垂直振動管による揚液効果に関する研究*

(第2報, 液体上昇特性におよぼす吸込管幾何形状の影響)

橋本 弘之**, 佐藤 六郎**, 檜山 浩国***

The Effect of Pumping in a Vertically Vibrating Pipe (2nd Report, The Effect of Suction Pipe Geometry on the Characteristics of Liquid Rising)

by Hiroyuki HASHIMOTO, Rokuro SATO and Hirokuni HIYAMA

The liquid rising effect which is investigated in this study still remains to be clarified. The objective of the present study is to obtain fundamental design data for the vibration pumping system. The experiment revealed that liquid rising could occur in a suction pipe line under the condition that the suction pipe was cut in two and the lower half was fixed so that only the upper half could be vibrated. The effect of the scale of the lower half suction pipe on the characteristics of liquid rising, was also made clear experimentally. By comparing the experimental results with the theoretical analysis, the performance of the new pumping machine could be estimated.

Key Words: Fluid Vibration, Unsteady Flow, Pumping Effect, Vibrating Pipe, Spring Control Valve, Pump, Liquid Lift

1. 緒 言

上端にはばね制御弁を設けた直管をある特定の振動条件のもとに鉛直に管軸方向に振動させることによって、管内の液体を揚液させることができる。このような揚液効果に対して著者らは、前報でその揚液原理の理論解析ならびに吸込振動管の短縮による揚液効果への影響の実験などを行ってきた⁽¹⁾⁽²⁾。それらの結果によればこのような揚液現象に対しては、加振条件の選定が重要であり、それに基づく吸込部の構造上の改善によって揚液装置としての大幅な性能向上が期待できることなどが示唆された。

他方、このような揚液効果を利用して実用に供し得るポンプを設計するには、その運転範囲を規定する振動部の管径や振動部の長さ、あるいは、吸込流路の断面積変化に対する管内の液体の上昇特性の変化などをあらかじめ定量的に予測する必要がある。しかし、ここで対象としている揚液方式は従来用いられてきたいづれの揚液方法とも異なるので、その揚液効果につい

ては、いまだ不明な点が多い。特に、ポンプ構造上の機能に関連する吸込流路幾何形状の液体上昇特性に及ぼす影響についてはほとんど未知の状況である。

本報は振動ポンプとしての基礎設計資料を得ることを目的として、ばね制御弁付き振動管が単調振動するときに、振動部の管径や長さを変えても、あるいは振動管を振動部より大きな管径を有する静止管に接続しても十分揚液し得ることを明らかにするとともに、このような吸込管の幾何形状の変化に対する揚液可能な運転範囲を定量的に明確にした。さらに、これらの実験結果を先に示した理論解析結果と対比することによって揚液特性の理論的予測の可能性について吟味した。

2. 実験装置

実験装置は揚液特性に対する寸度効果の影響を明確にするため小形(振動管の内径 19 mm, 全管長 0.6 m 以下)と大形(振動管の内径 50 mm, 全管長 1 m 以下)のものを製作し、両装置を用いてそれぞれの管内の液体の上昇試験を行った。小形装置は前報⁽¹⁾で示したものとほぼ同様のものであるから、ここでは大形装置のみを示す。図 1 は大形装置の概略図である。振動管①の上端には、調節ねじ⑤で外部から初期縮み代を変え

* 昭和 60 年 3 月 16 日 東海支部第 34 期総会講演会において講演、原稿受付 昭和 60 年 4 月 18 日。

** 正員、東北大学高速力学研究所 (〒980 仙台市片平 2-1-1)。

*** 正員、荏原総合研究所 (〒251 藤沢市藤沢 4720)。

られるコイルばね③によって、制御弁④が圧着されており、振動管は加振棒⑦を介して動電形加振機⑧で鉛直方向に加振される。ガイド⑫は加振時の振動管の横ぶれを防止している。加振機の加動部は上からばね⑩で釣り上げられており、振動管の静荷重を打ち消している。本実験における加振機の運転範囲は、振動数 0~100 Hz、振幅 0~25 mm である。弁室⑪は支柱⑨に設けた溝に沿って上下させることにより、吸込管の没水深さを変えられるようになっている。水槽⑥は振動管の直径に比較して十分大きく、オーバフロータンクにより水位は常に一定に保たれている。

図2は吸込管が振動部①と急縮小断面を有する静止部②の両者から構成される場合の詳細図である。静止部②は下端を液中に挿入した状態で支柱に固定されており、Oリングとフェルトリングによって振動部①とのしゅう動部を密封している。供試振動管および静止管は透明アクリル樹脂製で液面の上昇の様子が肉眼ならびに光学的に観察できるようになっている。振動管は管長 L_v が 0.15 m から 0.64 m の直円管を用い、静止管は振動管より内径の大きい円筒流路から振動管と同一内径の円筒流路へ急縮小するものを用いた。実験はこれらの管長と通路断面積を種々に変えて、表1、2の組合せによって行った。振動管の変位、速度および加速度は加速度変換器で、管内気柱圧力は管壁に取付けたひずみゲージ式圧力変換器で、弁の変位は渦電流式非接触変位計でそれぞれ測定した。これらの波形は電磁オシログラフおよびFFTアナライザを用いて

分析された。

3. 実験結果

本振動ポンプの揚液原理についてはすでに一次元モデルに基づいた理論解析を試み、吸込部が断面一様な吸込振動管のみから構成されている場合は実験結果とも一致し、理論解析の妥当性が裏付けられている⁽¹⁾。一方、振動管の負荷特性を改善するため、吸込部を同一断面を有する振動部と静止部に分け、振動部の長さを短くしても揚液できることが実験から確認されている⁽²⁾。したがって、ここでは前報の理論解析に基づいて数値計算を行い振動管に静止管を接続した場合の揚液特性をどの程度予測できるのかを具体的に示す。次に、吸込管の途中に急縮小部が存在する場合の揚液特性の変化を定量的に明らかにする。

表1 吸込直円管寸法 ($J=1$)

$$D_1 = D_2 \quad (J=1.00)$$

	H m	L_v m	D_1 m
a	0.64	0.64	0.050
b	0.53	0.53	0.019
c	0.53	0.53	0.050
d	0.64	0.32	0.019
e	0.64	0.15	0.019
f	0.53	0.15	0.019
g	0.53	0.34	0.050

表2 吸込急縮小管寸法 ($J \neq 1$)

$$D_1 \neq D_2 \quad (J \neq 1.00)$$

$$H=0.60 \text{ m}, D_1=0.019 \text{ m}, L_v=0.15 \text{ m}$$

D_2 m	$J = \frac{D_1}{D_2}$	L_1 m
0.032	0.59	0.20
0.052	0.37	0.20
0.072	0.26	0.20
0.102	0.19	0.20
0.072	0.26	0.26
0.072	0.26	0.31
0.072	0.26	0.36
0.072	0.26	0.46

図1 実験装置の概略図

図2 吸込管の詳細図

3・1 最適加振振動数 揚液装置として好適な運転条件は、できるだけ小さな駆動入力で振動管上端に設置した弁が開放するようにすればよいから、この状態を実現するためには振動管の加振振動数をできるだけ管内液柱の共振点に近づけて、管内の圧力振幅を大

きくして運転すればよい。したがって、ここでは管内圧力振幅が最大となる加振条件を最適揚液条件と呼ぶことにする。図3(a)は $J=D_1/D_2=1$ における無次元揚液高さ $Y'=Y/L$ (Y :基準液面からの管内液面上昇高さ)と最適揚液無次元振動数 $f_a=f_a\sqrt{L/g}$ (f_a :管内圧力振幅が最大となる最適加振振動数、 g :重力の加速度)の関係について先に求めた理論値と実験値を対比させて示したものである。図3(a)中の記号は図2および表1, 2に示されてある。また、実線は前報で求めた最適揚液条件(共振点)の理論値で次式で示される。

$$f_a = [\{\gamma/(4\pi^2)\}(P_n' - Y')/\{(1 - Y') \times (Y' + S')\}]^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $S'=S/L$, $P_n'=P_n/(L\rho_1 g)$, P_n :基準液面上の圧力、 S :没水深さ、 γ :ポリトロプ指数、 ρ_1 :水の密度である。式(1)は弁設定圧力 $P_e[P_e=(kz_1 + mg)/(AL\rho_1 g)$, k :ばね定数、 z_1 :ばね初期縮み代、 m :弁の質量、 A :管断面積]に無関係であり、 f_a は L, S, P_n が定まれば、管の接続の有無に無関係に管内の気柱-液柱系の共振点に対応することを示している。図3(a)から、最適振動数は各液面高さによって異なり、液面高さの変位に対して最小値をもつ曲線となることがわかる。また、接続部がない場合はもちろんのこと接続部のある場合もその管軸方向の位置によらず実験値は理論値に良く一致することから、先の理論解析は $J=1$ であれば管の接続の有無に無関係に適用できることが裏付けられる。すなわち、 f_a は基準液面上の管長 L および Y が同じであれば、振動部の長さ L_v によらず同じ値になることがわかる。他方、図3(b), (c)は縮小部が存在すると f_a が大きく変化することを示している。図3(b)は管軸方向の位置 L_1 ($L_1=L_1/L$)および S を一定にして静止管の縮小率 J を変化させたときの f_a と Y' の関係を示す。 f_a は J が小さくなるほど大きく、 Y' が L_2 に一致する位置($L_2=1-L_1$, 管内の液面がちょうど急縮小部に一致する位置で図3(b)の横軸上の矢印で示される)で極大となる。図3(c)は図3(b)と同様の関係を示したもので、 $Y'<L_2$ では f_a は L_1 が大きいほど大きい、 $Y'>L_2$ になると逆に小さくなる。また、 f_a は $Y'=L_2$ で極大となるが、その極大値は L_1 によってあまり変わらない。これらの図から明らかなように加振振動数を一定に設定して揚液する場合は、その設定振動数を小さくするといずれの吸込管においても Y' が1付近で揚液しづらくなる。

図4(a)は、揚液開始時($Y'=0$)における f_a と無

(a) $J=1$

(b) $L_1=0.40$

(c) $J=0.26$

図3 最適加振振動数と上昇高さ

次元没水深さ $Sp_i g/P_n$ の関係である。式(1)から得られる理論値と実験値は良く一致しており、 $J=1$ であれば f_a は管径、管長、管接続の有無に無関係に $Sp_i g/P_n$ のみによって定まることがわかる。これは本研究が対象としている気柱-液柱振動系における等価ばね定数が $\gamma P_n A/L$ 、等価質量が $\rho_i S L$ になるから、この系の固有角振動数は $\sqrt{\gamma P_n / (\rho_i S L)}$ となることに対応している。したがって、図4(a)からも明らかなように振動系の質量に比例する液柱 S が小さくなるとこの系の固有振動数は増加する。

図4(b)は $Y'=0, J<1$ の場合の f_a を示しており、

(a) $J=1$

(b) $L_1/H=0.33$

(c) $J=0.26$

図4 最適加振振動数と没水深さ

急縮小部があると、式(1)で与えられる一次元理論解とは一致しなくなる。しかし、 J が変化しても縮小部の位置 L_1 が変わらなければ f_a は変化しない。理論と実験値との差は主として縮小部での二次元性の影響によるものと推察される。図4(c)は急縮小部の管軸方向の位置 L_1 が変化する場合で、 f_a は L_1 によっても大きく変化することがわかる。横軸上の矢印は没水深さ S が急縮小部と同じ位置 ($S=H-L_1$) になることを示している。 f_a は図3(c)の場合と同様に S (すなわち、静止液面) が縮小部に近づくとき極大値を取り、 S が縮小部より大きくなると急激に減少する。また、 S が縮小部より小さいときは L_1/H が大きいほど f_a も大きくなる。以上の図から無次元没水深さ $Sp_i g/P_n$ に対する無次元最適振動数 f_a は急縮小部の縮小率が変わってもほとんど変化しないが、急縮小部の位置によって大きく異なることがわかる。

3.2 揚液開始条件 図5は揚液開始 ($Y'=0$) における無次元加振加速度 $G=\omega^2 \cdot z_0/g$ (z_0 : 加振振幅) と加振振動数の関係について理論値と実験値とを対比したものである。揚液開始に必要な加振加速度は、理論解析結果⁽¹⁾によれば、弁設定圧 P_e および L, S によって異なり、図5中の曲線のように異なる。いずれの加振条件に対しても実験値は理論値より大きくなるが、

図5 揚液開始時における加振加速度

図6 加振振動数と上昇高さ ($J=1$)

両者は定性的に一致している。このような傾向は吸込管が振動管のみの場合とほとんど同様で、管接続による差異はあまり認められない。また $G_{Y=0}$ が最小になる振動数は最適揚液条件 ($f=f_a$) に相当し、理論値と一致している。また、 $f < f_a$ における $G_{Y=0}$ の f 変化に対する増加割合は $f > f_a$ のそれに比して緩やかである。

3.3 液面上昇高さ と 揚液限界範囲 図6は $J=1$ で接続部がある場合の無次元加振加速度 $G/G_{Y=0}$ と無次元揚液高さ Y' の関係を、 P_e, S を一定にして振

図7 加振振動数と上昇高さ ($J=0.59$)

図8 上昇可能最小加振振動数

図9 上昇限界範囲 ($J=0.19 \sim 1$)

動数 f を変えて示したものである。この場合の $Y'=0$ における最適揚液振動数は約 9 Hz であり、加振振動数がそれより低い 7, 8 Hz の場合は、液面は G の増加に対して最初急激に上昇し、 Y' が 1 に近づくにつれて緩やかに上昇する。加振振動数が高い 10 Hz の場合は、液面は初め緩やかに上昇するが、 Y' がある位置に達するとその後は急速に $Y'=1$ まで上昇する。このような傾向は吸込管に接続部がない場合もまったく同様で、液面上昇高さについても管径や振動部の長さ変化に伴う差異はほとんど認められない。図7は急縮小部がある場合の液体上昇高さを示すもので、図6に示す直管の場合と同じような傾向が見られる。図8は液面が $Y'=0.86$ まで上昇するのに必要な最小の加振加速度 G_m について理論⁽¹⁾と $J=1$ の場合の実験を対比したものである。流体損失を考えると当然のことながら実験値は理論値よりも大きくなるが、定性的には両者は一致している。図8中の条件のもとでは $f\sqrt{L/g}=1.9$ ($f=8$ Hz) 程度で揚液するのが最も妥当と考えられ、この値は $Y'=0$ における最適振動数 (図8中の一点鎖線) に近い値であり、通常は、このよう

図10 上昇限界範囲 ($L_1=0.40 \sim 0.92$)

図11 上昇速度 ($J=1$)

な一定の振動数で揚液してもさほど揚液性能の低下をきたさない。図9は吸込管形状の違いに対する液面上昇限界を示すもので、無次元液面高さ Y' と無次元加振振動数 $f' = f\sqrt{L/g}$ の関係を J を変化させて示したものである。 J が大きいほど $Y'=1$ まで揚液できる加振振動数の範囲は広がるが、 J が小さくなると液面上に発生した表面波の振幅が大きくなり、上昇しにくくなる。本実験範囲内では通常 J が0.25以下では管上端までの揚液が不可能であった。また、図10は J を一定にして L' を変化させた場合を示すもので、 L' が大きいほど $Y'=1$ まで揚液できる加振振動数の範囲は広くなるとともに、若干、振動数の高いほうへと移行する。

3・4 液面平均上昇速度 図11は無次元加振加速度 G と無次元液面上昇高さが $Y'=0$ から $Y'=0.86$ に至るまでの時間 T から得られる平均速度 $V_m = Y'/T$ の無次元表示 $V'_m = V_m/(2\pi/L)$ を示したものである。ここに示した理論値は、振動の各周期ごとに管内平均圧力の減少量に相当したヘッドだけ液面が上昇すると考え、理論⁽¹⁾で得られた気柱圧力の時間変化を積分して得られる圧力減少値を時間で割った平均速度である。図11より実験値と理論値は定性的に一致しており、 V'_m は管接続の有無によらずほぼ G に比例することがわかる。また、この V'_m は f が小さいほど大きい。したがって、平均上昇速度を増加させるには、大きな G で加振すればよいことになる。しかし、平均上昇速度は加振振動数によって異なり、例えば加振力が同じでも、加振振動数によって異なる。

以上に示したように一次元非粘性流と仮定した前報の理論結果は $J=1$ であれば実験とは比較的良く一致し、液体上昇特性に対する管径ならびに接続部の有無や振動管の長さの影響はほとんどなく、液面上の吸込管全体の長さ L と没水深さ S が上昇特性に対して支配的である。また、吸込管の途中に急縮小部が存在し

ても十分揚液できるが、その揚液特性は $J=1$ の場合と異なったものになることを実験的に明らかにした。

4. 結 言

ばね制御弁付振動管の液体上昇特性に対する基礎設計資料を獲得する目的で、振動管の幾何形状の影響について究明した。以下にその結果を要約する。

(1) 振動管の液体上昇特性は、吸込管の途中に急縮小部が存在しなければ管径および振動管のみの長さにはほとんど影響を受けず管全長の変化によって変化し、一次元非粘性流の仮定に基づいた前報の理論解析結果と良く一致する。

(2) 加振加速度と揚液高さとの関係は加振振動数が小さいと吸込管下部で上昇しやすく、振動数が大きいと吸込管上部で上昇しやすくなる。

(3) 本実験条件のもとでは、縮小率 J が0.25以上であれば吸込部に急縮小部が存在しても、吸込管上端まで揚液することができる。

(4) 任意の没水深さに対する揚液開始の無次元最適振動数は吸込部の縮小率が変化しても変わらないが、急縮小部の位置によって大きく変化する。また、管内液面が急縮小部付近にあるとき、最適振動数は急激に大きくなり、この点で極大となる。

(5) 液面が吸込管上端まで上昇する加振振動数の範囲は縮小率が大きいほど広がり、この範囲は縮小部位置が低いほど高い振動数領域に移行する。

(6) $J=1$ における液面平均上昇速度は管径に無関係で、加振振動数が一定のもとでは加振加速度に比例し、加振振動数が変われば変化する。

文 献

- (1) 橋本・佐藤, 機論, 50-457, B (昭59), 2013.
- (2) Hiyama, K., Hashimoto, H. and Sato, R., *Proc. China Jap. Vib. J. Conf.*, Shanghai, (1984), 351.