

# 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

Investigation of Detection Method of Cavitation Behavior with Accelerometer and AE sensor Mounted on Outer Surface of Piping

水山 成郎 (Shigeo Mizuyama)\* 村瀬 道雄 (Michio Murase)\* 八木 良憲 (Yoshinori Yagi)\*\*

**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。本研究では配管の外部に取り付けた加速度センサーとAEセンサーにより、キャビテーション発生を検知する手法について実験を行った。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加速度センサーの出力は変化し、キャビテーションが発達するとパルス状の信号が検出される。(2) 加速度センサーとAEセンサーの出力波形の周波数分析の結果、キャビテーション固有の周波数は検出されず、むしろ配管材料とセンサーの特性に依存した周波数分布となった。また、キャビテーションが発達するにつれ、すべての周波数帯域で信号値は増加する。(3) 加速度センサーによる流れ方向の出力分布はキャビテーション数で大きく変化し、この結果から気泡崩壊位置の概略評価が可能である。(4) 複数のセンサーを取り付けて同時測定を行い、パルス状の信号の時間差から気泡崩壊位置を同定することができる。(3)と(4)により、実機運転中にキャビテーションの発生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、AEセンサー、周波数分析、空間分布、衝撃波

**Abstract** Cavitation induced vibration and the consequent erosion of pipes are one aspect of the potential damaging factor in piping system, and in order to prevent such trouble, it is demanded to develop a detection method of cavitation. Especially, in a plant such as nuclear power plant, it is preferred to detect them measuring outer surface of pipe during plant operation. In this paper, a result of experiment to detect cavitation by using accelerometer and acoustic emission (AE) sensor is discussed. As a result, (1) Output of the accelerometer varied with the cavitation number, and pulse shaped signal was detected as the progress of cavitation. (2) Conducting frequency analysis of the output of the accelerometer and the AE sensor, a specific frequency related to cavitation was not detected and distribution of frequencies were a rather related to material of the pipe and characteristics of sensors. It was also concluded that the output signal increased in all frequency band as the progress of cavitation. (3) Distributed output of accelerometer into flow direction differed significantly by the cavitation number and by using this characteristic, it is possible to locate bubble collapsing area roughly. (4) By conducting simultaneous measurement using several sensors and acquiring the time lag of the pulse shaped signal. It is possible to specify bubble collapsing area. Using the characteristics of results (3) and (4), prospect of detecting cavitation during plant operation were obtained

**Keywords** cavitation, accelerometer, AE sensor, frequency analysis, spatial distribution, shockwave

## 1. 緒言

弁やオリフィスなどの配管の絞り部分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、衝撃圧力が発生する。この衝撃圧力が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号機の封水注入ラインにおいて、プラン

\* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

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

ト起動停止に伴う弁の開度調整によるキャピテーションの発生に起因した振動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>。これは過渡的な運転状態でのトラブルである。このような弁操作の際、どの開度からキャピ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ピ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、キャピテーションによるトラブルを未然に防止することで、原子力プラントの安全・安定運転に寄与することが可能となる。

キャピテーション現象を把握する方法に関しては、現在、多くの研究機関で、さまざまな手法が実施されている。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把握<sup>(2)(3)</sup>、(2)壊食量測定や衝撃力測定といった内部情報の把握<sup>(4)-(6)</sup>、(3)気泡崩壊時の衝撃力による振動やAEなどセンサーなどを使用した外面接触測定による把握<sup>(7)(8)</sup>、(4)キャピテーション発生時に生じる音響をマイクロフォン等の非接触測定で把握する方法<sup>(9)(10)</sup>、(5)数値解析によって気泡の挙動を把握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、実機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)および(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)、(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センサーを使用している報告や<sup>(9)</sup>、加速度センサーやAEセンサーを用いてキャピ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、信号頻度とキャピテーション状態の相関が良く、キャピテーション検知に適用できる可能性があるが、実機プラントで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、適用範囲が広いが、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。

本研究で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センサーとAEセンサーによる外面接触方式によって検知手法を検討するこ

ととした。発生検知手法の開発のためにオリフィス体系での可視化実験による現象把握を行い、外部に取り付けた加速度センサーとAEセンサーによるキャピテーション検知手法の実機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 $1.28\text{m}^3$ の圧力容器であり、安全弁の吹き出し圧力の $3.2\text{MPa}$ 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ポ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( $3\sim 6\text{mg/l}$ )。水温は $25$ 前後とした。流速は加速度センサーの許容最大加速度を考慮して約 $15.0\text{m/s}$ とした。

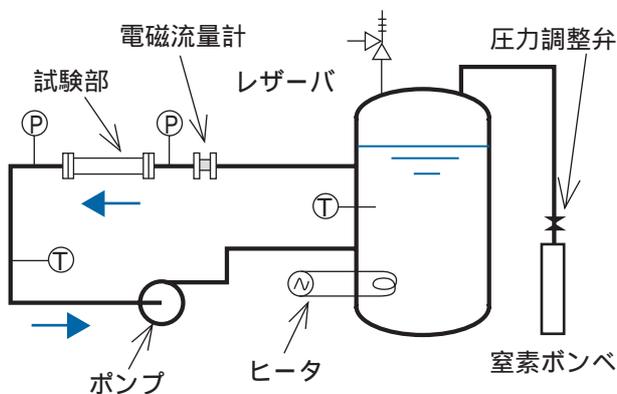


図1 実験ループ

## 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を可能とした。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49.5mm、肉厚は5.5mm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24.75mmであり、配管内径の1/2の大きさである。また、オリフィス長さは28mmである。また、加速度センサーは図2のように試験部の外面へ取り付け付けた。

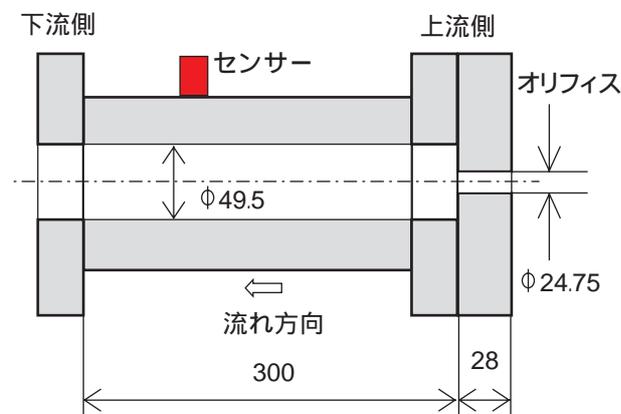


図2 試験部(単位:mm)

## 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は以下のように定義される。

$$= \frac{2(P - P_v)}{V^2}$$

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、 $V$  は実験水温での流体密度、 $V$  はオリフィスのど部での流速であり、その値は電磁流量計で測定した流量を流路断面積で除して求めた。

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は加速度センサー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

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10k Hzにあるとされている<sup>(10)</sup>。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センサー(TEAC製, 703FB, 0.3~45kHz ± 3dB)および、同じく圧電素子型のAEセンサー(NPA製, UT-1000, 60k~1MHz)を使用した。図3に各センサーによる測定システムを示す。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付けた後、樹脂製バンド(ロックタイ)で固定した。AEセンサーは音響カプラとしてセンサーにワセリンを塗布して試験部に取り付け、加速度センサーと同様に樹脂製バンド(ロックタイ)で固定した。各センサーの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。データは実験終了後、パソコンで処理した。

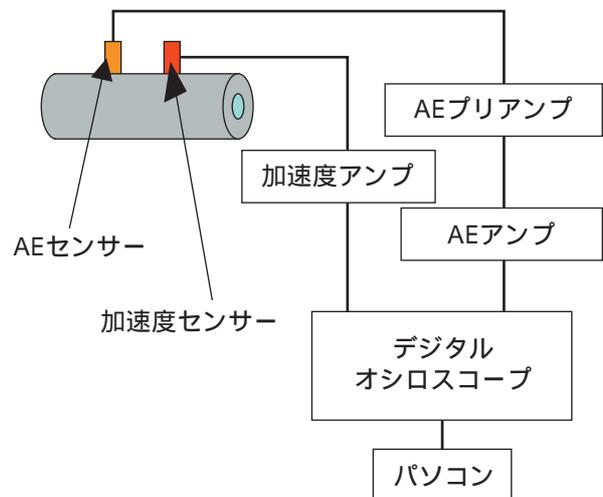


図3 加速度センサーとAEセンサー測定システム

## 3. 各センサーによるキャビテーション現象の把握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

キャビ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下流100mmの箇所に取り付け、流速を一定(15.0~15.4 m/s)とし、キャビ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4に示す．縦軸には加速度センサー出力電圧のRMSの平均値（512個のデータ）を，キャビテーションが生じていない時（ $\beta = 2.8$ と $2.6$ ）の出力電圧RMSの平均値で除した値をとった．本研究で用いたオリフィス体系では $\beta = 2.4$ 付近から加速度センサー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淡い状態であった．加速度は $\beta = 2.0$ 付近まで増加した後，出力は低下し始め， $\beta = 1.8 \sim 1.4$ の範囲では低下した． $\beta = 1.6$ 付近で気泡が目視できるようになることから， $\beta = 1.4$ 付近までを初生領域と考えた．さらに $\beta$ を低下させると，出力が増加し， $\beta = 0.6$ 付近でピークに達した． $\beta < 0.6$ ではスーパーキャビテーション状態となり，加速度センサーの出力は低下した．このように，キャビテーション数の変化によって，加速度センサー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 $\beta = 0.9$ から $0.6$ の範囲では加速度センサー出力が $\beta = 2.8$ と比較して100倍以上となり，キャビテーションが発生していない場合と比較することで，キャビテーション発

生を検知できる可能性がある．ただし，実機プラントへ適用する場合は，プラント運転管理上の問題から，キャビテーション数の変更（弁開度や系統圧力の変更）を行うことは出来ない．

### 3.2 各キャビテーション数での流動状態と加速度センサー出力波形

キャビテーション数 $\beta = 2.8$ （気泡無）， $1.4$ （初生段階），と $0.7$ （遷移状態）における流動状態と加速度センサー出力波形を図5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り付け位置は，図4の衝撃強さ測定と同じオリフィス下流 $100\text{mm}$ とした． $\beta = 2.8$ では出力値は微小である．初生段階にある $\beta = 1.4$ では出力値は小さいが間欠的にパルス状の信号が検出された．キャビテーションが発達した $\beta = 0.7$ になると，出力値の大きいパルス状の信号が検出され，信号頻度も増加した．これは，キャビテーション気泡崩壊によって生じる衝撃波を捕らえたものであると考える．従って $\beta = 0.7$ 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を検知が可能であり，その出力波形

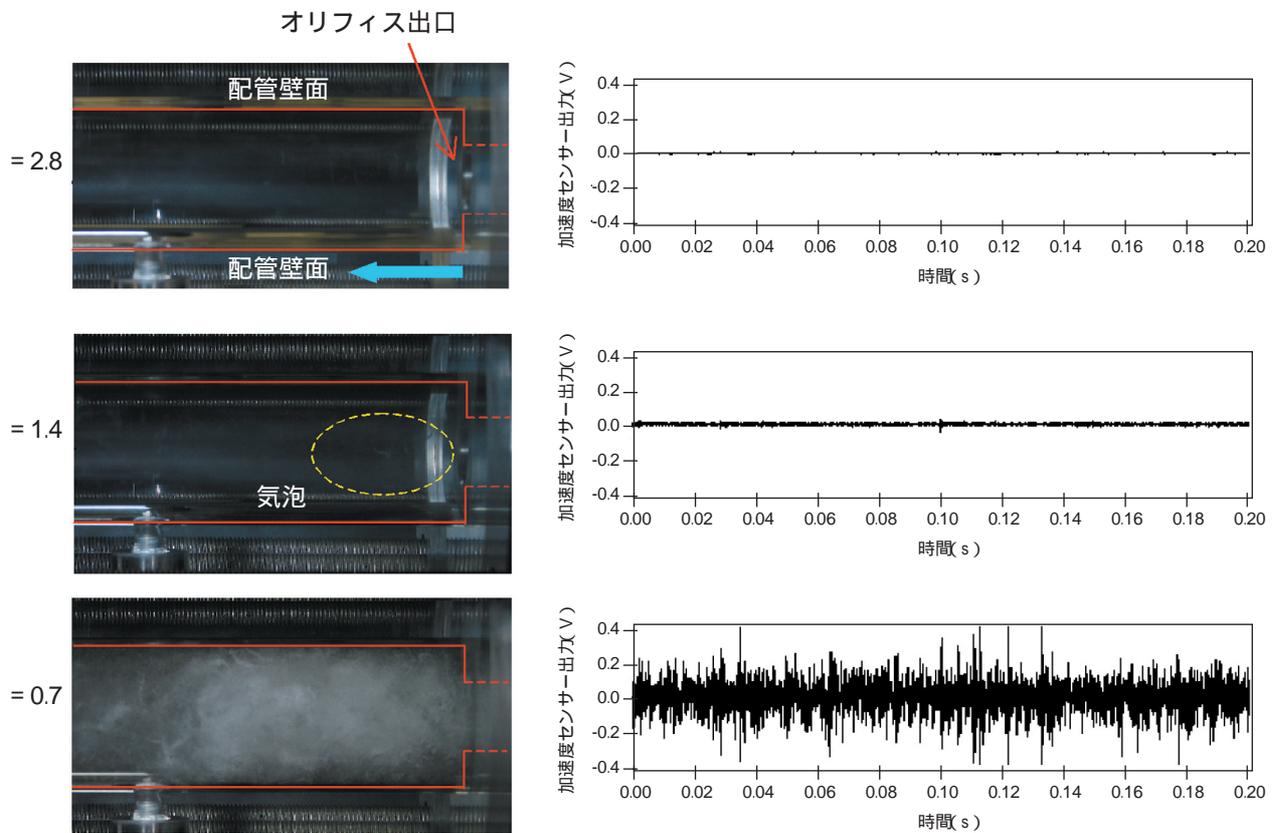


図5 各キャビテーション数における流動状態と出力波形

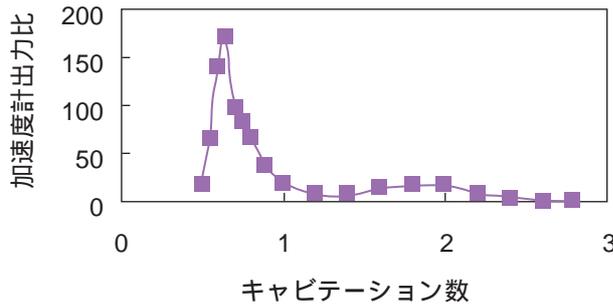


図4 キャピテーション数の変化による加速度計出力比

の大きさと頻度によりキャピテーション強さの程度を分析することも可能と考えられる。ただし、実機プラントの配管などには実験室とは異なり、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、パルス状の信号が検出されても、それがキャピテーションによる信号とは断定できない。

### 3.3 加速度センサーとAEセンサー出力波形の周波数分析による検知手法の検討

キャピテーションに固有の周波数があれば、他の振動と区分ができ、キャピテーション検知に適用することが可能となる。そこで、キャピテーション固有の周波数の有無による検知手法について、実験および検討を行った。加速度センサーとAEセンサーをオリフィス下流100mmの箇所へ取り付け、キャピテーション数 = 2.8, 1.4 および 0.7 での出力波形について周波数分析を行った。ポンプの流速制御を行っているインバータのノイズの影響があったため、500kHzのローパスフィルタ処理を施した。

図6は加速度センサー出力波形の周波数分析結果である。= 2.8 と 1.4 で比較すると、5k ~ 20kHzの周波数成分が大きくなっている。また、= 1.4 と = 0.7 で比較すると、ピーク周波数は多数検出されている。しかし、キャピテーションの有無で明確に差が検出されているとは言い難く、周波数分析によるキャピテーション検知は困難である。パワースペクトル密度の大きさは、キャピテーション数によって異なり、= 2.8 と 1.4 で比較すると、パワースペクトル密度はピーク周波数のある5k ~ 20kHzの領域で大きくなっている。= 1.4 と 0.7 では全体的にパワースペクトル密度が大きくなっている。しかし、実機プラントで測定する場合には基準値が分からないため、パワースペクトル密度の大きさによるキャ

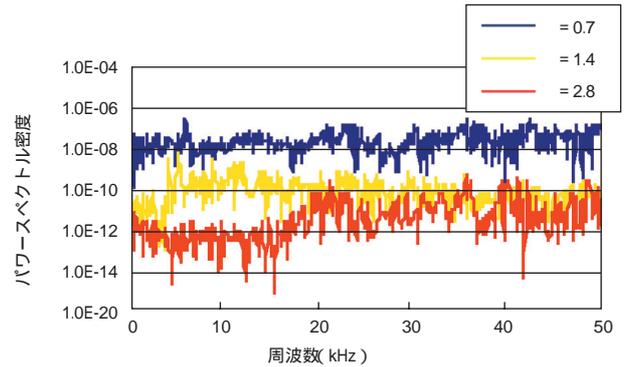


図6 加速度センサー周波数分析

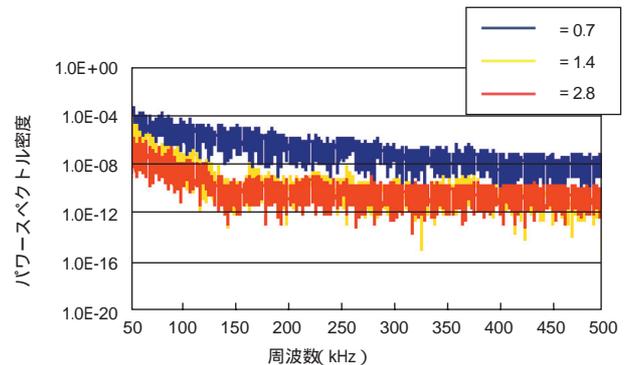


図7 AEセンサー周波数分析

ピテーション検知は困難であると考えられる。

図7はAEセンサー出力波形の周波数分析結果である。AEセンサーの場合は、キャピテーションの有無に関わらず、60 ~ 100kHzの周波数領域でピーク周波数が検出されており、AEセンサーに関しても固有の周波数を検出するのは困難と言える。また、パワースペクトル密度の大きさについても加速度センサーの場合と同様に = 2.8 では小さく、= 0.7 では大きくなっているが、実機プラントで測定する場合には基準値が分からないため、大きさによる比較はできない。したがって、キャピテーション検知は困難であると考えられる。

### 3.4 流れ方向の出力分布測定による検知手法の検討

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、加速度センサー出力が大きくなり、キャピテーションの未発生時と発生時ではセンサー出力の大きさが異なることをすでに述べた。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ることと、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であれば、

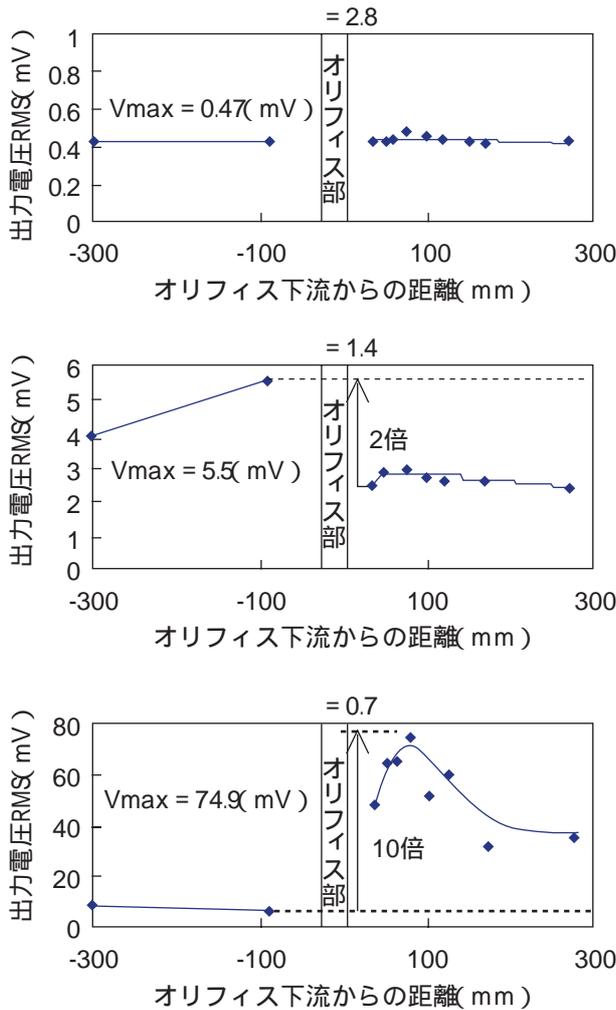


図8 各キャビテーション数における流れ方向の加速度センサー出力分布

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ことから、上流側と下流側の何点かで、出力電圧のRMSの測定を行い、その出力分布からキャビテーションの検知の可能性を検討した。条件として、 $\sigma = 2.8, 1.4, 0.7$  で実験を行い、加速度センサーを、オリフィスの上流 300mm, 90mm, 下流 35mm, 50mm, 75mm, 100mm, 170mm と 270mm に取り付けた。

$\sigma = 2.8$  の場合では、出力電圧は最大電圧で 0.47mV と非常に小さい。また出力分布は上流と下流側の出力電圧のRMSに差がない。また、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す結果となった。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、約 10 倍出力電圧が上昇している。また、出力分布は下流側より上流側の出力電圧の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が、詳細なメカニズムについては今後の検討課題である。

$\sigma = 0.7$  の場合では、最大出力電圧値で 74.9mV と  $\sigma = 1.4$  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、キャビ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結果を示している。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。

### 3.5 同時測定による衝撃波発生箇所の同定

実際のプラントではキャビテーション以外にも様々なノイズや振動があり、それらの発生源や発生箇所を求めることが重要である。そこで、複数個の加速度センサーを使用し、その取り付け位置の違いから検出される各センサーの出力信号の時間差から、衝撃波の発生位置を求める手法について検討した。

時間差の評価方法として相互相関関数による信号処理方法があるが、衝撃波が伝播する間に波形の減衰や変形の他に、センサーの個体差などの影響により、同時期に発生していない衝撃波に関して評価することが考えられることから、出力波形を比較し、同時期に発生したと考えられる衝撃波の最初のピーク到達時間を比較することとした。

センサー  $S_1, S_2, S_3$  を図 3 のように配管の同一直線上に取り付け、各センサーの座標を  $S_1(a, 0), S_2(b, 0), S_3(c, 0)$ 、衝撃波発生箇所を  $(x, y)$ 、試験部入口のセンサー同一線上の箇所を原点  $(0, 0)$  とし、衝撃波が  $S_1$  に到達した時間  $t$  を基準として、各センサーの位置と衝撃波発生箇所との関係は次のように表される。

$$V_{st} = \sqrt{(x-a)^2 + y^2}$$

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

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

$V_s$  : 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  $S_2$  との信号到達時間の差 (s)

$t_2$  :  $S_1$  と  $S_3$  との信号到達時間の差 (s)

この式を解くことで衝撃波発生位置の同定が可能となる。正確な発生位置を求めるためには、音速を

求めておく必要があるが、衝撃波の伝播経路によって音速が異なるため、ここでは次のように仮定した。

- (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として同心円上に伝播し、センサーに到達する。

上記のように仮定し、音速はステンレス鋼での横波の音速 3000 m/s として計算を行った。

図 10 は加速度センサーを用いて、流れ方向に設置した同時測定波形である。  $\phi = 0.7$  で実験を行い、加速度センサーをオリフィスの下流 50mm, 75mm, と 150mm に取り付けた。各センサーでほぼ同時に出力波形が検出されており、同一衝撃波による信号と考えられる。

図 11 は図 10 を拡大したものであり、各センサーの出力波形のピーク到達時間を確認すると、若干の時間差がある。この出力波形の衝撃波発生箇所を同定した結果、発生個所がオリフィスの下流 97mm となった。このことから、パルス状の信号がノイズではなく、キャビテーションによる衝撃波による可能性が高いと推測できる。

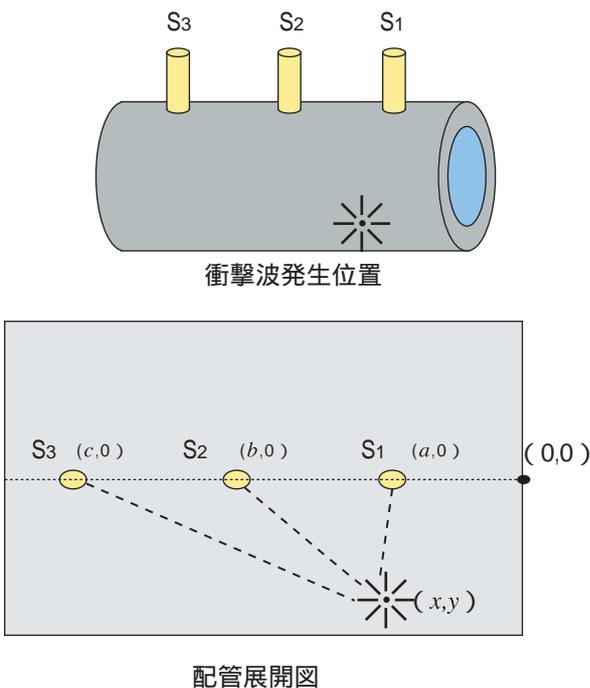


図9 加速度センサー取付図

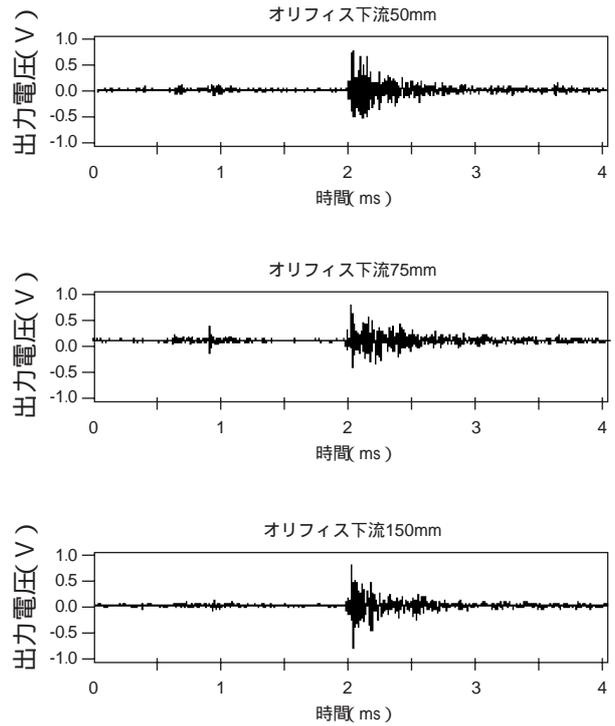


図10 加速度センサーによる同時測定波形(  $\phi = 0.7$  )

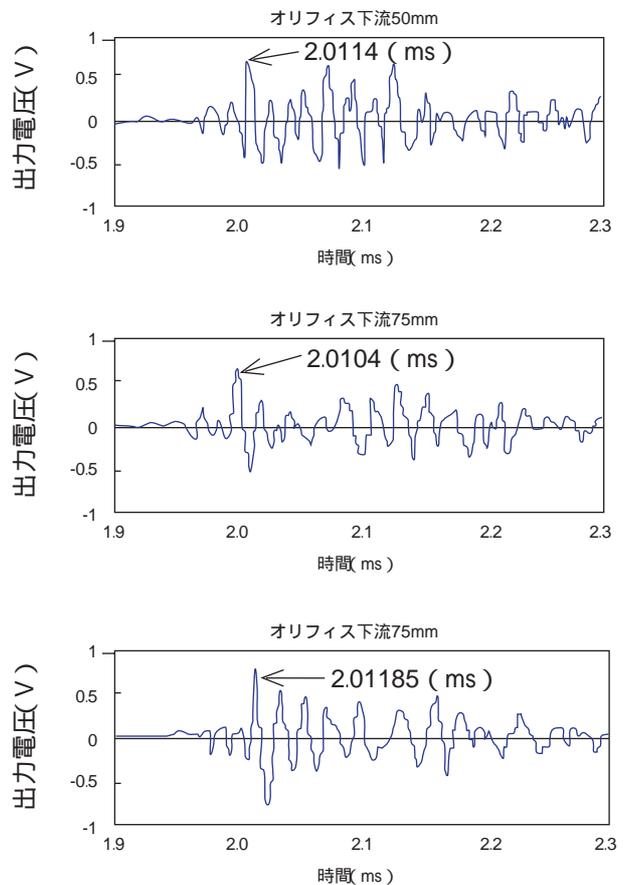


図11 加速度センサーによる同時測定波形拡大図(  $\phi = 0.7$  )

## 4. 結論

配管外部に取り付けた加速度センサーとAEセンサーで測定を行い、キャビテーション発生を検知する手法について検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) キャビテーションの発達と共に、加速度センサー出力は高周波のパルス状の信号が増加し、振幅も大きくなる。しかし、キャビテーション検知に用いるには、このパルス状の信号がノイズでないことの確認と振幅の比較基準値が必要である。
- (2) 加速度センサーとAEセンサーの出力波形の周波数分析では、いずれもキャビテーション固有の周波数は検出されなかった。
- (3) 絞り部の上流と下流に取り付けた加速度センサー出力電圧のRMSはキャビテーション状態によって変化し、初生段階では上流側が下流側の2倍となり、キャビテーションの激しい遷移状態では下流側が上流側の10倍となったことから、流れ方向のセンサー出力分布からキャビテーションの発生状態が検知できる。
- (4) 複数の加速度センサーを用いて同時測定し、衝撃波の伝播速度と各センサーへの伝播時間から、衝撃波の発生位置を同定した。その結果、パルス状の信号がノイズではなく、気泡崩壊による衝撃圧力であることを確認した。

上記の(3)、(4)では複数位置での測定が必要であるが比較基準が不要であり、運転条件を変更できない実機プラントにも適用でき、キャビテーションの発生を検知できる見通しを得た。

## 謝辞

本研究の遂行にあたって、キャビテーション現象に関する多くの有効な助言を頂いた金沢工業大学の佐藤恵一教授と福井大学の服部修次教授に深く謝意を表します。また、本研究の実験実施につきましては、関電興業(株)の北野淳一氏に多大なご協力を頂きましたのでここに感謝します。

## 文献

- (1) <http://www.kepco.co.jp/genji/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)。

- (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)。