

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

Evaluation of Incipient Cavitation Erosion using Impact Force Detector and Accelerometer

水山 成郎 (Shigeo Mizuyama)*¹ 村瀬 道雄 (Michio Murase)*² 服部 修次 (Syuji Hattori)*³

要約 キャビテーションによる振動や壊食の発生は、配管の潜在的な損傷要因の一つであり、こうしたトラブルを防止するためにはキャビテーションの発生を検知し、その影響を評価することが重要である。近年、状態監視保全が注目されている原子力発電所においては、プラントの運転中にキャビテーションの発生や壊食を判断できることが望ましい。本研究では、運転中の原子力プラントで適用可能な加速度センサーによる配管外面からの壊食初生評価について検討するために、配管オリフィスを用いて、アルミ試験片による壊食実験とキャビテーション衝撃力を直接測定可能な衝撃力センサーと配管外面に取り付けた加速度センサーによる比較を実施した。その結果、以下の知見が得られた。(1)アルミ試験片を使用したキャビテーション壊食実験において、キャビテーション壊食ピットが発生するキャビテーション数はオリフィス下流の50 mmと75 mmでは0.8、オリフィス下流の100 mmでは0.7であり、キャビテーション遷移状態もしくはそれに近い状態であった。(2)キャビテーション気泡崩壊の衝撃力を直接計測できる衝撃力センサーを用いた測定結果から、衝撃力が増加し始めるキャビテーション数と壊食ピットが発生するキャビテーション数はほぼ一致した。(3)配管外面に取り付けた加速度センサーによる測定結果から、キャビテーション壊食初生付近からキャビテーション気泡崩壊による衝撃力のために出力電圧値の変動が大きくなった。また、衝撃力センサーによる衝撃力測定結果とよい相関性があり、キャビテーション壊食初生の評価には出力電圧 RMS 値での評価精度がよい。

キーワード キャビテーション, エロージョン, 壊食初生, 加速度センサー, 衝撃力センサー, 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 important to develop a detection method of cavitation and to evaluate its influence. In recent years, state monitor and maintenance attract attention in the nuclear power plant, and it is preferable to detect cavitation and cavitation erosion during plant operation. In this paper, in order to evaluate incipience of cavitation erosion using accelerometers which can be applicable during plant operation, we carried out cavitation erosion experiments with aluminum specimens and measurements of impulsive force induced by cavitation bubbles collapse using impact force detectors and accelerometers mounted on the outer surface of a pipe with an orifice. As a result: (1) In the cavitation erosion experiments using aluminum specimens, the incipient cavitation number where cavitation erosion pits occurred was 0.8 at 50 mm and 75 mm downstream of the orifice and 0.7 at 100 mm downstream of the orifice. At those cavitation numbers, the state of cavitation was a developed stage or near the developed stage. (2) In the measurements of impulsive force induced by cavitation bubbles collapse using impact force detectors, the cavitation number where impulsive forces began to increase almost agreed with the cavitation number at the occurrence of the cavitation erosion pits. (3) In the measurements with accelerometers mounted on the outer surface of the pipe, fluctuations of the output voltage increased rapidly at the stage of the incipient cavitation erosion due to impulsive force by the cavitation bubble collapse. The output voltage of accelerometers had close relationship with impulsive force measured by impact detectors, and the output voltage RMS value of accelerometers mounted on the outer surface of the pipe would be effective to evaluate the incipience of cavitation erosion.

Key Words cavitation, erosion, incipient erosion, accelerometer, impact force detector, shockwave, orifice

* 1 (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)

* 2 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

* 3 福井大学大学院工学研究科

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、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。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⁽¹⁾⁽²⁾。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、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過渡時の運転状態でトラブルが発生している。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と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。特に長時間運転を継続したプラントでは、壊食率が低くても、次第に壊食量が増加し、配管破損に至る可能性があるため、キャビテーションの発生箇所を特定し、さらに、キャビテーション壊食の有無を判断できることが重要である。

著者らは、運転中の原子力プラントにおける弁やオリフィス下流でのキャビテーション検知について、配管外面に取り付けた加速度センサーや非接触のマイクロフォンによる測定を行い、キャビテーション発生時に、それぞれの出力にパルス状の出力信号の検出されることとキャビテーション発生箇所であるオリフィスの上流側と下流側の出力電圧実効値(RMS値)の比較から、キャビテーション検知の可能性を見出している^{(4)~(7)}。しかしながら、キャビテーション壊食に関する評価に関しては、配管外面の複数個所に加速度センサーを取り付け、そのRMS値の相対評価および、壊食実験との比較による定性的な評価のみであり、定量評価はされていない。服部らはキャビテーション気泡崩壊圧測定可能な衝撃力センサーを使用し、衝撃エネルギーの積算値とキャビテーション壊食量により相関性があることを示している⁽⁸⁾。しかしながら、キャビテーション壊食の初生に関しては評価を行っていない。また、衝撃力センサーは配管内壁面に取り付ける必要があり、運転中のプラント配管に取り付けてのキャビテーション衝撃力測定は困難である。

本研究では壊食による圧力バウンダリへの影響が大きい配管系のキャビテーション壊食評価を目的とし、アルミ試験片による壊食実験とキャビテーション気泡崩壊による衝撃力を流れ場で計測可能な衝撃

力センサーによる実験と配管外面からの加速度センサーを用いた実験を行い、運転中のプラントで適用可能な配管外面からのキャビテーション壊食初生評価について検討した。

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1.28 m³の圧力容器であり、3.2 MPa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

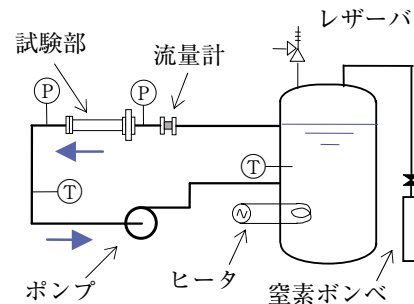


図1 実験装置

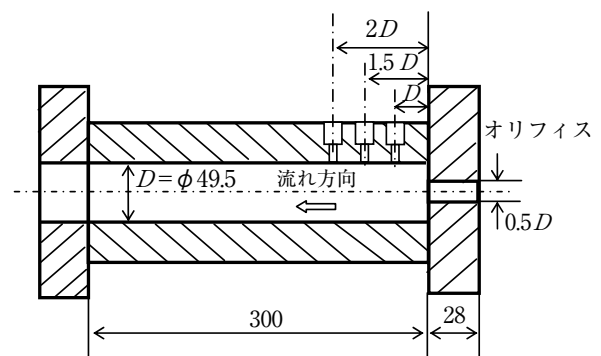


図2 アクリル試験部 (単位: mm)

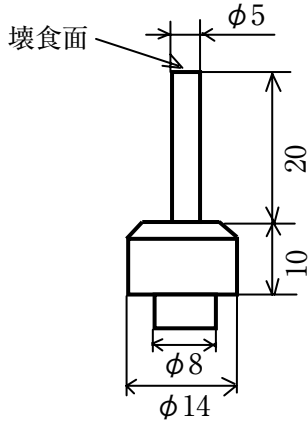


図3 腐食試験片 (単位: mm)

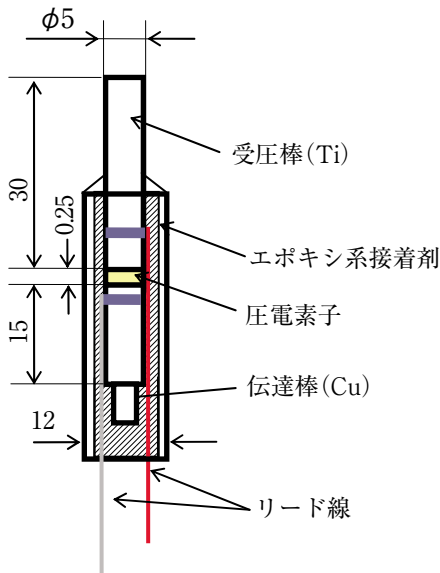


図4 衝撃力センサー (単位: mm)

素濃度を測定し、大きな変化がないことを確認した (3 ~ 6 g/m³)。本実験では水温を約 25 °C 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オリフィス平均流速を約 15.0 m/s とした。

衝撃力測定および腐食測定試験部を図2に示す。材質は腐食試験片および衝撃力センサーを取付ける箇所はアクリル製で試験部両端はステンレス製フランジであり、アクリル試験部をロングボルトで挟み込むようにして実験装置へ取り付けた。上流側フランジはオリフィスとなっている。オリフィス径は 24.75 mm (0.5 D) である。試験部内径 D = 49.5 mm である。流路壁面には試験片の取り付け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いる。腐食実験用のアルミ試験片を図3に示す。先端の腐食面の直径は 5 mm である。キャ

ピテーション衝撃を測定するための衝撃力測定センサーは福井大学の服部研究室で開発されたものであり、その断面を図4に示す。圧力センサー(8)は圧電素子を Ti 製の長さ 30 mm の受圧棒と Cu 製の長さ 15 mm の反射棒でサンドイッチ構造にし、導電性接着剤で固定した。圧力計測用の圧電素子は(株)村田製作所製の直径 5 mm、厚さ 0.25 mm、共振周波数は 8 MHz の円板状ピエゾ圧電セラミックスを用い、接着部の保護、防振、防水のためにアクリル製のパイプを圧力検出部の周囲に置き、エポキシ系接着剤で固定した。

加速度センサーによって出力電圧を測定した試験部は原子力発電所などで使用される一般的な配管形状のもので、材料はステンレス製で配管内径と長さはアクリル試験部と同様とし、配管肉厚は 5.5 mm とした。

キャピテーション状態を表す無次元パラメータであるキャピテーション数 σ は次式を用いた。

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

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]、 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。

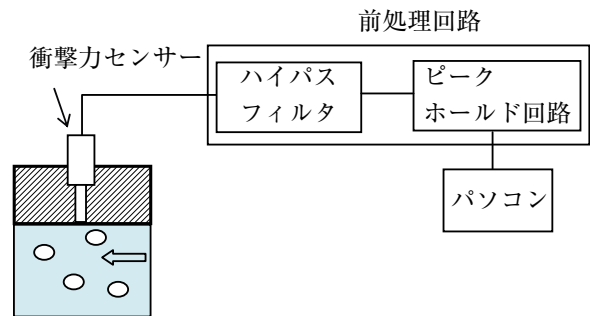


図5 衝撃力測定システム

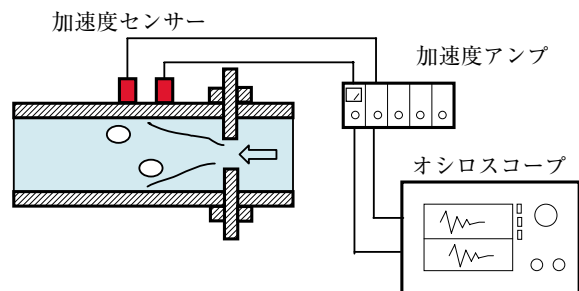


図6 加速度測定システム

図5に衝撃力センサーによる衝撃力測定システムを示す。これらの装置は流体内に取り付けて直接キャビテーション気泡の衝撃力を測定可能な装置である。なお、この測定システムは福井大学の服部研究室の磁わい振動実験で使用されているものであり、磁わい振動実験に合わせて19.5 kHz以下の信号を除去するためにハイパスフィルタを通して信号を処理している。

図6に加速度センサー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、樹脂製バンド（ロックタイ）で固定した。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、DA DiSP）にて処理を行った。

3. 壊食実験と衝撃力センサーによる実験

3.1 アルミ試験片による壊食実験

キャビテーション実験装置を用い、オリフィス下流でのキャビテーション壊食初生実験とキャビテーション気泡の衝撃力測定実験を実施した。Tullis⁽⁹⁾はアルミ材料による壊食実験を実施し、1分間に1平方インチ当たり1個のピットができるキャビテーション数を壊食の初生として定義していることから、本研究においてもその定義を参考にして実施した。アルミ壊食試験片は流れ場に影響を与えないように配管内壁に段差なく取り付け、ねじで固定した。壊食試験片はオリフィス下流の50 mm、75 mmおよび100 mmの箇所に取り付け、キャビテーション数0.7～1.3の範囲で、オリフィス平均流速を15.0 m/s、水温を約20℃で実施した。また、試験時間を30分とした。キャビテーション壊食初生の判断については光学顕微鏡で拡大した写真で直接ピットを確認することで判断した。図7(a)～(d)は $\sigma = 0.7 \sim 1.0$ でオリフィス下流50 mmの試験片の壊食面の写真である。丸く窪み、撮影時に光を当てたときに反射が起こらないものをピット（赤丸で囲んだ箇所）と考えた。 $\sigma = 0.7$ および0.8では複数個見られるが、 $\sigma = 0.9$ や1.0において壊食ピットは確認できない。

表1は各条件における壊食ピットの有無を一覧にした。図8(a)～(d)は $\sigma = 0.7 \sim 1.0$ でのオリフィス下流の流動写真である。この流動写真からキャビテーション数が増加するにつれて、キャビテーション気泡が少なくなっていることがわかる。 $\sigma = 0.7$ と0.8のオリフィス下流50 mmの箇所においては、試験部内壁面で気泡が多くなっており、キャビテーションによる壊食が多くなると予測される。一方、 $\sigma = 0.9$ では $\sigma = 0.7$ や0.8と比較して全体的にキャビテーション気泡は少なくなり、濃い気泡領域がオリフィス出口からオリフィス下流75 mmの試験部中心付近になっており、試験部内壁面付近の気泡量が少なくなっている。 $\sigma = 1.0$ においては濃い気泡領域はオリフィス出口からオリフィス下流75 mmの試験部中心付近になっており、試験部内壁面付近の気泡量が少なくなっている。

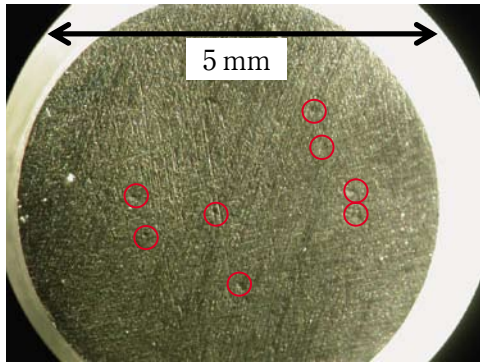
$\sigma = 0.9$ と1.0における壊食実験で壊食ピットが確認できなかった。これは従来からの知見であるキャビテーション気泡の崩壊が材料表面付近での崩壊によって壊食が発生することに一致する。

オリフィス下流100 mmにおいて、 $\sigma = 0.8$ の流動写真では内壁面付近まで気泡が確認できるが、壊食試験結果では壊食ピットは確認できなかった。気泡は内壁面付近まで広がっており、キャビテーションによる壊食が発生する可能性は高いが、平均流速が遅くなり、壊食が発生しにくくなっていると考えられるが、詳細な原因については今後の検討課題である。

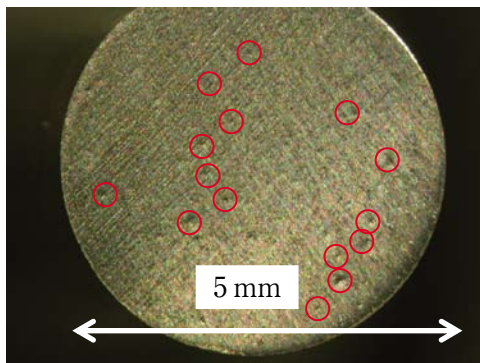
今回の壊食実験およびキャビテーション流動の観察から、壊食初生となるキャビテーション数はオリフィス下流50 mmと75 mmで $\sigma = 0.8$ オリフィス下流100 mmで $\sigma = 0.7$ でキャビテーション遷移状態、もしくはそれに近い状態であることがわかった。

3.2 衝撃力センサーによるキャビテーション気泡崩壊圧測定

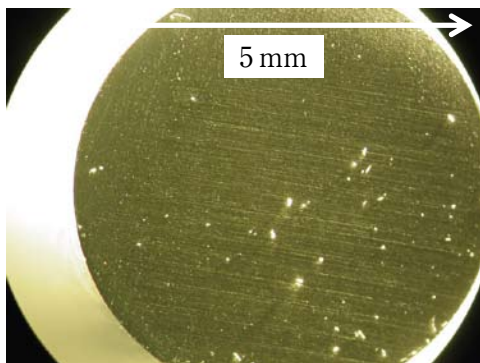
次に試験部の内壁面に取り付けた衝撃力センサーを使用し、キャビテーション気泡崩壊時に発生する衝撃力測定を実施した。服部ら⁽⁸⁾はキャビテーション噴流実験装置を使用した実験で、Al、Cuやステンレス鋼等の様々な材料の壊食試験片にて実験を行っており、キャビテーション壊食量を衝撃力エネルギー相当量（ $\sum F_i^2$ と呼ぶ。測定した衝撃力の2乗に測定個数をかけたもの）で評価しており、 Σ



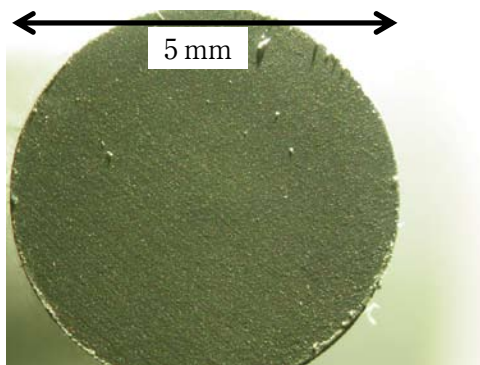
(a) $\sigma = 0.7$



(b) $\sigma = 0.8$

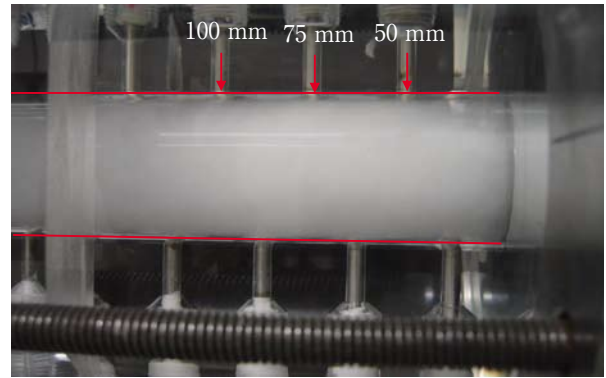


(c) $\sigma = 0.9$

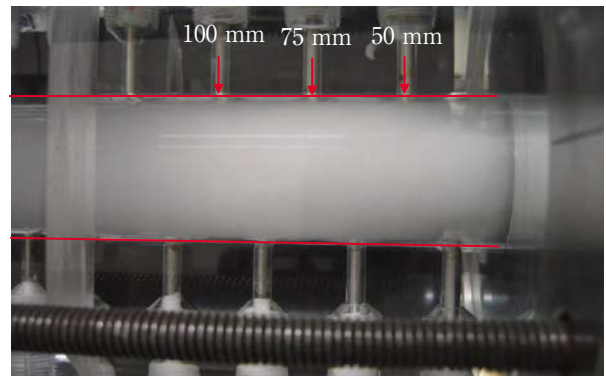


(d) $\sigma = 1.0$

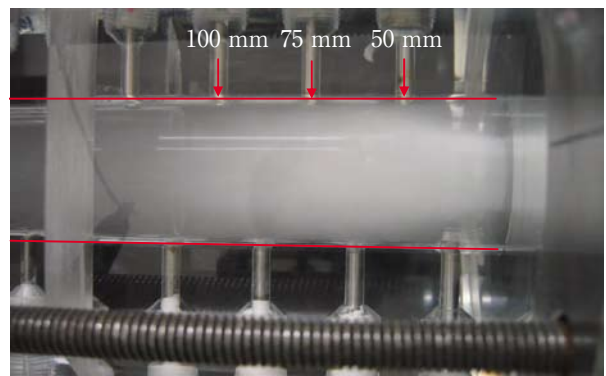
図7 アルミ試験片の顕微鏡写真
(赤丸で囲んだ箇所が壊食ピット)



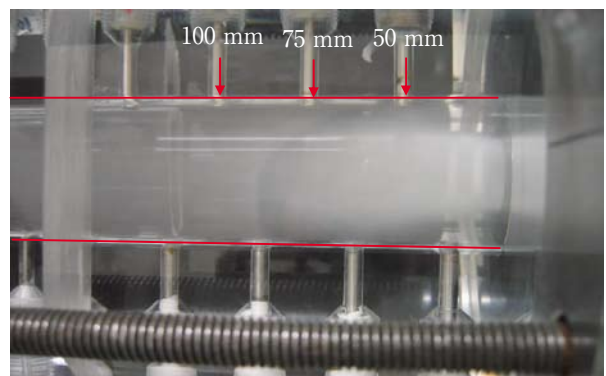
(a) $\sigma = 0.7$



(b) $\sigma = 0.8$



(c) $\sigma = 0.9$



(d) $\sigma = 1.0$

図8 キャビテーション流動写真

表1 キャビテーション数と壊食ピットの関係

キャビテーション数 σ	オリフィスからの距離(mm)		
	50	75	100
0.7	○	○	○
0.75	○	○	×
0.8	○	○	×
0.9	×	×	×
1.0	×	×	×
1.1	×	×	×
1.2	×	×	×

○：壊食ピット有 ×：壊食ピット無

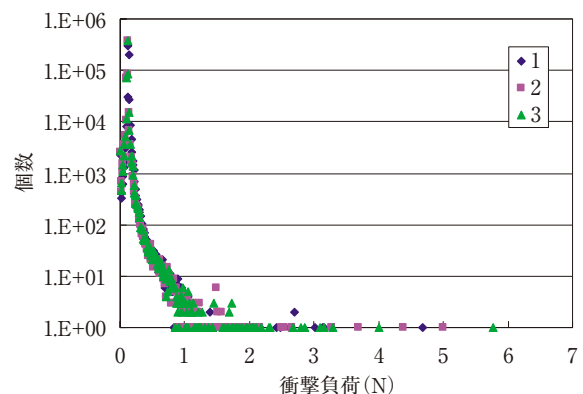
Fi^2 で $10^7 \sim 10^8$ の範囲の高壊食領域では平均壊食量深さ (MDERmax) と非常に良い相関が得られている。このセンサーを使用することでキャビテーション壊食の初生についても評価できる可能性があることから、衝撃力センサーによるキャビテーション壊食初生評価について検討した。キャビテーション数をパラメータとし、オリフィス下流の 50 mm, 75 mm および 100 mm の箇所に衝撃力センサーを取付けて測定を行った。それぞれ 1 分間の測定を 3 回実施した。実験条件は $\sigma = 0.7 \sim 1.6$ とし、流速はオリフィス平均流速で 15.0 m/s とした。図 9 はその測定結果の一例である。図 10(a)~(c) に ΣFi^2 で整理した結果を示す。オリフィス下流の 50 mm ではキャビテーション数が低下するにつれて ΣFi^2 は低下傾向であるが、キャビテーション数の違いによる大きな変化は確認できず、 $\sigma = 1.6$ の場合を除き、約 9500 ~ 11000 の間であった。キャビテーション壊食の初生段階である $\sigma = 0.8$ においても特に違いは見られない。また、オリフィス下流の 75 mm や 100 mm の場合でもほぼ同様であり、キャビテーション数による違いはあまり見られず、 ΣFi^2 はそれぞれ 9000 ~ 10500, 7500 ~ 10000 程度である。オリフィス下流 100 mm の箇所は、オリフィス出口から最も遠く、流速が低下したことから衝撃力の値が小さくなったと考えられる。また、服部らの実験結果⁽⁸⁾ と比較すると ΣFi^2 は 3 ~ 4 桁も小さく、非常に弱いキャビテーションであることがわかった。

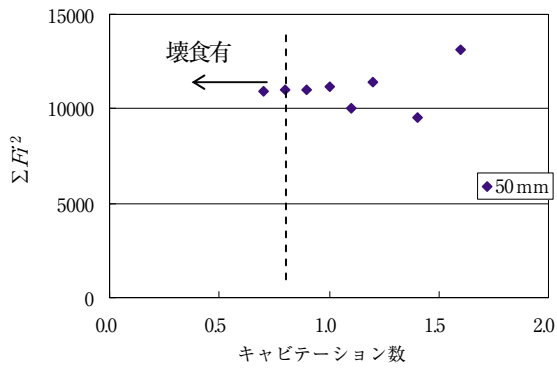
次に衝撃力センサーで測定した衝撃力による評価を実施した。1 分間の衝撃力測定を 9 回実施し、キャビテーション壊食初生に関する最適な評価について検討した。壊食初生段階の実験のため、壊食量が少なく、キャビテーション気泡による衝撃力が弱いことを考慮し、計測された衝撃力の 1, 3, 5 番目

に大きな値 (それぞれ F_{1st} , F_{3rd} , F_{5th} と呼ぶ) でそれぞれ評価を実施した。その結果を図 11(a)~(c) に示す。図の各印は各実験条件での平均値を表し、その時の最大値と最小値を示した。全体的な傾向として衝撃力は小さく、0.1 ~ 0.2 N 付近の測定個数が最も多く、全測定個数の約 80 % であった (図 9 参照)。オリフィス下流 50 mm の場合、 $\sigma = 1.1 \sim 1.6$ の測定結果では、衝撃力は小さく、最も大きい衝撃力でも 2.0 N を超えていない。次に $\sigma = 1.0 \sim 0.9$ の範囲では全体的な傾向は $\sigma = 1.1 \sim 1.6$ の範囲と同様である。しかし、数は少ないが、1.5 N 以上の衝撃力が発生しており、 F_{1st} では $\sigma = 1.0$ で 4.0 N が計測されている。 F_{3rd} , F_{5th} の場合では $\sigma = 1.1 \sim 1.6$ の測定値と比較して、少し大きくなっているが有意な差は確認できなかった。

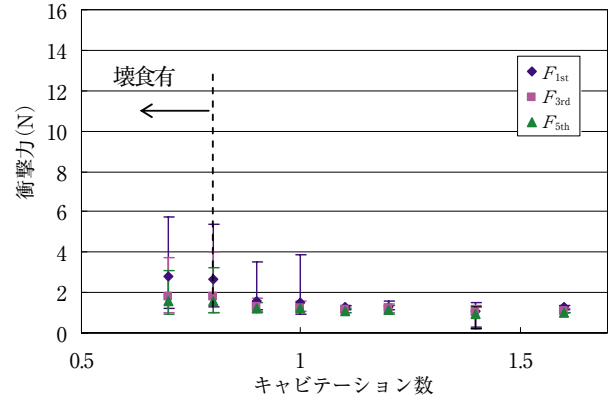
次に $\sigma = 0.8 \sim 0.7$ の範囲では測定される衝撃力も大きくなり、その測定個数も増加している。壊食ピットが検出された $\sigma = 0.8$ 以降の衝撃力が大きくなっており、壊食ピットとの相関性があると考えられる。測定された衝撃力は $\sigma = 0.8$ 以下において、 F_{1st} は 2.0 ~ 8.0 N, F_{3rd} は 1.3 ~ 4.0 N, F_{5th} は 1.0 ~ 3.0 N となっている。

これらの結果から、 F_{1st} で評価すると、今回の壊食片での実験において壊食が始まるキャビテーション数と衝撃力が増加し始めるキャビテーション数では、壊食が発生するキャビテーション数に少しのずれがあり、ばらつきも大きいことがわかる。次に F_{3rd} では壊食試験結果と、衝撃力が増加し始めるキャビテーション数は一致し、ばらつきも比較的小さい。 F_{5th} の場合では衝撃力が増加し始めるキャビテーション数と壊食ピットが発生するキャビテーション数はほぼ一致するが、壊食が発生する条件で

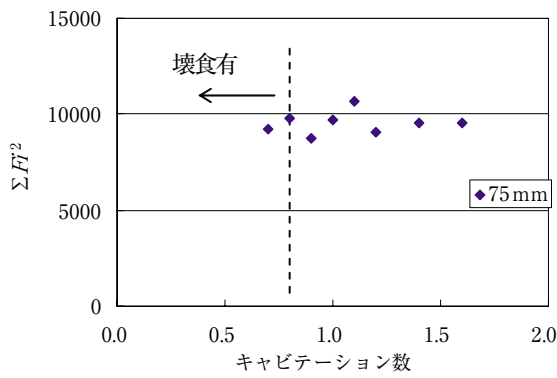
図9 衝撃力センサーによる測定結果の一例 ($\sigma = 0.7$, オリフィス下流 50 mm)



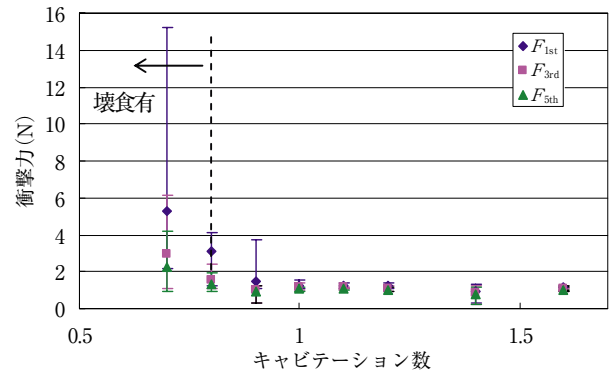
(a)オリフィス下流 50 mm



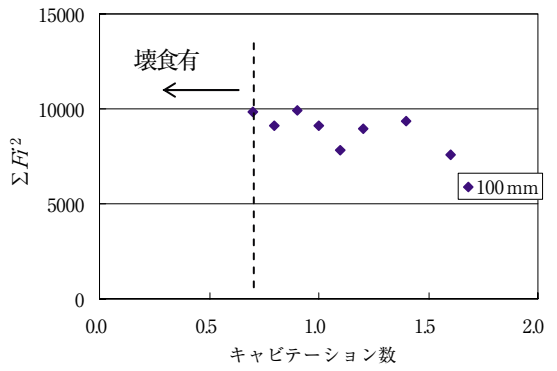
(a)オリフィス下流 50 mm



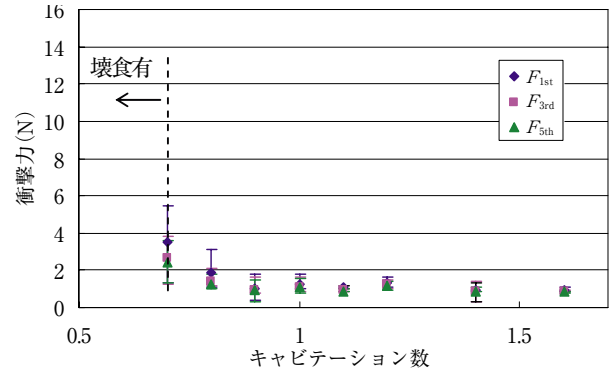
(b)オリフィス下流 75 mm



(b)オリフィス下流 75 mm



(c)オリフィス下流 100 mm



(c)オリフィス下流 100 mm

図 10 キャビテーション数と衝撃力エネルギー相当量

図 11 キャビテーション数と衝撃力

も（オリフィス下流 75 mm, $\sigma = 0.8$ ）出力値が小さいため、少し精度が悪いと考えられる。

これらの結果から、壊食発生時と非発生時では衝撃力に有意な差が生じ、壊食初生時の評価が可能であると考えられる。

加速度センサーによる配管外面からの壊食評価に関しては F_{3rd} による測定結果を用いることとし、 F_{3rd} の衝撃力が 1.5 N 以上であることが、キャビテーションの壊食実験と 1 つの判断基準として評価できる。

4. 加速度センサーによるキャビテーション壊食評価

4.1 鋼球落下試験

アルミ試験片による壊食実験によって、オリフィス下流 50 mm および 75 mm では $\sigma = 0.8$ 、オリフィス下流 100 mm では $\sigma = 0.7$ においてキャビテーションの壊食ピットが確認された。実際のプラントでの配管材料はアルミではなく、炭素鋼やステンレスといった壊食に強い材料であるが、今回の実験において壊食発生した流動状態は遷移キャビテーションで、壊食が発生しやすい状態である。また、八木ら⁽⁴⁾が銅試験片を用いた実験においてはオリフィス下流の 20 ~ 180 mm ($0.5 D \sim 3.5 D$) の範囲で 1 時間当たり 0.05 ~ 0.15 mg/h の壊食が生じており、壊食が少ない初生段階のキャビテーションでも数十年といった長時間キャビテーション状態にさらされることにより壊食が進むことが考えられる。その場合にキャビテーションの発生の評価と同時に、簡易的にキャビテーションの壊食の発生を判断することが望ましいと考える。そこで、試験部をステンレス鋼材の配管とし、配管外面に加速度センサーを取り付け、キャビテーション数をパラメータとした加速度センサー出力値と衝撃力センサーによる測定値との相関性について検討することとした。

測定の前に配管の厚みによる加速度センサー出力電圧値の影響を確認するために、ステンレス鋼材の円柱伝達棒の長さを変化させた鋼球落下試験を実施した。

測定方法は加速度センサーを円柱棒の下端面に両面テープで取り付け、鋼球を円柱棒の上端面に同じ高さから自然落下させることで実施した。大きい鋼球（直径 7 mm, 質量 1.48 g）と小さい鋼球（直径

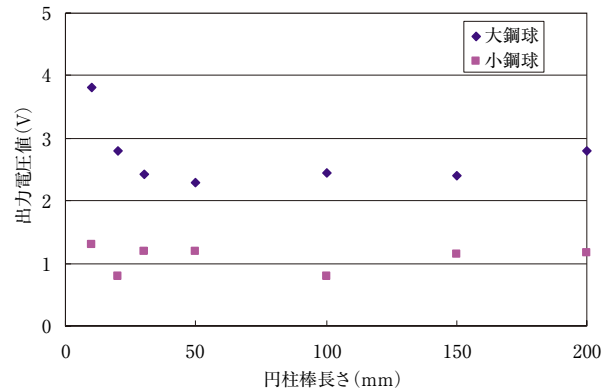


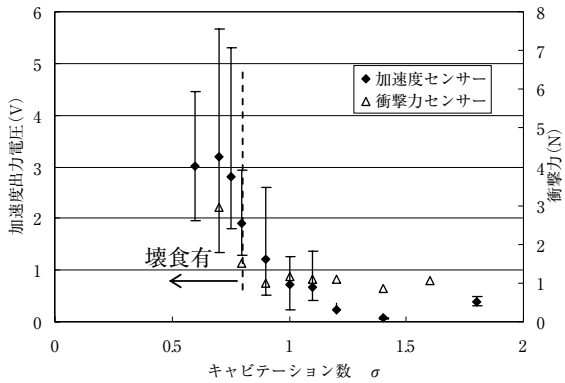
図 12 鋼球落下試験結果

3 mm, 質量 0.11 g) の 2 種類で実施し、伝達棒の長さを 10 mm ~ 200 mm とし、加速度センサー測定値は最大電圧値とした。その測定結果を図 12 に示す。

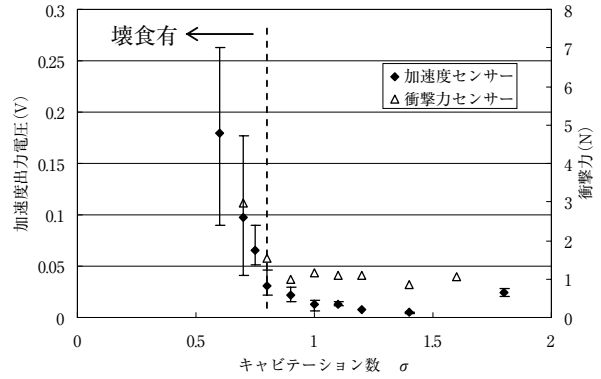
大きい鋼球による落下試験では、円柱棒長さが 30 mm までは出力電圧値はほぼ一定である。円柱棒長さが 30 mm 以下になると出力電圧値は大きくなっており、20 mm のときで約 1.3 倍、10 mm のときで約 1.6 倍であった。一方、小さい鋼球での落下試験では、伝達棒長さによる出力電圧値の差は確認できなかった。この結果から、衝撃力が大きい場合は、伝達棒の長さが短くなると出力値が大きくなり、衝撃力が小さい場合は伝達棒長さの影響が少ないということがわかる。今回、加速度センサーによる配管外面からの出力電圧測定に使用した試験体の厚みは 5.5 mm であり、実際のキャビテーション気泡崩壊による衝撃力よりも大きく測定されると考えられ、実機に適用する場合には補正する必要があると考えられる。

4.2 配管外面に取り付けた加速度センサーによる壊食評価

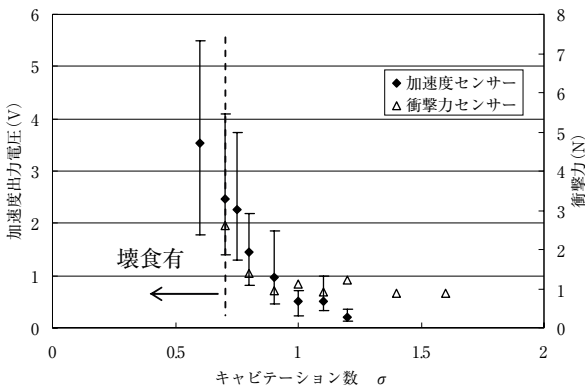
配管外面に取り付けた加速度センサーによる出力電圧測定は、八木⁽⁴⁾らの銅試験片を用いた壊食実験にて壊食量の多かった 75 mm と 100 mm とした。各キャビテーション数で 5 ~ 10 回測定を行った。加速度センサー出力電圧の最大と最小値の差（以降 P-P 電圧値という）と加速度出力電圧の RMS 値を求め、衝撃力センサーでの測定結果との比較を行った。加速度センサーによる測定結果をそれぞれ図 13(a) (b) と図 14(a) (b) に示す。図には各キャビテーション数



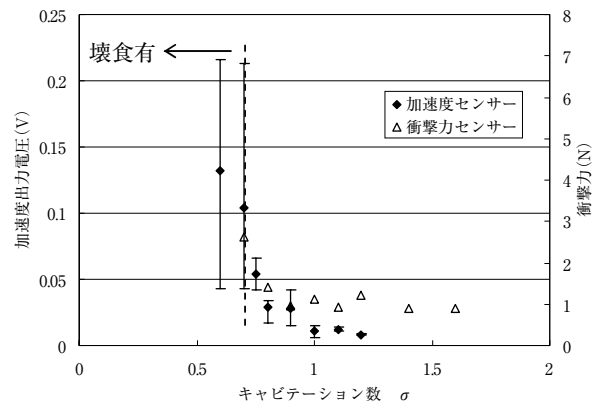
(a)オリフィス下流 75 mm



(a)オリフィス下流 75 mm



(b)オリフィス下流 100 mm



(b)オリフィス下流 100 mm

図 13 キャビテーション数と最大 - 最小電圧値 (P-P 電圧値)

図 14 キャビテーション数と出力電圧 RMS 値

で測定された最大値と最小値と平均値と衝撃力センサーで測定した衝撃力を示した。

キャビテーション発生初生段階である $\sigma = 1.2$ では、P-P 電圧値は小さく、平均値で 0.2 V 程度である。キャビテーション数を小さくしていくと、徐々に出力値は大きくなっていき、壊食し始める $\sigma = 0.7$ においては平均値で 2.5 V を超え、測定値のばらつきが非常に大きくなっており、最大で 4.0 V を超え、最小値が 1.4 V である。ばらつきが大きくなっていくのは $\sigma = 1.0$ 以下になってからであり、壊食が始まるキャビテーション数より高い。これらの原因としては、キャビテーション気泡の崩壊により、衝撃力が発生して出力値に変動が生じていると考えられる。また、これらの出力値の変動はキャビテーションを判断基準の 1 つになると考えられる。衝撃力センサーによる測定値とも定性的に一致している。出力電圧 RMS 値で整理した場合の傾向もほぼ同様であるが、出力値の変動成分は P-P 電圧値と

比較して緩やかであり、信号のばらつきが大きくなるのは壊食が始まる $\sigma = 0.7$ 付近からで、衝撃力センサーによる測定値とも定性的に一致している。

P-P 電圧値と出力電圧 RMS 値の評価もどちらも衝撃力センサーによる測定結果と定性的には一致する結果となった。ばらつきがあまりなく、キャビテーション壊食が発生するキャビテーション数で出力値が大きくなる点において出力電圧 RMS 値のほうが精度よく評価できていると考えられる。また、壊食が発生する時の加速度センサーの値は P-P 電圧値で 2.0 V、RMS 値で 50 mV を超える時がしきい値となると考えられ、実機において壊食初生を判断する場合に、過大評価ではあるが、判断基準になると考えられる。

5. 結言

運転中のプラントにおける配管外面からのキャビテーション壊食初生評価を検討するために、オリフィス下流におけるキャビテーション壊食実験とキャビテーション気泡の衝撃力測定実験および配管外面に取り付けた加速度センサーによる測定の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) アルミ試験片によるキャビテーション壊食の発生するキャビテーション数 σ はオリフィス下流の50 mmと75 mmでは0.8, オリフィス下流の100 mmでは0.7であり, キャビテーション遷移状態に近いもしくは同等の状態である。
- (2) キャビテーション気泡の衝撃力を直接計測できる衝撃力センサーを用いた実験と壊食実験との比較により, キャビテーション壊食発生時に衝撃力が増加し始めることからキャビテーション壊食初生と衝撃力に良い相関性がある。
- (3) 配管外面に取り付けた加速度センサーによる測定結果から, キャビテーション壊食初生付近からキャビテーション気泡崩壊による衝撃力のために出力値の変動が大きくなることがわかった。また, 加速度センサー出力電圧と衝撃力センサーによる衝撃力測定結果とよい相関性があり, キャビテーション壊食初生評価には出力電圧RMS値での評価精度がよい。

今後は実際の原子力発電所で使用されるステンレス鋼材や炭素鋼での壊食初生実験を行い, 加速度センサーによる配管外面からの評価を実施し, 実機適用に向けた精度のよい評価を行うことが課題であると考えます。

謝辞

本研究の衝撃力センサー測定実験, 壊食ピットの判断や鋼球落下試験については福井大学との共同研究として実施した。実験に協力いただいた福井大学の服部研究室の方々に感謝いたします。

文献

- (1) J. Ozol, J.H. Kim, J. Healzer, "CAVITAION 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, 関西電力(株).
<http://www.kepcoco.jp/pressre/2002/1126-1j.html>
- (4) 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).
- (5) 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).
- (6) 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).
- (7) 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).
- (8) 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).
- (9) J. Poul Tullis, "Cavitation Guide for Control Valves," NRC NUREG/CR-6031, (1993).