

水車外函内の流れと Index Test

山崎卓爾* 手島友亮**

The Flow in Waterwheel Casing and Index Test

By Takuji Yamazaki and Tomosuke Tejima
Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

Abstract

The writers investigated from various angles into the water flow in the spiral casing which is most extensively used for the waterwheel, having recourse to the two most prevailing Index Test methods, i.e. Peck method and Winter-Kennedy method, and the investigation revealed that the flow in the casing which has been considered relatively simple and handled in that light, represents a phenomenon of considerable complexity. So the investigation extended into the various factors which influence that water-flow, and found as a result that the waterwheel can be operated with larger stability by making the water stream flowing into guide vanes and to the runner more regular and uniform. At the same time, suggested by the flow around the stay vanes, the writers studied in some detail about the problems concerning the design of pressure-measuring holes on the Peck method.

Also, they clarified the direction of propensity of main flow in the spiral casing by means of the Winter-Kennedy method, and taking the sectional secondary flow into account, determined the relation between the shape of casing and the pressure-measuring hole which is to be brought about when the pressure measuring hole is provided.

The article explains based on the results thus obtained that an apparently simple method of quantity indication that is known as "Index Test" calls for the most careful study in its practical application.

〔I〕 緒 言

フランシス水車並びにカプラン水車に広く採用されている渦巻型水車外函内の流動状態は、従来比較的単純なものとして取扱われているようであるが、実際には決して簡単なものではあり得ない。せめて羽根車及び案内羽根に入る直前ではかなり整流した流れになつていなければ水車の安定した運転は望めないであろう。羽根車に入る水の流動状態を左右する素因は極めて多いが、ここではそれらのうちまず固定羽根周辺の流動状態を知る目的で、模型水車の固定羽根上に Peck 法の測圧孔を設けて Index Test^{(1)~(3)}を行い、固定羽根の形状とその周辺の

流動状況をあきらかにし、その結果として固定羽根周辺の水の流れを整流することによつて、水車のより安定した運転状態が得られるに到つた。

次に Winter-Kennedy 法を同じ模型水車の外函に適用して、渦巻型水車外函内の流動の偏向性を捕え、種々検討を加え、Winter-Kennedy 法の測圧孔設置に当り考究すべき諸項目を探究することができた。

この2つの実験結果から、水車外函内の流動状態をある程度究明すると共に、目下一般的に普及されている Peck 法並びに Winter-Kennedy 法の2種の Index Test 法を実施するに当つて起る種々の問題をある程度解明することができたので、その一端を紹介することとする。

* ** 日立製作所日立研究所

〔II〕 固定羽根周辺の流れと Peck 法

Index Test 法の一つとしての Peck 法の測圧孔は、本来、常時ほとんどの流れの方向に向っているように考えて、固定羽根の先端附近に設けた全圧孔と羽根側壁に穿けた静圧に近い値を示す筈の測圧孔とから取り出した水頭差を流量の指示に利用しようとするのであるから、この原理はピトー管に類似しているものと解される。よつてこれによつて指示された水頭差 h は水力学では

$$\left. \begin{aligned} V &= C\sqrt{2gh} \\ \text{又は } h &= \zeta \frac{V^2}{2g} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

V = 流速, $\zeta = 1/C^2$ = ピトー管係数
 g = 重力の加速度, h = 指示水頭差
 で示される。更に Index Test の基本式

$$Q = K\sqrt{h} \dots\dots\dots(2)$$

Q = 流量, h = 指示水頭差, K = 係数

はまた $Q = A \times V = A \times C\sqrt{2gh}$ と考えられるので、係数の K は $A \times C\sqrt{2g}$ を意味していることとなる。こゝに A は流れに直角の方向の断面積に相当するものである。従つて AC の積は流れの方向によつて大きく変化する。(1) 及び (2) 式は全く同様な形の式であるから (2) の K の性質は (1) の ζ と同様な性質のものと考へてよいわけである。よつて K の値即ちピトー管に於ける係数が常数となるような性質の点が見出し得れば、これはとりもなおさず理想的な Peck 法の測圧孔ということになる。

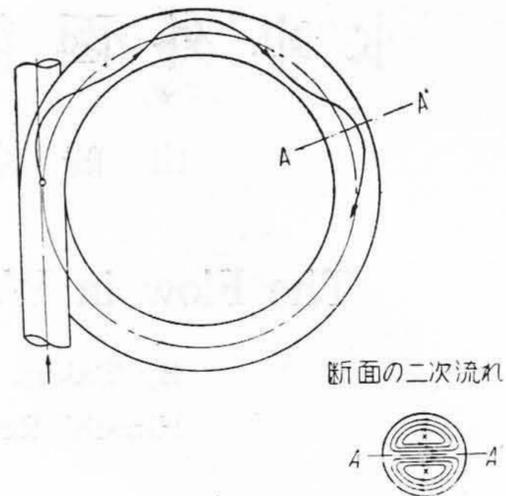
(2) 式の両辺の対数をとれば

$$\log Q = \log K + 1/2 \log h \dots\dots\dots(3)$$

となるから、直交座標軸上に $\log Q$ と $1/2 \log h$ を点記すれば上記のような場合には 45° の傾斜線で示されることになる。

〔III〕 外函内の水流の偏向性と Winter-Kennedy 法

Index Test 法としての他の一つの方法 Winter-Kennedy 法の原理は周知のように水の渦巻運動を基にして、渦巻流れの中心より遠方にある点では中心に近い点に比べて流速は遅く、圧力は高く、渦の中心に近づくとつれて次第に高速、低圧となることから、外函の外周と中心近くに設けた 2 つの測圧孔から採り出した圧力差の平方根はやはり流速に比例するから、この水頭差を流量の指示に使用せんとする試みである。しかし自由渦巻運動の流線と水車の外函の渦巻形状は必ずしも合致しておらず、水圧鉄管より外函に入つた水は必ず最初の曲り部



第 1 図 円形断面曲管内の流れ
 Fig. 1. Flow in A Circular Bend Pipe

分で外周に押えつけられて、普通の曲り管内の流れのような週期的偏向性 (第 1 図) を示し、各断面には二次的な流れを誘起する。水車外函の場合には旋回流とともに水が渦巻中心の方に向つて流出する放射状内向き方向の流れを伴つているので、この二次的な流れは一層盛んに生成されるわけである。

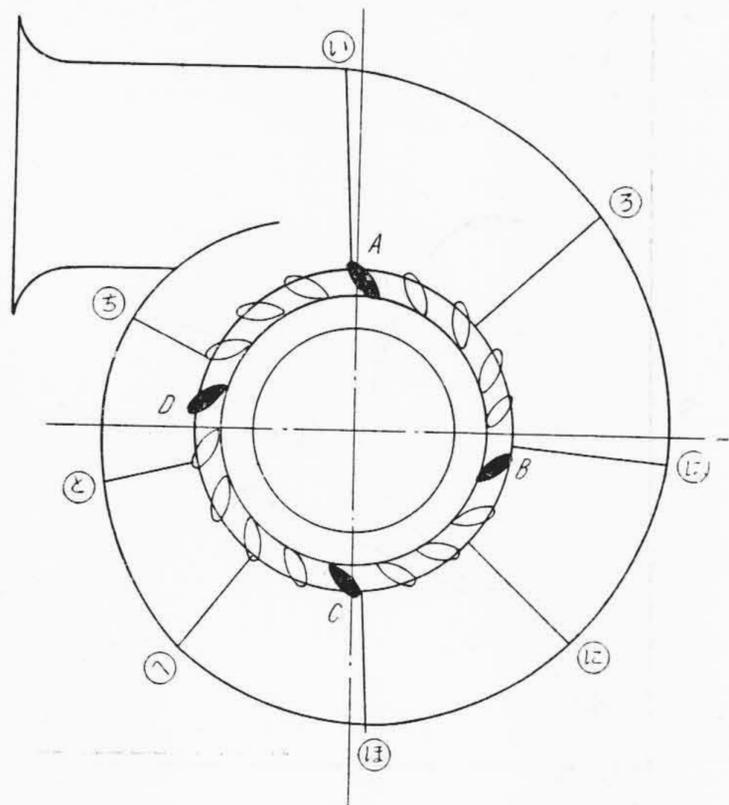
Winter-Kennedy 法はこの二次流を捕えて、流量の指示に利用しようとするものと考えられるから、二次流が強くなればなる程放射状内向き流れは良くなり、羽根車への水の流入が良くなつていくことになる。そこで外函全周に 8 断面を選び、その各断面に Winter-Kennedy 法にのつとつた 1 つの低圧孔と 3 つの高圧孔を設けて水車外函内の流動状態を変えて二次流の変化をしらべた。

この実験で求めた水頭差は $V = C\sqrt{2gh}$ の形で放射状内向き流速に相当するものを表わしていることとなり、Peck 法と同様に Index Test の基本式に従うわけで、外函内の流動状態を整えて $A \times C = \text{const.}$ の条件を広い範囲に亘つて満足する断面を探究すれば、前述と同様に理論的な 45° の傾斜直線にのることとなる。

〔IV〕 実験方法

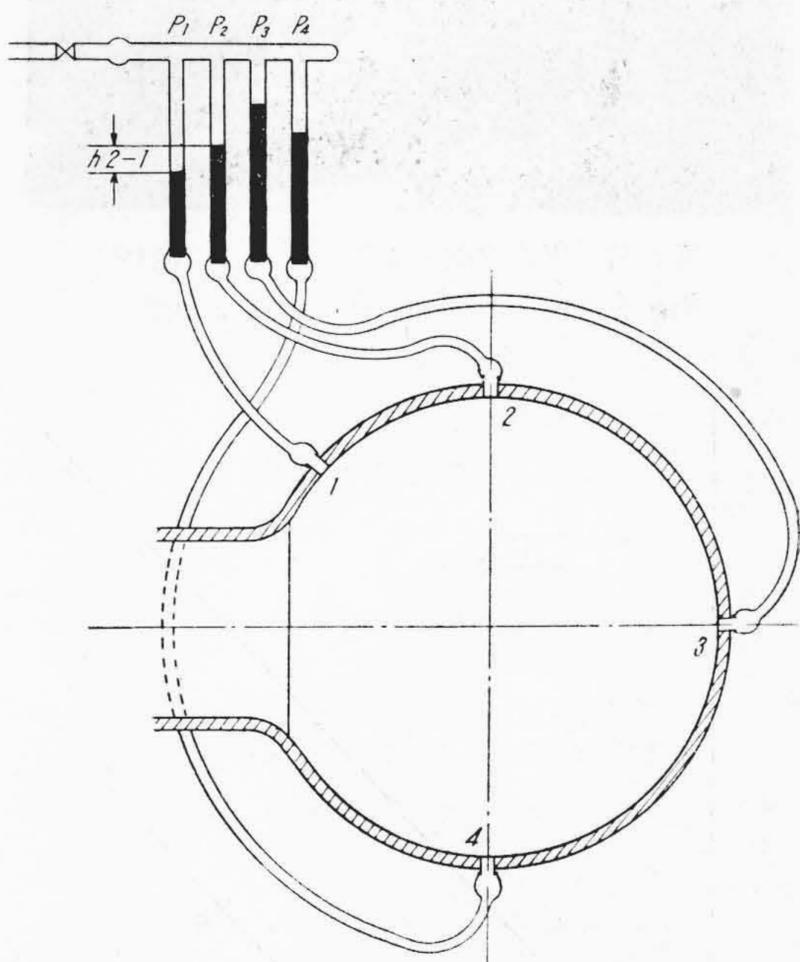
以上のような考え方のもとに日立研究所水力実験室内の模型水車性能試験装置を使用し、普通の模型試験と同様に流量の調節は案内羽根を開閉して行い、模型水車を実物水車の運転状態に相当する回転速度の状態に置いて実験し、流量の絶対値を標準矩形縮流堰で測定した。

筆者等は水車外函内の流れの状態の変化に伴う渦巻室内の位置による測定値の変わり方を検討するために第 2 図に示すような直交位置の 4 枚の固定羽根を選定して、そのおのおのに第 3 図に示したような Peck 法の測圧孔を設け、先端測圧孔と側面の測圧孔との水頭差を水柱マンメータで読んで、これから固定羽根周辺の流れの状態を検討した。更に第 2 図に“い”、“ろ”、“は”……“ち”と記号した外函全周上にほぼ等距離に選定した 8



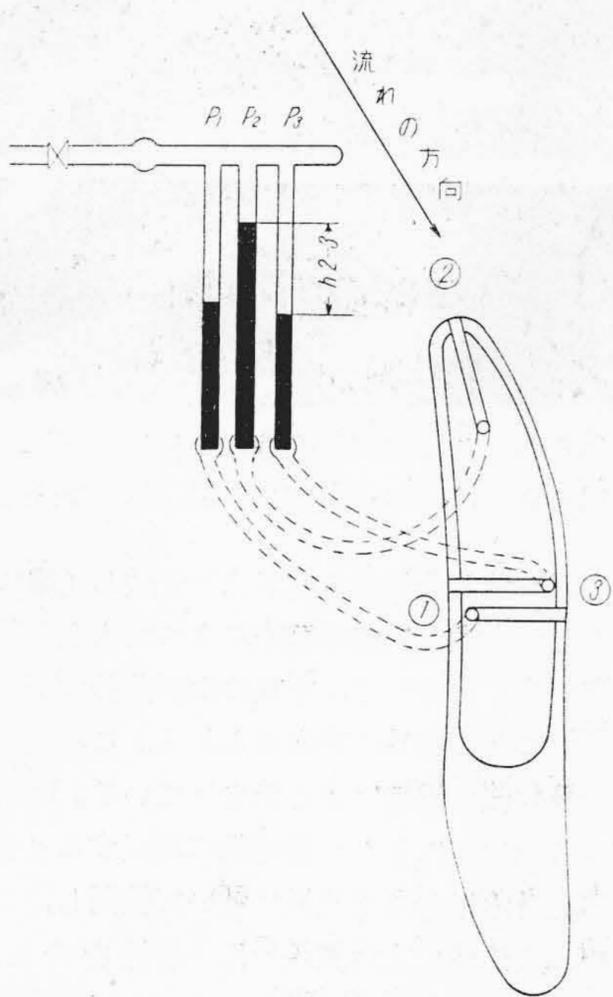
第2図 Peck 法の測圧孔を設けた固定羽根及び Winter-Kennedy 法の測圧孔を設けた断面の位置

Fig. 2. Positions of Pressure Measuring Port for Index Test



第4図 Winter-Kennedy 法の測圧孔の位置

Fig. 4. Measuring Port on the Casing for Index Test (Winter-Kennedy's Method)



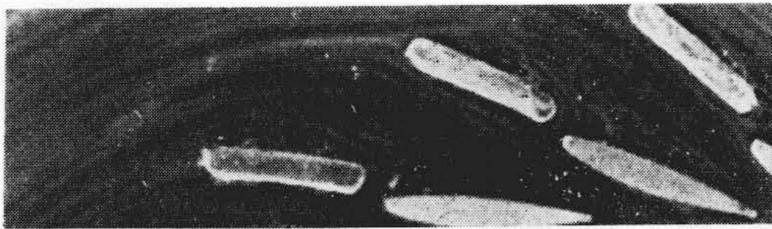
第3図 固定羽根上の測圧孔の位置

Fig. 3. Measuring Ports on a Stay Vane

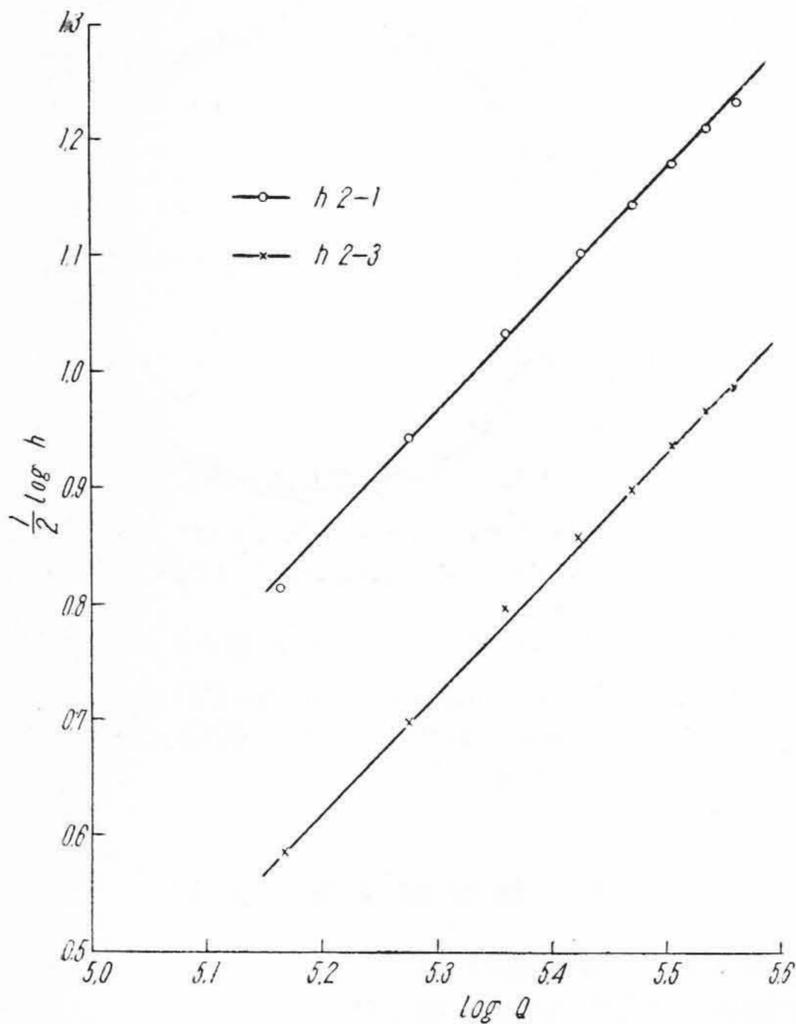
断面に第4図のような Winter-Kennedy 法の測圧孔を穿けて低圧孔1と他の高圧孔2, 3, 4とから求めた水頭差を利用して外函内の水流の遷り変りを検討し, 当実験室で現在までに行つて来た Winter-Kennedy 法の結果と比較した。

〔V〕 測定結果及び検討

固定羽根の形状並びに取付角及び測圧孔を十分検討して固定羽根周辺の流れを第5図(次頁参照)にみられる程度に改善した後, 第2図に A, B, C, D と記号した4枚の固定羽根に就いて行つた Index Test の結果を $\log Q$ と $1/2 \log h$ の関係で整理すると第6図(次頁参照)のように測定点は 45° またはこれに近い傾斜直線上にのるものが多い。水車の比較回転度の値如何によつては 45° の傾斜直線を示す固定羽根は非常に限定されることがある。現在まで試験して来た多数の模型水車に就いての Peck 法の結果のなかに第7図に示すような種々の奇妙な現象が現われることがあつたが, その原因は外函内の流れの差異によつて起るものと考えられる。今回試験に供した比較的良好な結果を示した模型水車でも固定羽根周辺の流れの状態を種々の素因を変えることによつて, 第8図(次頁参照)に1例を示すような非常に乱れた渦や剝離を起している状態にして $\log Q$ 対 $1/2 \log h$ 曲線を求めると第9図(次頁参照)に掲げたような異常曲線を呈した。またかゝる極端な変り方をしないものでも傾斜直線の角度が變つて来る場合がある。今固定羽根の周辺の流れの状態を種々に変えた試験の結果を系統的に整理してみると, 我々の考える理想的な 45° の傾斜直線とは第10図(次頁参照)の1部分, 即ち曲線の頂部よ

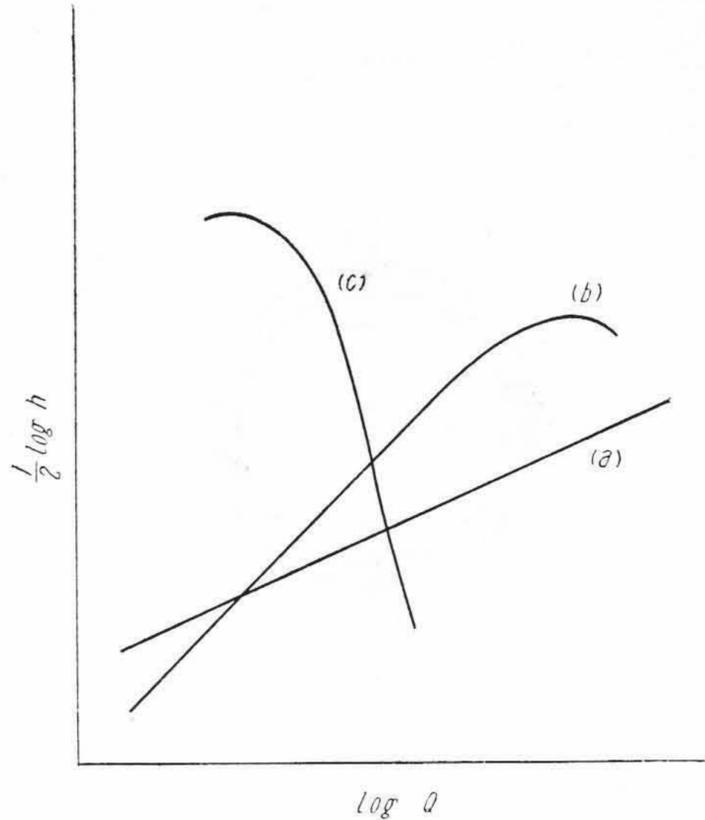


第 5 図 比較的整流された外函内の流れ
Fig. 5. Good Flow in the Casing

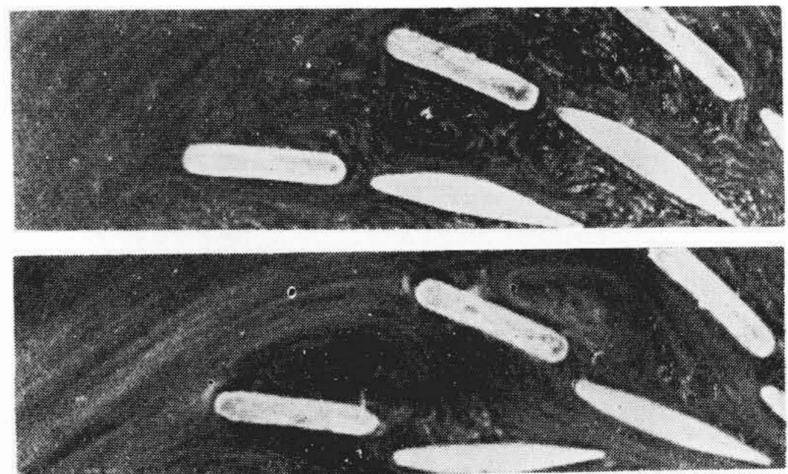


第 6 図 良好な $\log Q$ と $1/2 \log h$ の関係を示す一例
Fig. 6. A Good Example of the Relation between $\log Q$ and $1/2 \log h$

り左側の比較的広範囲に亘る 45° の傾斜線を意味しているものと考えることができる。そこで第10図の曲線を吟味してみるのに、今仮に固定羽根を丸棒と考えれば、この丸棒状の固定羽根に就いての Peck 法測圧孔は全く円筒型ピトー管を固定羽根の代りに置いたものと考えられる。円筒型のピトー管の特性曲線は第11図のような左右対称な山形曲線をなすことは既に周知の事実である。しかるに水車の固定羽根はほぼ流れの方向に向つてゐるものゝ、その形状は流れに対して非対称な一種の翼型をなしているから流れの方向変化に伴う特性曲線は自ら第12図のように左右非対称となり、この非対称な山形曲線の中央から左側の左下りの部分は第13図の I にみるような翼型の腹面の方に偏つた流れ方向に相当し、比較的緩かな傾斜で直線的な範囲が広く、中央から右側の右下りの部分は第13図の III に示すような翼型背面に偏つた流水方向を意味し、急激な右下り曲線を呈している。更に固

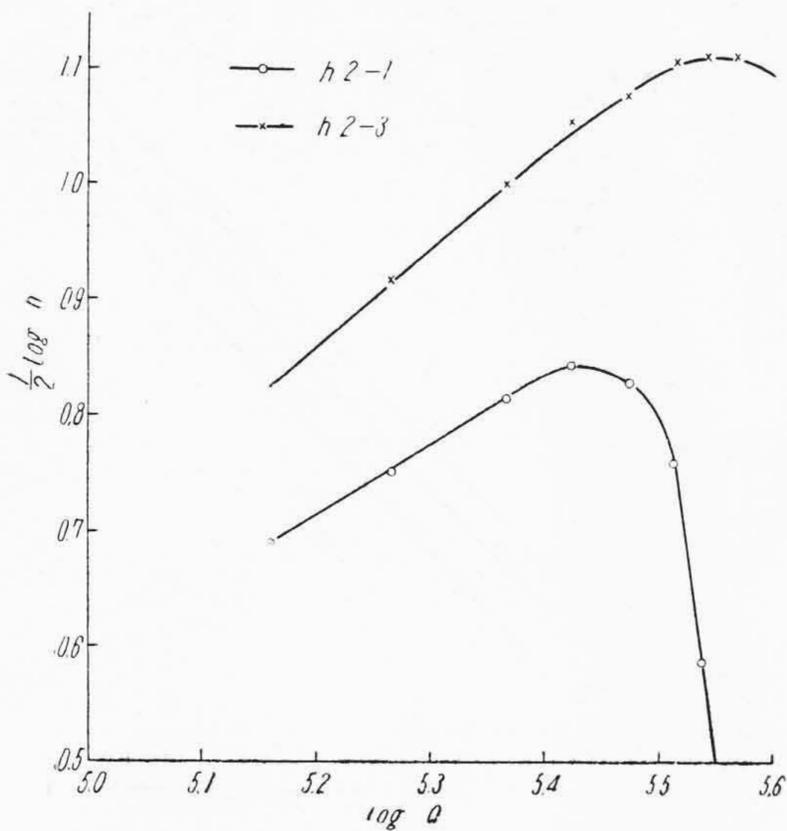


第 7 図 異常な $\log Q$ と $1/2 \log h$ の関係
Fig. 7. Abnormal Relations between $\log Q$ and $1/2 \log h$



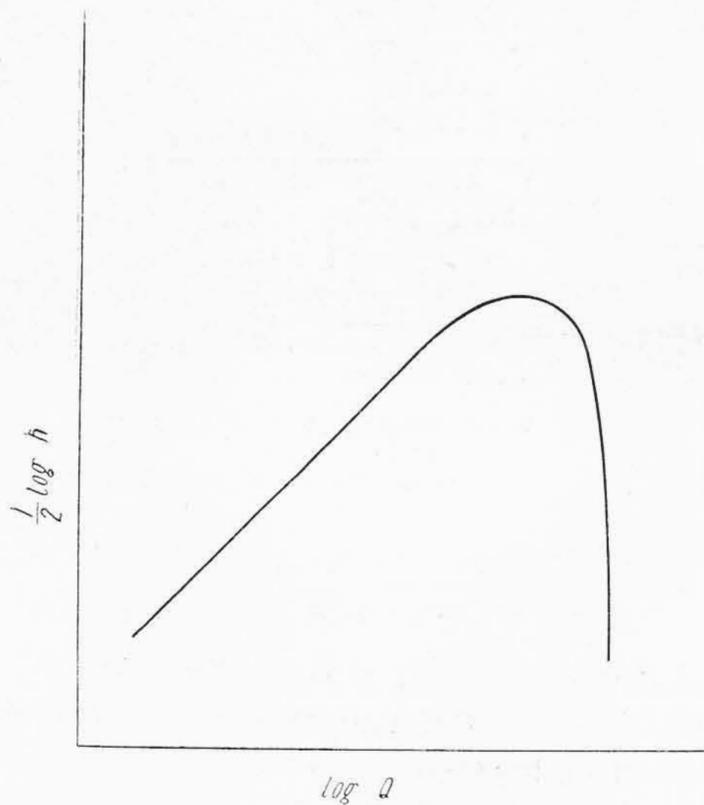
第 8 図 乱れた外函内の流れの例
Fig. 8. Confused Flow in the Casing

定羽根の取付角と流れの方向がほぼ合致し(第13図の II の方向)、しかも案内羽根の開閉によつても余り流れの方向に差異が生じなければ、中高の山形曲線の頂部近くの曲線を示すことが容易に想像せられる。この現象は先きに示した第10図の結果によく示されている。Index Test を実施するためにはピトー管係数に相当する ζ または C の変り方を各水車の固定羽根に就いて検討し、これと流路断面積 A の水流の方向変化に伴う特性を合せ考えて Index Test の基本式の係数 $K (= A \times C \sqrt{2g})$ が広い範囲に亘りほぼ一定になる固定羽根並びに測圧孔を定めることが必要となるので、Index Test 法がいかに簡易水量指示法であるからといつてもその完全実用化に就いては水車の比較回転度、固定羽根の形状、測圧孔の位置及び外函内の流動状態を左右する諸要素等多くの条件を検討せねばならず、在来の絶対値測圧法と比べ、さ程簡単に実施できるものでないといふことができる。



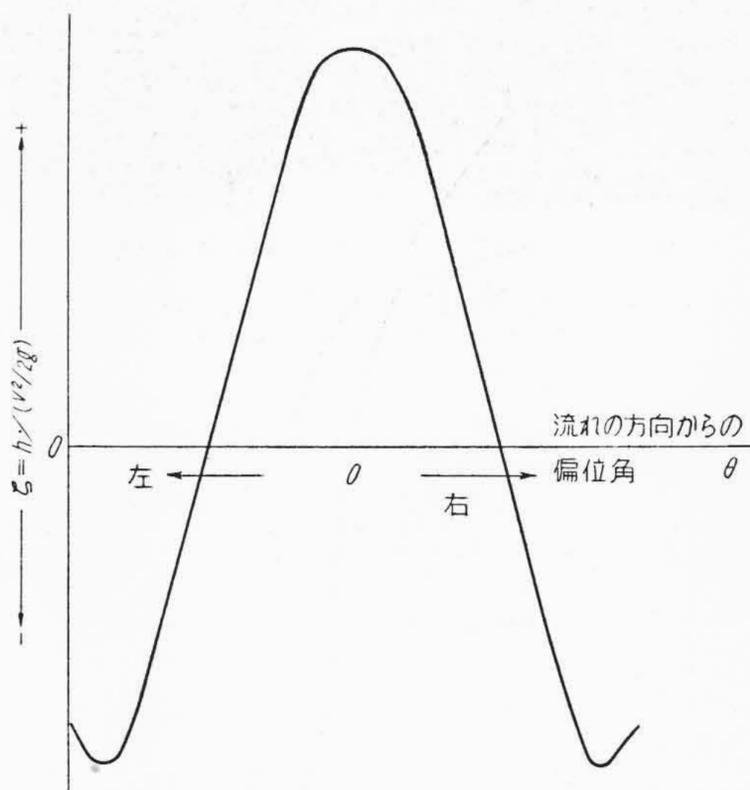
第9図 異常な $\log Q$ と $1/2 \log h$ の関係を示した実験値の例

Fig. 9. Abnormal Test Results between $\log Q$ and $1/2 \log h$



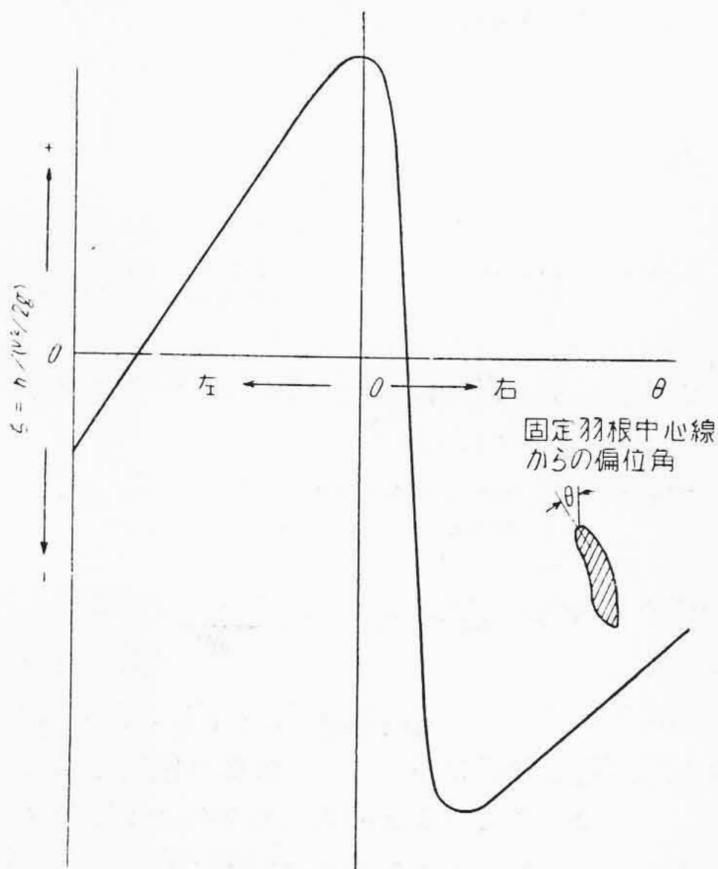
第10図 Peck法の結果を系統的に整理した場合の総合曲線

Fig. 10. Total Intensity between $\log Q$ and $1/2 \log h$ in the Peck's Method



第11図 円筒型ピトー管の特性曲線の一例

Fig. 11. An Example of the Characteristic Curve of Circular Type Pitot Tube

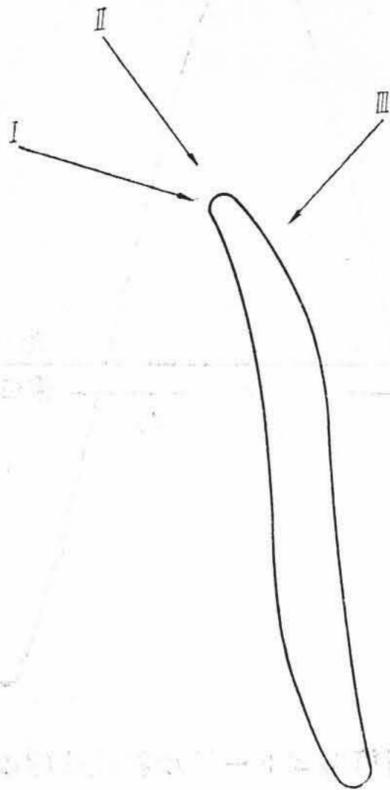


第12図 固定羽根を円筒型ピトー管の変形と考えた場合の推定特性曲線

Fig. 12. Pitot Tube Characteristics of a Stay Vane Treated as a Deformed Circular Pitot Tube

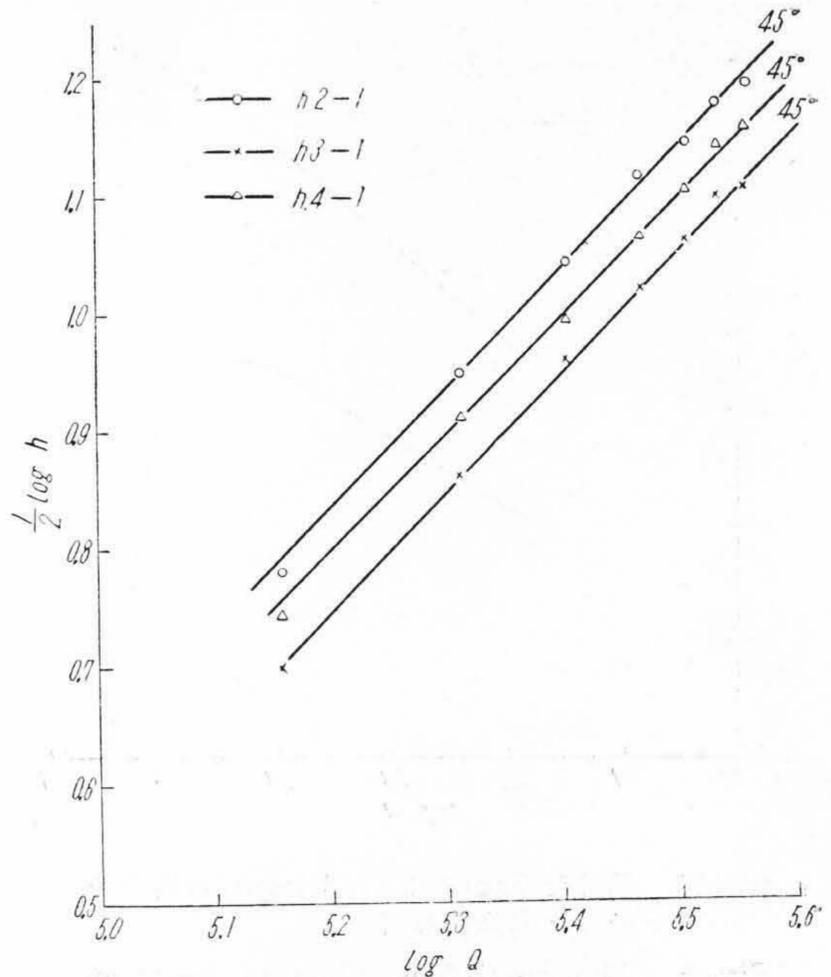
次に渦巻型水車外函内を流れる渦巻状の主流の状態を検討するために、第2図に示す殆ど等距離の8断面を選んで、各断面に第4図のような Winter-Kennedy 法の測圧孔を設けて Index-Test を行つた。その結果を見ると第14図(次頁参照)に示すように、その $\log Q$ 対 $1/2$

$\log h$ 曲線は 45° またはそれに近い角度の傾斜直線で示すことができる。この場合には Peck 法にみられるような異常な傾斜が現われることはなく、傾斜角度の違いや測定点のばらつきが測圧方法の良否の判定の基準となるのが通常である。今“い”、“ろ”、“は”、……の8



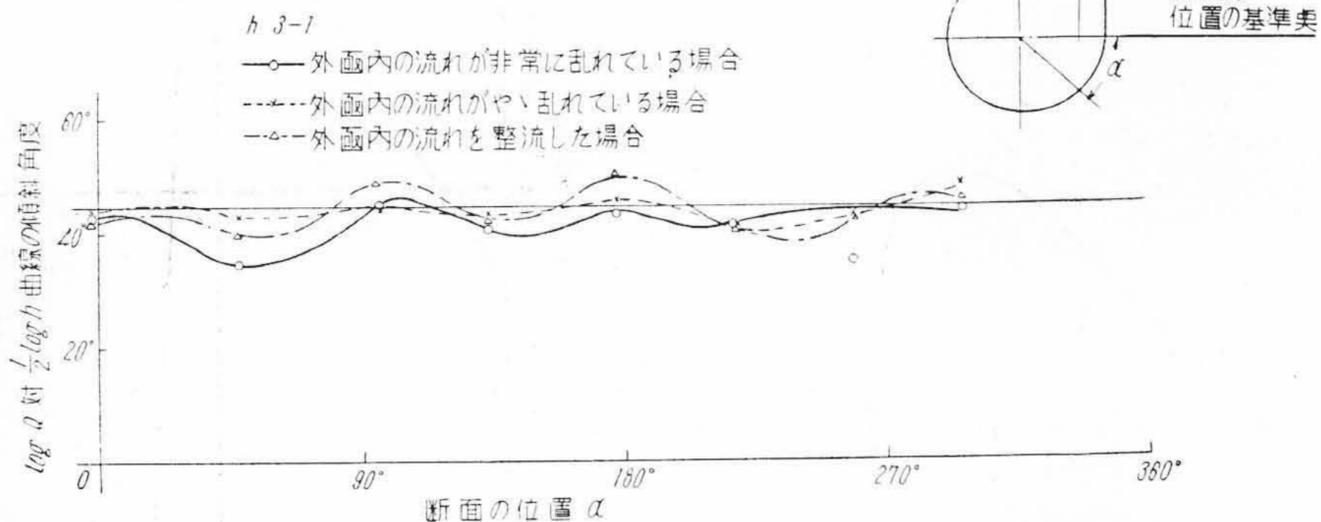
第 13 図 固定羽根前方よりの水の流入方向説明図

Fig. 13. Flowing Angle before the Stay Vane



第 14 図 良好な $\log Q$ 対 $1/2 \log h$ 曲線

Fig. 14. Normal Relation between $\log Q$ and $1/2 \log h$



第 15 図 $h 3-1$ を用いた場合の Winter-Kennedy 法の測圧孔を設けた断面の位置と $\log Q$ 対 $1/2 \log h$ 曲線の傾斜角度との関係

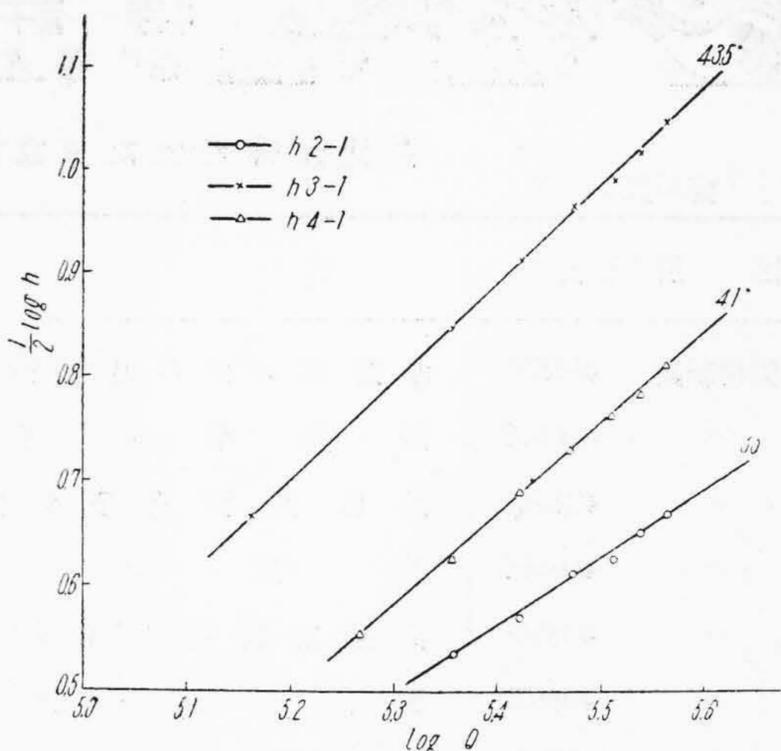
Fig. 15. Relations between the Inclination of $\log Q \sim 1/2 \log h$ lines and the Position of Pressure Measuring Port in the Index Test by Winter-Kennedy's Method

断面に就いて外函内の流動状態を変えて行つた Winter-Kennedy 法の結果から $\log Q$ 対 $1/2 \log h$ 曲線の傾斜角を求めそれが断面の位置の変化に対してどのように変わるかを図示したのが第 15 図である。この図にみられるように余り極端に飛び離れたものは見受けられない。鎖線で示した曲線は流動状態を最も改善した第 5 図にみられる流動状況に近い状態での結果で、これに比べ少しづつ外函内の整流を乱して行くと破線で示すように外函全周に亘りどの断面も殆ど 45° の $\log Q$ 対 $1/2 \log h$ 曲

線が得られるが、更に非常に整流を悪くすれば実線で図示するように何れの断面も 45° の傾斜線から次第に遠ざかつて行くようになる。ここに Index Test の見地からすれば破線で示された結果が一応理想的のように考えられ、最も整流した一点破線の結果の方が凹凸が著るしい波状曲線になつて良好な Winter-Kennedy 法の測圧孔を設ける断面の決定は難しいようにみえる。しかし後者の場合は 2 と 4 の高圧孔(第 4 図参照)を使用した水頭差 $h 2-1$, $h 4-1$ の値は第 14 図にみるように殆ど近い値を示

し傾斜線も平行している。またそれに比して整流を乱した実線の場合は第16図にみられるように $h2-1$, $h4-1$ の水頭差の値に相当の差異があるし、この時の傾斜線の角度も異つている。本来、曲管内の流れには必ず第1図のような波状偏向流があり、各断面には二次的な流れが誘起され、この二次流の様子は Re 数によつて変ることとは理論的にも古くから解明せられているところである。渦巻型水車外函内の流れもこれと同様で、且つ外函の場合にはその内側全周より羽根車に水が流出しているから、この二次流れの生成は普通の曲り管より一層顕著であることは納得できる。この二次流れを Winter-Kennedy 法で測定していることになるので、同一水車に就いては二次流れの生成が盛んである程羽根車への水の流出は良いことになる。ここに Winter-Kennedy 法は放射状内向きの流水の流速を $V = C\sqrt{2gh}$ の形で求めているのであるから、理論的には 45° の傾斜直線に完全に合致せねばならないが、外函内の主流は前述のように偏向性を持つていたので断面の位置によつて $\log Q$ 対 $1/2 \log h$ 曲線の傾斜角度は 45° の理想線を挟んで上下に週期的凹凸を示すことになり、整流が乱れるに従つて波状曲線の中心線は次第に 45° より小さい方に移行する傾向を示している。これは二次流れが非対称であり完全な生成をしていないために3の測圧孔が最高圧を示していないためと考えられ、 $h2-1$ と $h4-1$ の値が等しくならぬことから説明できる。この現象は現在まで当水力実験室で実施した多くの Winter-Kennedy 法の結果を顧ても何れもよくこの傾向と合致している。たゞ最も整流された第15図の鎖線の結果は破線で示した結果に比べ凹凸が著しいが、その平均は 45° の理想的な線に近い。これは前述の水流が整流され二次流れが良好となり波状偏向性が顕著となつたため、この波状曲線は渦巻型外函に就いては避けることのできない宿命的なものであるが、外函の形状を考慮することによりかなり小さくすることができる。無論水車の比較回転度が変われば外函の形状が変わり波状曲線も変つて来るが、少くとも Index Test を行う立場からすれば第15図の波状曲線が 45° の理想的な線を挟んで、しかも凹凸の小さい外函ができれば非常に好都合であるわけである。以上のように渦巻型外函を利用して簡易に水量を指示せんとする Winter-Kennedy 法もこれを正確に実施することになると容易ならぬ検討がなされねばならないことが明かとなつて来た。

以上水車外函内の流れからみた Peck 法及び Winter-Kennedy 法はそれぞれ長短があつて一口にどちらが正確か、または何れが難かしいかを断言することはできない。何れの方法にしても水車の比較回転度により、また各部の形状及び寸法等によつて種々の制限があり、その



第16図 外函内の流れが乱れたときの $\log Q \sim 1/2 \log h$ 曲線の一例

Fig. 16. An Example of Abnormal Relation between $\log Q$ and $1/2 \log h$ by Bad Flow

うえ絶対値の測定法と異り、一度設備すれば永久に常時使用されるのであるからこれら Index Test の測圧孔の設計に当つては慎重な検討と研究を必要とすることになる。

[V] 結 言

模型水車に就いて Peck 法及び Winter-Kennedy 法による Index Test を利用して渦巻型水車外函内の水の流動状態を検討した結果、外函内の流れは詳細に検討すれば相当複雑であることがわかり、簡易水量指示法としての Index Test 法にしても、これを正確に実施するにはこれらを考慮して慎重な検討を要することが痛感せられる。長い歴史と数多くの実験結果を持つ絶対水量測定法でさえ今なお各方面で真剣な研究にせまられている現在、ここにその一端を述べたような複雑な外函内の流れを利用した Index Test 法の実施に就いての今後の研究は更に一層の努力を要するものと信ずる次第である。

この実験の実施に当つて日立製作所兼先日立研究所長、日立工場小森谷電力設計部副部長、深栖水車設計課長を始め関係各位から賜つた御協力と御激励に対し、また実験に直接協力された水力実験室各位の御努力に深甚なる感謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- (1) G. H. Voader: Index Test of Hydraulic Turbine Trans. of A.S.M.E., 481 (1951-7)
- (2) 山崎, 手島: 電気計算 20, 1079 (昭 27-9)
- (3) 山崎, 手島: 日立評論 34, 1777 (昭 27-10)

特許月報

最近登録された日立製作所の特許及び実用新案

(その2)

(第14頁より続く)

区 別	登録番号	名 称	工場別	氏 名	登録年月日
実用新案	408555	水銀ポンプの電熱器取付装置	日立工場	佐藤克夫	28. 12. 14
"	408558	耐真空密着装置	日立工場	清水一夫	"
"	408563	回転変流機安全起動装置	日立工場	梅沢信義	"
"	408566	温度継電器	日立工場	滑川清	"
"	408567	真空加熱槽の資料抽出装置	日立工場	藤本貞夫	"
"	408572	変圧器タップ切換器	日立工場	栗山卓	"
"	408573	変圧器タップ切換装置	日立工場	伊藤武夫	"
"	408577	水銀整流器の励弧装置	日立工場	木村鐘治	"
"	408585	並列走行車の平衡運転装置	日立工場	佐川伊知夫	"
"	408586	並列走行車自動平衡運転装置	日立工場	佐川伊知夫 宮崎徳太郎	"
"	408557	鉸 鋸 機	笠戸工場	多田進	"
"	408568	安全弁調整装置	笠戸工場	高橋顕一夫 中山光久	"
"	408508	タワーエクスキャベーターに於けるロープ移動表示装置	亀有工場	大西昇	"
"	408513	制動力重畳防止装置	亀有工場	氏原良男	"
"	408514	巻胴とロープとの組合せ	亀有工部	大西昇	"
"	408553	多段タービンポンプの過熱防止装置	亀有工場	栗野義六郎	"
"	408559	蓄圧揚水槽に於ける自動空気補給装置	亀有工場	木暮健三郎	"
"	408575	掘さく用バケツト	亀有工場	大山崎昇勇	"
"	408582	スクレーパーバケツト	亀有工場	盛武賢	"
"	408588	ブームの俯仰制限装置	亀有工場	田中茂	"
"	408516	連続人造繊維切断装置のカッター	川崎工場	薄渡正四 辺茂	"
"	408576	置換空気通路を設けたる空気力粉体圧送装置	川崎工場	松宮健一	"
"	408569	ダンパー開度指示装置	栃木工場	栗本正雄	"
"	408570	ターボ冷凍圧縮機用油室	栃木工場	栗本正雄	"
"	408571	ターボ冷凍機冷媒回収装置	栃木工場	滝川重幸	"
"	408512	回転軸のパッキング	多賀工場	横内直中之 古市光	"
"	408556	電子顕微鏡の試料上下装置	多賀工場	近藤弥太郎 木村博一	"
実用新案	408560	積算電力計の端子ボックス	多賀工場	木内勝造	28. 12. 14

(第50頁へ続く)