

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289029

研究課題名(和文) 塗装型高速応答感圧塗料による移動物体周り非定常圧力場計測法の確立

研究課題名(英文) Development of measurement technique on unsteady surface pressure field on moving bodies using fast-responding pressure-sensitive paints

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) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：ファンや風車のような回転翼全体の表面圧力分布を把握することを最終目的に、高速応答型感圧塗料(PSP)による非定常圧力場計測法の開発を進めた。まず、圧力・温度・湿度感度を独立して測定する装置を製作し、それらの感度を定量的に定めた。固定翼、円柱を対象にした実験から、流速測定から得た渦渡場とよく相関する圧力場がPSPから得られること、適切なデータ処理法を用いればPSPによる変動圧力振幅の測定限界を10 Pa以下にまで広げられることを示した。ファン表面の圧力は、1 kPa以内の動圧分布を100 Pa程度の精度でとらえられ、ラージエディシミュレーションによる解析結果とも良く一致することが分かった。

研究成果の概要(英文)：We developed the measurement system for detecting unsteady surface pressure field by fast-responding pressure-sensitive paints (PSP). Ultimate goal of our study is to analyze the surface pressure field on rotating machinery such as fan and wind turbine. First, we precisely determined the pressure, temperature and humidity sensitivities by a new apparatus in which these quantities are varied independently. We presented the pressure signal measured by PSP is correlated well with vorticity field measured by particle image velocimetry. Then we developed a sophisticated image processing technique by which we dramatically reduced error on unsteady pressure measurement within 10 Pa. Finally, we successfully measured pressure field on rotating fan within the range of 100 Pa. We found that the measured pressure distribution agrees well with the distribution calculated using large-eddy simulation.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 流体計測 航空宇宙工学 計測工学 風洞実験

1. 研究開始当初の背景

(1) ファンや風車のような回転翼による空力騒音は生活環境における代表的な騒音源である。この騒音の評価には、翼表面全体の圧力分布を知る必要がある。感圧塗料 (PSP) は、半導体圧力センサの設置が困難な薄い物体にも適用でき、その輝度分布から面全体の圧力分布を一時 (いちどき) に取得可能、という特徴を有し、従来、圧力計測は不可能、とされてきた回転翼への適用性の確立が期待されている。

(2) 移動物体における PSP 計測は、最近、研究事例が増えている。しかし、最新の研究例でも繰り返し周波数の低い (15 Hz) パルスレーザを用いており、翼表面圧力分布の時間変化を得るには至っていない。

(3) ファンを含めて、一般に低速流 (0 (10 m/s)) 中に置かれた物体表面の圧力分布を取得するには、その動圧レベルである 1 kPa を下回る解像度での計測が必要である。さらに、空力音と相関する物体表面圧力変動の振幅は 10 Pa 以下のオーダと考えられており、これまでの PSP 計測の精度では計測不可能であった。

2. 研究の目的

(1) ファンや風車のような回転翼全体の表面圧力分布を把握することを目指して、高速応答感圧塗料 (Pressure-sensitive Paint, 以下 PSP) による移動物体周り非定常圧力場計測法を確立する。

(2) 高速応答性を有する 2 種類の PSP (シリカ超微粒子 PSP, 多孔質陽極酸化アルミニウム PSP) を対象に、圧力計測精度を高める感圧塗料出力の温度・湿度依存性補償手法の開発、回転体非定常圧力場計測のための高速度カメラ撮影法、画像データ処理法の開発を進める。

(3) ファンを用いた実証試験を実施し、CFD (非圧縮 LES) 解析結果との比較を通じて、0.1 kPa 以下の振幅を持つ表面圧力変動分布を定量的にとらえる計測システムを構築し、空力音響解析に対する感圧塗料計測の有効性を示すことを目指す。

3. 研究の方法

(1) PSP の出力特性を精密に評価するため、まず、PSP 出力の温度・湿度依存性補償法を検討した。大型恒温恒湿器と飽和塩法による調湿を組み合わせ、図 1 に示す。温度、湿度、圧力を独立に制御できる PSP 較正試験装置を構築した。この装置を用いて、AA-PSP 発光特性を詳しく調べた (雑誌論文, 学会発表,)

(2) 回転体発光画像撮影システムの構築と

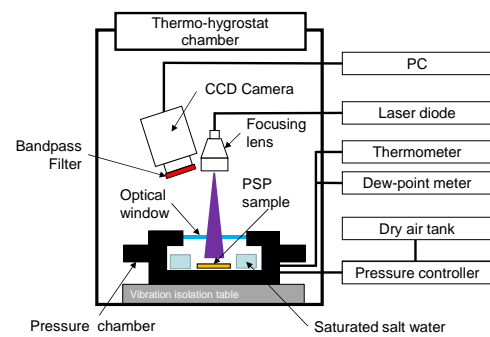


図 1 圧力・温度・湿度感度測定装置

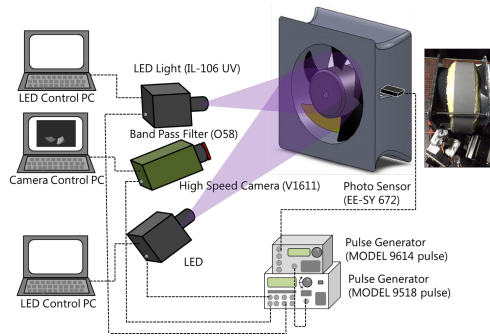


図 2 ファン表面 PSP 計測装置

圧力算出画像処理プログラムを開発した。高速度ビデオカメラとレーザダイオード光源を用いて、回転中の小型ファン表面に塗布した PSP, 感温塗料 (TSP) 画像を取得するシステムを構築した (図 2, 学会発表)。また、異なる 2 枚の翼面上の PSP, TSP 出力を組み合わせ合わせた処理を行うために、翼外縁を正確に一致させる画像処理アルゴリズムを構築した (雑誌論文)。

(4) PSP/PIV 複合計測による空力音源探査方法を構築した。円柱を対象に、表面変動圧力場を PSP によって、円柱周りの速度場を PIV によって測定する風洞実験を行った (雑誌論文, 学会発表,)。

(5) 最後に、発光量変化の時系列画像データから微小変動圧力を取り出すために、NACA0012 翼の後縁ノイズを検討対象にノイズ源の特定と、ノイズ低減法の改良を進めた (学会発表,)

4. 研究成果

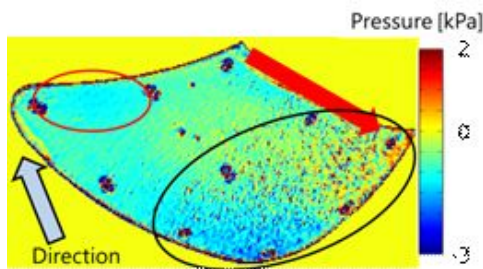
(1) 大型恒温恒湿器と飽和塩法による調湿を組み合わせによる温度、湿度、圧力を独立に制御できる PSP 較正試験を用いて、高速応答型 PSP の一つである AA-PSP の発光特性を評価した結果、温度、相対湿度、圧力の違いによる発光量の変化はそれぞれ独立しており、それぞれに対する感度を用いて a priori に圧力を定めることができることを示した (雑誌論文, 学会発表,)。また、温度、湿度の違いが周波数応答性に与える影響の評価も行い、風洞実験で変化する範囲内であれば、これらは大きな影響を与えない、

ということも分かった(学会発表,)。

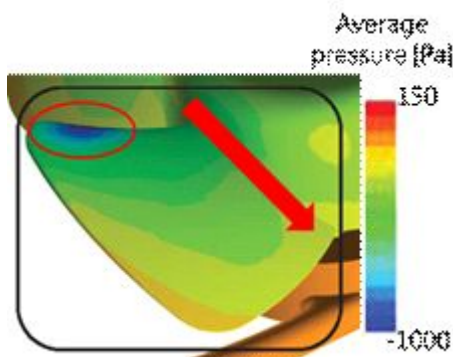
(2) 発光量変化の時系列画像データから、微小変動圧力を取り出すために、ノイズ源の特定と、画像処理法(特異値分解(SVD)法(Pastuhoff et al. Meas. Sci. Technol. 2013)、画像内各点輝度値周波数スペクトル積算による方法(Nakakita AIAA Paper, 2013)の比較検討を行った結果、本計測の主なノイズ源は、カメラショットノイズであること、このノイズが卓越するため、Pastuhoff らによる特異値分解に基づく PSP ノイズ低減法では、流れ場由来の変動が有効に抽出できないことがわかった(学会発表,)。

(3) 前節で測定対象とした後縁騒音は純音性の高いノイズであり、この種のノイズは、流れ場由来の変動周波数付近のみを取り出すバンドパスフィルタ処理が有効であり、バンドパスフィルタを狭帯域化することで、数 Pa の振幅を持つ 2kHz の変動まで抽出可能(オリジナルの SVD 法では 20 Pa)であることがわかった(学会発表)。

(4) シリカ超微粒子をバインダとする PSP を用いて、回転するファン表面の圧力分布を測定した結果、基準となる静止状態の翼画像と回転時のスナップショットの位置を 1 ピクセル以内で一致させ、同時並行で取得した感温塗料(TSP)による温度場データを温度補償に用いることで、1 kPa 以内の動圧分布を 100 Pa 程度の精度でとらえることに成功した(図 3(a))。さらに、同じファンに対する LES 計算値(図 3(b))と比較し、両者が良く一致することも分かった(学会発表)。



(a) PSP/TSP 計測からの算出結果



(b) LES を用いた CFD 解析結果

図 3 ファン表面圧力分布

(5) 最後に、PSP/PIV 複合計測による物体周り渦度場と物体表面圧力場の相関解析を行った。円柱を対象とした風洞実験から、両者に良い相関があることが確認できた(雑誌論文, 学会発表,)。

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 3 件)

野邑佑二, 亀田正治, 中北和之, 加藤裕之, 小池俊輔 (2015), "円柱周り流れの非定常圧力, 渦度場に対する PSP/PIV 複合計測," 可視化情報学会論文集, 査読有, Vol. 35, pp. 1-6.

doi: 10.3154/tvsj.35.1

Kameda, M., Yoshida, M., Sekiya, T. and Nakakita, K. (2015), "Humidity effects in the response of a porous pressure-sensitive paint," Sensors and Actuators B: Chemical, 査読有, Vol. 208, pp. 399-405.

doi:10.1016/j.snb.2014.11.052

Makoshi, T., Tanaka, T., Yoshida, M., Tajika, Y., and Kameda, M. (2013), "Image registration for unsteady PSP measurement over a rotating fan," Proceedings of the 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 査読有, Paper 02-09-2.

[学会発表](計 14 件)

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)

Kameda, M. (2015) "Fast-responding pressure-sensitive paints for unsteady flow measurements," The 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (June 15, 2015, University of Naples Federico II Conference Centre, Naples, Italy), K1, 招待講演.

Noda, T., Nakakita, K. and Kameda, M. (2015) "Noise reduction technique using singular value decomposition for unsteady PSP measurement," The 5th Japanese-German Joint Seminar Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research (September 23, 2015, 産業総合技術研究所, 茨城県つくば市), P12.

Watanabe, W. and Kameda, M. (2015) "Investigation of the factor of frequency response on fast-responding

PSP," The 5th Japanese-German Joint Seminar Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research (September 23, 2015, 産業総合技術研究所, 茨城県つくば市), P13.

野田貴宏, 亀田正治, 中北和之 (2015) "非定常 PSP 計測における特異値分解を用いたノイズ低減法", 第 47 回流体力学講演会 / 第 33 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム (2015 年 7 月 3 日, 東京大学 生産技術研究所, 東京都目黒区), 2C09.

渡邊渉, 亀田正治 (2015) "高速応答型 PSP の周波数応答に対する湿度の影響", 第 47 回流体力学講演会 / 第 33 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム (2015 年 7 月 3 日, 東京大学 生産技術研究所, 東京都目黒区), 2C10.

兼村寛人, 田近義宏, 亀田正治 (2015) "感圧塗料によるファン表面の圧力測定," 日本機械学会 第 93 期 流体工学部門 講演会 (2015 年 11 月 7, 8 日, 東京理科大学, 東京都葛飾区), No. 1007.

田近義宏, 馬越太郎, 吉田匡秀, 亀田正治, 中北和之 (2014) "感圧塗料を用いたファン表面圧力分布計測," 日本機械学会 関東支部 第 20 期総会・講演会 (2014 年 3 月 15 日, 東京農工大学小金井キャンパス, 東京都小金井市), No. 20508.

関谷翼, 亀田正治, 吉田匡秀, 中北和之 (2014) "高速応答型感圧塗料計測における湿度依存性の評価," 日本機械学会 関東支部 第 20 期総会・講演会 (2014 年 3 月 15 日, 東京農工大学小金井キャンパス, 東京都小金井市), No. 20511.

亀田正治, 吉田匡秀, 関谷翼, 中北和之 (2014) "多孔質陽極酸化アルミ感圧塗料の応答に対する湿度の影響", 第 46 回流体力学講演会 / 第 32 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム (2014 年 7 月 4 日, 弘前文化センター, 青森県弘前市), 2A14 (流体力学部門最優秀賞受賞).

Kameda, M., Nomura, Y., Seya, Y., Nakakita, K., Kato, H. and Koike, S. (2013) "Combined measurement of aerodynamic sound source around a circular cylinder by unsteady PSP and PIV," The 4th Japanese-German Joint Seminar on Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research (September 23, 2013, Universitat der Bundeswehr Munchen, Munich, Germany).

Makoshi, T., Tanaka, T., Yoshida, M., Tajika, Y., and Kameda, M. (2013) "Image registration for unsteady PSP measurement over a rotating fan," The 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology

(November 21, 2013, サポートホール高松, 香川県高松市).

野邑佑二, 瀬谷佑介, 亀田正治, 中北和之, 加藤裕之, 小池俊輔 (2013) "円柱周りに非定常流れに対する PIV/PSP 複合計測," 第 45 回流体力学講演会 / 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, (2013 年 7 月 5 日, タワーホール船堀, 東京都江戸川区), 2B10.

吉田匡秀, 馬越太郎, 野邑佑二, 亀田正治, 中北和之 (2013) "高速応答型 PSP に対する湿度補正法の開発," 第 51 回飛行機シンポジウム (2013 年 11 月 20 日, サポートホール高松, 香川県高松市).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等
<http://web.tuat.ac.jp/~kamelab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

亀田 正治 (KAMEDA, Masaharu)
東京農工大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 7 0 2 6 2 2 4 3

(2) 研究分担者

天尾 豊 (AMAO, Yutaka)
大阪市立大学・複合先端研究機構・教授
研究者番号: 8 0 3 0 0 9 6 1

中北 和之 (NAKAKITA, Kazuyuki)
宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究領域リーダー
研究者番号: 5 0 3 5 8 5 9 5

横山 博史 (YOKOYAMA, Hiroshi)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 6 0 5 8 1 4 2 8

(3) 連携研究者

飯田 明由 (IIDA, Akiyoshi)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 3 0 3 3 8 2 7 2