

報告日 2011年(平成23年) 2月25日

報告者 神戸大学大学院 工学研究科 助教  
林 公祐

## 1. 研究概要

(和文)

### (1) 課題名 (日本語)

配管内キャビテーション損傷対策のための高安全特殊エルボの開発

### (2) 研究者氏名

林 公祐 神戸大学大学院 工学研究科 助教

### (3) 研究概要 (日本語)

本一連の研究では、T字形のエルボを用いた壊食対策を提案している。本研究では、種々のエルボ形状に対応できる工夫を施したアクリル樹脂製試験部を製作し、様々な条件において流動を観察するとともに、エルボ壁面上の圧力変動を測定した。また、内部流動を詳細に調べるために、ラージエディーションシミュレーションを用いてエルボ内流れを数値予測した。その結果、エルボ T 字部内循環流の維持が壊食低減の要となること、管直径に対して T 字部長さを 1.5 倍程度にすると最も循環流が維持できることなどを明らかにした。

### (4) キーワード

キャビテーション, 壊食, 数値シミュレーション, LES

(英文)

### (1) Research title

Development of an elbow for preventing erosion in pipelines

### (2) Name of researcher with title of position

Kosuke Hayashi, Graduate School of Engineering, Kobe University  
Assistant Professor

### (3) Summary

In our previous studies on cavitating flows in pipelines, it has been proposed to use a T-shaped elbow to prevent erosion due to collision of cavitation bubbles. In this study, flows in T-shape elbows of different shapes are observed by using a high-speed video camera, and the pressure fluctuation at the elbow wall is

measured. The elbows are made of transparent acrylic resin for observation. Numerical simulations using LES (large eddy simulation) are also carried out to obtain detailed velocity field in T-shape elbows. These measurements and predictions confirm that the main cause of reduction of erosion is formation of circulating flows in the elbow, and good sustainability of the circulating flow is obtained when the ratio of the length of T-shaped part to the pipe diameter is about 1.5.

#### (4) Key Words

Cavitation, Erosion, Numerical Simulation, LES

## 2. 本研究の意義・特色

本研究グループは、これまでのキャビテーション対策研究において、配管エルボ部の形状を通常のL字形からT字形に変更することで、壊食を低減できることを実験によって確認した。エルボ形状をT字形に変更するだけで壊食を低減する対策法はこれまでに皆無である。本技術を実用化できれば、既存の配管系にも容易に導入でき、かつ機器の維持管理を大幅に低コスト化できるため、水圧装置の発展・普及に著しい貢献を期待できる。

## 3. 実施した研究の具体的内容、結果 (本文)

### 3. 1 エルボ内流動の観察

T字形エルボ内の流動を観察するため、透明アクリル樹脂でT字形エルボを製作した。図1に示すようにT字部の突き当たり部をトラップ部、その長さLをトラップ部長さとする。エルボ内流動の観察には高速度ビデオカメラ(PHOTRON製 ASTCAM-NYEC, Canon製 レンズ V6×16\_1.9MACRO, フレーム速度 500 fps)を使用した。照明は透過光とした。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。トラップ部長さはスペーサーを用いて変更した。  $10.5 \leq L \leq 100 \text{ mm}$  の 11 条件とした。レイノルズ数は 19800, 平均液流速は  $0.94 \text{ m/s}$ , 水温は  $23.1 \text{ }^\circ\text{C}$ , 一次側圧力は  $9.70 \text{ MPa}$  とした。

図2に  $L = 30 \text{ mm}$  における流動を例示する。黒く写っている部分がキャビテーション気泡である。動画から図の矢印のように循環流が生じていることを確認した。この循環流は上流の流れの影響を受けて形成・崩壊を繰り返した。この循環流により気泡を含む流れがトラップされ、気泡は壁面に到達するまでに大幅に減速することも観察により確認した。このことが壊食低減の主因と考えられる。

そこで、一定時間内に循環流が形成されている総時間を調べ、これを全測定時間で除した値  $C_t$  を求めた。全測定時間は 5 秒間とした。図3にLと  $C_t$  の関係を示す。  $L = 10.5 \text{ mm}$  ( $L/D = 0.55$ ) では循環流は形成されず、  $L \geq 12 \text{ mm}$  において循環流が形成された。また、  $10.5 < L < 30 \text{ mm}$  ( $0.55 < L/D < 1.58$ ) では、Lの増加に伴って  $C_t$  も増加しているが、  $L > 30 \text{ mm}$

ではLの増加に伴い $C_t$ は減少している。

本流動観察に加えて、トラップ部突き当り部壁面における圧力変動を圧力変換機(東京測器研究所, 超小型圧力計 PDB-PA, 許容圧力 200kPa)により測定し, 循環流形成の定量的評価を試みた。循環流が形成されている時間と, 形成されていない時間の圧力変動を FFT 処理して比較したが, キャビテーション気泡による変動が非常に大きく, 循環流に関する周波数成分のみを本システムで抽出することは困難であった。

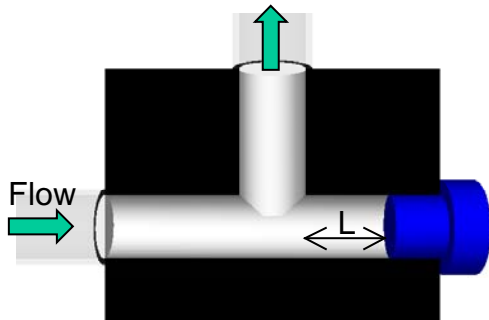


図1 T字形エルボ

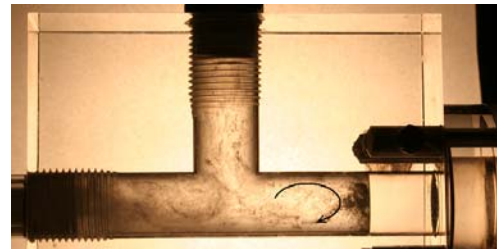


図2 エルボ内流動 (L= 30 mm, D = 19 mm)

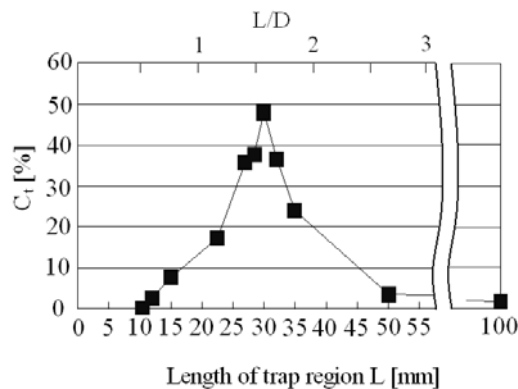


図3 Circulation rate,  $C_t$  (D = 19 mm)

### 3. 2 エルボ方向の影響

流れの方向やエルボ設置方向には図4のように種々考えられる。本節ではこのような方向の違いが循環流に及ぼす影響を調べる。前節のケースは(a)に相当する。本節ではさらに(c)のケース及び(c)の流動方向でかつ水平面内に設置した場合について検討する。L は 30 mm とした。

流出方向が下向きの場合の流動状況を図5に例示する。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た。ただしエルボに対しては相対的に同じ回転方向である。水平面内に設置した場合についても相対的に同じ回転方向の流れが確認された。 $C_t$  を表1に整理する。流出方向が下向きの場合および水平面内にエルボを設置した場合における  $C_t$  の値は流出方向が上向きの場合よりも低い。したがって, 本条件ではケース(a)が最も壊食低減効果に優れている。

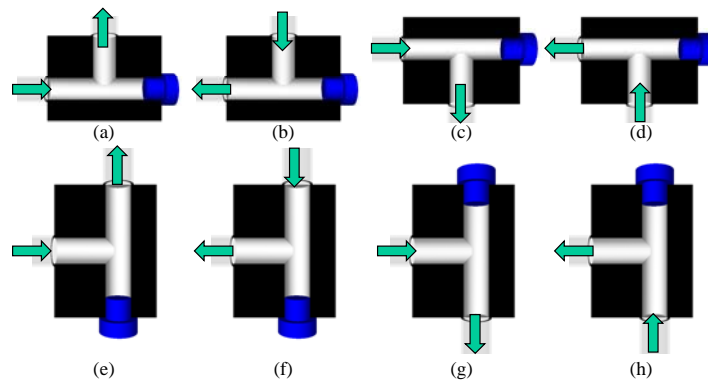


図4 エルボ設置方向と流動方向

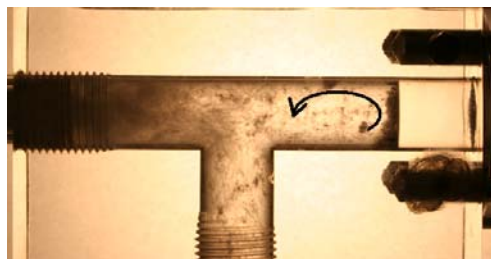


図5 エルボ内流動（下向き設置）

表1 Circulation rate,  $C_t$

Direction		$C_t$ [%]
Vertical plane	Upward	47.9
	Downward	6.3
Horizontal plane		2.6

### 3. 3 数値シミュレーションによる検討

Large Eddy Simulation (LES)による非定常計算を実施し、実験結果と比較・検討するとともに、循環流形成に関する評価および壊食低減メカニズムを検討した。本計算では、文科省世代IT基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」において、加藤らが開発した流体解析ソフトウェア Front Flow/Blue 6.1 (FFB)を使用した。FFBでは、時間・空間ともに2次精度を有する上流化有限要素法が採用されている。サブグリッドスケールの乱れに対するモデルにはスマゴリンスキーモデルを用いた。D=19 mm, L=10, 15, 30, 35, 50 mmの条件で計算した。計算格子は6面体立方体、格子点数は約100万点とした。なお、格子生成には汎用格子生成ソフトウェア Gridgen (VINAS社)を用いた。入口境界条件は一樣流速(0.94 m/s, Re=19800), 出口境界条件はトラクションフリー、壁面はすべりなし条件とした。なお、本計算ではキャビテーション気泡は考慮していない。

図6にL=30 mmにおける実験結果を参考のため例示する。図7にL=10, 30, 50 mm

における速度分布の計算結果を示す。T 字形エルボ内の流れにおいて、エルボに流入した液体は流出方向に急激に曲げられて流出するが、出口方向まで曲がりきれなかった流れはトラップ部上部壁面側からトラップ部へ流入しており、その後、トラップ部壁面に沿った流れが形成されることで、循環流が生じることが確認できる。この結果は実験結果と定性的に一致している。本計算条件では全てのトラップ部長さに対して循環流が形成された。

図 8 に流線を示す。トラップ部内の流れは非常に複雑な流れとなっているが、 $L = 30 \text{ mm}$  において循環流と見なし得る流れ模様が確認できる。この循環流構造は時間とともに様々な方向に変化した。トラップ部内の流速は奥に行くほど減少している。特に  $L = 50 \text{ mm}$  においては、トラップ部深部の流体はよどみ状態にあり、循環流は形成されにくいと考えられる。一方、トラップ部長さ  $L = 10 \text{ mm}$  の場合、トラップ部に流入した流れはトラップ部最深部に速い速度で衝突している。このため、トラップ部内流れは非常に乱れた状態になり、循環流は形成されにくい。 $C_t$  は  $10 < L < 30 \text{ mm}$  では  $L$  に対して単調増加し、 $L = 30 \text{ mm}$  付近で最大をとった後、 $L > 30 \text{ mm}$  では減少することを 3. 1 の実験で確認したが、上述の計算結果からこの  $C_t$  の特性を理解できる。

図 9 にトラップ部入口より  $1 \text{ mm}$  突き当たり側の位置における瞬時主流方向速度分布を示す。図中の赤い部分はトラップ部内へ流れが流入していることを示し、それ以外の色はトラップ部外へ流出していることを示している。 $L = 25 \text{ mm}$  において流入が占める面積が上部壁面側に集中しており、このため循環流が形成されやすいと考えられる。



図 6 エルボ内流動の可視化 ( $D = 19 \text{ mm}$ ,  $L = 30 \text{ mm}$ )

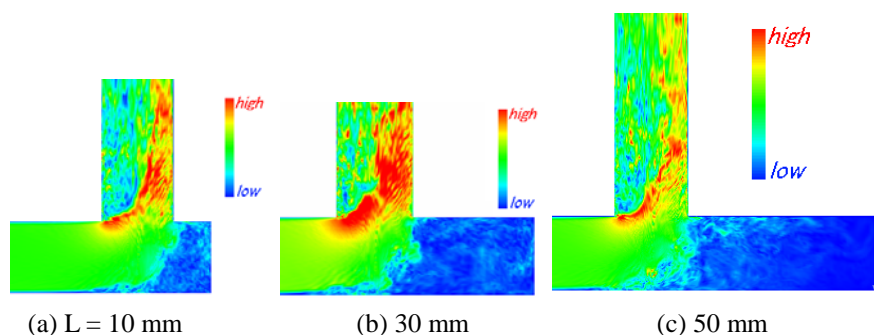


図 7 エルボ内速度分布 (速度ベクトルの大きさ)

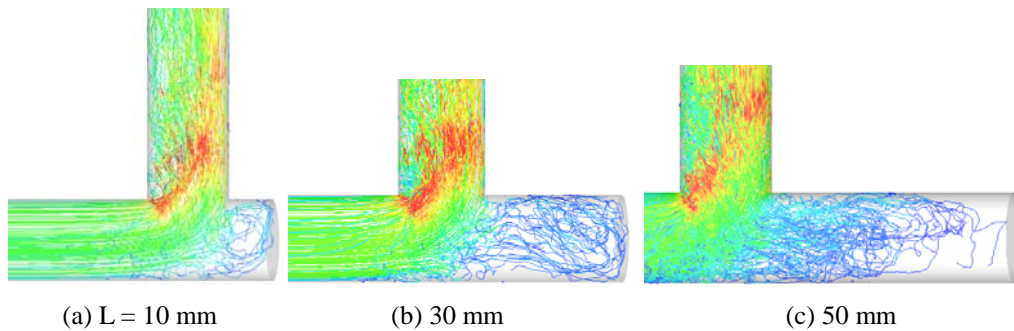


図8 エルボ内流線

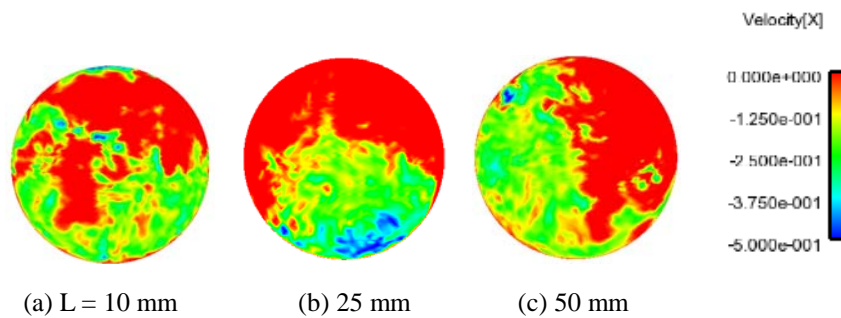


図9 トラップ部入口速度分布

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

林 公祐 神戸大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 助教  
 赤対秀明 神戸市立工業高等専門学校 機械工学科 教授  
 鈴木隆起 神戸市立工業高等専門学校 機械工学科 講師

5. 研究実施時期

2009年（平成21年） 4月 1日から2011年（平成23年） 1月31日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

- (1) 苗木伸也、柴田高宏、林公祐、鈴木隆起、赤対秀明「T字型エルボ内の循環流に及ぼす形状の影響」産学官技術フォーラム'09 講演論文集、p. 60, 2009
- (2) 苗木伸也、柴田高宏、林公祐、鈴木隆起、赤対秀明「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」神戸高専研究紀要、第48号、pp. 39-44, 2010
- (3) 苗木伸也、柴田高宏、林公祐、鈴木隆起、赤対秀明「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」日本機械学会関西支部第85期定時総会講演会、p. 10-1, 2010
- (4) 柴田高宏、苗木伸也、林公祐、鈴木隆起、赤対秀明「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」日本機械学会関西支部学生卒業研究発表講演会、p. 11-9, 2010

- (5) 山中淑雄、鳴瀬隆志、柴田高宏、苗木伸也、林公祐、鈴木隆起、赤対秀明「T字形エルボ内の循環流におよぼす設置方向の影響」産学官技術フォーラム'10 講演論文集、p. 134, 2010
- (6) 高嶋万将、村上遼平、鈴木隆起、赤対秀明「数値流体解析による各種諸問題の解決」産学官技術フォーラム'10 講演論文集、p. 143, 2010

#### 7. 内外における関連研究の状況

小川と久田は、バタフライ弁通過後に管直径拡大部を設けて圧力回復させることで、キャビテーションによる騒音低減を試みた[1]。本対策によれば、過酷なキャビテーション発生時でも音圧を低減できる。申請者は以前に、壊食対策を目的として、同様に管直径拡大部を設ける試みを独立に実施したが、良好な壊食低減効果は得られなかった。また、池田らは、超音波でキャビテーション気泡の形成・崩壊を制御する結石破碎技術を検討している[2]。しかし、超音波による気泡制御法を水圧装置内のキャビテーション制御に用いると、装置が複雑になり、また気泡発生状況に応じて設計を検討する必要があるためコストがかかる。以上は本研究課題申請時にも述べたことであるが、その後も現在に至るまでエルボ形状を変更することによる壊食対策に関する研究は見受けられない。

[1] 小川・久田，日本機械学会論文集 B 編，73-726, pp. 561-566, 2007

[2] 池田ら，日本機械学会論文集 B 編，70-692, pp. 904-911, 2004

#### 8. 今後の発展に対する希望

本研究課題では、T 字形エルボ内流れを実験的、数値的に調べることにより、壊食低減における循環流の役割を詳細に検討した。壊食低減効果そのものの定量的評価とモデリングが今後の課題となっている。本エルボによる壊食低減技術実用化に向けて、これら定量化及びモデル化の実現を目指している。