

基礎講習

技術第4部 部長 吉岡 逸夫

管路内の液体過渡解析セミナー
2013年5月30日(木)開催
アドバンスソフト株式会社

資料目次

1. 物理現象編	スライド3
2. 理論編	スライド7
3. 数値計算編	スライド24
4. 流体機器編	スライド38
5. 設計とシミュレーション編	スライド42
6. 計算手順編	スライド46

物理現象編

- 水撃とは？
- 液柱分離とは？



[物理現象編]

水撃とは？

- 管路を液体が流れているとき、弁などを短時間に操作した結果、液体の運動エネルギーが圧力に変化し、水圧が急激に上昇あるいは下降する現象を水撃現象、発生圧力を水撃圧という。
- 水撃により管路系が受ける被害として次のような事例が報告されている。
 - ① 管内圧力の上昇による管体、弁、ポンプなど器材の破損事故。
 - ② 管内圧力の低下により負圧が発生し、管体が圧潰する事故。
- 水撃は時として管路に致命的な損害を及ぼすため、その圧力変化を予測することは実用上重要である。



液柱分離とは？

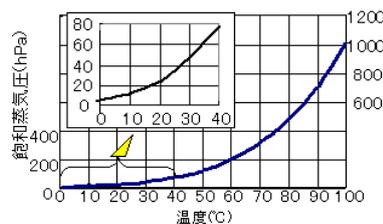
管路内の負圧が大きくなりすぎると「液柱分離」を誘発し、高圧に至ることがある。

管路内で圧力(内圧)が低下するのは、管路の一番高い場所や、弁の急遮断時の弁下流、ポンプトリップ時の長い管路などである。



管路の一番高い場所

例えば20°Cの水は2339 Pa[abs]以下で蒸気になる。



飽和蒸気圧

圧力が飽和蒸気圧以下に低下した場合、管内液体が蒸気となる現象が液柱分離である。蒸気の空洞が消滅するとき大きな圧力上昇が発生する。

液柱分離 (FrontNet/Ωのモデル)

Advance/FrontNet/Ωでは、このような物理現象を取り扱うために、次のような解析モデルを用いる。

➤ 計算で求めたメッシュ(格子点)の圧力水頭が蒸気圧以下の場合

- ①メッシュの圧力を蒸気圧に固定する。
- ②流入流量と流出流量の差を時間積分し、空洞体積を求める。
- ③空洞体積がゼロとなったときに圧力上昇を以下の式で計算する。

$$\Delta H_{\text{cavi}} = \frac{a}{2gA} (Q_{\text{out}} - Q_{\text{in}})$$

a : 音速[m/s]

A : 管の断面積[m²]

理論編

- 水理学の基礎的な用語と概念の復習



[理論編]

定常状態と過渡状態

定常状態

流れの状態(圧力、流速)が時間的に変化しないことを定常状態の流れという。

過渡状態

流れの状態(圧力、流速)が時間的に変化することを過渡状態の流れという。



典型的な例＝水撃



絶対圧、ゲージ圧と負圧

絶対圧とゲージ圧

真空状態を基準とした圧力を「絶対圧」という。絶対圧力は0より小さくなることはない。

大気圧を基準とした圧力をゲージ圧 (Gauge Pressure) という。

設計や実業務で使用されている圧力はゲージ圧であることが多い。

ゲージ圧 = 絶対圧 - 大気圧

※Advance/FrontNet/Ωではゲージ圧を標準として用いている。

負圧

ゲージ圧が負になることを負圧といい、液柱分離が起こる可能性があることから危険の目安となる。

実際には、液柱分離は飽和蒸気圧以下で起こる。

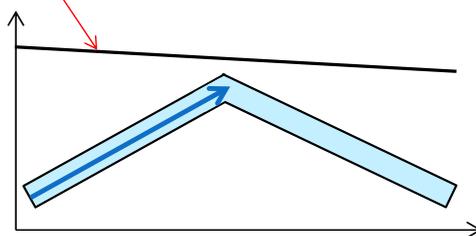
例えば、20°Cの水では、飽和蒸気圧 2339.2 Pa[abs]より、このときのゲージ圧は

$$P_{\text{gauge}} = 2339 - 101325 = -98986 \text{ Pa[gauge]} \doteq -0.1 \text{ MPa[gauge]}$$

動水勾配線 (圧力勾配線)

管路の各点のPiezo水頭を結んだ線を動水勾配線という。通常は流れの方向に沿って、負の勾配をもってなめらかな線となる。これを見ると送出圧力 (タンク水位やポンプ昇圧) が足りているかが確認できる。

動水勾配線の例 (定常)



最高圧力線

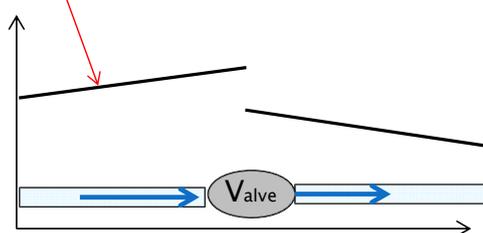
管路の各点に対し、ある過渡イベント(弁が閉まる、ポンプがトリップするなど)を考えたときに最高圧力を結んだものを最高圧力線という。

最高圧力線は、ピエゾ水頭表示と内圧表示がある。

最高圧力線がピエゾ水頭を結んだものである場合、配管耐圧値と比較できないため注意が必要である。

最高圧力線は不連続となる場合がある。

最高圧力線の例



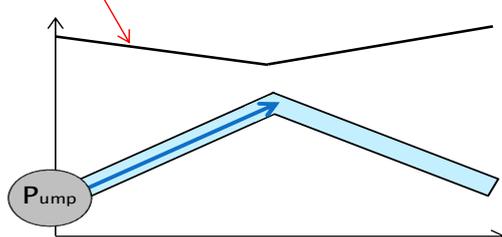
最低圧力線

管路の各点に対し、ある過渡イベントを考えたときに最低圧力を結んだものを最低圧力線という。

最低圧力線は、ピエゾ水頭表示と内圧表示がある。

最低圧力線がピエゾ水頭を結んだものである場合、これは飽和蒸気圧と比較できないため注意が必要である。内圧表示の最低圧力線は負圧の検討で利用される。

最低圧力線の例



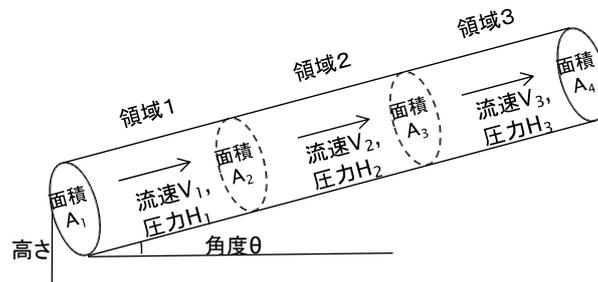
過渡流動の基礎方程式

$$\text{質量保存式} \quad \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + V \left(\frac{\partial H}{\partial x} - \sin \theta \right) = 0$$

$$\text{運動量保存式} \quad \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \left(V \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} \right) + \frac{\lambda Q}{2gDA^2} |Q| = 0$$

H: Piezo水頭[m]、V: 流速[m/s]、A: 流路断面積[m²]、Q=AV: 体積流量[m³/s]、
θ: 管勾配[rad]、g: 重力加速度[m/s²]

配管内の流れのイメージ



圧力波伝播速度

$$a = 1 / \sqrt{\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{D \cdot C_1}{E \cdot e} \right)}$$

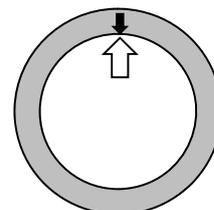
K: 液体の体積弾性係数[Pa]、ρ: 密度[kg/m³]、E: 管材のヤング率(縦弾性係数)[Pa]

D: 配管径[m]、e: 管厚[m]

C₁は管の埋設状況による係数である(1.0を基準とする)。

この式が表しているのは、圧力波伝播速度が流体物性のみには依存しているのではなく、
管材物性、管形状にも依存していることである。

管路構造材のたわみも考慮して音速が決められる

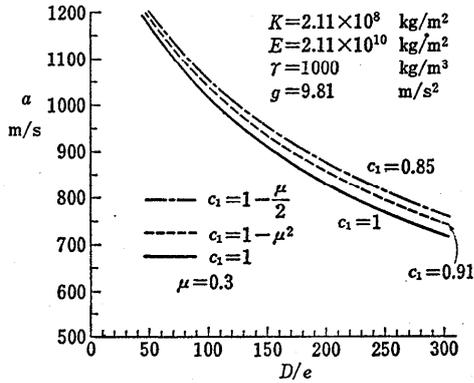


圧力波伝播速度

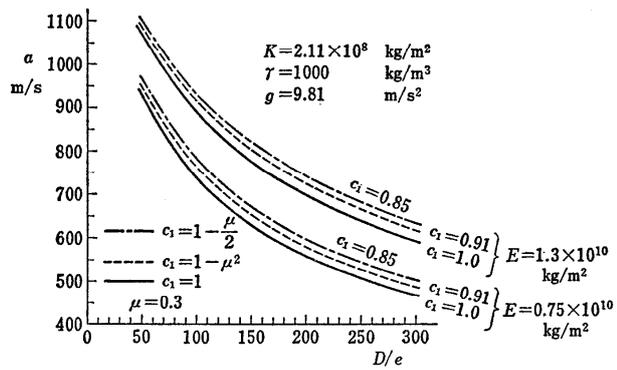
管材が剛体の場合はヤング率Eが無限大とみなせ、水温20°C、大気圧の場合は圧力波伝播速度は1438m/sとなる(スライド16の式から)。

実際の管材は、剛体ではなく種々の材料が用いられている。

例として鋼管と鋳鉄管の場合の圧力波伝播速度を示す。



鋼管における圧力波伝播速度



鋳鉄管における圧力波伝播速度

[出典]水撃入門、横山(2003).

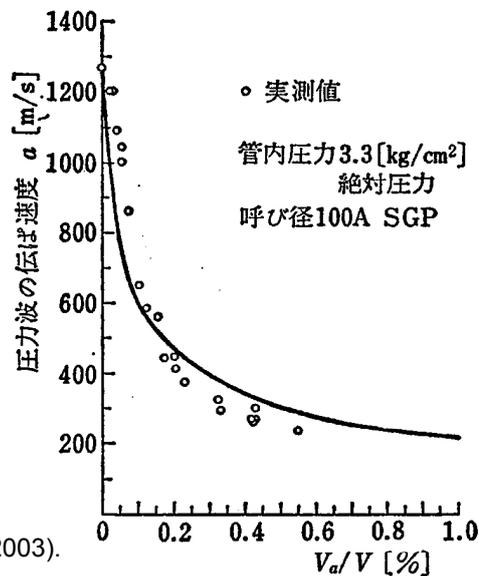
圧力波伝播速度

水中に気泡が含まれている場合、圧力波伝播速度は著しく低下する。

配管用炭素鋼鋼管(SGP)を例に、空気混入率が圧力波伝播速度に及ぼす影響を示す。

V_a : 空気の体積

V : 水と空気との混合体の体積

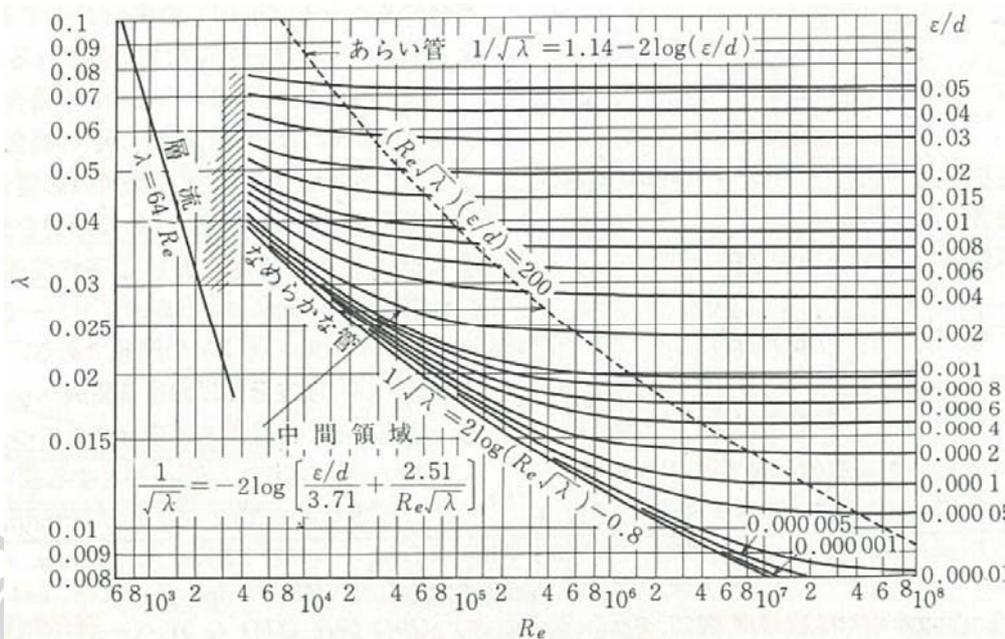


[出典] 水撃入門、横山(2003).

管摩擦 (Moody線図)

管路内を流れる流体は摩擦抵抗を受ける。

Re(レイノルズ数)と摩擦係数の関係図としてMoody線図がよく知られている。



[出典]
機械工学便覧 A5
流体工学 p.75

管摩擦 (Colebrookの式)

Darcyの管摩擦係数λは以下の式で表わされる。(Colebrookの式)。
これはλに関して陰的表現となっている(λ=...の形で表せない)。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.0 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right)$$

ε: 配管粗度[m]、D: 配管径[m]、ε/D: 相対粗度[-]

管摩擦による圧力損失と管摩擦係数の関係は下式で表される。

$$\Delta P_{\text{wall}} = \frac{\lambda L}{D} \frac{1}{2} \rho u^2$$

L: 摩擦損失が生じた距離[m]

※Darcyの管摩擦係数λとFanningの摩擦係数fは4倍の差があるので混同しないように注意が必要である。
 $\lambda = 4f$

[理論編] FrontNet/Ωの基礎式 管摩擦 (Churchillの式)



Colebrookの式の陽的表現の式として、Churchillの式がある。

$$\lambda_{\text{Chu}} = 8 \left\{ \left(\frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + (A + B)^{-1.5} \right\}^{\frac{1}{12}}$$

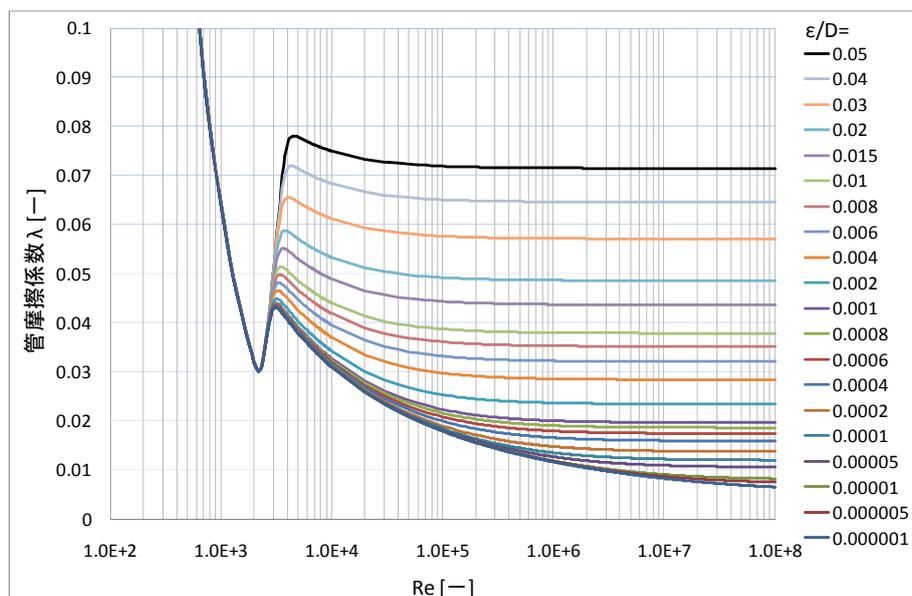
$$A = (2.457 \ln C)^{16}$$

$$B = (3.753 \times 10^4 / \text{Re})^{16}$$

$$C = \frac{1}{(7/\text{Re})^{0.9} + 0.27(\varepsilon/D)}$$

Churchill式の特長は、層流から乱流までを一括して扱えることである。

[理論編] 管摩擦 (Churchill 式の図化)



← 層流 → 遷移領域 ← 乱流 →

Churchillの式による管摩擦係数

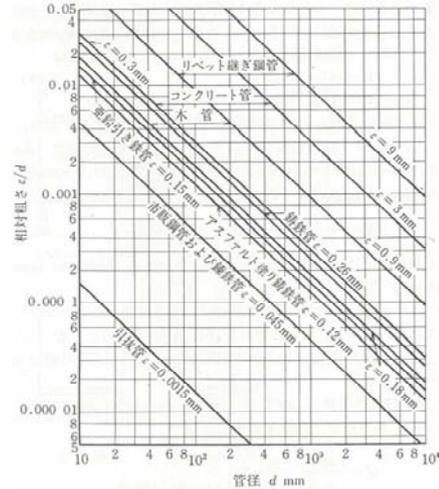
配管粗度

管壁面の粗さを配管粗度とよび、絶対粗度(突起の高さ) ϵ や相対粗度 ϵ/D が指標となる(D:配管径)。

乱流域における管摩擦係数は、 Re (レイノルズ数)及び相対粗度の関数である。

海水や汚水を流している配管では、腐食により粗度は大きくなる。

経年劣化により古い管のほうが粗度が大きい。



实用管の相対粗さ
 ϵ : 絶対粗度、 ϵ/D : 相対粗度

[出典]
 機械工学便覧 A5 流体工学 p.75



数値計算編

- Advance/FrontNet/ Ω の数値計算法



特性曲線法と離散化(1)

非公開

特性曲線法と離散化(2)

非公開

非公開

非公開

時間刻み(クーラン数)(1)

非公開

時間刻み(クーラン数)(2)

非公開

Null transient計算

ナル(=ゼロ) トランジェント(=過渡)

非公開

圧力境界条件と流量境界条件

非公開

圧力一圧力境界

非公開

流量一圧力境界

非公開

压力—流量境界

非公開

流量—流量境界

非公開

時系列データの出力

非公開

流体機器編

非公開

局所損失(エルボ、ベンド、オリフィス)

非公開

弁

非公開

非公開

非公開

非公開

非公開

非公開

非公開

計算手順の例(1)

非公開

計算手順の例(2)

非公開