

〈一般研究課題〉 住環境における超低周波騒音を測定する  
レーザ音波センサの開発  
助成研究者 愛知工業大学 津田 紀生



## 住環境における超低周波騒音を測定する レーザ音波センサの開発

津田 紀生  
(愛知工業大学)

## Development of Laser Microphone to detect Very Low Frequency Noise for Resident

Norio Tsuda  
(Aichi Institute of Technology)

### Abstract:

Since the vibrating film is used for a current microphone, the detectable frequency is restricted. Recently, the influence on the human body by the sound wave of very low frequency from various apparatuses or equipments has become a problem. It is necessary to detect the sound wave of very low frequency. A new type of microphone by using self-coupling effect of semiconductor laser has been studied. It is named the laser microphone. This microphone consists of laser and a light reflector, and it is not necessary to process a signal. An acoustic field is not disturbed by the microphone. The laser microphone can detect a sound with frequency from 10 Hz to 20k Hz. The laser microphone is more sensitive than the condenser microphone in long distance from sound source, and is detectable a sound with lower frequency than condenser microphone. Moreover, if there is the sound source with some sound pressure, sound with the lower frequency below 10 Hz may be detectable.

### 1. はじめに

現在、音波の検出をする方法としてマイクロフォンを用いて検出を行っている。その種類としてはコンデンサマイクとダイナミックマイクの2種類がある。

コンデンサマイクは互いに平行な2枚の電極板があり、一方を振動膜とし、音の振動によって振動膜が振動する事により音波検出している。しかし、振動膜が $\mu\text{m}$ とかなり薄い為、高音圧、衝撃

波に弱く、振動膜が振動しない低周波・高周波の検出が行えない。又、音場を乱す欠点がある。この様な特性を持つ為、コンデンサマイクによる正確な音場分布の測定が行えなかった。

ダイナミック型のマイクでは振動膜に加えコイル、永久磁石が使用されている。音波の振動が振動膜に当たり、その振動でコイルを動かして発電し、その電流の変化を電気信号に変換するマイクである。長所としては構造が単純で、耐久性(振動、高音圧に強い)があるという事、短所としては、コイルと振動膜の大きさが必要なので小型化が難しく、コンデンサマイクに比べて検出可能領域(特に高周波数帯域)が集音しにくいという特徴が挙げられる。

近年、住宅環境において使われる機器や設備の騒音を軽減する為、可聴周波数域外の騒音が増えてきた。その結果、可聴周波数以外の音波による人体への影響も問題視されており、現在あるマイクでは測定できない低周波、高周波数域の音波の検出も行う必要がある。

低周波音の影響については、建具等をはたつかせる「物的影響」、眠りを妨げる「睡眠影響」、知覚による圧迫感、振動感や頭痛、吐き気等がもたらされる「心理的・生理的影響」等がある。その発生源については、送風機、ディーゼル機関、風車、燃焼機械、ジェットエンジン、治水施設などが挙げられる。しかし、超低周波を正確に検出するマイクが無い為、原因究明の妨げとなっている。

そこで、振動膜を使用しない半導体レーザの自己結合効果を利用した音波検出方法をレーザマイクロフォンと名付けて試作し、周波数特性の測定を行い、新しい音波検出装置の実現を目指した。

## 2. 測定原理

### 2.1 自己結合効果

単一波長動作をするレーザダイオード(LD)は、コヒーレンスが高い為、可干渉性が非常に強いという特徴を持っている。図1のようにLDから発振されたレーザ光は平行ビームにして反射板に照射する。その戻り光を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

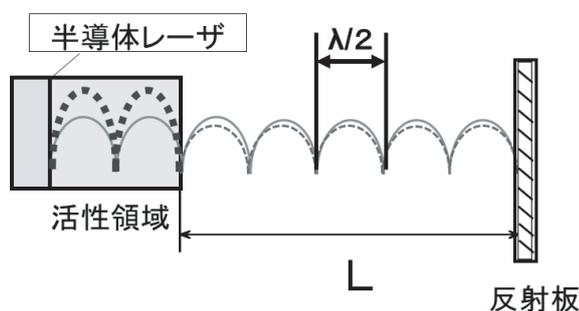


図1 複合共振モデル

干渉し、出力光が僅かに増減する。この現象を自己結合効果と呼ぶ<sup>1,2)</sup>。発振波長を $\lambda$ 、LDから反射板までの距離をLとすると共振条件式(1)を満たすとき光出力が最も増加する。

$$L = \frac{\lambda}{2} \cdot n \quad (n ; \text{整数}) \quad (1)$$

### 2.2 検出原理

本研究ではLDから反射板の間に音波を当て、音波による位相・屈折率の変化を検出する事でレーザ光から音波を検出することに応用した。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、戻り光位相が変化することから音波検出に応用している。ここで光の関係式を式(2)、および屈折率による波長

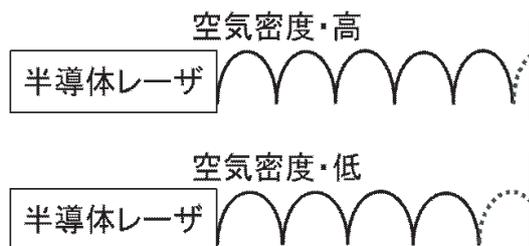


図2 音による波長変化

変化を図2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、 $c$  は真空中の光の速さ、 $v$  は物質中の光の速さ、 $f$  は光の周波数である。式(2)から屈折率と波長は反比例の関係にあり、図2の様に屈折率が高くなれば波長が短くなり、その変化を観測する事で音波検出に応用した。

そして、1atmの空気の真空との屈折率  $n-1 = 3 \times 10^{-4}$  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  $3 \times 10^{-10}$  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  $3 \times 10^6$  と非常に多く、全体の位相変化は  $3 \times 10^{-10} \times 3 \times 10^6 = 10^{-3}$  と自己結合効果を用いて十分検出可能となる。

### 3. 測定装置

#### 3.1 測定装置概要

測定装置概略図を図3に示す。本研究において試作した装置は、光学系と投光回路、受光回路から構成されている。光学系はLDと集光レンズから成り、固定と集光距離調節の為に真鍮製のシリンダ

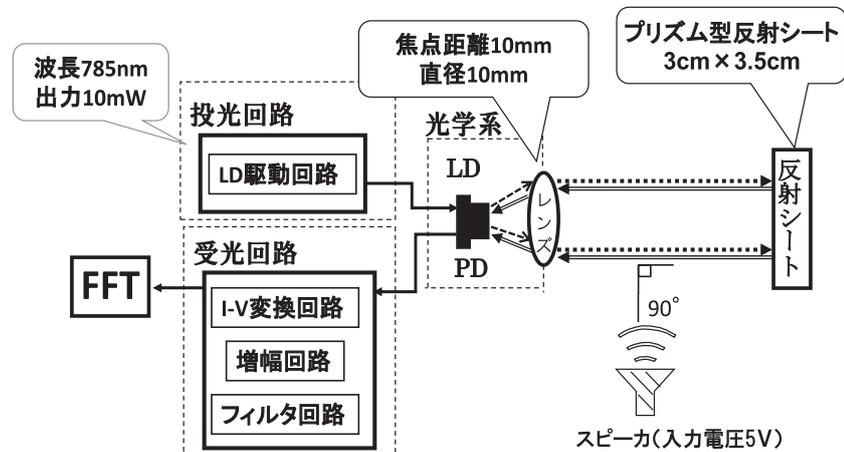


図3 測定装置概略図

になっている。まず、LD駆動回路でレーザ(HITACHI社製HL7859MG波長785nm、出力10mW)を連続発振させる。レーザ光は集光レンズ(直径10mm、焦点距離10mm)により平行ビーム(縦3mm、横5mmの楕円形)にされ反射板に照射される。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DG<sup>3</sup>4090シリーズ)を使用した。反射した光は、戻り光の一部を同じレンズで集光し、LD内で自己結合効果を起こし、その出力の変化をLD内のフォトダイオード(PD)で受光する。得られた受信信号をI-V変換回路、増幅回路、フィルタ回路に通し、その出力をFFTで測定した。FFTは外部雑音の影響を避ける為使用した。反射板にプリズム型反射シートを使用する事によって光軸調整を容易にした。反射シートはマグネットベースに接着剤で接着し、光学ステージに磁石で固定した。そして、レーザ光に対して垂直にスピーカ(Pioneer社製、2wayサテライトスピーカ Carrozzeria [TS-STH1000]、再生周波数帯域 73[Hz]~4[kHz])を置き、ビームの長径から音波を当て、測定を行った。

また、本研究では超低周波数帯域で、受光回路を改善して測定を行った。I-V変換回路のカップリングコンデンサを0.1[μF]から22[μF]、オペアンプをLF356から1/fノイズの低いOP37に変え、LPFも20[kHz]から200[Hz]に変えた。スピーカも再生周波数帯域が2.0[Hz]から出力できるソニー社製ステレオヘッドホン[MDR-XB1000](再生周波数帯域2[Hz]~30[kHz])に変えて測定した。

### 3.2 光学系

本研究で作製した装置は小型で、構造も簡単であるのが特徴である。光学系ではPD内蔵のLDと集光レンズで構成され、真鍮製のシリンダと一体型となり、その概略図を図4で示す。レンズには光洋社製の直径10[mm]、焦点距離10[mm]の両凸レンズを使用した。シリンダはLD側、レンズ側で分かれておりレンズ側はネジ式で稼働できる構造になっている。

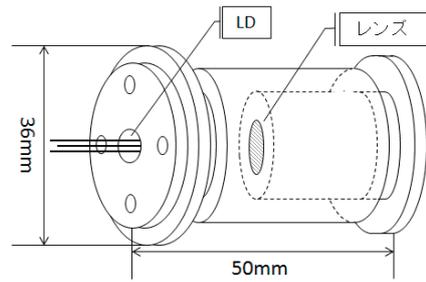


図4 光学系構造図

### 4. 出力波形

本研究で作製したレーザマイクロフォンで測定し、オシロスコープで得られた信号波形を図5に示す。測定条件を図6に示す。スピーカとレーザ光軸の距離を15[cm]、LDと反射板距離を15[cm]、入力電圧5[V]、入力周波数3[kHz]とした。図5より、上の波形がレーザマイクロフォンで得られる電圧波形、下はスピーカの入力信号となっている。レーザマイクロフォンの出力波形は元のレーザ光出力をフィルタ回路によって高周波成分を取り除いてあるが、フィルタで取り除けない残留ノイズの為、トレース幅が広がっている。しかし、この2つの波形を見て分かる様にスピーカの波形とレーザマイクロフォンの波形がほぼ一致している事が分かった。多少のノイズが入り込んでいるものの、レーザ光で音波の検出は可能となっている。又、レーザマイクロフォンの出力をスピーカに接続すれば、声をスピーカから直接聞く事が確認できた。

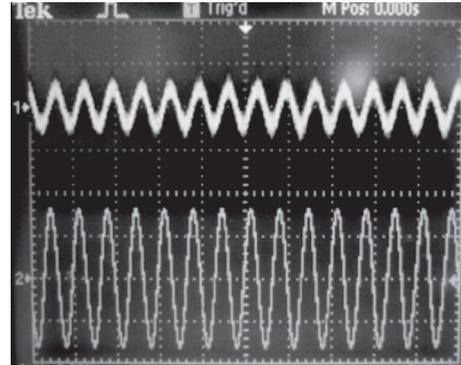


図5 入出力波形

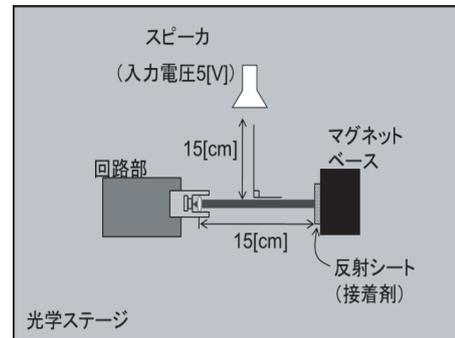


図6 測定条件

### 5. 周波数特性結果

#### 5.1 可聴領域での周波数特性

一般的な部屋(60[dB]以上)での周波数特性の測定を行った。測定条件を図6に示す。スピーカ(Pioneer社製2WAYスピーカ)への入力電圧を5[V]、レーザ光軸とスピーカの距離を15[cm]、LDと反射板距離15[cm]一定とした。そして、周波数を10[Hz]から100[kHz]まで変化させて測定を行った。騒音計、コンデンサマイク(周波数応答50[Hz]~18[kHz]、感度65[dB]~

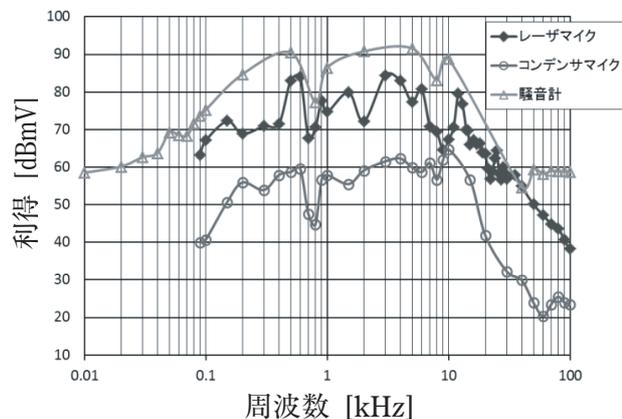


図7 周波数特性(可聴周波)

3[dB]、無指向性)、レーザマイクロフォンの3種で測定した結果をそれぞれ図7に示す。騒音計はオシロスコープで測定し、入力電圧からの利得を示した。また、騒音計は小野計器株式会社製の普通騒音計LA-1210(測定周波数範囲は20[Hz]~8000[Hz])を使用し、騒音計の特性はスピーカの特性になると考えられる。図において、700~800[Hz]帯で大きく減衰しているが、これはスピーカが2way方式で770Hzにおいて低音域と高音域の切り替えを行っている為である。20[kHz]以上の高周波で減衰しているのは、スピーカの特性の為である。100[Hz]以下で測定できていないのは、受信回路のカップリングコンデンサやオペアンプの1/fノイズによるものであると考えられる。この測定結果から回路を低周波用に改善し、測定した結果を5.2に示す。

## 5.2 超低周波数帯域における周波数特性

スピーカも再生周波数帯域が2.0[Hz]から出力できるヘッドホンに変えて測定した。又、騒音計はリオン株式会社製の低周波音レベル計NA-18A(測定周波数範囲は1[Hz]~500[Hz])を使用した。

ヘッドホンへの入力電圧を5[V]、レーザ光軸とヘッドホンの距離を10[cm]、LDと反射板距離15[cm]一定とし、周波数を10~1000[Hz]まで変化させて測定した。その測定値(FFT)より利得を求め、「測定値/音圧」の周波数特性を図8に示す。

図より、コンデンサマイクでは100[Hz]から急激に減衰し始めるのに対し、レーザマイクロフォンは10[Hz]まで測定でき、レーザマイクロフォンの方がコンデンサマイクよりも低周波における周波数特性が良い事が分かった。又、一定以上の音圧の音源があれば10[Hz]以下の低周波でも、レーザマイクロフォンならば測定できる可能性がある事が分かった。

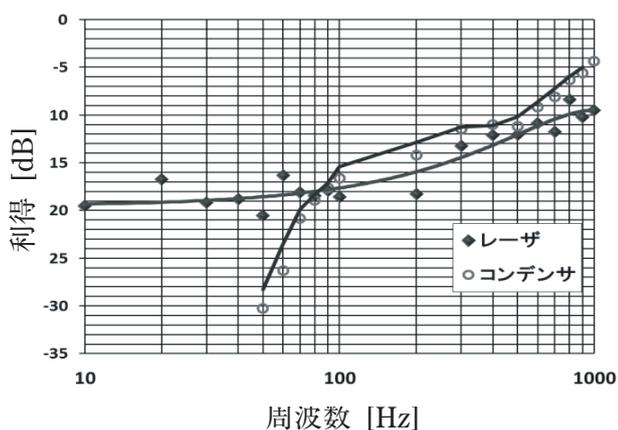


図8 周波数特性(低周波)

## 6. レーザマイクロフォンの距離特性

ヘッドホン-レーザ光軸間までの距離を5~20[cm]まで変化させ、入力周波数を40[Hz]として測定した結果を図9に示す。図より、コンデンサマイクでは利得が距離に対して反比例で減少していくのに対し、レーザマイクロフォンはピークが観測され、反射シートまでの距離の約半分の距離でピークが現れる事が分かった。音というのは音源から広が

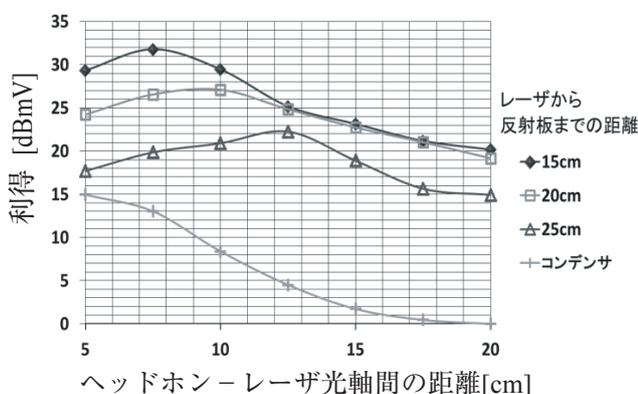


図9 レーザマイクロフォンの距離特性 (入力周波数[40Hz])

り、遠くなれば音圧も下がる。検出には音の音圧と、光路上の屈折率変化が起きている領域との積で決まる為、距離が近いと音圧は高いが、屈折率変化が起きる領域は狭くなる。しかし、距離が遠くなる事によりレーザー光路上全体に音波が当たる為、ピークが現れる。これは、レーザーマイクロフォンの大きな特徴と言える。また、レーザーマイクロフォンの方が距離に対しての利得の減少幅も小さい事が分かったので、離れた所ではコンデンサマイクよりも感度が良いと考えられる。

## 7. スピーカ角度依存特性

図10の様に周波数40[Hz]、入力電圧5[V]、LDと反射板の距離15[cm]一定とし、レーザー光軸とスピーカの距離を10[cm]に保ち、レーザー光の真ん中を中心に、スピーカの角度を変化させて角度依存特性の測定を行った。角度軸は、レーザー光路上とスピーカが直角の関係にある時を0°とし、シリンダ側からレーザー光方向に向けた場合を正の値、反射板側からレーザーに向けた場合を負の値としてある。結果を図11に示す。

スピーカを直角に置いた場合が最も感度が良く、スピーカをシリンダ側、もしくは反射板側に移動させると感度が悪くなる結果となった。スピーカをレーザー光軸に対して直角に置く事で、レーザーにはほぼ同時に全体に音波が当たる。その為、レーザー光路上では位相変化が同時に全体で起こる。しかし、スピーカの角度を変化させ、横から当てる事によってレーザー光路上で音波が当たる時間に違いが生まれ、レーザー光路上では音の密の部分、疎の部分が存在する為、レーザー光路上全体の位相変化を見ると、打ち消し合ってしまう得られる利得が減少した

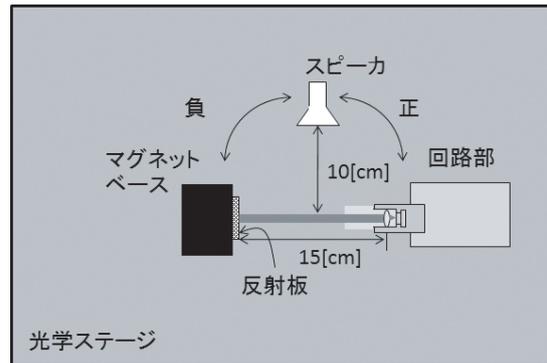


図10 スピーカ角度特性の測定条件

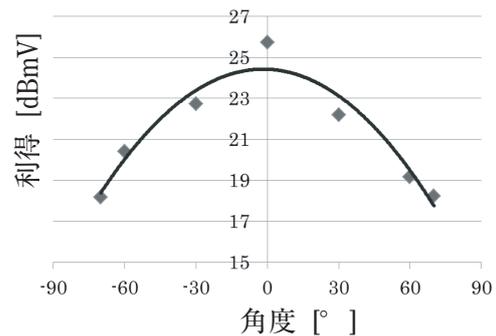


図11 スピーカ角度特性

## 8. まとめ

本研究で作製した装置は、半導体レーザーとレンズ、反射板のみで構成する事ができ、信号の後処理する事なく構成する事ができた。音の検出についてはレーザーの出力をスピーカに繋ぐ事により、検出した音を聞く事が可能な為、音の検出は行えていると断定した。

周波数特性を測定した結果、低周波数帯域ではコンデンサマイクよりもレーザーマイクの特性が良い事を確認した。10Hzまで測定する事ができた。低周波での特性から一定以上の音圧のある音源があればより低い周波数帯域で検出が可能となると考えている。

レーザー光軸とスピーカの距離を変化させて測定した結果、ピークが観測できたが、これは音の音圧と、レーザー光路上の屈折率変化が起きている領域との積で決まる為、少し距離を遠くする事で

感度が最も良くなる事が分かった。又、その感度の最も良くなる距離はLDから反射板までの距離の約半分の距離となった。

スピーカの角度を変化させて測定を行った。レーザ光軸に対しスピーカを直角の位置に置いた場合が最も感度が良くなった。レーザ光路上で位相変化が同時に全体で起こるからである。

この距離特性と角度依存特性の2つの結果は、本研究で作製したレーザマイクロフォンの特徴を良くとらえており、レーザマイクロフォンで音波の検出が行える事が分かった。

#### 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
- 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, No.12, pp.1454-1459, 2006

