

## 光波マイクロホンによる可聴帯から低周波超音波帯の音測定

園田義人\*<sup>1</sup>・田中啓一\*<sup>2</sup>・寺園信一\*<sup>3</sup>

### Measurement of sounds from audio to low frequency ultrasonic band by Optical Wave Microphone

by

Yoshito SONODA, Keiich TANAKA, Shin-ichi TERAZONO

(Received : September 30, 2008, Accepted : February 6, 2009)

#### Abstract

The optical wave microphone, which has no diaphragm but uses a laser beam as a sound detection probe, can measure sounds without any disturbance to a sound field and has possibility of measuring sounds over wide frequency band from audio to low-frequency ultrasonic wave by the same measurement machine. In the present feasibility study, the experiment measuring sounds from 3 kHz to 80 kHz by the optical wave microphone is carried out. It is experimentally shown that these sounds can be detected by the method and that the amplitude of output signal of the optical wave microphone is linearly proportional to the sound frequency, which is consistent with the prediction by the theoretical analysis.

#### 1. はじめに

音の検出法として、従来から種々のマイクロホンが利用されてきた。これらは100年以上に亘る開発の歴史を持つが、振動膜を内蔵し音による振動を電気信号に変換するという基本原理は変わっていない。この方法ではセンサーに物体を用いそれを測定点(音場)に持ち込む必要があるため、高周波応答が悪い、場を乱すなどの実用上の制約や欠点が出るのが避けられない。一方、近年、人の音感の問題に関連して、可聴周波数より高い20 kHz以上の音の役割及びその検出技術の重要性が指摘され、可聴帯域を越えた100 kHz程度までの広帯域にわたる音計測法の確立が望まれている。これに対しては広帯域の静電マイクロホンなどが実用化されているが、高価であり、振動や高音圧で破損し易いなどの弱点がある。一般的には振動膜式では高周波域まで広げた特性を実現するにはかなり困難を伴う。

これに対し、著者等は、プラズマ波動計測法として開発された方法<sup>[1],[2]</sup>を拡張することで、振動膜を全く用いず、光により音を直接検出する方法、もしくは光の中から音情報を取り出す方法(総称、光波マイクロホン)を提案し基礎的な研究を行っている。この方法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検出することにより音を再生しようという試みであるが、こ

の方法では可聴帯から20 kHz以上の周波数を含む領域での連続測定が理論的に可能と推定される。このうち、100 Hz ~ 20 kHzの可聴帯域については、すでに測定可能性の検証、及び理論との比較検討が行われている<sup>[3]</sup>。一方、20 kHz以上の帯域全体にわたる測定については可聴帯をはずれることもあり十分な検討がされていなかった。

光波マイクロホンにより可聴帯から低周波超音波帯に至る広帯域での音波検出が可能であるかどうかを調べるため、本研究では3 kHzから80 kHzに至る帯域の音波を測定する実験を行った。さらに測定結果と、理論的予測との比較検討を行った。

#### 2. 計測原理と広帯域化の考察

図1の配置のように、レーザー光のビームウェストに音波が交差する場合を考える。

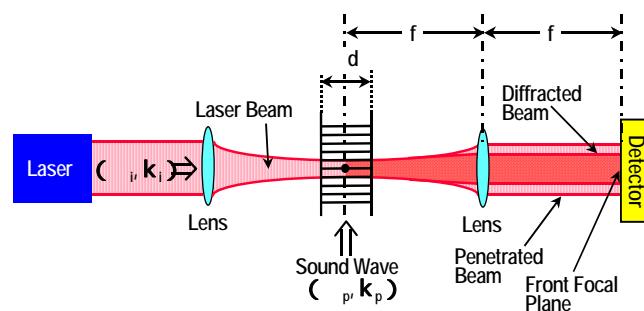


図1. 光波マイクロホンの計測原理

\* 1 産業工学部 電子知能システム工学科 教授

\* 2 (株)アコー 研究開発室長

\* 3 (株)アコー 代表取締役

観測面 ( $x_f, y_f$ )での光波分布は、光学分野で定式化されたレンズを通した場合のフラウンホーファ回折積分の式を用いて求められる<sup>[1],[2]</sup>。

ここで、音入力面 ( $x_0, y_0$ )における入射レーザービームの複素振幅  $u_w(x_0, y_0)$  を次式で与える。

$$u_w(x_0, y_0) = \left( \frac{\pi P_0}{2w_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left\{ \frac{-(x_0^2 + y_0^2)}{w_0^2} \right\} \quad (1)$$

また、音波による空気密度変動を、

$$n = n_0 + \Delta n \cos(k_p x_0 - \omega_p t) \quad (2)$$

とする。フラウンホーファ回折積分の式にこれらを代入すると、観測面での信号強度  $I_{ac}$  [ $W/m^2$ ] は、

$$I_{ac} = I_0 \left[ \exp \{ -(u^2 + (u - )^2) \} + \exp \{ -(u^2 + (u + )^2) \} \right] \sin_p t \quad (3)$$

で与えられる<sup>[1],[2]</sup>。

ここで、 $I_0 = (2P_0 / w_f^2) \exp[-2(y_f/w_f)^2]$  [ $W/m^2$ ]、 $u = x_f/w_f$ ：後方焦点面（観測面）の規格化された  $x$  座標、 $= k_p w_0/2$ ：規格化波数、 $w_f$ ：観測面でのビームサイズ、 $(x_f, y_f)$ ：観測面での  $x, y$  座標、 $(\omega_p, k_p)$ ：音波の角周波数および波数、 $w_0$ ：音波入射領域でのスポットサイズ、 $P_0$ ：総入射レーザーパワー、 $(k_i, k_i)$ ：入射レーザービームの角周波数および波数、 $\omega_0 = k_i(\mu_0 - 1) d$ 、 $p$ ：位相変化の時間変動成分、 $\mu_0$ ：空気の屈折率、 $\gamma$ ：比熱比、 $d$ ：音波の幅、 $p$ ：気圧、 $p$ ：音圧、 $p/p = n/n_0$ 、である。

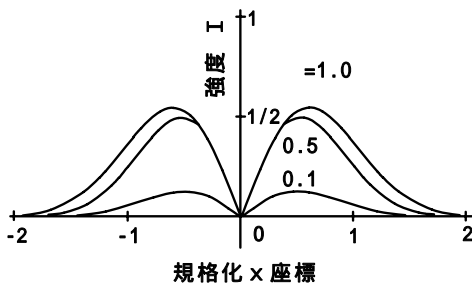


図2．回折像の強度分布の理論計算例

式(3)で与えられる回折強度の理論計算結果の一例を図2に示す。横軸は観測面の規格化  $x$  座標 ( $u$ ) である。回折強度分布は左右2つのピークを持つ分布からなっている。規格化波数により回折像の強度及び形が変わるが、可視光により波長の長い音波を測定するときは2つのピーク点の位置は変化しない。ピーク点の強度は  $1/2$  の値で

変化する。

式(3)の理論式で  $w_0$  を変化させてピーク点の信号強度の変化を考察すると、最大信号強度はおよそ規格化波数

1 辺りで得られる。これから、レーザービームのビームウェストと光波マイクロホンの最大感度波長の関係は次の近似式で与えられる。

$$\lambda_{max} \cong \pi w_0 \quad (4)$$

これから、光波マイクロホンでは、レーザービームウェストを変化させることにより最大感度の音波波長、又は周波数を変化させることが可能であることが分かる。

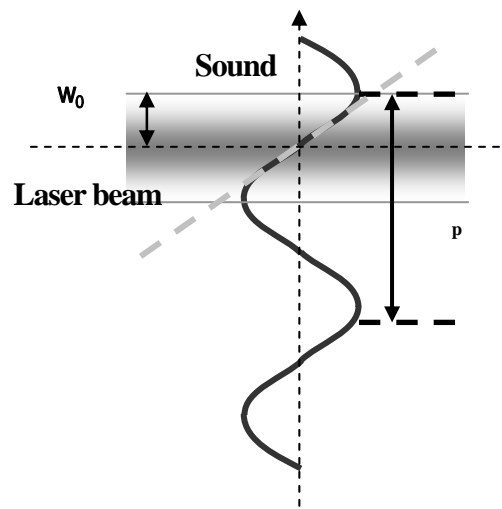


図3．音の密度勾配とレーザー直径の関係

これを物理的な視点から定性的に考察する。回折光は音波に起因する媒質の密度勾配で生じるため、その強度は図3に示すように、レーザービーム直径がおよそ音の半波長に近いときに最大強度になると考えられる。レーザービーム直径が音の半波長より小さければ光音相互作用の幅が小さくなり、大きければその一部が当該の回折光に寄与しなくなる。ただし、レーザービーム断面はガウス分布であり、音波強度（あるいは密度勾配）は正弦波的に変化しているため、光波マイクロホンの音検出部光学系を作成する場合は、式(4)は概略の条件を示すと考えて設計した方がよい。

### 3．実験装置と方法

実験に用いた装置の概略図を図4に示す。実験装置の全体は、光学系装置、音響系装置、及びデータ処理装置から構成されている。実験は全て無響室内で行った。

光源には、真円型半導体レーザー（波長  $635\text{ nm}$ 、定

格出力30 mW)を用いた。音入射領域のスポットサイズ半径 $w_0$ は2 mmとした。この値は、2章で述べた光音相互作用という物理面から考察すると、およそ55 kHz付近で最大感度になると予測されるビームサイズである。受光側にはレンズ3枚を使用した。音入射領域から見て1番目のレンズ(焦点距離:200 mm)は、回折光をフーリエ変換するための光学情報処理用レンズである。2番目のレンズ(焦点距離:6 mm)及び3番目のレンズ(焦点距離:200 mm)は、1番目のレンズでフーリエ変換された回折像の大きさが小さいため、これを拡大調整するためのレンズである。光検出器にはフォトダイオードを用いた。その受光面サイズは直径1.2 mmである。

音波の発振源には、ツイーターを使用した。発振性能の制約から、実験する音波周波数は3.15 kHz ~ 80 kHzとした。ツイーター表面とレーザービーム中心軸との距離は100 mmで一定とし、レーザービーム地点での音圧は94 dBで一定とした。

フォトダイオードからの出力信号は検出回路で交流成分のみを検出してアンプで増幅し、ハイパスフィルター(中心周波数:300 Hz)を通した後、デジタルストレージオシロスコープで観察・記録した。アンプの増幅率は10倍とした。

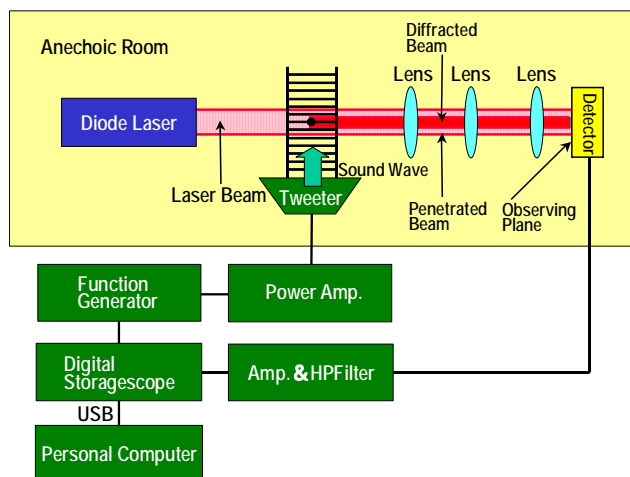


図4 . 実験装置図

#### 4. 実験結果と検討

##### 4.1 レーザ回折信号光の空間プロファイルの測定

まず、得られる光信号が振動等の外乱によるものではなく、音波による回折光であるかどうかの確認を行うために回折光の空間プロファイルを測定した。図5に音波周波数が20 kHzのときの回折光信号強度分布(2つのピークを持つ分布)とレーザービーム断面強度分布(1つのピークを持つ分布)の測定例をそれぞれ示す。レーザービ

ーム断面強度分布から、観測面でのレーザービーム断面の実効幅(直径で表現; ガウス分布の定義幅)は1.8 mm程度となっており、およそ設計値どおりになっている。一方、回折光信号強度分布は、図2の回折像の強度分布と同じように2つのピークを持つ分布となっている。前述のように、物理的には音波に起因する媒質の密度勾配によって生じた極微弱強度のドップラーシフト回折波が左右に揺れている状態を観測していることになる。これをレンズに通して観ることにより、2つのピークを持つ回折像分布が観測される。以上により、作成した光波マイクロホン装置により、音波による回折像が予測通り捉えられていることを確認した。

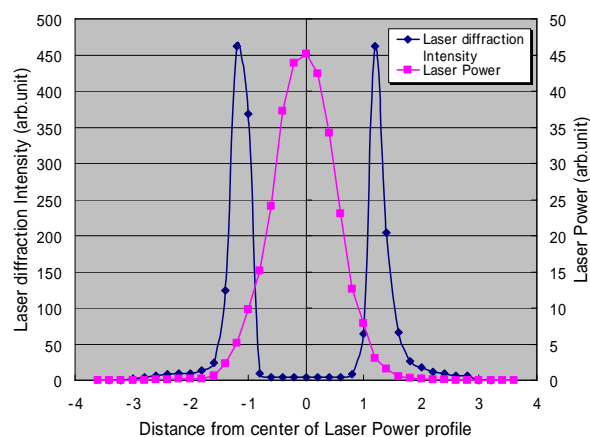


図5 . レーザ回折強度分布及びレーザー強度分布  
( $f = 20 \text{ kHz}$ )

なお、回折信号強度の最大点は理論的にはおよそレーザービーム半径の半分的位置に生じると予測されるが、今回の実験では図5のように0.6 mm程度それよりも外側で観測された。これはフォトダイオードに市販の汎用品(直径1.2 mm)を用いているため、受光面積が観測点のレーザー断面に対して比較的大きく中心部では位相の反転した左右の回折像を受けること、及び検出器が直流成分で飽和すること、などによると推定される。これは他の同種の実験でも確認されている<sup>[3]</sup>。今後、使用レーザーパワーの調整及び出力信号強度に適合した検出回路の選択などを検討する必要があるが、今回の実験では、この構成で実験を行った。以下の実験では、光検出器は図5の左側最大点の位置に設置した。

##### 4.2 周波数特性の測定

音波周波数を変化させて周波数特性を測定した。音圧は94 dBで一定とした。まず、測定した時間波形の一例として、5, 8, 50, 60, 80 kHzの各波形を

図6に示す。ただし、現在の実験ではノイズが比較的大きいためデジタルオシロスコープで16回の平均化処理をしている。これらにより、可聴音波から低周波の超音波まで（波長100mm～4mm程度；周波数3.15kHz～80kHz）の音波が連続的に検出可能であることを実験的に確認した。

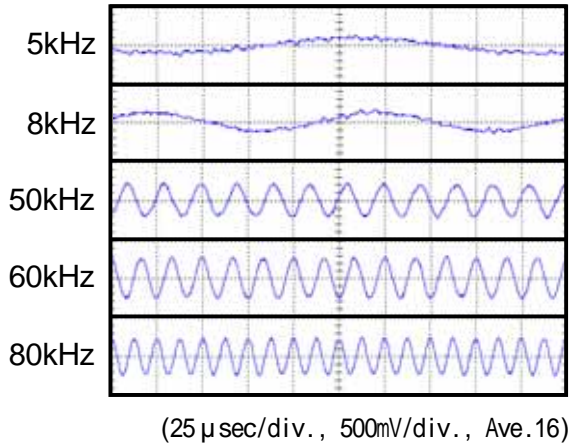


図6．測定した信号時間波形（音圧：94dB）．

これらのデータから求めた周波数特性の測定結果を図7に示す。これまでの可聴域（100Hz～20kHz）の実験結果で、光信号強度は理論的に予測されるように周波数に比例することが検証されている<sup>[3]</sup>。一方、今回の測定周波数領域では、図7のようにおよそ55kHzあたりで最大信号強度となり、周波数が低くなるにつれ信号強度が比例して小さくなっていることが分かる。ただし、図7の測定値では、周波数特性の傾きが理論的予測より小さくなっている。この原因として、ツイーターから放射された音波がレーザービームと交差する幅（音波実効幅）が周波数により変化していることが大きく影響していると推測される。

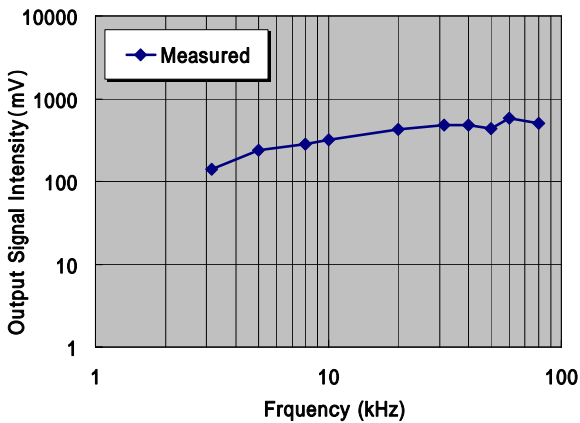


図7．測定した周波数特性

そこで、ツイーターの各周波数での放射音波の空間分布を1/4インチコンデンサマイクロホンにより測定した。ツイーターと1/4インチコンデンサマイクロホンとの距離は、ツイーターとレーザービームの距離と同じ100mmとした。測定結果を図8に示す。さらに、これより求めた音波の実効的な半値全幅（実効幅）を表1に示す。低周波側の3.15kHzでは、高周波側の80kHzより約7倍の実効幅となっている。

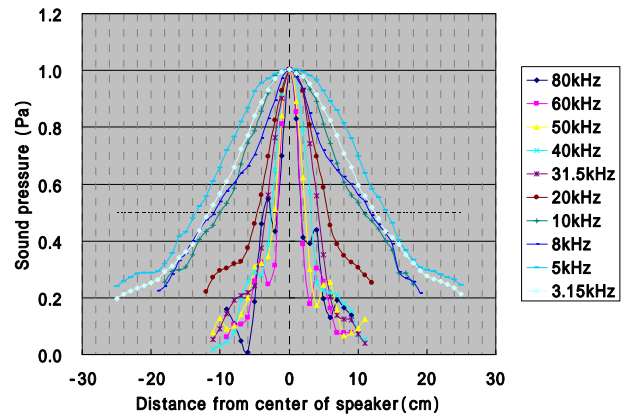


図8．ツイーターからの放射音波の分布。

表1．音波の実効幅（半値全幅）の概算値

Frquency (kHz)	width of sound wave (mm)
80	35
60	35
50	40
40	60
31.5	70
20	110
10	210
8	230
5	270
3.15	250

これらの測定値の中から20kHzの実効幅を基準値1として、各周波数の信号強度を音波実効幅で補正した。その結果を図9に示す。同図には測定結果（生データ）、補正結果、及び理論予測曲線(点線)を示している。補正した信号強度はおよそ周波数に比例した特性となり、予測と一致する結果が得られた。

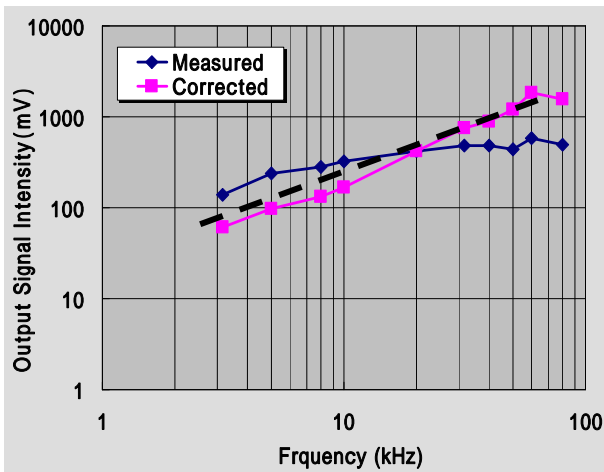


図9．音波実効幅で補正した周波数特性.

## 参考文献

- [1] D.E.Evans, M.von Hellermann and E.Holzhauer: Plasma Phys. Vol.24, No.7, pp.819-834 (1982).
- [2] Y.Sonoda, Y.Suetsugu, K.Muraoka & M.Akazaki: Plasma Phys.Vol.25, No.10, pp.1113-1132 (1983).
- [3] 田中・野上・園田：“レーザ光による可聴音波の計測” 電学論，122-E 巻7号，pp.362-368，(2002)。

## 5．あとがき

光波マイクロホンによる可聴音波及び低周波超音波の測定可能性を検討した。得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 理論的予測によれば、光波マイクロホンでは可聴帯から低周波超音波帯まで広帯域の音測定が可能であり、また周波数特性はレーザビーム直径により変化すると推定された。
- (2) 音波受信部のレーザビームの直径を4mmとし、これによる3kHz～80kHzの音の計測可能性を調べる実験を実施した。その結果、これらの周波数帯の音検出が可能であることを示した。
- (3) 光波マイクロホンの周波数特性を求めた。3kHz～80kHzでは周波数が増加するに従って信号強度も増加し、60kHz近傍に信号強度が最大となる点が現れることを示した。これらの周波数特性の結果は、音波の実効幅で補正した場合、ほぼ理論的予測と一致することを示した。

今後は音圧別の周波数特性（ダイナミックレンジ）や検出回路の最適化などを検討する予定である。

## 謝辞

本研究は、東海大学と(株)アコーとの2007年度共同開発協定に基づいて実施された。

また、本研究の一部は2007年度科学研究費補助金・基盤研究(C)、及び、宮崎県産業支援財団の2007年度中小企業新分野進出支援補助金の助成を受けて行われた。記して感謝の意を表す。