ポンプ水車のポンプ運転時のインデックス法

Index Method for Pumping Operation of Reversible Pump-turbine

山部正博*山口雄三* Masahiro Yamabe Yûzô Yamaguchi

要

旨

ポンプ水車のポンプ運転時のインデックス法^(*)として、Winter-Kennedy 法⁽¹⁾は可動ガイドベーン付き斜流 ポンプ水車には使用不適であること、さらにフランシスポンプ水車には一応は使用できるが小揚水量域では望 ましくないことを明らかにした。よって、吸出し管あるいは給気管に測圧孔を設けた場合の特性を究明し、最 高効率点における揚水量の約40%以上の揚水量範囲ですぐれた仮標揚水量が得られること、これ以下の揚水量 域でも、測圧孔の1個をランナに近い吸出し管面上に設ければ、差圧と揚水量とに1対1の対応関係が存在す ることを明らかにした。

1. 緒

言

揚水発電所の運営を経済的に行なうためには,水車運転時にはポ ンプ水車への水力入力および発電機からの電気出力を,ポンプ運転 時には電動機への電気入力およびポンプ水車の水力出力をそれぞれ 知る必要がある。これらの諸量のうち,電気的入出力および落差・ 揚程は高精度の計測が容易であるが,水量の計測には種々の誤差が はいりやすく計測にかなりの手間を必要とする。それゆえに,水力 発電所においては,計測の困難な流量の絶対値の代わりに,周知の ように流量と一義的関連をもつ仮標流量とも称すべき指示量を利用 するインデックス法が採用されている。

			フラ	斜流形		
			А	В	С	D
ランナ	入口直徑	e (mm)	430	280	405	325
ランナ	出口直径	£ (mm)	256	150	238	200
ランナ	入口高さ	(mm)	45	20	44	75
ランナ	ランナ羽根枚数(枚)		7	7	7	8
ランナ	羽根角度	۴ د	固定	固定	固定	可 動
ガイドベーン枚数(枚)		16	20	20	20	
ガイドベーン開度			固定	可動	可 動	可 動
ドラフトチ	ニューブセン	1タービヤー	あり	なし	あり	tr L
い声中	ポンプ	m-m ³ /s	40	30	40	60
L 述皮	水車	m-kW	145	100	110	210

表1.供試ポンプ水車の諸元

水車運転時のインデックス法に関しては、G.H. Voaden 氏⁽²⁾が実 物に関する研究成果を報告しているが、種々のインデックス法のな かで、ランナ軸を含む同一断面内の渦巻ケーシング壁面上に設けた 2個の測圧孔の差圧を用いる Winter-Kennedy 法⁽¹⁾とステーベー ンの1枚に2個の測圧孔を設ける Peck 法⁽²⁾ とが現在広く用いられ ている。しかし、ポンプ運転時のインデックス法についてはいまだ 適切な方法が知られていない。

本報告は、フランシスおよび斜流ポンプ水車の揚水運転時におけ る Winter-Kennedy 法の適用性を吟味した結果、(1) Winter-Kennedy 法用測圧孔はフランシスポンプ水車では測圧孔の位置決 定に慎重を要するが、ある運転範囲では一応使用可能と考えられる こと、しかし、斜流ポンプ水車に対しては適用がはなはだ困難であ ることなどを明らかにした。よって、新しい方法として、吸出し管 の壁面圧力差または給気管の表面圧力差を利用する"吸出し管イン デックス法"の特性を検討した。その結果、(2) ポンプ運転時のイ ンデックス用測圧孔の1個を吸出し管壁面のランナに近い位置に設 ければ、インデックス法として好適性を示すことを明らかにし、こ の方法を提唱したものである。

2. 実験装置と実験方法

供試ポンプ水車はフランシス形および斜流形で,その諸元は表1 に示すとおりである。フランシスポンプ水車としてはガイドベーン が固定方式の模型(A)と可動方式の模型(B),(C)の3種類を,斜



流ポンプ水車としてはガイドベーン可動方式の模型(D)を実験に供した。図1は可動ガイドベーン付き斜流ポンプ水車の構造寸法ならびに測圧孔の位置を示す。すなわち、インデックス用測圧孔には、

- * 日立製作所日立研究所
- (*) 昭和40年10月日本機械学会第43期全国大会講演会におい て講演。本文の大部分は Trans. ASME, 91, D103 (1969) に発表した。

吸込みタンクの個所(S),吸出し管の個所(1)~(15),給気管の個
所(16)~(19)および渦巻ケーシングの個所(20)~(25)を設けた。
実験に際しては、揚水ポンプでくみ上げられた水はいったん吸込
みタンクにはいり,次に電気動力計で駆動される供試ポンプ水車に
よって吐出タンクに吐き出される。インデックス用差圧の測定には
水銀と水、水と空気または水と油とを組み合わせたマノメータを適
宜使用する。揚水量は重量法,揚程は水銀マノメータによってそれぞ



ここに,k = 常数, h_i , j = 測圧孔(i)の圧力から測圧孔(j)の圧力を差し 引いた差圧(cm Aq)である。測定点 が少し蛇(だ)行する傾向が認められ る。この場合, n=0.37 であるが, 水車運転時には同じ測圧孔の指数は n=0.50 であった。 log Q<1.9 では hi, j が急に減少している。ほかのフ ランシスポンプ水車(B)においても (1)式の関係を大体満足すること, および各ガイドベーン開度の測定点 に蛇行性があることなどは,上述の ポンプ水車(A)の場合と同様であ るが、そのばらつきの度合いはポン プ水車(A)よりいくぶん大きい。斜 流ポンプ水車においては, 図示した 差圧 h₂₅, 24 は同時に計測した差圧 h21,20 および h23,22 に比べて測定点 のばらつきが少ないのであるが、各 ガイドベーン開度の差圧が揚水量に 対して蛇行する傾向がフランシスポ ンプ水車に比べてさらに顕著で,し たがって各ガイドベーン開度を総合 した特性で比較すると測定点のばら つきが非常に大きく,かつ,羽根角 度によって指数nの値が変わり、こ れらの間に系統的な関係を見い出せ ないために実用上好ましくない。こ の傾向は差圧 h21, 20 および h23, 22 で も同様である。また、フランシスポ ンプ水車(A)では小揚水量域で差圧 が減少したが, 斜流ポンプ水車では 一定値に近づく傾向を示した。



ポンプ運転時には渦巻ケーシング はランナとガイドベーンの下流側に 位置するため, その中の流れはラン ナとガイドベーンの影響を受ける。 したがって, 測圧孔の位置はもちろ んのこと,ガイドベーン開度ならび

れ計測した。また、軸トルクの測定には精密自動秤を使用し、回転 速度の測定には電磁式パルス発生器と電子管式計数器を使用した。

結果 3. 実 験

供試ポンプ水車の一般性能 3.1

図2は供試斜流ポンプ水車の一般性能曲線である。図は羽根角度 次に本報告で提唱する"吸出し管インデックス法"について述べ 10度,20度および30度の場合の各ガイドベーン開度における揚水 量~全揚程曲線と効率包絡線とを示し、 さらに効率が最高となる 点の揚水量 Qm とあとに説明する差圧 hs, 14 の逆流開始点の揚水量 $Q_r(h_{s,14})$ を示している。 3.2 Winter-Kennedy法 Winter-Kennedy 法は水車運転時のインデックス法として広く 性に大いに関係がある。 採用されているが、この方法をフランシスポンプ水車(A)と斜流ポ 3.3.1 フランシスポンプ水車の吸出し管インデックス法 ンプ水車(D)のポンプ運転に適用した結果は図3に示すとおりであ る。フランシスポンプ水車の例では揚水量が log Q>1.9 の領域で は揚水量Qと差圧 hi, j との間には次の関係がある。

に羽根角度によって(1)式のnの値や測定点のばらつき程度が変化 するので、Winter-Kennedy 法の測圧孔をポンプ運転に適用する場 合には、適用する揚水量の範囲や要求精度に対する検討を慎重に行 なうことが必要である。

3.3 吸出し管インデックス法

る。一般にポンプ運転においては、揚水量がある値より大きいと流 れはほぼ正規の方向に流れているが、揚水量がある程度まで小さく なるとランナ内部に逆流が生じ, 揚水量が小さくなるにつれて逆流 は吸出し管の下方へ次第にのびてゆく。したがって、吸出し管壁面 などの静圧を用いる吸出し管インデックス法はポンプ水車の逆流特 図4と図5とはフランシスポンプ水車(B)に吸出し管インデッ クス法を適用した結果である。両図で明らかなような二つの特徴 ある傾向を示す。すなわち,図4ではQ<Qrで差圧hs,14が急減 して負となり、図5では $Q=Q_r$ または Q'_r で $h_{s,j}$ が極小値を示

論 評

第 51 巻 第 10 号



揚水量はわずか異なる。

一方,図5は測圧孔の1個に吸 出し管曲り部および水平部の個所 (2),(6),(12)のいずれかを選び, ほかの1個に測圧孔(S)を用いた場 合の結果である。いずれの測圧孔の 組合せにおいても Q>Qr では(1) 式をよく満足する。差圧 hs, 6 と hs, 2 とはその逆流開始揚水量 Qr が差圧 の極小値を示す揚水量と一致して いるが, 差圧 $h_{s,12}$ では log $Q_r >$ log Q'r=1.12 なる揚水量 Q'r におい て差圧が極小となっている。揚水量 が Qr または Q'r より小さくなると hs, jが再び大きくなる。したがって, 図5のような特性を示す測圧孔をイ ンデックス法に適用すると, ある揚 水量範囲では一つの差圧 hi, j に対し て二つの揚水量が対応する。したが って,これらの測圧孔は適用する揚 水量の範囲によっては実用上不適当 である。これに対して図4の特性は

3.5



一つの差圧 hi, j に対して一つの揚 水量のみが対応するのでインデック ス法用測圧孔として好適である。 3.3.2 斜流ポンプ水車の吸出し管

インデックス法

図6~図9は斜流ポンプ水車に関 する吸出し管インデックス法の実験 結果である。図6は吸出し管上部に 設けた測圧孔(14)と吸込みタンクの 測圧孔(S)との差圧 hs, 14 のランナ 羽根角度20度におけるインデック ス特性である。 逆流開始揚水量は $\log Q_r = 2.02$ で、 $Q > Q_r$ において差 圧hs,14はガイドベーン開度の影響 をうけずに(1)式の関係をよく満足 している。 Q<Qr では急に hs, 14< 0となるが、この範囲においてもガ イドベーン開度の影響がほとんど認 められない。

図7は吸出し管上部に設けた測圧 孔(12)と測圧孔(S)との差圧 hs, 12

す。この揚水量 Qr または Q'r の点はその測圧孔が逆流の影響を 受け始める点で、この点の揚水量を逆流開始揚水量と呼ぶことに し, Qr で示す。

2個の測圧孔のうち、1個を吸出し管のランナ近傍の個所(14) に設け、ほかの1個を吸込みタンク壁面の個所(S)に設けた場合 の結果が図4である。log Qr=1.23であり、揚水量がQ>Qrにお のインデックス特性で、ランナ羽根角度を10度、20度および30 度の3種類に変え、またガイドベーン開度も前図6の実験とほぼ 同じように変えている。いずれの羽根角度においても hs, 12 がガ イドベーン開度に影響されないことは図6のhs,14の特性と同様 である。逆流開始揚水量は,10度ではlog Qr(10°)=1.74,20度で は log $Q_r(20^\circ) = 1.94$, 30 度 では log $Q_r(30^\circ) = 2.05$ であり, 各羽

いては差圧 hs,14 に対するガイドベーン開度の影響がほとんど認
められず、この差圧は(1)式をよく満足するので仮標揚水量とし
てすぐれている。Q <qr 14="" hs,="" td="" が急に負の値となるが,="" こ<="" では差圧=""></qr>
の範囲においてもガイドベーン開度による差はほとんど認められ
ない。この傾向は個所(14)と同じ L/d で対称な位置にある測圧孔
(13)でも同様である。しかしながら、流れが必ずしも軸対称では
ないので,これらの測圧孔を用いた差圧の大きさおよび逆流開始

根角度の逆流開始揚水量 Qrより大きい揚水量範囲では, 差圧 $h_{i,j}$ は羽根角度の影響をうけずに同一の $Q \sim h_{s,12}$ 特性を示す。 すなわち、Q>Q,の範囲では、可動ランナおよび可動ガイドベー ン付きポンプ水車に対してもこのインデックス法がじゅうぶん適 用しうることを示している。また、吸出し管の上部にそう入した 給気管の吸出し管壁面近くに設けた測圧孔(16)と(17)の差圧も類 似のインデックス特性を示している。

8 -

ポンプ水車のポンプ運転時のインデックス法





図8は給気管の吸出し管中心部に設けた測圧孔(18)と(19)の差



圧 h₁₈, 19 ならびに吸出し管曲り部付近および水平部の測圧孔(2), (5), (11)と(S)との各差圧の羽根角度20度における特性を示 している。これらの測圧孔は Q_r または、 Q'_r で $h_{i,j}$ が極小値を とる形の特性を示し、ガイドベーン開度が揚水量の全領域にわた って hi, j にほとんど影響しないことは前述せる結果と全く同様 である。

図9は吸出し管曲り部の背面測圧孔(7)または腹面測圧孔(10) と測圧孔(S)との差圧のインデックス特性である。腹側のhs,10は 前図8と同じ形の特性を示すが、背側の差圧 $h_{s,7}$ は図示の Q'_r と Q",の二つの揚水量において極小値を持つ特性である。

3.3.3 吸出し管センターピヤーの影響

正規揚水量近くの運転時には吸出し管中の流れはほぼ壁面に沿 って流れているので,吸出し管両側壁面の圧力には比較的対称性 がある。しかし,揚水量が小さくなってランナ内部に逆流が生じ, この逆流が吸出し管曲り部まで発達した状態では、曲り部の影響 で流れの対称性が悪くなる。特にセンターピャーが付いている場 合にはこの影響も加わってさらに対称性がくずれる。

図10はフランシスポンプ水車(C)のインデックス特性を示し ている。図は上部吸出し管と吸出し管水平部とに設けた両測圧孔 の差圧を示しているが,前節の吸込みタンクの測圧孔(S)の圧力 を基準とした差圧特性と特に変わらない。ただ測圧孔(1)と(2) とは逆流開始揚水量以下の領域ではセンターピャーと吸出し管曲 り部の影響を受けて傾向が異なっている。

3.4 測圧乳の位置と逆流開始揚水量との関係

図11は各測圧孔の逆流開始揚水量 Qr と効率の最高値を示す揚 急に大きくなり、 $L/d < 2.1 \ \mathcal{O} \ h_{s,j} < 0 \ \mathcal{O} \ \mathcal{O} \ \mathcal{O}$ 。羽根角度によ 水量 Q_m との比 Q_r/Q_m が吸出し管壁面に沿って変化する様相を, 測 って差圧は異なるが類似の傾向を示している。すなわち、このポン 圧孔の位置Lと吸出し管ポンプ出口径dとの比L/dを横軸にとっ プ水車ではL/d<2の吸出し管壁面に測圧孔の1個を設けることに て示している。ここで,最高効率点としては,フランシスポンプ水車 よって、Q<Qrでhs,j<0となる形の差圧特性が得られる。この (B)では各ガイドベーン開度の効率曲線全体の包絡線の最高点,斜 hs, j=0 となる L/d の値はランナの逆流特性に関係することはもち 流ポンプ水車ではランナの羽根角度ごとにガイドベーン開度を変え ろんであるが、吸出し管曲り部の位置と形状ならびにセンターピャ て得られる効率包絡線の最高点 $Q_m(10^\circ)$, $Q_m(20^\circ)$ または $Q_m(30^\circ)$ ーにも影響される。ここで整理の対象としたポンプ水車(B)と(D) の値を用いた。各測圧孔の位置Lは吸出し管の形状が複雑なので正 においては、 $h_{s,j}=0$ となる L/d の値は吸出し管曲り部の中心位置 確には規定しがたいが、ランナおよび吸出し管の中心軸に垂直な平 の約70%の位置である。 インデックス用測圧孔の差圧特性として必要な条件は 面に含まれる測圧孔の位置を中心軸の曲線長さLで表示してある。

____ 9 ____



羽根角度10,20,30°



図から明らかなように、 $Q_r/Q_m \ge L/d$ の関係は両ポンプ水車で大 差なく, L/d が小さいほど, すなわち 測圧孔 が ランナに 近いほど Q_r/Q_m は大きく, L/d=1において $Q_r/Q_m=0.34\sim0.47$, L/d=6 に おいて $Q_r/Q_m = 0.26 \sim 0.40$ である。

3.5 吸出し管壁面に沿う圧力差

図 12 は吸出し管側壁と吸込みタンク側壁との圧力差 $h_{s,j}$ のL/dに対する変化を斜流ポンプ水車の場合について示したものである。 $Q>Q_r$ の揚水量においては, 圧力差 $h_{s,j}$ はL/d>4でほぼ同じ差圧 を示すが、 L/d<4 では L/d が小さくなるにつれて差圧が急に大き くなる。羽根角度によって差圧は変わらない。しかしながら、Q< Q_r においては、L/d=2.5~4でL/dが小さくなるにつれて $h_{s,j}$ が

906 曜	召和44年10月	日	立	評	論	第 51 巻 第 10 号
-------	----------	---	---	---	---	---------------

(1) $Q = k \cdot h_{i,j}^n$ の関係をなるべく広い揚水量範囲で満足する こと

(2)指示差圧がなるべく大きくしかも安定していること

(3) 指示差圧と揚水量との間に1対1の対応があること

である。条件(1)を満たすには、図11に示したように L/d の大き い位置の測圧孔ほど逆流開始揚水量が小さいのでよい。条件(2)に 対しては,図12に示したように $Q>Q_r$ ではL/dが小さいほどよ い。条件(3)に対しては、同じく図 12 に示したように $Q < Q_r$ にお いて $h_{s,j} < 0$ となる L/dの範囲に測圧孔を設けることが必要であ る。以上の三つの条件を総合すると、測圧孔の位置に関する必要条 件は $Q < Q_r$ において $h_{s,j} < 0$ となる位置に設けることである。そし て(1)式の関係をなるべく小揚水量の領域まで成立させる必要があ る場合は、測圧孔の一つをなるべく L/d の大きい位置に設け、差圧 hs, jの指示値を大きくしたいときは測圧孔の一つを逆になるべく小 さい L/d の位置に設ければよい。

言 4. 結

ポンプ水車のポンプ運転時のインデックス法に関し Winter-Kennedy 法を実験的に検討し、よって新しい吸出し管インデック ス法(特許申請中)を提唱し、次の結論を得た。

(1) 吸出し管インデックス法は逆流開始揚水量 Qr 以上の揚水 量範囲では揚水量Qと指示差圧 $h_{i,j}$ との間に $Q = k \cdot h_{i,j}^n$ の関係が ある。しかして、この関係はポンプ水車の形式、ガイドベーン開 度,羽根角度および測圧孔の位置の影響を受けず,また n=0.5 で

示され、仮標揚水量としてすぐれた特性をもっている。

(2) Q<Qr では、測圧孔の1個を L/d<2 の吸出し管管壁に設 けほかの1個を吸出し管水平部に設けた場合および2個の測圧孔 を給気管の吸出し管管壁近くに設けた場合には、いずれの差圧も 負となり、揚水量と差圧との間に1対1の対応関係が存在する。 また,ガイドベーン開度の影響をほとんど受けず, |hi, j|が大き くかつ安定しているので仮標揚水量として使用できる。ただし, 羽根角度の影響を受ける。

(3) Winter-Kennedy 法はフランシスポンプ水車では使用領域 を制限すれば一応適用できるが、測圧孔を設ける位置を慎重に選 定することが必要である。その位置は水車運転時に良好な測圧孔 の位置とは一般に異なる。斜流ポンプ水車では測定点のばらつき が大きく、また、ガイドベーン開度および羽根角度の影響を大き く受けるので、実用に際しては個々の場合について精度上の慎重 な検討が必要である。

終わりに、本研究のとりまとめに当たり東北大学沼知福三郎名誉 教授のご指導を賜わった。また,実験設備の計画と製作には茨城大 学山崎卓爾教授,供試ポンプ水車の設計と製作には日立製作所日立 工場深栖技師長ならびに外岡部長のご指導とご援助をいただいた。 以上のかたがたに深甚の謝意を表する。

文 献 考

- (1) I.A. Winter: Proc. of ASCE, 59, 565 (1933)
- (2) G. H. Voaden: Trans. of ASME, 73, 481 (1951)



タングステンと銅のロウ付け方法

シリコン整流器においてシリコンウェハと電極(銅)とを接着す る場合,両者の熱膨張の差によってシリコンウェハが破損するのを 防ぐ目的でシリコンウェハと近似の熱膨張率を有するタングステン 板をシリコンウェハと電極との間に介在させている。

この発明はこのような銅とタングステンを接着する場合のロウ付 け方法に関するもので、この発明によれば耐熱疲労性が大きく、過 酷な使用条件にもじゅうぶん耐えうる銅とタングステンの接着部を うることができる、

この発明の方法は、タングステン表面にタングステンと溶着し金

一錫ハンダとも合金化する金属たとえばニッケルの薄層を形成した 後(あるいは形成しないで),タングステンに金一ニッケル 0.1~20 %のハク層をのせ還元性ふん囲気中約1,100℃以下においてタング ステンに加熱溶着し、その後タングステンと銅とを金一錫ハンダで もって還元性ふん囲気中においてロウ付けするものである。

この方法によれば,金一ニッケル合金がタングステンならびに金 一錫ハンダ合金の両者に対し相互溶解度を有すること,機械的強度 が大きいこと, 合金の固溶状態における固相線, 液相線間の狭いこ とによって接着部の耐熱疲労特性が著しく向上する。 (諸角)

Vol. 30	日立造	船 技 報 No. 2
	目	次
■論 文		・高圧用メカニカルシールの研究(第2報)
• 針路安定性の悪い船の操縦性の判定方法	生について	一密封圧力によるしゅう動面の変形が
・ディーゼル機関潤滑油の化学洗浄方式	の自動化	密封特性に及ぼす影響ー
 オーステナイト系ステンレス鋼のウエルド・ 	ディケイ対	 ・ ・ ・
策		ーしゅう動面の熱変形が密封特性に及ぼす影響ー
• 鱼腹型ゲートの水理	! 実 験	• すぐ歯平歯車の疲れ試験(その3)
• 尾道大橋の走行荷重による動的応答	について	一給油と損傷について一
		 ・純流体OR-NOR素子の切換に関する二、三の考察

