

## 受光部に光ファイバ束を用いた光波マイクロホンの変換特性

本田和也\*<sup>1</sup> 岩原基樹\*<sup>2</sup> 佐松崇史\*<sup>3</sup> 園田義人\*<sup>4</sup>

### Transduction Characteristics of Optical Wave Microphone Using Optical Fiber Bundle in Light Detection

by

Kazuya HONDA, Motoki IWAHARA, Takashi SAMATSU and Yoshito SONODA

(Received: October 2010, Accepted: February 2011)

#### Abstract

The optical wave microphone with no diaphragm, which theory is based on wave-optics and derived from physics of interaction between light and sound, uses a laser beam as a sensor and can measure sounds without any disturbance to sound field. In this method, sound signal is transformed to electrical one by detecting diffraction light, which is generated from optical phase modulation by sound. Then the spatial position of diffraction light pattern in the light detection plane is changed by sound incidence angle to laser beam axis, which property has possibility that it could be used as a handy flexible control method of directivity from high to non directional and a sound separation measurement method according to its incidence direction. In order to consider such possibility, sound receiving directivity of the optical wave microphone using a single photodiode is experimentally examined. Based on the result, sound receiving property by using optical fiber bundle with 16ch fibers is examined. The experimental results show that the optical wave microphone with a single photodiode detection has bidirectional property and that it is possible to control the directivity and to separate two sounds with incidence angle difference of 90 degree by using an optical fiber bundle.

#### 1. はじめに

従来のマイクロホンは、内蔵した膜の機械的振動により音を検出し電気信号に変換するという原理に基づいている。この方式ではマイクロホンという物体を測定点(音場)に持ち込む必要があるため、マイクロホン筐体による音の回折現象が生じるなど実用上の制約や欠点が出るのが避けられない<sup>1)</sup>。一方、光波マイクロホンは、波動光学的な原理に基づいており<sup>2)~4)</sup>、光ビーム部を音が通過する際に生じる極微弱な回折光を検出して音信号を電気信号に変換する<sup>5)</sup>。したがって、音を非接触・非擾乱で計測することが可能であるとともに、光ビーム部(音波アンテナ)の構成・形状を変えることにより音検出特性(指向性、増幅特性、周波数特性など)を変化させることができる<sup>6),7)</sup>。また、観測面に生じる光回折像の位置は、音進

入方向により変化するため、回折像を検出する受光部にマルチ光検出器(又は光ファイバ束)を用いることにより音を入射方向毎に分離測定したり、検出器からの多チャンネル出力信号を合成することにより、音受信指向性を手元でコントロールしたりすることも原理的に可能と考えられる<sup>8)</sup>。

本研究グループでは、光ビームアンテナ構成と光検出器構成の両方による指向性の変化(又は制御)を明らかにする研究を行っている。本研究では、まず光検出器の配置と指向性との関係を明らかにする実験及び検討を行った。この結果に基づき、光ファイバ束による受信特性を実験的に調べた。さらに、指向性の手元制御や入射方向毎の音分離測定等の可能性について考察した。

#### 2. 原理

光波マイクロホンの基本となる計測理論はすでに明らかとなっているが<sup>9),10)</sup>、ここでは研究の背景の理解及び実験結果の解釈に必要な部分のみを引用して概要を述べる。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

\*1 大学院 産業工学研究科 生産工学専攻 修士1年生  
\*2 大学院 産業工学研究科 生産工学専攻 修士2年生  
\*3 産業工学部 機械システム工学科 准教授  
\*4 産業工学部 電子知能システム工学科 教授

調整用のレンズで、右側のレンズがフーリエ変換用のレンズである。音場にレーザービームを入射すると、音場の位相変調作用によって、光回折波が生じる。これをレンズ（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。

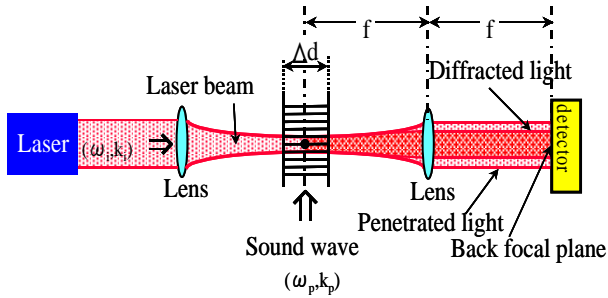
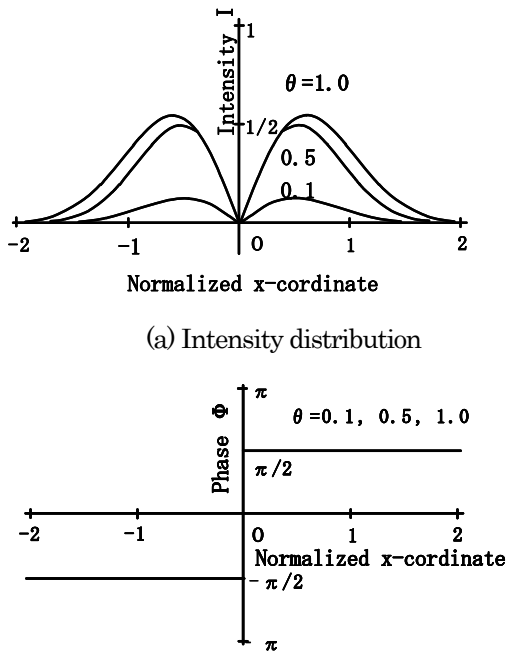


Fig. 1 Theoretical model

Fig. 1 のように、レーザー光のビームウェストに音波が入射角  $90^\circ$  で交差する場合、観測面における信号強度  $I_{ac}$  [ $W/m^2$ ] は、次式で与えられる<sup>9),10)</sup>。

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



(b) Phase distribution

Fig. 2 Theoretical calculation of diffraction

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

規格化波数  $\theta$  をパラメータとして、式(2)により回折光分布を理論的に求めた結果の一例を 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。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  $\pi$  で反転していることが分かる。

ここで、音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ことが上記理論から推定される。すなわち、レーザービームに垂直な断面内でレーザー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。したがって、分割形光検出器や光ファイバ束などによる受光方式を用いれば、指向性の手元（光検出信号処理回路部）でのコントロールや、音の進入方向毎の分離測定などが原理的に可能と考えられる。

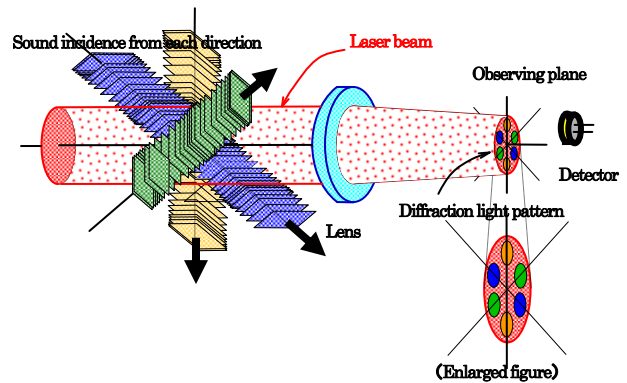


Fig. 3 Relation between sound incidence angle and spatial position of diffraction light pattern

### 3. 実験装置と方法

ここでは、1 個の光検出器（フォトダイオード）を用いた場合の指向性を測定する実験と受光部に光ファイバ束を用いた場合の受信特性を調べる実験の二つを行った。

Fig. 4 に実験装置の配置図を示す。レーザー光源には、可視光半導体レーザー（波長 635nm、定格出力 25mW）を用いた。レーザービームの半径は 1.5mm である。光検出器前の 3 枚のレンズで光学的フーリエ変換と回折像の大きさの調整を行う。検出面でのビーム半径は設計値 1.7mm に対し実

測値は 1.6mm であったが、許容誤差範囲内と見てこの条件により以下の実験を行った。

音波の生成には、25kHz 及び 40kHz (両方とも直径 16mm) の低周波超音波変換器を用い、これらにより音波をレーザービームに入射させる。Fig. 4 に示すように、40kHz 音波発振素子は、円形リング状支持金具に取り付け、光軸の周りを 360° 回転させることができる。ただし、角度 180° 前後の位置にはリング支持部があるため発振素子は設定できない。音波はレーザー光軸に垂直に入射し、この状態で音発振素子を光軸の方位角方向に回転するが、入射角  $\theta_i$  の基準 0° はレーザービームの真上とした。レーザー光源を見る方向で時計方向に音発振素子を回転しながら入射角を変化させる。25kHz 発振素子は後述のように角度 180° (レーザービームの真下) の位置に固定した。この発振素子は、40kHz を設置したリングから約 60mm 離れた位置に設置した。音検出部のレーザービームは平行ビームになっていてこの領域での入射音波は線形的に検出されるため、受信感度は両方の位置で同じである。音圧の測定には 1/4 インチ静電マイクロホンを用いた。音圧はレーザービーム部で 90dB に設定した。

最初の実験では、光検出器の大きさと音受信指向性との関係を調べるため、回折光(像)を検出するフォトダイオードには、直径 0.2mm、直径 0.8mm 及び 3.6mm\*3.6mm の 3 種類を用いた。

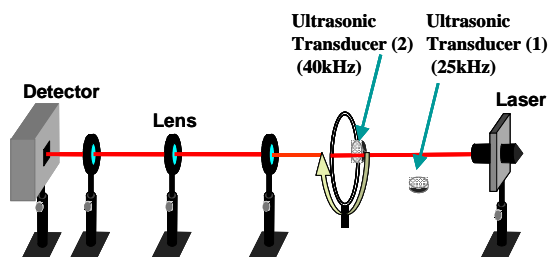


Fig.4 Experimental apparatus

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。

2 番目に実施した光ファイバ受光の実験で、受光部に用いた光ファイバ束の概略図を Fig. 5 に示す。上述のように検出面でのレーザービーム半径は 1.6mm であるが、回折光(像)を検出する光ファイバ束は直径 0.2mm の光ファイバ 16 本を直径 3mm の円周上に配置した構成となっている。光ファイバ出力は FC コネクタを介して、アバランシェ・フォトダイオード回路に入力した。

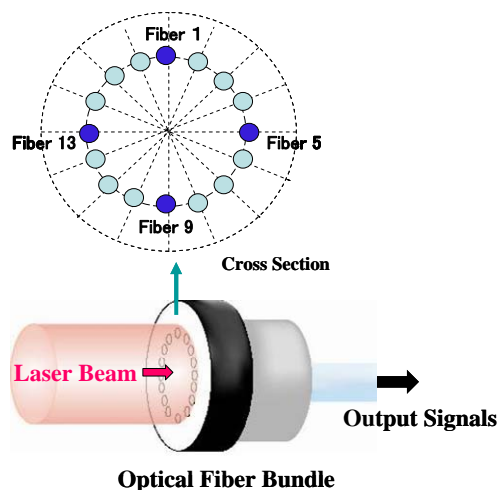


Fig.5 Optical fiber bundle

本研究室ではこの回路は 1 台しか所有していないため、各光ファイバを 1 本ずつ繋ぎ替えてそれぞれの出力信号を測定した。

以上の装置で、音波の入射角と信号強度との関係、回折像に対する検出器の大きさの影響、及び光ファイバ束による変換特性などを実験的に検討した。

#### 4. 実験結果と検討

1 個の光検出器による指向性の測定に入る前に、観測面における音による光回折像の分布及びその大きさを調べた。入射音を 25kHz とし、光回折像の 2 次元空間分布を測定した。光測定には 0.2mm φ のフォトダイオードを用いた。測定結果を Fig. 6 に示す。図中の等高線の数値単位は任意単位 (線形) である。これらの結果から、片側の回折像の空間広がり (半値幅) は、およそ 1.5mm (y 軸垂直方向) × 2mm (x 軸水平方向) 程度であることが分かる。

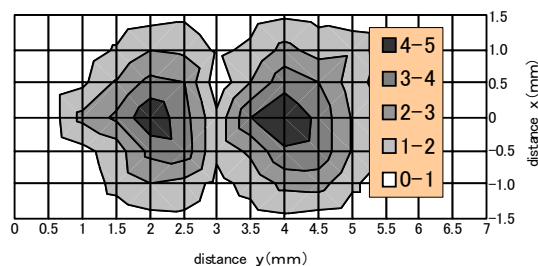


Fig.6 Two dimensional distribution of light diffraction pattern generated by sound

次に、25kHz 及び 40kHz の 2 つの音波を入射する実験を行った。Fig. 4 に示すように、25kHz 音波は基準信号として入射角 180° (レーザービームの真下) に固定した。40kHz

の音のみ入射角  $\theta_i$  を変化させ、その時の両周波数の信号強度の変化を測定した。光検出器は 0.8mm  $\phi$  で、入射角  $180^\circ$  (又は  $0^\circ$ ) の音の検出が最大感度となる位置に設置した。測定にはスペクトルアナライザを用いた。測定結果 (周波数スペクトル) の一例を Fig. 7(a) ( $\theta_i=20^\circ$ ), (b) ( $\theta_i=40^\circ$ ), (c) ( $\theta_i=80^\circ$ ) に示す。

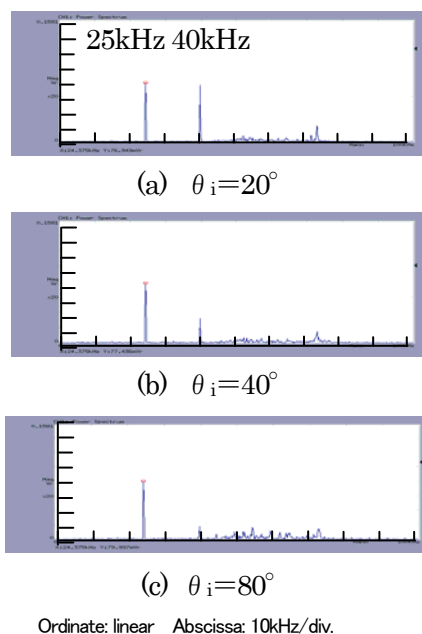


Fig.7 Frequency spectrum for each incidence angle

25kHz 音波信号は一定の大きさであるが、40kHz 音波信号は、入射角の増大と共に小さくなっていることが確認できる。50kHz 近傍に波形が出ているが、これらは近接機器 (検出器掃引ステージのコントローラなど) からのノイズである。本実験には支障がないためそのまま測定した。

これらの各入射角に対する周波数スペクトル波形から求めた入射角と信号強度の関係を Fig. 8 に示す。40kHz の信号は  $0^\circ$  近傍で最大となり、 $\pm 90^\circ$  でほぼ零となる。データのばらつきが若干多いが、半値角は約  $\pm 40^\circ$  程度となっている。

以上の実験では、光検出面でのレーザービーム断面の大きさ (半径 1.6mm) に対して比較的大きな光検出器 (直径 0.8mm) を用いており、光回折像測定時の空間分解能が低くなっている。光検出器サイズによる指向性の違いを調べるために、フォトダイオードサイズを直径 0.8mm から直径 0.2mm 及び  $3.6\text{mm} \times 3.6\text{mm}$  (正方形) に替えて同様の測定を行った。小さい光検出器を用いた場合に狭指向性化ができないかと期待したが、指向性の測定結果に大きな変化はみられなかった。これは、音による回折像がレー

ザ断面内 (観測面) で比較的に広く分布している為と予想される。今後さらに高指向性化に関する改善策を検討する予定である。

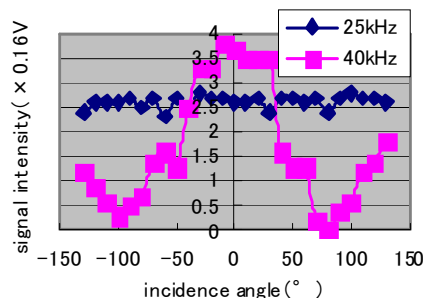


Fig.8 Signal intensity vs. incidence angle

次にマルチ検出形の受光部を用いた場合の音受信特性を調べる実験を行った。光観測面で用いることのできる分割形光ダイオードについては 2 分割又は 4 分割フォトダイオードしか市中に出回っておらず、また多分割フォトダイオードを特注品で購入すると高額になるためここでは利用できなかった。そこで、光ファイバ束を用いてマルチ検出方式の特性を実験することとした。

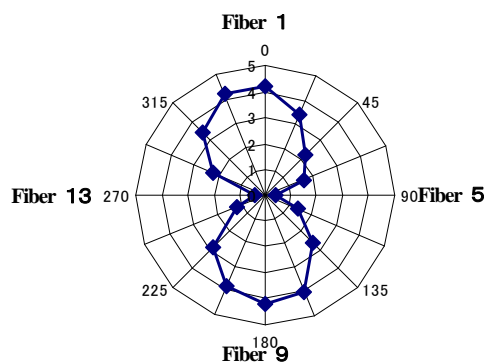
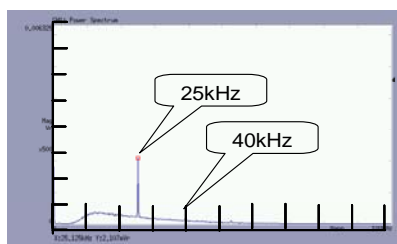


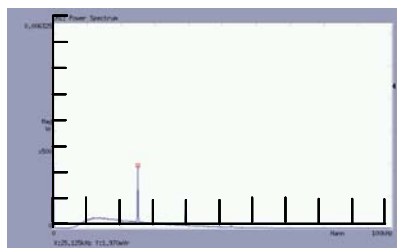
Fig9. Output signal intensity of each optical fiber

以下、光ファイバ束を受光部に用いた場合の変換特性を調べる実験結果について述べる。前記の実験と同様に、25kHz の音をレーザービーム下方向 (入射角  $180^\circ$ ) から入射させ、光ファイバの出力信号を測定した。測定結果を Fig. 9 に示す。円周上に角度を記入しているため、一見、指向性の測定に見間違いそうであるが、各角度に置いた光ファイバの出力強度をファイバ位置上 (円周上) でプロットしたものである。信号強度は、ファイバ 1 (角度  $0^\circ$ ) で最大で、ファイバ 5 (角度  $90^\circ$ ) で最小となっ

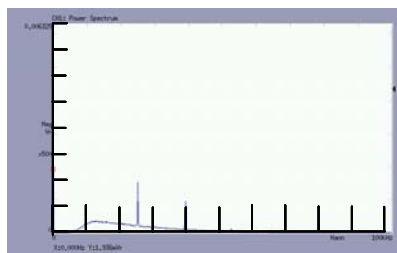
ている。ここで視点を変えて、1本の光ファイバのみ(例えば、図中のファイバ1)を使用する場合を考えると、Fig. 9のような双指向性を持つことになると解釈する



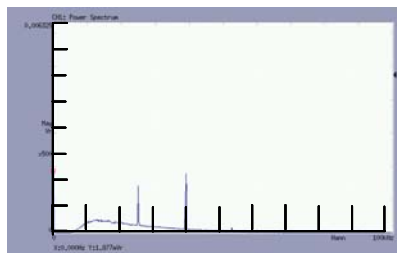
(a)Fiber 1



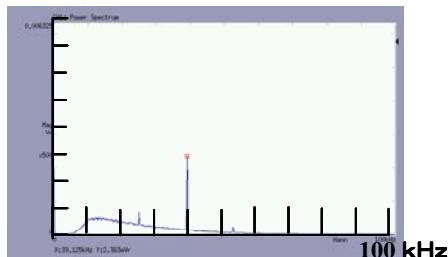
(b)Fiber 2



(c)Fiber 3



(d)Fiber 4



(e)Fiber 5 Ordinate: linear Abscissa: 10kHz/div.

Fig10. Frequency spectra of output signal of each fiber.

ことができる。すなわち、1個の光検出器を用いて指向性を測定した結果 (Fig. 8) と類似の特性となる。次に、前述の実験と同様に、25kHzの音をレーザービーム下方向から入射させ、同時に40kHzの音を横方向から入射させて、光ファイバ束による測定を行った。各光ファイバ出力信号(ファイバ1~5)の周波数スペクトル波形の測定例をFig. 10に示す。ファイバ1(0°位置)では25kHzの信号が大きく40kHzの信号は確認できないくらいに小さいが、ファイバ5(90°位置)では逆の関係になっていることが分かる。

各光ファイバ出力信号の周波数スペクトル波形から求めた光ファイバ位置と信号強度の関係をFig. 11に示す。40kHzの信号はファイバ5(90°)及びファイバ13(270°)近傍で最大となり、ファイバ1(0°)及びファイバ9(180°)ではほぼ零となる。各光ファイバの出力を合わせると半値角が約±40°の双指向形の曲線となっている。逆に、25kHz信号は0°及び180°近傍で最大となり、90°及び270°近傍ではほぼ零となっている。

これらの結果より、音入射角が90°異なればほぼ完全に分離測定できることが分かる。2つの音の入射角度の差が小さい場合には分離性能は悪くなる。

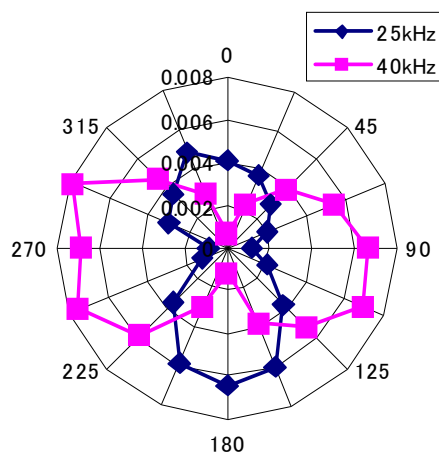


Fig11. Output signal intensity of each optical fiber for two sounds with different frequency and from different incidence angle

指向性の視点から見ると、1本の光ファイバを用いた場合、およそ±40°の双指向性の特性を持っていることになる。円周上に位置する各ファイバは、それぞれが半径方向(光ファイバ束の中心点と光ファイバ位置を結ぶ方向)を最大感度方向とする双指向性の音検出器の集合体を構成していることになる。

最後に、以上の実験結果を基に、指向性の手元制御及び分離測定の可能性について考察する。

本研究室では、光ファイバを接続するFCコネクタ付きのフォトダイオード回路を1台しか所有しておらず、16本の光ファイバを順次付け替えて測定した。したがって、マルチチャンネルを同時測定する実験や複数の光ファイバの出力信号を合成して指向性の変化を測定する実験等が実施できなかった。ここでは、原理面からの定性的な検討に留める。上記のように、一本の光ファイバ（又はフォトダイオード）を用いた場合、半値角がおよそ $\pm 40^\circ$ 程度の双指向性受信器となる。したがって、多分割フォトダイオード (Fig. 12 参照)、又は、上記の実験で用いたような光ファイバ束を用いた場合、それぞれの検出器の指向性を合成した可変指向特性が実現できる。マルチ検出器出力信号の合成による指向性の変化のイメージ図を Fig. 13 に示す。ただし、これらの図は正確な数値計算によるものでなく、あくまでイメージ図である。例えば、上記実験結果に準じて言えば、隣り合う2つの光ファイバの出力を合成すれば、 $\pm 40^\circ$ の二つの双指向性を $22.5^\circ$ の角度だけ離して合成した指向性になると予想される。このように各光検出器による検波後の出力電気信号を合成することにより、高指向性から無指向性までを手元切り替えてコントロールすることが可能になると期待できる。

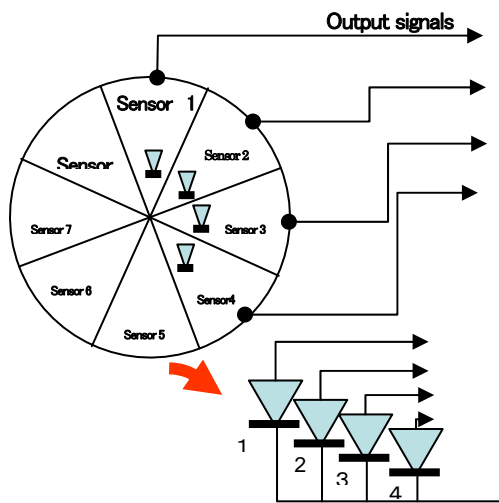


Fig12. Composition of output signals from each optical sensor element.

一方、音の進入方向毎の分離測定については、入射角が $90^\circ$ 異なればTJR(Target Jammer Ratio)の十分高い分離ができるが、小さい角度差での分離測定はできず、ニーズに合わせた設計をする必要がある。もし、方向のみ

の情報を得たい場合は、上記実験のように光ファイバ束を用いて、出力信号が最大となるファイバ位置から音の進入方向を推定することは可能と考えられる。

ただし、本研究では、現在盛んに研究が行われている音源推定方法などに対抗する技術を開発しようとする意図は全くない。それらのソフトを中心とする手法の音検出部のハードウェアとして、もし通常マイクロホンより有効な面があれば、状況に応じて光ファイバ束式光波マイクロホンを使用して頂ければよいと考えている。

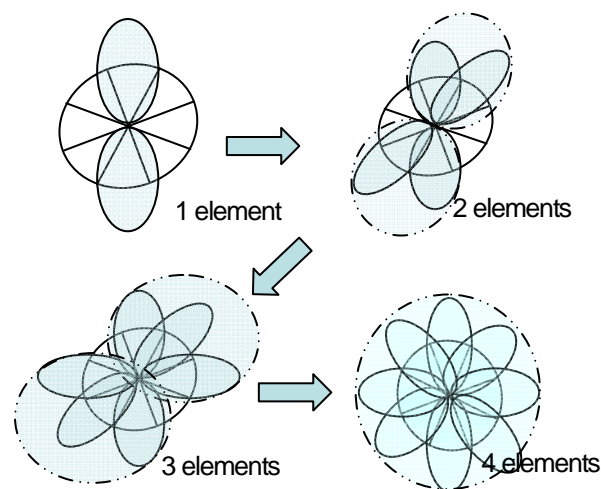


Fig13. Concept illustrations of resultant directivity by output signal composition

## 6. まとめ

本研究では最終目標としては光波マイクロホンの指向性の手元制御や音入射方向分離測定等の性能開発を目指している。今回は、光波マイクロホンの受光部に光ファイバ束を用い、各ファイバの信号強度を比較することで指向性制御や分離測定の可能性に関する基礎的検討を行った。内容をまとめると以下の通りである。

- ① 光波マイクロホンの光受光部に1個の光検出器（フォトダイオード）を設置した場合の指向性、及び16chの光ファイバ束を用いた場合のそれぞれの音受信特性を実験的に明らかにした。
- ② 1個の光検出器を用いた場合、指向性の指標としての半値角は約 $\pm 40^\circ$ 程度であった。
- ③ 検出器のサイズを小さくすることで高指向性を得ることはできなかった。回折像に広がりが大きいためと考えられた。
- ④ 円周上に配置した16ch光ファイバ束を受光部として用いた実験を行い、音入射時のファイバ毎の信号強度の違いを明らかにした。この結果から、各

検出器の出力を合成することにより、指向性の合成で、高指向性から無指向性への切り替えが手元できると予測される。

- ⑤ 1本の光ファイバで受光した場合も上記②（1個の光検出器使用）と同じ指向性が得られると考えられる。
- ⑥ 90°異なる角度から入射した2つの音波は90°異なる位置に配置した2本の光ファイバにより分離測定できる。入射角の差が小さい場合は完全な分離測定はできない。

受光部に光ファイバを用いる場合、ファイバ径（本研究では直径0.2mm）が小さいために取り込む光量が減り信号強度が小さくなる欠点があったが、さらに低音圧の音を測定する必要がある場合はレーザパワーの大きい光源を用いるか、ファイバ径を大きくする等の対応が必要である。

本研究では、光ファイバに接続できるFCコネクタ付きのフォトダイオード回路を増設して光ファイバ出力の合成による指向性制御の実験等を次に行う予定にしている。

今後、光ファイバ束（検出器）構成による指向性の手元制御や分離測定についてさらに検討を重ね、総合的な指針をまとめたいと考えている。

#### 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。

#### 参考文献

- [1] 小野一穂：「マイクロホンの広帯域化」日本音響学会誌, 64巻, 11号, pp. 656-660 (2008).
- [2] 矢田貝豊彦：「光情報処理の基礎」丸善(1998).
- [3] 吉村武晃：「光情報工学の基礎」コロナ社(2000).
- [4] 村田和美：「光学」サイエンス社(1979).
- [5] 園田義人：「光マイクロホン」特許第3543101号(2004).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 園田義人：「光マイクロホン」特開 2007-194677(2007).
- [9] D.E.Evans, M.von Hellebrand and E.Holzhauser: "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).

- [10] 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).