となり, $P_0=2P_{20}$ とすれば, (7) 式とはほぼ一致する。もし $P_0=3P_{20}$ としても T_1 と K_1 の比は P_0 に対して一定ですから, 第6図において前向きゲイン K_1 (≈ 50 db) が低周波数域で 6 db 程度増加するのみで, 一巡伝達関数のボード線図は大差ない。

(2) 第12図 $\delta=3\%$ の実線と鎖線は途中で逆になっており, スムーズでないのはともに $T_d=0.5$ s の場合である。第11図から判断すると $T_d=0.5$ s では, この場合不安定となるようである。第12図の

$T_d=0.5$ s のようにサーボモータが急激に動くことは実際にはないので, その点におけるベンジラム油圧および水圧変動は示していない。

(3) 実際サーボモータの配圧弁ポートを加減するリニアな範囲は少なく, ダンシュボットタイムを減少すると閉鎖する速度が一定値に近づくのはご指摘のとおりである。第12図をみるとサーボモータの変位は最上部ではいずれの場合も0となっているので飽和している。

533.691.015:621-253

羽根車の空転損失について*

古屋 善 正**, 渡 部 公 明**

On the Racing Power of Impellers

by Yoshimasa FURUYA and Kōmei WATABE

Measurements of the torque consumed by an impeller rotating in a closed vessel were obtained under the various geometrical configurations by means of a torsion balance technique. The experimental results indicate the following conclusions:

(1) When the boss ratio has a value between zero and 0.6, the resisting coefficient takes constant value approximately.

(2) The resisting coefficient C_f takes the maximum value for a certain number of blades of the impeller and varies in proportion to $(\sin \theta)^{1/2}$ ($\theta \neq 0$) where θ is the attack angle of blades.

(3) The relation between the resisting coefficient C_f and Reynolds number R_e in a smooth vessel is given by $C_f \propto R_e^{-1/6}$.

(4) When the width of the impeller is large, the resisting coefficient of the impeller is identical with that of a disc with ribs on both sides of the surfaces.

(5) The effect of the number of the blade disappears when the impeller has a shroud and the angle of blade is larger than 45 degrees.

1. 緒 言

一般に流体機械の締切点付近においては円板摩擦に類似のいわゆる再循環作用(かくはん作用)⁽¹⁾のため多くの動力が失われ, とくに軸流機械にあってはこの損失が著しい。これらの作用によって生ずる損失をここでは空転損失と呼んだ。スラリポンプなどにおいて見られる羽根車後面シュラウドに備えられた放射状リブ(これは浮遊固体を含む流体の後面シュラウドへの浸入を防止するとともに軸スラストを減少させる)あ

るいは近年の化学工業におけるかくはん機などはこの問題に直接関連することがらである。

従来かくはんの研究に対しては J. H. Rushton⁽²⁾ らによって実験がなされているが, 密閉された容器内で行なわれたものは少なく, また羽根車と容器内面のすきまのかなり大きな場合に限定されている。本実験においては以上のような各方面に応用される放射状羽根に起因する動力損失の一資料として, 簡単な数種類の羽根車を流体で満たされた密閉容器内で回転させ, その消費トルクを測定した。その結果, 羽根車ボス比, 羽根数, 羽根角度, 羽根幅, シュラウド, 容器とのすきまなどの影響を明らかにすることができた。またさ

* 昭和 37 年 10 月 15 日 第 40 期東京秋期講演大会において講演, 原稿受付 昭和 37 年 11 月 1 日。

** 正員, 名古屋大学工学部(名古屋市千種区不老町)。

きに報告された円板に羽根をつけた場合など^{(8)~(5)}の結果をさらに詳しく調べ、羽根車の結果と比較した。

2. 実験装置および方法

トルク測定装置は前報⁽⁴⁾で述べたものと同じである。羽根車または羽根をつけた回転円板は第1図に示すように密閉容器内に入れられ、軸方向すきま S として羽根の上端（あるいは下端）と容器内面との距離をとる。

羽根はボスまたは円板の円周上を等分に半径方向につけられ、その数 Z は 32, 16, 8, 4 の 4 種である。羽根角度 θ は軸に垂直な面となす角で示し、これを 90° , 60° , 45° , 30° , 0° の 5 種類に変化させた。羽

根断面はいずれも長方形で、羽根幅 b は 25.0mm,

第 1 図

$Z=16, \theta=90^\circ$

$Z=16, \theta=45^\circ$

$Z=8, d_0/d=0.75$

$Z=8, d_0/d=0.15$

円筒シェラウド

円板シェラウド

$b=25.0 \text{ mm}, d=258.0 \text{ mm}$

第 2 図 羽 根 車

12.0 mm, 6.0 mm, 羽根厚 a はすべて 5.0 mm である。

ボス直径 d_0 は 40.0 mm, 155.0 mm, 196.0 mm の 3 種に変え, それぞれの場合に対して羽根の長さ l を 109.0 mm, 51.5 mm, 31.0 mm にして, 羽根車および円板外径 d をいずれも 258.0 mm に保った。容器内径 D は, 半径方向のすきま t を変化させる時以外はすべて 261.0 mm であり, この場合半径方向すきま比は $t/d=0.006$ となる。

また容器内の羽根車によるかくはん流れを適当にさえぎるため, 羽根車外周に円筒状の薄板をはめた場合と, 羽根車の上下面(側面)に薄い円板をあてた場合を行なった。ここでは便宜上前者を円筒シュラウド, 後者を円板シュラウドと呼び, これらに対して前述のシュラウドのない場合を開放と称した。第 2 図にこれらの写真を示す。

前報の結果を補足するために行なった, 円板に羽根をつけた場合は, すでに述べたように, 羽根厚 $a=5.0$ mm, 羽根の高さ $h=12.0$ mm, 6.0 mm, 3.0 mm, で, 長方形断面の羽根の長さをそれぞれ $l=115.0$ mm, 86.2 mm, 57.5 mm, 28.8 mm に変えた。これらの羽根を円板の片面あるいは両面につけたが, 前者を片面羽根, 後者を両面羽根, そして両者を上述の羽根車に対して羽根円板と呼ぶ。

第 1 表はこれらの羽根車, 羽根円板を分類したもので, 実験はなめらかな内面の容器と組合わせ, 軸方向すきま S を種々変えて行なった。また容器内の上下両面に羽根幅 b の半分の高さの放射状羽根をつけた場合もあわせ行なったが, これは表中に○印を付してある。なお羽根数欄の ∞ の記号は羽根数を無限に増した場合すなわち円筒面(軸方向長さ b mm)をもつ円板を表わす。

抵抗係数 C_f の算出には

$$C_f = M/\rho\omega^2 r^5 \quad \dots\dots\dots (1)$$

を用い, レイノルズ数 R_e を $R_e = \omega r^2/\nu$ で表わした。ここに, C_f : 抵抗係数, M : 抵抗モーメント, ρ : 流体密度, ω : 羽根車または羽根円板の角速度, r : 同じくその半径, ν : 動粘性係数である。

実験結果は, 軸方向すきま比 S/d , 半径方向すきま比 t/d , 羽根数 Z , 羽根角度 θ , ボス比 d_0/d などをパラメータとした C_f-R_e 線図に整理し, これより種々の影響を考察する。

3. 実験結果と考察

実験は後の 3.7 節を除きすべてなめらかな内面の容器を用いて行なわれた。第 3 図は開放羽根車の結果の一つである。図のように縦軸に C_f , 横軸に R_e をとって整理すると, C_f-R_e 線はすべて直線を示し,

$$C_f = \alpha \cdot R_e^{-1/8} \quad \dots\dots\dots (2)$$

の式をほぼ満たすことがわかる。したがって本実験における R_e の範囲は $10^5 \sim 10^7$ であるが以下では主として $R_e=10^6$ の場合について述べることにする。第 2 表は各場合における $S/d=0.01$ のときの α の値を C_f-R_e 線図から求めたものである。

3.1 ボス比の影響 外径 $d=258.0$ mm の開放羽根車のボス直径 d_0 を順次に大きくした場合, すなわち羽根の長さ l を変えた結果を第 4 図に示す。図は縦軸に抵抗係数 C_f , 横軸にボス比 d_0/d をとり, 羽根数 Z および羽根幅比 b/d をパラメータとして C_f-R_e 線図より求めたものである。同図には円板片面に, 高さ h , 長さ l を種々に変えた羽根をつけた場合も示してある。○印は羽根車の結果, ⊖印は円板上の羽根を軸のほうより順次に切取った場合(前報と同じ), ●印はその切取った部分にボスをつけた場合である。いずれの場合も C_f はボス比 $d_0/d < 0.6$ ではそれぞれほぼ一定値をとるが, $d_0/d > 0.6$ では C_f は急に減小している。このことは前報で一部の羽根円板について示したが, 第 4 図からすべて同様な傾向を示すことがわ

第 1 表 羽 根 の 分 類

羽根別 羽根諸元	羽 根 車									羽 根 円 板					
	開 放			円筒シュラウド			円板シュラウド			両 面		片 面			
羽根幅 b mm 羽根高 h mm	25	12	6	25	12	6	25	12	6	12	6	3	12	6	3
羽 根 数 Z	4, 8, 16, 32, ∞	④, ⑧*, 16, ∞	④, ⑧, 16, ∞	4, 8, 16, 32	4, 8	4, 8	4, 8 16, 32	4, 8	4, 8	8, 16	8, 16	8	8, 16	8*, 16	8
羽根長さ l mm	31.0 51.5 109.0	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5	115.0	115.0	115.0	28.8, 86.2	57.5, 115.0	115.0
羽 根 角 度 θ°	90, 60, 45, 30, 0	90	90	90, 60, 45, 30, 0	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
備 考	ボス比 0.6 以外は $\theta=90^\circ$ のみ			○印: $h=(1/2)b$ の羽根をつけた容器との組合せを含む。 *印: 半径方向のすきまを種々変化した。											

かる。ボス比 $d_0/d=1$ は円筒面をもつなめらかな円板の場合に相当する。この円筒面の軸方向長さは、第 4 図における $d_0/d=1$ の場合、それぞれの羽根幅比 b/d 、あるいは羽根高さ比 h/d に対応した値をとる。この円筒面の影響を表わした C_f と b/d の関係は、後述の第 7 図(b)の点線で示されるようにほぼ直線的に変化している。

3.2 軸方向すきまの影響 第 5 図(a)は軸方向すきま比 S/d に対する抵抗係数 C_f の変化を示す。羽根幅 $b=25.0$ mm, ボス比 $d_0/d=0.6$ の開放羽根車を用い、羽根角度 θ を $90^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ, 0^\circ$ の 5 種類に変えた。 C_f-S/d 線は羽根枚数 Z が大きいほどその傾きをいくらか増すが、この傾きは羽根枚数 Z が変

第 2 表 α の値 (開放の場合)

b mm	Z	4	8	16	32	∞
25	90°	0.0945	0.0980	0.1025	0.1040	0.0425
	60°	0.0885	0.0928	0.0953	0.0990	—
	45°	0.0820	0.0855	0.0890	0.0960	—
	30°	0.0732	0.0750	0.0790	0.0825	—
	0°	0.0434	0.0509	0.0576	—	—
25	90°	0.0753	0.0777	0.0803	0.0828	0.0350
6	90°	0.0616	0.0630	0.0710	0.0727	0.0310

 $d=258.0$ mm, $S/d=0.01$ 第 3 図 C_f-R_e 関係 (開放の場合)

らなければ、その角度 θ によってはあまり変わらないようである。第 5 図(b)には $d_0/d=0.6$, $Z=8$ の羽根車の羽根幅 b を 25.0 mm, 12.0 mm, 6.0 mm に変えた場合が示してある。同図には前節の羽根円板 ($h=12.0$ mm, 6.0 mm, 3.0 mm; $\odot, \bullet$ 印, 第 4 図参照) の場合が比較のため点線で示してある。羽根車羽根幅 b の小さい場合 ($b=6.0$ mm, $b/d=0.023$), C_f-S/d 線の傾きは羽根円板の結果と同じであるが、羽根幅 b が増すにしたがってその傾きは大きくなる。図中の細い線はボス比を変えた結果 ($d_0/d=0.15$) であるが、これと上述の $d_0/d=0.6$ の場合と比較すると、 C_f-S/d 線の傾きはボス比によって変らないことがわかる。

3.3 半径方向すきまの影響 第 6 図に C_f-t/d 曲線を示す。実線は羽根車、点線は羽根円板(片面)、細線は比較のためのなめらかな円板の場合である(第 1 表 * 印参照)。 C_f は t/d の増加とともにかなり大きくなり、その増加割合は羽根車ほど大きく、羽根円板では $t/d > 0.1$ になると円板の場合の傾向に近づく、また C_f は軸方向すきま比 S/d が大きいほど大きく表われている。Rushton⁽²⁾ は $\Phi-R$ 線図 ($\Phi=\pi^3/4 \cdot C_f q$, $R=2/\pi \cdot R_e$; q は羽根車の形によって与えられる定数)を用い、すきまの比較的大きい場合 ($t/d > 0.5$, $S/d > 0.4$) について動力を算出する方法を述べているが、これによると第 6 図から推定した C_f のほぼ 2 倍の値を与える。この差は q の値のとり方と軸方向すきま比 S/d の影響によるところが大きいと思われる。

3.4 羽根角度, 羽根枚数, 羽根幅の影響 第 3

第 4 図 ボス比の影響

図の実験結果をはじめ一連の C_f - R 線図から羽根角度 θ , および羽根枚数 Z をパラメータとして C_f - θ , C_f - Z の関係を求めると第7図(a)のようになる。 C_f は Z の増加とともに漸増してある最大値(前報を参照すれば $32 < Z < 64$ の範囲で)その後減少して円筒面をもつなめらかな円板の値(3.1 節)に近づく。この C_f と Z の関係は後の第7図(b)のところで再び述べる。また C_f は θ の増加とともにはじめはほぼ直線的に増加し $\theta = 90^\circ$ で最大値となる。いま $C_{f(\theta=90^\circ)}$ を $\theta = 90^\circ$ のときの C_f の値とすれば, 角度によって変化する C_f はほぼ次式によって推定できる。

$$C_f = C_{f(\theta=90^\circ)} (\sin \theta)^{1/2} \quad \text{.....(3)}$$

ここで $\theta \neq 0$ 。

また羽根幅 b を 25.0 mm, 12.0 mm, 6.0 mm に変えて行なった結果より C_f - b/d 関係を求めると第7

第5図 C_f - S/d 関係

図(b)のようになる。 C_f は $0.02 < b/d < 0.1$ の範囲では b/d の増加とともにほぼ直線的に増加している。点線は羽根枚数 Z を無限に増した場合すなわち 3.1 節における $d_0/d=1$ の場合の円筒面をもつ円板の結果に相当するが, これも羽根車と同じく C_f は直線的に変化している。第7図(b)より

$$C_f = \frac{1}{4} \left(1 + 9 \frac{b}{d} \right) (0.9 + Z^{1/10}) \times 10^{-2} \quad \text{.....(4)}$$

の関係が得られる。(4)式は誤差 3% 以内で実験値とよく合うことが確かめられた。(2), (3), (4)式より

$$C_f = \left(1 + 9 \frac{b}{d} \right) (\sin \theta)^{1/2} (0.9 + Z^{1/10}) / 40 R_s^{1/8} \quad \text{.....(5)}$$

($S/d=0.01, t/d=0.006$)

となり, 開放羽根車の抵抗係数を比較的簡単に概算できる。

3.5 羽根車と羽根円板の比較 羽根車, 両面および片面羽根円板の結果から得られる C_f - S/d 線図において, 一定の S/d の下に C_f (C_f') と b/d (h/d) の関係を求めると第8図のようになる。 C_f' は片面の場合の実験値 C_f から滑面円板の C_f の 1/2 を差引いて 2 倍とした値, すなわち片面より両面の場合を推定した換算値であり, b は羽根車羽根幅, h は羽根円板羽根高さを示す。したがって第8図は羽根車の場合(実線)は C_f - b/d , 両面するとき(点線)は C_f - h/d ,

第 7 図 羽根数, 羽根角度, 羽根幅の影響

第 8 図 羽根車と羽根円板の比較

第 3 表 α の 値 (シュラウドの場合)

Z		4	8	16	32
別					
円筒 シュラウド	90°	0.0825	0.0856	0.0840	0.0867
	60°	0.0850	0.0867	—	0.0830
	45°	0.0800	0.0788	0.0779	0.0790
	30°	0.0699	0.0730	0.0754	0.0806
	0°	0.0520	0.0567	0.0643	—
	12 90°	0.0618	0.0660	—	—
	6 90°	0.0520	0.0552	—	—
円板 シュラウド	25 90°	0.0523	0.0550	—	0.0539
	12 90°	0.0406	0.0415	—	—
	6 90°	0.0360	0.0358	—	—

 $d=253.0 \text{ mm}, S/d=0.01$ 第 9 図 C_f-R 関係 (シュラウドの場合)

片面について(鎖線)は $C_f'-h/d$ の関係を示す。これより羽根幅 b (あるいは羽根高さ h) の大きいところでは羽根車と両面は一致し、羽根幅(高さ)の小さいところでは両面と片面の値が同じになっていることがわかる。前報⁽⁴⁾で両面の C_f と片面の C_f' が一致することを述べたがこれは羽根高さが小さい場合(前報では $h=3.0\text{ mm}$, $h/d=0.012$)についていえるが、羽根高さが大きくなると抵抗係数は片面のほうが両面より約15%大きくなる。

3.6 シュラウドの影響 前節までの開放羽根車の外周に薄い円筒状の板をはめ半径方向への流れをさえぎった場合、すなわち円筒シュラウドの結果の一つを第9図に示す。各 C_f-R_e 線はいずれも初めに述べた直線的な関係〔(3)式〕を満たしている。第3表に各場合における $S/d=0.01$ のときの α の値を示す。またこの C_f-R_e 線図より C_f-S/d , C_f-Z , $C_f-\theta$ の関係を求めるとそれぞれ第10図(a), (b)のようになる。すきま比 S/d の増加に対する C_f の増加割合は開

放の場合とほぼ同じであるが、羽根角度 $\theta > 45^\circ$ では羽根枚数 Z および羽根角度 θ によって C_f はあまり変化せず開放羽根車とかなり異なっている。また開放羽根車の上下面に薄い円板(外周はとくに薄くしてある)をつけ軸方向の流れをさえぎった円板シュラウドの結果の一つを第9図に併記した。この場合も上述と同様(3)式で示した関係をほぼ満たしている。 α の値は第3表に示してある。 C_f の値は円筒の場合に比べてかなり小さく羽根枚数 Z によってあまり変らない。また C_f の S/d に対する変化はなめらかな円筒面をもつ円板の場合とほとんど同じである。

第11図は C_f と b/d の関係を示したものである。図には比較のため開放羽根車の結果を細線、円板の結果を点線〔それぞれ第7図(b)実線および点線に相当〕で示してある。 C_f-b/d 線は、円筒シュラウドの場合は開放と、また円板シュラウドの場合は円板とそれぞれ平行な傾きを示し、上述の S/d の影響と同様な傾向を示している。

3.7 開放羽根車と羽根容器との組合せ 以上においてはすべてなめらかな内面の容器を用いた。ここでは羽根車の羽根幅 b の1/2の高さの羽根 ($h=(1/2)b$) を容器内の上下面に放射状につけ、その数を羽根車の羽根数と同じにした(第1表○印, $Z=4, 8$)。第12図(a)はその実験結果の一つである。 C_f の値はかなり大きくなるが、前報⁽⁴⁾の羽根円板の場合と同じく R_e 数に無関係でまたすきま比 S/d の増加とともにいくらか減少する傾向にある。 C_f と Z との関係を求めると第12図(b)のようになる。同図には前報の結果(円板と容器のそれぞれの片面に羽根がある場合の組合せ)が点線で示してある。この結果を3.5節に述べた

C_f' に換算して(鎖線)羽根車の場合(実線)と比べてみると、羽根幅 b (あるいは高さ h) の小さいところではこの両者はほぼ一致して、容器内面に羽根がある場合でも第8図において述べた結果と同じになる。

Rushton らは以上のような羽根を容器内の円筒面に軸方向につけ、すきまの比較的大きいところで実験し $\phi'=(\pi^2/4)C_f$ は $R=(2/\pi)R_e$ (3.3節参照, この場合は $q=1$) に関係なく一定値をとることを述べているが、この傾向は類似している。

$Re=10^6$, $b/d=0.097$
(a)

$S/d=0.015$
(b)

第10図 円筒シュラウドの影響

第 11 図 羽根幅の影響 (シュラウドの場合)

4. 結 語

密閉容器内で回転する羽根車のボス比, 羽根数, 羽根角度, 羽根幅および軸方向, 半径方向のすきまなどを変えて抵抗を測定し, あわせて前報の羽根円板の実験を補足した結果, 次のようなことがわかった。

(1) 羽根車, 羽根円板のボス比 0~0.6 では羽根の長さの影響は少ない。

(2) C_f は軸方向すきまとともに増加し, その割合は一定の羽根数のもとでは羽根角度によって変らない。

(3) 半径方向すきまを増すと, C_f はかなり増加し, この影響は軸方向すきまの大きいほど大きい。

(4) C_f は羽根数 32 の近傍で最大値をとり, 角度の影響はほぼ $C_f = C_{f(\theta=90)}(\sin \theta)^{1/2}$ で近似できる。

(5) なめらかな容器内における羽根車の C_f を示す簡単な実験式(5)を得た。

(6) 容器内面に羽根をつけると C_f はかなり大きく, そして Re 数に無関係になり, すきまの増加に対して減少する傾向にある。

(7) 羽根幅 (高さ) の大きい場合には羽根車と両面羽根円板の C_f が, また小さい場合には両面羽根円板と片面羽根円板 (換算値) とがよく一致する。

(8) 円筒, 円板両シュラウドの場合, すきまおよ

(a) C_f-Re の関係

(b) 羽根数の影響

第 12 図 容器に羽根のある場合

び羽根幅の影響はそれぞれ開放と円板の結果に類似し, いずれも羽根枚数の影響は少なくなる。

文 献

- (1) A.J. Stepanoff, *Centrifugal and Axial Flow Pumps*, (1948), 212.
- (2) J.H. Rushton & others, *Chem. Engng. Progr.*, 46-8 (1950), 395; 46-9 (1950), 467.
- (3) 渡部, 機械学会論文集, 23-129 (昭 32-5), 337.
- (4) 渡部, 機械学会論文集, 27-177 (昭 36-5), 543.
- (5) R.W. Mann & C.H. Marston, *Trans. ASME, Ser. D*, 83-4 (1961), 719.