

# 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

## Investigation of Evaluation Method of Cavitation Behavior by an Accelerometer Mounted on Outer Surface of Piping

八木 良憲 (Yoshinori Yagi)\*\* 村瀬 道雄 (Michio Murase)\*

**要約** 本研究の目的は、キャビテーションによる壊食や振動により引き起こされる配管系のトラブルを防止するために、配管外部からの測定によりキャビテーションの発生を検知するとともに配管への影響を評価する手法を開発することである。そこで、まず発生検知の検討として、オリフィスでの可視化実験による現象把握を行うとともに、配管外部に取り付けた加速度センサーの出力との関係について検討した。その結果、キャビテーション初生付近では正弦波に近い20k~30kHzの高周波数域の信号が検出された。この出力信号の特徴を初生の検知に利用できる可能性がある。またキャビテーションが発達した状態ではパルス状の出力波形が現れるが、そ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可能と考えられる。次に配管への影響評価の検討として、壊食実験による壊食率分布と加速度センサーの出力分布を比較した。その結果傾向はほぼ一致し、加速度センサーで壊食率分布を評価できる可能性があると分かった。

**キーワード** キャビテーション, 壊食, 加速度センサー, 検知, 出力波形

**Abstract** The objective of this study is to develop the methods of detecting the occurrence of cavitation and evaluating its influence on pipes by means of measuring from outside, in order to prevent troubles in piping systems caused by cavitation erosion and vibration. At first, we visualized cavitation behaviors downstream of an orifice and compared them with the output of an accelerometer mounted on outer surface of the pipe as the study of detecting the occurrence of cavitation. As a result, near the cavitation inception region, we detected signals like sine waves and the range of their frequencies was 20k-30kHz. It might be possible to utilize this characteristic of the signals for detecting the cavitation inception. And at the developed cavitation region, we observed pulses, and then we considered that we could classify cavitation strength by the magnitude and the number of pulses. Secondary, as the study of evaluating the influence of cavitation, we compared the distribution of the outputs of the accelerometer along the flow direction with that of erosion rates measured by erosion tests. The tendency broadly agreed with each other, and so we concluded that it was possible to evaluate the distribution of erosion rates by the accelerometer.

**Keywords** cavitation, erosion, piping, detection, accelerometer

## 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年に加圧水型原子力発電所の封水注入ラインにおいて、プラント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

起因した振動によって配管溶接部に疲労亀裂が生じた。これは過渡的な運転状態でのトラブルであった<sup>(1)</sup>。このような弁操作の際、どの開度から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ことから、流動状態を把握しておく必要がある。しかし実機では流動状態を可視化できないため流動状態の把握は実験のように容易ではない。

もしキャビテーションの発生がプラント運転中に配管外部から検知できれば、キャビテーションの発生箇所を把握することが容易になる。ただしキャビテーションの発生が常に配管の損傷を引き起こすわ

\*\* (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)

\* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

けではない。キャビテーション初生段階では配管への影響はほとんどないが、キャビテーション遷移段階では配管への影響は大きく、キャビテーションの状態によって配管への影響は大きく異なる<sup>(2)</sup>。従って配管への影響を評価できる手法も必要である。配管への影響には振動と壊食があるが、振動については従来の配管構造物の振動評価を適用し加速度測定に基づいて疲労評価を行うことができる。しかし壊食については運転中に配管外部から評価できる手法は確立されていない。

配管外部からの測定でキャビテーション発生の検知や、壊食の評価に、音響センサー、AEセンサー、加速度センサー等の適用が研究されている。音響センサーについては信号頻度とキャビテーション状態の相関が良く、検知等に適用できる可能性があるが、実機では周囲に多数の音源があり、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<sup>(3)</sup>。AEセンサーについてはキャビテーション状態と信号との良い相関が得られているが<sup>(4)</sup>、壊食量との相関についてはあまりよい相関は得られていないとの報告がある<sup>(5)</sup>。加速度センサーについてはキャビテーション状態と信号との良い相関が得られているが<sup>(6)</sup>、壊食との相関についてはあまり検討がなされていない。加速度センサーは比較的広い範囲の振動を捉えるため、局所的な壊食の情報を得るのに適用できるか検討を要する。

そこで本研究では、まず発生検知手法の開発のためにオリフィスでの可視化実験による現象把握を行うとともに、配管外部に取り付けた加速度センサーの出力との関係について検討した。次に加速度センサーによるキャビテーションの配管への影響評価の可能性についての検討として、壊食実験による壊食率分布と加速度センサーの出力分布とを比較し、壊食率の相対的な評価が可能であるかを検討した。

## 2. 実験装置

### 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 $1.28\text{m}^3$ の圧力容器であり、安全弁の吹き出し圧力 $3.2\text{MPa}$ までの実験が可能である。レザーバ内部にはヒータが取り付けられており、 $1\text{℃}$ の精度で

水温の調整 ( $150\text{℃}$ 以下) が可能である。流量の測定は試験部上流に取り付けた電磁流量計、圧力は試験部上流と下流の圧力計、供試流体の温度はレザーバに設置した温度計により測定した。実験装置の圧力はレザーバに取り付けた窒素ポンペ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。供試流体には水道水を用いた。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られられることから、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。各実験における溶存酸素濃度 $\beta$ の範囲は後述する。

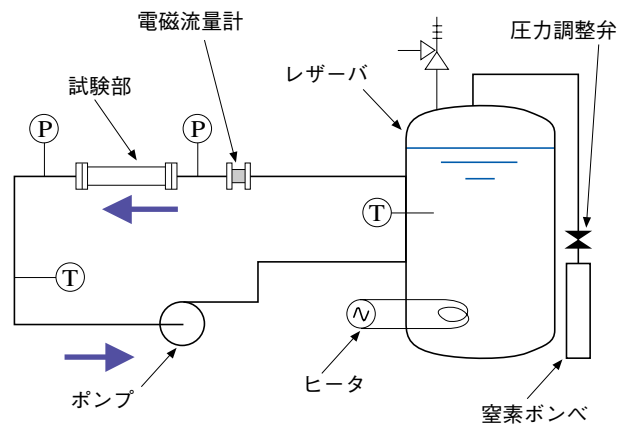


図1 実験ループ

### 2.2 試験部

試験部の詳細を図2に示す。試験部両端はステンレス製フランジであり、上流側フランジはオリフィスとなっている。配管内径は $D = 49.5\text{mm}$ であり、オリフィスのど部の径は $0.5D$ である。フランジで挟まれた流路部分はアクリル製であり、流動状況を観察できる。流路壁面には壊食実験用の試験片を取り付けるための穴を一定間隔で設けた。取り付け穴には栓をするためのねじが切ってある。試験片の構造を図3に示す。先端の壊食面の直径は $5\text{mm}$ である。また加速度センサーは図のように流路壁面の外部に取り付けた。

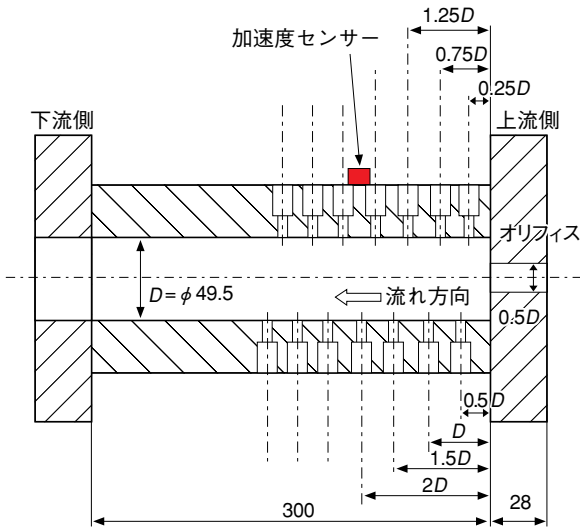


図2 試験部 (単位: mm)

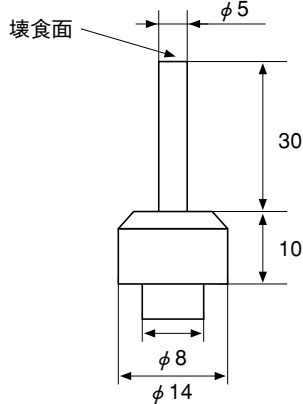


図3 壊食試験片 (単位: mm)

### 3. 実験方法

#### 3.1 キャビテーション数の定義

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る。キャビテーション数 $\sigma$ は以下のように定義される。

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

ここで、 $P$ はオリフィス下流圧力、 $P_v$ は実験水温での飽和蒸気圧力、 $\rho$ は実験水温での流体密度、 $V$ はオリフィスのど部流速であり、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、流速は一定とし下流圧力のみを変化させた。

#### 3.2 加速度センサーによる衝撃加速度の測定

加速度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（これを衝撃加速度という）を測定すると、卓越周波数は数10k Hzのオーダーにあるとされている<sup>(7)</sup>。また壊食量の予測にセンサーを用いる場合、10k Hz以上の高周波数帯域の信号が重要とされている<sup>(2)</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±3 dB）を用いた。図4に加速度センサーによる測定系を示す。加速度センサーは試験部に薄肉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。加速度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表示し保存した。データは実験後パソコンで処理した。

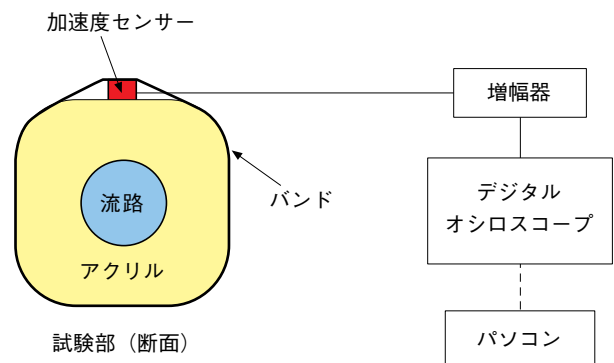


図4 加速度センサー測定系

#### 3.3 壊食率の測定

試験片の実験前後の質量を精密天秤（最小表示0.01mg）で測定し、その質量変化と実験時間から単位時間あたりの壊食量を求め、これを壊食率とした。

壊食実験では試験片の壊食面を鏡面仕上げし、キャビテーションにさらし、壊食率が最大域に達しほぼ一定値となった時の壊食率を評価に用いているが、流動ループでは壊食率が比較的小さいため、最大域に達するのに非常に長時間を要する。一方、試験片の材料にアルミニウムのような軟質材料を使えば実

験時間の短縮を図れるが、表面に大きな突起が発生し、流れに影響を与える可能性がある。そこで本研究では突起の影響がより小さい純銅（C1100BD-H）を用いた。純銅を用いた場合、壊食率が最大域に達するまでの時間はアルミニウムの約3倍になる。

そこで鏡面仕上げした試験片の壊食面を磁わい振動実験装置でキャビテーションにさらし、あらかじめ壊食面を壊食率の最大域まで前処理したのち流動実験を行うことにより、実験時間の短縮を図った。同じ材質の試験片を用い実験前に行った磁わい振動実験における壊食率の時間変化を図5に示す。その結果、実験時間20分で壊食率は最大域に達し、その後はほぼ一定の壊食率となっていることから、前処理の時間を25分とした。

壊食面が流路壁面に対し突き出したり、くぼんでいると流れに影響を与えるため、試験片の壊食面が流路に対し凹凸なく取り付けられるように、取り付け穴毎の形状に合わせて試験片の形状を微調整して取り付けた。

試験片の取付位置毎の壊食率から、流れ方向の壊食率の分布を求め、加速度センサーの取付位置を変えて測定した出力分布と比較した。

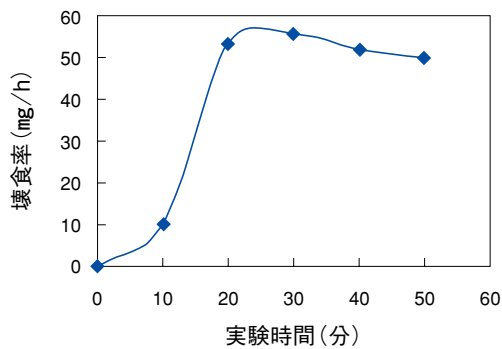


図5 磁わい振動実験による銅試験片壊食率の時間変化

### 3.4 試験片の取付け位置

流れ方向の壊食率の分布を測定するにあたり、試験片を最大壊食率の領域に取り付けるために、感圧紙（富士フィルム製プレスケール、中圧用、モノシートタイプ、圧力範囲10～50MPa）により衝撃力分布を測定した。感圧紙は圧力が加わる前は白色であるが、圧力が加わると発色剤層の微小カプセルが破れ赤く発色する。感圧紙をキャビテーションに曝すと針で突いたような小さな赤い斑点が多数生じ、赤い変色

の数密度が高い領域ほどキャビテーション衝撃の頻度が多いと判断することができる。ただし、感圧紙の発色剤層は水が付くと溶けるため、試験部への取付けは、発色剤層側を薄肉の両面テープで試験部流路内面に貼り付け、さらに受圧面側の端部を強粘着テープで貼り付けて水の侵入を防いだ。また感圧紙の面積を大きくすると、実験中に流路内が負圧になるため感圧紙が波打つので、感圧紙は短冊型（長さ210mm幅15mm）に切り複数取り付けた。この結果をもとに試験片の取り付け位置を決定した。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 キャビテーション数と衝撃加速度の関係

キャビテーション数の変化による衝撃加速度の変化を評価するために、遷移キャビテーションと考えられる領域における流動観察より、キャビテーション気泡の到達するオリフィス出口から100mm下流に、加速度センサーを取り付けた。そして流速を一定（15.0～15.4m/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。溶存酸素濃度は $\beta=3.77\sim 6.55\text{g/m}^3$ であった。この時の加速度センサーの出力変化を図6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（ $\sigma=3.0$ と2.8）の出力電圧RMSの平均値で除した値（これを加速度センサー出力比という）をとった。本研究で用いたオリフィス体系では $\sigma=2.6$ 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 $\sigma=1.8$ 付近まで増加した後、出力は低下し始め、 $\sigma=1.6\sim 1.4$ 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、 $\sigma=0.65$ 付近でピークに達した。 $\sigma<0.6$ 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。

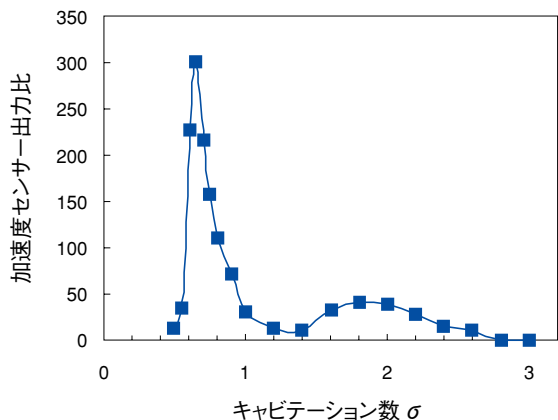


図6 キャビテーション数の変化による衝撃加速度の相対変化

この結果より、出力ピーク条件で壊食実験を行うと壊食の進行は早いですが、わずかな実験圧力のずれによってキャビテーション状態が大きく変わりうることに、ピークより低キャビテーション数側では流動状態が不安定になりやすいことから、ピーク以前の  $\sigma = 0.7$  を実験条件とした。流速は加速度センサーの許容最大加速度を考慮して約15m/sとした。

### 4.2 衝撃強さの分布

流速  $V = 15.3 \text{ m/s}$ 、キャビテーション数  $\sigma = 0.7$ 、水温  $21^\circ\text{C}$ 、下流圧力  $P = 0.08\text{MPa}$ 、溶存酸素濃度  $\beta = 4.11 \sim 5.61\text{g/m}^3$  のときの流動状況と、 $\beta = 6.89 \sim 8.11\text{g/m}^3$  のときの感圧紙による衝撃分布の測定結果を図7に示す。感圧紙の暴露時間は30分である。感圧紙実験では感圧紙が水に弱く、装置に水張り後直ちに実験を開始したため溶存酸素濃度が高い。下流50mmから100mmの間には大きな塊状のキャビテーションが見られ、鎖線で囲んだ領域には壁面に接している気泡塊が存在する。感圧紙ではオリフィス下流55mmから80mmの範囲に密な発色域が生じており、気泡塊が衝撃強さと発色域に影響していると考えられる。

この発色の密な領域では試験片の取り付け間隔を短く、疎な領域では取り付け間隔を長くとした。

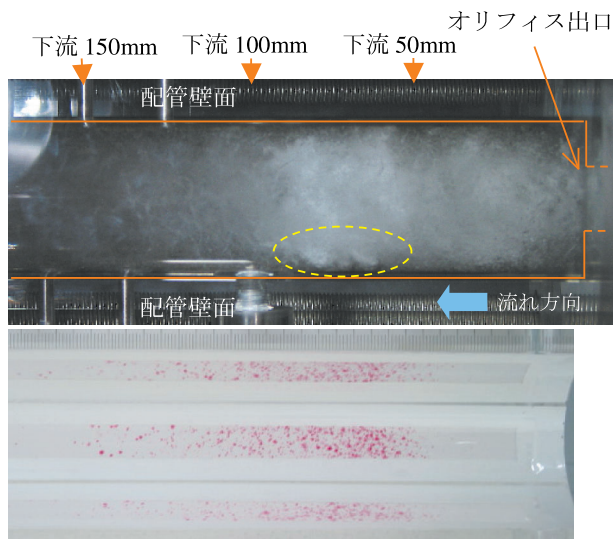


図7 流動状況の写真と感圧紙による衝撃分布 ( $\sigma = 0.7$ ,  $V = 15.3\text{m/s}$ , 水温  $21^\circ\text{C}$ ,  $P = 0.08\text{MPa}$ )

### 4.3 加速度センサーの出力信号の特徴

流速は一定 ( $15.0 \sim 15.4\text{m/s}$ ) とし、キャビテーション数  $\sigma = 2.8, 1.8, 1.4, 0.9$  と  $0.7$  に変化させたときの加速度センサー出力波形と流動状態を図8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6の衝撃強さ測定と同じオリフィス下流100mmとした。溶存酸素濃度は出力測定時が  $\beta = 4.15 \sim 7.26\text{g/m}^3$ 、流動状態の撮影時が  $\beta = 4.11 \sim 7.42\text{g/m}^3$  であった。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。しかし初生段階の波形は出力が小さく、特徴的な点は図8からは見いだせない。そこで出力信号をより詳細に解析した。

図8に示した波形の一部を取り出し詳細表示したものとそれを周波数解析した結果を図9に示す。初生付近の  $\sigma = 1.8$  や  $\sigma = 1.4$  では正弦波に近い波形が検出された。周波数解析を行うと、これらの波形は20kHzから30kHzの高周波数域にあり、キャビテーショ

ンの特徴とされる信号であった。また、これらの波形はキャビテーションが発生していない $\sigma = 2.8$ では検出されず、キャビテーションの発生に伴い検出されていることからノイズの可能性は小さい。この波形は $\sigma = 1.4$ でより明瞭であるが、糸巻き状になっている。糸巻き状の波形はキャビテーションが発達す

るにつれ崩れていく傾向にある。この正弦波に近い高周波の波形が初生付近の波形の特徴であれば、初生段階を比較的容易に判別できるようになる。これについては今後他の形状や金属配管でも同様の波形が検出されるか確認する必要がある。

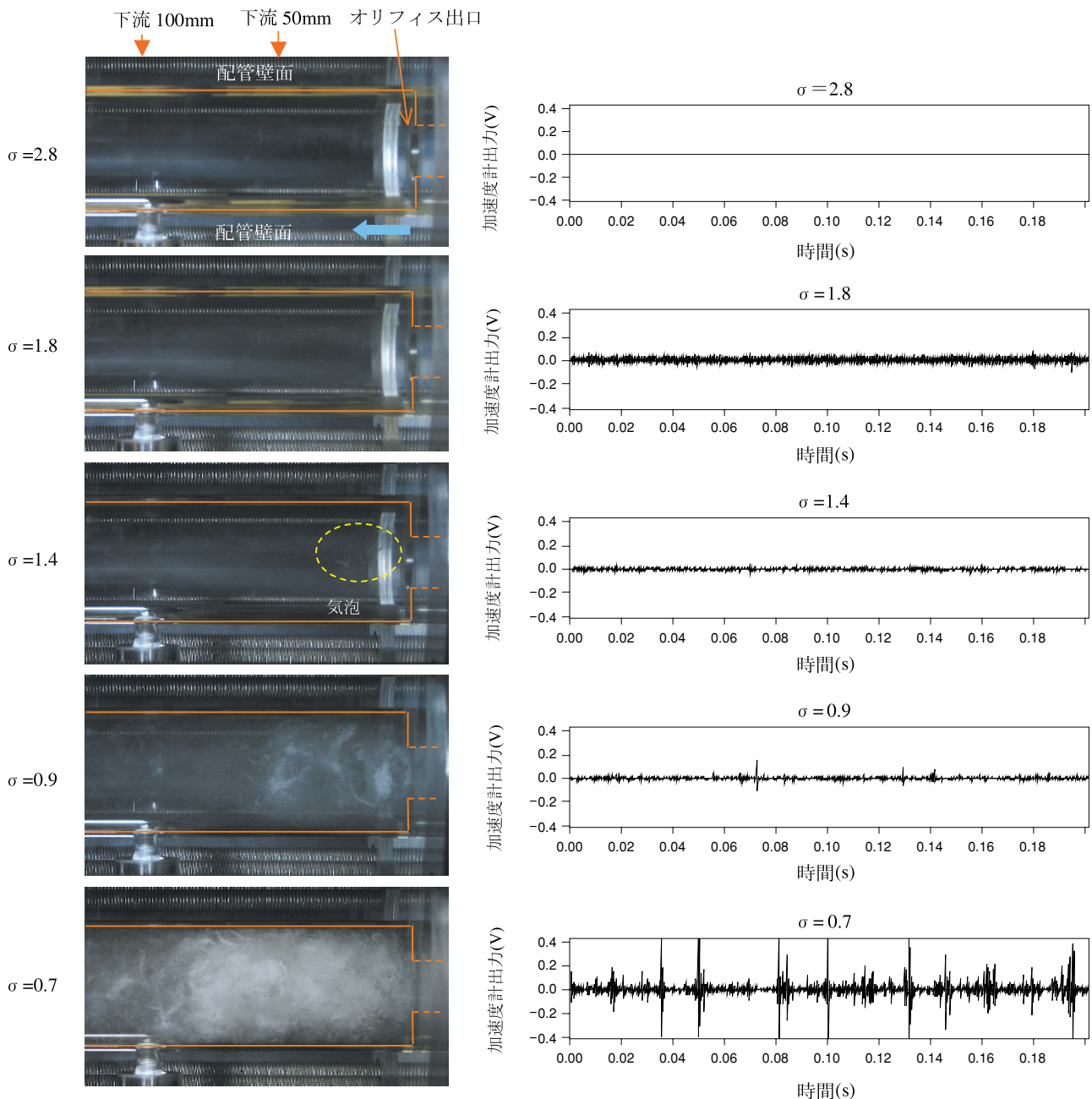


図8 各キャビテーション数における流動状態と出力波形

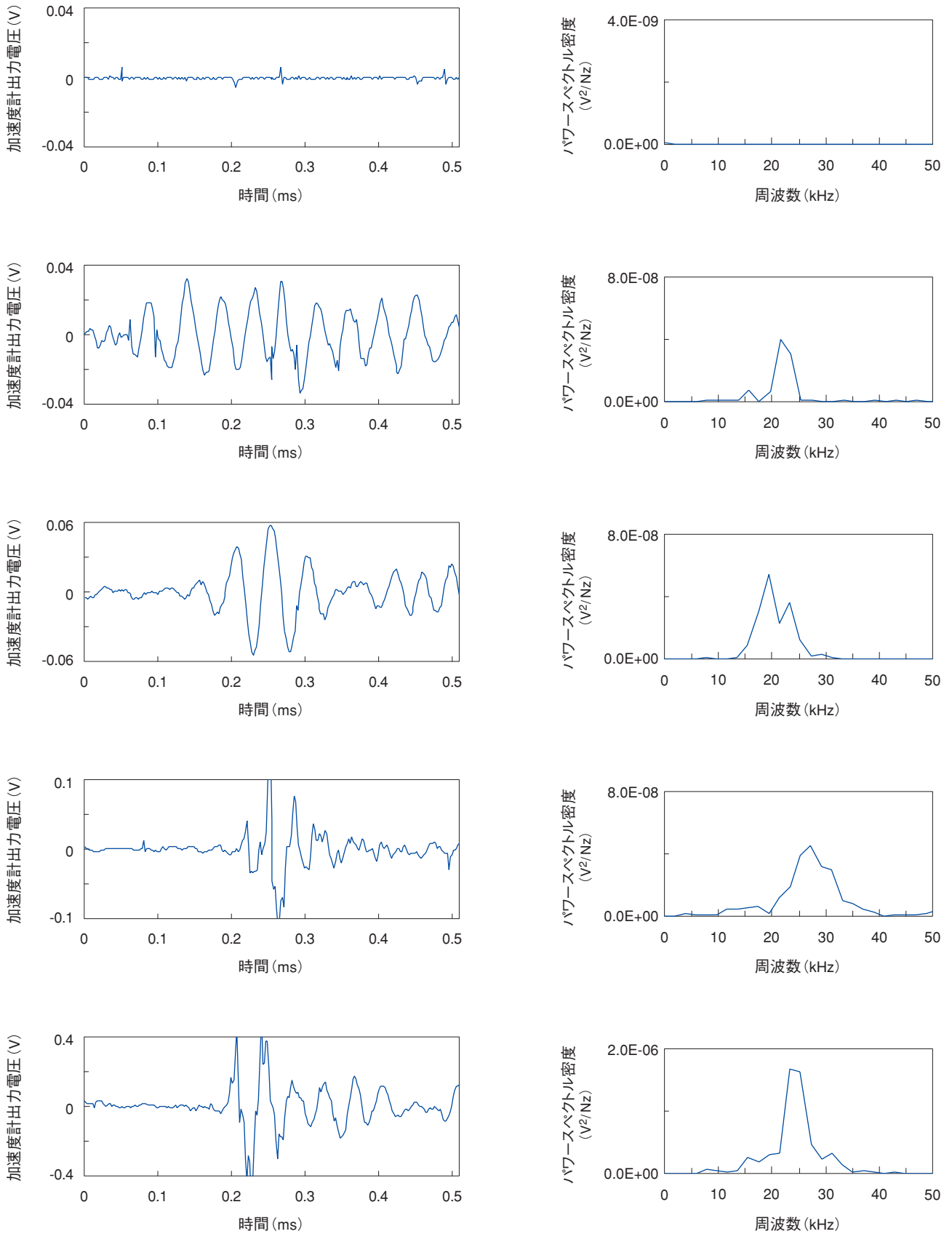


図9 出力信号の詳細と周波数解析

#### 4.4 壊食率分布

感圧紙による衝撃力分布をもとに試験片の取付位置を決定し、壊食実験で測定した流れ方向の壊食率の分布を図10に示す。流速 $V = 15.3\text{m/s}$ 、キャビテーション数 $\sigma = 0.7$ であり、溶存酸素濃度は $\beta = 4.69 \sim 6.56\text{g/m}^3$ であった。各位置で5回の壊食実験を行って得られた壊食率の平均値を示す。壊食率のピークは60mmから75mmの範囲で発生した。

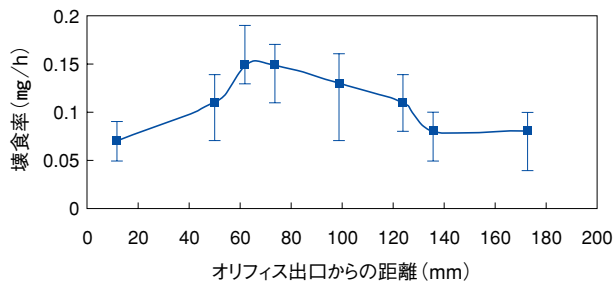


図10 壊食率の分布 ( $V = 15.3\text{m/s}$ ,  $\sigma = 0.7$ )

#### 4.5 加速度センサーの出力分布

壊食実験と同じ流動条件で、加速度センサーを用いて流れ方向の出力分布を測定し、壊食率分布と比較した。溶存酸素濃度 $\beta = 4.18 \sim 6.55\text{g/m}^3$ であった。データの取り込みにはトリガレベルを設定し、トリガ以上の出力のみ取り込んだ。

加速度センサーをオリフィス出口下流10mm, 50mm, 100mm, 140mmと190mmの位置に取り付けて測定した結果を図11に示す。トリガレベルを変えても出力分布の形状は同じであった。

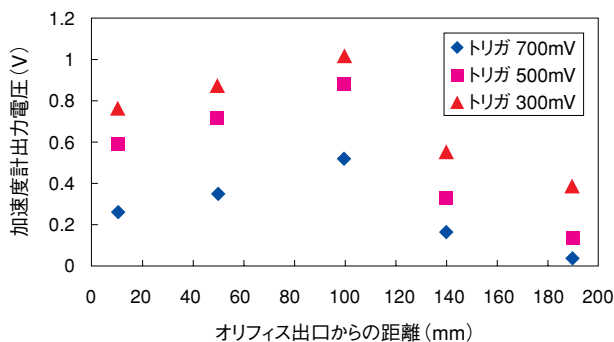


図11 加速度センサー出力分布 ( $V = 15.3\text{m/s}$ ,  $\sigma = 0.7$ )

次に加速度センサーの取り付け間隔をより狭めて測定した。図11の結果よりピークは50mmか140mmの範囲にあることが予想されることから、取付位置を

50mm, 60mm, 75mm, 100mmと140mmとして測定したのが図12である。図11のようにトリガレベルによる出力分布の形状は同じであることから、トリガレベル500mVの結果のみを示した。図12を図10の壊食率分布と比較すると、60mmにおける測定値が小さくなっており、ピーク位置が約20mm下流にずれている。しかし傾向はほぼ一致しており、加速度センサー出力分布から壊食率の分布を評価できると考えられる。つまり加速度センサーによる測定で内部の局所的な情報がある程度得ることができると考えられる。加速度センサーによる出力分布と壊食率分布のピーク位置がずれている点については、今後さらにデータを収集し原因を検討する。

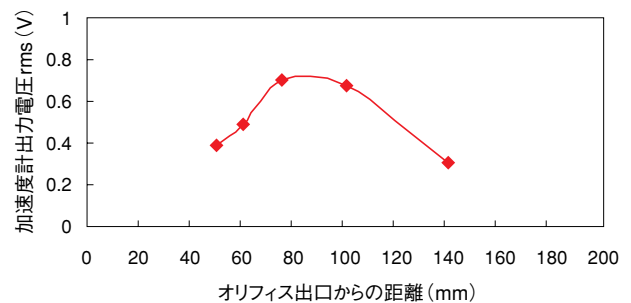


図12 加速度センサー出力分布 ( $V = 15.3\text{m/s}$ ,  $\sigma = 0.7$ )

### 5. 結論

加速度センサーを用いた配管外部からの測定によりキャビテーション発生の検知と壊食率分布の評価について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) キャビテーション初生付近では正弦波に近い20kHzから30kHzの高周波数域の信号が検出された。この出力波形の特徴を初生の判別に利用できる可能性がある。またキャビテーションが発達した状態ではパルス状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できると考えられる。
- (2) 壊食実験による壊食率分布と加速度センサーの出力分布とを比較した結果、ピーク位置が下流に約20mmずれているものの傾向は一致しており、加速度センサーで外部から壊食率分布を評価できる可能性がある。また加速度センサーにより内部の局所的な情報がある程度得られると考えられる。



## 謝辞

福井大学の服部修次教授には磁わい振動実験装置による試験片の前処理をして頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

## 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, 関西電力株式会社
- (2) 加藤洋治, 新版キャビテーション, 槇書店, 1999.
- (3) Yoshinobu Okabe, Akira Kitajima, Akiso Koishikawa and Yutaka Takeuchi, Experimental Studies on Relationship between Erosion Rate and Apparent Impact Pressure and Cavitation Monitoring System by Acoustic Detector, International Symposium on Cavitation, April 1986, Sendai, Japan.
- (4) 吉田義樹, 川上孝, 山田績, 上出修博, 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, 1990, pp.11-16
- (5) Grand, M.McD., et al., Int. Conf. on The Use of Micros in Fluid Eng., Paper G3, 1983, 271
- (6) K.Sato, A Study of Cavitation Process by means of Acoustic Pulse Measurement, FED-Vol.57, International Symposium on Cavitation Research Facilities and Techniques, 1987, pp.115-121
- (7) 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, 1990, pp3597-3602