

T 字形エルボによるキャビテーション壊食対策に関する研究

苗木伸也* , 柴田高宏** , 林公祐*** , 鈴木隆起**** , 赤対秀明*****

Study on countermeasure against cavitation erosion using T-shape elbow

Shinya NAEKI* , Takahiro SHIBATA** , Kosuke HAYASHI*** , Takayuki SUZUKI**** , Hideaki SYAKUTUI*****

ABSTRACT

Recently, it is actively using the water in fluid device because of considering the environment problems and device safety. However, the cavitation often occurs and it can cause the pipe erosion. Up to now, we reported that the development of pipe erosion could be reduced by using T-shape elbow. In this study, we investigate the most useful shape of T-shape elbow by experiments and numerical simulations. In the experiments, the cavitating flow is observed by using a high-speed video camera. As a result, it was found that the diameter of the pipe is 19 mm, length of trap section is 30 mm and outlet direction is upward for the most useful shape of T-shape elbow in this experimental condition, and the effect of countermeasure against cavitation erosion is enabled by measuring the staying time of the circulation flow which have formed in a trap section.

Keywords: cavitation, erosion, circulating flow, Tee

1. 緒論

従来、流体機器の作動流体は水に比べて腐食しにくい利点から、油が用いられてきた。しかし、油を使用する場合、引火の恐れがあり、また油の廃棄に関して環境汚染につながるといった問題点が生じる。そこで、流体機器の作動流体に水を用いることが検討され、いくつかの事例が提案されている^{(1), (2)}。しかし、油を使用した場合における諸問題は解決できるものの、水の飽和蒸気圧が油よりも高いため^{(3), (4)}、局所的な圧力の低下によりキャビテーションが発生しやすくなる。キャビティは崩壊時に高温・高圧を伴うため管壁の壊食の原因となる⁽⁵⁾。

本一連の研究では、Fig.1 に示す管内エルボ部におけるキャビテーションによる壊食を対象としてその対策が検討されてきた。本研究の発端は、ある企業の装置において、キャビテーション壊食によりエルボ部に穴が開いたときに、交換用のエルボがなく、応急処置的に T 字管の 1ヶ所に栓をしたもの（以後、T 字形エルボと呼ぶことにする）を代用したところ、その後、穴が開かなかつたという事実にある。

これを受けて、本研究室ではその流れ状況を模擬するために、透明アクリル樹脂製の T 字形エルボを製作し、その流れの解明を行ってきた^{(1), (6)}。しかし、未だに実験室レベルでは T 字形エルボがキャビテーション壊食に有効であるという事実を確認していなかった。

この事実を確認するために、実機による試験を行う場合、金属では壊食までの時間がかかりすぎる。そこで、本研究では、比較的材質の弱いもので、通常のエルボと T 字形エルボを製作し、比較的短い時間で、両者の耐壊食性を確認することにした。これが本研究の目的の 1 つである。

以前に、透明アクリル樹脂で製作した T 字形エルボを用いた実験より、Fig. 2 に示すように T 字部の栓をした箇所（以下、トラップ部と呼び、その長さを Fig. 2 に示すようにトラップ部長さ L とする）に循環流が生じることが確認されている⁽¹⁾。また、この循環流によりキャビティを含む流れがトラップされ、キャビティは壁面に到達するまでに大幅に減速することも確認されている⁽⁶⁾。これが、壊食が低減される理由の一つとして考えられている。しかしながら、この循環流は、継続的に形成されるのではなく、上流の流れの影響を受け、断続的に形成される⁽⁷⁾。

* 専攻科 機械システム工学専攻

** 機械工学科

*** 神戸大学 工学部

**** 機械工学科 助教

***** 機械工学科 教授

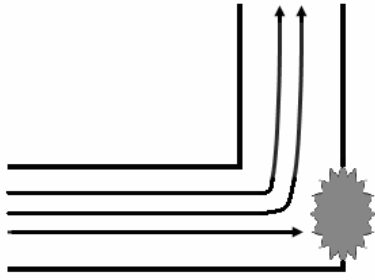


Fig. 1 Erosion at an elbow

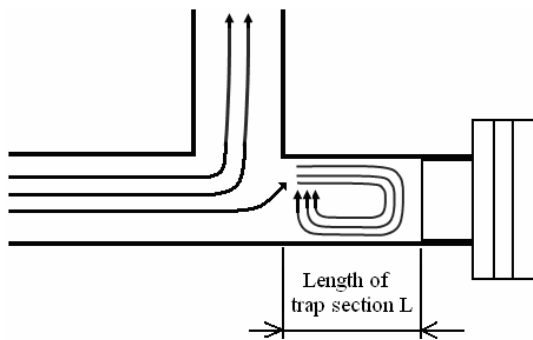


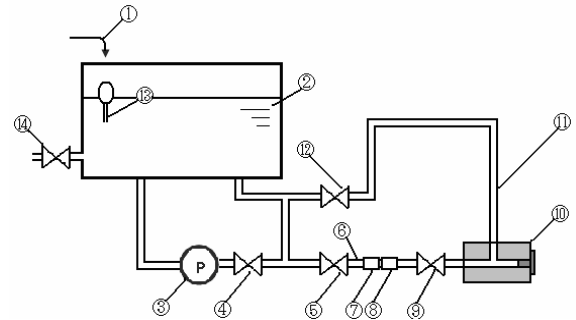
Fig. 2 T-shape elbow

断続的に形成される循環流による壊食低減を効果的に得るためには、循環流が形成・維持される時間が重要となる。循環流の形成に影響を与える因子として次に示すものが考えられる。まず、形状におけるパラメータとして、トラップ部長さ、管径、T字形エルボを設置する方向、T字形エルボの角部にアールをつけた場合、続いて流体工学におけるパラメータとして、流速、粘度、密度である。

これらの因子の中で本研究では、トラップ部長さおよびT字形エルボを設置する方向について実験を行い、循環流の形成・維持にどのように影響を及ぼすかを調べる。なお、残りの因子についても、今後調べていく必要がある。

2. 耐壊食性の確認実験

2.1 実験装置および実験方法 本研究で用いた実験装置の概略図を Fig. 3 に示す。実験装置は主に、水槽、高圧ポンプ、1次側配管、流量制御弁、試験部、および2次側配管からなる。水槽内の水は高圧ポンプ(ロータリー式、流量 14.6 L/min, 3.7 kW)により強制流動させられ、流量制御弁を通過する際の圧力低下によりキャビテーションが発生する。その後、キャビティを含む流れは試験部を通り、2次側配管を経て水槽へと戻る。試験部には、金属よりかなり耐壊食性の弱いと考えられる塩化ビニルおよび軟質塩化ビニルを用いた。



① : Water supply : Tank : Pump : Relief valve
 ② : Primary valve : Primary pipe : Pressure gauge (primary)
 ③ : Flow meter : Flow control valve : Test section : Secondary pipe
 ④ : Secondary valve : Thermometer : Drain

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 実験結果

2.2.1 塩化ビニル製試験部を用いた確認試験

Fig. 4 に塩化ビニルで製作した試験部を示す。Fig. 4 (a) は通常のエルボ、Fig. 4 (b) はT字形エルボである。まず、Fig. 4 (a) で実験を行ったが、合計 60 時間経過しても壊食は生じなかった。また、内壁を観察したが、表面に壊食らしき傾向も確認できなかった。このことから、塩化ビニル製の試験部では短時間で結果を得ることは困難と判断した。なお、Fig. 4 (b) はさらに壊食が期待できないので実験は行わなかった。



(a) elbow (b) T-shape elbow

Fig. 4 Shape of test section (vinyl chloride)

2.2.2 軟質塩化ビニル製試験部を用いた確認試験

塩化ビニル製の試験部では、短時間で結果を得ることは困難であったため、ここではさらに弱い軟質塩化ビニル製耐圧ホースの試験部を用意して実験を行った。Fig. 5 に示すような1本のホースを曲げてL字に近い形状にして通常のエルボの試験部とした場合と、ホースを接合してT字形エルボの試験部とした場合について実験を行った。この実験では、通常のエルボの試験部では、10分弱で壊食が生じた。一方、T字形エルボの試験部では、4時間(240分)以上経過しても壊食が生じなかった(実験の都合上4時間で打切った)。



(a) elbow (b) T-shape elbow
Fig. 5 Shape of test section (polyvinyl chloride)

2.2.3 耐壊食性の確認実験のまとめ 以上のように、金属よりも壊食を起こしやすい材料を用いて、通常のエルボとT字形エルボの耐壊食性を調べたところ、軟質塩化ビニルを用いて製作した形状において、通常のエルボでは10分程度で穴が空くが、T字形エルボでは最低4時間は穴が空かないことを確認し、T字形エルボが耐壊食性に優れていることを実験室レベルで実証した。

3. トラップ部長さの影響

本章では、循環流に及ぼすトラップ部長さの影響について、まず実験的に検討を行い、その事象について数値計算を用いて解明を試みた。主となる流動系は第2章で説明したものと共通で用い、試験部のみを変更した。

3.1 実験装置および実験方法 流動状況の確認には高速度ビデオカメラ(PHOTRON製ASTCAM-NYEC, レンズCanon製V6×16_1.9MACRO, フレーム速度500 frames/s)を使用した。撮影では、直接光を当てると反射しハレーションを起こし撮影できないため、透過光を用いた⁽⁸⁾。実験では、どのT字形エルボが壊食低減を得るために最適であるかを調べるために、一定時間内で循環流の形成・維持されている総時間を調べ、これを全測定時間で除した値(循環流の存在時間割合: C_t と呼ぶ)を求める。全測定時間は5秒間とし、高速度ビデオカメラにより撮影した動画をスロー再生し、循環流が形成・維持している総時間を求めた。管径 $D = 19\text{ mm}$ の試験部を使用し、トラップ部長さの影響を調べた。トラップ部長さは Fig. 6 に示すように

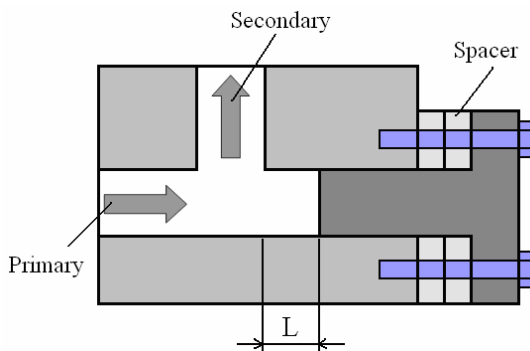


Fig. 6 Test section

スペーサーを用いて変更した。トラップ部長さは $L = 10.5, 12, 15, 22.5, 27, 28.5, 30, 32, 35, 50, 100\text{ mm}$ の11条件について測定した。また、実験条件は以下の通りである: レイノルズ数 19800, 平均液流速 0.94 m/s , 水温 23.1 , 一次側圧力 9.70 MPa .

3.2 実験結果 Fig. 8 に $L = 30\text{ mm}$ の流動状況の写真を示す。透過光のため黒く写っている所がキャビティである。写真ではわからないが、図の矢印のように循環流が生じた。

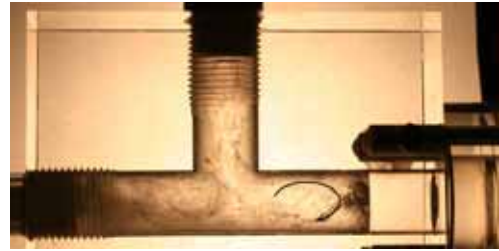


Fig. 8 Photo of flow in T-shape elbow ($L = 30\text{ mm}$, $D = 19\text{ mm}$)

Fig. 9 にトラップ部長さ L と循環流の存在時間割合 C_t の関係を示す。 $L = 10.5\text{ mm}$ (内径とトラップ部長さの比: $L/D = 0.55$) では、循環流は形成されておらず、 $L = 12\text{ mm}$ では循環流の形成が確認できた。このことから、循環流は $L \geq 10.5\text{ mm}$ で形成されると考えられる。また、 $10.5 < L < 30\text{ mm}$ ($0.55 < L/D < 1.58$) では、 L が増加するに伴って C_t も増加しているが $L = 30\text{ mm}$ の場合を最大値として、それ以上の L では L の増加に伴い C_t は減少した。

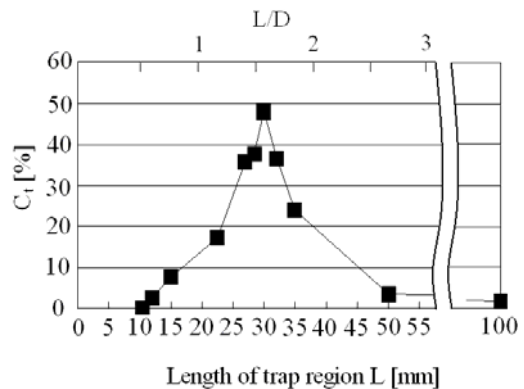


Fig. 9 Circulation rate ($D = 19\text{ mm}$)

3.3 数値計算と考察 このトラップ部長さによる循環流の形成されやすさの違いを理解するために、数値解析ソフトウェア PHOENICS (Release 3.6)を用いて⁽⁷⁾、T字形エルボ付近の流速および流線を調べた。ただし、実験で観察されたキャビティが非常に小さいことから、気相が液相流れに与える影響は小さいと考え、水単相の時間平均流を計算した。計算を行ったトラップ部長

さは $L = 15, 22.5, 30, 35$ mm であり, 各 L について流動状況を比較した。

数値計算結果により得た T 字形エルボにおける流線を Fig. 10 に示す。この流線を確認すると, どの L においても, T 字形エルボにおける流れは上流から下流へ直接流れる流れと上流からトラップ部へ流れる流れが存在していることが確認できた。この中で上流からトラップ部へ流れる流れについて L ごとに比較するために, 上流から下流へ直接流れる流れの内, 最もトラップ部に近い流線を太く表示してある。この太くした流線を比較すると, L が増加するにつれて, 流線の曲がり具合が緩やかになっている。トラップ部へ流れ込む流れは太くした流線に沿って流れるため, 曲がり方が急である L が小さな場合ではトラップ部への流入位置が低くなる。逆に L が増加するにつれて流入位置は上側推移し, その結果循環流を大きく駆動させることとなる。このことが循環流の形成・維持を促進したと考えられる。しかしながら, $L = 30, 35$ mm の流線には大きな違いが見られなかった。このことから $L = 30, 35$ mm では循環流の形成されやすさは変わらないと考えられる。ところが, トラップ部長さが大きくなるにつれて循環流の局所的な流速は低下する。その結果, 上流からの流れの影響を受けやすくなるため循環流の維持が困難になったと考えられる。

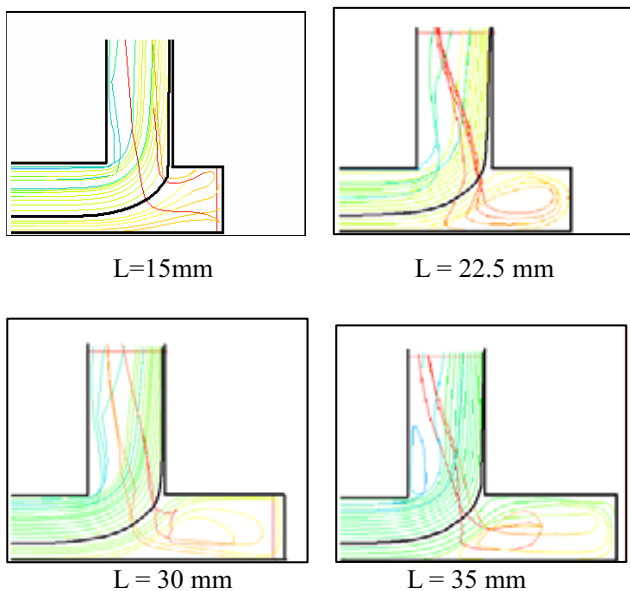


Fig. 10 Streamline in T-shape elbow (different trap length)

以上の説明をよりわかりやすくするために, Fig. 11 に $L = 15, 22.5, 30, 35$ mm について, トラップ部への流入位置における水平方向の速度分布を示す。なお, 流速は円管中心を通る鉛直線上の値を用いており, トラップ部流入方向を正, 流出方向が負である。

この結果について, まず $L = 15$ mm と 22.5 mm のトラップ部へ流入および流出する流れについて, その流速分布を比較すると, 流入, 流出の双方とも, 流れの中心位置は $L = 22.5$ mm の方がトラップ部入口の中心部分から遠い位置にあると言える。この計算結果における流速は同一面積を持つ, 各メッシュ当りの流速であるから, 流速分布は流量の分布形状に等しいといえる。トラップ部入口について, その中心から遠い距離に多くの流量が流入・流出することは中心回りのモーメントが大きくなり, 循環流の形成・維持を促進すると考えられる。この L の増加とともに循環流が形成されやすくなる傾向は $L < 30$ mm までは顕著に表れている。しかし, $L = 30, 35$ mm を比較すると, その分布形状は酷似している箇所が多々あり, $L < 30$ mm までと同様に L の増加により循環流が形成されやすくなるとは言えない。

これらのことが Fig. 9 に示す結果が得られた要因と考えられる。

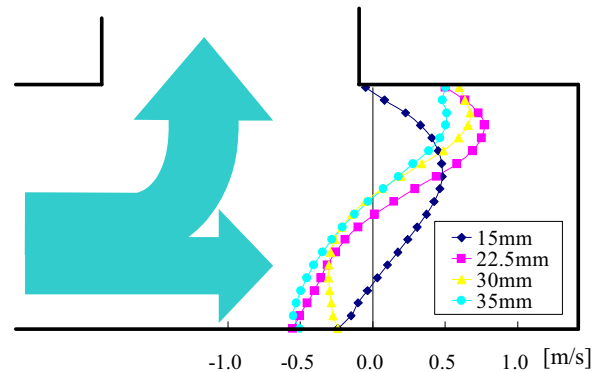


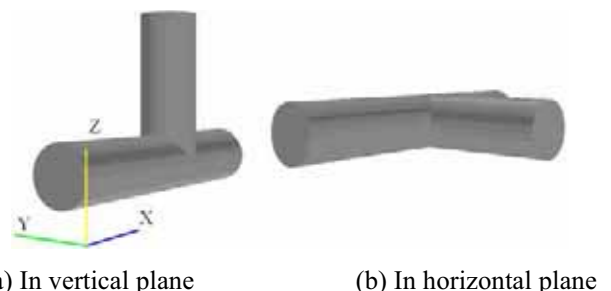
Fig. 11 Velocity at inlet of T-shape elbow

4. 方向の影響

4.1 実験装置および実験方法 T 字形エルボについて, 流入方向によって様々な設置方向が考えられる。Fig. 12 (a)に示すように垂直面内に設置する場合, Fig. 13 における 8 種類の形状が考えられる。

一方で, Fig. 12 (b)の水平面内に設置する場合は Fig. 13 A, B に示す 2 種類が考えられ, 水平面内においては A, B に示す各 4 つの形状は視点を変えただけで同じ流動である。

本節ではこのような方向の違いが循環流にどのように影響を及ぼすかを調べる。



(a) In vertical plane (b) In horizontal plane

Fig. 12 Direction of test section

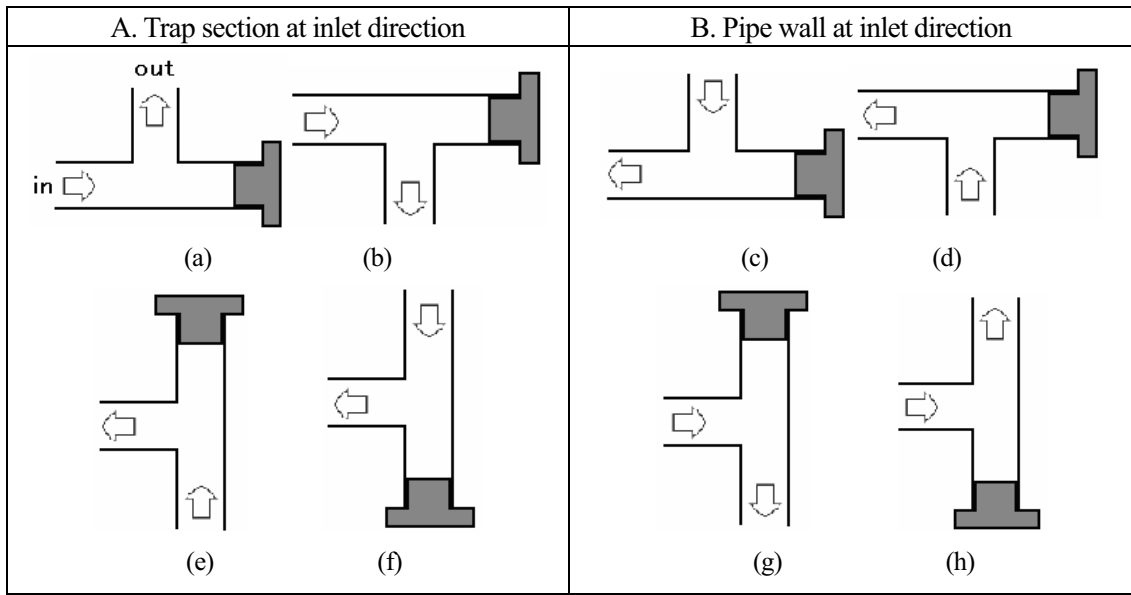


Fig.13 Kinds of direction of T-shape elbow

まず、第3章で示した形状は Fig. 12 (a)の形状である。これと比較するために Fig. 12 (b)および水平面内における形状を用いて実験を行いその影響を検討する。なお、Fig. 12 (a)の形状を流出方向上向き、Fig. 12(b)の形状を流出方向下向きと表記する。

3.1 節と同様の装置を用い、循環流の存在時間割合 C_t を測定し、T 字形エルボの方向の変化にともなう循環流の形成時間の变化を調べる。トラップ部長さは各向きについて $L = 30 \text{ mm}$ について計測し、実験結果をそれぞれの形状で比較した。

4.2 実験結果 流出方向が下向きの場合の流動状況 ($D = 19 \text{ mm}$, $L = 30 \text{ mm}$) を撮影した画像を Fig. 14 に示す。流出方向が上向きの場合とは異なり、逆周りの循環流が形成されることを確認した。しかし、T 字形エルボに対しては、相対的に同じ回転方向である。水平面内についても相対的に同じ回転方向の流れが確認された。



Fig. 14 Picture of flow in a T-shape elbow (downward)

実験結果を Table 1 に示す。流出方向が下向きの場合および水平面内に T 字形エルボを設置した場合における C_t の値が、流出方向が上向きの場合における C_t の値よりも低い。

Table 1 Result of experiment (difference of direction)

Direction		C_t [%]
In vertical plane	Upward	47.9
	Downward	6.3
In horizontal plane		2.6

4.3 数値計算と考察 Fig. 15 に流出方向の違いによる影響を見るために、 $L = 30 \text{ mm}$ における T 字形エルボ内の流線を示す。水平面内の流線については二次元的に表示するために上向きと同一方向に表示してある。

まず Fig. 15 に示すとおり、T 字形エルボ内の流れはトラップ部へ流れ込むものと、トラップ部を通らず直接下流へと流れる主流が存在している。これらを区別するために第3章と同様に主流の内、最もトラップ部に近い流線を太く表示してある。まず、上向きと下向きを比較すると、下向きの場合ではトラップ部へ流れ込む流れの領域は少なく、主流として直接下流へ流れる流れが多く見える。このことから上向きの場合と比べてトラップ部へ流入する流れの流量が低下し、流出方向が上向きの方が循環流の形成・維持に必要な流量を得やすかったのではないかと考えられる。

しかしながら、流量は流速によっても影響するため、流線を見るだけでは明確には示せない。このことを明確にするために、トラップ部入口における流速分布を示す。第3章と同様にトラップ部へ流入する流れを正とした。ただし、下向きおよび水平面内における速度分布は方向による比較をするためにすべて上向きに変えて表示してある。また、流出方向が上向きの場合と水平面内に設置した場合についてもここで考察を行う。

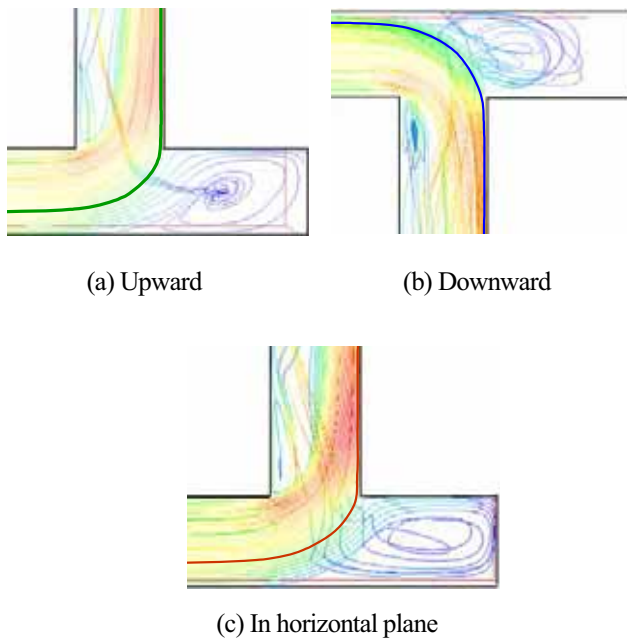


Fig. 15 Streamline in T-shape elbow (different direction)

Fig. 16 に示すように流出方向上向きと下向きでは速度分布の形状は似ているものの、流入する際の速度分布について、下向きの方が小さな流速である。3.3 と同様に、各メッシュ 1 つ当たりの流速であるから、流速の差は流量の差であるといえる。このことから、上述の考察における流量の違いを示せたことになる。

また、流出方向が上向きの場合と水平面に設置した場合を比較すると、上向きの方が流入・流出双方について速度分布の中心位置はトラップ部入口の中心位置から遠い位置にあるといえる。よって中心回りのモーメントが大きくなり循環流の形成・維持が容易であると考えられる。

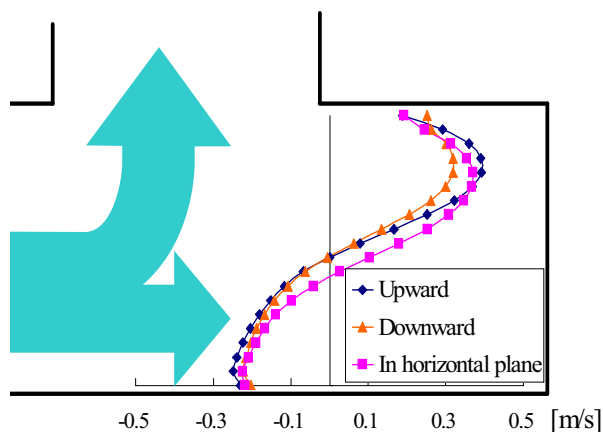


Fig. 16 Velocity at inlet of T-shape elbow

以上のことから、循環流によりキャビティをトラップする効果において流出方向が下向きおよび水平面に設置した場合は、流出方向が上向きの形状より劣ると考えられる。よって、T 字形エルボを効果的に使用するには

流出方向が下向きの形状より流出方向が上向きの方が良いといえる。

5. 結論

本研究では、T 字形エルボの壊食低減効果を実験室レベルで確認し、トラップ部長さ L 、T 字形エルボの向きがトラップ部内の循環流形成に与える影響を調べた。その結果、以下の結論を得た。

- (1) T 字形エルボの壊食低減効果を実験室レベルで確認できた。
- (2) 循環流の形成されやすさは L に強く依存し、 $L \leq 30$ mm まで、流入位置の上昇による流量増加によりその形成は容易になる。一方、 $L > 30$ mm では、トラップ部における循環流の局所的な流速の低下により循環流の形成・維持は困難になる。
- (3) 循環流の存在時間割合 C_t は T 字形エルボの向きにより大きく変化し、流出方向が下向きの場合より流出方向が上向きの場合の方が壊食低減効果を効率的に得られる。
- (4) 以上の結果より、本研究で行った循環流に影響を及ぼす因子について管径 $D = 19$ mm の場合、トラップ部長さ $L = 30$ mm で流出方向を上向きに設置した場合、最も壊食低減を効果的に得られる。

謝辞

本研究は油空圧機器技術振興財団の助成（平成 21 年度）を受けて実施したものである。ここに謝意を表す。

参考文献

- (1) 松本, 宮澤, 赤対, 土居, 菊谷, 日詰, 管内湾曲部におけるキャビテーションの影響, 日本混相流学会年会講演論文集, pp. 198-199, 2006.
- (2) 社団法人日本フルードパワー工業会, フルードパワーの世界, 2009.
- (3) 馬場, 吉田, 機械工学必携 8 版, 三省堂, pp.817-818, 2002.
- (4) 高島, 潤滑油の基本物性(潤滑油の蒸気圧), 日石レビュー Vol.40, No.1, pp.30-36, 1998.
- (5) Jean-Pierre, Michel, Fundamentals of Cavitation, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- (6) 松岡, 宇崎, 林, 赤対, 掛札, 日詰, 菊谷, T 字形エルボにおけるキャビテーションの流動, 日本機械学会第 85 期流体工学部門講演会 CD-ROM 版講演論文集, G105, pp. 1-4, 2007.
- (7) 苗木, 松岡, 林, 赤対, 菊谷, T 字形のエルボ内を流動するキャビテーションに関する研究, 日本混相流学会年会講演論文集, pp. 244-245, 2008.
- (8) 日本原子力学会編, 混相流測定法, 森北出版, pp. 279-281, 2003.