

チェツクバルブ付の渦巻ポンプにおける ウォーターハンマーについて

寺 前 博*

Water Hammering in Centrifugal Pump with Check Valve

By Hiroshi Teramae
Kameari Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

The writer made some experiments on water hammering phenomena in pump discharge lines caused by the sudden stoppage of power supply to the motor of pump.

The pressure were measured by the magnetostriction type pressure gauge and recorded by oscillograph.

The results obtained from the experiments are as follows:

The maximum pressure-rise in surge phenomena goes down, in proportion as the opening of the by-pass valve attached to check valve; the fly-wheel effect of pump system and the mean closing force of check valve increases.

〔I〕 緒 言

液體が管路を充滿して流れる場合、管路中に設けたバルブを急速に全閉するか或は部分的に閉鎖すれば管内の流れは急激に減速するか或は遮断され、そのためバルブの前方及び後方の水壓が急激に昇降し、その値は著しく大きくなることがある。この現象をウォーターハンマーと呼び、その理論的研究は既に伊太利の Allievi によつてかなり以前に解明され、その後多くの研究者がこの現象について研究し發表されている⁽¹⁾。これらの多くは水車の導水壓力管を對象として取扱つている。渦巻ポンプ系におけるウォーターハンマーについては一般にポンプの單位出力が小さいことと、ウォーターハンマーによる損害が比較的わずかな費用で修理できるため従来ほとんど關心が拂われていなかつた。最近に至つて歐米でこの方面の

研究が行なわれるに至つて二、三の文献も發表されている⁽²⁾。

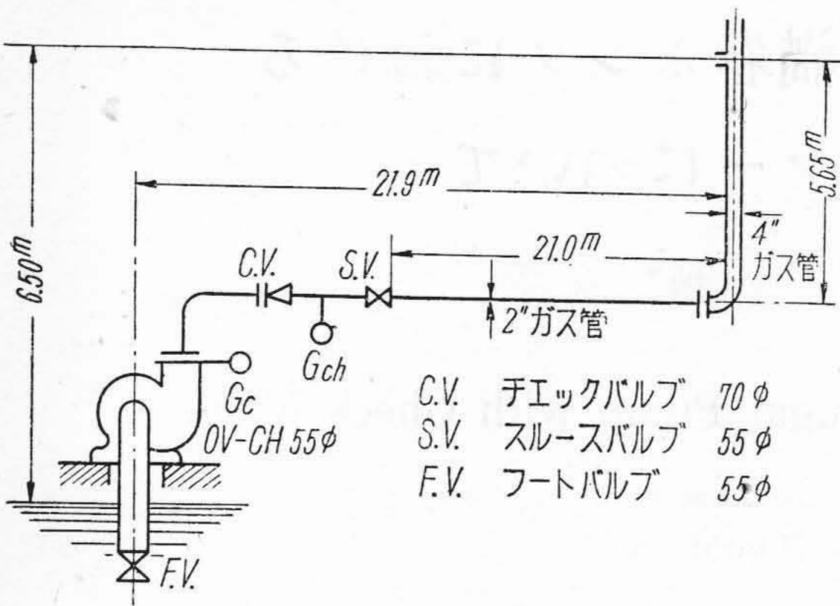
しかしそれらは理論かもしくは實地應用の報告で組織的な研究でない。日立製作所ではこの現象を取上げて二、三の實驗を行つたので茲に報告する次第である。

渦巻ポンプ系においては一般に揚程が高くなると吐出側にチェツクバルブが備えられている。かゝるポンプ系においてウォーターハンマーが問題になるのはモーターの電源が切られる時である。例えば停電の際にはスルースバルブは開けたまゝになつていたのでチェツクバルブは自動的に閉じる。そのためウォーターハンマーの現象が起り管内に異常の高壓が生ずる。本文はかゝる場合についての實驗結果の報告である。

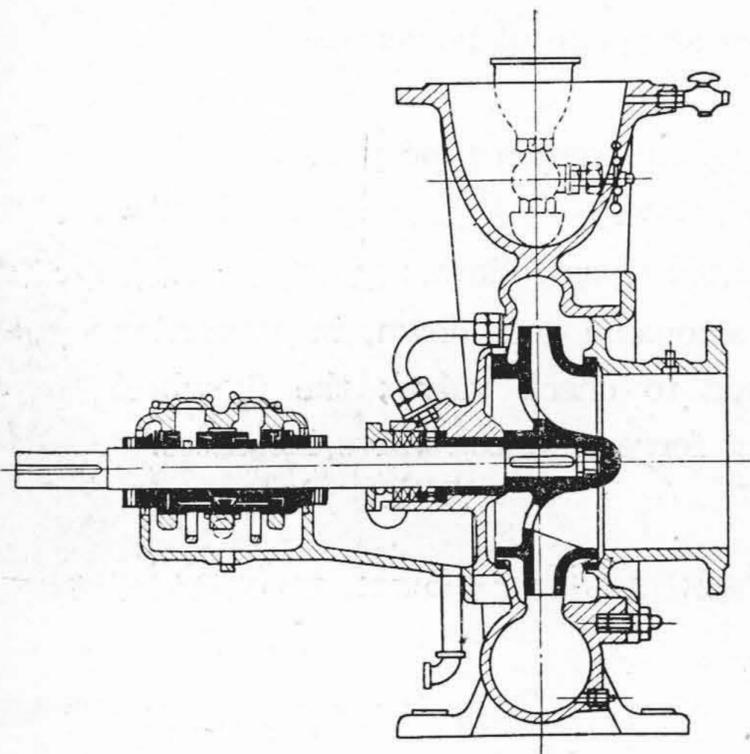
〔II〕 實 驗 方 法

(1) 實 驗 裝 置

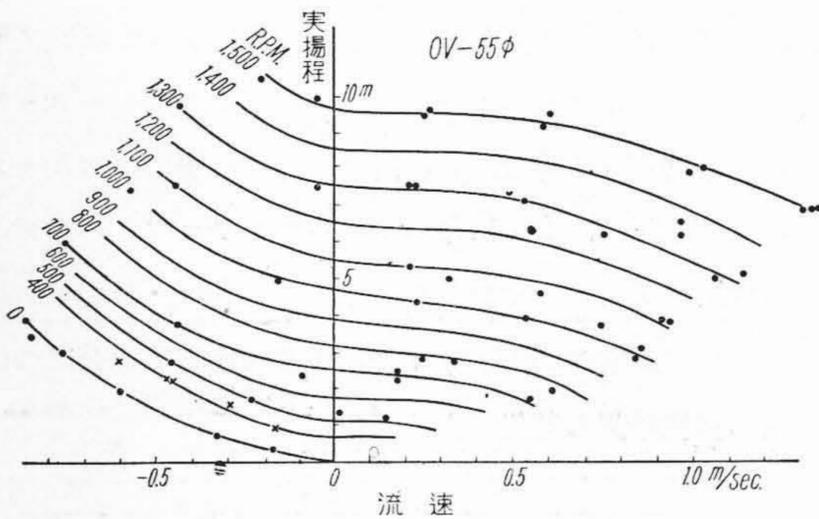
* 日立製作所龜有工場



第1圖 配管圖
Fig. 1 Piping of the Tested Pump.

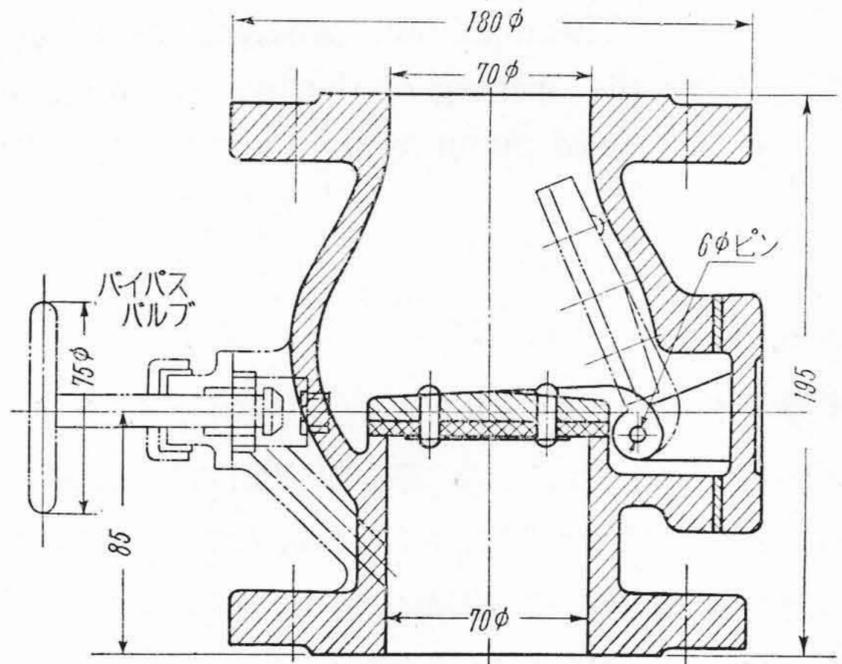


第2圖 渦巻ポンプの構造圖
Fig. 2 Construction of Centrifugal Pump.



第3圖 OV-CH 55φ 渦巻ポンプの特性曲線
Fig. 3 Complete Characteristic of Centrifugal Pump. (Type OV-CH 55φ)

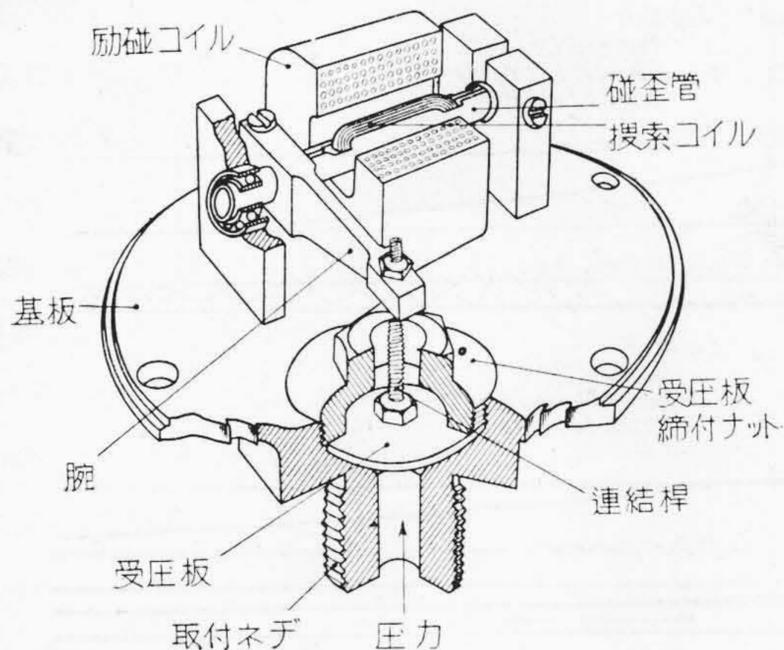
本実験には小型の渦巻ポンプを用い、その装置の配管圖は第1圖に示す通りである。ポンプは日立製の型式OV-CH、吐出し口径55mmのもので、その構造は第2圖の断面圖に示される様なものである。このポンプの揚程流速性能曲線は第3圖の通りである。この性能曲線を求める時はポンプのモーターは整流子モーターで回転數を變えた。第3圖の縦軸の左側に記入した所謂逆流特性曲線を畫くには次の方法をとつた。與えられた供試ポンプの吐出口に別の渦巻ポンプの吐出口を連結し、供試ポンプを順轉しながら別の渦巻ポンプによつて逆向きに送水して逆流を生じさせ、その時の流量とポンプケーシング内の水壓とを測定し、逆流量から算出した逆流速とこれに對する水壓とから特性曲線の左側延長部を寫し出した流速は吐出管内の平均流速である。チェックバルブは第4圖に示してある構造のもので、手持の関係で70φのものを使用した。



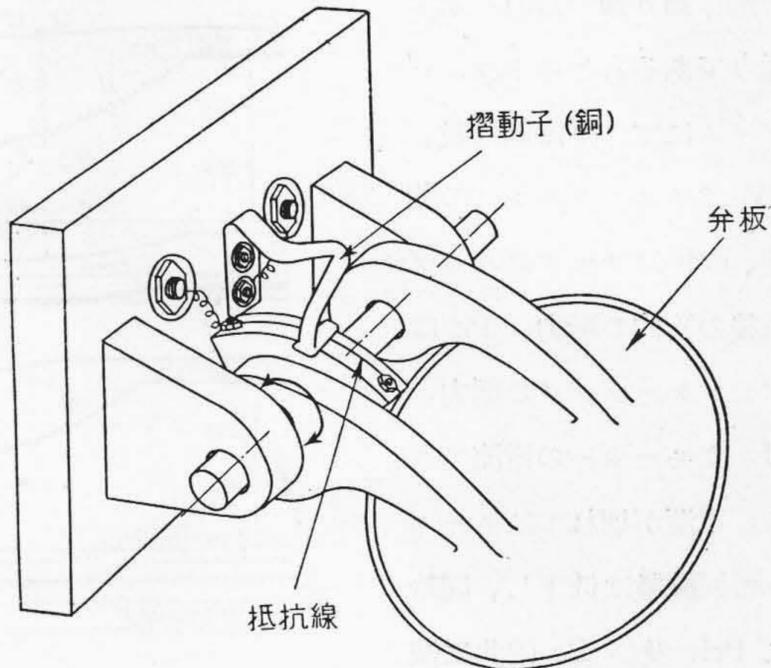
第4圖 70φ チェックバルブ構造圖
Fig. 4 Construction of 70φ Check Valve.

(2) 測定方法

ポンプの運轉中に急に電源を切つた時のウォーターハンマーの現象を求めるのであるから、オツシログラフを用いて壓力變化を撮影した。壓力測定は第1圖のGc及びGchの2個所にてそれぞれポンプ吐出側の壓力Pcとチェックバルブ直後の壓力Pchとを測定した。水壓測定にはMS-2型の磁歪管式壓力計⁽³⁾を用い、これを2



第5圖 MS-2型磁歪管式壓力變換器
Fig. 5 Construction of Magnetostriction Type Pressure Gauge (MS-2).



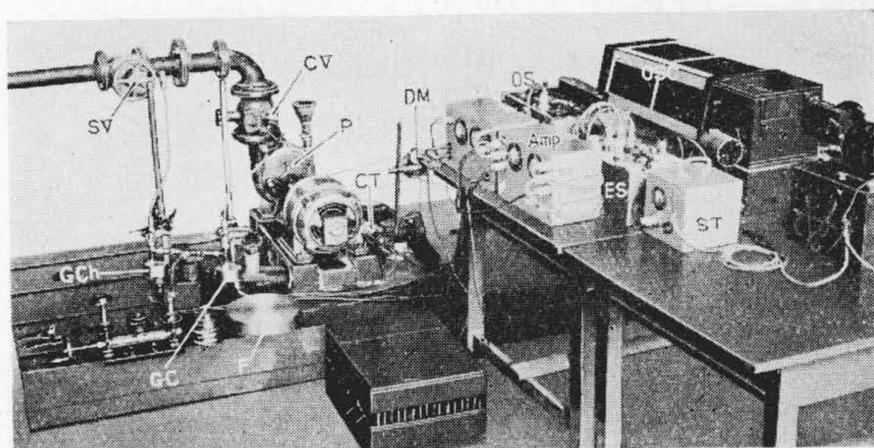
第6圖 チェックバルブの動き測定方法
Fig. 6 Measuring Apparatus of Movement for Check Valve.

個所に取り付けて測定した。この壓力計は第5圖に示す様に水壓を薄板にて受け、その變形をアルヘロ製の中空の所謂磁歪管の捩り變形としたものである。勵磁電流は4,000 サイクルを選び磁歪管の捩りによつて生じた誘起電壓を増幅してオツシログラフへ導いている。

チェックバルブの動きそのものは吐出管内の流速と必ずしも比例するものでないが、如何様に運動しているかを見るため第6圖に示す様にバルブに圓弧狀に抵抗線を張り、固定された摺動子がこの抵抗線上を摺動することによつて、バルブの開度に應じて抵抗が變ることを利用して測定を行つた。

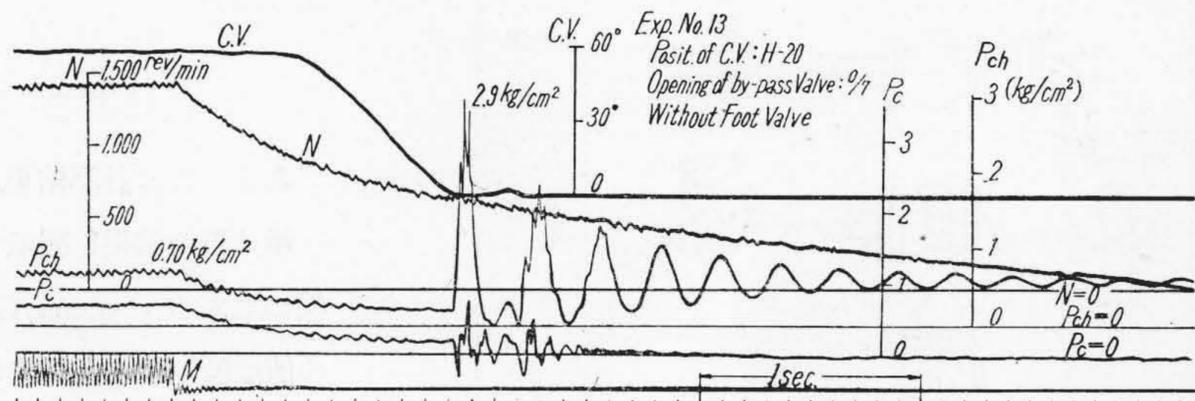
ポンプの回轉數はポンプカップリングからベルト掛けで驅動する直流發電機の電流をオツシログラフへ導いて記録させた。またポンプを運轉するモーターの電流は一種の變流計を特に作つてこれをオツシログラフへ接續した。

本實驗裝置並びに測定裝置は第7圖の寫眞に示す通りである。また本測定裝置で求めたオツシログラムの



第7圖 實驗裝置 Fig. 7 Testing Apparatus.

SV: スルースバルブ P: 供試ポンプ CT: 變流計
DM: 直流發電機 CV: チェックバルブ
Gch 及び Gc: MS-2型磁歪管式壓力計ピックアップ
F: 特製のカップリング(フライホイール効果の實驗に使用のもの) Osc: オツシログラフ ST: 自動電壓調整器
ES: 電源部 Amp: 増幅器 Os. 發振器(4,000~)



第8圖 オツシログラム No. 13
Fig. 8 Oscillogram No. 13.

一例は第8圖の寫眞に示す通りである。このオツシログラムにて N は回轉數、CV はチェックバルブの開度、Pch はチェックバルブ直後の管内の壓力、Pc はポンプケーシングの壓力、M はモーターの電流である。電源が切れればモーターの回轉數は低下し、同時に Pch 及び Pc は共に減じて行く。しばらくしてからチェックバルブは閉じ始

める。チェックバルブが閉じるとウォーターハンマーの作用によつて管内に高い壓力が生じ、この壓力は上下に振動する。チェックバルブの閉じた直後に出現するパイプ内の高い壓力が異常に高いと破裂を起すことがある。

〔III〕 實驗結果と検討

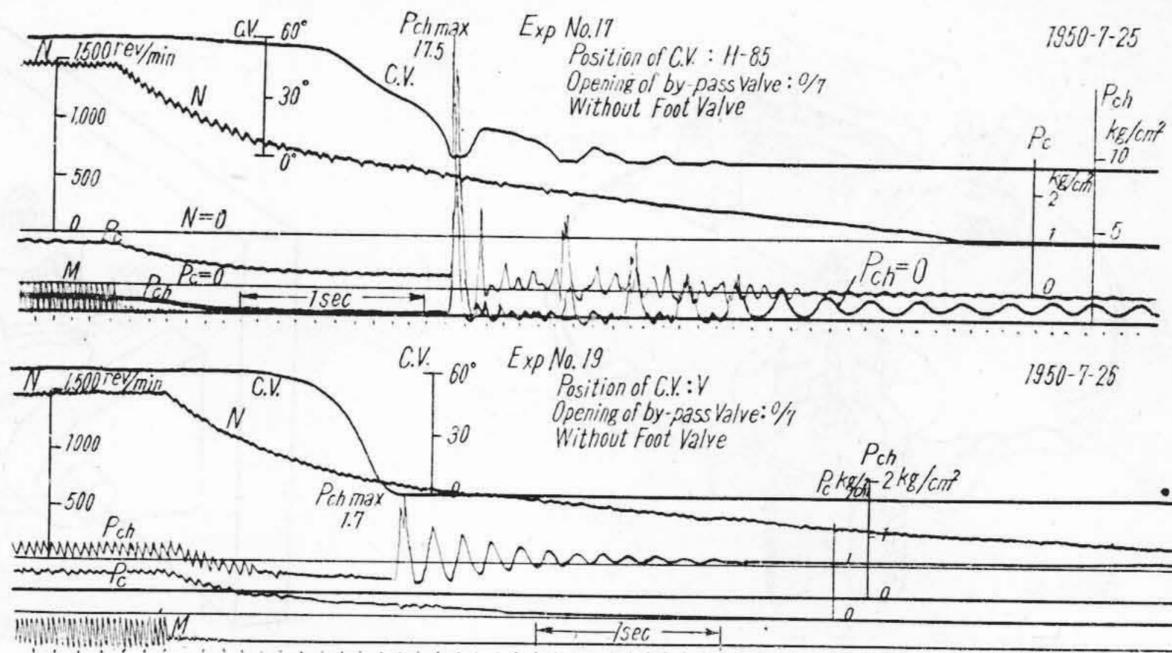
(1) チェックバルブの取付位置について

チェックバルブをポンプの吐出側に第1表に示す様な種々の位置に取付けた時のウォーターハンマーの現象について實驗を行つて見た。前掲の第8圖のオツシログラム No. 13 は第1表の H-20 の記號の位置の時のものであ

第1表 チェックバルブ取付位置一覽表

Table 1 Sign of Setting Position for Check Valve.

チェックバルブ取付位置	記号
	H-20
	H-85
	V



第9圖 オツシログラム (No. 17 及 No. 19)

Fig. 9 Oscillogram (No. 17 & No. 19).

る。又第9圖のオツシログラム No. 17 及び No. 19 は夫々 H-85 及び V の位置に取付けた時のものである。チェックバルブが閉鎖した直後の Pch の値 Pch max は何れも最高値になるが、この値はチェックバルブの取付位置によつて著しく異なる。H-85 の位置の時は 17.5 kg/cm² と云う大きな値になつている。

これらの實驗結果を一覽表に纏めると第2表の如くなる。この表中チェックバルブの閉鎖の瞬間における吐出管中の平均流速は次の如くにして求めた。第3圖のポンプの特性曲線中チェックバルブ閉鎖時のポンプの回轉數と管内壓力 Pch とをオツシログラム上から求め、これらの値を第3圖の左側に寫し出し負の流速を見出した。又表中の平均閉鎖力 Fmean とはチェックバルブが最大の開き角度 60° からバルブシートへ閉鎖するまでの自重による閉鎖力の平均値で、第10圖に示す符號を用うると

$$F_{mean} = \frac{1}{\theta} \int_0^{\theta_{max}} F \cdot d\theta$$

である。この計算結果が表中に示してあるのである。

第2表の結果を圖示すると第11圖の如くで、横軸に採つてある (Fmean/G) の値が大きくなる程 Pch max の値は低下することが判る。即ちチェックバルブの弁板が自重で閉鎖し易くなる程 Pch max は低くなつてい

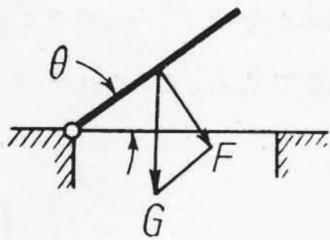
第2表 チェックバルブの取付位置と Pch max との関係

Table 2 Test Results of Pch max for Setting of Check Valve.

オツシログラム番号	チェックバルブの取付位置	フートバルブ	チェックバルブの自重	最高圧力 Pch max	チェックバルブ閉鎖時の流速	平均閉鎖力 Fmean
13	H-20	なし	530 gr	2.9 kg/cm ²	-0.25 m/sec	0.439G
17	H-85	"	"	17.5	-0.52	0.083G
18	"	"	"	17.0	-0.55	"
19	V	"	"	1.7	-0.23	0.828G
20	"	あり	"	1.85	"	"
26	"	"	583 gr	1.8	-0.26	0.905G

備考 G=530 gr

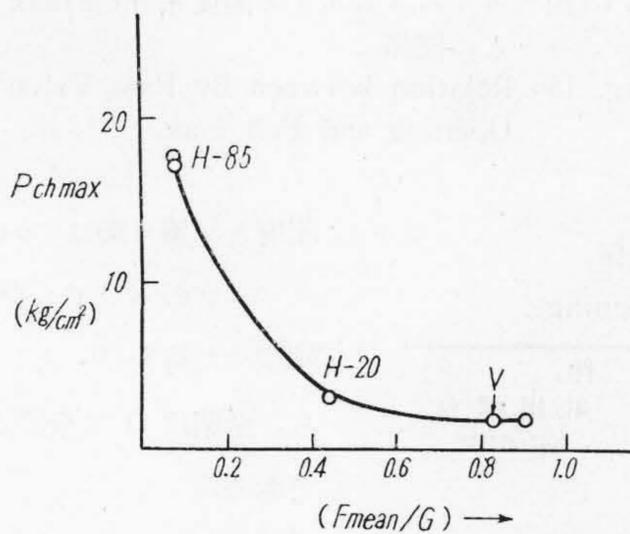
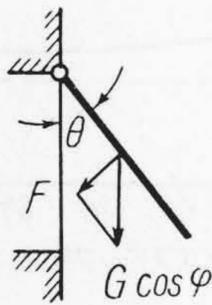
チェックバルブの位置 (V) の時



第10図 平均閉鎖力 Fmean の説明図

Fig. 10 Diagram of Mean Closing Force Fmean.

チェックバルブの位置 (H) の時



第11図 平均閉鎖力と Pch max との関係
Fig. 11 Relation between Mean Closing Force and Pch max.

ポンプの吐出側の立上り管にチェックバルブを取付けると第2表から判る様に逆流速も小さいので弁閉鎖時

の管内の水圧 Pch max も割合低い。これはチェックバルブが割合速く閉じるためである。チェックバルブを水平管に取付けるに當つてバルブの回転軸を水平に近くし、バルブを吊し下げた位置にした場合は Pch max はさして高くはならない。しかしバルブの回転軸を垂直に近い H-85 の位置にした時は Pch max は著しく高くなる。これはこの時バルブがかなりの逆流速の値になつて始めて閉じるためである。従つてバルブの回転軸を水平にしてバルブを逆立せしめる位置にチェックバルブを取付けた時は Pch max がかなり大きい逆の流速にならねば閉じないから非常に大きな Pch max の値となるであろう。

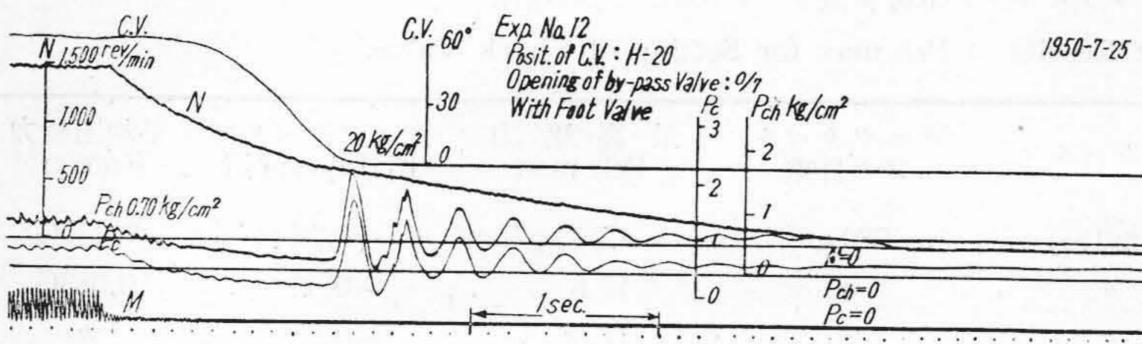
以上の実験からチェックバルブはなるべく速く閉じるように考慮する必要がある。このため普通の設計では立上り管にチェックバルブを取付けるようにし、水平管に取付ける必要のある時はバルブの回転軸を水平にしバルブを吊下げる位置に取付けねばならない。

(2) フートバルブとチェックバルブとの関係

第8図のオツシログラム No. 13 はフートバルブのない場合であるが第12図は同一条件でフートバルブのある場合である。第3表に両者を比較してある。

第3表 フートバルブの有無と Pch max との関係
Table 3 Test Results for Foot-Valve.

オツシログラム番号	フートバルブ	Pch max	Pc max	チェックバルブの位置
12	あり	2.0 kg/cm ²	2.0 kg/cm ²	H-20
13	なし	2.9	—	



第12圖 オツシログラム (No. 12)
Fig. 12 Oscillogram No. 12.

これらのオツシログラムから判る様にフートバルブがあると弁が閉じた後のウオターハンマーによる壓力振動はポンプケーシング内にも起きている。これはフートバルブがチェックバルブより先に閉じるためと思われる。チェックバルブの自重は530 gr、フートバルブの自重は380 gr であるが、チェックバルブはこの場合第1表のH-20の位置に取付けられているので、閉じ方がフートバルブより遅いためであろう。従つてチェックバルブを第1表のVの位置即ち立上り管に取付けた時はフートバルブの有無に關せずポンプのケーシング内には管内の高いウオターハンマーの壓力波は生じてないことがオツシログラム No. 19 及び 20 によつて確認されている。(オツシログラム No. 20 は省略)

チェックバルブとフートバルブを共に立上り管に取付けるとしてもチェックバルブの自重がフートバルブの自重より軽ければフートバルブの方が先に閉じるため高いウオターハンマーの壓力波がポンプのケーシングに働き結局チェックバルブを取付けた意義が半ばなくなつてしまふことが判る。

第4表 チェックバルブバイパスの開度と Pch max との関係

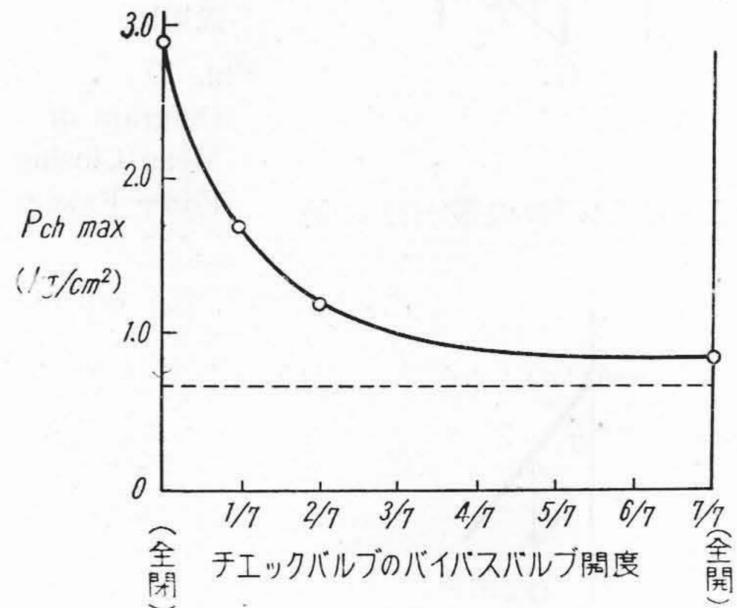
Table 4 Test Results of Pch max for By-pass Valve Opening.

オツシロ 番 號	バイパスバ ルブの開度	Pch max kg/cm ²	實 験 條 件		
			フート バルブ	チェックバル ブの取付位置	吐出壓力 kg/cm ²
13	0	2.9	なし	H-20°	0.70
14	1/7	1.7			
15	2/7	1.2			
16	7/7	0.9			
19	0	1.7	あり	V	
22	7/7	0.6			
20	0	1.9	なし	V	
21	7/7	1.5			

(3) チェックバルブのバ
イパスバルブの開度

チェックバルブ閉鎖時に吐出側の水を戻すため第4圖に見られる様に普通はチェックバルブにバイパスバルブがある。その通路の斷面積はチェックバルブの座の面積の 1/50

程度の小さいものである。これがウオターハンマーの軽減にどの程度有効に働いているかを調べて見た。バイパスバルブの開度を變えた時の管内の高いウオターハンマーによる最高壓力の Pch max をオツシログラムから讀んで一覽表にしたのが第4表である。バイパスバルブの



第13圖 バイパスバルブの開度と Pch max との関係

Fig. 13 Relation between By Pass Valve Opening and Pch max.

開度とは第4圖にてバイパスバルブのハンドルを一回轉開けた時を 1/7 としている。全閉は 0 で全開は 7/7 である。

オツシログラム番號 No. 13~16の成績を圖示したのが第13圖である。横軸にバイパスバルブの開度を取り、縦軸に Pch max の値

をとつてある。バイパスバルブを開く程 Pch max の値は低下することが判る。

第4表から判ることは次の通りである。

(A) バイパスバルブを開放して行くとその開度と共にウォーターハンマーによるパイプ内の最高圧力 Pch max は低下して行く。

(B) フートバルブがなければ開度 2/7 以上の時にはチェックバルブが閉じた後のウォーターハンマーの圧力振動が殆んど現われない。

(C) フートバルブがあればバイパスバルブを開けておくとウォーターハンマーの圧力の振動はポンプケーシングの内にも起る。しかしその Pch max の値は低い。

以上のことからチェックバルブのバイパスバルブにはフートバルブがない時にもある時にもそのウォーターハンマーによる高い圧力値を低下する効果がある。

(4) フライホイール効果

モーターのスイッチを切つてもポンプ軸は直ちには止まらない。これはモーターの回転子、ポンプのランナー、カップリングなどが慣性で回転するためである。フライホイール効果が大きなポンプ系の水管には急速に逆流が起りえないから大きなウォーターハンマーが起らない。

このフライホイール効果を興えるものゝ大きさを増した時はウォーターハンマーによる管内の水圧はどのようなになるかを実験して見た。モーターのカップリングの直径並びに重量を増し

たフライホイールを作り、従来のカップリングと取換えた時と比較した。

モーターのスイッチを切つてからポンプが完全に止まるまでにフライホイールが重いとかなり長い時間を要する。かゝる大きいフライホイールをつけた時はウォーターハンマーによる管内の最高圧力 Pch max は第5表に示す成績ではかなり低くなつていてフライホイールの効果がある。これはチェックバルブ閉鎖時の回転数及び圧力がいずれもフライホイールの重いのをつけた時は高い値を示して、その逆流値は低いためにチェックバルブの閉じたよめによるウォーターハンマーの最高値は低くなるのである。しかしポンプの軸芯が狂つていたり或はスタフィンボックスを締めて摩擦を多くしたりすればポンプは速く止まるようになる。しかるときはフライホイールの小さいものをつけたのと同じ効果が現われる。第6表は同じ運転条件ではあるが軸の摩擦損失が異なるため、ポンプの停止するまでの時間が異なる場合を比較している。この結果によると No. 6 の速く止まる方が Pch max が高い値になつて豫想通りである。

一般的にフライホイールの大きいものをつければ Pch max の軽減になりそうであるが、實際の設計に當つて

第6表 ポンプ軸の摩擦と Pch max との関係

Table 6 Test Results for Pump-shaft Friction.

オツシロ グラム 番号	チェックバルブ 取付位置	フートバルブ	スイッチを切つて からポンプの止ま るまでの時間 秒	管内の最 高圧力 Pch max kg/cm ²
No. 6	H-20	あり	2.8	3.2
No. 12	"	"	4.14	2.0

第5表 フライホイール効果の実験

Table 5 Test Results for Fly Wheel Effect.

オツシロ グラム 番 号	チェック バルブ 取付位置	フート バルブ	フ ラ イ ホ ー ル*		スイッチを切つて からポンプの止ま るまでの時間(秒)	管内の最 高圧力 Pch max kg/cm ²	チェックバルブ閉鎖時		
			直 径	重 量 kg			回 轉 数 r.p.m.	圧 力 kg/cm ²	流 速 m/s
20	V	あり	115	1.63	8.8	1.85	700	0.15	-0.10
24	"	"	240	13.7	27.5	0.95	1000	0.38	-0.02

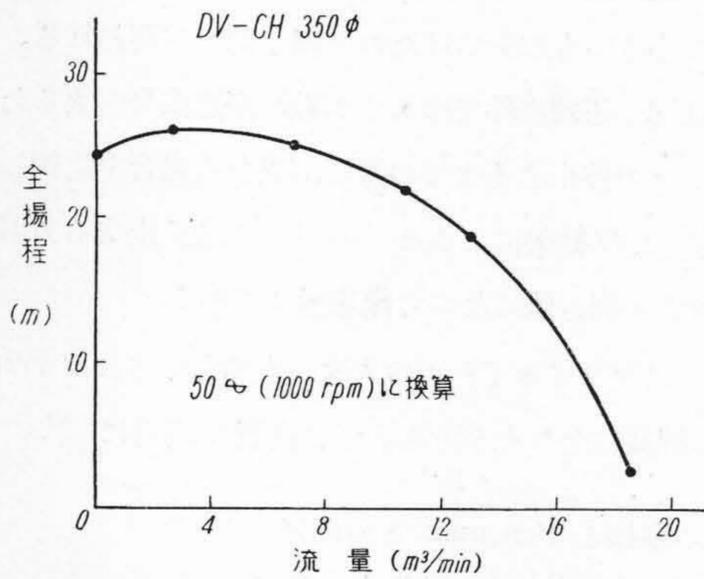
(No. 24 に用いたフライホイールは第7圖の F である) (* モーターカップリング)

はフライホイールの重量が非常に大きいものを必要とするから必しも有効な方法とは云えない。Allieviも壓力上昇を44.5%に減少させるためにフライホイールの慣性性能率を4.8倍にしなければならなかつたと述べている⁽⁴⁾。

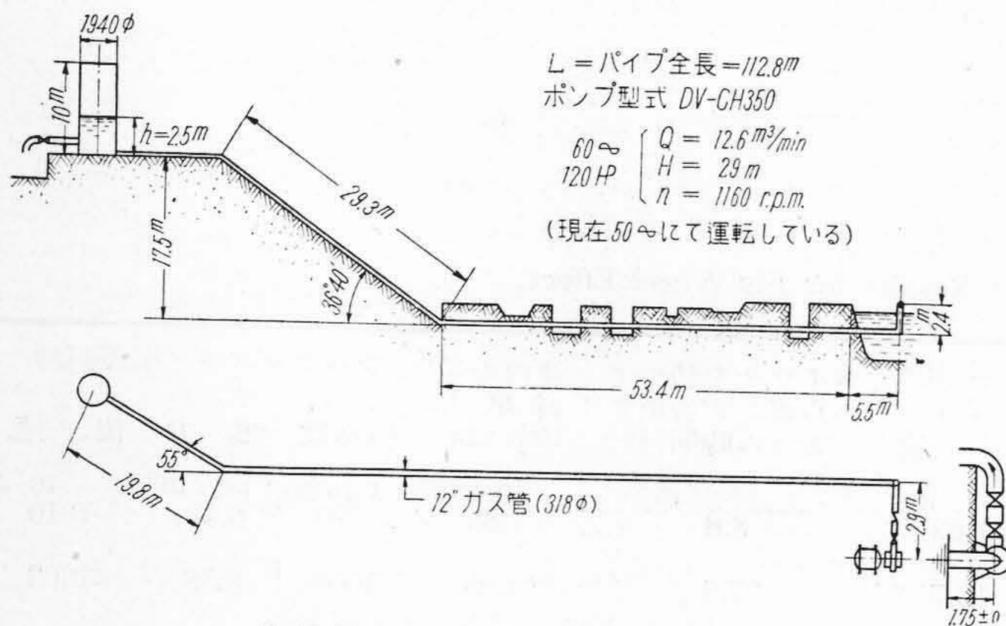
〔IV〕 實地の渦巻ポンプにおけるウォーターハンマーの實測例

(1) 實驗方法

以上記載の實驗に用いた装置は工場内の研究室に假設したものであり、又ポンプも小型であつたので實地に設備された大きなポンプについても實驗を行うことにした。日立工場内に据付の複吸込の渦巻ポンプ DV-CH



第14圖 供試ポンプ (DV-CH 350φ) の特性曲線
Fig. 14 Characteristic Curve of Centrifugal Pump. (DV-CH 350φ)



第15圖 配管圖
Fig. 15 Piping of Tested Pump.

350φ について測定を行つた。

製作當初のポンプの性能試験成績は第14圖の通りである。本ポンプの配管は第15圖に示す通りで實揚程約19.3mである。フートバルブはなく始動時の満水は眞空ポンプによつて行つている。チェックバルブは300φのものを特に取付けた。

測定方法は既述のものと全く同じである。

(2) 測定結果

電源を切つた時ポンプの回転は低下しそのためチェックバルブは閉じる。その瞬間ウォーターハンマーのために大きな壓力が管内に起る。測定結果の一例を第16圖の寫眞に示してある。カーブの符號は既記のものと同じである。

實驗條件は種々變えることが出来なかつたのでバイパスバルブの開度を變えることのみで行つた。第7表にその結果を掲げてある。これを圖示すると第17圖の通りである。即ちバイパスバルブの開度を開けてゆくと Pch max の値は低下していく。この事は既記の第13圖と同じ傾向である。第7表からバイパスを閉めてある時管内の最高壓力 Pch max は吐出壓力 Pd の180%程度である。

〔V〕 結 言

渦巻ポンプにおけるウォーターハンマーの實驗結果について報告されたものが少ないので、これについて實驗を

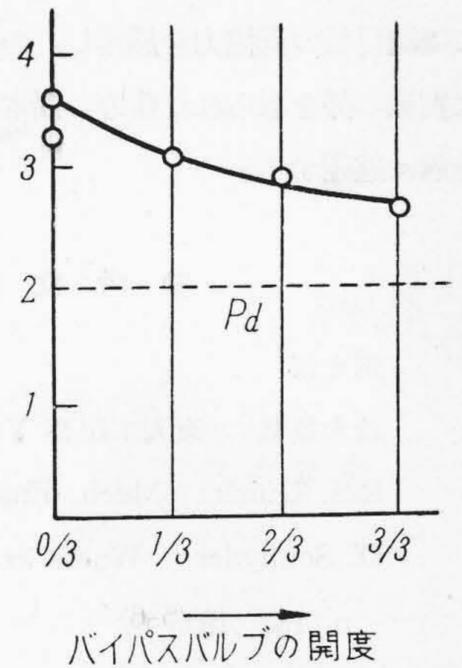
始めた。チェックバルブが渦巻ポンプの吐出管につけてある場合について研究した。その結果によると次の事が云える。

- (A) チェックバルブの取付位置を第1表のように變えて實驗した。取付位置によつては非常に大きな壓力が管内に生じるから取付けに對する注意が必要である。
- (B) チェックバルブとフートバルブとが共にポンプ系に設置される場合はポンプケーシングを保護するための意味においてチェックバルブを先に

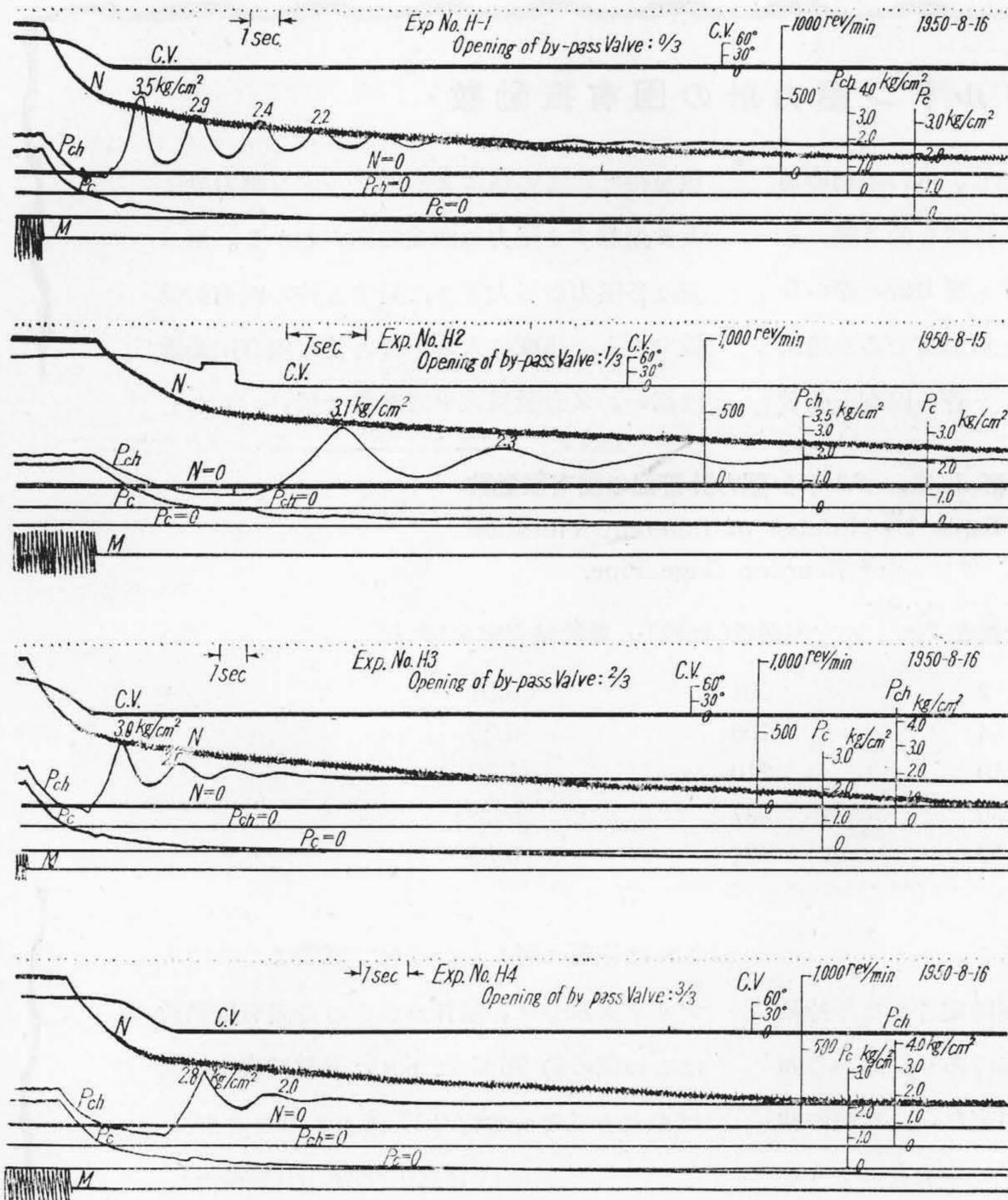
第7表 実験成績表
Table 7 Test Results in Hitachi Works.

オツシロ グラム 番号	チェックバルブ バイパスバルブ 開度	吐出圧力	パイプ内の 最高圧力	Pch max
		Pd	Pch max	Pd
H-1	0/3 (全閉)	kg/cm ² 2.0	kg/cm ² 3.6	1.80
H-2	1/3	"	3.1	
H-3	2/3	"	3.0	
H-4	3/3 (全開)	"	2.8	
H-5	0/3	1.9	3.3	1.74
H-6	3/3	2.0	2.8	

(フートバルブなし)



第17図 バイパスバルブの開度と Pch max との関係
Fig. 17 Relation between By Pass Valve Opening and Pch max.



第16図 オツシログラム (No. H-1~No. H-4)
Fig. 16 Oscillogram (No. H-1~No. H-4).

閉じるように考慮すべきである。

- (C) チェックバルブのバイパスバルブを開けるとウォーターハンマーによる高い圧力は低下しうる。
- (D) フライホイールの大きなものを取付けた本実験ではウォーターハンマーによる高い圧力は低下した。

渦巻ポンプ系のウォーターハンマーの現象を検討するに當つて理論的取扱いが必要であるが本文においてはこれを省略した。

最後に本文の御校閲を賜つた内丸最一郎先生に厚く感謝する。また日立工場における実験に當つて覺先所長、今尾部長、山崎課長、小堀、大内田、宇佐美の各氏の絶大なる御援助を得た。その御好意を感謝する。ま

た本實驗に當つてポンプ設計課の各位特に本田課長並びに堀田係長の御協力を感謝し、かつ研究課の多數の人特に實驗の勞を取られた藤芳、橋本、赤羽、大谷、植草の諸君に感謝する。

参 考 文 献

(1) 例え

鈴木茂哉：東大工紀要 Vol. 21, No. 2 (1937-3)
 R.S. Quick：Mech. Engg. 49, p. 524 (1927)
 O. Schnyder：Wasserkraft u. Wasserwirt 30, p. 133 (1935-6)
 F. M. Wood：Trans. A. S. M. E. 59, p. 707

(1937-11)

(2) 例え

O. Schnyder：Trans. A. S. M. E. 59, p. 695 (1937-11)
 R.M. Peabody：Trans. A.S.M.E. 61, p. 117 (1939-2)
 A.L. Stepanoff：Trans. A.S.M.E. 71, p. 515 (1949-7)

(3) 藤芳：日評 33, 33 (昭 26-4)

(4) L. Allievi：Trans. A.S.M.E. 59, p. 657 (1937-11)

ブルドン壓力計の固有振動數

振動する壓力の測定に際し、その振動の周期が比較的長く、測定値の精度を餘り気にしないでよい場合にはブルドン壓力計の管の自由端の變位を利用することが適當であり簡便でもある。それにはブルドン管の固有振動數

値を得た。この値によつてブルドン壓力計による振動する壓力の測定範圍がわかる。第 1 表は各壓力計の大きさに對する管の固有振動數である。指度の大きいほど管の固有振動數は高い。又對數減衰率は非常に低い。しかし

第 1 表 ブルドン壓力計管部の固有振動數

Table 1 Number of Inherent Vibration of Bourdon Gage Pipe.

壓力計指度 kg	固有振動數(毎秒)	對數減衰率 $\times 10^{-2}$
2	91	0.61
4	158	0.30
10	210	1.10
30	337	0.18
60	431	0.53

を豫め知つておく必要がある。

ブルドン管は 1 種の 1 端固定された片持軸であるが、斷面や形が特殊であり計算から固有振動數を求めることは出来ない。實驗の結果固有振動數を測定したところ次表のような

これは管部に何も無い場合で實際はこれにスプリングがつき、槓杆がつくので固有振動數はこの値の約 70% に下り、對數減衰率は何れも大きくなつて約 0.15 に上るのである。

(日立研究所 小堀與一)