

サボニウス風車

(2円柱により発生する流れの影響)

Savonius type wind turbine
(Influence of flow induced by 2 cylinders)

上野 博之^{*1}(日大)
Hiroyuki UENO

三野 正洋^{*1}
Masahiro MINO

高田 紀久^{*2}(山産技短大)
Nori-hisa TAKADA

Abstract

Research of Savonius wind turbines has been performed using uniform flow. However, flow in the neighborhood of the wind turbine is shear flow. Accordingly, we study the effects of shear flow on the turning force of a Savonius wind turbine. The low velocity area produced by the cylinders decreases the revolution of rotor. The vortex released from the cylinders hardly reduces the revolution of rotor.

キーワード : 自然エネルギー、風力タービン、サボニウス羽根、トルク、うず法、偏風板

Key Words : Natural Energy, Wind Turbine, Savonius Rotor, Torque, Vortex Method, Deflecting Plate

1. はじめに

サボニウス風車の羽根(以後回転羽根と呼ぶ)の回転力を高めるために、羽根形状に対する検討が加えられ^{1), 2)}、また、偏風板に対する検討が加えられ³⁾、そして、平板で構成する集風装置に対する検討が加えられている^{1), 4), 5)}。集風装置の調査に関する膨大な組み合わせの中から、回転力を増す集風装置の設置位置、ならびに回転羽根の羽根形状があるとされている¹⁾。本研究は、この実験結果を参考に、回転羽根の回転力を増すためには、さらに膨大な組み合わせを考えることができる。

本研究は、回転羽根の周りに8枚の平板を設置した集風装置^{1), 4), 5)}が、回転羽根付近の流れに及ぼす影響を調べて、回転力を増す要因並びに回転力を阻害する要因を調査する。以下に示すが本研究の場合、現象を単純化することができる。そこでまず現象を単純化し、それから徐々に複雑な場合を調査し、最終的に総合して考察することとする。

以後、集風装置として使われる案内羽根を平板と呼ぶ。また、進み羽根円弧部凹面側から流入して進み羽根直線部先端と戻り羽根円弧部先端の間から流出する流れを、羽根間を通過する流れと呼ぶ。

回転羽根は流体抗力ならびに揚力により回転力を得るとされているから、集風装置を設置するとき、揚力と抗力がさらに強まることになる。しかし、回転羽根付近の流れは回転

羽根の回転一周期中の時期(以後回転角の時期と呼ぶ)により大きく異なる⁶⁾。そこで、回転羽根付近になにも置かない場合と比較して⁶⁾、また偏風板設置時⁷⁾と比較して、集風装置を設置するとき、個々の平板(案内羽根)から発生するはく離域を含んだ流れにより揚力、抗力が複雑な影響を受けると考えられる。

しかし、集風装置の平板の間隔は 45° であるから、たとえば偏風板と回転羽根の間付近に現れる流れの特徴が、平板を8枚設置するとき完全に消失することはない。なお、偏風板を設置する位置付近に平板を1枚だけ設置しても、偏風板設置時と同じ様な現象を観察できる。またたとえば、2枚の平板を設置するとき、平板が流れを集める(集風の効果と呼ぶ)ため、偏風板設置時より羽根間を通過する流れを強める平板の配置があるが、この現象は8枚設置する場合にも現れる。すなわち偏風板設置時と同じような現象を集風装置設置時には少し形態を変えて観察できる。そこで、集風装置付近の流れを単純化した形態の一つに偏風板の設置があると考えられることもできる。これらに関する詳細な観察結果は続報に示す。

集風装置を付けた回転羽根付近の流れを単純化して調査するが、本研究では、回転羽根に発生する揚力、そして回転羽根の下流側に設置された平板が回転力に及ぼす影響、また回転羽根の上流側に設置された平板付近の流れが回転力に及ぼす影響に関する調査に大別する。

ここでは回転羽根の上流側に設置した平板と回転羽根の間付近を通過する流れだけに着目するが、この流れは偏風板を使った実験によりさらに下記のように分けられる。

偏風板を設置する⁷⁾とき、次の3つの特徴が現れる。まず、

*1 日本大学生産工学部教授
(〒275-8575 習志野市泉町1-2-1)
e-mail : ueno@cit.nihon-u.ac.jp

*2 山形産業技術短期大学
(原稿受付: 2002年11月28日)

羽根間へ向く流れがさらに強まる回転角の時期がある。このとき進み羽根先端部付近を通過する流れも増す。また、偏風板から発生するはく離域が戻り羽根の一部を覆う回転角の時期がある。このとき戻り羽根に作用する流体抗力が減少すると考えられる。そして、回転羽根の回転方向と逆向きの流れが現れる時期がある。このとき、平板から発生したはく離域は戻り羽根を覆わなくなる。

偏風板の設置位置等を変えた実験によれば⁶⁾、羽根間へ向く流れを強めることにより回転羽根の回転力が強まると考えられる。しかし、偏風板の設置位置を少し変えても他の2つの現象が大きく変化することはないから、これらを調べるためには、偏風板を使った実験以外の実験方法を使うことが要求される。

本報告では、回転方向と逆向きに流れる流れが回転羽根の回転数に及ぼす影響を実験により調べる。なお、はく離域が戻り羽根の一部を覆う回転角の時期があるが、この時期付近に関しては続報に示す。

本報告では逆向き流れだけを取り上げるが、回転羽根の近くに平板等を設置すると羽根間へ向く流れ、集風の効果等の逆向き流れ以外の流れが現れるから、現象の観察を困難にすると考えられる。そこで、本報告では、2本の円柱が放出するはく離渦を使って逆向き流れについて考察する。円柱を設置する場合はほとんど集風の効果等を考慮する必要がない。本報告では、偏風板等を設置する場合と区別して、逆向き流れを以後回り込み流れと呼ぶ。

回転羽根の回転数が、回転羽根と円柱の設置位置により異なる状態を実験により調べ、渦法を使った数値実験²⁾により回転羽根付近の流れを調べ、実験結果と比較して回り込み流れに対する考察を行う。

2. 実験装置

実験装置の概要を Fig.1 に示す。平行部の長さが 4m で、断面が(高さ 485×幅 735mm)の風管出口部に2本の円柱($\phi 165 \times 485\text{mm}$)を置き、その下流側に回転羽根を置く。2本の円柱と回転羽根を固定するために風管出口部の上下に、風管と同じ幅の平板を置いた。なお、側面は開放とした。風速は送風機の回転数を変えて変更した。

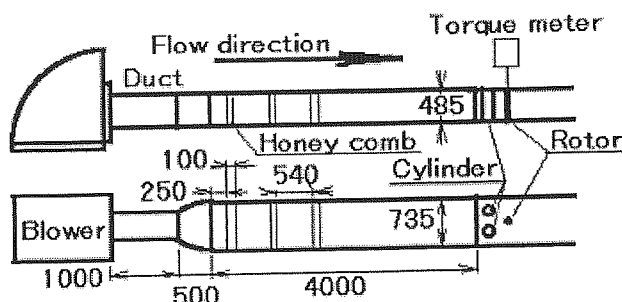


Fig.1 Experimental Apparatus

Fig.1の下図に示す風管出口部を拡大して Fig.2に示す。

Fig.2に示すx軸は主流に平行な方向にとる。円柱はx軸(横軸)に対して軸対称に設置する。縦軸(y軸)は主流の方向(x軸)に鉛直にとる。y軸は2本の円柱の中心を通る。

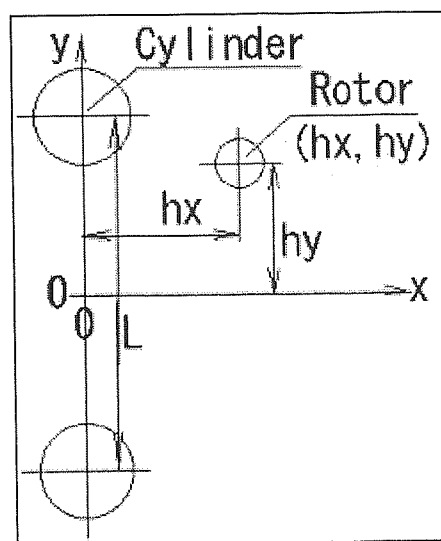


Fig.2 Position of two Cylinders and a Rotor

設置した風車の回転軸の位置を、座標(h_x, h_y)と書く。以後単に座標(h_x, h_y)と書く。

Fig.2を見て、上側に設置した円柱を上側円柱と呼び、下側に設置した円柱を下側円柱と呼ぶ。2本の円柱の中心間距離をLと書く。円柱なし(Lの表記なし)の場合、そして $L=400\text{mm}$ 、 $L=300\text{mm}$ の場合を示す。

Fig.1と Fig.2に示すRotor部(回転羽根)の詳細を Fig.3に示す。Fig.1と Fig.2と Fig.3を見て、主流は左から右へ流れているとする。回転羽根の回転方向は反時計まわりである。Fig.3を見て回転羽根の上側の羽根を戻り羽根と呼び、下側の羽根を進み羽根と呼ぶ。1枚の羽根の円弧部中心がある内側を凹面側と呼び、外側を凸面側と呼ぶ。

Fig.3の左側の図は実験に使用した回転羽根(単位 mm)の寸法である。右側は計算に使用した回転羽根(無次元)の図である。1枚の羽根の両端を結ぶ線分の長さを 1.0 とし、無次元であるから単位は(/)と記した。円弧部の半径は 0.4 とし、回転羽根の回転半径は 0.8 とした。

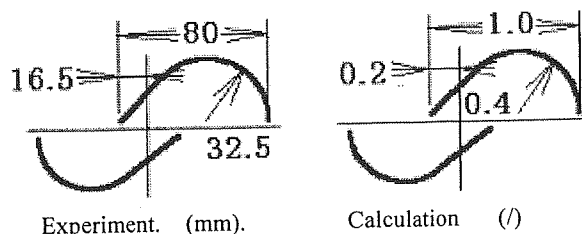


Fig.3 Wind turbine blades

本報告では、回転羽根の位置を変え、円柱間の間隔を変えて実験を行う。実験では、回転羽根の回転軸にかかる

制動用のトルクを一定に保ち、流速を変えて回転羽根の回転数を測定した。

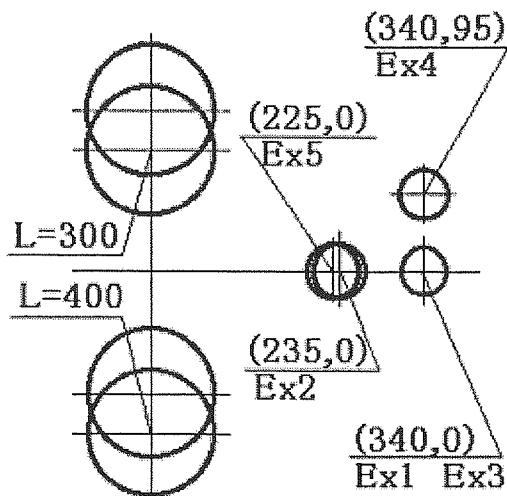


Fig. 4 Position of two cylinders and a Rotor

実験結果に示す円柱と回転羽根の位置 (Ex1～Ex5) を Fig. 4 に示す。

円柱を設置しない場合 (円柱なしの場合) を Ex1 と呼ぶ。回転羽根の位置は座標 (340,0) とする。

設置した円柱の間隔が $L=400\text{mm}$ の場合であるが、回転羽根の位置を座標 (235,0) とする場合を Ex2 と呼び、座標 (340,0) とする場合を Ex3 と呼び、座標 (340,95) とする場合を Ex4 と呼ぶ。

設置した円柱の間隔が $L=300\text{mm}$ の場合は、回転羽根の位置を座標 (225,0) とし、Ex5 と呼ぶ。

3. 実験結果

3. 1 風速の測定結果

実験結果の考察に風速の影響を考慮する必要がある。回転羽根を置かないで、2本の円柱の下流側で風速 (長時間の時間平均速度) を測定した結果を示す。 $x=0$ で $y=0$ の位置で測定した流速を基準の流速と呼ぶ。なお自由噴流の場合であるが、ポテンシャルコアが存在する長さは出口幅の 10～12 倍とされている⁸⁾。

2本の円柱を設置すると、円柱間の流れが増速すると考えられるが、風管出口部を開放型としたから、設置した円柱が障害物となって円柱群の外側を流れる流れが発生すること、円柱間の間隔が広いことから、円柱間を通過する流れの増速は無視できるくらい小さかった。

3. 1. 1 y軸方向の速度分布

$L=400\text{mm}$ の場合であるが、 $x=350\text{mm}$ の位置で測定したところ、 y が $+90\sim-90\text{mm}$ の範囲では風速はほぼ一定とみなせる。なお、円柱間の内側の距離は $400\text{mm}-165\text{mm}=2\times 117.5\text{mm}$ である。

3. 1. 2 x軸方向の速度分布

x軸上 ($y=0$) でx軸方向に流速を測定した。 x が $0\text{mm}\sim 200\text{mm}$ までは、風速は一定とみなせる。

$L=300\text{mm}$ の場合、x軸方向の流速は $x=200\text{mm}$ 付近から急速に遅くなり、たとえば $x=350\text{mm}$ の位置では、基準の流速の約 50% に遅くなる。

$L=400\text{mm}$ の場合は、 $x=350\text{mm}$ の位置で基準の流速の約 80% に遅くなる。この位置はほぼ Ex3 の場合 ($x=340\text{mm}$) の位置である。

主流速度の急速な減衰は、円柱の下流側にあるはく離域によって発生する低速部と円柱間を流れる流れとの混合が促進されることによるものである。

3. 1. 3 回転羽根の位置付近の風速

Fig. 4 に示す回転羽根設置位置付近における風速である。前述のように回転羽根を設置しない場合である。

$x=225\text{mm}$ の位置では、 $L=300\text{mm}$ の場合 (Ex5 の位置) は、基準の流速の約 85% に減速し、 $L=400\text{mm}$ の場合 (Ex2 の位置付近) は基準の流速の約 97% に減速する。 $L=300\text{mm}$ の場合は円柱間の流れと円柱のはく離渦との混合が進行しているが、 $L=400\text{mm}$ の場合は影響が殆ど及んでいないと考えられる。

$L=400\text{mm}$ の場合であるが、さらに下流側の Ex3 の位置 ($x=340\text{mm}$) 付近では基準の流速の約 80% に減速する。

Ex5 の位置 ($L=300\text{mm}$) は、 Ex3 の位置よりx軸方向の距離が約 100mm だけ円柱側にあるが、風速は Ex3 の場合より約 5% だけ遅い。

3. 2 回転数の測定結果

Fig. 5 は回転数の測定結果である。 Fig. 4 に示す円柱並びに回転羽根の設置位置では、風速が早くなるにつれて回転数は増加する傾向を示し、風速に対する回転数増加の増加率の傾向が大きく異なる事はない。

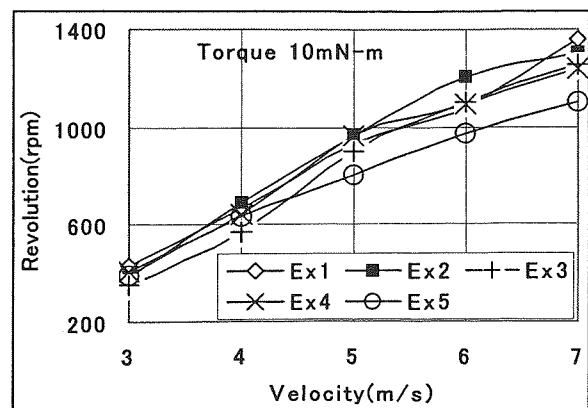


Fig. 5 Influence of two cylinders

3. 2. 1 円柱間距離の影響

Ex2とEx5は回転羽根がほぼ同じ位置にある(Fig.4)。前述の風速測定によると、風速は $97\% - 85\% = 12\%$ だけ異なる。回転羽根を設置しないときの流速を使って比較することになるが、Ex2の場合の回転数と風速の関係で、 12% だけ風速が減少したとすると、Ex2の場合の回転数はEx5の場合の回転数にほぼ等しくなる。

3.2.2 円柱なしとの比較

円柱なしの場合であるEx1と、 $L=400\text{mm}$ の場合であるEx3は回転羽根が同じ位置にある。Ex3の場合は 80% の減速であり、はく離渦の影響が現れると考えられるが回転数は殆ど変わらない。

Ex2の場合は 97% の減速であり、はく離渦の影響が少ないと考えられる。減速しないEx1(円柱なし)の場合とほぼ同じ回転数である。

はく離渦の影響を軽減する現象があると考えられる。

3.2.3 y軸方向位置の影響

Ex4の位置では、回転羽根は円柱から放出されるはく離渦の影響を受けると予測される。しかし回転数はEx1、Ex2、Ex3の場合とほとんど同じである。回転羽根を設置することにより円柱の下流側の流れに変化があると考えられる。

回転羽根を設置する位置がEx2、Ex5の位置付近の場合、流速測定値を用いて考察ができるが、Ex3、Ex4の場合は回転羽根を設置しないで測定した風速だけでは考察できない。

4. 計算方法

本計算は詳細なデータを得ることが目的ではなく、回転羽根付近の流れの傾向を調べ、上記実験結果の考察に用いることが目的である。したがって、定性的な表現を用いる。なお、風速は 4.3m/s 付近を対象とする。

サボニウス風車の羽根付近の流れは、離散渦法を用いて計算する。粘性の影響は無視する。計算に使用した諸係数は、従来の研究を参考にして決めた²⁾。

サボニウス風車の羽根を回転させる場合を回転羽根と呼び、回転させない場合を静止羽根と呼ぶ。1枚の羽根の両端を結ぶ線分がx軸となす角を θ とする。サボニウス風車の羽根の位置が Fig.3の位置にある場合を、回転羽根の場合は回転羽根の回転角 $\theta = 0^\circ$ と呼び(計算開始から3回転目付近で示す)、静止羽根の場合は設置角 $\theta = 0^\circ$ と呼ぶ。1回の計算に 3° 回転するとし、周速比は 1.1 とする。

計算に使用する円柱の半径は 1.5 とする。サボニウス風車の回転軸は $hy=0$ 、あるいは円柱の内側と同じ高さ($hy=5$)に設置する。

5. 計算結果

静止羽根付近の流れの特徴を調べ、それから回転羽根

付近の流れの特徴を調べる。

5.1 静止羽根の場合

設置角を $\theta = 90^\circ$ 、 $L=7$ 、 $hx=5.0$ とした、静止羽根付近の流れの一例を、Fig.6と Fig.7に示す。

Fig.6と Fig.7に示した円柱と円柱との間(横軸)付近で、図の左端(円柱の上流側)付近の流れは、ほぼ十分上流側の流れを表している。

円柱の下流側で静止羽根の影響が少ないと、たとえば Fig.6に示すが、カルマン渦の形成を見ることができる。

5.1.1 円柱と静止羽根から放出される渦の混合

円柱から放出される渦が、静止羽根付近を通過して静止羽根の下流側で、静止羽根から放出される渦と混合(以後渦の混合と呼ぶ)することがある。Fig.6の場合は上側円柱から放出された渦との渦の混合がある。Fig.7の場合は下側円柱から放出された渦との渦の混合がある。

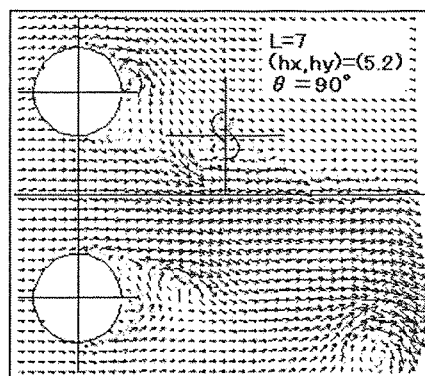


Fig.6 Static Rotor $(hx, hy) = (5, 2)$

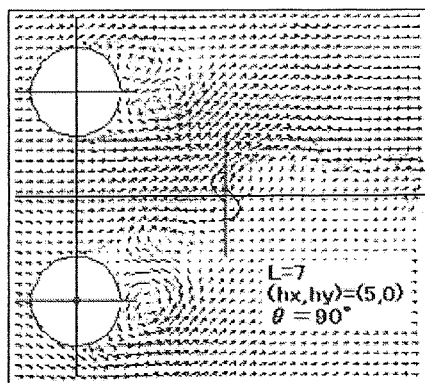


Fig.7 Static Rotor $(hx, hy) = (5, 0)$

渦の混合は円柱のはく離域が静止羽根に近いために発生する。渦の混合があるとき、円柱間の流れは渦の混合がある側の円柱(Fig.6の場合は上側円柱)と静止羽根の間を通過しない。したがって、Fig.6の場合は静止羽根の下側を流れ、Fig.7の場合は静止羽根の上側(回り込み流れ)を流れる。

Fig.6と Fig.7に示した静止羽根の位置を保ち、円柱間の長さ L を広げる($L=9$)と、円柱と静止羽根の間が離れるた

め渦の混合が発生しなくなり、円柱間の流れは静止羽根を取り囲むように、静止羽根の上下側に分かれて通過する。

5. 1. 2 円柱間の流れの方向

静止羽根からはく離する流れによって発生するはく離渦に、計算開始時の一時期だけ、故意に大きい渦度（あるいは小さい渦度）を与えると、円柱間の流れが静止羽根の上側を、あるいは下側を通過する流れとなる。すなわち、流れの方向を変えることができる。

静止羽根の位置を変えても、また、静止羽根の設置角（ $\theta = 0^\circ \sim 360^\circ$ ）を変えても、計算の初期に円柱間の流れの方向を決まると、計算の途中でその方向が変わることはなかった。

静止羽根の場合の実験データは実験のたびごとに変わるので、本報告では示すことができないが、この要因の一つは円柱間の流れの方向が変わることにあると考えられる。

5. 2 回転羽根の場合

円柱から放出される渦が回転羽根付近を移動する場合を Fig.8 ($L=9$) に示し、回転の一時期に回り込み流れが現れる場合を Fig.9 ($L=7$) に示す。円柱間の流れが回転羽根の上側と下側へ分かれて流れる場合を Fig.10 に示す (Fig.8の回転羽根の位置を移動した)。

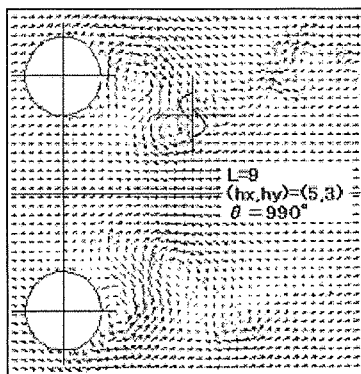


Fig.8 Rotating Blade $L=9$, $\theta = 990^\circ$

なお、円柱間の長さ L 等は実験の場合と一致していないが、現象を見やすくする一例として示す。

5. 2. 1 静止羽根の場合と異なる事項

次の3つの特徴がある。

1.) 円柱から放出される渦の変動が大きくなる。

円柱半径と回転羽根の回転半径がほぼ同じ(それぞれ1.5と0.8)大きさであるから、円柱から放出される渦は回転羽根の回転の影響を受ける⁷⁾。円柱と回転羽根の間が図示の程度に離れているとき、Fig.8に示す下側円柱の下流側とFig.10の上側・下側円柱の下流側で、回転羽根の回転につれて発生する大きなうねりのような流れ(以後蛇行する流れと呼ぶ)を観察できる。円柱だけを設置した場合と比較しても円柱下流側の流れの変動は大きい。

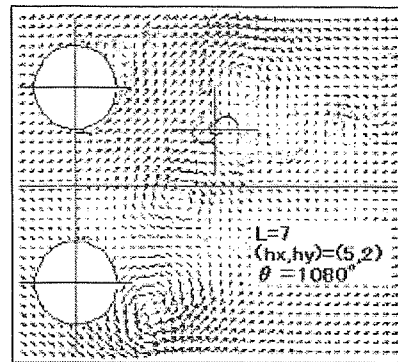


Fig.9 Rotating Blade $L=7$, $\theta = 1080^\circ$

2.) 計算の初期に円柱間の流れの方向を定められない。

回転羽根の場合は、回転羽根による流れの変動が激しいから、計算の初期に計算条件を変更しても円柱間の流れの方向を変えることはできない。

3.) 回転羽根に向く流れの方向の変化。

回転羽根の回転の影響を受けて、回転角の一時期に円柱間の流れが回り込み流れとなることがあり、また回転羽根の下側を流れることがある。回転羽根の下流側で渦の混合が生ずる場合もあり、Fig.8に示すように回転羽根を覆うような渦の混合が発生する場合もある。

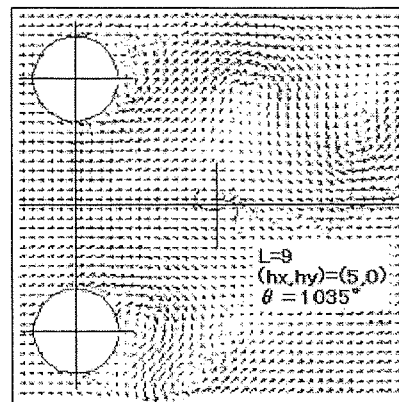


Fig.10 Rotating Blade $L=9$, $\theta = 1035^\circ$

5. 2. 2 回り込み流れが発生しない流れ

Fig.8の場合は回転の一周期の大部分で上側円柱の渦と回転羽根の渦が渦の混合を起こしており、また、回転の一時期に円柱の渦が回転羽根を覆うような流れとなる。円柱間の間隔 L が大きいために、下側円柱に発生する渦と回転羽根の渦が、回転羽根の近くで渦の混合を起こすことはない。円柱間の流れは回転羽根の下側を通過する。

Fig.10の場合は回転の一周期を通して渦の混合が現れないが、蛇行する流れが現れる。上側円柱の下流側にできる大きな蛇行する流れ(Fig.10)の移動速度は、回転羽根の回転直径の1.5倍程度を移動するのに、回転羽根の回転の約 $1/2$ 周期を使っている。下側円柱付近では、その移動速度が非常に遅く、Fig.10に示すが、下流側へ行くと

急に早くなる。

5.2.3 円柱間の流れの方向変化

Fig.9に示す程度に回転羽根が2本の円柱から離れている場合である。

円柱間の流れは回転羽根の上側を流れる回転角の時期と下側を流れる回転角の時期を交互に持つ。偏風板設置時に偏風板と回転羽根の間を流れる流れの現象⁷⁾と同じである。

2本の円柱の下側円柱から放出された渦は、Fig.9の場合、 $x=4.5$ 付近で x 軸を横切る程度に回転羽根の方向へ向いて移動し、その下流側では回転羽根から放出される渦との渦の混合を起こす。Fig.9に示した円柱の位置を保ち回転羽根の位置を(5,0)に移動しても、下側円柱付近の渦が回転羽根の方向へ移動し、回転羽根の上側を流れる回転角の時期が現れる。

下側円柱と回転羽根の間隔が狭まるにつれて現れる現象であるが、下側円柱付近の流れが回転羽根の上側へ向く流れとなり、一時的には離渦が回転羽根を覆うことになる円柱間隔並びに円柱と回転羽根間隔がある。

5.3 回転羽根の回転数に関する考察

5.3.1 回転数の低下

円柱と回転羽根との間隔を狭めるにつれて、円柱から放出された渦が回転の一時に回転羽根を覆うような流れとなる。一例をFig.8に示す。このとき回転羽根付近で回転羽根に向く流れの速度が一時的に低下するから、流れの速度を時間的に平均すると速度は遅くなる。この状態のとき、回転羽根の回転数は低下すると考えられる。この状態を Ex5 で見ることができる。

5.3.2 平行流に類似した流れの発生

渦の混合が回転羽根より下流側で発生する場合であるが、円柱間の流れの方向が回転羽根の上側(回り込み流れ)、下側へ交互に変わることがある。このとき、円柱から放出された渦が回転羽根を覆うことはない。したがって、変動する流れの速度を時間的に平均しても、円柱を設置しない場合に得られる平行流の速度とほとんど変わらないと考えられる。すなわち、円柱間を通過した流れの方向変化は、回転羽根から見ると、平行流の角度を変更したような流れとなるから、回り込み流れが発生する位置付近に設置される回転羽根の回転数はほとんど変わらないと考えられる。たとえば、回転羽根の設置位置が実験 Ex.4の場合、円柱と回転羽根の距離は短い、Fig.9に示す回り込み流れがある。この状態を回転羽根が円柱から離れた位置にある Ex3と Ex4 で見ることができる。

5.3.3 回転数を低下させない要因

回転羽根と円柱との距離に近い実験 Ex.2の場合、回転

羽根付近の流れは円柱からはく離れた渦の影響をほとんど受けないと考えられるから円柱なしの場合とほぼ同じ回転数であると考えられる。

回転羽根に流入する流れの角度が変化しても、回転羽根は主流の流入角度の影響を受けないから、回転数は変わらないと考えられる。すなわち、回り込み流れの発生等による流れの方向変化は、サボニウス風車の回転数を低下させる要因ではないと考えられる。

6. まとめ

2本の円柱から放出される大きな渦が、下流側にあるサボニウス風車の羽根付近の流れに及ぼす影響を調べた。

サボニウス風車の戻り羽根と円柱の間に、回転方向と逆向きに流れる流れが発生する。これは偏風板を設置する時に現れる流れと同じ現象である。

逆向きに流れる流れは、サボニウス風車の羽根に向く流れの方向を変えているが、サボニウス風車の羽根は風向の影響を受けないから、回転数を減らす役割はない。

逆向きの流れは、円柱間隔が一定の範囲内にあるとき、また、サボニウス風車の羽根が円柱の近くにあるとき発生する。このとき、サボニウス風車の羽根の回転数は次のようになる。

- (1) 円柱を設置しないときに得られる平行流の場合と同じくらいの回転数が得られる。
- (2) 設置場所に範囲はあるが、サボニウス風車の羽根の設置位置を変えてもサボニウス風車の羽根の回転数が変わらない範囲がある。

7. 引用文献

- 1) 呉鐘、木谷収、岡本嗣男、鳥居徹: サボニウス風車の効率向上に関する研究(第2報)、農業機械学会誌 58-4(1996)3-7
- 2) 小川武範: サボニウス風車に関する研究(第1報理論解析)、日本機械学会論文集(B編)49-441(1983)976-984
- 3) 長澤忠延、池田敏彦、桂川順、吉田尚史、土屋良明: 案内羽根を持つサボニウス風車の出力特性、日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集(1999.10.7-8・鳥取市)495-496
- 4) 小川武範、田原和之、鈴木計夫: サボニウス風車に関する研究(第2報、静止案内羽根を持つ場合)機械学会論文集(B編)51-471(1985)3516-3522
- 5) 呉鐘、木谷収、岡本嗣男、鳥居徹: サボニウス風車の効率向上に関する研究(第1報)、農業機械学会誌 58-2(1996)11-17
- 6) 上野博之、三野正洋、高田紀久: サボニウス風車(回転羽根凸面側の流れ)、太陽エネルギー 28-5(2002)、42-49
- 7) 上野博之、三野正洋、高田紀久: サボニウス風車(偏風板と羽根付近の流れ)、太陽エネルギー 28-5(2002)、50-55
- 8) 粘性流体の力学 生井武文、井上雅弘 理工学社 1978 p 206-207