

サボニウス風車（集風板の影響）

Savonius type wind turbine(The influence of wind concentrator)

上野博之^{*1}
Hiroyuki UENO

三野正洋^{*1}
Masahiro MINO

高田紀久^{*2}
Norihisa TAKADA

Abstract

There have been experiments that used a wind concentrator to increase the revolving speed of a wind turbine. This research also examined the effect of the wind concentrator on the revolving speed of the wind turbine. This paper handles a case of the wind concentrator composed of flat plates.

As the number of flat plate increases, the revolving speed tends to increase. However, when the number exceeds five, the revolving speed of the wind turbine tends to decrease as the number of installed plates increases. This paper shows that a decline in the revolving speed is originated from the flat plates installed in the downstream of a rotation axis. It also shows that the installed position that becomes the obstacle of rotation moves depending on the interaction of flows between the flat plates.

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. 概要

大別すると風車は揚力型と抗力型に分けられる。サボニウス風車は抗力型であるとされているが、軸出力が少ないため、軸出力を増すためにサボニウス風車の羽根（以後回転羽根と呼ぶ）のまわりに集風装置（静止案内羽根）を付けた模型実験が行われている^{1), 2), 3), 4)}。文献 1), 3) を参考にして集風板と呼ぶ。集風板として複数枚の平板が使用されている（以後、平板と呼ぶ）。

模型実験を行う場合、実験結果の考察は、平板の長さ、平板の配置、回転羽根の形状、負荷による回転数低下により、大きく変わる^{1)~4)}。さらに模型実験結果を実機へ適用するとき、速度変動（自然風）の影響を考慮した寸法効果（Re 数の影響）の影響も大きな調査対象となる。しかし、全ての要因の中から少数の要因を含む実験^{1)~4)}に限定しても、得られた現象を非常に複雑にする。

本研究^{5), 6)}では現象を単純化する。本報告では、回転羽根の形状を変更せず、平板配置の変更により回転羽根が受ける影響だけを調べる。実験は、回転軸に作用するトルクをほぼ一定（軸受け摩擦程度とした）に保ち、平板の設置により回転羽根が受ける影響を回転数の変化として読み取る方法とする。したがって本報告の範囲外となるが、効果的な配置を選び、模型実験としての風車の出力に関する総合的考察を行う必要がある。

平板の設置方法として、8枚の平板を使用する方法^{1), 3)}と、1, 2枚程度の平板を使用し、その設置位置を幅広く変更する方法⁴⁾がある。前者の方法は平板の設置位置がほぼ定まっている^{1), 3)}。本報告は、一枚の羽根程度の平板長さ、平板幅とし、前者の方法を^{1), 3)}参考にする。

1枚だけを設置して平板の設置位置が、回転羽根の回転数に及ぼす影響を調べた。偏風板^{4), 6)}を設置する位置付近で、偏風板設置時と同じような回転数の増加が現れたが、回転数を減少させる平板の設置位置も現れた。

主に、2枚から3枚の平板を設置して回転数を調べ、回転数が増加する設置位置、並びに回転数が減少する設置位置を分類することができた。

本報告では、平板を5枚から8枚まで設置するとき、設置枚数が増えるにつれて複雑になる平板間の流れの干渉が回転数に大きな影響を及ぼすこと示す。

なお、平板が回転羽根の回転数に及ぼす影響は風管を用いた実験により調べ、回転羽根並びに平板付近の流れを数値実験^{7), 8)}により調べて実験結果の考察を行う。

2. 実験装置

Fig.1に実験装置概要を示す。風管（485×735mm）の出口部に平板と回転羽根がある。回転羽根の回転軸には回転形とトルクメーターを付けた（図では省略する）。平板設置の影響は回転数の変化として観察する。

実験と計算に使用した回転羽根の形状を Fig.2に示す。Fig.3は平板と回転羽根の相対的位置を示す。回転羽根は戻り羽根と進み羽根からなる。

*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: 2003年10月21日)

計算では1枚の羽根の両端を結ぶ線分の長さを1.0とする。回転羽根の回転軸中心を通り、主流の方向に平行に横軸を、横軸に直角に縦軸をとる。

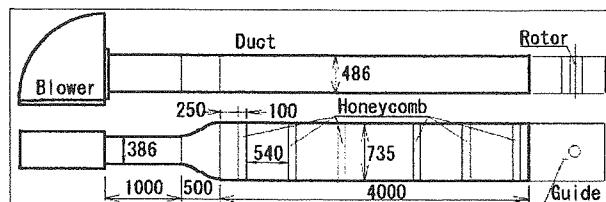


Fig. 1 Experimental apparatus

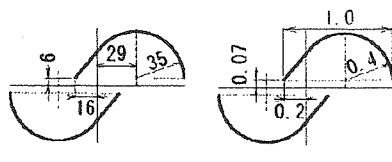


Fig. 2 Rotor of wind turbine

回転羽根の回転軸と同心の、半径1.0の基礎円を描き、 45° の勾配を持つ直線との交点を求める。その交点を通る、Fig.3に示すGuide vane 1のように横軸に平行な直線を描く。同様に 45° 間隔に8本の線を描き平板設置用の溝とする。溝に番号1～8をつける。溝に平板を立てる。溝1に立てた平板の位置を $\delta = 0^\circ$ とする。反時計周りを正とする。回転羽根の回転半径(0.8)と平板(長さ1.1)の内側先端が描く円との間の隙間を隙間と呼ぶ。隙間は0.2から1.13まで変えた。平板は円盤(内径2.0、外径6.25)上に設置した。

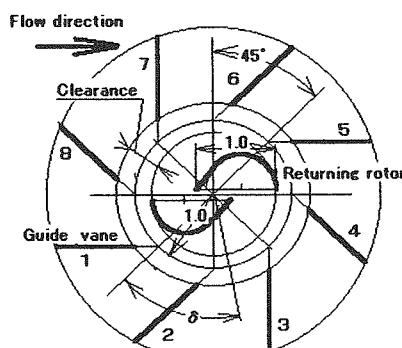


Fig. 3 Guide vane

風速は 4.5m/s である。まず、平板を置かない回転羽根だけのときの回転数を測定し、次に平板を設置して回転数を測定する。置かないときの回転数で置いたときの回転数を除して回転数比とする。円盤をまわす角度 δ を 15° 間隔に変えて実験を行う。

平板を連続して溝に置いた場合をTypeと呼ぶ。たとえば4枚の平板を溝番号1, 8, 7, 6におく場合はType4と呼ぶ。後述するFig. 10～Fig. 13に示すが、不連続に設置する場合は6A等と呼ぶ。

3. 実験結果

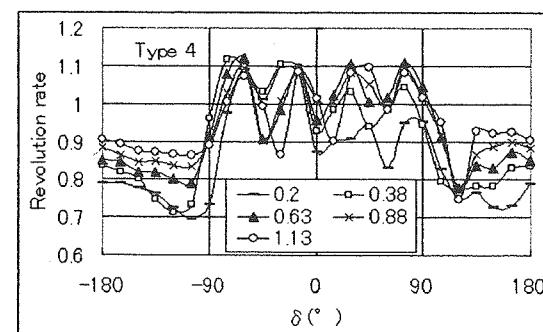


Fig. 4 In case of 4 plates

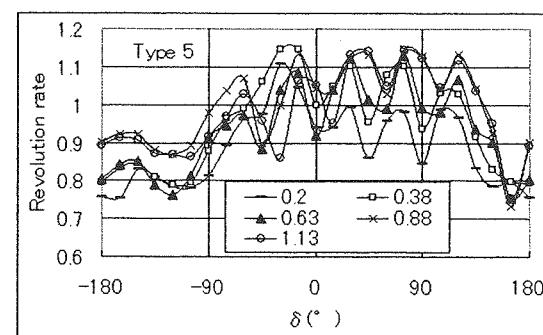


Fig. 5 In case of 5 plates

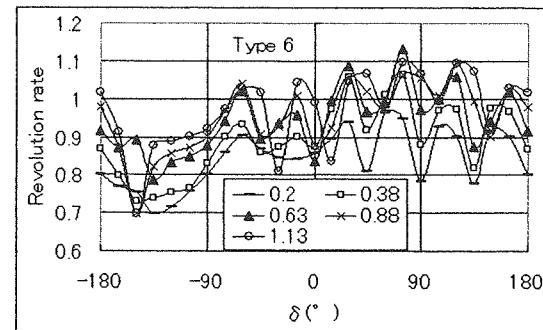


Fig. 6 In case of 6 plates

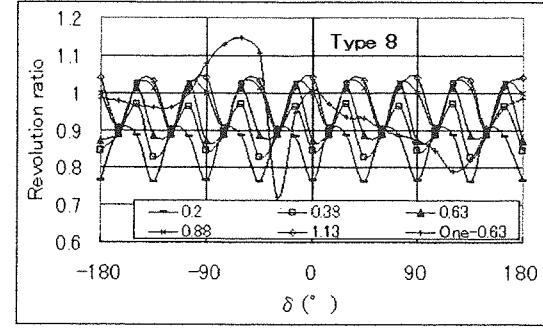


Fig. 7 In case of 8 plates

Fig. 4～Fig. 7は平板の設置枚数を4, 5, 6, 8とし、隙間を変えて回転数比の傾向を調べた結果である。Typeと呼ぶ平板配置の場合である。なおFig. 7の中に、比較のため1枚の平板を設置する⁵⁾ときの回転数比の傾向を記号+

で示す。隙間は 0.63 の場合である。

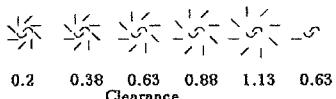


Fig. 8 Position of plates(in case of 8 plates)

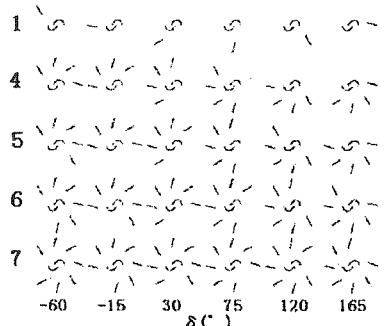


Fig. 9 Position of plates (Clearance=0.88)

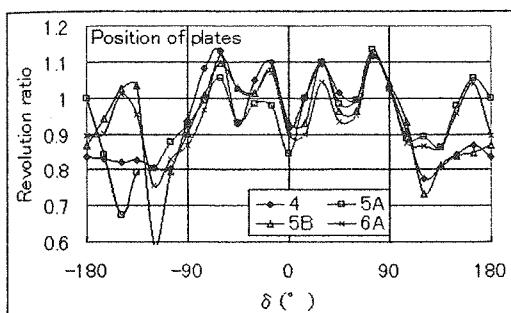


Fig. 10 Influence of position

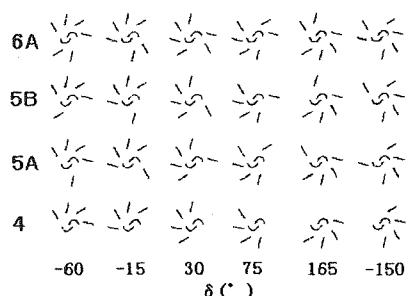


Fig. 11 Position of plates (Clearance=0.63)

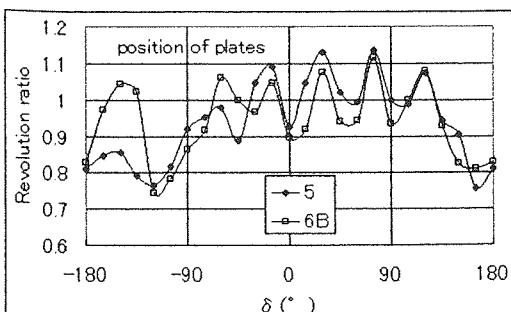


Fig. 12 Influence of position

Fig. 8は、8枚の平板を設置したときの回転羽根と平板との相対的な位置を示す。

Fig. 9は円盤をまわす角度 δ によって変化する平板の位置の一例である。隙間を 0.88 とした場合で、設置枚数は 1, 4, 5, 6, 7 である。

Fig. 10は平板を不連続に設置したときの回転数比の傾向である。隙間は 0.63 である。Fig. 10の場合の平板配置例を Fig. 11 に示す。Fig. 3 に示した溝番号 1, 8, 7, 6 に平板を設置し、さらに溝番号 4 に設置した平板配置を 5A、溝番号 3 の場合を 5B、溝番号 3, 4 の場合を 6A とする。なお、Type 4 の場合を記号 4 と記し併記する。

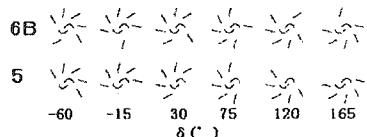


Fig. 13 Position of plates (Clearance=0.63)

Fig. 12 も不連続に設置したときである。Fig. 12 の場合の平板配置例を Fig. 13 に示す。溝番号 1, 8, 7, 6, 5 に平板を設置し、さらに溝番号 3 に設置する配置を 6B とする。Type 5 の場合を 5 と記し併記する。

回転数比が極大となり、さらにその値が最大値付近となるときを、以後単に極大値と呼ぶ。

3. 1 偏風板の効果

平板を 1 枚だけ設置した場合、一例を Fig. 7 の中に示したが、 $\delta = -60^\circ$ 付近だけで回転数比は高く、その他の角度範囲では低い。この現象を偏風板の効果と呼ぶ。

平板を 2 枚から 4 枚まで増やしても、一例を Fig. 4 に示すが、設置した平板の中の一枚が -60° 付近にあるときだけ回転数比は高くなる。

Fig. 7 に示した Type 8 の場合、回転数比に極大値が現れるときの δ の位置はほぼ 45° 間隔に設置枚数と同じ 8 個所であり、 -60° 、 -15° 、 $+30^\circ$ 、 $+75^\circ$ 、 $+120^\circ$ 、等である。したがって 8 枚の平板を設置しても偏風板の効果が現れると考えられる。

Type 8 の場合であるが、隙間が 0.2 ～ 0.63 程度までは隙間が広くなるにつれて回転数比は全体的に増加する。0.88 ～ 1.13 程度になると隙間を変えても増減する回転数比の傾向はほとんど変わらない。極大値になるときの δ の位置は隙間が増すにつれて変わる。たとえば隙間が 0.2 のときは 15° と 30° の間にあるが、隙間が 1.13 のときは 30° と 45° の間にある。

8 枚の平板を設置しても偏風板の効果は隙間の影響を受けると考えられる。

3. 2 平板の設置枚数により変わる回転数比の傾向

Type 4 の場合、回転数比が極大値を示す δ の位置はほぼ 45° 間隔に現れ、平板の設置枚数に等しい 4 個所だけ

ある。

平板の設置枚数が4枚より増えると $\delta = -60^\circ$ 付近で回転数比の低下が発生する。

Type5の場合、 $\delta = -60^\circ$ 付近の回転数比は低いが、 $\delta = -15^\circ$ 付近では高くなり、 $\delta = +30^\circ$ から $+120^\circ$ 付近の間の3箇所だけで極大値となる。

Type6の場合 $\delta = -60^\circ$ から $+75^\circ$ 付近に向けて回転数比が増加し、 $\delta = +75^\circ$ だけで極大値となる。なお $\delta = +15^\circ$ と $+120^\circ$ の回転数比の値はほぼ等しい。

Type7の場合もType6の場合と類似した回転数比の傾向を示すが、極大値はType6の場合より低くなる。

そしてType8になると8箇所ある極大値は全体的に低くなる。4箇所に極大値があるType4の場合と同様に、平板の設置枚数と同じ数の極大値が現れる。

隙間が0.8程度以上の場合に限定すると、隙間の大きさを変えることよりも平板の設置枚数を変えることの方が、回転数比の傾向を大きく変える。以後、隙間が0.63程度以上の場合を調べる。

3.3 回転数比を低下させる一要因

平板を1枚だけ設置するとき、一例をFig. 7の中に示したが、 $\delta = +120^\circ$ 付近では回転数比が低下する。このとき、Fig. 18の $\delta = 0^\circ$ に示したような、進み羽根と平板の間付近に低速域が現れる。この現象を妨害板の影響と呼ぶ。

一枚の平板に偏風板の効果が現れる設置位置でも、別の平板の影響で回転数比が低くなることがある。

$\delta = -60^\circ$ のとき、Type4の場合は回転数比が極大値となるが、Type5の場合は回転数比が低い。Type4の平板配置の特徴は $+120^\circ$ の位置に平板がないことである。

$+120^\circ$ の位置に平板があるとき、Type6とType7の場合でも回転数比の低下が現れる。すなわち、平板の設置枚数が1枚から7枚の場合でも妨害板の影響が現れる。

しかし、後述する3.5項と3.6項に示す効果も現れるので、主に、 -15° と $+30^\circ$ 付近に平板を設置していない δ 付近を取り上げて示した。

なお、妨害板の影響は $+120^\circ$ の位置付近に限定されないことを示しておく。

$\delta = +30^\circ$ の場合であるが、配置5Bの平板配置にさらに $+165^\circ$ の位置に平板を追加すると配置6Aとなる。配置5Bの場合は $+120^\circ$ の位置に設置した平板の影響が現れず回転数比は極大値となる(後述する)が、配置6Aの場合は回転数比がType8の場合程度に低下する。同様の現象はType6の場合で $\delta = +165^\circ$ のときも現れ、またType7の場合も同じような傾向を示す。

すなわち、 $+165^\circ$ の位置に設置した平板に妨害板の影響が現れることがある。

3.4 妨害板の影響が減る平板配置

これに対してType5並びにType6の平板配置の場合、回転数比は $\delta = +120^\circ$ のときに高い値を示す。妨害板の影

響を緩和する平板配置があると考えられる。

後述の3.7項に示すが、上流側の平板の後流中にある平板は回転数に及ぼす影響が少ないと考えられる。また、上流側の平板が流れの方向を変えるとき、妨害板の影響が緩和される可能性がある。そこで、 $+120^\circ$ の位置を取り上げて妨害板の影響の緩和について調べる。

-60° 、 $+120^\circ$ の位置に平板が設置されており、さらに $+30^\circ$ の位置に追加する場合を調べる。

Fig. 13に示すが $\delta = -60^\circ$ のとき、Type5の平板配置にさらに $+30^\circ$ の位置に平板を追加設置すると配置6Bとなる。回転数比を比較するとType5の場合より配置6Bの場合の方が高い。

Fig. 10に示すが、 $\delta = -15^\circ$ で配置5A(Fig. 11)の平板配置に、さらに $+30^\circ$ の位置に平板を追加すると、 $\delta = +30^\circ$ で配置6B(Fig. 13)の平板配置となる。配置6Bの回転数比は $+120^\circ$ の位置に平板を設置しないType5の場合(極大値となる)より低いが、配置5Aのときより高くなる。

妨害板の影響を緩和していると考えられる。

3.5 集風の効果

平板を1枚だけ設置するとき、 $\delta = -30^\circ$ 付近に設置された平板から発生するはく離域は回転羽根付近に達して回転数比が大きく低下する。この現象をはく離板の影響と呼ぶ。一例をFig. 7の中に示した。

しかし2枚の平板を 45° の間隔(溝番号1と8)に設置するとき、 $\delta = -30^\circ$ 付近でも回転数比の低下は少なくなる。この現象を集風の効果と呼ぶ。

平板の設置枚数が5、6、7枚のとき、妨害板の影響が現れて現象の観察が困難になるから、Type4の場合で集風の効果を見る。

-60° から -15° の間である $\delta = -45^\circ$ にある回転数比の極小値は、 $+30^\circ$ と $+75^\circ$ の間にある極小値より少し低い値である。 -60° から -15° の間では溝番号1と8に設置した平板に集風の効果が現れると考えられる。これに對して $+30^\circ$ と $+75^\circ$ の間では溝番号8と7の平板に集風の効果が現れ、さらに溝番号1の平板は、3.4項に示した進み羽根凸面側の下流側へ向く流れを発生させているから、回転数比を高めると考えられる。以上を集風の効果と呼ぶ。

平板の設置枚数が8枚の場合でも、はく離板の影響による回転数比の低下を軽減する、集風の効果が現れると考えられる。

3.6 風向を限定する場合

たとえばType4の場合、偏風板の効果が現れない $\delta = -105^\circ \sim 180^\circ \sim +120^\circ$ 付近の角度範囲で回転数比は大きく低下する。一方、全ての風向に対応できるとされているType8の場合は 45° 間隔に偏風板の効果が現れ、集風の効果も現れるから、Type4の -105° 付近で見るような回転数比の局所的な低下は現れない。

円盤をまわす角度 δ の一周期について平均した回転数比は、隙間が 0.88 の場合、Type8では 0.978 、Type4では 0.947 である。

次に偏風板の効果が現れる角度範囲内で平均する。一例として隙間が 0.88 の場合を示す。Type5の場合は $-15^\circ \sim +120^\circ$ の範囲で平均して 1.095 である。Type4の場合は $-60^\circ \sim +75^\circ$ の範囲で平均して 1.032 である。風向を限定すると平均回転数比が増加する。

3.7 回転数比に及ぼす影響が少ない平板配置

平板は回転数比を高めるために使用されるが、風向により回転数比の増減に影響を及ぼさない平板配置がある。一例を以下に示す。

Fig. 10の中の $\delta = +75^\circ$ のとき、Type4、配置5A、5B、6Aの場合の回転数比はほぼ同じである。Type4の平板配置にさらに平板を付加して配置5A、5B、6Aとしてある。付加した平板は、上流側に設置した平板の後流の影響を受ける配置となっている。

Type4の場合は4個所に極大値があるから、極大値には -60° に設置した平板だけが影響しており、他の平板は影響を及ぼしていない。しかし、前述の3.5項に示したが、他の平板の一部は極大値間で発生する局所的な回転数比の低下を妨げている。

隙間が広いときに現れる現象であるが、たとえば配置5Aで $\delta = +30^\circ$ のとき、進み羽根凸面側の近くを流れる流れが $+165^\circ$ の位置に設置した平板の内側先端と回転羽根の間を流れようになることがある。この状態のとき流れの概要は後述するFig. 17の右図に示す。

3.8 平板群から流出する流路の確保

風向が一方向に限定されたとすると、流出路の確保が必要になることを示す。

Fig.10、Fig.12に示すが、 $+120^\circ$ の位置に平板を設置しないとき回転数比は高い。

Type5で $\delta = +120^\circ$ のとき、さらに -105° の位置に平板を追加するとType6の配置となり(-150° と $+165^\circ$ に平板がない)、 -150° の位置に平板を追加すると配置6Bとなる(-105° と $+165^\circ$ に平板がない)。共に回転数比に大きな相違は現れない。

一方、Type5で $\delta = +120^\circ$ のとき、さらに $+165^\circ$ の位置に平板を追加すると Type6で $\delta = +165^\circ$ の配置となる。 -150° と -105° に平板を設置していないが回転数比は低下する。前述(3.3項)の妨害板の影響である。

同様に前述(3.3項)の妨害板の影響によるものであるが、回転軸より下流側に連続して平板を設置した Type6で $\delta = -60^\circ$ と $\delta = -15^\circ$ のときも回転数比は低い。

すなわち $+120^\circ$ 、 $+165^\circ$ の位置付近にある平板を除去して流れの退出路を確保する必要がある。

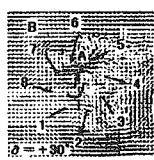
4. 流れの様子

羽根付近の流れは渦法を用いて計算する。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⁷⁾。

Fig.14は、8枚の平板を設置したときの $\delta = +30^\circ$ の位置における回転羽根付近の流れの状態を示す。

一例として図中の溝番号7に設置した平板の上方に、記号Bを付けて示すが、流れの中に障害物(回転羽根と平板)を設置するとき、障害物付近の上流側の流れは低速となる。したがって偏風板の効果は、低速となった流れの領域の中で局所的に流れを集中させることである。

溝番号5と6の間に記号Aを付けたが、隙間を増すとき、すなわち、流れの流路を拡大することにより、この付近の流速は僅かに増加するから、回転羽根付近の流速が局部的に増して回転数比が大きくなることを示している。



Clearance=0.6

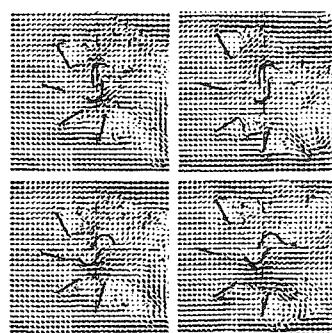


Clearance=1.1

Fig.14 The influence of the clearance $\delta = +30^\circ$

Fig.15は平板の設置枚数が4枚の場合である。Fig.14の場合と比較して障害物の上流側に現れる低速領域が減少している。回転軸より下流側に設置した平板を除去すると平板群の間から流出する流れの流路が確保され、回転羽根付近の流れが増加することを示している。

Fig.15は進み羽根の先端付近の流れが隙間の影響を受ける回転角の時期付近を示す。隙間を 0.7 から 1.1 に広げるとき、回転羽根付近の流れの通路が確保される。



Clearance 0.7 1.1

Fig.15 In case of Type 4 $\delta = +75^\circ$

Fig.16は平板の設置枚数が5枚の場合である。回転羽根の回転角だけを変え、回転角により異なる流れの状態を示す。Fig.15と比較すると、図の上側に平板が追加された平板配置である。

全体を通して、追加された平板により戻り羽根の下流側へ向く流れが強まっており、Fig.4とFig.5に示した実験値によれば、追加した平板は回転数比に僅かに影響している。なお集風の効果が現れるから、 -15° にある平板の下流側

にはく離域が現れない。

回転羽根の回転につれて回転羽根付近の流れは大きく変化する。左図のとき回転羽根と平板の間の流路は広い。中図になると偏風板の効果が現れて、進み羽根凹面側と戻り羽根直線部先端との間へ向く流れが強まることを、羽根間から流出する流れから観察できる。そして右図になると流れの流路が狭められるから、回転羽根の上流側に低速域が広がり、羽根間を通過する流れは少なくなる。そして $+30^\circ$ と $+75^\circ$ にある平板のために進み羽根円弧部凸面側に沿って流れのような流れが現れる。

偏風板の効果が現れる回転角の時期は短いから、実験結果で見るように回転数比の増加も少ない。

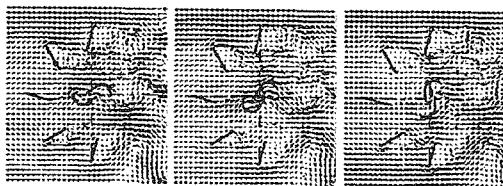


Fig. 16 In case of Type 5 $\delta = +75^\circ$

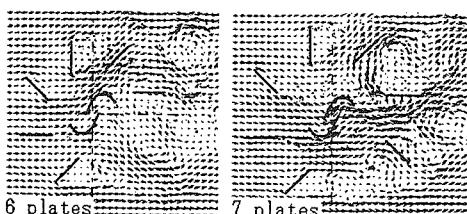


Fig. 17 In case of Type 6 and Type 7 $\delta = +45^\circ$

Fig. 17は平板の設置枚数が6枚と7枚の場合である。6枚の場合であるが、 180° の位置の平板がはく離域の中にあり、7枚の場合であるが、 $+135^\circ$ の位置の平板が進み羽根の下流側にある流れの方向変化により流れの外側に位置している。回転数比に及ぼす影響が少ない平板配置例である。

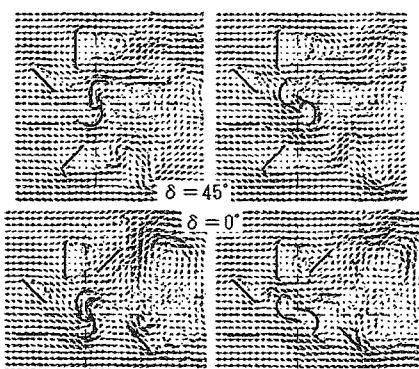


Fig. 18 In case of 5A Clearance=0.7

Fig. 18は配置5Aの場合である。 $\delta = +45^\circ$ の図の中にある -45° の位置の平板が作る流れは、角度が浅くて偏風

板の効果が少ない状態を示す。 $\delta = 0^\circ$ の図は、 $+135^\circ$ の位置にある平板に弱い妨害板の影響が現れる状態を示している。

5.まとめ

集風装置(8枚の平板で構成される)がサボニウス風車の羽根の回転数に及ぼす影響を、羽根と同心円の回転円盤の上に平板を設置し、平板の設置枚数並びに設置位置を変えながら調べた。

羽根の回転数が受ける影響は次の4つに大別できる。

- (1) 2枚の平板が羽根に向く流れを強め、羽根の回転数を増すことがある。集風の効果と呼ぶ。
- (2) 偏風板は主流に直角に置かれるが、偏風板が設置される位置付近に平板を置くとき、羽根の回転数は高くなる。偏風板の効果と呼ぶ。
- (3) 平板からはく離した流れが、進み羽根に及び、回転数を低下させることがある。はく離板の影響と呼ぶ。
- (4) 進み羽根の下流側に平板を設置するときであるが、平板の設置により回転数が著しく低下する設置位置の角度範囲がある。妨害板の影響と呼ぶ。

平板の設置により羽根が受ける影響は次のようにになる。

- (A) 主に偏風板の効果により回転数は高くなるが、集風の効果でも高くなる傾向がある。
- (B) 設置した平板に偏風板の効果が現れる位置付近はほぼ最高回転数付近となる。
- (C) 設置枚数が増えるにつれ、設置した平板のどれかに妨害板の影響が現れるため、回転数は低下する傾向を示す。

6.引用文献

- 1) 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
- 2) 吳鑑、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
- 3) 吳鑑、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
- 4) 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、日本機会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
- 5) 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
- 6) 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)、50-56
- 7) 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
- 8) 上野博之、三野正洋:サボニウス風車(巻きこみ流れを含まないはく離流れの影響)、太陽エネルギー27-1(2001)、70-76