

柔軟なファイバーとシートの付加によるバタフライ弁の キャビテーション抑制

小川 和彦[†], 青山 一樹^{††}

Cavitation Reduction of Butterfly Valve by Flexible Fibers and Sheet Materials

OGAWA Kazuhiko[†], AOYAMA Kazuki^{††}

Abstract

Butterfly valves are most commonly used in all industrial plants because of their simple construction. This cavitation phenomenon, which cannot be avoided in butterfly valves, is known to be caused by the interference of the flow from the front and rear edges of the valve body, and its reduction can be suppressed by preventing the flow interference. Various types of valves have been proposed in the past, but this study proposes a simple method to suppress cavitation by adding a flexible fiber or flexible sheet fixed behind the valve body.

The intensity of cavitation was measured in terms of noise level, and the polyester sheet, which was the most flexible, had the greatest noise suppression effect. In the normal valve without the seat, the noise was reduced by approximately 5 dB to 10dB at each valve opening position based on the mid valve opening position, where cavitation is most likely to occur, confirming the suppression effect of the polyester sheet. However, a detailed study will be required in the future to determine the length of sheets and the degree of flexibility required.

Key Words: Cavitation, Cavitation reduction, Butterfly-valve, Noise, Pressure loss, Pipe flow

† 大阪産業大学 工学部 交通機械工学科 教授

†† 大阪産業大学 全学教育機構 テクニカルセンター 講師

草稿提出日 10月21日

最終原稿提出日 11月21日

1 緒言

著者らは、構造が簡単であり軽量かつコンパクトであることから、産業用プラントで広く用いられているバタフライ弁のキャビテーション抑制について、研究を行ってきた。バタフライ弁においては、構造上キャビテーション現象の発生は避けられず、騒音や壊食の発生により、メンテナンスの上からしばしば問題となっている。筆者らはすでにバタフライ弁下流側の管路に拡大部を設けて圧力回復を図る方法¹⁾、および弁体にフィンを取り付けて弁周囲の複雑な流れが干渉させない方法²⁾を提案してきた。

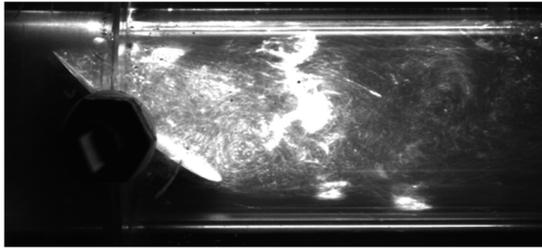
従来の制御弁のキャビテーション抑制については、Skousen³⁾やRahmeyerら⁴⁾によるTortuous pass (曲りくねった微細な流路)をもつ構造の例がある。また、バタフライ弁については、Baumann⁵⁾による弁体の周囲に櫛歯状の突起を設けた形状、樋口ら⁶⁾による多孔板と弁体との組み合わせ、谷ら^{7), 8)}の弁体の下流側かつ前縁側に凸部を設けた構造などの研究例がある。これらの研究例では、流路の寸法を微小にしてキャビテーションの発生区域を細かく区切り、気泡同士の干渉による分裂あるいは合体を防いでキャビテーション減少を抑制している。しかしながら、現実にはコストの問題の他、粒子が混じるような汚れた流体では、適さないことが多い。

また著者らの研究による弁下流側の管路に拡大部を設ける方法¹⁾は、抑制効果は大きいものの弁のコンパクト性を損ねるため、実際には使用される場面が限られる。弁体にフィンを取り付ける方法²⁾は拡大部を設ける方法¹⁾よりコンパクトなものであるものの、実用化には薄いフィンを多数設ける必要があり⁹⁾、バルブの主たる製造方法である鋳物においては注意を要する。

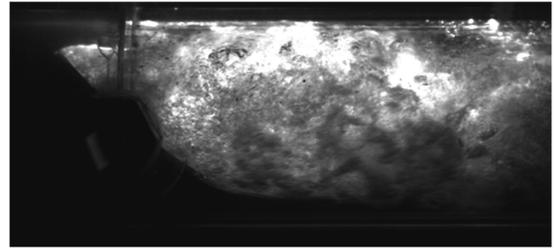
バタフライ弁のキャビテーションについては、次節に述べるように、弁体の前縁側と後縁側からの流れの干渉が発生原因であり、流れの干渉を防ぐことによって減少を抑制できる。そこで、さらに簡便な方法として、弁体後方に柔軟なファイバーあるいは柔軟なシート状の流れになびく部材を付加し、キャビテーションを抑制する方法を提案する。この方法に関しては、著者の一人が過去に試みを行っていたが¹⁰⁾、その後キャビテーションが激しい中間弁開度で系統的に実験を行ったので、本論文ではその詳細を述べる。

2 バタフライ弁のキャビテーション現象抑制

Fig. 1 に、著者が過去に撮影したバタフライの代表的なキャビテーション流れを示す²⁾。流体は水であり、図の左から右方向に流れている。写真左上が弁体の前縁、右下が弁体の後縁である。以下、本論文では弁体前縁側をオリフィス側、弁体後縁側をノズル側と呼ぶことにする。Fig. 1 (a) は弁開度45°におけるキャビテーション流れであり、弁体背面は主流の剥離域でキャビテーション気泡が成長する。弁体の中心からおよそ1D (D: 弁体直径) の位置で上方の管



(a) Valve Opening 45°, $\sigma = 20.4$



(b) Valve Opening 45°, $\sigma = 19.2$

Fig. 1 Cavitation Conditions around a Butterfly Valve²⁾

壁から管中心に向かって、クラウド状のキャビテーションが発達している。この渦は特異渦として知られており^{7), 8)}、写真中央下部に見られる弁体の後縁側（ノズル側）から円管の管壁に沿って管の上方へ向かってくる流れと、写真左上部に見られる弁体の前縁側（オリフィス側）の縮流部からの流れが、管頂部において衝突し干渉することによって激しい渦運動が生じたものである。これにより、特異渦キャビテーション（写真中央の管頂部から管の中央まで伸びている気泡群）が発生し、激しい壊食や騒音をもたらす。

Fig. 1 (b) は騒音が最大となる状態を示しており、Fig. 1 (a) より流速が大きく、弁の下流側では圧力低下が非常に大きくなり、下流側全体に気泡が広がる。これらの写真では前述のノズル側から円管の管壁に沿って管の上方へやってくる流れと、オリフィス側からの縮流が明確に現れており、この二つの流れの干渉を軽減することがキャビテーション抑制につながると考えられる（なお、Fig. 1 のキャプションの σ はキャビテーション係数であり、3.2 節 (1) 式を参照）。

3 キャビテーション流れの実験方法と実験での係数

3.1 キャビテーション実験装置および実験方法

Fig. 2 は本研究に用いたキャビテーション実験装置であり、同図の左のタンクの直径は 500mm である。ポンプの回転数をインバータで変化させ、流速を設定する。管内平均流速は、弁上流側に設置した超音波流量計により測定している。弁体の圧力損失については、供試弁体の弁軸より上流側 1 m および下流側 1.5 m の区間の圧力差を管壁に設けた静圧孔から取り出して差圧変換器により測定し、配管の管摩擦を差し引いて弁体の圧力損失を求めた。なお、上流側、下流側の静圧孔は、共に管頂部、管底部およびそれらの中間に 4 か所に設けている。後述のキャビテーション係数の計算に必要な上流側絶対圧力は、上流側静圧孔からの圧力変換器からのゲージ圧の測定と気圧計による大気圧の測定により求めた。

実験装置内に注水後、ポンプで装置内の水を 0.5m/s 程度で数分間回流させ、ある程度の空気泡は取り除き、その後約 3 時間程度放置し、実験を開始した。水温を一定に保つ制御は行って

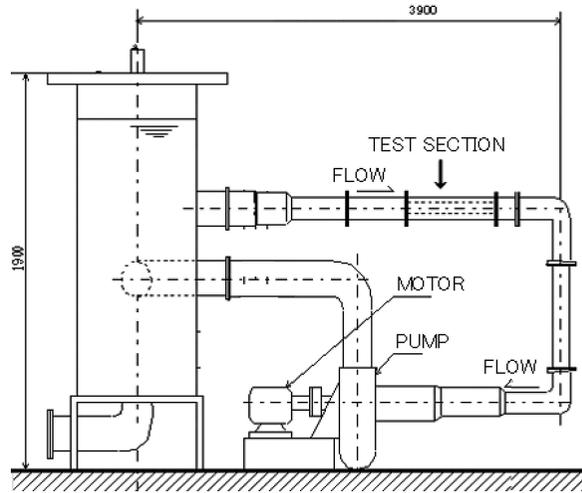


Fig. 2 Experimental equipment of cavitation

いないが、実験開始後と開始前で水温上昇が 2°C 以内に収まる程度の時間で測定を終了させた。

Fig. 1 左のタンク上方は大気に開放しており、弁の上流側圧力は大気圧となっている。

キャビテーション騒音は、弁体を取り付けたテスト部配管の外側に騒音計を設置して測定した。騒音計は弁軸に近接した位置とした。

3.2 実験での係数

キャビテーション状態の激しさを表すキャビテーション係数 σ は、上流側絶対圧力を P_1 [Pa]、飽和蒸気圧を P_v [Pa]、管内平均流速を U [m/s]、水の密度を ρ [kg/m³]として、次式で求めた。

$$\sigma = \frac{P_1 - P_v}{\rho U^2 / 2} \quad (1)$$

また弁体の損失係数 ζ は、弁体の圧力損失を ΔP [Pa]として次のように定義した。

$$\zeta = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2)$$

4 ファイバーによるキャビテーション抑制に関する実験と考察

4.1 ファイバーによるキャビテーション抑制

第2章で述べたように、キャビテーションがある程度激しくなった状態では、弁体のオリフィス側からの流れとノズル側からの流れが管壁に沿って干渉し螺旋状に流れとなり、特異渦キャ

ビテーションが発生する。このキャビテーションは、弁体の中心からおよそ1D (D:弁体直径)の位置で上方の管壁から管中心に向かって伸びるクラウド状のキャビテーションであるが、これが騒音、振動ひいてはキャビテーション壊食を発生させる原因となる。

この特異渦の発生を緩和させるために、水の流れに追従するファイバーを弁体に取り付けて、弁体のオリフィス側とノズル側の合流を防ぐことを試みた。従来のプレートやフィンなど剛性のある材料を弁体もしくは弁体の後方に設置したりすると、エッジ部などから二次的なキャビテーションが発生することや、流れ方向を強制的に変更させるのでプレート等の付加物を含めた弁体の制御性を大きく変化させることになる。そこで弁体の特性をあまり変化させることなく、キャビテーション状態のみを緩和させるため、ある程度流れに沿って柔軟に形状が変化する紐状のファイバーを用いることにした。このファイバーによって弁後方の剥離渦および、オリフィス側とノズル側からの流れの合流による特異渦を抑制させることを狙いとした。

Fig. 3の左側に示す弁体は、直径48mmで角部を2mmの面取り加工を行った円板系の通常のバルブである。この弁体を基準の弁体として、Normalと呼ぶ。この弁体に図の右上に示す直径44mm、厚さ1.5mmの亚克力板に25個の穴を設け、計25本ファイバーを接着し、Normal弁体にネジで固定した。

ファイバーの材料はポリエチレン、太さは約1.5mm、比重は0.92である。**Fig. 4**に示すようファイバーの長さは150mm (Test1)、125mm (Test2)、72mm (Test3)の3種類とした。また、以下ではファイバーを取り付けていない通常の弁体をNormalと呼ぶことにする。

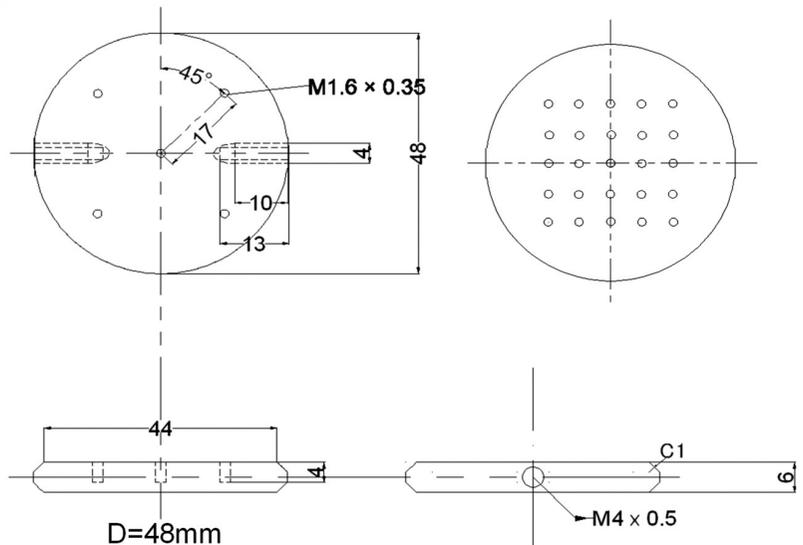


Fig. 3 Test Valve Body (Normal)

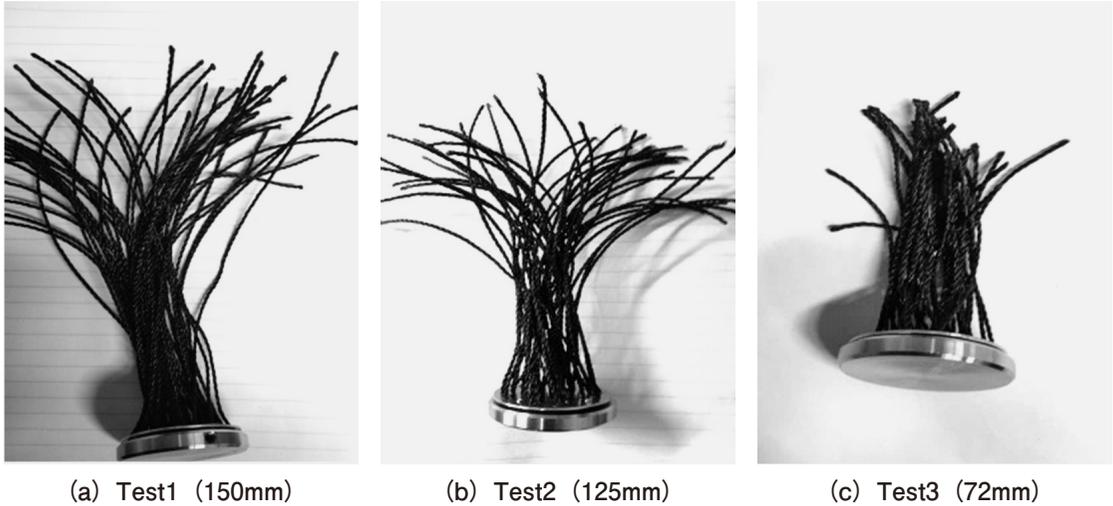


Fig. 4 Test valve body with Fibers

4.2 キャビテーション抑制効果の比較について

弁体の正味のキャビテーション抑制効果は、以下のような理由から、同じ弁開度の結果から判断するのではなく、同じ損失係数のもとでの結果から判断を行うことにした。

本実験ではインバータでポンプの回転数を徐々に上昇させて流速を増加させ、各流速のもとでキャビテーション騒音を測定している。実験ではどの条件でも上流側の圧力は一定で、かつ飽和蒸気圧の影響は小さいため、キャビテーション係数 σ が同じであれば、流速も同じである。しかしながら、実際のプラントではポンプの回転数をインバータで変化させることはほとんどなく、配管の途中に流量制御のために設置したバタフライ弁自体の弁開度を調節して所定の流量を得る場合のほうがはるかに多いと考えられる。

実際の配管での流量はポンプの揚程曲線と配管系全体の圧力損失によって決定される。電気回路にたとえると、電流は流量、バルブは抵抗、ポンプは電池である。電池すなわちポンプ性能が同じとすれば、一定の電流（流量）にするには、同じ抵抗にする必要がある。したがって、新しい工夫を加えた、従来とは異なる弁体は、同じ弁開度にしても従来弁と同じ抵抗（すなわち圧力損失）にならないので、同じ弁開度で異なった弁体の騒音を比較してもキャビテーション抑制効果は判断できない。

そこで、本研究では同一の圧力損失係数という条件でキャビテーション抑制の効果を検討することにした。バタフライ弁の圧力損失係数はレイノルズ数に対してほぼ一定となる特性があり、同じキャビテーション係数で比較すれば、同じ圧力損失になっているとみなすことができる。本実験では(1)式の σ の式において、上流側絶対圧力 P_1 は大気圧で一定、飽和蒸気圧 P_v もほぼ一定であるので、 σ は管内平均流速 U に対応すると考えてよく、 σ が同じなら U も同一

であり、同じ σ で比較すれば圧力損失も同じになっていると考えることができる。

4.3 ファイバー付き弁体のキャビテーション抑制の効果

Fig.5は各弁体の損失係数を示しており、損失係数 ζ が21程度になるように各弁体の弁開度を調節した。Test1では弁開度 $\theta = 43^\circ$ 、Test2では弁開度 $\theta = 45^\circ$ 、Test3では弁開度 $\theta = 46^\circ$ 、Normalでは弁開度 $\theta = 47^\circ$ で損失係数は $\zeta = 21.5$ となり、4つの弁体の損失係数が一致する。

Test1が最もファイバー長さが長く弁体直径の3倍の長さであり、Test3が最もファイバー長さが短く弁体直径の約1.5倍である。同じ損失係数のもとでTest1の弁開度が $\theta = 43^\circ$ と最も小さいことから、ファイバーが長いほど整流効果が大きいことがわかる。バタフライ弁から発生するキャビテーションは最も激しい状態でも、弁体下流側において弁体直径の約1.5倍～2倍程度の長さで消滅してしまうことが指摘されているが^{1), 2)}、同じ損失係数のもとではTest1の弁開度が最も小さくなっており、弁体による流れの乱れは弁体直径の3倍程度でも持続していることがわかる。

この $\zeta = 21.5$ のもとで騒音を測定した結果がFig.6であり、この図から抑制の効果を比較する。キャビテーションが連続的に発生して騒音が大きくなり始めるのが、Test1が $\sigma = 65$ 、Normalが $\sigma = 70$ であり、Test1がキャビテーションの初期の発生を抑制していることがわかる。

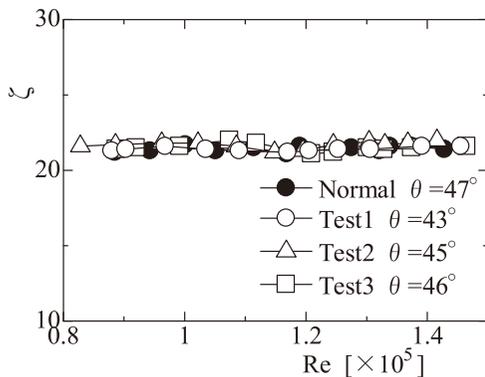


Fig. 5 Pressure loss characteristics of test valves with fibers

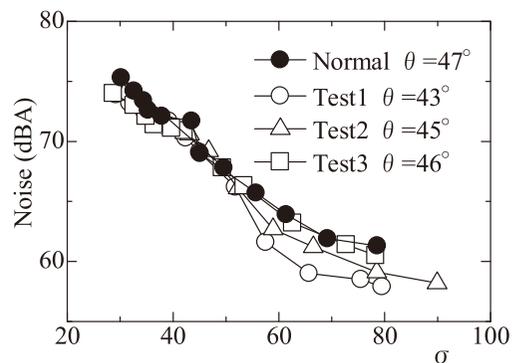


Fig. 6 Noise characteristics of test valves with fibers

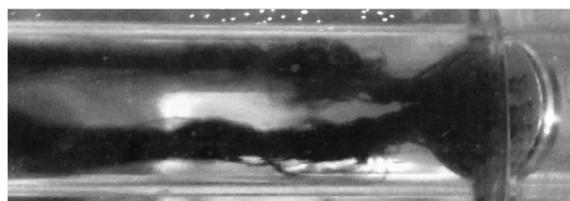


Fig. 7 Fibers entangled behind the valve ¹⁰⁾

Test2とTest3に関しては初生が明確ではなかったが、騒音レベルはTest2でも低下している。Test3の騒音はNormalとほぼ同じであり、ファイバー長さは弁体の直径の1.5倍程度では不足ということがわかる。

Fig. 6において騒音が急上昇するのは、Normalでは $\sigma = 46$ 付近、Test3では $\sigma = 45$ 付近、Test2では $\sigma = 44$ 付近、Test1では $\sigma = 46$ 付近である。これらの σ より σ 値が小さい領域ではファイバー付き弁とノーマル弁の騒音の差がほとんど見られなかった。

その原因は流速が大きくなると、前述の特異渦キャビテーションを発生しており、ファイバーは強い渦によって**Fig. 7**に示すように絡みあってしまうことが著者の過去の研究において指摘されている¹⁰。**Fig. 7**は弁体の上方から撮影した写真であり、流れは右から左方向であるが、弁体の上下左右に等間隔にとりつけたファイバーが絡み合っ二つの棒状のような状態となっている。本研究ではファイバー長さの異なる弁体を3種類試みたが、上述のように σ が一定程度小さくなると（ $\sigma = 44 \sim 46$ ）、すなわち一定程度の流速より大きくなると、騒音低減の効果がなくなるのは、ファイバーが高速の流れに従って左右二つの棒状の塊になってしまうことによると考えられる。第2章で述べたように、ノズル側から円管の管壁に沿って管の上方へやってくる流れと、オリフィス側からの縮流が明確に現れており、この二つの流れの干渉を軽減することがキャビテーション抑制につながると考えたが、ファイバーが棒状の塊になってしまうため、弁体後方の騒音低減の効果が小さいと判断できる。

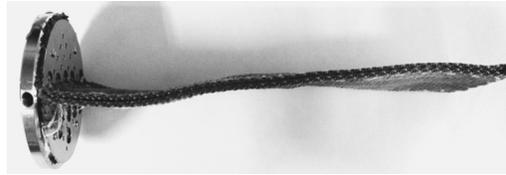
ただし、最大音圧はファイバーを取り付けた弁はNormal弁に比べて2～3 dB低くなっており、上記のようにファイバーが棒状になってもある程度の整流効果はあるため、最大騒音に関しては一定程度抑制できるものと思われる。しかしながら、キャビテーションが弁体背面に広がる状態である $\sigma = 46$ より σ が小さい範囲ではNormal弁とファイバー付きの各弁体との差が小さいため、騒音をさらに低減するには、ファイバーが棒状の状態にならないようにすることが必要と思われる。

5 柔軟なシートによるキャビテーション抑制に関する実験と考察

5.1 柔軟なシートによるキャビテーション抑制

前章のファイバーを用いる方法は、ファイバーが棒状の塊になってしまうため、このような状態にならないようにすることが必要である。そこで新たな方法として、弁体の中央に柔軟なシートを取り付けて、弁体のオリフィス側とノズル側の合流を防ぎ、弁後方の渦が消滅させることよりキャビテーションを抑制することを試みた。

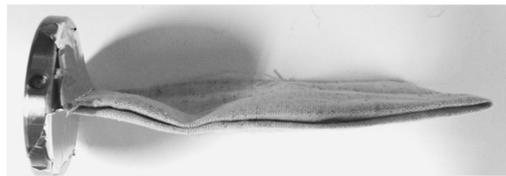
柔軟なシートの材料としてはいろいろなものがあるが、市販で簡単に得られる3種類の材料を選択した。**Fig. 8**に示すように、ポリエステルシート（Test4）、天然ゴムシート（Test5）、布シート（Test6）をひれとして取り付けることにした。ファイバーのTest1の結果が最もキャ



(a) Test4 (Polyester sheet)



(b) Test5 (Natural rubber sheet)



(c) Test6 (Sailcloth sheet)

Fig. 8 Test valve body with sheets

ビテーション抑制の効果が大きかったことから、シートの長さはTest1と同じく弁体直径の3倍の150mmとした。

シートの材料については、Test4はポリエステル生地で作られたベルト材料であり、厚さ1mm程度、長さ300mm程度として折り返して弁体に取り付けた。また、Test5は天然ゴムシートであり、厚さ2mm程度である。Test6は帆布生地（帆布規格11号）であり、厚さは0.4mm程度であった。Test6については、Test4およびTest5とほぼ同じ厚みにするために幅100mm、長さ300mmとして四つ折りにし、弁体に取り付けた。

シートの弁体への取り付け方に関しては、取り付け後の形状がFig. 3に示したファイバーのTest弁とほぼ同じになるように、Fig. 3の右上に示す多孔板のファイバーを通すための穴を直径6mm程度の穴に拡大し、シートの一部を穴に通し、弁体と多孔板をネジ止めして挟む形式で取り付けられている。

5.2 シート付き弁体のキャビテーション抑制の効果

前章の4.2節での議論をふまえ、各供試弁について、同じ損失係数のもとでの実験の結果から、キャビテーション抑制の効果を比較する。

Fig. 9において、Normalは弁開度 $\theta = 45^\circ$ 、Test4は弁開度 $\theta = 50^\circ$ 、Test5は弁開度 $\theta = 48^\circ$ 、

Test6は弁開度 $\theta = 48^\circ$ の場合に4つの供試弁の損失係数は $\zeta = 16$ 程度でほぼ一致する。Fig.10の騒音測定結果において、騒音が増加し始める $\sigma = 50$ ではキャビテーションが連続的に発生する騒音が聴取できる状態であり、Normal弁の騒音とTest4の騒音の差は2 dB程度と小さいが、 $\sigma = 30$ の状態では10dB程度の抑制効果が見られた。

Fig.11において、Normalは弁開度 $\theta = 40^\circ$ 、とTest4は弁開度 $\theta = 46^\circ$ 、Test5は弁開度 $\theta = 46^\circ$ 、Test6は弁開度 $\theta = 45^\circ$ の場合に4つの供試弁の損失係数 $\zeta = 20$ 程度でほぼ一致する。Fig.12の騒音測定結果において、 $\sigma = 60$ ではNormal弁の騒音とTest4の騒音の差は3 dB程度だが、 $\sigma = 40$ では6 dB程度の差となった。

Fig.13において、Normalは弁開度 $\theta = 35^\circ$ 、とTest4は弁開度 $\theta = 40^\circ$ 、Test5は弁開度 $\theta = 43^\circ$ 、Test6は弁開度 $\theta = 40^\circ$ の場合に損失係数 $\zeta = 39$ 程度でほぼ一致する。Fig.14の騒音測定結果において、 $\sigma = 85$ 付近はキャビテーション騒音が始まる初生状態であり、この状態からNormal弁の騒音とTest4の騒音に差が生じ始め、 $\sigma = 60$ では5 dB程度の差となった。

以上から各弁開度において、Test4の騒音低減の効果が大きいことがわかる。また、Fig.10、Fig.12、Fig.14から、最大音圧も約5～7 dB低減できることがわかる。したがって、本実験ではポリエステルシートが最もキャビテーション騒音の抑制に効果があることがわかった。

Test4～Test6の各供試弁のシート材料の柔軟性に関する実験として、シートの一端を固定し、反対側の端を鉛直方向から約 80° 程度の角度まで持ち上げ、その状態から振り子のように振動させたとき、元の状態に近い角度まで戻ってくる状態をビデオカメラで撮影し、角度の変化を記録したものをFig.15に表す。空気中でシート材料を振動させた実験であり、角度の読み取りについても、振れが比較的安定して読み取れる振れ角度の範囲の画像について読みとったものであるため、データに多少の任意性はまぬがれないが、最も減衰の早いのは天然ゴムシートであり、ポリエステルシート、帆布シートの二つは減衰の様子に大きな差はなく柔軟であっ

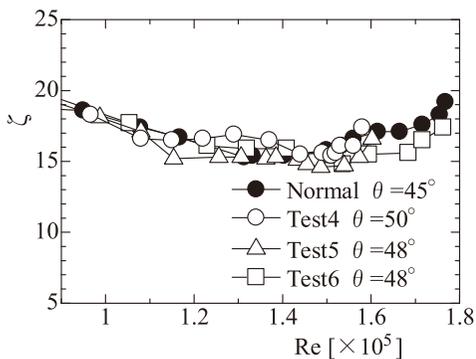


Fig. 9 Pressure loss characteristics of test valves with sheets

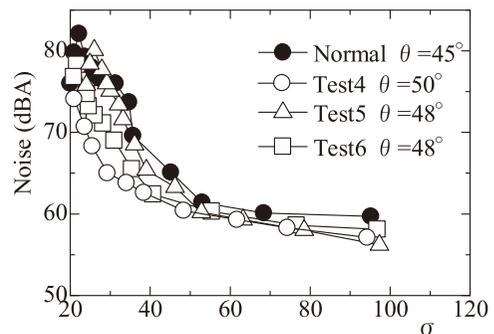


Fig. 10 Noise characteristics of test valves with sheets

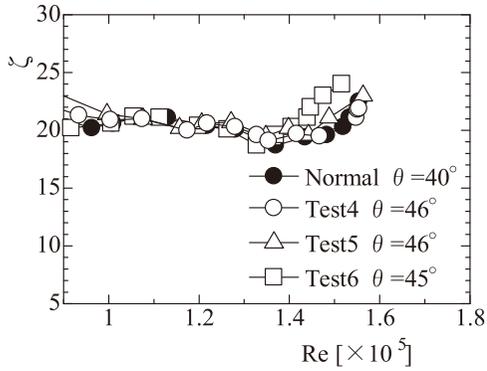


Fig. 11 Pressure loss characteristics of test valves with sheets

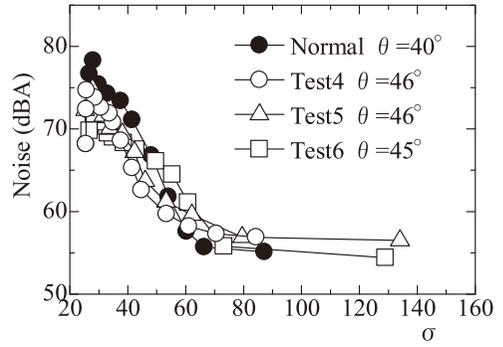


Fig. 12 Noise characteristics of test valves with sheets

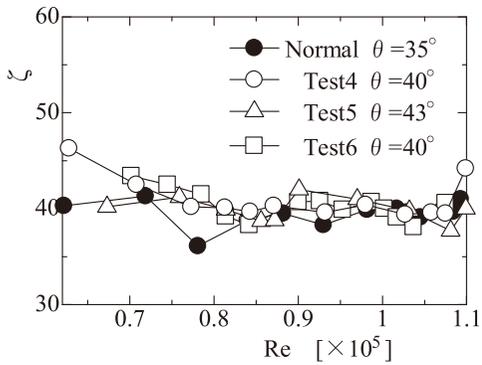


Fig. 13 Pressure loss characteristics of test valves with sheets

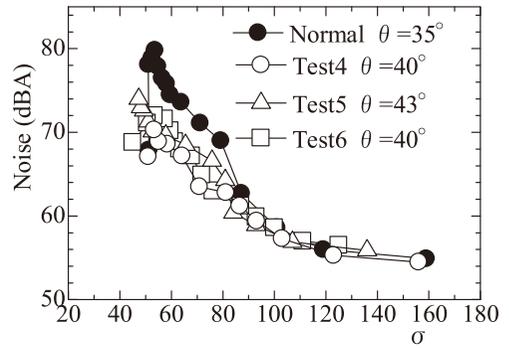


Fig. 14 Noise characteristics of test valves with sheets

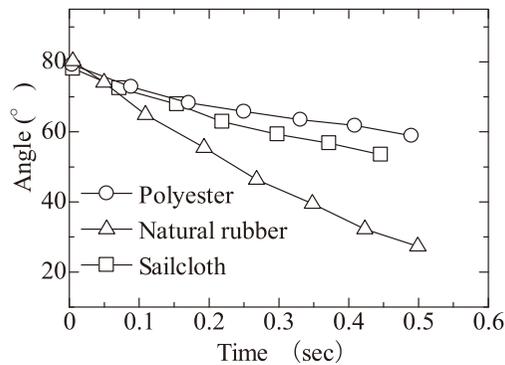


Fig. 15 Experiment on Flexibility of each sheet

た。キャビテーションの騒音低減の様子はポリエステルが最も大きく、適切な柔軟性を有すると考えられる。

6 結言

本研究ではバタフライ弁のキャビテーション抑制を柔軟なシートを弁体背面に取り付ける方法を試みた。キャビテーションの激しさは騒音の大きさから測定したが、その結果、最も柔軟であったポリエステルシートの騒音抑制の効果が最も大きかった。

シートを取り付けていない通常の弁であるNormalにおいて、キャビテーションが最も激しく起こるとされる中間弁開度の約 $\theta = 45^\circ \sim 35^\circ$ の範囲では、各弁開度でポリエステルシートを取り付けたTest4の弁体では、騒音は約5 dB~10dB低減し、シートによる抑制効果が確認できた。

流れの乱れは本実験から弁体の直径の3倍程度下流側でも続いており、Test4は供試弁の中で長さが弁体直径の3倍でもっとも長いものであったため、騒音抑制効果が大きかったと推測されるが、今後は適切な長さについての検討が必要である。また、本実験ではポリエステルシートが最も柔軟な材料であったが、どの程度の柔軟性が必要なのかについても今後詳細な検討が必要である。

参考文献

- 1) 小川和彦, 久田幸一: バタフライ弁のキャビテーション現象の抑制 (管径拡大による抑制), 日本機械学会論文集B編, 73, 726 (2007), 561-566.
- 2) 小川和彦: フィンによるバタフライ弁のキャビテーション騒音の抑制 (弁軸に対して直角方向に設置したフィンの効果), 設計工学, 44, 9 (2009), 496-504.
- 3) Skousen, P.L.: Valve Handbook, McGraw-Hill (1998), 511-526.
- 4) Rahmeyer, W.J., Miller, H.L. and Sherikar, S.V.: Cavitation Testing Results for a Tortuous Path Control Valve, Cavitation and Multiphase Flow, ASME, FED-Vol.210 (1995), 63-67.
- 5) Baumann, H.D.: Control Valve Primer, Instrument Society of America (1991), 100-107.
- 6) 樋口英司, 宮川榮一, 西川哲朗: CAEによる低キャビテーションバルブの開発研究, バルブ技報, Vol.7, No.1 (1994), 67-97.
- 7) 谷清人, 伊藤幸雄, 大場利三郎, 岩崎正博, 平田泰茂: 低壊食性バタフライ弁に関する研究 (壊食性渦キャビテーションの抑制), 日本機械学会論文集B編, 58, 553 (1992), 2645-2650.
- 8) 谷清人, 岩崎正博, 伊藤幸雄, 大場利三郎, 平田泰茂: トンネル形凸部を持つ低壊食性バタフライ弁の締切側における壊食抑制の効果, 日本機械学会論文集B編, 59, 559 (1993), 702-706.
- 9) 千野一広, 小川和彦, 掛川光彦, 井上栄一, 深尾典久: キャビテーション抑制と流量制御性を両立したバタフライ弁の開発, 日本水道協会, 令和2年度全国会議 (水道研究発表会) 講演集 (2020), 358-359.
- 10) 馮旭, 小川和彦: 柔軟なひれによるバタフライ弁キャビテーションの抑制, 日本機械学会関西支部講演会講演論文集, 2014-89 (2014), 9-26.