

調節弁のキャビテーション抑制技術開発

Development of Cavitation Suppression Technology for Control Valves

黒澤 祐貴
Yuki Kurosawa

新谷 知紀
Tomonori Shintani

尹 鍾皓
Chongho Youn

キーワード

調節弁, キャビテーション, Computational Fluid Dynamics (CFD, 数値流体力学), 液体圧力回復係数 (F_L 値)

高差圧条件下で使用される調節弁では、キャビテーションによって壊食（エロージョン）が発生する可能性がある。そのため、キャビテーションの抑制技術の開発は調節弁の信頼性向上において重要な課題となっている。今回、グローブ形調節弁の一形態であるケージ形調節弁における多孔ケージと、調節弁本体下流側に設置するディフューザの開発及び試作を行い、CFD解析と実験を実施した。その結果、キャビテーション抑制効果が確認され、全ての開度領域で F_L 値の向上を達成したため、ここに報告する。

There is a risk of erosion in control valves used under high differential pressure conditions due to cavitation. Therefore, the development of cavitation suppression technology is an important issue in improving control valve reliability. CFD analysis and experiments were conducted in which globe control valves were developed using a perforated cage in a cage-type control valve and a diffuser was placed downstream of the control valve body. The results confirm that it is possible to suppress cavitation and improve the F_L value over the entire valve opening range.

1. はじめに

アズビルでは、高差圧条件下で使用される調節弁の信頼性向上のため、キャビテーションを抑制する内弁構造の技術開発を進めている。

キャビテーションとは、液体の圧力が飽和蒸気圧以下に下がることで生成された気泡が、流体の流れに沿って飽和蒸気圧以上の地点に到達した際に崩壊するまでの過程のことをいう。気泡の崩壊の際には衝撃波が発生し、振動や騒音の原因となるだけでなく、構造物の近傍で起こると微細ながらも構造物を削っていく、壊食（エロージョン）という現象を引き起こす。壊食は時間と共に進展し、最終的に弁や配管の故障に繋がる。

調節弁の固有特性として、容量係数 (C_V 値) 及び液体圧力回復係数 (F_L 値) がある。 C_V 値は流体の流れやすさを示す値であり、流路構造のほかに、調節弁の開度とも密接に関係している。調節弁が高開度になると C_V 値は増加し、低開度になると C_V 値は減少する。 F_L 値は閉塞流れ（キャビテーションが発生していることによって、差圧を増加させても流量が増加しなくなる流れの状態）を定義する値である。 F_L 値の範囲は0から1であり、値が1に近づくほど差圧を増加させても閉塞流れが発生しにくく、キャビテーション抑制効果が高いことを示す。

キャビテーションの抑制技術として、複数の抵抗要素で減

圧する多段減圧がある。多段減圧によって急激な減圧を避けることができ、キャビテーションの抑制につながる。過去に3段絞り構造をもつケージを用いた調節弁の研究を行った際には、 F_L 値は1に近い値となりキャビテーション抑制効果が非常に高いことを確認した⁽¹⁾。しかしながら、3段絞り構造のような多段絞り構造は高い F_L 値を得ることができるが、 C_V 値が小さくなる。一方、抵抗要素が少ない1段絞り構造は3段絞り構造と比較すると F_L 値は劣るが、 C_V 値を大きくすることが可能となる。そのため、求められる C_V 値や F_L 値に応じて調節弁のキャビテーション抑制方法を選択する必要がある。

本技術開発の目的は調節弁の F_L 値向上である。また、本技術開発は、製品仕様として要求される C_V 値と F_L 値のバランスを考慮し、1段絞り構造のケージ形調節弁を開発対象とした。キャビテーションを抑制するための新たな内弁構造として、テーパ形状を持つ多孔ケージと、スリット部を有するディフューザの形状を提案する。提案した構造について、Computational Fluid Dynamics (CFD, 数値流体力学) と実験によるキャビテーション抑制効果の検証を行った。以下、それぞれについて説明する。

2. 多孔ケージによる F_L 値向上

多孔ケージの孔形状による F_L 値向上の取り組みについて紹介する。初めに1段テーパ形状について、 F_L 値の向上を検

討した。1段テーパ形状の高い F_L 値を維持した状態で、更に C_V 値を向上させることを想定した2段テーパ形状を検討し、実験でその効果を確認した。最後に2段テーパ形状の多孔ケージによる F_L 値向上について言及する。

(1段テーパ形状、2段テーパ形状についての特許2件を出願済み)

2.1 1段テーパ形状

本項では、多孔の入口から出口まで一定のテーパ角度で多孔径が縮小する1段テーパ形状を検討する。

検討する1段テーパ形状の多孔ケージを調節弁内に配置したときの断面図を図1、多孔ケージの孔の断面図を図2に示す。図1に示す通り、調節弁の流れは左から右であり、多孔ケージの内径と接しているプラグの位置によって流量を制御する。本技術開発で用いた調節弁の呼び径は、2インチである。図2の通り、テーパ角度は 0° (多孔内径が一定の円筒形状)、 1° 、 2° とし、多孔出口径を $\phi 2.5$ mmとした。多孔ケージの孔数は36である。

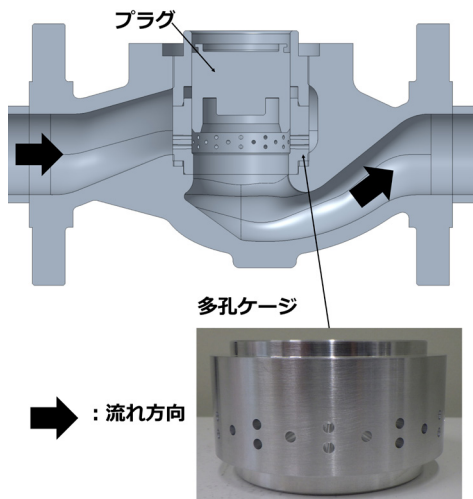


図1 調節弁断面図と多孔ケージ

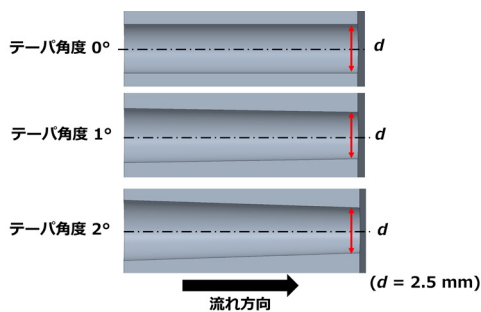


図2 1段テーパ形状の多孔断面図

圧力測定箇所は、International Electrotechnical Commission (IEC) 60534-2-3の調節弁試験圧力測定位置に従い、配管径 D に対しそれぞれ上流側に $2D$ 、下流側に $6D$ の位置とし、1段テーパ形状の多孔ケージを用いて C_V 値と F_L 値の実験を実施した。 C_V 値と F_L 値の定義式を式(1)と(2)、実験結果を図3に示す。図3から、テーパ角度の増加に伴い C_V 値と F_L 値が向上することが確認された。

$$C_V = \frac{Q}{0.0865} \sqrt{\frac{1}{P_{in} - P_{out}}} \quad \text{式(1)}$$

$$F_L = \frac{1}{\sqrt{P_{in} - 0.96p_v}} \sqrt{P_{in} - P_{out}} \\ = \frac{1}{\sqrt{P_{in} - 0.96p_v}} \frac{Q_{max}}{0.0865 C_V} \quad \text{式(2)}$$

Q :流量, P_{in} :上流圧, P_{out} :下流圧, p_v :飽和蒸気圧, Q_{max} :最大流量(閉塞状態)

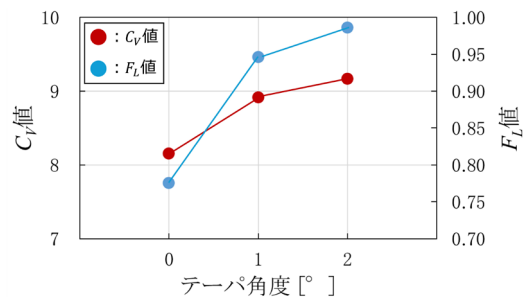


図3 1段テーパ形状の C_V 値と F_L 値

次にテーパ角度 0° 、 2° の1段テーパ形状の多孔ケージについて、 F_L 値計測時と同じ圧力条件でCFD解析を行い、多孔付近のボイド率の分布を可視化した。ボイド率は気液二相流の中で気体が占める体積比率であり、1に近いほど気体の割合、つまり気泡が多くキャビテーションが激しく発生していることを示す。CFD解析には北海道大学のスーパーコンピュータ「Grand Chariot」を用いた。CFD解析の計算条件を表1、ケージのテーパ孔内流れのボイド率分布を図4に示す。

表1 CFD解析の計算条件

ソフトウェア	Advance/FlowFlow/Red Ver.5.4
乱流モデル	高レイノルズ数型k-εモデル
流体	水(25°C, 圧縮性)
メッシュセル数	約500万
運動量差分スキーム	2次精度風上
壁関数	Spalding則
時間刻み[s]	5×10^{-6}

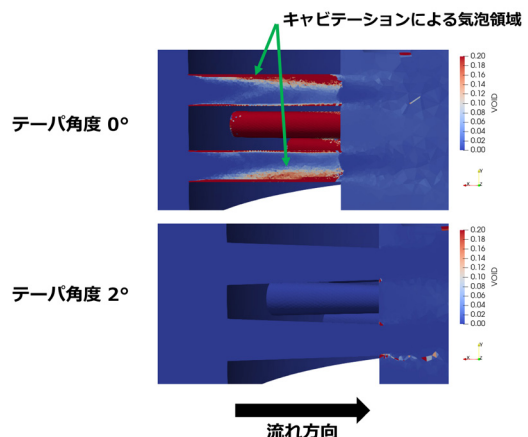


図4 1段テーパ形状におけるボイド率分布

図4は青部がボイド率0、赤部がボイド率0.2以上となっており、キャビテーションの発生状況を確認できる。図4から、多孔内部において F_L 値が小さいテーパ角度 0° ではキャビテーションが発生しているが、 F_L 値が大きいテーパ角度 2° ではキャビテーションが確認されなかった。

以上から多孔を1段テーパ形状とし、テーパ角度を大きくすることで C_v 値と F_L 値の向上を確認した。CFDのボイド率分布から、多孔を1段テーパ形状とすることで多孔内部のキャビテーションを抑制できることが分かった。

2.2 2段テーパ形状

高い F_L 値を維持しつつ定格 C_v 値(全開時の C_v 値)を更に増加させるため、テーパ角度が一定の1段テーパ形状に代わりテーパ角度を途中で変化させる2段テーパ形状を検討した。2段テーパ形状の詳細を図5に示す。2段テーパ形状の多孔出口径は1段テーパ形状と同一($\phi 2.5\text{mm}$)とし、入口から出口方向に対して付加されたテーパ角度を途中から小さい角度に変更している。この構造により、2段テーパ形状の多孔入口径は1段テーパ形状より小さくなり、ケージに配置可能な多孔数が増加した。

IEC 60534-2-3に基づき、2段テーパ形状の多孔ケージを用いて C_v 値と F_L 値の実験を実施した。実験で用いた2段テーパ形状の詳細を表2、 L_1/L の値による2段テーパ形状の概略図を図6に示す。 L_1/L の値によって、多孔入口径が異なるため、ケージに配置可能な多孔の最大数も L_1/L の値によって異なる。また、実験結果を図7に示す。図7の縦軸に示す定格 C_v 値比は、1段テーパ形状である $L_1/L=1.00$ の定格 C_v 値を基準としたときの $L_1/L=1.00, 0.75, 0.50, 0.25$ の定格 C_v 値との比率である。図7より、 $L_1/L=0.25$ では F_L 値が減少したことが分かる。一方、 $L_1/L=0.75, 0.50$ は1段テーパ形状である $L_1/L=1.00$ と同等の F_L 値を維持しつつ、 C_v 値が向上した。

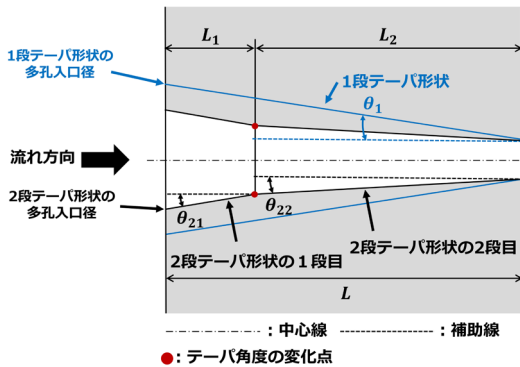


図5 2段テーパ形状の概略図

表2 実験で使用した2段テーパ形状

	L_1/L (入口側テーパ長さの割合)			
	1.00	0.75	0.50	0.25
1段テーパ形状 θ_1 [°]	2	2		
2段テーパ形状の1段目 θ_{21} [°]				
2段テーパ形状の2段目 θ_{22} [°]		0.5		

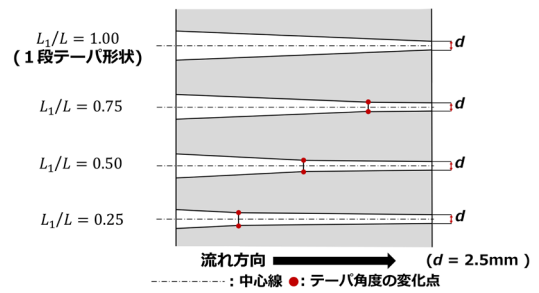


図6 L_1/L の値による2段テーパ形状の概略図

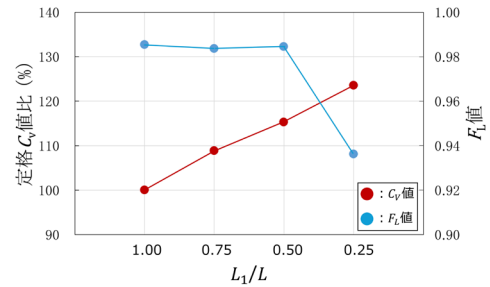


図7 2段テーパ形状の定格 C_v 値比と F_L 値

2.3 全ての開度領域における F_L 値の評価

2.1項及び2.2項は C_v 値が10程度と限定的な評価であったため、ケージの孔数を180に増やし、広範囲の C_v 値となる全ての開度領域において F_L 値の確認実験を行った。目標とする F_L 値は0.9以上とした。

実験結果を図8に示す。図8より、 C_v 値が30未満となる低开度から中間開度の領域では、目標値である F_L 値0.9以上となった。しかしながら、 C_v 値が30以上の高开度領域では、 F_L 値は0.9を下回った。

テーパ形状を変更した多孔ケージを複数製作して実験を行ったが、いずれの多孔ケージにおいても C_v 値30以上の高开度領域では、 F_L 値は0.9以上には達しなかった。そのため、高开度領域における F_L 値向上には、多孔ケージ以外の方法を検討する必要がある。

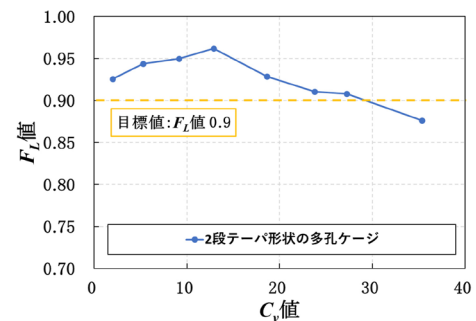


図8 2段テーパ形状の多孔ケージの実験結果

3. 調節弁本体下流側のディフューザ設置による F_L 値向上

高开度領域の F_L 値向上に向けた取り組みを紹介する。高开度領域における F_L 値向上に必要な要因を検討し、調節弁本体下流側にスリットと穴出入口に R を設けたディフューザを設置することとした。CFD解析の結果からディフューザ設置によ

るキャビテーション抑制効果を確認し、2段テーパ形状の多孔ケージとディフューザを調節弁に組み入れて実験を行った。
(スリットと穴出入口Rについての特許2件を出願済み)

3.1 高開度領域における F_L 値向上のための要因分析

前項までの結果より、多孔ケージのみでは高開度領域で F_L 値が向上しないことが分かった。

F_L 値が向上しない要因を調査するため、CFD解析を行った結果、図9のように調節弁本体下流付近の流れの剥離領域においてボイド率が高く、キャビテーションの発生が疑われる領域を確認した。低開度、中間開度ではこのようなボイド率の分布は見られないため、調節弁本体の流路形状の影響によるものと推定できる。そのため、調節弁本体下流側にディフューザを設置することで、高開度領域における F_L 値向上を図ることとした。

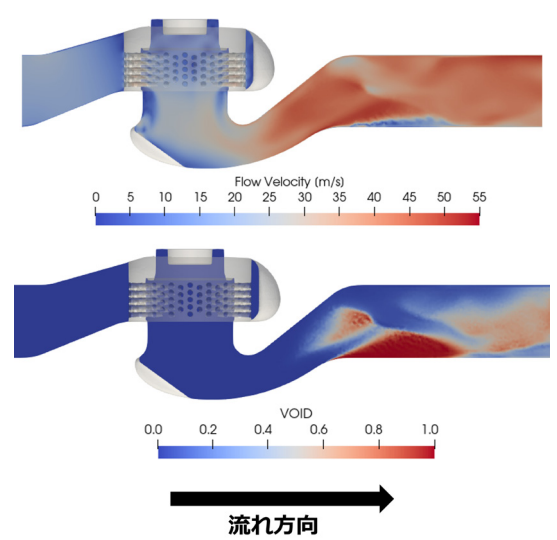


図9 全開時の調節弁本体下流におけるキャビテーション
(上:流速分布, 下:ボイド率分布)

高開度領域において F_L 値の向上が見られない要因とその解決策の妥当性を別の観点から確認する。そのため、式(1),(2)に示した C_V 値と F_L 値の式を用いて、調節弁における F_L 値の推定を行った。図10のように調節弁の各要素を抵抗要素としてモデル化し、 C_V 値と F_L 値の式から非閉塞流れと閉塞流れにおける流量 Q は式(3),(4)のように表せる。また、調節弁全体の C_{V_ALL} と F_{L_ALL} はそれぞれ式(5),(6)に示す。それぞれの抵抗が非閉塞流れ、または閉塞流れであるかを仮定し、式(3)と(4)を用いて中間圧を計算する。 P_{in} と P_{out} には、対象となる抵抗に応じて、上流圧、中間圧または下流圧を用いる。その後、各抵抗における圧力に関する条件を検討することでCFD解析や実験を実施しなくとも調節弁全体の C_{V_ALL} と F_{L_ALL} を理論的に推定することが可能となる。

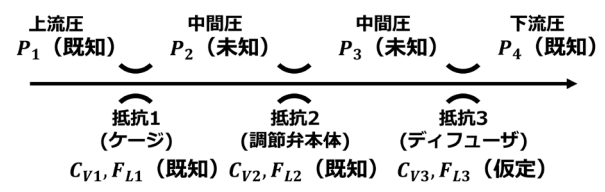


図10 ケージ、調節弁本体及びディフューザのバルブ抵抗要素のモデル化

$$Q = 0.0865 C_V \sqrt{P_{in} - P_{out}} \quad (\text{非閉塞流れ}) \quad \text{式(3)}$$

$$Q = 0.0865 F_L C_V \sqrt{P_{in} - 0.96 p_v} \quad (\text{閉塞流れ}) \quad \text{式(4)}$$

$$C_{V_ALL} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{C_{V1}^2} + \frac{1}{C_{V2}^2} + \frac{1}{C_{V3}^2}\right)}} \quad \text{式(5)}$$

$$F_{L_ALL} = \frac{Q}{0.0865 C_{V_ALL} \sqrt{P_{in} - 0.96 p_v}} \quad \text{式(6)}$$

図11に調節弁本体下流側のディフューザの設置位置、図12にディフューザを設置した場合の F_L 値の理論計算結果を示す。図12より、ディフューザを設置すると高開度領域において F_L 値が向上すると予測できる。

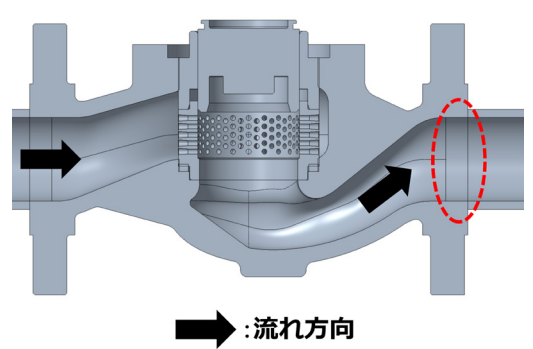


図11 ディフューザの設置位置

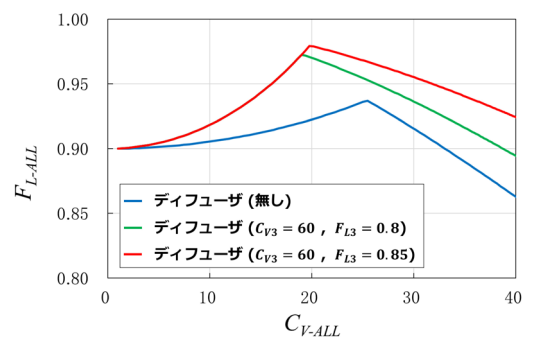


図12 調節弁本体下流位置へのディフューザ設置による F_L 値の理論計算結果

3.2 CFDを用いたディフューザによる F_L 値向上の検証

調節弁本体下流側に設置するディフューザの効果を検討するため、#1(多孔板)、#2(コーン形)、#3(コーン形+穴出入口R1+スリット)の3つの形状についてCFD解析で検証した。CFD解析条件を表3に、解析モデルとCFD解析結果を図13、図14に示す。

表3 CFD解析の計算条件

ソフトウェア	Advance/FrontFlow/Red Ver.5.4
乱流モデル	DLES (Detached Large Eddy Simulation)
流体	水(25℃, 圧縮性)
メッシュセル数	約750万
運動量 差分スキーム	2次精度風上
壁関数	Spalding則
時間刻み[s]	5×10^{-6}

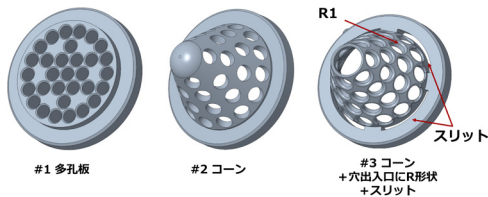


図13 CFD解析対象のディフューザ形状

ディフューザ	静圧分布	流速分布	ボイド率分布
無し			
#1 多孔板			
#2 コーン形			
#3 コーン形 +穴出入口R1 +スリット			

図14 ディフューザのCFD解析結果
(流れ方向:左から右)

CFD解析結果から、特に#3 (コーン形+穴出入口R1+スリット)が高いボイド率の領域を抑えられ、 F_L 値向上に大きな効果を示すことが分かった。理由としては以下の3点を挙げることができる。

①流れ同士の衝突による圧力回復

図15から、コーン形ではコーン内部で流れ同士が衝突して圧力が回復するためキャビテーションが抑制されることを確認した。流れが外側から中心に向かうケージでもキャビテーション抑制効果があることが知られている⁽²⁾。

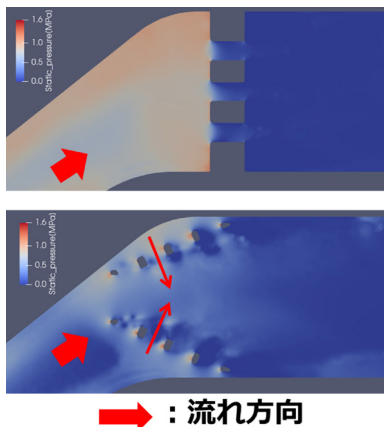


図15 ディフューザ付近の静圧分布
(上:#1(多孔板), 下:#2(コーン形))

②スリットによる流れの剥離防止

流れの剥離領域では圧力の低下や変動によりキャビテーションが発生しやすいことが知られているが、図16に示すように、#3ではスリットを通過した流れによりコーン外周部後流の流れの剥離が抑制され、ボイド率が高いキャビテーションの発生領域(図16の赤い領域)が減少している。

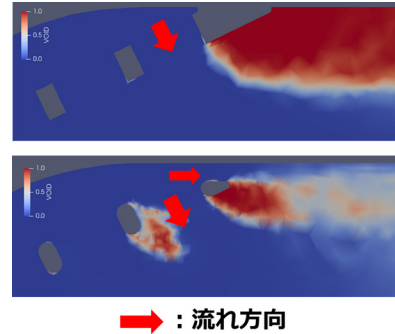


図16 ディフューザ付近のボイド率分布
(上:#2(コーン形),
下:#3(コーン形+穴出入口R1+スリット))

③コーン穴出入口のR形状による流れの剥離防止

図17から、コーン穴出入口にRを設けた形状では、流れが穴壁面に沿って流れやすくなるためコーン後流での流れの剥離が減少し、キャビテーションが抑制されることを確認した。

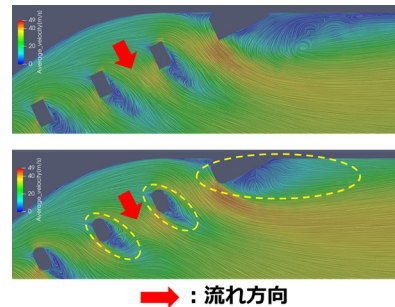


図17 ディフューザ付近の流線分布
(上:穴出入口Rなし, 下:穴出入口Rあり)

3.3 実験によるディフューザの高 F_L 化検証

CFD解析よりキャビテーション抑制効果が最も高いと考えられる#3 (コーン形+穴出入口R1+スリット)を試作し、2段テーパ形状の多孔ケージと組み合わせた調節弁での実験を行った。図18に2段テーパ形状の多孔ケージとディフューザを組み合わせた調節弁を、図19にその実験結果を示す。図19に示す通り、ディフューザの導入によって高開度領域でのキャビテーションが抑制され、目標である全ての開度領域において F_L 値0.9以上を達成した。

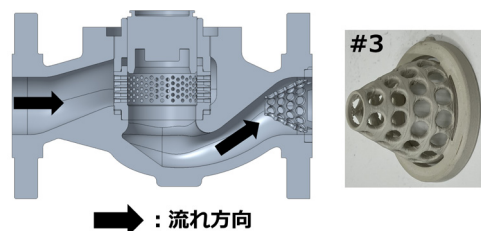


図18 2段テーパ形状の多孔ケージとディフューザを組み合わせた調節弁と製作したディフューザ

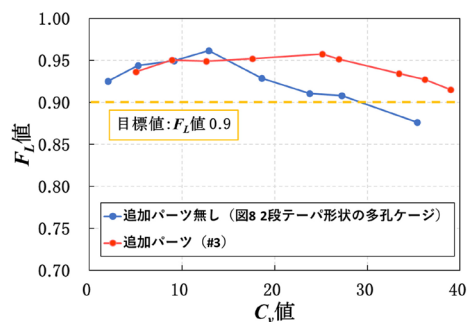


図19 2段テーパ形状の多孔ケージとディフューザを組み合わせた調節弁の実験値

4. おわりに

本技術開発では、CFD解析と実験により調節弁のキャビテーション抑制技術開発を行った。以下にその結果を示す。

(1) 2段テーパ形状の多孔ケージを開発し、特に低开度から中間開度の領域において F_L 値向上を実現した。

(2) キャビテーションを抑制する構造のディフューザを調節弁本体下流側に設置することで、特に全開付近での F_L 値向上を実現した。

これらの技術開発により、全ての開度領域で F_L 値の向上を実現できる見込みが立った。

今後、この技術をシビアサービス向けの調節弁へ適用することでプラントの長期的な安定操業を実現し、基盤産業の発展への貢献が期待できる。

<参考文献>

- (1) Y. Kurosawa, C. Youn: Computational Fluid Dynamics of a Control Valve with Three-stage Perforated Cages under Varying Perforation Size Distributions, *Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*, 2025, Vol.12, pp.343-351
- (2) 加藤洋治 他 編著: 新版キャビテーション 基礎と最近の進歩, 2016年, pp.259, 森北出版株式会社

<商標>

Advance/FrontFlow/redはアドバンスソフト株式会社の商標です。

<著者所属>

- | | |
|-------|----------------------------------|
| 黒澤 祐貴 | アズビル株式会社
アクチュエータ開発本部開発1部1グループ |
| 新谷 知紀 | アズビル株式会社
アクチュエータ開発本部開発1部1グループ |
| 尹 鍾皓 | アズビル株式会社
アクチュエータ開発本部開発1部1グループ |