

## On Basic Characteristics of Cross-Flow Fan with High Aspect Ratio

Tetsuya OKAMOTO\*, Takashi NOGUCHI\*\*, Katsuya HIRATA\*\*, Hiroaki MIHARA\*\*\*

(Received November 10, 2021)

The authors investigate the simplest model of cross-flow fans, in order to provide the fundamental flow features of them. The model is an approximately-two-dimensional cross-flow impeller with a very-high aspect ratio of 5.8 and without any casings, and surrounding fluid is stationary. In some cases of the present experiments, the authors place a splitter plate with minimal influence instead of casings for more precise observations. Instantaneous measurements of flow-velocity vectors on the mid-span plane are conducted using a CCD camera and a double-pulse YAG laser with particle-image-velocimetry technique, in addition to conventional flow visualisations and hot-wire-velocimetry measurements. As a result, the authors visualise the revolutionary motion of such an eccentric vortex as a large-scale re-circulating flow structure inside the cross-flow impeller, and reveal the details of flow at the Reynolds number  $Re = 300-2500$ . The revolution speed is about 1/100 of impeller's rotation speed. Furthermore, the authors show the relations between  $Re$  and outflow rate from the impeller.

**Key words :** Cross-flow fan, Cross-flow impeller, Blower, Ventilator, Mixer

**キーワード :** クロスフローファン, 貫流羽根車, ブロワー, 送風機, 攪拌機

## 高アスペクト比貫流羽根車の基本特性について

岡本 哲也, 野口 尚史, 平田 勝哉, 三原 宏昭

### 1. はじめに

既に1892年にはMortierが貫流(あるいは, 横流)羽根車 (cross-flow fan) について報告しており, 20世紀を迎えるまでには鉱山の換気において貫流羽根車は広く応用されていた<sup>1)</sup>. しかし, 効率が低いため, そして, 他の様々な送風機(fan)が開発されていたため, 貫流羽根車は20世紀半ばまではあまり普及しなかった. 貫流羽根車の開発における決定的な転換点の一つは, 内部流れの可視化により, 大規模な再循環流れ構造つまり“偏心渦”を, Eckが発見したことである. 貫流羽根車は, 回転軸に垂直

な方向にほぼ均一な二次元の薄くて広い(回転軸と同程度の長さの)流れを容易に作り出せるため, 低効率や高騒音などの固有の欠点にも拘わらず, エアカーテンやエアコンなどの産業機器または家電機器で現在は広く使用されている.

実用上の重要性により, これまで多くの貫流羽根車の実験や解析が報告されている. Ikegami and Murata<sup>2)</sup>は, 単純な線形ケーシング(casing)と非粘性非圧縮性流体を仮定し, 無限個の翼(blade)を備えた貫流羽根車を解析した. Porter and Markland<sup>3)</sup>は, 熱線流速計(HWV)計測と流量計測, 流れの可視化実験

\*Graduate School of Doshisha University, Kyoto

\*\*Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto  
Telephone: +81-774-65-6407, E-mail: tanoguch@mail.doshisha.ac.jp

\*\*\*General Building Research Corporation of Japan, Osaka

を行なった。Lajos<sup>4)</sup>は、単純化した解析モデルを提案した。村田・西原<sup>5, 6)</sup>は、ケーシングつまり舌部と下流壁の形状の影響を研究した。山藤<sup>7, 8)</sup>は、偏心渦の基礎的な研究を行なった。村田ら<sup>9)</sup>は、ポテンシャル流れ解析と実験との比較を行なった。中村・奥谷<sup>10)</sup>と中村ら<sup>11)</sup>は、ピトー管を用いた自動データ収集システムを使用して、内部の流れ場を測定した。深野ら<sup>12-16)</sup>は、一連の研究で騒音低減法を扱った。田中・村田<sup>17)</sup>は、形状効果とレイノルズ数効果に関する研究を行なった。鶴崎ら<sup>18)</sup>と吉田ら<sup>19)</sup>は、PTV (粒子追跡法)を用いて流れの可視化を行なった。田中・村田<sup>20)</sup>と新井ら<sup>21)</sup>は、レーザードップラー流速計 (LDV)による測定を実施した。福富ら<sup>22-24)</sup>は、ケーシングの形状効果とファンのトルク特性を調査した。林ら<sup>25, 26)</sup>は、騒音低減のための可変ピッチ翼に関する新しい設計法を提案した。Lee et al.<sup>27)</sup>も、騒音低減方法を扱っている。大谷ら<sup>28)</sup>は、サージ現象に関する実験的研究を行なった。Koo<sup>29)</sup>は、スパン方向にねじれた安定板が騒音低減に及ぼす影響を調査した。川口ら<sup>30, 31)</sup>は、熱交換器を備えた複合システムを扱った。原ら<sup>32)</sup>は、流れ場と騒音発生の両方に注目して、スケール効果を検討した。Lazzarotto et al.<sup>33)</sup>と Lazzaretto<sup>34)</sup>は、羽根車の形状を体系立てて規定する基範を提案し、Lazzaretto et al.<sup>35)</sup>は、その基準に基づき実験を行なった。山田ら<sup>36)</sup>は、音響ホログラフィ法を使用し、騒音源を研究した。船橋ら<sup>37)</sup>と繁永ら<sup>38)</sup>は、騒音予測モデルを提案し、それを確認した。Toffolo et al.<sup>39)</sup>は、五孔ピトー管を使用し、圧力場と流れ場を測定した。Tsai et al.<sup>40)</sup>は、より効果的な低騒音設計を探るため、流れと音響性能を比較した。

実験に加えて、流れの数値解析(CFD)も試みられている。多久島・飯塚<sup>41)</sup>は、セル内クラウド法(CIC)を用いて、有限差分法(FEM)を行なった。吉田ら<sup>42)</sup>は、粘性を導入するためにランダムウォークモデルを使用し、離散渦法を行なった。陳ら<sup>43)</sup>は、CICを境界要素法 (BEM)と共に用いた。赤池ら<sup>44)</sup>は、有限差分法 (FDM)で、滑り境界面法と  $k-\epsilon$  乱流モデルを用いた。Cho and Moon<sup>45)</sup>と Moon and Cho<sup>46)</sup>は、流れと音響の性能に加えてランダムな翼ピッチが

騒音に及ぼす影響を数値的に調べ、流れ場との関係を議論した。Toffolo<sup>47)</sup>は、市販の CFD コードを使用し、羽根車性能に及ぼすケーシング形状の影響を調べた。福富ら<sup>48, 49)</sup>と Nakamura et al.<sup>50)</sup>は、流入条件の影響を調査し、入口案内板による制御を試みた。それらのうち、最近の研究では、特に室内空調機への応用に関連して、音響騒音が注目されている。

以上のこれまでの研究の多くは、応用の観点から、特定の複雑なケーシングを備えた貫流羽根車について検討している。そのため、多くの形状パラメータが存在し、それらの試験範囲も限定的となる。よって、最適な羽根車を設計するための系統立った手順は確立されていない。これには、以下の二つの理由が挙げられる。(1)乱流と流れの剥離による強い非線形性を伴う流れの複雑さ。この点は貫流羽根車の本質であって、低効率と高騒音・高振動は避けられない。(2)羽根車の性能に影響する多くの要因と支配パラメータの存在。唯一の例外として、山藤の研究<sup>7, 8)</sup>があり、貫流羽根車の基本特性を明らかにするため、ケーシングのない貫流羽根車(impeller)を調べている。その後、著者ら<sup>51-56)</sup>も同様にケーシングのない貫流羽根車を調べ、低いアスペクト比の羽根車の基本特性を明らかにした。

本研究では、粒子画像流速測定法 (PIV)を HWV と共に使用して、最も単純な流れ、つまり、ケーシングのない開空間で回転する非常に高いアスペクト比を有する貫流羽根車の周りの流れを、実験的に調査する。この戦略により形状パラメータの数を減らし、さらにできるだけ二次元性を高くすることで、より基本的な流れ場を理解することを期待している。ここで、流れの二次元性確保のために、開空間に大きな端板(end plate)を設ける。もちろん、ケーシングのない羽根車だけでは、送風機としての機能を有しないのは自明である。しかし、遠い目標として、今までよりもはるかに大きな自由度を前提とした貫流羽根車の最適設計を筆者らは模索している。事実、ケーシングには多くの形状パラメータが存在するため、結果として、最適設計は形状パラメータのごく限られた範囲内に限定されてきた。

## 2. 実験装置

Fig. 1 は、試験モデル、すなわち、ケーシングの無い貫流羽根車である。Fig. 2 は、羽根車の翼(blade)の詳細を示す。Table 1 に、羽根車の形状パラメータをまとめる。力学パラメータつまりレイノルズ数を  $Re \equiv u_2 c / \nu$  と定義する。ここで、 $u_2$  は羽根車の外周速度、 $c$  は翼弦長、 $\nu$  は流体の動粘度である。この羽根車は、流れ場の二次元性を保つようにアスペクト比を高くし、その内部の流れを観察するために透明アクリル板で作られている。主な無次元形状パラメータは、内外径比  $D_1/D_2 = 0.76$ 、アスペクト比  $L/D_2 = 5.8$  (翼アスペクト比  $L/c = 40.6$ ) である。Fig. 1 中の二つの中間補強材は、内径  $D_0$  は 70 mm であり、外径は  $D_2$ 、両端から 150 mm の位置に設置する。中間補強材の厚さは 2 mm である。

座標系は円柱系( $r, \theta, z$ )であり、原点  $O$  は羽根車中心軸上かつ、羽根車スパン中央にある (Fig. 1 を参照)。本研究では常に  $z$  の正側から観察するため、羽根車の回転方向は全ての図において時計回り ( $-\theta$  方向) である。

Fig. 3 に、実験装置の概要を示す。作動流体は空気である。羽根車 (Fig. 3, No. 1) は、二つの端板つまり正方形の透明アクリル板の間に配置している。端板の一辺の長さは 1 m で、羽根車はボールベアリングによって支持されており、端板の外側のフレキシブルカップリングとタイミングベルトを介して AC ステッピングモーターによって駆動する。羽根車の回転速度  $n$  は、同じ端板外側のロータリーエンコーダーで検出する。

流速測定には、粒子画像流速測定法(PIV)、および I 型プローブを持つ熱線流速測定法(HWV)を使用する。正確に述べると、羽根車周囲の一部の領域では、流れが乱流となるので、三次元の流速  $\mathbf{v} = (v_r, v_\theta, v_z)$  を考えるべきである。しかし、本実験で実際に検出できるのは、PIV では二つの流速成分  $v_r$  と  $v_\theta$  のみであり、HWV では合成流速  $|\mathbf{v}| \cong (v_r^2 + v_\theta^2)^{1/2}$  である。

PIV は、相互相関法に基づいている。複数のノズル(No. 2)を羽根車の周りに設置して、流れの可視化

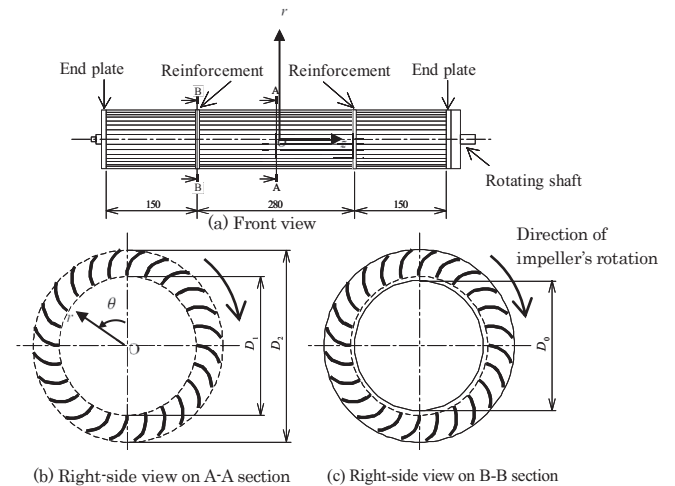


Fig. 1. Model: a two-dimensional cross-flow impeller without any casings (unit: mm), together with a coordinate system.

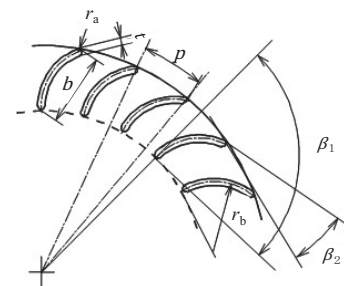


Fig. 2. Detail of impeller's blades.

Table 1. Parameter of an impeller.

Outer diameter	$D_2$	100 mm
Inner diameter	$D_1$	76 mm
Number of blades	$N$	24
Blade's chord length	$c$	14.3 mm
Blade's angles	$\beta_1, \beta_2$	90, 23 deg.
Blade's thickness	$t$	2 mm
Impeller's length	$L$	580 mm
Blade's pitch	$p$	13.09 mm
Blade's curvature	$1/r_b$	0.087
Blade-edge curvature	$1/r_a$	0.5

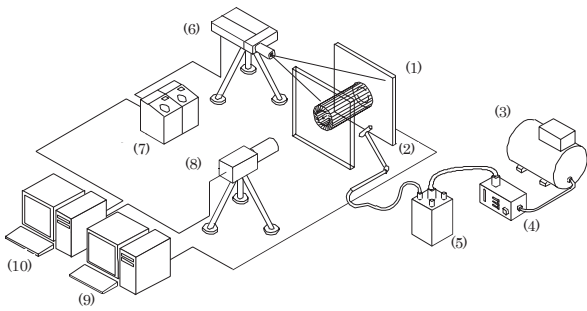


Fig. 3. Experimental apparatus for flow visualisation with PIV system. (1) Impeller, (2) nozzle, (3) compressor, (4) atomiser, (5) tracer tank, (6) YAG laser, (7) power supply, (8) CCD camera and (9, 10) PC's.

と PIV のトレーサーとしてオリーブ油の微小粒子を周囲の空間に注入する。トレーサー粒子は、圧縮機 (No. 3) で駆動した 6 ジェットアトマイザー TSI MODEL 9306 (No. 4) にて生成し、トレーサータンク (No. 5) を介して、ノズルに供給する。PIV システムは、ダブルパルス YAG レーザー (No. 6)、および、レーザー電源 (No. 7)、高解像度 CCD カメラ (No. 8)、制御用 PC (No. 9, 10) で構成される。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 偏心渦の回転

Fig. 4 は、シート状光源と高速度ビデオカメラにより観察した羽根車周りの流れの時刻歴発展の一例である。偏心渦を明瞭に観察することができる。偏心渦は、空間に固定しているのではなく、羽根車の回転方向と同じ方向に、かつ、羽根車の回転よりもはるかに遅い角速度で、旋回する。今回の実験条件下では、偏心渦旋回の角速度は、常に安定しほぼ一定である。

Fig. 5 は、二台の HWV で同時計測した  $r/D_2 = 0.70$  (羽根車の外周部近傍) かつ  $Re = 1000$  での合成流速  $|v|$  の時刻歴波形を示す。パネル (a) と (b) は、それぞれ、 $z_1/L = 0$  の Probe 1 と  $z_2/L = 0.37$  の Probe 2 によって同時に測定した結果である。ここに、 $z_1$  と  $z_2$  は、それぞれ、Probe 1 と Probe 2 の位置  $z$  を示す。  $|v|$  は、羽根車外周部の速度  $u_2$  によって無次元化している。

最初に、パネル (a) に注目する。約 30 秒の明確な周期性を観察できる。HWV の測定結果を流れの可視

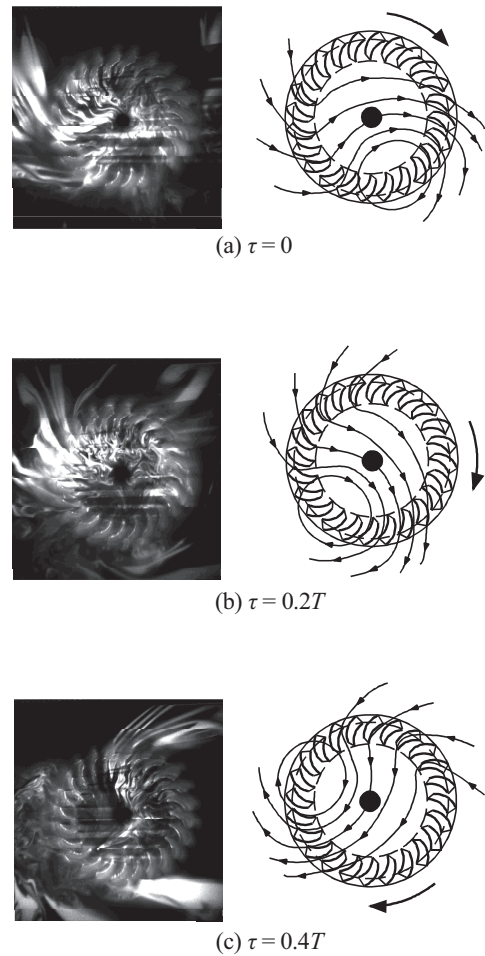


Fig. 4. Revolution of the eccentric vortex visualised by smoke (at  $z/L = 0$  and  $Re = 500$  ( $Re(D_2) = 3500$ )).  $T$  is period of the revolution.

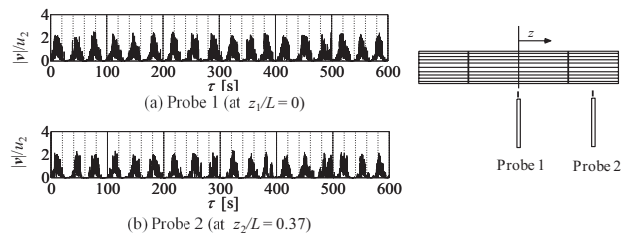


Fig. 5. Simultaneously-detected flow-velocity fluctuation by two HWV's 1 and 2 (at  $r/D_2 = 0.7$ ,  $z_1/L = 0$ ,  $z_2/L = 0.37$  and  $Re = 1000$  ( $Re(D_2) = 7000$ )).

化と同期して比較することにより、この周期性が偏心渦の旋回に対応していることを確認できる。この偏心渦の旋回に関連する卓越周波数  $f_{EVR}$  に加え、

Probe 1 からの HWV の信号には、偏心渦の巡回周波数よりもはるかに高い卓越周波数成分を含む。この高い卓越周波数は翼の通過によるものである。

次に、パネル(b)を見る。一般に、貫流羽根車の大きな利点の一つは、羽根車軸に垂直な二次元流れを生成できることである。本研究では、貫流羽根車の最適な設計のために理想状態での流れを知ることが目的であり、そのために、高アスペクト比のモデルを用いている。そこで最初に、流れの二次元性を確認する。パネル(b)は、パネル(a)と同時測定した HWV による流速の時刻歴波形を表す。波形は定性的にだけでなく定量的にもパネル(a)に似ている。もちろん、パネル(a)と同様、Probe 2 からの HWV 出力信号には、低い卓越周波数と非常に高い卓越周波数の両方の変動成分が含まれている。これら二つの卓越周波数成分の位相は、共に、パネル(a)の位相とかなり一致している。

Fig. 6 は、二台の HWV を用いて計測した  $r/D_2 = 0.70$  かつ  $Re = 1000$  での相互相関係数  $R_{12}$  を示す。パネル(a)と(b), (c), (d)は、それぞれ、 $z_2/L = 0.12$  と  $0.19$ ,  $0.37$ ,  $0.45$  でのものである。 $z/L = z_1/L = 0$  の位置にある Probe 1 を基準プローブ、 $z/L = z_2/L$  の位置にある Probe 2 を移動プローブとする。これらのプローブを使用した一連の同時測定から、レイノルズ数  $Re$  が 500 と 1000, 1500 における  $z_2/L = -0.40 \sim 0.45$  の範囲での相互相関係数  $R_{12}$  を求め、その一部を Fig. 6 に示す。 $R_{12}$  の値は、 $z/L = 0.24$  の位置に補強板があるにも拘わらず、全ての実験を通して  $\tau = 0$  秒において常に 0.5 を超える（厳密には、 $R_{12}$  は  $Re$  の減少とともに徐々に減少する）。さらに、全ての実験を通して、両プローブの位相の差はほとんどない。結論として、本研究の流れの二次元性は、端板の近傍を除く広いスパンに亘って十分に確保されている。もちろん、この二次元性は主に乱流のため、厳密ではない。

Fig. 7(a)は、羽根車の回転速度（回転周波） $n$  に対する偏心渦巡回周波数  $f_{EVR}$  を示す。Fig. 7 (b)は、Fig. 7(a)の無次元表記の一つである。つまり、横軸は  $Re$ 、縦軸は  $f_{EVR}$  を羽根車の回転速度  $n$  で除して無次元化したものである。 $f_{EVR}$  は、 $r/D_2 = 0.51$  かつ  $z/L = 0$  での HWV による測定値をフーリエ変換して、求めて

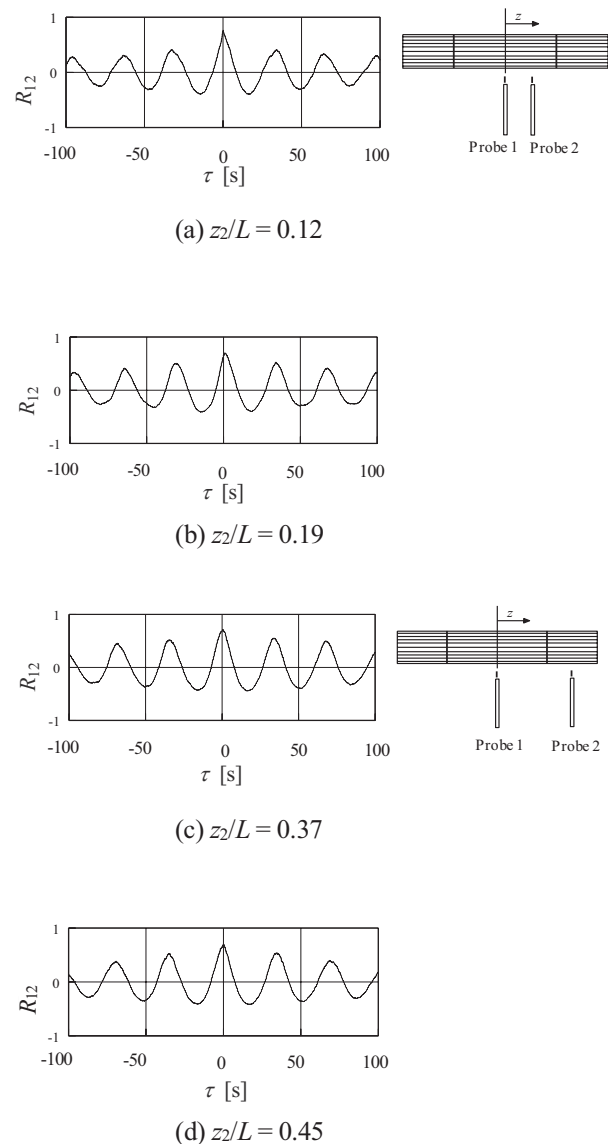
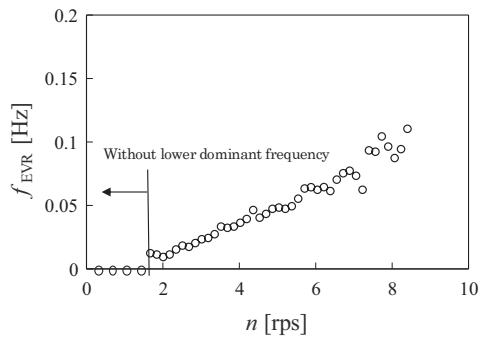


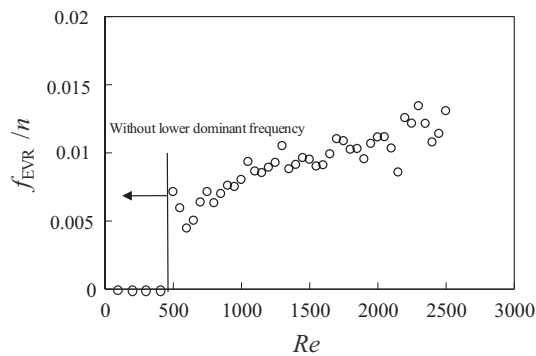
Fig. 6. Cross-correlation coefficient  $R_{12}$  between two HWV's 1 and 2 (at  $r/D = 0.7$ ,  $z_1/L = 0$  and  $Re = 1000$  ( $Re(D_2) = 7000$ )).

いる。

最初に、パネル(a)に注目する。HWV からの出力信号には  $n \geq 1.8$  rps でのみ、低い卓越周波数  $f_{EVR}$  が認められる（よって、 $n < 1.8$  rps では、 $f_{EVR} = 0$  と表記している）。 $f_{EVR}$  は、 $n$  の増加につれて、単調増加する。なお、翼の通過によるはるかに高い卓越周波数は、図中に示していないが、 $n < 9$  rps のすべての実験した  $n$  で検出できる。同時に行なった流れの観察からは、 $n < 1.8$  rps で低い卓越周波数  $f_{EVR}$  を検出できない主な理由は、偏心渦の消失ではなく、偏心渦の非周期的・不規則な巡回または振動、あるいは、



(a) In dimensional form



(b) In non-dimensional form

Fig. 7. Lower dominant frequency  $f_{EVR}$  related with the eccentric-vortex revolution EVR by HWV against impeller's rotational speed  $n$  (at  $r/D_2 = 0.51$  and  $z/L = 0$ ).

空間的固定である。

一方、 $n \geq 1.8$  rps では、偏心渦の安定した旋回を観察できる。図からは、この旋回が、羽根車の回転数の約 1/100 程度と非常に遅いことがわかる。よって、 $f_{EVR}$  を決定するメカニズムの説明には強い非線形性を伴う困難さが予想される。

次に、パネル(b)を見る。  $Re < 500$  では  $f_{EVR}/n$  は検出できないので、 $f_{EVR}/n = 0$  と表示している。  $Re = 500 \sim 1000$  では、 $Re$  の増加に連れて  $f_{EVR}/n$  は増加する。  $Re = 1000 \sim 2500$  では、 $f_{EVR}/n$  は  $Re$  の増加に連れて増加傾向を示すが、その増加傾向は小さく、 $f_{EVR}/n \cong 0.01$  と近似できる。  $Re > 2500$  では、 $f_{EVR}/n$  の値はバラついてはいるが、時間とともに変動して、偏心渦旋回が安定せず周期性は弱まることに対応している。  $Re > 2500$  での不安定性は未解明ではあるが、理論的および実用的な観点から意味があり、将来の重

要な課題である。 実際、Lazzarotto et al.<sup>33)</sup>によると、相似則に従う下限界の臨界レイノルズ数は、ケーシングの形状の影響を受けはするが、5000~12000 程度であり、2500 よりはるかに大きい。

### 3.2 偏心渦固定のために挿入した平板の影響

この節以降、より正確な流れの観察と測定のため、羽根車の外側に挿入した薄い平板を用いて偏心渦を空間に固定する。 偏心渦を含む流れ場全体をより正確に測定する上で、偏心渦の旋回は測定上の困難さを生むからである。 例えば、位相平均処理は、厳密な周期性がないことと高周波数のランダム変動成分のため、適用することが困難である。 そこで Fig. 8 に示す配置で、羽根車近傍に薄く長い平板を挿入し、空間に偏心渦を固定する。 隙間  $\delta$  は、平板の先端部と羽根車の外周の半径方向の距離として定義する。

偏心渦が固定された準定常な流れ場では、(1)翼通過と乱流による変動成分は残ったままだが、これらの変動成分より低い卓越周波数  $f_{EVR}$  は消える。(2)羽根車外周の流入領域と流出領域、および、偏心渦の位置を HWV でより正確に判別できる。(3)さらに、PIV のトレーサー粒子を継続的かつ安定的に導入することが容易になる。

一般に、偏心渦の旋回を止めるためには隙間  $\delta$  を小さくする必要がある。 Fig. 9 は旋回が停止する  $\delta$

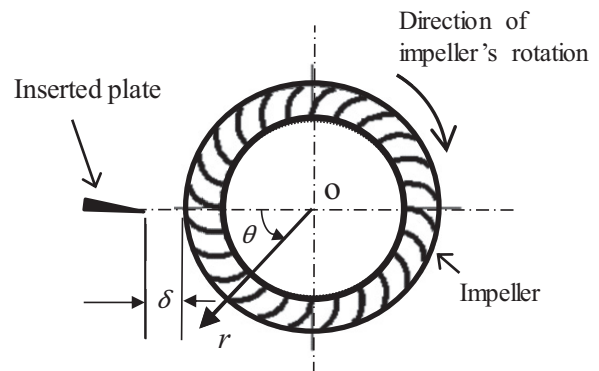


Fig. 8. An inserted plate to fix the eccentric vortex in space with the distance  $\delta$  form an impeller, together with polar coordinates  $r$  and  $\theta$ .

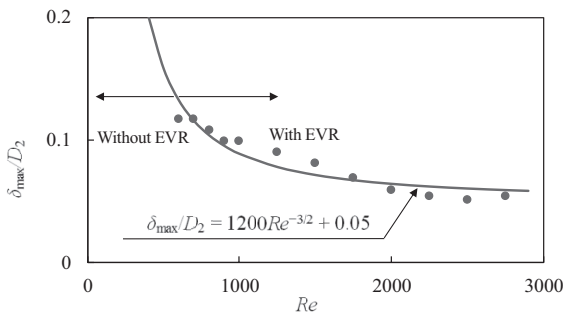
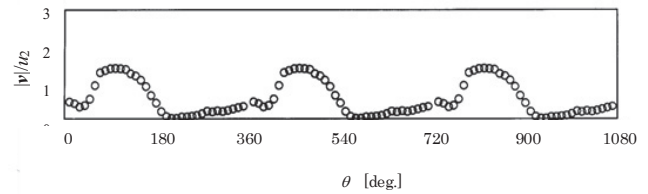


Fig. 9. Maximum distance  $\delta_{\max}$  between an impeller and an inserted plate against Reynolds number  $Re$ . A solid line represents such an empirical formula as  $\delta_{\max}/D_2 = 1200Re^{-3/2} + 0.05 (= 65Re(D_2)^{-3/2} + 0.05)$ .

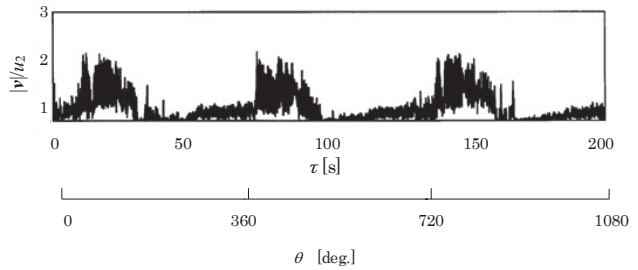
の最大値  $\delta_{\max}$  を示す。図中の実線は、 $\delta_{\max}$  の実験式である。Fig. 9 に示す様に  $\delta_{\max}$  は  $Re$  に依存するが、 $Re > 2000$  で  $\delta_{\max}/D_2 \cong 0.05$  である。一方、山藤<sup>7)</sup>は、 $Re > 2000$  で偏心渦旋回を停止させる条件として  $\delta/D_2 \leq 0.2$  を提案した。この不一致の主な理由は、(1) 山藤<sup>7)</sup>の実験での自由表面の存在による強い三次元効果と重力波効果、および、(2)山藤<sup>7)</sup>の実験に用いた水槽が小さいことにあると考えられる。

平板挿入の目的は、偏心渦の旋回を止めることだけなので、元の流れを極力変形させないようにすべきである。隙間  $\delta$  が小さくなると、平板による流れの変形が大きくなる。そのため、 $\delta$  は大きいほど望ましいので、 $\delta = \delta_{\max}$  とすべきである。

Fig. 10 では、平板により偏心渦を空間固定した場合の時間変動流速（パネル (a)）と、偏心渦が回転している場合の時間変動流速（パネル (b)）とを比較する。具体的には、パネル (a) は、 $r/D_2 = 0.51$  での時間平均流速の周方向分布を示す。パネル(b) は、 $r/D_2 = 0.51$  での HWV で測定した瞬間流速の時刻歴波形を示す。パネル(a)の準定常解析には、パネル (b) に現れる翼通過に伴う高い卓越周波数が存在しないが、それにも拘わらず、両者は良好な類似性を示す。今回、瞬間流速について、挿入平板の影響を直接議論できていない。瞬間流速同士の比較の参考として、後に示す Fig. 11 での平板を挿入した高アスペクト比羽根車の PIV 解析結果を、Funaki et al.<sup>51)</sup>での平板を挿入しない低アスペクト比羽根車の PIV 結果と比較



(a) Time-mean flow velocity distribution around an impeller by HIV (The eccentric vortex is fixed by an inserted plate with  $\delta/D_2 = 0.05$ ).



(b) Without a splitter plate

Fig. 10. Wave forms with/without a plate inserted near an impeller (at  $r/D_2 = 0.51$ ,  $z/L = 0$  and  $Re = 700$  ( $Re(D_2) = 5000$ )).

することが有用である。結論から述べると、アスペクト比の違いはあるが、挿入平板の影響は、定性的に無視できそうである。

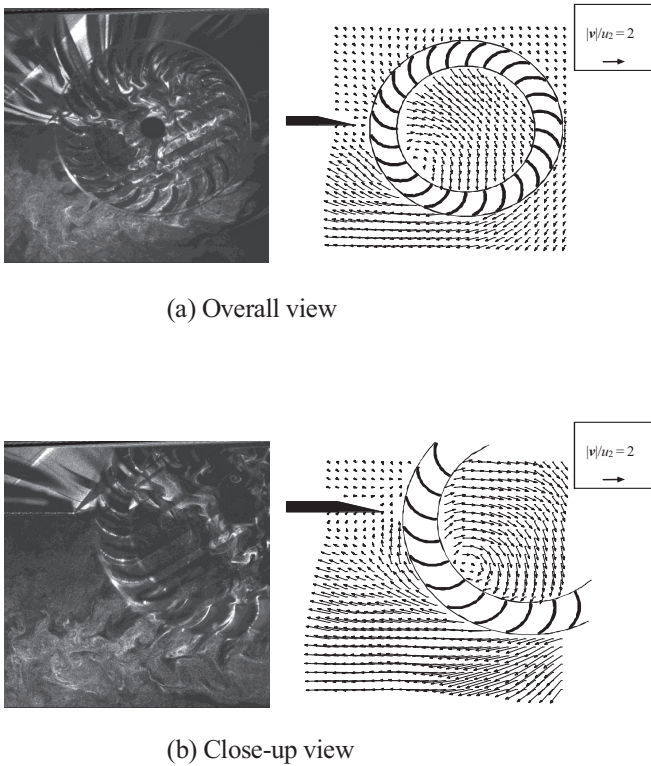
以上から、次の節以降、挿入平板により偏心渦を空間的に固定した結果について議論する。

### 3.3 羽根車近傍と内部の流れ場

Fig. 11 は、 $Re = 1500$  での羽根車近傍の流れの可視化写真（左側）と PIV 解析した速度ベクトル（右側）を示す。パネル(a)は全体図であり、パネル(b)はその拡大図である。

$Re = 300 \sim 2500$  でも同様な流れの可視化を行い、結果は示していないがそれらは Fig. 11 と同様の傾向を示す。すなわち、次の二つである。(1) 偏心渦、つまり、羽根車内部の大規模な再循環流構造。(2) 平板の先端近くの再流入により生じる羽根車外周のすぐ外側の再循環流構造。もし偏心渦が完全な円形から若干歪んだ形と見做すならば、この再流入を偏心渦の一部と見ることができるともかもしれない。

煙により可視化された流れの観察 (Fig. 4 など) と共に PIV (Fig. 11 など) の結果を羽根車外周部につ



(a) Overall view

(b) Close-up view

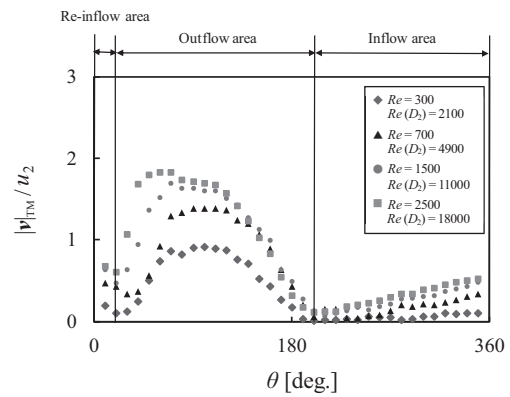
Fig. 11. Visualised photograph (on left hand) and flow-velocity vectors by PIV (on right hand) near an impeller with an inserted plate (at  $z/L = 0$  and  $Re = 1500$  ( $Re(D_2) = 11000$ ) with  $\delta/D_2 = 0.08$ ).

いて詳しく見ると、 $Re$  に依らず次の三点が認められる。(1)羽根車すぐ外側の再流入は  $\theta \cong 0 \sim 20$  deg. (2)羽根車からの流出は  $\theta \cong 20 \sim 200$  deg. (3)羽根車からの流入は  $\theta \cong 200 \sim 360$  deg. 再循環流領域(羽根車外周部の再循環構造の現れる  $\theta$  の範囲)に関しては、流れの可視化からその空間範囲を明確にすることはできないが、後に示す HWV の結果からは、この再循環流領域は  $\theta \cong 0 \sim 40$  deg. である。

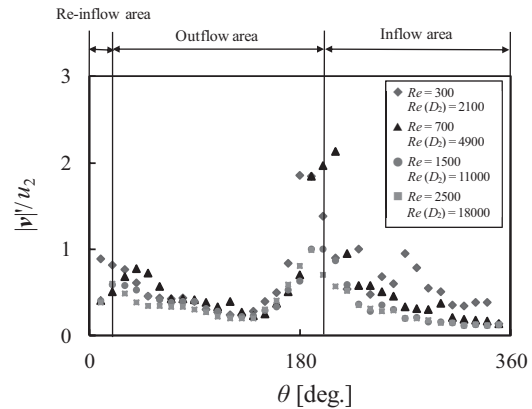
以上、全ての PIV 結果をまとめると、羽根車外周の再流入、流出、流入の全ての領域は、定性的に  $Re$  に依存しない。定量的には、 $Re$  の増加に連れて、無次元化された流速の絶対値  $|v|/u_2$  は、増加する傾向がある。具体的には、羽根車外周付近の流出領域での  $|v|/u_2$  は、 $Re = 300$  で約 1、 $Re = 1500$  と  $2500$  で約 2 である。さらに、 $Re$  の増加に連れて、偏心渦の中心位置は羽根車中心から羽根車内周へと移動する傾向がある。偏心渦の中心位置は、時間につれて変動す

る。 $Re = 300$  と  $700$  では、中心位置は、 $r/D_2 = 0.2 \sim 0.4$  および  $\theta = 30 \sim 60$  deg. の範囲で変動する。 $Re = 1500$  と  $2500$  では、中心位置は、羽根車内周上にあり、 $\theta = 40 \sim 45$  deg. の狭い範囲で変動する。

HWV の結果により、以上の PIV の結果を確認できる。Fig. 12 は、羽根車外周近傍  $r/D_2 = 0.51$  での HWV により得た時間平均流速  $|v|_{TM}$  (パネル(a)) と乱れ強さ  $|v'|$  (パネル(b)) の周方向(方位角方向)分布を示す。



(a) Time-mean flow velocity  $|v|_{TM}$



(b) Turbulence intensity  $|v'|$

Fig. 12. Circumferential distributions of both time-mean flow velocity  $|v|_{TM}$  and turbulence intensity  $|v'|$  on the outer periphery of an impeller with an inserted plate by HWV (at  $r/D_2 = 0.51$  and  $z/L = 0$  with  $\delta/D_2 = 0.05$ ).



最初に、パネル(a)を見る。  $\theta = 200 \text{ deg.}$  の時に  $|\mathbf{v}|_{TM}/u_2 \cong 0$  となり、流出領域と流入領域の境界に対応している。再流入領域と流出領域との境界つまり  $\theta \cong 20 \text{ deg.}$  で  $|\mathbf{v}|_{TM}/u_2$  は極小値をとる。流出領域では  $|\mathbf{v}|_{TM}$  は、他の領域よりもはるかに大きな値をとりがちである。流入領域では、 $|\mathbf{v}|_{TM}$  の分布はやや平坦で、その値は小さくなりがちである。PIV と整合して、三つの領域の範囲は  $Re$  にほとんど依存せず、かつ、 $|\mathbf{v}|/u_2$  の値は  $Re$  の増加に連れて増す。なお、流入領域の総和と流出領域の総和に差異が生じる主な原因は、縦軸が半径方向速度成分ではなく、合成速度の絶対値であることにある。Fig. 11 に示した様に、流出領域の周方向流速成分は小さくないが、流入領域の周方向の流速成分は零に近い。

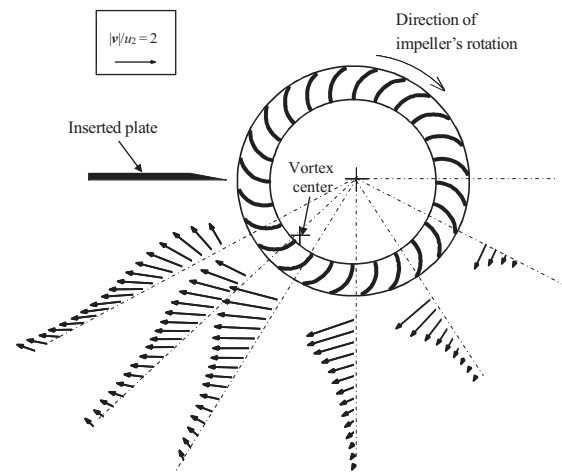
次に、パネル(b)を見る。  $|\mathbf{v}'|$  は流出領域と流入領域で小さく、これら二つの領域の境界に近い  $\theta \cong 200 \text{ deg.}$  で極大値をとる。この極大値は、挿入平板による偏心渦の空間固定が特に  $\theta \cong 180 \text{ deg.}$  で不充分であることによる。つまり、この極大値は瞬間場には現れない擬似的なものである。また、 $\theta \cong 0\sim 40 \text{ deg.}$  での  $|\mathbf{v}'|$  は、再流入領域に対応して、若干大きな値を示す。パネル(a)と同様、三つの領域は  $|\mathbf{v}'|$  の分布とよく整合する。よって、 $|\mathbf{v}'|$  の分布は、 $Re$  にほとんど依存しない。ただし、 $|\mathbf{v}'|/u_2$  の値は、 $Re$  の減少に連れて、若干大きくなる傾向がある。

### 3.4 PIV と HWV 計測に基づく最適なケーシングと流量

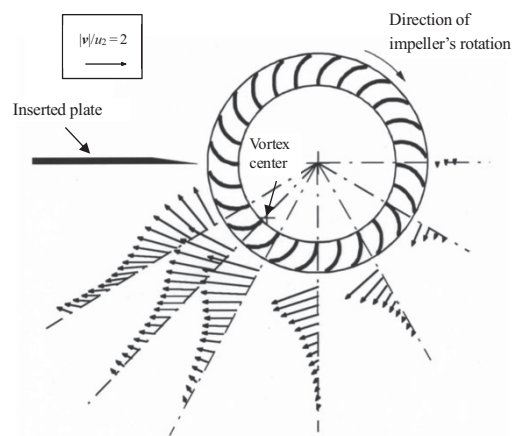
全ての PIV の結果を HWV の結果と比較すると、羽根車外周近傍の流出領域の前半分でトレーサー状態が悪いため、PIV の精度を維持することが難しい。この範囲を除き、全ての  $Re$  で良好な類似性が見られるが、PIV による流速の絶対値は HWV よりわずかに小さくなる傾向がある。HWV は PIV と比較して精度と信頼性に優れているので、この PIV の欠陥を HWV と PIV の両方のデータを併用して以下に補正する。Fig. 13 は、流出領域近傍で、HWV と PIV とを組み合わせた結果を示す。つまり、HWV による流速ベクトルの絶対値と、PIV による流速方向を組み合わせている。パネル(a)と(b)は、それぞれ、 $Re=$

1500 と 2500 の結果である。 $\theta=90 \text{ deg.}$  で、流出角は、羽根車外周付近で最大を示し、かつ、外側翼角  $\beta_2$  に近い。

今、Fig. 13 の結果に基づき、羽根車ケーシングの最適形状を考える。より高性能なファン設計の条件として、いささか逆説的ではあるが、ケーシングを流れの阻害要因と想定する。もちろん、ケーシングにより偏心渦が強化されて高性能ファンが実現できるなど、別の可能性も存在するが、ここではそのような可能性は考慮しない。まず、流線に沿ったケーシングを考えるとその形状は、一般的なケーシング形状とは大きく異なることに注意する。そこで、流速



(a) At  $Re = 1500$  ( $Re(D_2) = 11000$ )



(b) At  $Re = 2500$  ( $Re(D_2) = 18000$ )

Fig. 13. Flow-velocity vectors of outflow by both PIV and HWV (at  $z/L = 0$  with  $\delta/D_2 = 0.05$ ).

の絶対値が無視できる程度に小さな場所にケーシングを配置し、流速方向を無視する。一例ではあるが、Fig. 14 に $|v|/u_2 = 1$  の等値線を示す。等値線は、中心をずらした直径  $D_{EC} = 1.55D_2$  の円とほぼ一致する。等値線は、 $Re$  にほとんど依存せず、また、多くの実際の貫流羽根車のケーシング形状に近いことも興味深い。なお、 $|v|/u_2 \ll 1$  の等値線から求めたケーシングは、羽根車から遠い位置になり、実用的観点からは、ケーシングには大きすぎる。

一般に、流量は、ファン性能の主要な指標である。一方、ケーシングのない状態の羽根車単体では、直接、流量を定義できない。そこで、流量を、羽根車の単位スパン長さ当たりの、流速の半径方向成分の流出領域だけでの周方向積分  $Q_{out}$  と定義する。

Fig. 15(a)に様々な  $n$  での  $Q_{out}$  を示す。Fig. 15(b)は、Fig. 15(a)の無次元表記である；つまり、 $Re$  に対する流量係数  $C_{Qout}$  を示す。ここに、 $Q_{out}$  を、 $C_{Qout} \equiv Q_{out}/(\pi D_2 u_2)$  と無次元化している。具体的に述べると、 $Q_{out}$  は、PIV と HWV の計測に基づく、 $r/D_2 = 0.51$  かつ  $z/L = 0$ 、 $\delta/D_2 = 0.05$  での結果である。

最初に、パネル(a)を見る。 $Q_{out}$  は、 $n$  の増加に連れて単調に増加する。次に、パネル(b)を見る。 $C_{Qout}$  は、 $Re$  の増加に連れて単調増加する。ただし、その増加傾向は、 $Re \geq 500$  で頭打ちとなり、 $C_{Qout} \cong 0.1$  となる。なお、図中の実線は、今回の実験に基づく経験則  $C_{Qout} = 0.16(1 - e^{-Re/700})$  である。一般的な実用的貫流羽根車の多くでは、 $Re$  は  $10^3$  以上である。一方、

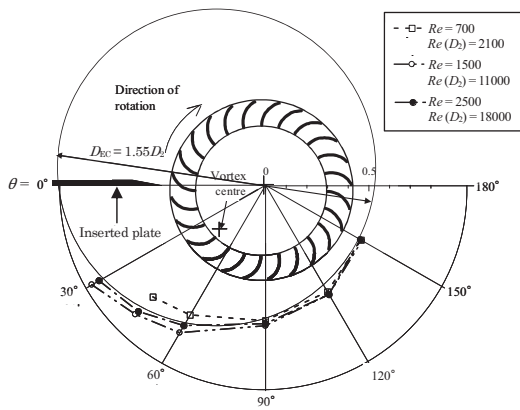
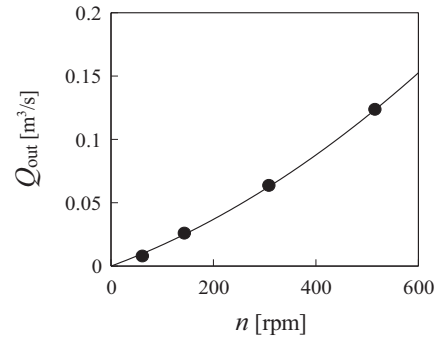
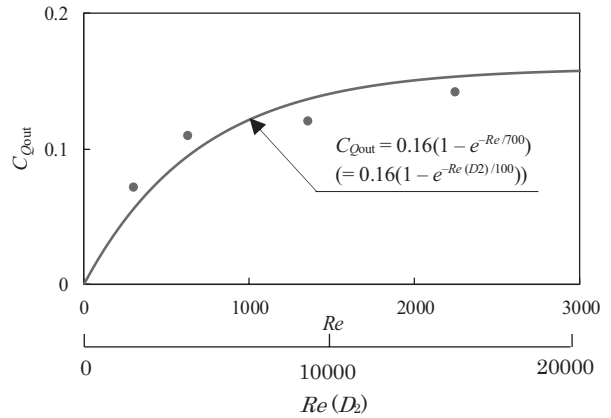


Fig. 14. Contours on which  $|v|_{tm}/u_2 = 1$  (at  $z/L = 0$  with  $\delta/D_2 = 0.05$ ).



(a) In dimension form



(b) In non-dimension form

Fig. 15. Outflow rate  $Q_{out}$  from the outflow are against impeller's rotation speed  $n$  by both PIV and HWV (at  $r/D_2 = 0.51$  and  $z/L = 0$  with  $\delta/D_2 = 0.05$ ). A solid line represents such an empirical formula as  $C_{Qout} = 0.16(1 - \exp(-Re/700)) = 0.16(1 - \exp(-Re(D_2)/100))$ .

本研究で調べた貫流羽根車は理想的に単純化されたものの一つである。 $Re \geq 500$  にて  $C_{Qout} \cong 0.1$  となる結果は、低エネルギー損失ケーシングを設計する際の一つの目安として利用できそうである。

#### 4. 結論

最適な設計手法を確立するため、単純な貫流羽根車の基本的な流れ場の理解を試みた。つまり、PIV と HWV を用いて、ケーシングの無い高アスペクト比の羽根車の流れを実験的に調べた。結果は次の通りである。

- (1) 偏心渦は  $Re = 500 \sim 2500$  で一定の角速度  $2\pi f_{EV}$

で安定して旋回する。旋回速度は、羽根車の回転速度の1/100程度である。 $Re \geq 1000$ で、旋回速度への $Re$ の影響は小さくなる。

(2)流れの可視化と時間平均分布、乱れ強さ分布に基づき、羽根車外周部を、流入と流出、再流入の三つの領域に分類した。

(3)実験結果に基づき、羽根車ケーシングの一つの最適形状を考案した。

(4) $Re \geq 500$ での $C_{Qout} \cong 0.1$ であった。これは、貫流羽根車のケーシング設計において、低エネルギー損失の目安として利用可能である。

鈴木慧輔氏と三船友梨恵氏、椋木優士氏、長手拓海氏（同志社大学）の技術的支援に感謝する。

### 参考文献

- 1) Eck, B., *Fans-Design and Operation of Centrifugal, Axial-Flow and Cross-Flow Fans*, Pergamon Press, NewYork (1973).
- 2) Ikegami, H. and Murata, S., "A Study of Cross Flow Fan - a Theoretical Analysis -", *Osaka Univ. Faculty of Engineering Tech. Reports*, **16**, 557-578 (1966).
- 3) Porter, A. M. and Markland, E., "A Study of the Cross Flow Fan", *J. Mechanical Engineering Science*, **12**[6], 421-431 (1970).
- 4) Lajos, T., "Investigation of the Flow Characteristic in the Impeller of the Tangential Fan", *Proc. of the Fifth Conference on Fluid Machinery* (1975), pp. 567-577.
- 5) 村田 暹, 西原一嘉, "横断流送風機に関する研究 (第1報: ケーシング形状が送風機性能に及ぼす影響)", 日本機械学会論文集 (第2部), **41**[347], 2062-2075 (1975).
- 6) 村田 暹, 西原一嘉, "横断流送風機に関する研究 (第2報: 性能曲線と内部流動状態)", 日本機械学会論文集 (第2部), **41**[347], 2076-2089 (1975).
- 7) 山藤和男, "貫流羽根車の流れの研究 (第1報: 実験的研究)", 日本機械学会論文集 (第2部), **41**[347], 189-199 (1975).
- 8) 山藤和男, "貫流羽根車の流れの研究 (第2報: 解析的研究)", 日本機械学会論文集 (第2部), **41**[344], 1184-1192 (1975).
- 9) 村田 暹, 小川徹, 志水勇, 西原一嘉, 木下 敏治郎, "内部案内装置をもつ横断流送風機の研究", 日本機械学会論文集 (第2部), **43**[372], 3009-3019 (1977).
- 10) 中村邦夫, 奥谷浩一郎, "クロスフローファン内部流れの解析", *ターボ機械*, **11**[4], 196-201 (1983).
- 11) 中村邦夫, 梅景康裕, 友広輝彦, 奥谷浩一郎, "クロスフローファン内部流れの自動計測とその解析", *ターボ機械*, **14**[2], 67-76 (1986).
- 12) 深野 徹, 山下 泰, 原 義則, 木下 敏治郎, 野見山茂治, "横流れファンの騒音低減化に関する研究 (第1報: 舌部及び動翼の幾何形状の影響)", *ターボ機械*, **20**[8], 464-470 (1992).
- 13) 深野 徹, 原 義則, 山下 泰, 木下 敏治郎, "横流ファンの騒音低減化に関する研究 (第2報: 舌部隙間の大きさの影響)", *ターボ機械*, **21**[6], 350-357 (1993).
- 14) 深野 徹, 山下 泰, 原 義則, 木下 敏治郎, "流れファンの騒音低減化に関する研究 (第3報: スクロール形状の影響)", *ターボ機械*, **21**[8], 466-472 (1993).
- 15) 深野 徹, 山下 泰, 原 義則, 木下 敏治郎, "横流ファンの騒音低減化に関する研究 (第4報: 内部流れと諸特性との関係)", *ターボ機械*, **22**[12], 709-714 (1994).
- 16) 深野 徹, 陳 次昌, 原 義則, 坪内 寛, 木下 敏次郎, "横流ファンの空力及び騒音特性の相似則に関する研究", *ターボ機械*, **25**[2], 73-81 (1997).
- 17) 田中周治, 村田 暹, "横流送風機の寸法効果に関する研究 (第1報, 特性曲線に及ぼす羽根車寸法の影響)", 日本機械学会論文集 (B編), **58**[550], 1788-1795 (1992).
- 18) 鶴崎 展, 清水 宏文, 辻本 良信, 吉田 義樹, 北川 晃一, "可視化によるクロスフローファン内部の流れの研究 (第1報, 粒子追跡法による計測結果の検討)", 日本機械学会論文集 (B編), **59**[568], 3743-3748 (1993).
- 19) 吉田 義樹, 田附 英幸, 清水 宏文, 鶴崎 展, 北川 晃一, 辻本 良信, "可視化によるクロスフローファン内部流れの研究 (第2報, 偏心渦の強さのバランスの機構)", 日本機械学会論文集 (B編), **60**[580], 4074-4081 (1994).
- 20) 田中周治, 村田 暹, "横流送風機の寸法効果に関する研究 (第2報, 内部流動に及ぼす羽根車寸法の影響および特性表示法の検討)", 日本機械学会論文集 (B編), **59**[560], 1153-1160 (1993).
- 21) 新井隆景, 杉山弘, Socharto, 小林洋一郎, "クロスフローファン内部流れの可視化とLDV測定", 日本機械学会論文集 (B編), **61**[583], 967-973 (1995).
- 22) 福富 純一郎, 中瀬 敬之, 伊澤 昌一郎, 玉置 雅司, "横流ファンの性能と内部流れに関する研究", 日本機械学会論文集 (B編), **61**[590], 3699-3705 (1995).

- 23) 福富 純一郎, 中瀬 敬之, 一宮 昌司, 篠原 善哉, “入口案内羽根による貫流ファンの高性能化に関する研究”, 日本機械学会論文集 (B 編), **64**[618], 442-446 (1998).
- 24) Fukutomi, J. and Nakamura, R., “Performance and Internal Flow of Cross-Flow Fan with Inlet Guide Vane”, *JSME International Journal (Series B)*, **48**[4], 763-769 (2005).
- 25) 林 卓郎, 小林 洋一郎, 永守 朗, 堀野 博文, “周波数変調による横流ファンの低騒音設計”, 日本機械学会論文集 (C 編), **62**[601], 3446-3451 (1996).
- 26) 林 卓郎, 小林 洋一郎, 永守 朗, 堀野 博文, “横流ファンの低騒音設計 (音源の干渉による翼ピッチ音の低減)”, 日本機械学会論文集 (C 編), **64**[617], 218-233 (1998).
- 27) Lee, D., Chen, P. and Miao, J., “Noise Reduction of A Cross-Flow Fan”, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, **20**[3], 265-273 (1997).
- 28) 大谷 浄, 金子 憲一, 藤井 昭一, “クロスフローファンのサージングに関する研究”, ターボ機械, **27**[2], 110-116 (1999).
- 29) Koo, H. M., “Discrete Frequency Noise Reduction of the Cross-Flow Fan of the Split Type Room Air-Conditioners Using the Skewed Stabilizers”, *JSME International Journal (Series C)*, **43**[1], 104-109 (2000).
- 30) 川口 清司, 鈴木 昌彦, “熱交換器一体形ファンにおける内部流れと伝熱特性”, 日本機械学会論文集 (B 編), **67**[662], 2518-2524 (2001).
- 31) 川口 清司, 鈴木 昌彦, “熱交換一体形ファンにおける内部流れと伝熱特性”, 日本機械学会論文集 (B 編), **67**[662], 2518-2524 (2001).
- 32) 原 義則, 深野 徹, 加野 敬子, 田中 英志, “横流ファンの流力と騒音の両特性の相似則および内部流れの二次元性”, ターボ機械, **29**[4], 236-245 (2001).
- 33) Lazzarotto, L., Lazzaretto, A., Martegani, A.D. and Macor, A., “On Cross-Flow Fan Similarity: Effects of Casing Shape”, *ASME J. Fluids Engineering*, **123**, 523-531 (2001).
- 34) Lazzaretto, A., “A Criterion to Define Cross-Flow Fan Design Parameters”, *Trans. ASME J. Fluids Engineering*, **125**, 680-683 (2003).
- 35) Lazzaretto, A., Toffolo, A. and Martegani, A. D., “A Systematic Experimental Approach to Cross-Flow Fan Design”, *ASME J. Fluids Engineering*, **125**, 684-693 (2003).
- 36) 山田 彰二, 中島 伸治, 大蔭 勝久, “クロスフローファンの離散周波数音源探索 (回転音の時刻歴伝ば挙動の再現)”, 日本機械学会論文集 (B 編), **69**[682], 1417-1424 (2003).
- 37) 船橋 茂久, 繁永 康, 渡邊 昌俊, 高田 芳廣, “空調用貫流ファンの流体騒音予測 (第 1 報, 相対速度に対する騒音の相似性の検討)”, 日本機械学会論文集 (B 編), **69**[687], 2472-2478 (2003).
- 38) 繁永 康, 船橋 茂久, 渡邊 昌俊, 高田 芳廣, “空調用貫流ファンの流体騒音予測 (第 2 報, 騒音予想モデルを用いた貫流ファンの低騒音化)”, 日本機械学会論文集 (B 編), **70**[690], 380-385 (2004).
- 39) Toffolo, A., Lazzaretto, A. and Martegani, A. D., “An Experimental Investigation of the Flow Field Pattern within the Impeller of a Cross-Flow Fan”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **29**, 53-64 (2004).
- 40) Tsai, Go-Lo., Tu, Ts-Hs., Li, Tu-Ch. and Wang, Ku-Hs., “Flow Style Investigation and Noise Reduction of a Cross-Flow Fan with Varied Rotor-Skew-Angle Rotor”, *JSME International Journal (Series B)*, **49**[3], 695-704 (2006).
- 41) 多久島 朗, 飯塚 邦彦, “クロスフローファンの内部流れの数値解析 : CIC (Clouds-in-Cells)法と FEM の適用”, 日本機械学会論文集 (B 編), **58**[545], 64-70 (1992).
- 42) 吉田 義樹, 田附 英幸, 清水 宏文, 鶴崎 展, 北川 晃一, 辻本 良信, “可視化によるクロスフローファン内部流れの研究 : 第 2 報, 偏心渦の強さのバランスの機構”, 日本機械学会論文集 (B 編), **60**[580], 4074-4081 (1994).
- 43) 陳 次昌, 深野 徹, 原 義則, “境界要素法と離散渦法によるクロスフローファン内部流れの解析”, 日本機械学会論文集 (B 編), **61**[587], 2387-2392 (1995).
- 44) 赤池 茂, 北田 基博, 平等, 菊山 功嗣, “クロスフローファンの内部流れと送風特性”, 日本機械学会論文集 (B 編), **63**[606], 583-589 (1997).
- 45) Cho, Y., Moon, Y., “Discrete Noise Prediction of Variable Pitch Cross-Flow Fans by Unsteady Navier-Stokes Computations”, *Journal of Fluids Engineering*, **125**[3], 543-550 (2003).
- 46) Moon, Y., Cho, Y., and Nam, H., “Computation of Unsteady Viscous Flow and Aeroacoustic Noise of Cross Flow Fans”, *Computers & Fluids*, **32**, 995-1015 (2003).
- 47) Toffolo, A., “On the Theoretical Link Between Design Parameters and Performance in Cross-Flow Fans: a Numerical and Experimental Study”, *Computers and Fluids*, **34**, 49-66 (2005).
- 48) 福富 純一郎, 中村 怜, 重光 亨, 法貴 雄介, “クロスフローファンの入口予旋回流れとその制御”,

- 日本機械学会論文集 B 編, **78**[795], 1919-1927 (2012).
- 49) 福富 純一郎, 重光 亨, 飯野 峻也, “クロスフローファンの偏心渦が内部流れと性能に及ぼす影響”, 日本機械学会論文集, **81**[824], DOI: 10.1299/transjsme. 14-00636 (2015).
- 50) Nakamura, R., Fukutomi, J., Shigemitsu, T., and Houki, Y., “Pre-Whirl Flow and Its Control in a Cross Flow Fan”, *Journal of Fluid Science and Technology*, **8**[3], 452-461 (2013).
- 51) Funaki, J. Kimata, N. Hisada, M. and Hirata, K., “Aspect-Ratio and Reynolds-Number Effects on Short-Span Cross-Flow Impellers without Casings”, *JSME International Journal (Series B)*, **49**[4], 1197-2005 (2006).
- 52) 舟木 治郎, 木全 伸幸, 久田 基秀, 平田 勝哉, “ケーシングの無い短スパン貫流羽根車のアスペクト比効果とレイノルズ数効果”, 日本機械学会論文集(B編), **73**[736], 2514-2523 (2007).
- 53) Hirata, K., Iida, Y., Takushima, A. and Funaki, “J., Instantaneous Pressure Measurement on a Rotating Blade of a Cross-Flow Impeller”, *Journal of Environment and Engineering*, **3**[2], 261-271 (2008).
- 54) 平田 勝哉, 飯田 雄一, 多久島 朗, 舟木 治郎, “貫流羽根車の回転翼表面における変動圧力測定”, 日本機械学会論文集(C編), **74**[748], 2947-2954 (2008).
- 55) Hirata, K., Onishi, Y., Nagasaka, S., Matsumoto, R. and Funaki, J., “Aspect-Ratio Effects and Unsteady Pressure Measurements inside a Cross-Flow Impeller”, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, **5**[3], 117-125 (2012).
- 56) 平田 勝哉, 松本 遼, 山村 光弘, 三原 宏昭, 舟木 治郎, “貫流羽根車内部の非定常圧力分布”, ターボ機械, **41**[12], 743-753 (2013).