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*

野邑 佑二¹⁾, 亀田 正治²⁾, 中北 和之³⁾, 加藤 裕之³⁾, 小池 俊輔³⁾

Combined Measurement of Unsteady Pressure and Vorticity Fields of the Flow around a Cylinder by PSP and PIV

Yuji NOMURA, Masaharu KAMEDA,
Kazuyuki NAKAKITA, Hiroyuki KATO, and Shunsuke KOIKE

ABSTRACT

A combined measurement of velocity field and surface pressure distribution around a two-dimensional cylinder in a low-speed wind tunnel was conducted using unsteady pressure-sensitive paint (PSP) and time-resolved particle image velocimetry (PIV). We measured pressure fluctuation on the surface of the cylinder as well as spatial distribution of the vorticity fluctuation behind the cylinder. Then we calculated the spatial distribution of coherence for surface pressure and vorticity. Finally, we determined characteristic decay length of coherence in spanwise direction of the cylinder. We obtained good agreement between the characteristic lengths determined by surface pressure and by vorticity. This agreement implies that the unsteady PSP is potentially a good tool for aeroacoustic analysis.

Keywords: Aeroacoustics, Pressure-sensitive Paint, PIV, Coherence

1. はじめに

環境適合性が求められる輸送機器(鉄道, 自動車, 航空機)の空力騒音は, 物体表面での流れのはく離や渦と物体との相互作用にともなう渦度の変動がもとで生じる¹⁾. 特に, 低速流れに置かれた物体からの発生音は, 物体表面の圧力変動をともなう二重極音が支配的とされる. この表面圧力変動をとらえるためには, 流れの動圧レベル(100 Pa)以下の精度を持つ計測手段が必要である. また, より本質的な現象の理解には, 近傍の速度場情報に基づく渦度場の時系列データも必要である.

感圧塗料 (Pressure Sensitive Paint, PSP) は色素の発光強度(寿命)から圧力(酸素濃度)を得る分子センサの一種である. PSP を用いれば, マイクロ流れから航空機レベルまでの幅広いスケールに対して, サブマイクロ秒オーダーの時間分解能で物体表面圧力場の画像計測が可能である²⁾. 非定常圧力をとらえることを目的として, 高速応答型 PSP の開発も進んでいる^{3),4)}. これらは 10 μ s 程度の立ち上がり時間を有し, 数 kHz の変動をとらえることが

可能である⁵⁾. また, 最近になり, FFT による信号処理を行うことで, 数 10 Pa 程度の振幅を持つ圧力変動をとらえるめどがいつてきた^{6),7)}.

本稿では, 空力音響解析に PSP 技術を適用することを目指した, 時系列 PIV と非定常 PSP を用いた複合計測の方法を示す. 時系列 PIV から物体周りの渦度場を求め, 非定常 PSP 計測から物体表面の圧力変動をとらえることで, 音源探索と遠方場音場に与える三次元的な物体形状や流れ場の影響を把握することを目指した. ここでは, 非定常 PSP と時系列 PIV データの整合性を検証するため, 精度の良いデータ⁸⁾が整っている円柱周りの流れを対象として, 同一の気流条件で PIV, PSP データを別のタイミングで取得し, PIV, PSP 両者の相関解析を行った結果を示す.

2. PSP/PIV 複合計測システム

2.1 実験装置・方法

風洞気流中に置かれた模型周りの流れを調べることを目的として, PSP/PIV 複合計測システムを構築した. 装置の概略を図 1 に示す. また, 図 2 に示すように, この実験では, 測定結果の妥当性を検証しやすい 2 次元円柱を模

* 原稿受付 2014 年 10 月 6 日

1) 東京農工大学大学院 工学府

2) 正会員 東京農工大学 大学院工学研究院 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16, E-mail: kame@cc.tuat.ac.jp)

3) 正会員 宇宙航空研究開発機構 航空技術部門

型として用いた。座標軸は、主流方向を x 、円柱スパン方向を z 、両者に垂直な方向を y とした。また、参照用の非定常圧力を計測するため、スパン方向中央断面に 3 か所、半導体センサ (Kulite, XCQ-093-5SG) を埋め込んである。計測の際は、層流はく離点近傍であるよどみ点から 70° 回転した位置に半導体センサが位置するよう模型を設置した。

円柱表面は、全体にわたり、高速応答型 PSP の一つである多孔質陽極酸化アルミニウム PSP (AA-PSP) によりコーティングされている。AA-PSP は、Kameda ら⁵⁾、Sakaue ら⁹⁾ に倣ってジュラルミン (A5052) 材の表面に作成したもので、PSP 層の膜厚は $10\ \mu\text{m}$ とした。また、感圧色素であるバソフェンルテニウムを吸着させたのちに、温度・湿度感度低減のために、ステアリン酸吸着による疎水化処理^{9),10)} を施している。同一条件で作成した AA-PSP の 25°C 、基準圧力 $p_{\text{ref}} = 100\ \text{kPa}$ に対する校正曲線は図 3 のようになる。また、相対湿度一定条件における温度感度は $-0.08\%/^\circ\text{C}$ ¹⁰⁾、共鳴管試験により得た -3dB カットオフ周波数は約 $5\ \text{kHz}$ である¹¹⁾。

まず、風洞の中央を横断する形で設置した円柱に対して、アクリル製の下壁側から、円柱の軸方向垂直断面を照射するシート光、および、円柱表面に塗布された PSP を励起するための光を導入する。シートと正対する形で PIV 画像取得用の高速度カメラ (Vision Research Phantom V710, 12bit, $1280\ \text{pixels} \times 800\ \text{pixels}$) を設置し、円柱後流の流れ方向 $x/D = 0 \sim 4$ 、垂直方向 $y/D = -1.5 \sim 1.5$ を計測領域とした。また、円柱側壁の下側をとらえる形で PSP 画像取得用の高速度カメラ (同上) を設置し、スパン方向中央の位置を基準点とし、 $z/D = -6 \sim 6$ を計測領域とした。

PIV 用のトレーサ粒子は、風洞上流に設置したレーキから導入した。トレーサ粒子の材料は DOS(Dioctyl sebacate)であり、気流中の粒子径は $1\ \mu\text{m}$ 程度である。また、光源には Nd:YAG ダブルパルスレーザ (Lee Laser, LDP-200MQG, $532\ \text{nm}$, $10\text{mJ/pulse}@10\ \text{kHz}$) を用いる。円柱下方から導かれたシート光を半分遮り、円柱後流のみを照射した。また、シート光をスパン方向にトラバースできる機構を用いて、 z 方向に移動させながら多断面での計測を行った。図 2 に示すように、半導体センサを $D/2$ 間隔で設置することで、一計測で 3 断面のコヒーレンス分布を取得できるようにした。シート光は半導体センサ 3 の位置を基準断面とし、スパン方向へ $z/D = 0, 1, 2, 2.5, 3, 3.5$ と移動させ、コヒーレンス値が下がる様子を捉えるようにした。レーザとカメラの同期には La Vision 社製の PIV 制御装置によって行った。

PSP の励起光源には青色レーザダイオード (住友電工, BLM7000-H08D/ VPS-ENN124B) を、照射ヘッドにはシリンドリカルレンズを用いて、スパン方向に対する照射強度の変化を小さくした。円柱下方に設置したカメラから、

Fig. 1 Schematic diagram of PIV/PSP combined measurement system

Fig. 2 Circular cylinder

Fig. 3 Pressure sensitivity of AA-PSP

円柱の $\theta = 0^\circ$ (よどみ点) $\sim 180^\circ$ の様子を撮影した。PSP からの発光のみをとらえるために、カメラレンズ前面にはシャープカットフィルタ (Hoya O-58) を取り付けた。

実験は、JAXA 航空本部にある循環式の小型低乱風洞 (計測部：幅 0.55 m, 高さ 0.662 m, 最大風速 60m/s) を用いて行った。PSP, PIV 撮影ともに 1000 fps にて 4096 枚の時系列画像を取得した。

2.2 データ処理

PSP 画像のデータ処理には、MATLAB をプラットフォームとする自作ソフトを用い、円柱表面上圧力の時系列データに対して、画像上のピクセルごとに FFT 周波数解析を行った。

FFT 解析に先立ち、まず、PSP 出力時系列データをその平均値で割ることで、実験中の平均圧力に対する相対的な変動の大きさに変換した。これまでの研究¹⁰⁾から、本研究で用いた AA-PSP の圧力感度は、本実験で変化し得る温度や湿度の範囲では一定とみなせることが示されている。そのため、相対的な変動の大きさは、温度の影響を受けることなく図 3 の較正直線にしたがって圧力に変換できる。つぎに、S/N 比を向上させるために、FFT 解析では、周波数次元のデータを複数回重ね合わせて積算した⁷⁾。具体的には、4096 点のデータを 512 点ずつオーバーラップさせながら 1024 点 7 セットのデータに分け、それぞれに FFT 処理を施したのちに、積算を行った。

PIV 画像のデータ処理には、市販の解析ソフト (La Vision Davis) を用いて取得画像から渦度を算出し、渦度の時系列データに対して FFT 解析を行った。PIV 処理は、検査窓 32 pixels $\times$ 32 pixels (50%オーバーラップ) にて実施し、 x 方向 80 pixels, y 方向 50 pixels の領域の渦度を算出した。

3. 実験結果と考察

3.1 実験条件

本実験では、直径 $D = 40$ mm の円柱を用いた。一様流の流速 U は 40 m/s とした。このとき、レイノルズ数 $Re = 1.07 \times 10^5$ である。このレイノルズ数では、円柱から放出されるカルマン渦列のストローハル数 St は約 0.2 であり、周波数 f は約 200 Hz となる。

3.2 相関解析

Nakakita⁷⁾の方法に基づき、PSP 計測結果から求めた円柱表面上圧力変動のコヒーレンスと、PIV 計測結果から求めた円柱後流渦度場のコヒーレンスを求め、両者を比較した。

コヒーレンス $coh^2(\omega)$ は以下の式を用いて計算する¹²⁾。

$$coh^2(\omega) = \frac{\langle S_{xy}(\omega) \rangle^2}{\langle S_{xx}(\omega) \rangle \langle S_{yy}(\omega) \rangle} \quad \dots (1)$$

Fig. 4 Spatial distribution of power spectra of vorticity fluctuation

ただし、周波数空間における基準点、参照点の FFT データ $\mathbf{x}(\omega)$, $\mathbf{y}(\omega)$ のクロススペクトルを $S_{xy}(\omega)$, 基準点のスペクトルを $S_{xx}(\omega)$, 参照点のスペクトルを $S_{yy}(\omega)$ と表した。コヒーレンスを求める際の周波数は、円柱表面上圧力変動のピーク周波数である 200 Hz とした。

3・2・1 円柱後流渦度場のコヒーレンス

PIV により求めた渦度場に対する FFT 解析結果を図 4 に示す。図は 40 Hz 毎の変動成分の大きさを表しており、赤い領域程、変動成分が大きいことを表す。図から円柱後

Fig. 5 Difference of coherence for vorticity at 200 Hz in spanwise direction

流において、エオルス音の周波数と一致する 200 Hz の変動成分が支配的であることが分かる。

次に、円柱後流渦度変動の円柱軸（スパン）方向に関するコヒーレンスを求めた。ここで、コヒーレンスを求める際の基準を円柱スパン方向中央部に設置した半導体圧力センサの取得データとし、コヒーレンスを求める際の周波数を圧力センサによって得られる取得データから求まる圧力変動のピーク周波数とした。解析結果を図 5 に示す。図から、PIV 計測断面が基準点から離れるにしたがい、コヒーレンスが小さくなっていることが確認できる。

Fig. 6 Spatial distribution of power spectra of surface pressure fluctuation

3・2・2 円柱表面圧力変動のコヒーレンス

PSP により得られた円柱表面上圧力の時系列データに対して FFT 解析を行った結果を図 6 に示す。図から、渦度変動と同様に、200 Hz 付近の変動成分が大きいことがわかり、円柱表面上圧力の変動成分もエオルス音に寄与していると考えることができる。

次に、円柱スパン方向中央部を基準点とし、基準点と任意点における圧力変動のコヒーレンスを求めた結果を図 7 に示す。基準点に近いスパン方向中央部付近に強い相関があることが分かる。

3・2・3 スパン方向相関長の比較

図 5, 7 で求めたスパン方向のコヒーレンス分布をもとに、それぞれの相関長を算出した。渦度場については、図 8 で示すように、変動成分が大きい領域内のコヒーレンス値の平均値を代表コヒーレンス値として、中央断面 $z = 0$ から $z = 4.5D$ までの分布を求めた。圧力場については、2次元円柱模型を用いることから、基準点を境に対称な流れであると考えられるので、 $z = 0$ から $6D$ までの範囲で

Fig. 7 Coherence of pressure fluctuation

Fig. 8 Determination of averaged coherence for vorticity

分布を求めた。ここで、渦度場の取得データ数は 18、圧力場のデータ数は 291 点とした。

次に、取得データに対してガウス関数[式(2)]でフィッティングを行った。最後にフィッティング式の係数を用いて相関長 L_c/D を求めた⁸⁾。

$$coh^2(z/D) = A \exp\left(-\eta \frac{z^2}{D^2}\right), \quad \frac{L_c}{D} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\eta}} \quad \dots (2)$$

$z=0$ のコヒーレンスは 1 ($coh^2=1$) となるべきなので、式(2)の定数 A は 1 とすべきである。しかし、後に示すように PSP データのばらつきが大きく、原点からわずかに離れた点でも顕著な値の低下が見られたため、ここでは、 A をフィッティングパラメータとして扱った。

(a) Coherence for vorticity

(b) Coherence of pressure fluctuation

Fig. 9 Decay of coherence in spanwise direction (blue: PIV, red: PSP; lines: fitting curve based on Eq. (2))

結果をまとめたグラフを図 9 に示す。渦度場のフィッティングから求めた相関長は $L_{c\pi}/D = 4.8$ 、圧力場から求めた相関長は $L_{cp}/D = 4.3$ となった。また、渦度場のフィッティングに対する取得データの標準偏差は 0.08、圧力場における標準偏差は 0.11 となった。

つぎに、渦度場、圧力場それぞれにおいて、フィッティングにより定めた相関長、その点におけるコヒーレンスの値、およびフィッティング曲線に対するコヒーレンスの標準偏差 σ を算出し、 $coh^2(L_{cm}/D) = coh^2(L_c/D) - \sigma$ 、 $coh^2(L_{cp}/D) = coh^2(L_c/D) + \sigma$ を満たす L_{cp} 、 L_{cm} を同様に式(2)の関数 (図 9 黒点線) から求め、 L_{cm} から L_{cp} までを信頼区間 (図 9 水平赤点線) として相関長の不確かさを見積

もった。その結果、不確かさを含めた相関長は、渦度に対して $L_{cr}/D = 4.8 \pm 0.55$, 圧力場に対して $L_{cp}/D = 4.3 \pm 0.9$ となった。

圧力場のコヒーレンスのフィッティング値が $d/D = 0$ において 0.8 であること、分布にばらつきがあるのは、PSP 計測のノイズによる。そのため、渦度場に比べ相関長の不確かさが大きくなったが、その不確かさの範囲で、両者のデータは整合していることがわかった。

4. まとめ

円柱周りの流れから発生する音を計測対象とし、風速 40 m/s 中に置かれた直径 40 mm の円柱について、渦の非定常運動を PIV により計測し、物体表面の圧力変動を高速応答型 PSP (AA-PSP) により計測した。

得られたデータから、円柱後流に発生する渦度変動の相関長および円柱表面上圧力変動の相関長を算出し、両者を比較した。その結果、円柱表面上圧力変動から求めた相関長 ($L_{cp}/D = 4.3 \pm 0.9$) は、渦度変動の相関長 ($L_{cr}/D = 4.8 \pm 0.55$) とほぼ一致した。

このことから、風速 40 m/s 程度の低速流中に置かれた物体から発生する空力音の解析に非定常 PSP 計測技術が適用できる見通しを得た。

謝辞

本研究は、文科省/学振科研費 (基盤研究(B)No. 22360075, 25289029) の助成を受けて行われた。実験は、東京農工大学大学院生の瀬谷祐介、吉田匡秀の両君の助力を受けて遂行した。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 吉川茂, 和田仁編著: 音源の流体音響学 (2007) コロナ社.
- 2) Bell, J.H., Schairer, E.T., Hand, L.A., Mehta, R.D.: Surface pressure measurements using luminescent coatings, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 33 (2001) pp. 155-206.
- 3) Gregory, J.W., Asai, K., Kameda, M., Liu, T., Sullivan, J.P.: A review of pressure-sensitive paint for high speed and unsteady aerodynamics, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, Vol. 222 (2008) pp. 249-290.
- 4) Gregory, J.W., Sakaue, H., Liu, T., Sullivan, J.P.: Fast pressure-sensitive paint for flow and acoustic diagnostics, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 46 (2014) pp. 303-330.
- 5) Kameda, M., Tezuka, N., Hangai, T., Asai, K., Nakakita, K., Amao, Y.: Adsorptive pressure-sensitive coatings on porous anodized aluminum, Measurement Science and Technology, Vol. 15 (2004) pp. 489-500.
- 6) Nakakita, K.: Unsteady pressure measurement on NACA0012 model using global low-speed unsteady PSP technique, AIAA-2011-3901 (2011).
- 7) Nakakita, K.: Detection of phase and coherence of unsteady pressure field using unsteady PSP measurement, AIAA-2013-3124 (2013).
- 8) 飯田明由, 藤田肇, 加藤千幸, 高野靖: 空力音の発生機構に関する実験解析 (第 1 報 円柱表面圧力変動の空間構造について), 日本機械学会論文集(B), Vol. 61, No. 592 (1995) pp. 4371-4378.
- 9) Sakaue, H., Tabei, T., Kameda, M.: Hydrophobic monolayer coating on anodized aluminum pressure-sensitive paint, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 119 (2006) pp. 504-511.
- 10) Kameda, M., Yoshida, M., Sekiya, T., Nakakita, K.: Humidity effects in the response of a porous pressure-sensitive paint, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 208 (2015), pp. 399-405.
- 11) 亀田正治, 瀬谷佑介, 吉田匡秀, 中北和之: 多孔質皮膜感圧塗料の時間応答性, 第 44 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講演集, (2012) JSASS-2012-2019.
- 12) 日野幹雄: スペクトル解析 (1977) 朝倉書店.