分岐管内のキャビテーションの観察*

池田 隆治**, 武内 平八郎***
伊藤 幸雄****, 正路 良孝**

Cavitation Observation in Branch Ducts

by Ryuji IKEDA, Heihachiro TAKEUCHI,
Yukio ITO, and Yoshitaka SHOJI

In order to make clear the cavitation aspects in branch ducts, we carefully observed the cavitation for several cavitation numbers σ , radii of curvature on the corners R/b , flow ratios between the upstream duct and the downstream branched duct K , by means of high speed photography and a high speed stereo movie camera, in various kinds of right-angled branch ducts with square cross-sections. Typical types of cavitation, their interference, behavior, domain of occurrence are shown.

Key Words: Cavitation, Branch Duct, Flow Visualization, Vortex, Attached Bubble

1. 緒 言

管路網の重要構成要素である分岐・合流管にひとたびキャビテーションが発生すれば、管路損失などの基本特性への重大な影響ばかりでなく、下流側管路のキャビテーション壊食、振動などの致命的障害も起こり得るから、このようなキャビテーションの解明は重要な工学的課題と言えよう。

そもそも、キャビテーションはそれぞれ独自の様相、初生点、発生領域⁽¹⁾および障害を呈する各種のキャビテーションにより多元的に構成されている⁽²⁾⁽³⁾から、ここで取り上げた分岐・合流管のキャビテーション特性の解明においても、まず、「いかなる種類のキャビテーションが発生するか？そしてその挙動は？」が重要課題となる。著者ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾は、正方形断面を有する直角分岐・合流管のキャビテーション特性を調べ、分岐損失に対しては支管上流壁面上のはく離領域内に生じる付着キャビテーションが効き、二次渦の核内に生じる渦キャビテーションは効かないことを示した。し

かし、この種の分岐管に生じる二次渦あるいははく離泡⁽⁶⁾まわりのキャビテーションの様相は必ずしも明らかではない⁽⁷⁾。

よって本報では、やはり正方形断面を有する直角分岐管において、このようなキャビテーションの挙動を立体高速映画ならびに瞬間写真により撮り、種々のキャビテーション係数 σ_1 、かどの曲率半径 R および流量比 K について、キャビテーションの種類、その多元的構成、挙動、それらの相互干渉、発生領域などを明らかにする。

2. 実験装置および方法

2.1 立体高速映画撮影装置 キャビテーション気泡(以下単に気泡という)の挙動は、直交する2方向から同時に撮るいわゆる立体高速映画撮影法⁽⁸⁾により撮った。すなわち、図1のように4枚の平面鏡 M_{11} , M_{12} , M_{21} および M_{22} を用いて分岐部の垂直方向(Top v. で示す)と水平方向(Front v.)からの映像をフィルム上の同一コマに撮った(撮影コマ数は約3000コマ/s)。その際、管壁における屈折の悪影響を極力避けるために、鏡 M_{11} , M_{21} は分岐部の真上と真横に置き、距離 $AM_{11}M_{12}B$ と距離 $AM_{21}M_{22}B$ も等しくした。また、キャビテーションの種類判別には露出時間 $3\mu s$

* 昭和61年4月1日 第63期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年11月9日。

** 正員、岩手大学工学部(〒020 盛岡市上田4-3-5)。

*** 故(元八戸工業大学)。

**** 正員、東北大学高速力学研究所(〒980 仙台市片平2-1-1)。

の瞬間写真撮影法⁽²⁾を採用した。

2・2 試験水槽、供試分岐管および実験方法 これらは既報⁽⁴⁾⁽⁵⁾と同様だから、ここでは詳細な説明は省略する。分岐管上流側の測圧孔の位置は測定部中央(図2のO点)より $7b$ (b は流路幅)の P_1 点、下流側の位置 P_2 (支流)、 P_3 (本流)は $26b$ 下流にとった。

供試分岐管も既報⁽⁵⁾のものと全く同一で、図2に示すように一辺50mmの正方形断面のもので全壁面は十分滑らかに仕上げ、さらに気泡を観察できるように透明アクリル樹脂製とし、また、かどA、Bには曲率半径 $R=0, 12.5, 20, 25, 50$ mmのものを準備した。

分岐後の本流と支流の流量 Q_2, Q_3 は四角せきにより測り、分岐前の流量 $Q_1=Q_2+Q_3$ を算定した。キャビテーション係数 σ_1 、レイノルズ数 Re_1 、流量比 K も既報と同様に次のように定義した。

$$\sigma_1 = 2(p_1 - p_v) / \rho v_1^2$$

$$Re_1 = v_1 b / \nu, K = Q_2 / Q_1$$

ここに、 p_1, v_1 は上流 P_1 点における壁面静圧と平均流速で、また、 p_v, ρ, ν はそれぞれ試験水温での水の蒸気圧、密度、動粘度である。

試料水にはキャビテーション核⁽⁹⁾(以下単に核という)および物性値が全実験範囲において変化しないことを期待して、清浄な大容量(約80m³)の地下水槽に長時間静置貯留され、大気圧下に空気で飽和している自然水を用いた。この空気含有度 α/α_s および核分布

は沼知の方法⁽¹⁰⁾とコールタ・カウンタ⁽¹¹⁾で測定した。

図3には上流 P_1 点で採取した試料水より求めた流入核分布を示す。ここで、 $N_n[m^{-4}]$ は核の数密度関数で気泡径 d_1, d_2 間の単位体積当たりの数と d_2-d_1 の比であり、 $d_n=(d_1+d_2)/2[mm]$ は核の直径である。また、 α は標準状態における試料水中の全空気含有量(容量%)、 α_s は飽和状態における空気含有量である。

3. 実験結果

3・1 2種のキャビテーションの構成 既報⁽⁵⁾のように、分岐管内には少なくとも初生点、発生領域そしてその様相から成因が明らかに異なる2種のキャビテーションが発生している。すなわち、図4のスケッチのように、 $y=0$ の支管入口付近の上下壁面上の境界層内より大略 y 方向にひも状にのびる渦キャビテーション気泡(以下渦泡という。図4中では C_1 で示す)と、支管入口かどAの壁面上よりはく離するはく離域内に発生する付着キャビテーション気泡(付着泡、 C_2)とに大別される。

図5にはこれらの気泡の瞬間写真の一例を示す。写真中央の淡い大円は光源によるもので、また、そのまわりの幾つかの中円は管壁上の水球によるもので現象とは関係ない。ここで、曲率半径 R/b の括弧内は、上

図1 立体高速映画撮影装置

図2 供試直角分岐管

図3 試料水中のキャビテーション核分布

図4 気泡のスケッチ

(a) Front v.

(b) Top v.

図 5 2種のキャビテーション気泡の瞬間写真 [$\sigma_1=2.3$, $K \approx 1$; $R/b=(0.4, 0)$]

流側のかどと下流側のかどの組合せを示す。まず、図 5 (b)より明らかなように、渦泡の上流側（静圧が比較的高い）では、渦核内に微小気泡が確率的に分布している気泡キャビテーション⁽¹²⁾（典型的なサブキャビテーション⁽⁸⁾）の様相を呈するが、低静圧の下流側に行くにつれて、その気泡数あるいは径が次第に増加、増大して珠数状⁽³⁾キャビテーションを経て、ついにはひも状の渦泡（一種のスーパーキャビテーション空洞とも言える）に発達する。そして、下流側では付着泡との相互干渉により巨大な塊状気泡⁽³⁾に移行し、さらに下流の圧力回復領域に流れ去る。すなわち、渦キャビテーションはまわりの静圧と核の変化に応じて、サブキャビテーションよりスーパーキャビテーションへと長い1本の渦に沿って段階的に移行する。

次に付着泡についてみると、図 5 (b)ではく離領域の最上流付近に雲状に見えるのは、図 5 (a)より明らかなように、ベンチュリの付着泡の初期のもの⁽¹³⁾に似た非球状（偏平）気泡である。この気泡端より出発する微細渦泡⁽¹⁴⁾、はく離領域内を回流する球状ならびに非球状気泡、ひも状気泡も明りょうに認められる。すなわち、渦キャビテーション、付着キャビテーションのいずれもが幾つかの気泡により多元的に構成されていることがわかる。

3.2 渦泡の動的挙動 図 6 にはキャビテーション係数 $\sigma_1=1.4$, $K=0.5$ において高速映画（約 2500 こま/s）で撮った典型的な渦泡の挙動を示す。これより、渦泡は数 ms から数十 ms で発生、成長、消滅およびリバウンドしていることが見てとれる。また、渦泡は渦核内の低圧部に気泡が成長したものだから、こ

図 6 渦キャビテーション気泡の挙動 [$\sigma_1=1.4$, $K=0.5$; $R/b=(1.0, 1.0)$]

これらの気泡が大きく成長しないかぎり渦泡の挙動より流れ内の二次渦の挙動が推測され得よう。

3・2・1 主発生領域 図7には片側のみ丸み $R/b = (1.0, 0)$, $K = 0.5$, $\sigma_1 = 1.1$ (付着泡が発生しない典型的なサブキャビテーションの σ_1 の領域) を例にとり、渦泡の発生点 (図中の○印, Appearance p. で示す) と消滅点 (●印, Disappearance p.), すなわち主発生領域 ○—● (上壁) または ○—■ (下壁) を示した。座標 x, y, z の原点はかど A の上端にとる (図4)。

渦の不安定な挙動と核の確率的分布から予想されるように, $x-y$ 面上では主発生領域はかなり変化するが, 気泡が発生しやすい $0 \leq y \leq b$ なる低压領域に, また, z 方向には上下壁から約 8 mm 以内の境界層内にそれぞれ留まっている。ここで, z 方向の結果は曲率には左右されない。

次に, 図8には種々の σ_1 および R/b における主発生領域をみるため, $R/b = (0, 0)$ および $(1.0, 1.0)$, $K = 0.5$ の場合を例にとり, $x-y$ 面の主発生領域をサブキャビテーション領域の種々の σ_1 について示した。図8より, 「主発生領域はほとんど σ_1 に依存しない (σ_1

による変化は経時変化の範囲内に留まる)」という事実が注目されるが, これは「サブキャビテーション領域では σ_1 が変化しても個々の気泡は渦内に確率的に分布しているから, 見かけ上主発生領域は変化しない」と解されよう。また, 主発生領域はかど A に丸みを付けると y の小なる方向に, また, かど B に丸みを付けると x の大なる方向にそれぞれ移動し, 発生点と消滅点を結ぶいわゆる発達方向がやや不安定になり, 極端な場合には本流の下流側 ($x > b$) へ発達する。図9には最も極端な例として, 発生点が $y = -50$ mm にある渦泡の一例を示した。

3・2・2 非定常性 発生より消滅までの渦泡の特異な挙動をみるために, 図10には $\sigma_1 = 1.8$, $K = 0.5$; $R/b = (0.25, 0.25)$ の場合を例にとり, 上壁近傍の渦泡に対する上・下流端の y 座標, したがって渦泡の y 方向長さを示してみた。明らかに, 渦泡は発生から消滅までの数十 ms の間に数回の非線形伸縮 (主要周波数は数百 Hz) をくり返しながら支管を流下している (図6も参照)。

また, 図11には特徴的な R/b を選び, 分岐部の上壁近傍の渦泡と下壁近傍のその上流端 y の経時変化を示す。これより, 「上・下壁の渦泡は互いに独立して発生, 消滅をくり返している」, 「発生点は時間的空間的にも確率的に現れ, 上流端 y は断続的に経時変化する」ことがわかる。各断続過程中の平均的な y の時間変化率は $R/b = (0, 0)$ の場合はほぼ一定でその大き

図7 渦キャビテーションの主発生領域

図8 渦キャビテーションの主発生領域

[$\sigma_1 = 2.2$, $K = 1$; $R/b = (0.4, 0)$]

図9 上流壁面上に発生点をもつ渦泡

図10 上壁近くにおける渦泡の上・下流端の y 方向の位置の経時変化

さは v_2 に大略等しい^{*1}が、特異な挙動を示す両側丸みの $R/b=(1.0, 1.0)$ の場合には不安定となり確率的に分布し、渦泡はかど B のよどみ点を境にして支流と本流に迷走流下する。

3.2.3 生存時間と生存率 渦泡の安定性の目安として以下のような生存率を考究しよう。

観察時間 T 中に渦泡が写っているこま数の時間換算値 T_v の割合、つまり生存率 T_v/T を、種々の R/b および σ_1 について示したのが図 12 である。図 12 より、 T_v/T は σ_1 が小なるほど大となり、また、同一の σ_1 では R/b が大なるほど大となる。さらに、同一の σ_1 , R/b では両側丸みの場合の T_v/T より片側丸みのそれは小さい。

3.3 渦泡と付着泡の相互干渉 (爆発的気泡群の発生) 最後に、初生しやすく、かつ、かなりの空気などのガス (多量の巨大核の源) を内在し、特に振動と騒音の増大にかかわる渦泡と、管路損失に支配的に効く付着泡との干渉についてみる。

渦泡と付着泡を同時に撮った瞬間写真の中には、はく離領域を突き破るような大気泡群の爆発的成長を示すものが幾つか見つかった (図 13)。このような気泡の大群の異常発生は管路損失の増大のみならず、下流側管路への多量の巨大核を供給して重大なキャビテーション障害を招来しようから、その様相を鋭意追及してみた。図 13 より、爆発的気泡群には右上方より旋状に小渦泡が進入して好ましくない渦泡と付着泡の干渉の実在を示している。また、この写真の上部に大規模に発達している渦泡の下流後端部が付着泡より多量の核を供給されて異常に発達している事実、さらに、こ

の後端部より付着泡の後半部の多数の気泡群の中に突出した積乱雲状の気泡の大群も認められる。そして、これらの気泡群の下流には直径 0.1 mm 以上の巨大核の大群が流下している。同様な現象は前図 5 (b) から確認されよう。

4. 結 論

正方形断面の直角分岐管内に発生するキャビテーション (特に渦キャビテーション) ならびに二次渦の挙動を、立体高速映画ならびに瞬間写真により詳細に解明した。得たる結果を要約すると次のようになる。

(1) 渦キャビテーション気泡 (渦泡) は低圧域 $0 < y < b$ の上・下壁上の境界層内の渦核内で初生し、該渦から発達する二次渦に沿う静圧および核の変化に応じてサブキャビテーションよりスーパーキャビテーションへと段階的に変化しつつ、流動泡のように主流速度で流下している。

(2) 付着キャビテーション気泡 (付着泡) は、はく離泡の厚みが薄い上流側では独特の非球状気泡から、また、下流側では多数の球状・非球状気泡、ひも状気

図 12 キャビテーション係数 σ_1 と生存率 T_v/T の関係

図 11 渦泡の上流端 y の経時変化

^{*1} したがって、渦泡は大略流動泡 traveling bubble と同様に流動している。

図 13 渦泡と付着泡の相互干渉

泡、微細渦泡および爆発的気泡群などによって多元的に構成されている。

(3) 渦泡と付着泡は著しく相互干渉する。絶えず不安定に変動している渦泡の付着泡または離泡への接近により、爆発的気泡群の発生とそれに伴う管路損失ならびに流下気泡量の異常な増大、または付着キャビテーションの初生点の異常な増大と大幅なぼらつきなどが起こり得る。

(4) 渦泡は発生から消滅までの大略数十 ms の間に大振幅の非線形伸縮(主要周波数は数百 Hz)を数回繰り返す。また、その発生点は時間空間的にも確率的に現れ、渦泡(上流端)は時間とともに断続的に支管まれには本管下流側に流下する。

(5) 渦泡の安定性の目安となる生存率は σ_1 が小なるほど、かどの曲率半径が大なるほど大となる。また、主発生領域は上流側のかど A に丸みを付けると小 y 方向に、下流側のかど B に丸みを付けると大 x 方向に移動し、渦泡はかど B 上のよどみ点を境にして支流と本流に迷走流下する。また、主発生領域は σ_1 にほとんど依存しない。

(6) 上・下壁の渦泡は相異なる核から生じるために当然のことながら互いに独立して発生する。

終わりに臨み、本実験に協力していただいた岩手大学工学部学生(当時) 佐藤友春君ならびに東北大学高速力学研究所技官 樋口二郎君に感謝します。

文 献

- (1) Beaufrère, J., *Houille Blanche*, 17-4 (1962), 521.
- (2) 大場・伊藤, 機論, 45-398, B (昭54), 1428.
- (3) 大場・浦西, 機論, 45-389, B (昭54), 72.
- (4) 池田・渡辺, 機論, 39-328 (昭48), 3691.
- (5) 池田, 機講論, No. 750-8 (昭50-8), 297.
- (6) 岩浪・ほか2名, 機論, 35-269 (昭44), 97.
- (7) McCormick, B. W. Jr., *Trans. ASME, Ser. D*, 84-3 (1962), 369.
- (8) 村井・武内, 東北大学高速力学研究所報告, 24-246 (昭43/44), 315.
- (9) Johnsson, C. A., *Proc. 12th ITTC*, (1969-9), 381.
- (10) Numachi, F., *Ing. Arch.*, 7-6 (1936), 396.
- (11) 大場・ほか4名, 機論, 46-408, B (昭55), 1485.
- (12) Knapp, R. T., ほか2名, *Cavitation*, (1970), 8, McGraw-Hill.
- (13) 伊藤・大場, 機論, 49-442, B (昭58), 1099.
- (14) Kuiper, G., *Proc. 2nd Int. Conf. Cavi.* (1983-8), 151, *Inst Mech. Eng.*