

センサーを用いた配管外部からのキャビテーション検知手法 の開発—10年間にわたる取り組みのまとめ—

Development of Detection Methods of Cavitation Phenomena by Sensor Placed
outside of the Piping—Ten Years Summary of This Approach—

長屋 行則 (Yukinori Nagaya)*¹ 村瀬 道雄 (Michio Murase)*¹ 水山 成郎 (Shigeo Mizuyama)*²

要約 キャビテーションによる振動や壊食の発生は、配管の損傷の潜在的要因の一つであり、キャビテーションに起因したトラブルを防止するためにはその発生を検知し、その影響を評価することが重要である。近年、状態基準保全が注目されている原子力発電所においては、発電所の運転中にキャビテーション発生の有無を判断できることが望ましい。著者らは、約10年間にわたり配管外部からのキャビテーション検知手法の開発に取り組んできた。その主なものとして、オリフィスを対象にキャビテーション流動状況の把握として高速度カメラによる可視化実験、配管内表面での衝撃力測定、配管外部からの検知手法として加速度センサーおよびマイクロフォンによる測定を実施しており、それらの試験の結果、キャビテーション発生の有無を判断できる見通しを得ている。今後はこれまでの検討を踏まえ、様々な配管構造側条件での知見の拡充を図るとともに検知精度の向上を図り、実際の原子力発電所におけるキャビテーション検知への適用を目指す予定である。本稿では、これまでの研究の概要と得られた主な成果をまとめて報告する。

キーワード キャビテーション、エロージョン、加速度センサー、衝撃力センサー、マイクロフォン、衝撃波、オリフィス

Abstract Cavitation induced vibration and consequent erosion of the piping are some of the potential damaging factors in power plants. In order to prevent troubles caused by cavitation, it is important to detect the inception of cavitation and evaluate its impact on the pipe. In nuclear power plants, where greater attention has been paid on condition based maintenance recently, it is desirable to detect the inception of cavitation during plant operation. Authors have been working on detection methods of cavitation from outside of a pipe for about ten years. The main approaches we took were visualization experiments to understand cavitation phenomena using high-speed camera, measurements of impingement load on the inner surface of a pipe, and detection tests of cavitation using accelerometer and microphone. The methods using accelerometer or microphone seemed to be promising methods to detect cavitation phenomena in a piping system. The methods will be tested with various types of pipes and the applicability of the method will be examined for different conditions. The efforts to improve the detection accuracy will be continuously made to reach the goal of application to monitoring of nuclear power plant piping. In this paper, the summaries of these studies and some of the major findings were outlined.

Keywords cavitation, erosion, accelerometer, impact force detector, microphone, shockwave, orifice

1. はじめに

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、これ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。絞り部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、プラント配管損傷の潜在的要因となる⁽¹⁾⁽²⁾。原子力発電所ではもともとキャビテーションを防止するような設計がされているが、近年の原子力発電所におけるトラブル事例⁽³⁾では、プラントの通常運転中ではなく、設計では考慮されていないプラントの起動や停止といった過渡的な運転操作に伴いトラブルが発生している。

* 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 現在 関西電力(株)

そのため、運転中のプラントにおいて、キャビテーションを検知する手法を開発し、それらによる壊食や振動などの配管系への影響評価ができることが望ましい。

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、様々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⁽⁴⁾⁽⁵⁾、(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^{(6)~(10)}、(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アコースティックエミッションセンサーを使用して間接的に検知する方法^{(11)~(13)}、(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⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾、(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^{(16)~(18)}などについての研究がある。

キャビテーションが発生しやすい箇所として、ポンプ、プラント配管の弁やオリフィスが挙げられる。通常、圧力、流量といった運転パラメータから求められるキャビテーション数といった評価指標でキャビテーション発生有無を判断することが可能であるが、実際の原子力発電所では、弁は多数設置されており、圧力や流量などの監視計器がないものも多く、配管系のキャビテーション数の算出は困難である。また、キャビテーション検知手法についても、運転中のプラント配管の弁やオリフィスを対象とした研究はあまり見られない。

そこで、著者らは、約10年間にわたり、運転中の原子力発電所における弁やオリフィス下流といった

絞り部を対象としたキャビテーション検知手法として、配管外部にセンサーを設置して検知する手法の開発を進めてきた。本報告では、キャビテーション検知手法の研究開発^{(19)~(23)}で得られた知見を整理して紹介する。

2. 研究の経過

原子力安全システム研究所（以下、INSS という）におけるキャビテーションに関する研究経過を図1に示す。研究着手にあたり、まず、キャビテーション実験ループ設置などのインフラ整備に着手した。実験ループの設計・製作に当たり、具体的な設計のノウハウが乏しかったため、金沢工業大学の佐藤恵一教授にご協力いただいた。それまで、INSSには流動実験を行うための実験装置がなく、文献調査や外部での実験委託に頼らざるを得なかった。実験装置を保有することにより、様々な実験が可能になり、実験ノウハウの蓄積に大いに役立った。

実験内容に応じて、センサー等の必要な測定機器は適宜導入してきた。具体的な機器仕様については後に述べるが、流体挙動把握に必要な高速度ビデオカメラ、配管外表面信号を検知するための加速度センサー、マイクロフォンなどを取り揃えた。

本研究の目的は実機プラント運転中におけるキャビテーション検知技術の開発であったことから、非破壊検査であること、様々な現場条件で使用可能であることが求められた。そのため、キャビテーション振動と音響に着目して開発を進めることとした。キャビテーション発生時には、大きな振動や音響を

		H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19
実験設備			▼ 実験ループ設置							▼ 実験ループ改造 (流れ加速型腐食実験対応化)	
取組項目	可視化 (一部共研 金沢工大)		高速度カメラによるキャビテーション挙動の把握								
	内部測定 (一部共研 福井大学)		キャビテーション壊食の影響評価								
	外面接触測定							加速度センサーによる検知			
	外部非接触測定							マイクロフォンによる検知			

図1 INSSにおけるキャビテーション研究の変遷

伴うことが知られている。これは、キャビテーション気泡崩壊に伴い、強い衝撃波が発生して配管内表面に作用し、その振動が配管外表面に伝達されるからである。

具体的な取組項目は以下の通りである。

- (1) 可視化：キャビテーション挙動の把握
 - (2) 内部測定：キャビテーション衝撃力の定量把握
 - (3) 外面接触測定：加速度センサーによる検知
 - (4) 外部非接触測定：マイクロフォンによる検知
- 各々の取組項目の詳細については後に述べるが、キャビテーション発生から配管外部へ振動ならびに音響が伝達されるまでのステップごとに、実験を実施し、それらの相互関係を調べてきた。

3. 実験装置

3.1 流動実験ループ

実験に用いたループの概要を図2に示す。実験装置は、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1.28m³の圧力容器であり、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、

最大圧力 [MPa]	3.2
最大流量 [l/min]	800
最大温度 [℃]	200
配管内径 [mm]	49.5

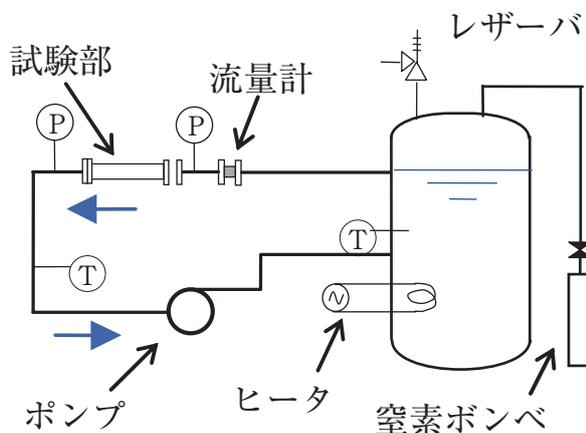


図2 キャビテーション実験ループの概要

圧力は試験部上流と下流の圧力計で測定する。

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する。実験装置の圧力はレザーバに接続した窒素ボンベにより調整する。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する。

3.2 試験部

試験部形状を図3に示す。この形状は、本研究で実施した各種試験を通じて使用している。配管部は内径49.5mmの円管であり、オリフィス内径は配管内径の1/2（24.75mm）である。オリフィス長さは28mmとした。

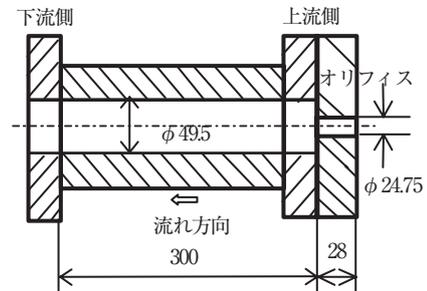


図3 試験部形状

3.3 実験条件

キャビテーションの状態を表す代表的なパラメータであるキャビテーション数を実験パラメータとして用いた。キャビテーション数 σ は次式で定義される。

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

ここで、 P_d はオリフィス下流の圧力 [Pa]、 P_v は実験水温での飽和蒸気圧 [Pa]、 ρ は実験水温での流体密度 [kg/m³]、 V はオリフィス部での平均流速 [m/s] である。

キャビテーション数 σ は、式(1)からわかるように、圧力、流速、密度といった流体パラメータのみで与えることができる。キャビテーション数 σ をパラメータとしてキャビテーション気泡挙動を把握することにより、可視化出来ない実機用配管での測定における基礎データとすることができる。

4. 高速度カメラによる可視化実験

4.1 目的

センサーによる配管外表面からの検知には、配管壁面近傍でのキャビテーション気泡の挙動とセンサー出力との関連付けが必要である。そのため、キャビテーション挙動に関する基礎的な知見を拡充することを目的に、高速度カメラを用いた可視化実験を実施した。

4.2 実験方法

図4に、高速度ビデオカメラを示す。亚克力製試験部を用いて、キャビテーション流動状況を撮影した。オリフィス平均流速15.0m/sで循環し、実験ループ圧力を調整することにより、キャビテーション数 σ を調整した。

使用した高速度ビデオカメラ（フォトロン社製FASTCAM ULTIMA-SE）は、フルフレーム撮影の場合で最大4500fps（コマ/秒）、パーシャルフレーム撮影の場合で最大40500fpsの能力がある。4500fpsで撮影する場合、流速15.0m/sでは、気泡発生から試験部長さ300mm間を流れ去るまでに90コマの映像となる。



図4 高速度ビデオカメラ（フォトロン社製）

4.3 得られた知見

キャビテーション数 σ を変化させた場合の流動状況の可視化写真を図5に示す。可視化実験により判明したキャビテーション挙動に関する基礎的な知見は以下のとおりである。

(1) キャビテーション数 σ が小さいほど、キャビ

$\sigma = 2.8$
(気泡なし)



$\sigma = 1.4$
(初生段階)



$\sigma = 0.9$
(遷移状態)



$\sigma = 0.7$
(遷移状態)



$\sigma = 0.5$
(スーパー
キャビテー
ション)



図5 キャビテーションの流動状況（フレームレート：9000fps）

テーション気泡は激しく発生する。

- (2)オリフィス形状におけるキャビテーションの初生はキャビテーション数 $\sigma = 1.8 \sim 1.4$ であり、遷移状態である0.7でキャビテーションが最も激しくなる。
- (3) キャビテーション数 $\sigma < 0.6$ では、気相部と液相部が完全に分離したスーパーキャビテーション状態となる。

5. 外面接触測定⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾

5.1 目的

キャビテーションに起因する配管外表面振動は配管内表面近傍の気泡崩壊に密接に関係するものと考えられる。可視化実験でキャビテーションの流動状況とキャビテーション数 σ の関係が明らかとなったことから、流動状況と配管外表面加速度との関係を明らかにすることを目的に、キャビテーション数 σ をパラメータとして配管外表面での加速度センサーによる測定を実施した。

5.2 実験方法

図6に加速度センサーとアンプを、図7に加速度測定システムの概要を示す。ステンレス鋼(SUS304)製の試験部を用い、配管外表面加速度を測定した。オリフィス平均流速15.0m/sで循環し、実験ループ圧力を調整することによりキャビテーション数 σ を調整した。本測定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, 703B, 0.3~45kHz, 感度 ± 3 dB)を使用した。

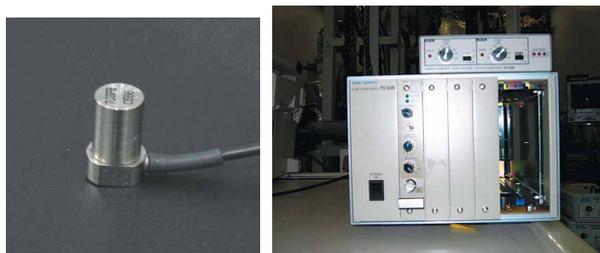


図6 加速度センサーおよび加速度アンプ

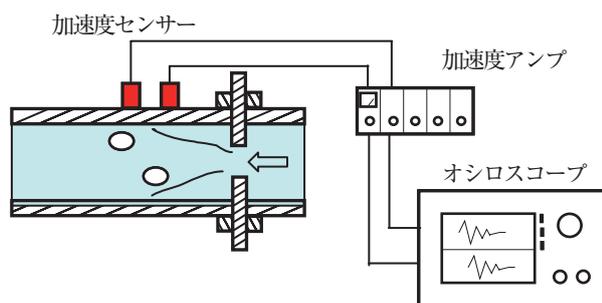


図7 加速度測定システム

5.3 得られた知見

図8にオリフィス下流100mmにおける加速度センサーの信号波形例を示す。また、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を図9に示す。

本測定により判明した知見は以下のとおりである。

- (1) キャビテーション数 σ の低下に伴い、加速度センサー信号波形はパルス状の信号が増加する。
- (2) 加速度センサー出力は、遷移状態ではキャビテーションが発生していない状態の数十倍以上となる。
- (3) キャビテーション数 σ の変化によって流れ方向の加速度センサー出力分布は異なる。気泡なし($\sigma = 2.8$)では上流と下流の出力に差はなく、

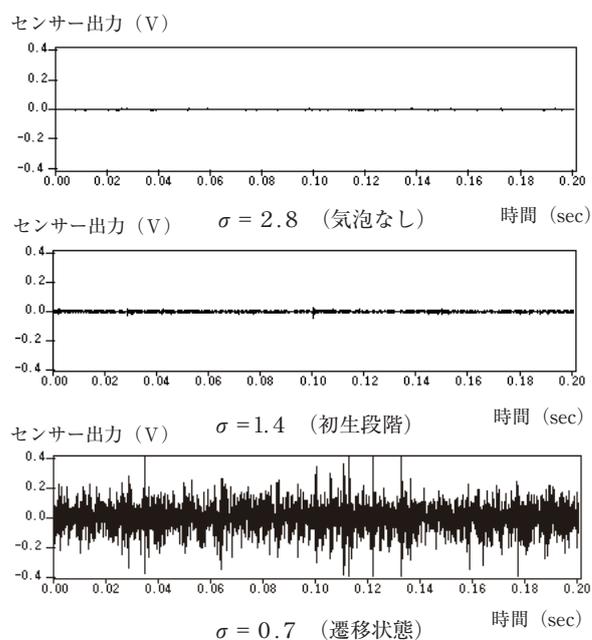


図8 各キャビテーション数における加速度センサー出力波形

出力は全体的に小さい。初生段階($\sigma = 1.4$)では、下流に比べ上流側出力は2倍程度大きくなる。これは、オリフィス入口付近での気泡崩壊が支配的であることが原因である。遷移状態($\sigma = 0.7$)では、オリフィス下流50mmから75mmまでセンサー出力が増加し、75mmで最大となる。上流と下流のセンサー出力比は最大で10倍程度となる。キャビテーションの発達に伴い、気泡崩壊位置が下流側にも進展するためである。

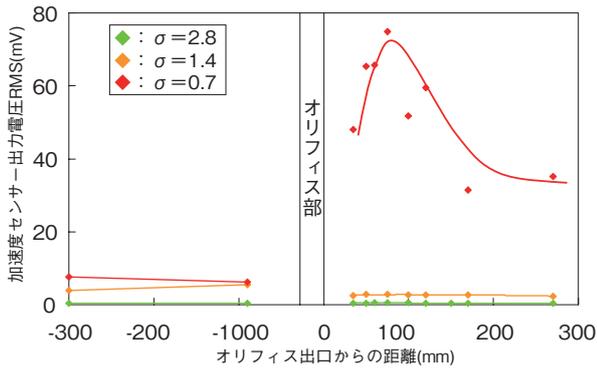


図9 キャビテーション数の変化による加速度センサー出力

5.4 キャビテーション検知手法への適用

実機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、それらとキャビテーション起因の信号とを判別する必要がある。キャビテーションは絞り部とその下流で発生し、キャビテーションの発達に伴って気泡崩壊位置が下流に移動することから、比較基準データがなくても、絞り部の上流と下流とで加速度を測定し、上流での出力と下流での出力とを比較することによりキャビテーションを検知することが可能となる。

6. 外部非接触測定 (21) (22)

6.1 目的

加速度センサーを用いたキャビテーション検知は有効な手法であるが、配管外表面に加速度センサーを取り付ける必要があるため、高温配管部での測定が困難であるなど現場適用上の課題がある。そこで、キャビテーション発生時の音響に着目した非接触測定手法の開発を進めることとした。キャビテーション音響は、配管外表面からの放射音響と考えられることから、加速度センサー出力との相関について明らかにすることを目的に、マイクロフォンを用いたキャビテーション音響の測定を実施した。

6.2 実験方法

図10にマイクロフォンを、図11に加速度センサーとマイクロフォンによる測定システムの概要を

示す。ステンレス鋼 (SUS304) 製の試験部を用い、キャビテーション発生時の音響を測定した。オリフィス平均流速 15.0m/s で循環し、実験ループ圧力を調整することにより、キャビテーション数 σ を調整した。本測定では音響測定用にコンデンサマイクロフォン (小野測器製, MI-1233, 20~20kHz, 最大音圧レベル 140dB, 感度 - 29dB ± 3dB) を使用した。

測定位置は、キャビテーションの発生がないオリフィス上流 90mm と遷移状態で最も加速度センサー出力が大きかったオリフィス下流 75mm とし、ノイズ成分を除去するため 8kHz のハイパスフィルタ処理した。

6.3 得られた知見

キャビテーション数 σ を変化させた場合のオリフィス上流および下流のマイクロフォン出力を図12に示す。

本測定により判明した知見は以下のとおりである。



図10 マイクロフォン

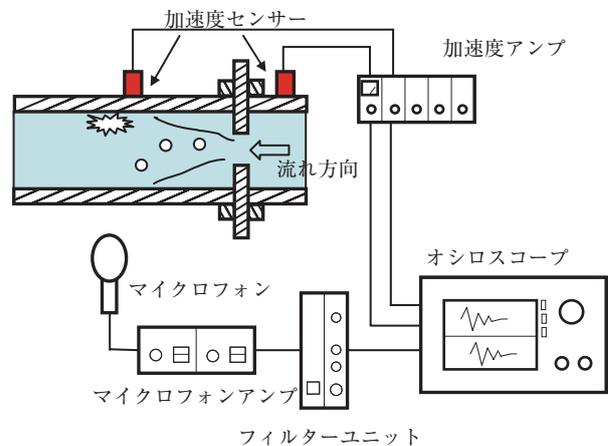


図11 加速度センサーとマイクロフォンによる測定システム

- (1) キャビテーション流動状況により、マイクロフォン出力が変化する。その変化の傾向は加速度センサー出力と定性的に一致する。気泡なし ($\sigma = 2.8$) では上流と下流の出力に差はなく、遷移状態 ($\sigma = 0.7$) では、上流に対する下流のセンサー出力比が数倍程度となる。なお、キャビテーション数 $\sigma = 2.8 \sim 1.4$ の範囲で上流側出力が大きいなど加速度センサーの場合と異なるが、放射音響を測定しているためオリフィス部で発生している音響も検知しているからである。
- (2) キャビテーション数 σ の低下に伴い、加速度センサーと同様に、マイクロフォン信号波形にはパルス状の信号が検出される。
- (3) マイクロフォン出力および信号波形については、ハイパスフィルタにより低い周波数成分を除去することで、上流に対する下流のマイクロフォン出力比やパルス成分をより明確にすることができる。

6.4 キャビテーション検知手法への適用

上流での出力 RMS 値に対する下流での出力 RMS 値の比を図 13 に示す。加速度センサーでの測定結果とマイクロフォンによる測定結果とで定性的に傾向が一致したことから、加速度センサーと同様の手法でキャビテーションを検知することが可能となる。

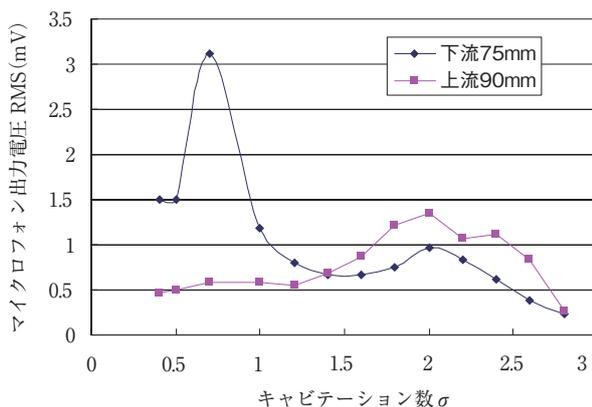


図 12 キャビテーション数 σ とマイクロフォン出力 (8kHz ハイパスフィルタ処理)

7. 内部測定⁽²³⁾

7.1 目的

キャビテーション気泡が崩壊すると配管内表面に衝撃力が作用し、衝撃力が一定値を越えると配管材に壊食が生じる。そこで、配管材への影響を定量的に評価することを目的に、配管内表面の衝撃力を直

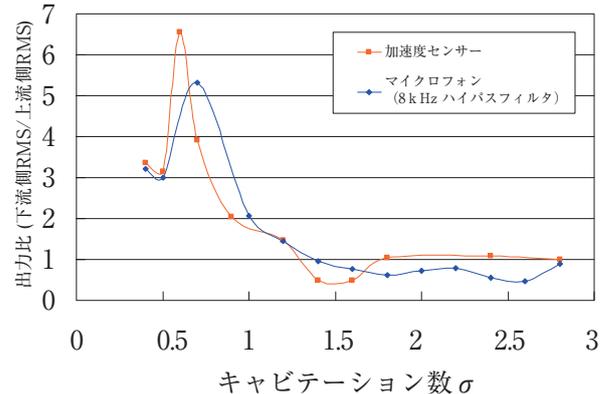


図 13 下流／上流のセンサー出力比

接測定する衝撃力センサーを用いた衝撃力測定を実施した。これにより、キャビテーション気泡の崩壊による構造材への影響の有無についての知見を得ることができた。

7.2 実験方法

図 14 に衝撃力センサーの構造を、図 15 に衝撃力測定システムを示す。衝撃力センサーを埋め込んだアクリル製試験部を用い、配管内表面の衝撃力を測定した。オリフィス平均流速 15.0m/s で循環し、実験ループ圧力を調整することによりキャビテーション数 σ を調整した。本測定で使用した衝撃力センサー⁽¹⁵⁾は、福井大学の服部研究室で開発されたものであり、圧電素子を Ti 製受圧棒と Cu 製伝達棒のサンドイッチ構造である。

信号の前処理として、衝撃力センサーからの出力はノイズ成分を除去するため、19.5kHz のハイパスフィルタを通した。本測定システムは、サンプリング周波数 600,000 回／1 分間で、受圧棒にかかる衝撃力の大きさと個数を検出した。

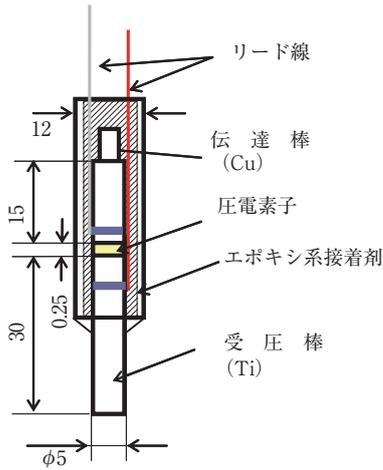


図14 衝撃力センサーの構造

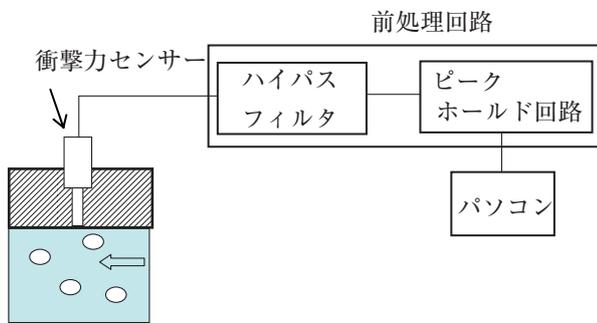


図15 衝撃力測定システムの構成

7.3 得られた知見

衝撃力センサーによる測定例を図16に示す。また、衝撃力センサー出力の上位値と加速度センサー出力との比較を図17に示す。衝撃力センサーによる測定結果から得られた知見は以下の通りである。

- (1) 配管系のキャビテーションでは、キャビテーション噴流実験⁽¹⁵⁾といった高壊食領域での実験結果とは異なり、非常に小さい衝撃力エネルギーである。これは主として流速が小さいことによる。
- (2) キャビテーション数の違いによる衝撃力の分布は、どのキャビテーション数でも0.1~0.2Nに集中しており全体的には大差ないが、最大衝撃力については大きく変わる。
- (3) 衝撃力センサー出力の上位値と加速度センサー出力とでよい相関がある。
- (4) キャビテーション数 σ が小さい場合、衝撃力上位値のばらつきが大きくなる。壊食の有無はア

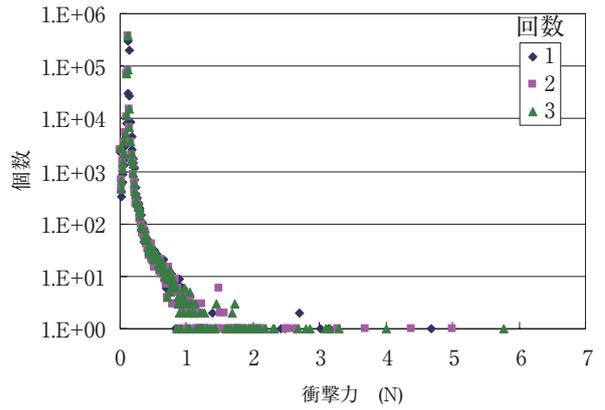


図16 衝撃力センサーによる測定結果の一例 ($\sigma = 0.7$, オリフィス下流 50mm)

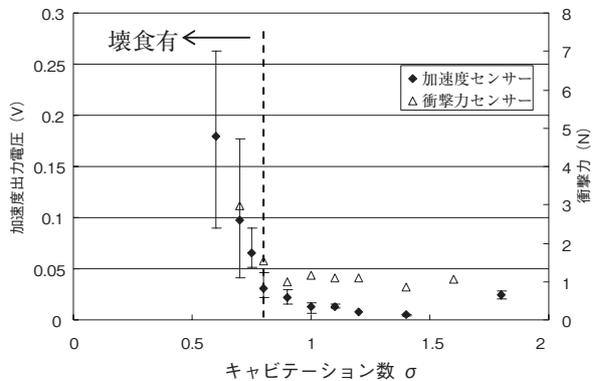


図17 衝撃力と配管外表面加速度の関係 (オリフィス下流 75mm)

ルミ試験片を用いて壊食ピット発生の有無を測定したものであり、 $\sigma > 0.9$ では壊食ピットが発生せず、 $\sigma < 0.8$ で壊食ピットが発生する。

7.4 キャビテーション検知手法への適用

衝撃力センサー出力の平均値ではなく上位値が加速度センサー出力とよい相関があるということは、配管表面へ伝達される衝撃力の閾値があると考えられる。配管外表面測定により衝撃力を評価するためには、その閾値を明らかにすることが課題といえる。

また、キャビテーションが発生しても $\sigma > 0.9$ では壊食は生じないことから、壊食防止の観点からは $\sigma < 0.9$ の強い遷移キャビテーションを検知すればよいことになる。

8. まとめ

運転中の原子力発電所において配管外部からキャビテーション発生を検知する手法を開発するために、オリフィス下流におけるキャビテーションの高速カメラによる流動状況の観察および各種センサーによる測定を実施した結果、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 高速ビデオカメラによるキャビテーション流動状況の観察の結果、キャビテーション数 σ が小さくなるほど、キャビテーション気泡が増加する。キャビテーション数 $\sigma = 1.8 \sim 1.4$ で気泡が発生しだす初生段階となり、 $\sigma = 0.7$ で最も激しい遷移状態となる。 $\sigma < 0.6$ では、気相と液相が完全に分離するスーパーキャビテーション状態となる。
- (2) 加速度センサーによる配管外表面加速度測定の結果、キャビテーション数 σ の低下に伴いオリフィス下流の加速度が大きくなり、気泡崩壊が激しい遷移状態ではキャビテーションが発生していない状態に比べ数十倍以上となる。また、加速度センサー信号波形にも変化が現れ、パルス状の信号が増加する。
- (3) マイクロフォンによる音響測定の結果、加速度センサーによる配管接触測定結果と定性的に一致する。
- (4) 衝撃力センサーによる配管内表面の直接測定の結果から、キャビテーション数 σ の低下に伴い、衝撃力の分布の全体的な傾向に変化はないものの、衝撃力の上位値が大きくなる。また、加速度センサー出力との比較の結果、衝撃力センサー出力の上位値と良い相関が有る。アルミ試験片を用いて壊食ピット発生の有無を測定した結果、 $\sigma > 0.9$ では壊食ピットが発生せず、 $\sigma < 0.8$ で壊食ピットが発生する。

加速度センサー及びマイクロフォンといったセンサーを用い、絞り部の上流と下流における配管外表面での加速度、もしくは音響信号のRMS値の比較により基準データなしでキャビテーション発生の有無を判別する手法を開発することができた。特に、壊食発生領域である $\sigma < 0.9$ では、上流と下流とで顕著な差があることから確実に判断することが可能である。今後は、これまでの検討を踏まえ、様々な配管構造条件における知見を拡充するとともに検知精度の向上を図り、実機プラントへの適用を目指す

予定である。

謝辞

本研究は金沢工業大学や福井大学との共同研究により進めてきた。キャビテーション実験ループの設計と製作および加速度測定では金沢工業大学の佐藤恵一教授に、衝撃力センサーによる衝撃力測定および壊食実験については福井大学の服部修次教授に多大なご協力を頂きましたのでここに感謝いたします。

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) 関西電力(株), 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洩の原因と対策), 平成14年11月26日.
<http://www.kepco.co.jp/pressre/2002/1126-1j.html> (2008.6.30HP確認)
- (4) 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).
- (5) 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.05-108 (2001).
- (6) Yves Lecoffre, Antoine Archer "A Method to Evaluate Cavitation Erosion in Valves" Third International symposium on Cavitation (1998).
- (7) 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).
- (8) 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).
- (9) 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).
- (10) 服部修次ら, ASTM 規格に基づくキャビテーション噴流法による壊食速度におよぼす流速およびキャビテーション数の影響, 日本機械学会論文集 (A 編), 71 巻, 709 号, pp.1276-1282 (2005).
- (11) Kam W. Ng, "Diagnostic of Cavitation in Pumps and Valves Using the Wigner Distribution" FED-Vol.109,Cavitation and Multiphase Flow Forum ASME (1991)
- (12) 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).
- (13) 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).
- (14) 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).
- (15) 加藤洋治, 新版 キャビテーション, 槇書店 (1999).
- (16) Frederick G. Harmmit, "Cavitation and Multiphase Flow Phenomena", MaGRA W-HILL INTERNATIONAL BOOK COMPANY.
- (17) 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).
- (18) 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).
- (19) 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).
- (20) 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).
- (21) 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).
- (22) 水山成郎, 村瀬道雄, 加速度センサーとマイクロフォンによるオリフィス外部からのキャビテーション検知, INSS JOURNAL, Vol.13, p. 115 (2006).
- (23) 水山成郎, 村瀬道雄, 服部修次, 衝撃力センサーと加速度センサーを用いたキャビテーション壊食初生評価, INSS JOURNAL, Vol.14, p. 116 (2007).