D208

気泡噴流の POD 解析

石川正明[○] (琉球大), 伊良部邦夫 (琉球大), 照屋 功 (琉球大)

POD Analysis on a Bubble Jet Flow

Masaaki ISHIKAWA, Kunio IRABU, Isao TERUYA

ABSTRACT

Bubbly flows are complicated flows because bubbles are deformable and the bubble-bubble interaction work. Such flow occurring turbulence in liquid phase by each bubble is called "pseudo turbulence". A PIV is most effective tool to measure bubbly flow because of multi-dimensional measurement. Recently Dynamic PIV system consisted of high-speed camera and high-repetition laser is developed, it is possible to capture time-serial images with higher resolution. In this paper POD (Proper Orthogonal Decomposition) is described as post-processing. It is applied to bubble jet flow and flow structure are investigated.

Keywords: Dynamic PIV, POD, Bubbly jet flow

1. 緒 言

気泡流は原子力発電, 化学プラント, バイオリアクタ一等様々な工業分野で利用されている。気泡流は, 気泡自体, 変形可能な界面を有し, かつ多数の気泡が含む局所的な領域で気泡間相互作用により, 非常に複雑な流動構造を示す。気泡流の研究は, 実験的, 計算的に盛んに行われている。計算では, DNS⁽¹⁾や Euler-Lagrange モデル⁽²⁾を利用して, 個々の気泡の運動により液相に乱流構造を示す“疑似乱れ”を生じることが示され, 実験的に PIV と IST (Infrared Shadow Technique) を利用し, 気泡の形状とその周りの液相流動構造を同時計測が可能である⁽³⁾。また近年の高速度カメラの向上により高速な流れを可視化, かつ時系列での計測が重要である。

本研究では, 従来の PIV による空間の速度情報だけでなく, 時系列の速度情報も有効に利用することで, 気泡を含む複雑の流れから, 特徴的な流動構造を明らかにするために, POD (Proper Orthogonal Decomposition: 固有直交分解) 法⁽⁴⁾を試みた結果について示す。

2. POD (固有直交分解) 法

Dynamic PIV によって得られた速度情報は, 高い時間・空間分解能を有し, 空間のみならず, 時間方向のデータも有効に利用する解析方法が望まれる。ここでは, 流動構造の特徴を数学的に客観的に評価できる POD (Proper Orthogonal Decomposition: 固有直交分解) 法について説明する。

PIV によって得られた (x, y) 点上の時系列の変動速度ベクトルを $u'(t, x, y)$ とすると, FFT (高速フーリエ変換)

によって変動速度ベクトルは $u'(f, x, y)$ となる。ここで, M 点上の変動速度の相関マトリックス $R(f)$ は次式で与えられる。

$$R(f) = \langle u'(f, x, y) u'(f, x, y) \rangle \quad (1)$$

$2M \times 2M$ マトリックスサイズとなる。ここで, 相関マトリックス $R(f)$ の固有値問題を考えた時, 固有値 $\lambda_m(f)$, 固有ベクトル $\Phi_m(f)$ としたとき, 次式が与えられる。

$$R(f) \Phi_m(f) = \lambda_m(f) \Phi_m(f) \quad (2)$$

ここで, m はモードを表し, $m = 1, \dots, 2M$ である。

次に n 次モードおよび周波数 f_n までの変動速度と固有ベクトルを用いて, 次式で復元すれば, 変動速度ベクトル $\tilde{u}'(f, x, y)$ が得られる。

$$\tilde{u}'(f, x, y) = \sum_{f=1}^n \sum_{m=1}^n ((u'_i(f, x, y) \Phi_m(f)) \Phi_m(f)) \quad (3)$$

式(3)によって得られた変動速度を逆 FFT 変換により, 最終的な変動速度ベクトル $\tilde{u}'(t, x, y)$ が得られる。

3. 実験装置および方法

実験装置図の概要を Fig. 1 に示す⁽⁵⁾。容器のサイズは $600\text{mm} \times 300\text{mm} \times 30\text{mm}$ で, 流入サイズは $30\text{mm} \times 10\text{mm}$ である。液体には水道水を, 気体には N_2 ガスを用い, 25 本のニードル (内径 0.5mm , 外径 1mm) により気泡噴流を作成した。本実験では水およびガス流量はそれぞれ 18L/min , 0.45L/min である。カメラには Photron 社製 FastCam Max (1024×1024 画素, 2000fps) を用い, 撮影位置を流入口から 50mm , サイズ

を 30mm×30mm とした。照明には、粒子像撮影のため New-Wave Research 社製 Pegasus-PIV (Nd:YLF ダブルパルスレーザー、波長 527nm) を用い、約 1mm のシート光とし、容器側面より照射した。気泡像撮影のため、Oxford Lasers 社製ダイオードレーザー (波長 808nm、外部トリガー周波数 500Hz、バーストモードで 4 パルス発振、パルス幅約 5μs) を用い、光拡散紙を設け、バックライト照明を行った。

Fig. 1 Experimental apparatus

3. 実験装置および方法

本実験によって得られた原画像および瞬時の速度ベクトル分布図を Fig. 2 と Fig. 3 に示す。POD 法では、固有値を求めるため、膨大なメモリ空間と計算時間を必要とするため、噴流の中心軸から半分の 15×31 グリッドの 1024 時系列データを用いた。また 1024 時系列データは 128 時系列データ×8 ブロックにデータを分割している。

Fig. 4 は POD によって得られる固有ベクトルの絶対値 $|\Phi_m|$ を示したものである。(a) は 1 次モードの低周波数域を、(b) は 2 次モードの低周波数域を、(c) は 1 次モードの高周波数域を、(d) は 2 次モードの高周波数域を示す。グラフは青が低い値を、赤が高い値を持つカラーグラデーションで表している。また、この $|\Phi_m|$ は、式(1)の変動速度の相関マトリックスから、乱流エネルギーと同等の流動構造を持つことが考えられる。低周波数域を抽出した場合、(a) の 1 次モードでは、噴流のポテンシャルコア部で高い値を持ち、(b) の 2 次モードでは、周囲流体を巻き込むエントレインメント領域において高い値を持つ構造を示した。また、高周波数域を抽出した場合、(c)、(d) の 1 次・2 次モードとも、噴流のポテンシャルコア部で高い値を持ち、かつ主流軸に何点かのピークを持つことがわかる。またそのピークの位置は 1 次モードと 2 次モードではほぼ半波長位相が異なる結果を持つことがわかった。しかし、噴流の中心部は気泡と判断され、液相速度を 0m/s としているため、気泡の有無による乱れ構造とも考えられ、今後の課題として、気泡部を考慮した方法を考える必要がある。

4. 結 言

気泡噴流の可視化・PIV によって得られる液相流速の時系列データを POD 法に適用して、時・空間における流動構造の抽出を試みた。POD 法の計算によって得られた

固有ベクトルの絶対値の分布を、低周波数と高周波数の周波数成分に分けることで、低周波数域では、1 次と 2 次モードで変動成分のピークの違いが観察されることが分かり、また高周波成分の領域では、噴流のポテンシャルコア部に高い分布が見られ、またそのピークが半波長位相の異なる構造を持つことがわかった。

Fig. 2 Original image

Fig. 3 Instantaneous velocity vectors

(a) Mode=1, low freq.

(b) Mode=2, low freq.

(c) Mode=1, High freq.

(d) Mode=2, High freq.

Fig. 4 Absolute value of eigen vector $|\Phi_m|$

参 考 文 献

- 1) Bunner, B., Tryggvason, G., : J. Fluid Mech., Vol. 406, (2002), pp. 17-52.
- 2) 村井, 松本 : 機論, Vol. 64(B), No. 611, (1997), pp. 2277-2288.
- 3) 藤原, 菱田 : 機論, Vol. 68(B), No. 668, (2002), pp. 1143-1150.
- 4) Bi, W., et al. Meas. Sci. Technol. Vol. 14, (2003), L1-L5.
- 5) Ishikawa, M., et al., Proc. Japan-US seminar on two-phase flow dynamics (Nagahama), Vol. 1, (2004), pp. 301-305.