

レーザ発振特性とレーザマイクロホンの音波検出特性の研究

Study on the sound wave detection characteristic of a laser microphone on laser spectrum

吉元 裕哉† , 五島 敬史郎†† , 津田 紀生†† , 山田 諄††
Hiroya Yoshimoto , Keishiro Goshima , Norio Tsuda , Jun Yamada

Abstract: Since the vibrating film is used for a conventional microphone, the detectable frequency is restricted. Recently, the influence on the human body by the sound wave of low frequency or high frequency from various apparatuses or equipments has become a problem. It is necessary to detect the sound wave of such frequency. A new type of microphone by using self-coupling effect of semiconductor laser has been studied. It is called the laser microphone. This microphone consists of laser and a light reflector, and it is not necessary to post-process a signal. Difference in coherence reflects on the sensitivity of the laser microphone. Therefore spectrum of laser is measured. It is understood that the laser microphone becomes sensitive if coherence is better and light power is higher. The laser microphone can detect a sound with frequency to 24 kHz.

1. はじめに

現在、音波検出を行っているマイクロホンには大きく分けて 2 種類ある。1 つ目は、コンデンサ型のマイクで別名静電型と呼ばれ、振動膜に電気を貯め、音波による空気の振動を感知し、この振動板が動くことで電極間の距離が変化するため、音声信号に比例した静電容量の変化が発生する。2 つ目はダイナミック型のコンデンサで別名動電型と呼ばれ音波を受け取る振動膜にコイルが取り付けられており振動膜が振動することで、コイルは磁石の磁界の中で動くことになり、電磁誘導の法則によりコイルに電流が流れる。またコイルの代わりに金属箔を利用したタイプをベロシティ型と呼び金属箔を用いるのは、空気の振動を受け止めやすくするためである。また、電源はコイルを利用しているため不要で衝撃や高音圧、振動にも強く耐久性が高い。温度、湿度の影響を受けにくく価格もコンデンサ型に比べると安価である。

説明したマイクロホンでは構造上振動膜やコイルを使用するため、音波検出範囲が限られており、電気的影響を受け、音場を乱す欠点がある。

また、近年では機器、設備などから発生する可聴周波

数以外の低周波(20Hz 以下)による人体への影響が問題視されており、この様な周波数域の音波の検出も行う必要がある。実際に風力発電の近隣に住む住民たちは風車の低周波による健康被害を訴えた事実もある。さらに、風力発電が始まり自覚症状が出できた後、風車の近くにある自宅を離れることで自覚症状がなくなるというケースも出ている。しかし、現在風車から発生する低周波と人体への影響の因果関係は明らかになっておらず、また低周波を測定する検出装置がないため、原因究明の妨げとなっている。

現在、半導体レーザ(以下、LD とする)の自己結合効果を利用した研究が行われている。ターゲットを振動させて自己結合効果による光出力の増減を見ることで nm オーダーの振動の検出を行う振動計の研究¹⁾や、ターゲットまでの距離を cm オーダーで測定する距離計の研究²⁾、LD を用いた音波検出装置の研究³⁾等が行われている。

今まで行ってきた、レーザマイクロホンの研究から、LD の自己結合効果を用いた音波検出装置で音波を検出可能であると確認され、低周波においては 20Hz まで測定可能であると確認された。

本研究では LD の発振特性によるレーザマイクロホンの音波検出感度、検出範囲の関係を調べるために、本研究で使用する LD の発振特性を測定し結果を元に音波検出特性の比較、考察を行った。

†愛知工業大学 工学研究科 電気電子工学専攻 (豊田市)

††愛知工業大学 工学部 電気学科 (豊田市)

LDの自己結合効果を応用することでセンサ部がLDと光を反射させる反射板のみとなり、回路も簡単な定電流回路とI-V変換回路で構成できることから装置・構成共に非常に簡略化される。そして信号の後処理が必要なく低周波から高周波まで1つのレーザマイクロホンで測定することができ、従来の振動膜による検出の欠点であった音場も乱すことなく、音圧にも左右されない。本研究ではレーザの発振特性を測定し、レーザの単色性により試作したレーザマイクロホンでの音波検出特性の音波検出感度及び音波検出範囲の測定を行い、比較、考察した。

2.測定原理

2-1. 自己結合効果

単一波長動作をするLDは、コヒーレンス度が高い為、干渉性が非常に強いという特徴を持っている。その為、レーザ光が対象物に当たり外部共振器から反射光がLDの活性物質内に戻ってくると、出力光と干渉し合い出力光強度が変動する。戻り光によって生じる光強度変動を戻り光ノイズと呼ぶ。戻り光ノイズによるLDの特性の変化は、出力光に対する相対的な光量が $10^{-6}[\text{lm} \cdot \text{s}]$ 程度と極めて僅かであっても顕著に現れる。これは出力光と戻り光との干渉が共振条件を満たすと、LDの共振器内での増幅作用により、実際の戻り光量以上の出力増加となる為である。この現象はこれまで各種の応用技術で雑音の原因として大きな障害となっていた。しかし、この現象を自己結合効果として利用し、音波検出に応用した。そしてこの効果を用いる事により、センサ部がLDとレンズのみの簡単な構造となり小型化が可能である。又、僅かな戻り光でも顕著に効果が現れる為、小さい音であっても音波の検出が可能である。

本研究の測定原理である自己結合効果とは図1に示すように、LDから発振されたレーザ光は平行ビームにし外部反射面(反射板)に照射する。その戻り光を同じレンズで集光し、LD内部の活性領域内に戻す。この時、LDからの出力光と戻り光がLD共振器内で干渉し、出力光

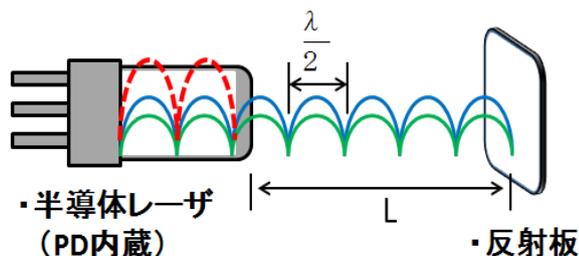


図1 自己結合効果

が僅かに増減する。この現象を自己結合効果と呼ぶ。そして発振波長を λ 、LDから外部反射面までの距離を L とすると共振条件式(1)を満たすとき両者の光は強め合い、光出力が最も増加する。

$$L = \frac{\lambda}{2} * m \quad (m, \text{整数}) \quad (1)$$

本研究では外部共振器までの距離を一定に保ち、その間に音波を当てる事で起こる屈折率変化により、波長や位相が変化し、自己結合効果の光出力の増減を見る事で音波検出に応用した。

2-2 検出原理

本研究では平行ビームにしたLDと外部反射面の間に音波を当て、音波による空気の密度変化による屈折率の変化を検出することでレーザ光から音波を検出する事に応用した。音というのは疎密波であり、空気密度の高低で構成されている。音によって光路中の空気密度(=屈折率)が変化し、戻り光量が変化する事から音波検出に応用している。ここで光の関係式、および屈折率による波長変化を下に示す。

$$n = \frac{c}{v}, \quad v = f\lambda, \quad \lambda = \frac{1}{f} \frac{c}{n} \quad (2)$$

ここで n は屈折率、 c は光の速さ、 v は波の速さ、 f は周波数とし、式(2)から分かる様に屈折率と波長は反比例の関係にあり、屈折率が高くなれば波長が短くなり波数が増加し、波長が長くなれば波数は減少する。その関係を図2に示す。

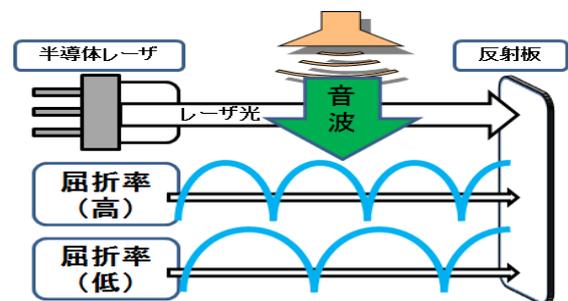


図2 音波による波長変化

波長の変化から自己結合効果による光出力の増減が起き、その変化を観測する事で音波検出に応用した。

1atmの空気の真空との屈折差 $n-1=3 \times 10^{-4}$ は1に比べ小さく、普通の会話程度の音圧 $0.1\text{Pa}=10^{-6}\text{atm}$ における屈折率変化は 3×10^{-10} 程度と小さくなっている。しかし、外

部共振器内に立つ定在波の数は $L=1\text{m}$ の時 3×10^6 と非常に多く、全体の位相変化 $3 \times 10^{10} \times 3 \times 10^6 \approx 10^3$ と自己結合効果を用いて十分検出可能となる。また、直接音波を検出できるため信号の後処理が必要ない。

3. 測定装置

3-1 測定装置概要

測定装置の概略図を図 3 に示す。本研究において試作した装置は投光回路、光学系、反射板、受光回路から構成される。

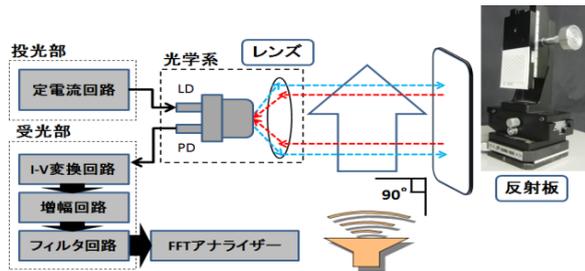


図 3 測定装置概略図

投光部は定電流回路のみで構成されており、定電流回路で使用した LD(VCSEL : OPV310 波長 850nm、DFB : GH08360A2A 波長 830nm)をそれぞれ連続発振させた。レーザ光は集光レンズ(球面両凸レンズ : 直径 10mm、焦点距離 10mm)により平行ビームにし反射板へ照射した。反射板にはプリズム型反射シート(3M 社製ダイヤモンド・グレード DG³4090 シリーズ)を使用した。レーザ光は反射板で反射し、その戻り光は同じレンズで集光され LD 内の活性領域内に戻る。この戻り光により得られた自己結合信号を LD 内蔵のフォトダイオード(以下、PD とする)によって検出する。その後、I-V 変換回路、増幅回路、フィルタ回路を通し FFT アナライザ(株式会社小野測器社製 CF-5220)で測定する。光学系は LD と集光レンズからなり、LD 及びレンズの固定と集光距離調節のために真鍮製のシリンダで構成した。スピーカは Pioneer 社製 TS-STH1000 無指向性 2way 方式、BOSE 社製 DS16S フルレンジスピーカを使用し、光軸から直角の位置に置いた。反射板はプリズム型反射シートを使用することによりレーザの光軸調整を容易にするとともに、戻り光量を多くして自己結合効果をより強くした。

3-2 フィルタ回路

PD で得られる自己結合信号は周囲の雑音や、装置の振動などを検出してしまいうため、ノイズが多く混ざり自己結合信号がノイズに埋もれてしまう。そこで測定範囲で

ある可聴周波数(20Hz~20kHz)以外の余分なノイズを取り除くためにバンドパスフィルタ回路を製作し、対策を行った。バンドパスフィルタのローパスフィルタ回路とハイパスフィルタ回路の周波数特性の例をそれぞれ図 4(a)、4(b)に示す。入力電圧を 5V としファンクションジェネレータで周波数を変化させ入力端に接続、回路の出力端をオシロスコープに接続し測定した。カットオフ周波数はローパスフィルタ回路では、約 40kHz、ハイパスフィルタは約 100Hz に設定した。

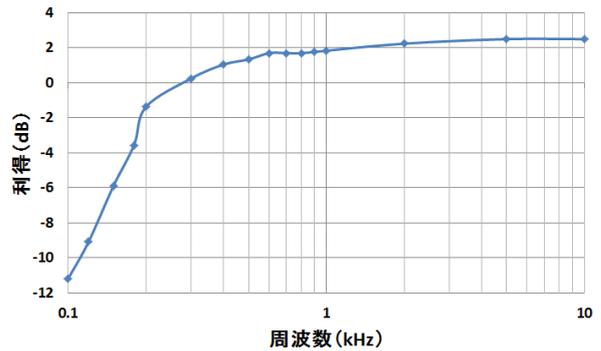


図 4(a) ハイパスフィルタ回路

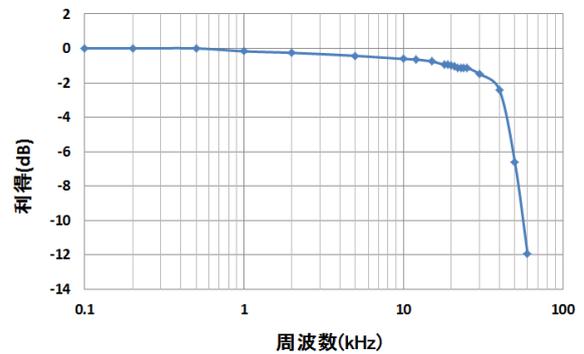


図 4(b) ローパスフィルタ回路

4. 発振特性

本研究で使用した LD の発振特性について説明する。恒温層を用いて光スペクトラムアナライザで使用する LD の発振特性を測定した。測定条件を図 5 に示す。TEXIO 社製 PAR36-3H 直流安定化電源装置で LD を発振させレーザ光のレベルが高くなるように光軸を合わせ受光部へ照射する。恒温層の温度設定を 25℃から 5℃ずつ下げて測定し、-15℃まで測定後 -15℃~60℃まで 5℃ずつ温度を上げ測定を行う。温度調整後光ファイバーを通して ADVANTEST 社製 Q8347 の最大分解能 1pm の光スペクトラムアナライザで発振特性を測定した。

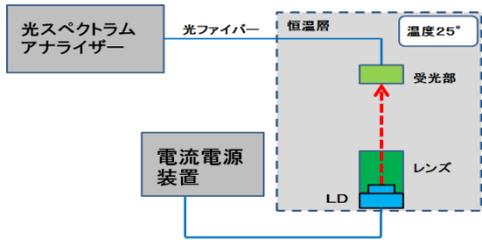


図 5 測定条件

I) OPV310(VCSEL)

LD : OPV310(波長 850nm、出力 2mW)の 25°C時の発振特性を図 6 に示す。

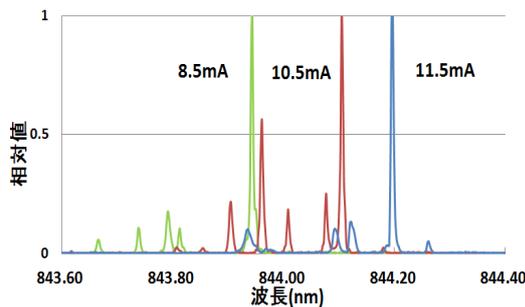


図 6 OPV310 発振特性

図 6 は恒温層の設定温度を 25°C時の OPV310 の注入電流を 8.5mA、10.5mA、11.5mA を相対値に直した発振特性を示しており、本研究で使用した注入電流値となっている。グラフを見ると、注入電流 10.5mA は第 1 ピークに対して第 2 ピークが半分以上立っており注入電流 10.5mA ではレーザーの単色性が良くない結果となった。8.5mA 及び 11.5mA の発振特性は第 1 ピークに対して第 2 ピークは 0.2 以下となっており 10.5mA と比べ単色性が良い結果となった。

II) GH08360A2A(DFB)

LD : GH08360A2A(波長 830nm、出力 60mW)25°C時の発振特性を図 7 に示す。

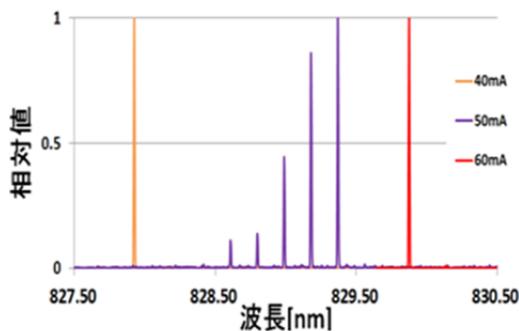


図 7 GH08360A2A 発振特性

図 7 は GH08360A2A の注入電流 40、50、60mA を相対値に直した発振特性を示しており、本研究で使用した注入電流値である。グラフより、注入電流 50mA は第 1 ピークに対し第 2 ピーク、第 3 ピークと立っており単色性が良くない結果となった。注入電流 40mA、60mA は第 1 ピークに対し第 2 ピークがほとんど無く単色性が良い結果となった。

5.周波数特性

5-1 一般的な部屋における周波数特性(OPV310)

一般的な部屋(室内ノイズ 60dB 以上)での周波数特性の測定を行った。測定条件を図 8 に示す。

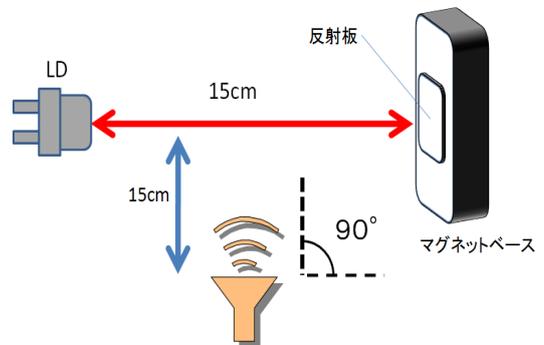


図 8 測定条件

Pioneer 社製の 2way スピーカを使用し、スピーカへの入力電圧を 5V、レーザー光軸とスピーカの距離を 15cm、LD と反射板距離 15cm 一定とした。反射板はマグネットベースに固定し、光学ステージに固定してある。スピーカは光学系台とは別の台に離して置き、レーザー光軸に対し垂直の位置に固定し周波数を 200Hz から測定可能範囲まで変化させ、FFT アナライザで測定を行った。OPV310 を用いたレーザーマイクロホンの音波検出の測定結果を図 9 に示す。

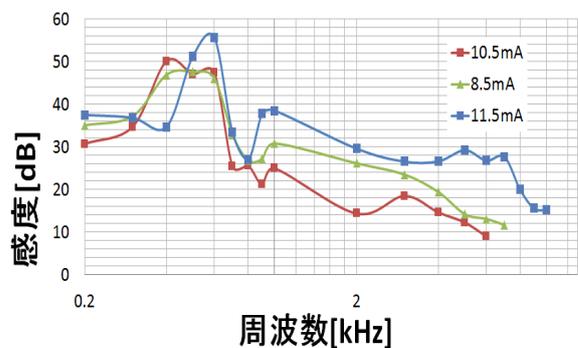


図 9 OPV310 周波数特性

グラフは青色が注入電流 11.5mA (光パワー1.9mW)、緑色が 8.5mA (光パワー1mW)、赤色が 10.5mA (光パワー1.5mW) となっている。

グラフをみると、注入電流 10.5mA は、他に比べて感度があまり良くなく、検出範囲も狭くなっている。8.5mA と 10.5mA を比べると、8.5mA の方が感度が良い結果となった。この結果より 10.5mA は 8.5mA に比べパワーが高いにも関わらず単色性が良くなかったため、音波検出の感度が良くなかったと考えられる。また、8.5mA と 11.5mA では単色性はほぼ変わらない結果となっていたが感度と検出範囲に違いがでた。これはレーザのパワーが 8.5mA に比べ 11.5mA は倍近く高いためだと考えられる。また 700~800Hz で感度が落ちているのは使用したスピーカが 2way 方式となっておりこの周波数で低音用と高音用に切り替わるためであると思われる。

5-2 一般的な部屋における周波数特性(GH08360)

図 8 の測定条件と同じにしてスピーカと LD をそれぞれ BOSE 社製 DS16S、GH08360A2A に変え、騒音計及び GH08360A2A のレーザマイクロホンの音波検出の測定結果を図 10 に示す。

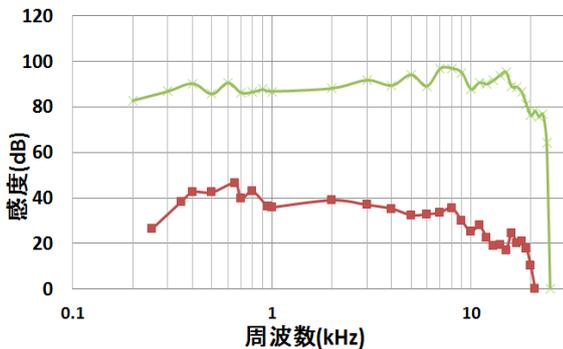


図 10 GH08360A2A 周波数特性

グラフは緑色が騒音計で測定した BOSE : DS16S の利得、赤色が LD : GH08360A2A の感度を表す。騒音計は FFT アナライザで測定した利得である。また、感度は測定した時の室内のノイズを FFT アナライザで測定し、音波を当て同じく FFT アナライザで測定した利得を差し引いた値となっている。

グラフより GH08360A2A とスピーカの比較を行う。スピーカは部屋のノイズにより少し増減しているが比較的フラットな特性であることが分かる。また、この結果より使用しているスピーカ(BOSE : DS16S)では最大 24kHz までしか再生できないことが分かった。

しかし、LD : GH08360A2A を用いてレーザマイクロホ

ンで測定して見ると 10kHz 付近から感度が減衰している。原因はローパスフィルタ回路によるものだと考えられる。測定で使用したローパスフィルタを図 11 に示す。

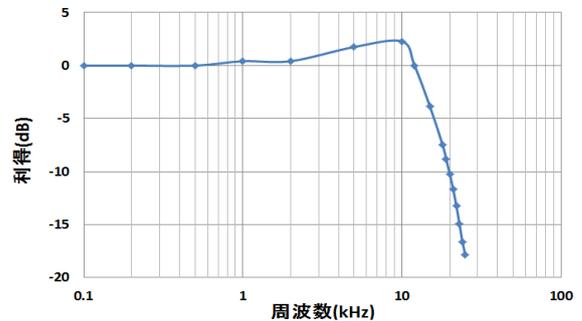


図 11 ローパスフィルタ回路(20kHz)

図 11 より 10kHz 以上の周波数では利得が減衰していることが分かる。LD : GH08360A2A の感度が 10kHz 付近で減衰した原因としてローパスフィルタにより信号がカットされていたと考えられる。そこで図 4 のローパスフィルタ回路(カットオフ 40kHz)を使用した。前回のフィルタ回路と比べ周波数利得が 20kHz 付近までフラットになっていることが分かる。

カットオフ 40kHz のローパスフィルタ回路を用いて測定条件を同じとして、音波検出測定の測定結果を図 12 に示す。

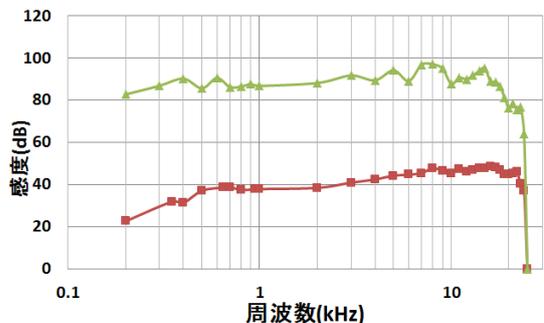


図 12 GH08360A2A 周波数特性(カットオフ 40kHz)

グラフより、カットオフ 20kHz のローパスフィルタ回路に比べ感度がフラットになり、10kHz 付近の減衰もしていない事が分かった。また、GH08360A2A とスピーカを比べても感度は低いながらも全体的に同じようなグラフとなっていることからレーザマイクロホンで正常に音波検出ができていと考えられる。

今回使用した OPV310 と GH08360A2A を比較する。両 LD の光パワーを見ると、OPV310 は 1.9mW、GH08360A2A は 20.5mW となっており光パワーでは GH08360A2A の方

が 10 倍近く高い。発振特性より図 6 及び図 7 を比較すると単色性に関しても GH08360A2A の方が良い結果となっている。

これまでの結果より本研究装置であるレーザマイクロホンは単色性が良く光パワーがより大きいほうが自己結合効果を強く得られ、検出範囲が広くなり、音波検出特性が良くなることが分かった。音波検出範囲が 24kHz までとなっている理由はこの測定で使用した BOSE:DS16S の限界再生周波数が 24kHz になっているためである。また、感度が 24kHz で約 40dB 出ているため、24kHz 以上の高周波を検出することが可能であると考えられる。

5-3 ビーム径による周波数特性

一般的な部屋(ノイズ 60dB 程度)でビーム径を音波の伝播方向に対してビーム径を縦、横と向きを変えて音を当てたときの高周波域での周波数特性を調べるためにレンズを換えて測定を行った。測定条件はビーム径を広げるためにレンズを大きくしスリットを通すことでビーム径の向きによる周波数特性の変化を見やすくした。レンズはシグマ光機社製球面両凸レンズ(レンズ直径 30mm、焦点距離 60mm)、スリットは隙間幅 2mm のものを作り、LD は GH08360A2A(注入電流 60mA)を使用してスピーカは BOSE 社製 DS16S でスピーカ入力電圧を 5V、反射板からレーザまでを 15cm、レーザ光軸からスピーカまでを 15cm に設定し、ファンクションジェネレータより周波数を変え測定を行った。測定条件の概略図を図 13 に示す。

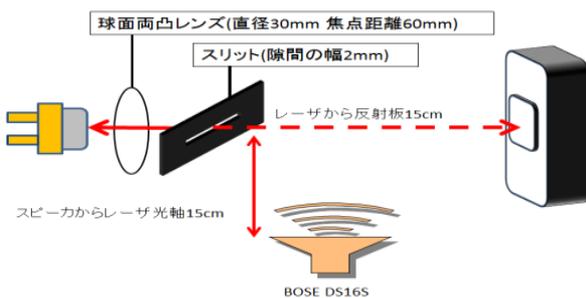


図 13 測定条件

ビーム径による周波数特性の測定結果を図 14 に示す。グラフは測定条件よりビームの向きを縦方向及び横方向にしてスリットを通し測定を 3 回行い平均した値となっている。グラフより、縦、横スリット共に同じ周波数特性となった。この結果から高周波域におけるビーム径の縦、横方向による影響を見ることができなかった。原因として、ビーム径の向きによる高周波の周波数特性の変

化は、より高周波な領域で起こるのではないかと考えられる。スピーカによる最大の高周波音は 24kHz となっており、これ以降の高周波は再生出来ない。そこで、現在のスピーカより高周波域が出せる音源を製作し、ビーム径による周波数特性を測定し検証する必要があると考えられる。

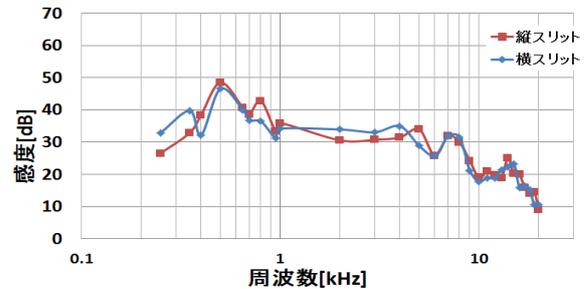


図 14 測定条件(スリット付、レンズ大)

6.まとめ

本研究ではレーザの発振特性を測定して、試作したレーザマイクロホンで音波検出特性の測定を行った。周波数特性の結果から、レーザの単色性が良いと音波検出の感度が良くなることが分かった。また、単色性が良く、高いパワーであれば音波検出範囲が広くなることが分かり、24kHz までの音波検出が可能となった。

ビーム径の向きによる高周波域の音波検出特性の測定を行ったところ、今回の実験条件では、向きによる音波検出の違いを見ることが出来なかった。

今後の課題として単色性が良く高いパワーの LD の選定及び測定・比較を行う。また 25kHz 以上の音源の製作を行い、ビーム径の向きの違いによる音波検出の測定、回路の S/N 比の改善などの必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 名和靖彦, 津田紀生, 山田諄:「自己結合効果を用いた微小振動の自動測定」, 電気学会論文誌 C, Vol.129, No.12, pp.2115-2120(2009.12)
- 2) 坂本明紀, 津田紀生, 山田諄:「面発光レーザを用いた自己結合型距離計の特性」, 電気学会論文誌 C, Vol.126-C, No.12, pp.1454-1459(2006.12)
- 3) 神田明典, 津田紀生, 山田諄:「レーザマイクロホンによる音波検出に関する研究」, 愛知工業大学研究報告 vol.47, pp197-202(2012.3)

(受理 平成 26 年 3 月 19 日)