脈動流下の分岐管のキャビテーションの挙動*

池田 隆治^{*1}, 伊藤 幸雄^{*2}
正路 良孝^{*1}, 祖山 均^{*3}

The Behavior of Cavitation in a Branch Duct under Pulsating Flow

Ryuji IKEDA, Yukio ITO,
Yoshitaka SHOJI and Hitoshi SOYAMA

To clarify the capacity effect by cavitation bubbles, the cavitation aspects and the vibrational acceleration were studied experimentally in pulsating flows through a branch duct. When the pulsation is given on the upstream side, the wall pressure and the flow velocity fluctuate in phase, while when the pulsation is given on the downstream side, there is a phase difference of 90° between them. The incipient and the desinent cavitation number have approximately the same value. The characteristics of such pulsations are independent of the pulsating conditions and the types of cavitation.

Key Words: Cavitation, Pipe Flow, Bubble, Unsteady Flow, Flow Pulsation, Branch Duct

1. 緒 言

流体機器の高効率化, 高速化あるいは高信頼性を実現していくうえで, 配管内に発生する流体関連振動(圧力変動, 流量変動)が問題にされている。その中でも流体の脈動流下に発生するキャビテーション流れの解明は工学的に重要課題であろう。

キャビテーション振動に関する非定常問題については, 大場の展望⁽¹⁾などがあり, ポンプのインデューサや船用プロペラに発生する非定常キャビテーションについても, 多くの研究があるが, 脈動流下の管路要素におけるキャビテーションの研究は極めて少ない^{(2)~(10)}。Iwanickiら⁽⁷⁾, Fox⁽⁸⁾は「キャビテーションが発生しているベンチュリ管においては, 下流側の圧力変動(1 kHz以下)は上流側へは伝ばせず, キャビテーション気泡(以下単に気泡という)は流体キャパシタとして働く」という興味ある事実を示し, この効果は液体ロケットエンジンの POGO 不安定防止に有効に利用し得るとしている。神山・山崎⁽⁹⁾は絞りのキャ

ビテーション実験で同様な結果を得ている。Kawadaら⁽¹⁰⁾はオリフィスのキャビテーション発生部は圧力波が吸収される無反射端として近似できることを実験的に示した。しかし, この単一流路結果が, 羽根車内やプラント系内のような多数の分岐流路をもつ流れにも適用できるかは不明である。

よって, 本研究では分岐管における気泡のキャパシタ効果の解明の第1歩として, 50×50 mm²の正方形断面をもつ直角分岐管を取り上げ, 1 Hz以下の低周波脈動流下におけるキャビテーションの様相, キャビテーションのタイプ, 壁面圧力, 平均流速およびキャビテーションの発生に伴う振動の経時変化を解明する。また, 分岐部の上流側あるいは下流側から与えられた脈動のキャビテーションへの影響も調べる。

2. 実験装置

実験には図1に示す二次元分岐管用試験水槽を使用した。この詳細については文献⁽¹¹⁾を, また, 試料水のキャビテーション核および核分布の経時変化については文献⁽¹²⁾を参照されたい。容量約80 m³の地下貯水槽(縦6 m, 横9 m, 深さ1.5 m)からポンプPでくみ上げられた試料水は, 吐出し弁V₁, 円形直管より異径管, 正方形断面の管路を通り, 流路幅 $b=50$ mmの供試直

* 原稿受付 平成2年8月13日。

^{*1} 正員, 岩手大学工学部(〒020 盛岡市上田4-3-5)。^{*2} 正員, 八戸工業大学工学部(〒031 八戸市大字妙字大開88-1)。^{*3} 東北大学流体科学研究所(〒980 仙台市青葉区片平2-1-1)。

角分岐管(50×50 mm²の正方形断面)⁽¹¹⁾の主管に入り、そこで本流と支流に分流する。分岐管を出た支流および本流の水はそれぞれ弁 V_2 , V_3 を経て四角せき W_2 , W_3 を通り再び地下貯水槽に還流する。供試管はフルード数の影響を避けるために本、支管が水平になるように設置してある。脈動流は、弁 V_1 の下流のバイパス管(または弁 V_2 の下流)に設置したボール弁 BV_1 (または BV_2) をウォーム変速機(変速比 10:1)を介し、変速モータ(500~4 500 rpm)で回転させることにより与えた。以下では、これらの脈動流を区別して、それぞれ上流駆動脈動流、下流駆動脈動流と呼ぶ。また、下流側の回転弁 BV_2 が完全に閉じたときの圧力上昇を回避するため、別にバイパス管に弁 V_{B2} を付けている。供試分岐管は、気泡状態の詳細観察のために透明アクリル樹脂製とし、さらに、分岐管の本管と支管の接合部のかどを交換できる構造とし、かどの形状による気泡の発生、消滅の違いを観測できるようにしているが、本実験では曲率半径 $R/b=0$ の場合のみを実験する。

3. 実験方法

時間平均流量は分岐後の支流 Q_2 と本流の流量 Q_3 より、分岐前の流量 $Q_1 (=Q_2 + Q_3)$ を算定した。変動流量は分岐管上流に設置した電磁流量計(図1の FM)で測定した。上流側の変動圧力 P_1 は圧力変換器で、平均圧力 P_1 は図1の A 点の圧力タップ(直径 0.7 mm)から連結した水銀マンオメータで測定した。圧力変換器のアダプタには脱気したシリコン油を封入し、良好な応答性を保証している。キャピテーションイベントの直接的反響である衝撃波形の測定には、分岐部外壁面上に固定した圧電型加速度計を用いた。キャピテーションの観察には、せん光時間 2 μ s のクセノンランプによる瞬間写真で撮影した。キャピテーションの連続撮影のため、撮影時間間隔はタイマを用いて任意に設定し、撮影時刻はフォトマークとしてデータレコーダに

図1 分岐管用試験水槽

記録した。また、キャピテーションが典型的な確率事象であることを考慮し、脈動流下のキャピテーション状態での圧力、流量の動的関係を知るために流速、圧力、キャピテーション衝撃振動加速度、フォトマーク(Photo M.) のアナログ信号をカセットデータレコーダ(4チャンネル)に同時記録し、同一母集団に属するデータを集録するよう配慮した。流速および圧力はDR(直接記録, DC~625 Hz), 振動加速度およびフォトマークはFM(周波数変調, 50 Hz~8 kHz)方式で記録し、データロガ(最高サンプリング速度 40 μ s)と周波数分析器(FFT, 最大分析周波数 100 kHz)により流速、圧力、衝撃波形のそれぞれの波形を描かせ、また、衝撃波のパワースペクトルを求めた。

実験の整理に用いた諸量の定義は次のようなものである。

$$\text{流量比: } K = Q_2 / Q_1$$

$$\text{振幅比: } \beta = (Q_{\max} - Q_{\min}) / Q_1$$

$$\text{レイノルズ数: } Re = \rho v_1 / \nu$$

$$\text{キャピテーション係数: } \sigma = 2(P_1 - P_v) / \rho v^2$$

ここに、 P は静圧、 P_v は水の蒸気圧、 v は管断面の平均流速、 ν は水の動粘度、 ρ は水の密度であり、添字の 1, 2, 3 はそれぞれ分岐上流、分岐支流、分岐本流を示す。

本試験の範囲は、 $\sigma = 1.8 \sim 11.2$, $Re = (1.8 \sim 3.9) \times 10^5$, 試料水中の空気含有度 $a/a_s = 1.1$, 脈動周波数 $f_d = 0.17 \sim 0.75$ Hz, 水温 $t_w = 282.7$ K である。

4. 実験結果

4.1 脈動発生条件による圧力および流速脈動

まず、供試脈動流の様相を調べてみる。供試分岐管は上流側かどが直角である直角分岐管の場合を例に取り、図2~3には上流駆動脈動流の場合の、また、図4には下流駆動脈動流の場合の流速 v_1 , 圧力 P_1 , 加速度 Acc およびフォトマークを4チャンネルのカセットレコーダに同時記録した結果と、 P_1 , v_1 により算定した瞬時のキャピテーション係数 σ を示す。明らかに、上流駆動脈動流の場合には、静圧 P_1 と流速 v_1 はほぼ同位相のほぼ正弦波状(P_1 にはキャピテーションなどによる高周波成分が含まれる)に増減し、 P_1 の変動の位相は v_1 変動の位相よりわずかに先行している。下流駆動脈動流の場合には、 P_1 の増加、減少に伴って v_1 は減少、増加し、 P_1 の位相はこの場合も v_1 の位相より先行している。なお、圧力波形は、図2, 4においては期待されるように正弦波に近いが、 β が小さい図3の場合は正弦波からややずれている。

4.2 分岐管における脈動キャピテーションの様相

周知のように、直角分岐管に発生するキャビテーションは、定常流れにおいては、流れの中の二次渦の中に発生する「渦気泡」(以下 C_1 キャビテーションという)

図2 圧力 P 、速度 v 、加速度 Acc およびキャビテーション係数 σ の経時変化(上流駆動脈動流)

と分岐上流側壁から発生する「付着気泡」(以下 C_2 キャビテーションという)に大別され、 C_2 に比べ C_1 が早く初生することが知られている⁽¹⁾。次に、図5には図2の各フォトマーク位置(図中①～⑦で示す)における瞬時キャビテーション係数 σ に対するキャビテーションの瞬間写真を示す。図2の上流駆動脈動流の場合キャビテーションは P と v が増加し始めると③と④の間で初生し、 P と v が共に最大値をとった後⑤に十分発達した付着泡となり、その後、両者が最小値をとった後、わずかに遅れて③、⑦で消滅する。ここで取り上げた上流側かどが鋭角の場合で、かつ $\sigma \cong 4 \sim 4.5$ の場合には、 C_1 キャビテーションの生存率⁽¹⁾は限りなく零に近い、すなわち、 C_1 キャビテーションの発生の間欠性は著しく大きいので、瞬間写真により撮えられる確率は非常に低くなる。したがって、付着形の C_2 キャビテーションのみが卓越的に観察され、 C_1 キャビテーションはほとんど見掛け上認められなくなる。この結果は、既報⁽¹⁾の定常流における観察と良く符合している。キャビテーション発生領域の長さ(キ

図3 圧力 P 、速度 v 、加速度 Acc およびキャビテーション係数 σ の経時変化(上流駆動脈動流)

図4 圧力 P 、速度 v 、加速度 Acc およびキャビテーション係数 σ の経時変化(下流駆動脈動流)

図5 キャビテーションの様相(図2に対応)

キャビティ長さ)は当然のことながら瞬時キャビテーション係数 σ と良く対応して変化するが、さらに、例えば図2より、キャビテーションイベントの直接的反響である振動加速度 Acc ともよく対応して変化する。すなわち、 Acc が最大のときに l はほぼ最大長となり、また、最小のときほぼ最短となる。したがって、「瞬時キャビテーション係数 σ および振動加速度 Acc の検出により、脈動キャビテーションの波長が十分な精度で検出できる」という脈動キャビテーション検出上の有力な手がかりが得られる。なお、「上流駆動脈動流(例えば図2)においては、 v_1 の最大点はほぼ一致するが、これらと P_1 最大点とは少しずれている。一方、下流駆動脈動流の例えば図4においては、 l は v がほぼ最大、 P が低いときは最大となる」のように、一見矛盾したような傾向を示すが、これは、瞬時キャビテーション係数 σ への効きが v_1 のほうが圧倒的に大きいためである。また、初生のごく近傍の付着気泡の発する音あるいは振動はかなり微弱で、振動加速度計によった加速度波形から初生または消滅状態を正確に把握することは困難である。しかしながら、瞬間写真と Acc の変化をみると、 Acc がわずかに平坦部ではキャビテーションは発生していない。よって近似的に

Acc に変化が現れた点を初生点、変化がなくなり平坦に戻った点を消滅点と定義する。これによると、圧力は消滅点より初生点のほうが明確に高いが、流速はほぼ同じぐらいである(図2参照)。流速のキャビテーション係数への影響が大きいことからみると初生キャビテーション係数 σ_i が消滅キャビテーション係数 σ_d とほぼ等しい。周知のように、定常流では、 σ_i と σ_d はかなり相違し、いわゆるヒステリシスが存在するが、これは、初生時と消滅時の有効キャビテーション核分布の大差によることが言われているから、上記の事実は、脈動キャビテーションではヒステリシスの消滅を意味しており注目される。この理由は、流速、圧力の脈動および壁面の振動などにより有効キャビテーションの核の発生が助長⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾され、さらに試料水の空気含有量が少し過飽和にあることにより、初生時と消滅時における有効キャビテーション核分布の差が次第に消失してくるためと考えられる。

4.3 分岐管キャビテーションの振動加速度のスペクトル分布 分岐管でキャビテーションが発生したときの Acc のパワースペクトル経時変化を時間間隔0.5秒について三次元表示したものを図6~8に示す。図6には、定常流の場合のパワースペクトルを、図7, 8には、それぞれ上流および下流駆動脈動の場合における Acc のパワースペクトル(特に図7は図2に対応)を示す。ここで、縦軸はパワースペクトル密度 $S(G^2/Hz)$ を示す。まず、図6の定常流の場合をみると、500 Hz, 1.5 kHz, 2.5~4 kHzの周波数成分が卓越しており、既報⁽¹¹⁾で示したように、キャビテーション気泡が各種のものから多角的に構成されている事実と良く符合している。次に、上流または下流駆動の場合のそれをみると、定常流のそれとの差(当然周期的な変動はあるが、スペクトルの形状のみに注目されたい)または脈動の与え方の差によっては顕著な差異は

図6 加速度のパワースペクトルの三次元表示
(定常流)

図7 加速度のパワースペクトルの三次元表示
(上流駆動脈動流)

図8 加速度のパワースペクトルの三次元表示
(下流駆動脈動流)

認められない。この事実は、脈動流におけるキャビテーションは、定常流のそれに酷似しているという上記の観測と良く符合している。なお、強いて言えば、定常流時に比較して、2.8~3.7 kHzの周波数成分が変動時はやや大きい。キャビテーションの微弱なとき3~4 kHzの成分が比較的早くみられる。

5. 結 論

直角分岐管の上流側または下流側で流れに脈動を与えた場合のキャビテーションの動的な様相と振動加速度の関連性を明らかにすることを目的として、圧力、流量およびキャビテーションによる振動加速度の測定と瞬間写真連続撮影法との同時観測を行った。得たる結果を要約すると次のようになる。

(1) 分岐管の上流側で脈動を与えた場合には、圧力と流量は同位相で脈動する。しかし、下流側で脈動を与えた場合には、圧力と流量は逆の位相で脈動する。そして、いずれの場合も圧力変動の位相は流量変動の位相よりわずかに先行する。

(2) 1 Hz以下の脈動流下のキャビテーションにおいて、初生キャビテーション係数と消滅キャビテーション係数はほぼ等しい。

(3) 振動加速度のパワースペクトルの卓越した周波数成分は500 Hz, 1.5 kHz, 2.5~4 kHzであり、定常流においては変動流と比較して2.8~3.7 kHzの周波数成分が小さくなる。これらに対する、変動の与え方やキャビテーションのタイプによる影響はほとんど認められない。

文 献

- (1) 大場, 機誌, 82-728 (1979), 666.
- (2) 石原・ほか3名, 機論, 44-388 (1978), 4215.
- (3) 石原・大内, 油圧と空気圧, 12-4 (1981), 227.
- (4) 日比・ほか3名, 機講論, No. 723-5 (1972-6), 5.
- (5) Backe, W. and Riedel, H. P., *Ind.-Anz.*, 94-8 (1972), 153.
- (6) Riedel, H. P., *Ind. Anz.*, 94-71 (1972), 1724.
- (7) Iwanicki, L. R. and Dykema, O. W., *AIAA J.*, 2-4 (1964), 753.
- (8) Fox, Z., *Space Aeronaut.*, 38-7 (1962), 141.
- (9) 神山・山崎, 機論, 46-401, B (1980), 1.
- (10) Kawada, Y., Hamano, K., Takata, T. and Hikiyama, M., *Proc. Int. Symp. Cavi.*, Sendai, (1986-4), 127.
- (11) 池田・ほか3名, 機論, 52-478, B (1986), 2317.
- (12) 池田・ほか2名, ターボ機械, 16-2 (1988), 81.
- (13) 大場・ほか2名, 機論, 48-430, B (1982), 1025.
- (14) Ripkin, J. F. and Killen, J. M., *Proc. IAHR Symp. Cavi. Hydr. Mechant.*, Sendai, (1962-9), 37.