U. D. C. 621.675 : 621.221.4

九州電力株式会社納

諸塚揚水発電所用ポンプのモデル実験

Model Tests for Hitachi Pumps for the Morozuka Pumped Storage Power Station, Kyushu Electric Power Co., Inc.

山本芳正* 大谷清*
Yoshimasa Yamamoto Kiyoshi Ōtani

内容梗概

揚水発電所用揚水ポンプとして世界記録的な容量をもつ，諸塚揚水発電所用 56,500 kW ポンプの設計にあたり，モデルポンプを製作して研究試験した。その結果，すぐれたポンプを製作することができたが，特にプリローテーション付き構造の採用は，効率，キャビテーション，水圧脈動などに関してすぐれた効果を示した。

実物換算効率としては 90.2% を得ることができ保証値 90% を満足することができた。

1. 緒言

九州電力株式会社諸塚発電所の 56,500 kW ポンプは，わが国における揚水発電所用揚水ポンプとして，昭和 27 年に完成した東北電力株式会社沼沢沼発電所の 21,000 kW 揚水ポンプ（日立製作所製），昭和 34 年に完成した四国電力株式会社大森川発電所の 15,000 kW 揚水ポンプ（日立製作所製）についで，昭和 36 年，三番目に完成したもので，全揚程および駆動電動機出力においてわが国最大の記録品であり，世界的にみてもリンベルグ発電所 (85,000 PS) につぐ容量をもち，非兼用機式の立形としては世界最大のものである。

この諸塚発電所の機器は，立形で，上から電動発電機，水車，ポンプとくし形に配列されている点が，沼沢沼の横形配列，大森川の水車ポンプ兼用機と，その構造上全く違った特徴を有している。

これらの記録的なしかも新しいくし形配列に対して，各機器は慎重なモデル実験と新しい構想を採り入れ，日立製作所の総合技術を結集し，これを完成させたのであるが，揚水ポンプについても，沼沢沼の 2 倍半という大容量を有すること，従来の実績に比べ，揚程が高いのにより高い比較回転度を採用したこと，高い効率を目標としたこと，キャビテーション性能の向上を計ったこと，水圧脈動を小さくすることなどのいくつかの目標を完遂するために，一連のモデルポンプ類を製作し，一般特性，全般特性，効率，キャビテーション，水圧脈動，ランナ入口付近における水の流れ状態，水撃現象などにつき詳細な研究，試験を実施した。

モデルポンプは，基礎的資料を得るための 1 段モデルポンプと，実物と水力学的にまったく相似形な 2 段モデルポンプとを製作した。1 段モデルポンプは，実物ポンプのサクションケーシングから 1 段目羽根車，ガイドホイル，水返しまでのモデルであって，2 段目羽根車とスパイラルケーシングとを除いたものである。

この 1 段モデルポンプの目的は，実物ポンプの仕様が最終的に決定する前に，高い比較回転度のモデルポンプとして，主として定性的な研究を行うために製作したものである。

また 2 段モデルポンプは実物ポンプと水力学的にまったく相似形のポンプであって，実物ポンプの設計を決定し，実物ポンプの予想特性，効率，キャビテーション性能，水圧脈動の状況，水撃現象，インデックス法による水量測定のための資料などをは握するために製作したものである。

実物ポンプの仕様は次のとおりである。

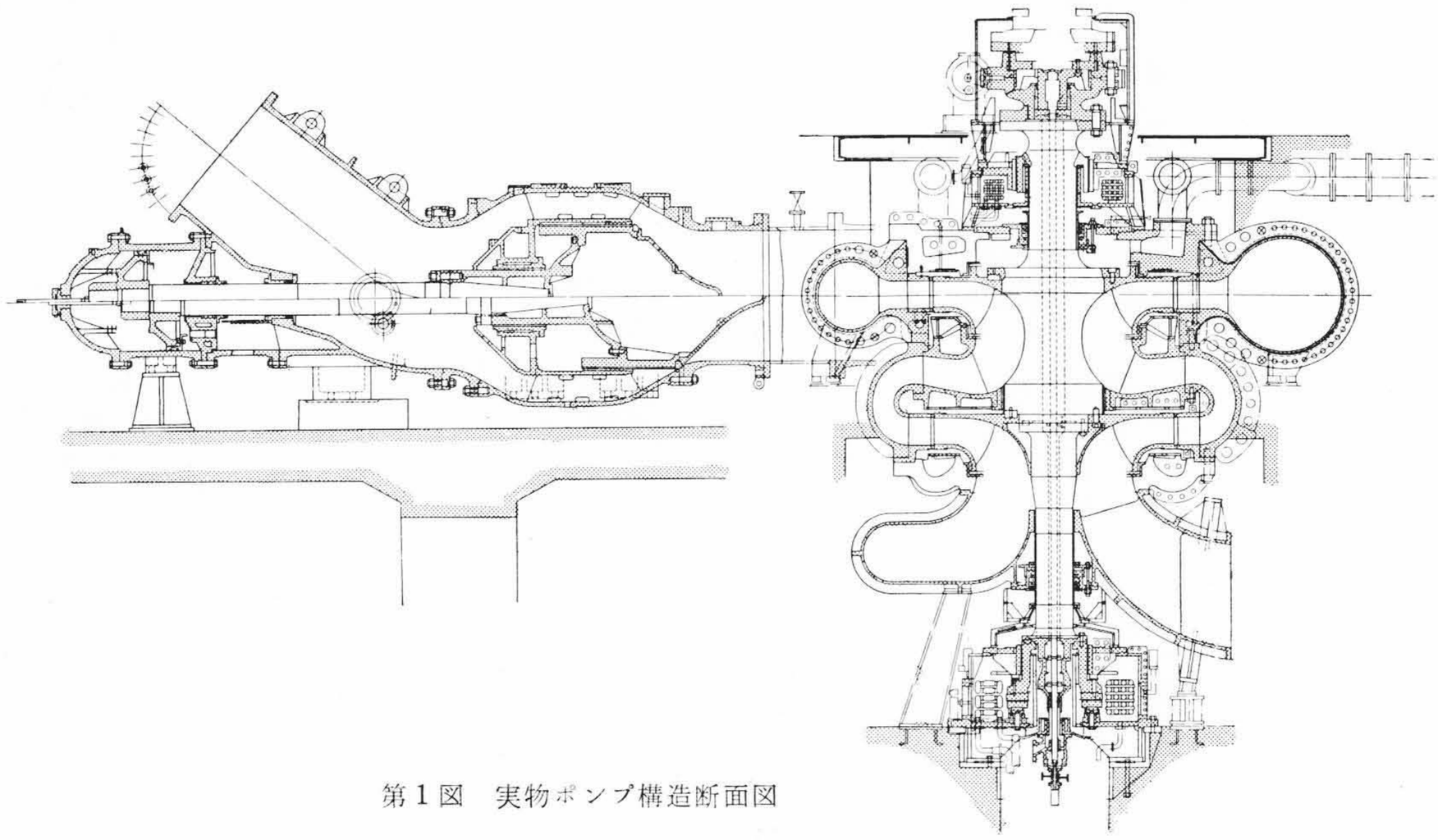
1,800 mm 2 段立軸タービンポンプ

18.6 $m^3/s \times 241.4\ m \times 300\ rpm \times 56{,}500\ kW$

2. 基礎実験用モデルポンプ

実物ポンプは，第 1 図に示すように 2 段のタービンポンプであるが，その基礎研究用として 1 段のモデルポンプを製作した。このモデルポンプは実物ポンプのサクションケーシング，1 段目羽根車，1 段目ガイドホイル，水返しまでのモデルである。

このモデルは沼沢沼の実績に比較して，より高い全揚程であるに



第 1 図　実物ポンプ構造断面図

* 日立製作所亀有工場

もかかわらず，かえって，より高い比較回転度を採用したので，高比較回転度のモデルポンプとして主として定性的な研究を行うことを目的とした。

この研究には沼沢沼の例にかんがみ，締切付近の振動を軽減するために，従来からボイラ給水ポンプなどに採用して効果をあげているプリローテーション付き構造の効果を確認することを加味し，1段モデルポンプについてもこれを行った。

したがって，この1段モデルポンプは主目的の研究を，プリローテーション付きと付かないものとを比較しながら行うことができるよう設計した。

モデル比は約 10 で，最高効率点の比較回転度を実物に合わせ約 280 とした。

サクションケーシングは普通の形のものと，水にゆるやかな予旋回を与えることによって，水の流れ方向を統一し整流するような形としたプリローテーション付のものとを設計した。

また，羽根車は普通形サクション用のものと，プリローテーション付きのサクション用のもの（水流の予旋回を想定して羽根入口角度を大にしたもの）を準備した。

試験の結果は，効率，キャビテーション性能とも良い結果が得られ，特にプリローテーション付きサクションケーシングを使用した場合は，普通形サクションケーシングを使用した場合に比較して，あらゆる点でこれをりょうがし，水圧脈動については半減の効果を示した。**第2図**はプリローテーション付きの場合となしの場合との水圧脈動の比較で，サクションケーシングのみを交互に取替え，ほかはまったく同一のものを使用して実験した結果である。

脈動水圧の測定はサクションケーシングの周上に4個，吐出側フランジに1個の圧力ピックアップを取付けて吸込圧力，吐出圧力の脈動をオシログラフで同時測定して記録した。

これらの実験の結果から次のことがいえる。

（1） いずれの場所においても，脈動水圧は最高効率を発揮する吐出量付近で最低で，吐出量がこの点より大になっても小になっても脈動は増加する。特に吐出量Oの締切点では最も著しい。

（2） サクションケーシングの二つの形を比較するとプリローテーションをつけた場合の脈動ははるかに少なく，脈動の振幅はプリローテーションのない場合に比較してほぼ½である。

3. 実物用モデルポンプ

1段モデルポンプの基礎実験により，高比較回転度においても高い効率が得られ，キャビテーション性能も良好で，これにプリローテーション付きサクションケーシングを使用した場合には，いっそうの性能向上が見られ，特に水圧脈動の減少は著しい効果が確認できたので，一段モデルの設計を基準として，実物と水力学的に全く相似形の実物用モデルポンプを設計した。

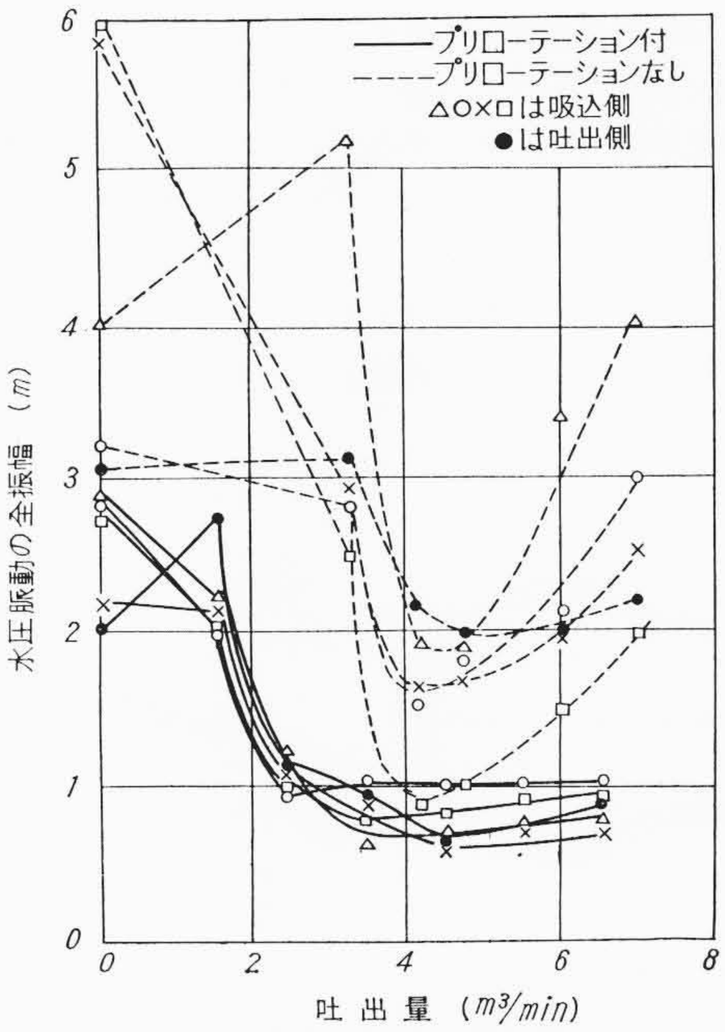
このモデルポンプは実物ポンプと同様に2段のタービンポンプで，決定した最終仕様に基づき改めて各部寸法を詳細に設計した。

モデル比は10，回転数を3,000 rpm（実物の10倍）とし，実物ポンプと同一の全揚程が得られるようにした。数種のモデルを製作して実験した結果，いずれも80%をこえる優秀な効率を得たが，その中で最も良い成績を示したモデルポンプに対し，プリローテーションのある場合とない場合について，さらに比較試験を行った。

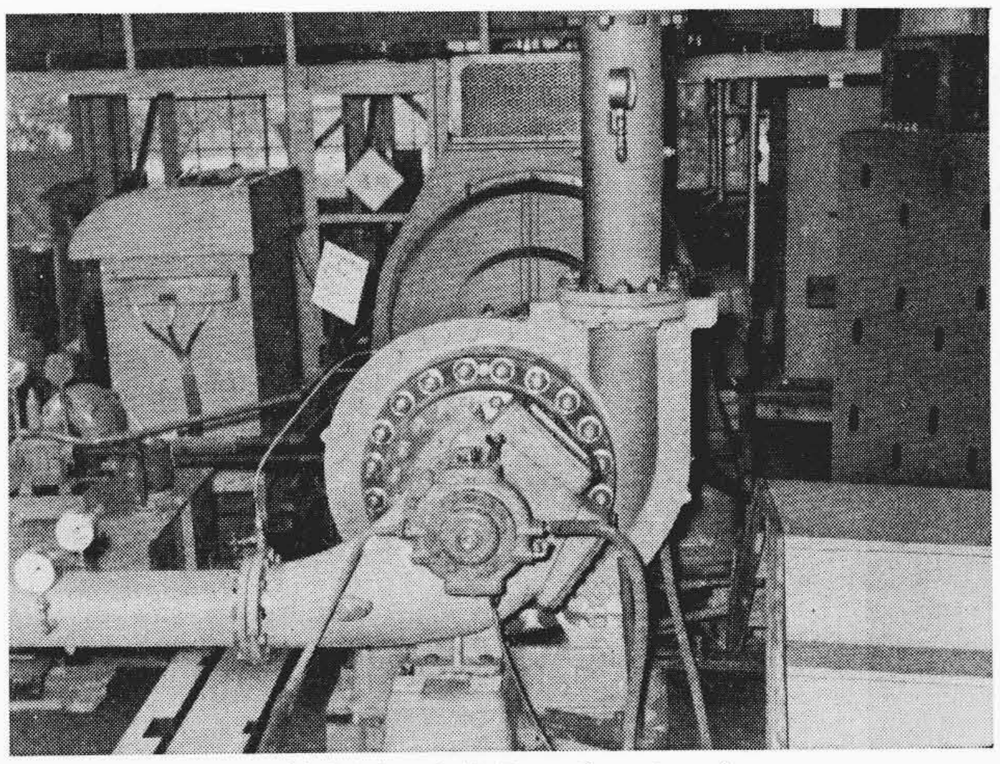
その結果，1段モデルポンプと同様，プリローテーションのある場合のほうがない場合より，非常によい成績を示し，ムーディーの¼乗式によって換算された実物ポンプの効率は90.2%となり，最高効率点における比較回転度も実物ポンプと一致した。

したがって，このモデルポンプを実物ポンプの設計に採用することにした。**第3図**はプリローテーション付きサクションを取付けた実物用モデルポンプを示す。

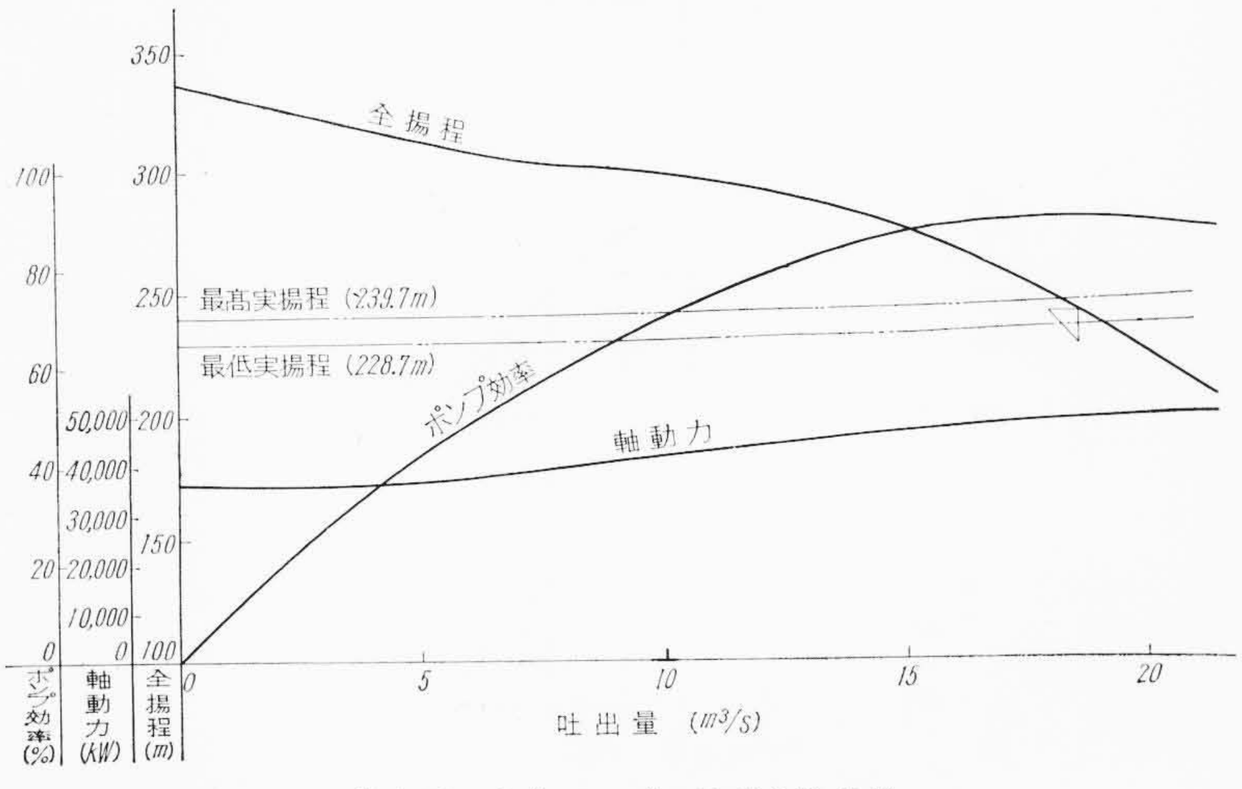
第4図はモデルポンプの試験結果より換算した実物ポンプの予想特性曲線を示す。



第2図　水圧脈動の比較



第3図　実物用モデルポンプ



第4図　実物ポンプの予想特性曲線

以下，実験結果の内容を少し詳しく述べることにする。

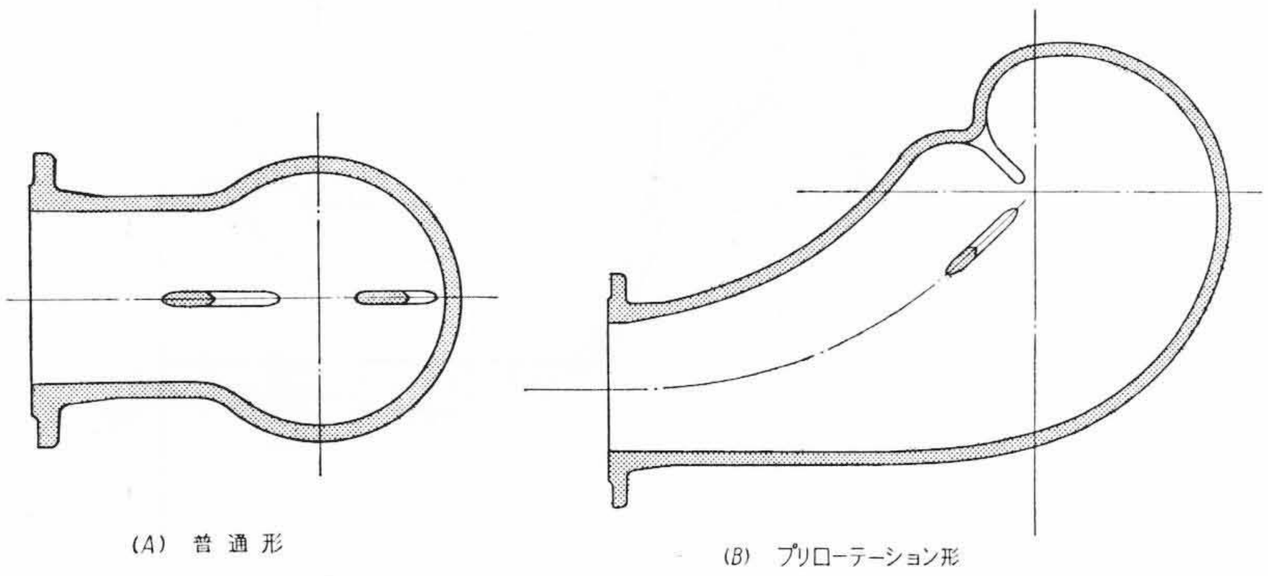
4. プリローテーションの効果

4.1 プリローテーション

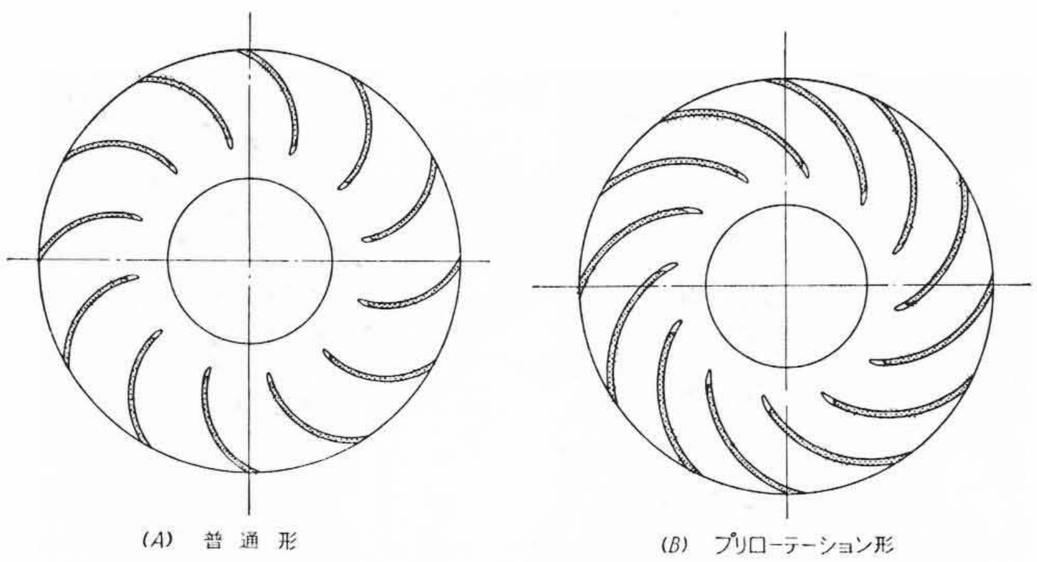
羽根車入口付近における水の流れを整流するために，あらかじめ水にゆるやかな旋回を与えてやると，ポンプの特性が安定カーブとなるばかりでなく，キャビテーション性能がよくなり，また，吐出量の少ない領域での振動が軽減することは，すでにボイラ給水ポンプ，その他で実績を上げていることである。

第5図は実物用モデルポンプのプリローテーションを与えるために設計されたサクションケーシングと普通形サクションケーシングとの形状を示す。

また，**第6図**は同じく実物用モデルポンプの1段目羽根車と2段目羽根車との間にある水返し羽根を，プリローテーションを与えるよう設計したものと，普通形との比較を示す。



第5図　サクションケーシングの形状比較



第6図　水返し羽根の形状比較

4.2 性能の比較

第7図および**第8図**は，実物用モデルポンプにつき同一ポンプを使用して，サクションケーシングと水返し羽根のみを，プリローテーションのあるものと，ないものと交互に入れ替えて試験した結果である。

押込揚程を10mから2mまで変えていった場合の揚程曲線および効率の変化は，プリローテーション付きのものについてはほとんど見られず，吸込側条件の広範囲な変化に対しても安定した性能を維持していることがわかる。

第9図および**第10図**は，キャビテーション性能について調べるために，同じく実物用モデルポンプについて吸込側条件をいっそう大幅に変化させた実験結果である。

この両図から判断できるように，プリローテーションのないものは，押込2mが限度であるのに対し，プリローテーション付のものは，吸込4mまで使用範囲におけるキャビテーション発生は見られない。このときのキャビテーション係数は0.053という非常に優秀な値である。

また，水圧脈動についてもプリローテーションのあるもの，ないものに対して1段モデルポンプと同様の方法により，実物用モデルポンプについてもサクションケーシングの周上4箇所，吐出フランジ1箇所をオシログラフで同時測定したが，その傾向は1段モデルポンプとまったく同一で，プリローテーションによる水圧脈動の減少効果は顕著であった。

4.3 羽根入口付近における水の流れ方

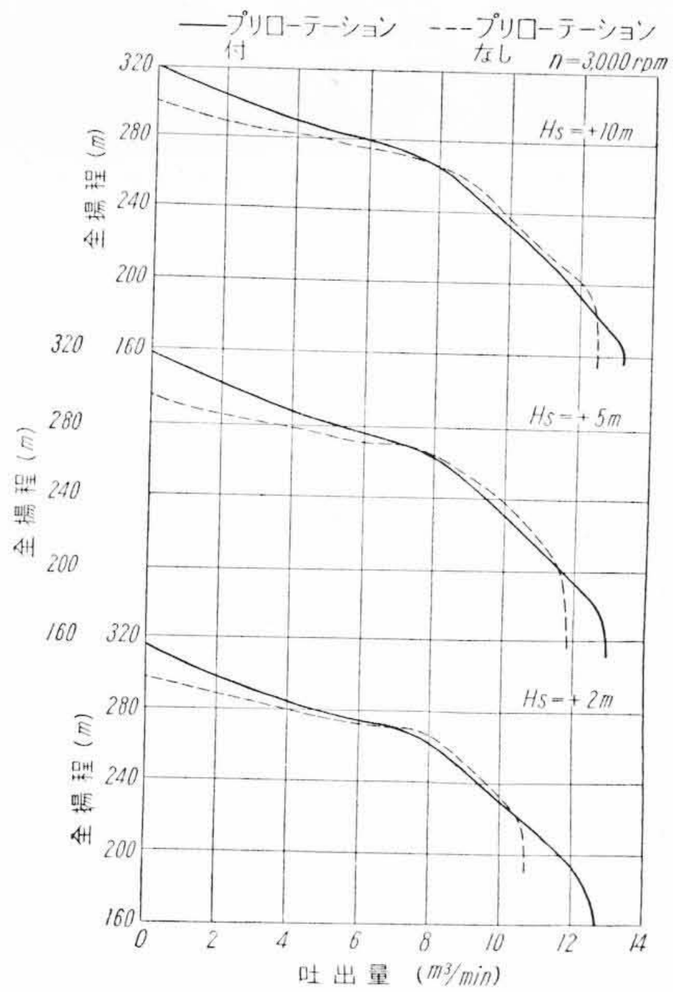
プリローテーションが性能に及ぼす数々の良い効果の原因を調べる一手段として，羽根車入口付近の水の流れ方を1段モデルポンプについて測定した。

測定の方法はサクションケーシングの周上ほぼ4等分位置に，ピトー管差込座を設け，ピトー管の突込深さを変えて，水の流れ方向，流速を記録した。

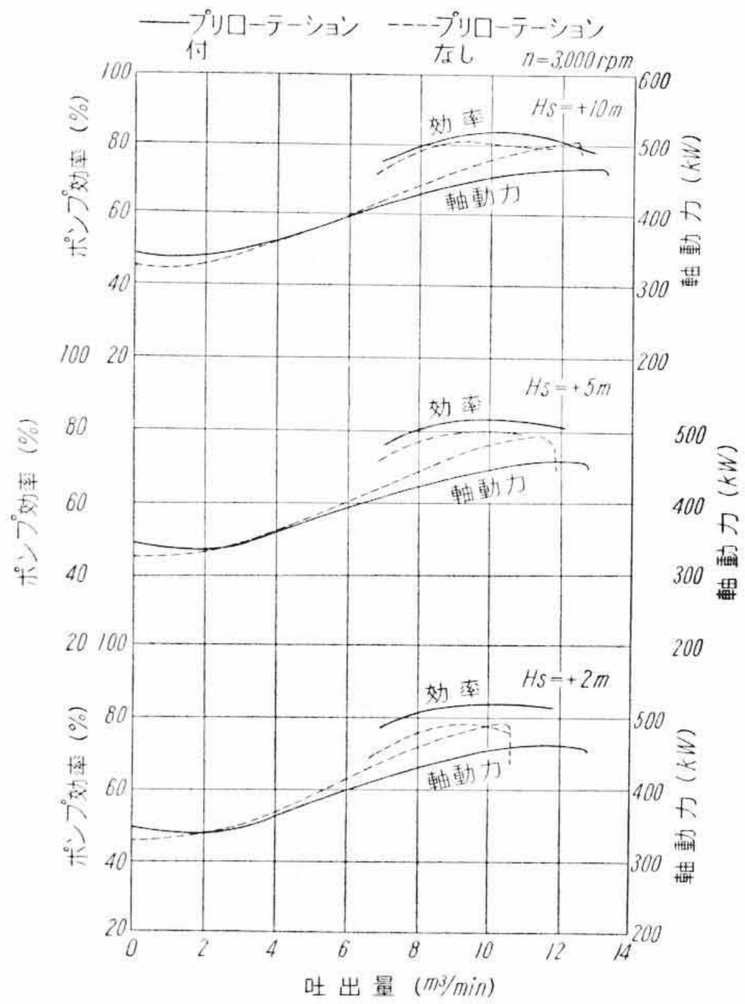
ピトー管には5孔ピトー管を使用した。

第11図は1段モデルポンプの羽根車およびサクションケーシング部分の断面図で，5孔ピトー管の差込位置を示す。

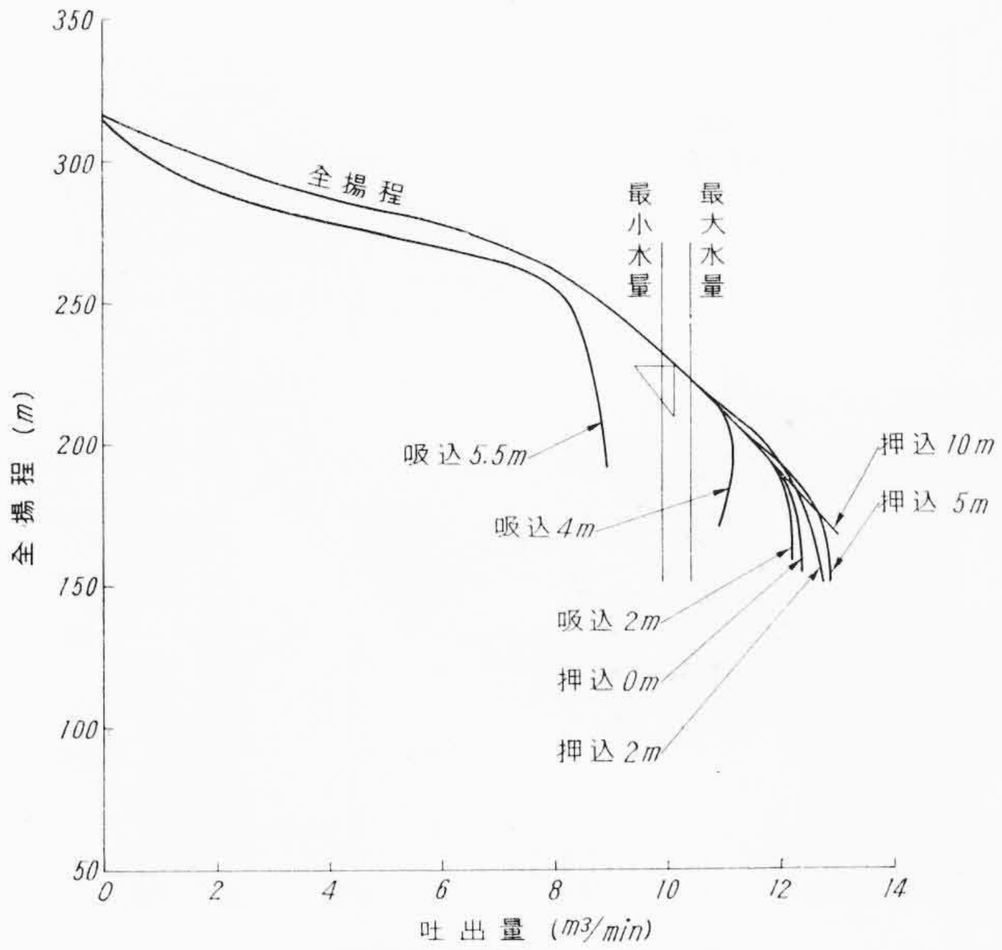
第12図および**第13図**は吐出量を色々と変えた場合のサクション



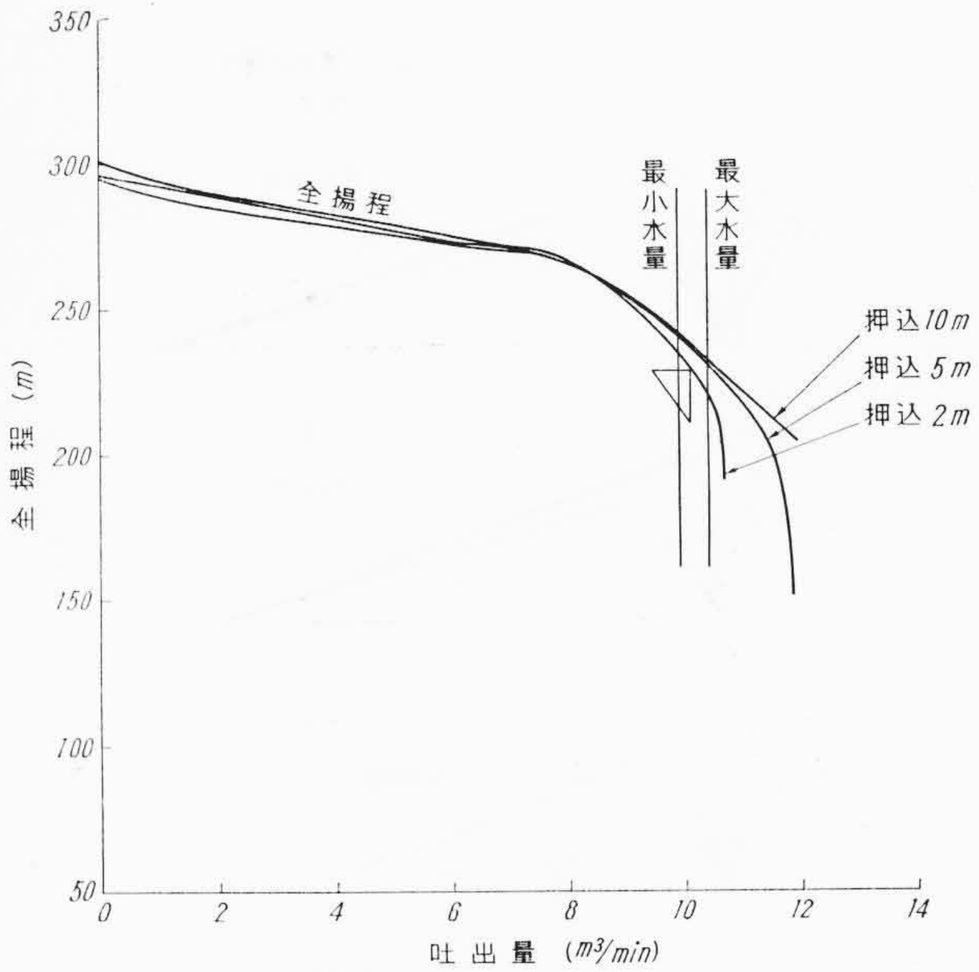
第7図　揚程曲線の比較



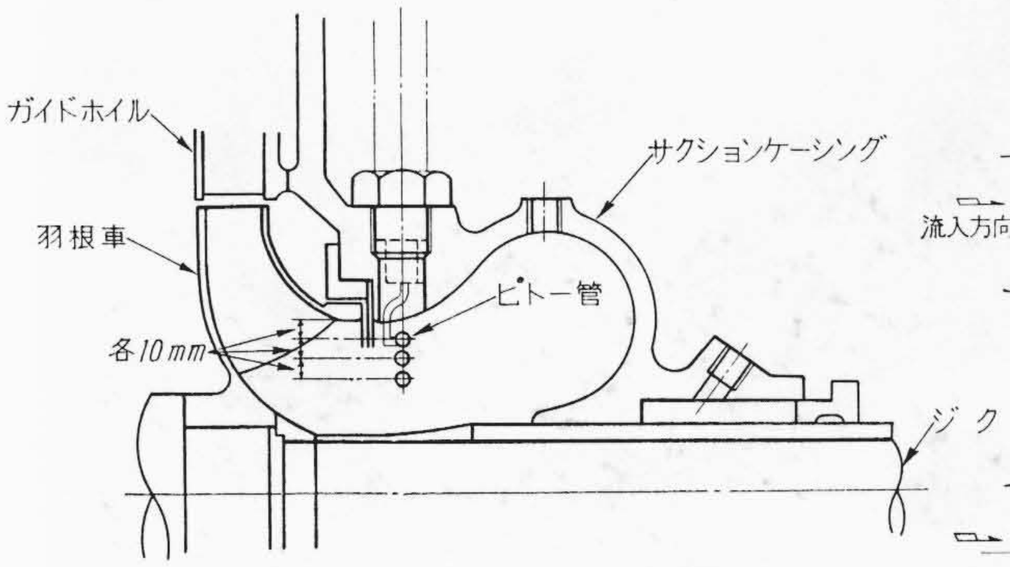
第8図　効率，軸動力の比較



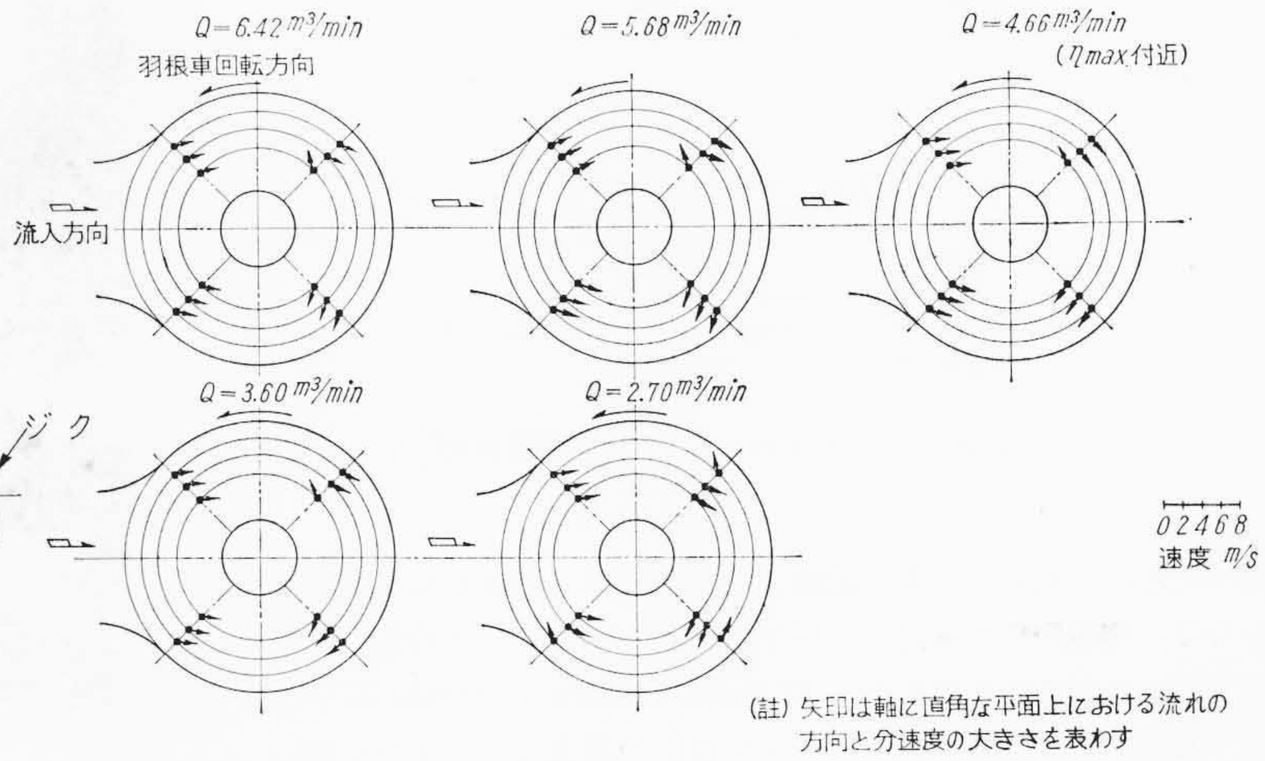
第9図　キャビテーション試験(プリローテーション付)



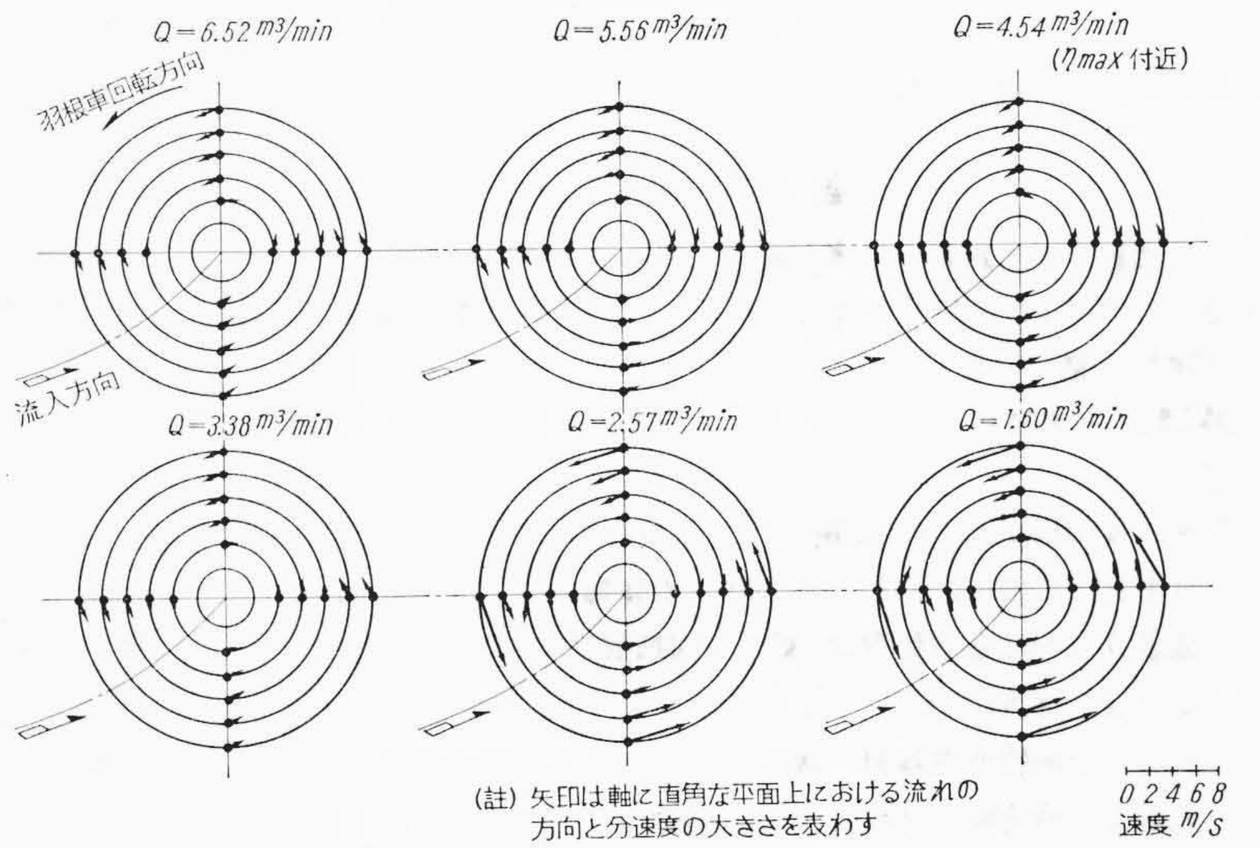
第10図　キャビテーション試験(プリローテーションなし)



第11図　羽根車入口付近断面図



第12図　普通形サクションケーシング内の水の流動状態



第13図　プリローテーション付サクションケーシング内の水の流動状態

ケーシング内における水の旋回状況を，プリローテーション付きのものと，なしのものについて示したものである。図は軸に直角な平面における流れの方向と分速度を示したもので，水に予旋回を与える力の大きさと見ることができる。

羽根車の回転方向は紙面に向って左回転であり，サクションケーシングへの水の流入は左側からである。

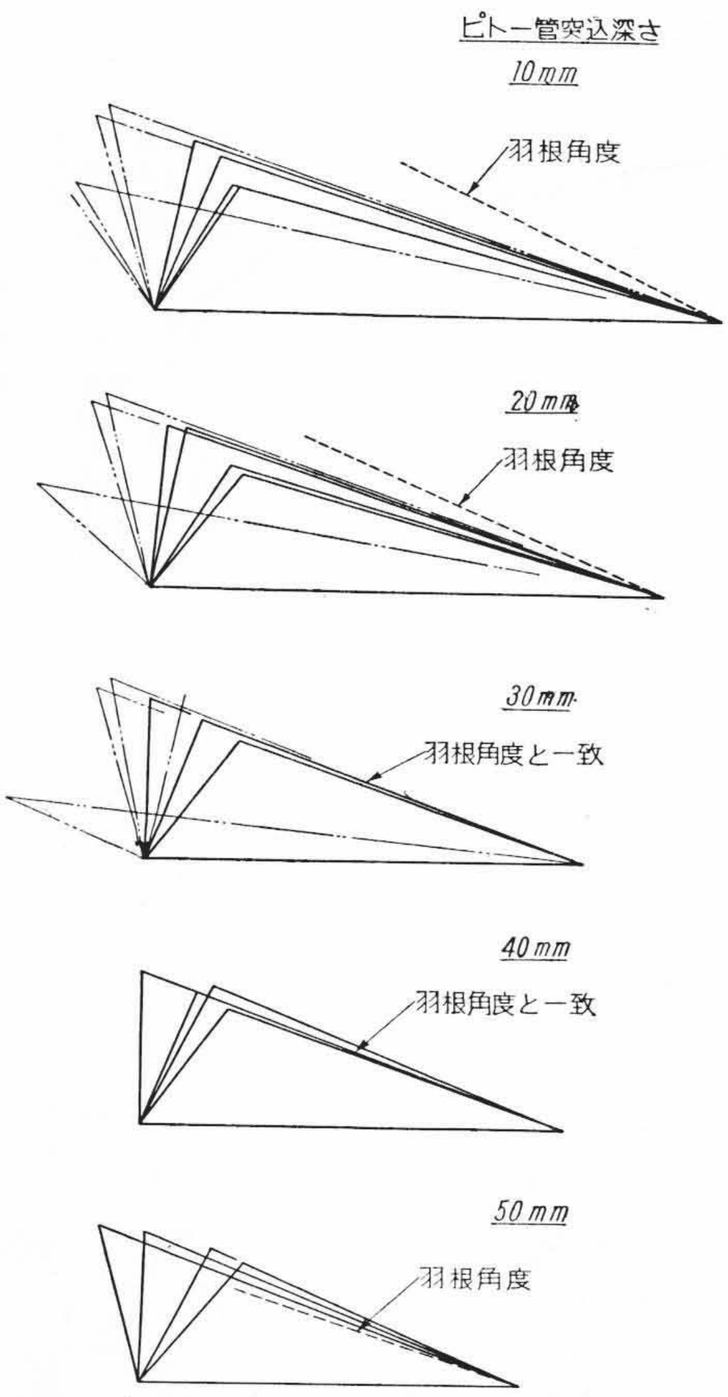
第12図と**第13図**を比較してわかるとおり，プリローテーションなしの場合は，流れの方向が一様でなく，ぶつかり合うところがあり，旋回方向がほぼ羽根車の回転方向と反対方向であることがわかる。

これに対し，プリローテーション付きの場合はほとんど流れの方向は統一され，整流された旋回状況を示している。旋回方向も羽根車の回転方向に一致しているので，羽根車への流入が円滑に行われることが推定される。

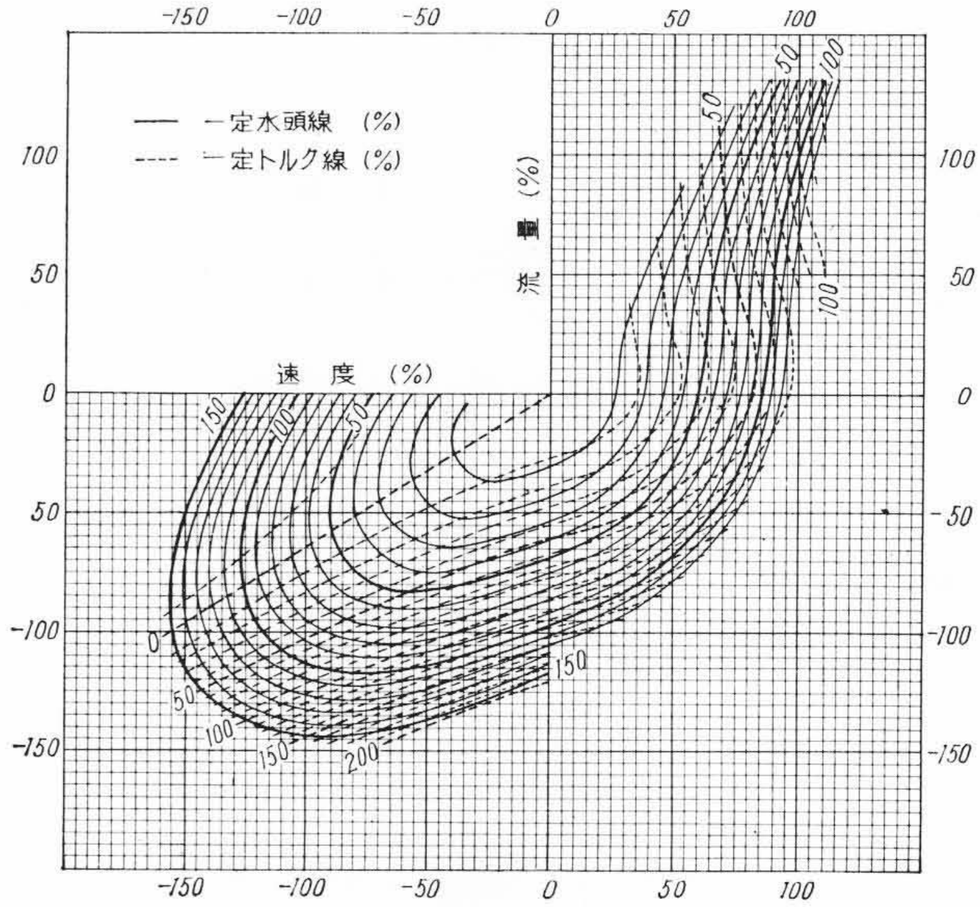
第14図は最高効率を発揮する吐出量における流入角度と速度を定量的に採り上げ，羽根車入口の速度三角形を示したものである。

点線で示したものは設計上計算された羽根車の入口角であり，実線で示したものは，プリローテーション付きサクションケーシングを使用した場合の実測値より作図したもの，二点鎖線で示したものは，プリローテーションの付かない普通形サクションケーシングを使用した場合の実測値より作図したものである。

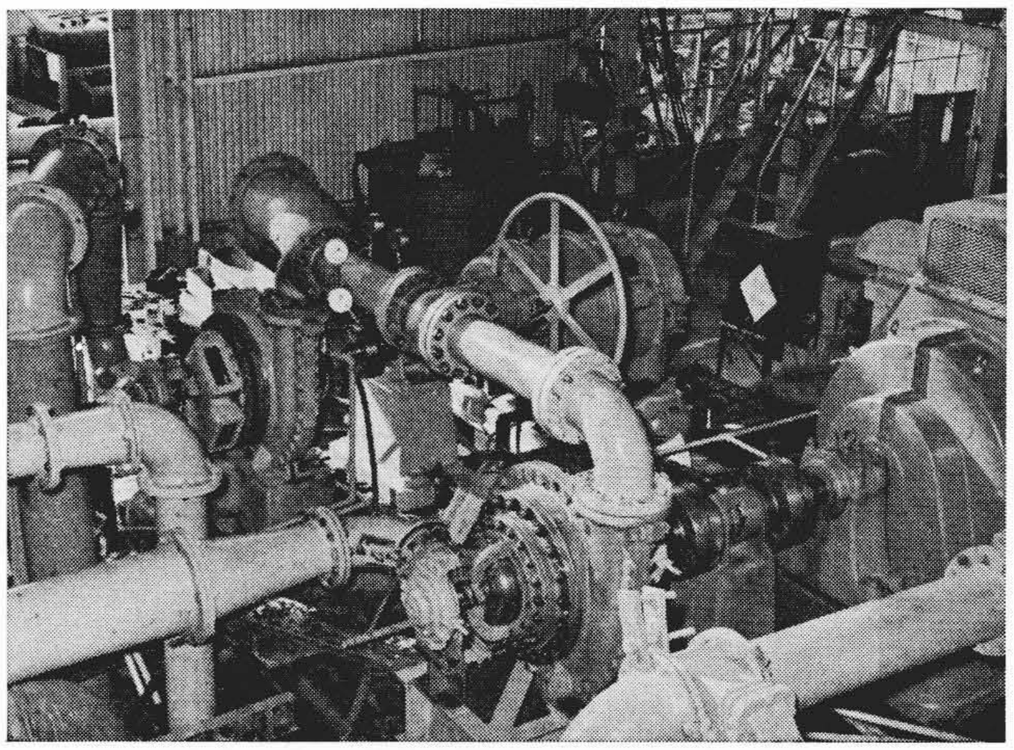
5孔ピトー管の突込深さは10mm間隔で，羽根車入口径の縁より中心に向って突込んで行ったもので，図はそのそれぞれについて



第14図　羽根車入口における速度三角形



第15図　全般特性曲線図



第16図　正転逆流試験装置

並べたものである。なお，速度三角形が実線，鎖線とも4個ずつあるのは，測定箇所が前述のとおりサクションケーシングの周上に4箇所設けてあるからである。突込深さ40mmと50mmについては，都合によりプリローテーションなしの測定はできなかった。

図を見てわかるように，プリローテーション付きの場合の羽根車への流入角は，いずれの場所においてもほぼ計算値と一致しているが，プリローテーションなしのものは，大きく食い違っている場所があるという結果がでた。

5. 全　般　特　性

電源遮断による鉄管内の水撃現象を計算するためにはポンプの正常運転特性のほかに，正回転逆流試験，さらに逆回転逆流の水車特性試験が必要である。

第15図は実物用モデルポンプについて試験して求めた全般特性曲線である。

本図は$n=0.5$において測定を行い，他の値に対しては相似法則により算出したもので，たとえば100%水頭線についてこれをたどれば，流量0における回転数は85%，回転数0における逆流量は96%，走り放し速度は126%などの特性を示している。

これらの全般特性曲線群と後に述べるニードル形吐出弁のモデルの正流および逆流時の特性とより，実物ポンプの最大水圧上昇値，最大逆転速度および最大逆流量を保証値内に納めるよう予測計算することができる。これらの値はいずれも保証値を上回る優秀な値とすることができた。

第16図は正転逆流試験の状況を示したものである。

6. ニードル形吐出弁のモデル

前項に述べた水撃現象計算のためには，吐出弁の閉特性が必要である。モデル比はポンプモデルに合わせて10とし，水力学的に相似となるよう製作した。

試験は正流の場合，逆流の場合につきそれぞれ開度と抵抗係数との関係を調べた。閉速度は沼沢沼の場合と同様二段動作とし，計算と実測により最終速度を決定した。

7. 結　　言

以上，諸塚揚水発電所56,500kWポンプのモデル試験のあらましを述べた。このモデル試験の結果，実物ポンプの設計に採用できる優秀な性能のモデルポンプを製作することができたが，その著しい特長としてプリローテーション付き構造による性能の向上があげられる。このプリローテーション効果を細かに実験し，さらに羽根車入口付近の水の流動状態を実測して，プリローテーションの効果の一端を裏づけできたことは大きな収獲であった。

終りに，本モデル試験は九州電力株式会社との協同研究によって進められたもので，ここに多大のご指導を賜った九州電力株式会社の関係各位に厚くお礼申上げる。