

ポンプの自動制御

Automatic Control for Pumps

木暮健三郎* 佐藤広光**
Kenzaburo Kogure Hiromitsu Sato

内容梗概

水道用，鉱山排水用，農業用，その他各種産業用に使われるポンプの自動化は，一人制御方式自動運転，制限開閉器による自動運転などが盛んに行われている。今回水道用として需要量の変動に応じてポンプ速度を調整し配管による損失水頭を補償して，需要端における水圧を一定に保つように自動制御を行ったポンプならびにその制御装置を新潟市水道局大島浄水場に製作納入した。ここにそのポンプおよび制御装置の仕様および特性について報告する。

1. 緒言

大都市水道配水用のように，その使用水量が季節的にも，また一日のうちでも時間的に非常に変動するポンプは，配管が長くなれば，その管路抵抗による水圧降下が大きいため給水端における圧力が変動し，需要家がはなはだ困惑する。このために使用量に応じて常に給水端圧力を一定にするように制御せねばならぬ。この方法としては，

- (1) 吐出弁絞り調節
- (2) 駆動ポンプの速度調整

などがあり，これらは単独または組合せて使用される。

(1) ポンプ吐出側に絞りをあたえ水量を変える方式は，動力の損失は最も大きい弁操作電動機の容量は数馬力程度の小容量のため制御しやすく，最も簡易な制御方法である。

- (2) ポンプ速度を制御すれば

ポンプの回転数を変えた場合の特性変化は理論的には $q \propto n$, $h \propto n^2$, $p \propto n^3$, $\tau \propto n^2$ の関係がある。

ただし q = 単位時間当りの揚水量

h = 全揚程

p = 軸動力

τ = トルク

n = ポンプ回転数

である。この法則が広い範囲まで成立すると仮定してポンプ百分率特性の一例を第1図(a)(b)(c)の細線で示す。ただし n, p, τ の100%点はポンプの定格仕様実数値としてある。これに対し送水系統特性として実揚程 h_a ，ポンプをそれぞれ単独および2台並列運転したときの管路の抵抗損失を①および②曲線とする。ただし並列時の q, p, τ は単独の2倍である。送水量を零から次第に増したときのそれぞれに対しポンプの要求するト

ルク τ は ①②, p は ①② で示される。次にポンプを単独運転した場合でかつ誘導電動機の二次抵抗により速度制御した場合の単位送水量当りの所要動力を絞り制御時のそれと比較してみる。与えられた電動機のすべりとトルク特性を第2図実線とする。第1図(b)より $q=0$ のときの各 n のトルク τ を第2図上に移すとU曲線となる。同様に $A'-K, A'-L, A'-M, A'-N, A'-H$ に対応するトルクはそれぞれ, W, X, Y, Z , で描かれる。これより抵抗器の一定ノッチでポンプを運転するときの $q-h$ 曲線は第1図(a)の太い実線となる。第2図上のポンプ所要軸動力 p は第1図(c)で $D''-C''-E'$ となる。ところが電動機はスリップが増すと効率が低下するからこの分を見込むと③の曲線となる。またこの電動機は残留抵抗があるから定速電動機では軸動力は⑤の代りに④でよいことになる。したがって絞り制御に比し実質的な軸動力節減量は③と④の差で与えられる。単位揚水量当りの軸動力はそれぞれ⑥⑦となり速度制御方式は絞り制御に比し相当量の動力節約となる。

第3図はエンジンおよび可変油量型流体接手のトルク特性の一例を参考に示した。数字は調節桿の位置を示す。

今回新潟市水道局大島浄水場に納入された配水ポンプは以上の点を考慮して，使用量の異なる変動に対しては，ポンプ台数の増減により，小さな変動に対してはポンプ速度を制御する方式を採用した。本文では本設備の概要と試験結果について述べる。

2. 機器概要

2.1 配水ポンプ (5台内1台ディーゼルエンジン駆動常時3台運転)

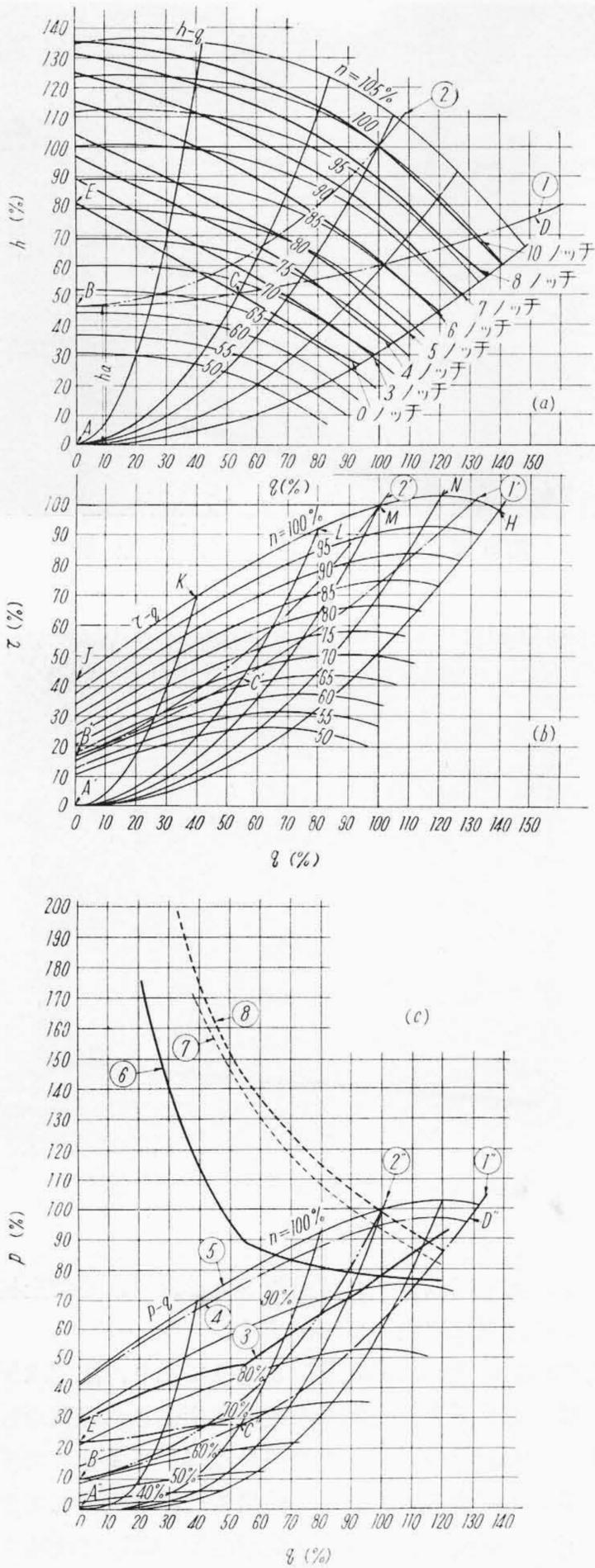
型式 電動機直結横軸両吸込型ポリユートポンプ (DV-CH)

口径 300mm (吸込側, 吐出側共)

揚水量 10m³/min (=600m³/h)

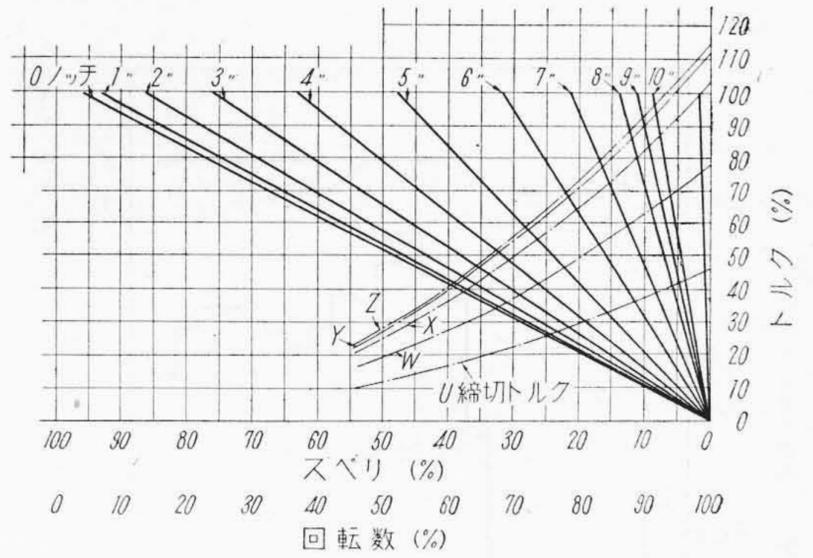
* 日立製作所亀有工場

** 日立製作所日立工場

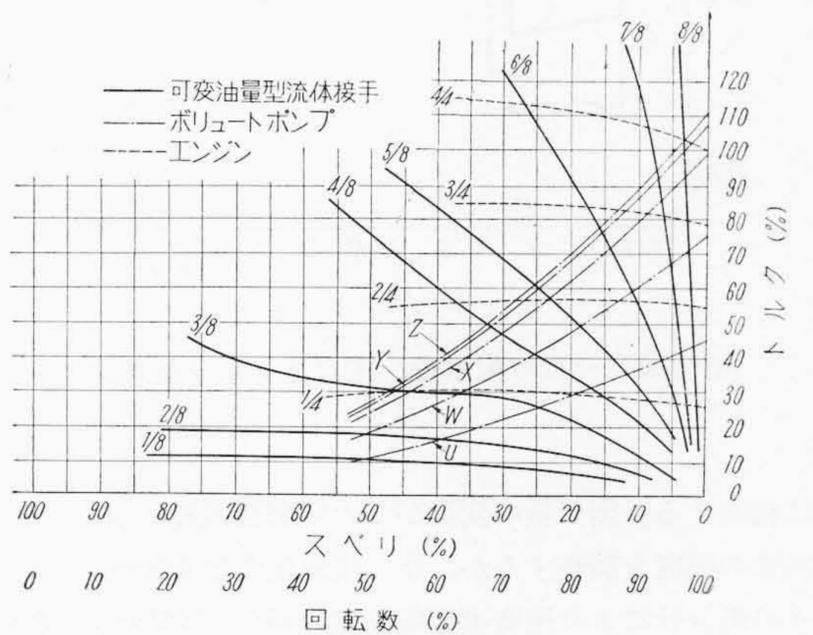


第1図 ポンプ百分率特性

- 全揚程 65m
- 回転数 1,500 rpm
- 原動機 250 HP
- 2.2 主電動機
- 型式 EFU-DQ 1台
- EFU-CYI 3台
- 出力 250 HP
- 定格 連続
- 回転数 1,500 rpm(同期速度)



第2図 電動機およびポンプのトルク特性



第3図 流体接手エンジンとポリユートポンプのトルク特性

速度調整範囲 -50% (型式EFU-DQ のもののみ)
 上記4台中1台を使用水量に応じて自動速度調整しポンプ全揚程を制御するものである。

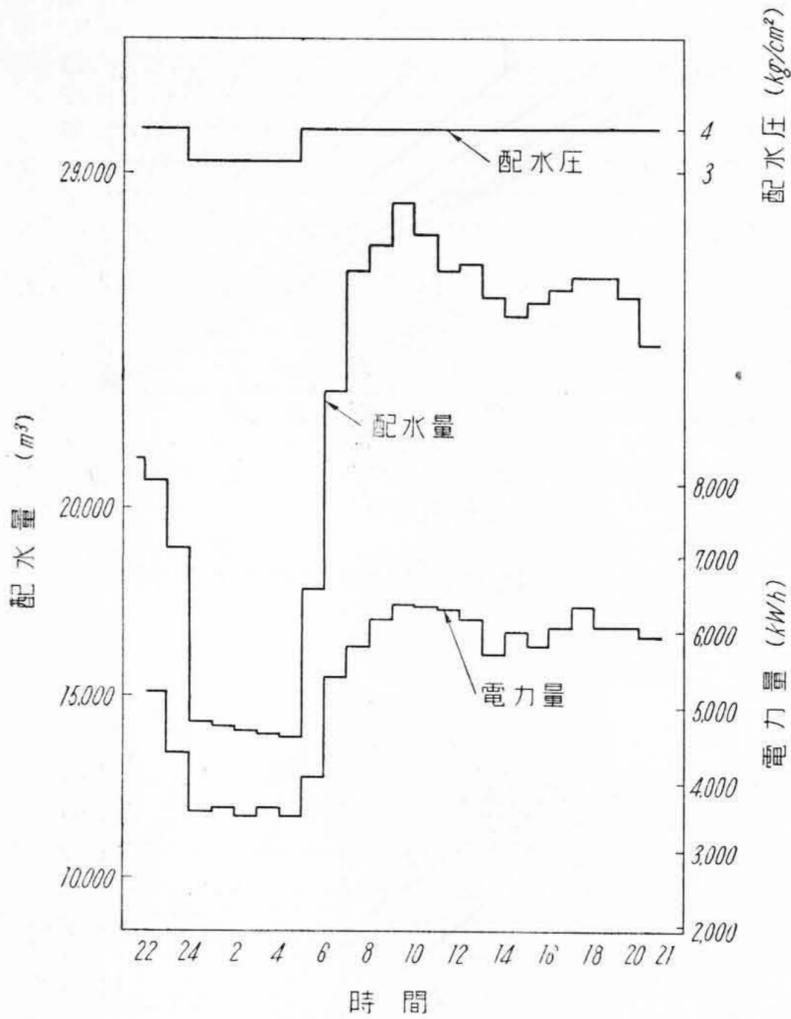
2.3 配管

ポンプ場より需要家までの配管は
 管径 700 mm
 管長 約6 km

3. 運転方式

本ポンプ場の操作方式は中央制御盤より行う1人制御方式で、これに関してはすでに詳細は報告済みであるのでここでは省略する。

電動機の種々の二次抵抗に対する回転力速度曲線およびポンプの所要回転力速度曲線は第2図に示すとおりである。ポンプの速度制御可能範囲は40%から50%程度であり流量では5m³/minから6m³/min程度である(第4図参照)。これは1台のポンプ容量の50から60%



第4図 一日の配水量，電力量および配水圧

に相当する。需要量の変動がこの制御範囲外になれば吐出弁の開度を調整するか、または運転台数を変更して、その組合せにより速度調整電動機の制御可能範囲に調整する。

新潟市における水道使用量の日中の変化は第4図のとおりであり日中の変動ははなはだしいが夜中の使用量はほぼ一定である。すなわち昼間は自力制御を含む1人制御運転を行い、夜間は無人運転も可能である。

第5図は操作機の全景であり、第6図は制御キュービクルの全景である。

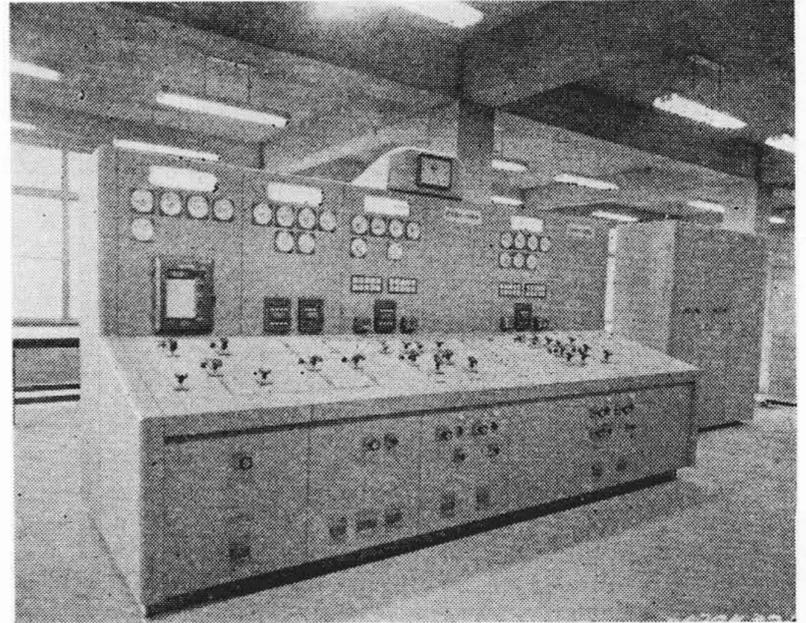
4. 制御方式

流体の管路抵抗による損失水頭は流量の自乗に比例する。すなわち

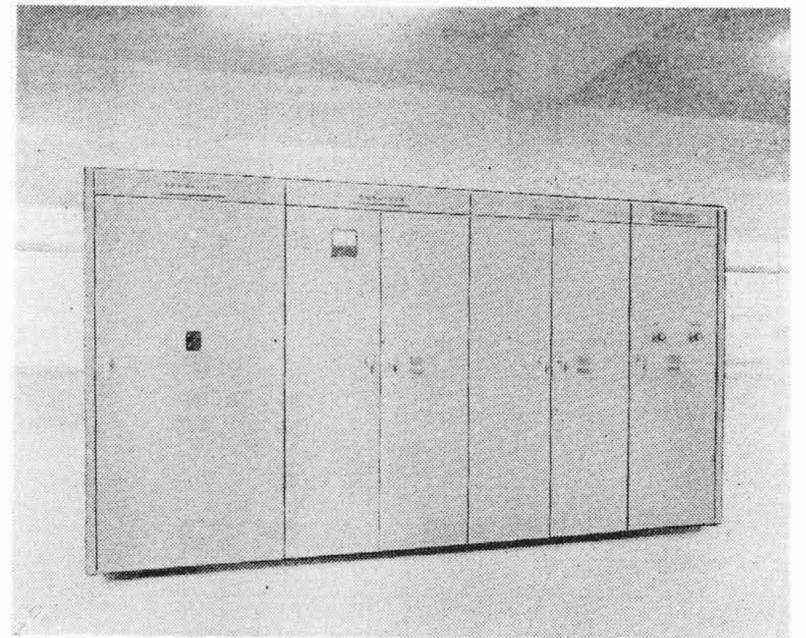
$$h = Kq^2 + a \dots\dots\dots(1)$$

- ただし h : ポンプ全揚程
- K : 管路抵抗係数
- q : 流量
- a : 所要一定圧力

このポンプ系の配管抵抗特性は第7図に示される、所要一定圧 a は 15m, K は曲線 CD により与えられる。すなわち配管抵抗は曲線 OA , 給水管末端圧を一定とするための流量圧力特性は曲線 CD で示される。一方定速度におけるポンプの流量揚程特性は曲線群 (C) で示され



第5図 中央制御操作機全景



第6図 制御キュービクル全景

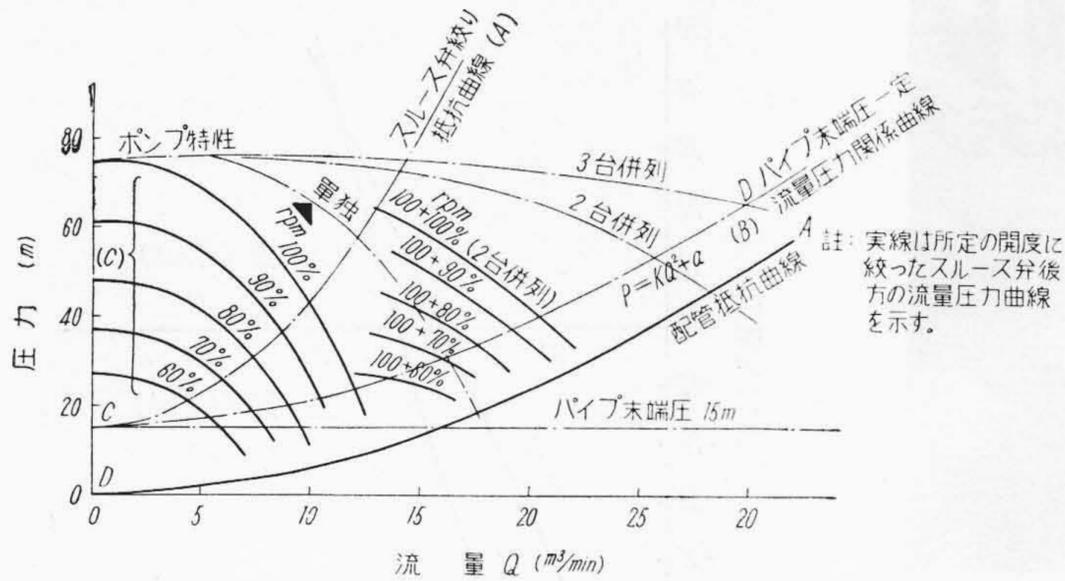
るように流量が減少すれば揚程が高くなり、また全揚程は速度の自乗に比例して増減する。

操作回路の大略は第8図のとおりであり、圧力は圧力発信器により圧力に比例する電流に変換され磁気増幅器 MA_1 で増幅される。配管中の流量はベンチュリーで流量の自乗に比例する差圧として検出され流量発信器で差圧に比例する電流に変換され磁気増幅器 MA_2 で増幅される。したがって磁気増幅器 MA_1 の出力電圧 e_1 は圧力に比例し、 MA_2 の出力電圧 e_2 は流量の自乗に比例する。さらに一定圧力部分としては定電圧回路中の抵抗 VR_2 の電圧降下をとる。これら前段増幅装置の出力電圧 E_0 は

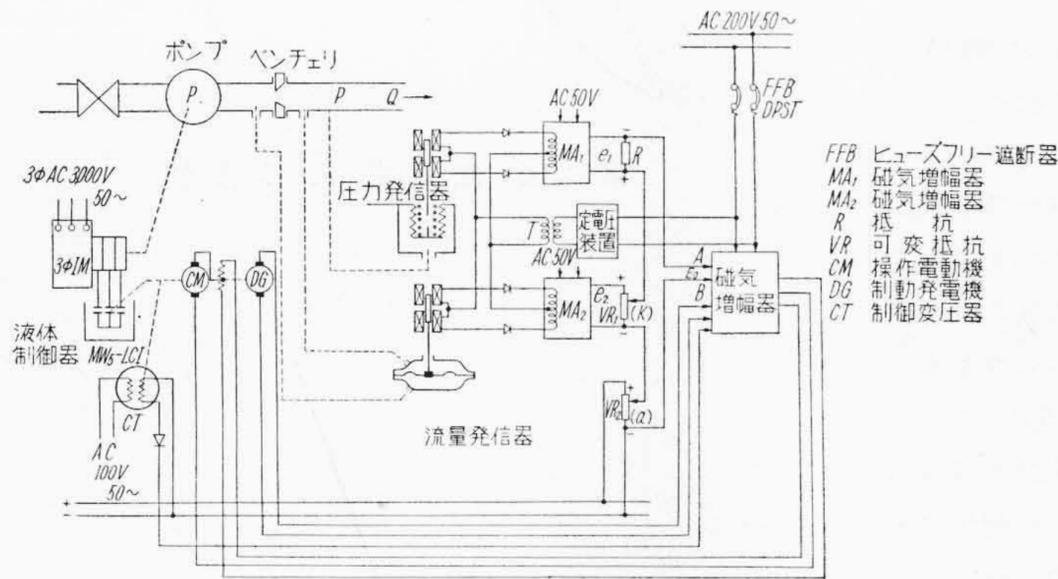
$$E_0 = K_1 h - K_2 q^2 - K_3 \dots\dots\dots(2)$$

となる。ただし K_1, K_2, K_3 はそれぞれ比例常数

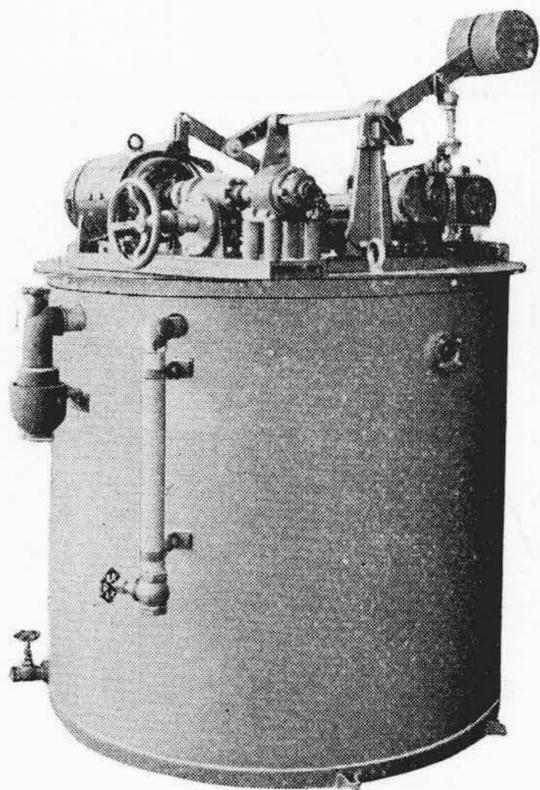
$E_0 = 0$ の状態でこの系は所要特性となりポンプは第8図 CD 曲線上を動作していることになる。そこで E_0 を磁気増幅器で増幅してその出力により直流操作電動機を正逆転して誘導電動機二次回路用液体抵抗器の電極を上



第7図 流量—圧力関係図



第8図 ポンプ自動制御系統図



第9図 速度調整用液体抵抗器

下してその抵抗値を加減し、ポンプの回転数を制御して揚程を所要値に保持する。

将来管路状態が変更されて管路による損失水頭が変化

した場合とか、給水末端の一定圧力を変更したいときには、管路抵抗係数 K の調整は可変抵抗器 VR_1 、一定圧力の調整は可変抵抗器 VR_2 (ともにポンプ運転中央制御盤に取り付けてある) を調整することによりそれぞれの所要量に簡単に設定することができる。

このように管路の長い流体系を取り扱うときのもつとも問題となる点は、系の時定数の問題である。これを簡単に解析するために、流量系を電気系に置換してみれば

$$p \text{ (kg/ms}^2\text{)} \rightarrow E \text{ (V)}$$

$$q \text{ (m}^3\text{/s)} \rightarrow I \text{ (A)}$$

とすると、

$$\text{抵抗 } R \text{ は } R = \frac{E}{I} = \frac{p}{q} \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$\text{自己誘導係数 } L \text{ は } L = \frac{l\rho}{A} \text{ (henry)}$$

ただし l : 管の長さ (m)

ρ : 液体の密度 (kg/m³)

A : 管の断面積 (m²)

本ポンプ系における諸数値を入れて抵抗および自己誘導係数を求めるとそれぞれ $R = (1.24 \sim 1.75) 10^6 (\Omega)$ $L = 1.43 \times 10^7$ (henry) となる。これより配管の時定数 T を求めると、

$$T = \frac{L}{R} = 11.5 \sim 8.2 \text{ (s)}$$

平均で約 10 秒となる。この比較的長い時定数に対応せしめるため、誘導電動機二次液体抵抗器電極昇降用電動機には直流電動機を使用し、ポンプ負荷の大きい変動に対しては磁気増幅器全出力で急速に電極を昇降し、また負荷のわずかな変動に対しては磁気増幅器出力も少なく、電極昇降電動機はゆつくり回転する。

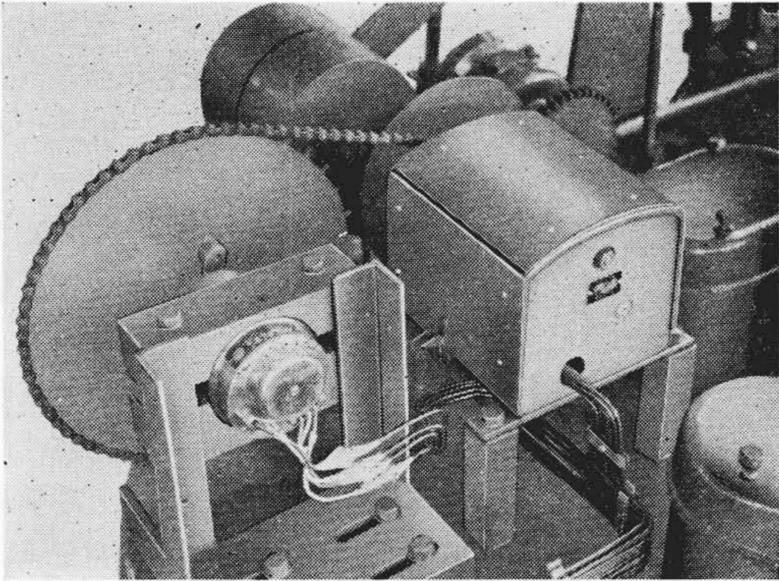
電極移動の大きすぎることによる系の乱調を防止するために、電極昇降電動機に直結に制動発電機をつけるとともに電極に取り付けた位置復元機構(第8図 CT)よりの帰還によりポンプ速度は安定に所定速度におちつく。

第9図は速度調整電動機二次液体抵抗器を示し、第10図は電極位置復元機構取付状態を示す。

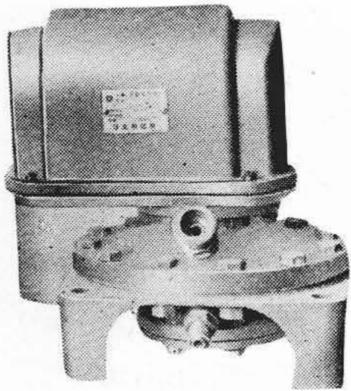
5. 検出装置

5.1 流量検出

(1) 式にみられるように流量は自乗項であるので、流量検出装置としてベンチュリー管により流量の自乗に比例する差圧を取り出し、差圧型流量発信器を駆動する。



第10図 電極位置復原機構



第11図 差圧型流量検出器外観

流量発信器の外観は第11図に示されその構造はベンチュリーよりの差圧によりダイヤフラムおよびベローズを動かす、その偏位によつて二重ソレノイドの中心に置かれた鉄心を移動し、二つのコイルのリアクタンスを変化させれば、両コイルに流れる電流の差はベンチュリーの発生する

差圧に比例する。すなわち流量発信器の出力（両コイルの差電流）は流量の自乗に比例する。

5.2 圧力検出

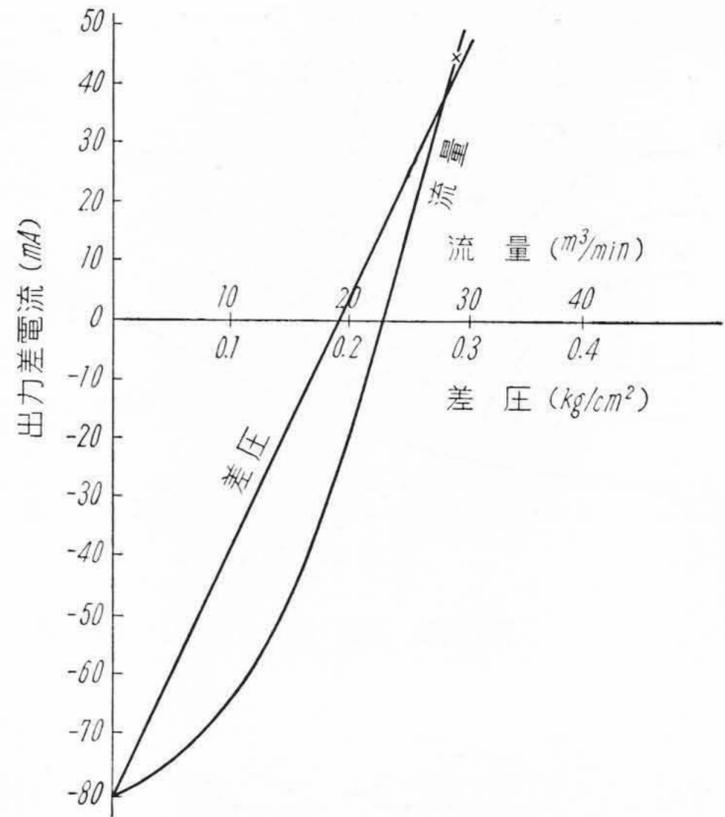
圧力は吐出弁負荷側における水圧によりベローズを駆動しその偏位により二重ソレノイドの鉄心を動かす、二つのコイルのリアクタンスを変化せしめる。その他の点はすべて流量検出器とまったく同じである。その出力は圧力に比例する。

これらの検出器の特性は第12図および第13図に示す。

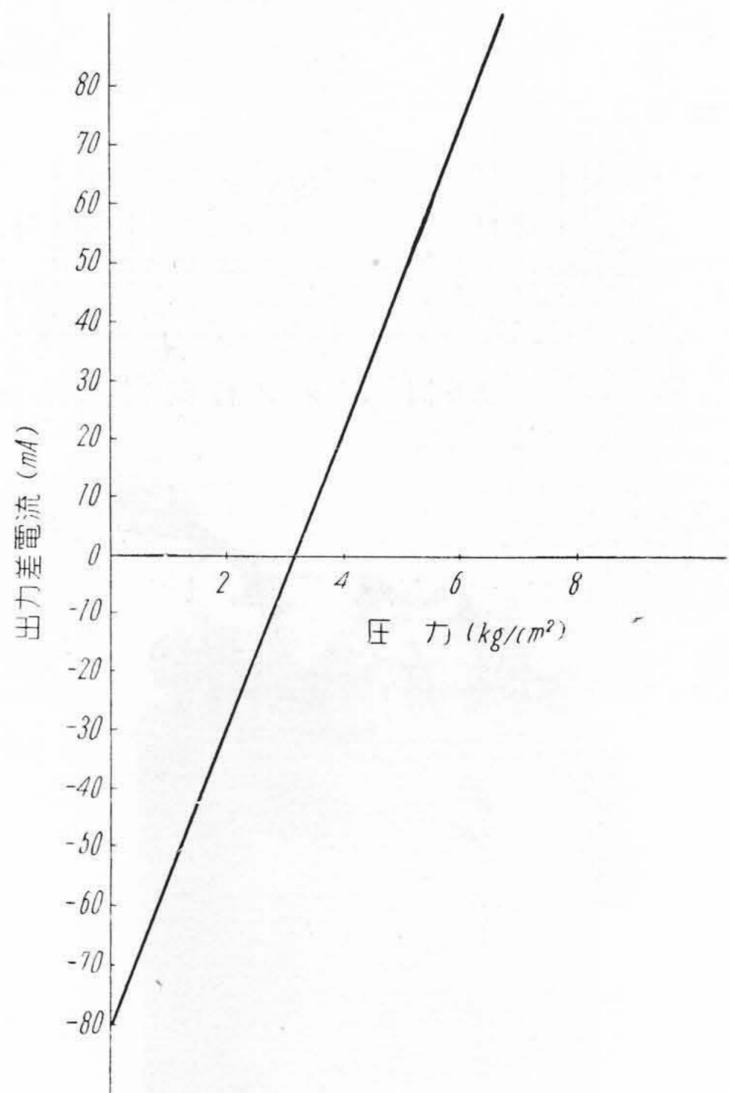
6. アナログ解析

第8図により制御回路のうち磁気増幅器、操作電動機、液体抵抗器よりなるサーボ機構部分をブロック線図で示せば、第14図(a)となり、これらと制御回路主電動機ポンプ配管および検出器を含めた自動制御系全体の閉回路では第14図(b)のようになる。ここに操作電動機主誘導電動機、ポンプおよび配管はともに非直線的要素であるが解析に便ならしめるため部分的には直線であるとみなして計算を行つた。

これにより流量を急変せしめたときのポンプ揚程の変化をアナログ計算器で解析した結果が第15図であり系の時定数は約10秒で安定に運転されるのがみられる。



第12図 流量検出器特性

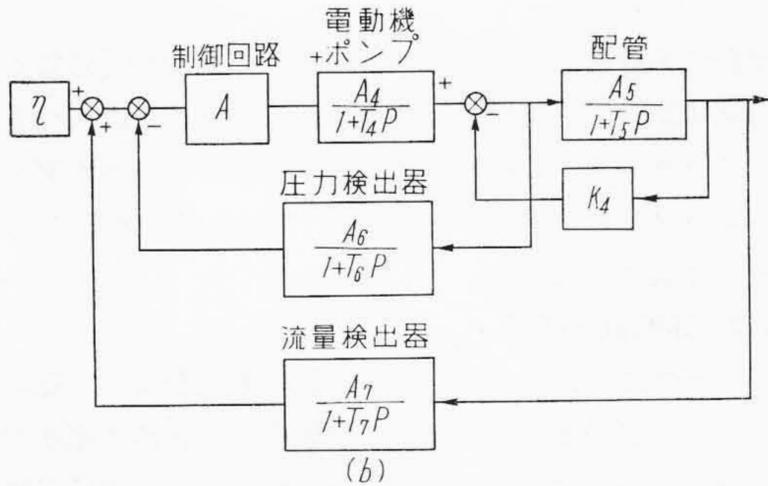
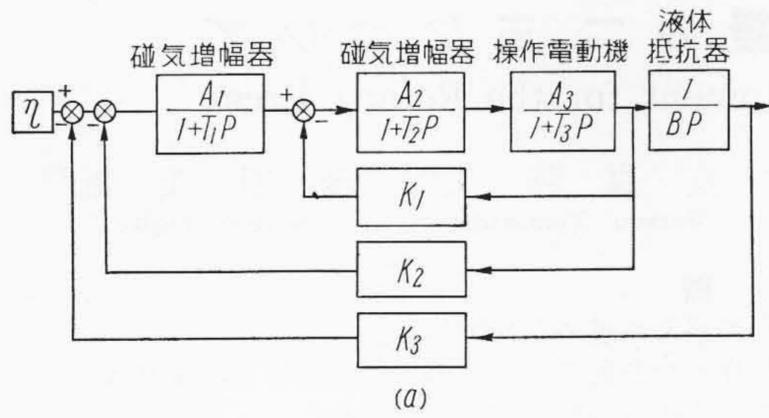


第13図 圧力検出器特性

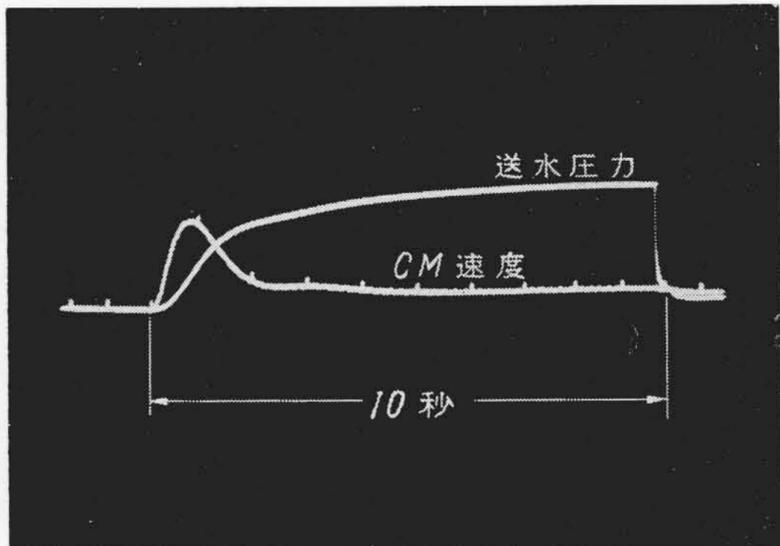
7. 総合性能

工場試験の結果は十分第7図CD曲線上で動作することが確認された。

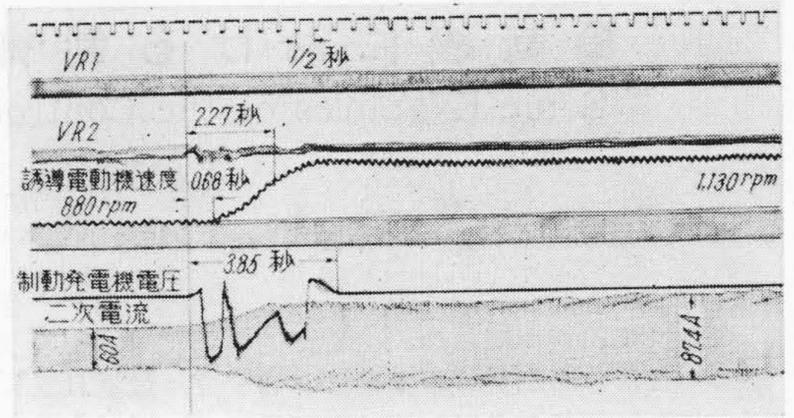
現地では種々の制約を受けて、ポンプは速度制御用のもの1台運転、配管は径700mm長さ約6kmでその先



第14図 ポンプ系ブロック結線図



第15図 アナログ解析結果



第16図 ポンプ速度応動オシログラム

の放水弁を開きその開度を調整して実際の配管抵抗に類似せしめて行つた。

ポンプ1台のみの運転であつたので第7図よりもわかるように流量の変化に対して圧力の変化の少ないところであつたが十分満足な結果が得られた。一定圧力設定用調整抵抗第8図 VR₂ を急変せしめてポンプ速度の応動を見たものをオシログラム第16図に示す。これでわかるように電動機は急速安定に所定速度におちつくのがみられる。

8. 結 言

ポンプ制御方式の実際の適要に当つてはポンプの系統、特性、経済性および保守の点を考慮して決定されねばならぬが遠距離送水で配管抵抗も比較的大きなポンプで送水揚程を広範囲に調節する時は可変速度全自動方式によれば能率良く、取り扱いの容易という点においても非常に有利な方式である。

参 考 文 献

- (1) Control Engineering April 1955 p. 43~49
- (2) 日立評論 39, 85 (昭 32-1)
- (3) 寺田： 応用ポンプ工学
- (4) R.L. Brown: ACER 4Th 1957 p. 28~33