配管エルボー内における気液二相流励振力に関する研究*
(第二報, 水平-下降管内二相流)三輪 修一郎^{*1,*2}, Yang LIU^{*3,*4}, 日引 俊^{*1}, 石井 護^{*3}, 近藤 喜之^{*5}, 森田 英之^{*5}, 谷本 浩一^{*5}Study of unsteady gas-liquid two-phase flow induced force fluctuation
(Part 2: Horizontal-downward two-phase flow)Shuichiro MIWA^{*1,*2}, Yang LIU, Takashi HIBIKI, Mamoru ISHII, Yoshiyuki KONDO,
Hideyuki MORITA and Koichi TANIMOTO^{*1} School of Nuclear Engineering, Purdue University^{*2} Graduate School of Engineering, Hokkaido University

Received 6 November 2013

Abstract

This study aims to investigate the horizontally oriented internal two-phase flow induced force fluctuations. Gas-liquid two-phase flow experiments were conducted on 90 degree pipe bend, oriented horizontal-downwardly. Multiple tri-axial force transducers were utilized to measure the dynamic force signals, and related two-phase flow parameters such as volumetric fluxes, void fraction and local pressure fluctuations were measured at various horizontal two-phase flow regimes. Unlike upward two-phase flow, horizontal-downward elbow orientation significantly altered the two-phase flow structure. Spectrum analysis was conducted to investigate the linkage between two-phase flow characteristics and force fluctuation. Results show that the predominant frequency of the fluid force peaks in the slug flow regime at a constant liquid flow rate, similar to the upward two-phase flow condition. Based on the database developed in the current experiment, previously developed force fluctuation model was utilized to assess its performance, and it was found that the model is capable of predicting these parameters with satisfactory accuracy.

Key Words : Multiphase flow, Flow induced vibration, Momentum transfer, Fluid mechanics

1. 緒 言

管内気液二相流は、流路形状や各相の運動量流束変化に応じて様々な流動様式をとるため、特異な流体関連振動の原因として知られている。流体励起振動 (Flow Induced Vibration, 以下 FIV と記述) は原子力や化学プラント系の配管を振動させ、運転に支障をきたす可能性があり、プラント安全設計の観点からも重要な課題である。この管内気液二相流における配管系流体振動の研究は比較的少なく、水平流-下降流体系におけるエルボー部での研究報告は皆無に等しい。以下に、気液二相流体振動関連で報告されている代表的な研究を記す。

Yih and Griffith (1968)らは、気液二相流における運動量流束変動について調べるため、垂直ダクトから噴出された気液二相流により振動する Beam 構造レスポンスを計測した。系内圧力、配管系、配管型の変動によるスペクトルへの影響は見られず、全ての実験条件においてのピーク周波数は 30Hz 未満であった。一定の体積流量において、液体スラグ中に多数の気泡を含んだチェーン流でのボイド率値で最大運動量流束変動が観測され、小口径

* 論文 No.13-00806 [DOI: 10.1299/transjsme.2014tep0046]

^{*1} 正員, 米国パデュー大学工学部原子力工学科 (Purdue University, 400 Central Dr., West Lafayette, IN 47907 USA)^{*2} 北海道大学大学院工学研究院エネルギー環境システム部門 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 西 8)^{*3} 米国パデュー大学工学部原子力工学科 (Purdue University, 400 Central Dr., West Lafayette, IN 47907 USA)^{*4} 米国ヴァージニア工科大学機械工学科 (Virginia Tech, 100 Randolph Hall, Blacksburg, VA 24061 USA)^{*5} 正員, 三菱重工業(株) 高砂研究所 (〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜 2-1-1)

E-mail: smiwa@eng.hokudai.ac.jp

配管においては運動量流束変動の揺れ幅の促進が報告されている。

Riverin and Pettigrew (2007)は U 字配管における管内二相流励振力を検証するため、内径 20.6mm の PVC 管を使用し、曲率値 (R/D) 0.5 から 7.2 の範囲で実験を行った。配管系の固有振動数と二相流励振力スペクトルのオーバーラップによる共振により、激しい流体振動が観測されている。励振力の RMS 値とピーク周波数は、液体の容積割合を一定とした際、気相みかけ流速とともに上昇する傾向が見られた。また、みかけ流速を一定とした際、容積割合が 50-60% の範囲 (チャーン流) で最大 RMS 値が計測された。このような観測結果は、Yih and Griffith の報告と一致している。Cargnelli(2010)は内径 6mm の配管系において円周 16.2mm と 25mm のエルボーを用いて気液二相流の実験を行った。大口径を用いた他の実験結果と同様、スラグ流で最大励振力が観測された。同様の実験を内径 25.4mm の水平エルボーとティー配管系において行ったが、スラグ流と環状流における励振力は他の流動様式に比べ、数オーダー高いことが報告されている。

以上の実験的研究成果は限られたデータベースを基に報告されているが、気液二相流の複雑な流動特性と励振力現象はまだ十分に解明されていない。報告された実験の殆どが、共振特性による激しい配管振動を伴ったものであり、気液二相流による励振力そのものを実験結果から解明することは困難である。また、Hibiki and Ishii(1998)は配管系の振動そのものが二相流構造に影響をもたらす現象を指摘している。即ち、二相流励振力変動のメカニズム解明には、構造固有振動数を高く設定し、共振現象を抑制する必要がある。

そこで本研究の目的は、配管エルボー部において見られる様々な気液二相流動様式がもたらす励振力を実験的、解析的に解明しようとするものである。本稿では、空気-水二成分二相流系に伴う水平流動様式において実験を行い、励振力予測の検討を行った。従って、本実験装置においては固有振動数を気液二相流現象に伴うスペクトルより高く設定することで構造系によるレスポンスを最小限に抑え、共振を伴わない環境下での励振力測定を行った。励振力と流速、ボイド率変動、エルボー部における局所圧力分布といったパラメータ測定によるデータベースを構築し、工学設計やモデル開発に適用することを目的とした。また、別報(Liu, et al., 2012)で報告したモデルを用いた解析を行い、水平二相流による励振力に影響をもたらすパラメータを検証した。

2. 主要記号

A :	断面積 [m^2]	p :	圧力 [Pa]	ρ :	密度 [kg/m^3]
c_p, c_v :	比熱比 [kJ/kg/K]	R :	エルボー半径 [m]	ϕ :	配管断面角度
f :	周波数 [Hz]	t :	時間 [s]	添字	
F :	励振力 [N]	u :	速度 [m/s]	f :	液相
g :	重力 [m/s^2]	x, y, z :	方向軸	g :	気相
i :	虚数	ギリシャ文字		in :	配管入口
j :	みかけの流速 [m/s]	α :	ボイド率 [-]	t :	両相
L :	スラグ長さ[m]	θ :	エルボー角度 [degree]	2ϕ :	二相流

3. 実験方法

二相流による流体励起振動においては、(1) 気液二相流特性 (平均ボイド率、ボイド率変動、相間速度、運動量流束や圧力等) (2) 構造物に加えられる起振力、(3) 静的・動的流体励振力への対象となる構造物のレスポンス、から成り立つ 3 つの要素が重要と考えられる。(2) に挙げた起振力は、二相流励振力と構造振動を連成する役割を担う。本研究の目的は二相流による励振力の基礎的解明であり、流体励振力と構造物振動の連動や共振による現象複雑化を回避するため、実験装置の固有振動数を高く設定した。固有振動数を把握するため、インパルスハンマーで実験装置を加振し、エルボー部に取り付けられた 3 軸加速度計からの信号を解析した結果、固有振動数は 500Hz 以上であった。このことから、(3) に挙げた構造物レスポンスの影響は本実験において極めて小さいと考えられる。以上の考察から、(1) と (2) の概念をふまえた上で、水平二相流励振力測定を行う試験ループを設計した。具体的には、気液二相流特性は流量計、インピーダンス・センサー(Mi, et al., 1998)、及び、圧力測定器を使用し、励振力と圧力変動は 4 つの力覚センサーと圧力測定器を用いて計測した。以下に、実験設備と測定

器について記す。

3・1 実験装置

図1に試験ループの概略図を示す。本装置は、二相流がエルボー部を通過する過程で、水平流から下降流へ変化するループとなっている。試験部であるエルボー部はステンレス製配管2つと（内径52.5 mm，長さ0.5 m），90°エルボー配管部（曲げ半径76.2 mm）を溶接加工したものを用い，鉄製とアルミ製の配管サポートを用い鉄製Iビーム上に固定した。試験部前後における平均ボイド率を測定するため，円型インピーダンス・センサーを水平配管部分のエルボー入口付近に，アーチ型インピーダンス・センサーをエルボー出口付近に設置した。

空気は約1MPaで圧力容器内に貯蔵されている圧縮空気を使用し，ベンチュリ管と流量計を用いて体積流量を計測した。水は75hpのポンプより送り出され，磁気流量計を通過した後一次と二次ラインに分岐し，二相インジェクター内で生成された気泡と混合される。混合された流体は二相流となり，PVCラインと水平アクリル配管の助走区間で均一化された後に試験部へ流入され，1.5m³のステンレス製貯水タンクへと戻る。タンクは開放状態となっており，気液分離器としての役割を担う。

Fig.1 Schematic of the experimental facility with a close up of the elbow test section. Air supplied from compressor and water supplied from the water tank are mixed at two-phase injector. Waterline is divided into primary and secondary lines to generate fine bubbles within the injector. Two-phase mixture, then, flows into test section, which consists of stainless steel elbow section equipped with instrumentations.

3・2 インピーダンス・センサー

インピーダンス・センサーは，電極と電子回路により構成されたボイド率計測装置である(Mi, et al., 1998)．液相と気相の電気伝導差を利用することで，断面平均及び，体積平均ボイド率を計測する手法として広く利用され，ボイド率時刻歴の測定が可能である．本試験ループにおいては，アーチ型（垂直配管部）と円型（水平配管部）2種類のセンサーを設置した．アーチ型の電極は厚さ9.5mmのステンレス製であり，アクリル製フランジ内壁に，対陣状態で設置されている．リング型電極は筒型ステンレスで製造され，10cmの間隔で水平管内に設置されており，電極間容積内の体積平均ボイド率を計測する仕組みとなっている．本試験ループにおいて使用したアーチ型と円型は，キャリブレーション過程で測定した平均ボイド率値に大きな違いは見られず，同じ校正曲線を使用した．二相流がもたらす励振力の評価として，エルボー出入口部でのボイド率に着目し（下降管内流においてはアーチ型，水平管内流においては円型）解析を行った．

3・3 加速度計，力覚センサー，圧力計

本実験では共振を避けるため，配管系の固有振動数が二相流励起周波数よりも大きくなるよう設計した．配管曲がり部における管内気液二相流における励振力スペクトル範囲は50ヘルツ以下であることが報告されている

(Yih and Griffith, 1968; Riverin and Pettigrew, 2007). 本試験ループにおいては、実験装置建設後にタッピングテストを行い、ループ固有振動数の計測を三軸加速度計 (PV-97C, Rion Co.) により計測したが、第1モードの振動は500Hz以上であり、これまでに報告されている二相流体励起振動による周波数よりも遥かに大きい。全ての二相流実験において加速度信号を測定したが、際立った変動は見られなかった。

配管エルボー部における励振力変動測定には三軸力覚センサー (USL-06-H5-100N, テック技販社製) を使用した。各センサーは $\pm 50\text{N}$ の範囲での x - y 軸計測、及び、 0 - 100N 範囲での z 軸計測が可能である。 z 軸方向においては、初期ローディングを加え、 x , y , z 軸全方向において -50 から 50N 範囲の測定を行った。エルボー試験部には計12個の圧力タップを設置し、差圧計 (Honeywell STD 924) によりエルボー部における局所圧力変動を計測した。配管断面に対し4箇所 of 圧力測定孔を設け、エルボー曲がり度3箇所 ($\theta=0, 45, 90$) で計測した。差圧計の精度はキャリブレーション範囲 ($0 - 0.1\text{MPa}$) の $\pm 0.0625\%$ で、本実験での流動範囲における精度は $\pm 2\%$ である。局所圧力の測定を行うため、差圧計の片方のタップを大気に開放した状態で計測を行った。試験部における力覚センサー、及び、圧力タップ位置については別報告(Liu, et al., 2012)を参照して頂きたい。

3・4 計測条件

本実験では、大気圧条件下の水-空気二相流条件において3つの液相みかけ流速 ($j_f = 0.610, 1.12, 1.86\text{m/s}$) を基に計測条件を設定した。各々の j_f 値において、異なる気相みかけ流速値 ($0.10 - 18\text{m/s}$) での実験を行った。本実験にて用いた条件を、Mandhane (1974)らの水平流動様式線図を用いて図2に示す。上昇流における流動様式とは異なり、水平流における管内気泡分布は浮力に左右されるため、試験ループでの気泡注入方法や配管系デザイン、及び、流動様式測定位置により流動様式判定は大きく異なる。Mandhaneの流動様式識別は観察によるものであるため、水平流実験条件によっては異なる流動遷移が生じることが知られている。本実験装置においてもエルボー部入口で流動様式判別を行ったところ、Mandhane線図とは異なり、 $j_f = 0.7\text{m/s}$ 付近において分離流(図2(c))から気泡流(図2(b))及び、波状流(図2(d))からスラグ流(図2(b))への遷移が観察された。該当する遷移線を図2中に紫線で示す。流動遷移が異なる理由として、本試験ループには二相インジェクターと試験部入口との間に複数の上昇・水平配管部とPVC配管エルボーが存在し、流動様式判定前に複数回もの気泡蓄積・分裂といった挙動が繰り返される影響が大きいと考えられる。以上に見られた流動遷移の違いを踏まえ、本実験においては水平二相流に見られる流動様式の内、気泡流、スラグ流、層状流、波状流を対象に検証を行った。

Fig.2 Schematic of the horizontal two-phase flow regimes consist of (a) bubbly, (b) elongated bubbly/ slug, (c) stratified, (d) wavy, and (e) annular flow, and experimental conditions shown on Mandhane's flow regime map. The dashed line colored with magenta indicates the flow transitions from stratified to bubbly and wavy to slug seen in the current experimental facility.

4. 実験結果

4・1 ボイド率計測

試験範囲において、60秒間のデータを1000Hzのサンプル周波数で収集した。本実験において得られたボイド率、加速度、励振力における高周波数領域のデータは0値に近かったため、0~20Hz範囲に着目して計測を行った。円型インピーダンス・センサーで計測したボイド率の時刻歴、確率密度関数(PDF)、PSDスペクトルを図3に示す。

Fig. 3 Void fraction measurement results for the flow regimes including Bubbly flow (#7), Slug flow (#11), Wavy flow (#12), and Stratified flow (#18). The table column shows time trace, probability density function (PDF) and normalized power spectral density (PSD). Black solid line and red dashed lines are the measurement at elbow inlet and outlet respectively. Effect of the elbow on two-phase structure is noticeable for slug and stratified flow regimes, while bubbly and wavy flows aren't significantly influenced by the elbow geometry.

エルボーによるボイド率変化を検証するため、エルボー入口（水平流）付近での計測値を黒線で、出口（下降流）付近を赤線で示した。PDFに見られるように、エルボー部における気泡蓄積現象により、出口付近では平均ボイド率値が大きく上昇していることが分かる。気泡流の場合、配管系スケールよりも遥かに小さい気泡が密集する影響により、ボイド率信号の変動値は小さく、比較的安定した波形が見られる。PSD スペクトルにおけるピーク周波数は数 Hz 程度であった。スラグ流でのボイド率信号は、液相スラグ内平均ボイド率値近くの 40-50% をベースに大きく変動し、スラグ気泡がセンサーを通過する際には 80% 近くまで上昇する。スラグ流の最大ピーク周波数値は 5 Hz 付近で見られた。これは気泡流のほぼ 2 倍であり、全実験において最大値であった。Ishii and Hibiki (2011)によれば、気液二相流の気泡径分布は小気泡（1 群気泡）とキャップ・スラグ気泡（2 群気泡）の 2 種類に分類が可能であるが、本実験結果においても気泡を群分けした考え方を基に、エルボーでの気泡挙動が説明できる。PDF(図 3-11)が示す通り、エルボー入口ではスラグ気泡と、液相スラグ内に存在する小気泡によるダブルピークが見られ、エルボー部で蓄積された気相は 2 群気泡として流出していることが分かる。また、波状流と層状流の場合、入口付近では大きなボイド変動が見られるが、エルボーによる気相蓄積効果から出口付近では流動場が安定化する傾向が見られた。

図 4 に、気相みかけ流速変化によるボイド率ピーク周波数と振幅変化を示す。気泡流におけるボイド率変動の周波数と振幅は、上昇二相流の場合と同様ほぼゼロに近い(Liu et al., 2012)。水平二相流の場合、気相の更なる上昇によりスラグ流が波状流に遷移するが（図 2）、スラグ気相が生成される場合は周波数が大きく上昇したのに対し、波状流の場合は気相流速とともに緩やかに上昇する傾向にある。また、ボイド率変動振幅ではスラグ流・波状流両方において、気相流速とともに著しく上昇する傾向が確認された。スラグ流でのピーク周波数は、観測された流動様式の中で最大値を記録した。また、液相みかけ流速の上昇とともに、ピーク周波数が増加する傾向も見られた。

Fig. 4 Change in void fraction peak frequency (Left) and peak PSD amplitude (Right) with respect to inlet superficial gas velocity.

Peak void fraction increases sharply after the flow regime transition to slug/ wavy flow region. The peak void fraction frequency suddenly increases in slug and wavy flow regimes, while the peak PSD magnitude tends to constantly increase as inlet superficial gas velocity increases.

4・2 圧力測定結果

圧力測定は計 12 個の差圧計を用い、1000Hz のサンプル周波数で計測した。エルボー内における圧力分布を検証するため、スラグ流条件で計測したデータをエルボー壁面において表したものと、エルボー部 0°, 45°, 90° における圧力分布を図 5 に示した。最大圧力値は全流動様式においてエルボー背側 45° 付近(Extrados)に見られたが、これは液相と配管壁面との相互作用や、液相流れによる衝撃といった影響によるものと考えられる。また、最小圧力値はエルボー腹側 45° 付近(Intrados)に見られたが、これはエルボー内部での境界層剥離現象により生じる渦流が低圧力領域を生成するためと考えられる。

4・3 力覚センサー実験結果

ボイド率変動計測と同様、各流動様式において励振力の測定も行った（図6）。気泡流における励振力信号はボイド率変動と類似した傾向が見られ、着目すべきピーク周波数は特に見られなかった。スラグ流と波状流におけるスペクトルでは10Hz以下のピークが複数見られ、ボイド率変動スペクトルと類似した特性が見られる。また、スラグ流の時刻歴においては、ボイド率とは異なり、気相スラグと液相スラグの流れに伴う変動特性が見られず、シャープな変動が繰り返されている。これは、液相スラグがもたらす励振力は、エルボー衝突初期の数ミリ秒

Fig. 5 Pressure tap locations (Left) and pressure profile (Right) at slug flow regime (Test Condition: 4). Black, blue, and red data points are the local pressure measurement of the elbow surface at extrados, outer-side, and intrados, respectively. Highest local pressure is observed at outersurface of of the 45 degree angle and lowest being near the inner side of the inlet. Such trend is also evident from the surface pressure color map.

単位のオーダーで働くためと考えられる。また、波状流の液相波による励振力も、液相スラグと類似した強度であることが分かった。層状流の励振力変動は気泡流と同様に小さいが、これは低二相流速下において生成される流動様式であるためと考えられる。

Fig. 6 Force fluctuation measurement results for flow regimes including Bubbly flow (#7), Slug flow (#11), Wavy flow (#12), and Stratified flow (#18). Relatively steady signals and no dominant peak frequency are observed for both bubbly and stratified flow regimes. Force fluctuation tends to manifest as flow regimes shift to slug and wavy flow. For slug flow, dominant peak frequency is observed near 7 Hz, which is related to the collision of liquid slug against the elbow structure.

図7に x 軸における励振力振動のピーク周波数を示す。ボイド率信号に比べ、複数のピークが見られたため、最大値のピーク周波数を選択して比較した。液相みかけ流速が一定の場合、ピーク周波数は気相みかけ流速とともに増加し、スラグ流動様式内において最大値が観測された。最大液相みかけ流速である $j_f = 1.86\text{m/s}$ の場合、ピーク周波数の変化は際立って見られなかったが、これは比較的長い気泡が混在した Elongated Bubbly Flow とスラグ流の形態が類似しているためと考えられる。また、気相みかけ流速と励振力変動値の関係性も図7に示した。ボイド率変動と類似し、気相みかけ流速の増加に伴い励振力変動も単調に増加する傾向が見られた。運動量流束は速度の二乗に比例するため、励振力変動においては、ボイド率変動よりも速度変化に影響されるものと考えられる。

Fig.7 Change in force spectrum peak frequency (Left) and peak PSD amplitude (Right) with respect to inlet superficial gas velocity.

Similar to the void fraction spectrum, peak force fluctuation frequency begins to increase in slug /wavy flow regimes. Magnitude of the force fluctuation tends to increase with the increase in inlet superficial gas velocity for horizontal two-phase flow.

また、水平スラグ流の場合、非連続で流れる液相スラグの断面積は垂直上昇流のものよりも比べ遥かに小さいため、衝撃力も小さくなるものと考えられる。

4・4 水平気液二相流励振力予測モデル

次に、水平二相流における励振力予測精度を検証するため、前報で報告した二流体モデルをベースとしたモデル式を示す(Liu et al., 2012).

$$\mathcal{F}_{\text{RSX}}(f) = A \rho_f j_{\text{fi}}^2 \mathbf{A}_f(x_0, f) e^{-i2\pi \frac{f}{j_{\text{fi}}} (L_2 - x_0)} \left[\frac{i2\pi R f j_{\text{fi}} e^{\frac{i f \pi^2 R}{j_{\text{fi}}}} + j_{\text{fi}}^2}{-4\pi^2 R^2 f^2 + j_{\text{fi}}^2} \right] + \mathbf{P}_m(f) A + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2}} \rho_{2\phi}(t) A_{\text{eff}} \sqrt{\frac{(c_p/c_v) P_0}{\alpha(t)(1-\alpha(t)) \rho_f}} \sqrt{\frac{2P_0 L_g}{\rho_{2\phi}(t) L_f}} e^{-i2\pi f t} dt \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{A}_f$, $\mathbf{F}_\alpha$, $\mathcal{F}$, $\mathbf{P}$ は液相比率スペクトル, 波動関数スペクトル, 励振力スペクトル, 及び, 圧力スペクトルである。式(1)における液相比率と圧力は測定値であり, 運動流速スペクトルは液相比率スペクトルより算出した。エルボー配管内の圧力変動はポンプ等の外部変動や境界層剥離による旋回渦といった現象に加え, 二相流圧力損失特性である摩擦損失, 加速損失, 及び, 重力成分による影響が考えられる。しかし, 本実験条件における圧力スペクトルのピーク周波数は低く(1Hz以下), 高周波数領域における圧力項の影響は殆ど見られなかった。右辺第3項は液相スラグ衝撃力項であり, 管内にキャップ気泡(2群)が存在する際に追加項として式(1)に組み込まれる仕組みとなっている。ここで, $\rho_{2\phi}$, A_{eff} , c_p , c_v , P_0 , L_g , L_f は二相混合密度, 有効断面積, 定圧,

定積比熱, エルボー部入口圧力, スラグ気泡長さ, 液相スラグ長さである。前述した通り, 水平二相流における液相スラグ生成過程は, 入口条件や, 流動様式識別位置, 気泡注入方法等に大きく左右される傾向にあり, 垂直上昇流に比べ, 水平スラグ長さを予測するモデルの精度は高いとは言えない。このことから, 本研究においては

Wallis(1969)による水平スラグ速度(u_{sb})相関式と、ボイド率計測値より算出したスラグ気泡通過周期(T_{sb})との積から水平スラグ気泡長さ(L_g)を式(2)より算出し、図8に示した単位水平スラグモデルを基に、液相スラグ長さを式(3)より近似した。 C_2 値は Re 数($=j_T D/\nu_L$)が 10^5 以上の場合1.25~1.35となり、本解析では1.35を用いた。

Fig.8 Schematic of the horizontal slug unit, consist of Taylor bubble (Group-2) and distorted bubble (Group-1). Schematic of the void fraction signal of the slug unit is also shown on the right, where the maximum and minimum values are measured by the passage of Taylor bubble and liquid slug, respectively. Contrary to the vertical upward flow case, bubbles are migrated at upper half of the flow path due to the buoyancy effect. The liquid slug responsible for the “impact force” is followed by a Taylor bubble, and it has an effective cross sectional area of A_{eff} . From the variables shown in the schematic, one can determine the liquid slug length, which is a crucial parameter to obtain force due to impact.

$$L_g = u_{sb} T_{sb} = C_2 j_{total} T_{sb} \quad (2)$$

$$L_f = \frac{L_g (\alpha_2 - \alpha_{mean})}{(\alpha_{mean} - \alpha_1)} \quad (3)$$

ここで、 α_1 、 α_2 はそれぞれ小気泡とキャップ気泡の平均ボイド率である。水平流の場合、2群気泡によるボイド率を求めるために必要な2群界面積濃度相関式は発展途上の段階であり、精度の高い予測モデルは現在存在しない。従って、図8に示した単位水平スラグによるボイド基本波形から、1群気泡がインピーダンス・センサーを通過する際に計測される最小ボイド率値を α_1 、2群気泡通過時による最大値を α_2 と仮定し、計算を行った。また、液相スラグによる衝撃力はボイド率変動に示された通り脈動的特性を有するため、気相スラグ背後の投影面積を液相部衝撃による有効断面積(A_{eff})と仮定し、計算を行った。

図9に、測定した励振力スペクトル(黒線)と共に、式(1)のモデルで計算したスラグ流及び波状流における励振力スペクトルを、衝撃項を含めた結果(赤線)と含めなかった計算結果(青線)として示す。図中のスラグ流動条件は左側が $j_f=1.74\text{m/s}$ 、 $j_g=3.75\text{m/s}$ 、右側が $j_f=0.55\text{m/s}$ 、 $j_g=12.2\text{m/s}$ である。スラグ流の場合、液相スラグによる力が支配的であることから、衝撃項を含めることにより励振力振幅の予測精度が向上していることが分かる。尚、式(1)に含まれる運動量流束項(右辺第一項)と圧力項(右辺第二項)による励振力への影響度を検証した結果、液相スラグによる圧力測定値への影響は比較的小さく、「衝撃力」と「運動量流束」成分が支配的であることが分かった。波状流の場合は運動量流束と圧力変動スペクトルの2成分で励振力スペクトルを予測することが可能であり、図9に示した実験条件では非常によく一致していることが分かる。尚、波状流の場合は、単位液相スラグが存在しないため、衝撃項を含めずに計算を行った結果、運動量流束変動と圧力変動で励振力評価が可能であった。

Fig. 9 Comparison of force terms on the frequency domain for 11Slug (Left) and 12Wavy (Right) flow regimes. Red dotted line is the calculation results using all the terms appear in Eq. (1). Inclusion of impact force term significantly improves the prediction, and force spectrum trend is very well captured. For the wavy flow, the model automatically turns-off the impact force term since no Group-2 bubble is present in this flow regime.

Fig. 10 Predictive capability of the model for peak frequency (Left) and slug flow fluctuation magnitude (Right). Blue data points are the results of Eq. (1) without the final term on the right hand side. Red data points include the impact force term. Inclusion of impact force term improves the predictive capability of both peak frequency and fluctuation magnitudes for slug flow regime.

予測モデルから、スラグ流条件における結果を実験データと比較した結果、ピーク周波数予測の平均誤差が 24.4%、励振力変動振幅予測の平均誤差は 22.6%であった (図 10)。ただ、水平流の場合、二相流励振力を算出する際に必要となるパラメータの評価予測に関する研究は発展途上段階である。特に、スラグ気泡が存在しない流動様式においては、精度向上に向けての検討が今後の課題であり、改善が必要である。しかしながら、激しい配管振動が予測されるスラグ流において本モデルが比較的高精度で適用可能であることが分かった。

5. 結 言

本報においては水平管内エルボ一部において生じる空気-水二相流について実験を行い、励振力特性を二相流パラメータと比較検討した。全流動様式における励振力スペクトル及び運動流速スペクトルのピーク周波数は 1~10Hz 間で観測された。一定の液相みかけ流速の場合、ボイド率、励振力スペクトルのピーク周波数はスラグ流領域において見られた。また、励振力振幅は液相みかけ流速とともに増加し、スラグ流域において急速に上昇する傾向がみられ、水平-下降系における配管振動が懸念される流動様式であると考えられる。水平二相流励振力スペクトルを予測するにあたり、垂直上昇流において構築されたモデルを水平スラグに適用し、励振スペクトル予

測を検討した。水平スラグ流においてはピーク周波数予測の平均誤差が24.4%、励振力変動振幅予測の平均誤差は22.6%であった。励振力予測モデルの更なる精度向上を図るには、水平二相流における1群・2群気泡の平均ボイド率、及び、気泡系の予測式の開発が重要であると考えられる。

なお、本研究は三菱重工業株式会社の助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表します。

References

- Cargnelutti, M.F., Belfroid, S., and Schiferli, W., Two-phase flow induced forces on bends in small scale tubes, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 132 (2010), pp. 1-7.
- Hibiki, T., and Ishii, M., Effect of flow-induced vibration on local flow parameters of two-phase flow, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 185 (1998), pp. 113-125.
- Ishii, M., and Hibiki, T., *Thermo-fluid Dynamics of Two-Phase Flow* (2011), pp. 9-299, Springer.
- Liu, Y., Miwa, S., Hibiki, T., Ishii, M., Morita, H., Kondo, Y. and Tanimoto, K., Experimental study of internal two-phase flow induced fluctuating force on a 90° elbow, *Chemical Engineering Science*, Vol. 76 (2012), pp. 173-187.
- Mandhane, J., Gregory, G., and Aziz, K., A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 1 (1974), pp. 537-553.
- Mi, Y., Ishii, M., and Tsoukalas, L.H., Vertical two-phase flow identification using advanced instrumentation and neural networks, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 184 (1998), pp. 409-420.
- Riverin, J.L. and Pettigrew, M.J. Vibration excitation forces due to two-phase flow in piping elements, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 129 (2007), pp. 7-13.
- Wallis, G., *One-dimensional Two-phase Flow* (1969), McGraw-Hill, Inc.
- Yih, T.S., and Griffith, P., Unsteady momentum fluxes in two- phase flow and the vibration of nuclear reactor components, MIT Report, No. DSR 70318-58 (1968).