

# 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

## Investigation of Detection Method of Cavitation Behavior using Microphone outside of Piping

水山 成郎 (Shigeo Mizuyama)\*<sup>1</sup> 村瀬 道雄 (Michio Murase)\*<sup>1</sup> 八木 良憲 (Yoshinori Yagi)\*<sup>2</sup>

**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研究開発が求められている．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検知できることが望ましい．本研究では非接触のマイクロフォンによるキャビテーション検知手法について配管外部に取付けた加速度計との比較実験を行った．その結果，以下のことが明らかになった．(1) キャビテーション数によってマイクロフォンの出力は変化し，キャビテーションが遷移状態に発達するとマイクロフォン出力電圧は急上昇した．この傾向は加速度計での測定結果と定性的に一致した．(2) キャビテーション発生時にマイクロフォン出力波形に8 kHzのハイパスフィルタ処理をすることでパルス状の波形が明確に検出された．(3) キャビテーションの有無によって周波数分布が異なり，キャビテーションが発生すると，主に1~3 kHzの周波数成分が大きくなった．(4) 加速度計とマイクロフォンによる同時測定の結果，同時期に発生したと考えられる衝撃波を両方のセンサーによって検知できた．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計と同様にキャビテーション検知ができることがわかった．

**キーワード** キャビテーション，加速度計，マイクロフォン，周波数分析，衝撃波

**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 demanded to develop a detection method of cavitation. Especially, in a plant system such as nuclear power plants, it is preferred to detect them measuring outside of pipes during plant operation. In this paper, the detection method of cavitation using a microphone was experimentally examined comparing with an accelerometer, as a result, (1) Output of the microphone varied with the cavitation number, and output voltage of the microphone increased with development of cavitation, and the measurement result with the microphone was similar to that of the accelerometer, qualitatively. (2) When cavitation occurred, a pulse shaped signal was clearly detected by carrying out 8 kHz high pass filter processing to the microphone output waveform. (3) When cavitation occurred, frequency distributions of microphone output waveform differed from those without cavitation and the frequency component of an output waveform with a microphone became large mainly in the range of 1 kHz to 3 kHz. (4) The result of the simultaneous measurement by the accelerometer and the microphone, both of sensors detected the shockwave considered to generate at the same time. Using the characteristics of the results, it turned out that cavitation detection using microphone without contacting pipes could be performed like an accelerometer mounted on the pipe surface.

**Keywords** cavitation, accelerometer, microphone, frequency analysis, shockwave

## 1. 緒言

弁やオリフィスなどの配管の絞り部では流速が局部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，衝撃圧力が発生する．この衝撃圧力が配管の壊食や振動をもたらし，プラント配管の潜在的な損傷要因となる．平成14年に関西電力(株)美浜発電所3号機の1次系冷却材ポンプ封水注入系統において，プラント起動停止に伴う弁の開度調整によるキャビテーションの発生に起因する振動

\* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

\* 2 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現 関西電力(株)

によって配管溶接部に疲労亀裂が生じた事例があった<sup>(1)</sup>。これは通常の運転状態とは異なる過渡的な運転状態でのトラブルである。このような運転状態が変更になる操作の際、いつキャビテーションが発生するかは配管内の流動パラメータによっても変わるため、容易に判断できない。このため、運転操作時や運転中にキャビテーション発生を検知するための手法が求められている。また、検知手法を開発し、キャビテーションによるトラブルを未然に防止することで、原子力発電所の安全で安定な運転に寄与することが可能となる。

現在、キャビテーション現象を把握する方法に関して、多くの研究機関や大学で、さまざまな研究が実施されている。例えば、(1)可視化による気泡の発生や崩壊といった気泡挙動の観察<sup>(2),(3)</sup>、(2)壊食量測定やキャビテーション気泡の崩壊衝撃力測定といった配管内部の状態評価<sup>(4)-(6)</sup>、(3)気泡崩壊時の衝撃力によって材料にもたらされる振動や超音波やアコースティックエミッション (AE) 等をセンサーを使用して間接的に検知する方法<sup>(7),(8)</sup>、(4)キャビテーション発生時に生じる音響をマイクロフォン等によって非接触測定で検知する方法<sup>(9),(10)</sup>、(5)数値解析によって圧力場を計算し気泡の発生や消滅を検知する方法などがある<sup>(11),(12)</sup>。それぞれの手法には特徴があり、運転中のプラントへの適用を考慮し、最善の手法について検討する必要がある。それぞれの特徴を記載すると、(1)と(2)の手法は、最も現象把握が容易であるが、実機適用ができない。(3)の手法は、(1)と(2)の手法と比較して、現象把握に関しては間接的となり、内部情報との比較の問題や、センサーの温度条件によって、取り付け箇所が制限されるといった点があるが、実機適用に関しての技術的課題は比較的小さい。ポンプの壊食量評価に加速度計を使用した報告や<sup>(9)</sup>、加速度計やAEセンサーを用いてキャビテーション検知に使用している報告がある<sup>(13),(14)</sup>。(4)の手法は、実機適用範囲は広く、信号頻度とキャビテーション状態の相関が良く、キャビテーション検知に適用できる可能性がある。プラントで発生する異常音から、機器の診断をする報告がされている<sup>(15)</sup>。しかし、キャビテーション現象に特化したものではなく、実際にキャビテーションを検知したという報告はされていない。また、運転中のプラントは多数の音源があり、ノイズレベルによっては適用が困難になると考えられる。(5)の手法は、さまざまな実機条件を模擬することができ、適用範囲が広く、汎用の解析プログラ

ムでもキャビテーション解析が可能となりつつあるが、現状では計算精度が低く、解析モデルの改良が必要であり、将来技術といえる。

筆者らは、これらの特徴を踏まえ、実機適用に関して技術的課題が比較的少なく、また、壊食量の評価にも使用されている加速度計による外面接触方式を検討し、運転中のプラントでキャビテーションの発生を検知できる見通しを得た<sup>(16)</sup>。しかし、加速度計による配管外面からの測定は、保温材が取り付けられている高温配管や、高所の配管などでは加速度計を取り付けるのは困難であり、すべての配管で加速度計を用いてキャビテーション検知する手法を適用することは困難である。そこで、本研究では、現場での適用範囲がより広い、非接触のマイクロフォンを使用したキャビテーション検知の可能性について検討した。オリフィス体系での可視化実験による現象把握を行い、配管の外表面に取り付けた加速度計の測定結果と非接触のマイクロフォンによる測定結果からキャビテーション検知手法の運転中のプラントへの適用性について検討した。

## 2. 実験

### 2.1 実験ループ

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、試験部を設置した配管から構成されており、閉ループ構造である。レザーバは容積が1.28m<sup>3</sup>の圧力容器であり、安全弁の吹き出し圧力の3.2MPaまでの加圧が可能である。レザーバ内部にはヒータが取り付けられており、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(1kPaまで測定可能)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。実験装置の圧力はレザーバに取り付けた窒素ボンベにより加圧し調整した。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>)。水温は25℃前後とした。流速は加速度計の許容最大加速度を考慮してオリフィス部で約15.0m/sとした。

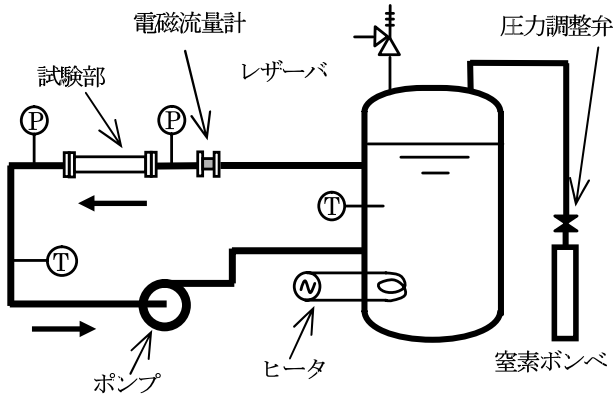


図1 実験ループ

## 2.2 試験部

キャビテーション実験の試験部の概要を図2に示す。この部分は配管部とオリフィス部で構成され、実験ループへの脱着が可能である。配管部は通常の円柱配管とし、材質はステンレス鋼 (SUS304) とした。また、内径は49.5 mm、肉厚は5.5 mmとした。オリフィス部はステンレス鋼製 (SUS304) で、オリフィス内径は24.75 mmであり、配管内径の1/2である。また、オリフィス長さは28mmである。

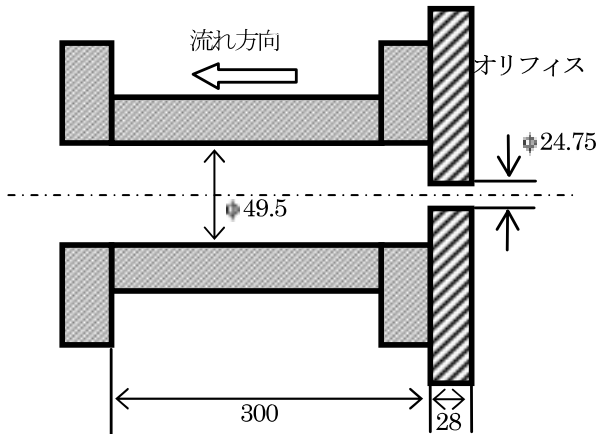


図2 試験部 (単位: mm)

## 2.3 実験パラメータ

キャビテーション実験の条件設定において重要なパラメータはキャビテーション数であり、この値が変化することにより配管が受ける衝撃が異なり、この値が小さくなるとキャビテーションが発生しやすい状態となる。キャビテーション数 $\sigma$ は流速によって以下のように定義される。

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

ここで、 $P$ はオリフィス下流の圧力、 $P_v$ は実験水温での飽和蒸気圧、 $\rho$ は実験水温での流体密度、 $V$ はオリフィス部での流速である。

本研究では、キャビテーション数の変化によるキャビテーション衝撃の相対的な変化を加速度計の出力電圧の変化により評価し、その結果をもとにして設定するキャビテーション数を決定した。キャビテーション数を変化させる場合、流速は一定としてオリフィス下流の圧力のみを変化させた。

## 2.4 測定方法

図3に本研究で用いた各センサーによる測定システムを示す。センサーを用いてキャビテーション気泡の崩壊時に壁面が受ける衝撃の加速度を測定すると、卓越周波数は数10kHzにあるとされている<sup>(10)</sup> (ただし、高周波の減衰の大きいアクリル材の場合)。またキャビテーション発生時には騒音が大きくなり、気泡の膨張や収縮・崩壊による特徴的な音響が発生することが知られており、現場でのキャビテーション検知手法の1つとして経験的に用いられている。そこで本研究では、高周波数帯域まで測定可能な圧電型の加速度計 (TEAC製, 703FB, 0.3~45kHz  $\pm$  3 dB) 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。加速度計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: 周波数帯域20~20kHz, 最大音圧レベル140dB, 感度-29dB  $\pm$  3 dB, 外形寸法 $\phi$  13.2 $\times$ 13.5mm) とマイクロフォン用プリアンプ (小野測器製, MI-3110: 周波数帯域20~20kHz, ゲイン-3  $\pm$  1 dB (1 kHzにて), 最大出力電圧3 Vrms, 入力インピーダンス 約5 G $\Omega$ , 外形寸法 $\phi$  13 $\times$ 61 mm) 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, LPF, HPF, スルー対応, カットオフ周波数1~30kHz) 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。

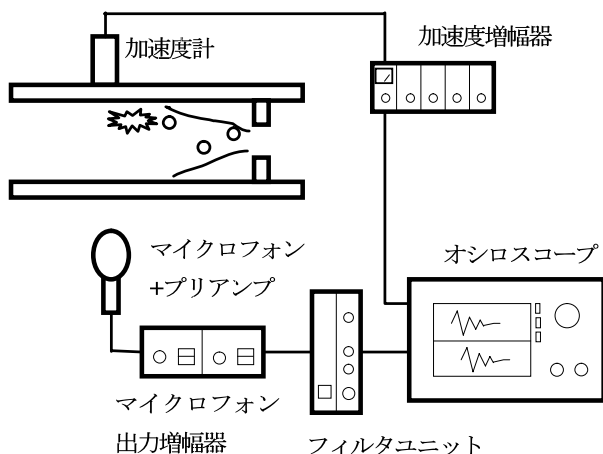


図3 加速度計とマイクロフォンによる測定システム

### 3 マイクロフォンによるキャビテーション現象の検出と実機適用性の検討

#### 3.1 キャビテーション数と衝撃強さ

マイクロフォンを使用し、キャビテーション数を変化させたときの信号出力電圧の変化を測定した。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の箇所とした。配管外面とマイクロフォンとの距離が50mmとなるように設置した。試験部はSUS304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と加速度計出力電圧RMSで整理したものを図4に示す。左の縦軸はマイクロフォン出力電圧RMSの平均値、右の縦軸は加速度計出力電圧RMSの平均値、横軸はキャビテーション数とした。本研究で用いたオリフィス体系では $\sigma = 2.4$ 付近からマイクロフォンの出力が増加し始めた。この状態ではキャビテーション音が聞こえ始めるが、気泡は目視できないほど細かく薄い状態であった。マイクロフォンの出力は $\sigma = 2.0$ 付近まで緩やかに増加した後低下し始め、 $\sigma = 1.8 \sim 1.4$ の範囲では低下した。 $\sigma = 1.6$ 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 $\sigma$ を低下させると、出力が増加し、 $\sigma = 0.5$ 付近でピークに達した。 $\sigma < 0.5$ ではスーパーキャビテーション状態となり、マイクロフォン出力電圧は低下した。このように、キャビテーション数の変化によって、マイクロフォンの出力が異なることが確認された。キャ

ビテーション気泡の崩壊が激しい $\sigma = 0.9$ から0.6の範囲ではマイクロフォン出力電圧が急激に増加し $\sigma = 2.8$ と比較して20倍以上になった。この結果は配管に加速度計を取り付けて、キャビテーション数を変化させたときの出力電圧RMSの測定結果と定性的に一致する結果となった。オリフィス上流90mmの箇所では $\sigma = 0.7$ で最大となったことに関しては、オリフィス下流で発生したキャビテーションによる音響が空气中を伝播したことが考えられる。この影響を取り除くためにマイクロフォンに外部からの音響を遮音する工夫が必要であると考えられる。また、オリフィス上流側と下流側で比較すると、ちょうどキャビテーション気泡が定常的に発生しオリフィス下流部で気泡崩壊が始まる段階である $\sigma = 1.4$ で上流側と下流側の出力値の大きさが逆転した。このことから、キャビテーション発生箇所によってマイクロフォン出力電圧が異なり、加速度計でキャビテーション数を変化させたときの出力電圧の変化と同様の結果が得られた。

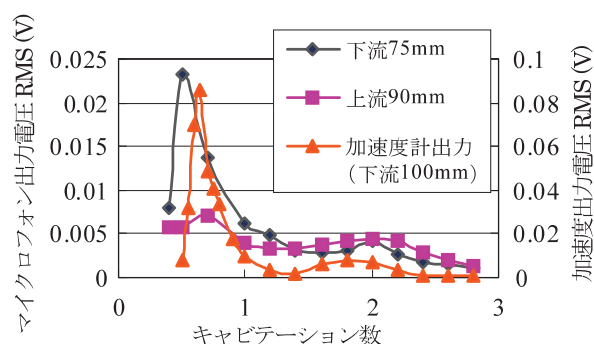


図4 キャビテーション数と測定位置の変化によるマイクロフォン出力電圧と加速度計出力電圧の比較

#### 3.2 マイクロフォン出力波形および周波数分析

キャビテーション発生時の気泡の膨張や収縮・崩壊によって引き起こされる音響は特徴的であり、キャビテーション発生の有無でその音響の周波数が異なると考えられる。そこで、キャビテーションが発生しているときの音響の周波数分析を行い、その周波数分布からキャビテーション検知の可能性について検討した。

マイクロフォンの設置箇所はオリフィス下流75mm、配管外面とマイクロフォン距離を50mmとし、各キャビ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プログラム（アストロデザイン社製，DADisp）を使用した。キャビテーション数  $\sigma = 2.8, 1.4, 0.7$  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，キャビ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図5(a)～(d)に示す。

キャビテーションの発生していない  $\sigma = 2.8$  のとき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。実験室では騒音がそれほど大きくないためそれほど問題にならないが，実際に運転中のプラントでは，この暗騒音が大きいと予想されるため問題になると考えられる。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5(d)で示すポンプ運転した直後（キャビテーション無）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  $\sigma = 1.4$  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， $\sigma = 2.8$  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。この出力波形の周波数解析した結果からは，キャビテーション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  $\sigma = 0.7$  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0.06Vとなり，最大出力電圧は  $\sigma = 2.8$  の時と比較して約10倍程度大きくなり， $\sigma = 2.8$  や  $\sigma = 1.4$  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。 $\sigma = 1.4$  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

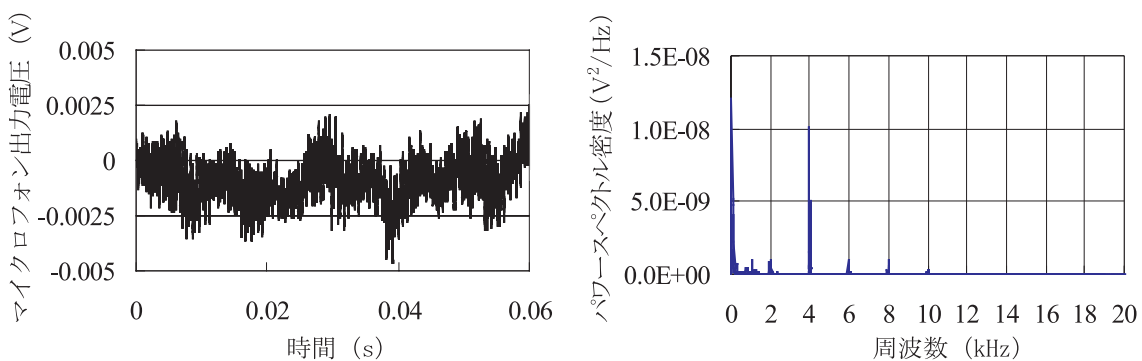


図5(a) マイクロフォン出力波形とパワースペクトル密度 ( $\sigma = 2.8$ )

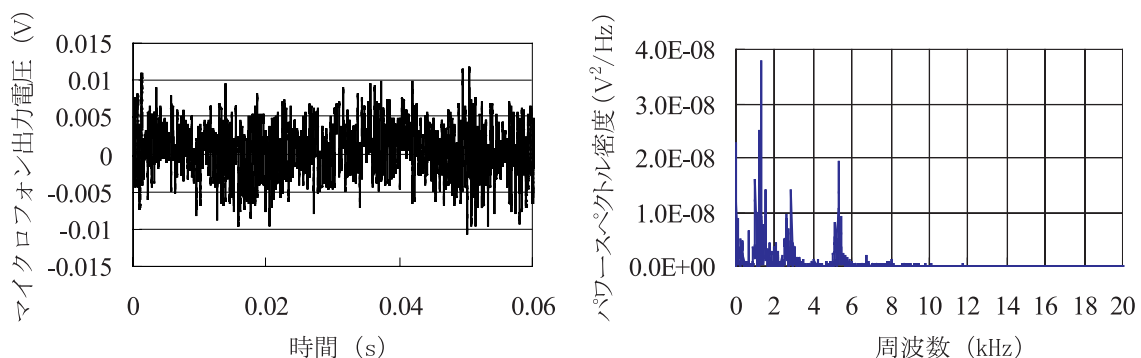


図5(b) マイクロフォン出力波形とパワースペクトル密度 ( $\sigma = 1.4$ )

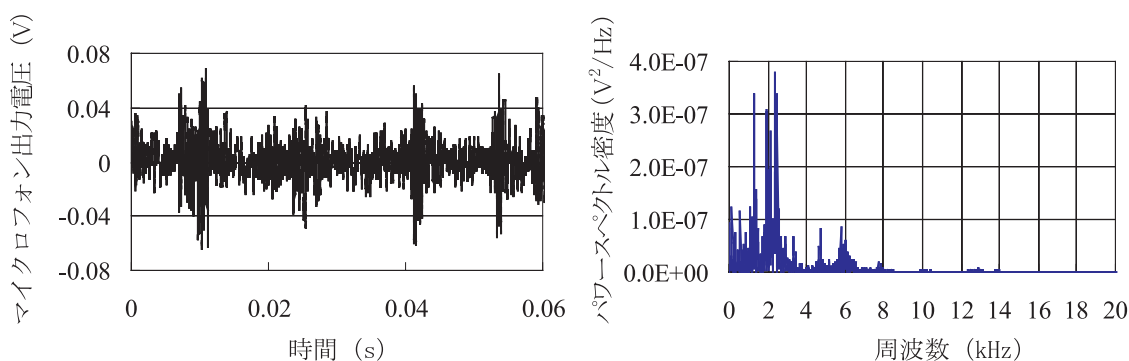


図5(c) マイクロフォン出力波形とパワースペクトル密度 ( $\sigma = 0.7$ )

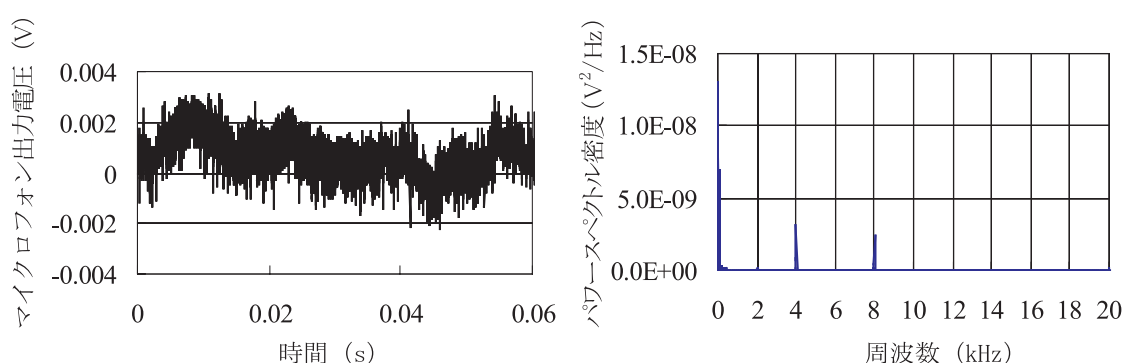


図5(d) マイクロフォン出力波形とパワースペクトル密度 (ポンプ運転直後)

くなっているように思われる。この実験結果からキャビテーションの発達に伴い、音響レベルが上昇し、その周波数特性は高周波成分が大きくなることがわかる。また、加速度計で測定したときと同様にパルス状の信号が検出されることもキャビテーション発生時の特徴と考えられる。

### 3.3 ハイパスフィルタ処理によるマイクロフォン出力波形の特徴

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、その出力波形にパルス状の信号が検出され、キャビテーション検知に適用できる可能性がある。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にくいことが容易に予測される。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>(16)</sup>では、キャビテーション検知にハイパスフィルタ（以降HPFという）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、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HPF処理を行い、適切なHPF処理について検討した。マイクロフォンの設置箇所はオリフィス下流75mm、配管外面とマイクロフォン距離を50mmとし、キャビテーション数  $\sigma = 2.8, 1.4, 0.7$  として、HPF処理無と2 kHz、4 kHz、6 kHz、8 kHzと10 kHzのHPF処理を行い、その出力波形を確認した。ここではHPF処理無と2 kHzと8 kHzの結果を図6 (a)~(c)に示す。HPF処理には実時間で処理可能なフィルタユニットによる処理と波形解析プログラムによる処理の2種類で行った。ここではフィルタユニットによる処理の結果を示す。

HPF処理を行っていないキャビテーション数  $\sigma = 2.8$  のマイクロフォン出力波形では、ある低周波の音響にノイズと思われる高周波成分が重畳している出力波形となっている。この波形にHPF処理を行うと、2 kHz HPF処理では、周期的なインバータ周波数が見られる。また、低周波数の成分が除去され、波形の大きな振幅がなくなっていることがわかる。8 kHzのHPF処理を行うと周期的なインバータ周波数は除去されていることがわかる。処理後の波形からは特

に特徴的な信号は見られず、細かいノイズのような出力波形となっている。出力電圧はHPFの周波数を上昇させると小さくなっている。 $\sigma=0.7$ のマイクロフォン出力波形にHPF処理を行った。8 kHzのHPF処理を行った波形でパルス状の信号が検出された。また、HPF周波数が8 kHzのとき、パルス状の波形が鮮明になっている。この結果からキャビテーション検知に用いる最適なHPFはインバータノイズの影響も除去可能であり、波形も鮮明に確認できる8 kHzのHPFが有効と考える。また、実際にキャビテーションが発生している $\sigma=1.4$ の時にはあまり明確なパルス状の信号を検出することができなかった。音響でパルス状の波形を検知できるのは、キャビテーションが遷移状態にまで発達し、気泡崩壊による衝撃が

配管内壁面近くで発生するか、もしくはそれに準ずる大きさの配管への衝撃を発生する気泡崩壊が水中で発生するときであると考えられる。キャビテーション壊食への影響の少ない初生段階では、気泡崩壊が配管に与える影響が小さいためにパルス状の信号が検出されなかったと考える。

図7は8 kHzのHPF処理をしたときのキャビテーション数とマイクロフォン出力電圧RMSとの関係を示したものである。定性的には図4に示したHPF処理しない場合とほぼ同様であるが、キャビテーション数 $\sigma=1.4$ を境界として、HPF処理をした方がオリフィスの上流と下流で明確な差が生じた。これはキャビテーションの初生段階ではオリフィス部でキャビテーションが発生するため、オリフィス上流側のマ

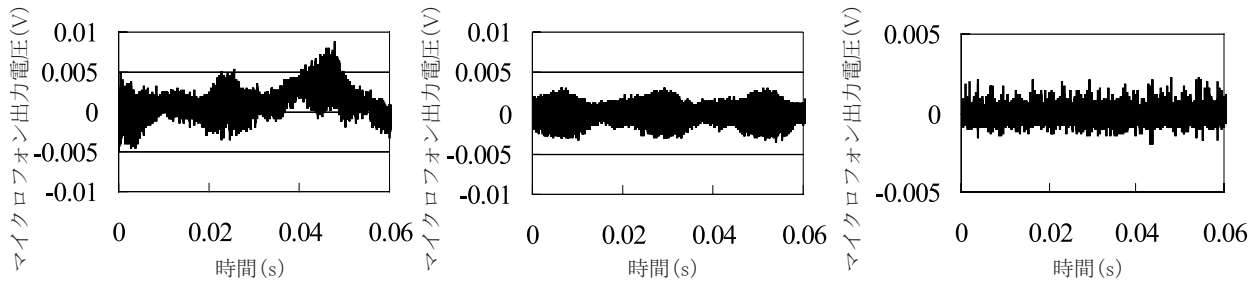


図6(a) マイクロフォン出力波形 ( $\sigma=2.8$  , 左 : HPF処理無, 中央 : 2 kHz HPF処理, 右 : 8 kHz HPF処理)

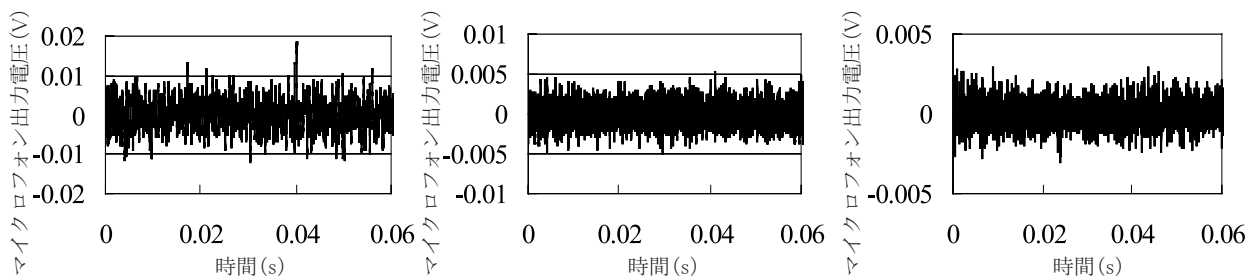


図6(b) マイクロフォン出力波形 ( $\sigma=1.4$  , 左 : HPF処理無, 中央 : 2 kHz HPF処理, 右 : 8 kHz HPF処理)

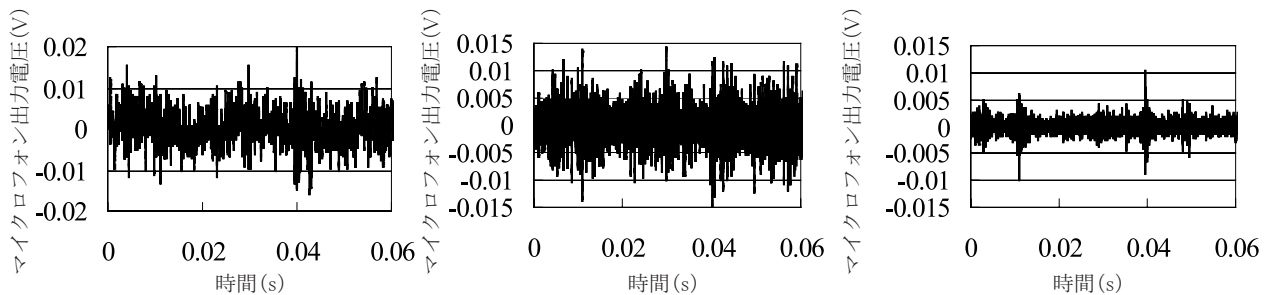


図6(c) マイクロフォン出力波形 ( $\sigma=0.7$  , 左 : HPF処理無, 中央 : 2 kHz HPF処理, 右 : 8 kHz HPF処理)

マイクロフォン出力電圧がオリフィス下流側のマイクロフォン出力電圧より大きくなり、キャビテーションが激しくなる遷移状態になるとオリフィス下流側でキャビテーション気泡の崩壊が発生することからオリフィス下流側出力電圧が上流側より大きくなったと考えられ、キャビテーション気泡崩壊位置との相関があると考えられる。

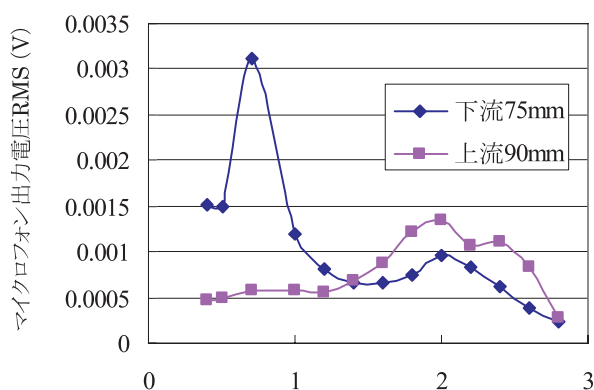


図7 キャビテーション数とマイクロフォン出力電圧RMS (8 kHz HPF処理)

### 3.4 加速度計とマイクロフォンによる同時測定

筆者らはキャビテーション発生時には配管外部に取付けた加速度計の出力波形にはパルス状の信号が検出されることを報告<sup>(16)</sup>した。非接触のマイクロフォンにも同様に、HPF処理を行うことでパルス状の信号が検出されることが実験より明らかになった。そこで、加速度計とマイクロフォンで同時測定を行い、マイクロフォンで捕らえられた信号が実際にキャビテーションに起因するものであるかを検討した。

実験条件は流速をオリフィス部平均流速の15.0 m/sとし、キャビテーション数 $\sigma = 0.7$ とした。マイクロフォン出力波形はフィルタユニットによる8 kHz HPF処理を行った。マイクロフォンと加速度計の取り付け箇所はオリフィス下流75mmとし、配管外面とマイクロフォンとの距離は200mmとした。その結果を図8に示す。

加速度計で測定されたパルス状の信号すべてをマイクロフォンで測定はできていないが、加速度計で測定されたパルス状の波形と同時刻に発生したと考えられるマイクロフォンの出力波形があることがわかる(図8の赤丸部分)。この波形のピーク発生時間を調べると、マイクロフォン出力波形のピーク到達

時間は46.2 ms、加速度計出力波形のピーク到達時間は45.4 msとなり、その時間差は0.8 msである。空気中の音速を340 m/s (気温15°Cの音速) とすると配管外面からマイクロフォンへの音響の最短到達時間は(配管外面とマイクロフォンとの距離/空気中の音速)で表され、 $(0.2/340) = 0.588$  msとなり、測定した時間遅れ0.8 msより約0.2 ms短い。この誤差の原因はセンサー特性や測定ケーブル長さの違いなどによる測定システムに起因するものとキャビテーション気泡崩壊箇所の正確な位置が不明なことによる伝達距離の差が挙げられる。しかし、これはキャビテーションによって引き起こされたと考えられる衝撃波(パルス状の信号)が音響として空气中を伝搬し、マイクロフォンで測定されたと考えるのが妥当である。

マイクロフォンの信号は加速度計と比較して、キャビテーション発生時の特徴であるパルス状の信号が検知されにくい結果となったが、配管外面に加速度計を直接取り付けなくても、非接触のマイクロフォンによってキャビテーション検知ができる可能性がある。

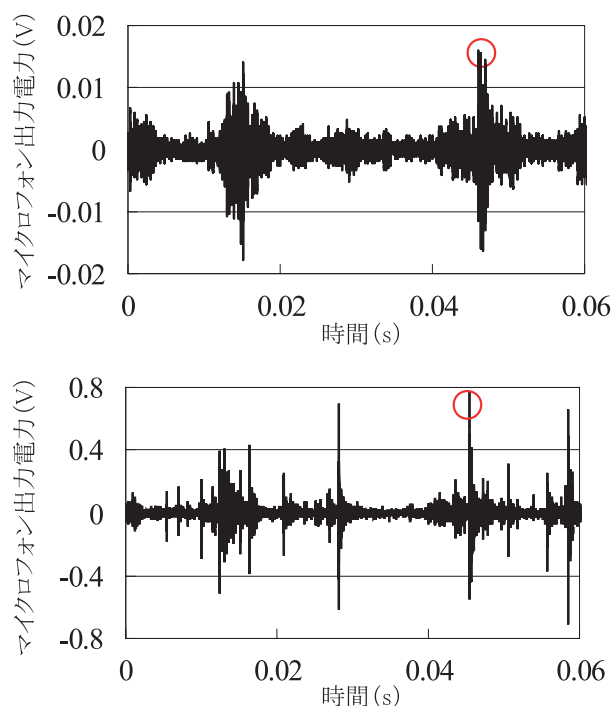


図8 同時測定したマイクロフォン出力波形(8 kHz HPF処理)と加速度計出力波形(赤丸は同時期に発生したと考えられるピーク)



## 4. 結論

配管外部に取り付けた加速度計と非接触のマイクロフォンによる測定結果から、キャビテーション発生検知の可能性について検討し、以下の結論が得られた。

- (1) キャビテーション数によって、マイクロフォン出力電圧の大きさが変化する。その変化の傾向は加速度計による出力電圧測定結果と定性的に一致した。キャビテーションが発生している箇所ではマイクロフォン出力値が大きくなり、8 kHzのHPF処理をすることでキャビテーションが発生していない箇所との出力電圧差がより明確になる。
- (2) キャビテーションの発達に伴い、マイクロフォン出力波形にはパルス状の信号が検出される。また、8 kHz HPF処理をすることでパルス状の波形がより明確に検出できる。
- (3) キャビテーションの有無によって周波数分布が異なる。その分布の特徴はキャビテーションが発生するとその1～3 kHz付近にピークがあり、そのピークを頂点とした山型となる。
- (4) 加速度計とマイクロフォンによる同時測定の結果、同時期に発生したと考えられる衝撃波を両方のセンサーによって検知できた。

上記の結論から、非接触のマイクロフォンを用いて、配管外面に取り付けた加速度計によるキャビテーション検知方法と同様に、遷移状態のキャビテーションであればキャビテーションが検知できると考えられる。

## 謝辞

本研究の実験実施にあたって、関電プラント（株）の橋本幸夫氏に多大なご協力をいただいたことを、ここに感謝します。

## 文献

- (1) <http://www.kepco.co.jp/gensi/index.html>  
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）。（平成17年7月1日 HP確認済）
- (2) 佐藤恵一，キャビテーション気泡崩壊時における圧力波の伝搬と周囲気泡の崩壊，第12回キャビテーションに関するシンポジウム，pp.85-88(2004).
- (3) 清水誠二，長方形ノズルから噴出するキャビテーション噴流の観察，第11回キャビテーションに関するシンポジウム，pp.105-108(2001).
- (4) 内山恒久，最高衝撃圧を呈する水温近傍におけるキャビテーションの挙動，日本機械学会論文集(B編)，69巻681号，pp.1128-1133(2003).
- (5) 岡田庸敬，服部修次，キャビテーション気泡崩壊圧の伝ば挙動と壊食量，日本機械学会論文集(A編)，62巻600号，pp.1820-1826(1996).
- (6) 佐藤恵一，キャビテーション壊食に関連する渦キャビティ圧壊挙動の観察，日本機械学会論文集(B編)，63巻616号，pp.3815-3821(2003).
- (7) 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).
- (8) 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).
- (9) 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（2003）.
- (10) 加藤洋治，新版 キャビテーション，槇書店（1999）.
- (11) 沖田浩平，翼まわりの非定常キャビテーション流れの数値シミュレーション，日本機械学会論文集(B編)，68巻667号，pp.637-644(2002).
- (12) 湊明彦，圧縮性二流体モデルによる気液二相流の数値解析，日本機械学会論文集(B編)，68巻673号，pp.2489-2495(2002).
- (13) 佐藤恵一，キャビテーション気泡形態の違いによる気泡衝撃特性の比較，日本機械学会論文集(B編)，56巻532号，pp.3597-3602(1990).
- (14) 澤田彰，AEセンサー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).
- (15) F.Takahashi, et al. Acoustic Monitoring Techniques for Anomalous Sounds from Machinery in Electric Power Plants, 14<sup>th</sup> International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries,

pp.567-572 (1996)

- (16) 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).