

フランスス水車吸出管における水圧脈動の実験的研究

Experimental Research on Pulsation of Pressure in Draft Tube for Francis Water Turbine

細 井 豊*
Yutaka Hosoi

内 容 梗 概

フランスス水車吸出管における水圧脈動に関し、模型水車を用いてその振動数特性と水車運転特性との関連について実験的検討を行ない、吸出管における水圧脈動振動数が、ランナを出る旋回流速の増減に対して直接的な大小関係を有することを確かめ、実物水車における振動数特性——特に、いわゆるサージ振動数特性——の傾向変化を、水車運転条件に応じて推定しうることを述べる。

1. 緒 言

水車吸出管内水流の振動に関して、その発生事例や対策などを報告した文献は数多くあり^{(1)~(6)}、また、すでにいくつかの研究論文も発表されている^{(7)~(19)}。しかしながら後者のほとんどが理論におもきがおかれ、実験は理論の補足的役割を果しているに過ぎないために、これらの研究成果が理論面で高度に貢献はしたものの、実機における複雑多様な振動現象の解析や対策に対する具体的な適用のためには、まだ不十分な点があるようである。

かような現状から、ここに従来ほとんど行なわれたことのなかった模型水車を用いた実験的研究を企図し、数個の模型フランスス水車に対する振動実験から吸出管水圧脈動の特性と水車性能および運転条件との関連を検討し、実水車への適用に、より実効性のある資料を提供しようとするものである。

2. 供試水車および実験条件

本研究に供したフランスス水車は、比速度約100のものから約220のものまでの模型水車8基と実物水車2基で、模型実験には、日立研究所水力実験所内の水車試験設備を用いた。使用した模型吸出管は、その一部または全部を透明なアクリル樹脂製のものとし、水流の状況を観察できるようにした。

実験は、

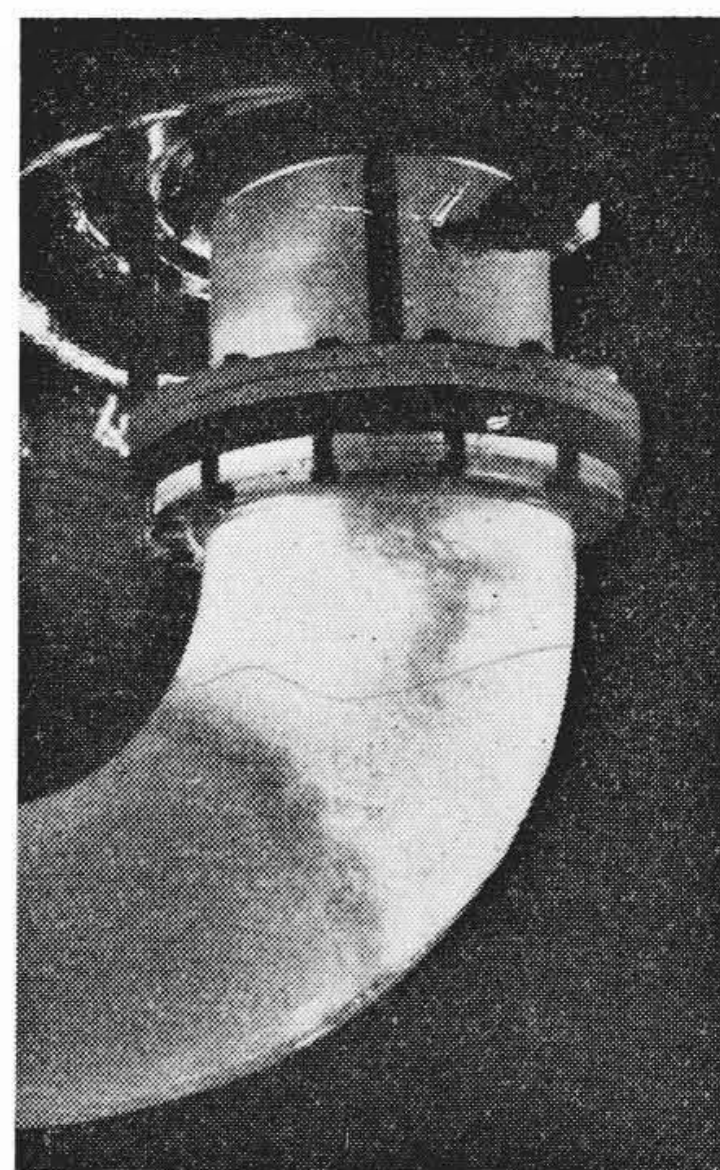
- (1) 振動特性の傾向の移行が明確には握できること
- (2) 水車性能との関連が理解しやすいこと
- (3) 実機の変落差などの運転条件変化に応じた振動の傾向を判断しやすいこと

などに主眼をおき、流量および回転数を水車の全運転領域にわたるようとり、測定諸量はすべて単位落差に換算して整理した。

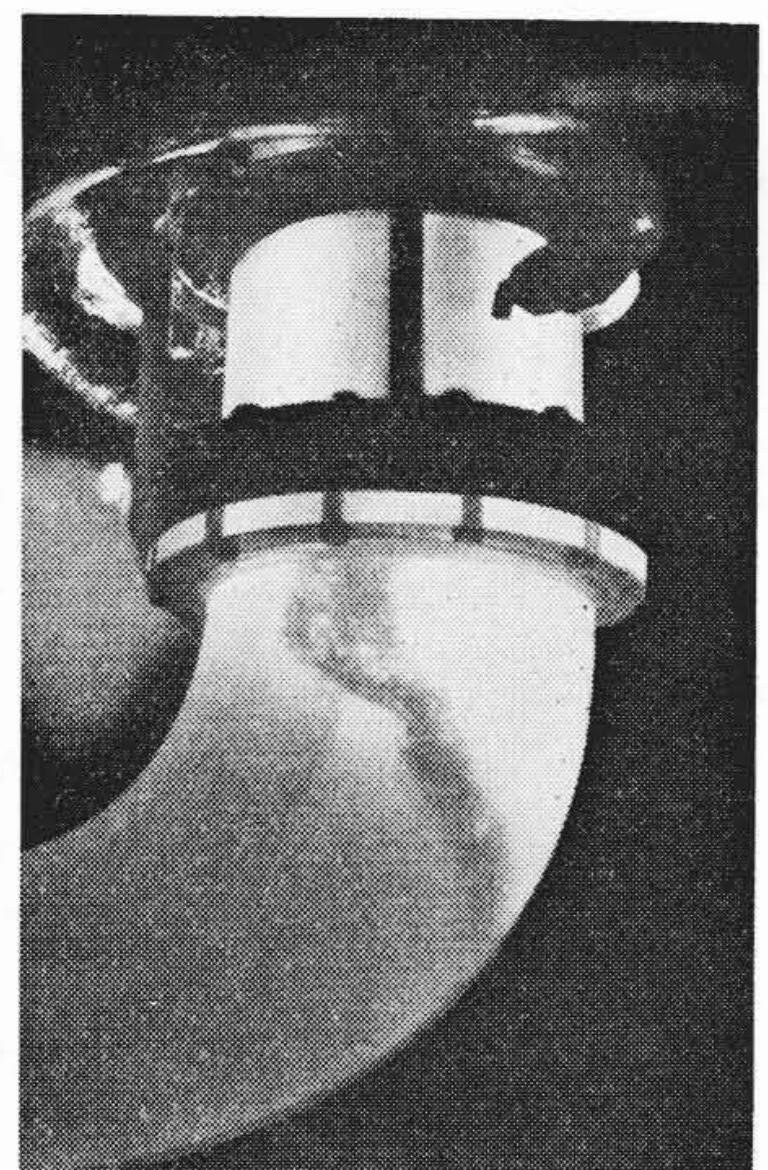
3. 吸出管内水流の状況

フランスス水車のランナを出る水流が、落差、流量または回転数の値いかにによって、軸流をなしたり、旋回流をなしたりして流下することはよく知られているが、この旋回流のために吸出管内に生ずるうず心の運動が水圧脈動の源となることも、かつてLord Kelvinによって発表された柱状うずの理論を水車に適用した内丸、鬼頭両氏の研究⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾に端を発する数々の研究によって、もはや今日では既知の現象となっている。

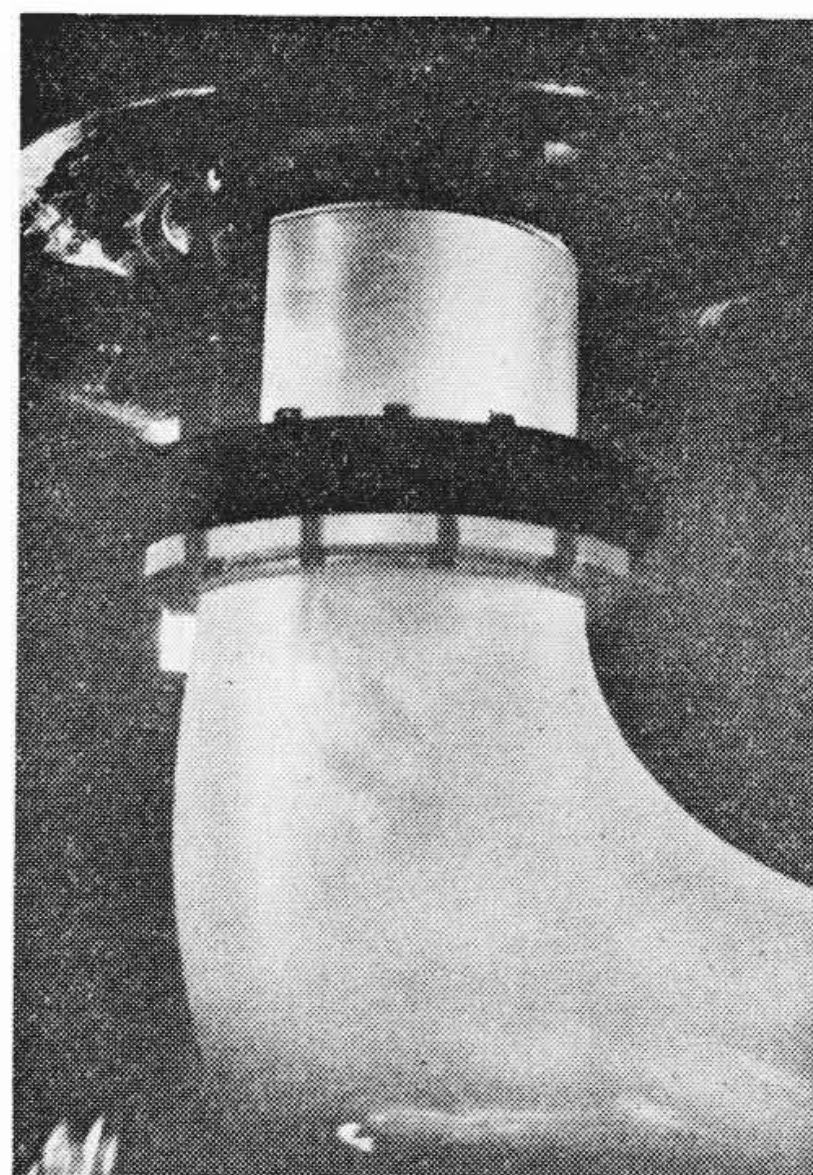
筆者は、このうず心の有様を、アクリル樹脂製の透明な吸出管を取り付けた模型水車で観察し、その様相をとらえた二、三の瞬間写真の例を第1図(a)~(d)に掲げた。水流の中央部に形成されたうず心は、ちょうど回された糸巻きからほぐれていく糸のように、ら



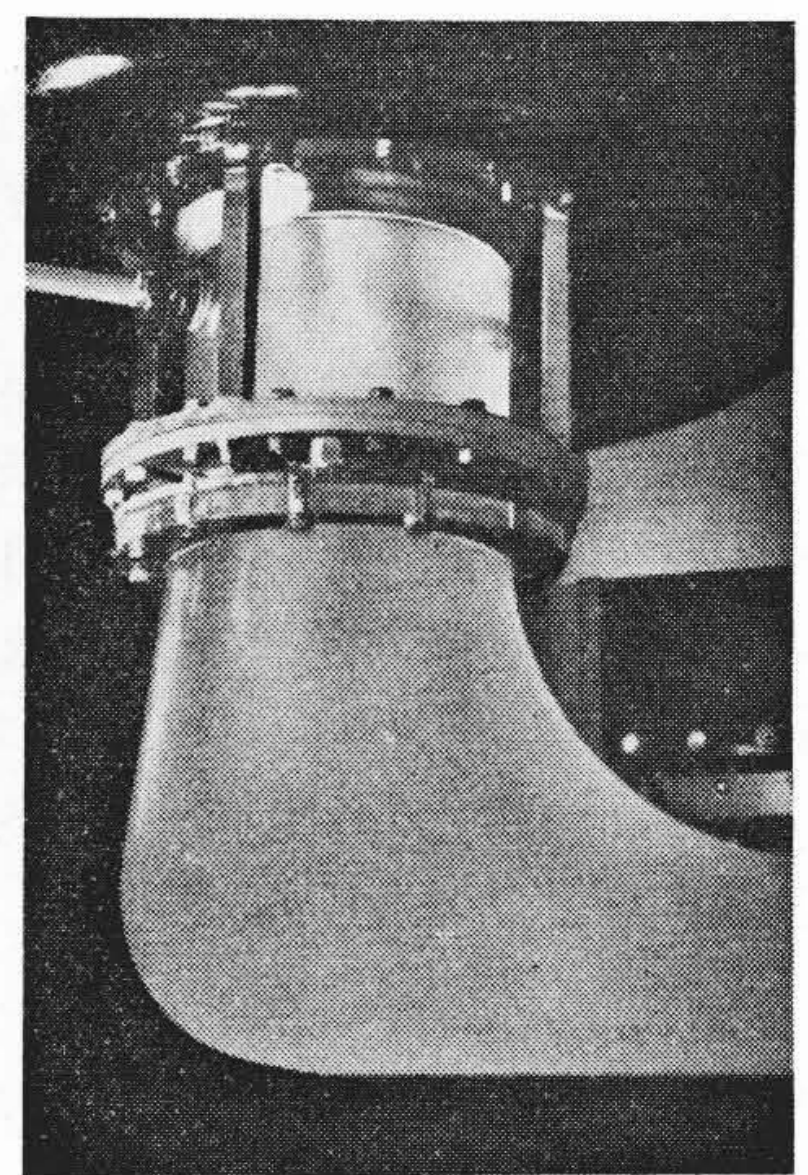
(a)



(b)



(c)



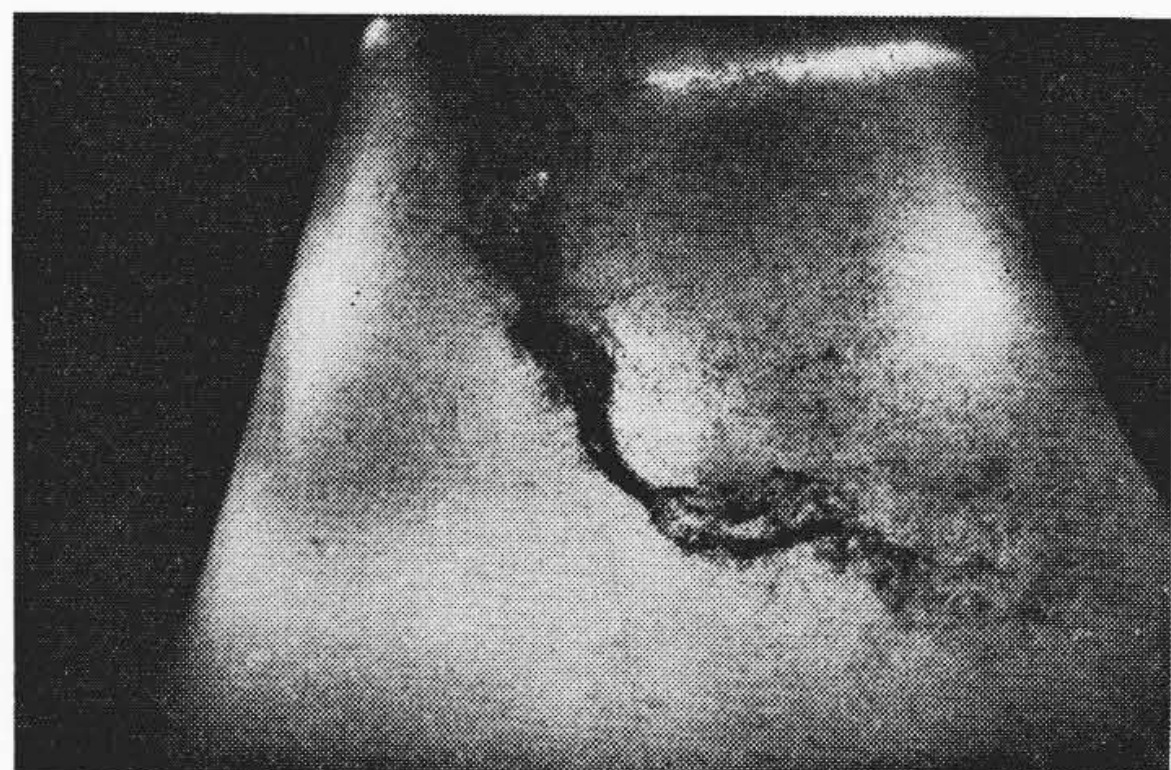
(d)

第1図 うず心の状況(その1)

せん状をなして下流に送られ、下端では第2図(a),(b)のように、さき細りの尾をなしてふれ回っている。このらせんは、一定運転条件のもとでは同じらせんピッチを保って定常的に下降し、らせんが回る周期はどの管断面でも変わらない。

この状況を図に書き表わすと第3図のようになり、うず心の運動の流れに直角な平面で切って考えて見ると、管断面によってきまったある大きさの直径をしたうず心それ自体が回転するように見えると同時に、うず心は管軸を中心としてその周りを回転しており、いわば自転と公転をなしているように見える。ただし、この自転というのは、うず心内に空虚な部分を持つとき、うず心とそれを囲む水流部分との境界面で観察される状況であって、その面での旋回流にはかならない。また、この公転の周期は前に述べたようにどの管断

* 日立製作所日立研究所



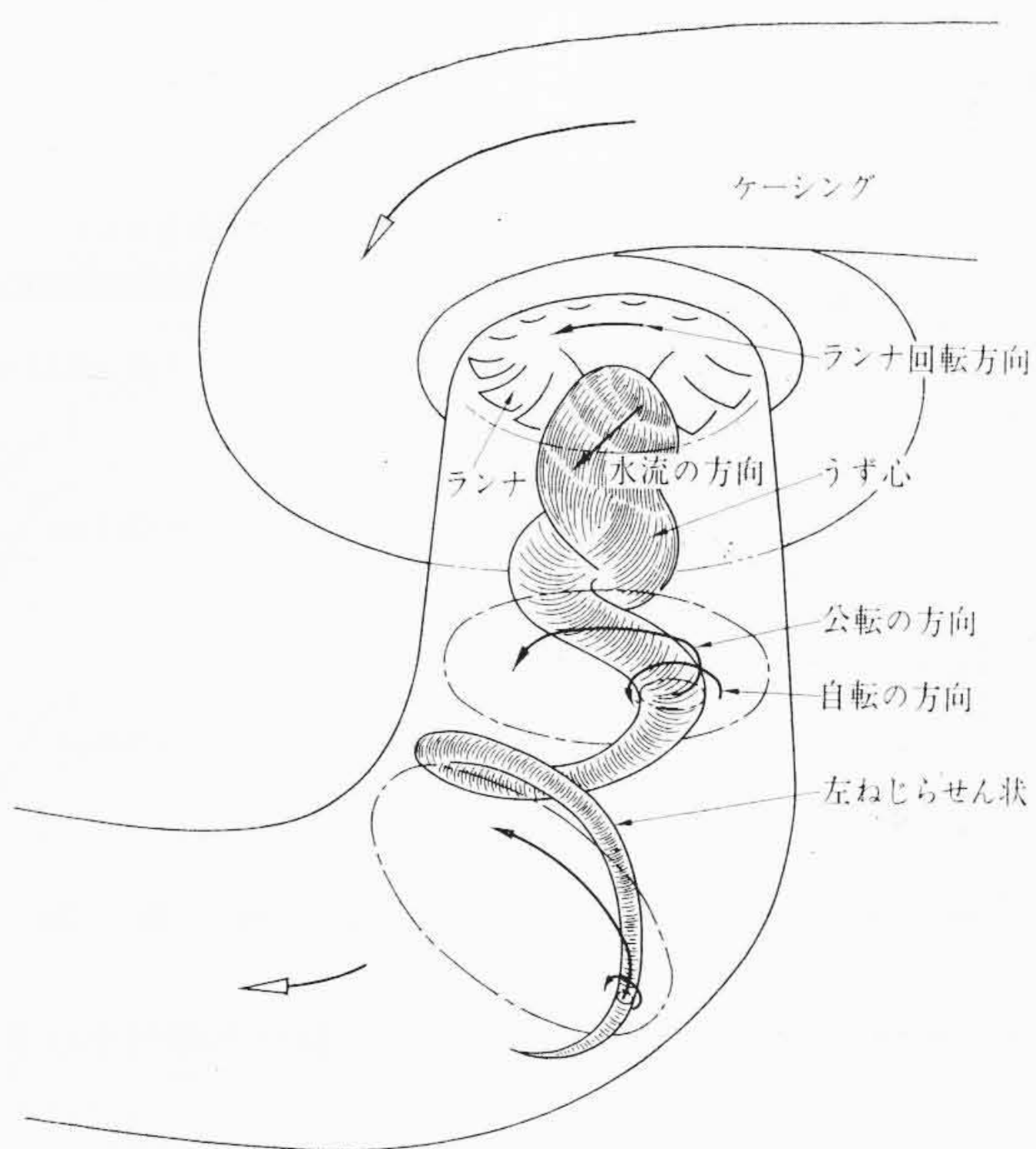
(a) 回転方向旋回



(b) 軸 流

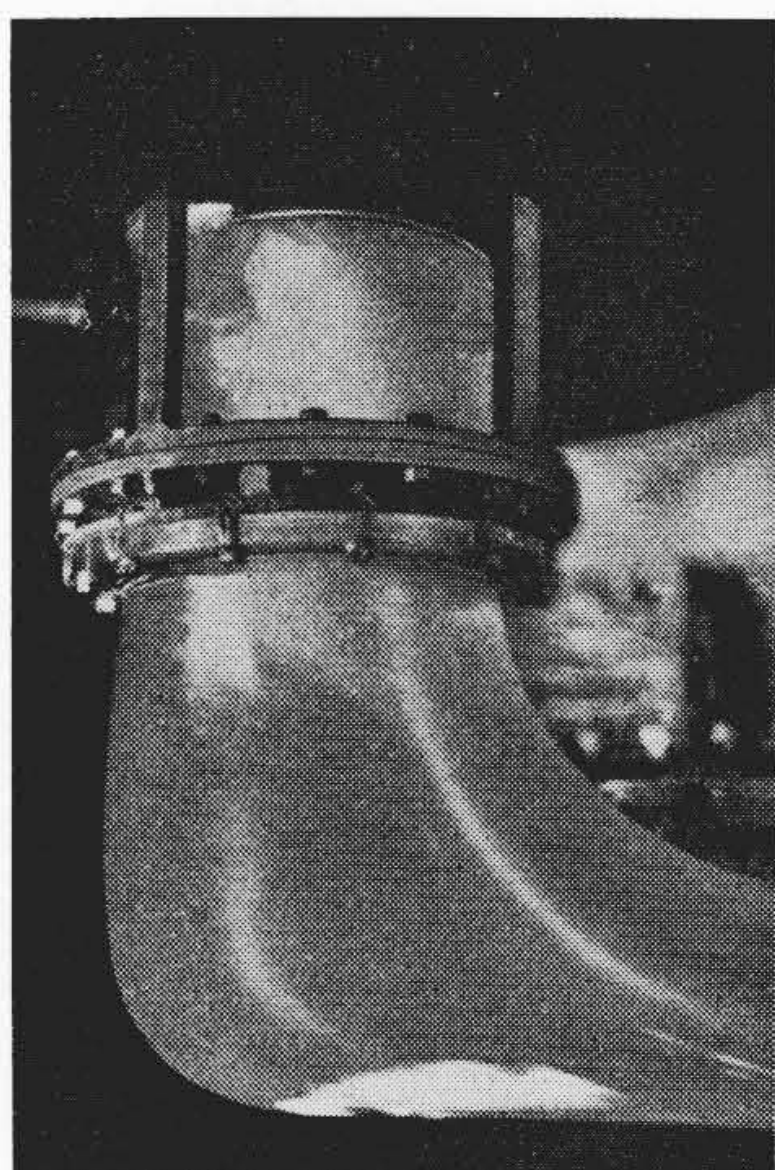
第2図 うず心の状況(その2)

(吸出管湾曲部底面より見たもの)

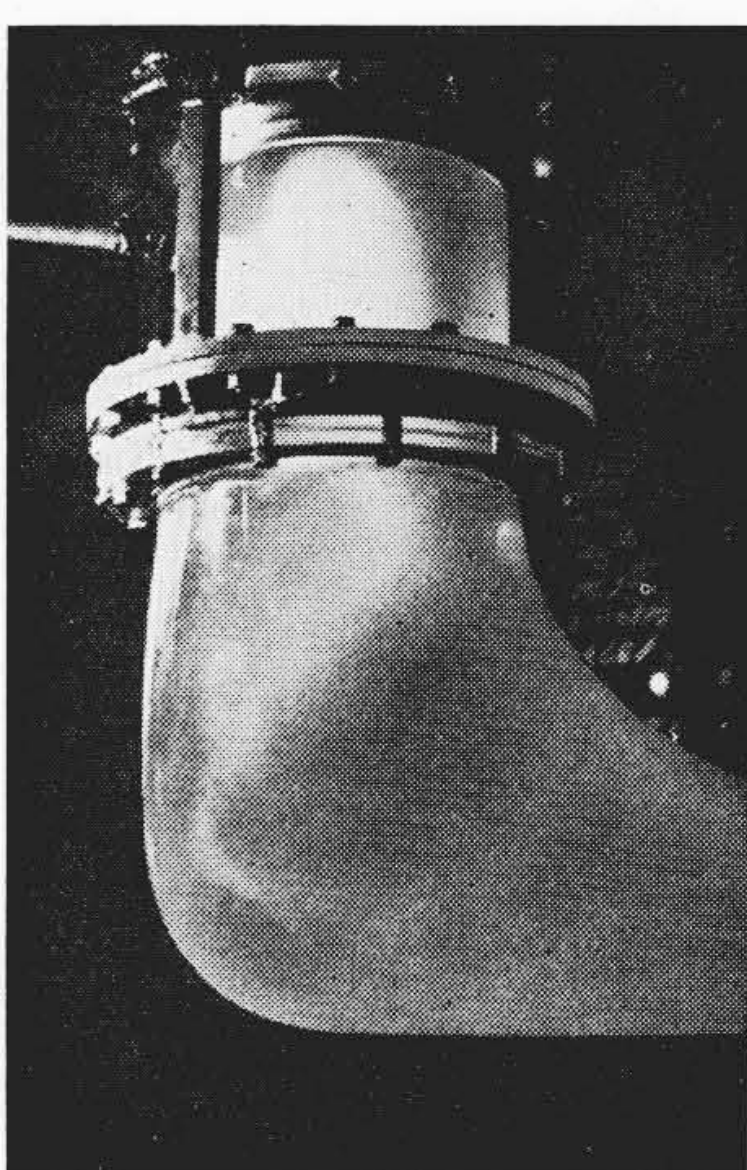


第3図 うず心の形状説明図

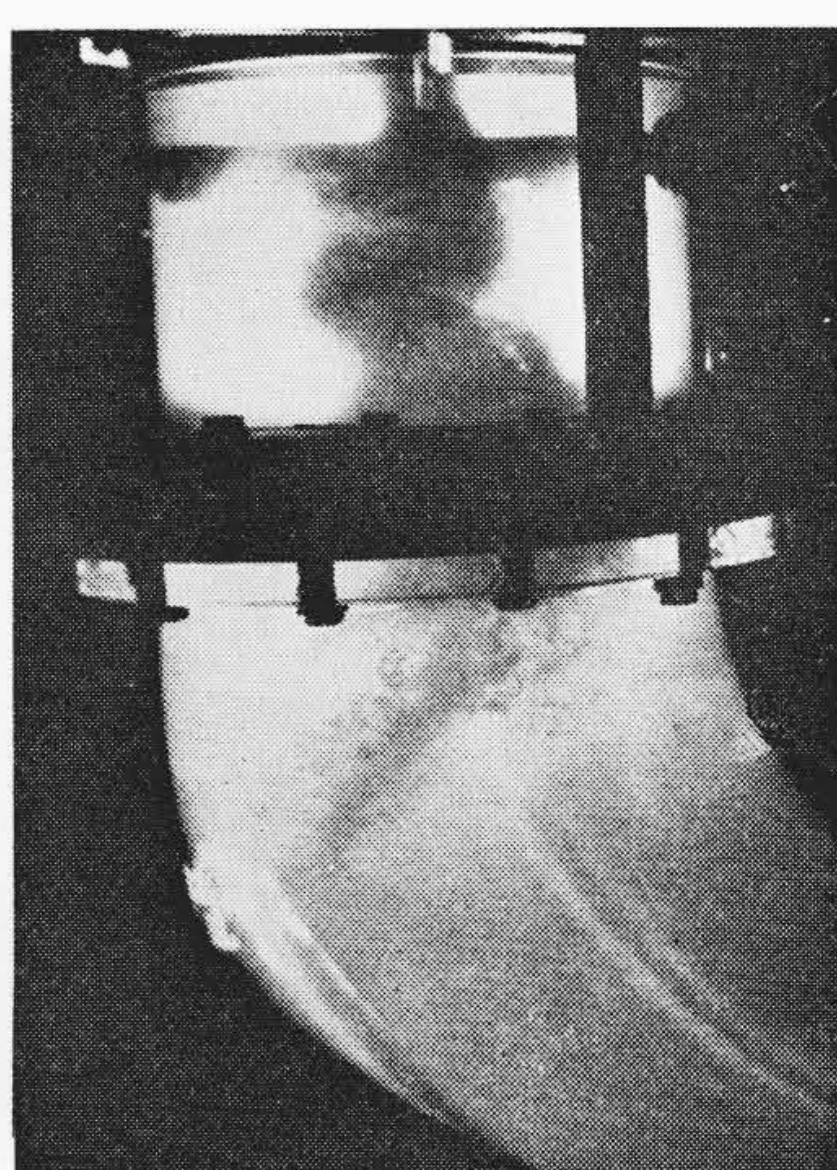
(ランナ回転方向旋回流を伴う場合)



(a) 回転方向旋回



(b) 軸 流



(c) 反回転方向旋回

第4図 うず心の状況(その3)

面でも変わらない。

第1図に示した写真は、普通軽負荷運転時に見られる状況の例で、旋回流およびうず心の回転方向はランナ回転方向とひとしく、ケーシングの渦巻き方向が下から見て反時計方向の水車では、このらせんは左ねじらせんとなる。次に第4図に示すものは、(a), (b), (c)の順にそれぞれランナ回転方向旋回流、軸流、反回転方向旋回

流の状況で、普通軽負荷、正規負荷、過負荷の各運転時に見られる状況である。このうち最後のランナ回転方向と反対方向の旋回流を伴ううず心は、下から見て渦巻き方向が反時計方向のケーシングを持つ水車においては、右ねじらせんをなしている。この過負荷時に見られるうず心は、軽負荷時のものに比べてしばしば大きな振動力を持つことがある。

うず心の大きさは、落差、流量および回転数によって異なるが、うず心径がある程度大きくなるとらせん

うずの上部は紡錘形に近づき、ついには上部ではふれまわりのない紡錘状のうず心を形造るようになるが、その場合でもうず心の後端部はふれまわる尾を持っている。このありさまは全長にわたり透視可能な吸出管を使うことによって観察された。

この上部がらせん形をしたうず心は少量の給気によってはらせん形を持続するが、給気量がある程度以上になるとその部分の形状は固定的な紡錘状に形を変える。

うず心径が小さいときはらせんの長さもまた短く、これが不規則に発生、消滅を交互に繰り返すことがある。また水車が無拘束速度付近でまわるときに、うず心の上部はらせん形と紡錘形を交互に不規則に繰り返すことがある。これらは、あるせまい条件範囲での、流れ自体の不安定に基づくものと考えられ、このとき、流量または回転数を少し変えることによってどちらか一方の形状に落ち着くという性質がある。

さらに、うず心上部のらせんは吸出高の負圧が強くなると紡錘状となるが、流量と吸出高の条件によってはかなり不安定な紡錘状うず心を形成し、キャビテーション音を伴って流水方向に振動するのが観察される場合がある。また、吸出高がある程度以上押し込みになると、うず心を見ることができなくなってくるが、ふれまわるうず心の存在していることが、吸出管内に設けた流動状況観察用糸などによって確かめられる。その観察例は第5図に示すようであり、中央部に逆流するうず心を見ることができる。

このように、うず心の形状は条件いかによってはなはだ多様であり、したがって吸出管水圧脈動もまた複雑多岐にわたるものと考えられる。

4. ランナ出口における旋回流

うず心を形成する旋回流の速度は、ランナを通過する平均的な代表流線で考えると、第6図に示したランナ羽根出口における速度三角形から、次式によって表わされる。

$$C_u = V_a - W_a \cos \gamma \dots \dots \dots (1)$$

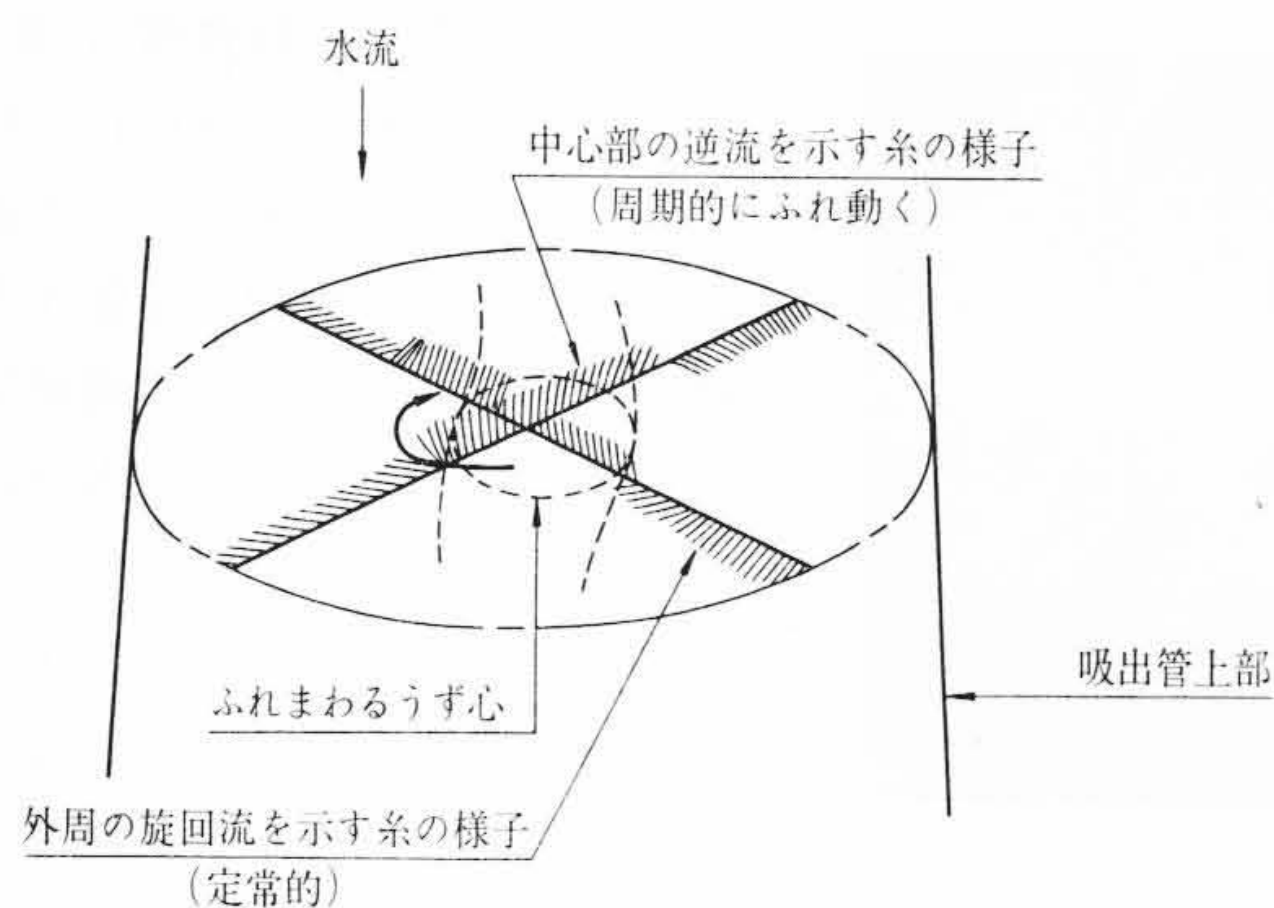
ここに、 C_u = 旋 回 分 速 度

V_a = ランナ周速度

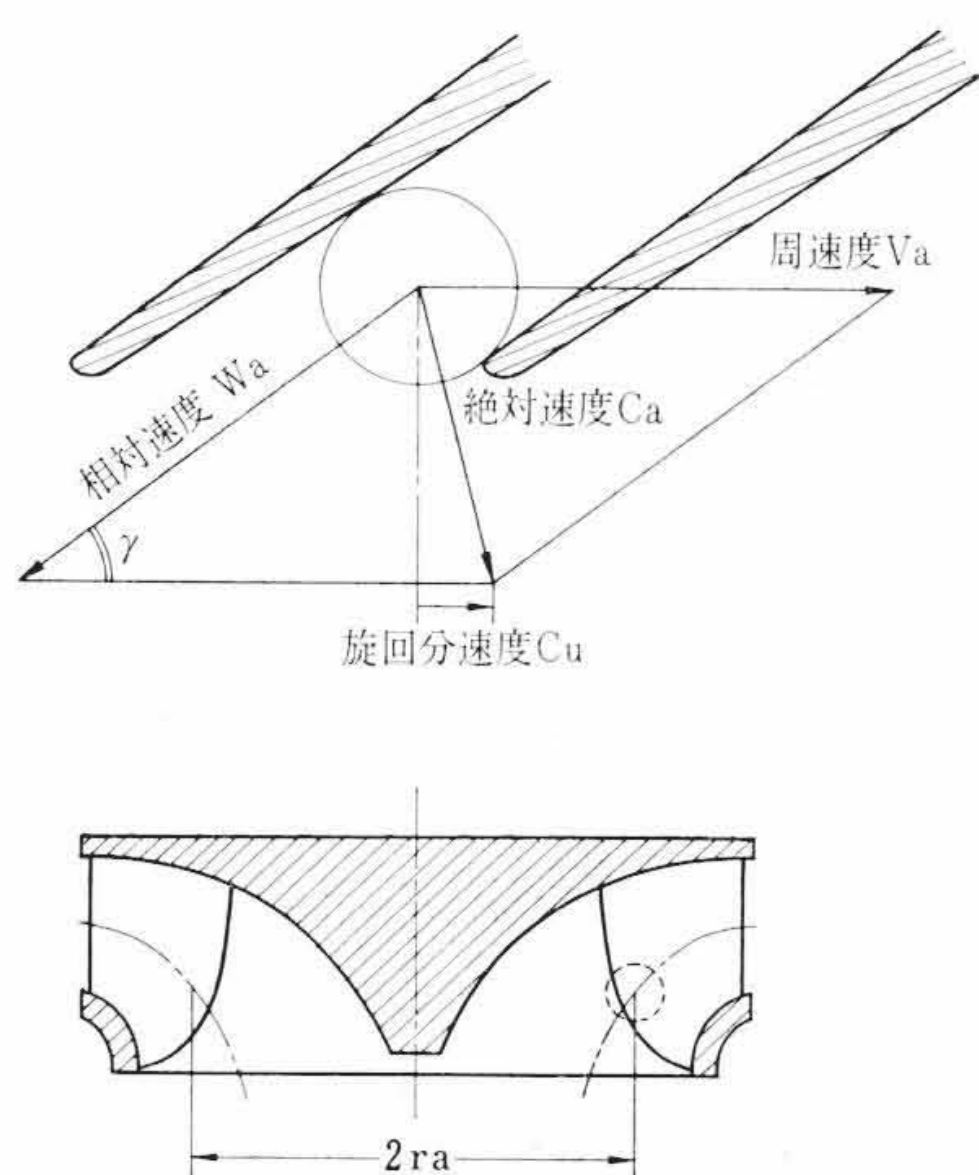
W_a = 水流の羽根に対する相対速度

γ = 羽根出口角度

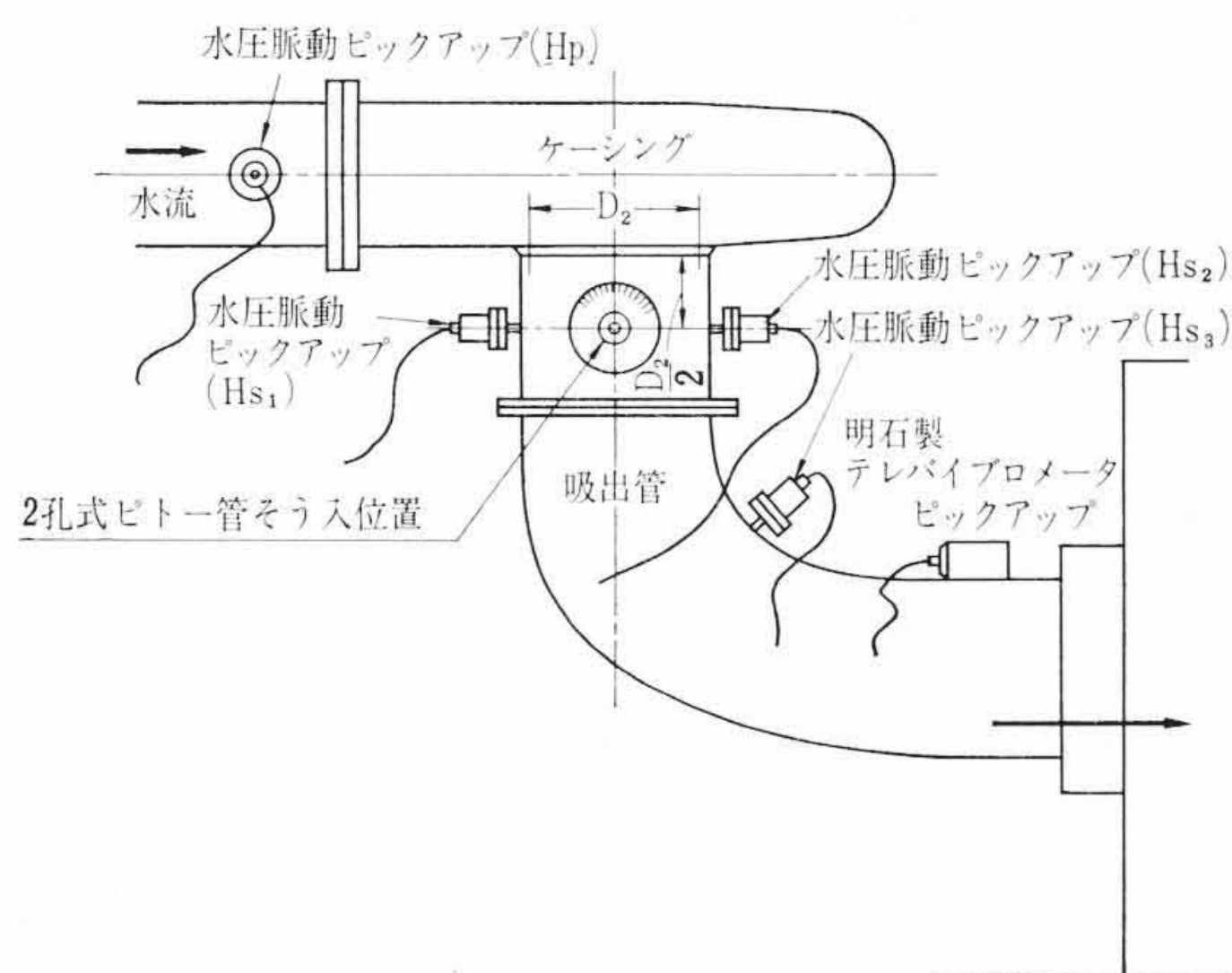
また、諸量を単位落差当たりの値で表現すれば(1)式は、



第5図 吸出高押込時流動状況例



第6図 ランナ羽根出口における速度三角形



第7図 流速分布および振動測定箇所

$$C_{u1} = V_{a1} - W_{a1} \cos \gamma \quad \dots\dots\dots (1')$$

$$\text{ただし, } C_{u1} = \frac{C_u}{\sqrt{H}}, \quad V_{a1} = \frac{V_a}{\sqrt{H}}, \quad W_{a1} = \frac{W_a}{\sqrt{H}}$$

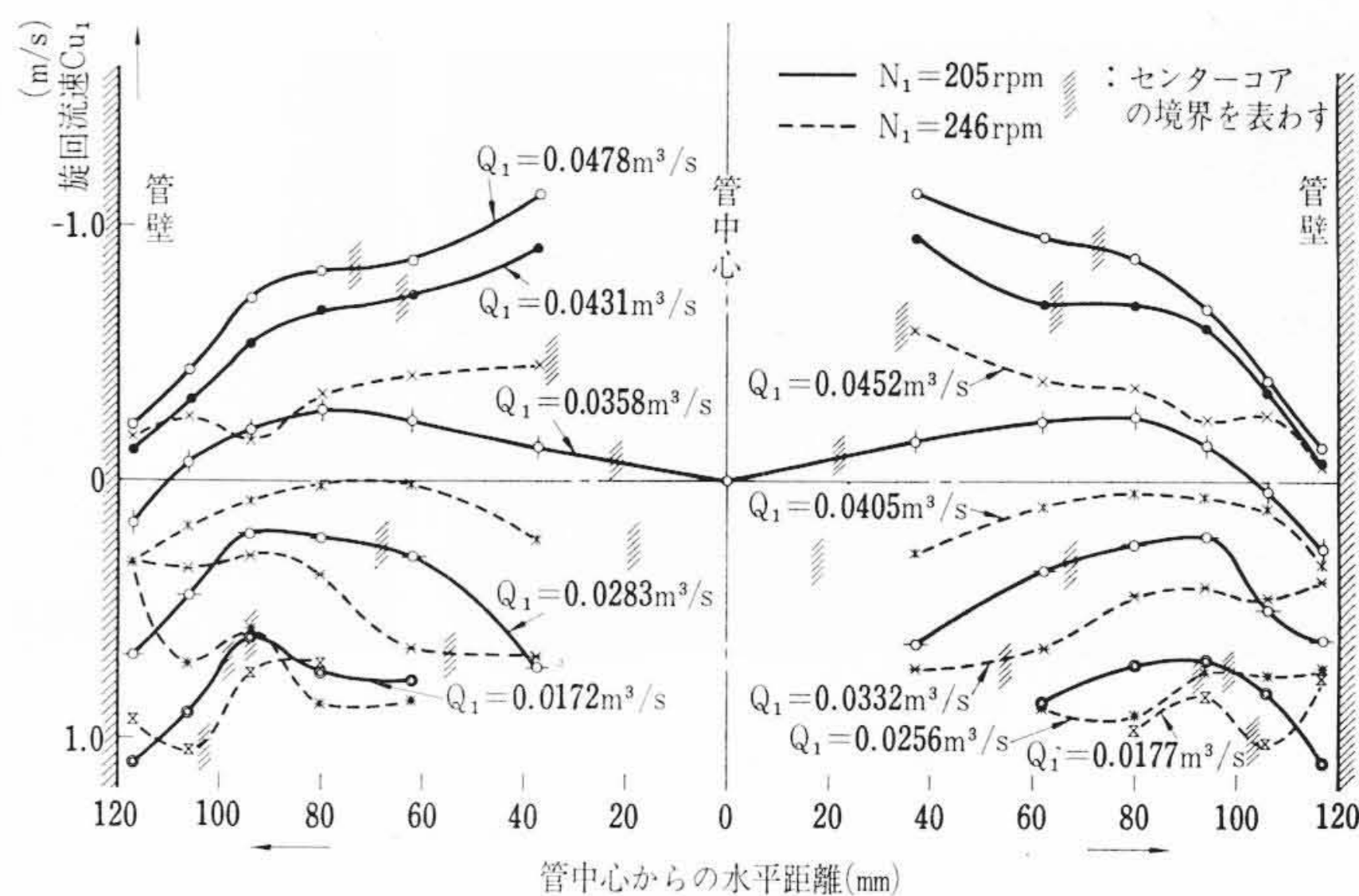
H = 有効落差

と表わせる。

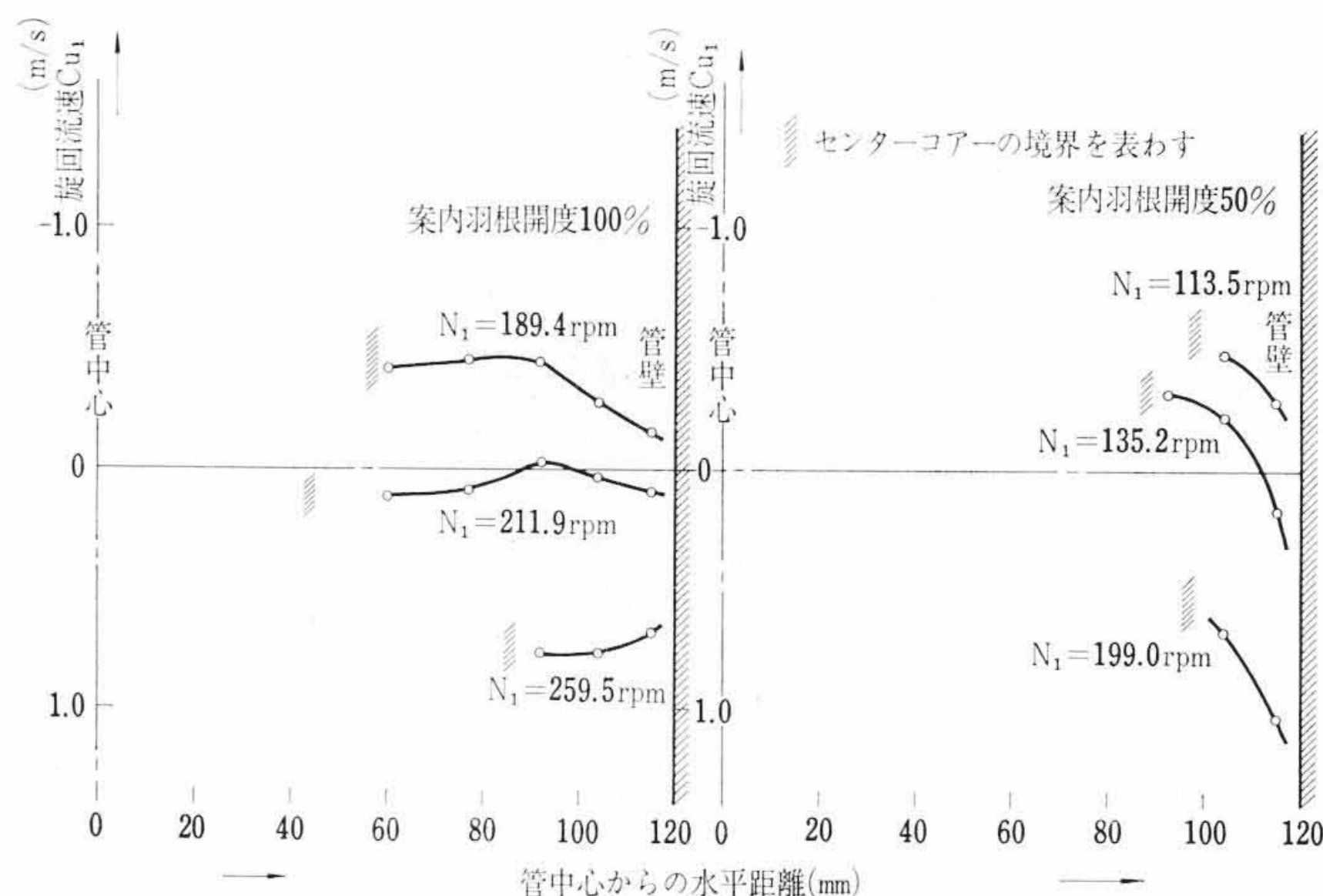
いま、水車の性能との関連性を知るうえの便利を考えて、水車の模型試験で広く用いられている単位落差当たりの毎分回転数 $N_1 (= N / \sqrt{H})$ 、単位落差当たりの流量 $Q_1 (= Q / \sqrt{H})$ を用いて (1') 式の V_{a1} 、 W_{a1} を書きかえると、

$$V_{a1} = \frac{2\pi r_a}{60} N_1$$

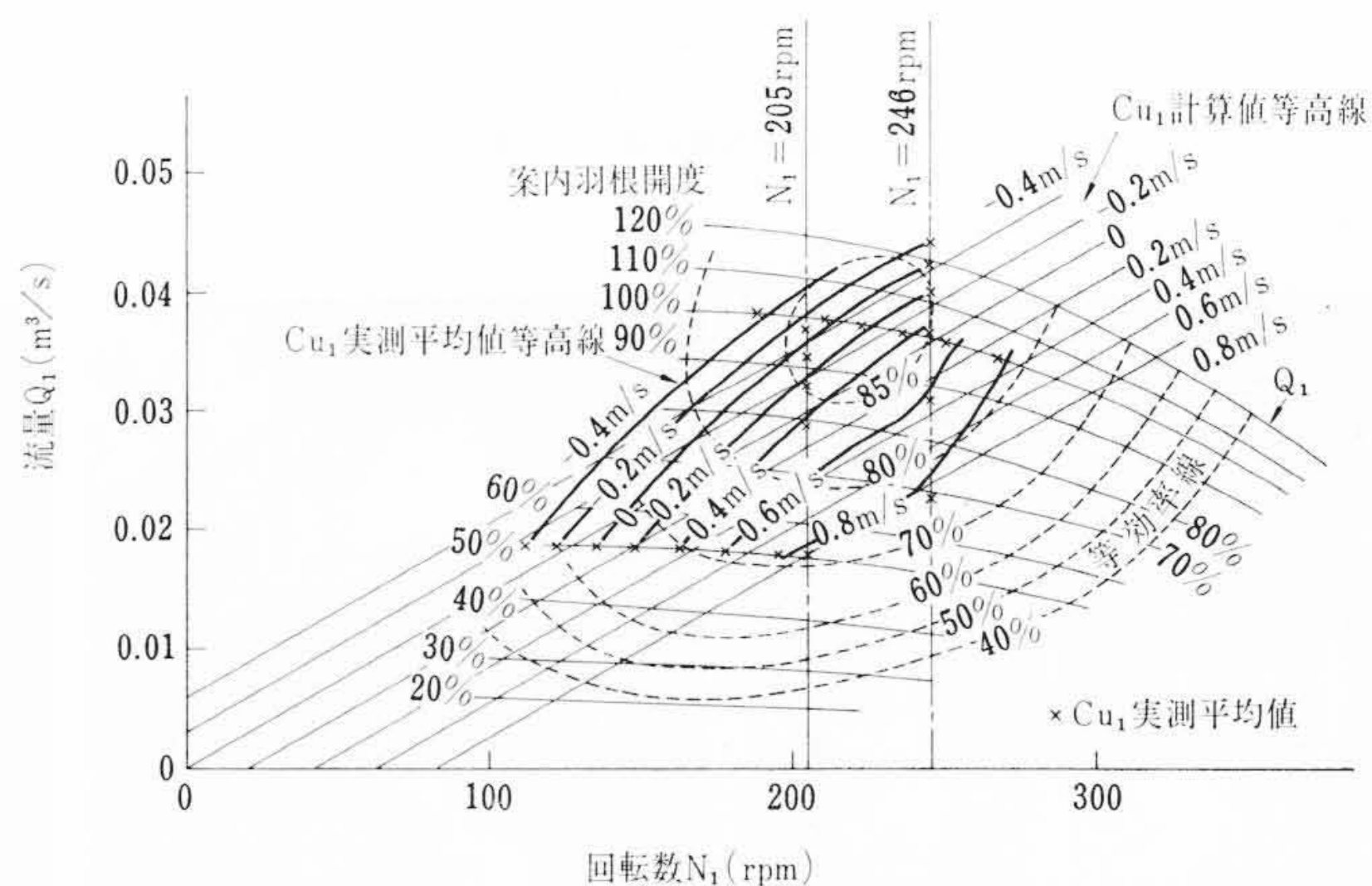
$$W_{a1} = \frac{1}{bZ} Q_1$$



第8図(a) ランナ出口における旋回流速実測値分布図 (その1)



第8図(b) ランナ出口における旋回流速実測値分布図 (その2)



第9図 ランナ出口における旋回流速等高線分布図

ただし、 r_a = 羽根出口端半径

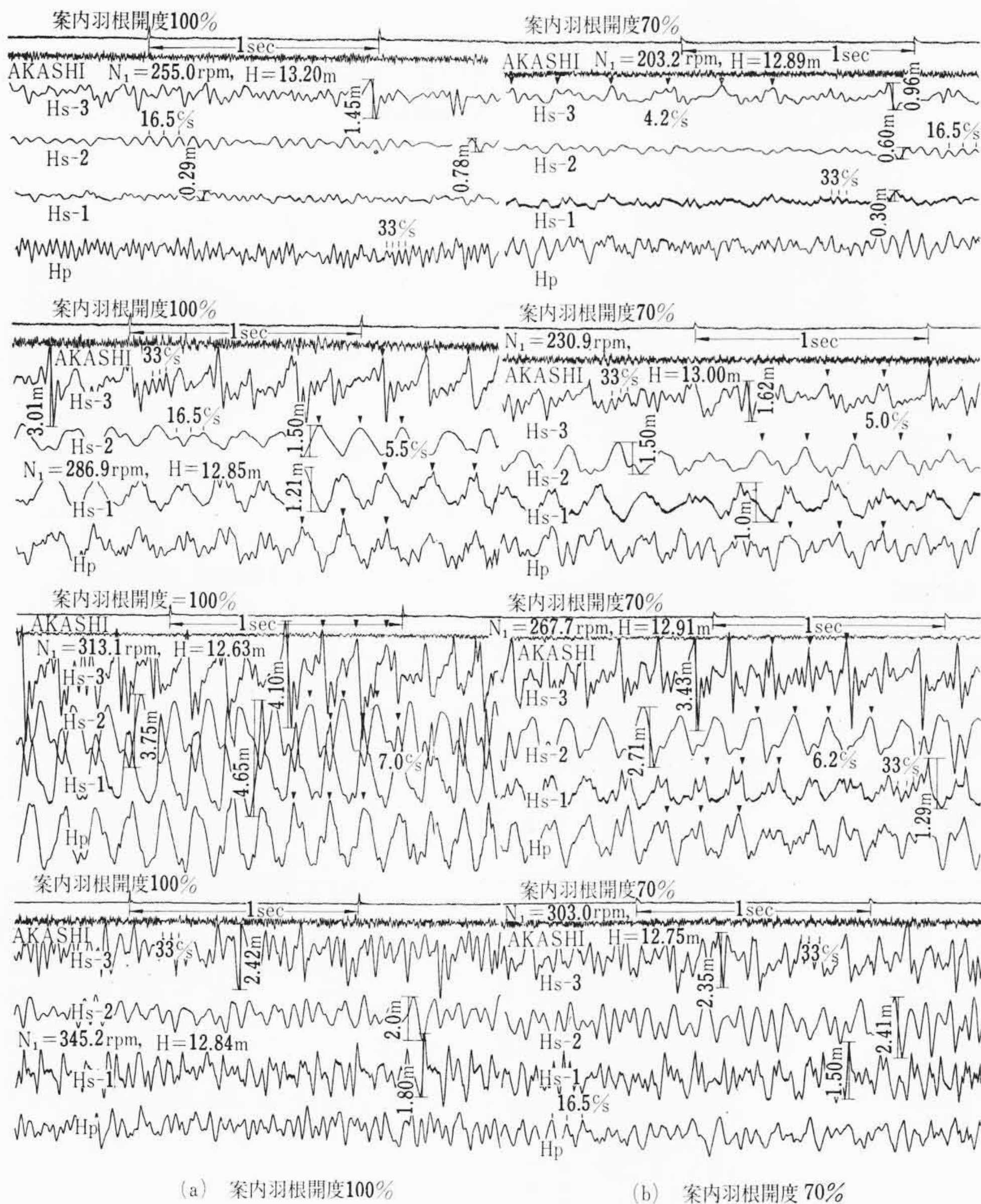
b = 流線に直角な出口羽根間断面積

Z = ランナ羽根枚数

と書けるから (1') 式は

$$C_{u1} = \frac{2\pi r_a}{60} N_1 - \frac{1}{bZ} \cos \gamma \cdot Q_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。(2) 式の右辺の $2\pi r_a/60$ 、 $1/bZ \cos \gamma$ は個々の水車ランナについて定数であるから、旋回分速度 C_{u1} は、各種の N_1 と Q_1 の組み合わせについて計算できる。しかしながら、(2) 式で計算される結果は、ランナを出る水が常にランナ羽根出口を充滿して流下すると仮定して求めた理論的平均旋回分速度であって、実際はランナを



(a) 案内羽根開度100% (b) 案内羽根開度70%
第10図 吸出管水圧脈動オシログラム例

出る水流の旋回の度合いが大きいほど遠心力が大きく作用し、水流は管壁側へおしやられ、中央部は水流に対して無効な領域を形づくる結果、羽根出口端の実測の流速分布はさきの仮定とかけはなれてくる。

いま、比速度 127 (m-kW) の模型水車について、そのランナ出口より約 $D_2/2$ (ただし D_2 はランナ出口径) 下流のドラフトパイプの部分に、第7図に示す要領で2孔式ピトー管をそう入して流速分布の測定を行ない、第8図(a)、(b)に示すような旋回流速の測定結果を得た。(a)は2種類の N_1 について流量を変え、また(b)は2種類の案内羽根開度について N_1 を変えて行なったものである。これらの実測結果と、(2)式で計算される理論的な平均分速度とを比較するために、実測値に対しては各条件ごとに算術平均値を求めたうえ、横軸に回転数 N_1 、縦軸に流量 Q_1 をとった座標面上にそれぞれの平均旋回分速度を等高線によって表わすこととする。すなわち、第9図には、実測値を太い実線で、理論値を細い実線で、それぞれの旋回分速度等高線図を描き、また、この水車の効率試験の結果から等効率曲線を点線で付記した。この図に見られるように、旋回分速度の実測値分布と理論値分布の間には、傾向こそ類似しているがなお相互にかなりの相違が見られる。しかしながら、軸流の場合を意味する $C_{u1}=0$ の線は、実測値のほうが最高効率点を横切っており、現象を忠実に捕えていることがわかる。同時に簡易化した理論の容易に適用されがたい吸出管内の流れの複雑さを示している。

5. 振動数実測特性

さきに旋回分速度を測定した模型水車の吸出管管壁および水圧管管壁に、第7図に示したようにひずみ式圧力計を配置して水圧脈動測定試験を行ない、オシログラムに記録させた。なお本研究では数

c/s 以下の低周波脈動に注目しているので、ひずみ式圧力計内水柱の固有振動数の低下を避けるためにこれらを管壁面に直接取り付け、さらにこの状況で予想される共振点約 100 c/s より高い振動数のものは解析の対象外とした⁽²⁰⁾。

試験落差は約 12~13 m、吸出高はランナ中心より下方へ約 1.5~2 m に調整し、案内羽根開度は 120% から 20% までの各開度、試験回転数はこの落差での正規回転数約 780 rpm に対し約 280 rpm から約 1,300 rpm の範囲にとり、各案内羽根開度ごとに 5 ないし 9 種類を選んで実験した。

得られた振動波形の一例を第10図(a)、(b)に示した。すべてのオシログラム上の波形の振動数を読み取って通観すると、約 16.5 c/s および約 33 c/s の振幅の小さな固有的なものと、条件によって異なる 10 c/s 以下の比較的卓越性をもつものとに大別される。前者の 16.5 c/s は実験設備の揚水ポンプの回転数 990 rpm と合致することから、倍サイクルの 33 c/s とともにポンプからの水圧脈動が供試水車内水流に絶えず影響しているものと考えられ、これらは現象の解析から除外する。

後者の 10 c/s 以下の低いサイクルのものは一般に振幅が大きく、それらのうちでも、案内羽根開度ごとに異なったある特定の N_1 の近傍で鉄管水圧をも同周期で振れさせているような大きな加振力をもっているものもある。

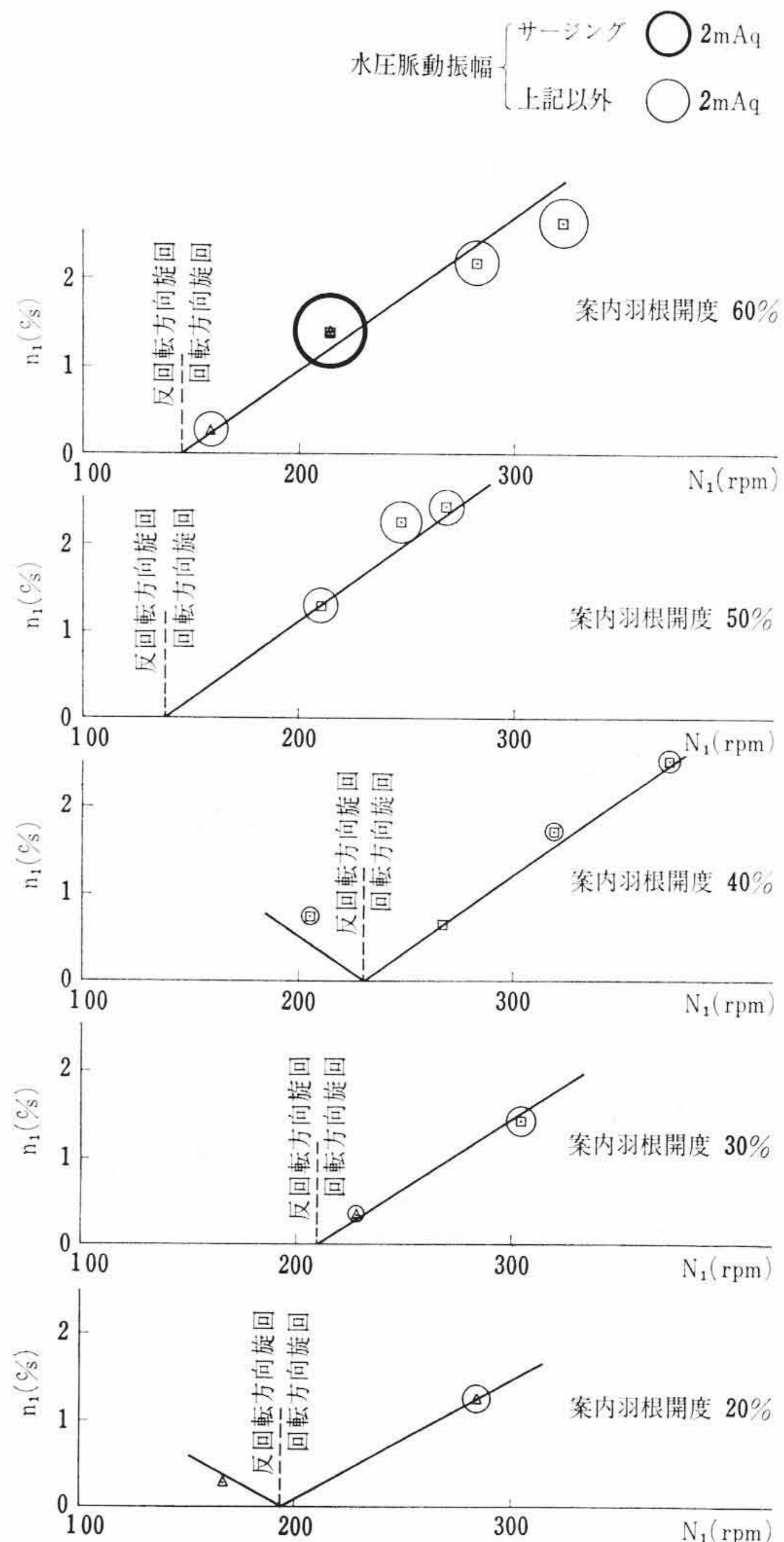
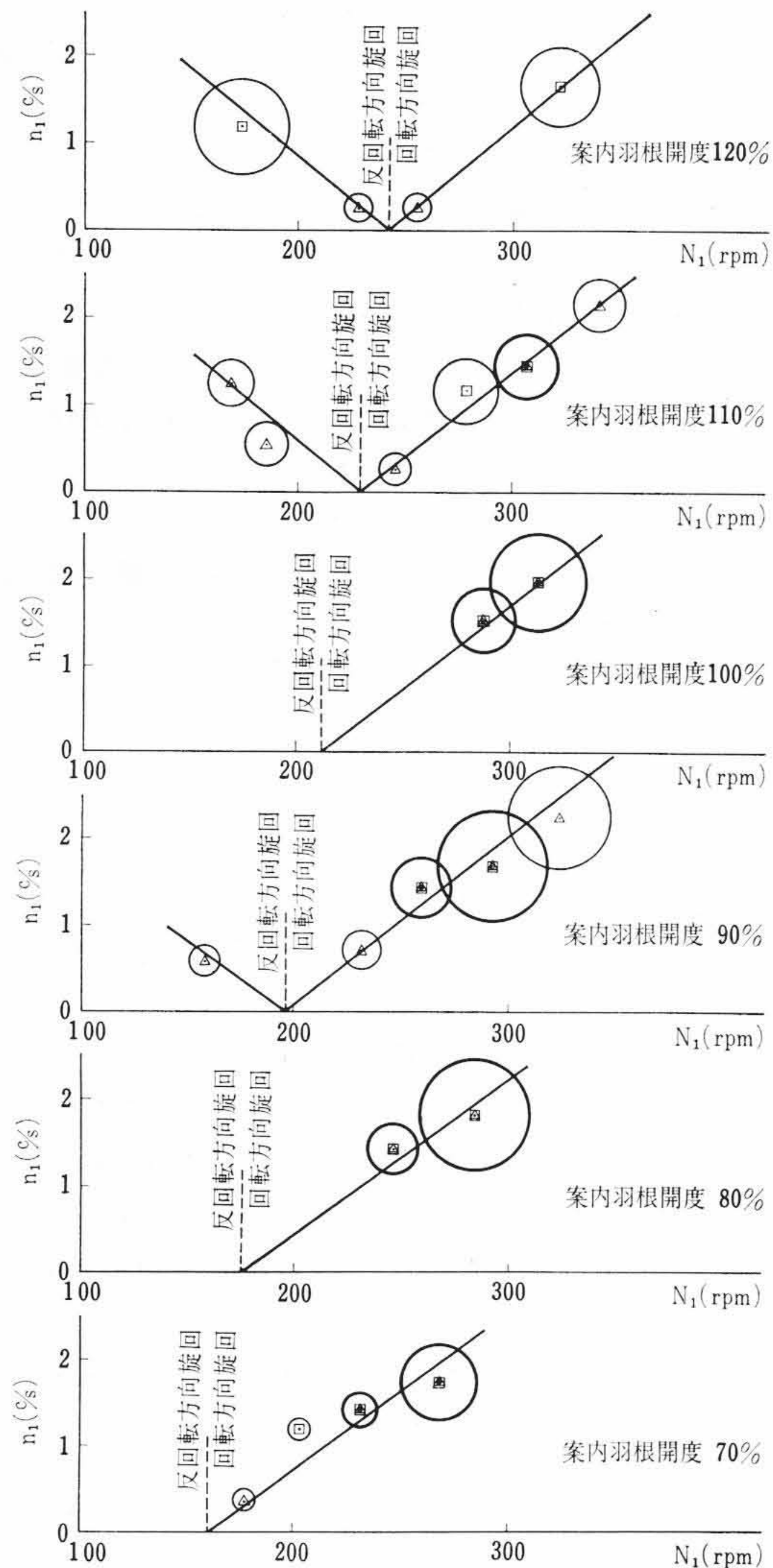
そこでまず 10 c/s 以下の卓越性ある低サイクルのもの全般についてそれらの振動数を調べてみると、どの案内羽根開度においても、開度ごとに異なった

ある特定の N_1 をさかいにして、 N_1 の大きいほうと小さいほうへ向って移行するにつれて振動数が大きくなっている。そしてこのさかいをなす N_1 の値は案内羽根開度の小さいほど低い N_1 値となっている。この傾向は、さきに述べた水車ランナを出る水流の旋回流速 C_{u1} の大きさが N_1 の値の大小変化につれて変わる現象とよく符合した傾向を示している。そこで、水車における速度成分が $\sqrt{H}$ に比例するという考えから、振動数 n を (1') 式で取り扱ったように単位落差当たりの量で表現し

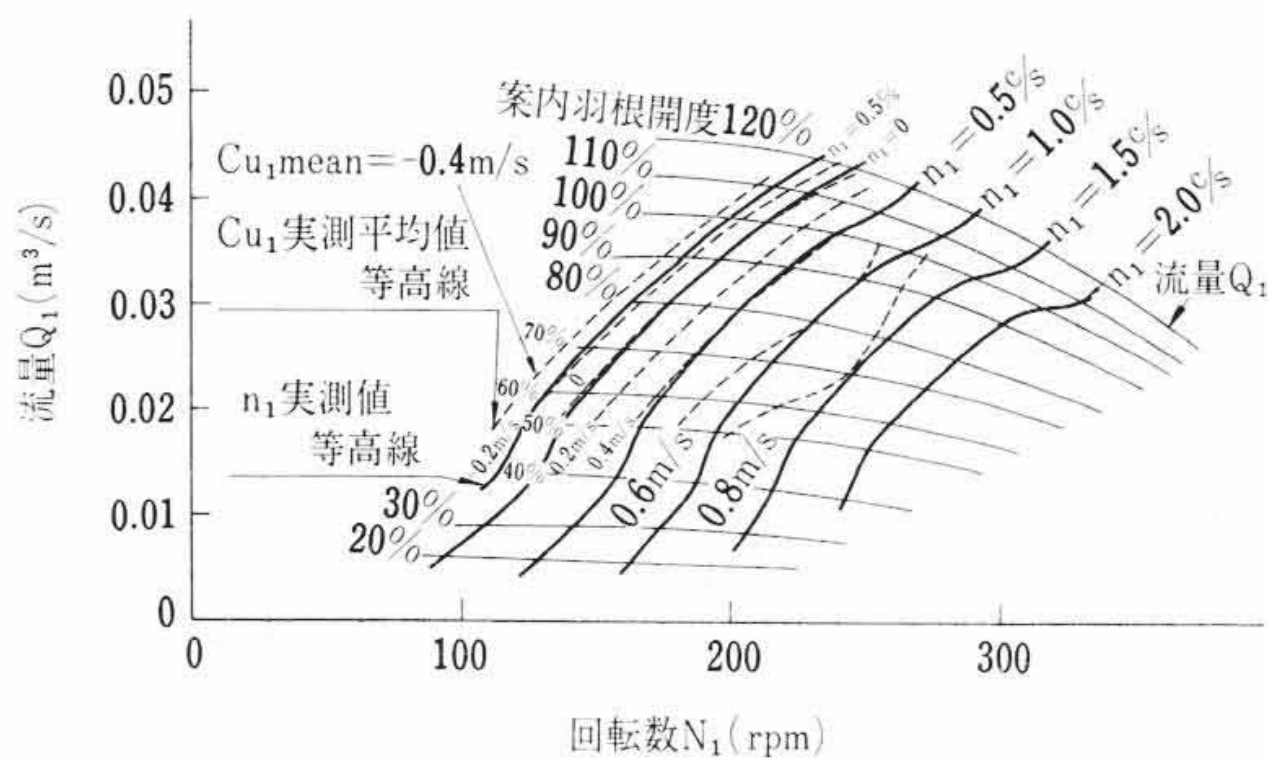
$$n_1 = \frac{n}{\sqrt{H}}$$

とする。この n_1 を縦軸に、 N_1 を横軸にとって各開度ごとにとりまとめると第11図のようになり、上述の傾向性がよくうかがわれる。

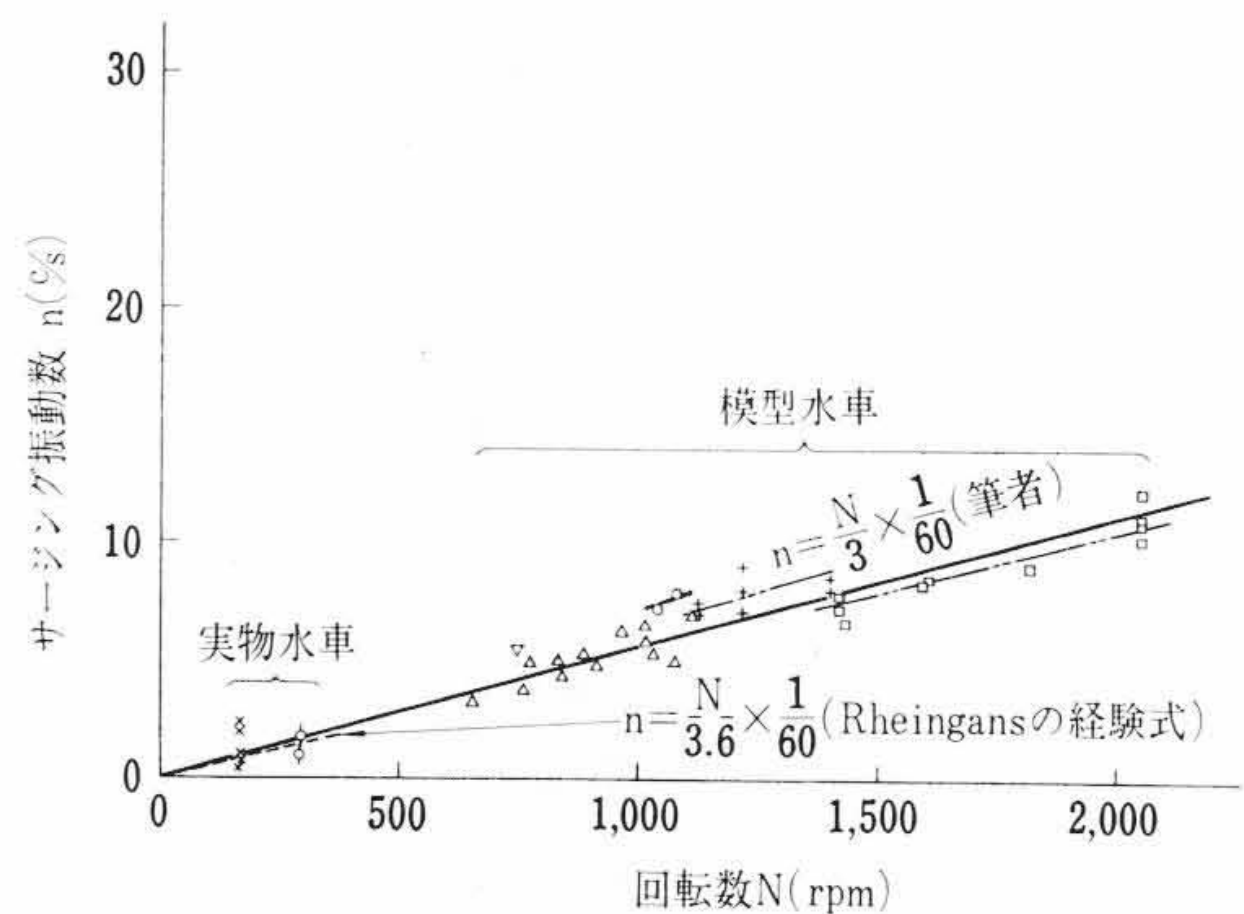
そこで、さきに実測した旋回流速実測特性と振動数実測特性の傾向性の合致を、より数量的にたしかめるために第11図の n_1 の特性図を $Q_1 \sim N_1$ 座標面上の等高線図として表わし、第9図の実測旋回分速度等高線図とを重ね合わせると第12図のようになる。この図から、旋回分速度 $C_{u1}=0$ すなわち軸流のときの等高線は、振動数 $n_1=0$ の等高線ときわめてよく一致することがわかり、この事実から、低サイクルの水圧脈動の振動数と旋回流速との直接的な関連がはっきりする。この旋回流と水圧脈動振動数との関連について、自由うず流れにおけるうず心の運動に対する複素ポテンシャル計算をもとにし、理論的に解析した村上氏の研究^{(13)~(16)}があり、大きな貢献がなされている。この村上氏の理論をはじめいくつかの理論的成果は、実水車にあって、水車回転方向と逆方向の旋回流領域をもふくめ、前記両者の大小関係に忠実に現われていることがわかる。しかしながら、ここでは、新たにこれら振動数と旋回流速との関連性を詳しくしらべるために水車模型を用いた実験によって検討を行ない、振



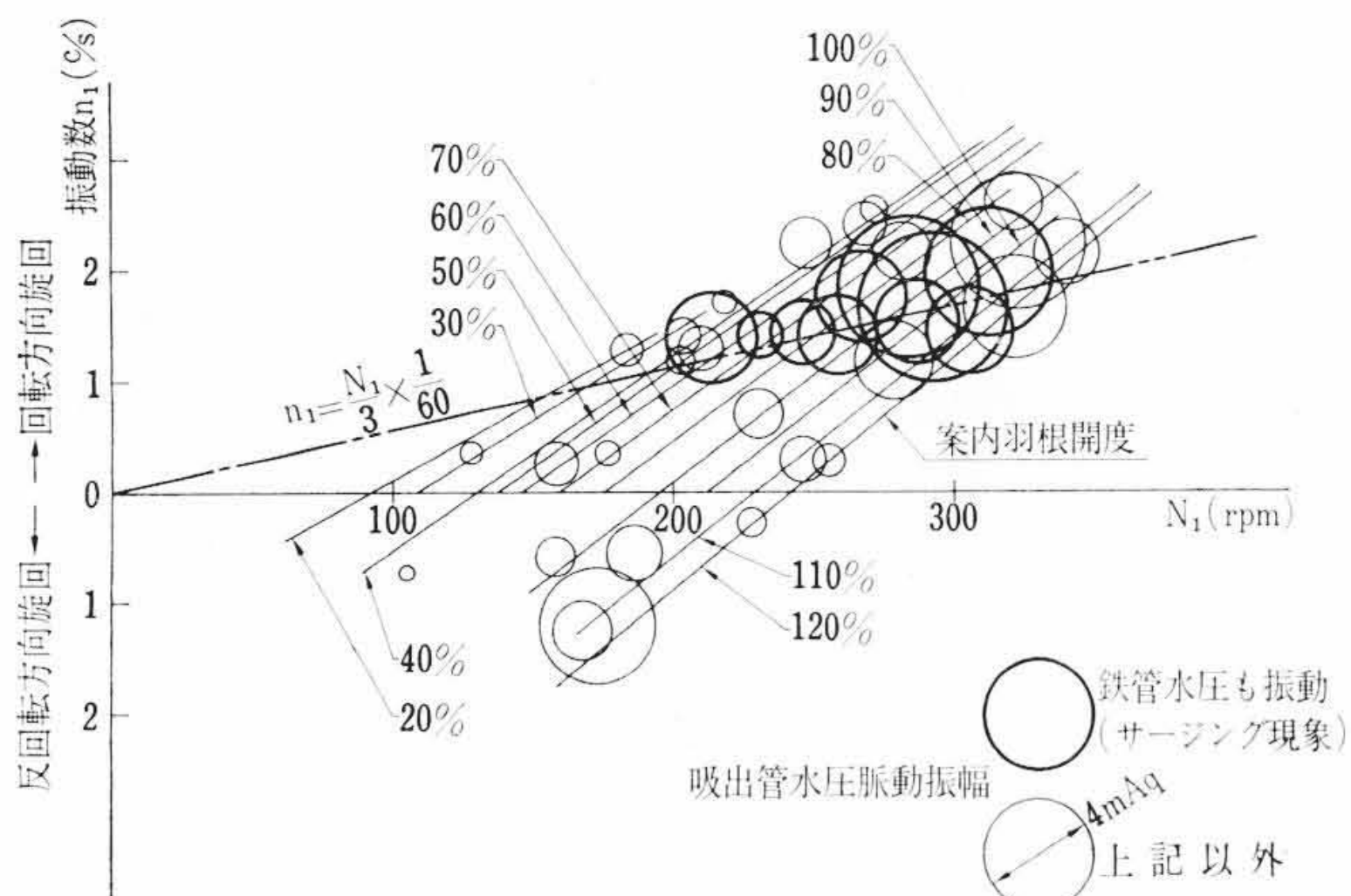
第11図 水圧脈動振動数実測値 (単位落差当たり)



第12図 振動数と巡回流速の実測分布特性比較 (単位落差当たり)



第14図 サージング振動数実測値



第13図 振動数実測特性 (単位落差当たり)

動数もまた回転数あるいは流量と同じく単位落差当りに換算して相似則の適用を導入し、実際の水車の運転条件変化に応じた振動数の傾向の移行を予想するに役だたしめた。

なお、ランナから流出する巡回流は、第8図に見られるような強制巡回と自由巡回との複雑な組み合わせになっており、水車吸出管内水流に対しては、ランナと吸出管とを組み合わせた状況で、流動状況そのものに対して解析さるべき多くの余地があると考えられる。

6. サージング現象

第11図において、水圧脈動の振幅の程度を示すに、同図上端に示す比率の円に対応せしめ、振動数特性線に書き加え、鉄管水圧も

ともに振動するような激しい水圧脈動、いわゆるサージングと呼ばれる水圧脈動は、その円を太線で表わした。案内羽根開度ごとにまとめた第11図を一括すると第13図となり、太線の円で表わされるような激しい水圧脈動を発生しているときの振動数 n_1 は、水車の回転数 N_1 に対して近似的に次のように表わせることがわかる。

$$\text{サージング発生時の } n_1 \doteq \frac{N_1}{3} \times \frac{1}{60} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $\left. \begin{array}{l} n_1: \text{ c/s} \\ N_1: \text{ rpm} \end{array} \right\} \text{それぞれ単位落差当たり}$

さらに、比速度約100~200 (m-kW)の供試各水車について調べたサージング発生時の振動数 n は、横軸に回転数 N をとって整理すると第14図のようになり、個々の模型水車について回転を変えた場合にはどれも、

$$\text{サージング発生時の } n \doteq \frac{N}{3} \times \frac{1}{60} \text{ (c/s)} \dots\dots\dots (4)$$

の関係にあり、個々の水車について成りたった(3)式の関係は、広範囲の比速度の水車のおのおのに対しても成り立つことがわかる。

一方、数例の実発電所のサージング発生事例を基に、1940年 Rheingans 氏によって報告された⁽²⁾下記の著名な経験式がある。

$$\text{サージング振動数 } n \doteq \frac{N}{3.6} \times \frac{1}{60} \text{ (c/s)} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、(3)式および(4)式は多数の模型水車についてそれぞれ回転数 N を変えて実験した結果から導いた式であり、(5)式は数例の実発電所で生じたサージングの振動数のデータを集積した資料をもとに導出した式であってその回転数 N はそれぞれの水車の正規回転数で運転された場合に限定され、両者は異なった過程を経て導出されているが、ともにサージング振動数 n は回転数 N にのみ左右され、よく類似した式で表わされていることは、流動現象の共通性を意味するものと考えられる。したがって、ともに実験的に定めた比例定数のちがいは重要な意味をもつものではない。また Rheingans 氏も同じ文献⁽²⁾で一つの水車の回転数に対するサージング振動数の比例関係をすでに示唆しており、今回模型水車によって実証されたことは興味深い。

しかしながら、本研究の結果からは(3)式からわかるように、サージング振動数の水車回転数に対する関係は、実機での大幅な変落差の運転状態に比しても同じ比例定数で成り立つことが明らかとなり、さらに第13図からわかるように落差変化に応じてサージング発生時の開度あるいは流量が変わり、その変わり方は、高い N_1 すなわち低落差運転時ほど大きい案内羽根開度でサージングを発生する可能性があるということがわかる。

7. 結 言

フランスス水車吸出管における水圧脈動について、模型水車による実験的検討を行なった結果、次の結論を得た。

- (1) 振動数 n は、流量 Q 、回転数 N および落差 H によって変わるが、その大小はランナを出る旋回流速の大小とよく合致した傾向を示し、水車の軽負荷運転時におけるランナ回転方向と同方向旋回流の場合にも、過負荷運転時におけるラ

ンナ回転方向と逆方向旋回流の場合にもこの合致性を有する。

- (2) 上記の関係は、相似則によって $n/\sqrt{H}$ 、 $Q/\sqrt{H}$ および $N/H\sqrt{H}$ に対する関係に整理され、水車の変落差などの運転状態の変化に応じた振動数の変化の傾向予測に役だつ。
- (3) 水車上流の鉄管水圧も共振させるような強い加振力を持つ吸出管水圧脈動—いわゆるサージング—が発生するときの振動数は、水車回転数に対して次の関係にあることがわかった。

$$\text{サージング振動数 } n_1 \doteq \frac{N_1}{3} \times \frac{1}{60} \text{ (c/s)}$$

$$\text{ただし、 } n_1 = \frac{n}{\sqrt{H}} \\ N_1 = \frac{N}{\sqrt{H}}$$

この関係は、広範囲の比速度の水車についても、また、個々の水車の回転数変化に対しても成り立つことが模型試験で実証され、実物水車の大幅な変落差運転状態下においても適用することができる。

以上、吸出管内水圧脈動測定実験の結果を整理して振動数特性の基本的な性質を示したが、さらに、吸出管内流動現象自体に対する解析、吸出高の因子に基づく変化、給気性能との関連など、水圧脈動に關係する因子は多岐に及び、本報告がいささかなりとも実発電所の水圧脈動現象の解析の足がかりともなれば幸いである。

本報をまとめるに当たり、日立製作所日立工場深栖部長、外岡課長をはじめ、日立研究所水力実験所山崎部長、手島主任研究員のご助言に対し心から謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 今井：日立評論，18，10 (昭9-10)
- (2) W. J. Rheingans：Trans. of A. S. M. E.，62，174 (Apr. 1940)
- (3) 佐藤：電業社技術彙報，4，1 (昭30-5)
- (4) 吉岡，岩田：電力，43，3 (昭34-3)
- (5) F. C. Taylor：Trans. of A. S. M. E.，83，Series A，2 (Apr. 1961)
- (6) 坂倉，篠田：電力，47，8 (昭38-7)
- (7) 今井：日立評論，9，12 (大15-12)
- (8) 宮城：日立評論，10，2 (昭2-2)
宮城：機学誌，33，156 (昭5-4)
- (9) 内丸，鬼頭：東大工学部紀要，18，8 (昭5-2)
- (10) 内丸，鬼頭：東大工学部紀要，19，4 (昭5-10)
- (11) 生源寺，下山：九大工学部紀要，7 (昭8-9)
- (12) 鬼頭：機学誌，51，356 (昭23-5)
- (13) 村上：機学論文集，18，73 (昭27)
- (14) 村上：機学論文集，21，101 (昭30)
- (15) 村上：機学東海支部講演会 (昭31-9)
- (16) 村上：機学論文集，24，137 (昭33-1)
- (17) 堀口ほか：富士時報，36，7 (昭38-7)
- (18) 中西ほか：富士時報，36，8 (昭38-8)
- (19) R. M. Donaldson：Trans. of A. S. M. E.，78，5 (July. 1956)
- (20) 富田ほか：日立評論，45，2 (昭38-2)