

## 光波マイクロホンにおける音波検出の物理的解釈に関する論理的考察

岩原基樹\*1・佐松崇史\*2・大内可人\*3・中園与一\*4・中宮俊幸\*5・園田義人\*5

### Theoretical Consideration on Physical Interpretation of Sound Detection in Optical Wave Microphone

by

Motoki IWAHARA, Takashi SAMATSU, Yoshito OUCHI, Yoichi NAKAZONO,

Toshiyuki NAKAMIYA and Yoshito SONODA

(Received: 19 OCTOBER 2009, Accepted: 22 FEBRUARY 2010)

#### Abstract

The optical wave microphone with no diaphragm, which uses a laser beam to detect sounds, can measure sounds without any disturbance to a sound field. The theoretical equation for this method is derived from optical phase modulation theory and optical diffraction integration equation, but the physical interpretation or meaning is not clear in these mathematical calculation. In this paper, the physical meanings for such wave-optical processes are theoretically considered. Especially, from a view of spatial sampling theorem, the interaction between a laser beam with small radius and a sounds with long-wavelength is discussed, showing that the wave-number resolution is lost for this condition and the spatial position of maximum intensity of the light diffraction pattern by a sound is not changed for different frequency, which property can be used to detect complex tone with different frequency. Finally, the method is compared with the conventional light diffraction phenomena by ultrasounds.

#### 1. はじめに

音の検出手段として、古くからいろいろな種類のマイクロホンが開発されている。これらのマイクロホンは100年以上に亘る開発の歴史を持ち高性能化されているが、内蔵した振動膜を音により振動させて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、近年、光学的に音を検出する方法として、振動膜で光を反射させそれを検出することで音を電気信号に変換する方式を用いた光マイクロホンなどが提案されている<sup>2)~4)</sup>。ただし、これは検出部に振動膜を用いているという点で、従来のマイクロホンに対し原理面での大きな変化はない。

これに対し、本研究では検出部に振動膜などの物体を全く用いず、波動光学的原理に基づいて音を光で直接検

出する方法を開発しており、前述の光マイクロホンと区別するためこれを光波マイクロホンと呼んでいる<sup>5)~7)</sup>。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検出器で電気信号に変換し、音を再生しようとする試みである。同法では、センサー部は光ビームであり、完全非接触で音を検出することが可能である。また、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、周波数特性、増幅特性など)を変化させることが可能である。さらに、観測面での光回折像の位置は音進入方向により変化するため、回折像を検出するマルチ光検出器を切り替えることにより音を入射方向毎に分離測定したり、音受信指向性を手でコントロールしたりすることも原理的に可能であるなど、従来のマイクロホンにない種々の利点を有している<sup>5)</sup>。光波マイクロホン法では、音の情報を持つ微弱回折光はフーリエ光学系による光情報処理を行った後、電気信号に変換される。

光波マイクロホン法の基礎となる計測理論式は、音による光の位相変調と光回折積分の式を出発点として求められている。最終的に得られた式を用いればレーザ光及び音波の各パラメータの関与を精密に計算することができる。ただし、その反面、理論計算は数学的な式の変形のみで展開されるため、音検出過程で生じる光音相互作用

\*1 大学院 産業工学研究科 生産工学専攻 修士1年生

\*2 産業工学部 機械システム工学科 准教授

\*3 産業工学部 電子知能システム工学科 准教授

\*4 産業工学部 機械システム工学科 教授

\*5 産業工学部 電子知能システム工学科 教授

用、回折光発生、回折光と透過光の光干渉等の各過程の物理的な解釈が直感的に理解しにくく、光波マイクロホン法が音響技術者に十分理解されない原因の一つとなっている。

本論文では、光波マイクロホン法における音検出の理論式とそこから明らかになる光による音検出の諸特性、並びに、それらに対応する光音相互作用や信号光検出の物理的解釈を考察した。特に、レーザビームによる音波の空間サンプリングという視点から考察を行い、サンプリングの定理を満足しないことから生じる波数分解能の低下を逆利用して可聴帯の複合音を検出するメカニズムを明らかにした。また、光ビームにより音を測定する際の周波数特性を示す理論式と物理像との対応なども考察した。最後に、光波マイクロホンの扱う光音相互作用と従来の超音波光回折(ラマン・ナス回折やブラッグ回折等)との違いに関する考察結果などをまとめた。

## 2. 光情報処理と光波マイクロホンの音検出の原理

光波マイクロホンによる音検出のイメージ図を Fig. 1 に示す。音は、空気の粗密波で光から見ると屈折率が変化している場であるので、音場に光ビーム部が入射すると、光が微弱に位相変調される。これにより音波の周波数だけドップラーシフトした極微弱な回折光が生じるが、この強度は非常に小さく直接検出するのは困難である。この微弱回折光と透過光を干渉させて光検出器で検出する。この際、微弱回折光と透過光を干渉させて光強度分布(光回折像)を得るためにレンズを用いた光学的フーリエ変換を用いる。

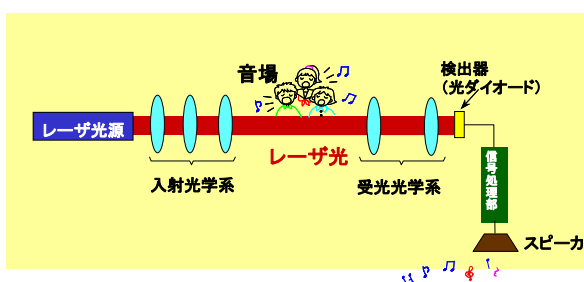


Fig.1 Image of optical wave microphone

一例として、2枚のレンズを用いたフーリエ光学系を Fig. 2 に示す<sup>8)</sup>。1枚目のレンズの後方焦点面に入力面のフーリエ変換像ができる。これをさらに2枚目のレンズによりフーリエ変換すると、その後方焦点面に左右上下が逆転した実像ができる。光学的な画像処理では、1枚目のレンズの焦点面にフィルタを入れることで画像加工がなされる。光波マイクロホンでは、音場が入力部とな

る。1枚目のレンズの後方焦点面にそのフーリエ変換像(回折像)が得られる。音による微弱な光位相変調が光回折像(強度分布)として出現する。

なお、音による位相変調の場合、2枚目のレンズでこれを再度フーリエ変換しても、その後方焦点面には十分な強さの強度分布(実像)は得られない。これを得るには、1枚目のレンズの後方焦点面に光学移相板を入れて透過光又は回折光のいずれかに $\pi/2$ の位相シフトを与える必要がある。これにより回折光と透過光が干渉し、2番目のレンズの後方焦点面に検出可能な十分な光強度分布(実像)が得られる。この方法は、位相コントラスト法として知られている<sup>9)</sup>。

光波マイクロホンでは、1枚目のレンズの後方焦点面のフーリエ変換像(回折像)に光検出器を置くことにより音信号を電気信号に変換する。次節で、この過程を理論式により表し、光による音検出の特徴を考察する。

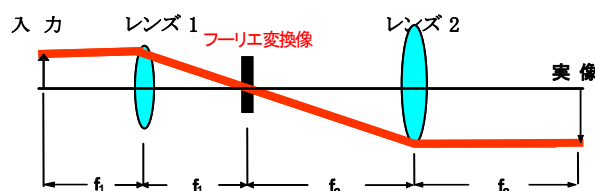


Fig.2 Fourier optical system using two lenses

## 3. 基礎理論と考察

Fig. 3 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、右側のレンズがフーリエ変換用のレンズである。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、光回折波が生じる。これをレンズ(焦点距離:  $f_1$  [m])を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。

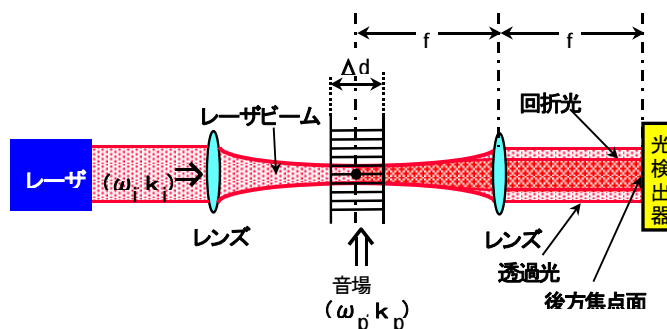


Fig.3 Theoretical model

Fig. 3 のように、レーザ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、観測面での光分布  $u(x_f, y_f)$  は次の回折積分により求めることができる<sup>10)</sup>。

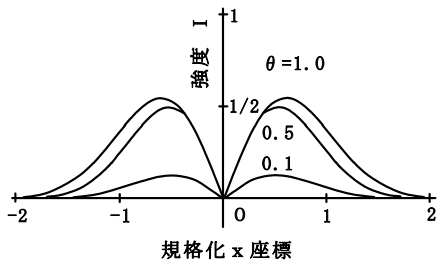
$$u(x_f, y_f) = \left\{ \frac{\exp(-2k f)}{\lambda f} \right\} \iint_{-\infty}^{+\infty} u(x_0, y_0) T(x_0, y_0) \exp \left\{ \frac{ik(x_0 x_f + y_0 y_f)}{f} \right\} dx_0 dy_0 \quad \dots (1)$$

ここで、 $u_w(x_0, y_0)$  : 入力面  $(x_0, y_0)$  でのレーザの複素振幅、 $T(x_0, y_0)$  : 音波による位相変調成分、 $\lambda, k$  : レーザの波長と波数である。

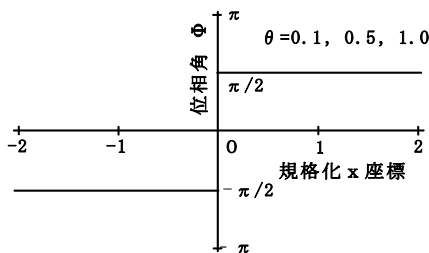
これから得られる光強度分布の式には、透過波に対応した直流成分や1次回折波の成分などが含まれるが、高次の回折波の強度は  $(\Delta \phi_0)^n$  (ここで、 $n$ : 高次回折波の次数) に比例するが、位相変調度が  $\Delta \phi_0 \ll 1$  であるため無視できる。観測面での1次成分の信号強度  $I_{ac}$  [ $W/m^2$ ] は、結局、

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

で与えられる<sup>11), 12)</sup>。ここで、 $I_0$  : レーザ光強度分布、 $u$  : 観測面の規格化x座標、 $\theta (=k w_0/2)$  : 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、 $\Delta p$  : 音圧、 $\gamma_a$  : 比熱比、 $p$  : 大気圧である。



(a) Intensity distribution



(b) Phase distribution

Fig.4 Theoretical calculation of diffraction

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. 4 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。

4. 規格化波数と回折像信号との関係に関する考察

さらに、可聴音をレーザビームで測定する時の最適条件を知るために、式(2)で規格化波数  $\theta$  を変化させた場合の最大強度 (Fig. 4(a) の山形のピーク点強度)  $I_m$  及びその空間的位置  $u_m$  の変化をそれぞれ数値計算により求めた。

まず、最大強度に対する計算結果を Fig. 5 に示す。同図より、強度は  $\theta = 0.8$  あたりで最大となることが分かる。この条件は、 $\theta = \pi w_0 / \lambda$  であるので、レーザビーム直径 ( $2w_0$ ) = 音波の半波長 ( $\lambda/2$ ) に相当していることが分かる。回折光は音場の媒質密度分布で生じることを考慮すると、これは音波の密度勾配 (半波長の領域) にレーザビームが有効に照射された条件に対応していると物理的に解釈することができる。Fig. 6 にその概念図を示す。

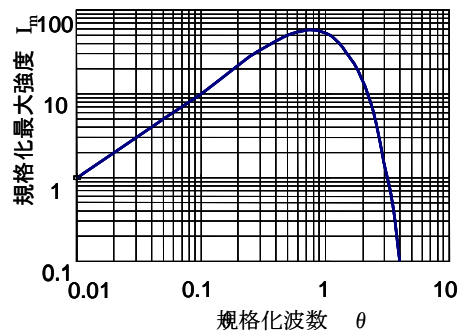


Fig.5 Change of maximum intensity ( $I_m$  vs.  $\theta$ )

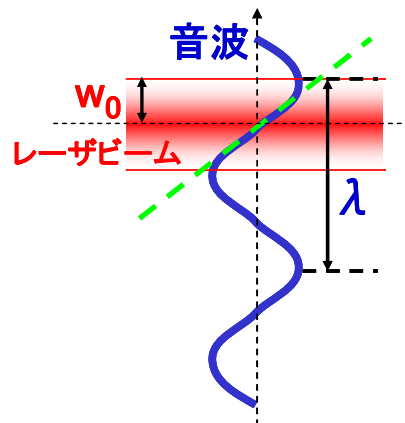


Fig.6 Interaction between laser beam and sound.

ここで、音波波長と規格化波数  $\theta$  の数値例を Tab. 1 に示す。レーザービームのビームウェストの半径  $w_0$  を 2mm と仮定した場合の値である。このように数 mm の直径のレーザービームで可聴音を測定する場合、結局、 $\theta \ll 1$  の条件となるが、これは Fig. 5 の周波数特性曲線の左端傾斜部の領域にあたる。この領域では、光信号強度は音波の周波数に比例した特性となっている。ちなみに、式(2)を  $\theta \ll 1$  の条件で近似計算すると次式が得られる。

$$I_{ac} = 4I_0\Delta\phi_0 e^{-2u^2} u\theta \sin(\omega t) \quad (3)$$

ここで、 $\theta = kw_0/2 = \pi w_0 f/c$  ( $f$ : 音波の周波数、 $c$ : 音速) であることを考慮すると、式(3)から低周波(可聴)領域では光信号強度は音波の周波数  $f$  に比例することが分かる。

Tab.1 Value of  $\theta$  for each wavelength of sound in case of  $w_0 = 2$  mm.

音波の周波数 $f$ (Hz)	100	500	1k	5k	20k	40k
音波の波長 $\lambda$ (mm)	3400	680	340	68	17	8.5
規格化波数 $\theta$	0.0018	0.0092	0.018	0.092	0.37	0.74

一方、高周波(短波長)の音波では密度勾配が大きくなるにも関わらず、Fig. 5 の  $\theta > 1$  の領域でも信号強度が低下している。これは、物理的には、回折角が大きくなって回折光が透過光の周辺部(または外側)に出るような状態となり、干渉相手となる透過光強度が指数関数的に低下するため信号強度が右下がりになる特性となっていると解釈することができる。または、光検波の考え方から見ると、ホモダイン検波の局発成分が小さくなるため信号強度が低下すると表現することもできる。

次に、最大強度点の空間的位置  $u_m$  に対する数値計算結果を Fig. 7 に示す。同図で、信号最大点の規格化座標(位置)  $u_m$  は  $\theta$  がおよそ 1 より小さい領域で変化しなくなり、0.5 に近づいていることが分かる。これは、最大点の  $x$  座標  $x_m$  が観測面でのレーザービーム半径  $w_f$  の 1/2 になることに相当している。すなわち、可聴音の測定ではこの位置に光検出器を置けば、音の周波数に関わらず音信号が取れることを意味している。

以上のように、音による光位相変調の理論から数値計算すると  $\theta < 1$  で回折像の最大点の位置が移動しなくな

るという結果が得られるが、これは従来の光音相互作用が強い条件下でのブラッグ回折やラマン・ナス回折<sup>13)~16)</sup>と様相が異なっている。このような波長の長い可聴音による光回折現象について、次節でレーザービームによる音の空間サンプリングという視点から考察し、従来取り扱われてきた超音波による光回折現象及びその理論との相違点を明らかにする。

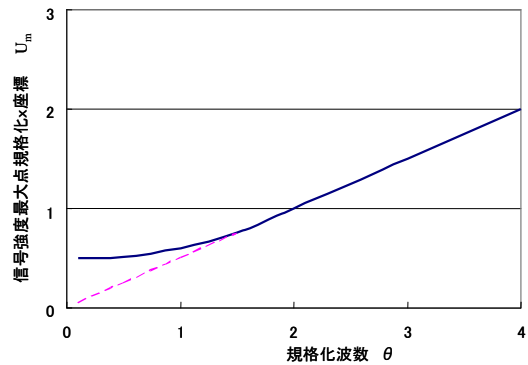


Fig.7 Change of spatial position ( $u_m$  vs.  $\theta$ )

### 5. レーザービームによる音の空間サンプリングの考察

時間領域におけるサンプリング定理によると、信号に含まれる最大周波数を  $f_M$  [Hz] とするとき、元の信号は  $1/2 f_M$  秒毎に取ったサンプル値から完全に決定される。これは、半周期に 1 回以上のサンプリングが必要なことに相当するが、空間領域における波動情報サンプリングでも同様のことが言える。すなわち、波動の空間サンプリングで波長(又は波数)の同定を行うためには半波長毎に 1 回以上のサンプリングが必要となる。

ここで空間を伝搬する音をレーザービームで検出する場合を考察する。このとき、レーザービームはガウス分布をしているため厳密ではないが、本論文では、簡便のためレーザービームの広がり幅(直径  $2w_0$ ) がおよそ空間サンプリングの全幅であるとみなす。

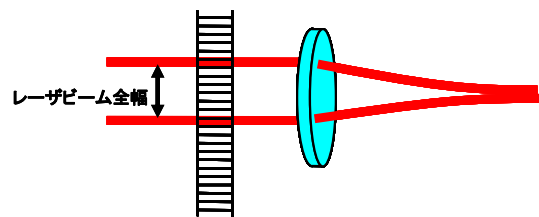


Fig.8 Raman-Nath diffraction by ultrasonic wave

まず、従来より理論的に確立されているラマン・ナス回折時の光ビームと音（高周波超音波）の関係の概略図を Fig.8 に示す。この場合は、音場による媒質の密度勾配が光ビーム幅の中に多数存在しており、各密度勾配からの多数の回折光の干渉波形が検出面で回折像として観測される。この場合、各回折光の干渉が強く起きる点に回折像が現れ、その最大点の位置は音波の波長に依存する。入力面での音という空間分布波形は、観測面で空間周波数分布（周波数スペクトル分布）に置き換わる。その様子の概略図を Fig.9 に示す。すなわち、音の空間サンプリングという視点から見ると、ラマン・ナス回折ではサンプリング領域（光ビーム全幅）内に多数の波長が含まれてサンプリングの定理の条件がおおよそ満たされており、回折像の分布は音の波長（又は波数）を決定するのに利用できる。

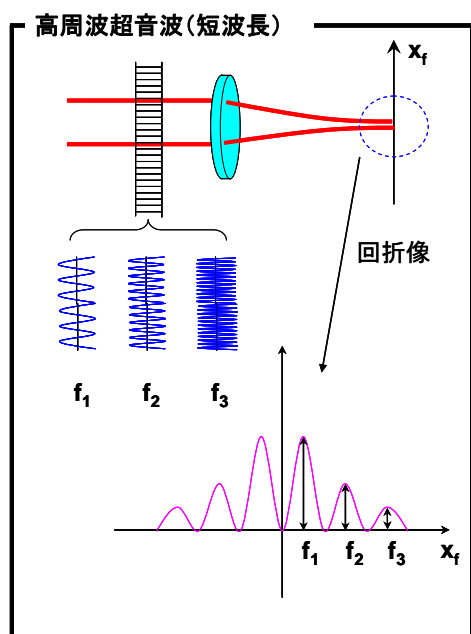


Fig.9 Distribution of light diffraction image for Raman-Nath diffraction.

一方、波長の長い可聴音を細いレーザービームで検出するときの光ビームと音波の関係の概念図を Fig.10 に示す。この場合、レーザービームは音の波長の一部を通過している。光ビームで音を検出する際、光ビームの全幅内にサンプリング点は無限に連続的に存在するが、音の空間サンプリング領域（光ビーム全幅）が音の半波長より狭くなっていて、空間サンプリングの定理が満足されない条件となっている。音波の波長（又は波数）を決定するためには、光ビーム幅（直径  $2w_0$ ）が音の半波長を複数含む必要があるが、最低1つ含む条件を考え

ると、 $2w_0 = \lambda/2$  となる。これは、規格化波数  $\theta$  に置き換えると、 $\theta = \pi/4 \approx 0.8$  となる。この条件は、Fig.7 で規格化位置が変化しなくなる所（波数分解能が失われる条件）とおおよそ一致することが分かる。

換言すれば、波長の長い可聴音領域では空間サンプリング条件が満足されないため、いずれの周波数でも回折像の最大強度点が同じ位置に現れる。この様子を Fig.11 に示す。この条件下では、レーザ測定で音場の波数（又は波長）を最大強度点の位置から決定することが原理的に不可能になる。ただし、音が検出できればよいというニーズに対しては、逆にこの特性を有効に利用できる。すなわち、検出器を回折像の最大強度点に固定した状態で複数の周波数から成る任意の複合音がそのまま検出できることを意味する。この特性を利用しているのが光波マイクロホンとすることができる。

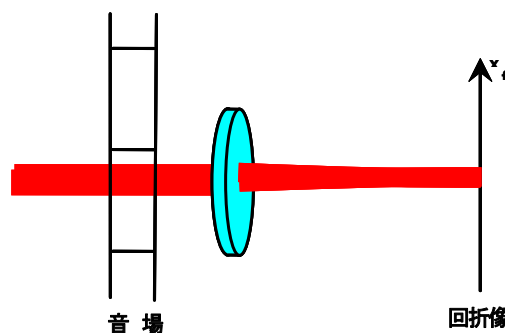
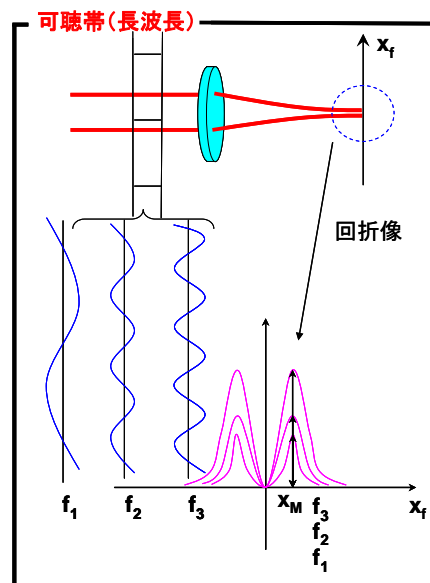


Fig.10 Weak light diffraction by acoustic wave treated in optical wave microphone.



標本化定理が満足されない場合の回折像

Fig.11 Distribution of light diffraction image for ultra-weak diffraction by audible sound.

音響光学で扱う高周波超音波による光回折像では、ビームが周波数に比例してずれたり、高調波が発生したりするが、可聴帯では波長が長く光ビームはその一部を通過するだけで極微弱ビーム偏向の状態に移っていて前者とは様相が異なっていることが分かる。従来からの超音波による光回折とここで扱う可聴音による光回折の違いについて、次節でさらに考察する。

6. ブラッグ回折及びラマン・ナス回折との比較考察

音波による光回折現象の中で強い光音相互作用の条件下で現れるブラッグ回折、弱い相互作用の条件下で現れるラマン・ナス回折、及びここで考察している長波長の可聴音により生じる回折、の各様子の概念図を Fig.12(a)~(c)に示す。ここでは、良く知られているブラッグ回折やラマン・ナス回折と光波マイクロホンで扱う可聴音による光回折との違いを考察する。

周期構造による光回折を扱う際、周期構造の特性を評価するのに、次に示す回折パラメータ  $Q$  が用いられる。

$$Q = \frac{2\pi\lambda_i d}{n_0\lambda^2} \quad (4)$$

通常、周期構造の評価として、 $Q > 10$  であるか、 $Q < 1$  であるかにより位相格子が厚いか薄いかの判別の目安とされる。特に、 $Q \gg 1$  の場合をブラッグ回折、 $Q \ll 1$  の場合をラマン・ナス回折と呼ぶ。ただし、明確な境界があるわけではなく、 $Q > 4\pi$  でブラッグ領域、 $Q < \pi$  でラマン・ナス領域とする見方もある。ブラッグ回折は簡単には Fig.12 (a) のように、音波の進行方向及び波面に平行な方向の多数の密度勾配からの回折光が干渉した結果として回折像が現れる強い相互作用の現象として理解される。このとき、入射光の波数ベクトル  $\mathbf{k}_i$ 、音場の波数ベクトル  $\mathbf{k}$ 、回折光の波数ベクトル  $\mathbf{k}_s$  の間には次の関係式が成り立つ。

$$\mathbf{k}_s = \mathbf{k}_i + \mathbf{k} \quad (5)$$

このとき、回折角  $\theta_B$  は次式を満足する。

$$k = 2k_i \sin(\theta_B / 2) \quad (6)$$

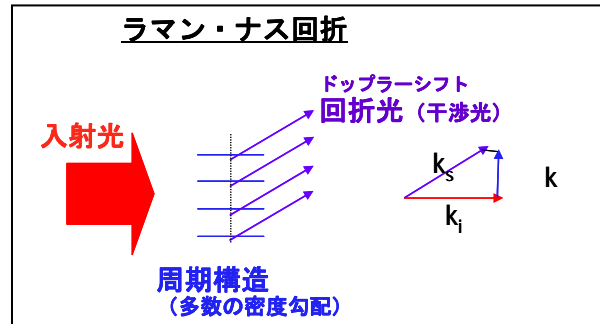
または、

$$\theta_B = 2 \sin^{-1}(k / 2k_i) = 2 \sin^{-1}(\lambda_i / 2\lambda) \quad (7)$$

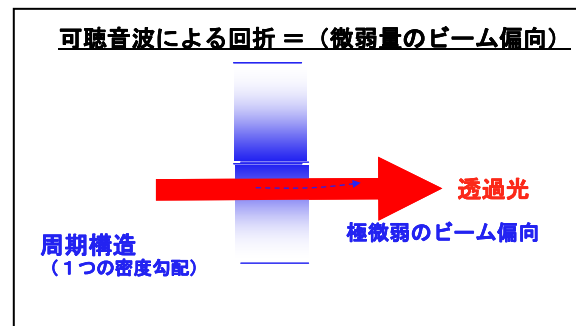
と表せる。式(6)は、回折角を測定することにより音波の波数又は波長を求めることに利用される。

また、ラマン・ナス回折は同図(b)に示すように、光学的に薄い周期構造で進行方向に多数存在する密度勾配からの回折光の干渉の結果得られた回折像として理解され

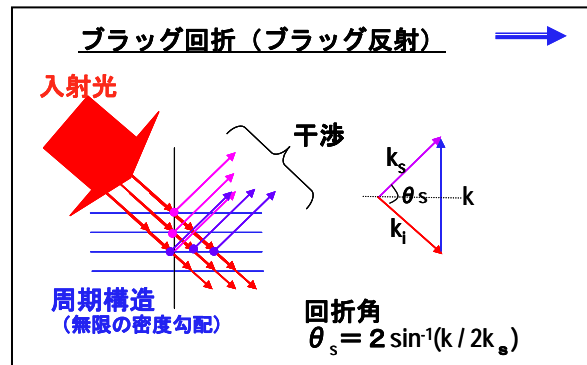
る。このとき、式(5)の条件は若干緩和され、Fig.11(b)に示すように音の波数ベクトルが同式を完全に満足しない場合でも回折光が得られる。



(a) Bragg diffraction



(b) Raman-Nath diffraction



(c) Diffraction by long-wavelength acoustic wave (Ultra weak beam deflection)

Fig.12 Comparison of three diffraction types.

ここで、光波マイクロホンのように可聴音を可視レーザで測定する場合を考える。Fig.10 のようにレーザビーム幅は音波長以下であるので、上記のような周期構造による回折の計算はそのまま適用できないが、それらの極限状態として形式的に試算してみる。例えば、 $\lambda_i = 638 \text{ nm}$ 、 $d = 100 \text{ mm}$ 、 $n_0 = 1$ 、 $\lambda = 34 \text{ mm}$  ( $f = 10 \text{ kHz}$ ) として概算すると  $Q \approx 3.5 \times 10^{-4} \ll 1$  となり、ラマン・ナ

ス回折の場合よりさらに回折パラメータQ値は小さくなる領域に入る。

次に、回折角について考察する。音波波長が長くなると回折角が小さくなるが、これらの回折光が観測されるためには透過光の外に出るくらいの回折角が最低必要である。上記の計算例で、これも形式的に式(7)により回折角を求めると  $\theta_B \approx 1.9 \times 10^{-5} [\text{rad}] = 1.1 \times 10^{-3} [^\circ]$  となり、可聴音では完全に透過ビーム内に入り込んだ状態となることが分かる。

なお、音波による光回折では、上記の周期構造の厚さを判定する回折パラメータQの他に、光位相変調の深さを表すパラメータとして、次のラマン・ナスパラメータ  $\nu$  が用いられる。

$$\nu = 2\pi \Delta n d / \lambda_i \quad (8)$$

ここで、 $\Delta n$  : 音波による密度変動、である。このラマン・ナスパラメータ  $\nu$  については、音場の幅、音圧、用いるレーザ波長が同一条件であれば同じ値になり、ラマン・ナス回折と光波マイクロホンが対象とする可聴音測定との間で大きい差はないことになる。したがって、ここではこのパラメータについてはこれ以上言及しないことにする。

最後に、光波マイクロホンによる音検出の様子を示す概略図を Fig.12(c)に示す。ブラッグ回折やラマン・ナス回折と比較すると、光波マイクロホンによる可聴音検出の場合の主な特徴として、①レーザビーム幅が音波の半波長より狭いこと、②回折光は1つの密度勾配から生じるもののみとなること、③入射光はその殆どが透過光として通過し、極微弱な量の光が回折光として生じてくる(音圧等の実験条件により異なるが、 $10^{-7}\%$ 以下となる)こと等が異なる点である。従って、これらの条件から④波長(又は波数)分解能が失われ、回折像のピーク点位置が周波数により変化しない状態となる。⑤これを逆に利用すると1個の光検出器を回折像の最大強度点の位置に置くことにより複合音が検出できる特性を持つことになる。

結局、これらの可聴音による光音相互作用の条件を有効に利用した方法が光波マイクロホンであるといえる。

## 6. まとめ

光波マイクロホン技術の基盤となる計測理論式は、純粋に数学的な数式展開により求められているが、そこで生じている光音相互作用や光干渉などの物理現象を直感的に理解するのは困難である。表面上見えなくなっている。本論文では、光ビームと波長の長い可聴音との相互作用に関する理論式とその背景にある物理現象について

考察した。得られた結果をまとめると、以下の通りとなる。

- (1) 光波マイクロホンでは、可聴音による光の位相変調の結果生じた微弱回折光と透過光を干渉させ、これを光検出器で検波することにより音を電気信号に変換している。
- (2) 微弱回折光と透過光を効果的に干渉させるため、レンズによる光学的フーリエ変換を用いている。
- (3) 光音相互作用により生じる微弱回折光は音波の密度勾配に起因するため、音波の半波長の密度勾配の領域にレーザ光の照射幅を合わせるときに信号強度が最も強くなる。また、可聴音の領域における周波数特性は、周波数に比例する形となる。
- (4) 従来扱われてきた超音波による光回折現象(ブラッグ回折やラマン・ナス回折など)と異なり、光波マイクロホンにおいてはレーザビーム幅が可聴音波の半波長以下となっているため空間領域におけるサンプリング定理が満足されず、回折像の最大強度点の位置は周波数が異なっても変化しない。したがって、回折像の最大点に光検出器を置けば任意の複合音が検出できる。

ここでは、光波マイクロホンの原理と物理像に関する定量的あるいは定性的な考察を行い音響技術者に本計測法を理解していただくための資料を提供したが、この技術の実用化を目指す場合、今後の最大の課題はSN比の改善(信号増大又はノイズ低減)である。これらについては別途報告の予定である。

## 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)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] 鈴木和拓・舟木英之・成瀬雄二郎:「MEMS技術応用による光回折型音響センサ」東芝レビュー, Vol. 60, No. 8, (2005).
- [3] コバテル(株)・(株)アコー:「光マイクロホン騒音計」日本音響学会誌, 64巻, 11号, pp. 686-689 (2008).
- [4] 中村健太郎:「光を用いた音波の検出」日本音響学会誌, 64巻, 11号, pp. 667-672 (2008).
- [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：「光マイクロホン」 特許第 3543101 号(2004).
- [8] 矢田貝豊彦：「光情報処理の基礎」 丸善(1998).
- [9] H. Weisen : “Imaging methods for the observation of plasma density fluctuations” Plasma Phys. Control. Fusion Vol.28, pp. 1147-1159 (1986).
- [10] 村田和美：「光学」サイエンス社(1979).
- [11] D.E.Evans, M.von Hellermann 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).
- [12] 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).
- [13] 小山次郎・西原浩：「光波電子工学」 コロナ社(1983).
- [14] 超音波便覧編集委員会編：「超音波便覧」 丸善(1999).
- [15] 高木堅志郎：「光と音波」 光学, Vol. 17, No. 9, pp. 477-485 (1988).
- [16] 井上直樹：「レーザーによる超音波計測とその応用」 レーザー研究, Vol. 19, No. 1, pp. 93-103 (1991).