

極低落差軸流水車用新変形S形 ドラフトチューブ(吸出し管)の開発研究*

清水 幸丸*¹, 石田 博幸*²
二木 善希*³, 久保田 喬*⁴

Development of New-Type S Draft Tube for Low-Head Axial-Flow Water Turbine

Yukimaru SHIMIZU, Hiroyuki ISHIDA,
Yoshiki FUTAKI and Takashi KUBOTA

An S-type tubular turbine is used for a low-head hydraulic turbine. The S-type draft tube plays an important role in the S-type tubular turbine. The S draft tube has two bend portions, first and second bends. Separation occurs here. The pressure recovery becomes low because of the separation. The paper proposes a new-type S draft tube which has the highest pressure recovery coefficient. One of the characteristics of the new draft tube is a twisted portion in the middle of the S draft tube. Asymmetrical secondary flow is generated in the twisted portion of the new S draft tube. The pressure recovery coefficient C_{p0} is largely improved because such asymmetrical secondary flow prevents the separation on the bend portion of the S draft tube. Such phenomena are assured by measuring the velocity distribution in the draft tube.

Key Words: Hydraulic Machinery, Low-Head Axial Water Turbine, S-type Tubular Turbine, Draft Tube, S-Type Draft Tube, New-Type S Draft Tube, Pressure Recovery Coefficient

1. 結 言

最近、極低落差水力エネルギーの利用が活発になり、S形チューブラ水車が多数使用されるようになってきている。この種チューブラ水車ではドラフトチューブ(吸出し管)におけるエネルギー回収が重要な役割を演ずる。著者らは第1報⁽¹⁾において、S形ドラフトチューブの圧力回復性能と内部流れの関係について報告した。また、第2報⁽²⁾、第3報⁽³⁾では、境界層制御によるS形ドラフトチューブの圧力回復性能の改善をおこなった。

本第4報では、最も高い圧力回復性能が望めるS形ドラフトチューブを提案し、実験的に検討した。その方法は次のようである。(1)従来の平面的にS字形に曲げられたドラフトチューブに若干空間的なひねりを加え、このねじり状の曲げによって一方向旋回流を発生させる。(2)このねじり部分で発生した一方向旋回流によって、ドラフトチューブ内のはく離発生を押さ

える。この方法⁽⁴⁾⁽⁵⁾によって、極めて高い圧力回復性能を持つ変形S形ドラフトチューブの開発に成功した。また、本報告では、このドラフトチューブ内の速度分布を明らかにした。また、水車ランナのある場合とない場合の圧力回復性能の違いを検討した。

2. 記号および式の定義

AR : 環状入口断面に対する各断面の面積比

$$= A_n / \pi(r_{w1}^2 - r_b^2)$$

A_n : 断面 n の面積

C_{p0} : 一次元圧力回復性能

$$= (P_T - P_{w1}) / (\rho/2) V_{m1}^2 \dots\dots\dots (1)$$

M_1 : 入口断面における旋回流強さ、

$$= \int_0^{2\pi} \int_{r_b}^{r_{w1}} v_{z1} v_{\theta1} dr d\theta r_{w1} / \pi(r_{w1}^2 - r_b^2) v_{m1}^2 \dots\dots\dots (2)$$

M_3 : 第2断面における旋回流強さ(図1参照)

P_{w1} : ドラフトチューブ入口断面における壁圧

P_T : ドラフトチューブ出口断面の平均圧力

Q : オリフィス流量計から求められた流量

r および r_{w1} : 半径位置および入口断面半径

r_b : ボス半径 (=11.6 mm)

V_{zn} および $V_{\theta n}$: 第 n 断面における軸速度および周速

* 厚稿受付 平成2年8月13日。

*¹ 正員、三重大学工学部 (〒514 津市上浜町)。

*² 学生員、三重大学大学院〔現在 鈴鹿富士ゼロックス(株)〕。

*³ 准員、ヤマハ発動機(株) (〒431-03 静岡県浜名郡新居町向島 3380-67)。

*⁴ 正員、富士電機(株) (〒210 川崎市川崎区田辺新田1-1)。

度

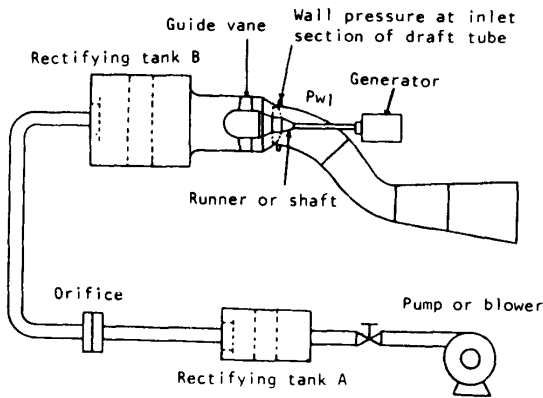
θ : 断面内の角度位置

ρ : 空気あるいは水の密度

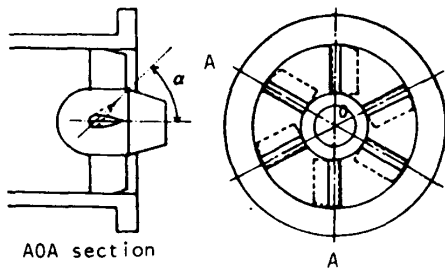
3. 実験装置および方法

図1には実験装置を示す。実験では水および空気が使用された。両者のデータはよく一致する。ポンプでくみ上げられた水は、整流タンク、オリフィス流量計、第2整流タンク、ガイドベーン(旋回流発生装置)を経てドラフトチューブに流入する。ドラフトチューブ入口には、ランナーを取付ける場合と取付けない場合が

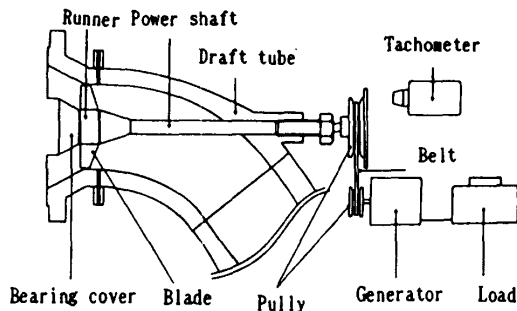
ある。ガイドベーンはドラフトチューブ流入旋回量を調節するために使用される。供試ドラフトチューブの入口壁圧 P_{w1} は、ランナ出口直後で測定された。壁圧の平均値を決定するために、外周に4個の測定孔が設けられた。図1(c)は小さなランナを持つ実験装置を示す。ランナ負荷にはミニチュア発電機が使用された。ランナは図1(c)に示す。ランナ形状は高性能化のための特別な配慮はしていない。図2には、今回特別に設計した高性能新変形S形ドラフトチューブを示す。このドラフトチューブは中間部分にひねりが与えられている。図2(b)にはこの新変形S形と従来形S形ドラフトチューブの外形写真を示す。新形ドラフトチューブの寸法は表1に示す。従来形の寸法は文献(1)に示してあるので、ここでは省略する。ドラフトチューブ内の速度分布を測定するために、直径3mmφの三孔円筒形ピトー管が使用された。実験は、レイノルズ数が 1.5×10^5 で行われた。レイノルズ数は水、空気両



(a) 実験装置の概略

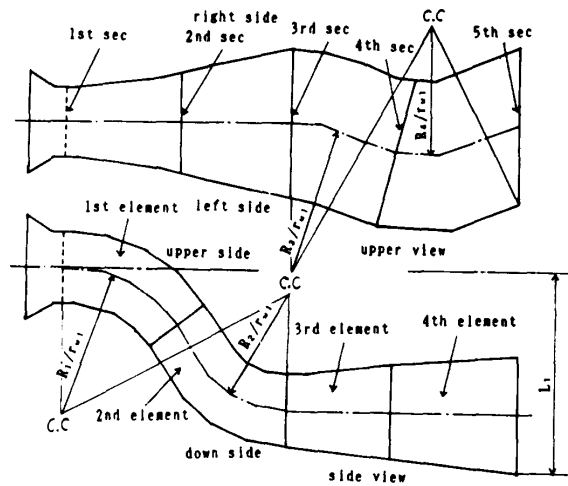


(b) 入口案内羽根

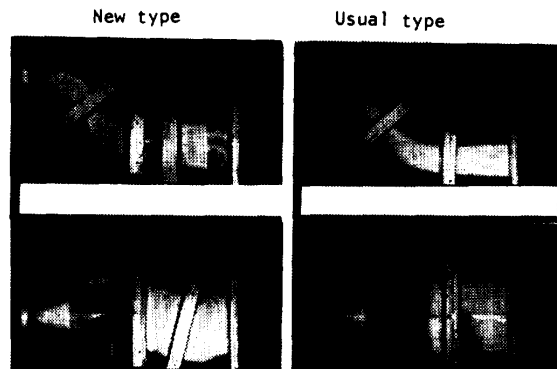


(c) 実験に使用したランナおよびミニ発電負荷

図1



(a) 供試新変形S形ドラフトチューブ



(b) 新変形S形(左)と従来形S形(右)ドラフトチューブの比較

図2

者共ほぼ同一である。

4. 実験結果と考察

4.1 高性能新変形S形ドラフトチューブの圧力回復係数 C_{p0} 図3には■印で新変形S形ドラフトチューブ、▲印で従来形の高性能ドラフトチューブ Type I' および●印で特別な場合のみ用いられる性能のあまりよくない、急激に曲げられたS形ドラフトチューブ type IVの圧力回復係数 C_{p0} を示す。縦軸は C_{p0} 、横軸にはドラフトチューブに流入する流れの旋回強度 M_1' を示す。この場合、ドラフトチューブ入口にランナは設置されていない。新変形S形ドラフトチューブはドラフトチューブの中間で空間的にねじられているため、左右非対称に製作されている。これに対して、従来形の Type I' および Type IVは二次元的にS字状に曲げられているだけなので、左右対称形になる。図3の結果より、新変形S形ドラフトチューブの圧力回復係数は、流入旋回 M_1' が正の範囲では従来形の Type I' および Type IVより相当大きくなり、最大値は $C_{p0}=0.97$ に達する。しかし、形状が左右非対称なので M_1' が負の領域では両形状の C_{p0} にあまり差はなくなる。この理由は、4.2節の速度分布の測定結果からも説明できる。ここで、流入旋回 M_1' が正の方向(下流から見て時計回り方向)は変形ドラフトチューブのねじり方向と同一で、このねじりによって新しく生じる旋回流の回転方向とも一致することになる。

図4には、ドラフトチューブ入口にランナが設置された場合の圧力回復係数 C_{p0} を示す。横軸にはランナ回転数が示されている。この実験では、空気が使用された。レイノルズ数が水と同一に取られているため、空気流速は速く、約40 m/sになる。さらに、ランナ直径も小さいため、ランナ回転数は相当大きく、2,000

rpm から 8 000 rpm の範囲で実験が行われた。この実験でもガイドベーン角度は変化された。変形S形ドラフトチューブの圧力回復係数 C_{p0} は最適ガイドベーン角度 $\alpha=45^\circ$ (▼印)で約1.0という高い値に達する。この値はすべてのS形ドラフトチューブの圧力回復係数のうちで最大である。 C_{p0} に対するランナ回転数の影響は次のようになる。ガイドベーン角度 $\alpha=45^\circ$ の場合、 C_{p0} に対する回転数の影響は少ない。しかし、回転数がいずれの場合もガイドベーン角度 α が減少する場合、 C_{p0} は減少する。また、回転数が増大すると、 C_{p0} は若干減少傾向を示す。図4(b)および図4(c)

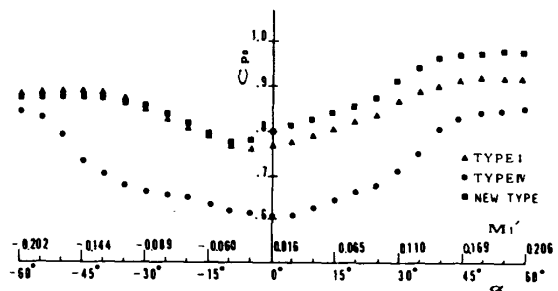


図3 ランナがない場合、供試S形ドラフトチューブの圧力回復係数 C_{p0} の比較

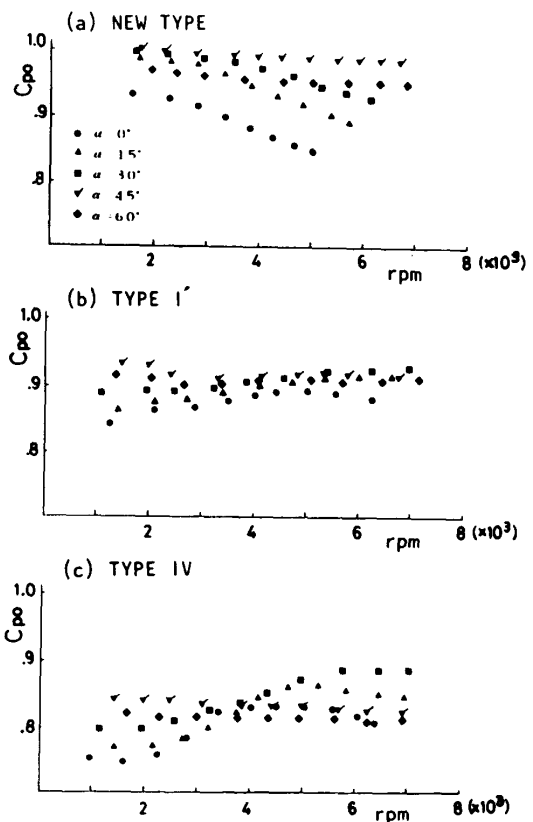


図4 ランナを取付けた場合、供試S形ドラフトチューブの圧力回復係数 C_{p0} の比較

表1 新変形S形ドラフトチューブの諸元

Number of section	2nd sec	3rd sec	4th sec	5th sec
length of center line	$L/r_{n1}=3.6$	8.0	11.0	14.8
Area ratio	$AR1=1.73$	2.87	3.76	5.00
Area ratio (with Boss)	$AR2=2.15$	3.55	4.65	6.17

表2 供試S形ドラフトチューブの曲率の比較

	R_1/r_{n1}	R_2/r_{n1}	R_3/r_{n1}	R_4/r_{n1}
TYPE I'	4	6	-	-
TYPE IV	2	6	-	-
NEW TYPE	4	3	4	3.5

は、Type I' および Type IVドラフトチューブの結果を示す。Type I' および Type IVの C_{p0} は、いずれの回転数でも新変形S形の C_{p0} より小さくなる。また、Type I' の C_{p0} は回転数が変わっても変化せず、また、 $\alpha=45^\circ$ で最大になる。しかし、Type IVの C_{p0} に対して回転数とガイドベーン角の影響は大きい。例えば $\alpha=30^\circ$ (■印)の C_{p0} は回転数の影響を強く受ける。 C_{p0} は回転数が増大すると大きくなる。この理由も、また、4・2節で説明される。また、図4(a)および図4(c)の C_{p0} はガイドベーン角度 α の影響の大きさを示す。 C_{p0} は α で大きく変化する。

4・2 新変形S形ドラフトチューブ内の速度分布

図5は、ドラフトチューブ入口断面における軸速度分布(左側)および周速度分布(右側)を示す。この断面はガイドベーン直後に相当し、ランナは設置されていない。入口旋回強度 M_i は零から0.206までかえられた。最大周速度は軸速度 V_{m1} の約0.5倍に達する。

図6(a)には、新変形S形ドラフトチューブ内の速度分布を示す。左側は $M_i=0(\alpha=0^\circ)$ の場合、右側は $M_i=0.169(\alpha=45^\circ)$ の場合の速度分布を示す。図6(a)の $M_i=0$ の場合、第2および第3断面の曲がり内側壁面において弱いはく離が発生する。Type I' あるいはType IVドラフトチューブではこのはく離は大きくなるが、変形S形ドラフトチューブではこのはく離は弱くなるか、または発生しなくなる。このため、変形S形の C_{p0} は他のType I' およびType IVドラフトチューブに比べ、大きく、良好になる。変形S形ではく離が小さく押えられる理由は次のように推定される。変形ドラフトチューブは中間の、3~4断面間にひねりが与えられているため、上流側、第1曲がりて生じた左右対称二次流れがこのひねり曲がりの部分を通る間に一方方向旋回流に変化し、はく離発生の条件が解消し、はく離が発生しなくなる。右図の図6(b)は入口旋回 $M_i=0.169$ の場合の速度分布を示す。この旋回は比較的強い。 $M_i=0$ の場合、第2および第3断面で見られたはく離は、この強い一方方向旋回流によって押えられてしまう。さらに、特徴のある流れ

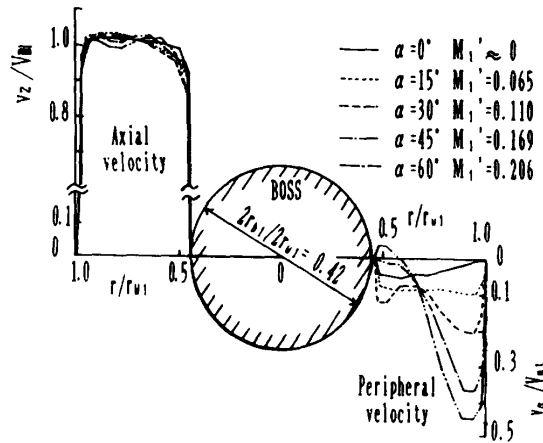


図5 ランナなしの場合、案内羽根直後の軸速度(左側)および周速度(右側)分布、案内羽根角度変化

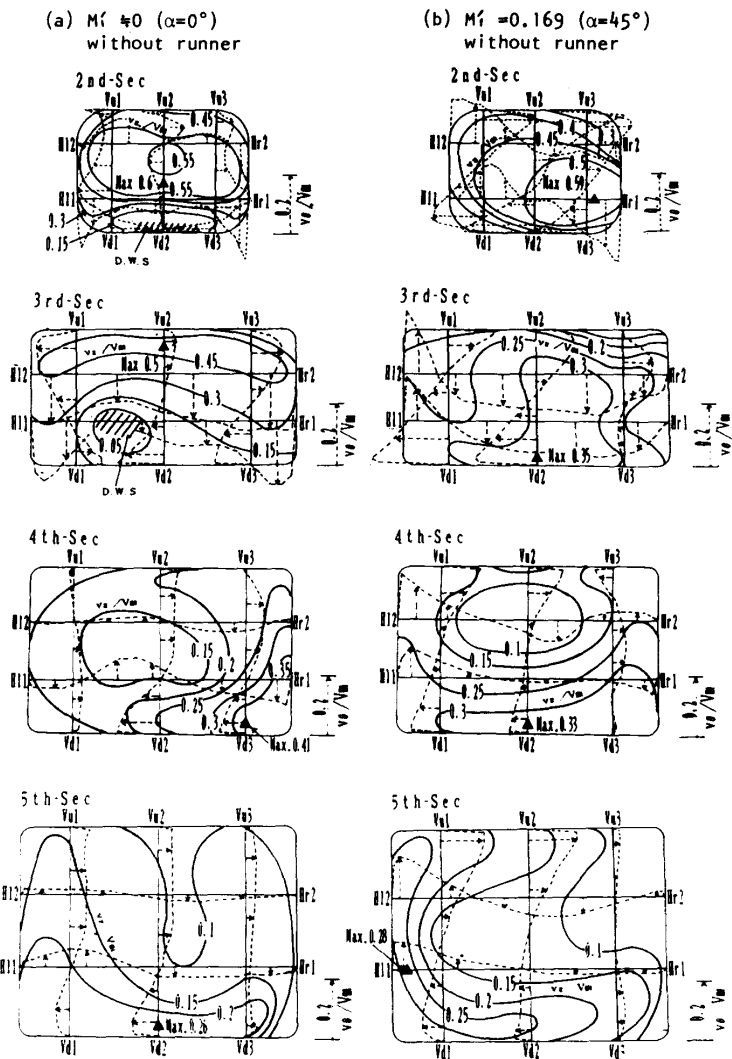


図6 ランナなしの場合、新変形S形ドラフトチューブ内の速度分布、左側入口旋回なし $M_i=0$ 、右側入口旋回 $M_i=0.169$

が生じる。この強い一方向旋回流も、第4、第5断面まで流下する過程で複雑に変化し、左右非対称な二つ以上の二次旋回うずに変化する。すなわち、直管内の一方向旋回流と異なり、変形S字形曲がり管内では入口部分で一方向旋回が強くて、下流では曲がりの途中で加えられたひねり曲がりのため、都合よく複数の二次旋回成分も含んだ複雑な旋回流に変わる。この都合のよいかくはん効果によって排出運動エネルギーが減少し、ドラフトチューブの圧力回復性能がいちだんと向上する。この複雑な二次流れ発生過程は次に示す図7によってさらに詳しく説明される。

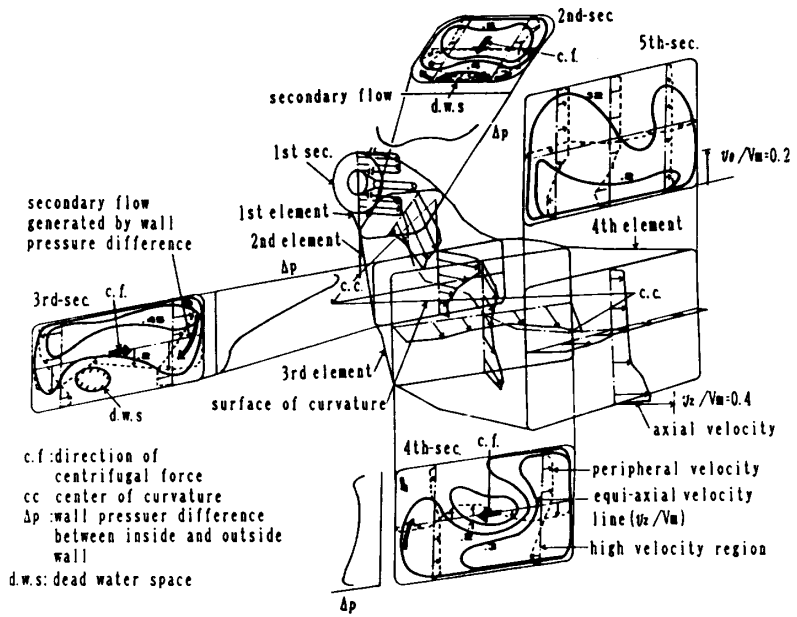


図7 ランナなしの場合、新変形S形ドラフトチューブ内の流れ模型、入口旋回 $M_i \neq 0$

図7には $M_i = 0$ 、入口旋回がない場合の変形S形ドラフトチューブ内の流れ模型を示す。図7中太線矢印 c. f. は第2、第3、第4断面における遠心力の作用方向を示す。遠心力の作用方向は、変形S形では、S方向およびそれに直角方向の4方向に変化する(図2参照)。それぞれの遠心力は、曲がりの内外壁間に壁圧差分布(ΔP 分布)を生じさせる。ドラフトチューブの壁周囲壁圧差 ΔP 分布は複雑に変化する。壁周囲の境界層内の流体は高い圧力部分から低い圧力部分へ押しやられる。壁周囲の複雑な圧力分布に基づく流体の移動によって、壁周辺では複雑な二次うずが形成される。図7中壁近くの中太矢印は二次うずの方向と強さを示す。第2断面の ΔP 分布は、曲がりの中心面に対してほぼ対称になる。しかし、第3および第4断面上の ΔP 分布は非対称になり、その結果、断面内には複雑な複数組の二次うずが形成されることになる。

図は省略するが、入口旋回がある場合、すなわち、 $M_i \neq 0$ の場合、上流側では、図7の流れに、一方向旋回流を重ね合わせた状態になる。しかし、下流になると、 ΔP 分布が異なり、一方向旋回流が上流側の二次流れによって相当変形するため、単純な重ね合わせの流れとは異なった流れになる。入口流れが $M_i \neq 0$ で、ある程度の旋回強さを持つ場合、図7の第2断面で見られたはく離は消滅する。その結果、下流の第3、第4断面でもはく離は生じずドラフトチューブの圧力回復性能は大幅に改善され、高い圧力回復係数を示す。

4.3 ランナが設置されている場合と設置されていない場合の圧力回復係数 C_{p0} の比較 図8にはド

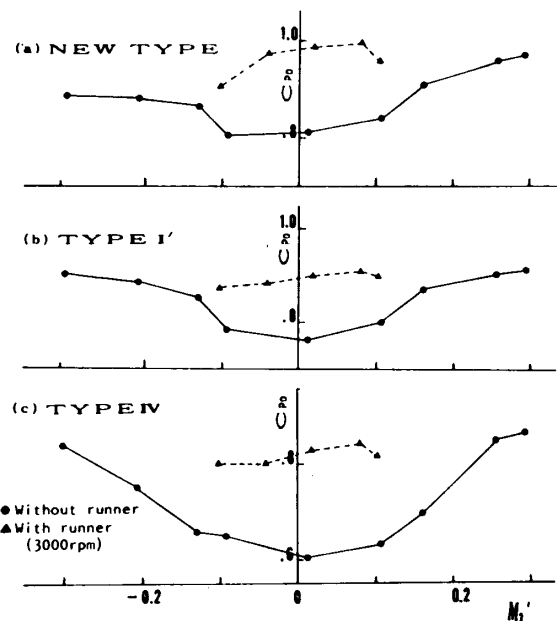


図8 ランナが設置された場合とランナなしの場合の圧力回復係数 C_{p0} の比較

ラフトチューブ入口にランナを設置した場合と設置しない場合の圧力回復係数が比較されている。図8(a)より、ランナが設置された場合の変形S形ドラフトチューブの圧力回復係数は、ランナなしの場合より大きな値を示す。すなわち、圧力回復性能はランナがある場合のほうが高くなる。図8(b)および図8(c)のType I'およびType IV形ドラフトチューブにおいても、同様に、ランナが設置されている場合のほうが

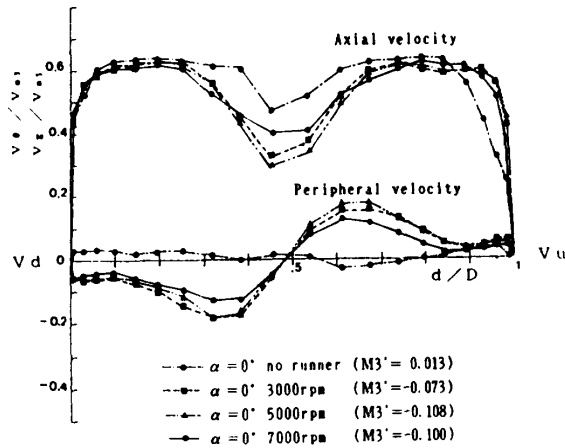


図9 ランナが設置された場合, Type I'ドラフトチューブ第2断面の速度分布

ない場合より高い値を示す。この理由は、4・4節の図9の速度分布および図10の境界層厚さ分布から説明される。

4・4 ドラフトチューブ入口にランナが設置されている場合の新変形S形ドラフトチューブ内の速度分布および境界層厚さ分布 図9は、Type I'ドラフトチューブ入口にランナが設置された場合の第2断面内の速度分布を示す。この場合、第1断面の速度分布はランナが設置されているため測定できない。速度分布は、ランナボス後流で低く、その両側部分は速く、しかも、比較的平坦になる。ランナの回転速度は、3000、5000 rpm および7000 rpm である。回転数によって、速度分布には若干差が生じる。これらの速度分布を用いて、第2断面壁面周囲の境界層厚さを求めると図10のようになる。図10には排除厚さ分布が示されている。図10の結果より、ランナが設置された場合のドラフトチューブ入口の排除厚さ(▲印)は、ランナがない場合(●印)に比べ薄くなる。図8に示されたように、圧力回復係数 C_{p0} は、入口排除厚さの薄いランナありの場合のほうが、ランナなしの場合より高い値を示す。この理由は、次のように説明される。入口排除厚さが薄い場合、ドラフトチューブ内全体の各断面の有効通路面積が大きくなり、断面積拡大率が増大し、圧力回復がその分増大する。さらに、境界層が薄いとほく離の発生が若干緩和され、ほく離損失が減少するためと考えられる。

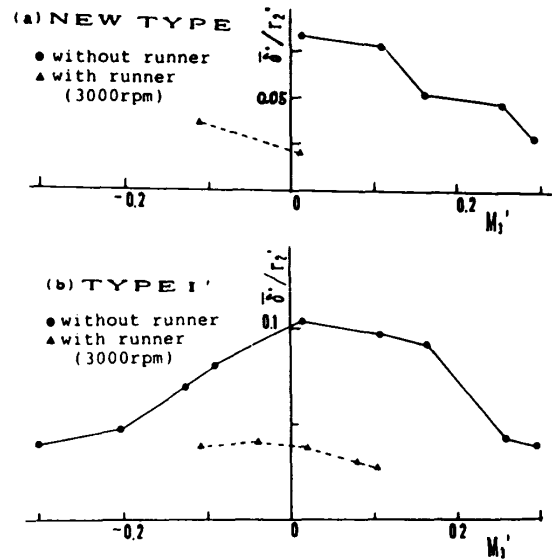


図10 ランナが設置された場合とランナなしの場合の第2断面壁面周辺平均境界層排除厚さの比較、新変形およびType I'ドラフトチューブについて

5. 結 言

以上の研究結果から次のような結論を得た。

- (1) 新しく考案設計された新変形S形ドラフトチューブは、従来の平面S形ドラフトチューブより高い圧力回復性能を示す。
- (2) 新変形S字状および平面S字状ともに、ドラフトチューブ入口にランナが設置された場合の圧力回復係数は、ランナがない場合に比べて高くなる。すなわち、ランナありのほうが圧力回復性能は良くなる。
- (3) 新変形S形ドラフトチューブ内の速度分布が詳細に測定され、従来形に比べて圧力回復性能の改善される理由が明らかにされた。

文 献

- (1) 清水・ほか3名, 機論, 52-474, B(1986), 585.
- (2) 清水・ほか3名, 機論, 53-492, B(1987), 2500.
- (3) 清水・ほか3名, 機論, 55-516, B(1989), 2331.
- (4) Shimizu, Y., ほか3名, *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, 108-3(1986), 289.
- (5) Shimizu, Y., ほか3名, *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, 108-3(1986), 293.