

# 集風装置付サボニウス風車(円柱と平板の影響)

Savonius wind turbine with wind concentrator (Influence of support post and flat plate)

上野 博之<sup>\*1</sup>

Hiroyuki UENO

柳 沼 孝 侑<sup>\*2</sup>

Takayuki YAGINUMA

三野 正 洋<sup>\*1</sup>

Masahiro MINO

高田 紀 久<sup>\*3</sup>

Norihisa TAKADA

## Abstract

When a wind concentrator composed of flat plates is installed on a wind turbine, its revolving speed increases. A support post is used to hold the wind turbine. In this report, the support post is cylindrical. The combination of a cylindrical post and flat plates effects wind concentration and rises the wind turbine revolving speed. The air flow to the wind turbine tends to become faster when one flat plate is used. It tends to become slower when two sheets are used, and tends to become faster when the cylindrical post is used.

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、うず法、偏風板

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

### 1. はじめに

本研究では、集風装置がサボニウス風車の羽根(以後回転羽根と呼ぶ)付近の流れに及ぼす影響を調べている。

軸出力を増すために集風装置(たとえば1)、2)、3)を設置するが、自然風の中では風向の変化があるから、風向の変化に追従できる<sup>4)</sup>ように集風装置の向きを変える。したがって、風車を支持する構造物の剛性を高めるために支柱を設ける場合がある。

集風装置として文献1)等では平板を使用している。以後本報告では集風装置を平板と呼ぶ。平板は文献2)等の方法にならって設置した。

支柱が平板より上流側に位置するとき、支柱から放出されるはく離渦は平板付近の流れに影響を及ぼす。また、上流側に直立した障害物がある場合も同様に、障害物から発生したはく離渦が平板付近まで流されてくるとき、平板付近の流れに影響を及ぼす。

本報告では支柱あるいは障害物を円柱とする。円柱から発生するはく離渦が平板付近の流れに影響を及ぼし、回転羽根の回転数を高める場合があることを示す。

なお、本報告は自然風の中ではなく、風管を用いた実験である。サボニウス風車を自然風のもとで使用するとき、回転軸に作用するトルクは、無負荷時に比べて回転羽根の回転数を減少させるから、本実験では回転軸に負荷をかけ、回転数を減少させた状態で実験を行う。

### 2. 実験装置

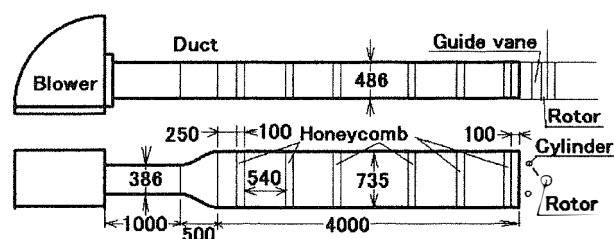
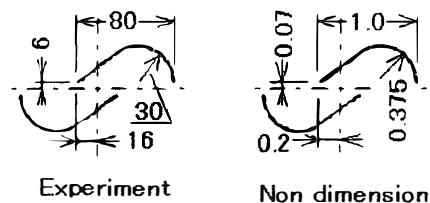


Fig. 1 Experimental Apparatus

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。風管(485×735mm)の出口部に平板と、半径 64mm、高さ 346mm の回転羽根を置いた。風管出口部の上下に風管と同じ長さの平板を置いた。側面は開放とした。



Rotor

Fig. 2 Rotor of wind turbine

Fig. 2 は実験に使用した回転羽根の形状を示す。1枚の羽根の両端を結ぶ線分の長さを基準の長さ(無次元長さ)1.0として計算に使用した。

<sup>\*1</sup> 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

<sup>\*2</sup> 日本大学工学部

<sup>\*3</sup> 山形産業技術短期大学  
(原稿受付: 2005年4月22日)

一般に回転羽根付近には、鉛直軸方向への流れが発生して性能に大きな影響を及ぼすが、本報告では、回転羽根の回転軸と同心円上に、平板を挟むための半径 250mm の 2 枚の円盤を設置し、回転羽根付近の流れを 2 次元に近い状態とした (Fig. 3)。鉛直軸方向への流れを含む実験結果に関しては、本報告の範囲外とする。

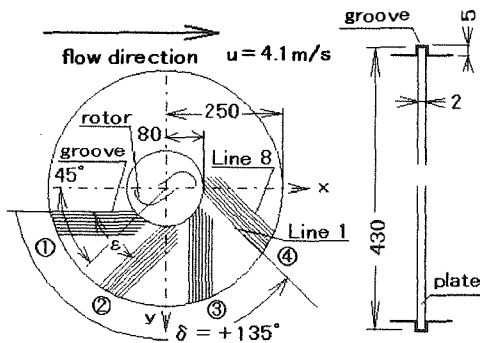


Fig. 3 Guide vane

円盤を回転して風向の変化とする。回転羽根と同じ回転方向を正の方向とし、回転角を設置角  $\delta$  と呼ぶ。平板を設置するため、互いに平行な深さ 5mm の溝を、7mm 間隔に 8 本 (Line 1 ~ Line 8 と呼ぶ) 設けた。溝の先端は半径 80mm (Line 1 ~ 4 の場合だけ) の位置にあり、後端は半径 250mm の位置にある。Line 2 の溝の先端は回転軸の中心から引いた傾き  $45^\circ$  の線と交わる。同様の溝群を  $45^\circ$  間隔に 8 箇所設置するために Line 5 ~ 8 の先端は、Line 4 の先端を通る傾き  $45^\circ$  の直線上に後退させた。

説明の都合上、Fig. 3 では溝群を①、②、③、④の 4 箇所だけ書いた。主流の方向と平行な溝群①に平板を設置するとき、設置角  $\delta = 0^\circ$  とする。たとえば 2 枚の平板が②と④にあるとき、回転方向の先頭にある平板④で設置角  $\delta$  を表し、 $\delta = +135^\circ$  と書く。平板の板厚は 1.2mm、幅は 80mm、高さは 430mm とした。設置した平板の回転羽根側を内側先端と呼び、その反対側を外側先端と呼ぶ。

主流と直角方向に  $y$  軸をとり、平行な方向に  $x$  軸をとる。円柱の直径は 59mm である。円柱の中心は、回転軸より上流側の  $x = -220\text{mm}$ 、 $y = \pm 180\text{mm}$  の位置に置いた。円盤の外側に置いたため設置角  $\delta$  の影響を受けない。

$y > |180\text{mm}|$  の領域を円柱の外側と呼ぶ。平板の外側先端の  $y$  軸方向の位置を  $+T\text{mm}$  あるいは  $-T\text{mm}$  と書くとき、 $y > |T|$  を平板の外側と呼ぶ。

### 3. 実験方法

回転軸にはトルクメータ、励磁式ブレーキ、回転計が付いている。平板と円柱を設置しないときに回転軸に負荷をかけ、回転羽根の回転数を一定にする。それから平板、円柱あるいは平板と円柱を設置し、変化した回転数を調べて平板等の設置により回転羽根が受ける影響とする。この繰り返しでデータ収集を行った。したがって、トルクの測定は行

っていない。主流の流速は 4.1m/s とした。一定にする回転数は 350rpm とした。以後 350rpm と書く。

回転軸の中心から平板の内側先端までの長さを  $R$  と記す。周速比を文中では  $\text{ratio}$  と略記し、 $\text{ratio} = (\text{回転羽根の先端の速度}) / (4.1\text{m/s})$  とする。図中には  $\text{tip speed ratio}$  と記す。なお回転数が 350rpm のときの  $\text{ratio}$  は 0.57 である。回転数比は  $\text{rpm ratio}$  と書き、 $\text{rpm ratio} = (\text{平板・円柱を置いたときの回転数}) / (350\text{rpm})$  である。

流速分布を測定した。測定位置は  $x = -100\text{mm}$ 、回転羽根の高さの中間 ( $346\text{mm} / 2$ ) で、流れに直角に挿入した一本の熱線流速計を使った。十分な時間にわたって平均した平均流速である。平板は Line 5、 $R = 110\text{mm}$  に設置した。

### 4. 計算方法

回転羽根付近の流れは渦法<sup>5)</sup>を用いて計算する。計算に使用する諸係数は、渦が合体する渦間の距離、壁面の近くで消滅する壁からの距離等、従来の研究<sup>6)</sup>を参考にして決めた。

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、実験結果の考察に用いることが目的である。

### 5. 実験の結果

回転羽根の回転数は主に平板の設置位置ならびに設置枚数により変わり、円柱の設置による変化は少ない。したがって以後、平板の設置枚数により大別する。

実験に使用した平板と円柱の設置位置を Fig. 4 に示す。円柱の位置により PA, PR, mix と呼び、円柱を設置しないで平板を設置する場合を plate と呼ぶ。平板の設置枚数により 1 plate, 2 plates, 3 plates と呼ぶ。平板の設置間隔は開き角  $\epsilon$  で表す。平板の位置は内側先端の位置で表す。

なお流速分布を示す Fig. 6 ~ 8、12、13 の場合は、 $y$  軸方向の測定位置を横軸にとるため、主流の方向を横軸に直角にとった。

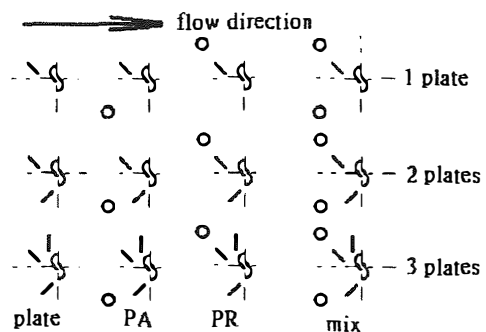


Fig. 4 Position of the cylinder and plate

#### 5. 1 平板を1枚設置する場合 (流速分布)

## 5. 1. 1 円柱と平板と回転羽根付近の流れ

Fig. 5は、回転羽根 (rotor) 付近の円柱 (cylinder) と平板 (plate) の配置状況並びにその配置のときの流れの計算結果を示す。mix で、平板を Line1、 $R=110\text{mm}$  に設置し、設置角を  $\delta = +45^\circ$  と  $\delta = -45^\circ$  とし、回転羽根の ratio を 0.35 (214rpm) と 1.05 (642rpm) とした。

円柱の上流側にある流れの岐点で2分された流れは円柱の下流側で直ちに合流せず、下流側に後流が現れる。回転羽根の近くに設置される平板の下流側ならびに回転羽根の下流側にもはく離域が現れる。回転羽根上流側付近の流れは、周速比を変えても大きな相違はない。

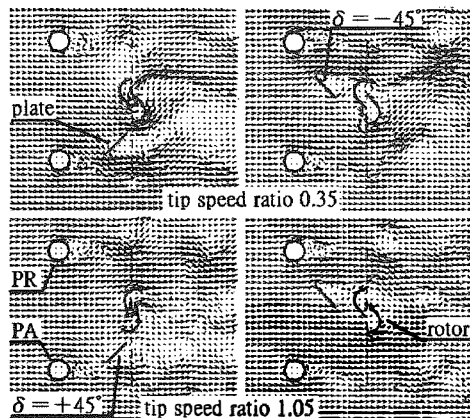


Fig. 5 Flow near the rotor

## 5. 1. 2 流速分布の測定

円柱、平板、回転羽根の配置の概要を図中に示す。

## A) 回転羽根付近の流速分布の測定

Fig. 6は回転羽根だけの場合である。図中の 0rpm は回転羽根を主流の方向に対して直角に静止して設置した場合である。350rpm と 500rpm は回転羽根の回転数である。

主流方向に対して回転羽根の形状が対称ではないので、0rpm のときの速度分布も対称ではない。回転羽根は流れにとって障害物であるから  $y=0$  付近が遅くなる。

回転数を変えても速度分布はほとんど変わらない。350rpm、500rpm の場合は、0rpm の場合と比較して戻り羽根側 (以後 PR 側と呼ぶ) の流速はほとんど変わらないが、進み羽根側 (以後 PA 側と呼ぶ) は増加する。

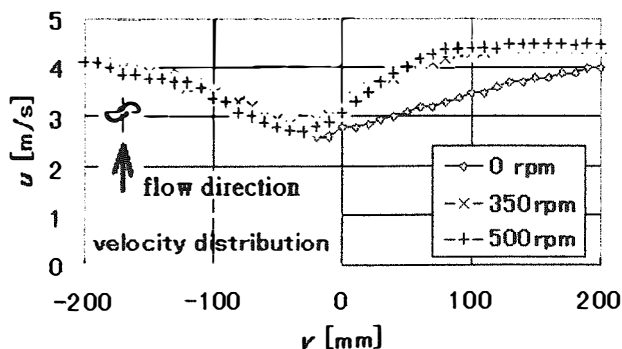


Fig. 6 Velocity distribution (rotor)

## B) 円柱を設置した場合

以後、回転数は 350rpm である。比較のため円柱を置かない場合を 350rpm として示す。 $y = \pm 180\text{mm}$  付近は、上流側に設置した円柱の後流の影響で低速になる。

350rpm の場合と比較すると円柱の設置により  $-140\text{mm} \sim +140\text{mm}$  の間の流速が増す。円柱を設置する位置が PA の場合は PA 側の、PR の場合は PR 側の流速が僅かに増加する。したがって、mix の場合は最も増速する。

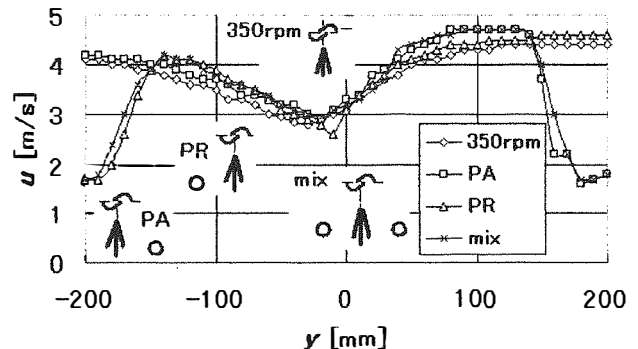


Fig. 7 Velocity distribution (rotor and cylinder)

## C) 円柱と平板を設置した場合

Fig. 8の中に、参考のために plate ( $\delta = -45^\circ$ ) の場合を併記する。図中の低速域は、 $y = -80\text{mm}$  付近が平板から発生するはく離の影響であり、 $y = +180\text{mm}$  付近が円柱の後流の影響である。平板からはく離した流れが平板の背後に回り込むため  $y = -80\text{mm}$  付近が極大になる。

平板は流れにとって障害物であるから、傾斜した平板が先細管のような役割をして、回転羽根の半径 60mm 付近から外側の流速をほぼ一定にする。円柱を設置すると plate の場合より少し流速が増加する。 $x = -100\text{mm}$  における測定位置では、 $y = +60\text{mm}$  付近から  $-30\text{mm}$  付近に向けて流速は徐々に低下する。増速した流れの一部だけが回転羽根の回転数を高くすると考えられる。

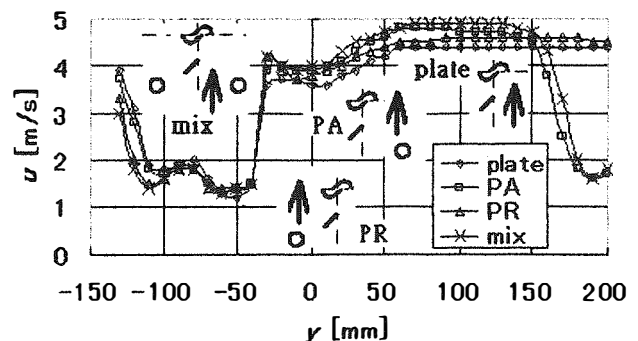


Fig. 8 Velocity distribution (rotor, cylinder and plate)

## 5. 2 平板を1枚設置するときの回転数比について

Fig. 9は平板を1枚設置したとき、さらに円柱を設置したとき (PR、PA、mix) の回転数比の変化を、設置角  $\delta$  を変えて示した。図中に plate の場合の平板配置例を示す。

全体的な傾向として、円柱を設置するときの回転数比は plate の場合より僅かに高くなる。その値は plate、PR、PA、mix の順に高い。したがって、極大・極小となる設置角  $\delta$  は plate の場合と PR、PA、mix の場合ではほとんど変わらない。すなわち plate の場合と PR、PA、mix の場合では、 $\delta$  を変えたときの回転数比がほぼ同じ傾向を示す。

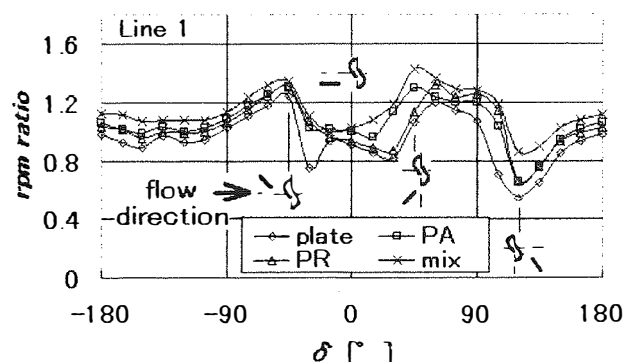


Fig.9 Influence of a plate position

概略の傾向であるが、 $0^\circ < \delta < 150^\circ$  付近の範囲は plate の場合と PA、mix の場合との回転数比の相違が大きい。この範囲では平板が PA 側にあり、さらに上流側に円柱がある。

したがって、PA 側の平板の外側先端と円柱との間の、y 軸方向の距離が狭くなっている。すなわち、円柱から放出された渦が平板の外側先端付近を通過するような平板配置のとき、回転数比の差が大きいと考えられる。

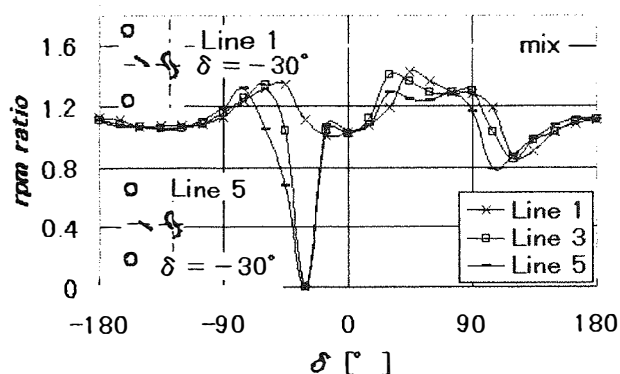


Fig.10 Influence of the Line (revolution ratio)

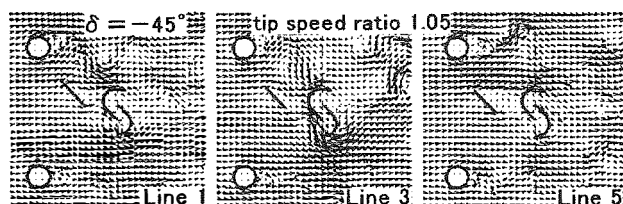


Fig.11 Flow near the rotor (in case of Line)

Fig.10は平板を設置する溝を変えた場合である。図中に  $\delta = -30^\circ$  のときの平板配置例を示す。

平板を設置する溝を変えるとき、 $-75^\circ < \delta < +120^\circ$  付近で回転数比は影響を受ける。しかし  $\delta = -30^\circ$  付近を除けば、その影響は少ない。

Fig.11は、 $\delta = -45^\circ$ 、 $R=100\text{mm}$ 、rate が 1.05 で mix の場合の流れの状態の一例であるが、Line 1 と 5 は 28mm 離れているから大きな相違はない。Line 5 のとき、平板から発生するはく離域が進み羽根と戻り羽根の間にある進み羽根凹面部付近に達しているため回転を停止する。

### 5.3 平板を2枚設置する場合(流速分布)

平板を  $\delta = +75^\circ$  に置き、開き角を  $\varepsilon = 135^\circ$  とした。

平板を1枚設置するとき、回転羽根の外側の流速が増加するから、2枚の平板を設置して流速の変化を調べる。

#### 5.3.1 plate の場合

2枚の平板を設置したときの流速分布を調べる。Fig.12の中に平板の設置位置を示す。平板を2枚設置し、350rpm で回転する場合を 2-plates と書き、羽根を静止させて主流の方向に対して直角に設置した場合を static と書く。

流速分布に次の3つの特徴が現れる。

PA 側の流速は、 $-60^\circ$  に平板がある 1-plate の場合より、 $-60^\circ$  と  $+75^\circ$  に平板がある 2-plates の場合の方が遅い。すなわち、 $+75^\circ$  に設置した平板(平板の外側先端は  $x = 4.7\text{mm}$  にある)の影響が  $x = -100\text{mm}$  (流速測定位置)まで及ぶことを示している。概略の傾向であるが、static の場合は 0rpm、350rpm の場合 (Fig.6) より遅くなる。

PR側の平板ではく離した流れが平板の背後に回り込むため、 $y = -50\text{mm}$  付近で流速分布に極大値が現れる。

平板の内側先端付近に極大値が現れる。

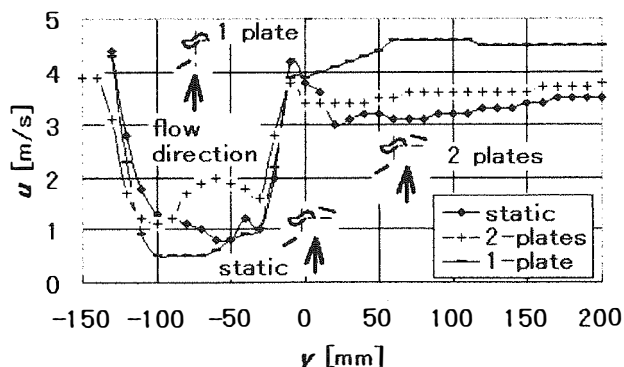


Fig.12 Velocity distribution (2 plates)

#### 5.3.2 円柱と平板を設置する場合

Fig.13 は円柱と平板を設置したときの流速分布である。

Fig.12 の 2-plates の場合に比べ、円柱の設置だけが異なる。すなわち円柱の設置により、上記 5.3.1 に示した3つの特徴が消える。

PAの場合でも平板の背後に回り込む流れが消える。

Fig.12 の 1-plate の場合より流速が増加する。

2-plates の場合は  $+75^\circ$  に設置した平板の上流側に弱

いよどみ流れが発生していると考えられるが、円柱の設置によりよどみ流れの影響は消え、 $x = -100\text{mm}$  における流速が増加したと考えられる。

傾斜した平板の影響により、PR側の平板の内側先端付近からPA側に向けて徐々に流速が増す。

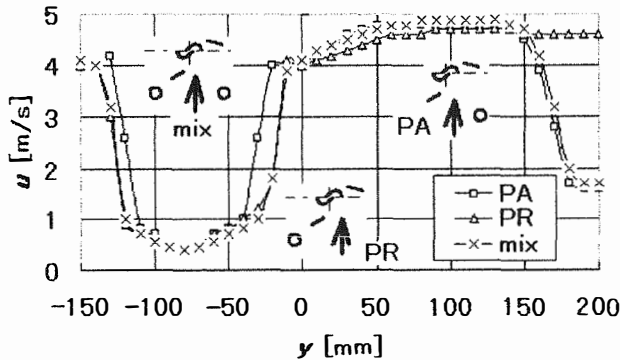


Fig. 13 Velocity distribution (cylinder and 2 plates)

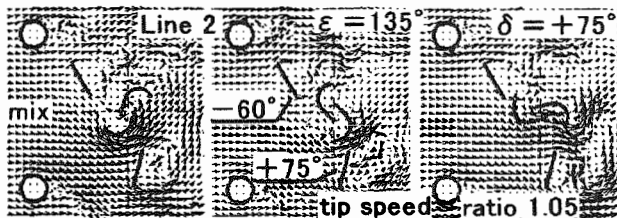


Fig. 14 Flow near the rotor (cylinder and 2 plates)

平板を  $\delta = +75^\circ$ 、 $\epsilon = 135^\circ$ 、 $R = 100\text{mm}$ 、Line 2 に設置し、mix の場合の回転羽根付近の流れを Fig. 14 に示す。他の平板は  $-60^\circ$  の位置にある。

回転羽根の回転により流れは時間的に変化するが、流速分布 (Fig. 13 等) は長時間にわたる平均流速である。

#### 5. 4 平板を2枚設置するときの回転数比について

平板を2枚設置するとき高くなる回転数比について検討する。溝群は  $45^\circ$  間隔であるから開き角が  $135^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $45^\circ$  について検討するが、 $45^\circ$  の場合は平板を3枚設置した場合で検討する。

##### 5. 4. 1 $\epsilon = 135^\circ$ の場合

Fig. 15 では Line 1、 $R = 100\text{mm}$  に平板を設置し、また円柱を設置したとき、変化する回転数比について調べる。同一の  $\delta$  であれば、円柱の存在だけが異なるから、主に PR、PA、plate の回転数比を比較する。

mix の場合の配置例を図中に示す。平板を1枚設置する場合より2枚の場合の方が回転数比は高い。円柱を設置すると plate の場合より回転数比は少し高くなる。

$\delta = +120^\circ$  のとき、回転を停止する PR と plate の場合は、進み羽根と戻り羽根の間にある進み羽根凹面側付近を平板のはく離域が覆っている。このとき、PR の円柱は回転数比に影響を及ぼしていないことになるが、PA の円柱を設置

すると回転数比が僅かに増加する。

$\delta = +75^\circ$  のとき最高回転数比となる。

$\delta = -45^\circ$  のとき、回転数比は極大となる。すなわち、最大値と  $\delta = -45^\circ$  にある極大値の間の角度差はほぼ開き角の間隔である。2枚の平板は  $-45^\circ$  と  $-180^\circ$  にあり、最大値と  $+75^\circ$  と  $-60^\circ$  にあるから、PR 側の平板が  $-45^\circ$  付近にあるとき回転数比は高くなる。このとき、図に示すように円柱と PR 側の平板との間隔は狭い。

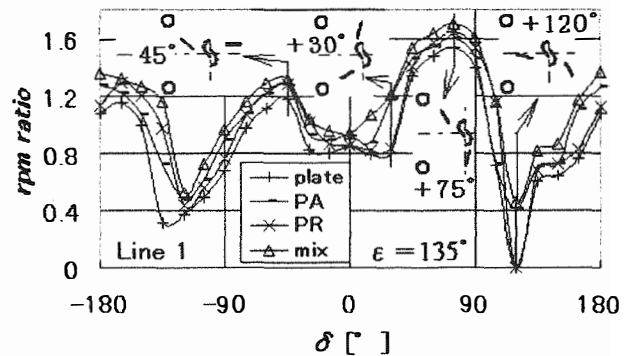


Fig. 15 Influence of cylinder (in case of  $\epsilon = 135^\circ$ )

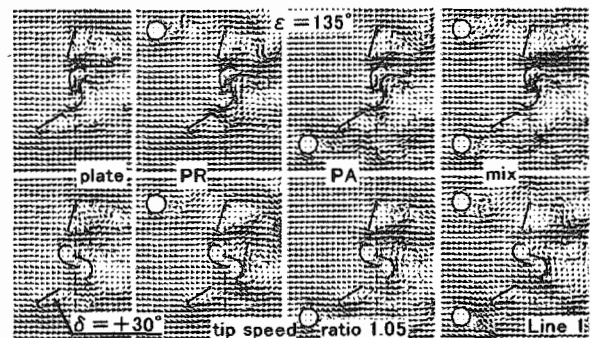


Fig. 16 Flow near the rotor (in case of 2 plates)

平板を  $\delta = +30^\circ$ 、 $\epsilon = 135^\circ$ 、 $R = 100\text{mm}$ 、Line 1 に設置したときの回転羽根付近の流れを Fig. 16 に示す。他の平板は  $-105^\circ$  の位置にある。

plate の場合、平板の上流側に低速域が広がっている。円柱の後流が平板の外側先端付近の流れに影響を及ぼしている。

##### 5. 4. 2 $\epsilon = 90^\circ$ の場合

Fig. 17 は2枚の平板を  $\epsilon = 90^\circ$  で、Line 1、 $R = 100\text{mm}$  に設置し、さらに円柱を設置したときの回転数比である。図中に plate の場合の平板配置例を示す。

開き角とほぼ同じ間隔で回転数比に極大値が現れる。最大値は  $\epsilon = 135^\circ$  の場合と同じ位の値である。円柱を設置すると平板だけを設置するときより少し回転数比が増す。

概略の傾向であるが、 $-120^\circ < \delta < +15^\circ$  付近は平板が PR 側にある。plate の場合と mix の場合の回転数比の差が大きくなる角度範囲では、平板が PA 側にある。

すなわち、円柱からはく離れたはく離渦が PA 側の平板の

外側先端付近を通過するとき、回転数比は高くなる傾向を示す。

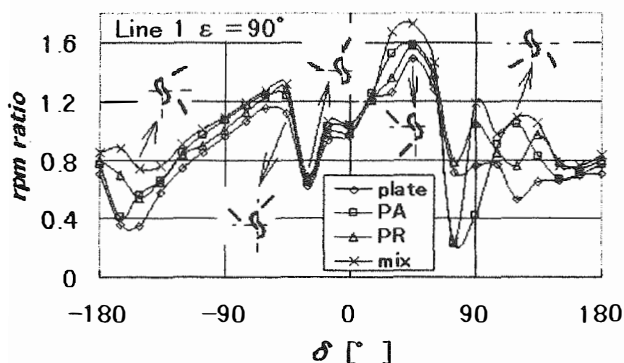


Fig. 17 Influence of cylinder (in case of  $\varepsilon = 90^\circ$ )

### 5. 5 平板3枚の場合(回転数比)

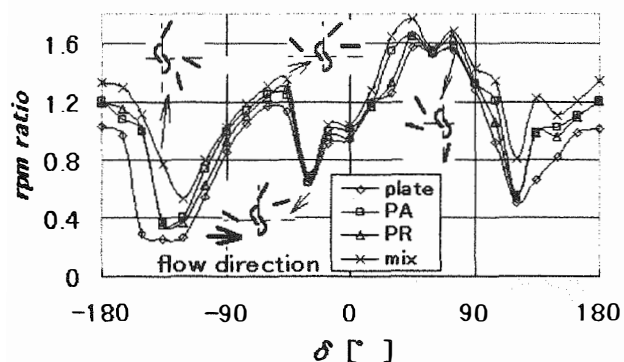


Fig. 18 Influence of cylinder (in case of 3 plates)

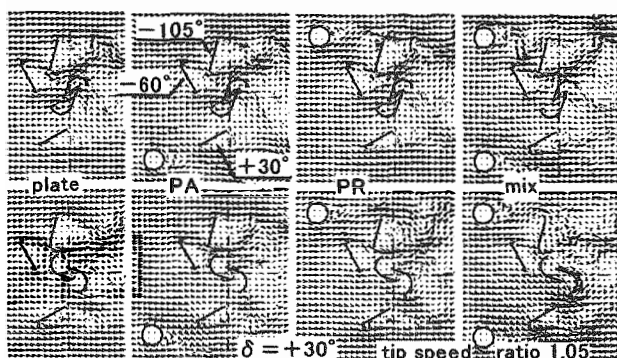


Fig. 19 Flow near the rotor (in case of 3 plates)

Fig.18 は円柱と3枚の平板を設置した場合である。平板の位置は  $R=100\text{mm}$ 、Line 1、 $\varepsilon = 90^\circ$  と  $\varepsilon = 45^\circ$  である。両端の開き角は  $\varepsilon = 135^\circ$  である。3枚を設置する組み合わせの中でもっとも最高回転数が高い場合である。

回転数比には設置枚数と同じ3つの極大がある。2枚を設置する前述の場合と最高回転数比もほとんど同じである。 $45^\circ$  間隔に現れる極大となる  $\delta$  付近が最高回転数比付近であるから、高い回転数比となる角度範囲が僅かに増加している。

$\delta = +30^\circ$  付近は mix の場合に比べ plate の場合の回転数比が低い。

Fig.19 は Line 5、 $R=1.25$ 、 $\delta = +30^\circ$ 、 $\varepsilon = 90^\circ$  と  $45^\circ$  に平板を、また円柱を設置したときの流れの状態である。

plate の場合、平板間に弱いよどみ流れの領域がある。

2枚と3枚の場合の相違は  $-60^\circ$  と  $-105^\circ$  に設置した平板である。これらはPR側にあり、円柱から放出されるはく離渦の影響を受けている。すなわち、はく離渦は  $-105^\circ$  にある平板の外側と、また  $-60^\circ$  と  $-105^\circ$  にある平板の間を、周期的に通過しており、 $-60^\circ$  にある平板の後流の影響を受けているから、2枚と3枚の場合の回転数比がほぼ同じになると考えられる。

### 5. まとめ

平板で構成される集風装置(平板と呼ぶ)付きサボニウス風車を支持するために支柱をつけるとき、支柱の影響を受けてサボニウス風車の羽根(回転羽根)の回転数が増す場合があることを、回転羽根の上流側で流速を測定し、回転羽根の回転数を測定して調べた。次の結論を得た。

- 1) 回転羽根の回転数は設置した平板により決まり、さらに円柱を設置すると少し回転数が増す。本実験では平板を2枚設置するとき回転数が高くなる。
- 2) 2枚の平板と円柱を設置するとき、平板の上流側の流速は増し、回転数が増加する。
- 3) 円柱と1枚の平板を設置するとき、回転羽根の外径より外側の流速が増す。
- 4) 2本の円柱と2枚の平板を設置する場合、2本の円柱からはく離したはく離渦が平板の外側付近を通過する、設置位置付近で回転数が増す。

以上、円柱からはく離渦と平板からの流れを利用すると、回転羽根の回転数が増加することを示した。

### 6. 参考文献

- 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) 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
- 3) 長澤忠延、池田俊彦、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、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) 長澤忠延、池田俊彦、杉本圭亮:サボニウス風車案内羽根の方向制御、機械学会九州支部鹿児島地方講演会講演論文集[2003.11.1・鹿児島市]229-230
- 5) たとえば水野明哲著:流れの数値解析入門 pp84~87 朝倉書店(1990)
- 6) 小川武範:サボニウス風車に関する研究(第1報、理論解析)機械学会論文集(B編)49-441[1983]976-983