103 画像による渦キャビテーション解析

東北大学 大場 光太郎*, 祖山 均, 武田 渉,
石原 正, 猪岡 光, 大場 利三郎

High-Speed Observations of Highly Erosive Vortex Cavitation around a Butterfly Valve

Kohtaro OHBA*, Hitoshi SOYAMA**, Sho TAKEDA**, Tadashi ISHIHARA*, Hikaru INOOKA* and Risaburo OBA**

In order to clarify the mechanism of the severe erosion mainly resulted by the singular vortex cavitation, we carefully try to observe the vortex cavitation associated with the erosion around a butterfly valve by means of a high-speed video-camera, whose framing rate is 40500 per seconds. The velocity of cavitating flow are measured by using the digital-image processing-technique. It is worth noticing that the vortex cavitation develops in the boundary region between the main flow region, i.e., the orifice-jet, and the recirculating region. The cavitating vortex core consists of several tiny vortex cavitation. And the rotating velocity of the highly erosive vortex cavitation can be also detected by the technique.

1. 緒言

バタフライ弁は、その構造が簡単で、その制御特性も優れているので、種々のプラントに多用されているが、弁の大形化、極限環境下での使用とともにキャビテーション壊食⁽¹⁾(以下単に壊食という)が深刻な問題となってきており、なかでも激しい壊食⁽²⁾⁽³⁾の効果的抑制法の確立が工業界から要請されている。

これまで、バタフライ弁まわりの流れパターン観察⁽⁴⁾やキャビテーション衝撃圧測定⁽⁵⁾から、弁まわりの激しい壊食の主因はオリフィス側下流に発生する特異渦キャビテーションであり、発生領域はオリフィス噴流により生ずる高せん断領域に限定されることが判明しているが、特異渦キャビテーションの発生が非定常的であるために、その詳細な挙動についてはいまだ未知なる点が多い。また、遠心ポンプや二次元翼形に生ずる激しい壊食も同様な渦キャビテーションによって引き起こされる^{(6)~(8)}ことから、このような高壊食性渦キャビテーションの詳細な挙動を究明することは壊食機構解明の観点からも非常に有意義であろう。特に、これらの渦キャビテーションの発生が非定常的であり、かつ、その渦キャビテーションの渦コアが数mmから数cmと小さいために、従来の方法による流速や圧力の測定は困難であったが、キャビテーション気泡(以下単に気泡という)による流れの可視化を利用して、画像処理法^{(9)~(11)}による渦キャビテーションの挙動の詳細な解析の可能性が生じている。

よって本報では、高壊食性渦キャビテーションの挙動解明の第一歩として、バタフライ弁のまわりの流れを取り上げ、壊食に係わるキャビテーションの様相を高速度ビデオカメラ等で観察し、また、画像処理法により高壊食性渦キャビテーションまわりの局所的速度分布の計測を試みる。

* Department of Mechanical Engineering, Tohoku University, Aramaki aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, 980, Japan

** Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, 980, Japan

2. 実験装置および方法

実験装置および測定部には、Fig.2に示す既報⁽⁵⁾⁽¹²⁾と同じ回流式試験水槽を用いている。なお、供試弁体には、典型的な高壊食性渦キャビテーションが発達するFig.1に示すような偏心形弁体を用いている。

キャビテーションの瞬時的様相は、せん光時間 $1\mu\text{s}$ のクセノンランプを用いて観察し、その動的様相は、最高速度40500コマ/s、最高画素数256画素×256画素の高速度ビデオカメラ(コダック製、コダックエクタプロモーションアナライザーモデルHS4540)で、1.5kWのシネキングライトランプ(色温度3200K)を用いて撮影している。

速度分布の計測を目的とした画像処理に際しては、まず、最高出力4Wのアルゴンイオンレーザを光源(Spectra-Physics製、Head:2017-04s、管:0026-0006、電源:2550、マルチモードで使用)としたレーザライトシート光(日本レーザ製、SLSレーザライトシートSLS-01)を厚さ2mmを使用し、三次元流れ中の任意の二次元流れを高速度ビデオカメラで撮影し、各コマごとにデジタル画像入力している。次に、この画像を相関法を用いて画像処理^{(9)~(11)}して各コマ間の速度ベクトルを求めている。なお、画像処理のアルゴリズム等の詳細については既報⁽¹¹⁾を参照されたい。

キャビテーション係数 σ は、

$$\sigma = \frac{(P_2 - P_v)}{(P_1 - P_v)},$$

と定義し、ここで、 P_1 と P_2 は、それぞれ弁体の2D上流と8D下流での静圧である。弁開度 α_v は、弁体面と流れに平行な垂直面がなす角度で定義する。試験条件は、特異渦キャビテーションが顕著に発生する弁開度 $\alpha_v = 40\text{deg}$ 、 $\sigma = 1.5$ とし、上流側流速 $U_1 = 4.0 \sim 6.0 \text{ m/s}$ としている。

Fig.1: Test Valve.

Fig.2: Experimental Device.

3. 実験結果

3.1. 特異渦キャビテーションの挙動

Fig.3には、4500コマ/sの高速ビデオカメラで撮影した弁体まわりのキャビテーションの様相を示す。なお、Fig.3では、撮影したコマから2コマごとに抜き出して示している。各コマの右側に輪郭が白い半楕円形状に見えるのが弁体上の上流端から生じたキャビテーションである。弁体および弁棒まわりの盛り上がり部に生じたキャビテーションが、オリフィス噴流に沿って下流に放出され、高せん断領域⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽¹²⁾で特異渦キャビテーションが生じている。特に、図中の $t=0\sim 1.33$ msの弁体下半部分の渦キャビテーションに顕著に現れているように、細い渦キャビテーションが合体して特異渦キャビテーションへと成長する様相が見て取れよう。すなわち、特異渦キャビテーションの形成要因の一つは、このような渦キャビテーションの合体であろう。そもそも、激しい壊食の壊食率は、渦キャビテーションのサイズが大なるほど壊食率が著しく増大する⁽³⁾ので、特異渦キャビテーションのサイズが大となる場合について特にその発達過程を究明してみよう。Fig.3の左上半部分に生じている特異渦キャビテーションに注目すると、上流側流速 $U_1=5.1$ m/sであり、多くの特異渦キャビテーションが下流に流出しているにも係わらず、ほぼ同位置に停在して、特異渦キャビテーションまわりの気泡量が著しく大きくなっている。

Fig.4には、4500コマ/s(図中4コマごとに示す)で渦コアの方向から拡大して撮影し、Fig.5には、瞬間写真でとらえた典型的な特異渦キャビテーションの様相を示す。Fig.4, 5のFlowは、主流の流れ方向を示している。Fig.4から気泡が渦コアを中心として変形しながら回転し、やがて凝集して崩壊する様相がよく見て取れる。Fig.4, 5より、特異渦キャビテーションの渦コアは、多数の気泡から構成されており、渦コアの形状は、扁平、かつ、捻れている。これは、同程度の渦度を持つ2個の渦が絡み合っただけの渦と類似しているから、前述した特異渦キャビテーションが複数個の渦キャビテーションが合体・成長している事実を裏付けている。特に、実際に壊食を生ずるのは管壁面であるから、特異渦キャビテーションの管壁面近傍の様相に着目してみる。Fig.5において、特異渦キャビテーションが管壁面に接する位置では、管断面が円形であるために、渦コアの下端で黒い長楕円形に見えている。なお、このように黒く見えるのは、特異渦キャビテーションが管壁面に接しており、かつ、管壁面近傍では気泡が多数集まって気泡密度が極端に大きくなり、単一キャビティに近い状態になっているからであろう。

Fig.3: Aspect of Cavitation Changing with Time.

Fig.4: Aspect of the Erosive Vortex Cavitation.

Fig.5: Highly Erosive Singular Vortex Cavitation.

3.2. 特異渦キャビテーションまわりの局所的流速分布

Fig.6には、レーザライトシート光を用いて2250コマ/sの高速度ビデオカメラで撮影した特異渦キャビテーションの様相と、それらの画像を相関法を用いて画像処理して求めた速度ベクトルとを、 $U_1=5.1\text{m/s}$ の場合について示す(Flowは主流の流れ方向)。なお、Fig.6は、Fig.4と同様の弁体下流の上半部領域を256画素×256画素で撮影し、特異渦キャビテーションの渦コアを中心として140画素×140画素の部分拡大して示している。図中、主流の流れ方向をFlowで示す。なお、速度ベクトル図の1コマ目は画像の1コマ目と2コマ目の相関から求めており、以下の各コマは順次そのように求めている。画像および速度ベクトルから、まず、気泡密度の高い領域(渦コア)を中心として多数の気泡および渦コアが回転し、やがて回転中心部分に向かって収縮している様相が明瞭に見て取れる。すなわち、画像処理を用いた本解析方法により直径数cmの渦キャビテーションの渦コア近傍の局所的流速の計測が可能であることが示された。なお、計測した特異渦キャビテーションの回転周速度は上流側流速 U_1 の数%であり、また、特異渦キャビテーションの崩壊時における気泡の凝集速度は U_1 と同オーダーである。

以上のことから、特異渦キャビテーションのサイズが著しく増大する原因の第1は渦キャビテーションが合体すること、第2は逆流域で比較的長い成長時間をかけて自転しながら渦コアに多くの気泡を取り込まれることであろう。

4. 結言

バタフライ弁まわりの流れを取り上げ、壊食に主として係わる特異渦キャビテーションを詳細に観察し、画像処理法により特異渦キャビテーションまわりの局所的流速分布を計測した結果、弁体まわりに生ずる渦キャビテーションが、逆流域とオリフィス噴流との境界の高せん断領域で主流方向に流れながら発達・合体し、逆流域に渦キャビテーションが流れ込んで渦コアを中心に回転する間に更に気泡を渦コアに取り込んで高壊食性特異渦キャビテーションとなる事実が判明した。

参考文献

- [1] Hammit, F.G., *Cavitation and Multiphase Flow Phenomena*, (1980), McGraw Hill, 220.
- [2] Soyama, H. ほか5名, *Proc. 15th Int. Sympo. of IAHR*, Belgrade, (1990-9), H4.
- [3] Soyama, H. ほか5名, *Proc. Cavitation and Multiphase Flow Forum*, ASME, Portland, (1991-6), 193.
- [4] 伊藤・ほか5名, 機論, 54-508, B(1988), 3317.
- [5] 谷・ほか3名, 機論, 57-537, B(1991), 1525.
- [6] 祖山・ほか2名, *Proc. 3rd Int. Symp. on Cavitation*,
- [7] 伊藤・ほか6名, 機論, 54-506, B(1988), 2727.
- [8] 祖山, 機論, 58-555, B(1992), 3366.
- [9] 木村・ほか2名, 計測自動制御, 23-2(1987), 101.
- [10] 木村・ほか2名, 流れの可視化, 7-26(1987), 297.
- [11] 大場・ほか2名, 流れの可視化, 9-33(1989), 145.
- [12] 谷・ほか4名, 機論, 58-553, B(1992), 2645.

Fig.6: Aspects Observed by Laser Light Sheet and Velocity Vector of the Vortex Cavitation