



解説

光波マイクロホンの開発とそのプラズマ計測への応用

Development of Optical Wave Microphone and Application to Plasma Diagnostics

園田義人¹⁾, 中宮俊幸¹⁾, 光木文秋²⁾

SONODA Yoshito¹⁾, NAKAMIYA Toshiyuki¹⁾ and MITSUGI Fumiaki²⁾

¹⁾東海大学大学院総合理工学研究科, ²⁾熊本大学大学院自然科学研究科

(原稿受付: 2015年6月25日)

音の検出法として従来から種々のマイクロホンが開発され技術的に完成されているが, それらは振動膜を介して振動を電気信号に変換するという原理に基づいている。光波マイクロホンは, 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検出することにより音波を測定する方法である。この方法は, 元々は核融合プラズマ分野でプラズマ中の乱流や波動を計測する方法として開発された方法であり, それを音波計測に拡張したものである。光ビームで音を直接検出するため, プラズマ現象などに関連した音の計測などへも有効である。本解説では, この方法の原理と技術概要を紹介すると共に, 特に最近実施されているプラズマに関わる音現象計測に応用した例を紹介する。

Keywords:

sound measurement, optical microphone, laser measurement, electrical discharge, plasma measurement

1. まえがき

音響工学分野では, 音の検出法として古くから種々のマイクロホンが利用されてきた。これらの技術は100年以上に亘る開発の歴史を有し高性能化されている。しかしながら, 振動膜を内蔵しこれ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[1]。この方法では音センサに物体を用いそれを測定点(音場)に持ち込む必要があるため, 音場や気流を乱す, 高電磁場環境では支障を来す, 高周波応答が悪いなどの実用上の制約や欠点が出るのが避けられない。

一方, 光学的に音波を検出する方法も数多く研究されており, 特に音響光学や超音波計測の分野では光回折法が古くから研究され技術的にも確立されている。ただし, これらは波長が非常に短い高周波超音波を測定対象としており, この方法では波長の長い可聴音の測定は困難である[2, 3]。

また, 音響工学の分野では, 振動膜にLED光やレーザー光を照射しその反射光で可聴音を検出する光マイクロホン技術が開発されているが, これらはいずれも膜(又は物体)の振動を用いている点で従来型のマイクロホンに近い[4-12]。

これに対し, 著者等は振動膜を全く用いず光により音を直接検出する方法, もしくは光の中から音情報を取り出す方法を提案し, 基礎的研究を行ってきた[13-22]。この方法は音波が光ビームに入射した際に生じる極微弱回折光を検出することで音を再生しようとする試みであり, 既

存の振動膜式光マイクロホンと区別し, 波動光学的音検出方式という意味を表すため光波マイクロホンと総称している。

同法で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透過光と共に光学的フーリエ変換を行い, 両者を同時に検波することで音を電気信号に変換する。振動膜を全く用いず, 光により音を直接検出するため, 音場を乱さない, 高電圧・高磁界中など特殊環境下でも音検出が可能である等の多くの利点をもっている[18, 20]。

この光波マイクロホン技術は, 元々はプラズマ核融合の分野でプラズマ波動(電子密度揺動)や乱流の測定法として開発されていた技術であり, 具体的にはファーフワード散乱法[23]やフラウンホーファ回折法[24]を起源としている。

これらのプラズマ波動計測法は, 1980年前後に登場しているが, 当時はプラズマ波動・電子密度揺動の代表的な計測法として電磁波(光)を用いた協同散乱法があった[25]。ただし, 測定対象とする波動が長波長となると散乱角が非常に小さくなるため, 計測光源としての遠赤外レーザーの開発とその適用などが行われていた。使用光源波長に依存するが, いずれにしても被測定波動の波長が長い場合は散乱波が透過光の中に埋もれてしまい測定限界に達する。そのような状況で提案された方法がファーフワード散乱法であり, 散乱光検出の支障とされて来た透過光を逆に参照光として利用する。それによりさらに波長の長いプラズマ波動の測定を可能とすることを目的とした[23]。そ

ここでは、従来の協同散乱法と異なり、巨視量である屈折率波による位相変調理論（薄い変調格子）とフーリエ光学的検出法が用いられた。その後、このフーリエ光学を用いた計測理論は、従来の協同散乱理論で扱っていた個々の自由電子により放射された散乱光の重ね合わせ（協同散乱光）と透過光とを遠方場（フラウンホーファ回折領域）で干渉させた結果として求められる式と一致することが示され、これにより揺動電子群の体積効果や被測定波動の傾き効果などの評価も可能となった[24, 25]。

その後、さらにどの程度まで測定可能波長を伸ばせるのかという点に対する技術的挑戦と、また一方で可聴音を扱う音響工学分野では光計測がほとんどないという事情に鑑み、著者等は光波マイクロホン技術の開発の方向へと進むこととなった[13, 14, 16]。

本解説では、この技術の原理・理論の概要を紹介すると共に、特に最近行われているプラズマなどから生じる音現象計測に応用した例を紹介する。

2. 光波マイクロホンの原理と基礎理論

2.1 原理と理論

プラズマ波動計測の場合は、上記のファーフォワード散乱法やフラウンホーファ回折法のいずれによっても理論的評価が可能であるが、ここでは空中音波の測定を扱うので巨視量としての屈折率の変化とフーリエ光学に基づく理論を示す。この方法は、広義には媒質の周期的粗密変化に伴う屈折率の空間的変動すなわち屈折率波による位相変調作用で生じる微弱光回折波を測定することで屈折率波の情報を得る手法であり、気中や水中の音波の測定等にも有効である。上述のように、プラズマ波動により生じる光回折波の場合は、粗密状態を構成する個々の自由電子によるトムソン散乱放射の重ね合わせとして求められる協同散乱波と等価である[24]。

光波マイクロホンの原理図を図1に示す。レーザー光をプローブビームとし、音波の位相変調作用によって生じた光回折波をレンズに通して光学的フーリエ変換を行った後、光回折像として観測面で結像させる。ここに光検出器を置いて検出することにより、音波の情報（周波数、強度など）を得ることができる。

図1の配置のように、レーザー光のビームウェストに音波が交差するとき、観測面 (x_f, y_f) での光波分布は、光学の分野で定式化されたレンズを通した場合のフラウンホー

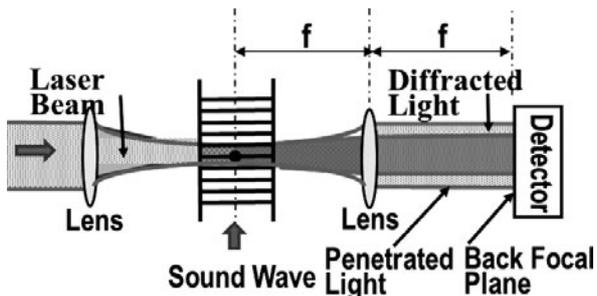


図1 理論解析モデル[18].

ファ回折積分の式[26]を用いて求められる。

これらの計算により観測面での信号強度 I_{ac} [W/m²] は、結局、

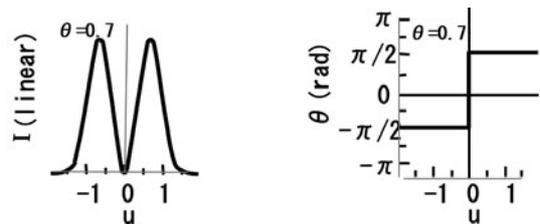
$$I_{ac} = I_0 \Delta\phi_0 [\exp\{-(u^2 + (u - \theta)^2)\} + \exp\{-(u^2 + (u + \theta)^2)\}] \sin \omega_p t \quad (1)$$

で与えられる[23, 24]。

ここで、 I_0 ：入射パワー密度、 $u = x_f / w_f$ ：後方焦点面（観測面）の規格化された x 座標、 $\theta = k_p w_0 / 2$ ：規格化波数、 w_f ：観測面でのビームサイズ、 (x_f, y_f) ：観測面での x, y 座標、 (ω_p, k_p) ：音波の角周波数および波数、 w_0 ：音波入射領域でのスポットサイズ、 $\Delta\phi_0 (\propto \Delta p / p)$ ：音による光位相変化の時間変動成分、 p ：気圧、 Δp ：音圧、である。

式(1)で与えられる回折像の理論計算結果の一例を図2(a)及び(b)に示す。(a)は強度分布で、(b)は位相分布である。両図では規格化波数 θ をパラメータとしており、横軸は観測面の規格化 x 座標 (u) である。回折強度分布は左右2つのピークをもつ分布となっており、同図(b)に示すように両者は位相差が π で反転している。どちらか片方のピーク点に光検出器を置くことにより、音を電気信号に変換できる。規格化波数 θ は $\theta = k_p w_0 / 2 = \pi w_0 / \lambda_p$ であるので、レーザービームの半径 w_0 と音波波長 λ_p の比によって回折像の強度及び形が変わることになる。図2におけるピーク点の強度（最大強度） I_m と規格化波数の関係を図3に示す。

横軸はレーザービーム半径を一定値としたときは周波数軸と見なせるので、図3は光音相互作用により音を検出する際の生の周波数特性と見ることもできる。同図では $\theta = 0.8$ あたりで最大値を示す曲線となっているが、



(a) Spatial profile of intensity (b) Spatial profile of phase

図2 回折像空間プロファイルの理論計算例[21].

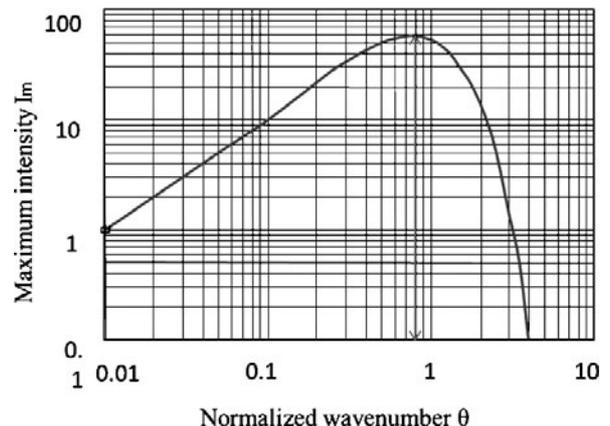


図3 周波数特性の計算[21].

$\theta = \pi w_0 / \lambda_p$ であるので、これはおよそレーザービーム直径 ($2w_0$) が音波の半波長 ($\lambda_p/2$) に等しい条件に相当している [18].

なお、長波長の音波測定では、図 2 (a) の強度分布 (2 山形) の最大強度点の空間的位置は周波数によっては変化しなくなる。これは、細いレーザービームによる長波長音波の測定が空間サンプリング定理を満足しないことに対応する [18]. すなわち、この最大強度点に光検出器を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になり、マイクロホンとしての利用が可能になる。

2.2 光波マイクロホンの利点

従来の振動膜式マイクロホンと異なる原理及び形態であるので、多くの特徴・利点を有するが [16], ここではその中から数点のみを以下に記す。

- ① 音場や気流を乱さない測定が可能である。
- ② 広帯域対応可能で、可聴帯から超音波帯まで 1 個の光波マイクロホンで測定できる。レーザービーム直径を調節することで、最大感度周波数を変化させることができる。
- ③ 振動膜がないため高音圧 (130dB 以上) の測定も可能である。
- ④ 気体中やプラズマ中の他、水中 (液体中) や透明固体中での測定にも適用可能である。

3. 光波マイクロホンの基本システム構成と受信特性

3.1 ハードウェア

光波マイクロホンのハードウェアの典型的な例として、基礎研究に用いている実験装置の概略図を図 4 に示す [15, 16]. これは理論検証用に作成したもので中央に無響箱を設置しているため、音波検出部のレーザービームは直線状で全長 2 mm 程度と比較的長くなっている。光学系は無響箱を挟んで、レーザー光源側と光検出器側に分離されており 2 台の光学防振台の上に設置されている。

レーザー光源には、ファイバ出力型半導体レーザー (波長 670 nm, 定格出力 6 mW) を用いている。音波を共振させるスピーカは無響箱の中に設置されている。また、音波の音圧は静電マイクロホンによりモニターしている。スピーカからの音をレーザー光に入射すると、前述のように極微弱な光回折波が生じ、透過レーザービームと共に伝搬し、受光側光学系を通過して観測面でフォトダイオードにより受光される。光検出器の直径は 1.2 mm である。検出した信号は、プリアンプとバンドパスフィルタを通した後、スト

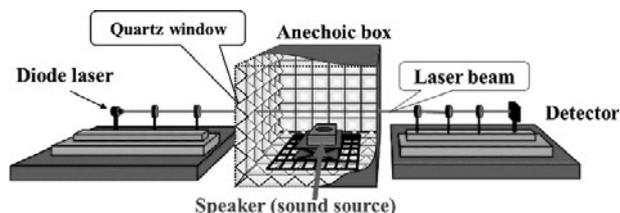


図 4 基礎研究用実験装置の例 [15].

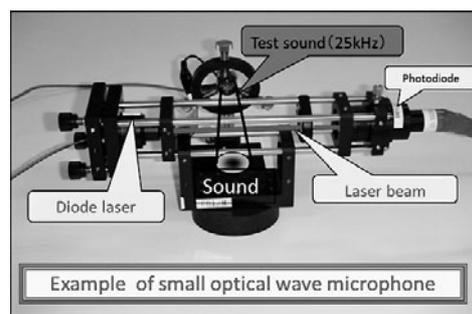


図 5 コンパクトタイプの例 [18].

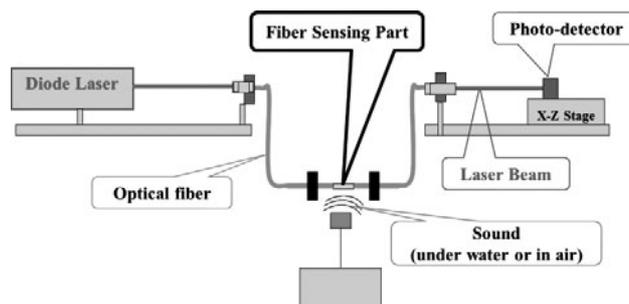


図 6 光ファイバセンサ方式の実施例。

レージスコープで観察し、パーソナルコンピュータにて記録される。入射音 (音楽) の音圧が高い場合は、検出信号を付属した家庭用ステレオシステムに入力することにより試聴することもできる [22]. 以上は光波マイクロホン構成の一例であるが、光学系はコンパクトにまとめることも、大きい音波アンテナを構成することもできる。図 5 に全長 150 mm の作成例を示す [18].

また、光ファイバをセンサとする方式も可能である。図 6 に光ファイバセンサ方式の実施例を示す。この例では、音検出用裸芯部の外径は約 100 μm で、長さは 5 ~ 50 mm 程度である。これにより空中及び水中の音波測定が可能であることを確認している。特に、ファイバセンサ方式は水中超音波センサや空中高音圧センサとして期待できると考えている。ただし、この方式については各種の光ファイバを用いたときの測定性能を検証中であり、その詳細についてはここでは割愛する。

3.2 基本特性の測定例

3.2.1 音圧依存性と周波数特性

音圧と信号強度との関係を図 7 に示す。信号強度は音圧におよそ比例しており、理論的に予測される特性と一致する。

次に、周波数特性の測定例 (300 ~ 20 kHz) を図 8 に示

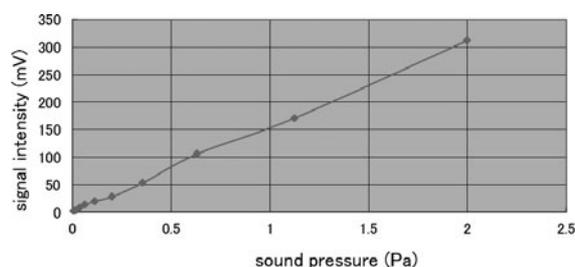


図 7 音圧と信号強度との関係 [21].

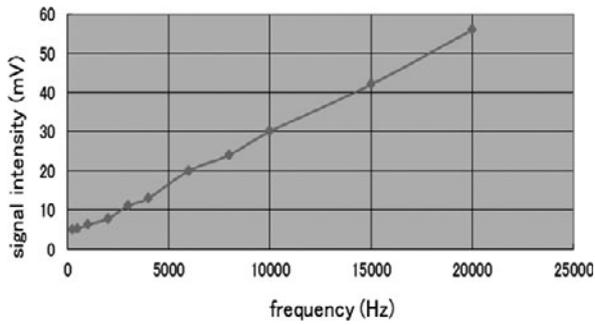


図8 周波数特性の測定[21].

す。音幅で校正した周波数特性は、周波数に比例して信号強度が増大する形となる。実用時は周波数特性を信号処理回路で平坦化して用いる。さらに数 100 kHz の帯域まで広げた応用測定も行っている [15, 21].

3.2.2 指向性と音方向分離測定

直線状の 1 次元レーザービームで音を検出する際の指向性を測定した例を述べる。この場合、レーザービームに垂直な平面内での指向性（垂直面内指向性）とレーザービーム光軸を含む平面内での指向性（平行面内指向性）の 2 つが基本的な指向特性となる。任意方向からの音波の入射は、この 2 つの特性を合成することでおよそ推定できる。両特性を測定する装置のイメージを図 9 に示す [15].

測定結果の一例を図 10(a) 及び (b) に示す。(a) は垂直面内指向性で、(b) は平行面内指向性である。同図 (a) で、レーザービーム軸に対して右水平方向からの入射が入射角の基準の 0° である。入射角 90° はレーザービーム真下からの入射に相当する。信号強度は周波数特性の項で示したように、高い周波数で強くなっているが、指向性は 200 Hz から 10 kHz に至る全周波数で類似の双指向性を示している。一方、同図 (b) では、レーザービーム進行方向を音波入射角度の基準の 0° としているが、周波数の高い場合は指向性が若干鋭く、低周波になるにつれ指向性が広がっている。10 kHz の指向特性の半値角は約 90° 程度である。

なお、図 11 に示すように、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、方向を求めたりすることができる。また、多チャンネル出力信号を合成（加算）することにより音受信指向性を手元でコントロー

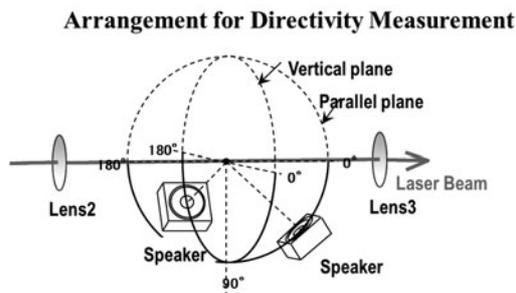
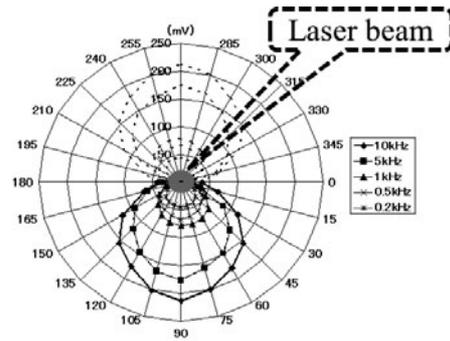
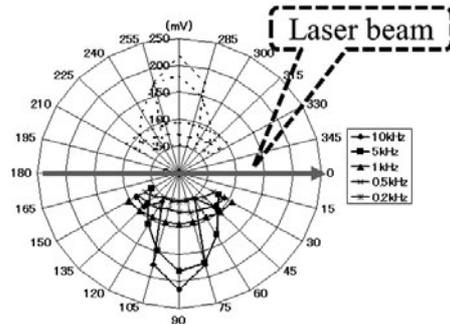


図9 指向性の測定システムのイメージ[15].



(a) Vertical directivity



(b) Horizontal directivity

図10 指向性の測定[15].

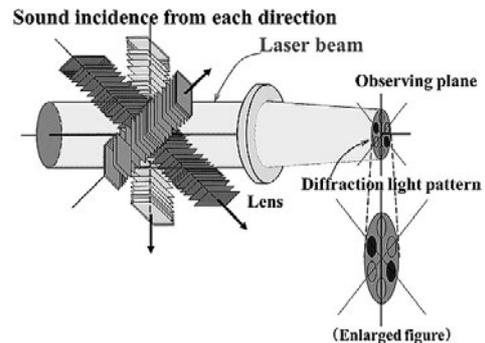


図11 音の入射角による回折像位置の変化[18].

ルすることも可能である。16本の光ファイバを円周上に並べた 16 ch 光ファイバ束を用いて、これらの実行可能性を実証している [18].

この方法は上述の音方向分離測定の外、コンピュータモグラフィ (CT) と組み合わせた音場可視化、可聴音と高音圧超音波の混在音場の測定などにも利用している。総じて、従来の膜式マイクロホンにない多くの特徴を有しており、適切な利用法を考案すれば多方面に高機能化した新技術を提供できると期待される。次章では、主にプラズマに関連した音現象の測定に本法を適用した例を紹介する。

4. 光波マイクロホンの応用

4.1 大気圧放電プラズマへの応用

著者らは、ガス温度の低い沿面放電や誘電体バリア放電から比較的ガス温度の高いグライディングアーク放電に光波マイクロホンを適用し [27-30], 他の光計測技術では得られない有益な物理的情報を得ている。その一例を以下に

示す。

光波マイクロホンを沿面放電プラズマに適用すると、二種類の圧力波が検出できる。一つは各々のマイクロ放電生成時に放出される衝撃波であり、もう一つは高圧電源周波数の倍波の成分からなる超音波である。前者は、マイクロ放電生成時の局所加熱による立ち上がりの急峻な単一圧力変動として電極近傍で観測される。ハイスピードカメラ画像および電流波形を同時に観測することにより、マイクロ放電と衝撃波の対応を見て取ることができる。後者は、生成イオンの印加電界による加速に起因する連続的な圧力波として、比較的電極から離れた位置でも観測される。後者については、図12のように放電電極をプローブレーザーに対して垂直に移動かつ回転させ、光波マイクロホンとCTスキャンを併用することで、音場分布を可視化することができる。放電電極をチャンバー内に設置した状態でCTスキャンを行うと、雰囲気ガスによる音場分布の比較を行うことができる。

図13は、Ar及びN₂雰囲気中で計測した沿面放電電極（印加電圧：正弦波 5 kV, 45 kHz）上部 1 cm における超音波 2次元音場分布とその時のプラズマ発光の様子を比較したものである。プラズマの発光の様子が変化すると、音場分布にも変化が見られることがわかってきた。また、本手法は、従来のマイクロホンでは十分な感度が得られない高周波の超音波帯の検出に適しており、観測された音波の主たる周波数成分は、印加電圧の周波数の2倍波（90 kHz）で

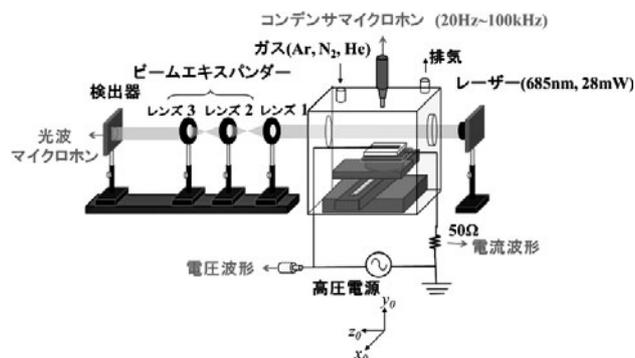


図12 光波マイクロホン CT スキャン装置[30].

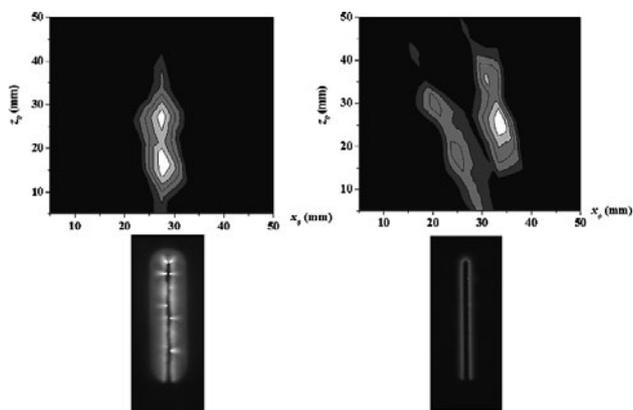


図13 音場分布（上）とプラズマ発光（下）。（左：Ar，右：N₂雰囲気）[30].

あることがわかっている。一方、衝撃波に関しては、CTスキャンのような定常信号を観測する手法は不向きであるため、マルチチャンネル光波マイクロホンシステムを適用している。光ファイバ分配器を用いたプローブビームの多チャンネル化により音場分布のリアルタイム計測が可能となるだけでなく、SN比も改善される。

4.2 レーザー材料プロセスへの応用

レーザー材料プロセスでは、固体表面の改質のため、パルスレーザーによる加熱がよく用いられる。材料分野では、光技術を用いたプロセスの間接的なリアルタイムモニタリングに期待が寄せられている。光波マイクロホンを用いると、固体にパルスレーザーを照射した際に放出される光熱音響波を検出することが可能である[31-33]。その放出メカニズムが固体表面から気体への熱伝達によるものであれば、光波マイクロホン信号の強度もしくは到達速度から固体の表面温度を材料によらず見積もることが可能となる。超臨界流体中のように、従来の振動膜式マイクロホンが使用できない環境では、本手法は非常に有効である。図14に超臨界流体中のレーザー-固体プロセスに光波マイクロホンを適用した例を示す。

図15は、パルスレーザーをアブレーション閾値以下で銅に照射した際、異なる二酸化炭素圧力において銅表面より 3.7 mm の位置で光熱音響波を観測した結果である。二酸化炭素気体中（0.1 MPa）の音速は 267 m/s であったが、超臨界中（22 MPa）では音速は液体中のそれに匹敵する程まで増加した（530 m/s）。一方、臨界点（7.4 MPa）より少し圧力が高いクリティカルな領域（8 MPa）では音速は気体中より遅く（187 m/s）なった。音速は等温圧縮率の平方根に反比例するが、臨界点近傍では等温圧縮率が発散することを裏付ける結果となった。また、アブレーションが生じた場合は、プラズマによる衝撃波が観測された。

著者らは、光波マイクロホンをレーザー-固体プロセスに応用することにより、レーザーアニール処理や超臨界

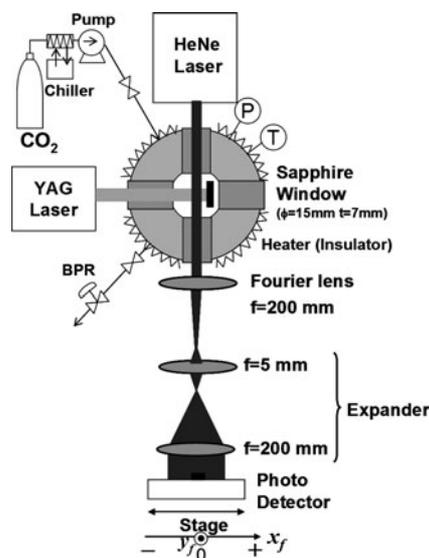


図14 超臨界レーザープロセス装置への光波マイクロホン導入[33].

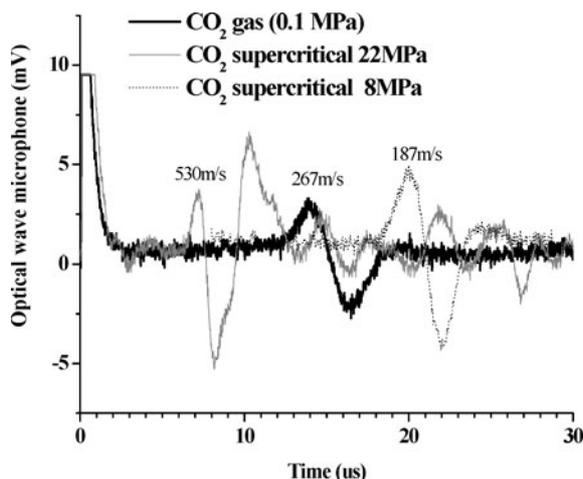


図15 二酸化炭素および超臨界二酸化炭素中における光熱音響波の光波マイクロホン測定結果[33].

レーザーアブレーションによるナノ微粒子作製におけるアブレーション閾値, 固体最高表面温度, 流体圧力のリアルタイム計測が可能となると考えている.

5. 光波マイクロホンの技術的課題

音響工学の視点から, 現在の基礎研究用の実験装置で検出している音の周波数及び音圧の領域の概略(2000年時作成)を図16に示す[18, 21]. これはSN比が2~3程度で非常に大まかに表したものである. 通常の部屋で測定しているため, バックグラウンドノイズが50~60 dB程度存在する条件下での結果である. また, 周囲の振動や電氣的雑音などを嫌って, 最初から300 Hz程度のハイパスフィルタを使用している. 80~90 dB以上の音(音楽)であれば, ホームステレオで比較的きれいに再生して聞くことができる[22]. もし信号処理フィルタを狭帯域にすれば20~30 dB低い音圧レベルの測定が可能である. また, 例えばロックインアンプ(ダイナミックリザーブ100 dB)などが使用できるような測定の場合は, 図4に示した現有計測装置で $\Delta p/p = 5.6 \times 10^{-13}$ 程度の測定が可能になる. なお, 周波数領域は可聴帯から100 kHzまで図示しているが, 4章で一部示したように, さらに高周波の測定も可能である.

総じて, 音響工学分野への適用に関して述べれば, ダイナミックレンジは十分あるので, ひそひそ話が取れるようにSN比を改善することが現状の最大の課題である. ただし, 音響分野のようにSN比が80~100 dBを越えるような高度な測定性能が要求される場面を除けば, いろいろな科学的計測あるいは実用場面に対しては現状性能でも十分に適用できると考えられる.

6. おわりに

光波マイクロホン技術は振動膜を用いずレーザービームにより音を直接検出する方法であり, その開発の起源はプラズマ・核融合分野で研究開発されたプラズマ診断技術を起源としている. 本解説では, その原理, 理論, ハードウェア及び基本特性を示し, またプラズマ現象に関連した音の計測に応用した例を紹介した.

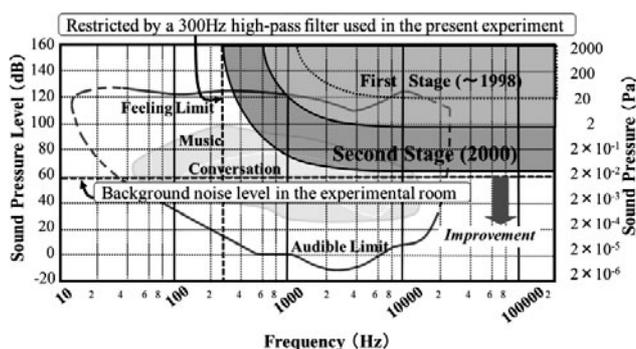


図16 音の利用範囲と光波マイクの開発状況[18].

従来の音測定法すなわち振動膜式マイクロホンにない利点を多数有しており, 音響分野に限らず, 放電・プラズマ分野を含めさらに広範囲に応用されていくことを希望している.

謝 辞

本研究の成果の一部は, 基礎研究に関してはJSPS 科研費基盤(C)(No. 25420419, 代表・園田義人) 他に得られたものである. また, 応用研究に関してはJSPS 科研費基盤(C)(No. 26420395, 代表・中宮俊幸) 他, 及び, JSPS 科研費新学術領域(No. 22110513, 代表・光木文秋), JSPS 科研費若手B(No. 24760319, 代表・光木文秋) にて得られたものである.

参考文献

- [1] 大賀寿郎: 日本音響学会誌 **64**, 650 (2008).
- [2] J.P. Monchalin, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, UFFC-33, 485 (1986).
- [3] A. Korpel, *Acousto-Optics*, 2nd ed., (Marcel Dekker, Inc., New York, 1997).
- [4] G.P. Johnson, J. the Audio Eng. Soc. **28**, 140 (1980).
- [5] G.M. Sessler, the 94th AES Conv. Paper **3525**, 1 (1993).
- [6] J.W. Gregory *et al.*, J. Acoust. Soc. America **119**, 251(2006).
- [7] M.H. de Paula *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **63**, 3487 (1992).
- [8] A. Dobrucki *et al.*, the 96th AES Conv. **3839**, 1 (1994).
- [9] A. Parisky *et al.*, the 107th AES Convention Paper, **4989**, 1 (1999).
- [10] P. Schreiber *et al.*, the 116th AES Conv. Paper, **6132**, 1 (2004).
- [11] H.J. Konle *et al.*, the 14th Int. Symp. on Appl. Laser Tech. to Fluid Mech., 1 (July, 2008).
- [12] Z. Du *et al.*, Opt. Exp. **21**, 30580 (2013).
- [13] Y. Sonoda, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **33**, 3110 (1994).
- [14] Y. Sonoda, Proc. 16th Int. Cong. on Acoust. and 135th Meet. of Acoust. Soc. America, **1**, 427 (1996).
- [15] 田中啓一 他: 電学誌 **122-E**, 362 (2002).
- [16] 園田義人: 光アライアンス **16**, 32 (2005).
- [17] 園田義人: 日本音響学会誌 **62**, 571 (2006).
- [18] 園田義人: 超音波テクノ **23**, 48 (2011).
- [19] Y. Nakazono *et al.*, J. Visualization **11**, 153 (2008).
- [20] Y. Sonoda *et al.*, Advances in Acoustics and Vibration, Article ID 909437, 1 (2012).
- [21] Y. Sonoda *et al.*, Audio Eng. Soc. 135th Conv. Paper, **8924**.

- 1 (2013).
- [22] 園田研究室 HP, http://music.geocities.jp/opto_sonophone/
- [23] D.E. Evans *et al.*, *Plasma Phys.* **24**, 819 (1982).
- [24] Y. Sonoda *et al.*, *Plasma Phys.* **25**, 1113 (1983).
- [25] プラズマ・核融合学会編：プラズマ診断の基礎（名古屋大学出版会，1990）。
- [26] 村田和美：光学（サイエンス社，1979）。
- [27] T. Nakamiya *et al.*, *J. Adv. Oxd. Technol* **13**, 43 (2010).
- [28] T. Nakamiya *et al.*, *J. Adv. Oxd. Technol* **14**, 63 (2011).
- [29] F. Mitsugi *et al.*, *PrzegladElektrotechniczny* **88**, 105 (2012).
- [30] T. Nakamiya *et al.*, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **61**, 24310 (2013).
- [31] F. Mitsugi *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**, 01AC10 (2012).
- [32] F. Mitsugi *et al.*, *Thin Solid Films* **521**, 132 (2012).
- [33] F. Mitsugi *et al.*, *Thin Solid Films* **547**, 81 (2013).



そのだよしと
園田義人

東海大学産業工学部電子知能システム工学
科及び大学院総合理工学研究科教授。1975
年九州大学大学院工学研究科修士課程修
了，九州大学大学院助手，英国原子力局カ
ラム研究所特別研究員，九州東海大学助教授を経て，1992年
より現職。工博，産総研客員研究員。専門はレーザー計測，音
響計測。主に，光の中から音情報を取り出す方法，光波マイ
クロホン（光で音を聞く方法）の開発研究を行っている。



なかみやとしゆき
中宮俊幸

東海大学基盤工学部 医療福祉工学科及び
大学院 総合理工学研究科 教授。専門は
レーザー・プラズマ工学で，パルスレーザー光
照射時の固体表面とレーザー光との相互作用
を，コンピュータ・シミュレーションや実験で解明してき
た。近年は，光波マイクロホンをを用い，沿面放電，レーザー
アブレーション，プラズマジェットなどによって生じる圧力
波の研究に取り組んでいる。



みつぎふみあき
光本文秋

熊本大学大学院自然科学研究科情報電気電
子工学専攻准教授。2002年熊本大学大学
院・博士（工学）。大分大学VBL，熊本大
学助手，助教を経て現職。専門はプラズマ
工学。光波マイクロホンをを用い，沿面放電，レーザーア
ブレーション，プラズマジェットなどによって生じる圧力波の
計測を行っている。最近では，プラズマの農業応用にも取り
組んでいる。