

令和元年6月10日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04265

研究課題名(和文) 光学的圧力センシング法の微圧，移動体，液体流れ計測への展開

研究課題名(英文) Development of optical pressure measurement techniques for small-amplitude fluctuation, moving body and liquid flow

研究代表者

亀田 正治 (Kameda, Masaharu)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70262243

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：非侵襲的光学圧力測定のためのいくつかの方法を開発した。まず、感圧塗料(PSP)について、PSPと騒音計の相互相関を含むコヒーレント出力(COP)を用いることが、空力騒音による小振幅変動の周波数領域測定に有効であることを示した。次に、回転翼や変形翼などの移動体の圧力計測システムを構築し、物体表面の位置と圧力を同時に決定することを可能にした。最後に、液体中の圧力測定に応用できる光学式フィルムセンサの構造を検討し、膜表面に担持された金ナノ粒子のプラズモン共鳴による光学特性の変化から圧力が測定できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

圧力測定は、流体計測の中核をなし、古くから多くの方法が開発されているが、いまだに測定不可能な対象が数多く存在する。本研究では、カメラによる表面圧力分布測定法を用いて、初めて、送風機が発する空力騒音に起因する微小な圧力変動や、移動する物体の位置と圧力を同時に取得することを実現した。また、カメラによる表面圧力分布をとらえる有効な方法が存在しない液体流れについても、ナノテクノロジーによる表面修飾法を駆使したフィルムセンサの開発に成功した。これらの成功は、身の回りの流れ関連装置の開発や現象解明に役立つ。

研究成果の概要(英文)：We developed several methods for noninvasive optical pressure measurement. First, with regard to pressure sensitive paint (PSP), it was effective for frequency-domain measurement of small-amplitude fluctuation due to aerodynamic noise to use the coherent output power (COP) involving cross correlation between PSP and sound level meter. Next, we constructed a pressure measurement system of moving object such as rotor and deformed wings. It enables us to determine the position and pressure of the body surface simultaneously. Finally, we examined the structure of an optical film sensor that can be applied to the pressure measurement in liquid. We showed that the pressure can be measured from the change in optical characteristics by plasmon resonance of the gold nanoparticles supported on the film surface.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 航空宇宙工学 計測工学 風洞実験

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

自動車周りの風切音、ファン騒音、航空機離着陸時の空力騒音、コンプレッサ、タービンの旋回失速など、圧力「場」が重要な役割を果たす現象が数多く存在する。物体表面の圧力を非侵襲で測る光学的方法として、感圧塗料 (Pressure Sensitive Paint, PSP) の開発が進んでいる。PSP 計測は、厚みの薄い翼など適用対象の広さ、圧力場の面情報が得られる情報量の多さ、適当な光源とカメラがあれば計測可能という簡便さ、の諸点で従来の圧力センサによる点計測に比べて優位に立つ。

しかし、現行の PSP は、その測定原理から、空気圧専用でありポンプなど水中の物体には適用できない。また、圧力感度が小さく、空力騒音を評価するために必要な微圧変動 [O(1 Pa)] をとらえるには、データのポスト処理に工夫が必要である。さらに、移動物体に対する PSP 計測の適用は、緒に就いたばかりである。

### 2. 研究の目的

以上の背景に基づき、流体力学/光物理/光化学を専門とする研究者でチームを組み、次のテーマに取り組んだ: (1) 空力騒音を評価に必要な微圧変動をとらえるための発光塗料 (感圧塗料, PSP) 計測データ画像処理法の開発, (2) 移動物体や回転翼の表面定常、非定常圧力場計測システムの構築と適用, (3) 液体中でも使える光学的感圧フィルムセンサの開発。 (1) では、着目周波数を取り出す相関データ解析、フィルタ処理を組み合わせ、振幅 O(1 Pa) の微小圧力変動をとらえることを目指した。 (2) では、高速回転するファンやコンプレッサインペラへの PSP 計測適用可能性の評価、および移動物体の計測に適した PSP・物体位置同時測定システムの構築を進めた。 (3) では、金属ナノ粒子のプラズモン共鳴を原理とする新たなセンサを開発し、水流中の模型表面圧力を取得することを目指した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 微圧変動をとらえるための感圧塗料 (PSP) 計測データ画像処理法の開発

気流中に置かれた二次元 NACA 0012 翼から発せられる後縁 (TE) ノイズによる表面圧力変動を対象に、多孔質陽極酸化アルミニウム PSP (AA-PSP) による測定を行った。測定データを用いて微圧変動抽出に適したデータ処理法を検討した。PSP の発光励起には青色レーザダイオードを用い、発光分布の測定には、12 bit CMOS カメラを用いた。PSP 計測における標準的な強度法に基づいて発光強度分布を圧力に変換した。高速フーリエ変換 (FFT) に基づく 3 つの画像処理方法を試験して、非定常 PSP データの信号対雑音比 (SNR) の改善におけるそれらの効率を決定した。それらは、2 つの基本的な FFT 手法 (全時系列データを一括して周波数領域に変換する方法、および、全時系列データをセグメント化し、それらの周波数領域データをアンサンブル平均する方法) と、同時に計測した騒音計の測定信号と PSP データの間の相互相関を含むコヒーレントアウトプットパワー (COP) である。

#### (2) 移動物体や回転翼の表面定常、非定常圧力場計測システムの構築

移動する物体表面の圧力場をカメラ撮影でとらえるいくつかの手法を検討した。

まず、高速回転するコンプレッサ用インペラを対象に、PSP 計測における標準的な強度法に基づく高速カメラ画像計測を行い、圧力分布取得可能性を検討した。物体の移動によるブレを防ぐため、露光時間を 1  $\mu$ s 程度に設定して撮影を行った。これに合わせて、1  $\mu$ s 程度の発光立ち上がり時間を有するルテニウム色素ベースの AA-PSP を用いた。PSP および補償用の温度データを得るための感温塗料 (TSP) を塗布したコンプレッサ用インペラを 133,000 rpm で回転させ、さまざまな吸い込み質量流量の下で測定した。高速度カメラおよび励起光源として用いた青色 LED は、ギャップセンサによる羽根車の固定回転角に同期した信号を使用して制御した。

次に、もう一つの PSP 計測法である寿命法に基づく撮影システムを構築した。寿命法は、励起光強度の空間的非一様性による影響を受けないため、移動体の計測に適している。構築したシステムを用いて振動翼、ファン表面の圧力場計測を試みた。この際、カメラによる発光寿命測定を容易にするため、比較的寿命の長いポルフィリン系色素ベースのポリマー/セラミック混合 PSP を用いた。

最後に、寿命法による PSP による圧力場と、ステレオ撮影による物体 3 次元変形量の測定を同時に行う計測システムの構築を進めた。動的変形をともなう物体表面形状の同定に適したランダムドットパターンを PSP に付加する方法を詳しく検討した。

#### (3) 液体中でも使える光学的感圧フィルムセンサの開発

通常の PSP は、発光色素強度 (あるいは寿命) の酸素濃度依存性を利用して圧力を間接的に求めている。空気中では酸素濃度と圧力は比例するためこの方法が適用可能である。しかし、溶存酸素濃度と圧力との間には依存関係がない液体中ではこの原理は適用できない。そこで、色素に代わる光学的圧力センサとして、金属ナノ構造を持つ薄膜を用いる手法を検討した。金属ナノ構造は、粒子間ギャップで発生するプラズモン共鳴により特定波長の光が吸収される性質がある。この吸収ピーク波長は粒子間距離に強く依存しているため、光吸収特性を圧力の印加による膜のたわみと関連付けることで、圧力の算出が可能になると見込んだ。金の蒸着によ

って生じる島状構造を用いて、ランダムなギャップを持つ金ナノ構造を製作した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 微圧変動をとらえるための感圧塗料 (PSP) 計測データ画像処理法の開発

本実験の TE ノイズの支配周波数は約 940 Hz である。まず、PSP データのノイズ源を予備試験により評価したところ、200 Hz 以上の周波数領域では、カメラのランダムフォトンショットノイズが支配的であることが分かった。次に行った本実験から、10 kfps で記録された 40,960 枚の連続 PSP 画像を用いれば TE ノイズに関連した圧力変動をとらえられることが分かった。パワースペクトルによる定量的比較から、COP が TE ノイズに直接関連する圧力変動を識別する最も効果的な方法であることが分かった。本測定データに COP を使用すると、4 Pa の分解能で圧力振幅を識別することができた (雑誌論文 2, 3 学会発表 8, 10)。

##### (2) 移動物体や回転翼の表面定常、非定常圧力場計測システムの構築

高速回転するコンプレッサ用インペラの実験では、インペラ上の圧力場は TSP による適切な温度補償の助けを借りて首尾よく得られた (雑誌論文 1, 学会発表 4)。合わせて、空気の圧縮にともなう高温化により、ルテニウム色素の発光が著しく低下する現象を見出した。次のステップとして、この問題の解決が望まれる。

寿命法計測をいくつかの対象に適用したところ、励起光強度の非一様性の影響が抑えられ、かつ、強度法と同等のノイズレベルで測定が可能であることが分かった (学会発表 5, 7, 9)。特に、移動体計測では、停止時と移動時の位置ズレの影響を受けないだけでなく、PSP と同時に補償用の温度データの取得も容易になるため、微小な圧力の違いをとらえるのに有効である (学会発表 3)。

動的変形を伴う物体の表面圧力分布を計測するための PSP/変形量同時計測では、発光強度に分布を持たせたランダムドット PSP により変形量の同定が可能であること、変形物体の座標データを取り入れることで、変形時の圧力算出も可能であることが分かった (学会発表 1)。

##### (3) 液体中でも使える光学的感圧フィルムセンサの開発

製作した感圧膜に圧力印加を行ったところ、十分な圧力を与えれば、吸光ピーク波長が遷移することが分かった。微小圧力範囲での吸光ピーク波長の遷移を実現するには、感圧膜を薄くする、センサ直径を大きくするといった改良により、微小圧力の検出も可能であるとの見通しを得た (学会発表 2)。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

1. Kitamura, T., Kameda M., Watanabe, W., Horimoto, K., Akimoto, K. and Akahori, A. (2018) "Measurement of unsteady pressure field in a turbocharger compressor using pressure-sensitive paint," Proceedings of ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference & Exposition, GT2018-76267. 査読有 .  
<https://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=2700683>
2. Noda, T., Nakakita, K., Wakahara, M., and Kameda, M. (2018), "Detection of small-amplitude periodic surface pressure fluctuation by pressure-sensitive paint measurements using frequency-domain methods," Experiments in Fluids, Vol. 59: 94. 査読有. <https://doi.org/10.1007/s00348-018-2550-z>.
3. Noda, T., Kameda, M. and Nakakita, K. (2017) "Improvement of signal-to-noise ratio for unsteady PSP measurement," Proceedings of the 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum, AIAA 2017-0702. 査読有.  
<https://doi.org/10.2514/6.2017-0702>.

[学会発表] (計 12 件)

1. 今井 雅人, 山本 洵, 中北 和之, 亀田 正治 (2019) "動的変形を伴う翼表面圧力分布計測法の開発," 第 51 回流体力学講演会 / 第 37 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム (2019 年 7 月 3 日, 早稲田大学国際会議場, 東京都新宿区).
2. 竹林 永人, 岩見 健太郎, 安 忠烈 (2018) "光学的感圧膜のためのプラズモン共鳴吸収フィルムの研究," 日本機械学会 第 9 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム (2018 年 10 月 30 日, 札幌市民交流プラザ, 北海道札幌市).
3. 若原 将希, 亀田 正治, 中北 和之 (2018) "移動物体表面圧力場に対する寿命法 PSP 計測システムの構築," 第 50 回流体力学講演会 / 第 36 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム (2018 年 7 月 5 日, 宮崎市民プラザ, 宮崎県宮崎市).
4. Kitamura, T., Kameda M., Watanabe, W., Horimoto, K., Akimoto, K. and Akahori, A. (2018) "Measurement of unsteady pressure field in a turbocharger compressor using pressure-sensitive paint," ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference & Exposition (June 11, 2018, Oslo, Norway).
5. 若原 将希, 亀田 正治, 中北 和之 (2017) "低速下における PSP 非定常圧力場計測への寿

- 命法適用評価”, 第 13 回 学際領域における分子イメージングフォーラム (2017 年 11 月 17 日, 宇宙航空研究開発機構 調布航空宇宙センター, 調布).
6. 長谷川 雄将, 亀田 正治, 中北 和之, 野田 貴宏 (2017) “非定常 PSP データ処理における COP の応用,” 第 13 回 学際領域における分子イメージングフォーラム (2017 年 11 月 17 日, 宇宙航空研究開発機構 調布航空宇宙センター, 調布).
  7. Wakahara, M., Kameda, M. and Nakakita, K. (2017) “Lifetime-based PSP measurement for unsteady pressure field,” The 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (October 28, 2017, 沖縄コンベンションセンター, 沖縄県宜野湾市).
  8. Kameda, M., Noda, T., Wakahara, M., and Nakakita, K. (2017) “Detection limit of small-amplitude pressure fluctuation by unsteady PSP measurements,” The 6th German-Japan Joint Seminar on High-speed molecular imaging technology for interdisciplinary research (September 26, 2017, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany).
  9. Yamamoto, J. Wakahara, M., Kameda, M. and Nakakita, K. (2017) “Unsteady PSP measurement of a cylinder in low-speed flow by lifetime method,” The 6th German-Japan Joint Seminar on High-speed molecular imaging technology for interdisciplinary research (September 26, 2017, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany).
  10. Noda, T., Kameda, M. and Nakakita, K. (2017) “Improvement of signal-to-noise ratio for unsteady PSP measurement,” The 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum 2017 (January 10, 2017, Gaylord Texan, Grapevine, Texas, U.S.A.).
  11. Noda, T., Nakakita, K. and Kameda, M. (2016) “Unsteady PSP measurement of surface pressure fluctuation due to trailing edge noise on a NACA0012 airfoil,” The 31st International Congress on High-speed Imaging and Photonics (November 9, 2016, ホテル阪急エキスポパーク, 大阪府吹田市).
  12. 野田 貴宏, 亀田 正治, 中北 和之 (2016) “狭帯域での周波数成分抽出による非定常 PSP 計測ノイズ低減法,” 第 48 回流体力学講演会 / 第 34 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム (2016 年 7 月 8 日, 金沢歌劇座, 石川県金沢市).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名 : 中北 和之

ローマ字氏名 : (NAKAKITA, Kazuyuki)

所属研究機関名 : 宇宙航空研究開発機構

部局名 : 航空技術部門

職名 : 主管研究開発員

研究者番号 (8 桁) : 50358595

研究分担者氏名 : 岩見 健太郎

ローマ字氏名 : (IWAMI, Kentaro)

所属研究機関名 : 東京農工大学

部局名 : 大学院工学研究院

職名 : 准教授

研究者番号 (8 桁) : 80514710

研究分担者氏名 : 天尾 豊

ローマ字氏名 : (AMAO, Yutaka)

所属研究機関名 : 大阪市立大学

部局名：複合先端研究機構

職名：教授

研究者番号（8桁）：80300961

(2)研究協力者

研究協力者氏名：野田 貴宏，渡邊 渉，堀本 一貴，山本 洵，若原 将希，北村 崇明，長谷川 雄将，今井 雅人，石本 隆

ローマ字氏名：(NODA, Takahiro), (WATANABE, Wataru), (HORIMOTO, Kazutaka), (YAMAMOTO, Jun), (WAKAHARA, Masaki), (KITAMURA, Takaaki), (HASEGAWA, Takamasa), (IMAI, Masato), (ISHIMOTO, Takashi)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。