二相流により誘起された垂直 U 字形配管の振動解析*

平 松 力**, 古 村 義 彰**, 伊 藤 敦***

Analysis of Two-Phase Flow Induced Vibrations in
Perpendicular Supported U-Type Piping Systems

by Tsutomu HIRAMATSU, Yoshiaki KOMURA, and Atsushi ITO

The purpose of this analysis is to predict the vibration level of a pipe conveying a two-phase flowing fluid. Experiments were carried out with a perpendicular supported U-type piping system, conveying an air-water two-phase flow in a steady state condition. Fluctuation signals are observed by a void signal sensor, and power spectral densities and probability density functions are obtained from the void signals. Theoretical studies using FEM and an estimation of the exciting forces from the PSD of void signals, provided a good predictional estimation of vibration responses of the piping system.

Key Words: Two-Phase Flow, Vibration of Piping System, Void Signal, Probability Density Function

1. 結 言

流体により誘起される配管系の振動の一つに、管の曲がり部分を通過する気液二相流が発生原因になるものがある。例えば、原子力発電用熱交換装置その他で発生する配管内には、垂直方向に気液二相分離の状態で見ることがしばしばあり、これが原因で振動し破損をもたらすことがある。

二相流により誘起される配管の振動を取扱った研究^{(1)~(3)}は、現在までかなり見られる。また二相流の検出などの実験的研究もすでに多く発表されている。しかし、まだ現在でもなお活発に論文が寄稿されており、問題点は実用段階での解決のほうへ発展している。

振動解析には、共振などを避けるべく固有振動の問題としての配管系を対象とすると、伝達マトリックス法⁽⁴⁾、有限要素法などでほとんどの問題が研究されつくしていると思われるが、流体関連振動の原因となる加振力については、境界領域のため問題を残している。

本研究は、実験を主として二相流体の U 字形に曲がる部分での加振力に注目し、簡単な仮定による理論計算を用い気液二相流により、熱交換器などの配管が振動する挙動の基本的研究を行ったものである。

2. 実験装置および実験方法

図 1 に本研究に用いた垂直 U 字形配管の概略寸法と実験装置および測定のためのブロック線図を示す。

配管は透明な硬質塩化ビニル管（内径 16 mm，外径 22 mm）で、管内の流動様相の可視化を図った。二相流の発生には、加圧された空気と水とを混合させ、垂直 U 字形管を上昇、降下させて作った。空気流量および水流量の調整は、それぞれのバルブ A，B の開閉操作により行った。

固有振動の測定は図 2 に示すロードセル付ハンマと配管に固定した加速度ピックアップの出力をチャージアンプを通してデジタル信号処理装置により解析した。また、図 3 に振動測定点を示す。固有振動の測定には、管内に充水させた場合と、空管とについて打撃により振動数と振動モードを求めた。

管内に二相流のある動作状態の管の振動には、図 1 に示すように管壁に加速度ピックアップを取付け解析器を用いて振動加速度のパワースペクトルを測定し

* 昭和 59 年 8 月 28 日 第 927 回講演会において講演、原稿受付 昭和 59 年 2 月 27 日。

** 正員、福井大学工学部（〒910 福井市文京 3-9-1）。

*** 正員、(株)神戸製鋼所

た。また、流動様式を測定するために、図 4 に示すボイドセンサを工夫した。センサは針の先端のみが感じるよう樹脂により被覆したもので、水と空氣の電気抵抗の差を利用して、到来二相流の時間信号の作成を図った。また、センサ針先端の間隔を可変にし、氣泡の直径が感じとれるように工夫した。

3. 測定結果

3・1 ボイドセンサによる信号 図 5 に水と空氣の体積流量 v_i , v_g および流量比 $v_i/(v_i+v_g)$ を 1.0 から 0.1 まで変化させ、さらに各流量比でセンサの間隔 d を変えたときのボイド信号の波形を示す。

図 1 測定装置の概略図

図 2 固有振動の測定

図 3 振動測定点

図 5 において、流量比 $v_i/(v_i+v_g)$ が 1.00, 0.71 ではボイド信号にあまり変化が現れず、氣泡が細かいいわゆる氣泡流 (Bubble flow) を意味する。流量比が 0.65~0.19 に対し、 d/D が小さくなる、すなわち電極間隔が小さくなるに従って、氣泡の存在を感知したいくつかのピークを生じ、その傾向は $v_i/(v_i+v_g)$ が小さくなる、すなわち氣相が増加するとはげしくなる。流量比が 0.51 までは管の中心軸に成長した氣泡を感じ、流量比が 0.41 程度になると、軸付近以外にも氣泡が発生していることを示し、さらに 0.31 および

図 4 ボイドセンサの概要

図 5 二相流の体積流量比とボイド信号波形

0.19 ではかなり径方向に気泡の広がり感知でき、気泡の大きな成長が読みとれる。この範囲の流れをスラグ流 (Slug flow) といい、大きな気泡のまわりに小気泡を付随した流れとなる。流量比が 0.11 ではもはや d/D による変化は見られず、大気泡と液相とが交互に到来するいわゆるフロス流 (Froth flow) の様相が波形より読取れる。

さらに、図 6 に示すように、ボイド信号の確率密度関数 (PDF) およびパワースペクトル密度 (PSD) にも流量比 $v_i/(v_e+v_g)$ に対する変化の様相が見られる。PDF によれば、流量比が 0.31 以下になると液相と気相とに分離して二つのピークが現れ、比が 0.11 では気相のほうが大きなピークとなる。さらに、 d/D による相違も、図 5 のボイド信号の波形に現れたもの

図 6 ボイド信号による確率密度関数 (PDF) とパワースペクトル密度 (PSD)

図 7 ボイド信号の確率密度関数

図 8 二相流体モデル

と同様な傾向を示すことがわかる。PSD のほうでは、比が小さくなると単一のピークになる傾向があり、加振力としての周期性が期待される。

次に図 7 のように、PDF の液相部ピークの高さを n_l 、気相を n_g として読みとり、次式のように正規化する。

$$\left. \begin{aligned} n_l^* &= n_l/n_0 \\ n_g^* &= n_g/n_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

n_0 : サンプル数

図 8 に気液が分離した二相流体モデルを示す。このモデルは気相 A、液相 C および 中間相 B とよりなっており、図 9 で示されるように、液相部の占める割合は $v_i/(v_i+v_g)$ で近似できる。また、この比が 0.3 を下まわる領域では前述のように気液両相の分離が行われる。一方、図 10 に示すように、 n_g^* は気流の分離したこれらの領域でも $v_g/(v_i+v_g)$ の比に対してかなり小さく現れている。これらの関係から図 8 の二相流モデルの妥当性がわかる。

以上に示した、ボイド信号を処理した解析結果より、二相流体の流れにより配管に及ぼす加振力のモデ

表 1 打撃測定による固有振動数と計算値 (Hz)

		1st mode	2nd mode	3rd mode	4th mode
Empty pipe	Calculation	3.20	12.00	13.48	18.55
	Experiment	3.16	—	—	18.17
Full pipe with water	Calculation	2.42	8.98	10.06	14.24
	Experiment	2.57	8.94	—	14.52

図 9 n_l^* と体積流量比

図 10 n_g^* と体積流量比

ルを作ることができる。

3・2 振動測定結果 打撃により求めた充水および空の配管の一〜四次に対する固有振動数を示す。計算値は管の減衰も考慮し、有限要素法によって求めたもので後述する。

空管では計算値の二次、三次に相当する固有振動数は現れず、また、充水管では計算値の三次に相当する振動数が得られなかった。

図 11 に固有振動数に対する振動モードの測定結果と計算結果とを示した。空管、充水管ともに測定に現

図 11 振動モードの測定結果と計算結果

図 12 配管上部の振動測定結果

われた振動数とモードとはよく一致している。

図 12 に配管系上部の流体通過中の振動測定結果を示す。一次および四次に相当する振動数では、流量比 $U_1/(U_1+U_0)$ に広範囲にわたり計算値とよく一致して現れ、特に流量比が 0.1~0.2 では大きな振幅を示す共振状の振動成分が見られる。二次、三次では計算値より低い振動数でかなりの範囲にわたり、大きい振幅が現れている。計算と測定の振動数の相違は、前述の静的状態でも現れたが、流動状態でも同じ結果が生じている。

この原因として計算では配管系の全域に質量が均一に分布していると考えたが、実際は流動中の水の質量分布が一様でないためと考えられる。以上の結果から振幅の大きな一次振動について注目して振動解析を行うことにする。

図 13 加振力モデル

図 14 加振力の波形

図 15 ボイド信号と加振力

図 16 配管の振動加速度とボイド信号の PSD

4. 理論計算と考察

4.1 振動計算式 配管系の固有振動数, 振動モードおよび強制振動の振幅の計算には有限要素法を用いた。また振幅応答を求めるために, 減衰の実測値をもとにして組み込んだ⁽⁵⁾。

運動方程式は次のようになる。

$$[M]\{\delta\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{p\} \quad \cdots \cdots (2)$$

$[M]$: 質量マトリックス, $\{\delta\}$: 節点変位ベクトル

$[C]$: 減衰マトリックス, $\{p\}$: 加振力ベクトル

$[K]$: 剛性マトリックス

まず, 固有振動数およびモードを求めるため, $\{p\}$ を零として, 式(2)を次のように変形する。

$$[K]\{\delta_0\} = \lambda[M]\{\delta_0\} \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに, $\lambda = \omega_0^2$ (固有角振動数)

$\delta_0: \{\delta\} = \{\delta_0\}e^{j\omega_0 t}$ の振幅

式(3)をコレスキー分解法を用いて次式を得る。

$$([U]^T)^{-1}[K][U]^{-1}\{\eta\} = \lambda\{\eta\} \quad \cdots \cdots (4)$$

$$([M] = [U]^T[U], \{\eta\} = [U]\{\eta_0\})$$

また, 定常応答では, 式(2)に次のように複素ばね定数の形に減衰を組み込み, 次式を得る。

$$[-\omega^2[M] + (1 + j\gamma)[K]]\{\delta_0\} = \{p_a\} \quad \cdots \cdots (5)$$

$\{\delta_a\}, \{p_a\}$: 定常応答振幅および加振力振幅

γ : 複素ばね定数の損失係数

次に, 加振力を求める。

図 13 に加振力の計算のためのモデルを示す。フロス流のような流れが長さ l で繰返され, 流速を v とすると, 曲がり部 I, II に作用する x 軸方向の力 P_I, P_{II} は図 14 のようになる。

$$|\vec{v}_1| = |\vec{v}_2| = |\vec{v}_3| = v$$

$$v = v_g + v_l$$

$$l = vT \quad \cdots \cdots (6)$$

T : 液相到来周期

表 2 配管の振動変位振幅の計算値と測定値

$\frac{U_1}{U_1+U_2}$	Frequency Hz	$\frac{\rho_l}{\rho_v}$	P_a N	$25\sin(\omega d/l)$	R_N	Amplitude mm	
						Calculation	Experiment
0.25	2.75	0.68	1.56×10^3	0.86	0.91×10^{-2}	4.67	5.61
0.19	2.75	0.63	3.87×10^3	0.66	1.61×10^{-1}	5.70	7.68
0.18	2.75	0.62	4.51×10^3	0.83	2.32×10^{-1}	7.96	10.40
0.16	2.75	0.61	9.08×10^3	0.76	4.21×10^{-1}	12.80	8.87
0.15	2.75	0.60	9.32×10^3	0.96	3.86×10^{-1}	11.00	10.70
0.14	2.75	0.59	1.19×10^4	0.64	4.50×10^{-1}	12.90	11.40
0.13	2.75	0.58	1.03×10^4	0.60	3.58×10^{-1}	9.75	8.23
0.12	2.75	0.57	1.45×10^4	0.56	4.64×10^{-1}	12.20	9.29
0.11	2.63	0.56	1.89×10^4	0.50	5.30×10^{-1}	8.95	7.91

図 17 配管上端の振動変位振幅の計算と測定

$P_I(t), P_{II}(t)$ をフーリエ級数展開すると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} P_I(t) &= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} P_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \\ P_{II}(t) &= -A_0 - \sum_{n=1}^{\infty} P_n \sin(n\omega t + \varphi_n + \alpha) \end{aligned} \right\} \quad \cdots \cdots (7)$$

ここに, $\alpha = 2\pi d/l$, したがって系全体では,

$$\begin{aligned} P &= P_I(t) + P_{II}(t) \\ &= -\sum_{n=1}^{\infty} 2P_n \sin \frac{\alpha}{2} \sin(n\omega t + \varphi_n + \alpha) \end{aligned} \quad \cdots \cdots (8)$$

P_I, P_{II} は気液各相の長さ, 到来周期および密度差より決まるが, ボイド信号の波形もまたこれらと同様の挙動を示している。図 15 は上段にボイド信号, 下段に加振力 $\rho_l S v^2$ の時間的变化を示す。 S は管内面積, v は液相の流速, 液相の密度 ρ_l は次式で与えられる⁽⁶⁾。

$$\rho_l = \left[1 - \left\{ (0.71 + 0.00143p) \frac{v_g}{v_l + v_g} \right\}^{1.8} \right] \rho_w \quad \cdots \cdots (9)$$

ρ_w : 水の密度

p : 流体の圧力 (ata)

また, 式(9)の p_l を用いて, 加振力の n 次成分はボイド信号の PSD の n 次成分により次式で求まる。

$$p_n = \frac{\sqrt{2(PSD)_n}}{V_0} \rho_l S v^2 \quad \cdots \cdots (10)$$

式(10)の p_n を式(6)に入れ加振力をつくり、配管の二相流による振動応答を式(5)より求めた。

4・2 計算結果および測定結果の比較と考察 上記計算法により、気相と液相とが分離した9種類の二相流について、ボイド信号をもとに振幅計算を行い、測定結果と比較した。センサの電極間隔は気泡塊の影響を排除するため $d/D=0.75$ とし、流動様式と振動との関連性を正確に把握するため両者を同時測定した。計算は最も振幅の大きく現れた一次振動について行った。

図16は配管の最上端での振動加速度のPSDを上段に、ボイド信号のPSDを下段に示した。この両者のスペクトルより、一次振動応答と二相流体波形の一次成分とがほぼ一致していることを示している。したがって液相の到来周波数一次成分が加振力の主成分となって配管を振動させていることがわかる。

表2に配管の最上端の振動変位振幅の計算値と測定結果を示す。測定値と計算値との差の最大は44.3%、平均で21.0%であるが、一般に振幅計算はオーダが合えばまず成功という見地からすれば、両者の一致の

程度はかなり良いといえる。

図17は配管上端の二相流により誘起された変位振幅の計算値と測定値の比較を示す。両者の流量比 $v_l/(v_l+v_g)$ に対する傾向はよく一致し、加振力の算定に用いたモデルの妥当性を示している。

5. 結 言

垂直 U 字形配管に気液二相流を流したときのボイド信号を波形分析し、確率密度関数などを求めることにより、流動様相の推定が可能になった。これをもとにして配管上端に作用する加振力の算定を行って振動応答の予測計算を可能にした。

文 献

- (1) 松井・ほか3名, 計測自動制御学会論文集, 17-1 (昭56), 85.
- (2) 西川・ほか3名, 機論, 35-271 (昭44), 582.
- (3) 谷口編, 振動工学ハンドブック, (昭51), 1031, 養賢堂.
- (4) Pestel and Leckie, マトリクス弾性力学, (昭53), 95, ブレイン図書.
- (5) 亘理, 機械振動, (昭55), 107, 丸善.
- (6) 赤川, 気液二相流, (昭52), 141, コロナ社.