気液混相流の鉛直ディフューザ性能*

豊倉 富太郎**, 鈴木 健一***
金元 敏明**, 柏原 俊規****

The Performances of Vertical Diffusers for Air-water Mixture Flow

by Tomitaro TOYOKURA, Kenichi SUZUKI,
Toshiaki KANEMOTO, and Toshinori KASHIWABARA

Diffuser performance for the two-phase flow of air-water mixture has been scarcely examined, though that for the mono-phase flow has been examined and the optimum profile given. The diffuser performance for the two-phase flow is affected not only by the diffuser profile, but also by the diffuser inlet velocity. Thus, this report aims to make clear these effects on the performance for an air-water mixture ratio 0-0.15, and to decide the desirable profile and inlet velocity. The performance deteriorates as the mixture ratio increases, but the optimum inlet velocity exists for each mixture ratio and diffuser profile. The best performance is obtained when the diffuser length-width ratio l/W is about 7 in spite of the mixture ratio. At $l/W=7$, the optimum divergent angle and inlet velocity are also given.

Key Words: Fluid Machine Element, Multiphase Flow, Diffuser, Draft Tube, Cross-Flow Turbine

1. 緒 言

流路の重要な構成要素の一つであるディフューザについては単相流を取扱う場合に関しすでに多くの研究がみられる⁽¹⁾。しかし、最近注目されている貫流水車⁽²⁾⁻⁽⁴⁾に設けられる吸出し管内の流れは、設計流量時においても気液混相流となり、その性能は単相流のディフューザの場合⁽¹⁾と相違するものと思われる。このことに関連し、著者の一人は円錐ディフューザを用い入口出口の面積比および入口流速を一定に保った場合について性能に及ぼす空気混入量の影響を調べた⁽⁵⁾。しかし、気液混相流の場合、ディフューザ形状とともに気泡の浮力の関係から流路内の流速も性能に影響を及ぼすが、このことに関する報告は見当たらない。

そこで本研究では、基本的な問題として、鉛直に設けられたく形断面をもつ直線壁ディフューザをとりあげ、種々な気液混相割合に対し、良好な性能を示す流路形状と流速を求めることを目的とした。

主な記号

AR : ディフューザ出入口断面積比
 C_p : 圧力回復率
 L : ディフューザ出口端から圧力取出口 A 点までの高さ { 図 1 (b) 参照 }
 Q_a : 空気流量
 Q_w : 水流量
 Re : レイノルズ数 ($=4v_0 r_m / \nu$)
 W : ディフューザ入口幅 { 図 1 (b) 参照 }
 h : 没水深さ { 図 1 (b) 参照 }
 l : ディフューザ長さ
 p_0 : A 点における圧力 { 図 1 (b) 参照 }
 p_a : 大気圧
 r_m : 水力半径
 v_0 : ディフューザ入口断面上の平均流速
 ξ : ディフューザ効率
 $= (p_a - p_0) / \rho g (L - h)$

2. 実験装置と方法

実験装置全体の概略を図 1 (a) に示す。水槽①に蓄えられた水は、ポンプ②によってく形箱⑥に移送され、管路途中に設けたオリフィス④により水流量 Q_w

* 昭和 60 年 8 月 28 日 第 933 回講演会において講演、原稿受付 昭和 60 年 2 月 15 日。

** 正員、横浜国立大学工学部(〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156)。

*** 学生員、横浜国立大学大学院。

**** 正員、高知工業高等専門学校(〒783 南国市物部乙 200)。

を測定した。同図(b)に示すように、く形箱には入口部に整流板が設けられており、水はそこで整流された後、供試ディフューザ③を通り水槽内へ流出する。ディフューザは入口端に丸味をもった形断面($W \times B = 150 \times 50$ mm)からなる平行流路(長さ45 mm)を経て広がり部へ連なっている。なお、広がり部の長さは $l = 210 \sim 1100$ mm、広がり角は $2\phi = 0^\circ \sim 35^\circ$ の範囲で変化させた。

空気の注入は図1(b)に示すように、内径4 mmの薄肉細管1~3本を用いてディフューザ入口中央断面上から行うこととし、空気流量 Q_a は層流形空気流量計で測定した。空気と水の混合割合は $Q_a/Q_w = 0 \sim 0.15$ 、ディフューザ入口部平行流路断面上の水流の平均速度は $v_0 = Q_w/A_0 = 0.77 \sim 2.1$ m/s($Re = 4v_0 r_m/\nu = 5.3 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^5$, A_0 : 入口断面積, r_m : 水力半径, ν : 動粘度)の範囲で変化させた。

実験は、まず、空気注入孔を閉じく形箱内の上部空気層を真空ポンプ⑤によって除去した後、次のような測定を行った。ディフューザ出口端から水槽内の自由表面までの高さ(没水深さ) h を一定($h = 100, 200$ mm)に保ちながら、前述の実験範囲に対し、ディフューザ

ーザ入口端から20 mm 下方の位置にあたるく形箱壁面上A点〔図1(b)〕の圧力 p_0 を求めた。

実験結果の整理に際しては、A点における速度ヘッドは小さいと思われるので省略し、またディフューザ内では混相流となっており出入口での流速測定が難しいので、ここでは貫流水車への適用も考慮し、単純に次式によりディフューザ効率を定義した。

$$\xi = (p_a - p_0)/\rho g(L - h) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 p_a は大気圧、 L はディフューザ出口端からA点までの高さを示す。したがって、 Q_a, Q_w がともに零の場合は $\xi = 1$ となる。

このように定義された ξ から求まる圧力回復率は、ディフューザ入口およびく形箱内での損失などのため、 $Q_a/Q_w = 0$ の場合でも通常用いられているディフューザの圧力回復率 $[C_p = (p_2 - p_1)/(1/2)\rho v_0^2]$ 、ただし、 p_1, p_2 は広がり部入口および出口の圧力を示し、重力の影響は考えない]より低い値となる。そこで、これらの損失ヘッドを $h_L = \xi(v_0^2/2g)$ と表すと、 ξ, ξ および C_p の関係は次のようになる。

$$C_p = 1 + \xi - (1 - \xi)(L - h)/\frac{v_0^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (2)$$

次章に示す実験結果のうち、 $Q_a/Q_w = 0, l/W = 3.4, 7.33$ (面積比 $AR = 1.3 \sim 2.1$)の場合に得られた ξ の値と、Sovranらが示した同一形状に対する C_p の値⁽¹⁾を用いて ξ を求めると $\xi \approx 0.2$ となった。

3. ディフューザ効率

3・1 空気注入位置の影響 まず、空気注入位置の影響を調べるため、図2の右上部に示すように3とおりに空気注入方法を変えて実験した。すなわち、空気注入方法a, bはそれぞれ1本の細管を用いて入口断面の中心または側壁近くから空気を注入した場合であり、cは3本の細管を用いて流路内に空気を注入した場合である。同図からわかるように、広がり角 2ϕ お

図1 実験装置

図2 ディフューザ効率に及ぼす空気注入位置の影響

よび空気注入方法によらず混合割合 Q_a/Q_w の増加につれて効率 ξ は減少し、とくに大きい広がり角で注入方法bの場合(▲印)に低下割合が著しい。これは側壁近くの速度が遅いところに空気を注入しているので、側壁に沿った広い範囲に空気層が生じ、流路の有効断面積が減少するためで、実験中にもこのことが観察された。このような傾向は円すいディフューザの場合にもみられる⁽⁵⁾。しかし、広がり角が減少し、 $2\phi=0^\circ$ の場合(△印)、流路内の流れは減速しないので空気が滞留しにくく、 Q_a/Q_w の増加による ξ の低下割合は比較的少ない。このため、 Q_a/Q_w が大きい範囲($Q_a/Q_w > 0.012$)では、流れの減速が大きい $2\phi=14.6^\circ$ の場合より高効率を得られる。また同様なことが、注入方法cについてもみられる($Q_a/Q_w > 0.09$)。

cの方法で空気を注入した場合、他の場合に比べ流路内に気泡がほぼ均一に分散して気泡核の大きさが相対的に小さくなるから、比較的良好なディフューザ性能が得られる(■, □印)。そこで、空気注入方法cの場合について以下の検討を行うこととした。

(a) $l/W = 6.47, 3.4, 2\phi = 7.3^\circ$

(b) $l/W = 3.4, 2\phi = 12.2^\circ, h = 100, 200 \text{ mm}$

図3 ディフューザ効率に及ぼす入口流速とディフューザ形状の影響

3.2 入口流速とディフューザ形状の影響 各混合割合 Q_a/Q_w について、入口平均流速 u_0 とディフューザ効率 ξ との関係の一例を図3に示す。 $2\phi, l/W$ および h によらず、前述のように Q_a/Q_w の増加につれて効率は低下するが、それぞれの Q_a/Q_w に対し最高効率 $\xi_{\max}$ を与える入口流速 u_{0m} が存在する(図中一点鎖線、以降この線を最高効率曲線と呼ぶ)。これは、流速が遅いと各気泡が結合し大きな空気層となって流路内に滞留し、一方速いと流路内の混合損失や排棄損失が増加するためと考えられる。また、混合割合 Q_a/Q_w が大きいほど気泡の結合作用が著しいから、 Q_a/Q_w の増加につれて u_{0m} は大きくなる。

単相流の場合に一般的に良好といわれている広がり角⁽¹⁾に近い場合について、2とおりの l/W に対するディフューザ効率 ξ を図3(a)に示す。同一広がり角では、 l/W が大きいとディフューザ効果も大きいから、 $Q_a/Q_w = 0$ の場合、 u_0 の増加による ξ の低下は少なく、空気が混入しても u_0 の大きい範囲では同様な傾向をもつ。また、 u_0 が小さい場合も、 l が大きいため水滴の自由落下に類似したフローパターンとなり、気泡が排出されやすくなるものと思われ、 ξ の低下割

(a) $l/W = 7.33$

(b) $l/W = 2.4$

図4 最高効率曲線に及ぼすディフューザ形状の影響

合は少ない。したがって、効率曲線はフラットに近く、最高効率も大きな値となる（同図実線）。なお、この傾向は、広がり角によらず同様である。

一方、同一ディフューザ長さの場合、図 3 (a) の破線、(b) の実線からわかるように、効率曲線は高速側で広がり角 2ϕ の影響をうける。しかし、低速側では 2ϕ によらずほぼ同様となる。後者は、 2ϕ が大きいほどディフューザ効果が大きくなるものの、流路内後半の速度が遅くなるので、気泡が流路内に滞留しやすいためと思われる。

効率 ξ は、ディフューザ出口端の没水深さ h の相違によっても当然異なるので、その影響を調べた。〔図 3 (b)〕。 h が大きくなると気泡が排出されにくくなるので ξ は低下し、その低下量は Q_a/Q_w が大きい場合に著しい。しかし h によらず、 v_0 に対する各 Q_a/Q_w の ξ 曲線の形状はほぼ同様であり、また、各 Q_a/Q_w における v_{0m} もほぼ一致する。

3.3 最高効率曲線に及ぼすディフューザ形状の影響 前項で求めた最高効率曲線はディフューザ形状によって相違するから、その影響を調べ図 4 (a), (b) に示す。なお同図には Q_a/Q_w の値も示してある（破線）。一般に、広がり角の増大と Q_a/Q_w の増加によってディフューザ後半部で気泡が滞留しやすくなり、最高効率曲線は高速側へ移行する。同一 Q_a/Q_w でみると、 l/W が大きいほど v_{0m} に及ぼす広がり角 2ϕ の影響は著しいが、 ξ_{max} に及ぼす 2ϕ の影響は少

図 5 最高効率を与える最適入口流速と最適広がり角

(a) $Q_a/Q_w=0$, $v_0=2.0, 1.3$ m/s

(b) $Q_a/Q_w=0.05, 0.1$, $v_0=2.0$ m/s

(c) $Q_a/Q_w=0.05, 0.1$, $v_0=1.3$ m/s

(d) $Q_a/Q_w=0.05$

図 6 等効率曲線

ない〔図4(a)〕。一方、 l/W が小さいと v_{0m} は 2ϕ によりさほど影響されないが、 $\xi_{\max}$ への 2ϕ の影響は著しくなる〔図4(b)〕。

4. 好適なディフューザ形状の選定

前章で明らかのように、種々な Q_a/Q_w および種々な l/W のディフューザに対し、最高効率 ξ_{opt} を与える最適入口流速 $v_{0\text{opt}}$ 、最適広がり角 $2\phi_{\text{opt}}$ が存在する。これらの関係をまとめて図5に示す。混合割合 Q_a/Q_w によらず $l/W=7$ 付近で最高性能が得られる。例えば $Q_a/Q_w=0.05$ の場合、 $\xi_{\text{opt}}=0.79$ となり、そのときの最適入口流速は $v_{0\text{opt}}=1.6$ m/s、最適広がり角は $2\phi_{\text{opt}}=9.5^\circ$ となる。したがって、混合割合 Q_a/Q_w があらかじめわかっておれば、同図から好適なディフューザ形状を求めることができる。つまり、ディフューザ入口幅を $W=l/7$ から決定し、次にディフューザ入口断面の流速が $v_{0\text{opt}}$ となるように水流量 Q_w と W から奥行き B (図1参照)を求めればよい。

5. ディフューザの性能予測

前章の方法では最適値が決定できるのみで、多少設計条件がはずれたときの性能推定ができない。そこで、図6に等効率曲線群を示した。なお AR はディフューザ出入口断面積比($=1+2l/W \tan \phi$)を示す。同図(a)は空気が混入しない場合について $v_0=2.0$ m/sおよび 1.3 m/sの条件に対するもの、同図(b), (c)は $v_0=2.0$ m/sおよび 1.3 m/sに対し Q_a/Q_w を2種類変化させて示したものである。また、一点鎖線 $\xi_{0.05}^*$ および $\xi_{0.1}^*$ は、それぞれ $Q_a/Q_w=0.05$ および 0.1 の場合について、 l/W が与えられたとき最高の効率が得られる面積比 AR を与える線を示す。さらに、 $Q_a/Q_w=0.05$ について v_0 が異なる場合の $\xi_{0.05}^*$ を同図(d)に示した。同図には、 l/W が与えられた場合の最適な AR と v_0 を示す破線(ξ^{**})と、流速が与えられた場合の最適な l/W と AR を与える一点鎖線も示してある。したがって、両者の交点は前章で求めた条

件と一致する。

6. 結 言

種々な気液混合割合の場合について鉛直ディフューザの性能を調べ、良好な性能を示すディフューザの形状および入口流速を明らかにした。得られたおもな結果は次のとおりである。

(1) 同一広がり角の場合、 Q_a/Q_w によらず l/W が大きいとディフューザ効率 ξ に及ぼす入口流速 v_0 の影響は少なく、効率も大きな値をとる。一方、同一長さの場合、 ξ は高速側で広がり角 2ϕ による影響を受けるが、低速側では 2ϕ によらずほぼ同様である。

(2) 各ディフューザ形状および Q_a/Q_w に対し、最高効率 $\xi_{\max}$ を与える入口流速 v_{0m} が存在する。一般に広がり角および Q_a/Q_w の増大につれて v_{0m} は大きくなる。同一 Q_a/Q_w でみると、 l/W が大きいほど v_{0m} に及ぼす広がり角 2ϕ の影響が著しいが、 $\xi_{\max}$ に及ぼす影響は少ない。一方、 l/W が小さいと、 v_{0m} は 2ϕ にさほど影響されないが、 $\xi_{\max}$ への 2ϕ の影響が著しくなる。

(3) ディフューザ効率は出口端の没水深さ h にも影響され、 h を大きくすると効率は低下する。しかし、同一 Q_a/Q_w の場合、速度に対する効率曲線の形状はほぼ同様であり、各 Q_a/Q_w における v_{0m} は h によらずほぼ一致する。

(4) 各 l/W に対し、最適効率を与える最適広がり角を求め、そのときの最適入口流速を示した。そして Q_a/Q_w にかかわらず $l/W=7$ 付近で最もよい効率が得られることを明らかにした。

文 献

- (1) 例えば、Sovran, G. and Klomp, E. D., Fluid Mechanics of Internal Flow, (1967), 270, Elsevier.
- (2) Scheer, W., VDI Ber., 424 (1981), 203.
- (3) 豊倉・ほか3名, 機論, 51-461.B (昭60), 143.
- (4) 山部・伊藤, 機講論, No. 847-2 (昭59-11), 281.
- (5) 柏原, 機講論, No. 830-12 (昭58-10), 272.