サボニウス風車周りの非定常フロー パターンの可視化*

藤沢延行**, 白井紘行**, 斎川雄司**

Visualization of Unsteady Flow-pattern around a Savonius Rotor

Nobuyuki FUJISAWA, Hiroyuki SHIRAI and Yuuji SAIKAWA

ABSTRACT

Flow fields around a Savonius rotor with and without a rotation are studied by flow-visualization experiment with the smoke-wire method. In case of the rotating rotor, the tip speed ratio is set at the maximum power performance. Based on the variations of the flow-pattern with and without a rotation, and with a rotor angle, the effect of the rotor rotation is discussed in relation to its power performance. It is found that at small rotor angles Coanda like flows are formed on the convex side of an advancing rotor, and as the angle increases large circulating vortices are shed downstream from both the sides of the rotor. Such Coanda like flows prompt a rotor rotation though the vortices act inversely.

1. 緒 言

サボニウス風車は、抗力形垂直軸風車として知られている。それは、プロペラ風車やダリウス風車と比べ低効率ではあるが、起動トルクが大きいこと、風向制御の必要のないこと、ならびに構造が簡単なことなどの特徴を持つことから、過去より、他形式風車の起動用あるいは揚水用風車として利用されてきた。

サボニウス風車に関する過去の研究は、出力特性に影響を及ぼす形状パラメータ（ブレード枚数、ブレード断面形状、オーバーラップ比、端板の大きさなど）の最適化についての実験的研究に始まる^{1)~3)}。その後、信頼性のある実験データを得

るためにサボニウス風車における風洞ブロックageの影響^{4)~7)}、出力増大を目的とした集風装置の開発^{8)~10)}などが活発に行われている。これらの研究課題は、いずれも風車周りの流れ場の状態に強く関係しており、その流れ場に対する流体力学的研究が重要と思われる。

サボニウス風車周りの流れ場に関する過去の研究は、流れの可視化^{9)~14)}や熱線流速計を用いた風速測定^{6)~8), 10), 11), 15)}など比較的活発である。しかしながら、風車の出力機構と風車周りのフローパターンの関係解明に関する研究はあまりない。サボニウス風車周りの流れの可視化は、この問題に対する有力な手段を提供するが、従来しばしば用いられてきたタフト法^{10), 11)}や表面浮遊法^{12)~14)}などの方法は、流れに対する追従性の点から、風車周りの非定常フローパターンの観察には十分適

*原稿受付 昭和61年10月25日

**群馬大学工学部

合しているとは言えない。

本報告は、スモークワイヤ法を用いて、サボニウス風車周りの非定常フローパターンを可視化した結果を示す。風車が静止時のフローパターンと最大出力発生時の周速比におけるフローパターンを、種々のロータ回転角に対して可視化観察した結果に基づいて、風車出力と流れ場の関係を詳しく検討する。

2. 実験装置および方法

図1に供試サボニウス風車の写真を示す。風車は、塩化ビニール製の半円筒形ロータ2枚とアクリル製の端板2枚から成っている。風車の横断面図を図2に示す。風車の形状パラメータについては、従来の研究^{1), 2)}の最適値からオーバーラップ比 $O_L (=a/(2R))=0.15$, 端板外径 $D_0=1.1D$, アスペクト比 $A_s (=H/D)=2.0$ とし、オーバーラップ部には風車軸が貫通しないように製作した。ここに、 a : オーバーラップ量, R : ブレード半径,

D : 風車直径, H : 風車高さである。供試風車の風車直径は、 $D=127\text{mm}$ とした。

図3(a), (b)に可視化用実験装置の概略を示す。開放形風洞の正方形断面形状をした吹出し口(= $900\text{mm} \times 900\text{mm}$)の下流側 700mm の断面中央位置に供試サボニウス風車(図中番号①)を設置する。風車は、その横断面内中央付近の流れを観察するために水平配置とし、直流電動モータ(②)の軸に直結することにより安定な一定周速比の回転が得られた。風車とモータ間には、風車と同回転する穴のあいた円盤(③)が設けてあり、フォトセンサ(④)によりロータ回転角を検出し、その出力パルスによって風車周囲に設置した3台のストロボ스코プを同期発光させる。このとき、一定ロータ回転角における瞬時のフローパターンが観察される。ここに、ストロボの発光時間は $22\mu\text{sec}$ であり、十分に短い。実験には、直径 0.1mm , 長さ 400mm のニクロム線(⑤)をスモークワイヤとして用い、それを電圧 250V , 容量 267

Fig. 1 Photograph of test Savonius rotor

Fig. 2 Cross-section of rotor

Fig. 3 Experimental apparatus for flow visualization

- ① Savonius rotor
- ② DC motor
- ③ Rotating disk
- ④ Photosensor
- ⑤ Smoke-wire (nichrom, 0.1mm in diameter)
- ⑥ Outlet of wind tunnel
- ⑦ Camera

μF の充電したコンデンサを用いて加熱発煙させる。スモークワイヤの塗布液としては、流動パラフィンを用いた。可視化実験は、主流の平均風速 $U_0=0.7\text{m/s}$ において行った。このとき、風車直径を基準としたレイノルズ数は、 $Re_D (=U_0 D/\nu)=6\times 10^3$ であり、カルマン渦列が発生するレイノルズ数範囲より十分大きい。ただし、 ν は流体の動粘度である。

風車設置位置における風速分布は、風洞の中央 $750\text{mm}\times 750\text{mm}$ の範囲にわたり $\pm 0.5\%$ の精度で一様である (文献(5)図3参照)。また、風洞吹出し口断面積に対する風車の最大受風面積 ($=DH$) の比は 0.04 であり、開放形風洞におけるブロックageの影響は十分小さいと考えられる⁵⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 静止風車周りのフローパターン

図4(a)~(d)は、ロータ回転角 $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ および 135° における静止風車周り流れ場の可視化写真を示す。ロータ回転角の小さい範囲 ($\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) では、進みブレード側によどみ点が生じており、時計回りの抗力が強く発生していることを示す。 θ が大きくなると ($\theta=135^\circ$)、進みブレード側のよどみ点は徐々にもどりブレード側へ移動し、風車は反時計回りの抗力を得るようになる。このことは、既報⁵⁾ に示した静トルクの測定結果において、 $\theta=30^\circ\sim 60^\circ$ 付近で時計回りトルクが最大値となり、 $\theta=160^\circ$ 付近でわずかに逆回転のトルクを生ずることと良く対応する。一方、風車の下流側では、主流方向の風車投影面積に対応した後流幅の変化が見られ、後流幅は、 $\theta=0^\circ$ 付近で最小、 $\theta=90^\circ$ 付近で最

大となる。

3.2 回転する風車周りのフローパターン

図5(a)~(d)は、最大風車出力時の周速比、すなわち、主流に対するロータ先端の速度の比 $X (=0.5D\omega/U_0)$ が 0.9 、における風車周りのフローパターンを示す。ただし、 ω は風車角速度を表す。図4(a)~(d)と同じロータ回転角に対する写真を示すが、静止ロータと回転ロータの流れ場の相違が注目される。ここに、各ロータ角に対して見られる特徴あるフローパターンの再現性は極めて良い。いずれのロータ回転角においても、風車前方よどみ点の位置はもどりブレード側に偏っていることが観察され、静止時と比べ反時計回りに強い抗力が作用していることが予想される。しかしながら、ロータ回転角の小さい $\theta=0^\circ$ および 45° の

Experimental conditions (Air, $U_0=0.7\text{m/s}$, $Re_D=6\times 10^3$, $D=127\text{mm}$, Smoke-Wire method)

Photographing conditions [Nikon FE2, 55mm/F2.8, NEOPAN F, F2.8, 0.8m, Three stroboscopes ($22\mu\text{sec.}$)]

Fig. 4 Visualizing photographs of flow-field around a Savonius rotor without rotation

写真には、進みブレードの凸面側に沿うコアンダ流に類似の付着流の発生が見られ、もどりブレード凹面側にスモークの流入が観察される。このとき、もどりブレード側には、時計回りの抗力が発生する。したがって、回転風車では、進みブレード側だけでなくもどりブレード側にも風車回転方向の抗力が発生しており、静止時よりかなり広いロータ回転角で、風車は抗力による回転トルクを得ることになる。一方、この付着流の発生に伴って、進みブレードには揚力が生じる。この揚力もロータ回転方向成分を有しており、上述のもどりブレードに発生する抗力と共に風車回転の駆動力となる。一方、進みブレード側 $\theta=90^\circ$ 付近において観察されるように、進みブレード凹面側の死水領域は風車外側方向へ移動する。このとき、進みブレード先端付近の風速分布⁵⁾は、 $\theta=90^\circ$ 付近の

風車外側向きの強い流れ（循環流）の発生を境として、風車内側下流向きから外側下流向きに転じる。このとき、付着流は、循環流の発生によるブレード面に垂直方向速度成分の影響によってく離流となると考えられる。これに対応して、付着流によって生じる抗力と揚力による風車回転トルクは消滅する。この循環流の発生は、熱線流速計を用いた風車周り流れ場の測定結果¹⁵⁾において、進みブレード先端から下流外側方向への強い増速流として観察されており、その発生するロータ回転角 $\theta \approx 90^\circ$ も良く一致する。一方、循環流は、風車と同方向に回転しており、 θ の増加と共に進みブレード下流側に渦として発達する。この渦は、 $\theta=135^\circ$ 、 0° の写真から明らかのように、下流方向に移動すると共にそのスケールを増大する。

(For caption see Fig. 4)

Fig. 5 Visualizing photographs of flow-field around a Savonius rotor rotating with tip speed ratio $X=0.9$ at the maximum power performance

もどりブレード側においても、進みブレード側ほど明瞭ではないが、 $\theta=0^\circ$ 、 45° 、 135° の可視化写真のもどりブレード側流脈線先端付近がわん曲していることから、風車と反対方向に回転する渦の放出が予想される。この渦は、風車回転によってもどりブレード凹面側に低圧領域が形成され、周囲の流体が巻き込まれることによって生じると考えられる。

このような、回転するサボニウス風車周りに形成される渦発生を伴うフローパターンは、風車の回転と風車と主流の間に形成される乱流せん断層との相互干渉による。また、風車出力に対するレイノルズ数依存性は比較的弱いことから⁵⁾、本実験から得られたフローパターンの主な特徴は実機レベルのレイノルズ数 ($Re_D \approx 10^6$) においてもほぼ同様であると考えられる。渦発生のメカニズムや風車出力との関係を解明するには、プレー

ド面上に形成される境界層のはく離について、さらに検討する必要があると思われる。

4. 結 論

静止時および最大風車出力時の周速比 ($X=0.9$) で回転するサボニウス風車周りのフローパターンをスモークワイヤ法を用いて観察し、次の結論を得た。

- (1) 静止風車では、かなり広いロータ回転角範囲でよどみ点が進みブレード側にあり、風車回転方向に抗力によるトルクの発生を示す。
- (2) 回転風車のロータ回転角の小さい範囲では、進みブレードの凸面側に付着流の発生が観察される。この付着流は、かなり広いロータ回転角に渡って、もどりブレードに風車回転方向抗力を与える。同時に、進みブレードには、風車回転方向揚力を生じ、風車回転の駆動力となる。
- (3) ロータ回転角が $\theta=90^\circ$ 付近で、進みブレード凹面側から風車外側向きに循環流が発生する。このとき、付着流ははく離流となり、それに伴う抗力と揚力の発生は消滅する。循環流は下流方向に発達し、風車と同方向に回転する渦となる。
- (4) もどりブレード側には、風車回転に伴って、風車と反対方向に回転する渦の放出が観察される。

終わりに、本研究を進めるに際して協力を得た群馬大学工学部学生田部井真史君および同工業短期大学部学生三宅征典君に謝意を表する。

文 献

- 1) Sheldahl, R.E., ほか2名: Wind Tunnel Performance Data for Two and Three-Bucket Savonius Rotors, J. Energy, 2-3 (1978), 160
- 2) Sivasegaram, S.,: Secondary Parameters Affecting the Performance of Resistance-type Vertical-axis Wind Rotors, Wind Engng., 2-1 (1978), 49
- 3) 牛山・ほか2名: サボニウス風車の最適設計形状に関する研究, 機論, 52-480 (昭61-8), 2973
- 4) Alexander, A.J.: Wind Tunnel Corrections for Savonius Rotors, Proc. 2nd Int. Symp. Wind Energy Systems (1978), Paper E-6, Amsterdam
- 5) 藤沢・ほか2名: 開放型風洞を用いたサボニウス風車の出力特性に関する研究, ターボ機械, 13-2 (昭60-2), 67
- 6) 藤沢・白井: 開放型風洞におけるサボニウス風車周りの変動流れの測定, ターボ機械, 14-6 (昭61-6), 321
- 7) Fujisawa, N., ほか2名: Hot-wire Anemometer Measurements of Flow Fields around Savonius Rotors in Open-circuit Wind Tunnel, Proc. 3rd Osaka Simp. Flow Measuring-Techniques (1987), 109
- 8) Charwat, A.F.: Performance of Counter-and Corotating Arrays of Savonius Turbines, J. Energy, 2-1 (1978), 61
- 9) 村井・ほか4名: サボニウス型ロータの出力およびトルク特性に及ぼすフラップおよび集風板の影響, 流れの可視化, 4-Suppl. (昭59-10), 11
- 10) Bowden, G.J. and McAleese, S.A.: The Properties of Isolated and Coupled Savonius Rotors, Wind Engng., 8-4 (1984), 271
- 11) Bergels, G. and Athanassiadis, N.: On the Flow Field around a Savonius Rotor, Wind Engng., 6-3 (1982), 140
- 12) 高本・遠藤: サボニウス風車に関する一実験, ターボ機械, 4-2 (昭51-3), 136
- 13) 小川ほか2名: 可視化による二枚翼形状の解析 (サボニウス型風車の翼形状), 群馬工専レビュー, 2 (昭58), 13
- 14) 沢田・ほか2名: サボニウス風車の翼に作用する力の測定と翼まわりの流れの可視化, 機論, 51-471 (昭60-11), 3743
- 15) 藤沢・ほか2名: サボニウス風車周りの非定常フローパターンの計測, ターボ機械, 14-12 (昭61-11), 658