
ポンプ特集

遠心ポンプの安定特性曲線に関する研究.....	59
アメリカ内務省開発局スネーククリーク第1ポンプ場納 ポンプ模型試験.....	66
化学プラント用ポンプの特性とメカニカルシール.....	72
超臨界圧火力発電所用ボイラ給水ポンプ.....	78
超高層ビル用防振装置付ポンプ.....	84

遠心ポンプの安定特性曲線に関する研究

Studies on the Stable Characteristic Curves of Centrifugal Pumps

小林 滋 明*
Shigeaki Kobayashi

要 旨

遠心ポンプを小流量域で運転する際、吐出流量および圧力が激しく周期的に変動し運転不能に陥ることがある。このいわゆるサージング現象が生ずるときにはポンプの流量揚程曲線は必ず右上がり部分をもっている。

本文は遠心ポンプの流量揚程曲線に影響を与えると考えられる主要な設計因子を選び、それらの値の種々の組合せのポンプにおいて流量揚程曲線を求め、統計的手法によりこれらの因子が流量揚程曲線の形状に及ぼす効果を調べたものである。さらにこの結果を用いて過去の製品ポンプの流量揚程曲線を推定し、実際の試験性能曲線と比較した。これにより、分析の結果の適用を慎重に行なえば、流量揚程曲線が安定か不安定かを予測することができることが明らかになった。

1. 緒 言

遠心ポンプを小流量域で運転する際ポンプが激しく振動し運転不能に陥ることがある。しかし少なくともポンプの流量揚程曲線(以下、揚程曲線と略す)が右上がり部分(流量が増すとともに揚程が増す領域)を持たなければ、配管のいかににかかわらずこの種の振動を起こさないことが経験されている。この振動はいわゆるサージングに起因するものと考えられている。いかにポンプを設計すれば右下がり揚程曲線(いわゆる安定特性曲線)が得られるかを調べることはサージングによる振動を防止するための基本的な課題である。

いくつかの設計因子が揚程曲線の形状に及ぼす影響については従来ある程度研究されているが(たとえば文献⁽²⁾⁽³⁾参照)、定量的にはまだ不十分な点が多い。またこれらは設計因子がそれぞれ単独に及ぼす影響について調べたもので、互いに及ぼし合う影響を総合的に調べていない欠点がある。

したがって、右下がり揚程曲線を持つ既存ポンプとほとんど同じ主要寸法を有するポンプを、部分的に多少変更せざるを得ない場合、揚程曲線の形がいかに変化するか分からないことが多い。たとえば構造上軸が太くなるために羽根車入口径を大きくすることによって、時に揚程曲線が右上がり部分を持つようになることを経験している。またこのように特性の一部に不安定点が生じたポンプのどの部分をどのように変えれば揚程曲線の右上がり部分をなくすることができるかということがわかっていないために、対策がたてられず困ることが多い。そこで設計因子相互間の影響をも含めて定量的により詳しく調べることにした。

まず第一段階として、設計諸因子のなかから揚程曲線の安定性に影響を与えると考えられるもの6個を選び、おのおの2種類(2水準)に変化させ、16個の羽根車と2個の案内羽根を製作し32個の実験を行なった。第二段階ではこの結果を基にしてさらに因子を選択し3個にしぼり、おのおの3水準に変化させ、27個の羽根車を製作し実験を行なった。いずれの場合も研究計画、実験結果の分析に実験計画法を用いた。

設計因子の値を種々に変化させると揚程曲線の形だけでなくポンプ効率も変化するから、揚程曲線の安定度に関する要因効果の分析と合わせて、ポンプ効率の変動に関する要因効果の分析も行なった。

2. 記 号

本文に使用する記号を下に示す。

$H_{th\infty}$: 羽根車の羽根数が無限大の場合の理論揚程

* 日立製作所亀有工場

H_{th} : 羽根車の羽根数が有限の場合の理論揚程

H : 実際に発生する揚程

H_s : 衝突損失

H_f : 流動部流路損失

u_1, u_2 : 羽根車入口および出口における周速度(添字1は入口を、2は出口を示す)

cu_1, cu_2 : 羽根車入口および出口における絶対速度の周方向成分

cm_1, cm_2 : 羽根車入口および出口における絶対速度のメリディアン方向成分

β_1, β_2 : 羽根車の羽根入口角および出口角

r_1, r_2 : 羽根車の入口および出口半径

Z : 羽根車の羽根枚数

D_1, D_2 : 羽根車の羽根入口径および出口径

D_e : 羽根車の入口目玉径

D_b : 羽根車の入口部ボス径

b_2 : 羽根車の出口幅

t_2 : 羽根車出口における羽根ピッチ

a_2 : 羽根車出口における羽根の円周方向厚み

S : 羽根車メリディアン断面における平均流線の回転軸に対する静止モーメント

ϕ : 経験により得られた値⁽⁴⁾

$\phi = (0.55 \sim 0.68) + 0.6 \sin \beta_2 \dots \dots$ 案内羽根のあるポンプに対して

α_4 : 案内羽根入口角

r_4 : 案内羽根入口半径

3. 研究 方法

種々の設計因子が揚程曲線の形状に及ぼす影響について考察してみる。

実際のポンプにおいては羽根数は有限であり、その場合の理論揚程 H_{th} と羽根数無限大の場合の理論揚程 $H_{th\infty}$ とを結びつける近似式は Pfeleiderer 氏⁽¹⁾によれば(1)式で表わされる。

$$H_{th\infty} = \left(1 + \phi \frac{r^2}{ZS}\right) H_{th} \dots \dots \dots (1)$$

ここで

$$S = \int_{r_1}^{r_2} r dx \dots \dots \dots (2)$$

である。

$H_{th\infty}, H_{th}, H$ と Q の関係を図1に示す。 $H_{th\infty}$ および H_{th} は図1上に直線として表わされる。 H は H_{th} から損失 H_s および H_f を

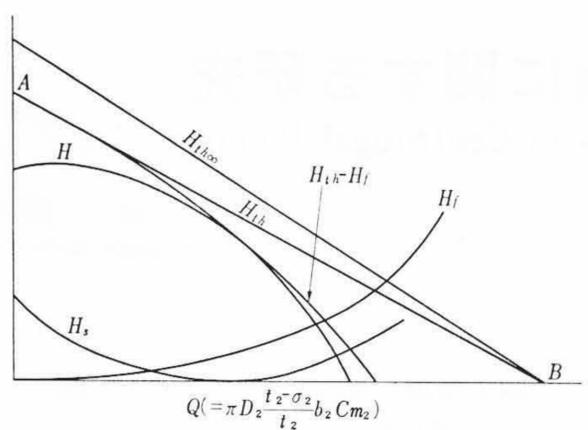


図1 揚程曲線

減じた値となる。

揚程曲線(H-Q曲線)は定性的には以下のようにすれば右下がりになることがいえる。

(1) $H_{th\infty}$ 直線の傾斜をできるだけ急にする。

モーメント理論より導かれる羽根数が無限大の場合の理論揚程 $H_{th\infty}$ は次式で表わされる。

$$H_{th\infty} = \frac{1}{g} (u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}) = \frac{1}{g} \left(u_2^2 - \frac{u_2 c_{m2}}{\tan \beta_2} - \frac{1}{g} \left(u_1^2 - \frac{u_1 c_{m1}}{\tan \beta_1} \right) \right) \dots \dots \dots (3)$$

したがって羽根車外径, 入口径, 回転数が一定であれば, $H_{th\infty}$ の直線の傾斜を急にするためには, β_2 を小, β_1 を大にすればよい。ただし半径方向流入の際には β_1 は関係しない。

(2) H_{th} 直線の傾斜をできるだけ急にする。

このためには(1)式より明らかなように, $\phi \frac{r^2}{ZS}$ をできるだけ小さくする。すなわち

(a) ϕ を小さくする。このためには ϕ に対する経験式より β_2 をできるだけ小さくすればよい。

(b) Z を大きくする。

(c) S を大きくする。いま外径 D_2 が与えられているとすれば, 内径 D_1 をなるべく小さくすればよい。

(3) H は H_{th} から衝突損失 H_s および流路損失 H_f を差し引いた値であるから, 図1からわかるように, H_s をできるだけ小さくし, また H_f を大きくするほうがよい。しかし後者は効率を低下させるので望ましくない。締切点における衝突損失 H_{s0} は Pfeleiderer 氏⁽¹⁾ によれば次式で表わされる。

$$H_{s0} = \frac{\phi}{2g} \left[\left(\frac{u_1}{u_2} \right)^2 + \left(\frac{1}{1+p} \frac{r_2}{r_4} \right)^2 \right] u_2^2 \dots \dots \dots (4)$$

ただし, $p = \phi \frac{r_2^2}{ZS}$

(a) 衝突係数 ϕ は O. Hansen 氏⁽²⁾ および H. Schröder 氏の研究結果によれば⁽²⁾, 案内羽根入口角 α_4 が小さいほど小さい。

(b) u_1/u_2 をできるだけ小さくする。これは D_1/D_2 を小さくすることで(2)(c)と同じである。

(c) p を大きくすればよいが, これは(2)と相反する効果となる。

(4) なお, Z と β_2 を変化させた場合については O. Hansen 氏の研究があるが⁽²⁾, これによると Z, β_2 はともに小さいほど H-Q 曲線は安定化するという結果が得られている。 β_2 については(2)(a)と同じであるが, Z については(2)(b)と相反する結果である。

以上の考察に基づき, 第一段階として, 揚程曲線の形に影響を及ぼすと考えられる因子の中から6個を選び, おのおの2種類に変化させることにした(6因子2水準実験, 表1)。これを $L_{32}(2^6)$ の直交表を用いて計画すると, 16個の羽根車と2個の案内羽根を製作

表1 選定した因子および水準値 (6因子2水準)

水準	因子	羽 根 車				案内羽根
		羽根枚数 Z	羽根入口径 羽根出口径 D_1/D_2	入口目玉径 羽根出口径 D_e/D_2	羽根出口角 β_2	
1	8枚	$\frac{160 \text{ mm}}{300 \text{ mm}} = 0.533$	$\frac{160 \text{ mm}}{300 \text{ mm}} = 0.533$	17°	10°	4°30'
2	5	$\frac{130 \text{ mm}}{300 \text{ mm}} = 0.433$	$\frac{140 \text{ mm}}{300 \text{ mm}} = 0.467$	21	15	6°30'

表2 ポンプ諸元数値 (6因子2水準)

直交表No.	因子 列番	Z	$D_1/(D_2)$	β_2	$D_e/(D_2)$	β_1	α_4	不安定 指数
		1	2	4	8	15	16	
1	8枚	$\frac{160}{300}$	$\frac{160}{300}$	17°	$\frac{160}{300}$	10°	4°30'	10.8
2	8	160/以下略	160/以下略	17	160/以下略	10	6 30	10.8
3	8	160	160	17	140	15	4 30	16.8
4	8	160	160	17	140	15	6 30	15.6
5	8	160	160	21	160	15	4 30	19.3
6	8	160	160	21	160	15	6 30	24.5
7	8	160	160	21	140	10	4 30	28.6
8	8	160	160	21	140	10	6 30	28.6
9	8	130	160	17	160	15	4 30	4.1
10	8	130	160	17	160	15	6 30	1.0
11	8	130	160	17	140	10	4 30	2.0
12	8	130	160	17	140	10	6 30	5.2
13	8	130	160	21	160	10	4 30	9.6
14	8	130	160	21	160	10	6 30	7.4
15	8	130	160	21	140	15	4 30	12.0
16	8	130	160	21	140	15	6 30	14.4
17	5	160	160	17	160	15	4 30	13.2
18	5	160	160	17	160	15	6 30	10.8
19	5	160	160	17	140	10	4 30	23.2
20	5	160	160	17	140	10	6 30	18.0
21	5	160	160	21	160	10	4 30	25.9
22	5	160	160	21	160	10	6 30	21.9
23	5	160	160	21	140	15	4 30	27.2
24	5	160	160	21	140	15	6 30	20.6
25	5	130	160	17	160	10	4 30	1.0
26	5	130	160	17	160	10	6 30	0
27	5	130	160	17	140	15	4 30	9.6
28	5	130	160	17	140	15	6 30	6.3
29	5	130	160	21	160	15	4 30	3.1
30	5	130	160	21	160	15	6 30	6.3
31	5	130	160	21	140	10	4 30	8.5
32	5	130	160	21	140	10	6 30	9.6

表3 選定した因子と水準値 (3因子3水準)

水準	因子	羽根枚数 Z	羽根入口部ボス径 羽根車外径 D_b/D_2	羽根出口角 β_2
1	8枚	$\frac{141 \text{ mm}}{300 \text{ mm}} = 0.47$	15°	
2	6	$\frac{111 \text{ mm}}{300 \text{ mm}} = 0.37$	18	
3	4	$\frac{81 \text{ mm}}{300 \text{ mm}} = 0.27$	21	

し, 32回の実験を行なうことになる。つまり32組のポンプが得られることになるが, これらを具体的な水準値を用いて示すと表2のようになる。

第二段階としては, 第一段階の分析結果を整理検討のうえ, 効果の大きかった因子, さらに詳しい効果を知る必要のある因子として羽根車羽根枚数 Z , 羽根入口部ボス径 D_b , 羽根車羽根出口角 β_2 の3個にしぼり, おのおの3種類に変化させることにした(3因子3水準実験, 表3)。 D_b を採用する理由は, 強度上または構造上の条件よりまず軸径したがってボス径 D_b が決められてしまい, これがポンプの水力性能にもかなりの影響を有すると考えられること, 設

表4 ポンプ諸元数値 (3因子3水準)

直交表 No.	因子 列番	Z	$D_b/(D_2)$	β_2	不安定指教
		1	2	5	
1	枚	8	mm mm 141/(300)	15°	103
2	枚	8	141/以下略	18	96
3	枚	8	141	21	156
4	枚	8	111	15	79
5	枚	8	111	18	115
6	枚	8	111	21	152
7	枚	8	81	15	43
8	枚	8	81	18	45.5
9	枚	8	81	21	126.5
10	枚	6	141	15	124
11	枚	6	141	18	115.5
12	枚	6	141	21	160
13	枚	6	111	15	37
14	枚	6	111	18	84.5
15	枚	6	111	21	127
16	枚	6	81	15	31.5
17	枚	6	81	18	41
18	枚	6	81	21	70.5
19	枚	4	141	15	51.5
20	枚	4	141	18	101
21	枚	4	141	21	115.5
22	枚	4	111	15	41
23	枚	4	111	18	36.5
24	枚	4	111	21	105.5
25	枚	4	81	15	28.5
26	枚	4	81	18	41
27	枚	4	81	21	35.5

計仕様点において羽根車入口部軸流速度一定という条件を設ければ入口目玉径 D_e および羽根入口角 β_1 は一義的に定まること(羽根車羽根入口径 D_1 はどの羽根車についても同じある関係でなるべく小さく決めるものとする) などより, 羽根車入口部の制御因子としては D_b で代表させることができると考えられるからである。羽根枚数 Z は, 従来の研究で相異なる見解⁽²⁾⁽³⁾ が得られているので, さらに詳しくその効果を見きわめるため因子として存続させることにした。羽根出口角 β_2 は第一段階の実験の結果, 効果が大きかった因子である。結局取り残しなく考え得る因子は以上の3個となり, これを $L_{27}(3^{13})$ の直交表を用いて計画すれば, 27個の羽根車で27回の実験を行なうことになる。これらを具体的な水準値を用いて示せば表4のようになる。

4. 実験用ポンプ

ポンプ組立断面図を図2に示す。ポンプ回転数は1,500 rpmである。

5. 実験装置および実験方法

実験装置配管図の概略を図3に示す。ポンプ入口部の圧力を大気圧以上のある値に保ち得るように圧力タンクを設け, これに押込ポンプによって給水する。圧力タンク内の圧力は押込ポンプ吐出弁およびタンクのバイパス弁を開閉することによって調整される。

流量は検定済みのベンチュリ計を用いて測定した。ポンプ入口部の静圧は, 2個の静圧測定孔(サクシヨンケーシングのフランジ面から上流側に500mmの位置)から1本のビニールチューブによって導かれた水銀柱マンオメータにより, ポンプ出口部の静圧は同様に2個の静圧測定孔(吐出側フランジ面から下流側に500mmの位置)から1本のビニールチューブによって連結されたブルドン管により測定した。ポンプの軸トルクの測定は抵抗線式トルクメータによった。ポンプ回転数は電子管式自動計数器によって測定した。

なお各実験は連続して2回行なわれ, その1回の実験において測

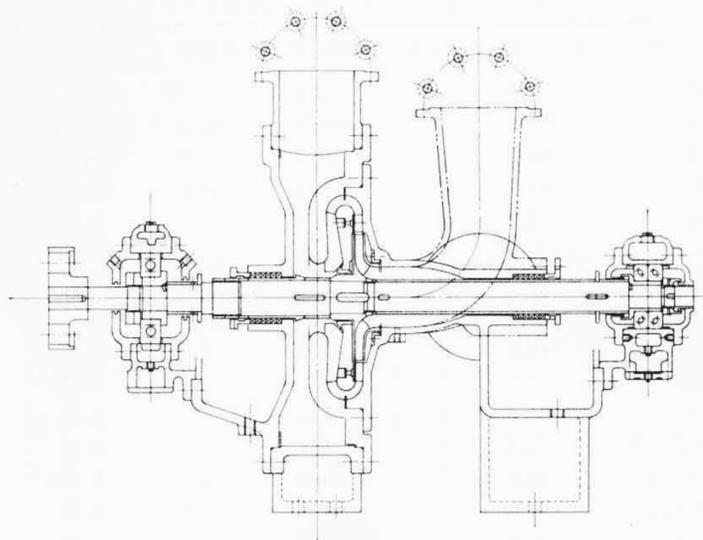


図2 試験用ポンプ断面図

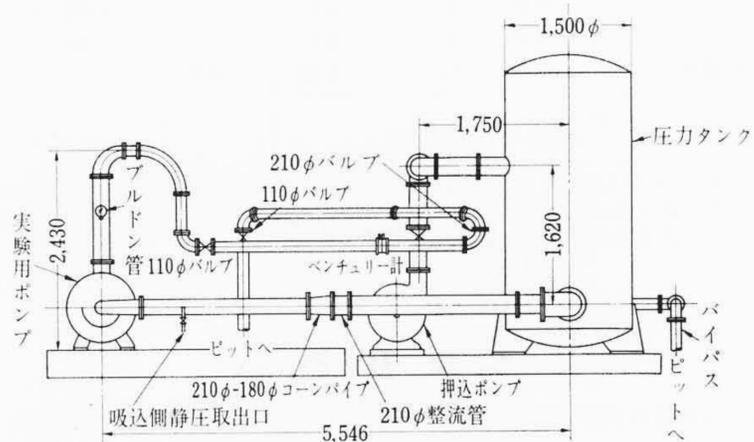


図3 試験装置配管図

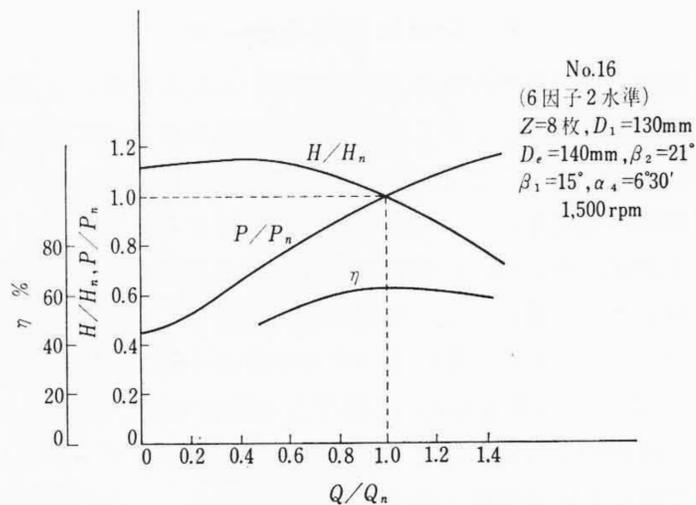


図4 一般性能曲線

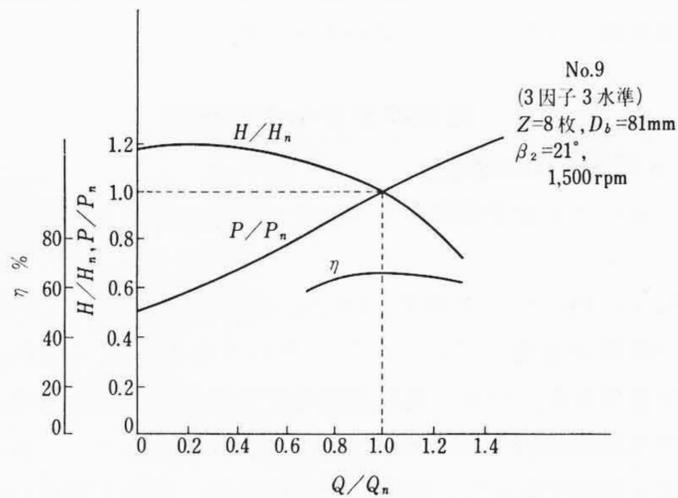


図5 一般性能曲線

定値の読み取りは2回くり返した。また各実験の実験順序は無作為に決めた。

表5 分散分析表 (6因子2水準, 安定性に関して)

要因	変動	自由度	不偏分散	寄与率	分散比	判定
Z	0.9	1	0.9	(%)	0.17	
D ₁ /D ₂	1,453.9	1	1,453.9	62.3	272.78	**
D _e /D ₂	182.9	1	182.9	7.6	34.31	**
β ₂	443.3	1	443.3	18.8	83.17	**
β ₁	1.2	1	1.2		0.22	
α ₄	6.0	1	6.0		1.13	
Z×D ₁ /D ₂	9.3	1	9.3		1.74	
Z×D _e /D ₂	0.8	1	0.8		0.15	
Z×β ₂	43.0	1	43.0	1.6	8.07	*
Z×β ₁	7.7	1	7.7		1.45	
Z×α ₄	15.8	1	15.8		2.97	
D ₁ /D ₂ ×D _e /D ₂	1.2	1	1.2		0.23	
D ₁ /D ₂ ×β ₂	39.8	1	39.8	1.5	7.47	*
D ₁ /D ₂ ×β ₁	34.6	1	34.6	1.3	6.49	*
D ₁ /D ₂ ×α ₄	6.6	1	6.6		1.23	
D _e /D ₂ ×β ₂	5.7	1	5.7		1.07	
D _e /D ₂ ×β ₁	0.5	1	0.5		0.09	
D _e /D ₂ ×α ₄	0.9	1	0.9		0.16	
β ₂ ×β ₁	11.4	1	11.4		2.14	
β ₂ ×α ₄	4.6	1	4.6		0.83	
β ₁ ×α ₄	0.2	1	0.2		0.03	
e (誤差)	53.3	10	5.33	(6.9)		
計	S _T =2,323.6	31				

注 1. ** 印は危険率 1% で有意, * 印は危険率 5% で有意の判定印である。
 注 2. Z×D₁/D₂ は Z と D₁/D₂ の 2 因子交互作用であることを示す。単に Z は Z の主効果であることを示す。

6. 実験結果

第一段階の実験では32個の一般性能曲線が、第二段階の実験では27個の一般性能曲線が得られたが、図4および図5はおのおのの一例ずつを示したものである。

7. 分析に用いるデータ

揚程曲線の安定性の程度を表わすのにいかなる基準によるかということが問題になる。しかし特性曲線の形状を数量的に表現することはきわめて困難なことである。よって次の方法を採用した。すなわち揚程曲線の安定性について客観的に判断できるとされる6名の経験者を選び、めいめいに独立に実験結果の各揚程曲線について安定性の判定という観点に立って総合的に観察して、安定度の順位をつけさせ、これら6組の順位数の平均を求め(6因子2水準の実験の場合)、あるいは和を求め(3因子3水準の実験の場合)、これを各曲線の最終的な判定順位とし、また分析のためのデータとした。この順位数を不安定指数と名づけることにする。この不安定指数が小さいほど性能曲線は安定な曲線であることを示す。これらの不安定指数は表2および表4の最後の欄に示されている。効率に関しては最高効率値を分析のためのデータとした。

8. 結果の分析および検討

8.1 6因子2水準の場合

表2に示した不安定指数をデータとして分散分析を行なった結果を表5に示す。

D₁/D₂, D_e/D₂, β₂ の主効果, Z×β₂, D₁/D₂×β₂, D₁/D₂×β₁ の交互作用の効果が有意と認められた。そのうち D₁/D₂, D_e/D₂, β₂ は高度に有意である。つまり揚程曲線の変動に大きな影響を与える。D₁/D₂ の主効果の寄与率は60%近くを占めているが、これは予想以上に大きな値であった。実験計画をする際、Zの主効果はかなりあいまいな点を含んでいたが、この実験結果からはその影響の差を見いだせなかった。α₄ は主効果, 交互作用ともに有意と認められなかったが、これは意外な結果であった。

次に取り上げた因子の効果の傾向を知るために有意と判定された

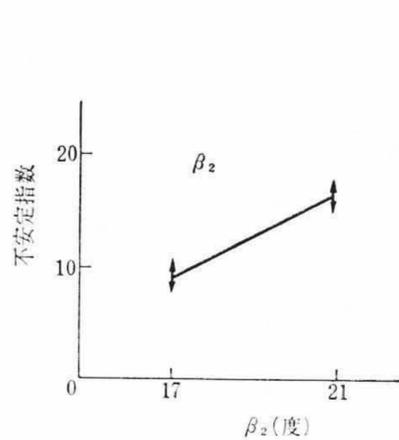


図6 D₁/D₂ の主効果

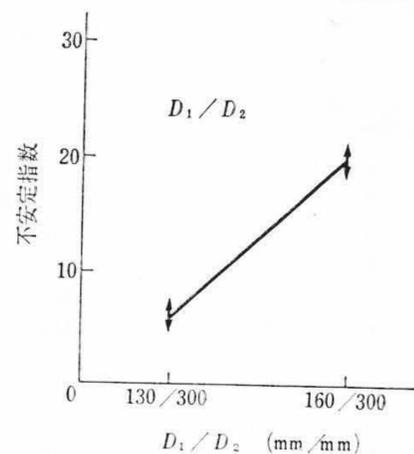


図7 β₂ の主効果

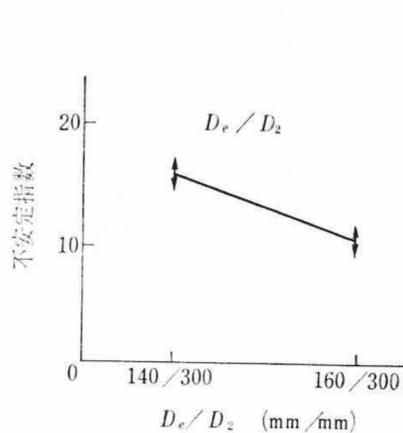


図8 D_e/D₂ の主効果

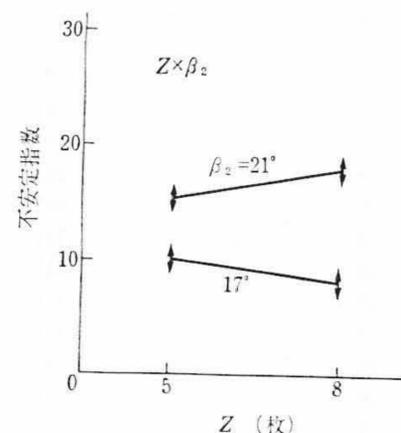


図9 Z×β₂ の交互作用

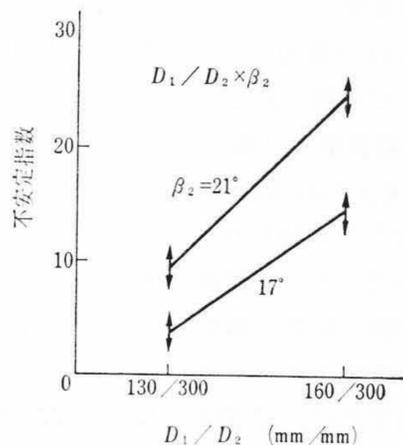


図10 D₁/D₂×β₂ の交互作用

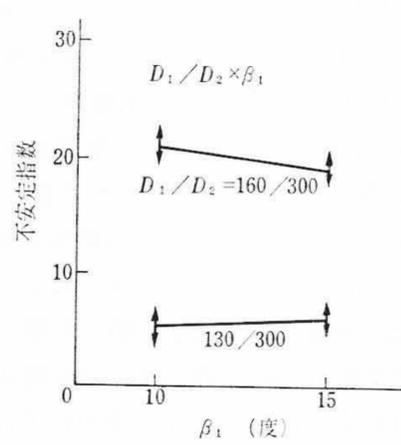


図11 D₁/D₂×β₁ の交互作用

要因効果に対してその因子の水準またはその組合せごとに特性値(たとえば不安定指数)のデータの平均値を算出し(表2参照)、これを図6~11に示した。たとえば D₁/D₂ の水準1の要因効果の平均値は

$$(D_1/D_2)_1 = \frac{(D_1/D_2)_1 \text{を含むデータの和}}{16} \quad (\text{添字1は水準を示す})$$

により, (D₁/D₂)₁×Z₁ の交互作用の要因効果の平均値は

$$(D_1/D_2)_1 \times Z_1 = \frac{(D_1/D_2)_1 \text{および } Z_1 \text{を含むデータの和}}{8}$$

により求められる。図6~11より, D₁/D₂, β₂ は小さいほうが、また D_e/D₂ は大きいほうが安定性にとって有効であることがわかる。さらに β₂ が大きいときは Z が少ないほうが、β₂ が小さいときは Z が多いほうがよいこと、β₂ が大きいときは D₁/D₂ が小さいほうが、β₂ が小さいときもその影響の程度の強さは異なるがやはり D₁/D₂ が小さいほうがよいこと、D₁/D₂ が大きいときは β₁ が大きいほうが、D₁/D₂ が小さいときは β₁ が小さいほうがよいことなどがわかる。

なお各因子がここで取り上げた水準値以外の任意の水準値を有す

表6 分散分析表 (3因子3水準, 安定性に関して)

要因	変動	自由度	不偏分散	寄与率	分散比	判定
Z	7,605.6	2	3,802.8	14.1%	8.78	**
D_b/D_2	17,780.4	2	8,890.2	35.3	20.53	**
β_2	15,234.7	2	7,617.4	31.2	17.59	**
$Z \times D_b/D_2$	1,995.6	4	498.9		1.15	
$Z \times \beta_2$	888.2	4	222.1		0.51	
$D_b/D_2 \times \beta_2$	915.4	4	228.8		0.53	
e (誤差)	3,461.2	8	433.0	(19.4)		
計	47,884	26		100		

** は危険率 1% で, * は危険率 5% でそれぞれ有意であるとの判定印である。

るポンプについてはその不安定指数の推定値を次のように求めることができる。例として次の水準値を仮定する。

$$Z=6 \text{ 枚}, D_1/D_2=145/300 \text{ (mm/mm)}, \\ D_e/D_2=160/300 \text{ (mm/mm)}, \\ \beta_2=18^\circ, \beta_1=13^\circ, (\alpha_4=5^\circ)$$

この組合せにおける各要因効果の推定値は上述の計算例のように各因子の各水準について求められた要因効果に対して比例的に内挿(ないそう)あるいは外挿(がいそう)することにより求められる(この場合, 図6~11に示すように中間の水準値における要因効果は2水準点における値を通る直線で表わされるという仮定を設けているわけである)。すなわち

$$Z:13.0 \quad \beta_2:11.2 \quad \beta_1:13.0 \\ D_1/D_2:13.0 \quad D_e/D_2:10.6 \quad D_1/D_2 \times \beta_2:11.0 \\ D_1/D_2 \times \beta_1:12.9 \quad Z \times \beta_2:11.3$$

いま実験データの一般平均を m で表わせば上記の組合せにおける不安定指数の推定値 $\hat{\mu}$ は有意な要因効果のみを用いて次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= m + D_1/D_2 + D_e/D_2 + \beta_2 + Z \times \beta_2 + D_1/D_2 \times \beta_2 + D_1/D_2 \times \beta_1 \\ &= m + Z + \beta_2 + Z \times \beta_2 + m + D_1/D_2 + \beta_2 + D_1/D_2 \times \beta_2 \\ &\quad + m + D_1/D_2 + \beta_1 + D_1/D_2 \times \beta_1 \\ &= m + D_1/D_2 + m + D_e/D_2 - m + \beta_2 - m + Z - m + \beta_1 + m \\ &= \frac{(Z \times \beta_2)}{8} + \frac{(D_1/D_2 \times \beta_2)}{8} + \frac{(D_1/D_2 \times \beta_1)}{8} - \frac{(D_1/D_2)}{16} \\ &\quad + \frac{(D_e/D_2)}{16} - \frac{(\beta_2)}{16} - \frac{(Z)}{16} - \frac{(\beta_1)}{16} + \frac{(T)}{32} \end{aligned}$$

ここで $(Z \times \beta_2)/8$ は $Z \times \beta_2$ の当該水準点における不安定指数の推定値を表わし, $(D_1/D_2)/16$ は D_1/D_2 の不安定指数の推定値を, また (T) は実験データの総和を表わす。したがって $\hat{\mu}$ の値は次のようになる。

$$\hat{\mu} = 11.3 + 11.0 + 12.9 - 13.0 + 10.6 - 11.2 - 13.0 - 13.0 + 13.0 = 8.6$$

これが上例の水準値の組合せにおける不安定指数の推定値である。この推定値に匹敵した揚程曲線を32個の曲線のなかから選び出せばこれにより当該ポンプの安定度を予測することができるわけである。

効率の分析結果については詳細は省略するが, 次の結論が得られた。すなわち D_1/D_2 , D_e/D_2 は効率に最も影響を与え, おおのこの寄与率の和は約45%である。 D_1/D_2 は小さいほうがよく D_e/D_2 は大きいほうがよい。これは安定性に対する効果と同じであって, ポンプ設計上非常に都合のよいことである。 β_1 , β_2 はともに大きいほうがよい。 β_1 は高度に有意であった。 Z も有意であり, 交互作用を

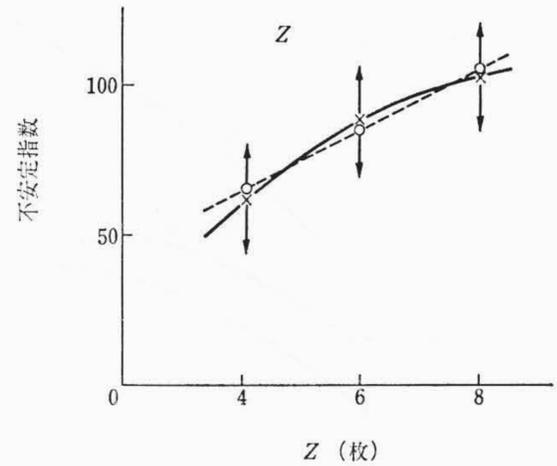


図12 Zの主効果

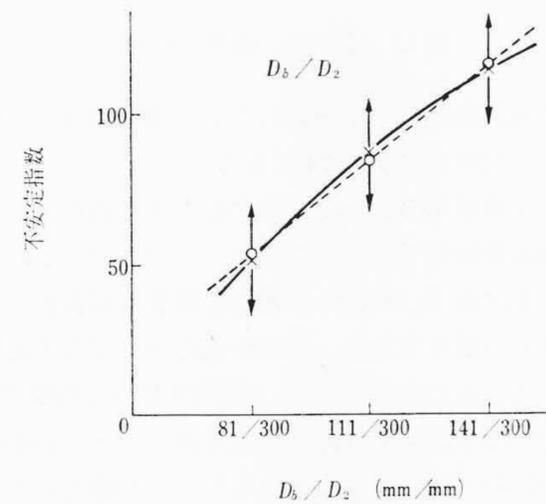


図13 D_b/D_2 の主効果

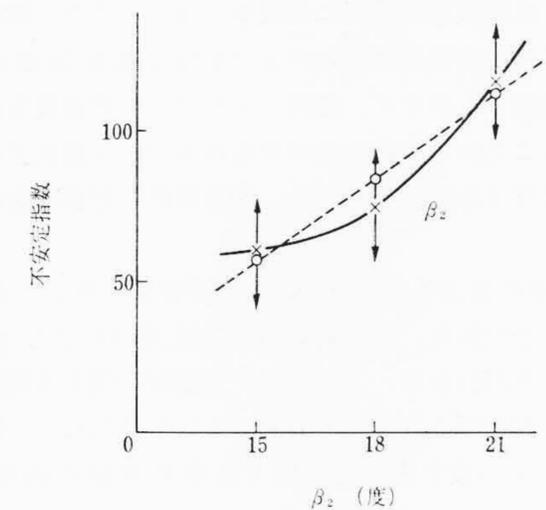


図14 β_2 の主効果

考慮すれば多いほうがよい。 α_4 については, 安定性の分析結果と同様に実験範囲では主効果およびすべての交互作用が有意でないという結果が得られた。

以上の6因子2水準の実験により, どの設計因子が安定性に影響を与えるか, その影響の度合いはどの程度か, 安定特性を得るには因子をどのような値にすればよいか, ということが実験の範囲内でかなりよく明らかになった。

8.2 3因子3水準の場合

表4に示した不安定指数をデータとして分散分析を行なった結果を表6に示す。

羽根枚数 Z , 羽根入口部ハブ径と羽根車外径との比 D_b/D_2 , 羽根出口角 β_2 の主効果が高度に有意である。これらの因子の交互作用はいずれも効果なしと判定された。2水準での実験結果から当然予想されたことであるが, D_b/D_2 の寄与率はいちばん大きく出た。2水準の実験結果と違ってきたのは, 今回は Z の主効果がでたこと, $Z \times \beta_2$, $D_b/D_2 \times \beta_2$ の交互作用が消えたことである。

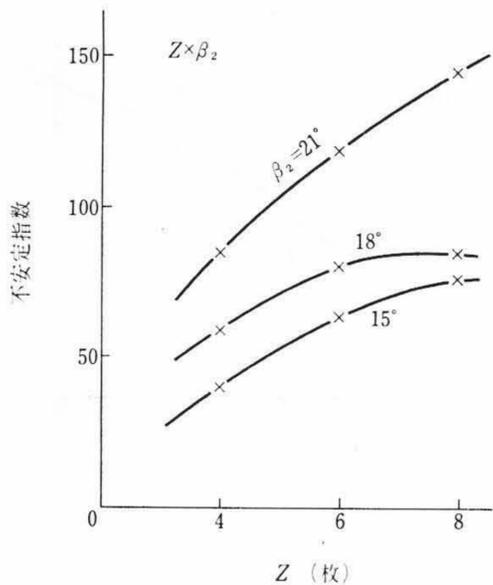


図15 Z x beta_2 の交互作用

有意と認められた3個の主効果について要因効果の平均値を求め、これを示したのが図12~14である。

D_b/D₂の寄与率は35.3%と全変動の約1/3を占めている。これは2水準の実験結果から予期されていたことであり、ここでのD_bが2水準実験におけるD₁, D_e, beta₁の効果を総合的に表わした結果とすれば、羽根車入口部の大きさ、形状が遠心ポンプの安定性能に多大の影響を与えていることがわかる。要因効果の平均値のみれば(図13), 軸径の細いほうが安定性能にとって良いことがわかる。傾向としてはD_bの小さいものから大きいものへと直線的に安定性に悪い効果を与える。D_bを小さくすれば、ポンプ回転数および仕様点流量一定のとき、羽根車入口部におけるメリディアン断面上の通路幅が広くなり、小流量域運転の際に羽根車へ流入する際の抵抗が最小となるような予旋回を得るに都合のよい十分な流動余裕を持っている。しかも前面シュラウド、後面シュラウドの湾曲度を減少し羽根を長くできることから羽根の曲がりもゆるやかに変化するなど総じて水の流動に対する抵抗が減少し、安定性能に好影響を与えるものと思われる。

beta₂の寄与率は31.2%でありやはり安定性能に対してかなりの影響を与える因子である。要因効果の平均値(図14)よりbeta₂は小さいほうが良いことがわかる。これはポンプ揚程に関する理論式より導かれる結果⁽²⁾およびこれまで実験的でたしかめられて一般に認められた通念⁽²⁾⁽³⁾と一致する。そして2水準の実験の結果とも一致する。

Zについては2水準実験ではその効果が検出されなかったが今回の3水準実験で検出された。図12よりZは少ないほうが揚程曲線は安定化に向かうという結果を得た。2水準における結果との違いの原因はよくわからない。

Zとbeta₂との交互作用は2水準の実験では有意とでたが、今回は有意差なしと出た。これも今回の3水準でのZの主効果が有意とでたことに関係すると思われるが理由は明らかでない。要因効果は図15のようになる。

これによると、beta₂のいかんにかかわらずZは小さいほうが、またZのいかんにかかわらずbeta₂は小さいほうが安定性能によいことがわかる。つまりZの効果とbeta₂の効果はそれぞれ独立しているのである。使用したポンプの形と仕様、実験の条件などは不明であるが、O. Hansen氏⁽²⁾およびE. Schröder氏⁽³⁾も同様の結果を得ている。

2水準の実験ではD₁/D₂ x beta₂の交互作用が有意と出たが、これに対応した今回のD_b/D₂ x beta₂の交互作用は有意と出なかった。

以上の分析結果が実際にどの程度信頼し得る適用性を有しているかを明らかにするためにすでに製品化されたポンプについて、その

表7 分散分析表 (自由度1の成分の分解)

要因	変動	自由度	不偏分散	寄与率	分散比	判定
Z {一次 二次}	7,401.4 204.2	1 1	7,401.4 204.2	15.4% 0.4	20.29 0.56	**
D _b /D ₂ {一次 二次}	17,703.4 77.0	1 1	17,703.4 77.0	36.9 0.1	48.77 0.21	**
beta ₂ {一次 二次}	14,168.0 1,066.6	1 1	14,168.0 1,066.6	29.5 2.2	39.03 2.94	**
e (誤差)	7,260.4	20	7,260.4	(15.5)		
計	47,884	26	47,884	100		

羽根車のディメンションより以上の分析結果を使ってそのポンプの揚程曲線の不安定指数を推定し、かつ本実験より得られた27個の曲線の中からこの推定された不安定指数とほぼ同じ値を有する曲線を選び、それと製品化された実際のポンプの揚程曲線とを比較した。

まず、有意なる3個の主効果(自由度2)を自由度1へ分解して分散分析を施し、不安定指数の推定式を求める。分散分析の結果は表7に示すとおりである。有意ではない交互作用はすべて誤差項にプールする。表7よりZ, D_b/D₂, beta₂の主効果は一次の項のみ高度に有意で二次項は省略できるから、不安定指数とこれら3個の因子の関係は実験範囲内ではほぼ直線的傾向で近似できる。その関係式は不安定指数の推定値をmu-hatとすれば

$$\hat{\mu} = \hat{m} + \hat{a}(Z - \bar{Z}) + \hat{b}\{(D_b/D_2) - (\overline{D_b/D_2})\} + \hat{c}(\beta_2 - \bar{\beta}_2) \pm \text{信頼限界}$$

となる。ただし

$$\bar{Z} = \frac{1}{3}(8+6+4) = 6$$

$$(\overline{D_b/D_2}) = \frac{1}{3} \left(\frac{141}{300} + \frac{111}{300} + \frac{81}{300} \right) = \frac{111}{300}$$

$$\bar{\beta}_2 = \frac{1}{3}(15+18+21) = 18$$

またa, b, c, mの推定値は

$$\hat{m} = \frac{\text{total}}{27} = \frac{2268}{27} = 84$$

$$\hat{a} = -10.14$$

$$\hat{b} = -313.61$$

$$\hat{c} = 9.35$$

である(係数a, b, cの求め方はここでは省略する)。よってmu-hatの推定式は

$$\hat{\mu} = 84 + 10.14(Z - 6) + 313.61(D_b/D_2 - 111/300) + 9.35(\beta_2 - 18) \pm \text{信頼限界}$$

で与えられる。これによる不安定指数と各要因との直線関係は図12~14中に示すような破線となる。

推定式mu-hatによって製品化されたポンプの不安定指数を推定してみる。

(例) C社納ボイラ給水ポンプ

$$Z = 7 \text{ 枚}, \beta_2 = 19^\circ, D_b/D_2 = 88.9/266.7 = 0.333$$

$$\hat{\mu} = 84 + 10.14(7 - 6) + 313.61 \left(\frac{88.9}{266.7} - \frac{111}{300} \right)$$

$$+ 9.35(19 - 18) \pm 9.6 = 90.95 \pm 9.6$$

表4より

直交表 No.	不安定指数
14	84.5
2	96

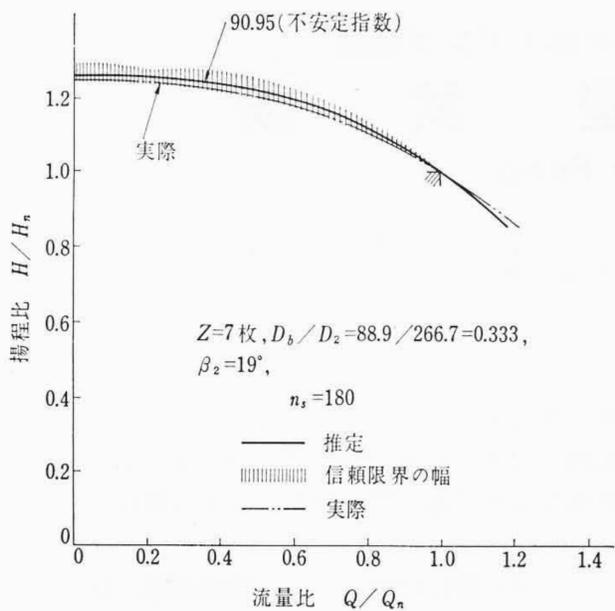


図16 流量揚程曲線

推定値 91.0 に当たる揚程曲線は表 4 の直交表 No. 14 と No. 2 の間にあり、比例的に曲線の形を描けば図 16 の実線のようになる。図 16 には信頼限界の幅をも示してある。またポンプの実際の揚程曲線も同図に示してある。以下数個の製品ポンプについて同様のことを行なった結果によれば、推定の精度はかなり良好であり、安定か不安定かの判別予測は確実にできることがわかった。

効率についても同様な分析を行なったが、結論のみを述べる。 D_b/D_2 の寄与率は 85.9% と全変動のほとんどを占めている。この 85.9% という値は 2 水準実験からの予想を大幅に上回った値である。いずれにせよ、この D_b/D_2 の効果の中には 2 水準実験においていずれも高度に有意であった D_1, D_e, β_1 など今回の実験では潜在化した要因の効果が総合されているとみなせると思う。 β_2 の効果は高度に有意である。 Z は 2 水準実験と同様有意となった。要因効果の平均値を求めてみると、 β_2 は大きいほうが効率はよくなる。これは一般通念と合致する。 Z は 6 枚付近で最大効率が現われるような二次傾向を有し、8 枚、4 枚ではともに効率は低下する。 D_b/D_2 は

小さいほうが効率は著しく上昇する。なお交互作用はすべて有意差なく無視できる。

9. 安定性能推定線図

安定性に関して $Z, D_b/D_2, \beta_2$ の主効果のみ有意であるので、これらの変化による安定性(不安定指数)の変化をその推定式より求め、等不安定指数曲線を描けば安定性能を得るための設計因子を容易に決定することができる。

10. 結 言

多段ポンプの段数を減らして軽量小形化を図るために低比速度の羽根車を採用することが最近の一つの傾向となっているが、この場合にポンプの安定特性が問題になる。しかし少なくともポンプ自体に不安定要因がなければ配管のいかににかかわらず、いわゆるサージ現象は生じないから、いかにポンプを設計すれば安定特性を有するポンプを得るかは基本的な問題となる。したがって本研究では、遠心ポンプの安定性能に影響を与えると考えられる数個の設計因子を選び、それらを種々に変化させて実験し、その結果を分析した。研究計画から実験結果の分析まですべて実験計画法を用いて行なったので、各因子の主効果のみでなく、交互作用をも求めることができた。また安定性能を得るためにどの設計因子をどのような数値に選べばよいかも定量的に明らかになった。

参 考 文 献

- (1) C. Pfeleiderer: Die Kreiselpumpen 4 Aufl. 1955, Springer-Verlag.
- (2) C. Pfeleiderer: Erfahrungen und Fortschritte in der Berechnung der Kreiselpumpen. V. D. I.-Z., Bd. 28, Febr. 1938, S. 263
- (3) A. J. Stepanoff: Centrifugal and Axial Flow Pumps. 1948, Wiley.
- (4) 田口玄一: 実験計画法 上, 下, 丸善
- (5) 水野ほか: 統計数値表の使い方(ノンパラメトリック検定) 朝倉書院
- (6) 北川, 増山: 新編統計数値表, 統計科学研究会編, 河出書房



特 許 の 紹 介



特許 第 412417 号 (特公昭 38-8656 号)

紛 沢 秀 夫・細 貝 隆

水 車 起 動 装 置

この発明は、水車の入力水量を調節する调速機サーボモータもしくはこのサーボモータと連動する機構から、その作動位置を検出して水車起動時における起動から無負荷運転までの運転制御を行なうことを特長とする水車起動装置である。

図面は水車が停止状態にあることを示しているが、水車停止用ピストン 5 の圧油を導管 8 より排出し、バネ 6 によりレバーと受板 13 との関係を通り配圧弁 2 を束縛より解放すれば、調整用ピストン 14 があらかじめ起動位置 a に設定されているから、必然的にレバー 8, 9, 10 および 11 を介して配圧弁 2 は操作され、サーボモータ 1 は起動開度 L_s まで作動する。このときサーボモータ 1 a の開動作と同時にロッド 11 に追従して切換弁 17 のロッド 19 もバネ 20 によって移行する。そしてその動作域が L_s に達すればピストン 14 に作用していた圧油は管 16, 調整弁 22 を経て外部に排出される。またそれと同時に管 23 の圧油はバルブ 18 を経て管 15 よりピストン 14 の上部室に送入される。したがってピストン 14 は無負荷位置 a' まで下動し、サーボモータ 1 を無負荷開度 L_n に復帰する。しかるのち並列投入が行なわれ平常運転にはいるのである。

並列投入後の调速は水位調整器などの调速装置 7 によって行なわれ、配圧弁 2 の復元はロッド 4 上に設けられたカム 3 によって行なわれる。図中 21 はバルブ 18 の動きを制限するストッパである。

この発明によれば、水車発電機の回転数を検出する速度検出部が

存在しないスピーダレス调速機においても、调速機サーボモータの作動位置を検出することにより、水車起動時における起動一無負荷運転を確実に制御し得る効果がある。(山元)

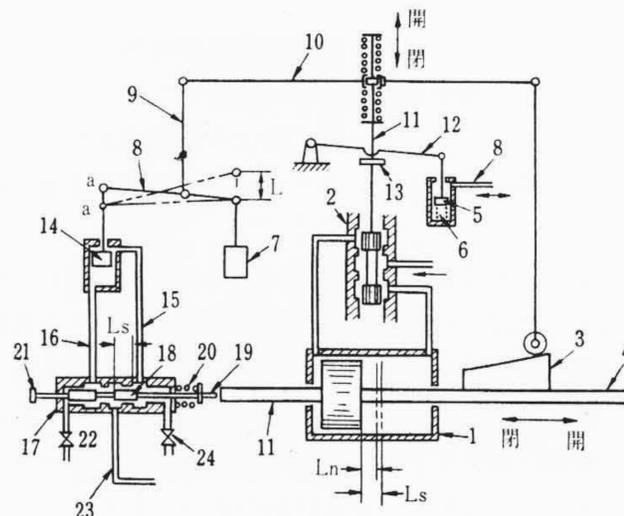


図 1