U.D.C. 532.591

導水管内の圧力波の伝わり速度について

小堀　威*　横山重吉**　宮代　裕***

Propagation Velocity of Pressure Wave in Pipe Line

By Takeshi Kobori, D.S.E., Shigeyoshi Yokoyama and Hiroshi Miyashiro
Kameari Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

It has been observed sometimes in the experiments on the water hammer of the centrifugal pump that the measured value of propagation velocity a of pressure wave in pipe line proves far smaller than the value calculated by the Alliévi's formula, and even below the sound velocity in the air which is about 340 m/s. It is natural that the value of a is reduced when water in pipe line contains air bubbles, but the writers had question whether the propergation velocity smaller than the sound velocity in the air could be possible. This article informs in detail of their calculation of the theoretical value of a to be reached in water containing air bubbles, which ended in proving that the phenomenon can reasonably occur even when extremely small amount of air is permitted into water in pipe line in the form of bubbles. The results of actual measurements were in a general agreement with the results of the writers' calculations.

〔I〕 緒　　言

渦巻ポンプのウォータハンマ現象の実験に際し，圧力変動の週期より逆算した圧力波の伝わり速度 a の値が Alliévi の式により計算した値よりもはるかに小さくなり，空気中における音の速度(約340 m/s)よりも小さくなることがある。導水管内の水が気泡を含んでいる場合に a の値が小さくなるのは当然のことである。しかし空気中の音速より小さくなることがありうるか否かの疑問を生じたので，管内の水が気泡を含んでいる場合の a の値の理論計算ならびに実測を行つた。

本報告はこれらの結果について述べたものである。

〔II〕 気泡を含んでいる場合の圧力波の伝わり速度の計算式

気泡は小さくかつ水中に一様に分布しており任意の小さな部分をとつても同じ割合で気泡が含まれているものと仮定する。気泡を含んでいる水を水と空気とに分けて考え，そのおのおのがそれぞれの体積弾性係数にしたがつて収縮するとして気泡を含む水の体積弾性係数を出し，それを Alliévi の式に適用して a の計算式を導いた。

今気泡を含む水の圧力が $\triangle P$ だけ増加したとき，その体積 V が $\triangle V$ だけ減少したとすれば次式が成立する。ただし K は気泡を含む水の体積弾性係数とする。

$$K=V\frac{\triangle P}{\triangle V} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

つぎに水および空気のそれぞれに対しては同様に(2)，(3) 式が成立する。

$$K_w=V_w\frac{\triangle P}{\triangle V_w} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

$$K_a=V_a\frac{\triangle P}{\triangle V_a} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

また

$$\left.\begin{aligned} V&=V_w+V_a \\ \triangle V&=\triangle V_w+\triangle V_a \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

の関係がある。ここに添字のない記号は気泡を含んでいる水を表わし，添字 w は水，添字 a は空気を表わすものとする。(2)，(3) および (4) 式の関係を用いて (1) 式を変形すれば

$$K=\frac{K_w}{1+\left(\frac{K_w}{K_a}-1\right)\frac{V_a}{V}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

となる。また，γ を比重量とすれば

$$\gamma=\frac{\gamma_w V_w+\gamma_a V_a}{V}=\gamma_w-(\gamma_w-\gamma_a)\frac{V_a}{V} \quad \cdots (6)$$

である。

*　日立製作所亀有工場　工博
** ***　日立製作所亀有工場

a は Alliévi によれば次式で表わされる。

$$a=\frac{1}{\sqrt{\frac{\gamma}{g}\left(\frac{1}{K}+\frac{D}{E\delta}\right)}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

ここに，D：導水管の内径

δ：導水管壁の厚さ

E：導水管材料の縦弾性係数

g：重力の加速度

である。

(5)，(6) 式を (7) 式に代入すれば

$$a=\frac{1}{\sqrt{\frac{\gamma_w-(\gamma_w-\gamma_a)\frac{V_a}{V}}{g}\left[\frac{1+\left(\frac{K_w}{K_a}-1\right)\frac{V_a}{V}}{K_w}+\frac{D}{E\delta}\right]}} \quad \cdots\cdots\cdots(8)$$

となり，a は一定の管路においては $\frac{V_a}{V}$，K_a および γ_a のみによつて変化することがわかる。

K_a および γ_a は導水管内の圧力 P kg/cm² (ただし絶対圧力) の函数であり，つぎのようになる (ただし，K_a は断熱変化の場合の値である)。

$$K_a=1.4P\times10^4\ \mathrm{kg/m^2}$$

$$\gamma_a=1.186P\ \mathrm{kg/m^3}$$

なお K_w，γ_w が P により変化する量は K_a，γ_a の変化に比しきわめて小さいから K_w，γ_w は P に無関係に一定とみなしてよい。

今管路は 4″ ガス管とし

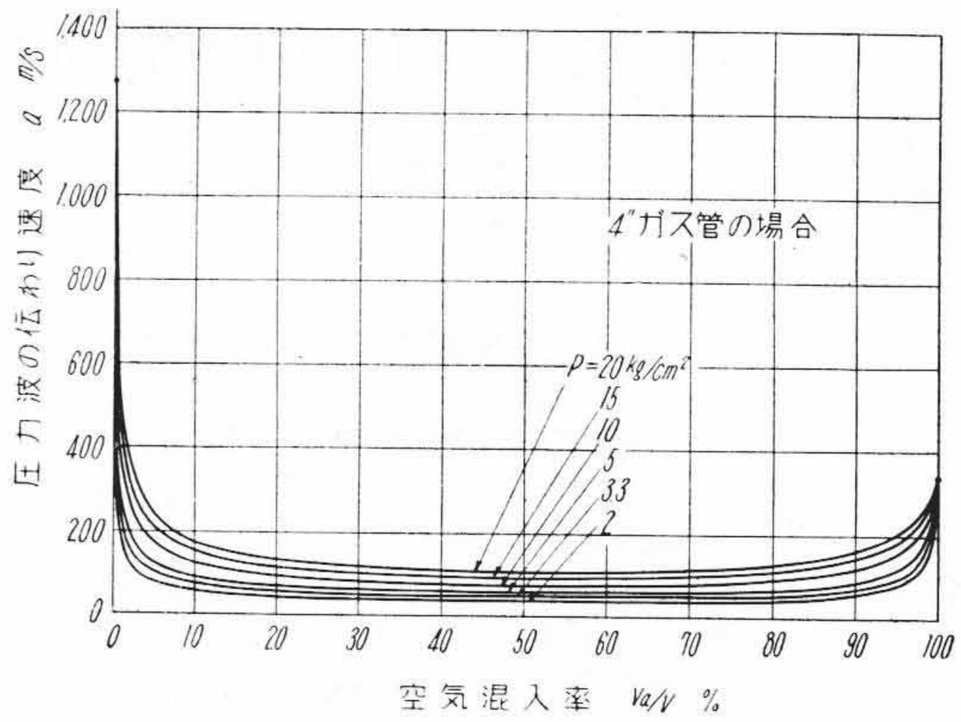
$D=0.1053$ m,　　$\delta=0.0045$ m,

$E=2\times10^{10}$ kg/m²,　$K_w=2.07\times10^8$ kg/m²

$\gamma_w=999$ kg/m³

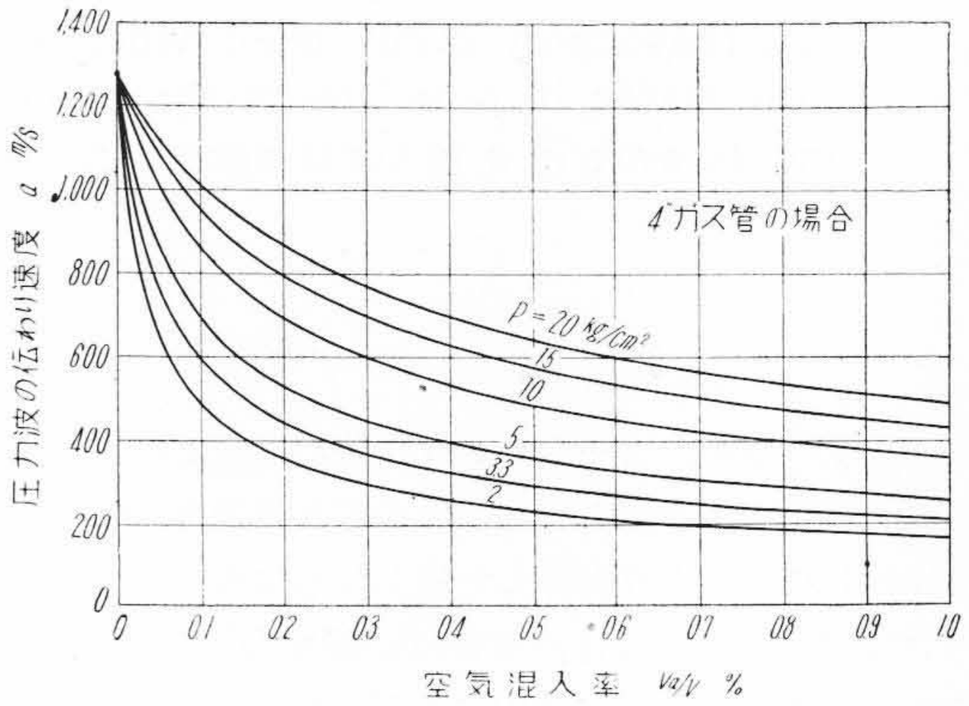
の数値を用いて (8) 式により管内圧力がそれぞれ 2, 3.3, 5, 10, 15 および 20 kg/cm² の各場合における $\frac{V_a}{V}$ に対する a の値の変化する様子を計算して図示したものが**第1図**の (a) および (b) である。

これを見ればあきらかなように，空気がわずか混入しても a の値は急激に小さくなり，空気混入率が数%以下で空気中の音速より小さくなつている。



第1図(a)　空気混入率と a との関係 $\left(\frac{V_a}{V}=0\sim100\%\right)$

Fig. 1. (a)　Propagation Velocity a of Pressure Wave in Pipe Line for Various Air Content $\left(\frac{V_a}{V}=0\sim100\%\right)$



第1図(b)　空気混入率と a との関係 $\left(\frac{V_a}{V}=0\sim1\%\right)$

Fig. 1. (b)　Propagation Velocity a of Pressure Wave in Pipe Line for Various Air Content $\left(\frac{V_a}{V}=0\sim1\%\right)$

〔III〕 実験装置および実験方法

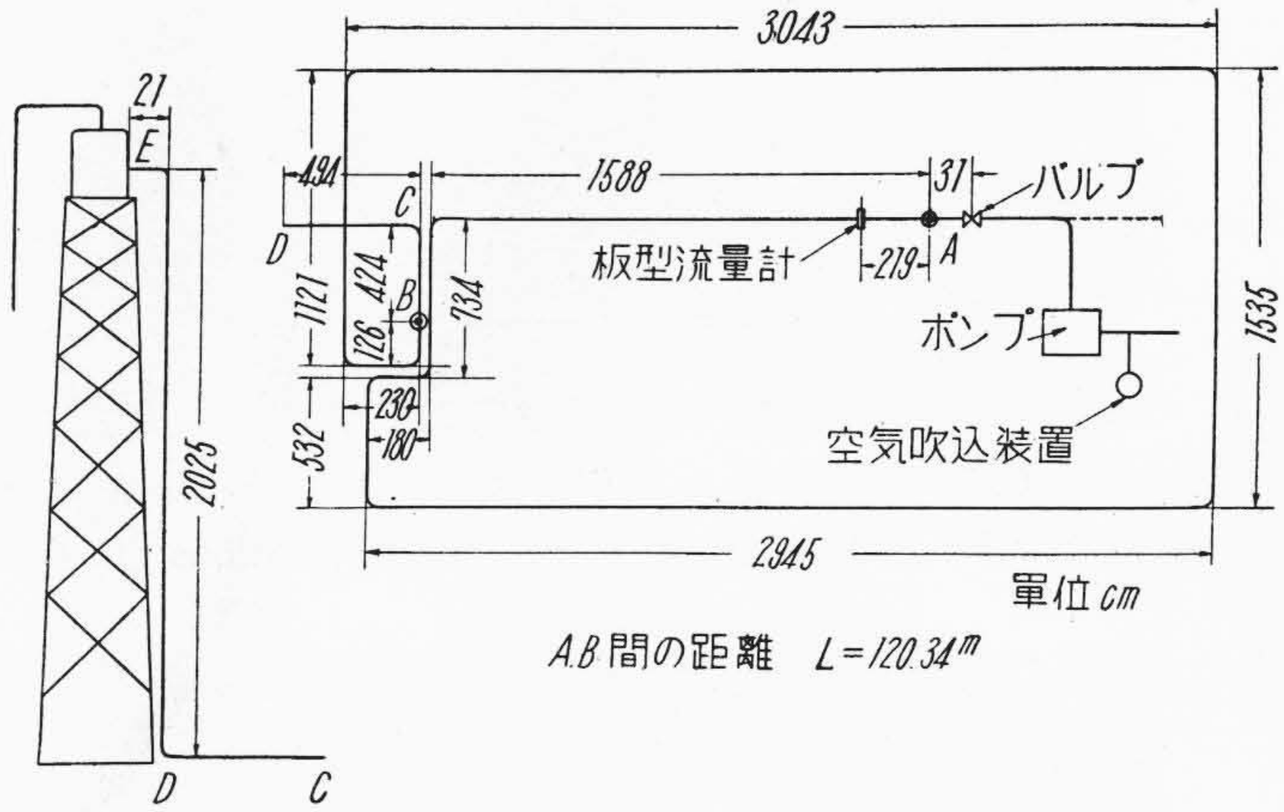
実験に使用したポンプは口径 110 mm の一段タービンポンプであり，**第2図**はその配管の概要を示す。ポンプ吐出管は 4″ ガス管で，実験室の外側を一周してから垂直に立上り約 20 m 高所にある水槽に達している。

導水管内を水が充満して流れているときバルブを急閉鎖すると，バルブ上流 (バルブより水槽側) の水圧が急激に変化する。この圧力波は管内を速度 a で伝わり，水槽の入口 E において反射し，以後水槽入口とバルブとの間を往復する。したがつて L なる間隔をおいた導水管の2点 A および B における圧力変化をオシログラフに描かしめれば**第3図**に示すように A 点の圧力 P_A が変化し始める時刻と B 点の圧力 P_B が変化し始める時刻とでは時間的ずれがある。このずれの時間を t とすれば

$$a=\frac{L}{t} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

により a が求められる。

単純な管路においては A 点および B 点の圧力は単純な週期的変化をするからバルブから水槽入口までの距離 L' と圧力変化の周期 t' を測定すれば



第2図　実験装置配管図
Fig. 2.　General Arrangement of the Experimental Pipe Line

$$a=\frac{4L'}{t'}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(10)$$

により a を求めることもできるが，分岐管などのある複雑な管路の場合には圧力変化の波形が不規則になり週期を正確に測定することが困難になる。したがつて a の測定には前者を採用する方がよい。

本実験においては，2箇の抵抗線式圧力計を**第2図**の A，B の位置に取付け，ウオータハンマを起させ圧力変化をオシログラフにより撮影し(9)式により a を求めた。

実験は水槽の水を管路端より自由に放出している場合とポンプで水槽に揚水している場合ならびに管内に空気を入れながら揚水している場合の三つの場合について行つた。

（1）　水槽の水を自由に放出している場合

ポンプで水槽内の一定の水位まで揚水して水中の気泡が抜けるまで放置し，さらに**第2図**の点線のような配管にしてポンプを管系から除いてから，バルブを開いて水を自由に放出させておき，ついでバルブを急閉してウオータハンマを起させる。

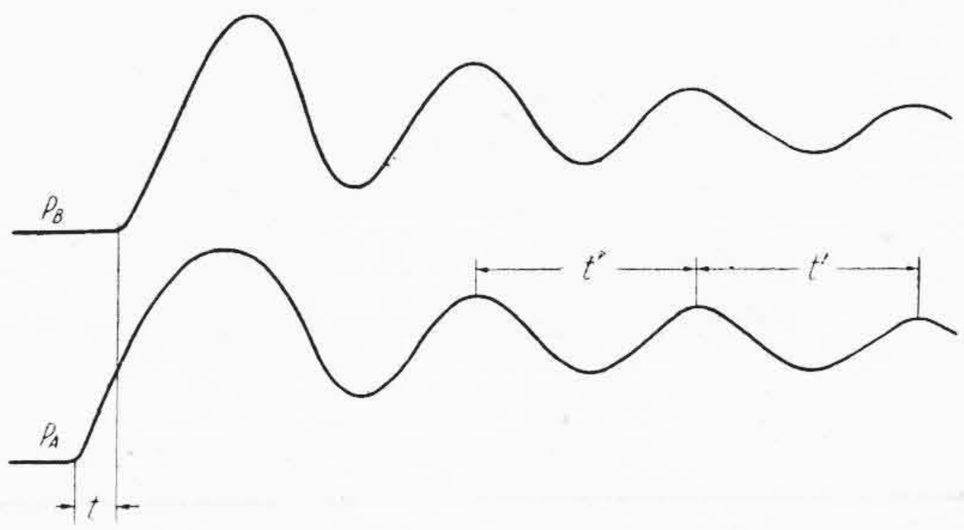
（2）　ポンプで揚水している場合

チエックバルブを使用し，ポンプで揚水して水槽内の水位を一定に保つた状態で電源を切り，ウオータハンマを起させる。

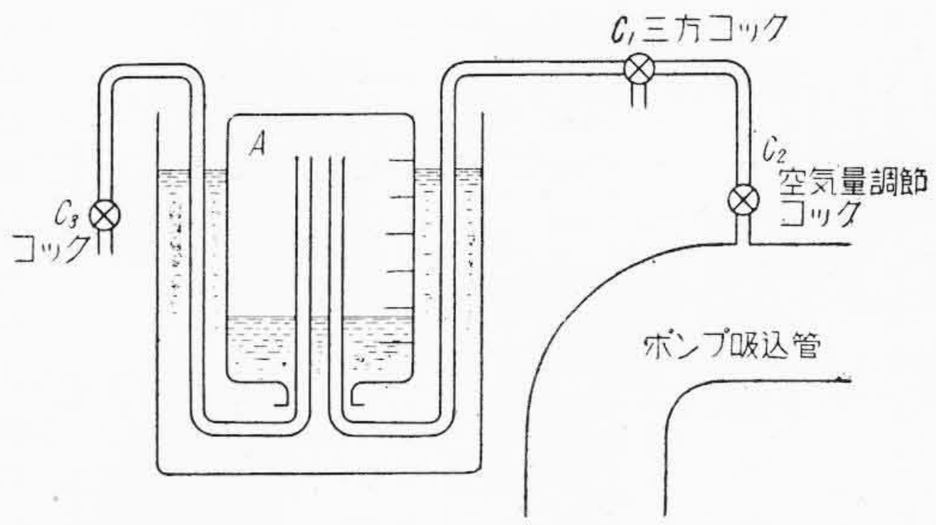
（3）　管内に空気を入れながら場水している場合

(2) と同様の方法で行う。管内に気泡を含ませるには**第4図**に示すような装置を用いた。すなわち三方コック C_1 を大気に通ぜしめ，空気量調節コック C_2 を適当に開いて吸込管内に吸込ませる。吸込空気量の加減は調節コック C_2 の開度を変えることによつて行われる。

調節コックの各開度に対する吸込空気量を知るには，コック C_1 を大気より遮断して瓶 A に通ぜしめ，瓶中の一定の空気量が減少する時間を測定した。なお，大気より直接に吸込む場合と，瓶中から吸込む場合とでは空気



第3図　A および B 点における圧力変化
Fig. 3.　Pressure Variations at A and B



第4図　空気吹込み装置
Fig. 4.　Air Inspiring Apparatus

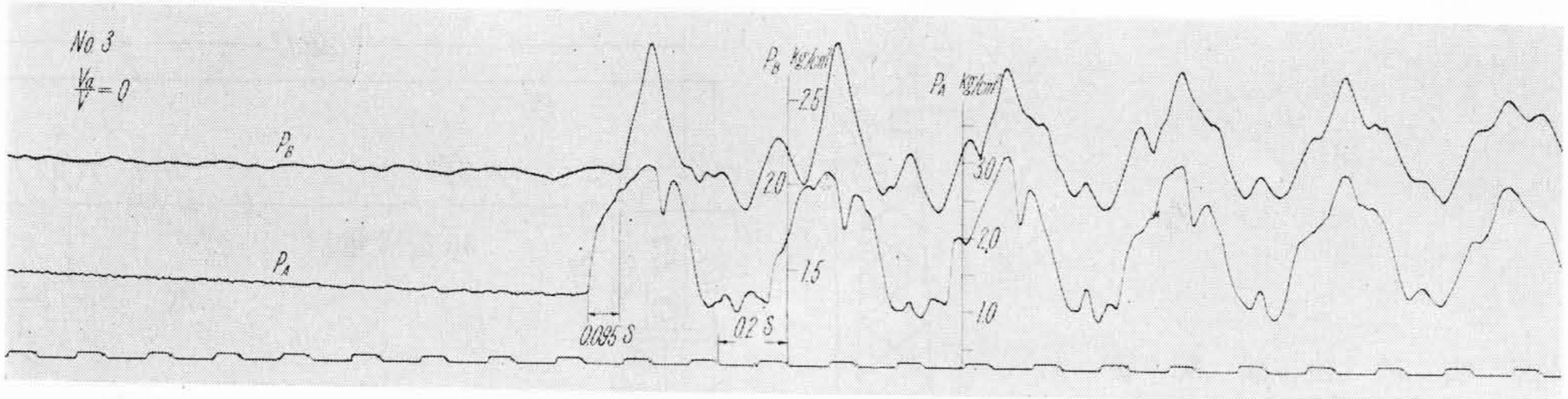
圧に多少の相違があるが，これは本実験においては無視した。

全体の流量は板型流量計[1]を用いて測定した。

なお，実験はそのたびごとにポンプで揚水中，導水管についている空気抜きをあけ，管内の残存空気を一掃してから行つた。

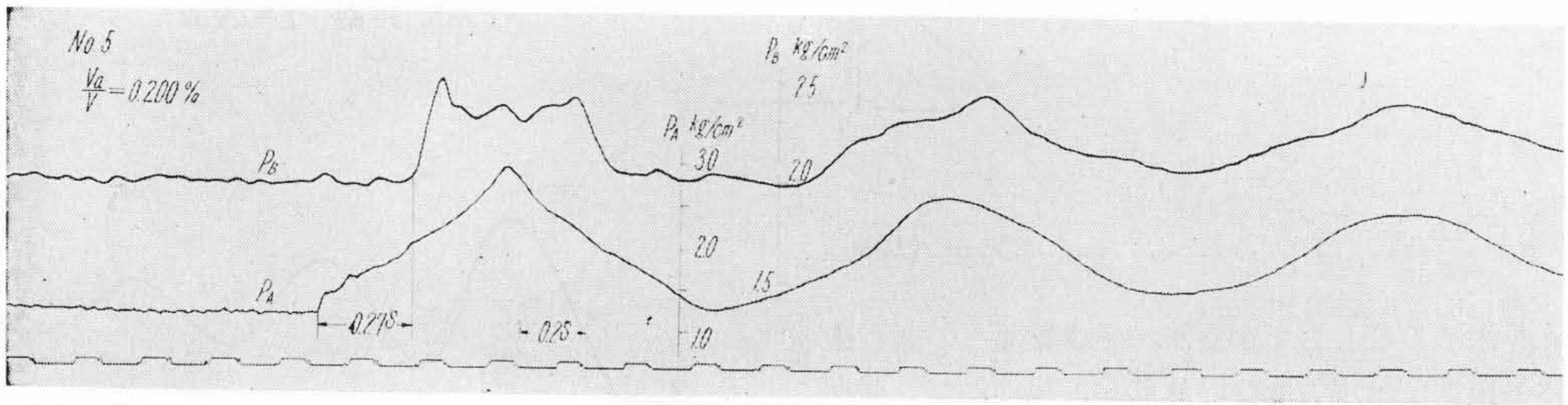
〔IV〕　実験結果および検討

第5図および**第6図**（次頁参照）はそれぞれ前章 (2)，(3) の実験によるオシログラムの例である。これらの実



第5図　空気を入れずに揚水している場合の圧力変化のオシログラム

Fig. 5.　Oscillogram of Pressure Variations (In Case of No Inspiring Air Bubbles)



第6図　空気を入れながら揚水している場合の圧力変化のオシログラム

Fig. 6.　Oscillogram of Pressure Variations (In Case of Inspiring Air Bubbles)

第1表　実　験　結　果　　Table 1.　Experimental Results

実験番号	吹込空気量 (3.3 kg/cm² において)	流　量	$\frac{V_a}{V}$***	t	a	実験番号	吹込空気量 (3.3 kg/cm² において)	流　量	$\frac{V_a}{V}$***	t	a
1	0* l/min	—	0 %	$9.5\times\frac{1}{100}$s	1,267 m/s	17	1.39 l/min	785 l/min	0.177 %	$27.5\times\frac{1}{100}$s	438 m/s
2	0*	—	0	9.0	1,337	18	2.48	766	0.324	37.0	325
3	0**	855 l/min	0	9.5	1,267	19	3.26	766	0.426	46.0	262
4	0.606	855	0.0709	14.0	860	20	4.21	766	0.550	51.0	236
5	1.71	855	0.200	27.0	446	21	1.00	807	0.124	20.5	587
6	3.20	740	0.432	40.0	301	22	0.226	740	0.0305	10.0	1,203
7	0**	582	0	9.5	1,267	23	0.577	766	0.0753	14.0	860
8	0.855	550	0.155	21.5	560	24	0.354	766	0.0462	11.0	1,094
9	0.842	807	0.104	18.5	650	25	0.431	766	0.0563	12.0	1,003
10	0**	807	0	9.5	1,267	26	0.424	785	0.0540	11.5	1,046
11	0.446	807	0.0553	12.0	1,003	27	3.37	785	0.429	46.0	262
12	2.69	807	0.333	41.0	294	28	3.37	807	0.418	45.0	267
13	1.64	807	0.203	29.0	415	29	1.81	766	0.236	32.0	376
14	0.352	807	0.0436	11.0	1,094	30	1.81	766	0.236	32.0	376
15	0.885	855	0.104	18.5	650	31	0**	785	0	9.5	1,267
16	0.195	807	0.0242	10.0	1,203						

*　水槽の水を管路端より自由に放出している場合

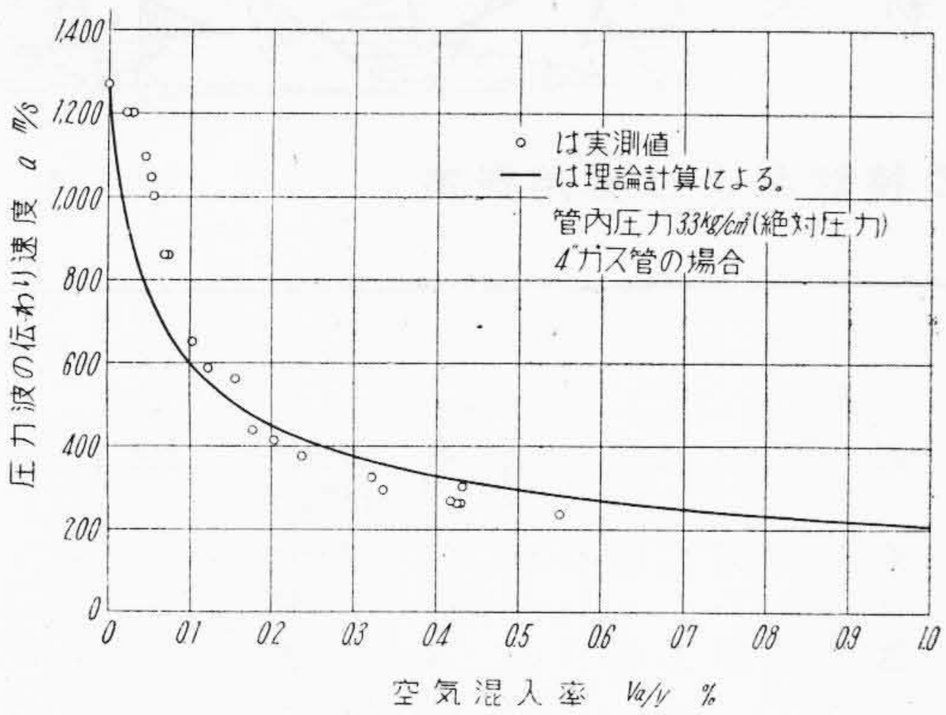
**　ポンプで揚水している場合

***　$\frac{V_a}{V}=\frac{\text{吹込空気量 (3.3 kg/cm}^2\text{において)}}{\text{流　量}}\times 100\ \%$

験結果を示したのが**第1表**である。a の値は水槽の水を自由に放出している場合には 1,302 m/s (2 回の実験の平均値)，空気を入れずに揚水している場合には 1,267 m/s (4 回の実験の平均値) であり，Alliévi の式により求めた値 1,279 m/s とほゞ同じになつた。

第7図は空気を入れながら揚水している場合の空気混入率に対する a の値を示したものである。○は実測値，曲線は理論式により求めた値である。これを見ればあきらかなように理論値と実験値とは比較的よく一致しており，僅かな量の空気を吹込むと a の値は急速に小さくなる。たとえば 0.5% において約 300 m/s である。

本実験においては，管内の気泡分布状態を観測することはできなかつたが，透明管を用いた他の実験の例からみても気泡はかなりよく分散していると推測される。



第7図　空気混入率と a との関係

Fig. 7. Propagation Velocity a of Pressure Wave in Pipe Line for Various Air Content (Theoretical and Experimental Results)

しかし〔II〕章の仮定のように完全に一様に分布しているとは考えられない。理論計算値と実験値とがやゝ喰違つているのは上に述べたような仮定した条件と実験時の状態との差異および本文(〔III〕章)にも触れたように大気から吸込む場合と瓶から吸込む場合の条件の差異などに原因すると考えられる。

なお，空気混入率の広い範囲にわたつて実験を行うことが望ましいのであるが，実験装置の都合で空気混入率がごく小さい範囲しか行えなかつた。

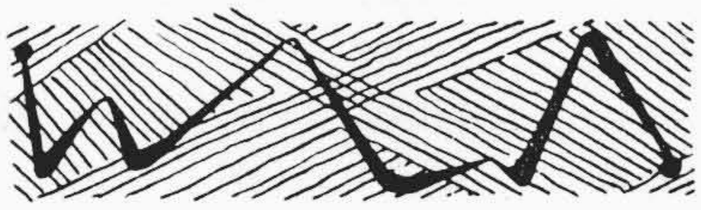
〔V〕 結　　言

導水管内に気泡が混入する場合に，圧力波の伝わり速度 a の計算式として従来行われているように Alliévi の式をそのまゝ用いるのは不合理であり，この場合には流体の体積弾性係数および比重量が気泡の混入する割合にしたがつて変化することを考慮して修正した Alliévi の式 (II章(8)式) を用いなければならない。この式を用いて計算した値と実験結果とはかなりよく一致し，導水管内に気泡が僅かに含まれても圧力波の伝わり速度 a の値は急激に減少し，空気中の音速以下になる。

参　考　文　献

(1)　草間，辻ほか2名：機械学会論文集 **20** 327(1954)

新　案　の　紹　介



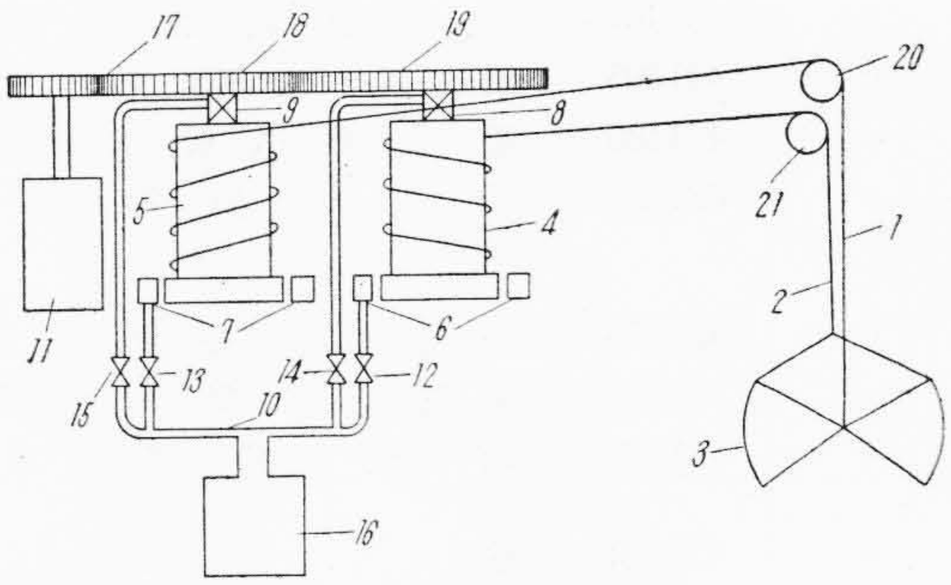
実用新案 第419039号

平川克己・佐川伊知夫・中野二郎

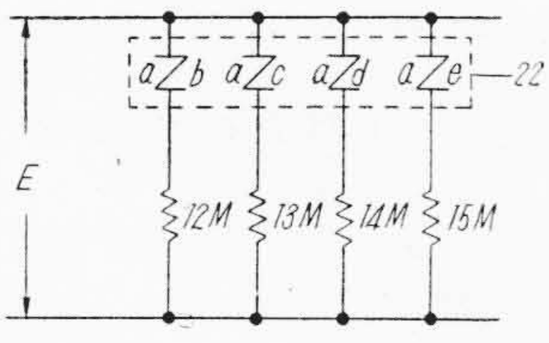
グラブバケット制御装置

この考案はグラブバケット制御装置としてこれまで本欄で再度にわたつて紹介した一連の考案の基本になつているもので，その権利範囲はつぎのごとくである。すなわち，電動機軸の歯車，クラッチを介した開閉巻胴および保持巻胴軸の三者を常にかみ合状態に保ち，各巻胴用ブレーキおよび上記各クラッチに対する圧気または圧油導管に各電磁弁を配し制御器により各電磁弁の附勢，消磁を制御せしめるようにしたグラブバケット制御装置の構造となつている。

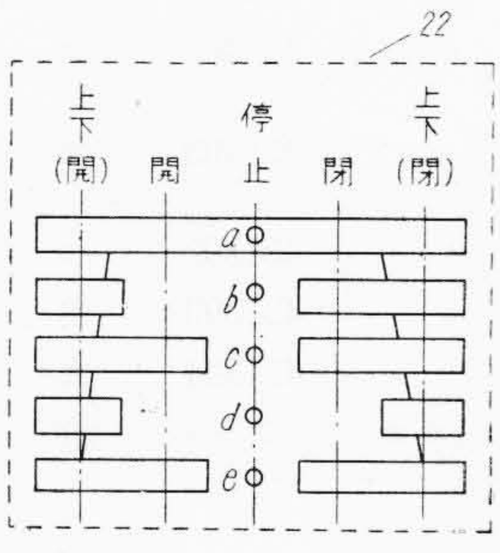
図中1は開閉用ロープ，2は保持用ロープ，3はバケット，4は保持用巻胴，5は開閉用巻胴，6は保持巻胴用ブレーキ，7は開閉巻胴用ブレーキ，8は保持巻胴用クラッチ，9は開閉巻胴用クラッチ，10は通気または通油管，11は駆動電動機，12および13は各巻胴用ブレーキ用電磁弁，14および15は各クラッチ用電磁弁，16は圧縮空気または圧油用のタンクで管10を介して各電磁弁にいたり，それより各ブレーキおよび各クラッチにおよぶようにした。17，18および19は11，7および6の各軸上の歯車，20および21はそれぞれロープ1および2の滑車を示す。つぎに22は制御器，12Mないし15Mは12ないし15の操作線輪でそのおのおのは22の接点 ab，ac，ad および ae を経て制御電源 E に連なる。なおグラブバケットの自由落下制御装置としては実用新案第419040号がある。(宮崎)



第　1　図



第　2　図



第　3　図

特許と新案

最近登録された日立製作所の特許および実用新案　(その 4)

(第32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	431354	遠隔指示計量装置	多賀工場	油谷源太郎 米岡正四郎	30. 7. 26
〃	431355	遠隔指示計量装置	多賀工場	油谷源太郎 米岡正四郎	〃
〃	431356	遠隔指示計量装置	多賀工場	油谷源太郎 米岡正四郎	〃
〃	431361	綜合水位指示計装置	多賀工場	篠原清之助 塙佐太男	〃
〃	431362	カーボンパイル電圧調整器	多賀工場	上村民夫	〃
〃	431363	カーボンパイル電圧調整器	多賀工場	上村民夫 田中貞之助	〃
〃	431364	フライホイールマグネトー	多賀工場	柿沼俊男 小室甲二郎	〃
〃	431365	遠隔指示計量装置	多賀工場	米岡正四郎 鈴木一夫	〃
〃	431370	ギャードモータ	多賀工場	古市光之	〃
〃	431371	竪型高速電動機給油装置	多賀工場	城宝為男	〃
〃	431382	計器用制動装置	多賀工場	西垣光夫	〃
〃	431383	洗濯物絞り機安全装置	多賀工場	大泉稔	〃
〃	431384	計器制動装置	多賀工場	西垣光夫	〃
〃	431395	直流高出力電圧安定装置	多賀工場	榊米一郎 只野文哉	〃
〃	431400	タンク型真空掃除機	多賀工場	安川昌平	〃
〃	431401	記録計用指針保護装置	多賀工場	矢内博	〃
〃	431405	耐久磁石を用いた電子レンズ系	多賀工場	木村博一	〃
〃	431406	電子顕微鏡試料微動装置	多賀工場	藤岡健夫	〃
〃	431353	X線間接撮影用暗箱	亀戸工場	和田正俊 小林長平 松本一雄	〃
〃	431376	螢光灯の長寿命点灯装置	亀戸工場	西岡博	〃
〃	431377	螢光灯の長寿命点灯装置	亀戸工場	西岡博	〃
〃	431378	軸受部防水装置	亀戸工場	益田貞三 長島英男	〃
〃	431373	端子板	戸塚工場	清宮弘基	〃
〃	431381	電視装置による水位観察装置	戸塚工場	角野正夫	〃
〃	431357	同軸ケーブル中心導体接続部	日立電線工場	庄司一男	〃
〃	431358	同軸ケーブル中心導体接続部	日立電線工場	庄司一男	〃
〃	431402	伸線機の空冷装置	日立電線工場	野村弘 北条勤	〃
〃	431403	伸線機における冷却装置	日立電線工場	野村弘 北条勤	〃
〃	431392	パイプ継手ソケット用自動固定装置	桑名工場	脇山茂	〃
〃	431393	表面検査用テストパターン	中央研究所	西谷邦雄	〃
〃	431394	真空コック	中央研究所	北川公	〃
実用新案	431380	超遠心機駆動装置	中央研究所	須藤卓郎	30. 7. 26