

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 21 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630050

研究課題名(和文)ヘテロダイン検出法の適用による非定常PSP計測の高圧力分解能化

研究課題名(英文)The pressure-sensitive paint technique based on the heterodyne method for a precise pressure measurement

研究代表者

松田 佑(Matsuda, Yu)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教授

研究者番号：20402513

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：近年，感圧塗料(PSP)による物体表面の圧力分布計測技術が大きな注目を集めている．PSPは一般的に用いられている圧力孔による多点計測と異なり，圧力分布計測が可能であり，広い範囲への適用が期待されている．しかしPSPは絶対圧センサーで，その計測域が数kPaから数気圧にわたるため，大気圧近傍の微小な圧力変化の計測は非常に難しく，応用先が非常に限られている．本研究では，PSP計測法にヘテロダイン検出法を適用することで，PSP計測における圧力分解能の向上を目指した．励起光波長を時間変調させPSP発光とのうなり信号を計測することにより，1 kHzで変動する圧力計測において圧力分解能50 Paを達成した．

研究成果の概要(英文)：The pressure-sensitive paint (PSP) technique has received much attention, as this technique enable us to measure pressure distribution. The PSP technique is an optical measurement technique based on oxygen quenching of luminescence. The application of PSP to pressure measurement near an atmospheric pressure is very difficult, because PSP is an absolute pressure sensor and it is difficult to detect small changes in luminescent intensity of PSP induced by small pressure changes. In this study, the heterodyne method was applied to the PSP technique. This method records the luminescent beat signal that result from interference between the PSP emission and modulating illumination light. The proposed method enables the precise measurement of pressure fluctuations, because only the signal at the frequency of interest can be detected. The 1 kHz pressure fluctuation of 50 Pa was successfully measured by this technique.

研究分野：流体工学

キーワード：感圧塗料 ヘテロダイン検出法 非定常流体計測 可視化計測

1. 研究開始当初の背景

近年、感圧塗料(PSP: Pressure Sensitive Paint)による気体流中の物体表面の圧力分布計測技術が大きな注目を集めている。PSPによる圧力計測法では、色素分子に光を照射した際に発せられるルミネッセンス(蛍光またはりん光)が酸素分子との相互作用によって消光される原理を利用する。すなわち、色素分子の発光強度が酸素分圧によって変化することから圧力分布を計測することができる。PSPは、一般的に用いられている圧力孔による多点計測と異なり、塗布した物体表面での面計測が可能であり、また高空間分解能を達成できるため、基礎科学分野から工業製品の研究開発にわたる広い範囲への適用可能性を秘めている。特にPSPによる壁面での高空間分解能での圧力分布計測技術は、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 <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に多大な貢献が期待されるが、現在の非定常PSP計測技術ではこれらの音圧分布や音源分布の計測は極めて困難である。PSPは絶対圧センサーで、その計測域が数kPaから数気圧にわたるため、大気圧近傍の微小な圧力変化の計測は非常に難しく、PSPの適用範囲は航空工学分野などの一部の分野に限られているのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、PSP計測にヘテロダイン検出法を適用することで、PSP計測における圧力分解能の向上を目指す。ヘテロダイン検出法では、励起光強度を強度変調させPSPを励起することにより、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「うなり信号」画像となる。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、高精度な計測が実現できる。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、高感度高速度カメラが不要であるという利点もある。そして得られたうなり信号強度の時系列画像は、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へ変換することができる。

3. 研究の方法

本研究では、ヘテロダイン検出法をPSP計測に適用した際に計測されるうなり信号強度と圧力変動との関係を理論的に求めた。その結果、うなり信号1周期を時間軸に対して4分割して計測し、取得した信号から簡単な計算で得られる値が圧力変動と比例関係になることを示した。またその比例定数は実験的には予め較正実験を行うことにより求められることを示した。

その後、気柱共鳴管(クント管)内に生じる圧力変動場の計測を通じて、提案手法であるPSP計測法とヘテロダイン検出法の融合手法の妥当性及び有効性の調査を実施した。共鳴管は矩形断面(1辺0.1m)で長さ0.5mとした。スピーカーを一端に設置し、もう一端は固定端とした。共鳴管壁面(0.1m \times 0.5m)にPSPを塗布した(図1)。この共鳴管では、スピーカーから370, 700, 1000Hzの圧力変動を生じさせたときに共鳴し、それぞれが基本振動, 2倍振動, 3倍振動となる。実験ではこれらの共鳴周波数においてPSPによる圧力変動分布計測を行った。なお、カ

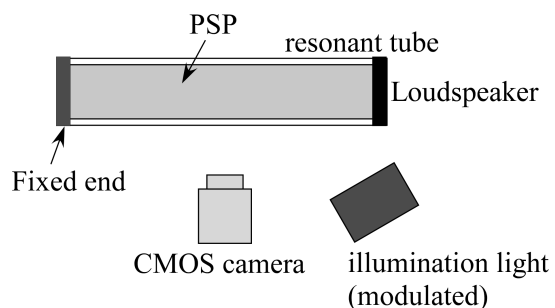


図1 実験装置概要

メラのフレームレートは 20 Hz とした。この設定により、励起光の変調周波数はターゲットである圧力変動の周波数から 5 Hz だけ変化させることとなる。計測したい圧力変動の周波数が未知の場合は、励起光周波数を掃引して計測することで、汎用的に本手法が適用できる。

本研究で使用した PSP は、TLC プレートに PtTFPP (Platinum(II)-tetrakis (pentafluorophenyl) porphyrin) と呼ば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る。TLC プレートに色素を吸着させた PSP は、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. 研究成果

うなり信号と圧力変動間の関係は、以下の式によって関係づけられることを導出した。

$$\Delta p \propto \frac{\sqrt{(J_1 - J_3)^2 - (J_2 - J_4)^2}}{J_1 + J_2 + J_3 + J_4}$$

ここで、 Δp は圧力変動、 J_1, J_2, J_3, J_4 はうなり信号を 4 分割した値である。これより、前述の通り、圧力変動値とうなり信号から得られる信号間には比例関係があることが分かった。

次に、共鳴管内での圧力変動分布計測を行った。図 2 に PSP 計測によって得られた圧力変動分布を示す。図は例として 3 倍波の場合の結果を示している。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 により計測された固定端部での圧力変動値は、別途、管端に設けた圧力孔で計測された値と非常に良い一致を示し

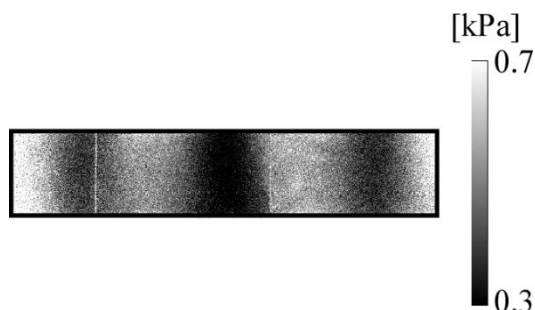


図 2 3 倍波時の圧力変動分布

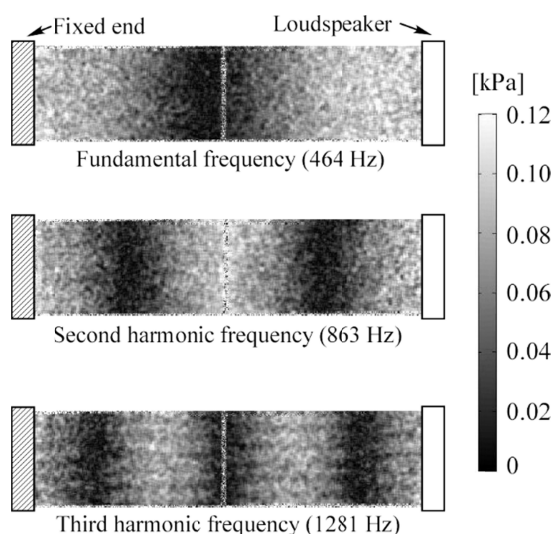


図 3 基本、2 倍、3 倍波時の圧力変動分布

た (両者とも 0.75 kPa であった)。また SN 比の非常に高い計測に成功していることが分かる。なお、励起光の変調周波数を Hz 単位で変更したところ、計測された圧力変動分布は全面で 0 となり、Hz オーダーの周波数分解能を有すことを実証した。周波数分解能に関しては、理論的な限界値が実験条件に応じて変化することを別途確認している。

図 3 に基本、2 倍、3 倍振動に対する圧力変動分布計測結果を示す。ただし、図 2 に対してスピーカから与える圧力変動値を 1/10 程度に低下させた。図 3 では、図 2 に比べ SN 比は低下したものの、十分な圧力分解能で分布計測に成功していることが分かる。また、図 3 中では、基本、2 倍、3 倍振動共に SN 比に違いがないことが分かる。これは、PSP 計測法とヘテロダイン検出法とを融合した本手法の大きな利点の一つであり、計測対象となる圧力変動の周波数に計測 SN 比が依存せず、高い SN 比を確保できる。これは、発生させるうなり信号の周波数を計測側で決定することができるため、カメラによる撮影周波数を低く設定できることによる。通常の高速度 PSP 計測法では、圧力変動の周波数に合わせ、カメラによる撮影周波数を変化させる必要があるために、高周波数の

現象には SN 比が低下し、計測が困難になる。本提案手法は、一層の高速現象に対しても SN 比を維持した計測が可能であり、極めて優位であると言える。

以上のように、本研究では、PSP 計測法にヘテロダイン検出法を融合することで、非定常周期現象計測における圧力分解能の向上を提案し、実証した。また、本手法が計測対象の周波数に依らず、高い SN 比計測が可能であることを示し、その有効性を示した。

また本研究では、並行して、高精度 PSP 計測を実現するために、PSP と感温塗料 (TSP: Temperature-Sensitive Paint) を、インクジェット技術を用いて塗り分けた PSP/TSP センサーの開発を行った。PSP は圧力変化だけでなく、温度変化によっても輝度変化をするため、模型上の非一様な温度分布は計測誤差の主因となる。そこで TSP を併用し、温度分布も計測することで、温度誤差の影響を補正することが期待される。しかし、PSP と TSP を単純に混合する場合、両色素間での干渉により感度が低下する等のセンサー特性が損なわれる問題があるため、この技術は実用化されていない。本研究では、PSP と TSP をインクジェット技術により物理的に分離塗布する手法の開発を行い、その有効性を示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Y. Matsuda, D. Yorita, Y. Egami, T. Kameya, N. Kakihara, H. Yamaguchi, K. Asai, T. Niimi, Unsteady pressure-sensitive paint measurement based on the heterodyne method using low frame rate camera, Review of Scientific Instruments, Vol. 84, 105110, 2013. 査読有
DOI: 10.1063/1.4826085

T. Kameya, Y. Matsuda, Y. Egami, H. Yamaguchi, T. Niimi, Dual luminescent arrays sensor fabricated

by inkjet-printing of pressure-sensitive paints, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 190, 70-77, 2014. 査読有
DOI: 10.1016/j.snb.2013.08.011

〔学会発表〕(計 3 件)

柿原典央, 松田佑, 依田大輔, 江上泰広, 亀谷知宏, 山口浩樹, 浅井圭介, 新美智秀, PSP を用いた共鳴管内の圧力分布計測, 日本流体力学会年会 2013.

T. Kameya, Y. Matsuda, H. Yamaguchi, Y. Egami, T. Niimi, A novel dual luminescent sensor composed of discrete pressure- and temperature-sensitive paint arrays, The 16th international symposium of flow visualization, 2014. 査読有.

Y. Matsuda, N. Kakihara, D. Yorita, Y. Egami, T. Kameya, H. Yamaguchi, K. Asai, T. Niimi, The PSP technique combined with the heterodyne method for a precise measurement of pressure fluctuation, The 16th international symposium of flow visualization, 2014.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/mtfe/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 佑 (MATSUDA, Yu)

名古屋大学エコトピア科学研究所・准教授
研究者番号：20402513

(2) 研究分担者

江上 泰広 (EGAMI, Yasuhiro)

愛知工業大学工学部・教授

研究者番号：80292283