

## 音・振動の分布を光で測る

中村 健太郎

音のない環境は無響室などの特殊な設備のもと以外では存在しえない。手で目を覆うと光は入ってこないが、耳を手で塞いでも、大きさはかなり低下するものの、完全に無音にはならない。このように、われわれはつねに音に囲まれてくらししており、さまざまな環境条件の中でも音の問題を避けることはできないし、その重要度は近年ますます高くなっているといえよう。今日では、家電製品から高速鉄道まで、その「静粛さ」が製品価値を左右するようにさえなっている。騒音問題の出力は人間の感覚量であるため、騒音対策は多方面から検討されるべきものであるが<sup>1-3)</sup>、物理量としての音を、空間分布、その時間変化を含めて正確に測定することがその第一歩である。一方、物体の振動が音源となる場合が多いこと、空気中の音が壁や柱など固体の振動に変換されて伝搬し、他の場所で再放射する場合も現実によくみられることなどから、空気中の音のみでなく、固体振動の測定技術も騒音対策にとって必要である。

本稿では、振動や音の空間分布を光を用いて測定することについて述べる。振動や音の測定では、加速度ピックアップとマイクロホンがそれぞれ代表的なセンサー素子であり、膨大な実用実績を有している。しかし、非接触測定、きわめて多数点の同時測定、厳しい電磁環境下での測定などの要求が生じる場合もあり、このようなときには、光学的な手法、あるいは光ファイバーの利用は有力な手段となる。とりわけ振動測定では、光学的な方法も古くから利用されているわけであるが、最近、使い勝手のよいシステムが市販されるようになったので、その一端を紹介する。一方、空中の音の測定にはこれまで光はほとんど使われていなかったが、近年、2, 3の試みがあるので、それらにつ

いて述べる。

### 1. 振動分布の測定

光を用いた振動の測定方法として、ホログラフィー干渉法やスペックル干渉法<sup>4)</sup>が実際に使われている。これらは、振動の2次元分布データを1回の計測で取得可能な有効な方法であるが、大型の光学系を必要とする場合が多く、実用上の適用場所や対象が限られているのが実状である。あるいは、実際に使用しようとする者の多くは光学の非専門家であり、利用を躊躇してしまう場合が見受けられる。

一方、測定対象からの反射光のドップラー効果を用いるレーザー・ドップラー法は、ヘテロダイン光学系を用いることで、高感度、広ダイナミックレンジを有する振動計となる。この方式も従来は定盤上に光学系を展開して自作するしかなかったが、近年、光学系を小型ヘッド内に組み込んだ高性能で使い勝手のよい市販品がいくつかのメーカーから入手できるようになった。その背景には、自動車その他機械の騒音対策開発などに加えて、パソコン用ハードディスク・ヘッドの挙動解析の需要があるようである。レーザー・ドップラー振動計は、基本的に一点の振動速度を測定するものであるが、機械的な2次元走査系と組み合わせたシステムも売られている。

図1にヘテロダイン方式のレーザー・ドップラー振動計の一般的な構成を示す。この基本構成に目新しい点はないが、広い速度域での直線性や広周波数帯域を有するFM復調回路の開発、高感度化のための専用光学部品の設計などによって必要な性能を実現している。特別な防護措置なく多くの場合に利用できるよう、出射光強度を1 mW以下に抑えてClass IIの安全基準に適合できる努力を行っているものもある。そのようなものでも、30 m程度離れた

東京工業大学精密工学研究所 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

E-mail: knakamur@pi.titech.ac.jp

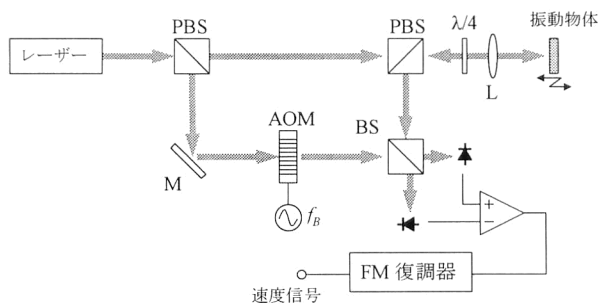


図1 レーザー・ドップラー振動計の標準的構成。

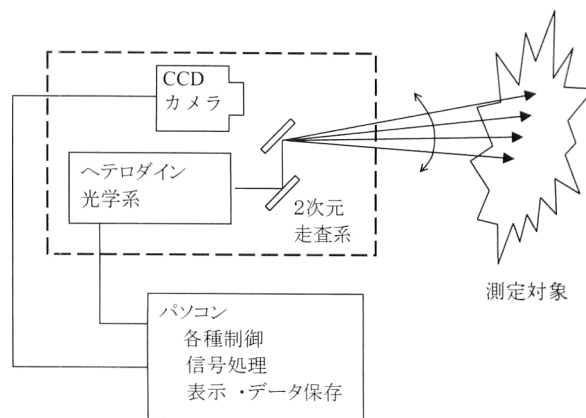


図3 走査型レーザー・ドップラー振動計の構成。

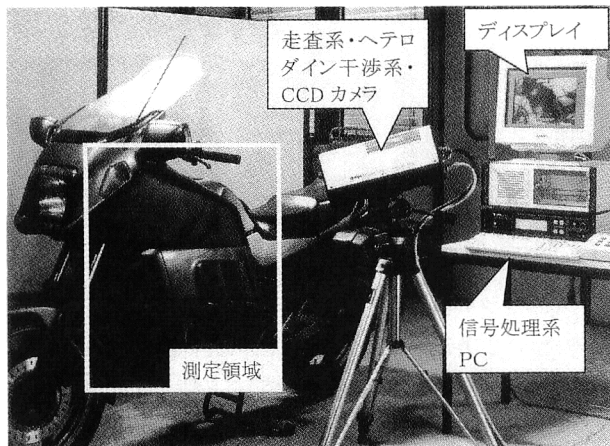


図2 2次元走査型レーザー・ドップラー振動計の例 (ピーアイ・ポリテック(株)提供)。

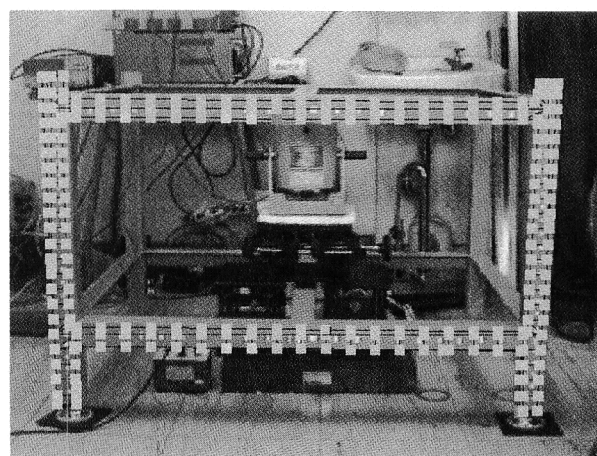


図4 ディスプレイに表示された測定対象(定盤台)と測定点の設定の様子。

場所の比較的粗い物体の振動測定が可能となっている。多くの市販品では40~80 MHzのシフト周波数が使われている。測定可能速度範囲が数 $\mu\text{m/s}$ ~数 $\text{m/s}$ 、上限周波数が数百kHzというのが平均的な製品の仕様であるが、0.2 $\mu\text{m/s}$ 程度の低速度域の測定が可能なもの、10 MHz以上の高周波数に対応できるもの、数十 $\mu\text{m}$ の焦点スポット径とし、顕微鏡と組み合わせて微小領域の振動観測を実現するものなどがある。また、光ファイバーを用いたプローブにより取り回しを容易にした構成も多い。いずれにしても、焦点調整程度の簡単な操作で測定が可能になっている。図2は、レーザー光を機械的に2次元走査して振動分布を自動的に可視化するシステムの例である。図3のように、ヘテロダイン光学系と走査系に加えてCCDカメラを搭載した光学ヘッドを有し、その大きさは三脚に固定できる程度である。CCDカメラで得られた測定対象の画像に重ねて測定結果がパソコン・ディスプレイ上に表示されるようになっており、測定結果を感覚的に把握できる。なお、この画面上で測定点の場所や測定条件の設定も容易に行えるようなマン・マシン・インタフェースが構築されている。例として、定盤の支持台の振動分布測定を行ったと

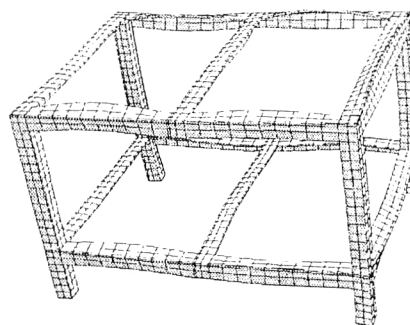


図5 定盤台の振動モードの測定例(555 Hz)。

きの測定点を表示したものを図4に示す。この測定で得られるのは、測定対象の一方から見える場所の振動データのみであるが、筆者らが開発中の有限要素法を援用した振動分布再構成アルゴリズムを用いると<sup>5)</sup>、このような振動に関する部分的な情報と振動体の構造データから、図5のように全体の振動の様子を推定することができる。

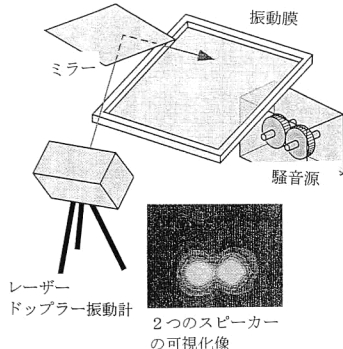


図6 振動膜を用いた音場測定法の構成と測定例 (2つの近接したスピーカー).

## 2. 音場分布の測定

### 2.1 非接触音場測定

音場測定にはマイクロホンが一般的に使われているわけだが、高周波ではマイクロホン自体が音場を乱すこと、多点測定のためのアレイ化にも実用上の本数の限界があること、高温下、強力な電磁ノイズの存在などの過酷な環境への対応のような種々の理由のために、音場中に何も挿入しない測定法に対する要求がある。ところで、音波は疎密波であり、その疎密に応じて光の屈折率も変化する。このような、音波による空間的な屈折率変化による光の屈折や回折を利用した音圧測定は水中の超音波音場についてはよく行われてきている<sup>6)</sup>。空気中の音場についてはあまり行われていないが、音場による光の屈折の利用について基礎的な検討がなされている<sup>7)</sup>。計算機トモグラフィの手法と組み合わせれば、3次元的な音場分布を可視化できる可能性もある。一方、音場を記述する基本量は音圧と粒子速度であるが、多くの音場センサーや測定手法は音圧を計測するものであり、粒子速度は音圧の空間微分から求められることが多かった。筆者らは、レーザー・ドップラー振動計によって空気の粒子速度を直接測定することを試みている<sup>8)</sup>。

### 2.2 振動膜を用いた音場測定

図6のように、音源から比較的近い距離に柔らかい膜を配置し、音場によるこの膜の振動分布を走査型レーザー・ドップラー振動計で測定することで音場分布を可視化する手法が提案されている<sup>9-11)</sup>。図中下では、近接した2つのスピーカーについて測定を行った結果を示してあるが、音の放射の様子がよく可視化されていることがわかる。使用する膜の音の透過率や振動特性と測定結果との関係など、この手法によってどのような物理量が測定されるのかといったことを含めた検討が行われている。多素子のマイクロホンアレイを利用する従来の方式に比べて、測定系の設置自由度が高い、多数の信号線を引き回す必要がないなどの

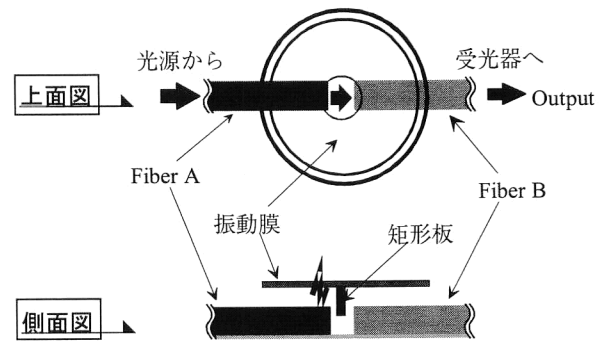


図7 強度変調型光ファイバーマイクロホン素子の構造。

利点が考えられる。

### 2.3 光ファイバーマイクロホンとそのアレイ化

音場分布を測定するためには、多数のマイクロホンをアレイ化するのが最も一般的な方法であり、コンデンサー型などの従来型マイクロホンをを用いた測定が行われている。しかし、素子数が増大するに従い、各素子マイクロホンからの同軸ケーブルの取り回しや、信号の切り替えなど、実際上の障害が大きくなっているのが実状であり、より使いやすいシステムが望まれている。また、素子数が多くなると電磁ノイズ対策も難しくなる。これに対し、音圧センシング、信号の伝送および切り替えをすべて光学的方法ないし光ファイバーによって行うことをめざして筆者の研究グループで開発しているマイクロホンアレイを紹介する<sup>12,13)</sup>。

音圧を光強度変化に変換する光マイクロホンの構造を図7に示す。直径16mmの高分子薄膜の中央に微小な矩形板を垂直に取り付けてある。この矩形板は近接して対向した2本の光ファイバーの間に挿入されている。音圧による高分子膜の変形によって矩形板が垂直方向に変位し、2本の光ファイバー間を通過する光量に変調される。コア径50 $\mu\text{m}$ の分布屈折率型マルチモードファイバーを用いた場合で、振動板の変位1 $\mu\text{m}$ に対して10%近い光量変化を得ており、注入光量や受光系の利得にもよるが、コンデンサー型やダイナミック型などの従来型マイクロホンと同程度の音圧感度が実現できている。一般に、このような方式では、振動膜の機械共振周波数程度までは平坦な周波数特性が得られるが、試作機では2kHzまで感度はほぼ一様であった。音圧による振動膜の変位で光量を変調する光ファイバー音圧センサーは、水中音響用としてさまざまな方式がすでに考案されている。すなわち、マイクロバンド損失<sup>14)</sup>を利用したものや、グレーティングを活用したり<sup>15)</sup>、エバネセント光を用いる方式<sup>16)</sup>などである。筆者らのマイクロホンアレイは空中用であり、周波数特性を高域まで確保する必要から振動板へ付加する質量ができるだ

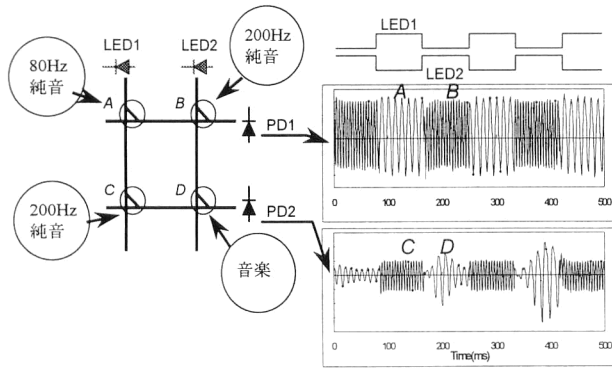


図8 光ファイバーマイクロホンアレイの基本構成と信号分離の方法.



図10 64素子光ファイバーマイクロホンアレイの外観.

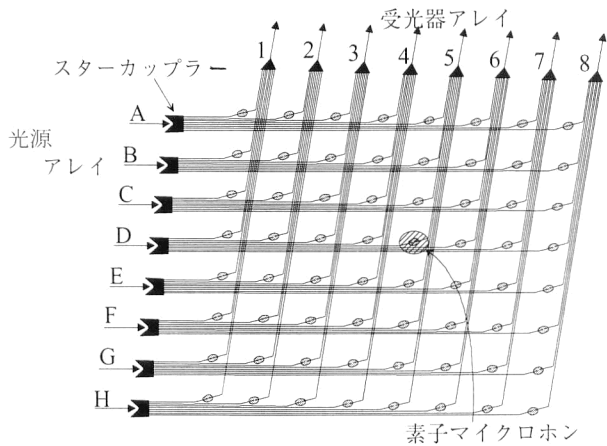


図9 試作した64素子光ファイバーマイクロホンアレイ.

け小さいこと、多素子を製作するために可能な限り簡素な構造であることなどを念頭に、既述の構成法を選択した。

次に、アレイ化の手法について、2次元の最小構成である $2 \times 2$ 素子アレイで説明する。図8のように、縦、横に2本ずつの光ファイバーを用い、2つの光源(LED1, LED2)と2つの受光素子(PD1, PD2)がある。光ファイバーの各交点に、2本の光ファイバーを架橋するように素子マイクロホンを配置する。これにより、音圧によって2本の光ファイバー間の光結合量に変調されることになる。LED1を点灯すれば、素子Aの信号がPD1で、素子Cの信号がPD2で検出される。LED2を点灯すれば、素子Bと素子Dの信号がそれぞれPD1, PD2で検出される。図中には、各素子を音響的に隔離して、それぞれに異なる音を与えた場合の信号分離の様子を示している。このように、光源の切り替えによって、マトリクス的な信号読み出しが可能である。図8の例では、光源の切り替えの周期が音の周期よりも長いですが、光源を高速に切り替えることで、各素子での瞬時音圧を順次サンプリングできると考えられる。すなわち、この方式は、高速な光源切り替えと

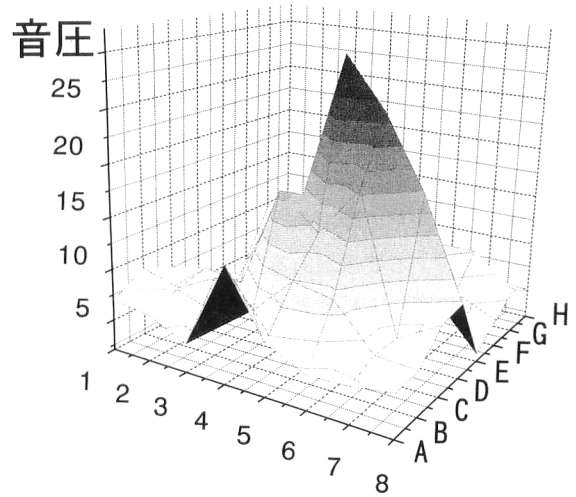


図11 スピーカーの音場の測定例(1kHz).

光ファイバーでマトリクス接続されたセンサー網自体でサンプリングと信号多重を行うもので、受光器からの信号を処理する回路の簡素化が可能であると思われる。図9は64素子の試作機の構成、図10はその外観である。なお、この試作機では16個の $1 \times 8$ スターカップラーを用いて、各素子への光の供給と各素子からの光の集合を行っている。素子間隔は約100mmである。このアレイを1kHzバースト波で駆動されたスピーカーの近傍(距離240mm)に置いたときに得られた2次元音圧分布の測定結果を図11に示す。アレイからの信号強度が強い場所と実際のスピーカーの場所は一致していた。

今後は、素子自体の性能の向上、特性ばらつき抑制に加えて、光源を高速切り替える場合の信号処理系の開発を行って、実用的なシステムを構築する計画である。

本稿では、音に関する環境の測定について、最近使いやすくなったレーザー・ドップラー振動計と、音場分布を光学的に測定する2,3の試みについて解説した。

これまでの騒音対策は、音源を探索してその大きさを小さくすること、伝搬経路を遮断することなどが中心であり、今後もこれが基本であることは変わらないであろう。このことを効率的に行うために、振動や音の分布を高速に可視化できる使いやすい装置がのぞまれる。一方で、二次的な音源を使って音場を積極的に制御する能動音場制御の技術も進歩してきたが、そこでも空間的に分布する振動や音を高速にモニターする手段が不可欠である。従来型マイクロホンは音場センサーとして成熟しており、その地位は当分ゆるぎないものと思われるが、非接触や耐電磁ノイズ性能など光を用いることの特長な優位性が生じる用途で光学的手法は今後もますます活用されることと考えられる。さらに、きわめて多数点の高速測定には光学的手法ないし光ファイバー方式の利点がクローズアップされると思われる。大型の定盤から解放されたシステムの実現やセンサー専用光部品の開発、光通信産業の進展によってもたらされるであろう低価格な光コンポーネントの有効な利用を考えることが必要となろう。

## 文 献

- 1) 鈴木昭次, 中村光勇, 山下 剛, 麦倉喬次, 古澤隆彦, 田中英晴, 月居和英, 佐々木實, 難波精一郎, 沖山文敏, 石井皓, 堀江裕一, 大野嘉章: “小特集: 快適な音環境”, 日本音響学会誌, **46** (1990) 757-784.
- 2) 桑野園子: “環境騒音の評価に関する最近の動向”, 日本音響学会誌, **52** (1996) 891-895.
- 3) 梅澤清彦監修: 静粛工学 (開発社, 東京, 1995) pp. 1-7.
- 4) 例えば, 光応用計測の基礎 (計測自動制御学会, 東京, 1983) pp. 188-197.
- 5) Y. Koike, C. Aramaki, K. Nakamura and S. Ueha: “FEM aided structural intensity measurement method and its application to thick bodies,” *Proc. Inter-Noise 98* (Christchurch, New Zealand, 1998) pp. 94-99.
- 6) 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦: 超音波技術便覧 (日刊工業新聞社, 東京, 1978) pp. 174-193.
- 7) 園田義人, 芦川直子: “1次元レーザビーム伝搬型光マイクロホンによる音波検出”, 平成8年春季日音講論集, 1-6-25 (1996) pp. 537-538.
- 8) 澤田 徹, 小池俊之, 小池義和, 中村健太郎, 上羽貞行: “トレーサを用いたレーザ・ドップラ法による粒子速度測定 of 検討”, 平成11年秋季日音講論集, 1-7-11 (1999) pp. 1183-1184.
- 9) H. Houjoh, S. Ohshima and K. Umezawa: “A new 2-D acoustic field measurement method with the use of laser Doppler vibrometry applied to a thin film placed close to a noise source,” *Proc. Inter-Noise 98* (Christchurch, New Zealand, 1998) p. 158.
- 10) 大嶋俊一, 山田牧人, 倉田雅友, 北條春夫: “音源近傍に置いた膜の非接触振動分布測定による音場の可視化法 (膜の支持方法の検討)”, 日本機械学会講演論文集 Vol. B (1999) pp. 685-688.
- 11) 大嶋俊一, 倉田雅友, 北條春夫, 梅澤清彦: “音源近傍に置いた膜の非接触振動分布測定による音場の可視化法—繊維状膜を用いた計測可能性について—”, 平成10年秋季日音講論集 (1998) pp. 751-752.
- 12) K. Nakamura and K. Fukaya: “Optical fiber coupler array for multi-point sound field measurements,” *Opt. Rev.*, **4** (1997) 65-68.
- 13) K. Nakamura and M. Yamanouchi: “A 64-element optical fiber microphone array for sound field imaging,” *Proc. Inter-Noise 98* (1998) p. 238-241.
- 14) J. N. Fields and J. H. Cole: “Fiber microbend acoustic sensor,” *Appl. Opt.*, **19** (1980) 3265-3267.
- 15) W. B. Spillman, Jr. and D. H. McMahon: “Schlieren multimode fiber-optic hydrophone,” *Appl. Phys. Lett.*, **37** (1980) 145-147.
- 16) W. B. Spillman, Jr. and D. H. McMahon: “Frustrated-total-internal-reflection multimode fiber-optic hydrophone,” *Appl. Opt.*, **19** (1980) 113-117.

(1999年9月3日受理)