

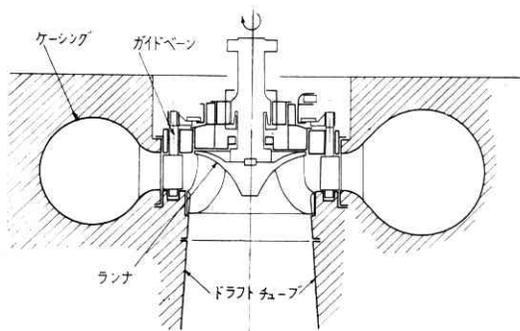
写真測量の水車形状の精密検査への利用

丸 安 隆 和・大 島 太 市・津 田 昌 明

地上写真測量を、三次元的精密測定に応用する一例として水車のランナ形状の精密検査を取り上げた。ランナは非常に複雑な形状であり、従来の測定検査の方法では、測定のための基準面を正確に決定することが困難であり、部分的に相対的な寸法の比較はできても、絶対値として全体をおさえることは不可能であった。今回東京電力KK水車技術研究委員会の依頼で実施した写真測量法によるランナ形状の精密検査は、おそらく初めての試みであり、完成したランナの形状や相互の関係位置をはっきりつかむことができた。

§ 1. ま え が き

水力発電所に使われる水車にはペルトン水車、フランシス水車、およびカプラン水車の3種類に分けられ、落差その他の使用条件によってそれぞれの水車が使い分けられている。これらの水車の形状は、その効率性能に影響するところが大きいので、一般に理論計算とモデル実験とからその形が決定されている。フランシス水車は、中心に羽根車（ランナ）があり、その外周にそって案内羽根（ガイド・ベーン）が並んでいて、案内羽根は一樣に角度を変え、その開度によって水車に供給する流量を加減する仕組みのものであるが、ランナは一般に鋳造であるので、羽根の取付角や、ピッチが狂って不揃いを生じ易いが、羽根形状が三次元的な複雑な曲面をなしてい



第1図 フランシス水車

るので、形状に狂いがあっても判定しにくく、その修正も十分行ない難い状態である。羽根の形状の狂いが性能にどんな影響をおよぼすかを知ることが、重要な課題であることはたしかであるが、複雑な形をしたランナの寸法を正確に測定することは非常にむづかしいことである。たまたま東京電力KK水車技術研究委員会（委員長高木利夫）より写真測量の方法で水車のランナの形状を測定することの可能性についての照会があり、これを実際に試みることになった。

従来このような対象物の検査は実際に尺をあてて、測定検査をしていて、測定の基準となる面を正確にきめる

ことが困難であり、したがって部分的に相対的な寸法の比較はできても、絶対値として全体をおさえることがむづかしいことであった。特に羽根自体が複雑な形状をしているので、軸に対してのある断面形状を調べるような場合には、いっそう測定が困難となる。このような複雑な形をした物体の形状寸法を正しく把握するには、写真測量による方法は非常に有効である。

さらに写真測量にはつぎのような利点が考えられる。

1) 撮影時の被写体の状況は、撮影乾板を図化機に挿入すれば再現できるので、必要の際は何回でも同じ状況でチェックすることができる。

2) 撮影された乾板内の被写体はどの点でも同一精度で測定でき、またチェックができる。

3) ランナの出口角、出口端、軸に対する直交断面、円筒断面等任意の断面によって、きった断面形状の測定ができる。

4) 測定された結果は、直接図面にすることができ、また機械に付属している座標記録機で各測定点の三次元の値を記録することができる。

§ 2. 測定に使用した水車要項および作業場所・日時
測定に使用した水車は東京電力株式会社の箱島発電所の水車で東京芝浦電気株式会社製作のものである。

水車要項はつぎのようである。

有効落差	80.0 m
流量	25.0 m ³ /sec



写真1 写真撮影の便宜のためにランナを横に整置した。撮影に先立ってハレーション防止のために塗装をほどこした。

出力 16,750 kW
 回転数 250 rpm
 ランナ出口径 1,884 mmφ
 比速度 135 m-kW

撮影は蒲田の東芝工場で行ない、測定図化は東大生産技術研究所・丸安研究室で行なった。

作業はつぎのような日程で進められた。

昭和37年9月25日・26日 塗装のための実験・検討

昭和37年10月4日・5日 撮影点、標定点の設定および撮影作業

昭和37年10月12日～20日 A7 オートグラフによる図化測定

§ 3. 水車測定に写真測量を用いる場合の問題点

写真測量には飛行機より連続的にとった写真を用いて行なう航空写真測量と地上で撮影した写真を利用して行なう地上写真測量とがあるが、いずれの場合にも、三次元的の測定が可能であるが、精密な立体測定への地上写真測量の応用面は最近著しく開発され、利用されるようになってきた。水車測定もその一つである。

従来地上写真測量は、ダム地点や石切場などのような、直接近づいて測定することの困難な場所の測量に利用されてきたが、この場合には写真機より被写体までの距離はかなり遠く、図化縮尺は 1/200～1/1,000 のものが多かった。

これに対して、水車測定の場合には、極めて高い精度の測定が要求され、図面も 1/1～1/5 程度の縮尺で描くことが要求される。この要求を満たすためには、至近距離撮影の写真測量が必要となり、撮影作業から図化作業にわたる全作業について、地形図作製の場合とはまったく異なった観点に立って考え直さなければならない。

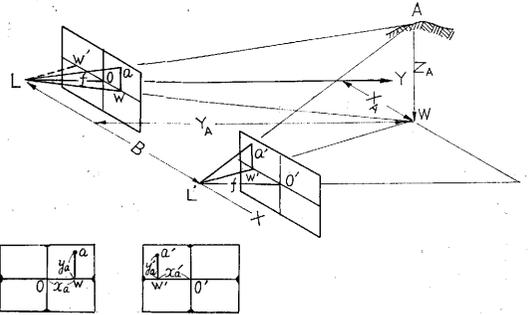
たとえば近距離物体の撮影に適するように、カメラの画面距離を修正したり、モデル表面の反射を防ぐ方策を講じたり、標定点の設置、図化および測定方式についても最適の方法が必要となるのである。

§ 4. 写真測量の原理および使用機械

写真測量の場合には適当な間隔（撮影基線）だけ離れた2点* からとられた一対の写真を利用して測定図化を行なうのであるが、その2枚の写真を両目で別々に、すなわち左の写真を左の目で、右の写真を右の目でながめれば、ちょうどカメラ位置に目をおいてながめるのと同じ立体感覚が得られる。しかもその場合に、カメラ間隔と両眼の間隔が異なるので、実際に目でながめるよりも立体観がもっと誇張されてあらわれる。写真測量ではこの原理を使って、2枚の写真より合成された拡大立体模像について測定を行なうものである。

* 航空写真撮影の場合は飛行機よりある間隔ごとの連続撮影を行なうが、その中の相隣れる2枚がこれに相当すると考えられる。

地上写真測量の場合について考えてみると、第2図に示すように、撮影基線長Bだけ離れた2点から、カメラ軸を水平にかつ、平行に設置して2枚の写真を撮る。カメラ軸は必ずしも水平かつ平行でなくても、その空間における方向が定まっておればよいわけであるが、あとの図化測定の処理を簡便にするためにそのように行なわれる。撮影基線長と被写体までの距離比は使用写真機、図化機、撮影条件等によって異なるが、だいたい 1:5～1:15 の間が望ましい。



第 2 図

第2図の点Aは写真乾板上では、それぞれ a, a' として写る。その2点の乾板中心（カメラのレンズの内部節点より乾板面におろした垂線の足で普通写真主点と呼ばれる）よりの座標値を $(x_a, y_a), (x', y_a')$ とし、 $x_a - x_a' = p$ （これを水平絶対視差差という）とすると、A点の座標値は次式であらわされる。

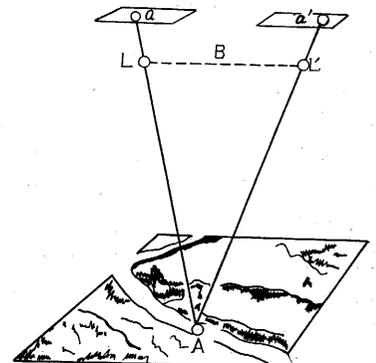
$$X = \frac{B}{p} x_a$$

$$Y = \frac{B}{p} y_a$$

$$Z_1 = \frac{B}{p} y_a \text{ or } Z_2 = \frac{B}{p} y_a'$$

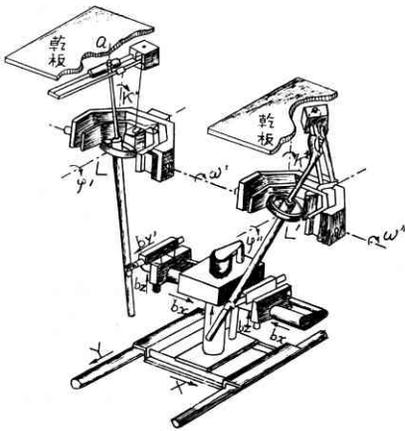
これらの式で B は撮影基線長、f は写真機の画面距離をあらわしている。

このようなA点の X, Y, Z 値を自動的にハンドルの回転操作により、図化測定を行なうのが A7 オートグラフで、航空写真測量、地上写真測量の両方に使用でき最も精度の高い図化機である。その原理としては、中心投影によって得られた2枚の写真から正射投影図を作る機械投影方式をとっている。



第 3 図

上述のA点の空間的位置をきめるのに、撮影された2枚の写真関係をこのオートグラフに縮尺化して再現する。第3図はそれを示し、A点の位置は写真上の a, a' より $aA, a'A$ の光線のかわりにスペース、ロッドとよばれる真直な鋼棒でおきかえて再現される。図化機に撮影状況を再現するために、内部標定と、外部標定が行なわれる。内部標定は2点で撮られた写真の相互関係をきめることであり、外部標定は二つのカメラの被写体に対する絶対関係を再現する作業をいうのである。A7オートグラフの場合には、カメラの投影中心は、第4図に示すカルダン軸の交点 L, L' であらわされ、そのスペース、ロッドの方向が第3図の $aA, a'A$ に相当し、そのロッドの延長尖端が乾板面上の a, a' 像をさしている。



第 4 図



写真 2 A7 オートグラフ

このステレオ模造の表面を乾板面下 70 mm のレンズ光学系の中にある直径 4/100 mm の丸い黒点の測標とよばれるものでたどって図化を行なう。この追跡移動を行なうのに、写真2に示す二つのハンドルと足盤が使われる。その動き (X, Y または X, Z) は本体に付属する描画台上に伝えられる。右ハンドルと足盤の動きは、自由に切り換えることができるので、 X, Y 断面への正射投影図のほか、 X, Z 断面に投影した図面も作ることができる。この機械には座標記録装置がついていて、測定

している点の座標値 (X, Y, Z) を自動的に記録させることができるので、図を描くだけでなく、測定結果をデジタルの記録として保存できるのが特徴である。

前述した標定作業を行なうためには、写真機の画面距離 (f) とレンズの節点より乾板面への垂線が乾板面と交わる点の位置 (これら二つの値を内部定位という)、および撮影基線長 (B)、撮影時における空間軸の回りの回転角 (φ, ω, K) (これらの値を外部定位という) が正確にきめられなければならない。カメラ本体の上部についている望遠鏡と気泡管がこの目的に使われる。

写真測量は乾板に縮写された映像をもとにして測定するのであるから、レンズの僅かな収差も誤差の原因になるし、乾板面の凹凸や伸縮や乾板面とレンズ軸との垂直度も精度に大きな影響をあたえる。ツアイス社の C3B 地上写真経緯儀はこれらの要求を満たすようにつくられた

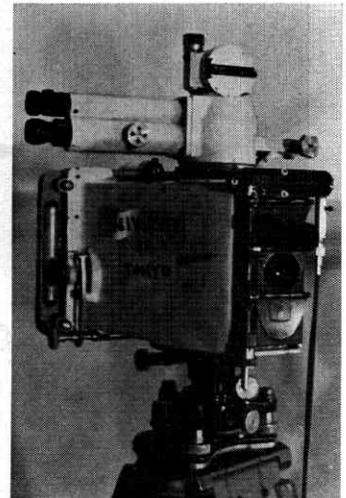


写真 3 C3B 地上写真経緯儀

ものである (写真3参照)。使用されているレンズは、オルソプロタールで焦点距離 193.22 mm、最大わい曲収差は 2~3 μ m、しぼりは $f=25$ に固定されている。

焦点面に乾板位置が固定されるような仕組であるので、近距離撮影の場合には、撮影距離に応ずるように乾板面を調節する装置を乾板正定面の上下に取り付けた。

§ 5. 塗装の予備実験

(1) 方法の概要

ランナは鋳造であるので、表面反射がつよく、そのままの状態で撮った写真では、表面のハレーションのために測定は非常にむづかしい。そのために、表面の反射を防ぐ塗料の塗布が必要であり、その塗布の状態が測定精度を左右すると考えても差し支えないくらい、重大な影響を及ぼす。そこでどのような塗装方法がよいかを調べるために、水車を撮影する同じ場所で、同一の撮影条件のもとで塗装のための予備実験を行なった。

実験は半径 160.02 mm 高さ約 400 mm の鉄管 3 本を使用し、1本の管につき半面ずつ、2種類、計6種類の塗装を行なった。円筒管を使用したのはあとで円管表面の測定を写真測量の図化機で行なって、設計半径値と比較してその測定誤差をチェックするためである (写真4、写真5参照)。

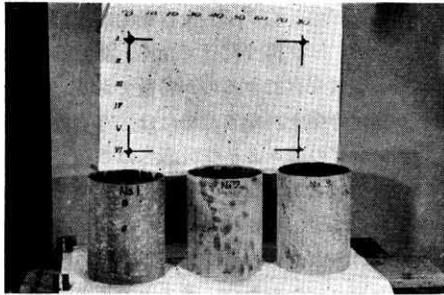


写真 4

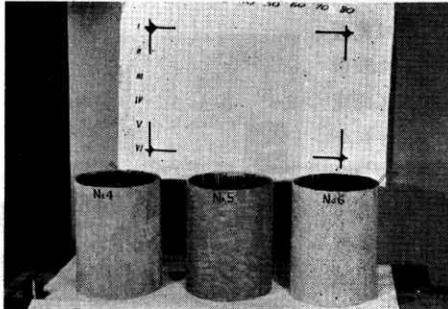
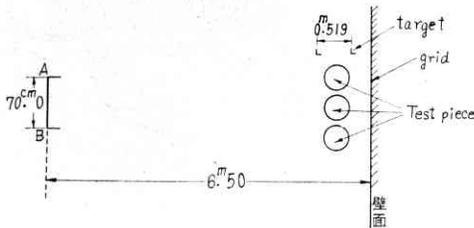


写真 5



第 5 図

第 5 図に示すようにテストピースを壁面の前に置き、壁面より 6.50 m 離れた地点で、壁面と平行な 70 cm の基線長 \overline{AB} の両端で C3B 地上写真経緯儀を用いて、基線に直角に、壁面にむかって撮影を行なった。

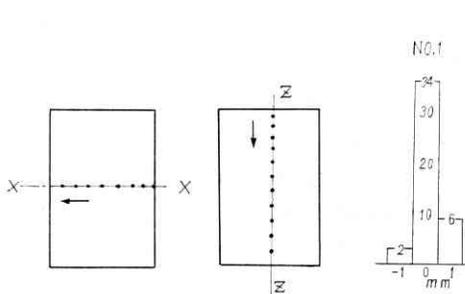
(2) 測定値のばらつき

撮影した乾板を用いて、A7 オートグラフによって、X 方向(横方向)と Z 方向(高さの方向)について、同一直線上、同一間隔で、測標を 1 点ごとに円管表面上に誘導して、点として測定を行なった(第 6 図参照)。その空間座標値は EK3 座標記録機(写真 2 参照)によって自動的に記録させ、その測定値のばらつきを調べた。各点の測定は互いに無関係に 5 回ずつ読定した。地上写真測量の場合には、一般に X 方向(横方向)と Z 方向(高さの方向)の読みとりのばらつきは、ほとんど無視できるほど小さいに較べて、Y 方向(奥行方向)のばらつきが、比較的大きく出るので、このばらつきを X 方向(横方向)の点と Z 方向(高さの方向)の点とについて検討してみた(第 6 図参照)。その測定値のばらつきを頻度曲線であらわしたのが第 7 図で、横方向にばらつきの値を示し、縦方向にその頻度(回数)をあらわした。

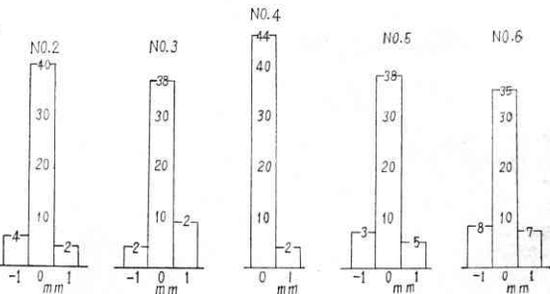
(3) 半径チェック

上記 A7 オートグラフによる測定座標値より、半径を求めて、設計半径長と比較した。これには X 方向上に測定した 8 点の中両測点を省いた 6 点を用い、デミングの方法*による最小自乗法の計算式より半径を求めた。

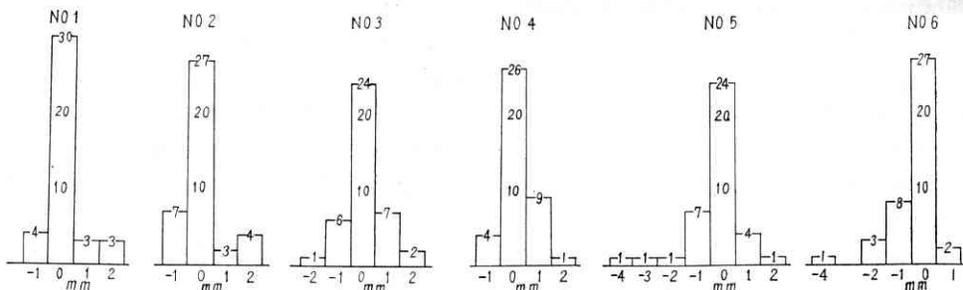
こうして計算結果より求めた半径は、つぎの表のようになる。



第 6 図



第 7 図 (1, 2) X 方向の測定値の頻度グラフ



第 7 図 (3, 4) Z 方向の測定値の頻度グラフ

* 参考文献 応用数学講座第 5 巻 (コロナ社発行)

Test piece	計算結果より求めた半径値 r_i	設計半径長 $r_0=160.02$ mm との差 $\Delta r_i=r_0-r_i$
No. 1	$r_1=162.52$ mm	$\Delta r_1=+2.50$ mm
No. 2	$r_2=164.27$ mm	$\Delta r_2=+4.25$ mm
No. 3	$r_3=160.33$ mm	$\Delta r_3=+0.31$ mm
No. 4	$r_4=161.99$ mm	$\Delta r_4=+1.97$ mm
No. 5	$r_5=161.90$ mm	$\Delta r_5=+1.88$ mm
No. 6	$r_6=161.31$ mm	$\Delta r_6=+1.29$ mm

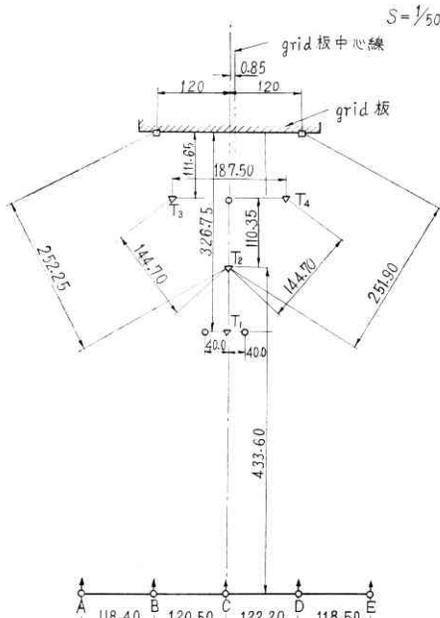
以上の結果より、塗装の種類により測定値が非常にばらつくことが分かる。円筒面の読定値のばらつきと、半径チェックの結果から No. 3 の塗装が最もすぐれた結果を示すことが分かった。実際塗布の場合にはこの模様を水性塗料で塗布してから、ガーゼを使ってラッカー吹付けを加えて行なった。

§ 6. 撮影点の選定および撮影作業



写真 6

写真撮影と図化測定の便宜のためランナの回転軸が水平になるように横にしてセットした。撮影基線はランナの外縁部に平行に設けなければならない(写真6)。そのために、ランナ外円周の両内側より下げ振りをおろして、床上に点



第 8 図 水力発電用ランナ地上写真測量、撮影点および標定点配置図

をとり、その両点より等距離になる、なるべくはなれた 2 点をとり、T 2 セオドライトで延長して縦軸方向をきめた。

第 8 図に示すように、その方向線上に C 点を取り、C 点におけるランナの縦軸方向線との直角方向線上に図のように、5 撮影点を配置した。これより 4 対の乾板を利用して、図化測定ができるが、主として両側の対を用いてなるべく羽根のシャドー部分の奥まで測定できるように試みた。

ランナ前部に 4 点、ランナ外円周部に 4 点の標定点をおき、さらにランナの後部にグリッド板をたてて、その表面に 20 cm 方眼のけがき線を入れ、図化測定の際の標定点とした。なおランナの回転中心には、写真撮影の際に明瞭にわかる十字線を入れた。

写真 7 は C 点で C3B 地上写真経緯儀で撮影された密着写真を示している。

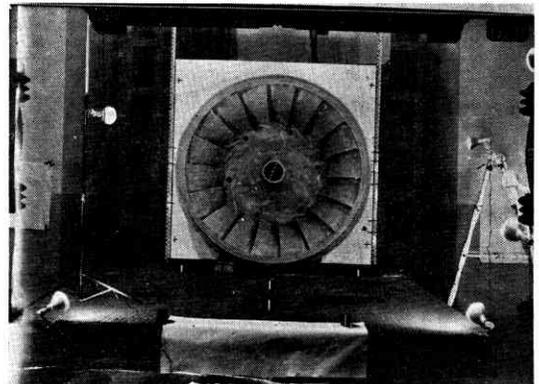
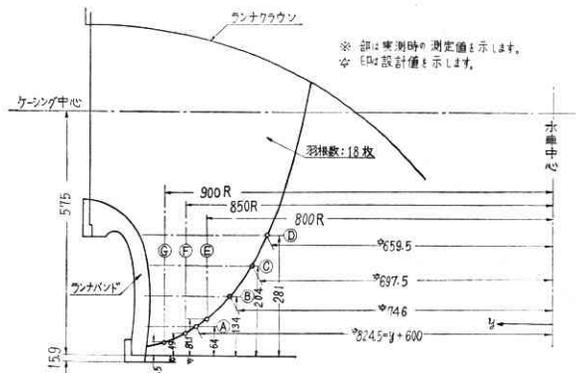


写真 7 C3B 地上写真経緯儀で撮影した密着焼付写真

撮影に際しては 500W 電球 8 個を照明に使用し、光線が水車の正面に一律に照されるように照明の配置を工夫した。

§ 7. 図化測定作業および成果品について

図化測定作業は A7 オートグラフを使って、機械梯尺 1/15、図化梯尺 1/2.5 で実施した。その場合の Y 方向(奥行方向)の描画の範囲は 2.10 m から 7.27 m であ



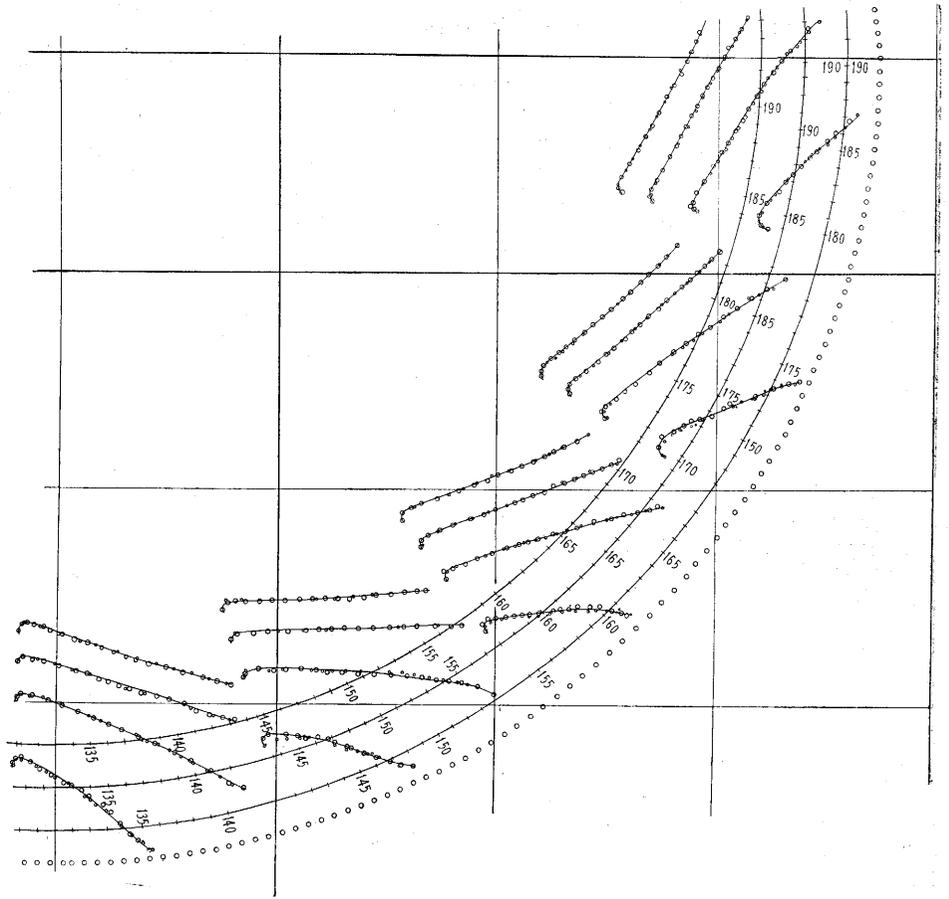
第 9 図 ランナ羽根型測定位置図

る。

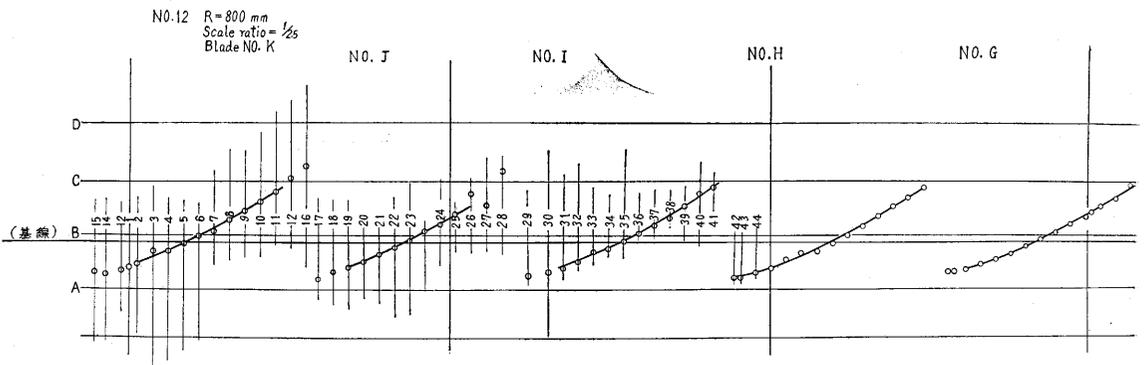
それより得られた
成果品は

- 1) 1/2.5 のランナ正面図
- 2) 撮影基線と平行な4断面で切った各羽根の切断図
- 3) 三種類の半径をもつ円筒形が切断する各羽根の切断図

最初に 1/2.5 の水車正面図を描き、その上に撮影基線長に平行な平面で切った切口を、ランナバンドの沓の表面より奥行方向に 79.9 mm, 149.9 mm, 219.9 mm, 296.9 mm (第9図参照) の4平行平面(図のA③C④)で切断した切口を描画した。これらはすべて点として描画し、あとでそれらの中間値を通る曲線を



第 10 図



第 11 図

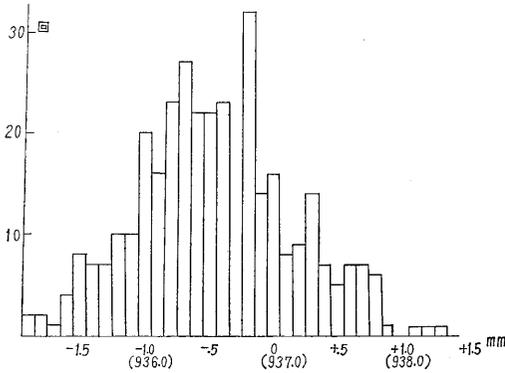
推定して画いた。その成果は第 10 図に示される。さらに水車中心より、半径 800 mm, 850 mm, 900 mm の三つの円筒面で切断した切口を画くために、先に画いた、円周図上で 8 mm 間隔の各点についての空間座標値を IBM 座標記録機で記録し、それを図示した一部が第11図である。

§ 8. 得られた成果の精度について

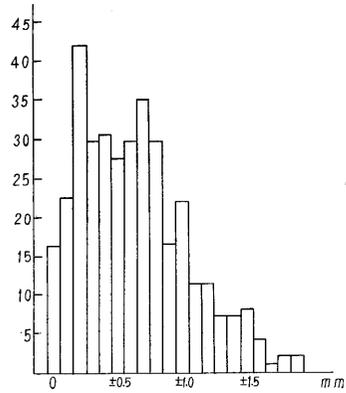
得られた成果品が、どのくらいの精度で測定されてい

るかは塗装実験の所でもすでに述べたのであるが、ランナ正面図作製の際に、ランナバンドの内側の点の空間座標値を座標記録機で記録し、そのランナ中心の座標値から、写真測量測定による半径の長さを計算して、設計半径長と比較して写真測量による半径測定の際のばらつきの状態を調べてみた。第 12 図、第 13 図に円周上 375 点の度数分布図と累積度数分布図を示している。

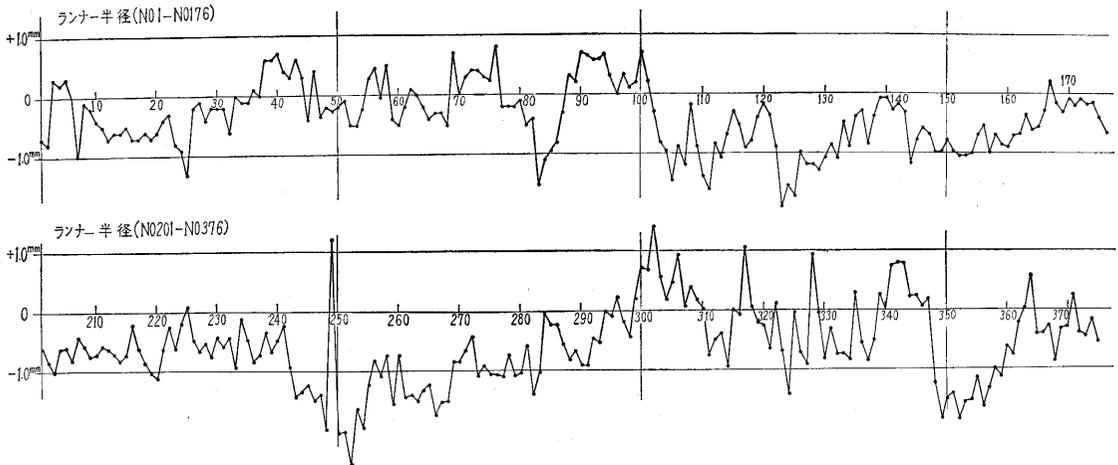
また全体の設計半径長と比較した中等誤差は 0.57mm



第 12 図 半径相対度数分布図 (No. 1~No. 375)



第 13 図 半径累積度分布図



第 14 図

であった。

なお、各測定値の設計半径長の差を一覧してあらわしたのが第 14 図である。

§ 9. 実績成果

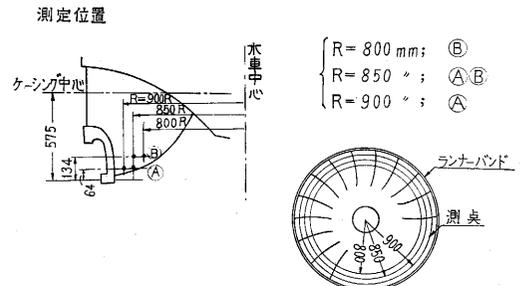
このようにして写真測量によって得られた図と設計図を比較して前記水車技術委員会において種々の検討が行なわれた。

その結果はつぎのようである。

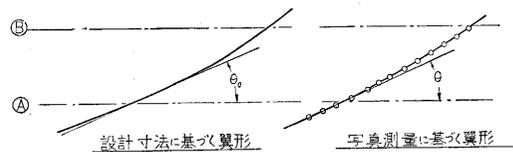
1) 写真測量で画いた正面図と、設計正面図とをあわせ比較検討した結果、個々の羽根形状は比較的よく出来ている。

2) 円筒断面をもとにして各半径の翼を描き、これとランナ軸に直角な平面(A)(B) (第 15 図参照) との交角 θ を各翼形 (18 枚, A, B, C……と名づける) について測定し、設計値 θ_0 との差 $\Delta\theta (= \theta - \theta_0)$ (第 16 図参照) のばらつきを調べ、そのばらつき結果を第 17 図に示した。

最大 1° くらいのくい違いで非常によく製作されていることが分かる。



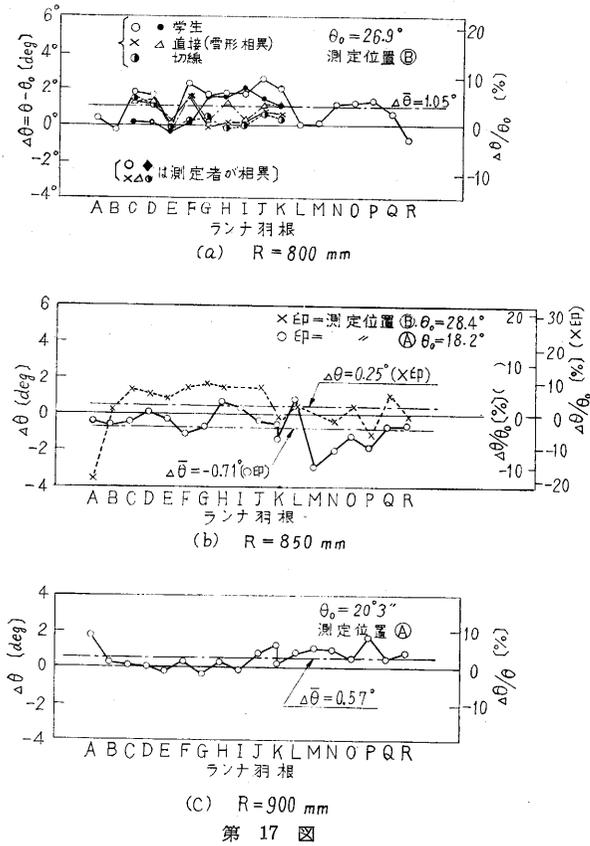
第 15 図 ランナ羽根角度のバラツキ (写真測量測定より)



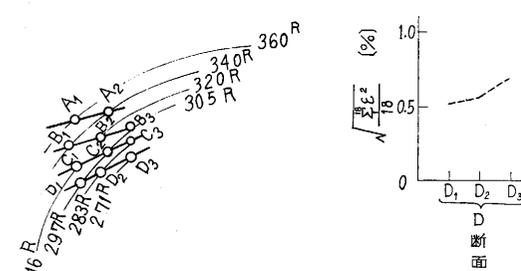
第 16 図

3) 羽根ピッチ誤差の測定は第 18 図に示す 11 点について各羽根ごとにその弦長 t を測定した。

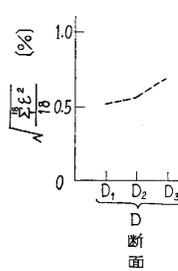
$$\text{平均弦長 } t_m = 2r \sin(\pi/18) = 0.347296r$$



第 17 図



第 18 図

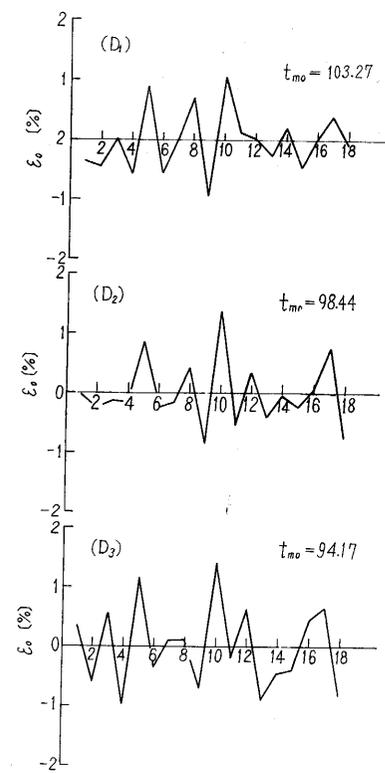


第 19 図 各測定位置における二乗平均誤差

ピッチ誤差 $\epsilon = \frac{t - t_m}{t_m} \times 100\%$

二乗平均誤差 $\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{18}{1} \sum \epsilon^2 / 18}$

その結果を示したのが第 19 図、第 20 図である。
この結果より、ところどころ各羽根間のピッチには不揃いの所がみうけられたが、大部分は 1% 以内の誤差範囲に入っているので、ほとんど影響はなく、接触面での影響もほとんど考えられないくらい小さいことが分かった。わが国では初めてのケースであるランナの精密検査に写真測量法を適用することができ、ランナの出来具合の現状をはっきりつかむことができ、初期の目的を達することができた。



第 20 図

に深謝の意を表する。(1963 年 3 月 13 日受理)

本研究は東京電力 K K 水車技術委員会の委託により行なわれたものであり、この実験をなすに当たって東京電力 K K 水車技術委員会の委員諸氏、特に東京電力 K K 工務部長高木利夫氏、東大生研石原助教授、神奈川大学井田富夫助教ならびに東芝 K K 水車部の関係諸氏、研究室の方々のご協力を得たこと

参考文献

- 1) PHOTOGRAMMETRY by MOFFITT
- 2) PHOTOGRAMMETRY by HALLERT
- 3) 本間・春日屋共著 次元解析・最小自乗法と実験式 (コロナ社)
- 4) 谷本著 実用数値計算法 (森北出版)
- 5) 深橋著 水車の理論と構造 (産業図書)
- 6) 丸安・大島・栗岡・津田 写真測量を利用した三次元の精密測定 (生産研究 第12巻 第1号)
- 7) 大島 地上写真測量の建造物への応用例 (測量, 1961. 8)
- 8) 丸安・大島 インド史跡調査と地上写真測量 (生産研究 第14巻 第8号)

次号予告 (6月号)

研究解説

- 銀塩写真の現像.....菊池 真一
- イオン界面活性剤に対するビルダーの作用.....松島 正太
- ラジエーション・コロージョン.....本間 禎一

研究速報

- ガラス表面における油分子の吸着現象の分子線法による研究.....富永 五郎
- 常時微動解析装置の試作.....岡本 舜三
- 斜板形アキシアルプランジヤポンプの性能.....井田 富夫 ほか