U.D.C. 532. 542:621. 224. 7-253 . 001. 24: 681. 322. 06

ポンプ水車ランナ内流れ解析方法 "FLANPT"とその応用 **Analysis of Flow in Pump-Turbine Runner** "FLANPT" and Its Applications

In recent years, several methods of analysis of flows along mixed flow pump runner making use of an electronic computer have been made available. The authors used one of them reported by Seno'o and Nakase in analyzing water flows caused by blades of water turbines. Analysis values obtained by this method, as compared with measured values, proved fully applicable to the evaluation of pump performance.

和田靱彦*	Yukihiko Wada
山口幸男*	Yukio Yamaguchi
横井信安*	Nobuyasu Yokoi
田辺誠一**	Seiichi Tanabe

1 緒 言

混流ポンプ水車の設計に際して,近年特に開発期間の短縮 および信頼性の向上が要求されてきている。そのためには, 混流ポンプ水車内の流れの状況を迅速かつ正確に知ることが 必要となった。一方, ポンプランナ内の流れの解析は最近の 大形電子計算機の発達によって著しく進歩し, 複雑な形状を 持ったランナ内の流れを計算することも可能となった。特に, 昭和35年ごろからNASA(アメリカ航空宇宙局)を中心に実用 的な計算法が精力的に開発され、これに刺激されて国内でも 同様の試みが行なわれた。九州大学の妹尾・中瀬両氏によっ て開発された方法^{(1),(2)}は現在発表されている実用的な理論の 中ではポンプ水車のランナの計算に対して最も適したもので あると思われる。日立製作所では、この妹尾・中瀬両氏によ って発表された理論を基礎として、ポンプ水車のランナ内の 流れを計算するプログラム"FLANPT"をこのほど完成した。 さらにこの"FLANPT"を用いてポンプおよび水車の流れ計 算を行ない、実験値とも比較した結果、性能を解明するうえ で十分有効であることを明らかにした。以下、その概要につ いて報告する。

面計算と第二段階の羽根間計算とを結合するに際して, 子午 面流れの流れ角Bmは、羽根間の流れ角の平均値に等しいとい う仮定を導入し三次元流れの運動方程式を簡単化している。 2.1 子午面理論

2 理論の概要

本報告で述べる理論は前述のように妹尾、中瀬両氏の論文 によるものであるが,本理論の詳細については文献に紹介さ れているので本稿ではその概要を述べるにとどめる。まず流 れはポテンシャル流れであることが仮定される。また、ラン ナ内の流れを純三次元的に解くのは困難であるので、計算を 二つの段階に分けて考える。第一はランナの子午面内の解析 であって運動方程式をクラウン~シュラウドを結ぶ任意の曲 線(準法線)に沿って数値的に積分する。ここでは羽根間の流 れは平均化されており,子午面内の流線や羽根間方向に平均 された速度, 圧力が決定される。第二は羽根間流れの計算で ある。流体は第一の段階で決定された子午面内の流線を回転 軸の回りに回転してできる回転流面上を流れるものとして流

クラウンからシュラウドへの任意曲線q'の子午面への投影 e_q とする。羽根車の回転軸を zとし、羽根車とともに回転 する相対円柱座標系 (r, θ, z) を用いる。相対速度は定常 であるからr, θ , z方向の相対速度成分をWr, $W\theta$, Wzとす ればオイラーの運動方程式は次のようになる。

本式を準法線 q に関係づけ整理すると次式をうる。

$$\frac{dW}{dq} = AW + B + \frac{C}{W} \cdots (4)$$

$$A = \left(\frac{\cos^{2}\beta m \cos \alpha}{r_{c}} - \frac{\sin^{2}\beta m}{r}\right) \frac{dr}{dq} - \left(\frac{\cos^{2}\beta m \sin \alpha}{r_{c}}\right)$$

$$\frac{dz}{dq} + (\sin\alpha\cos\beta m \sin\beta m) \frac{d\theta}{dq} \cdots (5)$$

$$B = \left(\sin\alpha\cos\beta m \frac{dWm}{dm} - 2\omega\sin\beta m\right) \frac{dr}{dq} + \left(\cos\alpha\cos\beta m \frac{dWm}{dm}\right) \frac{dz}{dq} + r\cos\beta m \left(\frac{dW_{\theta}}{dm} + 2\omega\sin\alpha\right) \frac{d\theta}{dq} \cdot (6)$$

$$C = \frac{dHi}{dq} - \omega \frac{d\lambda}{dq} \cdots (7)$$

面上の流れを解析する。この流れは二次元であるが一つの仮 定を設ける。すなわち,回転流面上の絶対流れは非回転であ るとしこの条件式を数値的に解いて羽根間の流線や速度分布, 圧力分布を計算する。実際の計算では、この第一段階の子午

ここに、 $W:(r, \theta, z)$ 面における相対速度 βm : (r, θ, z) 面において、相対速度とそのメリ ディアン方向成分とがなす角の羽根間の平 均角

**日立製作所日立研究所 *日立製作所日立工場

ポンプ水車ランナ内流れ解析方法"FLANPT"とその応用 日立評論 VOL.55 No.5 448



図 | 子午面 ランナを、回転軸を含む平面で切った際に現われる断面である。

Fig. I Meridional Plane



図2 回転流面 子午面流線を回転軸のまわりに回転すれば、この回転 流面が得られる。

Fig. 2 Stream Surface of Revolution

α:子午面内において、メリディアン流線と z 軸とが なす角

rc:子午面におけるメリディアン流線の曲率半径

m:メリディアン流線に沿って測った長さ

Wm:Wのメリディアン流線方向成分

Hi: 羽根入口での流体の全圧

λ:予旋回

(本記号については図1および図2を参照)

本式が子午面上での任意曲線 qの方向の力の平衡方程式で ある。この(4)式によって、ある流線上の相対速度Wがわかれ ばdqだけ離れた隣りの流線上の相対速度はこれを積分して直 ちに求まる。この際、クラウン側から積分を始めれば、クラ ウン上の相対速度Wを適当な初期値に仮定しなければならな い。子午面計算では、力の平衡式((4)式)と連続の式を同時に 満足しなければならない。そのためには各準法線を通過する 流量が規定流量 Q_0 と等しくなるようにする。すなわち、各準 法線について図1、図2より、

$$Q_0 = N \int_{q \text{ crown}}^{q \text{ shrowd}} W \cos\beta m \cos\left(\psi - \alpha\right) \left(\frac{2\pi r}{N} - t_0\right) dq \cdots (8)$$

ここに、 ψ :準法線の法線とz軸とがなす角

N:羽根枚数

to:周方向の羽根厚さ

2.2 羽根間流れ⁽²⁾

8

羽根車とともに回転する相対円柱座標系 (r, θ, z) を用い, 子午面内の流線の方向をmとする。この座標系における絶対 渦(うず)なし流れの条件式および連続の式に流れ関数を導入 して結合しさらに二次元の (R, \oplus) 平面(プラッシル面)に写 像する。その際流面の厚さbは羽根入口から出口までhp=

これは絶対流れが渦なしであるという条件を満たすために 相対流れに生じさせるべき渦の成分(第1項)と予旋回による 成分(第2項)および連続の式を満足させるために導入された 項(第3項)より成り、次式で与えられる。

これは羽根のそりの影響による速度の変化分であって、これを 求めるにはまず羽根のそり線上に次式により渦 μ を分布させる。 $\mu(\varphi) = [A_0(1 + \cos \varphi) + \sum_{n=1}^{a} An \sin n \varphi \sin \varphi] d\varphi \cdots (14)$ ここに、 $\varphi = \frac{(Re+Ri)-2R}{Re-Ri} \cdots (15)$

であって羽根の入口から出口まで φ は $0 \sim \pi \sim 2$ 変化する。 また、添字 e は羽根出口を、添字 i は羽根入口を表わす。 係数 $A_0 \sim An$ は流れが羽根面に沿って流れるという条件より求 まる。(10)~(12)式を用いればWm、 W_{θ} 、すなわち羽根間の速度 分布が求まる。また流れ角の羽根間方向の平均角 βm を計算 し子午面計算に用いる。

constなる条件式を満たすものとすれば次式をうる。



図3はこのプログラム"FLANPT"のフローチャートを示すものである。
3 計算結果
3.1 揚 程
図4はフランシス形ポンプ水車のポンプ運転時における揚程の実測値と計算値との比較を示したものである。実測値は

ポンプ水車ランナ内流れ解析方法"FLANPT"とその応用 日立評論 VOL. 55 No. 5 449



ランナを始めケーシング、案内羽根およびドラフトチューブ の損失を含むので、ポテンシャル流れによる計算値より多少 低めになるべきであるが、本図によればその傾向が明らかに 認められる。計算は*Nsp*=25~90(m-m³/s)のランナについて 行なったが、広範囲のランナについて実測値と一致しており、 本計算の妥当性を示している。しかし、各点各点をみると多 少のばらつきがあることがわかる。これは各羽根車の幾何形 状、運転状態の差およびそれらの入力データの精度によるも のと思われる。

3.2 流量一揚程特性

図5はNsp=30(m-m³/s)のフランシス形ポンプ水車のポン プ運転時における流量-揚程特性(Q-H特性)を実験値と計 算値とを比較して示したもので、これによると前述のように、 実験値と計算値との間には損失分だけの差異が認められる。 また計算によるQ-H曲線のこう配は実験のものとよく一致 している。しかし、低流量域では多少のずれが生じている。 このランナでは低流量域において、ポンプ入口のシュラウド 側に逆流が発生することが実験で確められており、本解析の 適用は困難な領域である。低流量の計算においてはクラウン 上の羽根間流れに逆流域が生じ収束状況が極端に悪くなる。

3.3 低流量特性

図6(a)は斜流ポンプ水車のポンプ運転時の逆流発生状況を 示すものである。この測定値より逆流域を推定して点線に示



Fig. 3 Flow Chart

す位置にクラウンとシュラウドが移動したものとしてQ-H 特性を計算したものが図6(b)である。同図にはこの"FLAN PT"による計算値とともに実験値も記入してある。このよう に,各流量における逆流域がわかればQ-H特性をかなり正 確に求めることができる。

3.4 子午面流線および羽根間流線

子午面流線の一例は図7(a)に、クラウン上における羽根間 流線の一例は図7(b)に示すとおりである。各実線は設計流量、 点線は80%流量の流線を示している。

(1) 子午面においては,流量の減少とともにクラウン上の 流速が他の部分よりもよけいに減少する傾向がある。流量が 80%に減少すれば子午面流線はクラウン側が広くなる。







図4 実験と計算による揚程の比較 計算による揚程のほうが実験によるものより多少高くなっており、この計算の妥当性を示している。
 Fig. 4 Comparison of Calculated and Experimental Head



図 5 流量と揚程の関係 実験と計算によるQ-H曲線のこう配はよく一致していることがわかる。

9

Fig. 5 Relation of Discharge and Head

ポンプ水車ランナ内流れ解析方法"FLANPT"とその応用 日立評論 VOL.55 No.5 450



| 斜流ポンプの逆流状況およびQ-H特性の計算結果 子午面内での逆流を図6(a)のように仮定し, 义 6 クラウンおよびシュラウドが一点鎖線のように移動したものとして流れ計算を行なうと図6(b)のように山と谷とが現わ れる。

Fig. 6 Reverse Flow in a Diagonal-flow Pump and Calculated Result of Q-H Characteristic





流量による流線の変化 図 7 流量が減少すると圧力側およびクラウン側の流線が広くなる。

Fig. 7 Changes of Streamlines Caused by Discharge Variation

(2) 羽根間においては、流量の減少とともに羽根の圧力側の 流速が他の部分よりもよけいに減少する傾向にある。したが って、羽根間の流線は80%流量において圧力側が図のように 広くなる。これは両者ともクラウン上の流れに起因している と思われる。詳しく調べるために、クラウン上およびシュラ ウド上において羽根のそり線上に分布させた渦分布を見ると 図8に示すようになる。本図では流量をパラメータにとって ある。これよりわかるように、クラウン上の渦分布はシュラ ウド側のものと比べてピーク点の絶対値が大きく,かつ入口 の渦強さとの比も大きい。また流量の減少とともにピーク点 の絶対値は大きくなることがわかる。このためにクラウン上 で羽根入口部付近において圧力面上の流速が極端におそくな

よる計算値を示したもので,同図には静圧の実測値も同時に プロットしてある。本図において、横軸は羽根入口から出口 までの羽根に沿った長さである。また各測定点および計算点 は中央の流線に沿った値である。本図によると実測値と計算 値とはかなりよく合っており、この計算の妥当性を示してい る。これにより羽根面上の静圧分布を計算によって正確に推 定することができるようになり、流れのはく離点を正確に知 ることも可能となった。さらに精密な圧力分布を求めるため には"FLANPT"による結果を用いて差分法による計算も行 なっている。この差分法の計算の基礎式は絶対渦なし流れお よび連続の式であり、この両式に流れ関数 φを導入し整理す れば次式をうる。

り、場合によっては逆流傾向になることもある。すなわち、ク ラウン上での流速がおそくなり、子午面流線および羽根間流 線はそれぞれ図7(a)および同(b)の点線のような傾向となる。 3.5 速度分布および圧力分布 図9(a)はフランシス形ポンプ水車のポンプ運転時における 静圧分布を、同(b)は水車運転時の静圧分布の"FLANPT"に

10





低流量域におけるクラウン上の逆流発生 流量が減少する 図 8 と渦の強弱が激しくなり、圧力側の流れに逆流を生ずる。

Fig. 8 Occurrence of Reverse Flow on the Crown at Rare Discharge Region

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = -\frac{b\rho}{W_G} r W m \cdots (18)$$

ここに、WG:羽根間を流れる質量流量

羽根間の流路を図10(a)に示すように網目状に分割し,(16)式 を差分方程式に変換したものを逐次過緩和法によって解く。 その際,境界条件として入口および出口での流れの状態を入 力する必要があるが、それは"FLANPT"の計算の結果をそ のまま用いればよい。

図10(b)は羽根面に沿っての速度分布の本計算によるものと 差分法によるものとの比較を示すものである。これによると 圧力面上の羽根後半部を除いてはよく一致しているが、これ は "FLANPT" による計算が計算精度についても良好である ことを示している。これによって羽根面に作用する静圧分布 が明らかになりランナの強度計算が正確に行なえるようにな った。またこの計算結果によって、キャビテーションの発生 予測がほぼ可能になったが、キャビテーションの発生限界を 正確に求めるために前述の差分法による精密な計算も行なっ ている。この差分法による計算結果は図11(b)に示すとおりで ある。これは羽根入口部の先端形状が図11(a)のA, B, Cのよ うに変形させた場合の計算結果である。そのときの実験によ るキャビテーション発生状況は図11(c)に示すとおりで、この ようにキャビテーションの発生程度を計算によってほぼ知る ことができるようになった。

ポンプ水車ランナ内流れ解析方法"FLANPT"とその応用 日立評論 VOL.55 No.5 451



(b)本計算と差分法との差

実験値と計算値との圧力分布の比較 実験値と計算値とは比 図 9 較的よく合っている。 Fig. 9 Comparison of Experimental and Calculated Pressure Distribution

差分法では流路を本図のようにメッ 図10 本計算と差分法との比較 シュ状に分割して計算する。計算結果は図10(b)に示すように負圧面ではよく一 致しているが, 圧力面では多少ずれが見られる。 Fig. 10 Comparison of Results by Present Method and Finit Difference Method

11

ポンプ水車ランナ内流れ解析方法"FLANPT"とその応用 日立評論 VOL.55 No.5 452



図|| 静圧分布の計算結果(キャビテーション発生状況) これに よりキャビテーションの発生状況を計算により予測することができる。 Fig. II Calculated Result of Static Pressure Distribution and Occurrence of Cavitation

図12 水車の羽根入口部,出口部における速度三角形(計算結果) 予旋回の大きさは出口流出角にはほとんど影響を与えないことがわかる。 Fig. 12 Velocity Triangles at Blade Inlet and Blade Outlet of a Water Turbine (calculated results)

3.6 水車の計算

12

ポンプの入力に際しては予旋回はゼロとしてほぼ満足できる結 果を得ているが,水車の場合は案内羽根からの流出角を見積る 必要がある。そのために案内羽根の流れ計算を"FLANPT" により行なった。本解析によって回転速度をゼロとすれば案 内羽根の流れ計算ができる。それによれば案内羽根入口の子 旋回の大小にかかわらず案内羽根出口でのスリップは1~3 度であることがわかった。またこの計算によって案内羽根上 の圧力分布がわかるので案内羽根の操作力を正確に見積るこ とができる。より正確な圧力分布を求めるためにこの計算結 果を用いて差分法の計算も行なっている。

案内羽根の流出角が求まれば次はそれを使って水車のラン ナ計算を行なう。図12は低Nsのポンプ水車の水車運転時にお いて、入口の予旋回を変化させた場合の入口速度三角形およ びそれぞれの場合の出口の速度三角形を示すもので、この図 より明らかなように、低Nsのポンプ水車では、水車出口の流 れの状態は水車入口の予旋回にはほとんど影響されないこと がわかる。これは流入角のいかんにかかわらず羽根のダクト 作用が非常に強いことを示すものであり, 出口旋回成分の計 算が可能になったことからドラフトのサージング対策も容易 になる。水車計算の圧力分布の計算値と実測値との比較は前

掲の図9(b)に示してある。このように羽根面上の圧力分布を 計算によってほぼ正確に見積ることができ、これによって水 車のキャビテーション対策も的確に行なえるようになった。

4 結 言

参考文献

以上, 論述した流れ解析 "FLANPT" によって, 混流ラン ナ内の流れの状況が明らかにされ、羽根面上の圧力分布,速 度分布, さらに羽根間および子午面内の流線や流量特性など が正確に計算で求められるので性能向上に大いに寄与するこ とができた。今後は、低流量域における逆流特性を理論的に 明らかにして行きたいと考えている。

最後に,本解析に対して種々ご教示をいただいた東北大学 名誉教授・沼知氏,九州大学教授・妹尾氏および徳島大学講 師・中瀬氏に対し,深く謝意を表する。

Senoo, Y. and Nakase, Y.: ASME series A Vol.94, No.1 p.43 (1)Senoo, Y. and Nakase, Y.: ASME series A Vol.93, No.4 p.454 (2)Jansen, W.: Internal AERO Dynamics Paperiz p.133 (3)