

【整番】 FE-06-IG-002	【標題】 水撃対策のあらまし	
分類：流れ(非定常流れ)／種別：初心手引き	作成年月：H24.3／改訂：Ver0.0 (H24.4)	作成者：N.Miyamoto

全 23 枚

1. イントロダクション

(1) 水撃現象は、流れ状態や流速の急激な変化によって発生する。すなわち、

- ・ 弁を開閉して流れを変えるとき（緊急遮断、動力源喪失による開閉、切換操作など）
- ・ 弁の開度を急に変わるとき（プロセス操作、運転逸脱対処など）
- ・ ポンプの起動/停止（締切起動/停止、半開起動、瞬時復電など）
- ・ ポンプトリップ（ポンプ動力喪失などによるポンプ急停止）
- ・ ポンプ切替え（予備ポンプ起動など）
- ・ ポンプ回転数変化（タービンポンプ/エンジンポンプの例）

弁操作やポンプ運転によるものが殆どである。水撃によるトラブルには次のようなものがある。

- ・ 過度な圧力上昇による管類/インターナル/支持金具/架構/アンカ/基礎の変形破損
- ・ 過度な圧力降下(負圧発生)による大径管/ライニング管の座屈/損傷
- ・ 頻繁な水撃発生による管類/インターナル/支持金具/基礎の疲労損傷
- ・ ポンプ/原動機などの逆回転/オーバーランによる軸や軸受などの損傷
- ・ 水槽/タンク/ピット等の水面スロッシング(波打ち)やオーバーフローなどによる影響
- ・ 衝撃圧やこれに伴う振動によるガスケット類の損耗や継手漏洩
- ・ 衝撃圧やこれに伴う振動による計器類の機能障害/誤作動など

衝撃で生じる損傷が多いが、水撃のくり返しによる疲労損傷やフレッチングなども含まれる。

流れの急変さえあれば水撃はどんな管路でも起きる(例えば家庭の水道管)。特に水撃の検討が必要になる管路には、次のようなものがある。

- ・ 流速が速い管路 → 例えば 2m/s を越えるようなラインは本質的に水撃ポテンシャルが高い。
- ・ 長い管路 → 圧力波の往復に時間がかかり弁操作が急開閉モードになって圧力上昇ないし圧力降下がひどくなる、またラインバック(*1)で圧力上昇が増加する。
- ・ 高所にある管路 → 管路の一部としての熱交類も含む。サイフォン効果で静圧が低くなるため水柱分離・再結合が起きる(最悪のパターンになる)。
- ・ アップダウンの多い高低差の大きい山越え管路
 - サイフォン効果で静圧が低いうえに水撃発生箇所が分散し複雑になる。
- ・ 逆流し易い管路 → 例えば高所に排出槽があり実揚程が高いと逆流が加速され水撃力が増加。
- ・ 流体温度の高い管路 → 飽和蒸気圧が低く容易に水柱分離・再結合する。
- ・ 空気溜りや蒸気相のあるライン → スラギング(*2)を起こし易い。

なお管サイズや管種によっても水撃検討の要否が分かれる。口径の小さい(例えば 50A 以下の)配管は肉厚/径比が高く強度があるので、サポートさえ十分であれば水撃検討は割愛できることが多いと思う。口径の大きい薄肉配管/ライニング配管などは水撃検討を行った方がよい。

水撃解析をベースにしたシミュレーションが実施されている配管には次のようなものがある⁽⁶⁾。

用水配管メイン(水道給水/工業用水/水力発電/農業用水系統)、
石油パイプライン等(原油/LPG/LNG/ナフサなど)、備蓄基地石油移送配管、
タンカー類荷役配管、船内バラスト配管、オフショア防消火メイン配管、
LPG ローリー出荷配管、各種工業製品出荷配管、
ボイラ/タービン/復水器循環配管、動力プラント冷却水系統配管、
プラント内冷却水系統配管/防消火メイン配管、高層ビル屋内送水配管

特に重要度の高い配管は殆ど例外なく解析されているようである。ポンプトリップについては、次の基準で簡易的に水撃計算を行うことができる。但し安全裕度が過度に大きくなることがある。

農水省監修 土地改良事業計画設計基準 設計「ポンプ場」8.7.3 水撃作用の計算

水撃の検討結果あるいは解析結果の評価は次のような基準によることが多い。

- (1) 水撃時の最大圧力 \leq 水圧試験圧力(=1.5x 設計圧力) (プラント設備規格)
- (2) 水撃時の最大圧力 \leq 設計圧力の 1.1 倍 (パイプライン規格)
- (3) 水撃時の最小圧力 \geq 最小設計圧力

ライニング管では材質サイズに応じた負圧制限が考えられる。基準を超える場合はサポート/アンカ/基礎も含め短期応力基準で強度をチェックする必要がある。

- (2) 一般に**水撃対策の要否**は、水撃検討あるいは水撃シミュレーションによって発生する現象とその規模を定量的に把握したのち、強度/運転/環境などの観点からその影響を評価して判断する。

水撃対策は多様であるため、対策立案に際しては一般にとられている対策の実態を総括的に理解しておく必要がある。本 TS は、工業分野で一般的に採用されている水撃対策について、その概要を述べるとともに、技術的な要点をまとめたものである。更に詳しい議論および関連データは次の TS を参照されたし。

- FE-06-TM-001 弁開閉操作に関する水撃関連情報 (準備中)
- FE-06-TM-010 スイングチェッキの水撃関連情報
- FE-06-TM-011 水撃対策用空気弁に関する情報
- FE-06-TM-013 水撃対策用サージタンクに関する情報 (準備中)
- FE-06-TM-014 水撃対策用エアチャンバ類に関する情報 (準備中)
- FE-06-TM-021 水撃関連データ集 (準備中)

なお本 TS では対象流体として水を想定して表現している部分が多い(例えば水柱分離)。しかし現象的には殆どの液体に共通するものが多いので、“水”を“液 or 液体”に置き換えて読んで構わない。

- (※1) 長いパイプラインで圧力の大半が摩擦圧力に占められていると、圧力波が通過しても管路中に圧力勾配が残り、下流の閉鎖端に向かって液体が圧縮されて余分に圧力上昇が起こる現象。
【FE-06-IG-001 水撃現象のパターン分類】を参照のこと。
- (※2) 流れによって空気(ガス)の溜まりが絞り(オリフィス/弁)あるいはティ/直角エルボなどを抜けた直後、液体の塊がその突当たり壁に衝突しておこる一種の水撃現象。

2. 水撃対策のあらまし

(1) 水撃対策には、プラント設備の設計－施工－運転を通して次の3通りのアプローチがある(7)。

- (1) 装置設計に際し、水撃が起こりにくい設計をする(以下、**装置設計対策**と仮称)
- (2) 運転操作の工夫によって、水撃の緩和抑制を図る(以下、**システム対策**と仮称)
- (3) 意図的あるいは積極的に、水撃抑制機器を設ける(以下、**水撃緩和機器**と仮称)

各アプローチにおける対策アイテムを下記にリストアップする。

表1 水撃対策一覧

	対策アイテム	主な該当イベント[現象]
装置設計対策	(1) 平均流速の低減 (2) 管路高さの低減 (3) 管路の形状に対する配慮 (4) 配管/サポートの構造強化 (5) 流量特性を考えた弁選定 (6) バイパス方式の採用 (7) 逆止弁に係わる配慮	全般 [圧力上昇/圧力降下/水柱分離] トリップ/弁開閉 [圧力降下/水柱分離] 全般 [圧力上昇/圧力降下] 全般 [圧力上昇/圧力降下/水柱分離] 弁開閉 [圧力上昇/圧力降下] トリップ/弁開閉 [圧力上昇/圧力降下] トリップ/起動停止 [圧力上昇など]
システム対策	(1) 弁の緩閉鎖/緩開放 (2) シリーズ弁の操作 (3) 弁の2段操作 (4) ノンリターン弁操作 (5) 回転数制御など	弁開閉など [圧力上昇/圧力降下/水柱分離] 弁開閉など [圧力上昇/圧力降下/水柱分離] 弁開閉など [圧力上昇/圧力降下/水柱分離] トリップ [圧力上昇/圧力降下/水柱分離] 全般 [圧力上昇/圧力降下]
水撃緩和機器	(1) フライホイール (2) サージタンク (3) ワンウェイサージタンク (4) 空気弁 (5) 急閉/緩閉逆止弁 (6) レリーフ弁類 (7) エアチャンバ (8) アキュムレータ	トリップ [圧力降下/水柱分離] トリップ/弁開閉 [圧力上昇/圧力降下/水柱分離] トリップ/弁開閉 [圧力降下/水柱分離] トリップ/弁開閉 [圧力降下/水柱分離] トリップ [圧力上昇] トリップ [圧力上昇] トリップ/弁開閉 [圧力上昇/圧力降下/水柱分離] トリップ/弁開閉 [圧力上昇/圧力降下/水柱分離]

(注) “トリップ” はポンプトリップを指す。この表以外にも幾つかの抑制策があるがここでは割愛。

(2) 表1の各対策アイテムの内容及びについては次節以下で概要を紹介する。工業分野では実に多様な防止策/緩和策/コントロール法が存在し、数々のアイデアが特許になっている。ただこれらを無定見に信用し、根拠を確認しないまま採用するのはリスクがある。条件によって成立しない対策もある。

エンジニアリングのあり方としては、

- ① 水撃解析に基づくシミュレーションを行いその効果を確認する、
- ② 解析による確認が困難な場合、根拠となるデータを確認する(できれば実験を行なう)

のが望ましい。現在はシミュレーションソフトが充実しており、①の水撃シミュレーションの実施は比較的容易である。

3. 装置設計における水撃対策

(1) 平均流速の低減⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹⁸⁾

通常、プラント配管の平均流速は0.5~4m/sとかなりバリエーションがある。もし1m/sと2m/sのどちらを採るかという問いがあれば、当然、初期コストから云えば2m/sを選んで管サイズをワンランク落とせばよい。しかしこの場合、水撃力のポテンシャルは2倍になることを忘れてはいけない。

ごく単純には、圧力(水頭圧)変化 ΔH と流速変化 ΔV には、次の関係がある。

$$\Delta H = (a/g)\Delta V \quad \text{ここで、} a = \text{圧力伝播速度(m/s)、} g = \text{重力加速度(9.807m/s}^2\text{)}$$

水頭圧 H /流速 V の流体は、零を基準にして最大で $\Delta H = H$ 、 $\Delta V = V$ の変化になるから、例えば2m/sの水流は、1000m/sの圧力伝播速度を想定して、

$$H = (a/g)V = (1000/9.807) \times 2 = 204\text{m} \rightarrow 20.4 \text{ kg/cm}^2$$

の圧力上昇のポテンシャルを持っていることになる。ここで水撃発生箇所の流速を2m/sから1m/sに変更すれば、このポテンシャルは半減する。従って**水撃発生部分の平均流速の低減は、圧力上昇の低減に直結している**。むしろこれは圧力降下の低減にもつながる(ただし絶対圧零が下限界になる)。

ただ流速の低減はコストダウンを阻害するので、実際には2次的な扱いになることが多い。結局水撃対策費などとの兼ね合いになる。

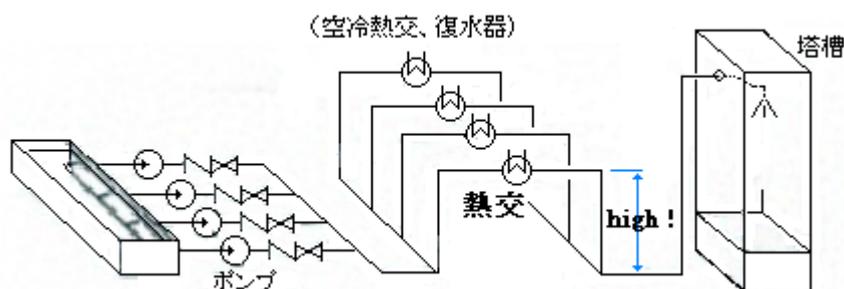
(2) 管路高さの低減⁽⁵⁾⁽⁷⁾⁽¹⁸⁾

定常状態の管路流れは連続の式と次のベルヌーイの式を用いておおむね理解できる。

$$\text{ベルヌーイ式: } H + Z + (K+1)V^2/(2g) = \text{一定}$$

その場合、静圧ヘッド H は、位置ヘッド Z と動圧 $V^2/(2g)$ によるが、水撃時に動圧が減少する場合は余程圧損係数 K が大きくならない限り動圧項は無視でき、殆ど位置ヘッド Z で決まってくる。

例えば下図のように熱交の設置位置が高く位置ヘッドが大きいと、定常でも熱交前後の静圧ヘッドは低い。この状態でポンプがトリップして管路の全域で圧力低下が起きると、熱交前後の静圧ヘッドは飽和蒸気圧まで割り込んで、水柱分離を起こしてしまう。更にこの状態で、末端にある程度の背圧がかかって逆流条件が成立すれば、下流から押し込まれて水柱分離空間(蒸気相)は消滅し、いわゆる再結合現象によってパルス的な圧力上昇が起きる。従って、**熱交であれ配管であれ、高所にこれらを配置するのは好ましくない。不必要に管路のレベルを高く上げるのは避けるべきである**。ここではポンプ吐出ラインを引用しているが、水柱分離が起き易いラインではすべて同じことが言える。また作動時に2次側に負圧を生じるような遮断弁を高所に設置することも避けるべきである。

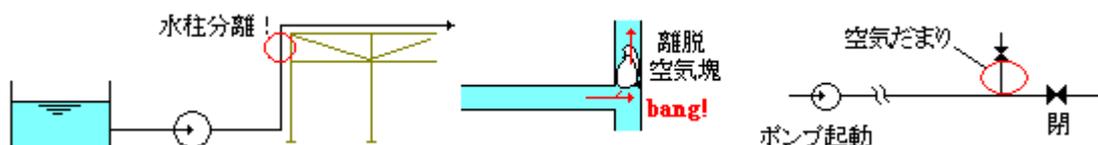


どうしても管路高さが高くなってしまう場合は、水撃解析を行って**水柱分離+再結合**の可否を確認すべきである。配置によっては水柱分離は起きても強い再結合は起きないかも知れない。強い再結合がなければ必ずしも管路高さを下げる必要はない(但し外圧強度はチェックする)。

(3) 管路の形状に対する配慮⁽⁷⁾⁽¹⁸⁾

特に水撃に強い配管形状があるわけではなく、水撃発生の際のセオリーを考えてケースバイケースで対処することになる。いくつか気付き点を記しておく。

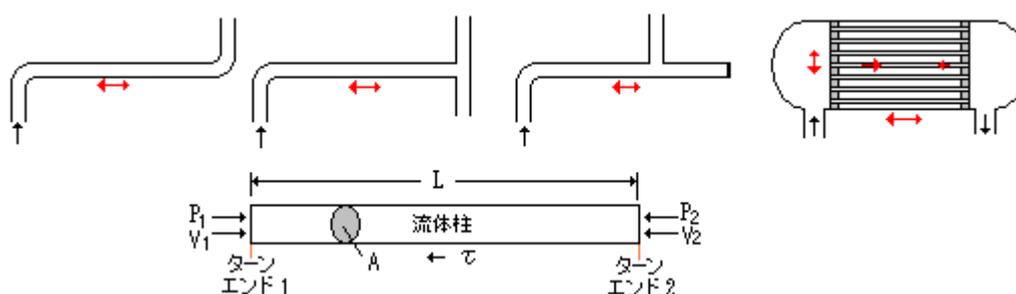
- ① ポンプ場近くで立ち上がって水平に移行するような配管は、立ち上がり部分で水柱分離を起こし易い。この立ち上がり部分の水柱分離は水平部分に比べ分散が少なく再結合しやすいため、不安/不快を引き起こし場合によって配管や計器・計装にダメージを与える。できるだけこのような形状はさけた方がよい。
- ② 管路高さに凹凸が多いと下流側の条件によっては水柱分離が連発して複雑になるのでできるだけ平滑な管路にする。また高所部分にエアポケットができて、スラギングの種になるので注意する。
- ③ ブロック弁の近傍に小径分岐管/バイパスなど空気が溜まりやすい部分を作ると、水撃時にスラギングではない、異常な圧力上昇を引き起こすことがあるので注意する。



(4) 配管/サポートの構造強化

水撃対策は水撃の緩和抑制だけには限らない。水撃荷重は短期荷重であるから、水撃時の圧力上昇が耐圧試験圧力を上回ることがなく、圧力降下による負圧が、最小設計圧力を下回ることがなければ基本的にその水撃荷重は許容できる。通常、圧力上昇については比較的問題が少ないが、大径薄肉管や内部がゴムあるいは樹脂ライニングされた管では負圧強度が問題視される。最小設計圧力が不明になっているか、なおざりになっているならフルバキュームを前提に新たに座屈チェックを実施すべきである。

実際の水撃による配管や機器の損傷は、配管よりも配管サポート/機器アンカ/土建基礎に多い。これは水撃時に生じるターンエンド間の不平衡力によるものである。ターンエンドは流体にとって突き当りになる部分で、エルボ(曲管)/ティ/鏡/盲などを云う。例えば対になったエルボ区間が長くなると、個々のエルボに到達する圧力波が遅れて差圧になり大きな軸力即ち不平衡力がこの区間に発生する(水平に長いラック配管などでは特に注意を要す)。もしサポートがこの軸力の作用を考慮して配置され十分に耐力を持っているなら問題はないが、無頓着に配置され脆弱な構造であるなら、サポート溶接部/アンカー/コンクリート基礎などに破損の恐れがでてくる。従ってサポート配置や構造は不平衡力の作用を前提にして決めるべきである(ローディングデータ設定でも然り)。なお不平衡力のオーダーは水撃解析による圧力波形を対になったターンエンドで同時刻に重ね合わせることで得られる。

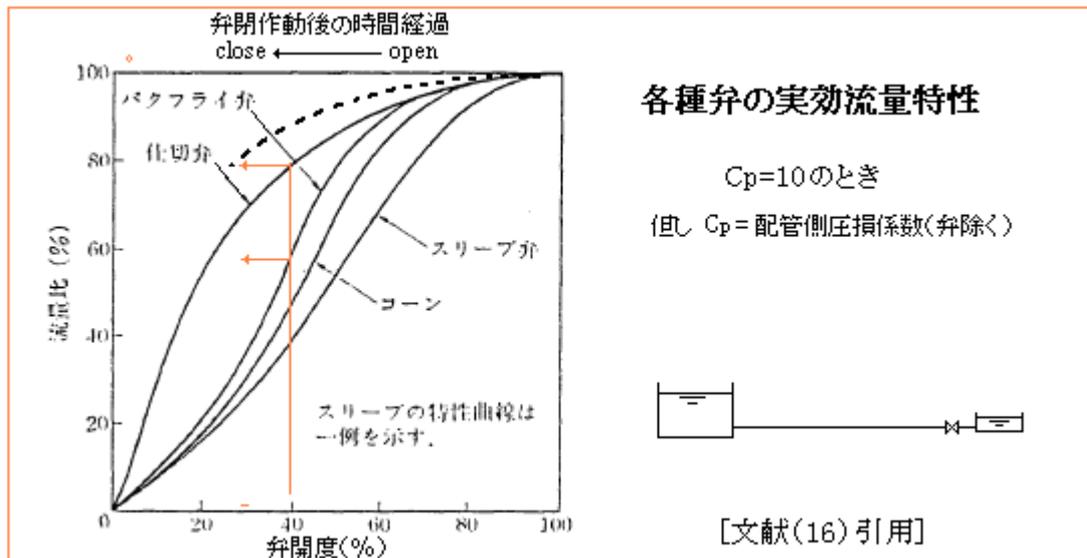


不平衡力については【FE-06-TM-015 過渡状態におけるターンエンド間の不平衡力】を参照のこと。

(5) 流量特性を考えた弁選定⁽²⁾⁽³⁾⁽⁷⁾⁽¹⁶⁾

弁の開閉作動に伴う水撃現象では、作動時間が短くなるほど水撃が激しくなるので作動時間を可及の範囲で長くとり、いわゆる緩閉鎖するのが望ましいとされる。その場合、弁のタイプによって緩閉作動の降下に、多少、差異が発生する。

管路の流量は殆ど一義的に管路の圧損で決まるが、その場合、厳しい絞り抵抗に惑わされて絞り弁の圧損だけを考えるのではなく、弁以外の配管圧損を含めてオーバーオールで管路圧損を考える必要がある。しかし、それでは弁の絞り抵抗の影響は見えてこない。そこで、弁以外の配管抵抗を固定して、弁開度-流量比の関係を表わしたものを下図に示す(この場合、流量比=任意開度におけるライン流量を全開時のライン流量で割ったもの)。



このグラフには見方がある。弁は100%開からスタートするので、弁閉鎖の場合は図の右から左に移動する。また仮に弁開度が時間に正比例するとすれば水平軸の弁開度を作動経過時間と読んでもいい。時間を追ってグラフをみてみると、当初70%開度程度までは仕切弁とバタフライ弁は一緒に、流量比はわずか10%程度しか減らない。しかしこれを過ぎると2つの弁には開きがでてくる。図に示しているように40%開になると仕切弁80%弱、バタフライ弁60%弱で約20%ほど差異がでる。そして30%開で最大30%程度の流量差になり、その後弁が全閉(0%)になるまで先細りに継続する。開度を時間に言い換えれば、当初1/3時間までは両者の流量(流速)低下は同程度に微弱で、その後仕切弁の方が高い流量(流速)を保持しながら全閉時間に至ることになる。グラフからわかるように仕切弁は2/3時間辺りを過ぎてから駆け込み的に流速がダウンする。すなわち非常に大胆に括って、仕切弁の閉作動は後半略1/3時間に集中しており、有効な全閉時間は殆ど1/3に短縮されている。

この点バタフライ弁は、初期1/3時間を除けば略々直線的に流速が低下している。大胆に括って言えば、バタフライ弁では有効な全閉時間は2/3程度に保たれている。

以上は、弁を除く配管側圧損係数 C_p が10の場合である。圧損係数 C_p が大きくなると、仕切弁の特性曲線は上図の中の破線のようにになる。これは長い管路(パイプライン)では、有効な全閉時間が更に短縮される傾向にあることを暗示している。

云うまでもなく有効全閉時間が短いことは圧力上昇(あるいは圧力降下)の増加を意味する。従って水撃防止の観点からは仕切弁よりもバタフライ弁の方が好ましい。ボール弁はバタフライ弁に近いが

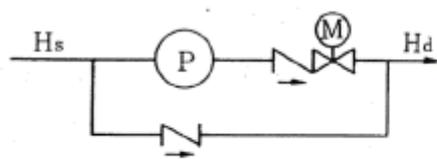
少し仕切弁寄りである。水道関係に使われるコーン弁はバタフライ弁より多少よくなる。また上図にはでていないが、ロート弁は水撃に強いと云われる。計装弁で云うイコールパーセンテージ弁は、バタフライ弁に近いが、リニア弁は仕切弁寄りと思われる。

(6) バイパス方式の採用⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽¹⁸⁾

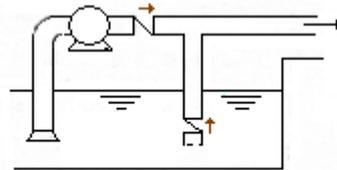
多少システムのなるが、ポンプやバルブにバイパスを設けることで水撃の影響を緩和できる。例えば長い吸込みラインを持つ管路では、下図(a)のようにポンプに逆止弁付きのバイパスをとって、吸込み側の圧力が上昇した時 & 吐出側の圧力が低下した時いずれも吸込側から吐出側にバイパスさせて、水撃圧力を緩和する方法がある。ポンプの停止は弁の閉鎖に似ているため、ポンプトリップでは、長い吸込ラインでは圧力がかなり上昇し、逆に吐出側では圧力がかなり低下するので、このバイパス方式はポンプトリップに有効である。またブースターポンプでは締切始動の場合、吸込側の昇圧を上流にパスさせることができる。

図(b)は図(a)の亜種ともいえる方式で、この場合吸込側の圧力上昇は考慮されない。ポンプ停止によって吐出側で圧力が低下し負圧になるとポンドから水が進入して過度な負圧を防止する。

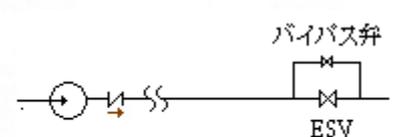
一方、図(c)は緊急遮断を要するラインに適用されるもので、遮断弁にバイパスバルブを設けて、両方の遮断時間をずらし、遮断弁1次側の圧力上昇と2次側の圧力上昇をともに緩和する。この方式は次節4.の(3)の2段階操作に等価であって実質上、緩閉操作になる。水撃解析によって時間-開度の関係は設定できる。



(a) ポンプバイパス方式



(b) ダブル吸上げ方式



(c) 遮断弁バイパス方式

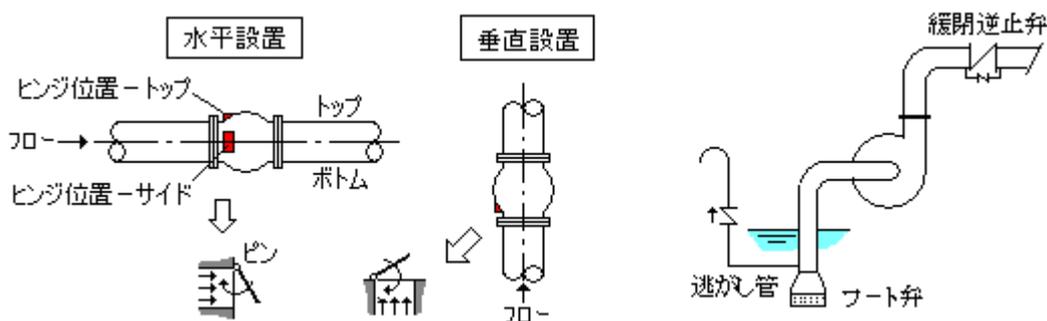
(7) 逆止弁に係わる配慮⁽⁶⁾⁽⁹⁾

逆止弁の設置に関連していくつかの注意点がある。以下これを記す。

- ① スイング式逆止弁の設置で注意すべきは、水平配管に取り付けた逆止弁の弁体ヒンジがサイド(脇)にこないことである。脇にすると閉じ遅れがひどくなるので必ずトップ(天)にくるようにすべきである。
- ② スイング式逆止弁を垂直配管に取り付けるのを良しとする考えがあるが、その反論もある。確かに垂直配管では弁体は自重によって直に閉まるかもしれないが、閉じ始めに遅れがでる可能性がある。強いて垂直に設置する意義は薄いのかも知れない。
- ③ 逆止弁を2個並列に設置して圧力脈動(振幅?)が低減したという報告もあるが、逆止弁間の流体が悪さして脈動を増幅することも考えられるので、慎重に検討すべきと思う。
- ④ ポンプの前後にフート弁と逆止弁をおく場合、フート弁と逆止弁の閉止時間のズレを考慮すべきという意見もある。給水槽の液面が低下した状態でトリップがあるとフート弁が速く閉じて、折角の

緩閉逆止弁が機能せず、ポンプケーシング内に激しい脈動が起こる恐れもある。緩閉逆止弁を使用するときは吸込み側に逃がしをとるべきと思う(下図参照)。あるいは後述の重錘式調圧弁を用いる。

- ⑤ ポンプ出口に逆止弁のみを設けて、吐出弁を省略することもある。この場合、吐出弁締切後ポンプ停止というモードがないため、通常のポンプ停止がポンプトリップということになる。この状態で起動・停止が繰り返されると逆止弁閉止に伴う衝撃音と振動によってガスケットが破損するといったトラブルが起きる恐れがある(事実ノンアスベスト系ガスケットが分解するというトラブルがある)。吐出弁はできるだけ併設して締切り後停止にした方がいいと思う。



4. システム対策

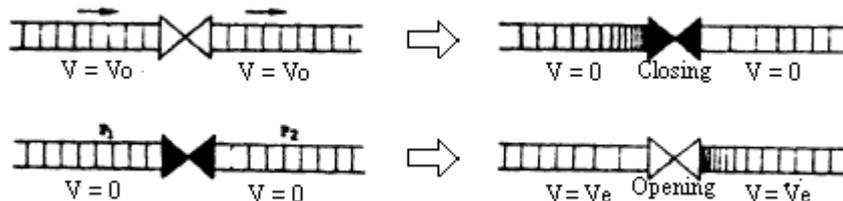
(1) 弁の緩閉/緩開⁽⁷⁾⁽¹¹⁾

これまで述べてきたように弁の開閉によってその前後の管路に圧力変化が起きる。すなわち

弁閉鎖(Closing)： 弁の1次側で圧力上昇、弁の2次側で圧力降下

弁開放(Opening)： 弁の1次側で圧力降下、弁の2次側で圧力上昇

これを粗密波で表現すれば下図のようになる。密の部分で圧力上昇、疎の部分で圧力降下が起きる。



これらの圧力上昇は弁の開閉速度に依存している。急激に開閉するほど即ち開閉時間が短いほど圧力の昇降が大きく、緩やかに開閉するほど即ち開閉時間が長いほど圧力の昇降が小さい。

水撃分野では次の簡明な区分で、弁の急開閉および緩開閉をわけている(目安的なもの)。

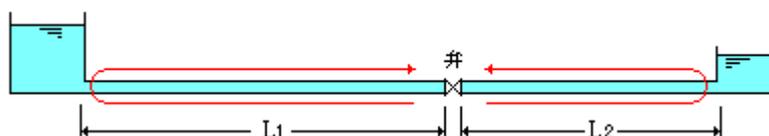
急開閉(急操作)： 弁の開閉時間が圧力(伝播)波の管路往復時間より短い場合

緩開閉(緩操作)： 弁の開閉時間が圧力(伝播)波の管路往復時間よりかなり長い場合

管路往復時間(t_r)は下記で定義される時間である(下図のモデル参照)。

$$t_r = 2L/a \quad (\text{sec.})$$

ここで L = 区管長(m)(下図の L_1 または L_2)、 a = 圧力伝播速度(m/s)



緩閉操作の時、いくら閉時間にすればよいか?についてはいろんな目安があるようだが、管路往復時間の3~6倍の範囲が相場ではないかと思う。

なお、弁の開閉時間が急であるか緩であるか、何か絶対的な目安があるわけではなくあくまでも相対的なものであることに注意すべきである。圧力波が往復する区間長 L がパイプラインのように長ければ、たとえ弁が 10 秒かかって閉じても急閉になる。逆にプラント内配管であってごく短かければ、仮に 0.1sec で閉じたとしても緩閉ということになる。圧力伝播速度についても同じようなことが言える。ヤング率の低い樹脂配管は伝播速度 a が遅くなるので往復時間 t_r は長くなる。

また前節 3.の(5)でも述べてように、弁のタイプによって実際に有効な開閉時間は異なっているので注意すべきである。

プラントにおける弁操作は、多くの場合、ポンプ等と連動したシーケンシャルな自動操作による。制御弁の緩操作を実現するには、大体の目安をつけ、**時間－開度－Cv 値の関係を設定して、実際に水撃解析を繰り返せばよい。**手動操作もあるが、予め目安をつけて試行的に時間設定すればよい。

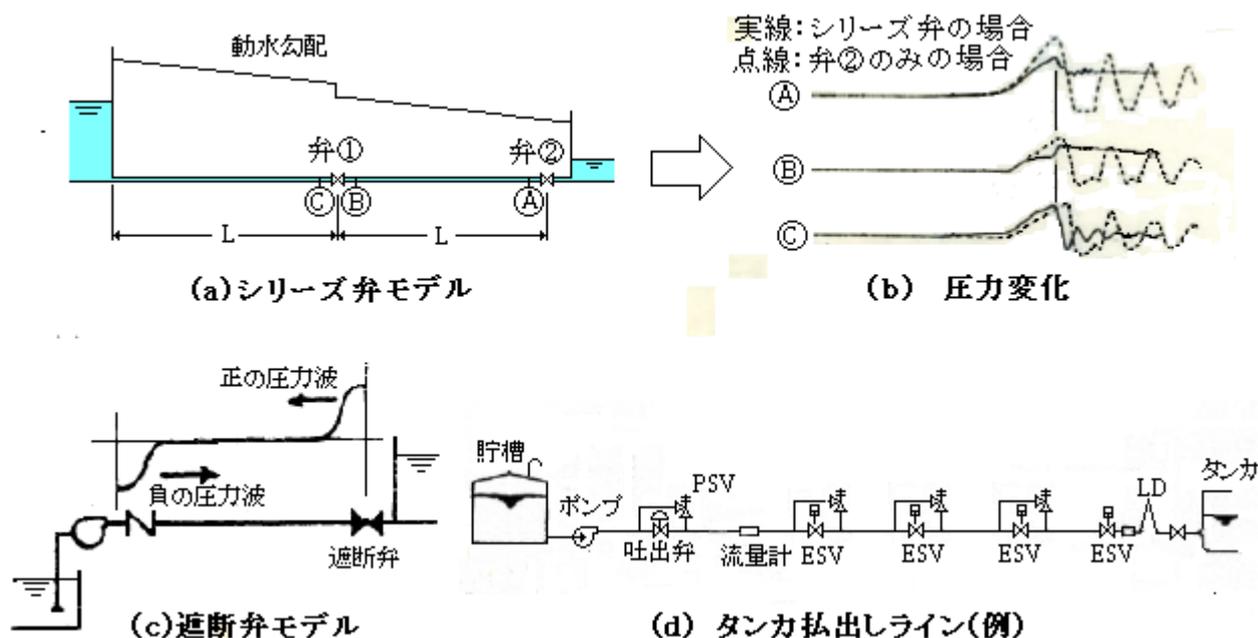
(2) シリーズ弁の操作⁽³⁾⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾

ここでいうシリーズ弁とは本来 1 個のブロック弁でいいところを、下図(a)のようにある間隔をおいて 2 個シリーズに設置したものである。この場合、次のような効果や傾向がみられる。

- (a) これら 2 つの弁を同時に閉じると、弁①で発生した負の圧力波と弁②で発生した正の圧力波が相殺し合って、弁②だけの場合に比べて圧力上昇が小さくなり、更に圧力脈動が解消する。
- (b) 2 つの弁を同時に閉じることができない場合、弁①を先に閉じると負圧による水柱分離のリスクがある。しかし弁②の方を少し先に閉じると負圧や圧力上昇は緩和できる。ただ余りに早すぎるとかえって緩和効果がなくなる。
- (c) 弁の開鎖速度が速くて(→急閉)、2 つの弁を同時に閉じて水柱分離のリスクがある場合は弁②をある程度先に閉じることで、弁②だけの場合に比べ圧力上昇や圧力脈動を低く抑えることができる。
- (d) 弁①を管路の上流側寄りに取り付けると水柱分離の発生リスクがでてくる。一方、下流側に取り付けると弁①直前で圧力上昇が大きくなる恐れがでてくる。

弁の開鎖速度即ち閉時間は、区間長さ L と圧力伝播速度 a に関係している。一方の弁からの圧力波到達時間(L/a)が早いと緩和傾向になる。とにかく余分に弁を追加することで、図(b)のように圧力上昇及び圧力降下を緩和する。その明細は水撃解析を実施することで得られる。

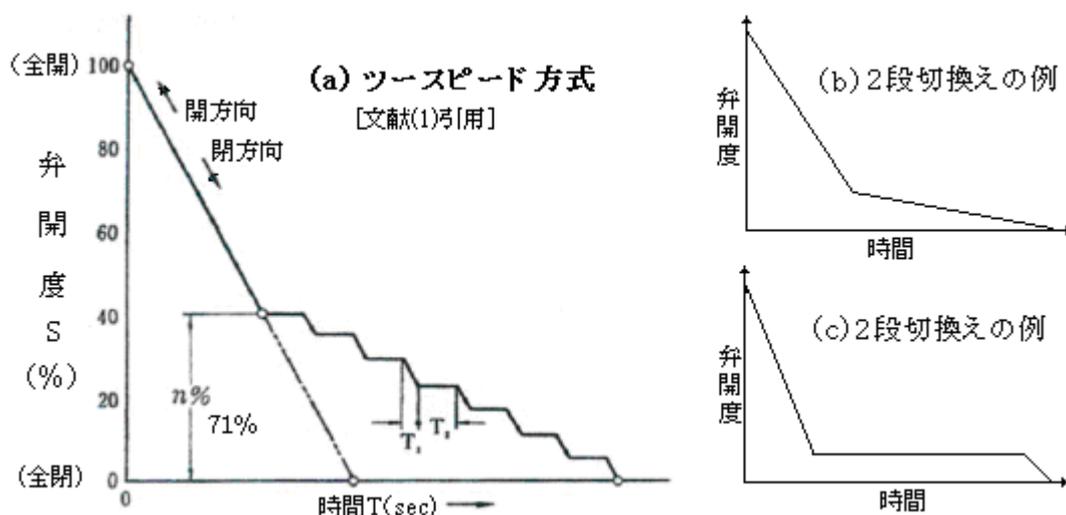
この方法は、石油などの荷役配管などで採用されているようだ。図(d)にその例を示す。この事例では 4 個の緊急遮断弁が設けられている。ローディングアーム(LD)に緊急離脱が起きると各遮断弁は 10sec で閉止するシーケンスが組まれている。なお各緊急遮断弁が閉じていると、区間は液封状態になるので逃がし弁(PSV)が付いている。図(c)はポンプ吐出ラインに遮断弁をつけたもので、ポンプがトリップすると弁を閉じるようにシーケンスが組まれている。トリップの際、ポンプ出口には負の圧力波がでるので、シリーズ弁と同じモードになって水撃が緩和される。



(3) 弁の2段階操作⁽¹⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹¹⁾

前項 3.の(5)で述べたように弁の流量特性は開閉動作の全工程で、一率ではなく、全開からある開度までは余り流量が低下せず、全開近くになって流量が急変する傾向がある。このため、弁の閉時間を長くとっても、実効の閉時間は短く、思ったよりも急閉鎖になって水撃が激しくなる。この問題は古くより”弁の **Stroking**”として知られ、最適化問題として議論されてきたが、結論的には閉操作過程の中間で閉鎖速度を変更するという、いわゆる **2段階操作方式**が最も水撃を緩和できるという結論になっているようである。

下図に代表的な2段階操作の例を示す。図(a)は荏原製作所で考案されたツースピード電動仕切弁で採られている弁の開閉方式である。管路が長くなると弁の閉時間を長くとする必要があるが、それにも限度があるので、流量が急変する小開度部分のみをゆっくり開閉するようにしたもの(全体の作動時間は短縮される)。電動操作の場合、中間開度まで直線的に絞り、それからタイマーで階段状に、寸動と寸停を繰り返して全閉するようになっている。また油圧操作の場合は、給油量を中間開度から変えてゆくようになっている。一見、複雑な操作に見えるが、製品としては調整目盛で調整して流速変化の割合を容易に変更できるようである。図(b)(c)は、図(a)を簡略化したもので、通常、スピードコントローラで制御される。(b)(c)の方が一般的と思う。



(4) ノンリターン弁操作⁽¹¹⁾⁽¹⁸⁾

ポンプトリップ直後の圧力降下に続いて逆流がおきるので、通常のポンプ送水管路ではポンプ出口に逆止弁が設けられているが、逆流時にスラミング(閉じ遅れ)が起きて圧力上昇が起きる。これについては後述のように種々の水撃緩和を考慮した逆止弁が考えられている。しかしポンプ吐出口には通常、吐出弁が付くので、これをトリップ時に閉止できるようにすれば、何も逆止弁を設ける必要はない。この趣旨で吐出弁と逆止弁の機能を合体させたポンプ出口弁を通常ノンリターン弁と呼ぶ。

ノンリターン弁には、バタフライ弁/仕切弁/ロート弁/コーン弁/ボール弁/ニードル弁などの弁種が使用される。駆動方式は、停電時に作動する必要があるため油圧駆動あるいは制御用電源や直流電源による電動駆動になる。ポンプ回転数やトリップ信号とシーケンスが組み込まれている。

ロート弁やコーン弁は流量特性が良く用水設備などで使用される。その場合、通常運転における流量制御やポンプ始動/停止では電動駆動、ポンプトリップ時では油圧駆動に切り換えるようにしている。前者の電動駆動では、長い管路のとき2段操作方式が採られている。これは緩開閉によって始動/停止の際に発生する過大な圧力上昇や負圧を緩和するものである。後者の油圧駆動でも、2段操作方式によって緩開閉を行うことが多いが、簡便に一樣速度で開閉する方式も採用されている。開閉時間については過不足によるトラブルも多いので、水撃解析など十分な事前検討が望まれる。

なお、2段操作方式による緩開閉の場合、ある程度の逆流を想定して、吸込み槽の波打ちや回転部分の逆転などに関して検討しておく必要がある。

(5) 回転数制御など⁽¹⁾

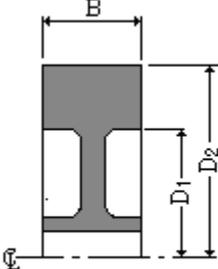
用水設備では停電時も供給が止まらないように、エンジン駆動によるポンプを電動の主ポンプに併設して運転を継続することがある。その場合、吐出側仕切弁を規定開度のまま(つまり半開きで)、起動/停止せざるを得ないことがあり水撃が問題になるので、起動/停止時におけるエンジンの回転数を制御するようにしている。これはやや特殊な例であるが、ポンプの回転数に制御を効かせて、弁の開閉時に流量(流速)をダウンして水撃ポテンシャルを削る工夫はよく行われている。特に省エネの観点からインバータ制御によるポンプ回転数制御が行われるケースが多いが、これを適用拡大して弁操作によらない直接的な流量制御による水撃対策が可能である。

5. 水撃緩和機器

(1) フライホイール(はずみ車)⁽¹⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁹⁾⁽¹⁸⁾

ポンプトリップによって動力が失われると、ポンプ回転体は急激に失速して流量がダウンし圧力降下(負圧化)が起きる。更にこの負圧化が著しいと水柱分離を起こし再結合して異常圧力上昇を引き起こす。これを防止するには、ポンプとそのモータの間にフライホイールを取り付け、ポンプ回転部分の慣性効果(GD²)をアップするのが最も効果的である。動力が失われてもポンプ回転部分は慣性力によって回り続けようとするが、慣性力は摩擦に急激に失われる。フライホイールの追加はこの慣性力の失墜を補って延命を図るものである。汎用ポンプによる中小規模のポンプ設備では、このフライホイールの追加で負圧防止を行うことが多い。

フライホイールはポンプとモータの継手部に取り付けられることが多いが、大きなGD²が必要なときは、ポンプ～モータ間にはずみ車装置を設置する。因みに前者のフライホイールのGD²は次の式で計算できる⁽¹⁸⁾(寸法は通常、ポンプメーカーで標準化されている)。

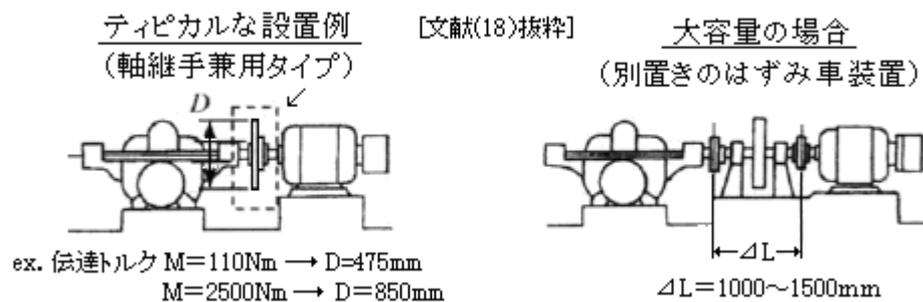


$$GD^2 = Gg\{(D_1^2 + D_2^2)/2\}$$

$$G = (\pi/4)(D_2^2 - D_1^2)B\rho_m$$

但し GD² = 慣性効果(Nm²), B = フライホイール幅(m)
 D₁ = フライホイール内径(m), D₂ = フライホイール外径(m)
 ρ_m = ホイル比重量(kg/m³), g = 重力加速度(9.8m/s²)
 N_n = ポンプ回転速度(min.⁻¹)

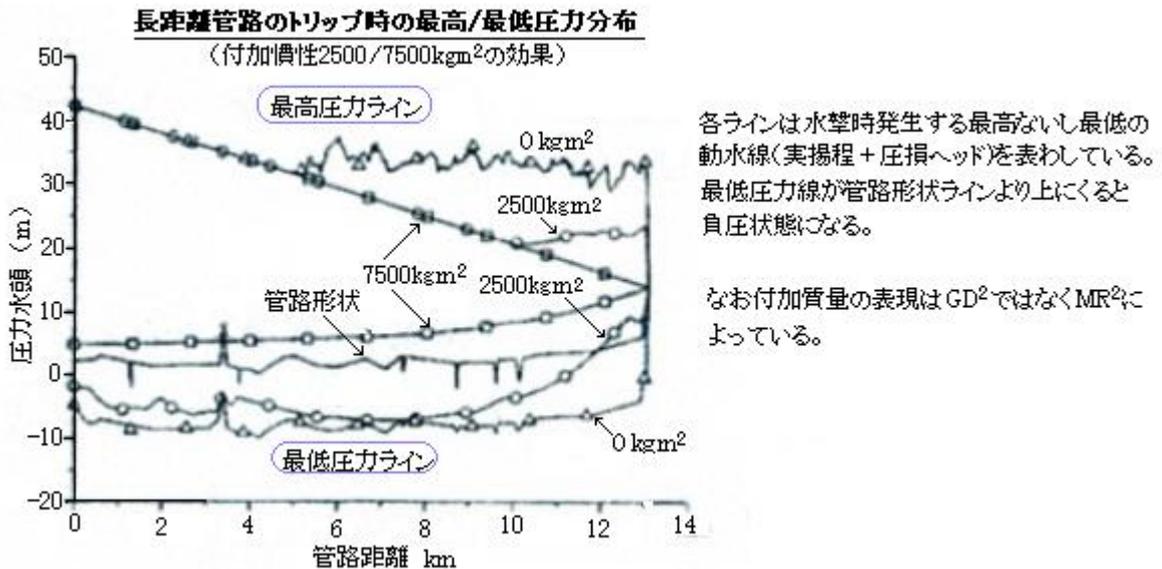
但し D₂については 周速(U = πD₂N_n/60) < 許容周速であること。
 許容周速はSC材のとき65m/s、SF材のとき80m/s



フライホイールはサージタンク等と比べ、より確実な負圧対策になるが、設置に際しては次の点に注意すべきである。

- ① 長い管路では負圧化が著しく、フライホイールが大きくなって設置が難しくなることがある。
- ② 水中ポンプには取り付けられない。また、縦形モータ使用のため軸ポンプには、フライホイールは付けにくい。
- ③ フライホイールを取り付ける場合 GD²が大きくなるので、あらためてモータの使用頻度や始動方式を検討し確認する必要がある。またポンプの軸受構造もチェックする必要がある。
- ④ ポンプ始動/停止時の吐出側電動仕切弁の開閉の扱いを見直す必要がある。通常フライホイール付きポンプの場合、始動時は全閉で立ち上げてよい(締め切り運転でよい)が、停止時は全開のまま電源をカットした方がよい(あるいは弁の2段操作を採用する)。従来のように、弁の閉時間が短すぎると電動仕切弁を全閉してからポンプを停止するシーケンスでは、全閉前の10→0%開度で急激な流量変化が起きて圧力降下/上昇が起こることがある。また緩閉逆止弁を使用する場合、停電時にバイパス子弁が動作緩慢になることがある。全開停止ではこれらが回避できる。

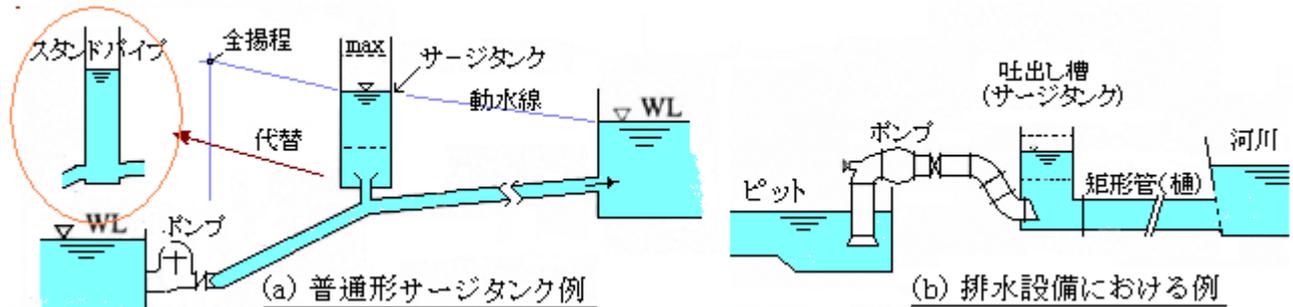
フライホイールの効果の例を下記に示す。



(2) サージタンク(普通形サージタンク)⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹⁸⁾

サージタンクは自由表面を持った水槽で、管路の圧力降下(負圧)を防止するとともに圧力上昇を吸収する。通常、ポンプ管路の吐出し側あるいは管路に設けられた閉止弁の上流などに設置される。

下図にその典型的な例を示す。この場合、ポンプがトリップして流量がダウンし圧力降下が起きると、サージタンクから管路側に水が補充され圧力降下が抑制される。またポンプ始動や逆止弁急閉などで圧力上昇が起きると、管路からサージタンクに水が放流され圧力上昇が抑制される。



サージタンクはシンプルで確実な作動が期待できるが、ポンプ吐出管路に設置される場合、少なくとも、その位置における動水圧(実揚程+圧損)に相当する水面高さを保持する必要がある。このためポンプ揚程によってはタンクの高さが非常に高くなることもある(これが最大の欠点になる)。

サージタンクを採用する場合には次のような注意点がある。

- ① ポンプの始動/停止等による管路の流量変動に対して水面変動が大きくなるように十分な断面積を持たせる(スタンドパイプでもいいが、それなりの断面積が必要である)。
- ② 負圧発生防止に対して、負圧発生予想範囲の中央にタンクを設置する。
- ③ オーバーフローの起きないタンク高さにするか、オーバーフローラインを付設する。
- ④ 作動の過程でサージタンクが空になったり送水管中に空気が入らないよう十分な容量にする。

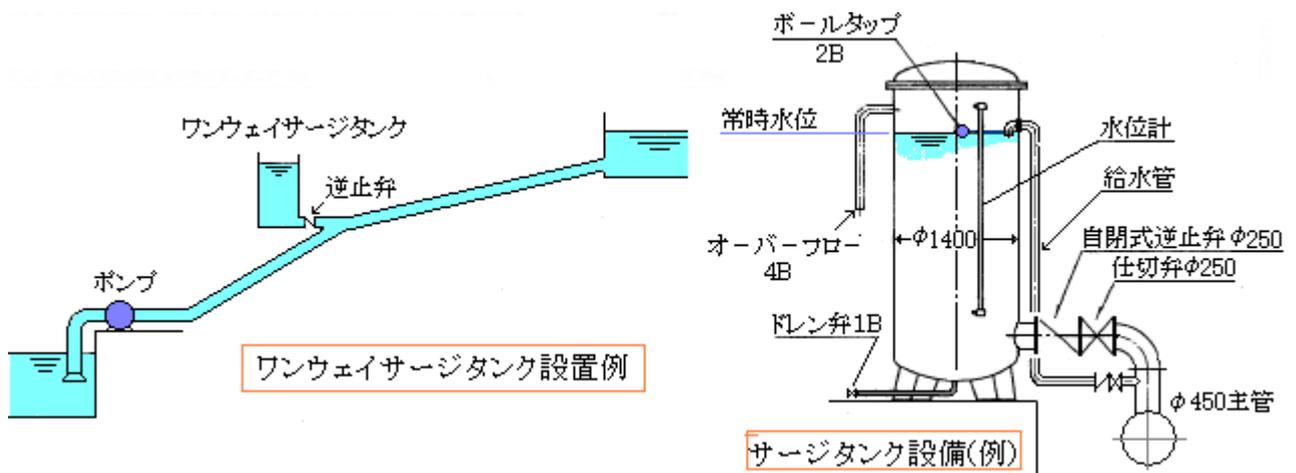
なおサージタンクは管路圧力の低下とともに作動するので次項のワンウェイサージタンクの場合のように複数個設置する必要はない(ただサージタンク出入口ノズルの流れ抵抗(流量係数)には注意)。

水撃時の水面降下量、水面上昇量および断面積などは、**R. S. Jacobson**の線図から得られる⁽¹⁸⁾。

(3) ワンウェイサージタンク⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾⁽¹⁸⁾

我が国では、設備費や環境問題の点から、前述の普通形サージタンクは余り使用されておらず、圧力降下→水柱分離・再結合のパターンを重視して、専ら**圧力降下(負圧)防止機能のみを持ったワンウェイサージタンク**が多く使用されている。この場合、入口に付く逆止弁の作動に依存するためある種の不安がつきまとうが、実績的には殆ど問題がないようである。

ワンウェイサージタンクは下図左に示すように、逆止弁(一般にはスイング式)を介して吐出管に接続される。通常運転時は管路の圧力が高いので逆止弁が閉じられておりタンク液面に変化はない。ポンプトリップが起きて管路の圧力が低下しタンク側の圧力が管路側より高くなると、逆止弁が開いて管路側に水が補給され、更に管路圧力が低下して水柱分離に至るのを防止する。通常、単独で負圧防止を担うが、場合によってはフライホイールと併用されることがある。

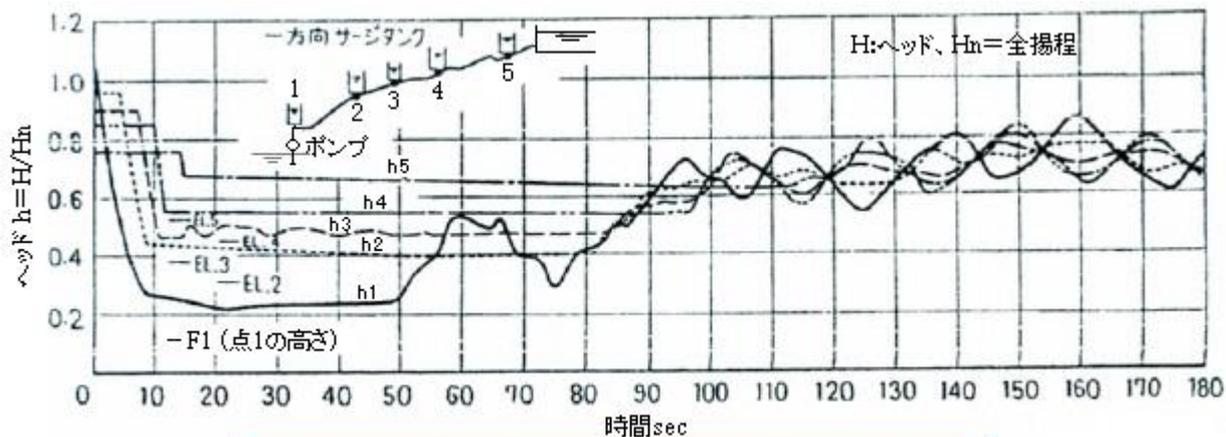


サージタンクの特徴及びその設計ポイントは次のとおり。

- ① 通常、タンクから管路に補給される水量は少ないので、タンクを高くする必要はなく、その点で普通形サージタンクより経済的である(景観的にも目立たない)。
- ② ただワンウェイサージタンクは管路圧力がある程度低下してから機能するのでサージタンクとして有効な管路長さは普通形サージタンクに比べて短い。故に管路が長い場合や管路に変化が多い時は、複数以上のタンクが必要になる。
- ③ またこのタンクは普通形サージタンクのように圧力上昇を直接防止する機能はない。ただ著しい圧力降下を防止するので、その反射波としての圧力上昇を間接的に防止していると云える。
- ④ 逆止弁は通常運転では閉じたままなのでタンク内の水はいわゆる死水状態にある。水道設備などでは水のリフレッシュを考慮する必要がある(例えば、上図右の給水管&オーバーフロー管)。
- ⑤ 屋外に設置される場合が多いので、寒冷地では凍結の恐れがあるので対策が必要である。
- ⑥ 逆止弁は重要な機能を担うので、2個並列に設置して、万一の場合の補完機能をもたせる場合もある(例えば農水省計画基準⁽¹⁸⁾など)。
- ⑦ ポンプ急停止でタンクがいったん機能したあと、ポンプが再起動し再び急停止する場合を想定してできるだけ迅速に満水に戻せるようにしておかねばならない。そのため管路からのタンクへの補給水管は大きくとりフロート弁は信頼性のあるものを使用する(上図右を参照のこと)。

- ⑧ 容量や設置場所あるいは効能などについては、水撃解析によって確認すべき。その場合、給水槽や受水槽の水位を最低水位にセットするなど、最も厳しい条件で計算する。なお管路に空気が入るのを嫌う場合などでは、安全側にタンク容量を計算値の2倍にすることも考えられる。

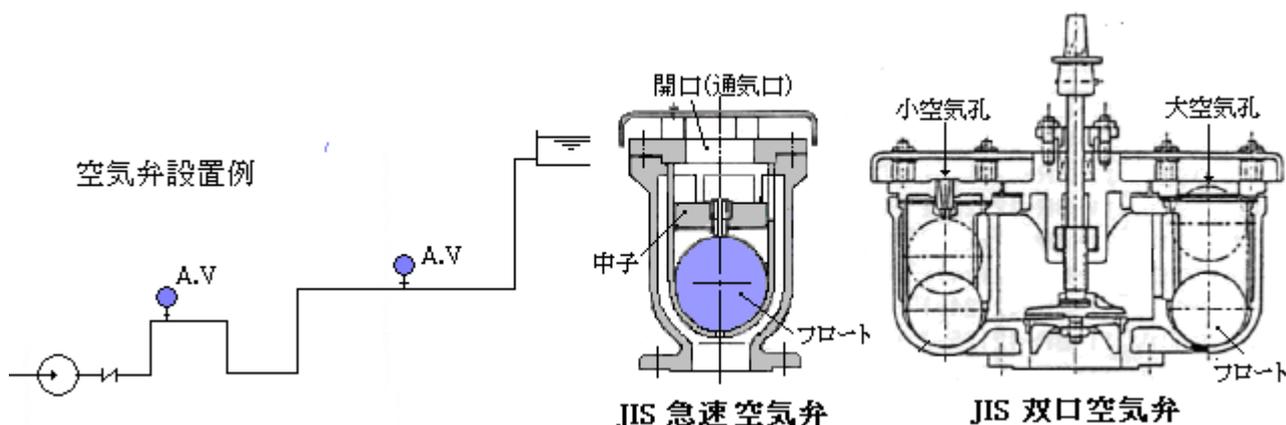
下記に5個のワンウェイサージタンクを用いた例を示す。



4つのワンウェイサージタンクが取り付けられている場合の水撃計算結果

(4) 空気弁(バキュームブレイカ)⁽²⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹⁸⁾

空気弁は管路の中途にノズルを設けて主管に取り付けられ、当該管路部分の圧力がほぼ大気圧を下回って負圧になると、空気を吸い込んでそれ以上の負圧化を防止する。更にその後、管路の圧力が回復すると逆に吸い込んだ空気を大気に排出する。旧来から空気弁は用水設備で管路に滞留した空気を排出するために使用されているが、**水撃対策に使用する空気弁は、急速吸気&急速排気の機能を持ったものを指している**。下図に示す双口空気弁は2つの空気孔を持ち、小空気孔からは通常運転時に溜まった空気を排出し、大空気孔から水撃時、大量の空気を吸入し排出する。

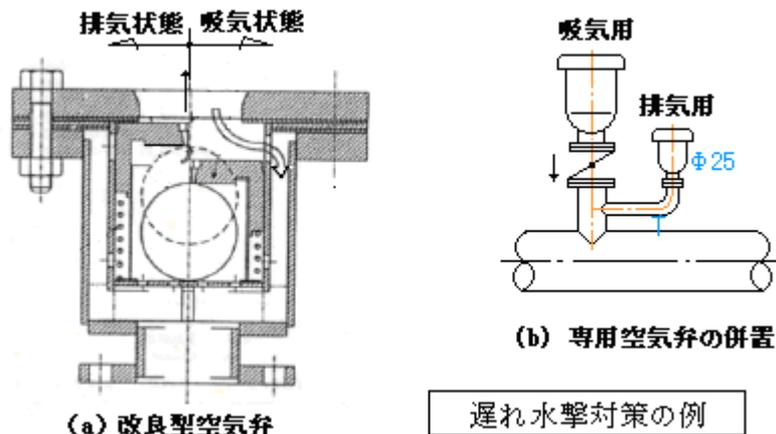


水撃対策における空気弁のメリットは、①安価で経済的なうえに、②構造が簡単で、③設置場所にそれほど大きな制約がないことである。ワンウェイサージタンクに比べれば明らかに差異がある。またデメリットは、①確実な作動のため点検が必要であること、②空気の排出工程でかなり大きな圧力上昇が発生する恐れがあること及び③管路内に空気が残り再起動に際して2次的なスラギング(空気塊がスルーした後に起こる水塊の衝突)を起こす可能性があることである。特に

デメリットの②と③は要注意である。安価であるからといって、ろくに検討もせず空気弁を乱用するのは考えものである(必ず解析で確認したい)。②の”遅れ水撃”の対策としては、次のようなものがある。

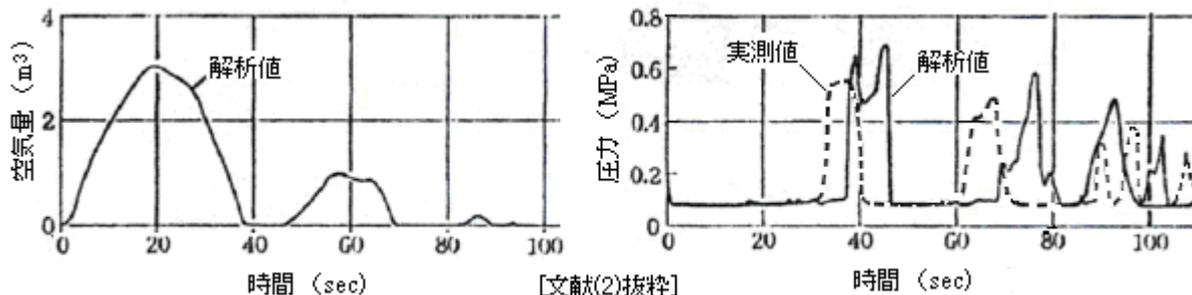
- (i) 吸気用通気口と排気用通気口を分離した改良型空気弁⁽⁴⁾を採用する(下図(a))。
- (ii) 吸気用の大径空気弁と、排気用の小径空気弁を併置する(下図(b))。
- (iii) 同様に 2つの空気弁を併置し排気用の空気弁接続管台にオリフィス挿入。

いずれも排気用の孔を小さくして急排出によって生じる水柱の衝突速度の低減を狙ったものである。



デメリットの③については、再起動前に管路内の空気の排除作業を十分に行うことが肝要である。

多くの水撃解析プログラムでは、空気弁モデルが扱える。ただかなり仮定をおいて設定されているので時間的に少しずれがあるが、排出時の圧力上昇は多少高めながら略々、実測値と合うようである(下図例)。



(5) 急閉逆止弁と緩閉逆止弁⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾⁽¹³⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾

一方向の流れを許容する逆止弁は、過渡状態においてポンプ上流側や分岐先などからの逆流を防止する働きをするので、本来、非定常的な管路要素である。この逆止弁において避けがたい過渡現象はスラミング(閉じ遅れ)である。すなわち、逆流が始まると同時に弁体が閉じることはなく、かなり逆流が本格化してから急激に(瞬間的に)全閉し、大きな衝撃音や振動および過剰な圧力上昇を引き起こすという現象である。

スラミングは、”逆流速度の急激な上昇”と”弁体廻りの流れ構造”に原因があると云われる。前者は逆止弁自身の問題ではなく管路自身の問題である。後者は弁体が閉じるとき、弁体の閉じ動作とその廻りの複雑な流れの相関関係によるものでCFD(流動解析)的な問題といえる。しかしCFD的な扱いは進んでおらず、実際の逆止弁のスラミング対策は次の2つの構造対策に集中している。

- ① 急閉逆止弁、
- ② 緩閉逆止弁

逆止弁の弁体は、リフト式にしるスイング式にしる、弁体自身の自重と背後からの流体力によって閉じる。①の急閉逆止弁はこれら閉じ力にバネや重錘による閉じ力を加算したものである。ただ、この対策は本質的には、前4の(1)項で述べた弁の急閉操作であるから、圧力上昇そのものは解消できない(通常程度の圧力上昇に抑える)。一方、②の緩閉逆止弁は、ある程度の逆流はやむを得ないとしてひたすら瞬間的な全閉を回避するものである。そのため、最後まで小さなバイパス流れを残しておき、最終的にその流れを閉じて衝撃の規模を弱める。従ってこの対策は前4の(1)項で述べた緩閉操作とは本質的に異なっている(よく混同されるので注意のこと)。

ここで急閉逆止弁と緩閉逆止弁をどう適用区分するか(使い分けるか)? 一般には、

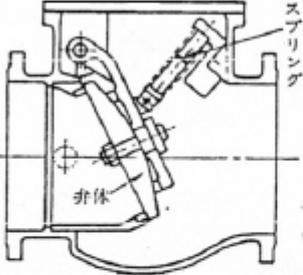
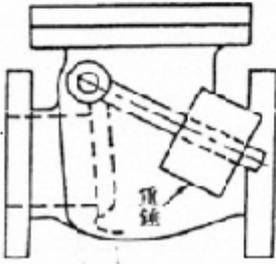
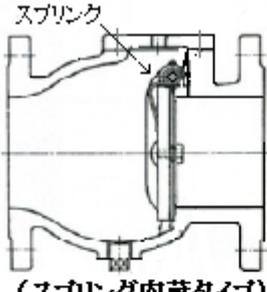
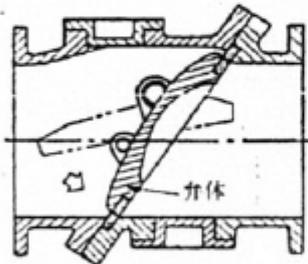
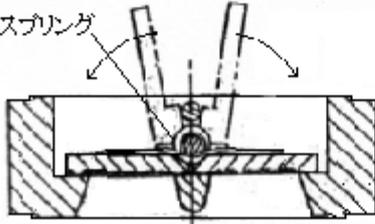
- * 管路が短くて圧力波の戻りが速い場合 あるいは
 管路が短く実揚程が高くて逆流が急増する場合 → 急閉逆止弁
- * 管路が長く流体慣性力が大きい場合 あるいは
 ポンプが大きくてある程度の逆流が許せる場合 → 緩閉逆止弁

ただ現実、明確な使い分けは難しいので、まず急閉タイプを検討し圧力上昇が耐圧試験圧力を越えるときは緩閉タイプの採用を検討するのが普通のような(これらの検討は水撃解析によるのが望ましい)。

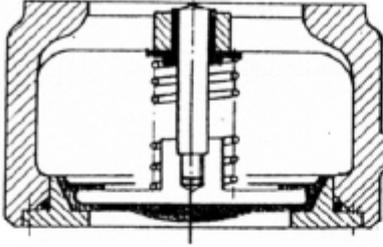
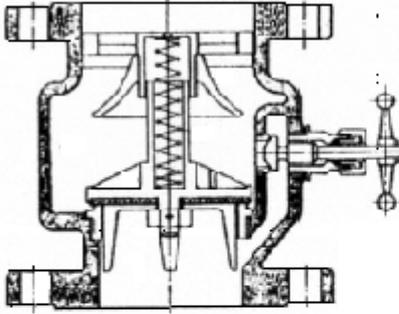
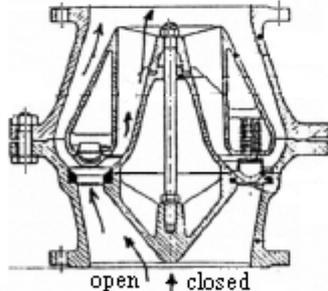
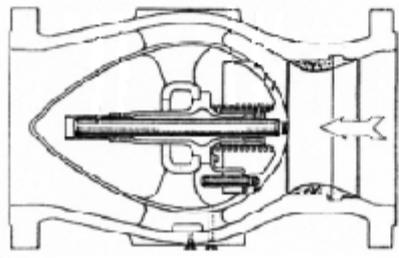
さて急閉逆止弁には、表 Y-1 及び Y-2 に示すようにいろいろなタイプがある。バネなどで閉止機能を強化したものは総じて**運転時の圧力損失が大きくなり、開状態を保つ為の最小流速が高くなる**。特に最小流速が維持されないと、弁体が不安定になり損耗が速くなるので注意を要する。ノズル逆止弁は総じて価格が高いが圧損が少なく機能性が高い。

また緩閉逆止弁には表 Y-3 のようなものがある。バイパス的に逆流の一部をポンプ側に放流するものが主流になっている。圧損は通常のスイング式逆止弁と同程度で気にならない。

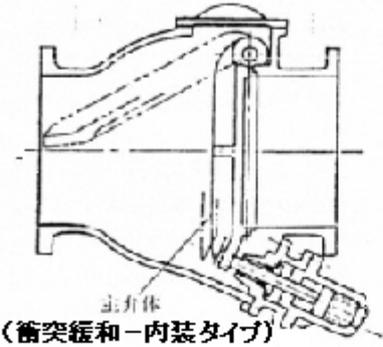
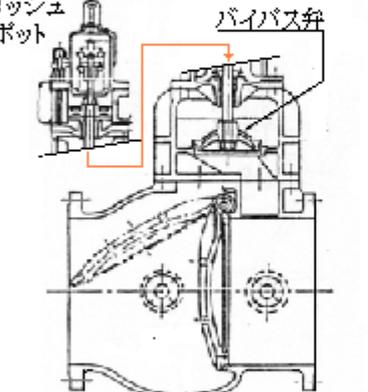
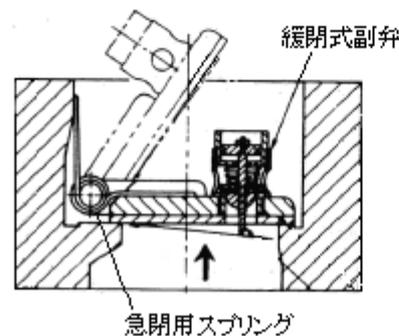
表Y-1 急閉形逆止弁(概要)

タイプ	構造	プロフィール
弁座急傾斜形 スイング式逆止弁		<p>便座を鉛直線に対し約30度以上、急傾斜して弁体の全開の角度をできるだけ抑えた構造。この場合、弁体の往復角度が小さい上に閉鎖トルクが大きくなるので、汎用のスイングチェックに比べ急閉効果が期待できる。通常、弁体はフリーであるが、スプリングを付けて急閉効果を補強したものもある。圧損は汎用スイングより大きくなる。</p>
重錘付き スイング式逆止弁		<p>弁体にカウンターウェイトを付け、その閉鎖トルクをアップした構造。弁体に重しを重ねたり肉厚を増やした内蔵型と、弁体軸を外部まで延ばしてカウンターウェイトを付けた外装型がある。</p>
スプリング付き 急閉 スイング式逆止弁		<p>スプリングで自閉力をアップしたもので、最も汎用的な構造。弁体軸にコイルバネを入れ弁体の背でもたせた内装型と、貫通した弁体軸にコイルバネをセットした外装型がある。欠点としては圧損が大きいことで、2~5の圧損係数となる。</p>
ティルティング式 逆止弁		<p>弁体の少し上に横通しの軸があり、バタフライ弁とスイング弁の長所を兼ね備えている。即ち正負の回転でトルクが小さく、偏心によって正流中で開/逆流中で閉になるようになっている。弁座への離着陸が容易で弁座への負担が少なく、小さなトルクで回転するのでスラミングが少ない。ただ、短管路で逆流開始時間がごく短い時、スラミングの懸念があるので、ダッシュポットで緩閉機能を付けることがある。圧損はかなり低めに抑えることができる。圧損係数は0.8~1.0程度。</p>
ダブルドア式 逆止弁		<p>半月状の弁体を振りバネの力で弁座にぴったり押し付けられる構造。弁体が半分になった分、早く閉まりスラミングが少ない。また軽量でコンパクトなので、閉止時の衝撃が少ない。DUOチェックとして知られ、API規格がある。弱点としては、構造的にストレスが集中し疲労破損が懸念されること、多少圧損が大きくなること。</p>

表Y-2 急閉形逆止弁(概要)

タイプ	構造	プロフィール
スプリングリフト式 逆止弁	 <p style="text-align: center;">はさみ込み</p>	<p>通常の垂直配管用リフト式逆止弁にコイルバネを装着して自閉力を付加したもので、閉じ遅れはすくない。水平でも垂直でも設置可能。いろいろのバリエーションがあるが、流れに乱れにさかちってバネ力が働くので <u>圧損が大きい</u>。圧損係数は2.5~10ぐらいになる。</p> <p>ストロークを短くしたものは、古くから <u>サイレント逆止弁</u> と呼ばれてきた。</p>
スモレンスキー 逆止弁		<p>スプリングリフト式逆止弁のひとつ。スプリングによる自閉力とともに、上方に傘型のじゃま板で逆流の向きを変えて逆流の勢力をそくため、ボディの胴にひとまわり大きなスペースを備えている。ボディをアングル型にした水平配管用の逆止弁もある。</p>
ノズル逆止弁	 <p style="text-align: center;">open ↑ closed</p>	<p>流線形のインターナルを持ち、コイルバネの自閉力で急閉する構造。断面がなく<u>圧損は少なく</u>汎用のスイングチェックと同程度である。左図は <u>西独DEMAG社</u> のもので大口径用である。U字上の弁体を4個のコイルバネで保持し、流体は先端のロケットから弁体の内と外を通して滑らかに流れる。気体の場合も微圧でタイトシャットが可能。</p>
ノズル逆止弁		<p>左図は <u>オランダMOKVELD社</u> のノズル逆止弁である。中央のロケットの先端の半球状の弁体が、センターガイド方式でスプリングの加勢を得て弁座に着地するようになっている。DEMAG社のもと同様に弁体の摺動部やスプリングが直接、流体に曝されないで <u>エロージョンなどの損傷を受けにくい</u>。圧損も同様に少ない。コンプレッサラインにも使用。<u>シートが交換できる</u>ので、メンテ上有利である。</p>

表Y-3 緩閉形逆止弁(概要)

タイプ	構造	プロフィール
主弁緩閉形 スイング式逆止弁		<p>弁体にクッションを持たせて緩閉し圧力上昇や衝撃力を緩和する構造。クッション効果を与えるため 油圧ダッシュポットが使われている。弁軸を貫通させて、外部にダッシュポットをつけたもの、弁体の自由端にダッシュポットを付けたもの、あるいは小弁を設け、そこに小さなダッシュポットを付けたものなどがある。圧損は汎用スイングとあまり変わらず、0.8~2.0程度の圧損係数になる。一般に実揚程の低い管路に使用されている。</p>
バイパス付き 緩閉形 スイング式逆止弁		<p>圧力上昇を始めた吐出側の水の一部を逆止弁のバイパス部分からポンプ側に流すことで、逆止弁に緩閉効果をもたせたもの。主弁をかかわす形がバイパス弁(緩閉弁)が内蔵されている。常時は主弁が開けるように緩閉弁はバネで吊り上げられている。逆流が始まって主弁が開けると水流が緩閉弁を閉じる方向に逆流するが、これに取り付けられたダッシュポットの抵抗で緩やかに閉じられる。比較的高い揚程でも使用可。圧損係数は1~2程度で、余り大きくない。</p>
緩閉式副弁付き 緩閉形 スイング式逆止弁		<p>通常のスプリング付き急閉スイングチェックの弁体に、シリンダーによってブレーキを利かせて緩閉鎖する副弁を設けたもの。急閉逆止弁+緩閉逆止弁の機能をもっている。元々急閉機能があるので、閉止時の圧力上昇が低い上に、主弁弁体が閉じた直後に、逆流の一部をポンプ側に流しながらゆっくり弁を閉じるので無水撃に近い状態が実現できるようなのである。</p>

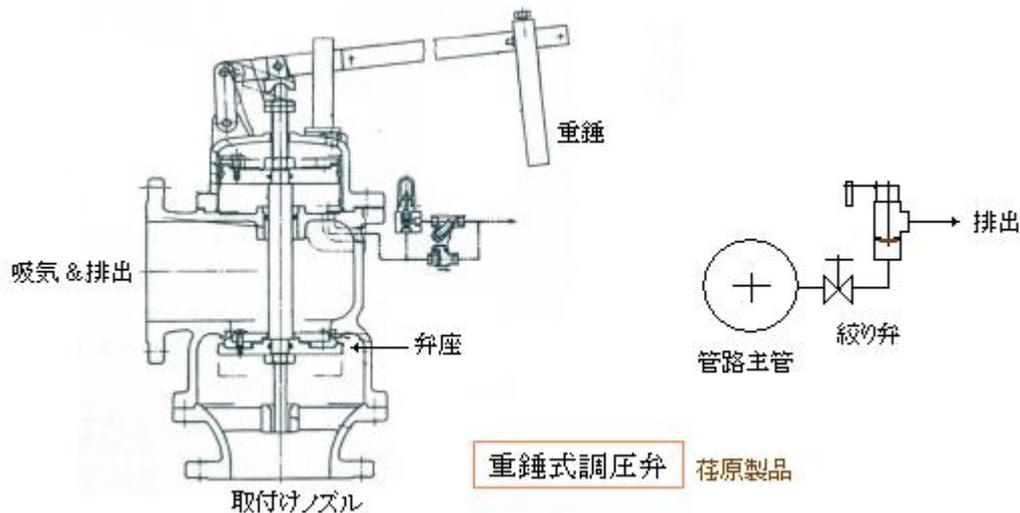
(6) レリーフ弁類⁽¹⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾

水撃による圧力上昇に対して通常の安全逃がし弁が作動するかという問題は、未だ決着がついてはいないと思う。パルス波的な圧力波に対しては殆ど応答は無理だと思う。レリーフ弁が作動したとしても吹き始めの遅れ、吹き出し時吹き出し中のチャタリング(→弁座損傷)、吹き出し液の回収等に問題が残る。そのため、通常のバネ式逃がし弁は余り使われていないように思えるがどうだろうか？

特許製品になると思うが、インターナルにスリットを設けその周りをフレキブルチューブで被覆してその外面に一定のガス圧をかけてバランスさせ、内部の液圧が上昇するとチューブが変形してスリットから液が吹き出しレシーバに導かれるような特殊なレリーフ弁もあるようである。

そのほか、レリーフ機能を有する特殊弁として**重錘式調圧弁**がある(下図参照)。この弁はポンプトリップ対策に有効である。定常運転では、内圧によって弁は閉じられているが、トリップして内圧が下がると重錘によるテコが打ち勝って弁が開き外気を吸い込む。続いて圧力が上昇すると水が排出され圧力上昇を阻止するが、内圧がテコに打ち勝つと弁が閉じる。なおこの場合、調圧弁と管路の間に絞り弁があって弁体に作用する静圧/流速は抑制されるので、弁の作動は緩閉になり衝撃は緩和される。

この弁は以上のように、ポンプ吐出弁と逆止弁が合体したような機能を持っているが、逆流水が外部に排出されるので、フート弁と併用しても支障がない(前述3の(7)④を参照のこと)。



(7) エアチャンバ(空気槽) (2)(6)(8)(12)

エアチャンバは圧力変化による空気(気体)の膨張と収縮を利用したもので、管路に接続されてその部分の管路圧力にバランスした圧力を持った**圧縮空気を上部に蓄えた密閉水槽**である。例えばポンプがトリップして管路圧力が低下したときには、エアチャンバから管路に水を補給して圧力低下を緩和し、その後、管路圧力が上昇に転じると管路から水を受け取って圧力上昇を緩和する。

機能的には“大気”が“圧縮空気”に置き換わっただけでサージタンクと同じであるが、圧縮空気の保持圧を管路圧力(即ち管路の動水圧)にマッチさせているので、**サージタンクのように高くする必要がなくコンパクトにできる**。

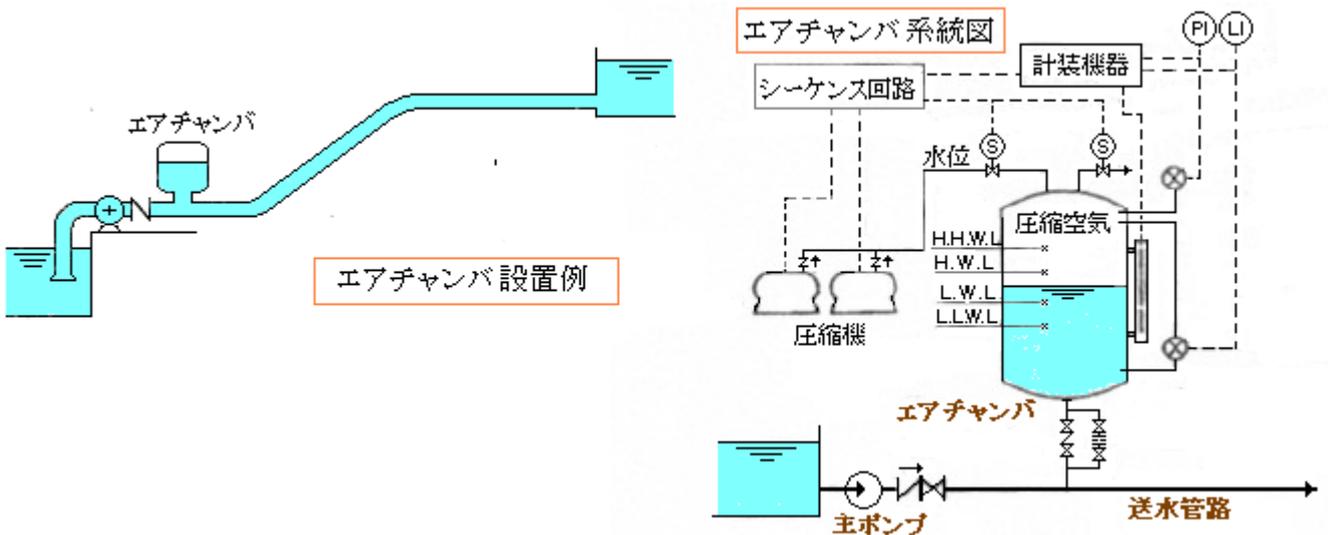
国内では管路の規模が小さくワンウェイサージタンクが主流で、エアチャンバは傍流になっていると思うが、次のようなメリットもあるので検討する価値がある。

- ① ワンウェイサージタンクは管路のある部分に有効であるが、全体をカバーしないので長距離管路では複数個のタンクが必要になるが、エアチャンバは管路全体の圧力変化をカバーできるので1セットの設備で済み**長距離管路に適合している(*)**。海外のパイプラインではエアチャンバが多く使われている。
- ② ワンウェイサージタンクに比べ設備をコンパクトにできる(用地/土木基礎工事/タンク高さ)。
- ③ ワンウェイサージタンクに比べて配置や設置方法あるいは設備製作(容器形状など)に自由度がある。

エアチャンバのデメリットとしては、

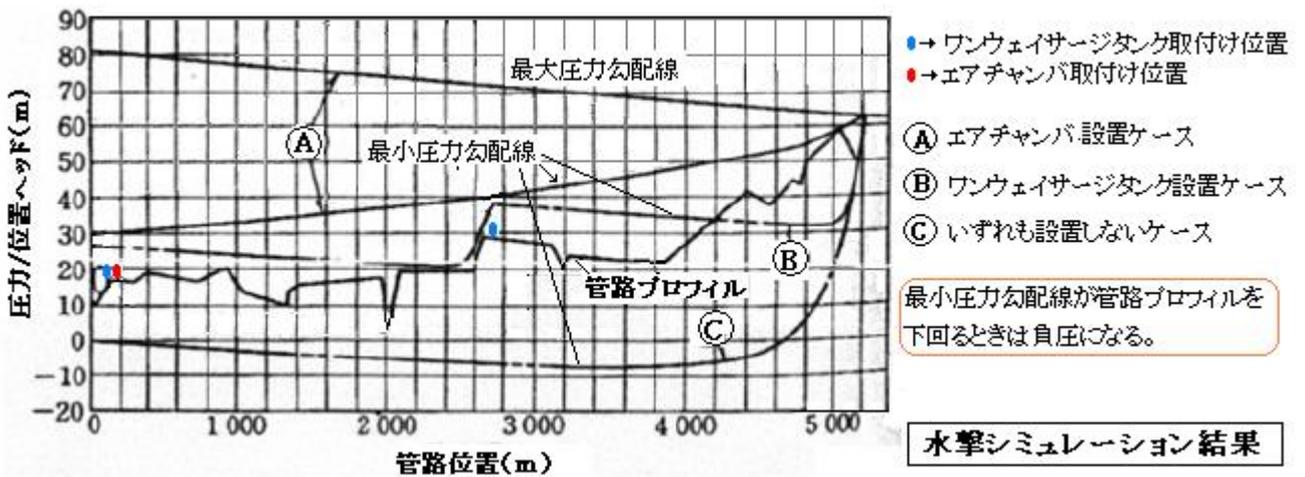
- ① 圧力があるのでエアチャンバ単体は規格上の圧力容器になる。
- ② 空気圧縮設備や計装設備が必要で複雑になりコスト高になる。

エアチャンバが普及していない最大の理由は、やや面倒なそのシステム性にあると思う。



なお、エアチャンバの設置場所は負圧化の起点になるポンプ出口付近が妥当と思われる(要確認)。

ポンプ送水管路にエアチャンバを設けた場合の水撃シミュレーション結果を下図に示す。この図には何も設置しない場合とワンウェイサージタンク(2基)を設置した場合を併記して示しているが、エアチャンバ設置の場合がもっとも最小圧力勾配線が高いレベルにきて、圧力降下をもっとも小さいことを示している。確かにワンウェイサージタンクでは管路端寄りに負圧が発生しているが、エアチャンバ設置では負圧部分がない。これは水撃計算の結果にすぎないが、実測でもエアチャンバによって水撃が相当緩和されているようだ。



(*) ワンウェイサージタンクは大気圧保持なので管路圧力がかなり下がってから作動するので元々圧力降下に対して遅れがある。一方、エアチャンバは高い圧力が保持されているので圧力降下の速い時点から作動(水補給)する。故にエアチャンバの方が広域をカバーできると考えられる。

(8) アキュムレータ(4)(7)(9)

エアチャンバでは、圧縮空気が水に溶け込むため空気の補給が必要とされる。そこで圧縮空気(ガス)をゴム袋に封じて空気(ガス)の補給を不要にしたものがアキュムレータである。ただゴム袋の大きさに

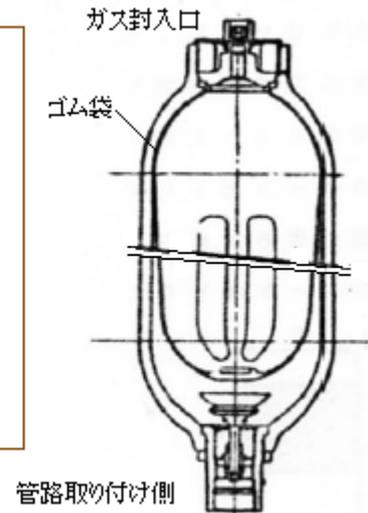
は限界があるため、どうしても小容量にならざるを得ない。そのため、空港の給油施設や高層ビルの補給水系統など小規模のポンプ輸送管路で使用されている。脈動吸収にも効果がある。

容量は1～5リットル程度。合成ゴムになるため温度限界があり、一般に-40～150℃の範囲で使用される。参考に容量計算式を示しておく。

$$V_1 = (P_a / P_1) W U^2 (n-1) / [200 P_a \{ (P_b / P_a)^{(n-1)/n} - 1 \}]$$

但し V_1 = 必要ガス容積(リットル)、
 P_1 = 封入ガス圧力(MPa)、
 P_a = 運転圧力(MPa)、
 P_b = 最高許容水撃圧力(MPa)
 W = 水柱の質量(kg)、
 U = 運転時の流速(m/s)
 n = ポリトロープ指数

NOK(株) 技術資料より引用



引用テキスト・文献)

- (1) 「最近の小型ポンプ設備における水撃防止機器(I、II)」喜多、牧野 エバラ時報 第20第76号,77号
- (2) 「水撃対策の進歩—日本報告—」里見 水道協会雑誌 第558号(S56.3)
- (3) 「ハンマリングの基礎と対策」岩崎 高圧ガス Vol.15 No.11 (1978)
- (4) NOK 社アキュムレータ技術資料
- (5) 「水撃対策に関する最近の話題」エバラ時報 No.198(2003.1)
- (6) 「送液配管システムエンジニアリングにおけるウォーターハンマ解析」土屋 配管技術 '85.7 (1985)
- (7) 「プラント配管系内非定常流れ(その1) 現象と対応策」広瀬 JSME 講習会テキスト(1983.10.18)
- (8) 「----- 8. 水撃対策」 配管と装置 1972.6
- (9) 「中小規模水道施設の水撃対策」日立評論 Vol.58 No.4 (1976)
- (10) 「2個の弁を有する管路系における弁操作による水撃現象」池尾 JSME 論文集 41 巻 342 号(S50-2)
- (11) 「ポンプの運転制御とウォーターハンマ」中村、三輪 ターボ機械 第17号第5号
- (12) 「水撃防止対策用エアチャンバ」中村、安西 エバラ時報 第113号
- (13) 「無水撃小抵抗逆止め弁の開発」山田、今尾 ターボ機械第14号第10号(1986)
- (14) 「逆止め弁のスラミング」宮本ほか エバラ時報 No.128 (1984)
- (15) 「水撃現象の軽減に対する管路上流端の最適弁閉鎖」山本 ターボ機械第21巻第4号(1993)
- (16) 「バルブの形式・用途・設置条件」小泉ほか [水道協会雑誌 第53巻第3号(S59)]
- (17) 「技術資料 - 逆止弁あれこれ」齊藤 [配管技術 1983年5月]
- (18) 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「ポンプ場」(農水省監修・農業土木学会発行)
- (19) (現代理工学大系)水撃入門 横山 (日新出版)