J0510202

スモークワイヤ法が多層配置化による三次元気流構造の可視化

小林 寛堯^{*1}, 小田 友郎^{*1}, 大石 義彦^{*2}, 田坂 裕司^{*2}, 村井 祐一^{*2}

3-D airflow structure visualization by means of multi-layer coloring of smoke-wire technique

Hiroaki KOBAYASHI^{*1}, Tomoro ODA^{*1}, Yoshihiko OISHI^{*2}, Yuji Tasaka^{*2} and Yuichi Murai^{*2}^{*1} Graduate School of Engineering, Hokkaido University, N13-W8, kita-ku, Sapporo 0608628, Japan

As a new technique for visualizing three-dimensional air flow fields, multi-layer coloring of smoke-wire technique is proposed. This method is composed of four processes. (1)The specific plane of the flow is illuminated by sheet light to detect z coordinate. (2)Sheet light is shifted in z direction to detect z coordinates of the other plane of the flow and this process is repeated for whole layer of z coordinates in the measurement area. (3)To express z coordinates, the recorded gray-scaled image is colored differently in each layer. (4)The colored images are integrated into one image. In this integrated colorful image, we can understand the three-dimensional structure of the flow by the position and the color of the smoke. By means of this technique, three-dimensional flow field around a twisted Savonius wind turbine was visualized. According to the visualized image, in the convex side of the blade, the separation of attached flow is suppressed and in the concave side of the blade, with the move of the flow to $+z$ direction, the angle of outlet flow is increased. Thereby it was concluded that twisted Savonius wind turbine is inferior in the drag characteristics and superior in the lift characteristics. This result suggests that the twisted Savonius turbines have advantages in conditions of the higher tip speed ratio, where the lift force has priority.

Key Words : Flow Visualization, Three-dimensional Flow, Wind Turbine, Separation

1. 結 言

気流三次元流れ場を計測する技術として、これまで複数台カメラによる多眼視を利用した 3-D PTV⁽¹⁾, ホログラムを利用する Holographic PIV⁽²⁾, トモグラフィックの再構成原理にもとづく Tomographic PIV⁽³⁾などが提案されている。しかしながら、これらは複雑な光学技術、高額な計測設備および高度な画像処理技術を必要とし、容易に三次元気流構造を計測することが困難であるため、計測の目的によってはより簡易的な手法が求められる。簡便に流れ場を把握する手法としてスモークワイヤ法⁽⁴⁾がよく知られているが、これは二次元流れを把握するものであり、流れの奥行き方向を計測することができない。そこでこのスモークワイヤ法で可視化領域を複数層に分け、特定の奥行き断面内に存在するスモークのみを可視化計測し、複数層の計測画像を合成することにより三次元流れ場を可視化する新手法を考案した。本手法では、シート光の可視化断面に対応させて、撮影されたグレースケール画像を疑似カラーで着色することで流れの三次元流れ場を表現した。よって、画像内のスモークの分布と色相により流れの三次元構造を直感的に理解できる。本研究ではツイストサボニウス風車周りの三次元流れ場を計測対象と設定した。サボニウス風車は出力効率に課題を抱えており、過去に複数風車の最適配置など様々な工夫が施されてきた⁽⁵⁾。ツイストサボニウス風車は風向きに対するトルク変動の減少と回転時における出力効率の向上が報告されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかしながら、これまでツイストサボニウス風車周りの三次元流れ場に関する研究例はなく、流体力学的視点での動作原理と風車性能の調査は行われていない。過去に、藤澤ら⁽⁸⁾は通常のサボニ

^{*1} 学生員, 北海道大学 大学院工学院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

^{*2} 正員, 北海道大学 大学院工学研究院
E-mail: kobayashi@ring-me.hokudai.ac.jp

ウス風車の動作原理の解明を目的として、スモークワイヤ法によりサボニウス風車周りの二次元流れ場を可視化し、サボニウス風車の揚力性能および抗力性能について考察している。同様に、本研究ではツイストサボニウス風車の動作原理の解明を目的として、新たに考案した多層スモークワイヤ法によりツイストサボニウス風車周りの三次元流れ場を可視化し、その揚力性能および抗力性能を考察した。

2. 実験装置および方法

2・1 多層スモークワイヤ法の計測原理

新たに考案した三次元可視化手法である多層スモークワイヤ法 (multi-layer coloring of smoke-wire technique) の計測原理について述べる。従来のスモークワイヤ法ではボリウム光を光源として空間全体のスモークを照明し、単視点カメラにより撮影する。三次元流れは二次元画像に投影されるため、撮影面に対して奥行き方向の情報を得ることはできない。そこで、本手法ではシート光を光源として特定の奥行き方向 (z 方向) に存在するスモークのみを照明し、撮影した二次元画像内に存在するスモークの z 方向位置を特定する。シート光を z 方向に移動させ、その都度同様の撮影を繰り返す (図 1 (a))。これにより、流れ全体の三次元構造を複数層に分割して獲得することができる。次に、シート光の z 方向位置に対応させて、モノクロ画像を疑似カラーで着色することで流れの奥行き方向を表現する (図 1 (b))。最後に、それぞれの着色画像を重ね合わせ、一枚のカラー合成画像を作成する (図 1 (c))。合成画像内のスモークの軌跡によって流れの面内成分を、スモークの色により撮影面奥行き方向の流れを定性的に観察することができる。尚、図(1)においてスモークワイヤの高さはシアン層の中央位置とした。したがって、 z 成分のない二次元流れの場合、合成画像内のスモークは全てシアンとなる。また、本手法では、複数回にわたって撮影を行うため、位相ごとの流れの再現性が保証されている流れを計測対象とする。

Figure 1 Procedure and example of multi-layer coloring of smoke-wire;(a) original images in each layer, (b) colored images in each layer, (c)integrating colourful image, and (d)multi-layer color configuration

2・2 実験装置および風車モデル

実験装置の概略図と座標系を図2(a)に示す。実験装置は開放型噴出風洞、風車モデル（ツイストサボニウス風車モデル（3D プリンタにより作成）およびサボニウス風車モデル）、高速度ビデオカメラ（Photoron 社, FASTCAM-MAX 120K）、スモークワイヤ、ステッピングモータ（オリエンタルモータ社, PK243MA）、レーザシート光（最大出力2W, CNI 社, MGL-F-532）より構成される。ツイストサボニウス風車モデルは、風車直径 $D = 75 \text{ mm}$ 、高さ $H = 150 \text{ mm}$ 、高さあたりのねじり角が 180° である。主流風速 $U = 1.0 \text{ m/s}$ に対し、ステッピングモータにより風車モデルを周速比 $\lambda = 0.5$ で回転させた。レイノルズ数は、空気の動粘性係数 $\nu = 1.57 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ を用いて、 $Re = 3.2 \times 10^3$ となる。また、比較対象用のサボニウス風車モデルとして、風車直径 60 mm 、高さ 80 mm のものを使用した。角速度、主流速度を調整し、ツイストサボニウス風車モデルと同一の周速比 $\lambda = 0.5$ 、レイノルズ数 $Re = 3.2 \times 10^3$ を再現した。また過去の研究では、サボニウス風車のオーバーラップ箇所における流体の移動が周囲流れ場に影響を及ぼすと報告されている⁽⁹⁾。そこで、オーバーラップ箇所の流体の移動を阻止するため、該当箇所を塞いだ。ツイストサボニウス風車周りの流れ場は三次元性を持つため、多層スモークワイヤ法により可視化した。シート光厚さを 10 mm として五層にわたり計測を行い、色の配置は図2(b)に示すように、順にシアン、レッド、グリーン、ブルー、イエローとした。サボニウス風車周りの流れ場は三次元性を持たないため、通常のスモークワイヤ法により可視化した。また、両風車モデルの可視化領域はモデル端部の影響を受けないパン方向中央部とした。

Figure 2 Experimental set up; (a) Overview and (b) Multi-layer color configurations

3. 実験結果および考察

サボニウス風車はブレードに働く揚力と抗力により駆動する。それぞれの流体力のバランスはロータ回転角 θ に依存し、 θ が小さい場合には揚力が支配的となり、大きい場合には抗力が支配的となる⁽⁷⁾。本研究では θ が小さい場合（代表として $\theta = 0^\circ$ ）と大きい場合（代表として $\theta = 90^\circ$ ）における三次元流れ場より、ツイストサボニウス風車の抗力性能と揚力性能について考察する（3.1 節, 3.2 節）。また、得られた抗力性能および揚力性能より、ツイストサボニウスの風車特性について考察する（3.3 節）。

3・1 ロータ回転角が小さい場合 ($\theta = 0^\circ$)

図3は回転角 $\theta = 0^\circ$ におけるサボニウス風車周りの流れ場（図3(a)）、およびツイストサボニウス風車周りの流れ場（図3(b)）を示す。両モデルにおいて、進みブレード凸面側に沿う付着流が観察され（図3(a)右上, 図3(b)右上）、これにより進みブレードに揚力が生じる⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾。またツイストサボニウス風車(b)では付着流の剥離が遅延され、ブレードに沿って大きく湾曲されている（図3(b)右上）。また、シアン層に流入したスモークは進みブレード凸面側において+z方向に隣り合うレッド層に移動し、ブレード表面に沿って下流側に移流している（図3(b)右上）。つまり、ツイストサボニウス風車では凸面側に流入した流れは+z方向変位を伴い、剥離が遅延されている。はく離の遅延はブレードに働く揚力を増強するため⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾、ツイストサボニウス風車の方が揚

力性能に優れていると言える。このはく離の遅延の要因としてブレード表面の曲率によるコアンダ効果が考えられる。通常のサボニウス風車では進みブレード凸面側の xy 断面における曲率によりコアンダ効果が働き、はく離が遅延される。ツイストサボニウス風車においては、 xy 断面に加えて xz 断面においても曲率が存在するため、コアンダ効果が持続され、 z 方向変位を伴いはく離がさらに遅延されると考えられる。

Figure 3 Streak-line at $\theta = 0^\circ$ around (a) a Savonius turbine and (b) a twisted Savonius turbine

3・2 ロータ回転角が大きい場合 ($\theta = 90^\circ$)

図4は回転角が $\theta = 90^\circ$ におけるサボニウス風車周りの流れ場 (図4 (a))、およびツイストサボニウス風車周りの流れ場 (図4 (b)) を示す。両モデルにおいて、進みブレード凹面側に流入する流れが観察され (図4 (a) 左上, 図4 (b) 左上), この流入により進みブレード凹面側に抗力が生じる。すなわち、主流速度を U 、ブレード周速を V とすると、図5に示すように、流体は相対速度 $W = U - V$ でブレードに流入し、流出角 α でブレードから流出する。運動量保存則により、流体が回転方向にブレードを押す力は次のように表され、流出角 α に依存することが分かる。

$$F = \rho Q W (1 + \cos \alpha) \quad (1)$$

サボニウス風車では、流れの z 方向変位が無いいため、流出角 α は $\alpha = \pi/2 - \theta$ で表される (図5(a))。一方で、ツイストサボニウス風車では、シアン層のブレード凹面に流入する流れはブレード曲面に沿ってレッド層まで $+z$ 方向に変位している (図4 (b) 左上)。図5 (b) のように、流れの $+z$ 変位によって流入時と流出時で断面形状が異なるため、サボニウス風車に比べて流出角 α は増加する。流出角 α の増加に伴い、式 (1) で表される流体がブレードを押す力、すなわち抗力が減少するため、ツイストサボニウス風車の方が抗力性能に劣ると考えられる。

Figure 4 Streak-line at $\theta = 90^\circ$ around (a) a Savonius turbine and (b) a twisted Savonius turbine

Figure 5 Illustration of flow in a concave blade for (a) a Savonius turbine and (b) a twisted Savonius turbine

3・3 風車性能に関する推察

ツイストサボニウス風車周りの三次元流れ場より、ツイストサボニウス風車はサボニウス風車に比べ、抗力性能に劣るものの揚力性能に優れることが推測される。サボニウス風車の出力効率は、低速回転時には抗力性能が支配的になり、高速回転時には揚力性能が支配的となる⁽⁷⁾。したがって、抗力性能が支配的な低速回転時にはツイストサボニウス風車の出力効率が低下し、揚力性能が支配的な高速回転時には優れることが推察される。また、この推察は Damak ら⁽⁷⁾による回転時におけるツイストサボニウス風車の出力効率計測結果とも矛盾しない。

4. 結 語

複雑な三次元気流構造を定性的に可視化する手法として、多層スモークワイヤ法を提案した。本手法の特徴は、特定箇所のみが存在するスモークのみを照明することで、撮影面に対するスモークの奥行き方向座標を特定し、座標に対応して撮影画像を着色した点にある。得られた画像上のスモークと色により流れの三次元的変遷を直感的に把握できる。本研究では、この手法を用いて三次元構造を有するツイストサボニウス風車周りの流れ場を可視化した。可視化画像より、ツイスト変形により抗力性能が低下するものの揚力性能が向上することを示した。したがって、ツイスト変形により抗力性能が支配的な低速回転時には出力効率が低下し、揚力性能が支配的な高速回転時には出力効率が向上すると考えられる。

文 献

- (1) Nishino, K., Kasagi, N. and Hirata, M., "Three-dimensional Particle Tracking Velocimetry Based on Automated Digital Image Processing", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 111, No. 4 (1989), pp. 384-391.
- (2) Meng, H. and Hussain, F., "Holographic particle velocimetry: a 3D measurement technique for vortex interactions, coherent structures and turbulence", *Fluid Dynamics Research*, Vol. 8 (1991), pp. 33-52.
- (3) Elsinga, G.E., Scarano, F., Wieneke, B. and van Oudheusden, B.W., "Tomographic particle image velocimetry", *Experiments in Fluids*, Vol. 41(2006), pp. 933-947.
- (4) 浅沼強ほか, "流れの可視化ハンドブック", 流れの可視化学会編, 朝倉書店(1986). Kamoji, M.A., Kedare, S.B., and Prabhu, S.V., "Performance tests on helical Savonius rotors", *Journal of Renewable Energy*, Vol. 34 (2009), pp. 521-529.
- (5) Shigetomi, A., Murai, Y., Tasaka, Y., Takeda, Y., "Interactive flow field around two Savonius turbines", *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 2(2011), pp. 536-545.
- (6) Kamoji, M.A., Kedare, S.B., and Prabhu, S.V., "Performance tests on helical Savonius rotors", *Journal of Renewable Energy*, Vol. 34 (2009), pp. 521-529.
- (7) Damak, A., Driss, Z. and Abid, M.S., "Experimental investigation of helical Savonius with a twist of 180°", *Journal of Renewable Energy*, Vol. 52 (2013), pp. 136-142.
- (8) 藤澤延行, 白井紘行, 斎川雄司, "サボニウス風車周りの流れ場と出力機構に関する研究: スモークワイヤ法による可視化観察", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 53, No. 496 (1987), pp. 3716-3721.
- (9) 藤澤延行, 池谷和昭, "サボニウス風車の出力機構に及ぼすオーバーラップの影響: ブレード表面圧力測定と流れの可視化による観察", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 58, No. 547 (1992), pp. 810-814.
- (10) Murai, Y., Nakada, T., Suzuki, T., and Yamamoto, F., "Particle tracking velocimetry applied to estimate the pressure field around a Savonius turbine", *Measurement Science and Technology*, Vol. 18 (2007), pp. 2491-2503.