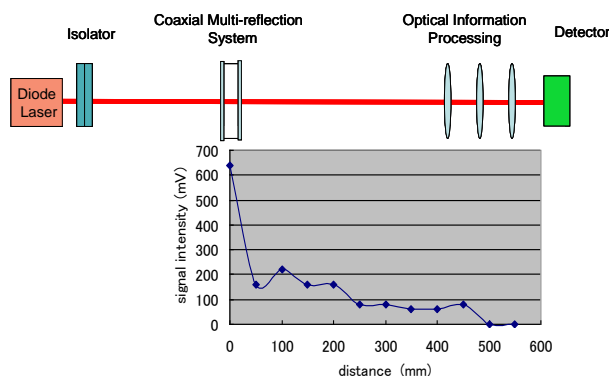


Fig. 13 Signal vs. incidence position of ultrasonic wave

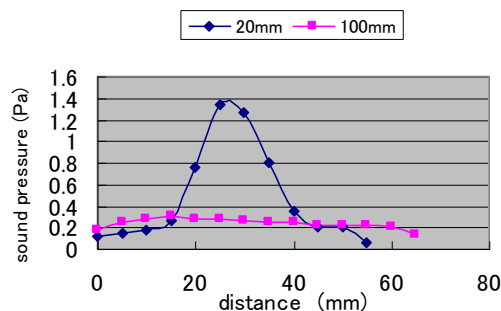


Fig. 14 Spatial distribution of sound field emitted by ultrasonic wave oscillator (25kHz)

1 点に集光した同軸多重反射では式(3)の何次項まできれいに集光できたのか目視観測では判定しにくいですが、得られた増幅度と同式を比較判断すると第 7 項前後までが有効に重畳されているのではないかと推定される。

次に、Fig. 8(b)で示した直交配置形の光学系 B で信号増大効果を測定した。その結果、対向ミラー間(80mm)での音入射時の出力信号が最大で約 1700mV であるのに対し、対向ミラー外部での音入射時の出力電圧は約 200mV であった。また、音のない状態のノイズが約 100mV であった。これより、8.5 倍~16 倍程度の信号増大効果が得られていると大まかに評価できる。

以上述べた初期的な実験では、同軸多重反射光学部を構成するところに持ち合わせの部品を使用していたため、多重反射光の重ね合せの調整は未だ最適の状態にはなっていない。さらに精密な設定を行えば、今回の実測値以上に増幅度を向上させることが可能と予想される。

7. まとめ

本研究では、光波マイクロホンの音受信部に 2 枚の対向レーザミラーで構成される同軸多重反射方式を用い、それによる信号増大効果に関する検討を行った。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 理論的計算に依れば、対向ミラーの合成反射率を 0.9 とするとき、共振形の場合は 1900 倍程度、非共振形の場合(多重反射を 10 次項まで重ね合わせると仮定)は 31 倍程度の増幅度が得られる。
- (2) 検証実験により、非共振形の場合は、10 倍(20 dB)程度以上の信号増大が簡易な対向ミラー装置により容易に得られることを示した。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)(No. 22560429)により行われた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 矢田貝豊彦：「光情報処理の基礎」丸善(1998).
- [2] 吉村武晃：「光情報工学の基礎」コロナ社(2000).
- [3] 村田和美：「光学」サイエンス社(1979).
- [4] 園田義人：「光マイクロホン」特許第 3543101 号(2004).
- [5] 園田義人：「解説・光で音を聞く方法 =振動板のない光波マイクロホンの開発=」光アライアンス, Vol. 16, No. 7, p. 32-39 (2006).
- [6] 園田義人：「解説・光波マイクロホンと光情報処理 =光学的フーリエ変換を用いた音の直接非擾乱検出=」光アライアンス, Vol. 17, No. 12, p. 1-4 (2006).
- [7] 園田義人：「解説・光波マイクロホンの開発 =光による音(可聴音から超音波帯まで)の直接検出=」超音波 TECHNO, Vol. 25, No. 5, p. 48-54 (2011).
- [8] D.E.Evans, M.von Hellermann and E.Holzauer: "Fourier optics approach to far forward scattering and related refractive index phenomena in laboratory plasmas" Plasma Phys. Vol.24, No.7, pp.819-834 (1982).
- [9] Y.Sonoda, Y.Suetsugu, K.Muraoka & M.Akazaki: "Applications of the Fraunhofer Diffraction Method for Plasma Wave Measurements Plasma Phys.Vol.25, No.10, pp.1113-1132 (1983).