

研究概要報告書

( 1 / 3 )

研究題目	光学屈折率の干渉計測による高周波音場の絶対値測定	報告書作成者	中村 健太郎
研究従事者	中村 健太郎		
研究目的	<p>従来、音場測定には振動板を有したマイクロホンが用いられてきた。しかし、有限の大きさを有するため、測定にはさまざまな制約がある。例えば、100 kHz 程度の空気中の高周波音では、マイクロホン感度の絶対値校正が困難になっている。また、校正されたマイクロホンをもってしても、マイクロホン自身による回折効果などのために正確な音場測定は容易ではない。また、流体音の発生部近傍でもマイクロホン自体が空気流を乱す問題がある。また、半値幅 10 度以下の鋭い指向性を得るには、2 kHz で直径 2m 程度の大きな開口面が必要になる。</p> <p>本研究では、<u>音波は空気の疎密変化であり、光学屈折率の変調も伴っていることに着目して、光学干渉計によって光路長変化を測定することで、マイクロホンのようなセンサを音場中にいっさい挿入することなく真の音場分布を可視化したり、音圧の絶対値を精密測定することをめざす。</u>これが実現すると、従来困難であった高周波音の正確な測定が可能になる。また、流体音の発生部位での音場測定ができるので、流体音の発生メカニズムの解明やひいてはその抑止に寄与する。</p> <p>次の 3 点を具体的な目的として、本研究を行った。</p> <p>1) <u>音圧と屈折率変化の関係を精密に求める</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・申請者はこの関係の概略を導いているが、温度・湿度・大気圧などの周囲環境変化の影響を加味したより精密な値を得る。</li> <li>・理論と実験でこの関係を求め、実用できるようにする。</li> </ul> <p>2) <u>極めて鋭い指向性を有した音波検出法の開発</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本手法によると、レーザ光の分布領域を広げるだけで、大きな受音開口面を得られるので、容易に超指向性を実現できる可能性がある。</li> <li>・このような大きな受音開口面を実現する方法を考案する。</li> <li>・計算で指向特性を予測する。</li> <li>・実際に指向特性を評価し、理論的に予想される値と比較する。</li> </ul> <p>3) <u>流体音の解析、高周波でのマイクロホン感度の校正などへの応用を検討する</u></p>		

研究内容

実際には、右図のように市販のレーザドップラ振動計 (LDV) を用いて、被測定音場越しに「振動しない」剛壁の振動を測定するような構成とする。こうすると、被測定音場による空気の疎密は光の屈折率変化を伴うので、光路長が変調され、あたかも剛壁が振動したように LDV で測定される。

この手法により 25kHz で呼吸振動する金属円環の内側およびピストン振動面の前面の音場測定を試み、音圧に対応した出力が得られることを確認した。

次に、LDV の出力と音圧の定量的な関係を検討した。その結果、音圧  $p$  は、

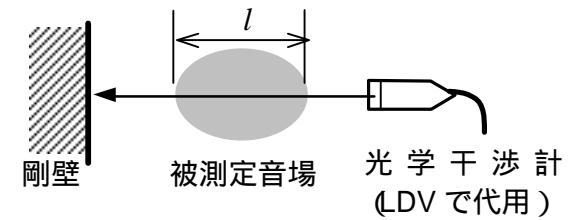
$$p \approx \frac{n}{n-1} \frac{c^2}{2fl} v_{LDV}$$

のように、LDV の読み  $v_{LDV}$  [m/s] で表せることを導いた。

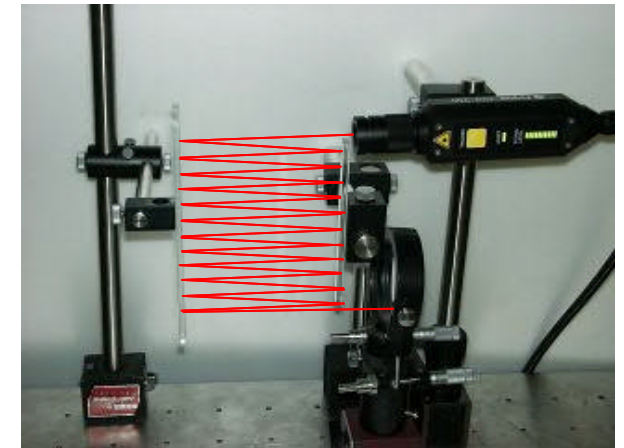
この式で測定した値を校正されたコンデンサマイクロホンと比較した結果、誤差は 20% 以下であった。

さらに、右写真のように 2 本の細長いミラーを互いに平行に向き合うように配置し、その間にジグザグにレーザ光を往復させ、これを測定光路とした。こうすることで、被測定音場の波長に比べて大きな受音開口面を実現し、この面に垂直方向に鋭い指向特性を得た。開口面の幅、高さを被測定音波の波長の約 10 倍とすることで、半値全幅 10 度以下の鋭いペンシルビームを実現した。実験は 25kHz の空中超音波と 2kHz の可聴音について行ったが、いずれも理論的に予測した通りの結果が得られている。このような鋭き指向特性はふつう使われている指向性マイクロホンでは実現できていない。

また、本手法で検出できる最小音圧値はレーザドップラ振動計の感度ないし分解能によって決まるが、固体伝搬音によるミラーの揺れなどの影響を排除する必要があることを示した。



測定系の構成



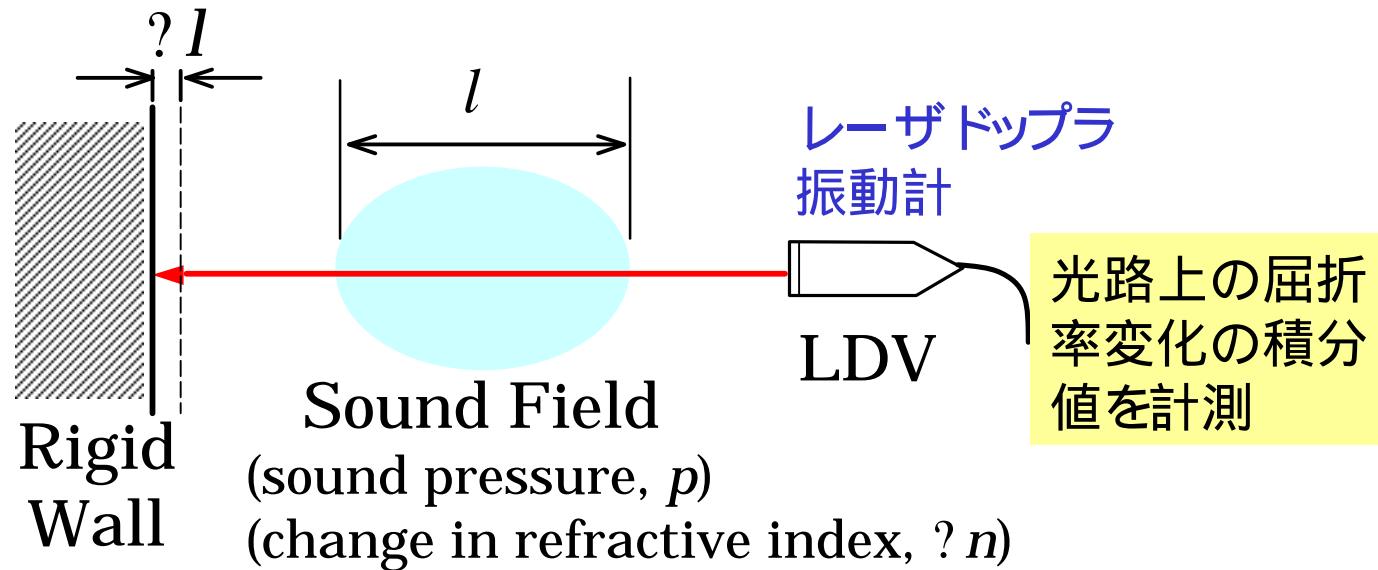
研究概要報告書

( 3 / 3 )

<p>研究のポイント</p>	<p>音圧を測定するのにマイクロホンを使用せず、空気の疎密変化を光学屈折率の干渉測定により直接検出している点が本研究の大きな特徴である。測定に光を用いるので、被測定音場を乱すことがない。</p> <p>実際の測定には、特に光学測定系を構成することなく、市販のレーザドップラ振動計が流用できることを指摘し、特別な技術を必要とせず前記の測定が可能であることを示した。</p> <p>また、音圧と光学干渉計の出力との定量的な関係を明らかにし、レーザ光に沿った音圧の平均値の絶対計測を可能ならしめた。</p> <p>さらに、流体音の解析やマイクロホンの高周波での校正、あるいは超指向性の発現など、本手法のさまざまな応用法を示唆した。そのうちで、超指向性を得るための機器構成を考案し、実際に半値全幅 10度以下という極めて鋭い指向特性を実現した。</p>
<p>研究結果</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 提案する計測手法が、市販のレーザドップラ振動計で行えることを実験で示した。</li> <li>2. レーザ光に沿った音圧の平均値とレーザドップラ振動計の出力との定量的な関係を理論的に導いた。</li> <li>3. この理論値を 400Hz から 25kHz の範囲で実測値と比較したところ、誤差は 20% 以下であった。</li> <li>4. 走査型レーザドップラ振動計を用いて、円環内の定在波およびピストン振動面からの放射音場の 2種類の空中超音波音場を可視化した。</li> <li>5. 2つの互いに平行なミラー間にジグザグにレーザ光を往復させて、音波検出開口面を構成する方法を考案した。</li> <li>6. この構成により 1.5m 四方程度の開口面を試作し、2kHz において半値全幅 10 度以下の指向性を実現した。</li> </ol>
<p>今後の課題</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本手法はレーザ光路上の音圧の積分値を与えるので、3次元音場分布の2次元投影像しか得られない。そこで、計算機トモグラフィ(CT)の手法を援用して、3次元分布を再構成することを検討する。</li> <li>2. 流体音の発生部付近など、マイクロホンを挿入すると被測定音場自体が乱れてしまうような測定対象に応用し、従来手法では得られなかったような知見を得る。</li> <li>3. 従来型のコンデンサマイクロホンによって、100kHz 以上の高周波音場を測定する際の絶対値校正に本手法を応用することを考える。</li> <li>4. そのために、音圧の絶対値の測定精度の向上方法について検討する。</li> </ol>

# 測定原理 何を測定するか？

空気の屈折率変化を測定する



屈折率が  $?n$  変化すると

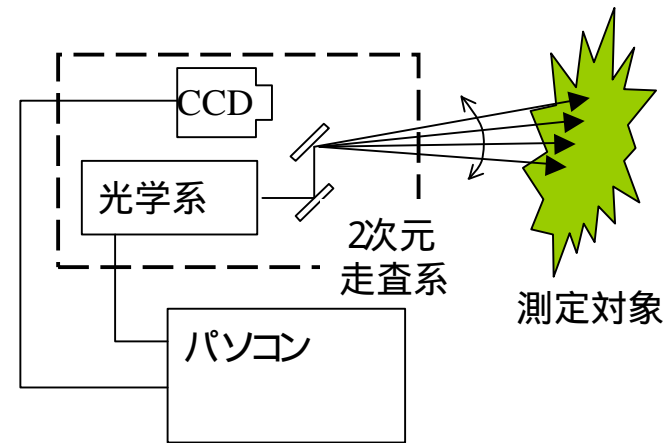
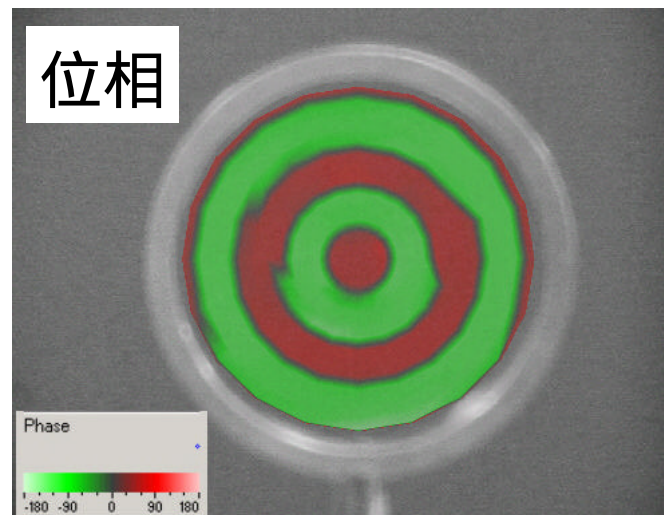
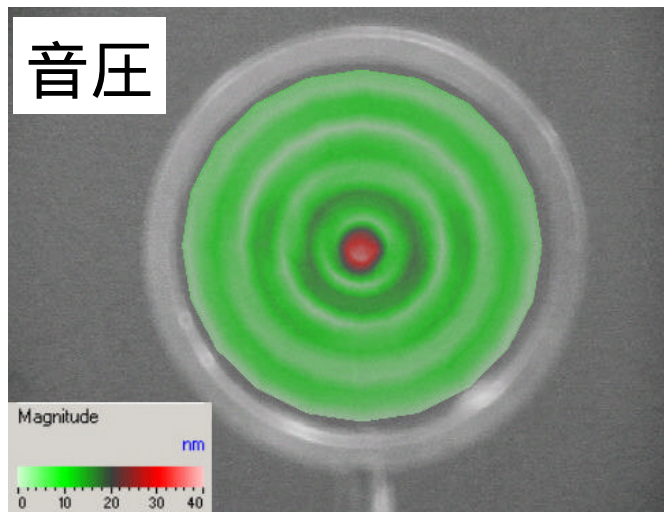
壁が  $?l$  変位したように観測される。

光路差変化  $?n \cdot l$   $?n \cdot l$

屈折率が変化したら

壁が変位したら

# スキャンニング LDVによる 2次元分布可視化 (1)円環内定在波



スキャンニング LDV  
PI-Polytech PSV300

# 絶対感度の検討 (1) 音圧と屈折率変化の関係

空気中の  
音圧と屈折率変化

$$\frac{\Delta V}{V} \propto \frac{\Delta n}{n - 1}$$

空気の屈折率 = 1.0002765

体積変化率  $\Delta V/V$  と屈折率変化  $\Delta n$   
が比例すると仮定

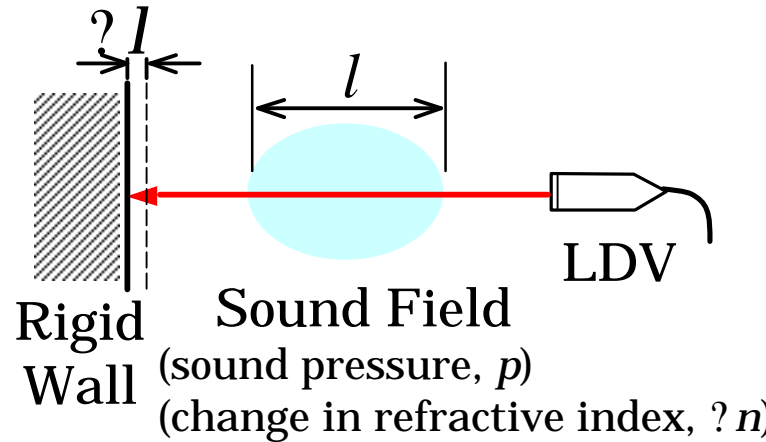
$$\frac{p}{P_0} \propto \frac{\Delta V}{V}, \quad P_0 \propto c^2$$

- $P_0$ , 大気圧
- $\gamma$ , 比熱比
- $\rho$ , 密度
- $c$ , 音速
- $f$ , 周波数

$$\Delta n \propto \frac{(n - 1)p}{c^2} \quad (\text{屈折率変化})$$

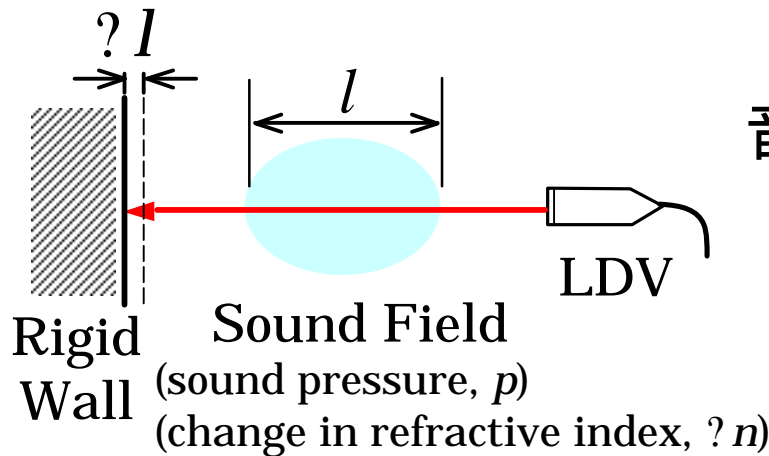
比較：水中 (Eykmannの式)

$$\Delta n \propto \frac{(n^2 - 1.4n - 0.4)(n - 1)p}{(n^2 - 0.8n - 1)c^2} = 1.05$$



## 絶対感度の検討 (2) 音圧とLDVの読み

LDVの出力信号 (速度信号) から音圧値への換算



音圧

$$p ? \frac{n}{n ? 1} \frac{c^2 ?}{2 ? f l} v_{LDV}$$

LDVの読み (速度 m/s)

空気の屈折率 = 1.0002765 (1気圧、15 °C、@ 632.8 nm )

音速 = 340.6 m/s、密度 = 1.226 kg/m<sup>3</sup>

$$p[\text{Pa}] ? 8.19 ? 10^4 ? \frac{v_{LDV}[\text{mm} / \text{s}]}{f[\text{kHz}] ? l[\text{mm}]}$$

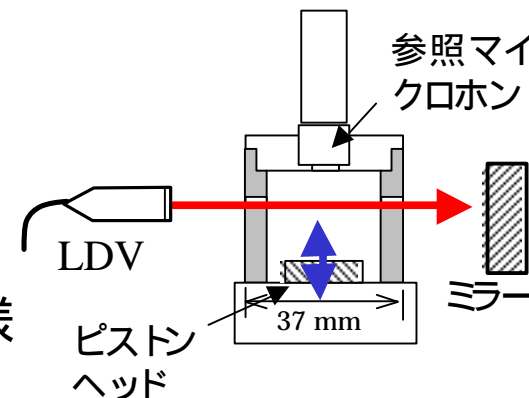
温度係数 = +0.35%/°C

# 実測による絶対感度の検証 : 測定系

## 250 Hz ピストンホン

予めピストンホンで校正した参照マイクロホンとの比較

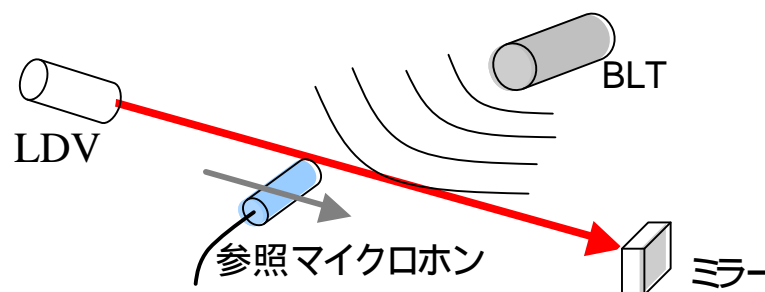
キャビティうちのりを作用長とする。音圧分布一様



## 15.7 kHz 放射音場

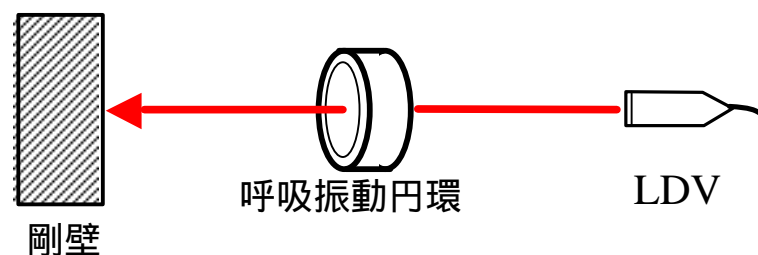
BLTからの放射音場を測定

参照マイクロホンを走査した平均音圧と比較



## 27.2 kHz 定在波音場

円環振動速度からFEMで計算した音圧と比較。音圧分布考慮





# 実測による絶対感度の検証 : 結果

本手法の誤差  $p[\text{Pa}] \approx 8.19 \times 10^4 \approx \frac{v_{\text{LDV}}[\text{mm/s}]}{f[\text{kHz}] \cdot l[\text{mm}]}$

250 Hz	+17%
--------	------

15.7 kHz	+12%
----------	------

27.2 kHz	+20%
----------	------

\* 温度補正済み

## 考えられる誤差要因

- 音圧と屈折率変化の関係 (湿度の影響 = 音速、屈折率)
- 参照音圧の誤差 (FEM、作用長の見積もりなど)
- 光学系への振動の励振