



平成25年度研究助成 【サウンド技術振興部門】より

感圧塗料を用いた 音圧分布計測技術の開発

名古屋大学大学院工学研究科
マイクロ・ナノシステム工学専攻
助教 博士（工学）

松田 佑

1. はじめに

感圧塗料（PSP：Pressure-Sensitive Paint）は、酸素消光性を有する色素を用い、固体表面の酸素濃度を計測することによって圧力分布を計測する可視化計測法である。PSPの研究は、1980年代にアメリカ合衆国（NASA Ames Research Center、当時のMcDonnell Douglas社）、当時のソビエト連邦（TsAGI）の各研究機関で開始されたのち、ドイツ（DLR）、フランス（ONERA）、そして日本（当時の航空宇宙技術研究所）と各国で研究されるようになり、近年では航空機の研究開発にも活用されている。PSPは定常流中の1 kPa程度の圧力差を有する圧力分布計測においては既に実用段階であるが、非定常に変化する圧力変動の計測技術としては未だ研究段階である。特にPSPでは物体表面での圧力分布計測が可能であることから、自動車や鉄道等を対象とした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への応用が期待されているものの、現段階では圧力分解能、計測精度の観点から同技術への応用は困難となっている。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ることを目指す。

2. PSPの計測原理

PSPは通常、酸素消光作用を示す色素分子とそれを模型表面に保持するためのバインダーから構成される。PSPによる計測は、模型表面に塗布されたPSPに適切な波長（400nm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（酸素濃度）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。PSP計測原理に関しては参考文献^{1)~3)}を参照されたい。

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。これに対し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。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。うなり信号の周波数は、励起光源の周波数、圧力変動の周波数の差に等しく、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その周波数の4倍のサンプリングレートで検出する。そのため、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。

3. 実験装置と結果

本研究では、ヘテロダイン検出法を適用したPSP計測法の妥当性を評価するために、共鳴管内に生じる圧力変動場の計測を実施した。実験装置は図1のようになっている。励起光源には波長395nmのLEDを用いた。共鳴管は矩形断面（1辺0.1m）で長さ0.5mのものを使用した。またPSPの励起光を透すために紫外透過性のアクリル製となっている。スピーカーを一端に設置し、もう一端は固定端とした。計測対象として基本波の3倍波である周波数1033Hz時の圧力変動分布を計測した。なお共鳴周波数

の計測には別途設けた圧力孔につながれた圧力計（Kulite、XCQ-062-5 SG）を用いた。またPSP計測はCMOSカメラ（Vision Research、Phantom V7.1）を用いて行った。なお、カメラのフレームレートは20Hzとし、ターゲットとなる1033Hzの圧力変動を計測するために励起光の変動周波数を1038 Hzとした。

本研究で使用したPSPは、TLCプレートにPtTFPP（Platinum (II)-tetrakis (pentafluorophenyl) porphyrin）と言われる色素分子をイソプロパノール中で吸着させたものであり、先行研究により今回の計測対象である1kHz程度の圧力変動に対して十分な時間応答性を有することが示されている⁴⁾。

図2にPSP計測によって得られた圧力変動分布を示す。図から、共鳴管内で生じている3倍波が計測されていることが分かる。またPSPにより計測された圧力変動値は、別途圧力孔で計

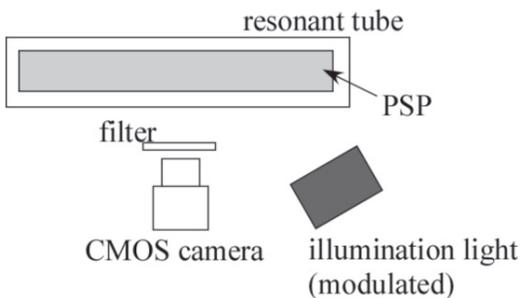


図1 実験装置

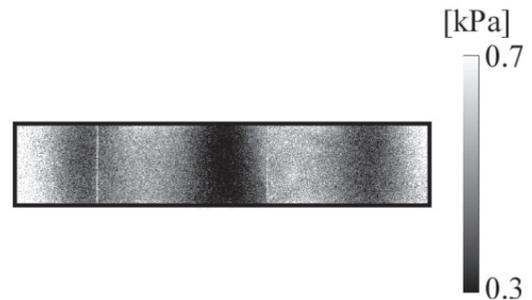


図2 圧力変動分布

測された値と良い一致を示した。従来のPSP計測では1 kPa以下で1 kHzの圧力変動を捉えることは困難であったが、本手法によってこの計測能を達成できることを示した⁵⁾。

4. 今後の展望

本研究では、ヘテロダイン検出法を適用したPSP計測手法の提案とその有効性の調査を行った。本研究で使用したPSPは作成が容易である一方、圧力感度や発光強度にやや劣るものである。また使用したカメラもAD変換が12bitのものと必ずしもPSP計測に最適な構成とはなっていない。そこで今後はより感度と輝度に優れたPSPの使用、量子収率とAD変換に優れたカメラの使用により計測能の一層の向上を目指す。

謝 辞

本研究は、一部にカワイサウンド技術・音楽振興財団、科学研究費補助金の支援を受けて実施された。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 特集：感圧塗料技術の新展開, 可視化情報学会誌, 21(83) (2001).
- 2) Bell, J.H., Schairer, E.T., Hand, L.A., Mehta, R.D., Surface pressure measurements using luminescent coatings, Annual Review of Fluid Mechanics, 33, 155-206 (2001).
- 3) Liu, T., Sullivan, J. P., Pressure and Temperature Sensitive Paints, 2004 : Springer-Verlag.
- 4) Sakamura, Y., Suzuki, T., Matsumoto, M., Masuya, G., Ikeda, Y., Optical measurements of high-frequency pressure fluctuations using a pressure-sensitive paint and Cassegrain optics, Measurement Science and Technology, 13, 1591 (2002).
- 5) Matsuda, Y., Yorita, D., Egami, Y., Kameya, T., Kakihara, N., Yamaguchi, H., Asai, K., Niimi, T., Unsteady pressure sensitive paint measurement based on the heterodyne method using low frame rate camera, Rev. Sci. Instrum., 84, 105110 (2013).