

【整番】 FE-03-TM-050	【標題】 エアバブル/エアポケットの管内移動についての基準
分類：流れ(気液 2 相流れ)/種別：技術メモ	作成年月：H10.6/改訂：Ver0.0 (H18.12) 作成者：N.Miyamoto

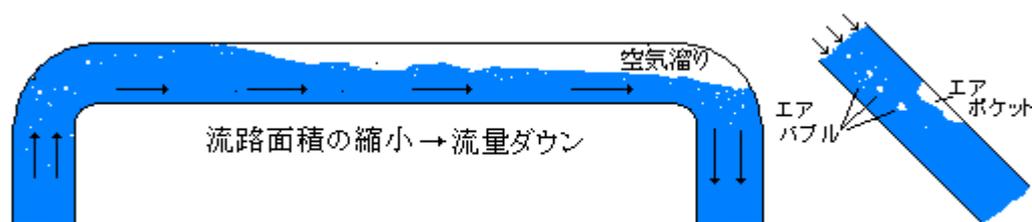
全 8 枚

1. 液体に凝縮しないエアやガスが混入すると種々のトラブルが起きる。トラブルを回避するには

- ① エア/ガスの侵入を予め防止する → 例えばエア巻きみや吸込み渦を回避する。
- ② 空気弁やエア/ガス抜きベンドを設ける → 万一の場合のエア抜き操作可とする。
- ③ エア/ガスが管内に滞留しないように、ある流速以上で流して管外に排出する。

③の場合、その最小流速(限界流速)をどう見積るか？ 下記の文献はパイプラインのエア混入について文献調査結果を開示しているが、その中にエアバブル/エアポケットの管内移動に要する限界流速の基準に関する調査が含まれているので、以下これを紹介する。なお便宜上、空気-水として記述する。

Report SR 649 (Rev.2.0) 【April 2005 Air in Pipelines – A Literature Review】 HR Wallingford



2. 限界流速基準を述べる前に、いかにしてエアが混入するか混入によっていかなる問題が生じるかを確認しておく。まず、管路へのエアの混入は次のようにして起きる。

- ① 溶解によって水に吸収される。通常、水にはある量(常温の飽和状態で約 2%)の溶解したエアが含まれていて減圧されると溶解分が放出される。水の蒸気圧は温度と共に増加するので(15℃では 1.7kN/m²、30℃では 4.24kN/m²)、温度が上がるとエアの解放量が多くなる。これは 30℃における空気の解放量は 15℃の 2.5 倍になることを意味する。エアの溶解は高温地域に設置される、あるいは著しい温度変化を受けるパイプラインの設計では重要な問題になる。
- ② ドロップチャンバ/インレット/インテークなどの流入位置からの吸い込み。
- ③ 海水レベルより上に位置する海水放流口など流出位置からの吸い込み。
- ④ インレット/インテークにおける渦による吸い込み。
- ⑤ 攪拌などかき乱しによるもの。
- ⑥ 跳水によるもの。管内の流れが重力(自然)流れから過重流れに変わるところで跳水が起きる。
- ⑦ エアの直接吸引によるもの。キャビテーションを抑えるためエアーを注入することあり。
- ⑧ ポンプなどの吸い込み渦によるもの。
- ⑨ ラインの充水/排水に伴うもの。例えば充水中のエアの移動は緩慢でラインの高所にトラップされる。
- ⑩ 廃水設備などにおけるバクテリアによるガスの発生(ガスはエアと同様の問題を起こす)。
- ⑪ 内部が負圧になる区間の継手/フランジからのエアの吸引。
- ⑫ 水面の乱れに伴うエアの巻き込み。例えば吐出端～水面に開きがある場合。

次に、管路にエアが混入すると以下のような問題が起きる。

- ① エアポケットができると管の有効断面積が減って管の輸送能力が低下する。
- ② 流体のかさ物性(主に密度、弾性)が変化する。
- ③ 空気の介在で、乱流構造、時には壁面のせん断構造が変化する。
- ④ エアバブルの浮力によって流れに直角なモーメント(運動量)が加わり流れ場に有意な影響を与える。
- ⑤ 過渡状態では、エアポケットが大きいと圧力波は抑圧され **ゆがめられる**が、エアの蓄積が少ないと圧力の過渡変化に不利な効果を与え、実際にサージ圧が高まる。
- ⑥ 系の中にエアが蓄積されると流れを崩壊させブローオフ(吹き払い)やブローバック(逆流)を起こす。例えば、跳水(hydraulic jump)に巻き込まれたエアは流れに乗って下流に移動することができずブローバックし、振動や構造ダメージを生じ水表面の不安定を引き起こす。
- ⑦ エアがはいると濾過操作が難しくなる。エア圧の変化によるサージによって良好な濾過操作が維持できない。またバブルがサンドフィルタにトラップされて効率が低下する。
- ⑧ エアが介在するとポンプやタービンの効率は下がる。エアの混入した水がタービンに入ると出力が低下して効率がダウンし、水撃圧も発生する。ポンプにエアが入ると **Priming(呼び水)のロス**になる。
- ⑨ 鉄製の管路では、エアによって酸化腐食が進む。
- ⑩ 管の部分充水から満水にいたるまでの過渡期間中に **Sealing** によって構造物の振動が起き、それに伴って流量サージングが起きる。
- ⑪ エア混入によって計器の読取り誤差が起きる。
- ⑫ 冷却水系では腐食抑制のため添加剤を使うが、エア混入で泡になることがある。
- ⑬ エアが排出位置で開放される時、泡がでたり白濁したり廃水から異臭が拡散されることがある。
- ⑭ 水中パイプラインの放出口などに浮力効果を生じる。

これらのアップセットの中で ①は最も深刻である。②では例えば、流体音速(圧力伝播速度 $=E/\rho$)が低下し流体振動がおき易くなる。③④は流れ構造の変化によって想定外の現象がでてくる。⑤では小さなエア溜りによって例えばポンプ起動時、異常昇圧が発生する。⑥における跳水は開水路で起きるが、ここでは下図のようにエアポケットの後端で起きエアの一部を巻き込むと思われる。



⑩については、**Sealing** がどういうものか？調べる必要がある。

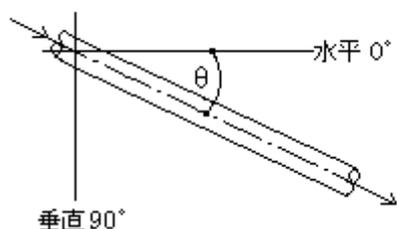
3. エアバブル/エアポケットの移動に対する判定基準について。現状、混入エア(実際には分散気泡流)の移動に関する解析には確かなものがなく、エアバブルやエアポケットの移動に要する基準は、既存の実験データをよっているのが実状である。

エアの移動に関しては、[表面張力、フルード数、レノルズ数および管の傾き]が関係するといわれるが、通常、表面張力やレイノルズ数の寄与は無視できるので、概ね、**フルード数と管の傾き**によって決まると言われている。ここでフルード数は $[Fr = V_c / (gD)^{0.5}]$ で表される。 V_c は限界流速、 g は重力加速度、 D は管内径である。**エアの移動は、実際の流速(液単相の管内平均流速)が限界流速 V_c を上回るときに起きる。**

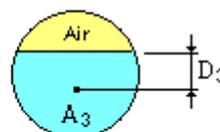
エア移動の限界流速式には以下のような提案がある。

モード	出典	限界速度式	備考
下向き 傾斜管	Kalinske ⁽¹⁾	$V_c/(gD)^{0.5} = 1.509(\tan \theta)^{0.5}$ (但し、 $\theta > 2.9^\circ$)	エア全般/ 実験式 0~1.1° では傾斜が増すと V_c が下がる。
	Kent ⁽²⁾	$V_c/(gD)^{0.5} = C_0^{0.5}(\sin \theta)^{0.5}$ (但し $C_0 = 1.53$)	エアポケット/実験式(15, 30,45,60° ベース) 限界流速はバブル量に依存しない。
	Wisner ⁽³⁾	$V_c/(gD)^{0.5} = 0.25(\sin \theta)^{0.5} + 0.825$	エアポケット/ 実験式 (0.1~0.244 径)
	Moswell ⁽⁴⁾	$V_c/(gD)^{0.5} = 0.5(\sin \theta)^{0.5} + 0.55$	Kent の実験データより
	Falvey ⁽⁵⁾	< Fig.12 参照 >	エアバブル・ポケット/ 実験式
	A.R.I ⁽⁶⁾	$V_c/(gD)^{0.5} = 0.25(\sin \theta)^{0.5} + 0.4$	条件および根拠不明
	Walski ⁽⁷⁾	$0.88V_{nom}^2/(gDS^{0.32}) = P'$ $P' = 1$ で平衡、 $P' > 1$ で下流移動	エアポケット/実験式(50mm 径 PVC)
	Dewhurst ⁽⁸⁾	$V_c = 2g[V_p \sin \theta / A + (D/2 - y_3 + D_3 A_3 / A) \cos \theta] \{ A_3 / (A_3 - A) \}^2$	エアポケット/理論式
下向き 垂直管	Davies & Taler	$V_c/(gD)^{0.5} = 0.33$	ドリフト速度の理論解による
	Dumitrescu	$V_c/(gD)^{0.5} = 0.35$	ドリフト速度の理論解による
水平管	Benjamin	$V_c/(gD)^{0.5} = 0.542$	ドリフト速度の理論解による
	Corcos ⁽⁹⁾	$V_c/(gD)^{0.5} = 0.484$ $V_c/(gD)^{0.5} = 0.638$ (傾斜部分通過含む)	エアポケット/根拠不明

< 傾斜管の限界流速式の記号定義 >



V_c = 限界流速 (m/s)
 g = 重力加速度 (9.807 m/s²)
 D = 管内径 (m)
 θ = 水平軸からの管の傾き (°)



< Walski 式の記号定義 >

V_{nom} = エアのないときの通常流速 (m/s)、 S = 管の傾き ($\sin \theta$)、 D = 管内径 (m)、 P' = 指標

< Dewhurst 式の記号定義 >

A = 管断面積 (m²)、 A_3 = 跳水が起こる前のバブルの下流端における水断面積 (m²) ----- 上図参照

D = 管内径 (m)、 D_3 = 水表面から A_3 の図心までの距離 (m)

V_c = エアポケット上流の限界流速 (m/s)、 V_p = エアポケット容積 (m³)、 θ = 管の傾き (°)

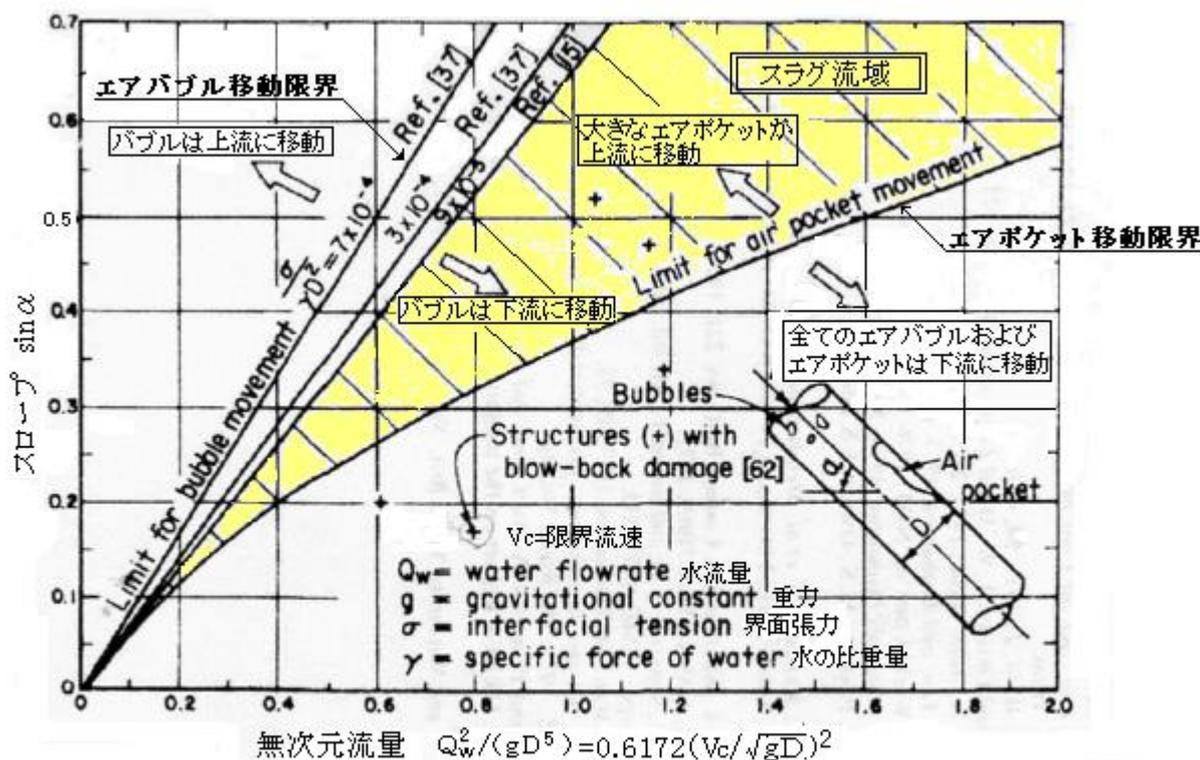


Figure 12 Graph showing flow rates required to transport air bubbles and pockets in pipes of varying slope (taken from Falvey, 1980)

[エアバブル/ポケットを移送するに必要な流量]と[管の傾斜度]の関係

なお、上記のエア移動の限界流速式には、以下のような背景や付帯情報がある。

- (a) 限界流速とエア量の関係は、Kentの実験では殆ど認知されていない。Wisnerなどの実験では、少量のとき関係し、ある量を越えると関係しなくなるとしている。これらの結果は、実験で目立った傾向がでないことを示しているのだろう。ただその傾向は理論的に説明できないという。従って理論的に導かれた Dewhurst 式を除けば、上記の限界流速式にはいずれもエア量が含まれていない。
- (b) 傾斜管の限界速度の傾向には、次の3つの異論がある。
- i. 限界速度は水平からの傾斜度が増すにつれて増加してゆく。
 - ii. 限界流速は下向き 1.2度ぐらいで最小になり、そこから平坦になっても険しくなっても増加する。
 - iii. エアバブル移動の限界流速は水平から傾斜度が増すにつれ増加し 30~50度のスロープで最大になり、それ以上スロープが増すと逆に減少し 90度で最小となる。

趨勢としては i または ii の支持が多いようである。上記の限界流速式は、殆ど i によるもの。

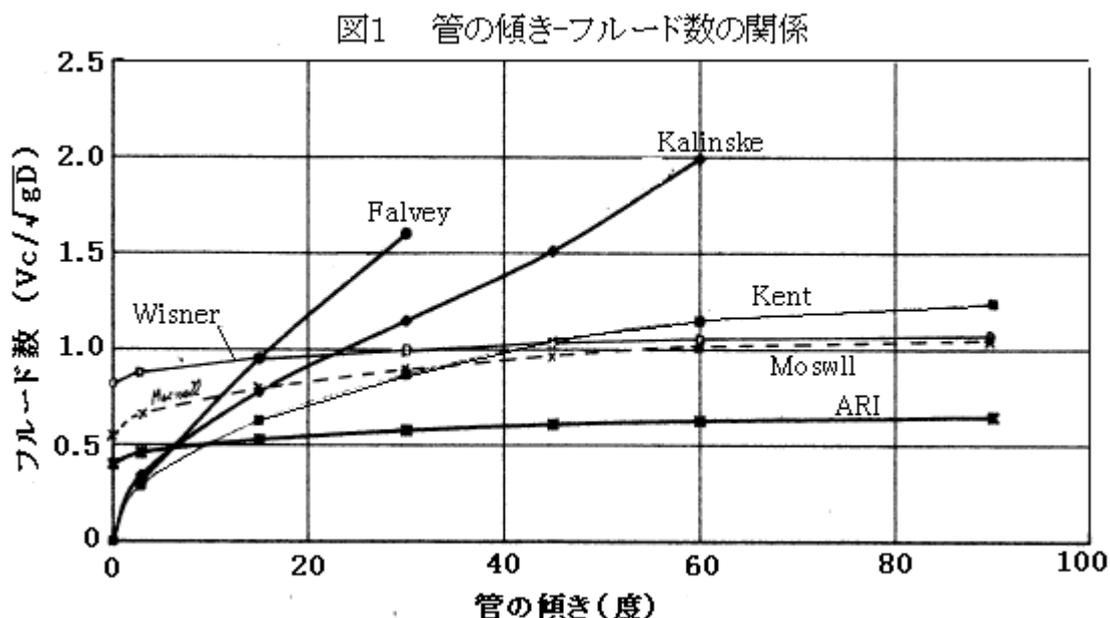
ii については、スロープ 0度即ち水平管のフルード数が決して低くないところから類推できるが、設計的には i にからげて処理できる(水平管のフルード数を高めにとる)。

- (c) 上記の限界流速式は、Falvey (Fig.12) を除けば、エアバブルが集合したエアポケットを対象にしている。エアバブル(分散気泡)の挙動はエアポケットとは異なると思われるが、Falvey の Fig.12 からわかるようにエアポケットの限界流速よりも低いので、設計的にはエアポケットの式で扱えば

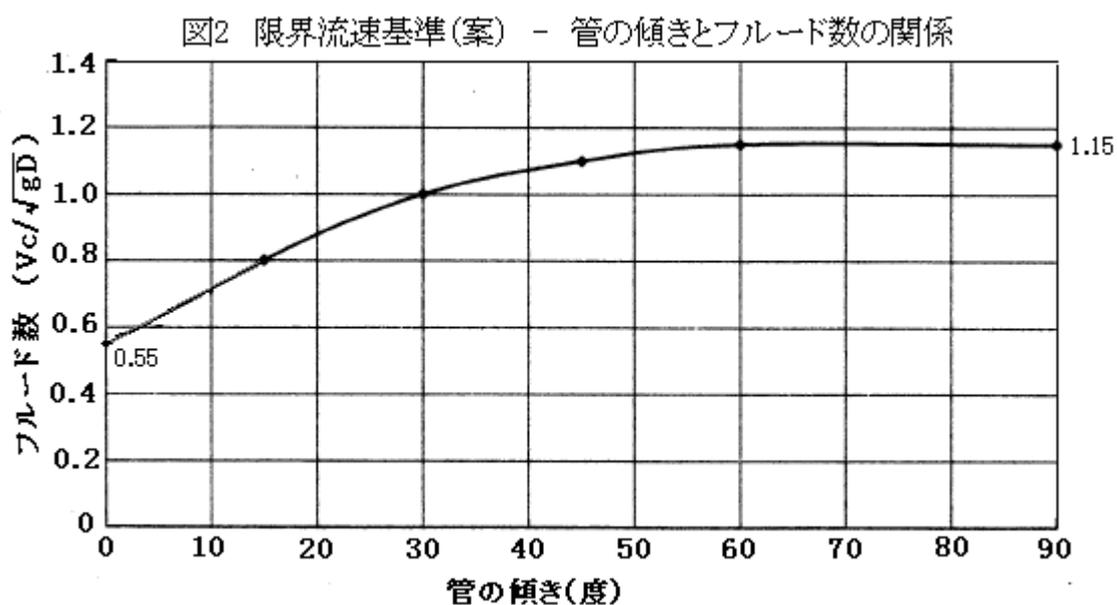
よい。

- (d) 下向き垂直管や水平管について、ドリフト速度(静止した水の中でバブルが浮力によって上昇する速度)を限界速度に等価とみなした理論式があるが、結果的に傾斜管式($\theta = 0, 90^\circ$)とかなり違う。難しいところだが、下向き垂直管についてはドリフト速度=限界流速とするには無理があり、水平管については、(a)の ii を考慮して妥当としておきたい。
- (e) 水平管については上記の限界流速データからみて、 $V_d/(gD)^{0.5} = 0.35 \sim 0.825$ とかなりバラツキがみられるが、一応、 $V_d/(gD)^{0.5} = 0.55$ が目安か？

傾斜管について、各限界流速式の比較を図1に示す。Falvey、Kalinskeには特異性がある。



4. 以上述べたようにあるいは図1に示したように、各限界流速式のバラツキは大きい。設計的にこれをどう扱うか？ ここでは、図2のような基準を提案しておく。これはKent式の傾向を拾ったもので傾きゼロの水平管でフルード数を0.55とアップしている。



引用文献：

- (0) Report SR 649 (Rev.2.0) 【April 2005 Air in Pipelines – A Literature Review】 HR Wallingford
- (1) Kalinske, A.A. and Bliss, P.H. 1943. Removal of air from pipe lines by flowing water. ASCE, Civil Engineering, Vol. 13, No. 10 pp480-482
- (2) Kent, J.C. 1952. The entrainment of air by water flowing in circular conduits with downgrade slopes. Doctoral thesis, University of California, Berkley, California
- (3) Wisner, P.E., Mohsen, F.N. and Kouwen, N. 1975. Removal of air from water lines by hydraulic means. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 101, HY2, p243-257
- (4) Mosvell, G. 1976. Pra 8 Air in outfall pipes, Project committee for the treatment of wastewater, (in Norwegian)
- (5) Falvey, H.T. 1980. Air-water flow in hydraulic structures. Engineering Monograph No. 41, United States Department of the Interior Water and Power Resources Service, Denver, Colorado, pp143
- (6) A.R.I. www.arivalves.com
- (7) Walski, T.M. et al. 1994. Hydraulics of corrosive gas pockets in force mains. Water Environment Research, Vol. 66, No. 6, Sept/Oct., pp772-778
- (8) Dewhirst, R.A. 1991. Optimising the use of air valves in piped water systems, Master of Engineering Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Auckland, Auckland, New Zealand
- (9) Corcos, G. 2003. Air in water pipes, Agua Para La Vida, 2nd Edition, www.aplv.org

添 付： 空調衛生設備便覧よりエア混入関係抜粋

9・4 水配管系中の空気排除

配管中の水に空気を混入した状態でポンプを運転すると、ポンプはサージング、キャビテーションを起こし、はなはだ不安定な運転をする。また、水の流れがうず流を生じる。その他に、空気だまりを生じウォーターハンマや脈動で配管を振動させて騒音の原因となる。

配管系中の水に空気が侵入すると、空気中の酸素で管内の腐食がはじまる。

配管系中に多量の空気がたまっていると、水の中の空気が圧縮されて、どこか一箇所に集まり、管路の断面積が縮小されて、通水量をへらしたり、水が通らないおそれが生じる。

(1) 空気が配管系に入る原因

(1) 配管系中にはポンプの位置、膨張水そうの位置により圧力分布が部分的に大気圧

以下となることがあり、その箇所の継手部分より空気が侵入する。

(2) ポンプのサクション側で大気圧以下の圧力で運転する場合、ポンプのグランドパッキングから侵入する。

(3) 配管系中、初期に水をはる場合、完全に空気抜きを行っていない。

(4) 開放回路で水を水そうに返す場合、吐水口と水面の間が広く、流れの衝撃で空気を混入する (図 9-32 参照)。

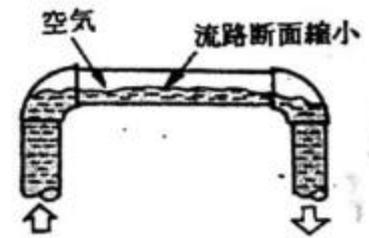


図 9-31 管路中に空気が入った図

(2) 配管系中の空気を抜く手法

(1) 配管系の最高所に空気抜弁を取り付ける。空気は水より比重が小さいため、配管の頂部にたまるから配管系の最も高い所に空気抜弁を取り付けて間欠的に空気抜きを行なう。

(2) 配管系内での水の流速がある程度速くなると (0.5 m/s 以上), 気泡は凸部に滞溜しなくなり、水とともに流されるので、最高所で空気抜きをする手法では完全に空気抜きはできない。還水主管の立上り部で集中的に空気を抜いた方がよい。空気の浮力のため、ある一定の流速

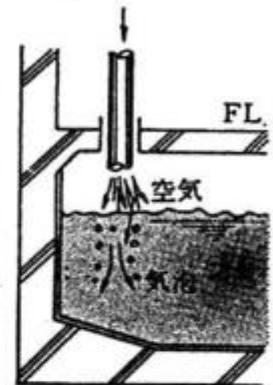


図 9-32 水そうに水を入れる悪い例

表 9-18 空気抜きのための流速の表

	推奨最低流速	上限流速
50 A >	0.6 m/s 以上	1.2 m/s 以下
50 A <	1 m 当たりの摩擦抵抗 7.5 mm/m 以上に相当する流速	40 mm/m 以下

$$V_c = X \times \sqrt{gD} = X \times \sqrt{9.807 \times 0.05} = 0.7X$$

$$\therefore X = 0.6 / 0.7 = 0.86 \text{ at } 90^\circ$$

これは 1.15 より小さい。

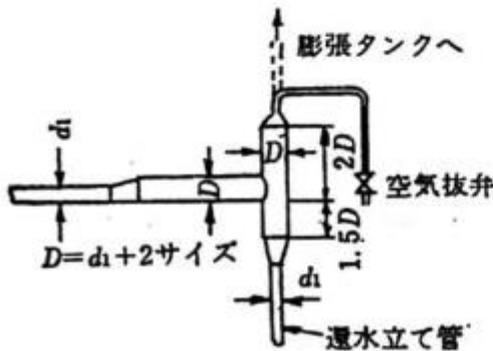


図 9-33 配管頂部空気抜きの例

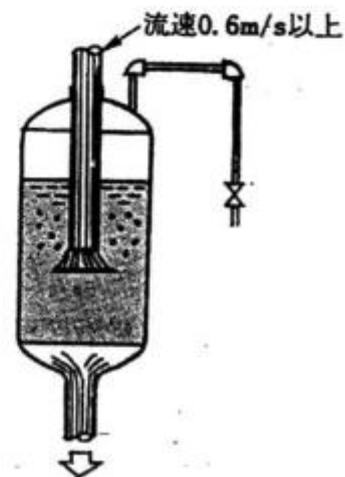


図 9-34 エアセパレータの例

より早い流速が必要となる。

図 9-34 にエアセパレータの例を示す。

(3) 空気抜きの手順

配管系により手順は多少ことなるが、次のような方法がある。

- (1) 配管系の下部から水を入れる。
- (2) 配管系内が満水になったら給水弁を閉じて、各所の空気抜弁より空気を抜く。
- (3) (1), (2) の動作を何回も行なう。
- (4) (1), (2), (3) が終わると循環ポンプを 1~2 時間程度運転する。
- (5) 循環ポンプを停止して、各所の空気抜弁より空気を抜く。
- (6) (4), (5) を 3~4 回繰り返す。
- (7) ポンプを運転して、圧力計の針の振れを見る。
- (8) 水の中の空気を排除するため配管系内の水温を 60~70℃ ぐらい上昇させて、(6) を何回も繰り返し行なう。