

# インデックステスト法の理論と実際 (その1)

## Theory and Practice of Index Test Method (Part 1)

山 崎 卓 爾\* 手 島 友 亮\*

### 内 容 梗 概

水力発電所の合理的運営がさげばれている現在、水車の経済的運転を行うためには個々の水車は勿論、発電所としての総合の出力、入力をも時々刻々適確に指示記録し、合理的方式にのつとり調整管理する必要がある。

ここに水車の運転性能の主体をなす発電力、落差および使用水量の3量のうち、その発電力および落差は電力計、圧力計、および真空計の3者によつてほぼその大要を知ることができる。しかし使用水量の指示は多くの優秀な指示計器類が製作されていながら、流水路への取付に際して水車内の流動状態が大きい影響をもたらすため、前2者に比べ進歩がおくれていた。最近 Index Test 法と総称される一連の試験法が我国に紹介されて以来、この流量指示の問題が真剣にとりあげられ水力発電所に水量の指示記録計が備えられるようになった。しかしこの運営合理化のための手段である Index Test 法は我国に紹介されてなお日浅く、これを実際に発電所の経済的運営に活用するに当つては親切な説明書ともいふべき文献があまり見当らない。よつて筆者らは実験室での基礎的研究の成果と幾多の現地試験の経験をもとにして解説を試みるしだいである。

## 第 1 篇 総 説

### 〔I〕 緒 言

水力発電所の経済的な発電運営を行うには、常時その水力入力および発電出力を知り、水車発電機の特性を考慮して、総合能力として最も有利な状態を保持しなければならない。いいかえれば水車に作用する有効落差、流量および発電力の3量を適確に指示する計器がえられることが先決問題となる。

以上3量のうち、有効落差の主体をなす圧力および吸出落差は圧力計および真空計により、出力は電力計によりそれぞれ現在では簡単にその大要を知りうるが、ひとり流量については、すでに多くの優秀な読取りおよび記録計が製作されているにもかかわらず、これらの計器を取付けるべき流水通路箇所の選定如何によつては、必ずしも適確な値を示さず、取付位置の決定については一連の慎重な試験を必要とする。

つぎにこのようにして取付けられた流量計により、詳細に亘る発電性能の総合試験を行い、経済的な運転方式を決定するためにも試験が必要である。

このような試験が一般にインデックステスト (Index Test) と総称されている。この方法が明確な水車の一試験法として、我国で注目されるにいたつたのは G. H. Voaden 氏の論文<sup>(1)</sup>(1951) が最初であろう。しかし実際に現地発電所で簡便にこのような試験を行うための手引となる文献や、測定孔の位置決定のための技術的な指導書、流量計器の取扱法に関する親切な指針となる説明書などがあまり見当らない。

\* 日立製作所日立研究所

筆者らは、この方法が我国に紹介されるや、いち早くこれに着目し、爾来基礎的な研究や模型水車による試験を通じての研究を実施し、また幾多の現地発電所における実地試験を実施してきたので、これらの経験をもとにして前記の発電所の経済的運営の手引、設計上の参考、ひいては水車性能の本質的な理解と向上に、いささかなりとも寄与せんことを目標として、ここに総合的な報告を企図したしだいである。

本文の内容は

第1篇 総 説

第2篇 ペック法 (Peck Method)

第3篇 ウインター・ケネディー法 (Winter-Kenedy Method)

第4篇 インデックス・テスト法の実際

の4篇とし、できるだけ平易に、また実際に役立てるように配慮したつもりである。

目標は遠大であるが、もとより浅学非才の筆者らのこととて意をつくさぬ点もかなりあるように考えられる。もし幸にして上述の目標に対し、いささかなりとも益するところがあつたとすれば、幸これに過ぐるものはない。

### 〔II〕 水力発電所の合理的な運営法

水力発電所において、その最も合理的な発電運営を行うことは、運営に当る発電所側の立場としては、もちろん最も重要な意義を持つことは当然であるが、また水車発電機の製造者の側から見ても、結局このような運転はその根本において水車発電機の高性能を期待するものであるから、やはり最も重大な関心事なることはあきらかである。

さてこの場合、発電性能を知るということは結局水車



への入力および発電機よりの出力を知ることである。このうち発電機出力は電力計の発達により現在ではその大要を簡単に知りうる。しかるに水力入力是有効落差と水車流量の積としてえられるが、このうち有効落差に関しては、その主体となる圧力落差は圧力計により、吸出落差は真空計により簡単にその大要を知りうるが、ひとり流量については、古くから多大の苦心研究がなされているにもかかわらずまだ決定的な方法が確立されたとはいへない難い現状である。しかし上述の流量測定の研究はその絶対値を知ることが目的とするものであり、発電所の発電運営上これはもちろん正確に知るに優ることはないが、たとえ絶対流量が不明であつても、流量の大小となんらかの一義的な関連をもつ量を確実に把握することができれば、運営の合理化は十分行いうるわけである。しかしこの場合流量との関連があまりにも複雑なものであつてはいたずらに換算補正に手数を要し、そのため運営の合理化について専門的な人員を要することとなり、目的に添うものとはいへず、また一般に行われている流量測定法（絶対流量の測定を目標とする）のように大規模な方法では常時運営の妨害にこそなれ、合理化のための有益な手段とはなりえないであろう。

したがって運営合理化の目的に対しては、流量の絶対値は不明でも、確実なしかも簡単な関連を保つような“仮標流量”とも称すべき指示をあたえるべき指示計器または記録計器がえられれば、十分役立つことになる<sup>(2)(3)</sup>。

このような仮標流量指示計器を使用して行う水車の運営試験を総称した Index Test 法が、現在我国で急速に普及しつつあることは、電力事情の明かるい解決への大きい前進であり、我国情としては当然すぎるほど当然なことといわなければならない。

### 〔III〕 Index Test 法の意義

#### （1）流量測定法の研究の現況

上述のように流量の絶対値を簡便かつ正確に指示する段階にはまだ立至っていない水力工学界の現状では、このような、相対的な流量に準じた値をもつて運営合理化の手段とするのは当然である。

また絶対流量の測定法がたとえ完成したとしても、それが常時計器に指示される性質のものでなければ、やはり運営合理化に対して十分な手段とはなりえない。

ひるがえつて絶対流量測定法の現況を見るに、この問題は目下のところ全世界的な問題のようで、各国当事者の主張は必ずしも合致していないときく<sup>(4)~(9)</sup>。しかし我国でもこれに対する研究的な推進は、戦後の電力増強の問題に関する電力会社の熱意と水車の効率換算式の確立

に端を発した日本機械学会の積極的な研究方針および水車製造者の実物水車の性能究明に対する深い研究的な要望とがすべて流量測定法の確立に集約され、戦後10年間の研究成果はいちじるしいものがあり、特に最近数年間の進歩はまことにめざましい。にもかかわらず現在では普遍性のあるしかも確実な流量測定法を決定する段階には立至っていないことは、明らかに流体流動自体の特性条件がいかに複雑なものであるかを物語っているといわなければならない。

このように流量の絶対値が必ずしもすべての場合明確であるとは限らない現状では、流量と有効落差をもとにした発電所の水力入力に厳密には不明といわなければならない。したがって運営の合理化に対する手段を講じえないということは明らかである。しかしたとえ絶対値は不明でも、仮標流量によつて合理的な運営のみは可能な筈であり、こゝに Index Test 法の重要性が浮び上つてくる。

#### （2）Index Test 法の意義

仮標流量を採用し、出力、落差および仮標流量の3者を使用して、効率試験に準じた試験を行えば、水車性能の絶対値は知りえなくとも、その発電所の最高機能の状態およびこれを基準とした運営は行うことができる。

Index Test なる語の意義は文献によつても必ずしも明確な回答はえられないようであるが、上述のように流量に相当した適当な指示、すなわち仮標流量を流量の尺度として使用した試験を総称するものと考えてよいようである。

このように考えると、現在行われている絶対流量測定法といえども、当然各方法に応じて大なり小なり誤差を伴うため、絶対値そのものではないので、Index Test に使用しうるはなはだ正確に近い尺度といふことができるが、運営のための利用度を高くするためには、その値の読みとりがきわめて簡便であることを必要とするので、このような方法を Index Test として採用することは實際上できないことである。

またさきにも述べたように、簡便なしかも流量の絶対値と結びついた読取りを行いうるためには、いかなる量を選ぶべきかがその Index Test の成否の鍵をにぎるものとなる。この意味において単に上述の運営上の試験のみならず、読取りの対象の選択についてさらに慎重な試験が行われなければならない。

したがって筆者らはこゝでは、上記の指示計器の取付位置の選択の良否の確認のための試験と運営の合理化のための試験の両者を総称して、これを Index Test と呼称することが最も妥当であると考え。したがって Index Test というのは「流量測定法の1種」ではない



のであつて流量と簡単な関連をもつる指示量を仮標流量として流量を代理せしめた指示法を採用したすべての試験というべきであると考える。

これを流量測定法として認めるためには、他の絶対流量測定法の結果によつて流量と仮標流量間の関係を確認したときに始めて流量としての性格をもち、したがつてその結果によつて行う試験はもはや Index Test ではないわけである。

#### [IV] Index Test 法における仮標流量 指示法の種類

##### (1) 指示法の具備すべき条件

[III] に述べたように流量と一義的な関連があれば、いかなる指示でもよいという寛大な制限は、ややもすると Index Test 法の使命をすら軽んずる結果を生じやすい。そこでこの寛容な制限について、さらに具体的に具備すべき条件をつぎにあげて見ることにしよう。

(A) 流量と指示量(すなわち仮標流量)とが一對一の対応をなすこと。

一義的な関連ということを知りやすく代表的に表わした制限の一つである。第1図には①, ②, ③の3個の流量—指示量函数曲線が示されているが、このうち①の曲線は指示量  $r$  に対して、 $m, n$  なる2個の流量値が対応しており、このようなものからは確実な結果は望めない。②, ③の曲線はそれぞれ指示量の1つの値に対し1つの値を示しているので使用しうる。

(B) 流量と指示量(仮標流量)の函数関係が簡単であること。

研究的には流量と仮標流量の間の函数形さえあきらかになれば、その複雑さは単に換算上の手数がかかるだけであつて本質的にはなんらさしつかえはないが、常時これを使用して発電所の発電運営の合理化に役立たしめるにはできるだけ簡単な函数関係にあることが必要で、現実にはこの関係が直線的である以外には実用しがたいといつてよい。(第1図の①, ③曲線は不可, ②が可)

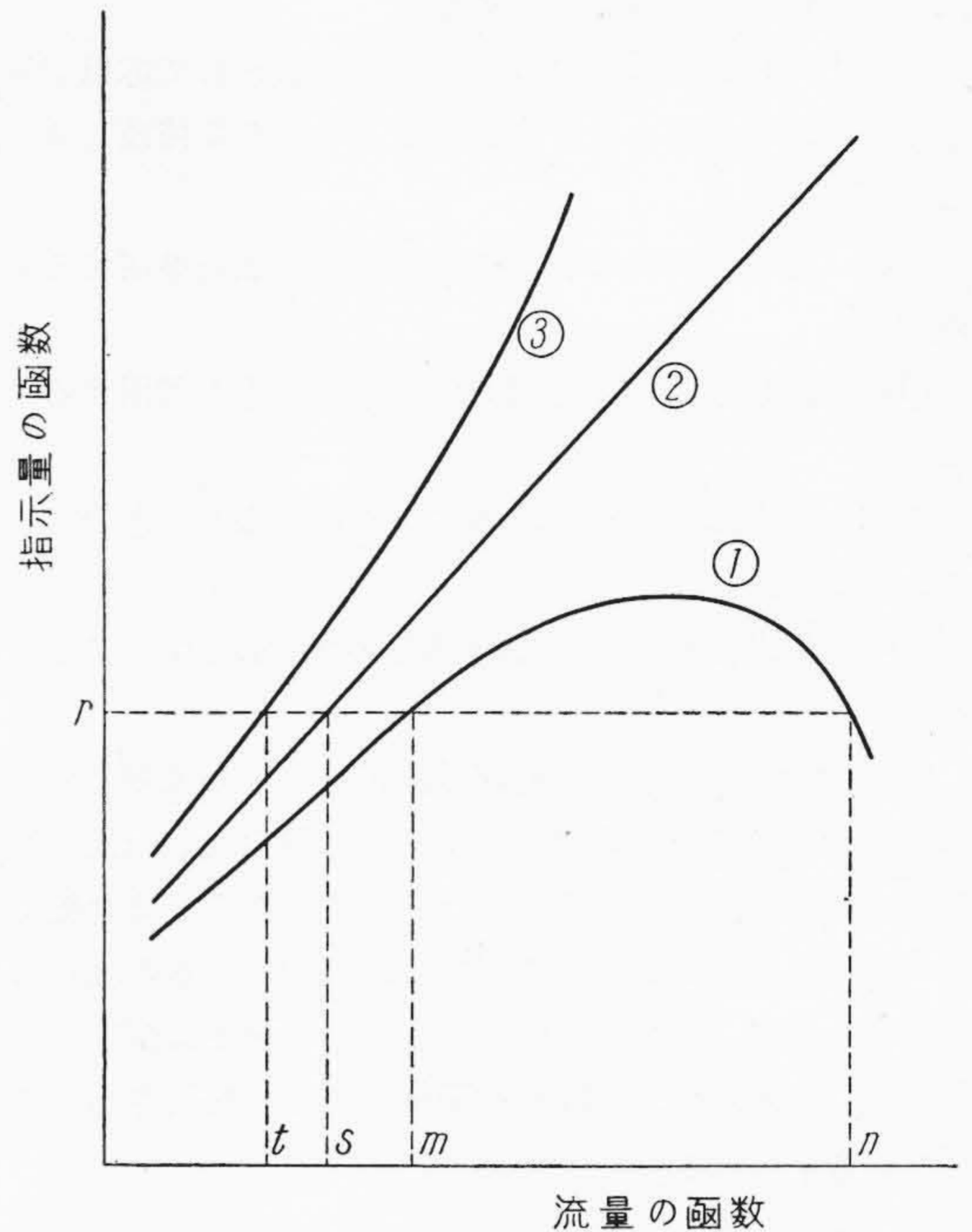
なお、実際の面から見るとこの直線は任意の直線であつてはいけなもので、さらに条件を備えるべきものであるが、このことについては後にのべることにする。

(C) 指示量が大きいこと。

測定精度の向上のためには是非共必要な条件である。

(D) 指示量が安定であること。

たとえ指示量が大きくとも、動揺のはげしいものは測定精度を害すること勿論であるが、同時に状況に応じて変化する(水流は必ずしも不変ではないため、場所によつてはこのようなことが起りうる)ようなこともあつてはいけな。



第1図 種々の流量—指示量の函数曲線  
Fig. 1. Various Indicating Curves for Discharge

(E) 指示計器が発電所自体として、場所的に便利であること。

たとえ正確な指示がえられても、それを常時読み取るに便利な個所に誘導する間に誤差が入つたりしてはなんにもならない。

(F) 指示量取出しの計器が流路の障害にならぬこと  
指示を取り出すための計器を流水路に設ける場合、特殊な突起物(たとえばピトー管のごとき)、をつけることも考えられるが、永年使用に対しては必ずしも良策とは考えられず、流水路には障害とならぬようなものが望ましいわけである。

(G) 簡便なること。

これは Index Test 法にとつては最も重要な条件である。精巧な計器であつても常時使用するのに専門的な技術を要するものであつてはいけな、現場人が簡便に操作してあやまりのない計器でなければならぬことは、Index Test 実施に際し、特に強調されねばならぬところであろう。

以上のような具体的諸条件をかえりみると Index Test 自身も、また指示計器も目的の完全な達成に対しては簡単なものではないことが伺われる。

さてしからば、これらの条件からみたときいかなる指示方法があるかについてつぎに述べる。



(2) 仮標流量指示法の種類

いま Index Test の仮標流量指示法として応用できうると考えられるものを大別するとつぎの2種類とすることができる。

(A) 従来行われている絶対流量指示法を準用するもの。

(B) 流水通路の2点間に生ずる圧力差を利用する方法。

これらの方法をさらに具体的に紹介するとつぎのようにいえるであろう。

(A) 従来行われている絶対流量指示法を準用するもの。

今まで行われてきた絶対流量測定法のうち未知の量があるために必ずしも絶対値を示すとは限らない方法は原理的に相対流量ならざるをえないわけである。また絶対値の算出はむずかしいが相対的にははつきり差の表われるものもある。これらはいずれも、もし簡便に採用できる条件にさえあれば Index Test として採用すべきものと考えられる。

a. ピトー管法

ピトー管法自体は現在絶対流量測定に大いに活用されているところであるが、水圧鉄管あるいは上水槽、放水路などの断面全体の流速分布を測定しなくても、断面上の1点において、流速すなわち流量と指示量との間に簡単な利用しうる函数関係が存在すれば、これを利用することにより Index Test の実施ができる。ただし流路鉄管内にピトー管を挿入すると測定個所が発電所より比較的遠方にある場合が多く、また計器の破損により水車に危害をおよぼすことも考えられるので常時計器としては必ずしも推奨できないであろう。

b. カレントメータ法

上述のピトー管のかわりにカレントメータを使用するものであり、全くピトー管と同様な特長ならびに欠点が存在する。

c. 量水堰法

現在比較的小水量の水力発電所では効率試験のための流量測定法として量水堰を使用することがある。

量水堰はその測定原理からいつて流量と溢流水位との函数関係を基準としているものであり、その意味においてその溢流水位の読みから流量を算出することは比較的容易であり、Index Test の仮標流量として利用するには好適である。最近では大型の堰が使用されるようになったが、これについては絶対値としての疑問は当然あるが、函数関係を基準とする Index Test への利用についてはさしつかえないと考えられる。このように堰の溢流水位を仮標流量とする方法はよい方法ではないかと考

えられるが、まだ実用された例を聞かない。

(B) 流水通路内の2点間に生ずる圧力差を利用する方法。

流水通路を今1本の流管と考え、その上流と下流の2点間に Bernoulli の定理を適用すると

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + \zeta \frac{v_2^2}{2g} \dots\dots (1)$$

ここに  $h_1, h_2$  は上下流測圧点における圧力水頭

$v_1, v_2$  は上下流測圧点における速度

$Z_1, Z_2$  は上下流測圧点のある基準よりの高さ

$g$  は重力の加速度

$\zeta$  は損失係数

すなわち

$$(h_1 - h_2) + (Z_1 - Z_2) = \frac{1}{2g}(v_2^2 - v_1^2) + \zeta \frac{v_2^2}{2g} \dots\dots (2)$$

いま2点における流路断面積を  $a_1, a_2$  とすれば

$$a_1 v_1 = a_2 v_2$$

$$v_2 = \frac{a_1}{a_2} v_1 \dots\dots (3)$$

(3) を (2) に代入すれば

$$(h_1 - h_2) + (Z_1 - Z_2) = \frac{1}{2g} \left\{ \left( \frac{a_1}{a_2} \right)^2 - 1 \right\} v_1^2 + \zeta \left( \frac{a_1}{a_2} \right)^2 \frac{v_1^2}{2g} \dots\dots (4)$$

2点における圧力を測定する計器を同一水平面に置けば計器の読みでは  $Z_1 = Z_2$  となり、この場合には

$$h_1 - h_2 = \frac{1}{2g} \left\{ \left( \frac{a_1}{a_2} \right)^2 - 1 \right\} v_1^2 + \zeta \left( \frac{a_1}{a_2} \right)^2 \frac{v_1^2}{2g} = \left\{ \left( \frac{a_1}{a_2} \right)^2 (1 + \zeta) - 1 \right\} \frac{v_1^2}{2g}$$

となる。

$a_1, a_2$  は測圧点については一定であるから、 $h_1 - h_2 = h$  とおき、 $\left\{ \left( \frac{a_1}{a_2} \right)^2 (1 + \zeta) - 1 \right\} = k$ 、 $v_1$  のかわりに単に  $v$  とすれば

$$h = k \frac{v^2}{2g} \dots\dots (5)$$

となる。すなわち一般に圧力水頭差は流水速度の2乗に比例するという水力学の原則がなりたつ、ここに  $k$  の値は断面積および水頭損失係数に関するものであるから、これは  $v$  の函数であるとするのが妥当で、このように考えると (5) 式は

$$h = K v^n \dots\dots (6)$$

と書くことが一般的であろう。

いま (6) 式の両辺の対数をとつてみると

$$\log h = \log K + n \log v \dots\dots (7)$$



となり、 $\log h$  と  $\log v$  すなわち  $\log Q$  とは直線的な関係を保っているわけで、Index Test の仮標流量としてこの2点間の圧力差をとることが、甚だ適格な方法であるといわなければならない。

このような意味から従来 Index Test の仮標流量にはこの原理を利用したものがもっぱら採用され、Index Test といえどもあたかもこの関係を利用した流量測定法のことであるかのごとき観を呈しているが、真実は Index Test として利用すべき最も簡易な方法の1種としての代表的なものであると見るべきであつて、(A)にのべたごとき方法の効用を見逃してはいけなからう。さてこの2点差圧法にも現在2通りの方法が考えられている。

- a. 鉄管路および上水槽を利用する方法
- b. 水車内の部分を利用する方法

つぎにこれらについて具体的にその方法について述べる。

- a. 鉄管路および上水槽を利用する方法

これに属する方法を列挙すると、

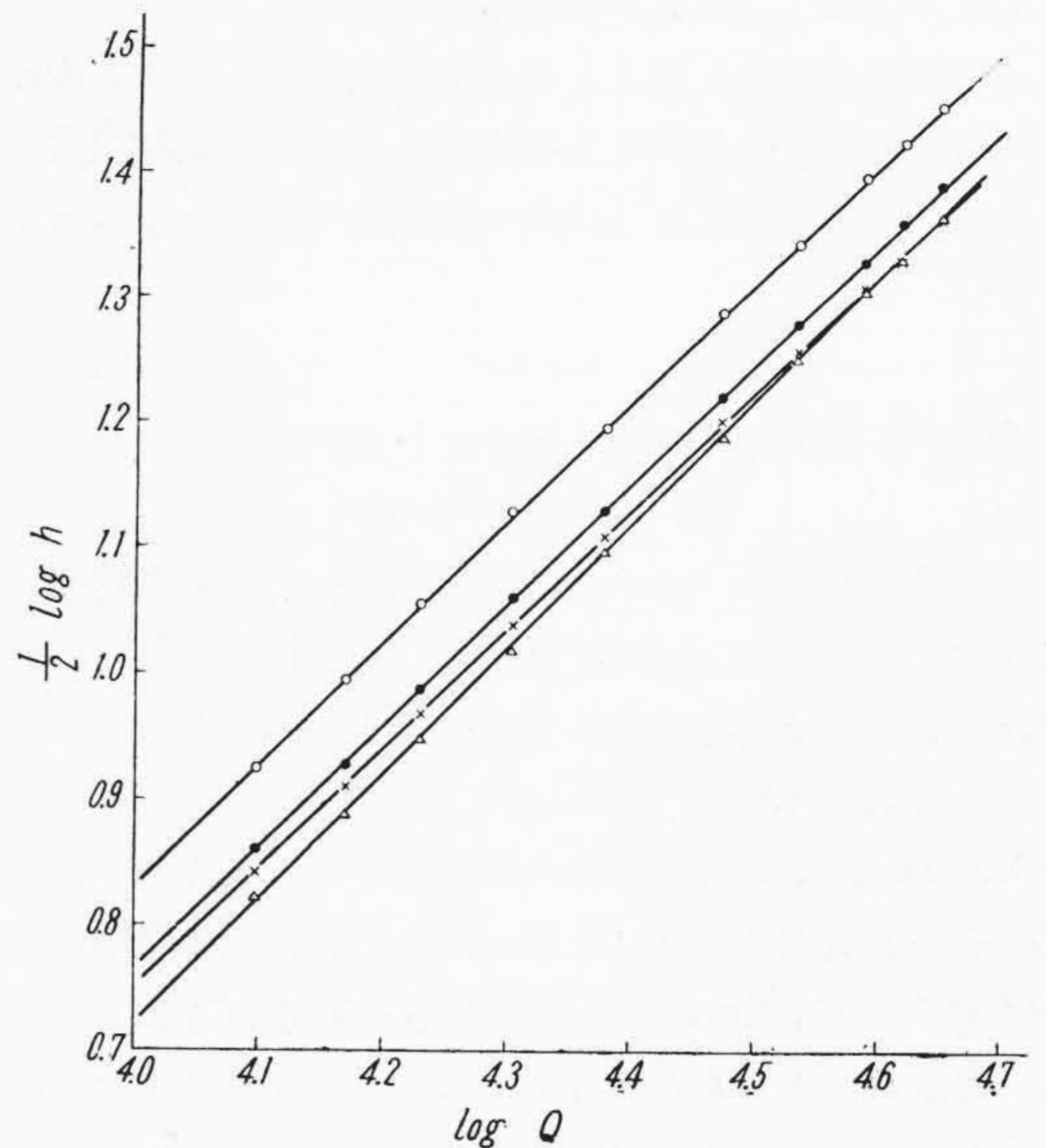
1. ベルマウス法

水圧鉄管の入口がベルマウスの形状をなしているものでは、すべての場合を通じて比較的安定した流入状態を現出するのが常であるから、その開口側すなわち水槽水位とベルマウス直後の管壁との間の圧力差を測定すれば、上述の原理によつて流量に関連した圧力差がえられる。この際ベルマウスの流動係数が確認しえれば、ただちに絶対流量の測定法ともなる性質のものであり、世にいうベルマウス法はこれを指すものである。一般には水圧鉄管入口の形状が完全な理想的ベルマウスを形成している場合はきわめて稀で、絶対流量に準じた流量値しかえられないものである。しかし構造が簡単で試験も容易であるから、良好な方法といふことができる。

筆者の1人は昭和24年に東京電力日橋川発電所において、同社の川崎技師に要請して、この方法でカプラン水車の Index Test を行つていただき、カプラン水車の羽根車羽根角度と案内羽根開度との関係のあやまりを指摘し、正常運転状態を現出することをえたという経験を有している。ただし指示圧の取出し場所が一般には発電所と離れた地点にあり、発電所内にこれを指示する計器を取付けねばならないのと、圧力差の記録値が比較的小さいということが欠点といへばいえるわけである。

2. 漸縮管法<sup>(10)</sup>

水圧管路の途中の水車に入る前に比較的絞り度の大きい漸縮管を持つ場合には、その漸縮部の上流および下流の側壁における圧力差をとれば上述と全く同様にして流量に関連した圧力差がえられる。これはベンチュリー流



第2図 模型水車によるペルトン水車の Index Test の1例

Fig. 2. Some Results of Index Test for Model Pelton Wheels

量計であつて特に新しいものではないが、それだけに比較的正確に流量指示をあたえるものであり、確実な検定が行われれば絶対流量値を示すこともできよう。しかし一般に管路が理想的でないために、流れの状態が画一の流速分布をしているとは限らないので、必ずしも絶対流量をうるに簡単ではない。Index Test としての仮標流量を示す方法としては良い方法といふことができるが、この場合も1の方法と同様な事柄を欠点として挙げることもできよう。

3. 管路損失法<sup>(11)</sup>

管路の上流および下流の2点間の圧力差は、その管の形状および摩擦損失がともに流速の2乗に比例した値を示すことから、これを測定すれば流量と関連した値となるわけである。さらにこの方法を極端にすると、下流側の1点のみを測圧し、上流測点を上水槽にとることもできる。この方法では2点間の距離を大きくさえすれば圧力差を大きく表わすことができるが、両測点が極端に離れてしまうので差圧の指示に工夫を要するので常時計測する計器としては必ずしも使用に便利だとはいえない。

また管路の内面の状態によつて当然指示圧が変つてくるので、永い期間にわたり一定指示をうることはむづかしい。この方法の1応用法として管路の曲管部上下の測圧をとる方法も考えられるが、一定指示をつねにえようとするには多少冒険といわざるをえない。

4. その他

以上のような適用は必ずしも上にのべた場合に限られ



たものではなく、あらゆる流水通路に適用できる。

この方法の特長とするところは2点間に介在する水頭損失は、その原因が単なる管摩擦または形状抵抗損失であるために特別に異常な位置での測定でないかぎりほとんど

$$h = Kv^2$$

なる法則に支配された値を示す、したがって

$$\log h = \log K + 2 \log v$$

となり  $1/2 \log h$  と  $\log v$  すなわち  $\log Q$  とは対数線図では  $45^\circ$  の傾斜をもつた直線となり、Index Test 法の仮標流量としては良好な指示をあたえるものである。

具体的な実例をあげれば、ペルトン水車に対する Index Test 用の流量計取付の位置をノズル管の上流の異面積の2断面にとりつければ、その結果は第2図のように  $45^\circ$  に近い傾斜をもつた直線的関係が簡単にえられ、後述の方法のようなむずかしい考慮なしに十分な精度のものがえられる。第2図は当研究室におけるペルトン水車の模型について行つた実験結果の1例である。

このことは管路に沿うた2点の圧力差はほぼ流速すなわち水量の2乗に比例することを裏書きするもので、その絶対値は前述のように管の状態に応じて往々にして変わるものであつても、対数線図の上での傾斜はほとんど変わらないという利点となつて表われる。ただしこのことは単純な管路についていえることであつて、複雑な場合には簡単には定められないことはいうまでもない。

#### b. 水車内の部分を利用する方法<sup>(1),(12)~(16)</sup>

Index Test といへば、あたかもこの方法のことであるかのように考えられる程現在では普及している方法である。すなわち Peck 法および Winter-Kennedy 法という名称で知られている2種の方法がこれに属する。

なぜこのようにこれらの方法が普及したかを考えるに最大の利点は圧力差が比較的大きいこと、測圧孔が水車自体の中にあるため計器の取付が便利であること、およびここで読まれた流量が他に流出することなく全部水車にのまれることにより、誤差として考えらるべき流量が存在しないことなどをあげることができる。

しかしひるがえつて考えるに、この方法はその測圧孔の決定に対しては必ずしも容易ではなく、多くの基礎的な研究を行つて、水車内の流動の一般的な法則を把握しない限りの確な測定孔を決定することは無理といわねばならない。

方法の原理としては Peck 法、Winter-Kennedy 法といへども特に異つたものではなく、前述の流水中の2点における圧力差がその真の速度または流量に比例するという原則によるものであり、ただこの2点をいかに選べば流量との対数関係が最も理想的であるかが問題だけ

である。このような関連をえしめることは、単純な1本の管路などの場合と異り、複雑な水車内の流水については甚だ困難である。後述するようにこれらの圧力差が指示としての役目を果たするためには水車外函内の圧力分布状態、流速分布状態に応じて、測圧孔の取出しを考慮しなければならないわけである。

また、これらの方法は理論的には Peck 法は固定羽根上の2点を、Winter-Kennedy 法は外函側壁上の水車中心を含む同一断面上の2点をとることが合理的であるとされているが、これらのことは理論的に理想的な流水状態を確立した場合にそのようになるというだけのことで、実際の外函内の流水はそれほど理想的な流れをしていないので、このような方法で満足しうる個所は多くない。実際問題としてはこれらのいずれの2点の組合せをとつてもさしつかえはなく、最も性能のよい組合せをとるべきである。ただこのような経験的な2点の組合せには一般性がなく、1つの水車で結果がよくても、他の水車についてその場所が必ずしも良いとはきまつていないわけではなく、また、性能の安定性からみてもすぐれているとは考えられないので、合理的な組合せがいずれも不十分なきにとらるべき応急手段として考える方が至当であろう。

東京電機大学の池谷教授<sup>(17)</sup>の研究によれば外函の最外周に沿うて設けた一連の測圧孔が良い結果を示すとされているのは興味あるところであるが、これには外函内の側圧分布の影響があるので、外函の形状と圧力分布の関係を明らかにされればさらに確実な資料がえられるであろう。

なお、この方法については後で詳述したいと考えるのでここではこの程度にとどめることとする。

### 〔V〕 Index Test 法の活用<sup>(1),(14)</sup>

前章までに Index Test 法についての概略の説明を終つた。さてしからば、このような Index Test は実発電所においていかに活用されるべきであろうか、このことはすでに本文の冒頭にも述べたところであるが、順序としてここにもう一度すでに古くからいわれていることも取り入れて少しく立入つて調べて見よう。

#### (1) 指示流量計の取付

先にも述べたように、発電所で使用する水量の絶対値は現在の測定技術を以てしては、その大要はすぐつかめるが正確にはなかなかつかみがたいといわなければならない。しかし、いかなる原動機と雖もその入力に対してなんの基準もなしで運転されることはゆるされない、たとえその絶対値は正確にわからなくても、相対的な多寡でもよいからつかんでいなければ合理的な運営は行いが



たい。しかし、このような相対的な流量値を知るとしてもそれが流量と一義的に結びついたものでなければ意味がない。しかもこの値は常時一定の性能を持つておらなければ役に立たない。幸にしてこのような良好な測定点がえられたならば、ここに指示計器としてあらかじめ準備されたいわゆる指示流量計をとりつけ、指示流量計の指示によつて発電所の運営を行うべきである。このような計器をとりつけるためには、指示圧力差が流量計に適合した指示を示さなければならないことは勿論である。

さて、前にわれわれは(6)式によつて一般に2点の圧力差は

$$h = Kv^n \dots\dots\dots(6)$$

で示されることを知つており、この両辺の対数をとれば

$$\log h = \log K + n \log v \dots\dots\dots(7)$$

となり、 $\log v$  を  $\log Q$  とおきかえれば

$$\log h = \log \bar{K} + n \log Q \dots\dots\dots(8)$$

となる。

この式において  $\bar{K}$  および  $n$  はその水車または測定個所の特性によつて定まる数であるから(8)式を線図に示した場合、もし  $\bar{K}$  および  $n$  が常数なれば第1図②のように直線となる筈である。図において  $\bar{K}$  は図の直線の標準座標軸からの高さを示すことになり、 $n$  は直線の傾斜を示すことになる。

ここに Index Test としての第1の条件は  $n$  が Const であること、すなわち直線の傾斜が一定であること、換言すれば曲線とならないことが第1であるとともに、 $\bar{K}$  の値が一定、すなわち何回試験を繰返しても同一の点の軌道をたどるといふことが必要条件となる。

以上が通常の Index Test を行う場合の必要条件であるが、もし常時流量計をとりつけて流量指示を行わんとする場合には、別に製作された流量計をこれにとりつける必要がある。この場合  $n$  が一定であつてもあらかじめ予想しえない値をとるものとする、計器の目盛りの目盛り方は一々流量計毎に変わることになり、はなはだしくは流量計の指示最大容量も決定することができず、流量計としては製作上はなはだ不便なものとなつてしまうことになる。経験によれば  $n$  の値は測定個所によつては相当のひらきを生ずるものであつて、流量計製作の面からは是非とも一定の値であつてほしいところである。

しかし原理的に考えるとき、もし安定した良好な流動状態がえられれば  $n$  の値は2となるべきものであり、実験上も2を僅かに前後した程度のものである。これは水力学上当然なことであることは(5)式によつて明らかであるところであり、この場合は(8)式は

$$\log h = \log \bar{K} + 2 \log Q \dots\dots\dots(9)$$

となり、これはまた

$$\frac{1}{2} \log h = \frac{1}{2} \log \bar{K} + \log Q \dots\dots\dots(10)$$

$$\text{または } \log \sqrt{h} = \log \sqrt{\bar{K}} + \log Q \dots\dots\dots(11)$$

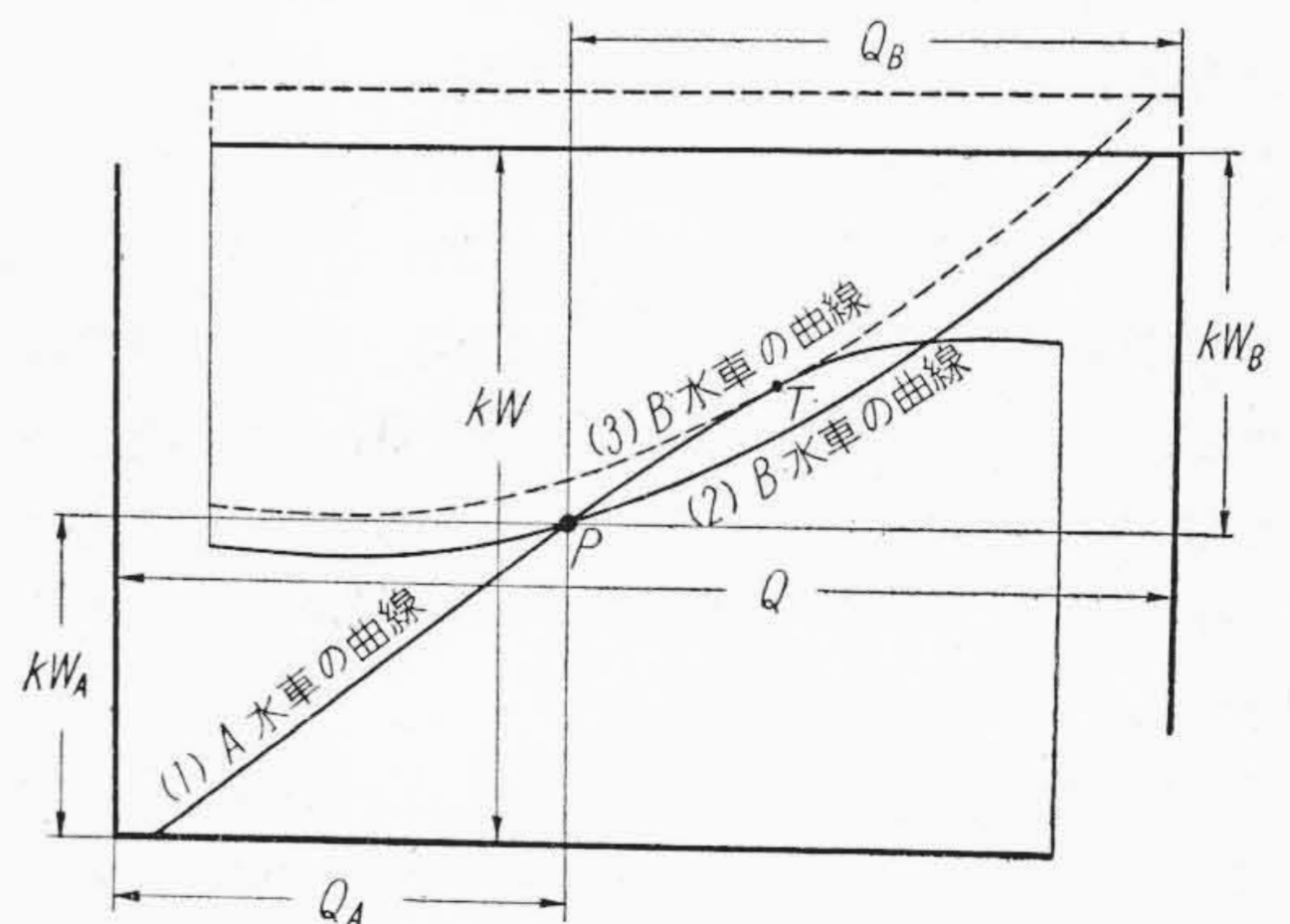
となり、このような場合を図示すると、その傾斜が座標軸に対して丁度45°となるわけである。したがつて流量計の取付に対しては、流量の多寡にかかわらず(10)式または(11)式の関係が存在すれば、流量計としての構造をそれに合うように大量に汎用なものを作ることができる。新型の流量計は水銀マンメータを  $n=2$  となるような形状に合せて製作することにより、指示計器の読みを直線目盛とすることが行われている。このような意味からは  $n=2$  となるような点を探し出すことが、流量計の取付への第1の応用例といふことができる。

もし目盛がこのように直線目盛となつておれば、これを実流量との関連で示す場合にも、一々全流量にわたつて絶対流量測定試験を行わなくても、一点における測定によつて他のすべての目盛をきざみうることになるので、多大の便宜をあたえられるものといわなければならない。

以上のようなことから流量計取付に際しては、いかなる測圧孔が45度の関係を示すかを確かめるために是非とも Index Test を行わなければならないわけである。

(2) 水力発電所の総合経済運転

2台以上の水車を備えた水力発電所においては、その各々の水車にいかように水量を分配したら最も経済的であるかは発電所の運営上重要な事柄で、これには各水車の水量と出力の関係がわかつていれば、随時流量指示計器をたよりに水量と出力関係を示す曲線の傾斜が同一になるような運転を行えばよいといわれている<sup>(19)</sup>。すなわち A, B 2台の水車をそなえた発電所で両水車の出力を  $kW_A, kW_B$  水量を  $Q_A, Q_B$  とし、発電所の総合出力を  $kW$ 、水量を  $Q$  とすれば



第3図 2台の水車の総合経済運転方式  
Fig. 3. Economical Operating System of Two Water Turbines



$$kW = kW_A + kW_B \dots\dots\dots(12)$$

$$Q = Q_A + Q_B \dots\dots\dots(13)$$

となる。この  $Q$  は発電所に流入する全水量であり、 $Q_A$ ,  $Q_B$  への分配方法は色々あることになる。

いま同一の  $kW$  を出すのに  $A$  水車の  $Q_A$  を単独に変えると

$$\frac{dkW}{dQ_A} = \frac{dkW_A}{dQ_A} + \frac{dkW_B}{dQ_A} \dots\dots\dots(14)$$

$Q_B$  についても同様のことがいえるが

$$Q = Q_A + Q_B = \text{一定}$$

であり、 $A$  水車の  $dQ_A$  の増加は  $B$  水車の  $dQ_B$  の減少にひとしいから

$$dQ_A = -dQ_B \dots\dots\dots(15)$$

となり、 $Q_A$  についての (14) 式も  $Q_B$  について全く同様な性質のものとなる。

したがって出力の水量変化に対する最大値を示す条件

$$\frac{dkW_A}{dQ_A} + \frac{dkW_B}{dQ_A} = 0 \dots\dots\dots(16)$$

(15) 式の関係より

$$\frac{dkW_A}{dQ_A} - \frac{dkW_B}{dQ_B} = 0$$

すなわち

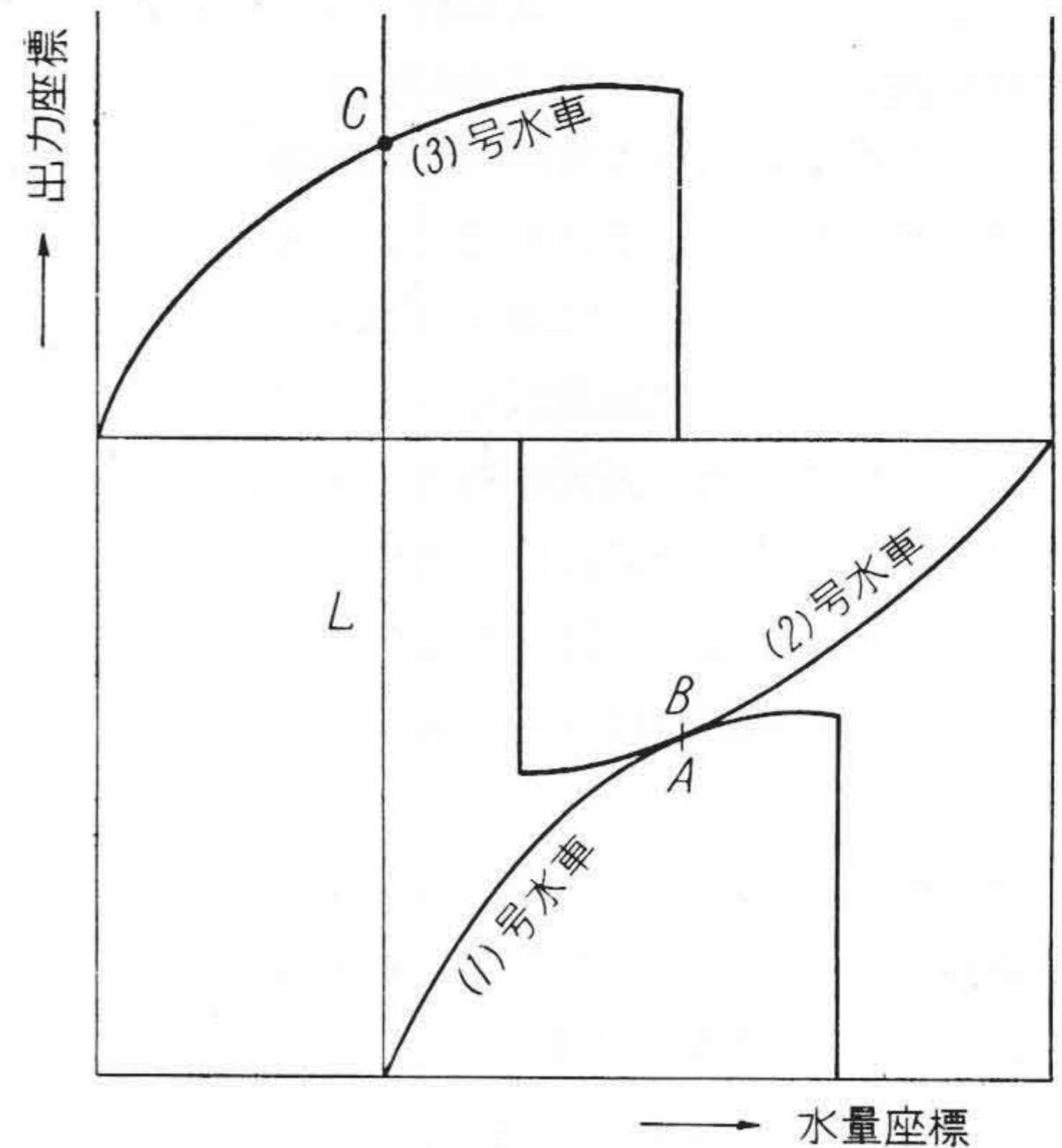
$$\frac{dkW_A}{dQ_A} = \frac{dkW_B}{dQ_B} \dots\dots\dots(17)$$

であることがわかる。この (17) 式は両水車の  $Q-kW$  曲線において、その水量  $Q$  に対する出力  $kW$  の曲線の勾配が両水車について同一の値をとる点で運転することが最も良い条件であるということを意味していることになる。

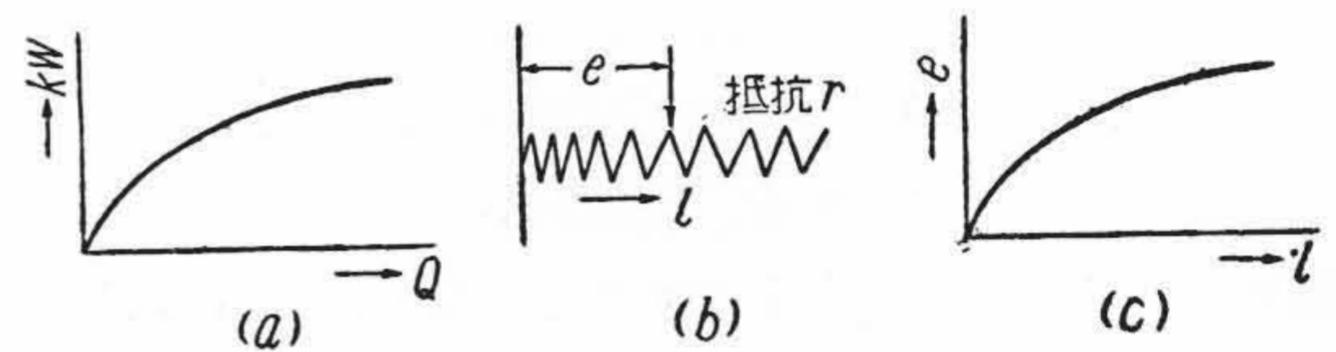
この方法を実用化するには  $A, B$  両水車の水量—出力曲線を型板に切り抜いて、 $B$  水車についての曲線を裏返し第 3 図のように重ね合わせると  $P$  点で両曲線が交わる。この縦座標 ( $kW$  軸) を垂直に移動して両曲線が相接する位置まで持つてきて、図の点線で示す (3) の位置におき、その切点  $T$  において  $A, B$  両水車を運転すれば、定められた横座標の  $Q$  に対し縦座標  $kW$  は最大となり、 $Q$  は全然無駄なく利用されたことになる。以上は落差  $H$  が一定としての場合であるが、変落差の場合には水量—出力曲線が変化する筈であるから、実用に当っては変動範囲内の数種のありうべき落差について操作しうるよう準備しておけばよい。

以上は 2 台運転の場合であるが、3 台の場合にはどうすればよいか、これに対処する方法は種々考えられるが、つぎのような方法は最も簡単なやり方の一つであろう。

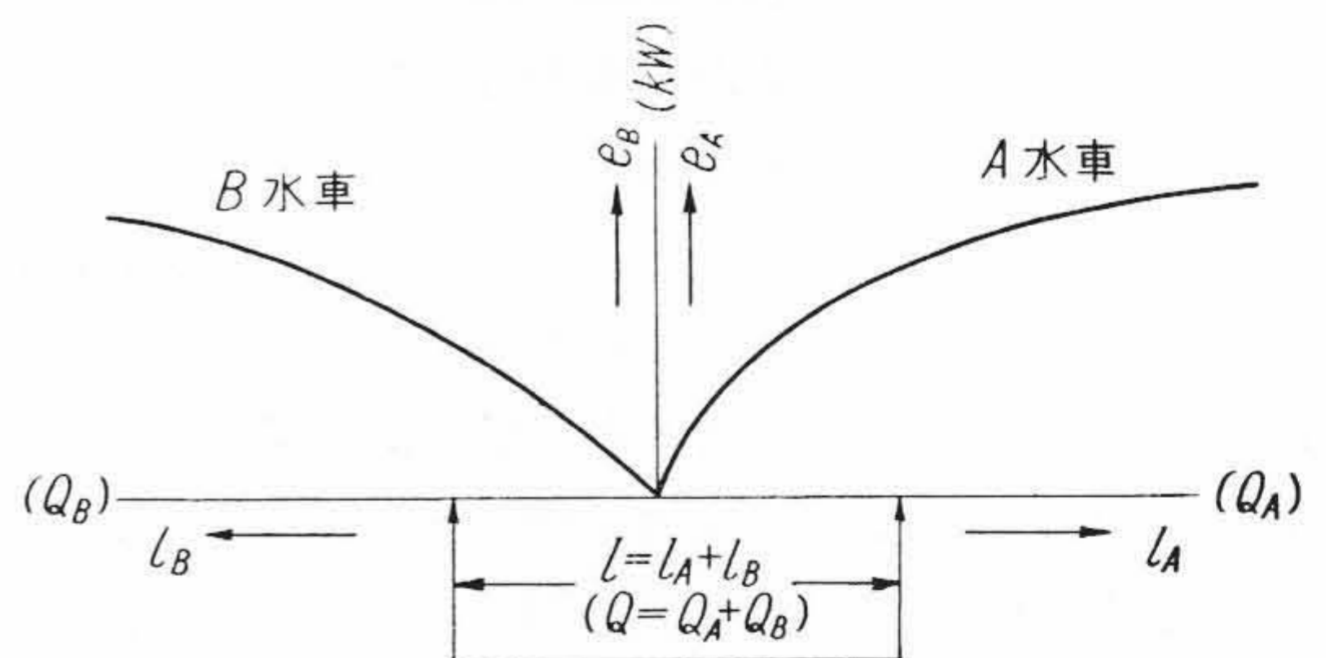
第 4 図はその方法の説明図である。今 (1), (2), (3) 号の 3 台の水車について上と同様な操作をなしうる特性



第 4 図 3 台の水車の総合経済運転方式  
Fig. 4. Economical Operating System of Three-Water Turbines



第 5 図  $kW-Q$  の関係を電氣的に指示する方法の原理  
Fig. 5. Principle of Electrical Indicating Method for  $kW-Q$  Relation



第 6 図 第 5 図に示した原理に基づく電気計器を使用した経済運転方式  
Fig. 6. Economical Operation System by Principle of Fig. 5

曲線の形状を作り、(1)と(2)の組合せについては前述の方法と同様であるが、(1)は横座標軸上を任意にすべりうるようにし、(2)と接するようになっており、(2)の上辺の横座標の上に(3)をのせ、(2)は右の縦座標に沿うて、(3)は左の縦座標に沿うて動くようにしてあれば、(1), (2), (3)の全水量は幅でおさえであるから、(1)の座標原点にたてた縦座標線を示す指標  $L$  と (3)の曲線縁との交点  $C$  が最高の位置を占めるということが、



この3台の水車運転における最高出力運転ということになる。このとき A, B, C と記載した3点の状態が総合最大出力を現出する状態となる。

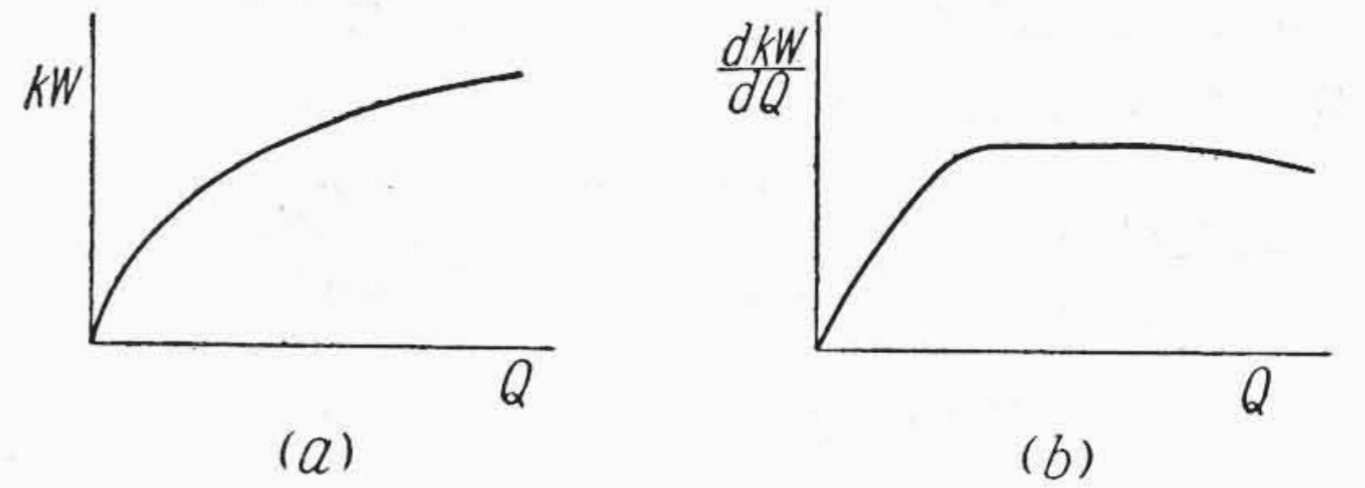
4台の場合には(3)の上にさらに(4)を逆に接せしめて、(4)の底辺が最高になるようにすればよい。それ以上の台数に対しても当然この方法を拡張できる筈であるが、このように台数の多い発電所ではそのうち数台を最高効率の点で一定出力運転を行わしめ、残余の水車に対し上述のような経済運転方式をとる方がよいと思われる。

また、各々の水車の  $Q-kW$  曲線を電気抵抗線  $\gamma$  を用いて第5図のようにおきかえると、すなわち(c)図の電圧  $e$  と端子の移動距離  $l$  との関係が(a)図の出力一水量関係曲線と同一になるように抵抗線  $\gamma$  を巻くことによつて、 $kW-Q$  曲線を電氣的に  $e-l$  曲線に置き換えることができる。しかして  $AB$  2台の水車の  $e-l$  曲線を第6図に示すように背中合せに組合せると、(13)式から  $Q=Q_A+Q_B=一定$  であるから  $Q_A$  すなわち  $l_A$  と  $Q_B$  すなわち  $l_B$  との和は  $l=l_A+l_B=一定$  となつて、この  $l$  を第6図の横座標の上を滑動させることによつて  $e_A+e_B=e$  すなわち  $kW_A+kW_B=kW$  が最大となる  $e_{max}$  の点を見出せば、 $A, B$  両水車に分配すべき水量が決定されることになり、この原理に基く経済運転計器がすでに考案されている。

さらに(17)式から各水車の出力と水量の変化の割合、すなわち、その微分係数が等しい点で各水車を運転すべきが理想的であることから第7図に示すように(a)の  $kW-Q$  曲線をもとに(b)の  $\frac{dkW}{dQ}-Q$  曲線を作つて、前述の電氣的計器と同様な方式によつて(b)図の  $\frac{dkW}{dQ}-Q$  曲線を電圧  $e$  と端子の移動距離  $l$  とにおきかえることによつて、常時各々の水車の  $\frac{dkW}{dQ}$  を指示計器に指示することができ、前述の原理に基く経済運転法はこの計器の指示を目安にきわめて容易に合理化運転ができることになるわけである。

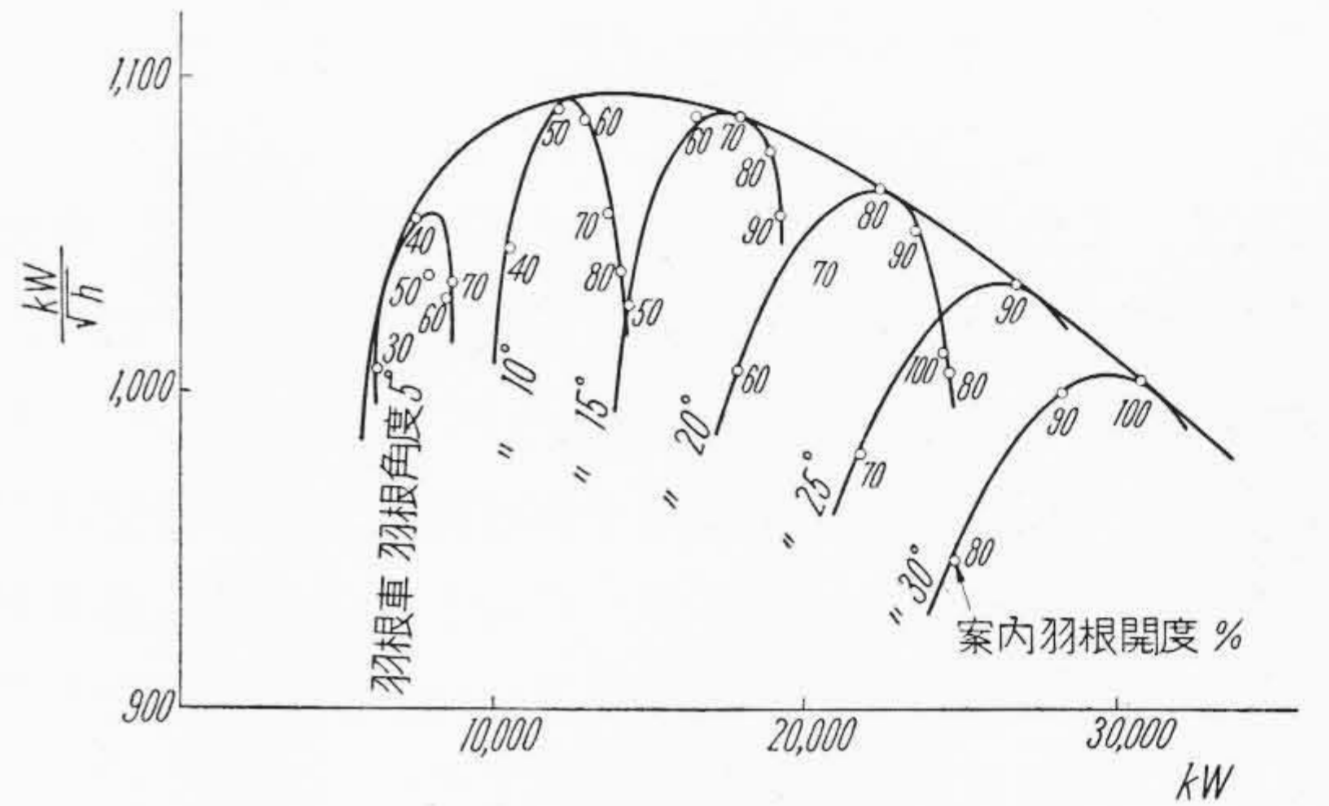
以上にのべた方法は一定の水量  $Q$  から最大の出力をえようとする場合の各水車への水量の分配方法についてであつたが、貯水式発電所などにあつては一定出力を出すための最小の水量  $Q$  を知りたいわけで、この場合にも上述の運転方式はきわめて有力な手段といふことができる。

このようにして最高経済運転状態を知ることはできるが、現在の電力事情では水量の制限よりも出力に対する要請の方が強い場合もあるので、この指示目盛によつて機械の調整を自動的に行うことが必ずしも実情に則しているとは思われないが、理想的には上記のような考えで行われるべきであろう。



第7図  $\frac{dkW}{dQ}$  を指示する電気計器の原理

Fig. 7. Principle of  $\frac{dkW}{dQ}$  Indicator



第8図 Index Test による仮効率曲線  
Fig. 8. Relative Efficiency Curve by Index Test

(3) カプラン水車の羽根車羽根角度と案内羽根開度の連動関係の検査

カプラン水車の羽根車羽根角度と案内羽根開度との連動関係はカプラン水車の特長の主格をなす最も重大な要点であり、この組合せの如何に誤りなきを期せねばならない。従来模型試験においてはこの事項に関する試験は必ず行つてはいるが、実物水車に対してはあまり行われていなかった。

前に述べた日橋川発電所の実例はこの件の試験としては我国では早期のものではないかと考える。この例では建設当初は最高効率運転をするように調整されていたものが、十数年にわたる使用中に調整に狂を生じ、低効率に運転されていたと考えられ、試験の結果によつて改められた好例である。

カプラン水車のような場合には、その絶対水量の測定はことのほかむずかしいもので、前に述べた簡単な直線関係の求められるものがあれば、そのマンメータの指示水頭差  $h$  をそのまま用い、仮効率として  $\frac{kW}{\sqrt{h}}$  をとることが多い。もし  $h$  そのものを仮標流量に相当するように、すなわち  $h \propto v^2 \propto Q^2$  であることがわかっている場合に  $\sqrt{h}$  のかわりに  $Q_i$  を用いてもよいわけである。この  $\frac{kW}{\sqrt{h}}$  がなぜ効率に相当するかをつぎに説明する。

われわれはここに水力学上の取扱を進めてきたが、Index Test の場合発電力の増強であるから、調査の対



象は発電機出力をとるべきであり、ここでもそのように論を進めることにする。

$$\begin{aligned} \text{総合効率} &= \frac{\text{発電機出力}(kW)}{\text{水車入力}(kW_T)} = \eta_G \frac{kW_w}{9.8QH} \\ &= \frac{kW}{9.8QH} \end{aligned}$$

ここに  $kW$  : 発電機出力       $\eta_G$  : 発電機効率  
 $kW_T$  : 水車入力           $Q$  : 水量  
 $kW_w$  : 水車出力           $H$  : 有効落差

$Q \propto \sqrt{h}$  であるから、結局総合効率  $\eta$  は

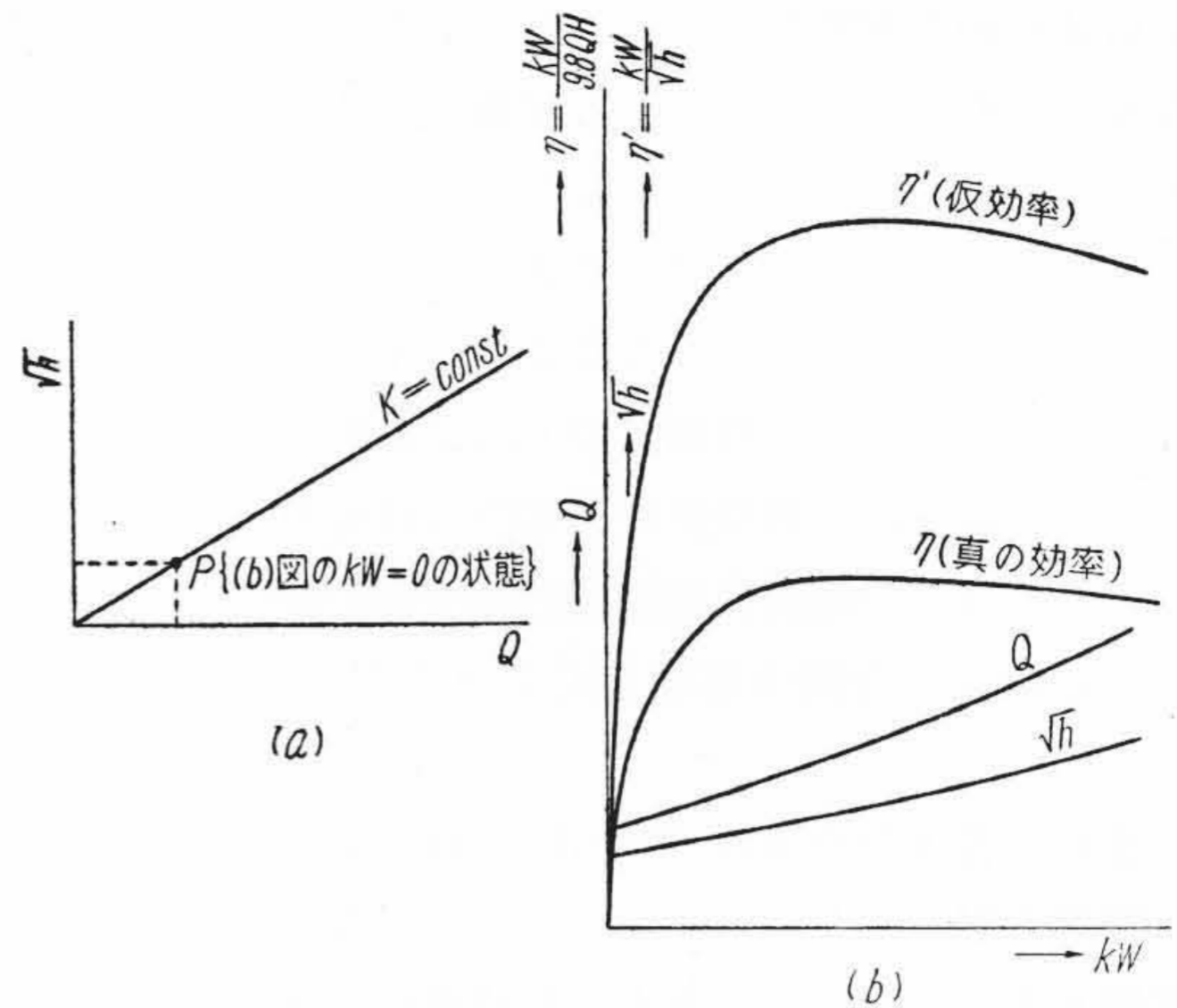
$$\eta \propto \frac{kW}{H\sqrt{h}}$$

となる。したがって総合効率  $\eta$  のかわりに  $\frac{kW}{H\sqrt{h}}$  を使用すれば、総合効率 ( $\eta$ ) 曲線の形状と非常によく似た、ただし値は全く別個の曲線がえられる。すなわちこの  $\frac{kW}{H\sqrt{h}}$  を仮効率として使用すれば運転性能の推定は行いうるわけである。一般に多くの場合、このうち落差  $H$  はその絶対値に比べ変化量は小さいから一定とみなしてよく、この場合にはさらに簡単にして

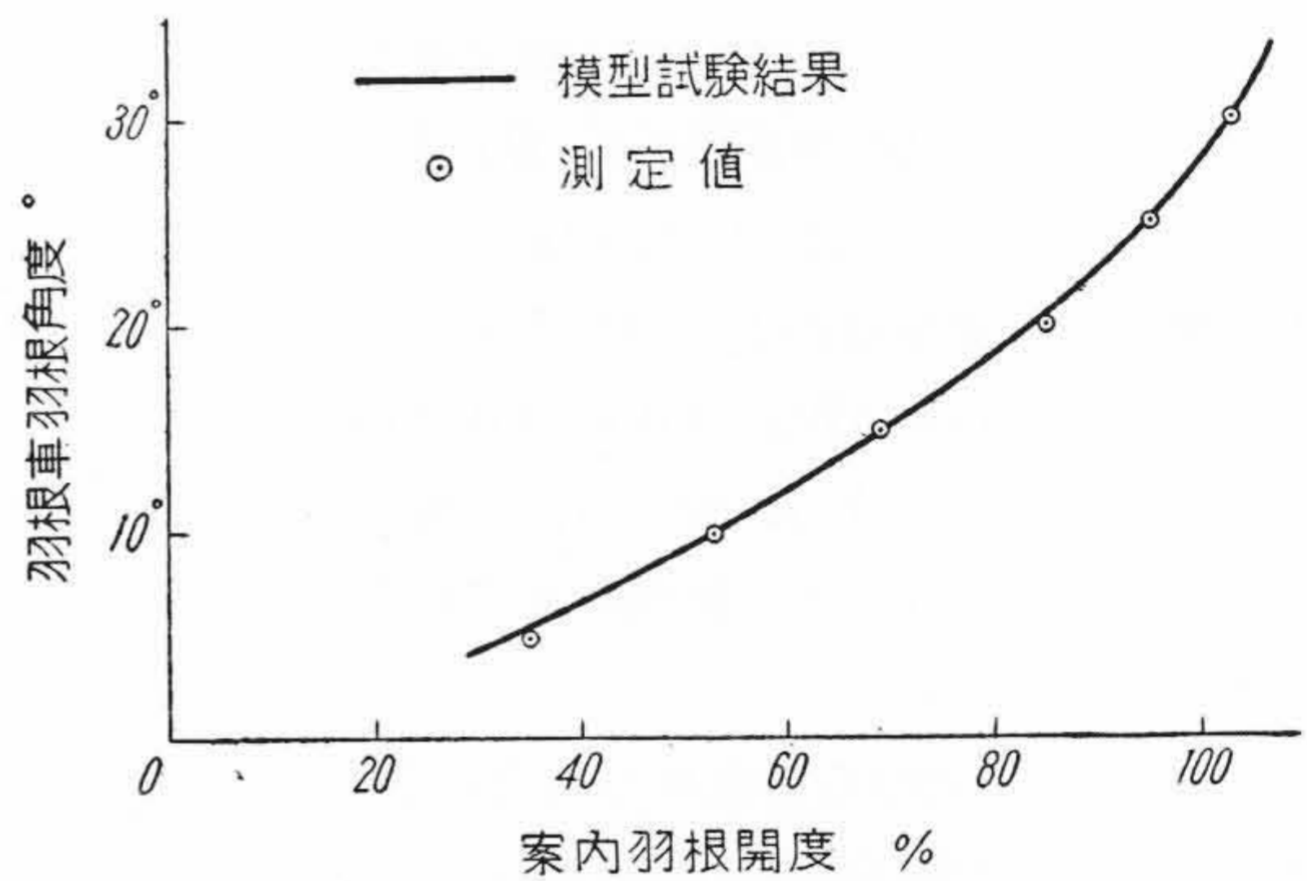
$$\eta \propto \frac{kW}{\sqrt{h}} \dots\dots\dots (18)$$

としてよい。従来 Index Test でよく使われている仮効率はこのような意味をもっている。多くの場合同一試験時に落差の変化はそれ程大きくはないので、この最後の式を使用する場合が多い。

第8図は筆者らが現地の実物カプラン水車について Peck 法測圧孔を使用して行つた結果の1例である。この仮効率曲線をながめると出力の増大と共に著しい効率の低下を来すかの感じを受けるおそれがあるが、これはつぎのような理由によるものであつて異とするにはあたらない。すなわちここに採用した (18) 式で示す仮効率  $\frac{kW}{\sqrt{h}}$  では真の水車入力  $9.8QH$  の代りに  $\sqrt{h}$  を使用してあるが、この  $h$  は本来 Index Test で使用する指示水頭差で真の水量  $Q$  とは  $Q = K\sqrt{h}$  の関係にあることはすでにのべたところである。(こゝにもちいた比例常数  $K$  は前述の (6) 式の  $K$  とはことなるが一般の習慣に習つて  $K$  をもちいる) これを図示すると第9図 (a) のようになる。そこで真の水車入力は  $9.8QH = 9.8KH\sqrt{h}$  とかきかえられる。ここに  $9.8KH = \text{一定}$  で、 $9.8KH = C$  とおけば (18) 式の仮効率では  $C=1$  として取扱つていることになる。今第9図 (b) の絶対効率曲線の  $Q$  の代りに  $\sqrt{h}$  を使用すると (b) 図の  $Q$  曲線は (a) 図の関係から  $\sqrt{h}$  曲線となる。したがつて絶対効率  $\eta$  の曲線は仮効率曲線  $\eta'$  のように変形してくる。いま仮効率を使用し  $C=1$  としているから、この  $\eta'$  曲線を  $C=9.8KH = \text{一定値}$  で割つてみると仮効率  $\eta'$  曲



第9図 仮効率曲線の性質  
 Fig. 9. Characteristic of Relative Efficiency Curve



第10図 羽根車羽根角度と案内羽根開度との関係  
 Fig. 10. Relation between Runner Blade Angle and Guide Vane Opening

線の形状は変形し真の絶対効率曲線とほぼ一致してくるわけである。これ以上の厳密を要する場合は水量も有効落差も厳密な測定を必要とすることになつて遂には絶対効率測定に帰することになる。以上のべたように仮効率曲線は真の効率曲線に比べその形状が変形しているか、羽根車羽根角度と案内羽根開度との関連性を検査するにはなんら支障がないわけである。

つぎに第8図の仮効率曲線から最高効率を示す角度と開度の関係を拾い集め、模型効率試験の成績と比較対照してみると第10図に示すようによく合致している。

〔VI〕 Index Test 法の将来の動向

以上の各章において Index Test 法に関する一般的な紹介を一通り終ることとするが、それでは将来 Index Test はいかなる方向に向かうであろうか、すなわち第III章でのべたように仮標流量の指示方法としていかなる方



法が最も多く採用される可能性があるかということである。これについてはその目的とするところにより必ずしも一方法に限定することはできないであろう。

たとえば発電所の流量を常に指示すべき流量計を取付けるという場合には、現在製作されている流量計が多くの場合水銀マンノメータを応用しているものであることから、その指示水頭差が比較的大きくないと計器としての性能を十分発揮しえないことになりこのような場合には測圧孔位置の選定には多大の苦勞をするが、Peck 法および Winter-Kennedy 法を使用することが至当であるといえる。しかし流量計の取付を問題とせず、単に一時的に Index Test によつて仮標流量を知つて経済運転の指針をうるためには特に Peck 法や Winter-Kennedy 法を使用するまでもなく他の方法によつて十分行いうる筈である。ただし指示水頭差があまり大きくないときには、その実験上の注意を細密に行わねば似て非なる結果を招来するおそれがある。要は試験の目的と発電所の構造とによつてどの方法を採用するかが決定されるわけである。

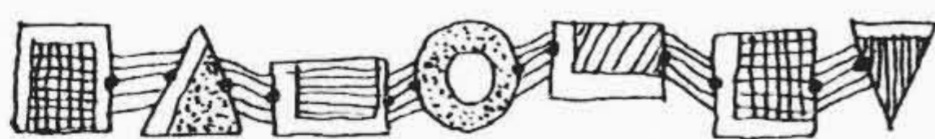
しかしいかなる場合と雖も、水力発電所において流量計をとりつけることは今後とも必ず行わねばあつてこれなくしては石炭の消費量を知らずして火力発電を行っているのと全く同様であり、将来共許さるべきではないであろう。従つて Peck 法および Winter-Kennedy 法による Index Test が将来ともますます盛に使用さるべきものと考えられる。

こゝにおいて筆者らは次号以下にこれら両法について詳述したいと考えるしだいである。他の方法についてはすでにのべたところ、および原理的には特に問題となる点もないので、以下には省略するが、上述のごとく一時的な試験に際してはきわめて簡単に使用しうるものであ

ることを説明すると共に、将来計器の発達と共に指示水頭差の小さい場合にも適用しうるものがあれば流量計取付用としても使用しうるものであることを忘れてはならない。  
(第1篇おわり)

参考文献

- (1) G.H. Voaden: Trans, A.S.M.E. 73 481 (1951)
- (2) J.M. Mousson: Trans, A.S.M.E. 63 369 (1941)
- (3) E.B. Storowger: Proce, N.E.L.A. 85 872 (1928)
- (4) A.S.M.E: Power Test Codes, Hydraulic Prime Movers (1949)
- (5) S.E.I.: Swiss Rules for Hydraulic Turbines (1946)
- (6) Societe Hydrotechnique de France: Code Dessais Des Installations Hydrauliques (1951)
- (7) Institution of Mechanical Engineers: Standard Test Code for Hydraulic Power Prant (1924)
- (8) 日本工業規格 JIS B. 8301 (1955)
- (9) 水車標準調査委員会: 水車標準規定 (JEC 117) (昭 22-12)
- (10) 文献(3)の 898 頁参照
- (11) C.W. Harris: Proce. A.S.C.E. 75 555 (1949)
- (12) I.A. Winter: Power 77 126 (1933)
- (13) E.B. Storowger: Electric World 103 535 (1934)
- (14) 山崎, 手島: 電気計算 20 1079 (昭 27-9)
- (15) 池谷: 流量測定法 151 (昭 29-2)
- (16) 内丸: 水力タービン 247 (昭 29-10)
- (17) 池谷, 加藤: 東京電機大学研究報告 (昭 28-4)
- (18) F.H. Rogers L.F. Moody: Engineers and Engineering 42 169 (1925)
- (19) C.V. Davis: Handbook of Applied Hydraulics 656 (1942)



新案の紹介



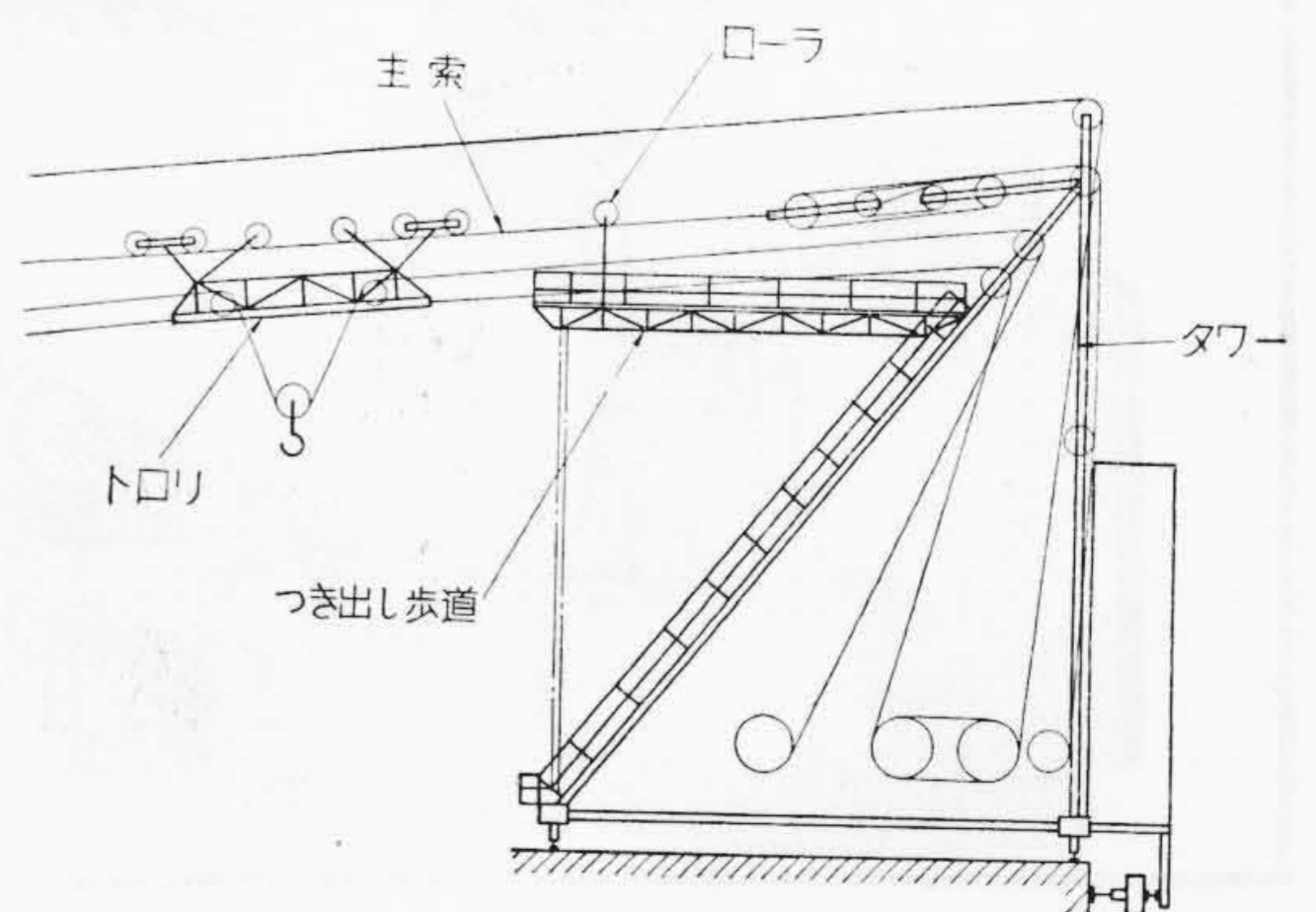
実用新案 第 446336 号

松崎直忠・宮内清

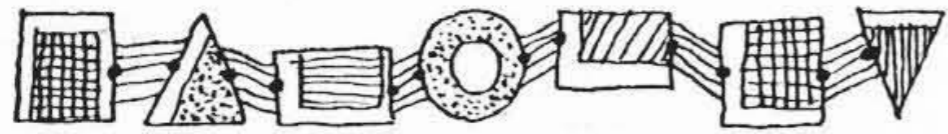
ケーブル起重機のトロリー用歩道

ケーブルクレーンのタワーには、トロリーを点検する場合にトロリーに移乗するためのつき出し歩道が設けられている。

従来のつき出し歩道はタワーに対して固定されているが、このつき出し歩道は、一端をタワーにピン止めし、他端を主索上に設けたローラに懸吊させて可動式にしたものである。こうすれば、主索の緊張装置の状況およびトロリーに懸吊する荷重の変化により主索が上下に変位しても、それに応じてつき出し歩道がその位置をかえトロリーの高さとも一致するので、トロリーへの移乗に不都合をきたすことがない。  
(富田)







1. 実用新案 第455220号

高橋長一郎・大竹政純

多心ケーブル端末部

2. 実公昭30-16959

高橋長一郎

ケーブル端末部

上記はポリエチレン電力ケーブル、ブチルゴム電力ケーブルなどの新型電力ケーブルの端末部構造に関する新案で、加熱収縮性ビニルチューブを利用したものである。

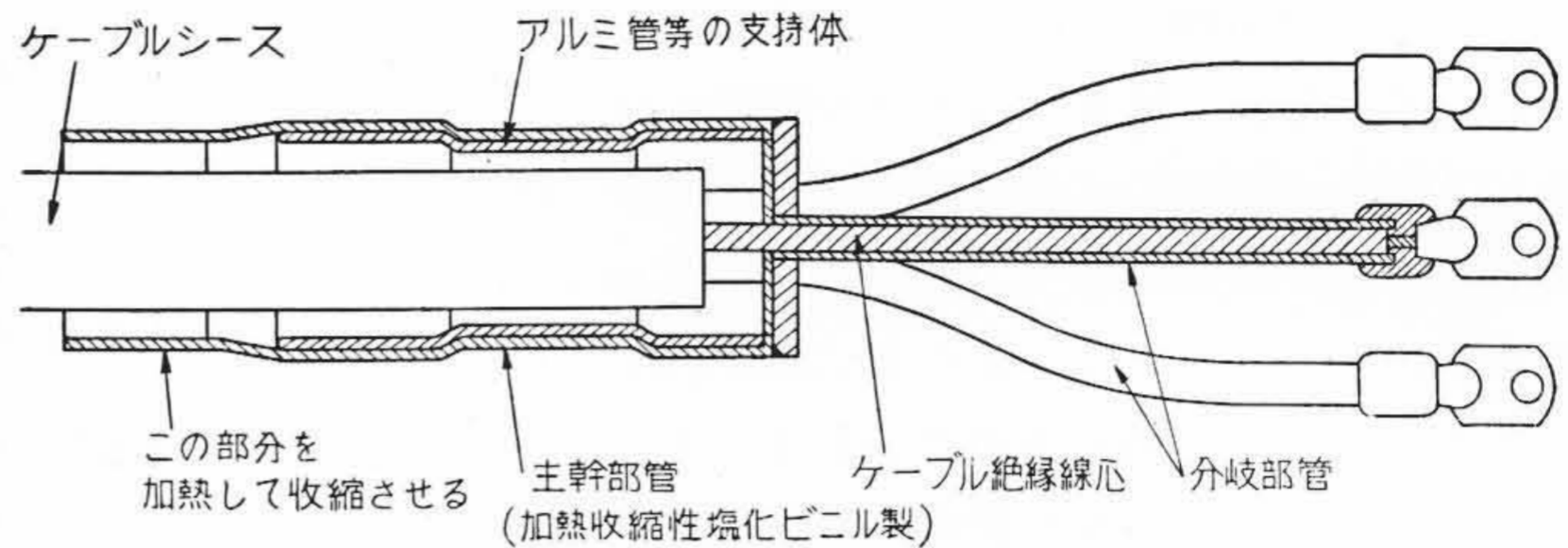
1. は多心電力ケーブルの端末部についての新案で、使用するケーブルヘッドは第1図に示すように加熱収縮性ビニルチューブでできた主幹部管と塩化ビニル製分岐管とによつて構成され、分岐したケーブル絶縁線心には分岐部管を、またケーブルシースには主幹部管をそれぞれ着装し、主幹部管を加熱することによつてこれを収縮させてケーブルシースに密着させるものである。

2. は遮蔽体ベルマウスを施したケーブル端末部についてのもので、第2図に示すようにケーブル端末部の外部シース、遮蔽体ベルマウス、端末補強絶縁体、ターミナルの各部周上を覆うよう加熱収縮性ビニルチューブを被せ、これを加熱して密着被嵌させた構造に関する新案である。

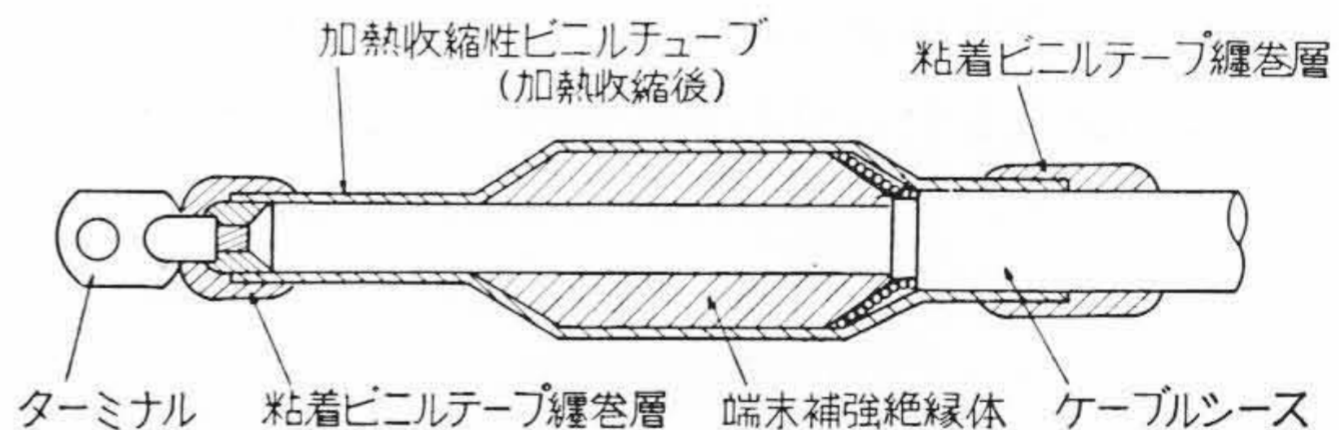
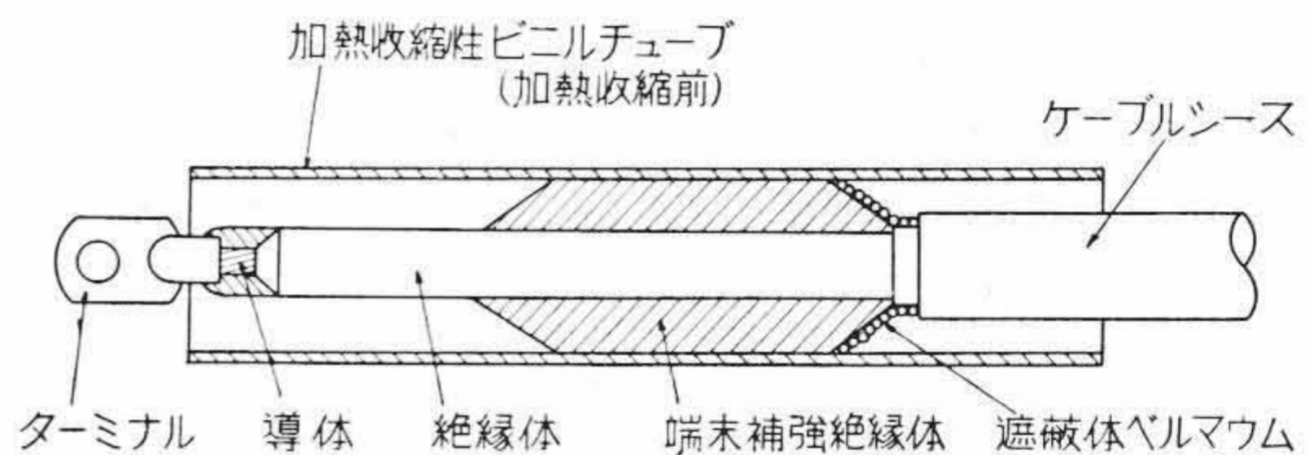
以上の案によるプラスチックケーブルヘッドはつぎのような特長をもっており、需要家の好評をえている。

- (1) 小型かつ軽量である。
- (2) 気密性である。
- (3) 電氣的にも十分な信頼性がある。
- (4) プラスチック製であるので耐化学薬品性、耐蝕性にすぐれている。
- (5) 施工が容易で特別な熟練を必要としない。
- (6) 外観が優美である上に廉価である。

(長山)

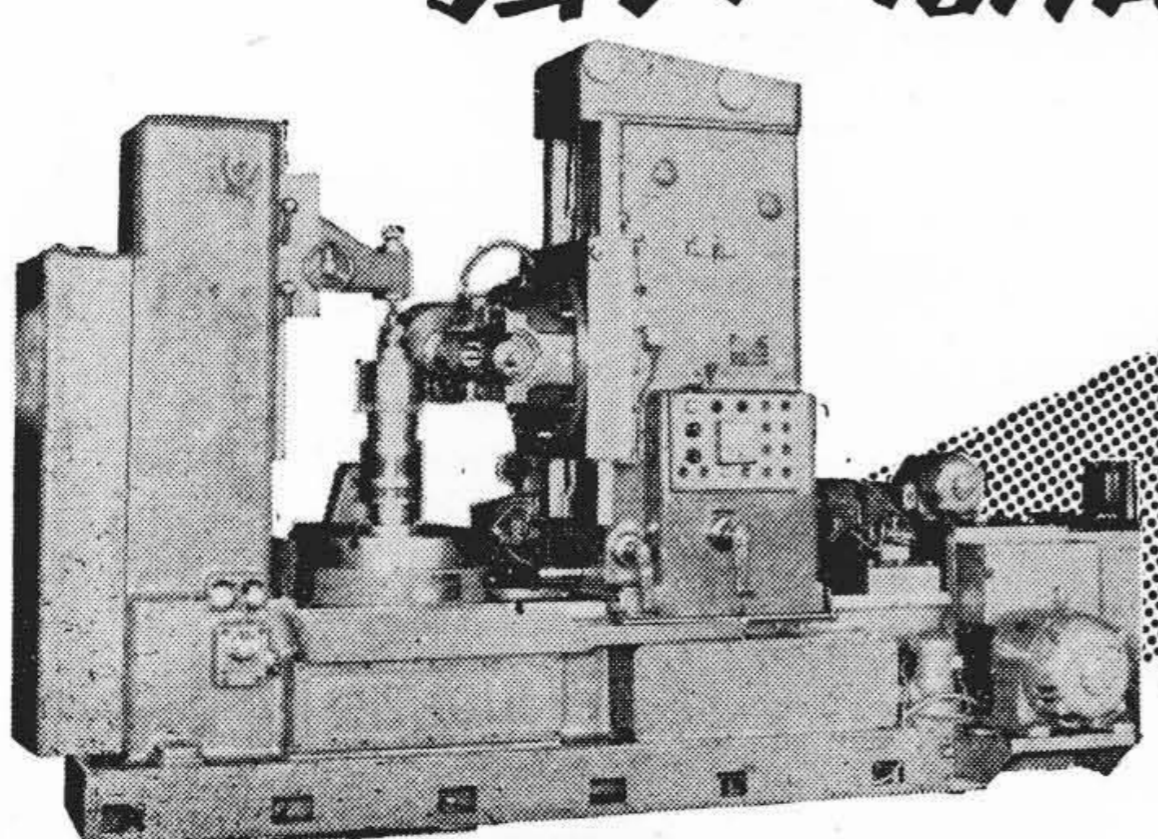



第1図



第2図

強力・高精度を誇る





日立800耗  
木7.盤

日立製作所