

## 加速度センサーとマイクロフォンによるオリフィスの 配管外部からのキャビテーション検知

Detection of Cavitation Behavior using Accelerometer and Microphone outside of Piping at Orifice

水山 成郎 (Shigeo Mizuyama) \* 村瀬 道雄 (Michio Murase) \*

**要約** キャビテーションによる振動、壊食の発生は配管の潜在的な損傷要因であり、こうしたトラブルを防止するために、キャビテーションの発生を検知する手法の開発が必要である。特に原子力発電所などでは、運転中にそれが評価できるように配管の外部からキャビテーションを検知できることが望ましい。本研究では、配管外部に取付けた加速度センサーと非接触のマイクロフォンを用い、オリフィス下流でのキャビテーション検知について比較実験を行った。その結果、以下のような知見が得られた。(1) キャビテーションが発達すると、加速度センサーの出力はキャビテーション気泡崩壊の激しい遷移状態で非常に大きな値となる。また、キャビテーション気泡が崩壊した時に生じる衝撃波と推定されるパルス状の信号を検出した。(2) 加速度センサーによる流れ方向の出力分布が、キャビテーション気泡の崩壊位置(壊食箇所)で大きな値となることが確認された。また、キャビテーション発生箇所の上流と下流を比較すると、遷移キャビテーション発生時は下流側が非常に大きくなることが確認された。(3) 非接触のマイクロフォンによる測定の結果、キャビテーションの発生によるパルス状の信号の検出や、オリフィス上流と下流でキャビテーションの有無による出力差が確認され、加速度センサーによる検知手法と同様の手法で評価できることがわかった。また、加速度センサーとの同時測定の結果、パルス状の信号の検出には時間差があり、その時間差から求められた速度は空気中を伝達する音速とほぼ一致した。これらの結果より、非接触のマイクロフォンでも、配管外面に取り付けた加速度センサーと同様にキャビテーション検知が可能であり、比較基準データのない運転中のプラント配管でも流れ方向の出力の大小関係からキャビテーションを検知できる見通しを得た。

**キーワード** キャビテーション, 加速度センサー, マイクロフォン, 出力分布, 周波数分析, 衝撃波, オリフィス

**Abstract** Cavitation induced vibration and the consequent erosion of pipes are one aspect of the potential damaging factors in the piping system. In order to prevent such trouble, it is needed to develop a detection method of cavitation. Especially, in a plant system such as nuclear power plants, it is preferable to detect them by measuring outside of pipes during plant operation. In this paper, the detection methods of cavitation using an accelerometer and a microphone were experimentally examined and compared each other. As a result: (1) Output of the accelerometer varied with the cavitation number, and its output voltage increased with development of cavitation. When cavitation occurred, a pulse shaped signal, which might be a shockwave by collapse of cavitation bubbles, was clearly detected. (2) Output distribution of the accelerometer in the flow direction became large where cavitation bubbles collapsed, and output voltage of the accelerometer downstream of the orifice was larger than that of the accelerometer upstream of the orifice. (3) The measurement results with the microphone were similar to those of the accelerometer qualitatively, pulse-shape signals were detected, and difference of output voltages between microphones upstream and downstream of the orifice were measured. In the simultaneous measurements by the accelerometer and the microphone, both sensors detected the shockwave considered to be generated at the same time with a time delay of the microphone. The sound velocity evaluated from the time delay agreed well with the sound velocity in the air. Using the characteristics of the measurement results, cavitation detection using a microphone without contacting pipes could be performed like an accelerometer mounted on the pipe surface, and cavitation could be detected from the distribution of output voltages in the flow direction even in pipings of a plant without data base to compare.

**Keywords** cavitation, accelerometer, microphone, output distribution, frequency analysis, shockwave, orifice

\* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

## 1. 緒言

弁やオリフィスなどの配管絞り部では流速が局所的に速くなるため圧力が低下し、圧力が飽和蒸気圧以下になるとキャビテーション気泡が発生する。下流の流路拡大部で流速が低下すると、圧力回復によって気泡が崩壊し、衝撃波が発生する。この衝撃波が壊食や振動を引き起こし、プラント配管の潜在的な損傷要因となる<sup>(1)(2)</sup>。近年の原子力発電所におけるトラブル事例<sup>(3)</sup>では、プラントの通常運転中ではなく、プラントの起動や停止といった設計では考慮されていない運転操作でトラブルが発生している。したがって、運転操作時にキャビテーションの発生を検知できれば、トラブル発生の未然防止に有効な手段となる。キャビテーション検知手法としては、加速度センサー<sup>(4)</sup>、アコースティックエミッション(AE)センサー<sup>(5)(6)</sup>やマイクロフォン<sup>(7)</sup>などを使用した手法が検討されている。しかしながら、従来の研究の多くは主としてターボ機器を対象としており、配管におけるキャビテーション検知手法に関する研究報告はあまり見られない。また、プラント配管系では保温材が取り付けられている配管や高所の配管も多数あり、配管へ直接取り付けする方法ではキャビテーション検知が困難な場合がある。そこで、本研究では、起動停止を含む運転中にプラント配管でのキャビテーション発生を検知する手法を確立することを目的とした。

昨年度までの報告で、オリフィス下流でのキャビテーションを対象に加速度センサーとAEセンサーを用いて検知手法について検討し、出力信号の強度が壊食量分布とよく対応すること、強いキャビテーションではパルス状の波形が検出され複数のセンサーによる同時測定とパルス状波形の検出時間差から衝撃力の発生位置を検出できることを明らかにした<sup>(8)(9)</sup>。この結果から、流れ方向の出力分布や衝撃力発生位置の同定により、比較基準データがなくノイズが大きいプラント配管でのキャビテーション検知に適用できる見通しを得た。一方、配管外面に設置する加速度センサーやAEセンサーは高所の配管や高温の配管に取り付けられている保温材のため、測定が困難であることから、前報では非接触のマイクロフォンを用いて測定し、8kHzのハイパスフィルタ(以降HPFという)処理によりパルス状の波形を検出できること、加速度センサーとの同時測定により同一の衝撃波を検知していることを確認した<sup>(10)</sup>。本報告では、マイクロフォンのプラント配管への適用を考慮し、

加速度センサー出力特性との対応から、マイクロフォンの流れ方向出力差について検討すると共に、加速度センサーとマイクロフォンの同時測定によりパルス状波形の検出特性について詳細に調べた。そして、最後に実機適用性についての考察を述べる。

## 2. 実験装置と実験条件

実験に用いたループの概要を図1に示す。実験ループは、レザーバ、ポンプ、試験部と配管で構成される閉ループ構造である。レザーバは容積が1.28m<sup>3</sup>の压力容器であり、3.2MPaまでの加圧が可能である。供試流体の温度調整はレザーバ内部のヒータで行い、1%の精度で水温の調整(150℃以下)が可能である。流量は試験部上流に取り付けた電磁流量計で測定し、圧力は試験部上流と下流の圧力計で測定した。

また、供試流体の温度はレザーバに設置した温度計で測定した。実験ループの圧力はレザーバに接続した窒素ボンベにより調整した。実験流速はポンプの回転数をインバータにより制御して調整した。供試流体には雑用水を用いた。供試流体中の溶存気体の量が気泡の発生や気泡崩壊時の衝撃力に影響を与えると考えられることから、実験前と実験後に溶存酸素濃度を測定し、大きな変化がないことを確認した(3~6g/m<sup>3</sup>)。本実験では水温を約25℃とした。流速は加速度センサーの許容最大加速度を考慮して管内平均流速を約4m/sとした。

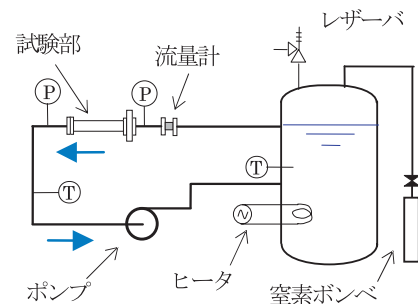


図1 試験ループ

試験部を図2に示す。試験部は内径49.5mmで、可視化実験用のアクリル材とプラント配管を模擬したステンレス鋼材(SUS304)の2種類とした。加速度センサーとマイクロフォンでの測定にはステンレス鋼材の試験体を使用し、絞り部には内径24.75mmのステンレス鋼製オリフィスを使用した。オリフィス部での平均流速は約15m/sである。配管の厚さは5.5mmである。

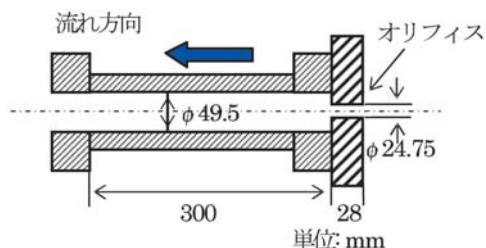


図2 試験部

キャビテーション状態を表す無次元パラメータであるキャビテーション数  $\sigma$  は次式で定義した。

$$\sigma = \frac{2(P_d - P_v)}{\rho V^2} \quad (1)$$

ここで、 $P_d$  はオリフィス下流の圧力 [MPa]、 $P_v$  は実験水温での飽和蒸気圧 [MPa]、 $\rho$  は実験水温での流体密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]、 $V$  はオリフィス部での平均流速[m/s]である。

図3に本研究で用いた加速度センサーとマイクロフォンによる測定システムを示す。本研究では高周波数帯域まで測定可能な圧電型の加速度センサー (TEAC製, 703FB, 0.3 Hz ~ 45 kHz) を使用し、その加速度信号はアンプを通してデジタルオシロスコープに保存した。加速度センサーは試験部に薄膜の両面テープで取り付けした後、樹脂製バンド (ロックタイ) で固定した。非接触型センサーのマイクロフォンはコンデンサマイクロフォン (小野測器製: MI-1233, 20 Hz ~ 20 kHz) を使用した。マイクロフォン出力電圧はマイクロフォン出力増幅器にて出力変換し、オシロスコープで波形を測定した。また、リアルタイムでのフィルタ処理を行うため、フィルタユニット (小野測器製, PS-701) を必要に応じて使用した。データは実験終了後、パソコンで処理した。測定した波形のデータは波形解析ソフト (フルイドテクノロジー社製, DADiSP) にて処理を行った。

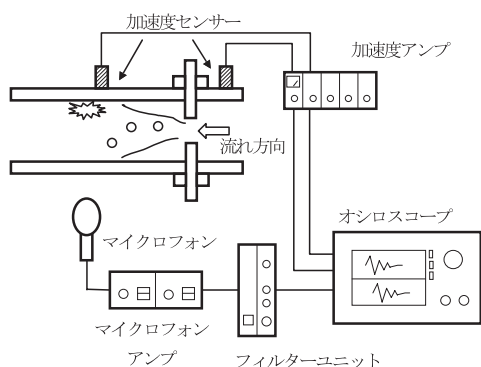


図3 測定システム

### 3. 加速度センサーによる測定結果と考察

#### 3.1 可視化実験結果と加速度センサー出力波形

キャビテーションが発生していない状態 ( $\sigma = 2.8$ ) からキャビテーション数を低下させ ( $\sigma = 1.8, 1.4, 0.9$ ) 強いキャビテーション状態 ( $\sigma = 0.7$ ) に至る加速度センサー出力波形 (アクリル試験体) と流動状態を図4に示す。データの記録時間は0.2秒で加速度センサーの取付位置は、オリフィス出口から下流100mmとした。キャビテーションが発生していない  $\sigma = 2.8$  では出力は微小であるが、初生段階にある  $\sigma = 1.8$  や  $1.4$  では小さな出力変動が多数連なった波形が得られた。キャビテーションが発達し始める  $\sigma = 0.9$  や、かなり発達した  $\sigma = 0.7$  になるとパルス状の信号が検出され、発達するにつれて信号頻度も増加した。従って  $\sigma = 0.9$  や  $0.7$  のようなキャビテーションが発達した状態ではパルス状の信号の存在によってキャビテーション発生の検知が可能であり、その出力波形の大きさと頻度によりキャビテーション強さの程度を分類することも可能と考えられる。ただし、プラント配管では実験装置とは異なり、ポンプやモータの振動といった多数のノイズが検出されることが予想される。

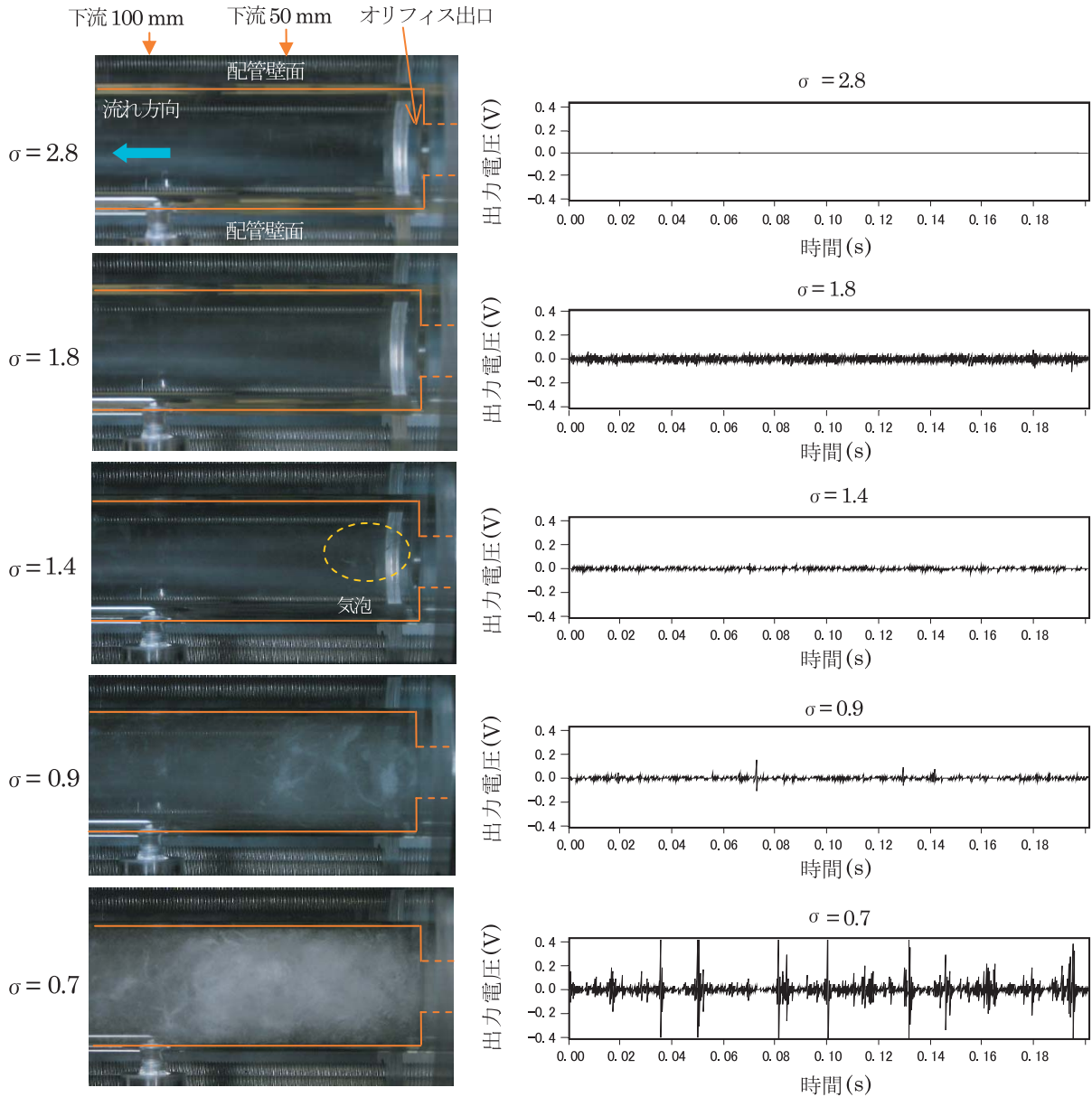


図4 各キャピテーション数における流動状態と出力波形 (V = 15.0 ~ 15.4m/s)

### 3.2 キャピテーション数とセンサー出力

キャピテーション数の変化による衝撃強さの変化を評価するために、加速度センサーをオリフィス出口から下流 100mm とオリフィス出口から上流 90mm に取り付け、オリフィス平均流速を一定 (15.0 ~ 15.4m/s) とし、キャピテーション数をパラメータにして配管壁面が受ける衝撃加速度を測定した。この時の加速度センサーの出力変化を図5に示す。

オリフィス下流 100mm に設置した加速度センサーの出力は  $\sigma = 2.4$  付近から増加し始めた。この状態ではキャピテーション音が聞こえ始めるが、オリフィ

ス下流の気泡は目視できないほど細かく淡い状態であった。出力は  $\sigma = 2.0$  付近まで緩やかに増加した後、低下し始め、 $\sigma = 1.8 \sim 1.4$  の範囲で極小となった。

$\sigma = 1.6$  付近で気泡が目視できるようになることから、 $\sigma = 1.4$  付近までを初生領域と考えた。さらに  $\sigma$  を低下すると、出力が増加し、 $\sigma = 0.6$  付近でピークに達した。 $\sigma < 0.6$  ではスーパーキャピテーション状態となり、出力は低下した。

オリフィス上流 90mm に設置した加速度センサーの出力もオリフィス下流 100mm に設置した加速度センサー出力と同様に、 $\sigma = 2.4$  付近から増加し始め、 $\sigma = 1.8$  付近でピークに達し、下流側よりも出力電圧 RMS

が大きくなった。その後、出力は低下し  $\sigma = 1.4$  付近で極小値となった。その後出力は  $\sigma = 0.6$  まで緩やかに上昇し、 $\sigma < 0.6$  では出力は低下した。

一方、キャピテーションの初生段階では、オリフィス内部で気泡の発生と崩壊が生じているため、オリフィス上流側の出力が大きくなり、遷移キャピテーションでは気泡の発生と崩壊がオリフィスの下流に拡大するためオリフィス下流側の出力が大きくなることを確認された。

このように、キャピテーション数の変化によって出力が異なることが確認されたが、プラント配管で圧力や流量調整によるキャピテーション数の変化によって基準データを取得することはプラント運転管理上の問題があるため困難である。

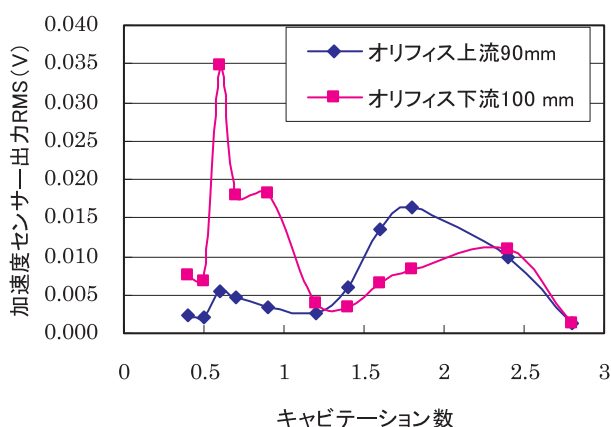


図5 キャピテーション数と加速度センサー出力電圧

### 3.3 流れ方向の加速度分布測定

キャピテーション発生時には気泡崩壊によって衝撃波が発生し、局所的に出力が大きくなり、発生していない箇所との相对比较を実施することでキャピテーション気泡の崩壊位置の予測が可能と考えられる。通常、キャピテーション気泡が発生する箇所は絞り部以降の下流と考えられ、配管に他の加振源からの振動やノイズがあったとしても同一配管上の近い箇所であれば、絞り部の上流側と下流側で大きな出力差は生じないと考えられる。そこで、上流側と下流側の複数箇所から加速度センサー出力電圧実効値(RMS)の測定を行い、その出力分布からキャピテーション検知の可能性を検討した。

キャピテーション数を変化させたとき ( $\sigma = 2.8, 1.4, 0.7$ ) の流れ方向の出力分布測定結果を図6に示す。 $\sigma = 2.8$  の場合では、出力電圧RMSは最大電圧で

0.47mV と非常に小さい。また、出力分布は上流側と下流側の出力電圧RMSの出力差や局所的に大きくなっている箇所がなく、気泡崩壊が無いことを示している。次に  $\sigma = 1.4$  の場合では、最大出力電圧値は 5.5mV と  $\sigma = 2.8$  と比較して、出力電圧が約10倍上昇している。また、出力分布は下流側より上流側の出力電圧RMSが大きくなっており、その出力差は約2倍となっている。上流側が下流側よりも大きくなることは気泡崩壊がオリフィス内で発生し、上流側にその衝撃力が伝播したと考えられる。 $\sigma = 0.7$  の場合では、最大出力電圧値で 74.9mV となり、 $\sigma = 1.4$  と比較して、10倍以上上昇している。また、出力分布は下流側が上流側の10倍と大きく、キャピテーション気泡崩壊による衝撃力が下流部で激しく発生していることを示している。このように、加速度センサーによる流れ方向の出力分布測定から衝撃波発生箇所を簡易評価できる可能性がある。

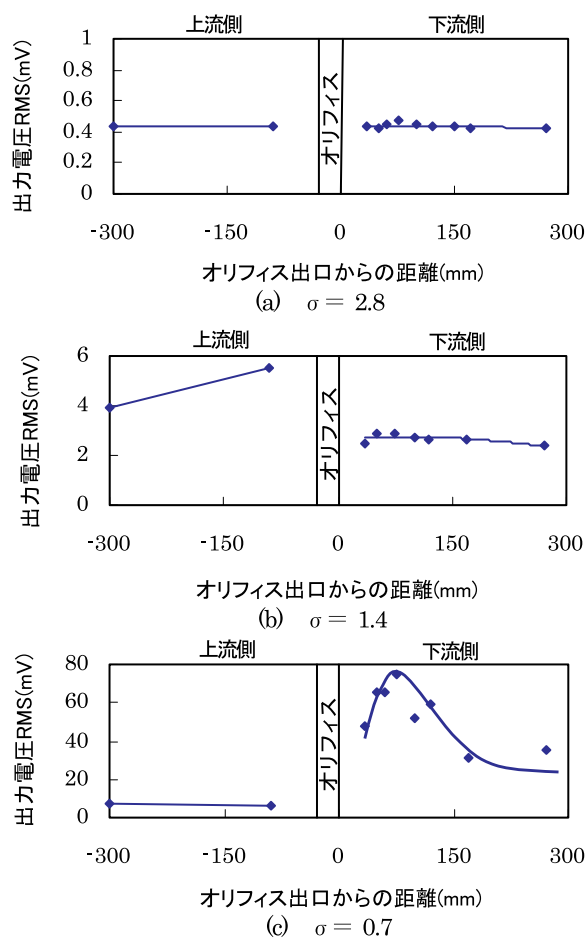


図6 流れ方向の加速度センサー出力分布

以前測定した  $\lambda = 0.7$  での壊食率の分布<sup>(8)</sup>を図7に再掲する。直径5mmの壊食試験片をアクリル製試験部の壁面に埋め込み、壊食による質量変化を精密天秤(最小表示0.01mg)で測定し、単位時間当たりの壊食量を壊食率とした。この試験材には純銅(C1100BD-H)を用い、鏡面仕上げした後に磁わい振動装置でキャピテーションにさらして壊食面を壊食率の最大域まで前処理し、流動実験に使用した。各位置で5回の壊食測定を行った平均値と最大値・最小値を示している。壊食率分布は図6の  $\lambda = 0.7$  の加速度センサー出力電圧RMSの下流側分布とよく対応しており、加速度センサー出力が気泡崩壊による衝撃力を検出していることを示している。

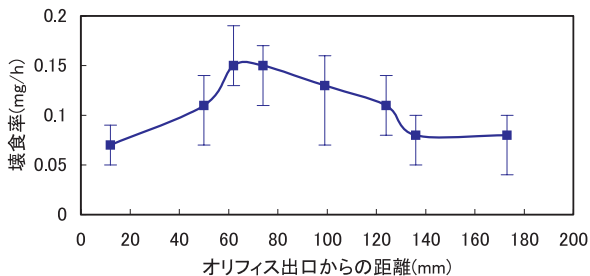


図7 壊食率の分布 ( $V = 15.3 \text{ m/s}$ ,  $\lambda = 0.7$ )

#### 4. マイクロフォンによる測定結果と考察

プラントでは高所の配管もあり、高温流体の流れる配管には保温材が取り付けられているため、加速度センサーの取り付けが容易ではない箇所が多数存在する。また加速度センサー自体の耐熱温度の問題もある。一方、マイクロフォンは非接触で測定が可能であり、マイクロフォンを用いてキャピテーション発生を検出した報告<sup>(11)</sup>があることから、運転中のプラントでもマイクロフォンで測定できる可能性がある。そこで、加速度センサー出力波形との比較から、マイクロフォンによるキャピテーション検知について検討した。

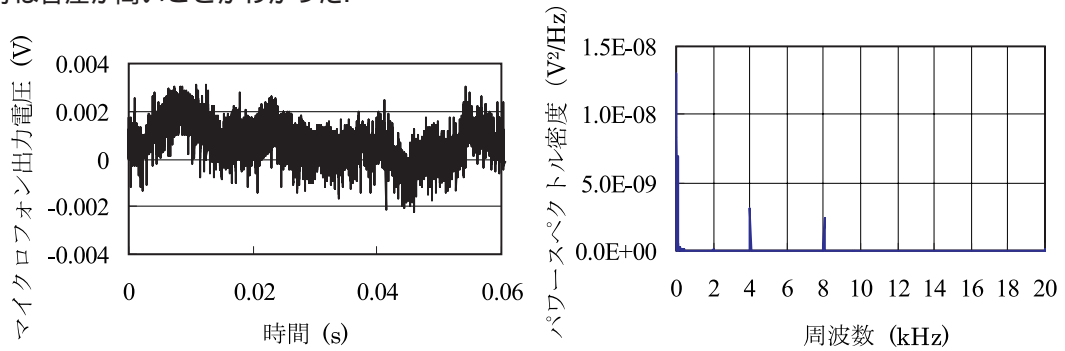
##### 4.1 マイクロフォンの出力特性

マイクロフォンをオリフィス出口から下流75mm、配管外面とマイクロフォン距離を50mmに設置し、各キャピテーション数でのマイクロフォン出力波形をオシロスコープに取り込み、パワースペクトル解析した。パワースペクトル解析には波形解析ソフト(フルイドテクノロジー社製、DADiSP)を使用した。キャ

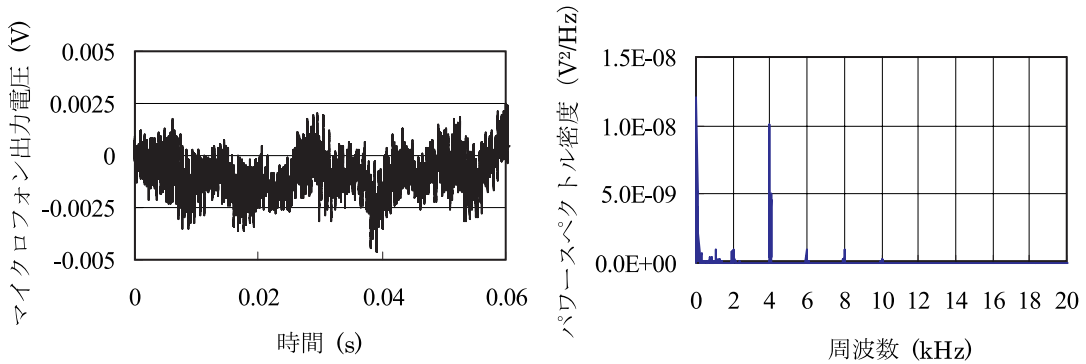
ピテーション数  $\lambda = 2.8, 1.4, 0.7$  およびポンプを運転した直後(圧力と流速の調整をしておらず、キャピテーションが発生していない状態)のマイクロフォン出力波形とパワースペクトル解析した周波数分布をそれぞれ図8(a)~(d)に示す。

キャピテーションが発生していない図8(b)の  $\lambda = 2.8$  の出力波形をみると、その出力電圧(絶対値)の最大値は0.004Vと非常に小さい。また、一定の周波数(2kHzと4kHz)で出力電圧が変動しており、それに高周波成分が重畳していることがわかる。この一定の周波数は実験室の暗騒音と考えられる。実験室では騒音源がないため、暗騒音が大きくないため、問題にならないが、実機に適用する場合には、運転中のプラントでは暗騒音が非常に大きいと予想される。この出力波形の周波数分析の結果からは40Hz付近と4kHz付近に大きなピーク周波数が見られた。これは図8(a)に示すポンプを運転した直後(キャピテーション無)の出力波形および周波数スペクトルがほぼ同様であるため、この周波数ピークはポンプの制御に使用しているインバータ周波数による影響と考えられる。次に初生段階である図8(c)の  $\lambda = 1.4$  の時の出力波形をみると、その出力電圧(絶対値)の最大値は0.01Vとなっており、 $\lambda = 2.8$  の時と比較して2倍程度大きくなっている。また、一定の周波数で出力電圧が変動している傾向を確認できるが、それに重畳している高周波成分値が大きくなっている。この出力波形を周波数解析した結果からは、キャピテーションが発生していない時とは明らかに周波数分布の形状が異なっている。周波数分布は1.3kHzに最大ピーク、5.3kHzと2.8kHz付近にもピークが見られ、1~8kHzまで広範囲に広がっていることがわかる。次に遷移状態である図8(d)の  $\lambda = 0.7$  の出力波形をみるとその出力電圧(絶対値)の最大値は0.06Vとなり、最大出力電圧は  $\lambda = 2.8$  の時と比較して約10倍程度大きくなり、 $\lambda = 2.8$  や  $\lambda = 1.4$  とは異なり、パルス状の波形が確認できる。周波数分布は2.5kHzをピークとし、その付近の周波数成分が大きくなっており、1~8kHzまで広範囲に広がっている。 $\lambda = 1.4$  の場合とピークが変化しているが、依然1.3kHzの周波数成分は大きい。断定するのは困難であるが、1~3kHz付近と、4~6kHz付近の周波数成分が他の周波数成分と比較して顕著に大きくなっているように思われる。この実験結果から、キャピテーションの発達に伴い出力電圧は大きくなり、パルス状ではないが出力電圧が大きくなる箇所を検出されるようになった。

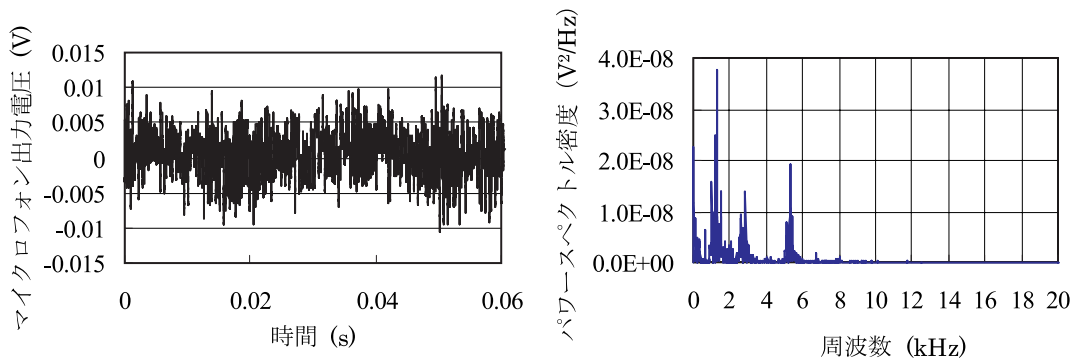
周波数分布は低周波数，高周波数とも大きくなり，  
 衝撃力によるパルス状の波形は高周波数であり，低  
 周波数成分は音圧が高いことがわかった。



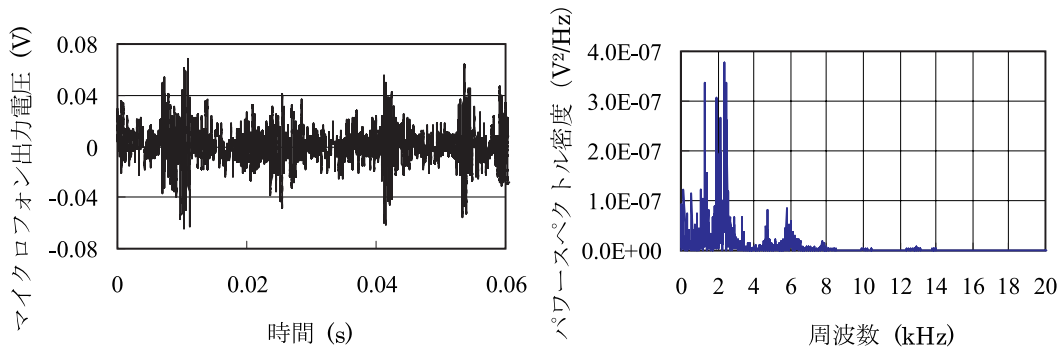
(a) ポンプ運転直後



(b)  $\sigma = 2.8$



(c)  $\sigma = 1.4$



(d)  $\sigma = 0.7$

図8 マイクロフォン出力波形とパワースペクトル密度  
 (オリフィス下流75mm，配管 - マイクロフォン距離50mm)

## 4.2 最適なHPF処理の検討

キャビテーション発生時には高周波成分の信号が増加し、その出力波形には局所的に出力信号が大きくなる箇所があり、加速度センサーで検出されたようなパルス状の信号が検出される可能性がある。また、キャビテーションによる気泡の崩壊は非常に短く、 $2 \sim 3 \mu\text{s}$ との報告がある<sup>(12)</sup>。そのため、高い周波数領域に着目することで、マイクロフォンでも衝撃波を検出できると考えられる。ただし、実際に運転中のプラントではポンプやファンなどの騒音が非常に大きく、パルス状の信号が検出しにくいことが容

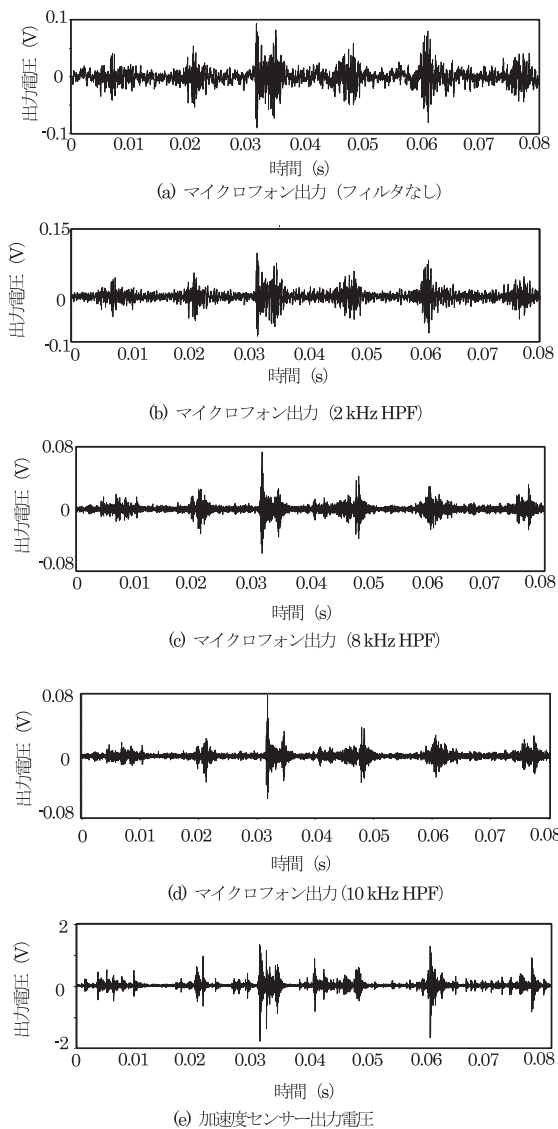


図9 加速度センサーとマイクロフォンの同時測定波形

( = 0.7, 加速度センサー取付位置: オリフィス下流 100mm, マイクロフォン設置位置: オリフィス下流 100mm, 配管 - マイクロフォン距離 100mm )

易に予測される。また、運転中のプラントで音響測定を行い、音響による設備診断を実施した研究<sup>(11)</sup>では、キャビテーション検知にHPF処理を行い、その出力電圧のしきい値を超えた数でキャビテーション発生と判断していることから、加速度センサーとマイクロフォンとの同時測定を実施し、キャビテーション音響を測定したマイクロフォン出力波形に対して適切なHPF処理について検討した。加速度センサーをオリフィス出口から下流100mmに取付け、マイクロフォンはオリフィス出口から下流100mmで配管(試験部)とマイクロフォンの距離100mmに設置した。キャビテーション数は0.7とした。その結果を図9に示す。フィルタ処理しないときは、低周波の成分があり、またパルス状の信号も加速度センサーの出力と比較すると明確ではないことがわかる。またパワースペクトル分布でキャビテーション発生時に最も大きく出力された2kHzのHPF処理を実施したが、細かいノイズ成分があり、さらなる高周波でのフィルタ処理が必要であると考えられる。8kHzと10kHzのHPF処理をすると、細かいノイズ成分が消え、パルス状の波形が明確になっており、同時測定した加速度センサーとほぼ同様な波形になっていることがわかる。図8に示したように8kHz以上のパワースペクトルは極めて小さいが、図9からパルス状の信号は10kHz以上であることがわかる。あまり高周波のフィルタ処理をすると、信号レベルが小さくなり、パルス状の信号が検出されなくなると予測されるため、パルス状の信号を検出するための最適なフィルタ周波数は8kHzのHPFとした。

検出されたパルス状の信号の発生時間は、加速度センサーとマイクロフォンで若干の時間差があることが確認された。この時間差は配管からマイクロフォンへ衝撃波が伝播する時間遅れと考えられる。そこで、配管外面とマイクロフォンの距離を100mmから500mm(100mm毎)と1000mmに変化させ各距離で同時測定を5回実施し、測定した加速度センサー出力波形とマイクロフォン出力波形の相互相関関数によってその時間差を求め、空気中を伝播する音速との比較を実施した。図10にその結果を示す。相互相関によって求められた音速は334.3m/s(青線)となった。空気中を伝播する音速は20℃で343.5m/sであり、それとの誤差は約3%であることが確認された。このことからキャビテーションによって生じた衝撃波が、配管から空気中を伝播し、マイクロフォンで測定していることが確認され、非接触のマイクロフォンで



もキャビテーションの検出が可能であると考えられる。

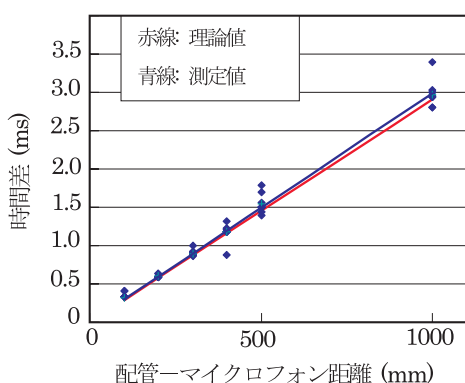


図10 加速度センサーとマイクロフォンの相互相関

### 4.3 キャビテーション数とマイクロフォン出力

加速度センサーで測定したときと同様に、マイクロフォンを使用し、流れ方向の出力電圧RMSを測定した。測定箇所はオリフィス出口を基準として、オリフィス上流90mmとオリフィス下流75mmとし、配管外面とマイクロフォンの距離が50mmとなるように設置した。試験部はSUS304鋼材とし、流速はオリフィス平均流速で約15.0m/sとした。キャビテーション数を変化させたときのマイクロフォン出力電圧RMSで整理したものを図11に、8kHzHPF処理したものを図12に示す。

HPF処理しない結果(図11)を、加速度センサーの結果と比較すると、ピークの発生箇所はより低いキャビテーション数で発生しているが、その傾向は加速度センサーの測定結果と同様であり、キャビテーションの初生段階で緩やかに出力が上昇し始め、キャビテーション気泡が安定して発生すると出力が低下した。遷移状態で最大ピークが発生し、スーパーキャビテーション(液相と気相が分離した状態)になると出力は低下した。また同時測定したオリフィス上流側の出力は、キャビテーションの初生段階で緩やかに出力が上昇し、その大きさは下流側よりも大きくなった。その後、キャビテーション気泡が安定して発生すると出力が低下した。遷移状態になると、上流側と下流側で出力電圧の大きさが逆転した。その後、緩やかに上昇した後、最大ピークが発生し、スーパーキャビテーションになると出力は低下した。

8kHzHPF処理した結果(図12)も、HPF処理なしの場合と定性的に一致し、上流側と下流側の相違が明確になった。しかし、出力電圧RMSはフィルタで低周波成分が除去されたため、1桁低くなっている。この結果から、高周波の信号は衝撃力を捕らえておりキャビテーションの信号をより明確に表しているが、低周波の信号もキャビテーションの特性を有しておりキャビテーション検出に利用可能であることがわかる。

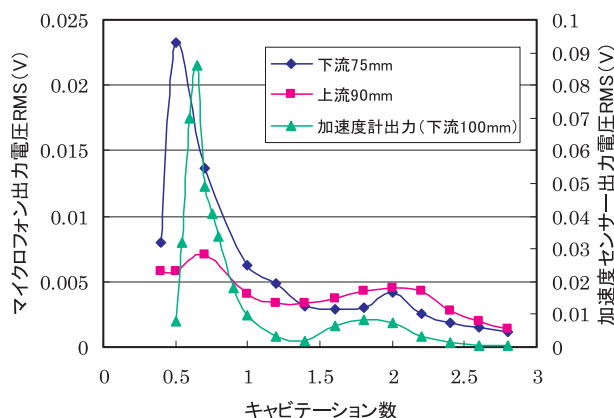


図11 キャビテーション数と測定位置の変化によるマイクロフォン出力電圧 (HPF処理なし)

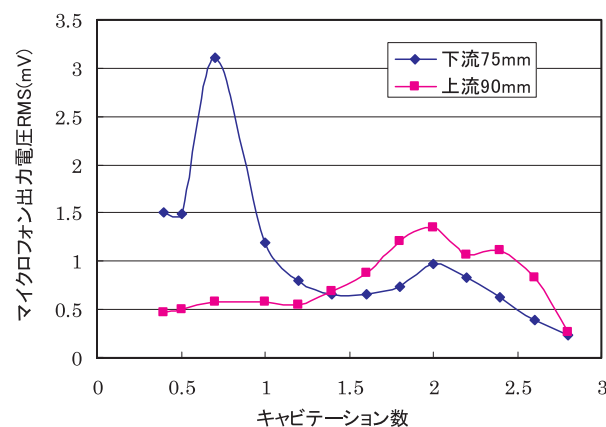


図12 キャビテーション数とマイクロフォン出力電圧RMS (8kHz HPF処理)

## 5. プラント配管への適用性に関する考察

オリフィス体系でのキャビテーション実験により、加速度センサーとマイクロフォンを使用してキャビテーション現象を測定した結果、加速度センサーとマイクロフォンの出力にはパルス状の信号が検出され、キャビテーションの発生箇所では、キャビテーションの発生していない箇所と比較して出力信号RMSが大きくなることがわかった。これらの特徴が

らキャビテーションが簡易的に検知できると考えられる。ここでは、運転中のプラント配管で測定する場合の評価に関して検討した。

## 5.1 パワースペクトル密度

$\zeta = 0.7$ での加速度センサーとマイクロフォン (HPF 処理なしと 8 kHz HPF 処理) のパワースペクトル密度を図 13 に示す。測定箇所はオリフィス出口を基準として、加速度センサーをオリフィス下流の 100 mm、マイクロフォンをオリフィス下流 100 mm、配管外面とマイクロフォンの距離を 100 mm とした。加速度センサーの周波数分布を確認すると、低周波から 50 kHz の高周波の領域まで幅広く分布していることがわかる。これは、衝撃波はパルス状の信号であるため、多数の周波数成分が含まれることによる。また、衝撃波が材料中を伝播する時に、反射や減衰の影響に支配され、キャビテーション気泡の収縮や崩壊による周波数を検出しているとは考えにくい。したがって、キャビテーションの発生有無を比較できる場合を除き、配管外部からの加速度センサーの周波数分析からキャビテーションを検知することは困難と考えられる。

マイクロフォンに関しても幅広い周波数分布となっているが、加速度センサーと比較すると測定可能なすべての周波数領域成分では出力が確認されず、10 kHz 以下の成分が大きい。これは空气中を伝播する音は、距離による高周波成分の減衰が大きいことによる。8 kHz HPF 処理では、約 13 kHz にピーク周波数が存在しており、このピーク周波数は加速度センサーでも検出されている。一方、加速度センサーで検出されている約 18 kHz のピーク周波数はマイクロフォンでは明確には検出されておらず、マイクロフォン測定では高周波成分の検出が困難であることを示している。図 9 に示した HPF 処理したマイクロフォンの出力波形と図 13 の 8 kHz HPF 処理した周波数分析結果から判断すると、マイクロフォンによるパルス状の波形は 13 kHz 前後であると考えられる。

検出信号の周波数特性は、配管材料や形状、保温材、空気などの媒体とセンサーの特性に依存することから、キャビテーションの発生有無を比較できる場合を除き、ある特定の周波数に着目したキャビテーション検知は困難であると考えられる。しかし、8 kHz HPF 処理したマイクロフォン出力で図 9 に示したパルス状の波形が検出され、周波数 13 kHz 前後にピー

クを持てば、キャビテーション発生の際の傍証として活用できると考える。

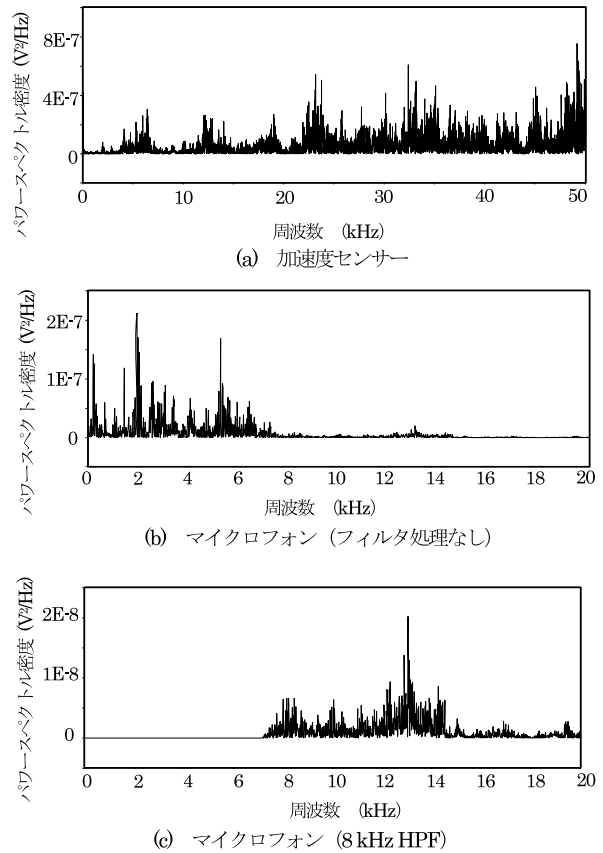


図 13 パワースペクトル密度 ( $\zeta = 0.7$ )

## 5.2 流れ方向の出力分布

図 5 に示したオリフィス上流 90 mm とオリフィス下流 100 mm の加速度センサーの出力電圧比 (下流 RMS/上流 RMS) と図 11 と図 12 に示したオリフィス上流 90 mm とオリフィス下流 75 mm、配管外面とマイクロフォンの距離が 50 mm のマイクロフォンの出力電圧比 (下流 RMS/上流 RMS) を図 14 に示す。加速度センサーとマイクロフォンとも、キャビテーションの初生段階 ( $\zeta = 2.4 \sim 1.4$ ) では上流と下流との値がほぼ等しいか上流側 RMS > 下流側 RMS となり、遷移キャビテーション ( $\zeta = 1.4 \sim 0.5$ ) では上流側 < 下流側となり、有意な差があることがわかる。一方、8 kHz HPF 処理したマイクロフォンでは、低周波成分を取り除いたことにより、キャビテーションによる低周波成分の音やノイズや暗騒音の影響が小さくなり、上流側と下流側の差がより明確になった。キャビテーションの発生を出力信号から判断する場合や、流れ

方向の出力分布をより詳細に評価する場合にはHPF処理を行いキャビテーションによるパルス状の信号を明確にすることが必要であるが、出力差から簡易的にキャビテーション検知する場合であればHPF処理をしない場合でも上流側と下流側の出力差を確認できるため、HPF処理なしでもよいと考えられる。プラント配管でのノイズや暗騒音の影響は上流側と下流側のセンサーで同程度と考えられることから、上流側と下流側のセンサー出力の大小の比較から、プラント配管でのキャビテーション検知が可能であると考えられる。

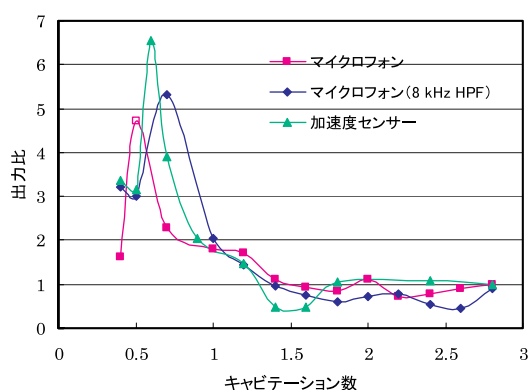


図14 上流側と下流側の出力電圧比

〔加速度センサー出力電圧比 = (下流100 mm/上流90 mm)  
マイクログフォン出力電圧比 = (下流75 mm/上流90 mm)〕

### 5.3 複数のセンサーによる同時測定

図15は複数個の加速度センサーを配管へ取り付け、同時測定を実施した結果である。その結果、パルス状の信号の発生時間には、時間差があり、パルス信号の検出時間差から、衝撃波の発生位置を同定することにより、気泡の崩壊位置を確認し、キャビテーションの発生を確認できる。気泡崩壊箇所を求めるには、配管同一線上に3個の加速度センサーを取り付け、その座標を $S_1(a, 0)$ 、 $S_2(b, 0)$ 、 $S_3(c, 0)$ 、衝撃波発生箇所を $(x, y)$ 、オリフィス出口のセンサー同一線上の箇所を原点 $(0, 0)$ 、衝撃波が $S_1$ に到達した時間 $t$ を基準とすると、各センサー位置と衝撃波発生箇所との関係は次のように表される。

$$V_s t = \sqrt{(x-a)^2 + y^2}$$

$$V_s(t+t_1) = \sqrt{(x-b)^2 + y^2}$$

$$V_s(t+t_2) = \sqrt{(x-c)^2 + y^2}$$

$V_s$  : 衝撃波音速 (m/s)

$t$  : 衝撃波が $S_1$ に到達した時間 (s)

$t_1$  :  $S_1$ と $S_2$ とのパルス信号到達時間の差 (s)

$t_2$  :  $S_1$ と $S_3$ とのパルス信号到達時間の差 (s)

これらの式と以下の仮定によって求められる。

- (1) 配管内面の近くで気泡が崩壊し、発生した衝撃波が配管内面に衝撃力を与える (配管内面から遠い位置で気泡が崩壊した場合は、配管内面に到達する前に減衰する)。
- (2) 配管内面に到達した衝撃波は、配管外面へと伝播する。
- (3) 配管外面へ伝播してきた衝撃波は横波 (SUSの横波速度を3000m/s)として同心円上に伝播し、センサーに到達する。

これらの計算結果から、図15のパルス状の信号から

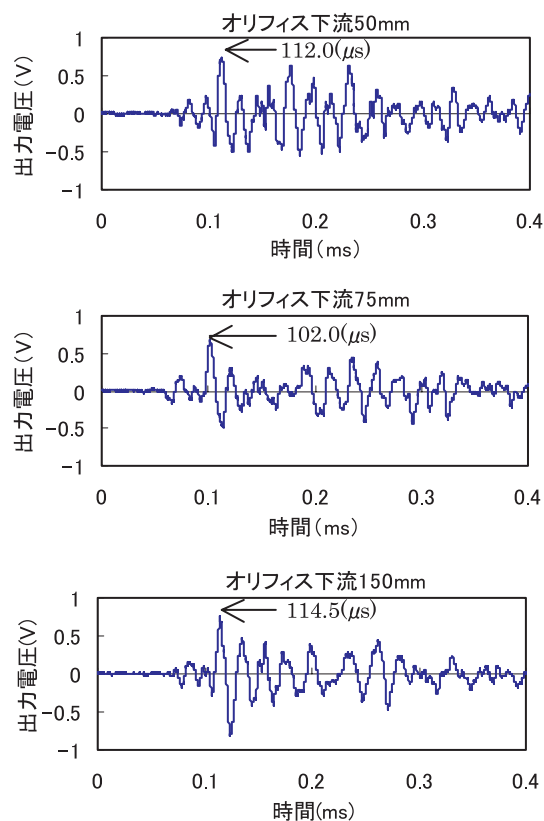


図15 加速度センサーによる同時測定時刻歴波形図  
( $\beta = 0.7$ ,  $V = 15.0$  m/s)

求められる衝撃波発生箇所がオリフィス下流 97mm と同定される。

簡易的に評価するのであれば、パルス状の信号の発生時間を確認し最も早くパルス状の信号が検出されたセンサー付近でキャビテーションによる衝撃波が発生したと評価ができる。プラント配管でのノイズや暗騒音は発生源と発生位置が異なることから、複数センサーによる同時測定から衝撃波の発生位置を同定することによりキャビテーション気泡の崩壊を検知することができる。

マイクロフォンには指向性があり、配管に直角に配置したことから、マイクロフォンによる同時測定では明確な相関と時間差を検出できなかった。キャビテーション気泡の崩壊位置を推定でき、複数のマイクロフォンを衝撃波の発生方向に向けて同時測定すれば、加速度センサーと同様にパルス状信号の検出時間差から発生位置を同定できる可能性がある。

## 6. 結言

キャビテーションの可視化実験と配管外面に取り付けた加速度センサーおよび非接触のマイクロフォンを使用した測定を実施し、その結果からプラント配管でのキャビテーション検知手法について検討し、以下の結論を得た。

- (1) キャビテーションが発達すると、加速度センサーの出力はキャビテーション気泡崩壊が激しい遷移状態で非常に大きな値となる。また、キャビテーション気泡が崩壊した時に生じる衝撃波と推定されるパルス状の信号を検出した。
- (2) 加速度センサーによる流れ方向の出力分布が、キャビテーション気泡の崩壊位置で大きな値となり、壊食率分布とよく一致することが確認された。また、キャビテーション発生箇所の上流側と下流側を比較すると、初生キャビテーションでは上流側で出力が大きくなるのに対し、強いキャビテーションである遷移キャビテーションでは下流側で出力が非常に大きくなることが確認された。
- (3) 非接触のマイクロフォンによる測定の結果、キャビテーションの発生によるパルス状の信号の検出や、オリフィス上流と下流でキャビテーションの有無による出力差が確認され、加速度センサーによる検知手法と同様の手法で評価が可能

であることがわかった。また、加速度センサーとの同時測定の結果、パルス状の信号の発生時間には時間差があり、その時間差から求められた速度は空気中を伝達する音速とほぼ一致した。

これらの結果から、非接触のマイクロフォンでも、配管外面に取り付けた加速度センサーと同様にキャビテーション検知が可能であり、比較基準のない運転中のプラント配管でも流れ方向の出力の大小関係からキャビテーションの検知ができる見通しを得た。今後はこれらのキャビテーション検知手法の有用性を確認するために、実機プラントでの測定を実施していく必要がある。

## 文献

- (1) J.Ozol, J.H.Kim, J.Healzer, "CAVITATION EXPERIENCE WITH CONTROL VALVES IN NUCLEAR POWER PLANTS," ASME-FED-Vol.190, pp.291-297 (1994).
- (2) P.Moussou, S.Cambier, D.Lachene, et al., "VIBRATION INVESTIGATION OF A FRENCH PWR POWER PLANT PIPING SYSTEM CAUSED BY CAVITATING BUTTERFLY VALVES," ASME PVP - Vol.420-2, pp.99-109 (2001).
- (3) 美浜発電所 3号機の点検結果について (C - 1 次系冷却材ポンプ封水注入ラインベント弁溶接部付近からの漏えいの原因と対策), 平成 14 年 11 月 26 日, 関西電力 (株).  
<http://www.kepco.co.jp/genji/index.html>  
(2006 年 6 月 13 日 HP 確認済)
- (4) 佐藤恵一, "流れの中でのキャビテーション気泡の崩壊時近傍の挙動," 日本機械学会論文集(B編), 61 巻 589 号, pp.3099-3104 (1995).
- (5) 吉田義樹, "AE センサーによるポンプのキャビテーション衝撃パルスの計測," ターボ機械, 第 18 巻 第 6 号, pp.11-16 (1990).
- (6) 澤田彰, "AE センサとウェーブレット変換を用いた水車キャビテーションの検出," 第 11 回キャビテーションに関するシンポジウム pp.157-160 (2001).
- (7) ターボ機械協会, ポンプのキャビテーション損傷の予測と評価, 日本工業出版株式会社, (2003).
- (8) 八木良憲, 村瀬道雄, "配管外部に取り付けた加速度センサーによるキャビテーション評価法の検討," INSS Journal, Vol. 10, p.116 (2003).

- (9) 水山成郎, 村瀬道雄, 八木良憲, "配管外部に取り付けた加速度センサーおよびAEセンサーによるキャビテーション検知手法の検討," INSS Journal , Vol. 11, p.129 (2004).
- (10) 水山成郎, 村瀬道雄, 八木良憲, "マイクロフォンによる配管外部からのキャビテーション検知手法の検討", INSS Journal, Vol. 12, p.160 (2005).
- (11) F. Takahashi, Y. Ueno, "Acoustic Monitoring Techniques for Anomalous Sounds from Machinery in Electric Power Plants", Proceedings of the 14th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, pp 567-572 (1996).
- (12) 加藤洋治編, 新版 キャビテーション, 槇書店, p.204 (1999).