

◇ミニ特集：バルブと材料の損傷と寿命診断◇

キャビテーションによる調節弁の損傷事例と技術対応の現状

奥津 良之*

・ Key Words：調節弁、キャビテーション、減圧要素、騒音、振動、壊食、配管要素、エロージョン、内部流れ

1. 高速流に起因する調節弁課題

産業用プラントの効率改善、生産性の向上に寄与すべく、高温条件や高圧条件、あるいは多相流体を扱う場合など、調節弁は過酷な使用状況下で運転されることが多い。

しかし、調節弁はそれ自身が有効なエネルギーを発生し得ない機械であるので、ポンプ、水車や蒸気タービン、あるいはジェットエンジンなどと同類のエネルギー変換機／流体機械として認識されていない現状がある。したがって、ともすると他の配管要素と同一の扱いを受けて、数と重さでその価値と実績が評価される場合が見受けられる。

現実的には、調節弁は高いエネルギーレベルの流体を、低いエネルギーレベルの流体へと変換させるエネルギープロセッサであり、限られた狭い弁室空間内で、流体摩擦による仕事を介して、圧力エネルギーを熱エ

ネルギーに変換する流体機械である。したがって流体力学的特性の向上と最適化、その性能の長い期間に亘る維持などを十分吟味すべき機械といえる。流れに対する技術配慮は計装機器としての技術的配慮とあいまって極めて重要なものである¹⁾。

調節弁およびその周辺において、高速内部流れに関連して派生する諸問題を図1に提示しておく。流れの剥離や再付着、混合、衝突、旋回流などの流体挙動を適正に処置できない場合、弁制御性能は安定しない。特に流体が液体の場合はキャビテーション現象が、気体の場合には衝撃波の発生が、その流量特性の予測を複雑なものとし、振動や騒音の発生といった非定常的な技術課題を誘発する要因となる。

ここではとくに高速液体を扱う場合にしばしば問題となるキャビテーションに話題を限定し、筆者が関与した範囲の最近の技術対応について概説する。キャビテーション壊食事例と壊食実験の概要、弁内部流動とキャビテーション気泡の発生状況、下流配管との連成事例、およびこれらの研究成果を反映して設計される耐キャビテーション調節弁の製品例について述べる。

2. キャビテーションによる壊食事例

高速液体流を減圧する際に、調節弁がキャビテーションにより被る最も深刻なダメージが材料面の壊食である。トリム部の壊食により、弁の「締切機能」・「制御機能」が低下する。弁本体壁に壊食領域がおよび、それが進行すると「圧力容器としての機能」を失うことになる。

代表的な弁形式についてのキャビテーション壊食事例を図2に示しておく。(a)・(b)はコンタート形単座弁の損傷例である。特性面の表面硬化処理を施し

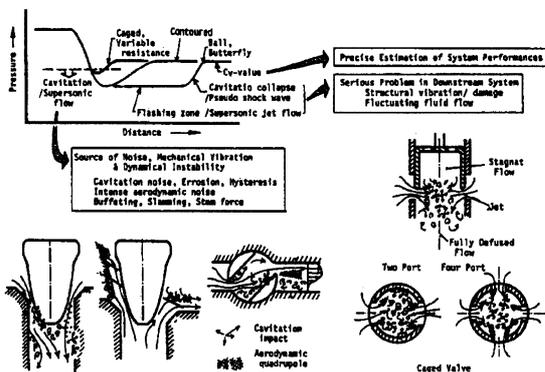


図1 Dynamic problems arising in throttling process of high pressure liquid/gas flow.

* (株)山武 プロダクト開発生産統括部CV開発部1グループ

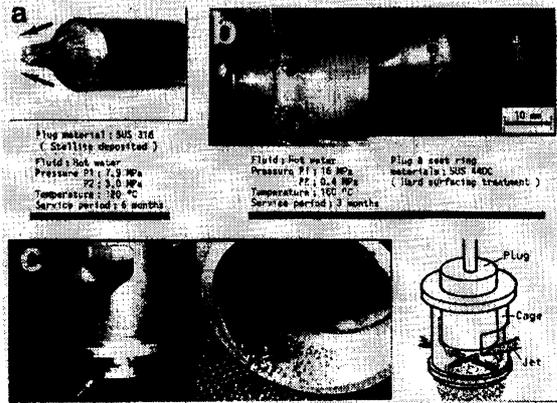


図2 主要弁形式についてのフィールド壊食事例

ていても、温水のキャビテーションにより、6ヶ月で「制御機能」を失った。(写真a) 調節弁は絞り部流路面積を変化させて所望の減圧能力を得る原理であるため、特性面の一部が損傷しても、弁開度(トラベル)を降下させることにより運転は可能である。しかし、この例のように全閉位置まで開度が絞られるともはや使用することはできない。写真bは通常時閉、1週間に1回の頻度で制御開度運用されたバイパス弁の損傷例である。全閉時に異物(ゴミやサビ粉)をかみ込み、その周囲にできた微小な流路を通して強いキャビテーション流が発生したことにより損傷を受けた。締切性能の劣化により交換を余儀なくされた事例である。

写真cにはケージ形複座弁の損傷事例を示す。常用開度が極めて小さく、強い2個のキャビテーション噴流が対抗する壁面に衝突したものと考えられる。適正開度での噴流同士の混合が、十分に行なわれなかったためによる。

キャビテーション壊食は流体の圧力や温度、Ph値、溶存酸素量など、液質を支配する種々の要因に敏感に影響を受ける現象である。個々に異なる弁形式について、かつ弁開度が運転とともに随時に変化し、流れ場が刻々と変化する状況において、材料面の壊食を予測することは定量的には非常に難しい状況である。この状況を打開すべく着手した実流条件下に於ける壊食実験研究例は5章にて述べる。

3. キャビテーション発生状況の観察(2~6)

キャビテーション発生メカニズムについては各種流体機械において相当量の研究例があるが、調節弁

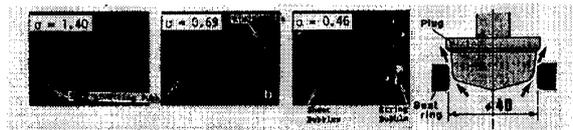
に限定すると、その研究例は極めて少ない。

ここでは、弁室、ケージ、プラグなどを透明アクリルで製作し、弁内部流れをキセノン管(発光時間 $2\mu\text{sec}$)を光源として瞬間写真を撮影して調査した結果例を示す。図3に、主要弁形式であるコンタート形、およびケージ形式についての水流条件下でのキャビテーション発生状況を示す(上流圧力 $P_1 = 0.4\text{MPa}$)。図中に示すキャビテーション係数 σ は以下の定義式による。 σ によりキャビテーション発達段階の指標とする。

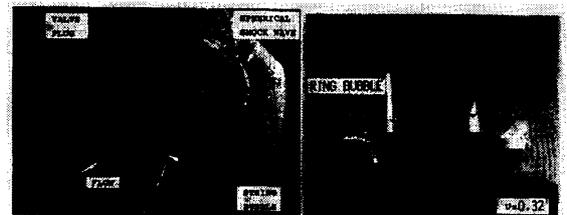
$$\sigma = (P_2 - P_V) / (P_1 - P_2) \quad \dots(1)$$

ここに、 P_1 : 上流圧力、 P_2 : 下流圧力、 P_V : その温度における流体の飽和蒸気圧力とする。

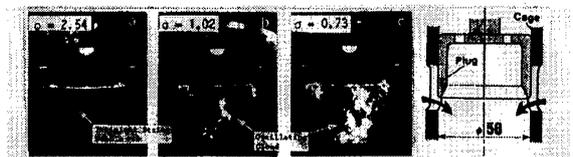
図3写真(1)は比較的高弁開度における状況であり、キャビテーションの初生(a: $\sigma = 0.14$)は縮流部における上流からのひも状泡として観察できる。差圧をあげ臨界キャビテーションまで発達させるとプラグ閉め切りリム部での球状泡が発生し(b)、さらに閉塞キャビテーション段階ではプラグ特性での付着泡を併せて発生するようになる。これらの様相は弁開度の変化につれて顕著に変化する傾向があり、運用



(1) コンタート形式におけるキャビテーション発生状況 (高弁開度、 $P_1 : 0.4\text{MPa}$)



(2) コンタート形弁縮流部下流におけるひも状泡崩壊と球面衝撃波の発生 (3) 共鳴音発生状況におけるリング状泡の周期的離脱



(4) ケージ形弁におけるキャビテーション発生状況 (低弁開度 $P_1 : 0.4\text{MPa}$)

図3 主要弁形式におけるキャビテーション発生状況の観察

条件からキャビテーション気泡の発生パターンを予測することは、必ずしも容易ではない。図3写真(2)にはシュリーレン写真によるひも状泡崩壊の様子を示しておく。コンタド形弁、中・高開度では旋回流が発生しやすくキャビテーションの初生をひも状泡崩壊時の間欠的な衝撃音として認識されることが多い。写真には旋回流先端のくびれに単独泡が発生し、外圧による気泡の崩壊により球面衝撃波が発生していることが観察できる。ところで、コンタド形弁の運転中、数kHzの強い分離音が発生することがある。その一つの発生メカニズムについて図3写真(3)に紹介する。この例では、約2.5kHzの分離音が発生しているが、リム部からの環状気泡が周期的に離脱しており、その周期が分離音周波数と一致している。音波がフィードバック信号として関与すると考えられ、共鳴状態にある。

図3写真(4)にはケージ弁におけるキャビテーション発生状況を示す。この弁開度ではキャビテーションの初生はポートエッジからのひも状泡の発生による ($a: \sigma = 2.54$)。これは縮流部を旋回流が通過し、その中心が低圧となって発生する気泡である。このような初生泡は間欠的に発生する特徴を有す。差圧の増大とともに、噴流のほぼ全域にキャビテーションが発生し、このとき噴流衝突部の気泡群は振動的であり、ケージ中心に定在していない (b,c)。内壁に接触する場合もあり、必ずしもケージ内壁面が壊食されないとはいえない。前出図2写真c事例の説明と一致する。

4. 接続配管との干渉

調節弁から排出される高速の流体は固有の設計条件下で下流管路と干渉し種々の不都合な事象を起こすことがある。とくに絞り部下流に弁本体の懐をもたないアングル形状の調節弁の場合、高い運動量の流体が減衰せずにそのまま下流へ導かれるので振動や摩耗への配慮が必要となる。キャビテーションを含む高速の二相流が発生する場合には、とくに配慮すべきである。

一例として、アングル弁下流において二相流が原因となって不適合事象に至った事例を紹介する¹⁾。

図4に示すとおり、4.8MPaのLNGを再循環させる口径3インチラインにおいて、さながら蒸気機関車を想起させる大音響と振動が、常用したい20t/hを超

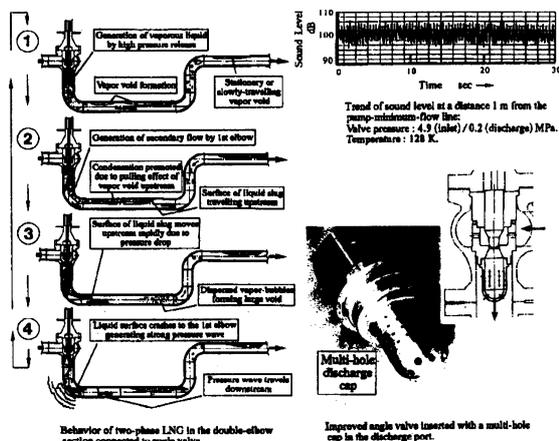


図4 LNGポンプ再循環ラインにおける凝縮振動

える運転条件で発生することが判明した。当時、5系列建設したライン全てが、ほぼ同様の事象が発生したとの報告があった。

現地を調査してみると、アングル形調節弁の真下流にエルボが対向して配備される配管構成となっていた。2~3Hz程度の強い衝撃音が発生し、1m離れた周辺の騒音レベルは100dBAを超えていた。ただし、弁自体の振動レベルは低く、ステムに異常な振動は認められなかった。配管系についての振動問題と判断された。

この事例に対し、実機と相似の可視化テストラインを建設し、水流テストを実施した。その結果、対向するエルボ間で閉じこめられたガス領域を境界として、液体部分の大振幅の波が定在することが観察された。この波の弁直下のエルボとの衝突、およびエルボによる二次流れの影響により振動が持続する。現地では、同図①→②→③→④→①のサイクルでLNGキャビテーション流の凝縮を伴う自励振動が発生すると推察された。

通常アングル弁下流には20D程度の余裕をみた配管レイアウトをすべきであるが、スペース制約上このようなコンパクトな配管レイアウトも余儀なくされ、不適合の要因となる。この事例では現地が商用運転段階とのことで配管レイアウトの変更が不可能であったため、弁の側からできるだけ配管内に均一の流れができるように工夫し、振動を抑止した。(図中には改良トリム写真を示す)

下流配管に及ぶ二相流を観察していると、流動パターンの変化に伴い弁容量係数や振動・騒音レベル

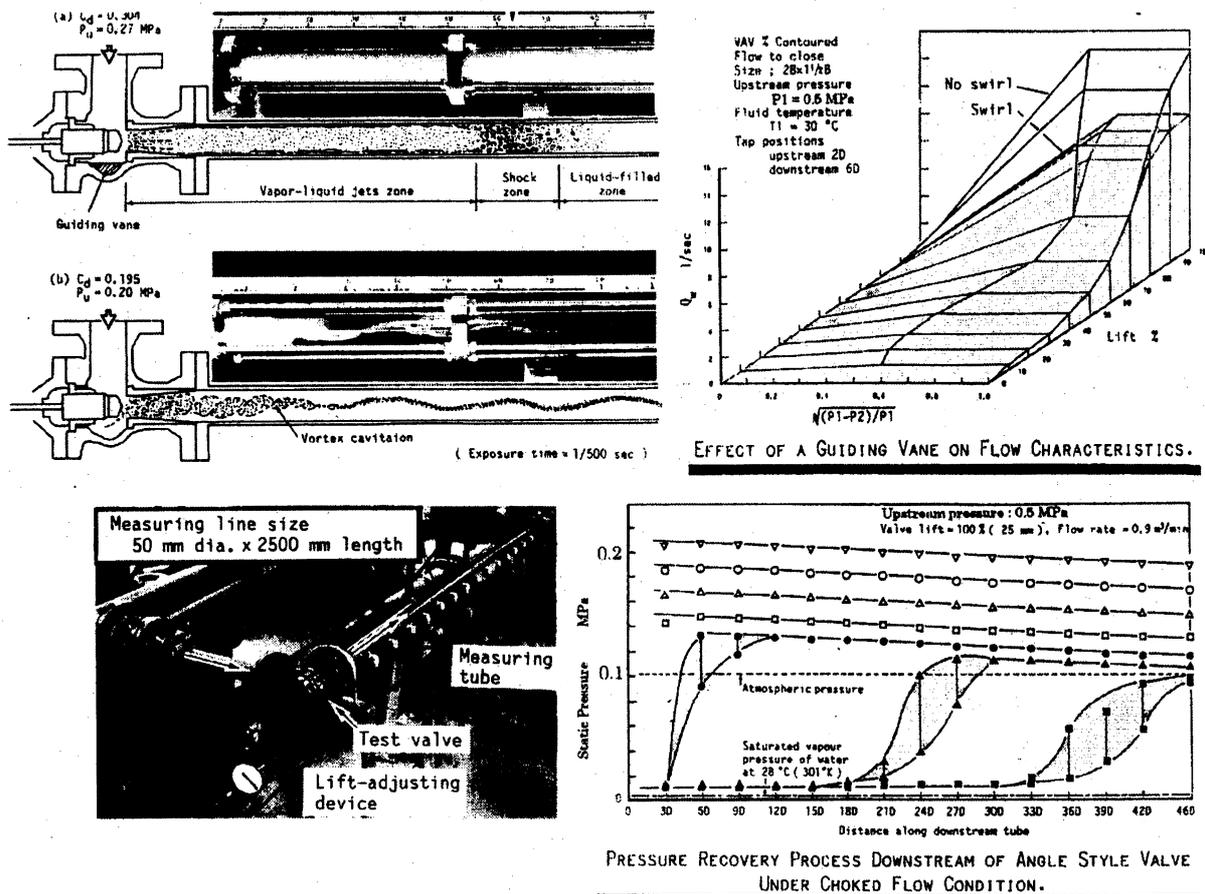


図5 Cavitation flow generated in downstream of ang-style control vaive.

の劇的な変化を確認することができる。

図5にアングル形弁下流におけるキャビテーション流の観察写真およびスケッチを示す。この種の弁では弁プラグの周囲に旋回流が発生し、弁容量係数を著しく減少させることがある。この渦は弁室に案内板を設けることにより抑止でき、弁容量を増加させることが可能である。流れの写真には、これらの状況を対比させて示す。(a)は案内板を設けて旋回流を抑止した場合であり、縮流過程での流れの加速は急激となり、下流管路の一部の区間が気液二相流となって白濁する。キャビテーション泡は一定区間の後に急激に凝縮し、この復液する部位での衝撃力は著しく、激しい振動と騒音を励起する。この部位以外の区間は静粛な印象を受ける。この復液する位置は下流管路系の干渉を受けるために一義的に算出することは難しい。(b)には案内板の設けられていない場合を示す。弁下流部はいわゆる“ボルテックス・

キャビテーション”が発生する。気泡は渦の中心に集まり、下流に移流していく。渦は消滅せずに相当に下流にまでこの様相が持続される。騒音や振動の観点からは(a)に比べ静粛な印象となるが、容量係数が高弁開度で30%程度減少し、かつ下流の相当に長い区間に渡り、長周期の圧力変動がおよぶことになる。

5. 壊食事象についての実験研究(7)

とくに高圧液体用の調節弁ではキャビテーション壊食が克服すべき最重要課題である。材料面の壊食によって機能が低下し、短周期でのメンテナンスが必要となり、高コスト化につながる。機器破壊の危険性も含み深刻な技術課題となっている。

キャビテーション壊食を軽減するには流動パターンの改善に加え、材料のキャビテーション耐力が高いことが必要とされるが、高速のキャビテーション

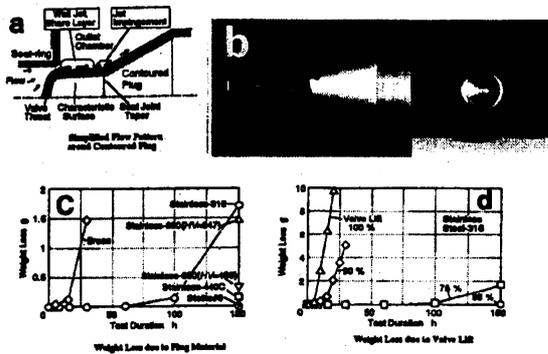


図6 20MPa高速キャビテーション壊食試験
(材料および弁開度の壊食率への影響)

流が関与する壊食のメカニズムについて十分に把握されている段階にはない。液体の諸条件や材料特性(強度・靱性・表面組織構造など)との因果関係においても未解明の部分が多い。

ここでは、実用レベルの水流条件(20MPa水準、弁容量係数 $C_v=1$ 程度)に実施されている高速キャビテーション実験結果の一例を、図6に提示する。

この実験では記述した調節弁内部流の観察により、キャビテーション発達経過、キャビテーション崩壊部位等を、プラグ形状の関連性を把握した上で、材料やキャビテーション経過時間による壊食の進行状態を調査している。(a)(b)に供試プラグと壊食状況例を示しておく。(c)にプラグ材質のキャビテーション耐力の評価を試験時間vs欠損重量の対比で示すが、ステンレスSUS316→SUS440C→ステライト#6(CO基)の順に耐力が向上することが示される。今後、Ni基材料、各種表面改質の結果などが期待される。

(d)に弁開度の変化による質量欠損量の違いを示すが、この条件では弁開度90%以上では短時間で使用不可能となることがわかる。ただし、65%程度では寿命が長いように思われるが、損傷状況を観察すると締切性能は比較的早い時期に失ってしまう。

このように、流体条件と材料条件および運転パターンなどの要因をパラメータとし、壊食データを集積することにより、将来的に弁寿命延長の工夫が明確となり、余寿命の予測など管理・保全の意味から有意な成果が導けるものと考えられる。

6. 耐キャビテーション弁の設計

産業用調節弁の内部構造の形式は多岐に亘る。各

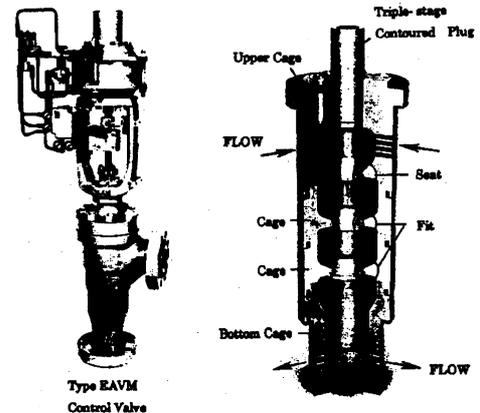


図7 耐キャビテーション弁の例(山武製EAVM形調節弁)

機種について、流れの仕様と対応して基本的なキャビテーション特性を明らかとし、特性改善のための工夫を考察する必要があるが、一方で、従来形式とは異なる内弁構造の、いわゆる耐キャビテーション弁と呼ばれる機種が実用され、相当する仕様領域で有意性を発揮している。しかし、一般的にこれらは多段構造、あるいは多孔構造となり弁容量が極端に小さくなる上に、構造が複雑となり、非常に高価となる状況が含まれる。

より構造が簡単で、効果的な、そして経済性の高い弁構造が望ましい。このような見地から開発された耐キャビテーション弁の一例を図7に示す。

基本構造として、多段減圧構造をとる。4個のケージを積層し、入口部と出口部のケージに多孔部を設けて2段階の減圧機構とし、中間部に3段のコンタド形プラグを組み込み、精密な流量特性を実現する。

流体力学的な流れの予測精度や弁軸に作用する流体力の予測精度を向上させる目的から、全体的に比較的単純なトリム構造としている。また、従来例のように多孔部の孔径を極端に小さくし、減圧能力を高めると、水流中のスケールを堆積させる。孔径と減圧能力の見積もりについてはとくに配慮している。また全閉状態において使用されることも想定し、シート部が着座時に流体中の微小なスケールが着座部にかみ込まれ、極めて微小な流路をキャビテーション流が通過することを防ぐ工夫が必要となる。この例では、コンタドプラグの第2段・3段のプラグ肩部とケージポート部に嵌合部を設けて微小流れに

対する抵抗要素とし、上流側の第1段プラグに加工されているシート部の壊食の進展を、抑える構成となっている。材料選定、仕様選定についても前出の基礎データを反映し、決定している。

7. 今後の課題

キャビテーションに関連する技術課題の範囲は広く、依然、未解明の部分が非常に大きい。現実的な調節弁の運用では、6章に紹介したような比較的高価な耐キャビテーション弁を適用し、低振動化・低騒音化・長寿命化を図るか、従来弁に対してはメンテナンス周期を短縮し、頻繁に高コストな点検作業を行うことになる。

液質、流れ場に関連付けてのキャビテーション発生メカニズムの詳細、振動や騒音の発生メカニズムの詳細、材料と壊食の関係、下流管路との連成メカニズムなど、さらに解明されていく必要がある。

これらの成果は、必ずや設計指針を向上させ、調節弁技術の信頼性を向上させる。かつ、故障診断・余寿命診断など、保全上の有意性を創出すると考えられる。

ところで、最近の有効な解析ツールとしてスーパーコンピュータ (SP)、あるいは並列SPを使用してキャビテーション流れ場を数値計算として解く試みが行われている。Navier-Stokesの直接計算によりキャビテーションの初生段階程度については実験結果を裏付けるモデリングが行われている⁶⁾。なお、発達したキャビテーション流れ場のモデリングの段階にはないが、今後は、既述してきた可視化実験・壊食試験と併用してSPによるモデリングが調節弁流れ

の解明を加速するものと考えている。これらツールを有効に活用し、諸課題を克服していきたいと考えている。

謝辞

ここで述べた研究成果の大部は、早稲田大学理工学総合研究センターに設置された特別研究部会「管内およびエネルギー変換機械の高速流に関する研究」(主査大田英輔教授)に弊社が研究協力をを行い、得られたものである。ここに記して関連各位に深甚なる謝意を表す。また、第5章の実験研究においては橋詰匠教授(早稲田大学理工学総合研究センター)のご指導を戴いている。あわせて謝意を表す。

<参考文献>

- 1) 奥津、「コントロールバルブに関連する現実的な課題」、シンポジウム/セミナー「計装Ⅱ」第1回(早稲田大学理工学総合センター)、P9-16、1996・12。
- 2) 大田、「コントロールバルブ 流れの制御」、シンポジウム/セミナー「計装Ⅱ」第1回、P17-40、1996・12。
- 3) 山武計装資料「調節弁内部の流体挙動」、ID1-8190-0360、1992。
- 4) Outa, E., et al., "Flow Oscillation in a Contoured-Plug Valve with Multi-Hole Retainer and the Related String Cavitation Generation.", Proc. of FLUCOME '91, ASME, P77-85, 1991.
- 5) Outa, E., et al., "High Frequency Vibration of Control Valves at Low Openings Due to Cavitation Development", Proc. 2nd Int. Symp. on Cavitation and Multiphase Flow Noise, ASME, P31-41, 1986
- 6) Outa, E., et al., "Inception of Vortices-generating Cavitation in Industrial Contoured-Plug Valve.", Int. Symp. on Cavitation Inception, ASME, P143-151, 1993.
- 7) Yuzawa, S., et al., "Cavitation Erosion Features in Industrial Control Valves at Inlet Pressure of 20MPa" JSME Int. Journal, series B. Vol. 41, No. 4, P1105-1113, 1998.