

研究概要報告書【サウンド技術振興部門】

( / )

研究題目	感圧塗料を用いた音圧分布計測技術の開発	報告書作成者	松田佑
研究従事者	松田佑		
研究目的	<p>近年、感圧塗料(PSP: Pressure-Sensitive Paint)による圧力分布計測技術が注目されている。PSP は固体表面の圧力分布を高空間分解能で計測可能な技術であり、種々の工業製品への応用が期待されているが、PSP の実用的な応用範囲は定常状態での計測に限られており、非定常現象の計測に関しては未だ研究段階である。本研究では、ヘテロダイン検出法を PSP に適用することにより、現在の PSP の適用限界を打ち破り、低マッハ数流れにおいて卓越する二重極音の音圧分布計測を可能とすることを旨とする。</p> <p>PSP による計測は、模型表面に塗布された PSP に適切な波長(400 nm 程度)の光を励起光として照射し、PSP に含まれる色素の発光をカメラなどの光検出器によって計測することによって行われる。PSP の発光強度が圧力に応じて変化することに基づき、発光強度画像を取得することによって模型表面での圧力分布を取得することができる。従来、PSP による非定常計測においては、レーザーなどの高強度の励起光と高速カメラを用いた計測システムが用いられている。しかしこれらは高価な機材を必要とする上に、高強度のレーザー照射により色素分子の劣化が促進されるため計測精度が低下する恐れがある。また、計測限界を引き上げるためには高速度カメラの性能向上を待つより他に手がない状況であり、実際にその適用限界は近年ほとんど向上していない。このような現状を打破するためには従来当然のように使用されてきた計測手法を大きく見直す必要があると考えられる。</p> <p>本研究で提案する手法は、ヘテロダイン検出法を用い、励起光強度を強度変調させ PSP を励起する。これによりカメラで撮像される画像は、励起光の強度変調と圧力場の時間変動により変調された PSP 発光強度によって生じるうなり(ビート)信号となる。ヘテロダイン検出ではこのほぼ一定の周波数のうなり信号を検出するために、他の周波数のノイズの影響を受けにくく高感度、高精度な計測が期待できる。また、計測対象となる圧力変動の周波数に対し、励起光の強度変調を適切に選択することによりうなり信号の周波数を小さくできるため、高価な高感度高速度カメラが不要であるという利点もある。これにより、産業機器での音圧分布計測を可能とするシステムの構築を行うことを目的とする。具体的には、1 kHz 程度で 0.1kPa 程度の振幅で変動する圧力変動の検出を旨とする。</p>		

研究内容

下記のような実験装置を構築し、それを基に提案手法の妥当性評価、有効性評価を実施した。

本研究で開発した計測手法は具体的には次のような手順でデータを得る。まず、励起光を強度変調させて PSP を励起発光させ、励起光の強度変調と圧力場の時間変動により変調された PSP 発光強度によって生じるうなり信号を CMOS カメラで検出する(説明書・図 3, 4 参照)。そして得られたうなり信号強度の時系列画像を、ロックインスキームに基づく単純な画像処理により周波数毎の圧力変動値(音圧)へ変換する。このように本研究で提案する手法は、一定強度の励起光を照射し、PSP の発光強度分布画像から圧力分布を得るという従来の PSP 計測法にごく簡単なひと手間を加えるだけであり、産業レベルでの使用にも十分耐え得る簡易なシステムである。

本研究では手法の開発と妥当性評価を行うための計測対象は、共鳴管内での定在波の圧力変動とし、周波数、圧力変動値を変化させながら、高速応答圧力計との比較により計測法の妥当性を評価した(図 1 参照)。共鳴管内での定在波では、周波数及び圧力変動値が定まった場での計測になるため、計測精度の検証には最適な対象であると言える。実際の計測に当たっては、励起光強度変調の周波数を変化させながらうなり信号(画像)の検出を行い、周波数毎の圧力変動値を求めた。図 2 に示すように、共鳴管の共鳴周波数に一致する場合において共鳴周波数に応じた(基本振動 374.1Hz, 2 倍振動 696.1Hz)、縦縞状の音圧分布が得られた。これらは、別途計測している圧力計の値とよく一致した。なお本実験ではカメラのフレームレートは 20Hz である。この結果は、実現象より 1 オーダー小さい画像取得周波数において既報の結果よりも優れた精度で圧力変動計測が可能であることを示しており、本手法の有効性を示す結果である。

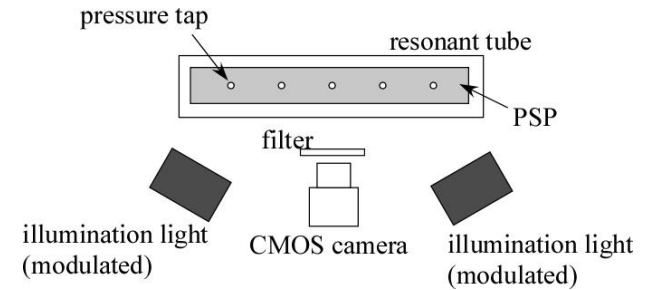


図 1 実験装置概略

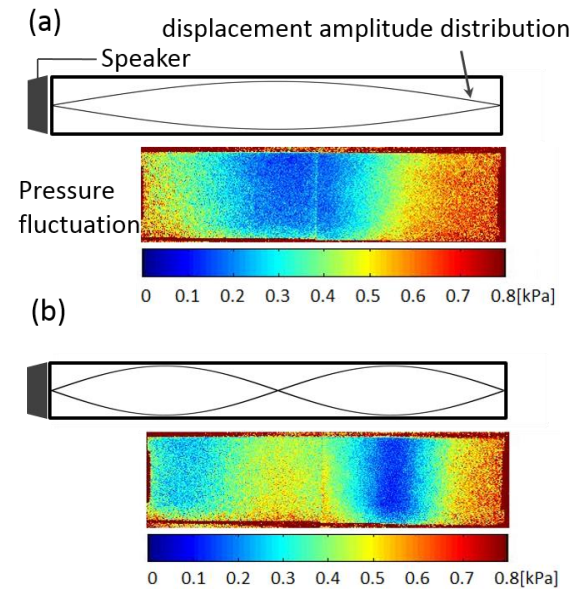


図 2 圧力変動分布

(a) 基本波, (b) 2 倍波

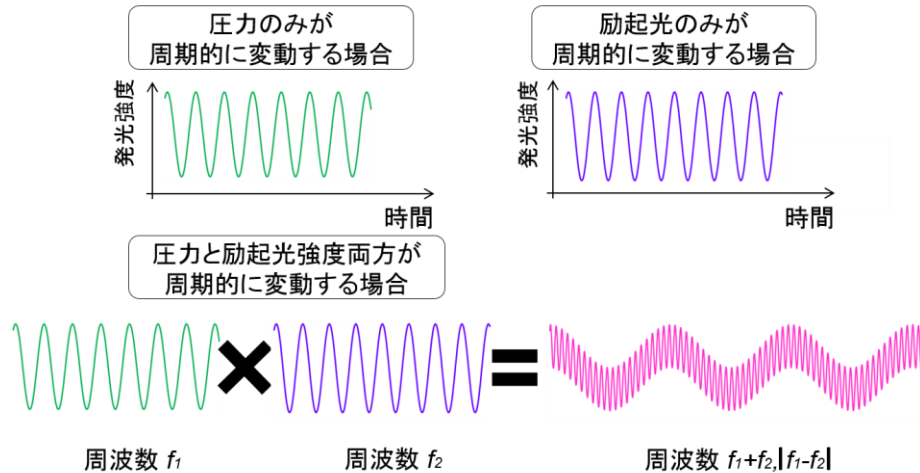
柿原, 松田ら, 日本流体力学会年会 2013 より

研究概要報告書【サウンド技術振興部門】

( / )

<p>研究のポイント</p>	<p>PSP は固体表面の圧力分布を高空間分解能で計測可能な技術であり、種々の工業製品への応用が期待されているが、PSP の実用的な応用範囲は定常状態での計測に限られており、非定常現象の計測に関しては未だ研究段階である。本研究では、ヘテロダイン検出法を PSP に適用することにより、ターゲットとなる周波数の現象を効率良く取得する一方、他の周波数のノイズの影響を排することで高感度、高精度な計測を実現する。また、計測対象となる圧力変動の周波数に対し、励起光の強度変調を適切に選択することによりうなり信号の周波数を小さくできるため、高価な高感度高速度カメラが不要であるという利点もある。これにより、従来技術で達成されている 1 kHz・1kPa 程度の圧力振幅の検出限界を超える手法の提案を行う。</p>
<p>研究結果</p>	<p>本研究では、提案手法の有効性を示すために音波共鳴管内に生じる圧力変動分布計測を実施した。具体的には、周波数、圧力変動値を変化させながら、高速応答圧力計との比較を行った。実際の計測に当たっては、励起光強度変調の周波数を変化させながらうなり信号(画像)の検出を行い、周波数毎の圧力変動値を求めた。本研究では基本振動 370 Hz、2 倍振動 700 Hz、3 倍振動 1050 Hz の 3 つの共鳴状態(3 倍波に関しては研究報告書参照)において圧力変動分布を取得し、圧力計の値との比較を行った。これらは、互いによく一致し、本手法により従来の計測限界を超える 1 kHz 程度で 0.1kPa 程度で時間変動する分布の取得に成功した。</p>
<p>今後の課題</p>	<p>本研究では、従来の計測限界を 1 オーダー上回る圧力分解能での計測に成功した。ただし、スピーカーなどの音響機器内、熱音響機器内、あるいは鉄道車両、自動車などの低マッハ数流れ(マッハ数&lt;0.3)において卓越する二重極音の現象理解や工業製品の設計開発等の実用機器の音源探査等に使用するためにはもう 1 オーダーの圧力分解能の向上が必要である。本研究では、ヘテロダイン検出法を適用することが主目的であったため、PSP そのものの特性にはあまり注意を払わなかった。そこで、今後の課題として、より高感度な PSP の使用によって更なる計測能の向上を図る。本技術は将来的に、模型表面での音圧分布を直接高空間分解能に計測することで、高速鉄道や自動車において大きな問題となっている騒音等の二重極音現象の理解の深化に活用することが可能と期待されており、今後とも研鑽を重ねたいと考えている。</p>

**PSPの発光強度: 圧力・励起光変動に応じて変動**



1. 発光強度が十分得られる撮影速度  $F$  に設定する
2. 共鳴周波数  $f_1$  でスピーカを鳴らす
3. 励起光の周波数  $f_2$  を  $|f_1-f_2|=F/4$  となるように設定する
4. 発生する周波数  $F/4$  の発光をカメラで撮影する

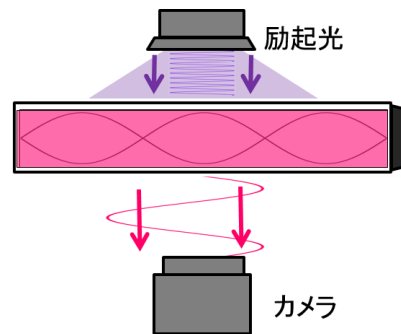
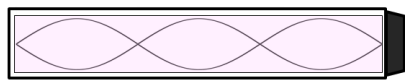


図3 ヘテロダイン検出法を用いたPSP計測システムの原理

左図のように、PSPの発光強度は圧力変動あるいは励起光変動によって変化する。この両者共に周期変動する際には、両者の周波数の差に相当するうなりと、両者の和に相当する高周波の波を合成した波が発生する。本手法では、遅い周波数のうなり周波数の画像を取得することにより、圧力変動を検出する。

図4 ヘテロダイン検出法を用いたPSP計測システムの方法

左図のように、本研究では、ターゲットとなる周波数及びカメラでの画像取得周波数に合わせて励起光周波数を決定する。ターゲットとなる周波数が未知の場合には、励起光周波数を掃引することで、各周波数毎での圧力変動分布図を得ることが可能になる。