

【整番】 FE-16-TM-002	【標題】 重力流れシステムの設計	
分類：流れ(重力流れ)/種別：設計メモ	作成年月：H19.1/改訂：Ver0.0 (H19.1)	作成者：N. Miyamoto

全 8 枚

1. はじめに

例えばコンデンサドレンなど、容器から重力によって連続的に液を排出する場合にテークオフノズルやノズルや排出管路のサイズをどう決めるか？この設計課題について次の推奨指針がある。

HTXX sheet. FM8 Design of Gravity Flow Systems

簡易的ながら、ある種、内容があるので、本 TS ではこれを簡単なチャートにして紹介する。

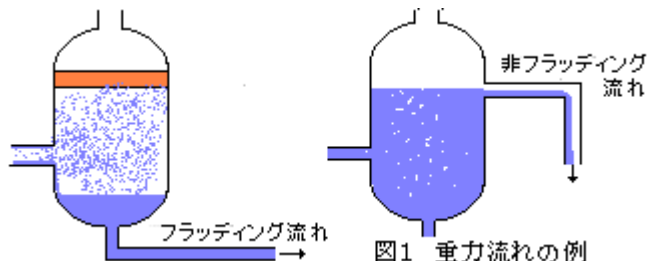


図1 重力流れの例

2. サイジング手順

重力流れシステムの設計アプローチには次の2つがある。

- 常に満液で流れるようにシステムを設計する。ラインサイズは単相流れとして求める。
- 自己排気できるようにシステムを設計する。この場合、ガスと液は対向流れになるので、液流速を十分に低くしてガスが排気できるようにする。

(a)のフローパターンをフラッシング流れ、(b)のフローパターンを非フラッシング流れあるいは自己排気流れという。

(a)の場合、排出管を満液で流すには、容器内の液面からガスが吸い込まれないようにその液レベルを保つ必要がある。液レベルはテークオフ(容器-排出管接合部)の口径に依存するので、運転から決まる最小液位を満たすと共に、ガスの吸い込みを起こさないように口径を選ぶ。

(b)の場合、2相流れを仮定し、

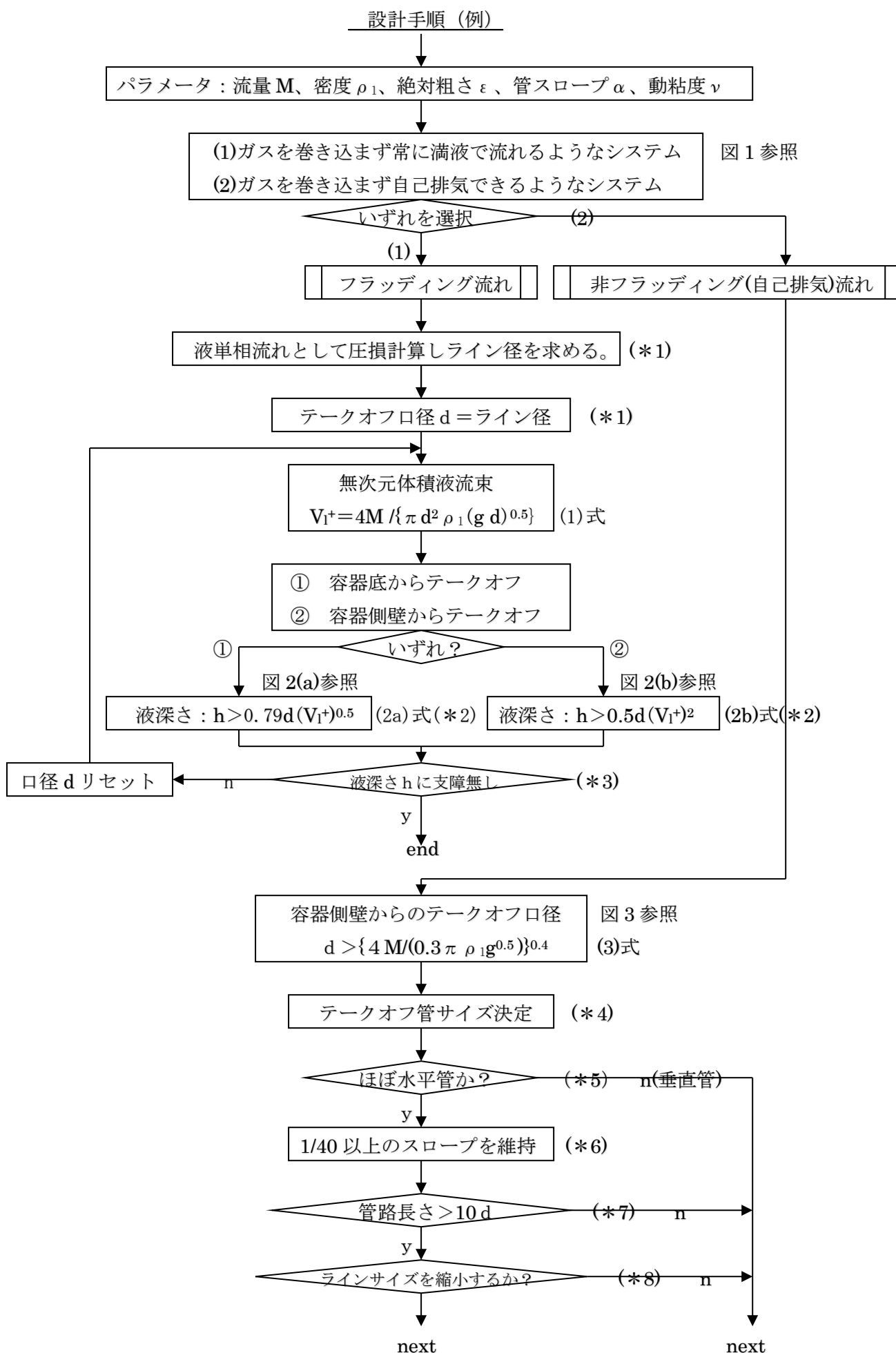
ほぼ水平な管：管の下部を液が、管の上部をガスが、対向して流れる

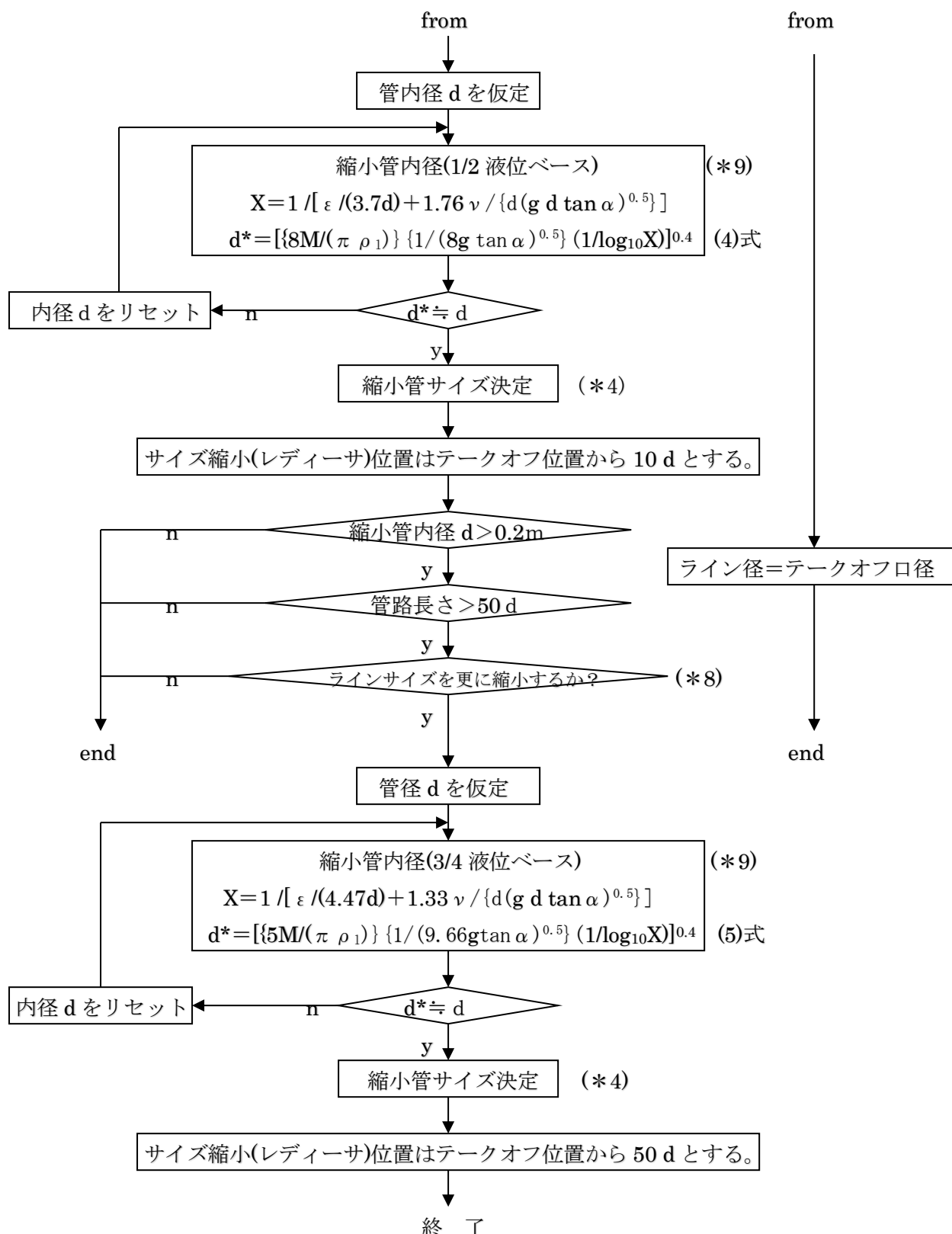
ほぼ垂直な管：管の周縁を液が、管の中心をガスが、対向して流れる

ようにする。まず上記のパターンに見合うように大きめのテークオフサイズを求める。次いで水平管では管路長が[10x 管径]を越える場合、液面が管径の 1/2 以下で流れるようにし、更に管径が大きくかつ管路長が[50x 管径]を越える場合、液面が管径の 3/4 以下で流れるようにする。また垂直管はテークオフサイズと同サイズにする。

以下に、排出流量が既知の場合について具体的な設計手順を示す。なお、ここで使用する記号の定義は下記のようなものである。

M = 質量流量(kg/s)、 V_1^* = 無次元体積液流束 (→ フルート数 $V/(gd)^{0.5}$ に同じ。但し V = 流速)、
 ρ_1 = 液体の密度(kg/m³)、 ν = 液体の動粘度(m²/s)、 g = 重力加速度(9.807m/s²)、
 d = 管内径(m)、 ε = 管内表面の絶対粗さ(m)、 α = 管スロープ(傾き)(°)

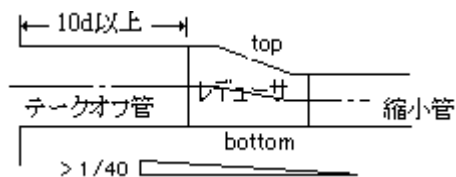




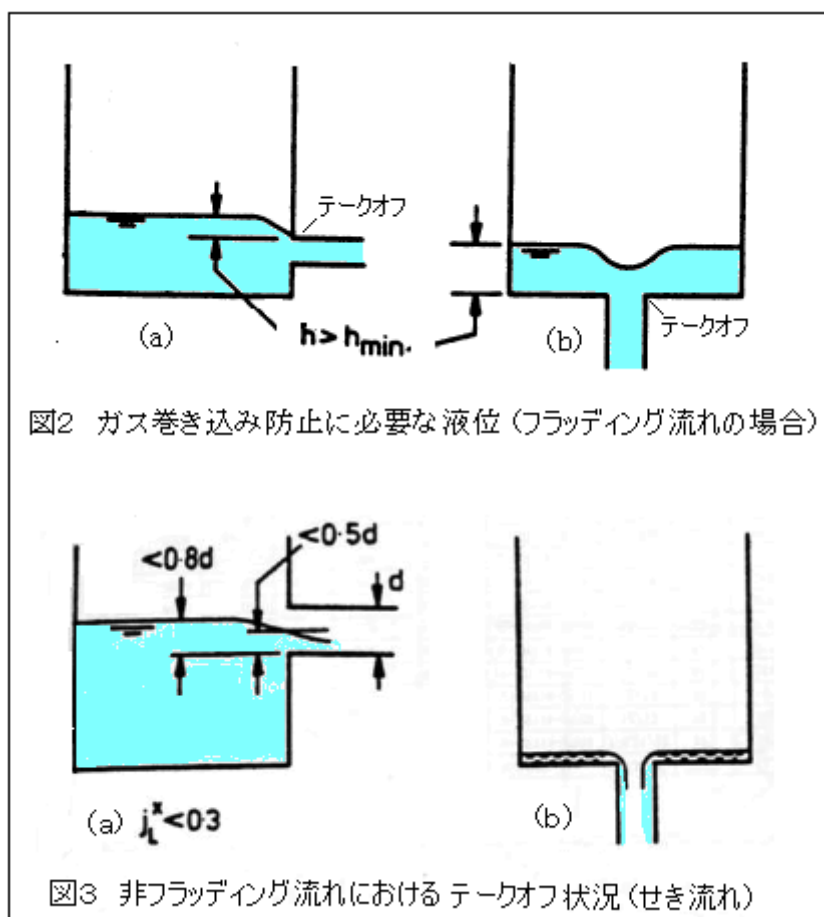
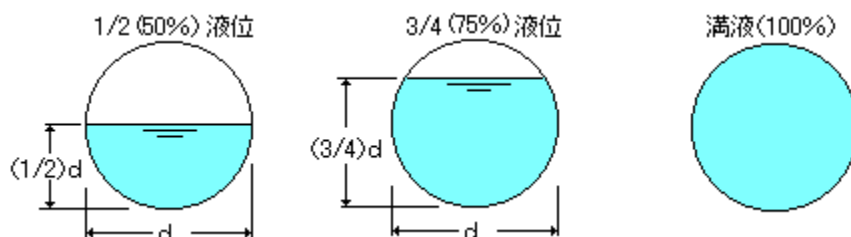
<注 記>

- (1) 液単相流れとして通常の圧損計算を行いライン径(管路徑)を設定し、まずラインがそのまま容器に接続されるとして必要液レベル計算を行う。もしその液レベルが不足するならば、ライン径より大きなテークオフサイズを選んで計算を繰り返す。こうして得られたテークオフ口径とライン径が異なるならば、(5)のようにテークオフ管長を[10x 管径 d]とし、偏芯レディーサでこれらを接続する。
- (2) 式の適用については要注意。解説 5.を参照のこと。
- (3) 容器側に事情(最小液位など)から、計算された液深さ h が成立するか判断する。

- (4) 計算された最小管内径 d より大きく、かつ d に最も近い内径を持つ規格パイプを採用する。
- (5) 本来、多少スロープのついた水平管を前提にしている。明らかに傾斜のついた管は適用外とする。
- (6) 重力流れの水平管は少なくとも $1/40$ の下り勾配を採ること。
- (7) テークオフ位置から $[10x \text{ 管径 } d]$ までの管路区間はテークオフ口径のままとする。 $[10x \text{ 管径 } d]$ を越えるときは下図のように偏芯レディーサを設けて $10d$ 以上を縮小サイズにしてよい。



- (8) ラインサイズを縮小する場合、レディーサを設けるので、製作の手間やコストを考慮してラインサイズを縮小するか否か決める。ラインサイズをそのままにしても殆ど支障はない。
- (9) 縮小管の内径は Acker の式によって決める。式の両辺に d が含まれるので反復計算になる。もし管スロープ $\tan \alpha = 1/40$ 、動粘度 $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (20°C の水に相当)、絶対粗さ $\varepsilon = 0.25 \text{ mm}$ 、であれば Fig. 3 を使って管内径 d を求めてよい。なお動粘度の影響は少ないので少々粘度がずれていても Fig. 3 は使用できる。なお液位の定義は下図の通り。



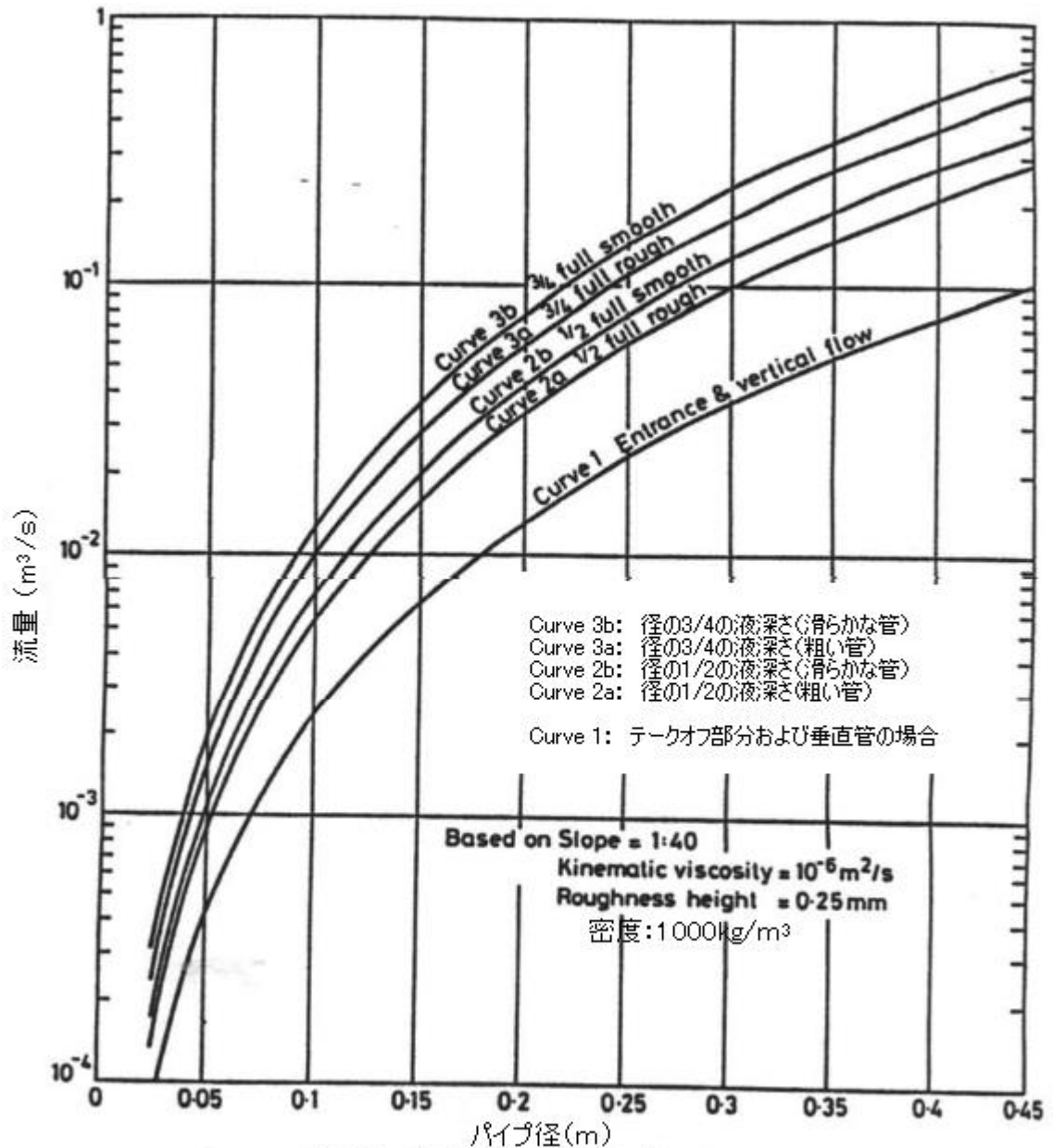


Figure 3: Capacity of sloping pipelines for self-venting flow
 Figure 3 非フラッディング(自己排気)流れにおける管路の性能
 (HTXX Sheet FM8 より引用)

3. 例題

3.1 20°C の水が 14 kg/s の流量で容器から 0.15m 径のパイプを流れ出る。ガスの巻き込みが巻き込まないようにするには容器の最小液深さをどの程度にすればよいか。なお、流出口は底あるいは側壁に付くものとする。

////////////////////////////////////

1. 式(1)から体積流量 V_1^+ を計算する。

$$V_1^+ = 4 \times 14 / (\pi \times 0.15^2 \times 1000 \times (9.81 \times 0.15)^{0.5}) = 0.653$$

2. 底流出の場合の液深さを(2a)式から求める。

$$h > 0.79 \times 0.15 \times 0.653^{0.5} = 0.096 \text{m}$$

よって最小液深さは容器底から 96mm となる。
 側壁流出の場合の液深さを式(2b)から求める。

$$h > 0.5 \times 0.15 \times 0.653^2 = 0.032 \text{m}$$

よって最小液深さは出口管トップから約 32mm となる。なお、解説 5.を参照のこと。

3.2 容器からのオーバーフロー量が 16.67 kg/s になるように設計せよ。管路はおおむね水平。管の絶対粗さは 0.25mm とする。

////////////////////////////////////

1. (3)式から分岐サイズを計算する。

$$d > \{4 \times 16.67 / (0.3 \pi \times 1000 \times 9.81^{0.5})\}^{0.4} = 0.22 \text{m}$$

管サイズはこれより少し大きい 10”(254mm)とする。

2. 式(4)から、1/2 満液のときのラインサイズを計算する。d=0.15m とすると

$$X = 1 / [0.00025 / (3.7 \times 0.15) + 1.76 \times 1 \times 10^{-6} / \{0.15 (9.807 \times 0.15 \tan 1.44)^{0.5}\}] = 1955$$

(ここで管のスロープは 1/40 程度即ち $\tan \alpha = 0.025$ と仮定する。0° とおくと計算できない。)

$$d = \{ \{8 \times 16.67 / (\pi \times 1000)\} \{1 / (8 \times 9.81 \times 0.025)^{0.5}\} (1 / \log_{10} 1955) \}^{0.4} = 0.153 \text{m}$$

従って、この仮定でよい。これは 6”パイプに相当するので、それをラインサイズに用いる。

3. (5)式を用いて 75%液深さに対する管サイズを計算する。d = 0.15m とすると

$$X = 1 / [0.00025 / (4.47 \times 0.15) + 1.33 \times 1 \times 10^{-6} / \{0.15 \times (9.81 \times 0.15 \times 0.025)^{0.5}\}] = 2302$$

$$d = \{ \{5 \times 16.67 / (\pi \times 1000)\} \{1 / (9.66 \times 9.81 \times 0.025)^{0.5}\} (1 / \log_{10} 2302) \}^{0.4} = 0.12 \text{m}$$

従って、この仮定でよい。ここでは、0.12mより少し大きな 6”パイプ(154mm)を用いる。

4. 以上より管路サイズは次のようになる。

まず、管路のスロープを 1/40 にする。最初の 2.5m(10x 管径)は 250mm の公称内径とし、その後、管スロープ 1/40 を保持して 250x150 の偏芯レディーサで絞り、それ以降は 150 の公称内径のパイプを用いる。

【 解 説 】

1. プラント設備においてはヘッド差がなく重力流れになる箇所はそれ程多い訳ではないが、流速が低いせいか、気体/固体を巻き込んで輸送性能がでないことが多い。また巻き込みが多いとこれを排出するだけのモーメントがないので、運転を止めざるを得ないこともある。またオーバーフロー管がサージングまがいの現象で損傷することもある。HTXX の FM 8 は重力流れシステムの要点を記述するもので、重力流れのビギナーにはありがたい資料である。今後、他のリアルな情報を集め、本 TS とリンクさせてより活発なデータベースにして行きたい。

FM8 は” FP3 Gravity Flow ”とセットになっている。FP3 は重力流れの基本事項を記述しており、その内容は【FE-16-TM-001 容器からの重力流れ】で紹介されるので、合せて参照して欲しい。

2. FM8では重力流れに対する設計アプローチとして次の3つを挙げている。

- (a) 常に満液で流れるようにシステムを設計する。この場合、単相流れとしてサイズを決める。
- (b) 自己排気できるようにシステムを設計する。この場合、ガスと液は対向流れになるので、液流速を十分に低くしてガスが排気できるようにする。
- (c) ガスの巻き込みが起きても、想定される問題に対処できるように設計する。

(c)は本来そうあるべきであるが、詳細に立ち入ってしまうためか FM8ではアイテムだけでそれ以上は割愛している。ただ、閉塞をどう解除するか、ベンド抜きをどうするかなど、設計者には関心が深い。これらについては別途の議論として、本 TS では前2者、即ち

- (a) → フラッディング流れ、 (b) → 非フラッディング流れ(自己排気流れ)

について FM8 に準じて設計手順化した。

3. フラッディング流れとは、端的に言えば気体の巻き込みがなく管断面が液で 100%満たされた単相流れである。従って通常の非圧縮性流れとしてライン径を決めればよい。但し、気体巻き込み零の条件を満たすためには容器気相部からの吸い込みを防ぐ必要がある。このために、容器内の液レベルをある程度以上に確保しなければならない。然るに、容器の液レベルはプロセスや運転の制約を受けるので任意に液レベルは取れない。一方、液レベルは流量およびテークオフ(出口ノズル)口径に依存するので、例えばテークオフ口径を大きくとることで必要な液レベルを切り下げることができる。従って、フラッディング流れにおいては、ガス巻き込み防止のために必要な液レベルと運転などから要求される液レベルが見合うようにテークオフ口径をサイジングする必要がある。

4. 非フラッディング流れは、上記のような満液の単相流れではなく、気液2相流れである。しかも気相と液相は、水平管の場合で層状流、垂直管の場合で環状流として分離される。ただ、この場合注意すべきは液相のみが流れ、気相は停滞することである(これは相対的にみれば対向流れである)。従って水平管の流れはむしろ開水路流れに近い。開水路流れでは、摩擦によるエネルギー損失は、管の傾きによるポテンシャルエネルギーによって償われ、液深さによって流量が保たれる。従って水平管の流れを維持するには、管に多少の勾配を付けるとともに、最後まで開水路流れを維持するようにサイジングするのがよい。ただ、気体の下流と導通して仕舞うので末端で液封する必要がある。なお、水平管は層状流で流れるので必然的に管径は大きくなり、フラッディング流れよりコストアップになる。

垂直流れでは気体スラグが液に巻き込まれないようにフルード数を小さくする必要があり、このために管径を十分大きくしなければならない。これは層状流で流れ出す水平管のテークオフ部分でも然り。

実際の排出管形状は水平管と垂直管の組み合わせになる。しかし FM8では、曲がりのある流れについてはデータがないとして Abort している。故に今後は曲がり管に関する情報を補足してゆく必要がある。このようなハンディや前述のコスト高を考えれば、フラッディング流れの管路を選択する方が望ましい。しかし容器内に十分な液レベルがキープできない場合は、どうしても非フラッディング流れにならざるを得ないだろう。

5. さてフラッディング流れでは、テークオフをボトムからとるか、サイドからとるかで液レベルの式が異なる。ここではボトムの場合の(2a)式【 $h > 0.79d(V_1)^{0.5}$ 】を、槽底部ノズルの空気吸い込みに関する萩原の式【 $Sc = [f_1/\{3(3k)^{0.5}\}]^{0.4}(d/2)$ 】と比較してみる。萩原の式は、 $k = 3.3 \times 10^{-6}$ とおくと

$Sc=3.228f_r^{0.4d}$ になる。ここで(2a)式ではフルード数 f_r は V_1^+ であり限界深さ Sc は h_{min} である。従って

$$\text{萩原式} : h_{min.} = 3.228d(V_1^+)^{0.4} \quad \text{vs} \quad \text{(2a)式} : h_{min.} = 0.79d(V_1^+)^{0.5}$$

比をとると、(2a)式は萩原式 $= 0.245(V_1^+)^{0.1}$ になる。通常、フルード数は $0.2 \sim 1.5$ 程度なので $(V_1^+)^{0.1}$ は 1 に近く、結局、(2a)式は萩原式の 25%程度になる。従って、FM8 では、萩原式で計算される液レベルの 1/4 程度の液レベルで済むということになる。この原因は、萩原の式が低いフルード数 (< 0.7) 域で 4 倍程度、限界液深さを安全側に見積もる傾向があることに由ると思われる。[FE-11-RP-001 槽類における吸い込み渦発生の可否] では、これについてゼロマージン曲線を提案しているが、(2a)式はほぼこれに乗っている。しかしフルード数 $(V_1^+)^{0.1}$ が 0.7 を越えると急激に限界液深さがアップしてくるのでたちまちアウトになる。従って、 $V_1^+ > 0.7$ では(2a)式ではなく萩原の式を使用することを薦める。

(萩原式については、前述[FE-11-RP-001 槽類における吸い込み渦発生 of 可否]を参照のこと。)

一方、サイドの式(2b)式については、式の中にフルード数が含まれておらず特異な印象を受ける。例題などからみても、余りに低すぎる値をカウントしている。従って、この式の使用に当たっては、FE-11-RP-001 による計算結果と比較して、裁決することを薦める。

(以上については、まだ判らないところが多いので、更に調査比較して結論づけていきたい。)

6. 非フラッシング流れでは、まずテークオフ部分で、ガスを随伴することなく液のみを流出させる必要がある。(3)式を変形すると、 $V_1^+ < 0.3$ になる。すなわちテークオフ部分のフルード数を 0.3 以下にすればガスの随伴は排除できることになる。管路において、エアバブルやエアポケットを移動させるに必要な液単相流れのフルード数の最小値(下限界)は 垂直管で 0.35、水平管で 0.5 程度である (詳しくは [FE-03-TM-050 エアバブル/エアポケットの管内移動に関する基準]を参照)から、フルード数 0.3 は十分小さく、仮にガスが液に巻かれても、自身の浮力によって離脱して上部の気相に抜け出すことができると思われる。その際、水平管ではかなり裕度(0.3 に対し 0.5)があるのでテークオフ部分でも気液が分離し層状になって流れると思われる。図 3 はこの状態を示している。一種のせき流れ(weir flow)となる。

テークオフ以降の流れは、基本的に開水路流れで扱われる。FM8 では Ackers の文献⁽²⁾が用いられている。

径を縮小する考えは理解できるが、何故、1/2 液位や 3/4 液位が採られるのかわからない。多分、テークオフ以降もガスの巻き込みを避けるための選択ではないかと思われる。この辺は対向 2 相流れの挙動という観点も含めて、更に調査してゆきたい。

引用文献)

- (0) HTXX sheet. FM8 Design of Gravity Flow Systems by R.A.Smith (Dec.1983)
- (1) "Tables for the hydraulic design of storm drains, sewer and pipeline " by Ackers,A
Hydraulic Research Institute, HMSO