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*

長屋 行則^{*1}, 村瀬 道雄^{*1}, 水山 成郎^{*2}

Detection of Cavitation with Microphone Placed Outside of Piping

Yukinori NAGAYA^{*3}, Michio MURASE and Shigeo MIZUYAMA^{*3} Incorporated, Institute of Nuclear Safety System,
64 Sata, Mihama-cho, Mikata gun, Fukui, 919-1205 Japan

Cavitation induced vibration and erosion of pipes are the potential damaging factors in a piping system. To prevent such trouble, it is necessary to develop the detection method of cavitation phenomena. Especially, in power plants, it is preferred to detect them from the outside of piping during operation. In this paper, detection of cavitation phenomena was experimentally investigated using microphones placed outside of piping at upstream and downstream of an orifice. Following results were obtained: (1) According to the progress of cavitation phase, output voltage of the microphone varied, and the amplitude and number of the pulse-shaped signals increased. However, it might be difficult to distinguish them from surrounding noises in an operating plant. (2) Microphone outputs were confirmed to be radiation sounds caused by vibration on surface of the piping based on measurements of time difference between accelerometer output and microphone output. (3) The results of 1/3 octave band analysis revealed, noises by cavitation increased in the region of high frequency according to the progress of cavitation. In transitional phase, high frequency noises at the downstream from the orifice were larger than upstream. (4) The RMS (root mean square) values ratio of microphone output at upstream and downstream of the orifice varied according to the progress of cavitation, and increased by applying a high band pass filter. Therefore, comparison of RMS values at upstream and downstream of the orifice might make it possible to detect cavitation phenomena in a piping system of operating plants.

Key Words: Cavitation, Power Plant, Pipeline Component, Orifice, Microphone, Noise, Detection

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⁽¹⁾⁽²⁾。プラントの通常運転時にはキャビテーションが生じないように設計されているが、起動や停止などの過渡的な操作によりキャビテーションが発生して配管溶接部に振動による疲労割れを生じた事例があり⁽³⁾、運転操作時にキャビテーションの発生を検知する手法が求められてい

る。

ポンプのキャビテーションについては、ターボ機械協会によりキャビテーション損傷の予測と評価に関する指針 (TSJ G 001) が公表されており、加速度計、AE センサ、水中マイクロフォンを用いたキャビテーション検知および評価に関して記載されている⁽⁴⁾。また、澤田ら⁽⁵⁾はアコースティックエミッション (AE) を測定して水車でのキャビテーションを検知する実験を行っている。木村ら⁽⁶⁾は、ちょう形弁を対象に騒音計および振動計によるキャビテーション診断を提案している。

プラント配管では、ポンプ以外に弁やオリフィスでキャビテーションが発生しやすいが、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い。したがって、キャビテーションの評価指標であるキャビテーション数を求めること、キャビテーション発生を判断する比較基準を準備しておくことが困難である。しかしながら、プラント運転中における弁やオリフィスでのキャビテーション検知に関する研究はあまり見られない。

* 原稿受付 2009 年 1 月 16 日。

^{*1} 正員、(株)原子力安全システム研究所(〒919-1205 福井県三方郡美浜町佐田 64)。

^{*2} 正員、関西電力(株)(〒919-2101 福井県大飯郡おおい町大島 1 字吉見 1-1)。

E-mail: nagaya.yukinori@inss.co.jp

本研究の目的は、プラント配管の弁やオリフィスでのキャビテーション発生を比較基準なしで検知する手法を開発することにある。著者は、オリフィスでのキャビテーションを対象として、可視化実験と壊食量測定および配管外面に取り付けた加速度センサでの測定を行い、絞り部の上流と下流での加速度出力を比較することによりキャビテーションの発生を検知できる見通しを得た⁷⁾。しかし、プラント配管では高所配管や高温配管のように加速度センサの取付けが困難な場所が多い。そこで、本報告では、キャビテーション発生時における配管表面からの放射音響に着目し、プラント配管での現場測定が容易で測定箇所を拡大できる非接触測定としてマイクロフォンを用いたキャビテーション検知手法について検討した。

2. 実験装置と実験方法

2・1 実験装置と試験部 実験装置の概要を図1に示す。実験装置は、レザーバ、ポンプ、試験部および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 m³の圧力容器(安全弁の設定圧力3.2 MPa)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設置し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た。

Fig. 1 Test loop

キャビテーション実験の試験部を図2に示す。試験部は配管とオリフィスで構成される。配管は内径49.5 mmの円管とし、試験部にはステンレス鋼製

(SUS304)を使用した。オリフィスは長さ28 mm、内径24.75 mmのステンレス鋼製(SUS304)である。

Fig. 2 Test section (unit: mm)

2・2 実験方法 実験条件としてキャビテーション数を用い、キャビテーション数 σ は次式で定義した。

$$\sigma = \frac{2(P - P_v)}{\rho V_o^2}$$

ここで、 P [Pa] はオリフィス下流圧力、 P_v [Pa] は水の飽和蒸気圧、 V_o [m/s] はオリフィス内の平均流速、 ρ [kg/m³] は水の密度である。キャビテーション数を変化させる場合、流速は一定 ($V_o = 15.0 \sim 15.4$ m/s) としてオリフィス下流の圧力を調整した。実験時の溶存酸素濃度は $\beta = 3.77 \sim 6.55$ g/m³ であった。水温は25℃前後とした。

2・3 マイクロフォンおよび加速度センサによる測定 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10 kHzのオーダーにあるとされている⁸⁾。また壊食量の予測にセンサを用いる場合、10 kHz以上の高周波数帯域の信号が重要とされている⁹⁾。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 ~ 45 kHz, ± 3 dB)を使用した。非接触型センサに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 ~ 20 kHz, 最大音圧レベル140 dB, 感度-29 dB ± 3 dB, 外形寸法132×13.5 mm)とプリアンプ(小野測器製、MI-3110: 周波数帯域20 ~ 20 kHz, ゲイン-3 ± 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 Ω , 外形寸法13×61 mm)を使用した。

図3に各センサによる測定システムを示す。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。マイクロフォン出力電圧は増幅器にて増幅し、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1～30 kHz）を必要に応じて使用した。各センサ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。

Fig. 3 Measurement system

3. 測定結果と考察

3.1 マイクロフォンの出力特性 キャビテーション数 $\sigma = 2.8$ (気泡無), 1.4 (初生段階), および 0.7 (遷移状態) における流動状態とマイクロフォンの出力波形を図4に示す。マイクロフォンの取り付け

位置は、遷移キャビテーションと考えられる領域における加速度センサ測定においてセンサ出力が最も大きいオリフィス出口の下流 75 mm とし、配管表面とマイクロフォンの距離は 50 mm とした。 $\sigma = 2.8$ では出力値は微小である。初生段階にある $\sigma = 1.4$ 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 $\sigma = 0.7$ 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。しかしながら、騒音環境下である実機プラントでの測定では、他の騒音との区分が難しく一般的に S/N 比が良くないため、パルス状の信号がキャビテーションに起因する信号と断定することは困難である。

キャビテーション数を変化させた場合のマイクロフォン出力変化を加速度センサと比較して図5に示す。縦軸にはマイクロフォン出力電圧の RMS の平均値（3 回のデータ）をとった。本研究で用いたオリフィス体系では $\sigma = 2.2$ 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、気泡は目視できないほど細かく淡い状態であった。RMS は $\sigma = 1.6$ 付近まで顕著な増加はなかった。 $\sigma = 1.4$ で RMS が大きくなっているが、測定時に試験部下流圧力計の取り出し分岐から音響が発生しており、その影響からマイクロフォン出力が増加していることが考えられる。さらに σ を低下させると、 $\sigma < 1.0$ で

Fig. 4 Flow condition and microphone output waveform at 75 mm downstream from orifice

出力が増加し、 $\sigma = 0.6$ 付近でピークに達した。 $\sigma = 0.6$ 以降では出力が低下し、 $\sigma = 0.5$ ではスパーキャビテーション状態となった。キャビテーション数の低下に伴う出力 RMS の変化量は小さいものの、このような傾向は、加速度センサにおける出力特性⁽⁷⁾と定性的に一致する。

Fig. 5 Output RMS voltage
at 75 mm downstream from orifice

3・2 マイクロフォンと加速度センサの同時測定

配管表面の振動を、マイクロフォンで検知することが可能であれば、加速度センサの代わりにマイクロフォンを使用することができ、加速度センサでは測定が困難であった高温配管でのキャビテーション検知が可能となる。そこで、マイクロフォンと加速度センサによる同時測定を実施し、配管表面加速度と音響の関係について検討した。加速度センサは、オリフィス出口の下流 100 mm に取り付けた。マイクロフォンはオリフィス出口の下流 100 mm に取り付け、配管表面からの距離を 100, 200, 300, 400, 500, 1000 mm に変化させ各距離で同時測定を 5 回実施した。図 6 に、加速度センサと配管表面からの距離 200 mm に設置した場合のマイクロフォンの同時測定出力波形を示す。例えば、パルス状波形に着目すると、加速度センサで検知された後、マイクロフォンで検出されていることがわかる。

Fig. 6 Output waveform of simultaneous measurement

測定した加速度センサとマイクロフォンの出力波形の相互相関関数によってその時間差を求め、空気中を伝搬する音速との比較を実施した。図 7 にその結果を示す。相互相関によって求められた音速は 334.3 m/s (破線) となった。空気中を伝搬する音速は 20 °C で 343.5 m/s であり、測定値との差は約 3 % であることが確認された。このことからキャビテーションによって生じた衝撃波に起因する配管表面からの放射音響が、空気中を伝搬し、マイクロフォンで測定していることが確認され、非接触のマイクロフォンでもキャビテーションの検出および評価が可能であると考えられる。

Fig. 7 Time difference between accelerometer output
and microphone output

3・3 絞り部の上流と下流での出力 マイクロフォンと加速度センサの同時測定によりマイクロフォンにより配管表面からの放射音響を測定していることを確認できた。このことから、マイクロフォンを用いた場合でも、筆者らが提案した加速

度センサを用いたキャビテーション検知手法⁽⁷⁾と同様の手法を適用できる可能性がある。図 8 に、キャビテーション数を変化させた場合の、オリフィス上流 90 mm と下流 75 mm でのマイクロフォン出力を示す。遷移状態である $\sigma = 0.6$ では上流出力 0.019 V に対し、下流出力 0.036 V であり最大倍率約 2 倍であった。加速度センサを用いた場合の数十倍に比べ上流と下流とで顕著な違いと言えず、マイクロフォンは検知精度が大きく劣る。

Fig. 8 Microphone output RMS voltage

加速度センサに比べマイクロフォンの検知精度が劣る一因として、一般的に空気伝搬音は他の騒音との区分が難しく、オリフィス上流に設置したマイクロフォンであっても、オリフィス下流で発生した音も合わせて検知していることが考えらる（付録に、実験体系における音響伝搬に関する考察を示す）。そのため、騒音環境下である実機プラントでの測定では実験と同様の測定ができない可能性がある。そこで、キャビテーション発生時には高周波成分の信号が増加する⁽⁶⁾という特徴があること、高周波成分は回折効果が少ないことから、含まれる周波数帯域ごとにオリフィス下流と上流のマイクロフォン出力を比較した。図 9 に、キャビテーション数 $\sigma = 2.8, 1.4, 0.6$ におけるマイクロフォン出力の 1/3 オクターブバンド解析結果を示す。各キャビテーション数の時の AP 値は、キャビテーション数の低下に伴い、徐々に大きくなり、1 kHz 以上の周波数帯での騒音値の増加が顕著となる。しかし、騒音の定量値ではキャビテーション発生有無の評価に比較基準が必要である。オリフィス上流と下流の比較では、初生段階である $\sigma = 1.4$ では、上流と下流の出力にあまり顕著な違いはなく微小であるが、遷移状態である $\sigma = 0.6$ では、6.3 kHz 帯で 11.1 dB、8 kHz 帯で 11.5 dB 下流のほうが大きな騒音値となった。

Fig. 9 1/3 Octave band analysis at 75 mm downstream and 90mm upstream from orifice

マイクロフォンを用いた絞り部下流と上流の比較の場合、6.3kHz 帯、8kHz 帯といった高周波数成分に着目することが有利であることを確認できた。そこで、マイクロフォン出力波形を 8kHz の HPF 処理を施し、加速度センサ出力との比較を実施した。図 10 に、キャビテーション数を変化させた場合の、加速度センサとマイクロフォン(HPF 有、無)の上流出力に対する下流出力の比を示す。加速度センサより劣るものの、HPF 無しでは最大倍率が約 2 倍に対し、HPF 処理をした場合約 3.3 倍となり、検出感度が向上することを確認した。

Fig. 10 Microphone and Accelerometer output RMS ratio between downstream and upstream

3・4 考察 加速度センサ, AE センサ, マイクロフォンを用いたキャビテーション測定が行われており, キャビテーション数により出力信号が変化することは知られている. 水山らは, 比較基準データがない運転中プラントの弁やオリフィスでのキャビテーションの発生を検知する方法として, 加速度センサを用いた検知手法を提案している⁽⁷⁾. しかしながら, 加速度センサは取付け準備時間が長い他, 測定対象が低温配管に限定されるなど課題があり, 非接触測定が可能なマイクロフォンの適用が有効である. マイクロフォン出力特性は, キャビテーション流動状況が激しくなるに従い, パルス状の信号波形が増加し, 遷移状態である $\sigma = 0.6$ 付近で最大となるなど, 加速度センサ出力とほぼ対応する結果が得られた(図 4, 図 5 参照). マイクロフォンと加速度センサの同時測定により, マイクロフォン出力は配管表面からの放射音響であることを確認できた(図 7 参照). 配管絞り部の上流と下流でのマイクロフォン出力の比較では, 上流に対する下流の RMS 比は最大倍率約 2 倍と有意な差はあるものの加速度センサを用いた場合に比べ検知精度は劣る(図 8 参照). 1/3 オクターブバンド解析結果から, キャビテーション数の低下に伴い 1 kHz 帯以上の周波数成分が増加し, 特に 6 kHz 以上の周波数帯域においてオリフィス上流と下流の騒音値に顕著な違いがあることを確認した(図 9 参照). 従って, 配管絞り部の上流と下流のマイクロフォン RMS 比は, HPF 処理をすることでより大きくなり検知精度が向上する(図 10 参照).

以上のことから, 比較基準がないプラント配管でもマイクロフォンを用いてキャビテーションの発生状態を検知できる見通しが得られた.

今後の課題として, 実機プラントの配管については, 保温材が取り付けられている箇所があり, 別途, 測定・評価方法の検討が必要である. また, 暗騒音による S/N 比の低下についても, 更に検討を要する.

4. 結 言

オリフィス近傍の配管外部に設置したマイクロフォンを用いて, キャビテーションの発生を検知する手法について検討を行い, 以下の結果を得た.

- (1) キャビテーションの発達と共に, マイクロフォン出力は高周波のパルス状信号が増加し, 振幅も大きくなる. しかし, プラント配管でのキャ

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) マイクロフォンと加速度センサの同時測定において, 加速度センサ出力波形とマイクロフォン出力波形の時間差が音速による伝搬時間と約 3 % の相違で一致することから, マイクロフォンにより配管表面振動を放射音響として検出することを確認した.
- (3) 1/3 オクターブバンド解析結果から, キャビテーション数の低下に伴い, 1 kHz 帯以上の周波数成分が増加することを確認した. また, 遷移状態における騒音値は, 6.3 kHz 帯以上の周波数帯域でオリフィス上流に比べ下流側が顕著に大きくなった.
- (4) マイクロフォン出力電圧 RMS のオリフィス上流と下流との比はキャビテーションの状態によって変化し, 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約 2 倍となり, 8 kHz の HPF 処理をすることにより約 3.3 倍と最大倍率が向上した.

マイクロフォンによる非接触測定は, 加速度センサ等を用いた配管接触測定と同様の評価ができることから, 上記(4)の方法により比較基準無しでキャビテーションの発生を検知できると考える.

付 録

実験体系における音響伝搬 音響測定実験における測定位置と音源の位置関係を図 A に示す. 実際は, キャビテーションによる放射音響は, 配管全体から不均一に放射されており特定は困難であるが, ここでは簡単のため, 位置が測定点 1, 2 の正面の 2 箇所の点音源とし, 拡散減衰のみ考慮する. また, 床面, 壁面における反射音, 定在波等は考慮しないものとする. 音圧は音源からの距離比に反比例することから, 音源 O からの音は, 測定点 2 では, 測定点 1 で観測される音の 25 % の音圧となる. 測定点 1 でも同様のことが言え, 位置によるキャビテーション音響の比較をする場合, それぞれがノイズ源となることから, 加速度センサに比べ S/N が低下する一因となる.

また, コンデンサマイクロフォン(MI-1233)は, 周波数が高くなると斜めからの音は減衰され検知される指向特性⁽¹⁰⁾を有することから, 高い周波数に着目することで S/N を向上させることが出来る.

Fig. A Model of sound propagation

文 献

- (1) Ozol, J., Kim, J.H. and Healzer, J., CAVITATION EXPERIENCE WITH CONTROL VALVES IN NUCLEAR POWER PLANTS, *Cavitation and Gas-Liquid Flow in Fluid Machinery and Devices*, ASME, Vol.190 (1994), pp.291-297.
- (2) Moussou, P., Cambier, S., Lachene, D., et al., VIBRATION INVESTIGATION OF A FRENCH PWR POWER PLANT PIPING SYSTEM CAUSED BY CAVITATING BUTTERFLY VALVES, *Proceedings of Symposium on Flow-Induced Vibration*, ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vol.420-2 (2001), pp.99-109.
- (3) Ministry of Economy, Trade and Industry, Nuclear and Industrial Safety Agency, Nuclear Safety Administration Division ed., *Publication of the annual report of nuclear plant operating administration* (2001), pp.391-396, Thermal and Nuclear Power Engineering Society. (in Japanese)
- (4) Turbomachinery Society of Japan ed., *Guideline for Prediction and Evaluation of Cavitation Erosion in Pumps* (2003), pp.112-113. (in Japanese)
- (5) Sawada, A., Sakakibara, M., Udoh, Y., Sasaki, K., Detection of the water wheel cavitation using acoustic emission sensor and wavelet transform, *Proceedings of the 11th Symposium on Cavitation*, (2001), pp. 157-160. (in Japanese)
- (6) Kimura, T., Ogawa, K., Measurement of Cavitation Vibration and Noise around a Butterfly Valve, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.52, No.474 (2008), pp501-507. (in Japanese)
- (7) Mizuyama, S., Murase, M., Fujii, Y., Yagi, Y., Detection of Cavitation with Accelerometer Mounted on Outer Surface of Piping, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.74, No.743 (2008), pp1681-1687. (in Japanese)
- (8) Sato, K., Comparison of Cavitation Shock Pressures Based on Difference of Bubble Patterns, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.56, No.532 (1990), pp.3597-3602. (in Japanese)
- (9) Kato, H. ed, *Cavitation New Edition* (1999), p.240, Maki-shoten. (in Japanese)
- (10) Onosokki technical note, No.70 (1998), pp4. (in Japanese)