

光を使って音を録る ～光学的音響測定とその信号処理～

矢田部 浩平^{1,a)} 石川 憲治¹ 池田 雄介¹ 及川 靖広^{1,b)}

概要：音は空気の疎密変化であり、疎密によって媒質の屈折率も変化するので、光を用いて屈折率を計測することで音を録ることができる。これは、マイクロホンの特性や音場への干渉が影響することのない非破壊非接触な計測を可能にし、また遠方から音情報を取得可能であるという利点も有するが、一方で、計測された信号の SN 比が悪いという課題がある。これに対し、筆者らは物理モデルを用いた信号処理を提案しており、SN 比の改善に取り組んでいる。本稿では、様々な光学的音響測定手法を概説した後、筆者らが提案する信号処理と、今後期待される応用について述べる。

1. はじめに

近年、アレイ信号処理や立体音響など電気音響分野を中心に、音の空間的な情報を利用した研究が盛んに行われている。複数のマイクロホンを用いることで、単に時間変化する情報としてのみでなく、位置に関する情報も同時に取得することができ、位置と時間の関数として音を扱うことが可能となる。観測点数が多いほど空間に関する情報が増えるので、その後の処理を考えれば、なるべく多くの点で広い領域を取音できることが好ましい。しかし、マイクロホン本数を増やしてアレイ規模を大きくするほど測定機器の設置や配線、チャンネル間同期などにかかる手間が膨大になる。また、マイクロホンはそれ自身が振動板の固有振動などに起因する音響特性を有しており、さらに音場内にモノとして実体が存在することで音波の挙動を変化させてしまうので、純粋に音の情報のみを取得することは容易ではない。

一方筆者らは、光を用いて遠方から非接触に広範囲の音情報を収録する研究を行っている [1–16]。音は空気の疎密変化なので、音によって空気の屈折率が変調される。したがって、音場を通過した光を用いてその屈折率の変化を検出することで、音情報を得ることが可能である。しかし、音波は大気圧に比べて微弱な圧力変動であり、その微弱な変動が光に与える僅かな影響を観測することになるので、光によって SN 比の良い音響測定を行うには多くの困難が伴う。また音による屈折率変化よりも、熱流体など音以外

の物理現象による変化の方が遥かに大きく、それらもノイズとして混入してしまう。そこで、音の物理モデルを用いた信号処理を提案し、SN 比の悪い測定データから元音場を復元することを試みている [14–16]。本稿では、これまで提案されている様々な光学的音響測定手法を概説した後、筆者らの提案する信号処理手法と、今後期待される応用について述べる。

2. 光を用いた音響測定

光は電磁波であり、古典的には Maxwell 方程式によってモデル化することができる。本稿では空気中を伝搬する光を考えるので、電荷や電流の存在しない非磁性な媒質とする。すると、電場に関する二階のベクトル偏微分方程式

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 (\epsilon \mathbf{E})}{\partial t^2} + \nabla (\mathbf{E} \cdot \nabla (\ln \epsilon)) = 0 \quad (1)$$

を導出することができる。ただし、 $\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, t) \in \mathbb{R}^3$ 、 $c \approx 3 \times 10^8$ は真空中の光速、 $\epsilon = \epsilon(x, t)$ は空気の比誘電率、 $(x, t) \in \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}_+$ である。

ここで、音に起因する比誘電率の変化について考える。音による空気の密度変化を断熱変化と捉え、大気圧における空気の圧力と密度を p_0 、 ρ_0 、音による変動分を p 、 ρ とすると、それらの関係は比熱比 γ を用いて

$$\frac{p_0 + p}{p_0} = \left(\frac{\rho_0 + \rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (2)$$

によって記述される。一方、媒質の密度 ρ と屈折率 n の関係を最も単純なモデルである Gladstone–Dale の関係式

$$n = C(\rho_0 + \rho) + 1 \quad (3)$$

¹ 早稲田大学
Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169–8555, Japan

a) k.yatabe@asagi.waseda.jp

b) yoikawa@waseda.jp

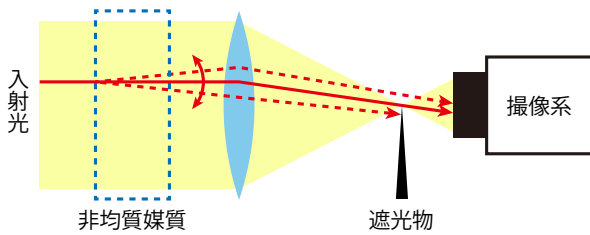


図 1 典型的なシュリーレン法の模式図。図の左側から測定用の光が入射されている。非均質な媒質を通過した光が屈折し伝搬経路が変化することで、レンズの焦点位置に置かれたナイフエッジと呼ばれる遮光物に遮られる光量に変化し、媒質の屈折率に応じたパターンが撮像面に明暗像として観測される。



図 2 レーザドプラ振動計 (LDV) による振動速度計測。LDV から放射されたレーザー光が振動体に反射され LDV 内に戻るとき、振動体の変位に応じて光路長が変化する。光の位相は光路長に依存するので、反射して返ってきた光の位相を復調することで振動体のレーザー経路方向の振動速度を得ることができる。

によって考えると *1, 比誘電率と屈折率の関係より,

$$\varepsilon(x, t) = n^2 = \left[(n_0 - 1) \left(1 + \frac{p(x, t)}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} + 1 \right]^2 \quad (4)$$

となる。これを式 (1) に代入して時間微分および空間微分を計算することで、音による影響を考慮した光の伝搬に関する非線形ベクトル波動方程式が得られる。

上述の方程式を解くことで、音場内を通過する光の挙動を把握することができるが、それには多大な困難が伴う。例えば p/p_0 は $10^{-6} \sim 10^{-10}$ 程度なので、 ε や E は少なくとも 10 桁以上の精度で計算されるべきである。ただし、光の波長は音に比べて遥かに短いので、非常に細かく離散化しなければならない。また、桁落ちや丸め誤差の影響も考慮すると、倍精度浮動小数点数では十分な精度で数値的な解析が行えるとは言いがたい。このように直接的な解析は難しいので、現存する光学的音響測定文献ではそれぞれの手法に応じて単純化したモデルで理論的な解釈を与えている。それらについて次節以降にいくつかの例を挙げる。

2.1 シュリーレン効果

透明な媒質の密度差を光学的に観測する手法として、18 世紀に発明されたシュリーレン法が知られている [17]。空気の屈折率は水などに比べて小さいので、空気中の音響関連事象としては密度差の大きい超音波や衝撃波を対象とした文献が多いが [18, 19], 可聴音に対する結果も報告されている [13, 20, 21]。

図 1 に典型的なシュリーレン法の測定系を示す。空中を伝搬してきた光が非均質媒質中に入射すると、媒質の屈折率勾配に応じて屈折する。シュリーレン法の測定系では媒質を通過した光をレンズで集光し *2, その焦点にナイフエッジと呼ばれる鋭利な遮光物を置く。屈折した光はナイ

フエッジ方向に曲がれば遮光され、反対に曲がれば遮光を逃れるので、媒質の屈折率勾配に従った明暗像を観測することができる。

観測された像の性質は、ナイフエッジ位置での光線の変動や撮像素子での明暗の差によって決まる *3。一般的にシュリーレン法では、光の経路を幾何学的に捉え、媒質の屈折率が光の経路方向に均一であると仮定することで、それらの考察を行う。測定対象の場に入射した光と通過した光の角度の差、すなわち屈折角を

$$\alpha_i = C \frac{\partial n(x, t)}{\partial x_i} \quad (5)$$

のように屈折率勾配に比例する関数として扱えば *4, レンズの焦点距離およびナイフエッジ位置による比例定数を通じて、撮像面での像のコントラストを屈折率勾配と結びつけることができる。観測対象を音とした場合は、式 (4) のような形式で屈折率を表すことができるので、シュリーレン法によって音圧勾配に関連した情報を得ることができる。

2.2 レーザドプラ振動計

レーザドプラ振動計 (LDV: laser Doppler vibrometer) は、レーザを振動体に照射し、反射光の Doppler シフトを参照光との干渉などで復調することで、振動体の振動速度を計測する測定機器である [22, 23]。図 2 に LDV を用いた振動計測の模式図を示す。反射体に照射したレーザー光の位相は、レーザ本体から物体までの距離に依存する。振動体にレーザを当てると、その振動に応じて光路長が変化し、したがって光の位相が変調されるので、それを位相同期回路などで復調することでレーザー経路方向の瞬時振動速度を得ることができる。

LDV は物体を対象とした振動計だが、振動していない壁などを反射体として選ぶことにより、レーザー経路上の空気の疎密変化を検出することができる [1-10, 24-30]。LDV

*1 2 章で扱う数式には様々な物理定数が出てくるが、その全てを厳密に記述すると表記が煩雑になり可読性が損なわれる可能性があるため、本稿では適宜物理定数をまとめて C と略記することにす。また、以降 p_0 のように下添字で 0 を付けた変数については、対応する変数の時間変化しない成分、すなわち直流成分とする。

*2 シュリーレン法には様々な系が存在し、例えばレンズの代わりに凹面鏡を用いる場合もあるが、簡単のため図 1 の系に限定した。

*3 屈折による明暗の変化量と定常光の明るさの比を像コントラストと呼び、測定系のダイナミックレンジを決める指標の 1 つとして用いられている。

*4 $x = (x_1, x_2, x_3)$ の座標軸は一般に撮像素子平面に合わせて取る。

内部から放射されるレーザ光を

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\omega t + \phi)} \quad (6)$$

で表される単色光とすると、式 (1) および式 (4) を線形化し、式 (6) を代入した上で微小な項を全て無視する大胆な近似を行えば、振動しない剛体に反射して返ってきた光の位相は

$$\phi(t) = \phi_0 + C \int_L n(x, t) ds(x) \quad (7)$$

と書くことができる。ただし、 $i = \sqrt{-1}$ 、 \mathbf{E}_0 は初期振幅および偏光を表す定数、 ω は光の角周波数、積分範囲 L はレーザ経路上を表す。LDV はその位相 ϕ の時間微分 $d\phi/dt$ に比例した量を検出するので、屈折率と音圧の関係を考えれば、音圧の時間微分に関係した情報を得ることができる。

2.3 光波マイクロホン

光波マイクロホンは、音による光回折像を Fourier 光学系によって観測することで、レーザを用いて音に関する情報を検出する手法である [31-34]。LDV の節では測定光は限りなく細い線として考えたが、光波マイクロホン理論ではレーザ光を幅をもったガウシアンビームとして扱い、音による影響を回折現象として捉える。

音波を光波に直交する平面波に限定し、音によって変調された測定光の位相を空間的な広がりをもって

$$\phi(0, x_2, x_3, t) = \phi_0 + C \int_{-d}^d n(x_1, x_2, x_3, t) dx_1 \quad (8)$$

と表す。ただし、光波は x_1 方向に進行し、音波は $x_1 = 0$ を中心に (x_2, x_3) 平面に沿って進む幅 $2d$ の平面波とする。音波を横切った光が $x_1 = F$ に置かれた前後方焦点距離 F なるレンズで集光される時、その後方焦点位置における光波分布は、Fraunhofer 回折積分を Fourier 変換とみなし

$$u(2F, y_2, y_3, t) = C \mathcal{F}_{x_2, x_3} \left[g(x_2, x_3) e^{i\phi(0, x_2, x_3, t)} \right] \quad (9)$$

と表せる。ただし、 $g(x_2, x_3)$ は平均 0 の Gauss 関数である*5。その強度分布 $|u|^2$ は、 $(2F, 0, 0)$ を中心とする定常光成分と、 $(2F, \tilde{y}_2, \tilde{y}_3)$ および $(2F, -\tilde{y}_2, -\tilde{y}_3)$ にピークをもち音に応じて時間変化する変調成分によって構成される*6。したがって、変調成分のピーク位置にフォトダイオードなど光の強度を計るセンサを設置すれば、音圧勾配に関係した情報を得ることができる*7。

*5 レーザを光源としたので、その振幅成分を Gauss 関数と考えている (ガウシアンビーム)。すなわち LDV の場合と同様に、可聴音による空気の屈折率変動は光の位相のみに変調を与え、振幅変調成分を無視していることを意味する。

*6 $(\tilde{y}_2, \tilde{y}_3)$ は音波の進行方向およびレーザのビーム幅と Fourier 変換像の大きさによって決まる。

*7 同様の議論により、シュリーレン法を光線と屈折角による近似を用いずに考えることができる。回折現象として考察することの利点は、変調成分のみの光強度分布を扱うことで、音情報を取得するのに最適なセンサ配置を容易に考えることができる点にある。

2.4 光散乱

ここまでの説明では、屈折率の空間依存性による測定光への影響は、光の進行方向のみについて考えていた。一方、空気の疎密変化による光の散乱を光路上以外で考えることで、光路上の任意の点における音圧を取得する手法が近年提案されている。文献 [11, 12] では、空気分子や水滴など空气中を浮遊する各々の粒子によって散乱された光を巨視的に捉えることで、音によって散乱光の強度が変調されることを示している。

空中を浮遊する粒子からの影響を散乱係数によって考えれば、散乱された光の強度は散乱体の密度に比例する。したがって、測定光の入射強度 I_0 と散乱光 I_s の関係は

$$I_s = C (n(x, t) - 1) I_0 \quad (10)$$

と表現することができる。すなわち、散乱光からは音圧に関係した情報を得ることができる。ただし、ここでの C は入射光の進行方向と観測点の位置に依存する定数である。散乱光は光路上のあらゆる点から発生するので、望遠鏡などを用いて測定系に入射する散乱光の位置を選択すれば、光路上の 1 点における音圧を取得可能である。

多くの手法が光の位相を利用するのに対し、光散乱による音計測では光の振幅の情報のみを用いている。その結果、特殊な光源でなくてもよい、精密な光学系を必要としない、振動等の外乱に強いなどの大きな利点があるが、一方で感度が低いという弱点もある。

2.5 その他の光学的観測手法

上で述べた手法の他にも、様々な光学現象を応用した音響計測が提案されている。例えば、ホログラフィを用いて空気の屈折率分布を求める手法 [35, 36] や、光の Doppler シフトを利用して粒子速度を計測する手法 [37, 38] などが挙げられる。また、空中を浮遊する粒子の動きから粒子速度を測定する粒子画像流速測定法 (PIV: particle image velocimetry) [39, 40] や粒子追跡法 (PTV: particle tracking velocimetry) [41]、さらに振動体の光学的計測手法 [42-44] も、間接的にはあるが、音に関する情報を光学機器を用いて観測しているという点で関連していると言える。

3. 光学的音響測定データの復元

前章では、これまで提案されている手法のいくつかについて、それぞれの分野で用いられている理論を述べ、原理的には光を用いて音に関する情報を取得できることを示した。しかし実際に測定を行ってみると、2 章冒頭で述べたように、音による屈折率変動は非常に微弱なので、SN 比の良い測定結果を得るのは困難である。そこで、非常に音圧の高い音場を対象にすることで信号強度を高めたり、再現可能な音場について何度も計測したデータを可算平均することによって SN 比を改善することが行われている。

一方で筆者らは、音の物理モデルを用いた信号処理を提案することで、SN 比の悪い測定データから元の音情報を復元することを試みている [14–16]. 本章では、音場復元問題への筆者らの取り組みの一部について述べる.

3.1 境界積分方程式による定式化 [14, 15]

通常我々が扱う可聴音は線形スカラー波動方程式によってモデル化されるが、双曲型方程式に比べて楕円型の方が扱いやすく解きやすいので、ここでは波動方程式の周波数領域表現と解釈できる同次 Helmholtz 方程式

$$(\nabla^2 + k^2)u(x) = 0, \quad x \in \Omega \quad (11)$$

を考える. ただし, Ω は滑らかな境界 $\partial\Omega$ をもつ, 音源および反射体を含まないように選ばれた領域とする.

複数の観測点 $\{x_n\} \subset \Omega$ において測定データ $\tilde{u}(x_n) = u(x_n) + \varepsilon_n$ が得られたとき, ノイズ ε の存在しない音場 u を復元することを考える. Helmholtz 方程式の境界積分形式

$$(Ku)(x) = \int_{\partial\Omega} \left[\Phi(x, y) \frac{\partial u(y)}{\partial \nu_y} - \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial \nu_y} u(y) \right] dS(y) \quad (12)$$

を用いて定式化すれば, 上記復元問題は境界条件 $u(y)$, $\partial u(y)/\partial \nu_y$ を推定する問題に帰着される. ただし, $y \in \partial\Omega$, ν_y は y における外向き法線方向, Φ は Helmholtz 方程式の基本解を表す. 提案法では, 制約付き最小二乗問題

$$\begin{aligned} & \underset{u(y), \frac{\partial u}{\partial \nu}(y)}{\text{minimize}} && \sum_n \left| \tilde{u}(x_n) - (Ku)(x_n) \right|^2 \\ & \text{subject to} && (\nabla^2 + k^2)u(y) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

を解くことにより境界条件を求め, 式 (12) より Ω 内の音場を復元する. 境界積分を用いたことにより離散化すべき領域の次元が下がるので, 比較的高速な推定が可能である.

3.2 点音源によるスパース推定問題としての定式化 [16]

上記境界積分方程式を用いた定式化は高速に解ける利点はあるものの, 変数を境界上に限定していることで空間的な先験情報を用いることが難しく, またモデルの自由度が高くオーバーフィットすることがある. そこで, よりノイズに強い推定が実現できることを期待し, 点音源モデルを用いたスパース推定法を提案している.

音場を推定するにあたり, 線形モデルで直接離散化することを考える. すなわち, 適当な関数系 $\{\varphi_m\}$ の線形結合

$$u(x) \approx \sum_m \beta_m \varphi_m(x) \quad (14)$$

によって解を近似する. 例えば有限要素法では $\{\varphi_m\}$ として区分多項式を用いることが多いが, ここでは式 (11) を厳密に満たす関数を基底として選ぶことを考える. そのような関数として, 一般には平面波や一般化調和多項式が用いられる. 一方, 線形楕円型方程式の数値解法である MFS (method of fundamental solutions) [45–47] では, Ω の閉

包 $\bar{\Omega}$ の外に特異点をもつ基本解を $\varphi_m(x) = \Phi(x, z_m)$ として選ぶ. これは, $x \in \bar{\Omega}$ において式 (11) を厳密に満たす基底となる. したがって, 基本解によって解を表現すれば, 式 (13) の制約条件を厳密に満足することになる.

観測領域は音源を含まないように選んだので, 観測データを与えた音源は $\bar{\Omega}$ の外にある. そこで, $z_m \notin \bar{\Omega}$ を空間に満遍なく配置すれば, $\{\Phi(x, z_m)\}$ のうち少数の要素で音源を近似できるはずである. また, 実環境では音源が空間に密に存在することは考えにくく, 空間に疎 (スパース) に存在するはずである. したがって, 推定問題を解くにあたり, $\{\beta_m\}$ のスパース性を先験情報として利用することができる. 観測点 $\{x_n\}$ について式 (14) を $\mathbf{u} \approx \Phi\boldsymbol{\beta}$ と行列を用いて略記すれば, 線形結合係数のスパース推定問題は

$$\underset{\boldsymbol{\beta}}{\text{minimize}} \quad \|\mathbf{u} - \Phi\boldsymbol{\beta}\|_2^2 + \lambda \|\boldsymbol{\beta}\|_1 \quad (15)$$

と書くことができる. これは, 最小二乗推定で広く用いられるデータ項に, スパース性を誘導するペナルティ項を l_1 ノルムで導入した形であり, $\boldsymbol{\beta}$ の要素数をペナルティとした問題の凸緩和問題になっている. すなわち, 種々の凸最適化手法によって式 (15) の大域最適解を得ることが可能である [48–50]. 一方, l_1 ノルムは推定結果にバイアスを与えることが知られている. 近年, よりバイアスの少ない非凸ペナルティによる最適化問題 [51] や, 重み付き l_1 ノルムによる手法 [52, 53] などが考案されており, それらを用いればより良い推定結果を得られる可能性がある.

図 3 に LDV によって測定された実データに提案法を適用した例を示す. 上段に示した実データには, 測定系の内外から発生した多くのノイズが含まれていることが見て取れる. 下段には, 測定データから音場を復元した結果を示した. 提案法によってノイズの大部分が除去され, スピーカによって再生されたパルス音が明確に視認できる.

4. 光学的音響測定手法の音響工学的応用

光を用いた測定では, 測定対象領域に直接測定系を設置する必要がないので, 音場を変化させることなく密な観測を得ることが可能である*8. そのように密な観測を得ることで, ビームフォーミングや音響ホログラフィなど従来からよく知られるアレイ信号処理を, マイクロホンの空間エイリアシングの影響を受けることなく実現できることが報告されている [28, 29]. 現在は光学系の制約を緩和する基礎的な研究が主流だが, 今後計測法として確立すれば, これまでマイクロホンアレイを用いて研究されてきた様々な音響信号処理に対し重要な結果を与える可能性がある. 一方, 光の経路上積分される性質を積極的に活用すれば, 積

*8 ただし, 光散乱による方法などのごく一部の手法を除いて, ほとんどの光学的音響測定は光の経路上積分された物理量を計測することになるので, コンピュータ断層撮影 (CT: Computed Tomography) と組み合わせて利用されることが多い [3–10, 27].

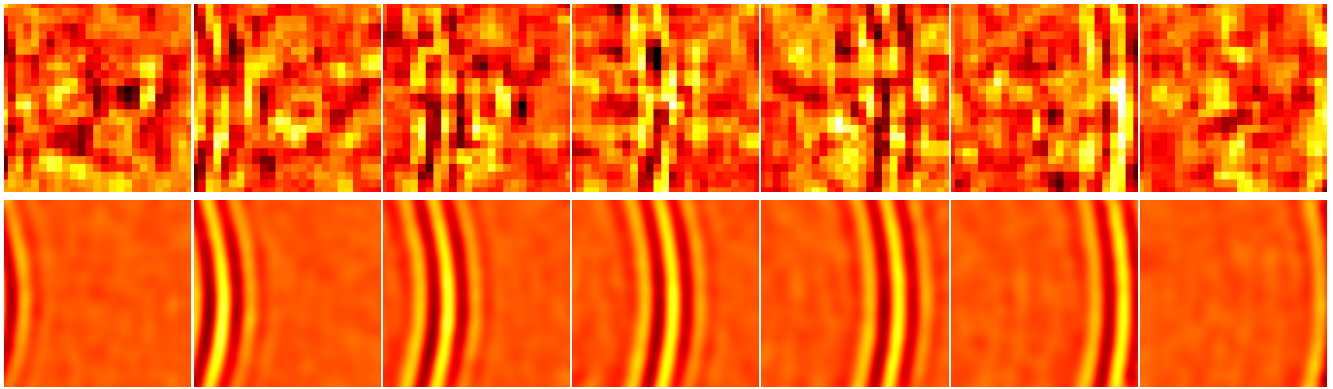


図 3 LDV を用いて測定された音場の一例。4 kHz の正弦波 4 波長に Hann 窓を乗じたパルス波をスピーカによって再生した。上段が LDV による測定データであり、ノイズの影響で再生されたパルス音を視認するのは困難である。一方、下段が提案法によって測定データを復元した結果であり、ノイズの多くが除去されていることが見てとれる。

分路は測定系次第で自由に選べるので、マイクロホンでは考えられなかった信号処理を実現できるはずである。

また、ジェット気流の存在する音場など、従来のマイクロホンでは物体が存在するために風切り音が発生し測定困難な状況への応用も進められている [34]。例えばバスドラムの録音や屋外での取音など風切り音が問題になる状況は身近にも存在し、そのような場面で光による測定が有効であると考えられる。ここで述べた応用を実現するには、第一に測定システムとしての SN 比を向上し、さらに測定系自体の振動にロバストな手法を実現することが重要である。

5. むすび

本稿では、これまで提案されている様々な光学的音響測定手法の一部を取り上げ、その原理について簡単に述べた。また、光と音の波長の違いから厳密な解析は困難であり、それぞれの測定系に合わせて単純化したモデルを考えた結果、光と音の物理的作用という単一の現象にも関わらず、様々な理論が存在することを示した。今後、測定系によらない統一的な理論が完成されれば、手法ごとの比較が容易になり、より良い測定系の提案に繋がることを期待される。

筆者らが提案する音場の復元手法についても概説し、光を用いて測定された実音場に対して適用した例を示した。さらに、光学的音響測定が発展した後の音響信号処理の可能性についても触れた。今後も測定手法およびその信号処理に関する研究を進めることにより、これまで実現不可能であった音情報の取得および活用を実現する所存である。

参考文献

- [1] 斎藤直毅, 山崎芳男: 振動版を用いない音情報の収録, 日本音響学会講演論文集, pp. 479–480 (2002).
- [2] 滝澤俊和, 斎藤直毅, 小西 雅, 山崎芳男: 振動版のないレーザードップラーマイクロホンによる大空間の取音, 日本音響学会講演論文集, pp. 595–596 (2003).
- [3] 後藤 亮, 滝澤俊和, 池田雄介, 及川靖広, 山崎芳男: レーザを用いた音響 CT による音場の観測, 日本音響学

- 会講演論文集, pp. 1031–1032 (2004).
- [4] 池田雄介, 後藤 亮, 滝澤俊和, 及川靖広, 山崎芳男: レーザ CT を用いた音場の 3 次元測定, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. EA2004-104, pp. 43–48 (2004).
- [5] 岡本直毅, 後藤 亮, 池田雄介, 小西 雅, 及川靖広, 山崎芳男: レーザ CT の音響設計への適用, 日本音響学会講演論文集, pp. 819–820 (2005).
- [6] Oikawa, Y., Goto, M., Ikeda, Y., Takizawa, T. and Yamasaki, Y.: Sound field measurements based on reconstruction from laser projections, *Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process. (ICASSP)*, Vol. IV, IEEE, pp. 661–664 (2005).
- [7] 池田雄介, 後藤 亮, 岡本直毅, 滝澤俊和, 及川靖広, 山崎芳男: レーザ CT を用いた再生音場の測定, 日本音響学会誌, Vol. 62, No. 7, pp. 491–499 (2006).
- [8] 池田雄介, 岡本直毅, 後藤 亮, 小西 雅, 及川靖広, 山崎芳男: レーザトモグラフィを用いた音圧分布測定における精度, 日本音響学会誌, Vol. 64, No. 1, pp. 3–7 (2008).
- [9] 池田雄介, 岡本直毅, 小西 雅, 及川靖広, 鶴田泰弘, 山崎芳男: レーザトモグラフィを用いた進行波の観測, 日本音響学会誌, Vol. 64, No. 3, pp. 142–149 (2008).
- [10] Oikawa, Y., Hasegawa, T., Ouchi, Y., Yamasaki, Y. and Ikeda, Y.: Visualization of sound field and sound source vibration using laser measurement method, *20th Int. Congr. Acoust. (ICA)*, Vol. 898 (2010).
- [11] Ishikawa, K., Oikawa, Y. and Yamasaki, Y.: Backscattering measurement method for sound field using pulsed laser, *Forum Acusticum*, EAA (2014).
- [12] Ishikawa, K., Oikawa, Y. and Yamasaki, Y.: Non-intrusive sound pressure measurement using light scattering, *Acoust. Sci. & Tech.* (2015).
- [13] Chitanont, N., Yaginuma, K., Yatabe, K. and Oikawa, Y.: Visualization of sound field by means of Schlieren method with spatio-temporal filtering, *Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process. (ICASSP)*, IEEE (2015).
- [14] Yatabe, K. and Oikawa, Y.: PDE-based interpolation method for optically visualized sound field, *Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process. (ICASSP)*, IEEE, pp. 4771–4775 (2014).
- [15] Yatabe, K. and Oikawa, Y.: Optically visualized sound field reconstruction using Kirchhoff–Helmholtz equation, *Acoust. Sci. & Tech.* (2015).
- [16] Yatabe, K. and Oikawa, Y.: Optically visualized sound field reconstruction based on sparse selection of point

- sound sources, *Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process. (ICASSP)*, IEEE (2015).
- [17] Settles, G. S.: *Schlieren and Shadowgraph Techniques*, Springer (2001).
- [18] Bucaro, J. A. and Dardy, H. D.: Visualization of ultrasonic waves in air, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 62, No. 6, pp. 1506–1507 (1977).
- [19] Krehl, P. and Engemann, S.: August Toepler – The first who visualized shock waves, *Shock Waves*, Vol. 5, No. 1-2, pp. 1–18 (1995).
- [20] Pandya, B. H., Settles, G. S. and Miller, J. D.: Schlieren imaging of shock waves from a trumpet, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 114, No. 6, pp. 3363–3367 (2003).
- [21] Hargather, M. J., Settles, G. S. and Madalis, M. J.: Schlieren imaging of loud sounds and weak shock waves in air near the limit of visibility, *Shock Waves*, Vol. 20, No. 1, pp. 9–17 (2010).
- [22] Albrecht, H.-E., Damaschke, N., Borys, M. and Tropea, C.: *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*, Springer (2003).
- [23] Castellini, P., Martarelli, M. and Tomasini, E. P.: Laser Doppler Vibrometry – Development of advanced solutions answering to technology’s needs, *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 20, No. 6, pp. 1265 – 1285 (2006).
- [24] Nakamura, K., Hirayama, M. and Ueha, S.: Measurements of air-borne ultrasound by detecting the modulation in optical refractive index of air, *Ultrasonics Symp.*, Vol. 1, IEEE, pp. 609–612 (2002).
- [25] Harland, A. R., Petzing, J. N. and Tyrer, J. R.: Nonperturbing measurements of spatially distributed underwater acoustic fields using a scanning laser Doppler vibrometer, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 115, No. 1, pp. 187–195 (2004).
- [26] Frank, S. and Schell, J.: Sound field simulation and visualisation based on Laser Doppler Vibrometer measurements, *Forum Acusticum*, pp. 91–97 (2005).
- [27] Torras-Rosell, A., Barrera-Figueroa, S. and Jacobsen, F.: Sound field reconstruction using acousto-optic tomography, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 131, No. 5, pp. 3786–3793 (2012).
- [28] Torras-Rosell, A., Barrera-Figueroa, S. and Jacobsen, F.: An acousto-optic beamformer, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 132, No. 1, pp. 144–149 (2012).
- [29] Fernandez-Grande, E., Torras-Rosell, A. and Jacobsen, F.: Holographic reconstruction of sound fields based on the acousto-optic effect, *INTER-NOISE NOISE-CON Congr. Conf. Proc.*, Vol. 247, No. 5, pp. 3181–3190 (2013).
- [30] Malkin, R., Todd, T. and Robert, D.: A simple method for quantitative imaging of 2D acoustic fields using refracto-vibrometry, *J. Sound Vib.*, Vol. 333, No. 19, pp. 4473–4482 (2014).
- [31] Sonoda, Y. and Akazaki, M.: Measurement of low-frequency ultrasonic waves by Fraunhofer diffraction, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 33, No. 5S, pp. 3110–3114 (1994).
- [32] 田中啓一, 野上暁一, 園田義人: レーザ光による可聴音波の計測, *電気学会論文誌E*, Vol. 122, No. 7, pp. 362–368 (2002).
- [33] 園田義人: 光学的フーリエ変換による可聴音の直接検出のための光学系の検討, *日本音響学会誌*, Vol. 62, No. 8, pp. 571–579 (2006).
- [34] Sonoda, Y. and Nakazono, Y.: Development of optophone with no diaphragm and application to sound measurement in jet flow, *Advances Acoust. Vib.*, Vol. 2012, No. 909437, pp. 1–17 (2012).
- [35] Løkberg, O. J.: Sound in flight: measurement of sound fields by use of TV holography, *Appl. Opt.*, Vol. 33, No. 13, pp. 2574–2584 (1994).
- [36] Matoba, O., Inokuchi, H., Nitta, K. and Awatsuji, Y.: Optical voice recorder by off-axis digital holography, *Opt. Lett.*, Vol. 39, No. 22, pp. 6549–6552 (2014).
- [37] Taylor, K. J.: Absolute measurement of acoustic particle velocity, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 59, No. 3, pp. 691–694 (1976).
- [38] Fischer, A., König, J., Haufe, D., Schlüßler, R., Büttner, L. and Czarske, J.: Optical multi-point measurements of the acoustic particle velocity with frequency modulated Doppler global velocimetry, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 134, No. 2, pp. 1102–1111 (2013).
- [39] Campbell, M., Cosgrove, J., Greated, C., Jack, S. and Rockliff, D.: Review of LDA and PIV applied to the measurement of sound and acoustic streaming, *Optics & Laser Technology*, Vol. 32, No. 7-8, pp. 629 – 639 (2000).
- [40] Valière, J.-C.: PIV for acoustics, *Acoustic Particle Velocity Measurements Using Lasers*, John Wiley & Sons, Ltd, chapter 4, pp. 111–136 (2014).
- [41] Akutsu, M. and Oikawa, Y.: Extraction of sound field information from flowing dust captured with high-speed camera, *Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process. (ICASSP)*, IEEE, pp. 545–548 (2012).
- [42] Su, X. and Zhang, Q.: Dynamic 3-D shape measurement method: A review, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 48, No. 2, pp. 191 – 204 (2010).
- [43] Akutsu, M., Oikawa, Y. and Yamasaki, Y.: Extract voice information using high-speed camera, *Proc. Meet. Acoust.*, Vol. 19, No. 1 (2013).
- [44] Molin, N.-E.: Optical methods for acoustics and vibration measurements, *Springer Handbook of Acoustics* (Rossing, T., ed.), Springer, pp. 1139–1163 (2014).
- [45] Kupradze, V. and Aleksidze, M.: The method of functional equations for the approximate solution of certain boundary value problems, *Comput. Math. Math. Phys.*, Vol. 4, No. 4, pp. 82 – 126 (1964).
- [46] Mathon, R. and Johnston, R. L.: The approximate solution of elliptic boundary-value problems by fundamental solutions, *SIAM J. Numer. Anal.*, Vol. 14, No. 4, pp. 638–650 (1977).
- [47] Karageorghis, A., Lesnic, D. and Marin, L.: A survey of applications of the MFS to inverse problems, *Inverse Probl. Sci. Eng.*, Vol. 19, No. 3, pp. 309–336 (2011).
- [48] Francis Bach, Rodolphe Jenatton, J. M. and Obozinski, G.: Optimization with sparsity-inducing penalties, *Found. Trends Mach. Learn.*, Vol. 4, No. 1, pp. 1–106 (2011).
- [49] Stephen Boyd, Neal Parikh, E. C. B. P. and Eckstein, J.: Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers, *Found. Trends Mach. Learn.*, Vol. 3, No. 1, pp. 1–122 (2010).
- [50] Parikh, N. and Boyd, S.: Proximal algorithms, *Found. Trends Optim.*, Vol. 1, No. 3, pp. 127–239 (2014).
- [51] Bayram, I.: Penalty functions derived from monotone mappings, *Signal Process. Lett., IEEE*, Vol. 22, No. 3, pp. 265–269 (2015).
- [52] Zou, H.: The adaptive Lasso and its oracle properties, *J. Am. Stat. Assoc.*, Vol. 101, No. 476, pp. 1418–1429 (2006).
- [53] Candès, E. J., Wakin, M. B. and Boyd, S. P.: Enhancing sparsity by reweighted ℓ_1 minimization, *J. Fourier Anal. Appl.*, Vol. 14, No. 5-6, pp. 877–905 (2008).