

水車模型試験法の推移

Progress of Water Wheel Testing by Models

山 崎 卓 爾*
Takuji Yamazaki

内 容 梗 概

水車の模型試験は水車製作上不可欠の手段として古くから実施され、今日ではその模型効率において90%をこえるものを日常経験するほどすぐれた特性のものとなっている。

しかるに模型試験設備は現状では工業試験の域を脱せず、特別な考慮なしには絶対値に対して $\pm 1\%$ の誤差範囲にとどめることは困難である。このため模型試験においては設備の精度の向上が大きい問題として近来特に注目されているところである。

この報告は模型効率試験を構成する流量、有効落差、トルクおよび回転数について、古くから今日にいたる変遷を概観し、今後採用されるべき方向を推定している。

最後にこれらの検討の結果、最も高い精度を得らるべき最近の技術に基き、実用的に0.1%の水車効率の差を判別しうる新実験設備の概要を紹介した。

このような設備の出現は、今後の水車の特性改善にきわめて大きい役目を果たすとともに、ひいては効率換算式の将来のありかたをもまた大きく左右するであろうことを付言した。

1. 緒 言

水車の模型試験は水車の製作における不可欠の手段として、古くから実施されており、今日の優秀な性能の水車の実現にきわめて重要な役割を果たしている。

今日の水車はきわめて高度の発達を示し、模型水車効率が90%をこえるものも日常経験するところである。かかる優秀な性能の水車の特性をさらに高めることが、価格の低減策とともに今後の水車の研究課題であるが、抜本的な新形水車の出現による場合は別として単なる部分的な改良によって一挙に数%の特性向上を期待することはほとんど不可能で、多くの試みは単独では1%以内の向上にとどまると考えなければならぬ。

しかるに従来水車の模型試験は、いわゆる工業試験の範囲を脱せず、その測定精度においても絶対値に対して $\pm 1\%$ の誤差範囲を確保することは一般的には困難で、ただこれを規約や規格に準拠して実施することによって相対的な精度を確保し、試験結果の優劣を判定することが多かったといえよう。

現実には前述のように1%以内の差が問題であるとき、かかる方法では問題の解決が困難なばかりでなく、今日の国際市場における技術的な優位を問題とすれば、0.1%といえどもすぐれていることが必要で、このような両面の立場から、好むと好まざるとにかかわらず水車の模型試験法の画期的な向上策がはからねばならない。

一方測定工学においては、最近の電子工学の目ざましい進歩が大きい貢献をなしており、水車の模型試験法もこれらの手段を借りて真に画期的な進歩をとげつつあるということができよう。

筆者は長い間水車の模型試験を担当しているものであるから、ここに現在までの種々の検討が、いかなる形に実りつつあるかを述べ、その一例として最近日立製作所日立研究所水力実験所に設置された新しい高精度測定設備を紹介し、ご参考にご供したいと考えた次第である。

2. 模型試験と現地試験

水車の試験には模型試験と現地試験があり、いずれもそれぞれ今日まで多くの技術上の改善がなされてきたが、両試験法における最大の相違は、模型試験における測定は必要に応じてほかの絶対測定法によって検定を行いうるのに反し、現地の測定では多くの場合これ

が困難であることにあるといえよう。また現地試験は限られた立地条件のなかで限られた測定回数でしか行われぬのに反し、模型試験では必要に応じてどこまでも探究することができる。

このような相異から一般に模型試験の精度は現地試験よりもはるかに高いことが認められている。しかし今日の段階においてはその測定方法における根本的な差異は比較的少なく、模型試験は比較的小規模であることが精度を高くしていると考えられてきた。

現在現地試験における試験誤差を $\pm 2\%$ 以内におさえることは必ずしも容易ではないが、比較精度として模型試験を $\pm 1\%$ におさえることは容易である。

しかしいかに現地試験において慎重を期しても、元来現地の条件は発電を目的としていて、水車の試験を目的とするものではなく、反対に模型試験は最も確実に水車の特性を知ることとを目的とするものであるから、そこにおのずから相異があり、両者における模型試験の優位は当然である。

このような見地よりすれば、現地における実物水車の試験を多大の労苦をもって実施しても、うるところは比較的低い精度の試験結果であるのに比し、高い精度の方法を採用しうる模型試験により詳細な性能を知り、これにもとづく合理的な特性換算法を確立することが、将来の水車の発展における最大の貢献であると信ずる。

将来の模型試験はもはや工業試験の領域を脱し、完全な物理測定とかわり、特性の換算もまた従来のような概括的なものでなく、詳細な要素を含んだ精密な方法がとられねばならないであろう。

筆者は現地試験にもまた多大の関心をよせているものであるが、以上の観点より、まず模型試験の高精度化こそ最大の急務であると信じ、検討を続けているものである。

以下各測定項目について大要を述べることにする。

3. 測定方法の変遷

水車の模型試験にも多くの種類があり、それぞれ目的に合致するように試験方法を定めるが、それらの基本となるものは効率試験である。ほかの試験は方法の上からみれば一応これに付随した試験とみることができよう。よってここでは効率試験に限って述べてみよう。

水車の効率はその出力および入力値から得られ、出力は水車の発生する回転力（トルク）と回転数の積より、入力は水車流量とこれに作用する有効落差の積から得られる。したがって水車の効率試

* 日立製作所日立研究所

験では流量、有効落差、回転力および回転数の四つの基本要素の精密な測定を行えば、結果として高い精度の効率が得られる。

しかし効率において 0.1% の判別を可能にするためには、これら 4 要素ともさらに高い精度で測定されねばならず、その容易ならざる困難を察知しうる。過去において総合的にこのような精度の現出を耳にしないことは、単に要求の有無でなくて達成する手段があまりにもけわしい道であることにほかならないことによると思われる。

以下上述の 4 要素についてその測定の今昔をながめてみよう。

3.1 流 量

水車の試験法で流量の測定ほど古くから研究されているものはない。ことに現地試験での流量測定は深く追究されている。

しかし模型試験では、わが国では例外なく量水せきが採用されている。同時に量水せきに関する学術的研究もきわめて多く行われている。

周知のように量水せきに関しては多くの研究結果をもとにして制定された流量公式があり、各国は最も適切と思われる公式を定めてこれを規格公式とし、公式の基礎となった実験における条件を制限条件として、この条件に従って作られた量水せきに対して公式を使用することが定められている。したがってこの公式はその根拠となった実験結果に応じて異なる値を与え、また実験結果の散在度より考えて、多くの場合 ±1% 程度の誤差を伴うことはさげられない。さらに実際の測定に際しての測定誤差を考慮すれば、一般的には ±1.5% の誤差が表われることは当然といえることができる。

しかし以上の誤差は絶対値に対していえることで、1 個の量水せきに対し一定の公式を使用し、一定の方法で測定を行えば、その相対精度は高くなるので、この意味において現在ほとんどすべての実験装置に採用されている。

ここで実際問題として、日立製作所のように外国納入の水車の試験がしばしば行われる場合、その取りきめ上、外国規格による流量公式を採用することになり、結果として同一の量水せきによる同一の読みから異なったいくとおりもの水量、したがっていくとおりもの性能が得られることになり、量水せき法のむじゅんが如実に経験される。

いまたとえば JIS 規格(日本)、スイス規格(スイス)、IEC 規格案としての Hegly 公式(IEC は International Electrotechnical Commission)の三者を、日立製作所の水路幅 3 m、切欠幅 1.5 m の縮流四角堰について数値的に比較してみよう。3 公式は次の形をそなえている。

JIS 公式

$$Q = k b h^{\frac{2}{3}} / 60 \dots\dots\dots (1)$$

$$k = 1.071 + \frac{0.177}{h} + 14.2 \frac{h}{D} - 25.7 \sqrt{\frac{(B-b)h}{DB}} + 2.04 \sqrt{\frac{B}{D}} \dots\dots\dots (2)$$

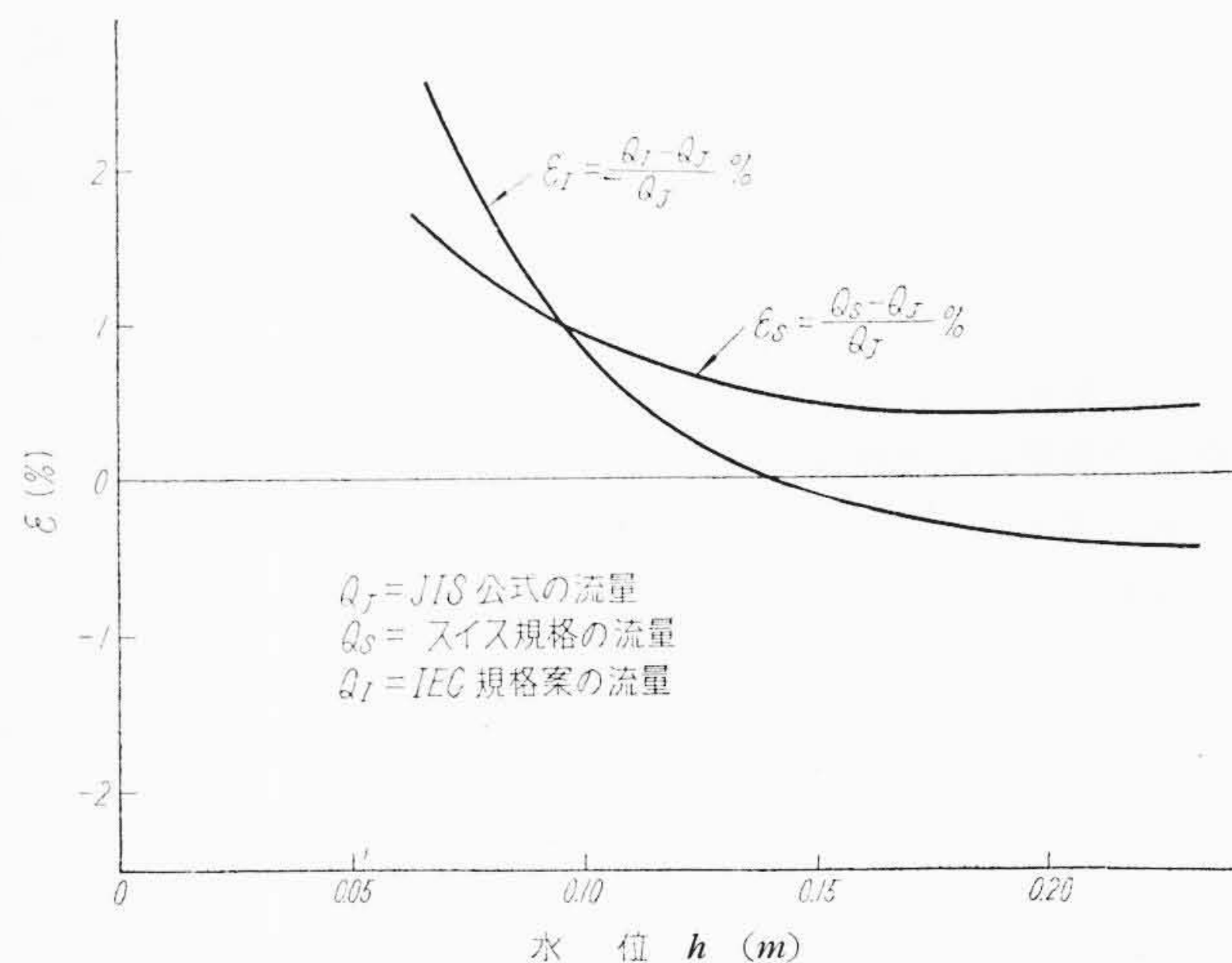
スイス公式

$$Q = \frac{2}{3} k b h \sqrt{2gh} \dots\dots\dots (3)$$

$$k = \left\{ 0.578 + 0.037 \left(\frac{b}{B} \right)^2 + \frac{3.615 - 3 \left(\frac{b}{B} \right)^2}{1,000 h + 1.6} \right\} \left\{ 1 + 0.5 \left(\frac{b}{B} \right)^4 \left(\frac{h}{h+D} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (4)$$

Hegly 公式

$$Q = k b h \sqrt{2gh} \dots\dots\dots (5)$$



第 1 図 3 種の規格流量公式の与える流量の差異

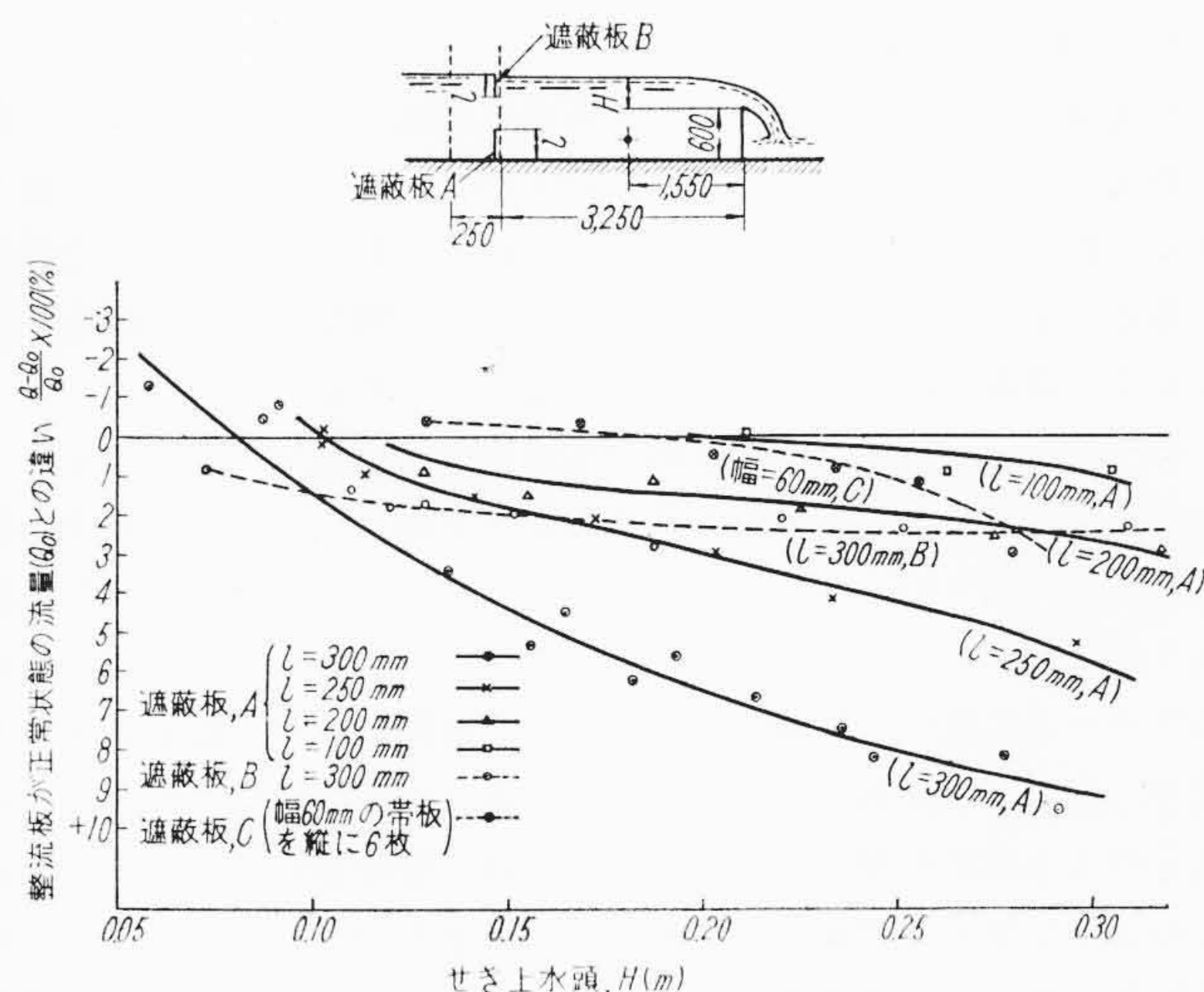
$$k = 0.405 + \frac{0.0027}{h} - 0.03 \left(\frac{B-b}{B} \right) \times b + 0.05 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h+D} \right)^2 \dots\dots\dots (6)$$

- ここに Q : 流量 (m^3/s)
 k : 流量係数
 h : せき峯より測定水面までの水位 (m)
 b : 切欠幅 (m)
 B : 水路幅 (m)
 D : 水路底よりのせき峯の高さ (m)

第 1 図は水位 h に対し JIS 公式の流量 Q_J を基準として、スイス規格公式の流量 Q_S および IEC 公式の流量 Q_I のおのおのの差を百分率で示したものであるが、 h の大きい場合三者は 1% 以内の差で一致しているが、小水量においては JIS 公式が他の二者よりも大きくはなれる傾向を示している。

いずれにしてもどの公式を採用するかによって、この程度のちがいが起ることは、すでに 1% 程度の絶対値の差を判別しえないことを示し、水車試験に適用するには適切でないといえることができる。

加うるに量水せきは水車試験として日夜連続使用したりすると、とかく監視が十分でなく、時として水路中の整流装置になんらかの障害が生じ、このためはなはだしい差を生ずることがある。第 2 図はこの影響について実験的に検討した例⁽¹⁾で、その激しい変化は驚くべきものがある。



第 2 図 量水せきにおける整流障害の影響の一例

このような経験を通じて、以前より慎重に検討を進めてきたが、結局量水せき法のような相対的測定法にしてしかもいわばインデックス法に類する方法では、多少なりともこのような傾向はさけられず、さらに高い精度を保持する方法として重量法を採用することが望ましいことを知った。

しかし重量法自体にもまた多くの問題があり、重量秤の精度および感度の長期間の確保はもちろんであるが、一定時間に重量タンク内に水を流入および停止せしめる切替え設備、タンク容量の決定(従来の規格では約1分間の流入量以上)などのわずらわしい問題、これに伴う時間単位としての標準時計設備の設置など決して簡単ではないが、これらの問題を一応技術的に解決すれば、重量法を採用することができよう。しかしこのほかに、重量法では水の重量を測定しているのであるから、流量すなわち容積を求めるためには、水温の変化による比重の変化、測定点における重力常数の決定、水の容積に応じた空気の影響など、かすかすの物理的な考慮が払われねばならないことになる。

当地における重力常数は専門家による実測値として次の値が得られている。

A地点	980.0258 ₄ gal
B地点	980.0223 ₆ gal
C地点	980.0218 ₈ gal

これらの地点はいずれも水力実験所内の基準的な地点で、水車の実験においては、これらの値を基準として実験箇所の値を決定することになる。

また空気の影響は

$$M = M_0 \left\{ 1 + \rho \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right) \right\} \dots\dots\dots (7)$$

で表わされる。ここに

M, M_0 : 物体および分銅の質量

d, d_0 : 物体および分銅の密度

ρ : 空気の密度

で、水車試験の程度の場合には、比重の値として空気 0.0012, 真鍮 砲金 8.5, 鉄 7.8, アルミニウム 2.7 の程度と考えてよいであろう。

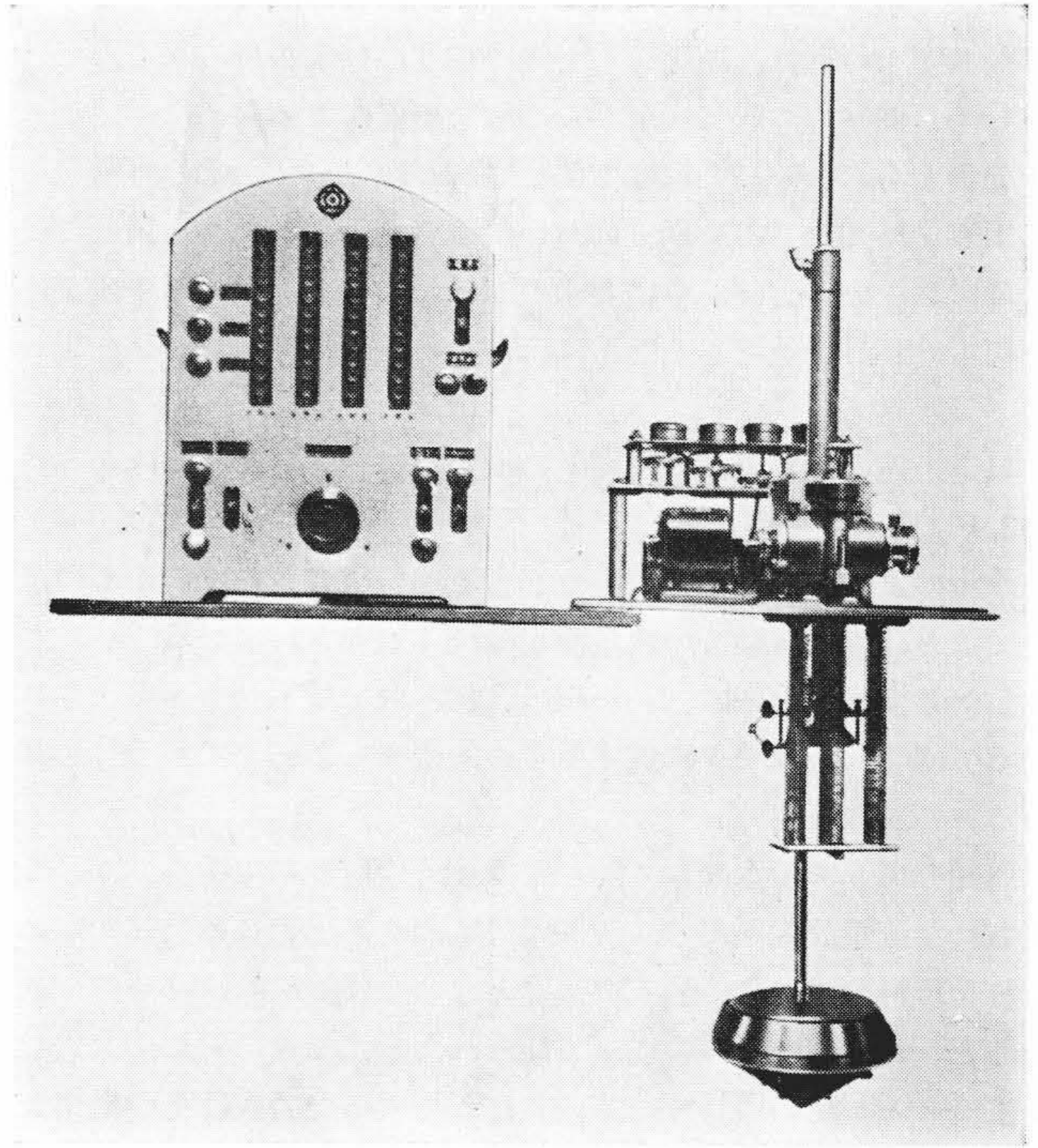
上述のように重量法による測定は、理論的にはきわめて明快な解答が得られるが、実際にはここに例示したようにはなはだやっかいな補正が必要である。

しかし重量法は流量測定における絶対法として古くから第一に取り上げられてきた方法であり、その改善により将来の模型試験における流量測定法として、必らず量水せき法に取って代わるべき資質を備えているものと考えている。

3.2 有効落差

有効落差の測定は従来一般にはあまり困難とされていないが、高い精度で測定することはなはだむずかしい。模型試験で取り扱う落差は数メートルより数百メートルにわたる範囲のもので、その測定落差の全部に共通した方法はいまのところ精度上および構造上不十分で、落差に応じて測定方法が異なるのが普通である。

低落差の実験では上下両水面の水位差を測定して、これをもって有効落差とすることが行われてきたが、水面水位の測定を厳密に行うために、種々のくふうが試みられている。日立製作所では数年前より第3図のような自動水位計を採用しているが、これは 0.1 mm のフロートの変位を自動的に読みとって遠隔地にその数値を送る方式で、もっぱら量水せきの水位の読み取りに利用していたが、これはそのまま落差の測定にもきわめて便利に使用されている。しかしこのような形式の実験では、水槽中に水車を設置して行うものであるから、ケーシング付きの場合ケーシング入口の呑口における損失落差が省略されることになり、これを計算で補ったとしても 0.2% 程



第3図 精密自動水位計

度の誤差はさけられない場合があり、必ずしも良法とはいえないようである。

中落差に対しては水銀柱マノメータなどが多く利用されるが、読み取りに関しては液柱であるだけに、特別な考慮が払われねばならず、簡単とはいえない。しかし最近これに関する特殊な精密測定法を考案し、高い精度の測定を行いうるようになった。

高落差に対しては、いわゆるゲージテスト(圧力校正器)が利用され、特に今日ではこれを測定計器として改造したHK式落差測定器が現地試験に広く使用されている。しかし元来圧力校正器はその構造上 0.2% 程度の誤差はさけられず、特に精密なものでも誤差 0.1% が最良の状態とされている。したがって高い精度の測定も現状ではこの程度が限度であると思われる。ましてブルドン管圧力計はこの校正器で校正するものである以上、これ以上の精度たり得ない。

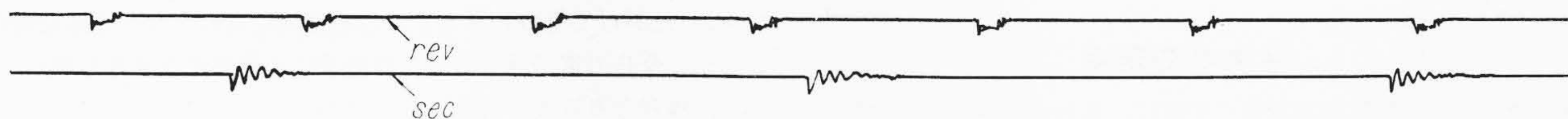
このようにして一般に有効落差の測定はほかの方法にくらべて現状では測定精度において劣ることが認められるが、部分的には進歩した方法も考案されつつあり、近い将来においてはさらに高い精度の計器が実現することが予想される。

3.3 回転力(トルク)

従来トルクの測定は機械式または電気式動力計によって行われていたが、最近ではトルクメータの使用もさかんである。しかしトルクメータは高い精度の測定に対してはまだ十分とはいえないであろう。

動力計は機械式電気式を問わず、その原理においては同様で、回転体の発生するエネルギーを固体または流体の抵抗におきかえて消費するのが機械式、これを発電機に代えて電熱などの形で消費するのが電気式である。機械式動力計としては古くから固体摩擦を応用したプロニーブレーキや流体の摩擦を応用した水動力計などがあるが、いずれも近來その構造において格段の進歩を示している。しかし電気式に比し、そのトルク、回転数の調整の円滑さにおいて劣っており、逐次電気動力計の使用度が高まりつつあり、ことに今後の水車の発展がポンプ水車に移行する傾向よりみて、ポンプ運転時の動力として動力計を電動機に使用することが必要となりつつあり、将来は電気動力計を採用せざるを得ないこととなろう。

動力計の生命は、水車の示す出力を損失なく表示することであり、



第4図 テープ式回転数記録装置により得られた記録テープ

そのため軸受特にいわれる可動棒と固定棒間の軸受の摩擦は直接動力計の感度を左右し、測定値の誤差に影響するところから、従来その改良には多くの試みがなされてきたが、最近の日立製作所のものは可動棒を油圧をもって支持する方式を採用しており、従来の球軸受とは比較にならぬ高感度を示しており、この点隔世の感がある。しかしなお水車側の軸受や詰箱などの損失を残すことは、高精度に対してはゆるぎないところで、これらは全部動力計の中に組込まれねばならないことはもちろんである。

このようにして得られたトルクは動力計においては機械的な秤で測定される。この点従来となんらこととなるところはないが、元来トルクと回転数は互に逆の関係にあるため、安定したトルクの読みをつねにすることはむずかしく、時間的に平均値に対し上下に変動をくりかえすことが多い。従来このような場合は測定者の観測によりその平均値を決定していたが、これでは人為的な誤差をまぬがれないことになる。新しい改良は、かかる測定を機械的に行わしめることが必要で、単に秤桿上の重錘の移動を電氣的に行わしめる方法はすでに諸外国にもその例をみるが、将来のものは上述のとおり動揺の平均値をも読みうるものでなければならぬ。

3.4 回 転 数

古くは回転計として最も正確かつ簡便なものとしてハスラ回転計が長く賞用されてきた。この時代には時間の精度を保証するいわゆる標準時計が簡単に得られず、このためあらかじめ調整製作されたハスラ形回転計が賞用されたが、現在では精密な時間表示が簡単に得られるところから大きい変革がもたらされた。

たとえばわが国の郵政省電波研究所より発信している標準電波JJYは1億分の2秒の精度をもち、また水晶発振器を採用した水晶時計でも百万分の1秒という程度の精度は確保される。日立製作所ではJJY電波をとらえて、これと回転パルス波とをテープ上に同時に記録することにより、回転数測定の様式とその精度を画期的に更新せしめたことがある。第4図はその記録テープの一部を示す。

しかしその電子管の応用の発展に伴い、今日では回転計はすべて電子管形式を採用するに至っている。回転計に関するこの改善はきわめて大きいものといわなければならない。

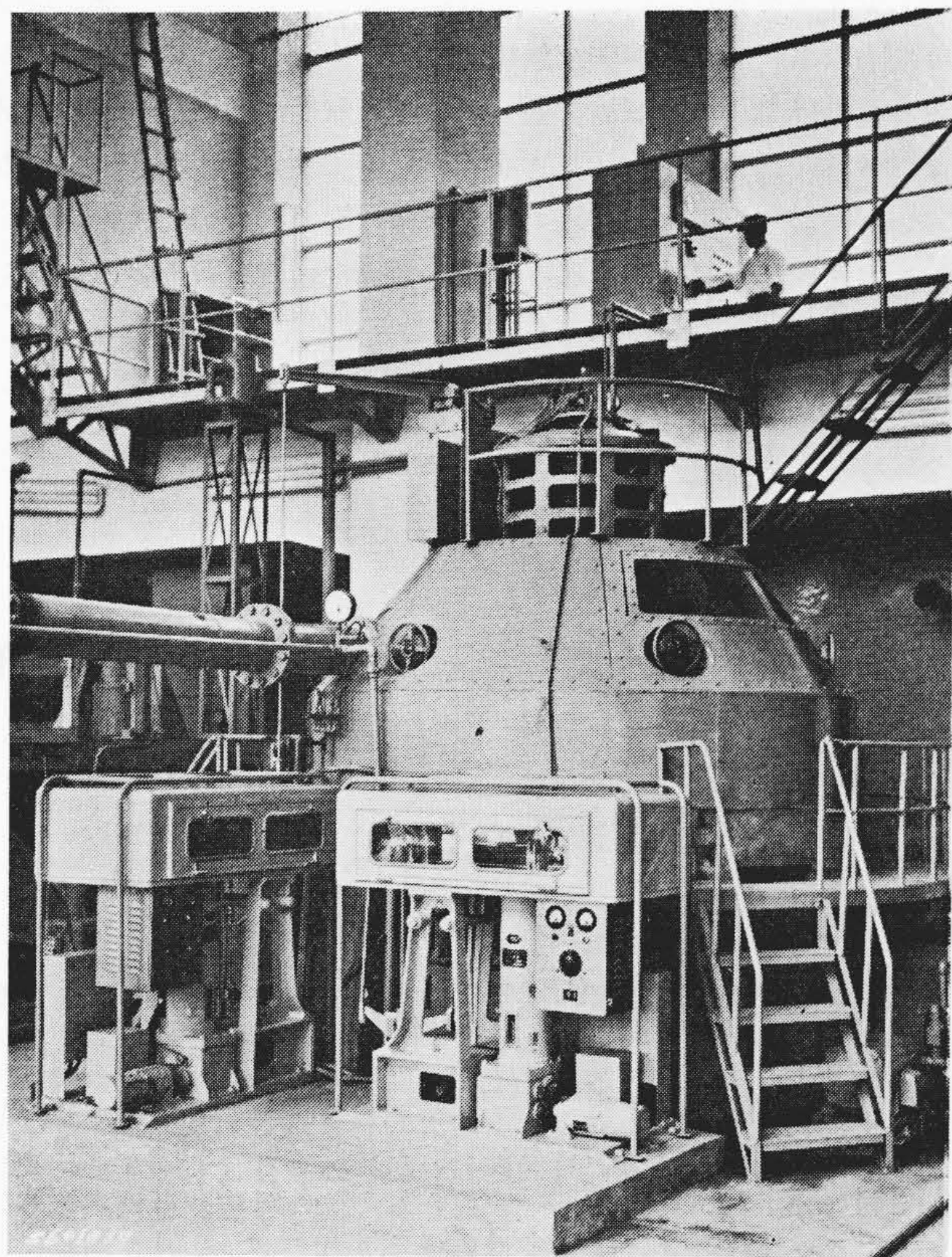
4. 新模型試験設備

以上のように、模型試験の精度をたとえば0.1%の水車効率の差を判別しうるまでに高めることは、各要素の測定方法において従来とは根本的に異なった立脚点から出発せねばならぬことが多く、日立製作所においてもこの目的のために逐次改善を試みてきたが、数年前ようやく最後の具体的な案に到達、爾来その実現に努力し、最近実用試験に使用しうる設備の実現をみた。

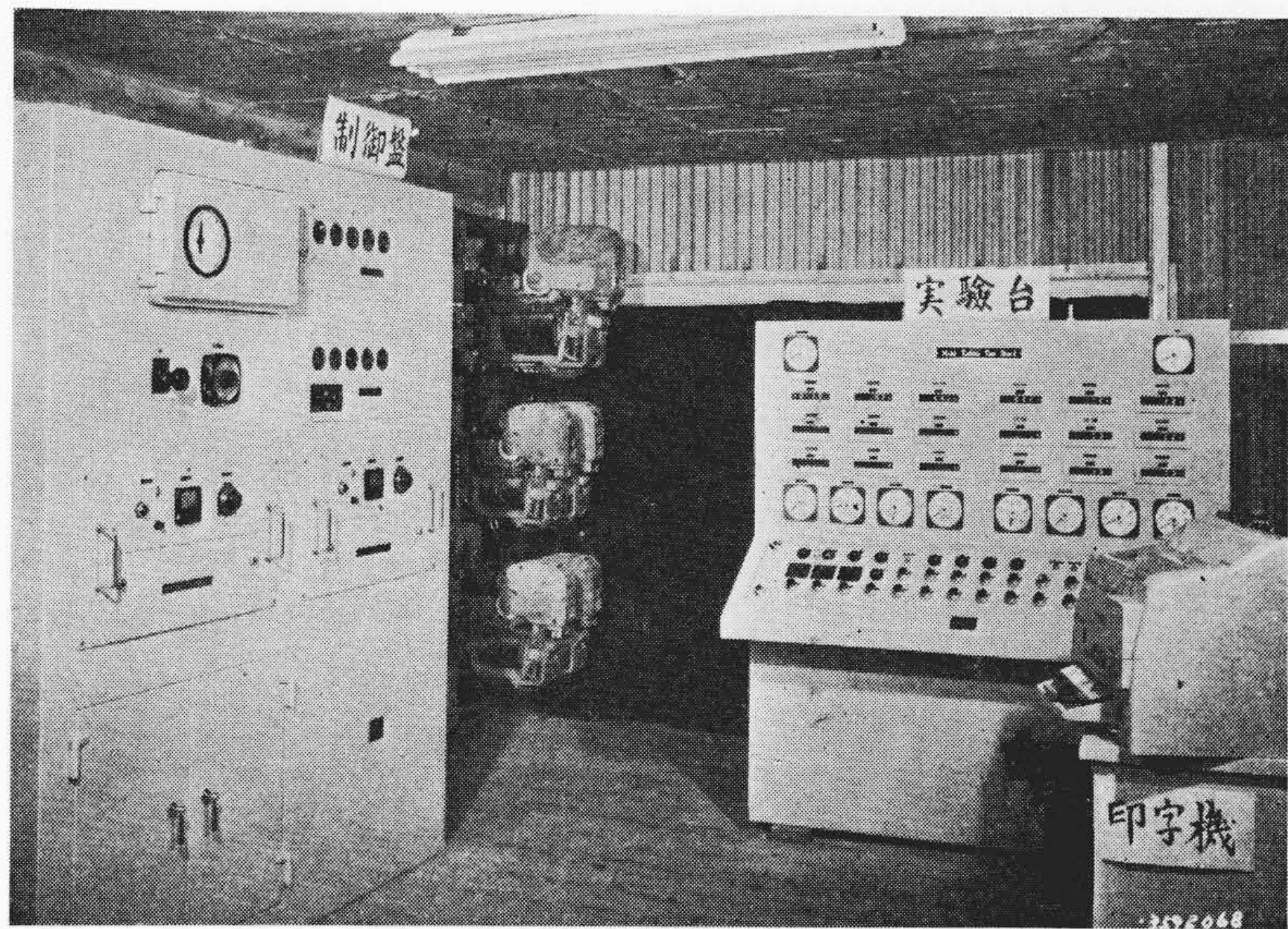
第5図はこの設備の外観写真を示す。この設備はたて軸6ノズルペルトン水車模型試験設備で、流量測定を重量法により、有効落差の主成分である圧力の測定には特に考案された水柱および水銀柱の合成精密マノメータを使用している。またトルクは自動精密トルク計でトルク動揺の平均値を自動的に読み取り、回転数を電子管式回転計によって測定する。これらの測定を人力で行うことは人的にも大きい損失であるばかりでなく、人為誤差の入る危険性があるところから、この装置では測定開始お

よびその終了の指令、ならびにこれらの数値を実験者の眼前に数値表示することを1個の押ボタンで実施する方式とし、さらにこれらの数値を他の押ボタンにより、実験用紙にタイプライタで記録するようになっている。第6図はこれらの信号および表示を行う実験台、実験の制御を行う制御盤およびタイプライタ1組を示す。

現在これらの動作は、理論的にはまだ多少改善の余地を残しているが、実験結果としてはほぼ0.1%の効率の差を適確に示しており一応の目的を達している。



第5図 高精度ペルトン水車模型試験設備



第6図 高精度試験装置の制御部

5. 将来の問題点

前述のような高精度測定設備の完成は、あらゆる面でふたたび大きい宿題を与えることになる。二、三の例をあげればまず効率のわずかの差が判別しうるところから、水車各部のわずかの变化の影響を確実にこえることができ、部分的な水車の改善を多方面にわたってひろく研究して行かなければならない。また詳細な測定値が得られるため、もはや計算尺をもってしては計算を完遂できず、少なくとも電動計算機によらねばならず、じん速化をねらうならば電子計算機のたすけを必要とすることとなる。そのほか模型水車の加工においても従来とまったく異なった高い精度で行わなければ、研究の目的に対してはるか遠いものとなるであろう。

なおこれに関連して効率換算式について一言すれば、従来効率換算式は、なるべく簡単にして誰にでも使用できる形式が好ましいとされ、少しく複雑なものはとかく敬遠されがちであった。また換算式そのものも、広く一般的な適用性をもつものとして考えられたが水車各部の効果が模型試験を通じて詳細に解明された場合、換算式もまた各部の影響度を適切に考慮したものでなければならなくなり、いきおいその形式において複雑精密なものとなるであろう。

かくして簡単な換算式という従来の方向は放棄されなければなら

ず、したがってその計算もまた当然複雑なものとならざるを得ない。しかし今日の電子計算機はこの要求に十分満足な計算を果しうるから、複雑な換算式が敬遠される理由がなくなる。

このようにして始めて水車の効率換算が具体的な確実な換算を可能ならしめてくれるであろう。

6. 結 言

水車の模型試験を構成する各測定要素につき、従来の方法と近時における進歩を簡単に一べつし、これらの検討結果をもとにして、最も高い精度を実現できる新しい設備を完成した。新設備は水車効率において 0.1% の差を確実に判別しうるものたることを目標としているが、この装置の完成により、水車の研究は新たな段階にふみ切ったものと考えている。

この報文では、新設備の内容にまでふれる余裕がなかったため、単に概括を述べるにとどめ、これについては近い将来において報告したいと考えている。

この概括的な報文が、多少なりとも寄与するところがあったとすれば幸これに過ぐるものはない。

参 考 文 献

- (1) 山崎, 栗須: 日立評論 第 39 巻 第 4 号 (昭 32-4)



特許第 239311 号

特 許 の 紹 介



斎 藤 武

発 電 機 過 電 圧 自 動 抑 制 装 置

発電機が負荷の急減によって電圧急上昇するのに備えて、発電機界磁回路に特に大きな抵抗を投入することは従来行われてきたことである。このような一時的抵抗そう入は、たしかに一応その対策とはなるが、ただそれだけのことで決して有効な過電圧抑制とはならない。この発明は、この点を検討し、いっそう合理的な抵抗そう入の手段を講じたものである。すなわち、図の界磁調整抵抗器 5 は電動機 8 によって正あるいは逆回転操作されるが、これと同軸に過電圧抑制用加減抵抗器 6 を設けたもので、これは通常時は抵抗挿脱用接触器 7 によって界磁 f_2 の回路から除外されている。なお図から解るように 5 と 6 との抵抗値の関係は、5 のそう入値が減ずるときに 6 のそう入値は逆に増大するように仕組んである。いま、もし発電機負荷が減じて電圧急上昇したとすると過電圧継電器 10 はその整定値に応じて動作し 7 を開放する。よって 6 の抵抗は f_2 回路内に急にそう入されることになり、抵抗器 5 のそのときのそう入値に加わって f_2 の電流に強い制限を加え、もって発電機 1 の電圧降下をもたらす。ところで 7 の開路の直前を考えると、もしその時発電機 1 の励磁度が高く f_2 の励磁電流が大であるとする、それだけ 5 の抵抗値は小になっているがこれと反対に 6 の抵抗値は大になっているから、その急速なそう入はきわめて合理的なものとなる。以上と反対に 7 の開路するときの f_2 の状態が比較的低電流励磁である場合は、5 の値は大きい 6 の値は逆に小であるから過電圧抑制効果は適正に現われ、過補償にもとづく乱調傾向を緩和することができる。なお 7 を開いて 6 をそう入するときは自動電圧調整継電器

9 も作用して電動機 8 により界磁を弱める作用に働くことであるから界磁は弱められ過ぎる傾向と考えられるが、5 と 6 との変化が逆関係であるから極端に弱界磁とすることを適当に緩和するため、いっそう過電圧抑制の実をあげることになる。(宮崎)

