621.224-154:532.51

軸流水車内の流れについて*

神元五郎**, 安藤 尚***, 赤松映明****

On the Flow in a Water Turbine of Axial Flow Type

by Gorō KAMIMOTO, Hisashi ANDŌ, and Teruaki AKAMATSU

The air tests of a model of propeller turbine were performed to reconsider the methods of designing Kaplan turbines by usual two dimensional treatments.

The characteristics of it were obtained, the flow conditions before and after the running blades measured with the cylindrical pitot-tubes, and the pressure distributions on the running blades were compared with the ones of the two-dimensional cascades.

The conclusions reached are as follows: (1) Owing to the curvature of the space between the guide vanes and runner, the radial distribution of circulation given by the guide vanes is not uniform at the entrance of a runner (different from the result expected from free vortex theory), and circulation is larger on the outer wall side. The designers should take into account such distributions of the circulation, which is theoretically obtained by an approximate calculation. (2) The pressure distributions on running blades resemble remarkably those of straight cascade test. This shows that data of cascades are much valuable to design, especially, to prevent cavitation.

1. 緒 言

カプラン水車を設計する場合、キャビテーション発生防止、効率の向上等いろいろ問題があるが、それには、まず水車内の流れについてもっとよく知る必要がある。それについての研究⁽¹⁾⁽²⁾はすでにいくつか報告されている。

著者らは、従来の二次元的取扱いによる設計法およびその特性解析について、いまだ検討を加える必要があるのではないかと考え、二次元理論に基いて設計したプロペラ水車の模型について空気実験⁽³⁾⁽⁴⁾を行い、軸流水車内の流れについて考察した。

2. 実験装置

実験装置の概要を第1図に示す。空気はシロコ・ファンによって吸込まれ案内羽根を通して羽根車を回転させ、吸出管を経て低圧そうに至る。この低圧そうが実際の水車の放水面に相当していると考えられ、この低圧そう内の圧力と大気圧との差をもってこの水車に働く有効落差 H とした。低圧そうを出た空気は整

流格子を通り流量測定用ノズルを経て大気中に放出される。

模型水車の主要部と羽根車の翼断面の形状を第2～4図に示す。羽根車は4枚羽根で、比較回転度 $n_s = 800$ として二次元的取扱いによって設計し、羽根車の平均半径での翼形としては Göttingen 428 を採用した。第3図に示す四つの羽根断面について圧力分布を測定するために、各羽根には銅管が鑄込まれていて、翼面の圧力はこの銅管、羽根車軸を通りパッキング箱を経て外部に取出される(羽根車の材質はアルミニウム鑄物である)。さらに、模型水車の回転中の翼性能と比較するため二次元の直線翼列および単独翼の性能を既設⁽⁵⁾の直線翼列風洞により実験的に求めた。模型水車の四つの断面 A, B, C, D (第3図)と同一の形状、翼配列のものを4組つくり、それぞれ翼枚数は5枚とし、中央の翼には翼面上に約20個の圧力測定孔を設けた。

3. 実験方法とその結果

(1) 特性曲線 案内羽根取付角 β (第2図)が $25^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ および 70° の場合について、それぞれ落差 H 、流量 Q 、羽根車の回転数、空気密度 ρ 、羽根車のトルク M 等を測定し、つぎのような無次元量に直して水車の特性曲線を描いた。

* 昭和31年3月20日 関西支部第31期定時総会講演会および昭和32年10月13日 創立60周年記念東京講演会において講演、原稿受付 昭和33年10月17日。

** 正員、京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)。

*** 正員、川崎重工業会社

**** 准員、京都大学大学院。

周速度係数 $K_u = U_0 / \sqrt{2gH}$

平均軸流速度係数 $K_{\bar{C}_m} = \bar{C}_m / \sqrt{2gH}$

水車効率 $\eta = M\omega / \rho g Q H$

ここで U_0 は羽根車チップの周速度, $\bar{C}_m$ は平均軸流速度, ω は水車の回転角速度である。

$K_{\bar{C}_m} - K_u$ 曲線および等効率曲線を第5図に示す。案内羽根取付角 β が 50° 以下のときは $K_{\bar{C}_m}$ と K_u とはすでに知られているようにほぼ直線の関係がある。

(2) 羽根車前後の流れ 羽根車入口および出口において, 円筒形ピトー管をそう入し, ボスからチップまで半径方向に移動させ流れの状態を測定した。周速度係数 K_u をもって運転条件を定めるパラメータとし, 循環 Γ , 総圧 P_t , および軸流速度の C_m の半径方向分布状態を $\beta = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ の場合について第6図に示す。半径方向を横軸にとり ($r/r_0 = 1$ はチップを, $r/r_0 = 0.4$ はボスを表わしている), 上の諸量を無次元化した Γ'/Q_1 , P_t/H , $C_m/\bar{C}_m$ を縦軸にとっている。ここで P_t は低圧そう内の静圧を基準として測った総圧で落差 H と同じ単位で表わす。また Q_1 は案内羽根の単位幅当りの流量で, $\bar{C}_m$ は平均軸流速度である。

第6図(a)において縦の棒線で示してあるのは入口での実測値であって, 種々の K_u に対してこの範囲におさまることを表わしている。 K_u の大小による差異をはっきりとは見出すことができなかったのでこのような表示法を用いた。また細い実線で示したのは羽根車のない場合の羽根車入口に相当する位置での実測値で, 羽根車が回転している場合と比較して多少違うようであるが, その大きさは実験誤差と同じ程度ではっきりとした傾向はつかめない。

羽根車入口での循環の分布は一樣ではなく, $\beta = 30^\circ$ では外周ほど大きくなっている。これは後述するごとく案内羽根と羽根車との間の曲り部分の影響が現われたものであり, また $\beta = 50^\circ$ ではほぼ一樣になっているが, これは案内羽根の取付角が大きくなって曲りの部分から遠ざかり, その影響を受けることが少なくなったためである。 $\beta = 30^\circ, 40^\circ$ では設計点に近いため羽根車内で利用される循環は半径方向にほぼ一樣となっているが, すでに入口での循環が一樣でないため, 出口で完全に旋回

1. プロローブブレーキ 4. 吸出管 7. 流量測定用ノズル
2. 案内羽根 5. 低圧そう 8. シロッコファン
(120 mmAq, 110 m³/mn)
3. 羽根車 6. 整流格子 9. モータ (5HP)

第1図

第2図

第3図

成分をなくすることができない。設計に際しては, この点とくに考慮する必要がある。

つぎに第6図(b)の総圧分布をみるに正規運転状態附近では総圧の分布は一樣となっている。また第6図(c)には, 羽根車入口および出口における軸流速度分布を種々の K_u に対して示している。羽根車を取

りはずした場合、羽根車入口に相当する位置での速度分布を太い実線で示しているが、 K_u の大小による差異、羽根車の有無による差異も、その大きさが実験誤差程度で、はっきりした傾向は見出し難いが、羽根車のない場合の方がチップの方で速度がおそくなっているようである。

(3) 翼面圧力分布 案内羽根取付角 $\beta=30^\circ$ の場合(設計点)について断面AおよびCにおける羽根車の回転中の圧力分布および直線翼列、単独翼のそれを第7図に示す。縦軸に圧力係数 C_{p1} をとっている

が、回転羽根に対しては $C_{p1} = (p - p_1) / \left(\frac{1}{2} \rho w_1^2 \right)$ で、

ここに p_1 および w_1 は圧力測定翼の前方での静圧および回転羽根に対する相対速度であり、 p は翼面上の圧力である。また直線翼列および単独翼に対しては圧

力係数は $C_{p1} = (p - p_1) / \left(\frac{1}{2} \rho V_1^2 \right)$ で、 p_1 および V_1

は翼前方の一樣流の静圧および速度である。迎え角 α_1 についても、回転羽根に対しては入口での相対流れが、直線翼列あるいは単独翼に対しては前方の一樣流がそれぞれ翼形基準線に対してなす角をもって迎え角としている。

直線翼列および単独翼については、比較のために、回転翼列実験における迎え角の近傍での実験結果を示している。なお単独翼の結果はA断面についてのみ示してある。これらを見ると、直線翼列の圧力分布は単独翼のそれに比して、はるかに回転翼列のそれに近い。このことは設計に際して、単独翼よりも直線翼列のデータの方が重要であることを意味している。

また、これらの圧力分布から求めた揚力係数 C_{L1} 、抗力係数 C_{D1} と迎え角 α_1 との関係を第8図に、四つの断面について示していて、回転翼列、直線翼列および単独翼としての性能を比較しており、単独翼の実験によって求めた性能はA断面について、また直線翼列の理論計算⁽⁶⁾の結果はC断面について示している。羽根車の中央部にあたるB、C断面においては回転翼列と直線翼列との実験結果はほぼ一致している。なお直線翼列実験では揚力曲線のこう配がA、B、C、D断面の順にチップに近づくほど急になっているのに対して、回転翼列ではまったく逆になっているが、これは羽根車がボス、チップにおける壁の境界層等の影響と考えられる。

4. 案内羽根内の三次元流れについて

従来、水車の設計に当っては、案内羽根によって与えられる循環は半径方向に一樣(自由うず)であると

(a)

(b)

第 4 図

第 5 図

していたが、本実験結果が示すように羽根車入口ではチップほど循環が大きくなっている。これは案内羽根と羽根車との間(Übergangraum⁽⁷⁾)の曲りのため、案内羽根を通る流れが翼幅方向に一樣でなく、そのため案内羽根によって与えられる循環が翼幅方向に異なってくるからである。つぎにこのことを近似計算によって求めてみよう。

まず、うずなしの場合について逐次近似の図式計算

(a)

(b)

(c)

第 6 図

法により流線を描く。本模型水車については流量 Q を 10 等分した場合の流線を第 9 図に示す。以下この流線をもとにして理論的に三次元流れを求める。既報二次元の場合の円形翼列薄翼理論⁽⁸⁾とまったく類似の方法で、用いた記号はすべて上記論文と同一であり、ここでは二次元流れに対してさらに付け加えるべき補正分だけについて述べることにし、 Δ の記号をもって表示する。

第 9 図の各分割水車について考えるに、その幅 Δb は変化して $\Delta b'$ になる。この分割水車内の案内羽根がつくる円形翼列に対して、その中心に ΔQ の吸込みを置くと、これによる半径方向の速度は

$$\frac{\Delta Q}{2\pi r} \frac{\Delta b}{\Delta b'} = \frac{\Delta Q}{2\pi r} (1+\varepsilon) \dots \dots \dots (1)$$

となり、ここで ε なる量を導入する。 ΔQ は一つの分割水車についての流量である (第 10 図)。一方、循環流れによる切線方向の速度は二次元流れの場合と同様で流路幅 $\Delta b'$ の変化による影響を受けないとする。

翼面上の一点の法線方向、切線方向の速度の補正分 Δv_n , Δv_t は近似的に

$$\Delta v_n = \varepsilon \frac{\Delta Q}{2\pi r} \sin \gamma \dots \dots \dots (2)$$

$$\Delta v_t = \varepsilon \frac{\Delta Q}{2\pi r} \cos \gamma \dots \dots \dots (3)$$

与えられた円形翼列の各翼の厚みは薄く、そり是对数うず線のそれと大差ないとしてこれを単位円に写像すると、この単位円上の半径方向の速度の補正分 Δv_r は

$$\Delta v_r = \varepsilon \frac{\Delta Q}{2\pi} \sin \gamma \frac{1}{N\sqrt{\tau^2 + \nu^2}} \times \frac{4\kappa\sqrt{K} \sin \theta'}{1 - 2\kappa^2 \cos 2\theta + \kappa^4} \dots \dots \dots (4)$$

ここで

$$\frac{\varepsilon \sin \theta'}{1 - 2\kappa^2 \cos 2\theta + \kappa^4} = \sum (c_n \cos n\theta' + d_n \sin n\theta') \dots \dots (5)$$

とおき、 ε をフーリエ級数で表わす。 c_n , d_n はその係数である。

ところで流体は翼を貫いては流れないから、半径方向の速度を打消すように高次の二重吹出しを置き Joukowski の仮設を満すように単位円に循環をつけ加えると、計算の結果、二次元流れに対して補正すべき循環 $\Delta \Gamma'$ は

$$\frac{N\Delta \Gamma'}{\Delta Q} = -\frac{2\kappa\sqrt{K}}{\pi} \frac{1}{\tau^2 + \nu^2} [\nu \sum (-1)^n c_n - \tau \sum (-1)^n d_n] \dots \dots \dots (6)$$

となる。そこで一つの分割水車について案内羽根の翼面上での流路幅 $\Delta b'$ を第 9 図から求めて (1) 式により ε を算出し、(5) 式のフーリエ級数の係数 c_n , d_n を知れば、(6) 式により循環の補正量がわかる。各分割水車ご

第 7 図

とに同様の計算を行っていけば、羽根車入口での半径方向の循環の分布を求めることができる。

案内羽根取付角 $\beta = 30^\circ$ の場合について 羽根車入口での流入角 θ_1 と無次元循環量 Γ/Q_1 とを上述の理論に

第 8 図

第 9 図

より計算し、これを実験と比較したのが第 11 図である。実験値は縦にある幅をもたせて示してあるがこれは第 6 図と同様であり、細い実線は羽根車を取りはずした場合の同じ位置での測定値である。図中二次元および三次元理論とあるのは、それぞれ二次元の円形翼列薄翼理論によるものと上述の三次元流の補正を施した場合とを指している。三次元理論の方が実験とよく一致している。

なお以上の計算は、第一次近似であって、流れがうずなしであるとして流線を求め、これをもとにして循環分布を求めたものであるが、さらに、こうして得た循環分布からうずのある場合の流線を描き直し⁽⁷⁾、この流線に対して上述の方法をくり返せば、さらに近似度を高めることができる。

5. 結 言

プロプラ水車の模型について空気実験を行い、その特性曲線を求めるとともに、羽根車前後の流れを二孔ピトー管で測定し、さらに回転羽根面上の圧力分布を測定してこれを直線翼列実験と比較した。

結論として、(1) 案内羽根と羽根車との間の曲りのため、案内羽根によって与えられる循環は半径方向に一樣ではなく、チップほど大きくなっている。これは理論的に近似計算によっても予測することができ、設計に当っては、この循環が一樣でないということを

第 10 図

第 11 図

621.67:532.517

うず巻形流体機械の羽根車内の流れについて

(第 3 報, 粘性の影響)*

神元五郎**, 松岡祥浩**, 白井英雄***

On the Flow in the Impeller of Centrifugal Type Hydraulic Machinery
(3rd Report, Effects of Viscosity)

by Gorō KAMIMOTO, Yoshihiro MATSUOKA, and Hideo SHIRAI

This paper deals with the Effect of Fluid Viscosity on the Performance and Pressure Distribution around the Vanes of the Impeller of Centrifugal Type Hydraulic Machinery. The viscosity of water was changed by adding of glycerin, and an impeller with 6 vanes, vane angle 30° and inner-outer radius ratio 0.6 was rotated in the above solution of glycerin, and then the head, water quantities and the pressure distribution around vanes were measured.

本報告はうず巻形羽根車内の流れに及ぼす流体の粘性の影響を検討するために、羽根数 6, 内外径比 0.6 で、羽根角 30° の対数うず線状の羽根をもつ羽根車について、グリセリン溶液の濃度を変えて種々の粘性係数をもつ流体を用いて実験し、流体の粘性によって羽根車の特性、羽根面圧力分布に及ぼす影響を測定した結果について述べる。

* 昭和 33 年 3 月 20 日 関西支部第 33 期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 34 年 2 月 5 日。

** 正員, 京都大学工学部 (京都市左京区吉田本町)。

*** 准員, 丸善石油会社。

十分考慮する必要がある。(2) 回転中の羽根面圧力分布は直線翼列実験によるそれと著しく類似しており、設計に際し、ことにキャビテーション発生の防止には直線翼列に関するデータは非常に重要である。

終りに直線翼列および単独翼の実験に協力した川田和良君に対し厚く感謝の意を表す。

文 献

- (1) W. Thuss, *V.D.I. Berichte*, **3** (1955), 89.
- (2) 石原, 井田, 生産研究, **7**, 4 (昭 30), 73.
- (3) J. Osterwalder, *Escher Wyss News*, **15/16**, (1952/53), 11.
- (4) *Escher Wyss News*, **12** (1939), 4.
- (5) 神元, 機械学会論文集, **17**, 58 (昭 26), 41.
- (6) 藤本, 神元, 広瀬, 京大工研研究報告, **10**, 5 (昭 26), 77.
- (7) Strscheletzky, *Ingenieur Archiv*, **19** (1951), 309.
- (8) 神元, 機械学会論文集, **18**, 77 (昭 27), 1.

1. 緒 言

著者は既に第 1 報⁽¹⁾においてうず巻形羽根車内の流れを測定するために、羽根数 4 枚, 内外径比 0.5, 羽根角 30° の対数うず線状の羽根をもち、幅一定の羽根について回転中の羽根面圧力分布を測定し、この結果を理論計算による結果と比較検討した。その結果羽根車の特性曲線は二次元流れの取扱いによる理論計算の結果とは著しく異なるものであることは周知のようであるが、それにもかかわらず測定された羽根面圧力分