

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



本日のプログラム

- 13:30～13:35 主催者挨拶
- 13:35～14:35 基礎講習
 - ・水理学とシミュレーションの基本事項
 - ・Advance/FrontNet/Ω インストール
- 14:35～14:45 休憩
- 14:45～16:25 応用事例紹介・ソフト使用方法
 - ・チュートリアルを使用したAdvance/FrontNet/Ω デモンストレーション
 - ・チュートリアルに沿ったソフトウェア体験学習
- 16:25～16:40 価格および関連サービス紹介、質疑応答
 - ・自由な条件設定での質問受付など

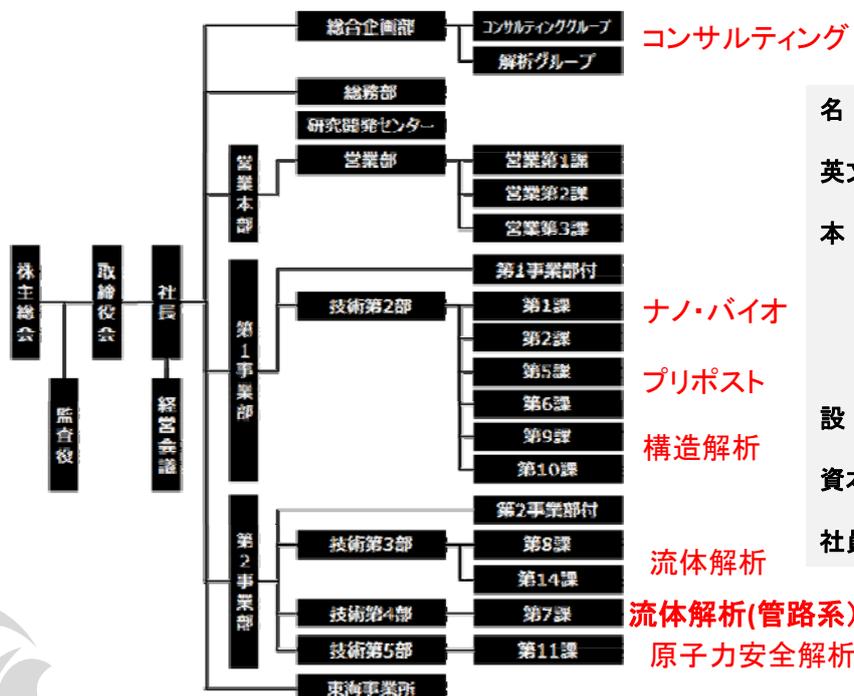


アドバンスソフト株式会社のご紹介

第2事業部 技師長 浜野 明千宏

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

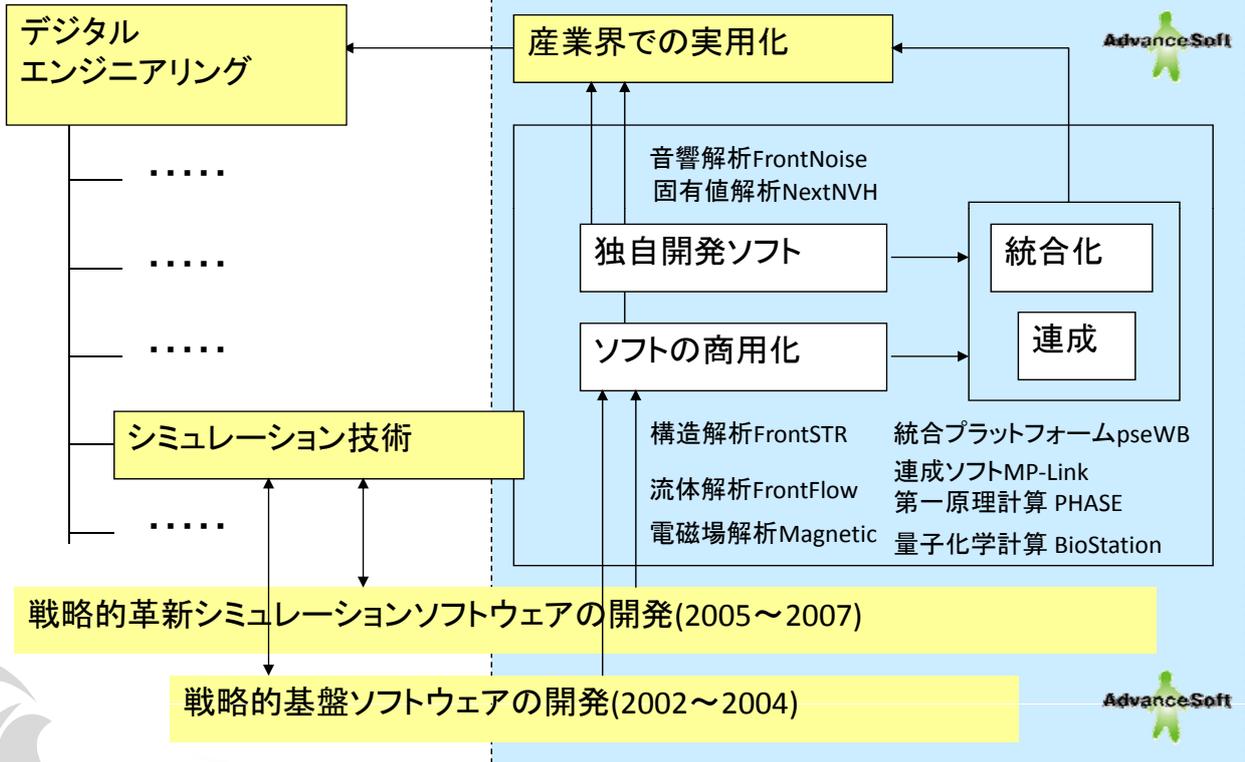
会社概要



名 称 アドバンスソフト株式会社
 英文名 AdvanceSoft Corporation
 本 社 〒107-0052
 東京都港区赤坂1丁目9番20号
 第16興和ビル南館7階
 TEL: 03-5570-1680
 FAX: 03-5570-1684
 設 立 2002年(平成14年)4月24日
 資本金 3,724万円
 社員数 67名(2013年4月1日現在)

アドバンスソフトとは

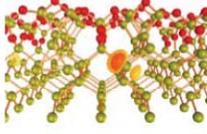
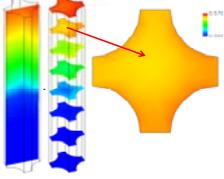
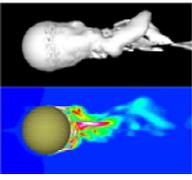
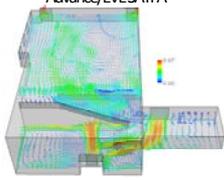
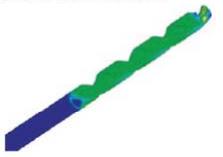
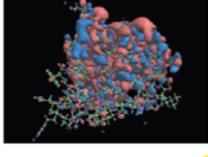
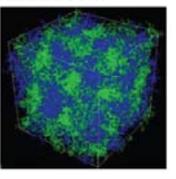
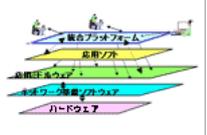
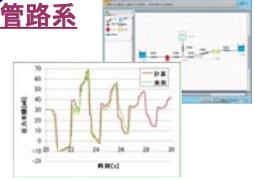
産業界のニーズ



事業分野と事業内容



取り扱いパッケージ一覧

<p>ナノ</p> <p>Advance/PHASE</p>  <p>Advance/TFLAGS</p> 	<p>流体</p> <p>Advance/FrontFlow/red</p>  <p>Advance/FrontFlow/MP</p>  <p>Advance/FrontFlow/FOCUS</p>  <p>Advance/EVE SAYFA</p> 	<p>構造</p> <p>Advance/FrontSTR</p> 
<p>バイオ</p> <p>Advance/BioStation</p>  <p>Advance/ProteinDF</p> 	<p>メソ</p> <p>Advance/OCTA</p> 	<p>統合プラットフォーム</p> <p>Advance/PSE Workbench</p> 
		<p>管路系</p>  <p>Advance/FrontNet</p>

アドバンスソフトのパッケージソフトウェア

ソフトウェア名称	解析内容
Advance/FrontFlow/red	汎用3次元流体解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/MP	3次元気液二相流解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/FOCUS	高速流解析ソフトウェア
Advance/EVE SAYFA	都市安全・環境シミュレータ
Advance/FrontNet	管路系1次元流体解析ソフトウェア
Advance/FrontSTR	汎用構造解析ソフトウェア
Advance/FrontNoise	騒音解析ソフトウェア
Advance/REVOCAP	構造解析・流体解析プリポストプロセッサ
Advance/PSE Workbench	統合プラットフォーム
Advance/PHASE	第一原理バンド計算ソフトウェア
Advance/DESSERT	半導体デバイスシミュレータ
AMDS (Advance/MaterialDesignSystem)	材料設計統合システム
ABaS(Advance/BatteryDesignSystem)	2次電池CADシステム
ADBS(Advance/BioStation)	大規模タンパク質の量子化学計算解析ソフトウェア
Advance/ProteinDF	大規模タンパク質の全電子計算ソフトウェア
Advance/OCTA	ソフトマテリアル統合シミュレータ
TFLAGS	薄膜成長シミュレータ

液体管路系の非定常解析ソフトウェア

Advance/FrontNet/ Ω

→水撃、液柱分離、ポンプトリップ、弁操作
⇒エネルギープラント、発電施設、上水道、農業

(本ご紹介)

ガス管路系の非定常解析ソフトウェア

Advance/FrontNet/ Γ

→実流体物性、圧力波、構造物熱伝導連成解析
⇒ロケットエンジン、原子力施設、都市ガス管路網

気液二相流管路系の非定常解析ソフトウェア

Advance/FrontNet/TP

→ドリフトフラックスに基づく気液二相流モデル
水、メタン、自然冷媒の物性DB、流体構造連成解析
⇒冷凍システム、原子力施設、プラント設計

facebook、YouTubeでも関連記事を掲載中

<http://www.facebook.com/advancesoft.jp>



<http://www.youtube.com/user/advancesoft>



アドバンスソフトは、高度な技術力、開発力、人材を武器に、最先端理論を応用した解析シミュレーションソフトウェアを開発・販売しています。受託解析、受託開発、パッケージソフトウェア、コンサルティング等多様なソリューションを通じて、お客様の問題解決に即戦力として貢献します。



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？

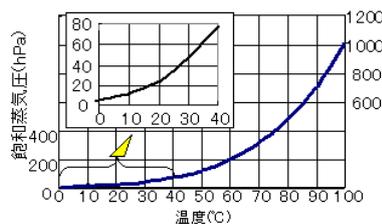
管路内の負圧が大きくなりすぎると「液柱分離」を誘発し、高圧に至ることがある。

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

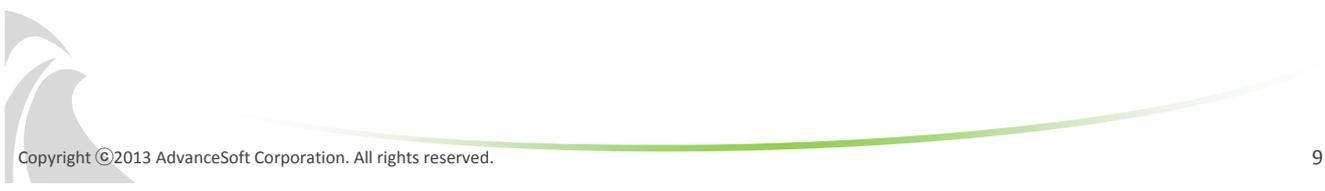


ベルヌーイの式

定常状態での流体に対する力学的エネルギー保存則を表す式がBernoulli(ベルヌーイ)の式である。

$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho g z = const.$$

静圧 (圧力の寄与) 動圧 (速度の寄与) 位置の寄与



水頭

エネルギーを高さで表したものを水頭(ヘッド)という。

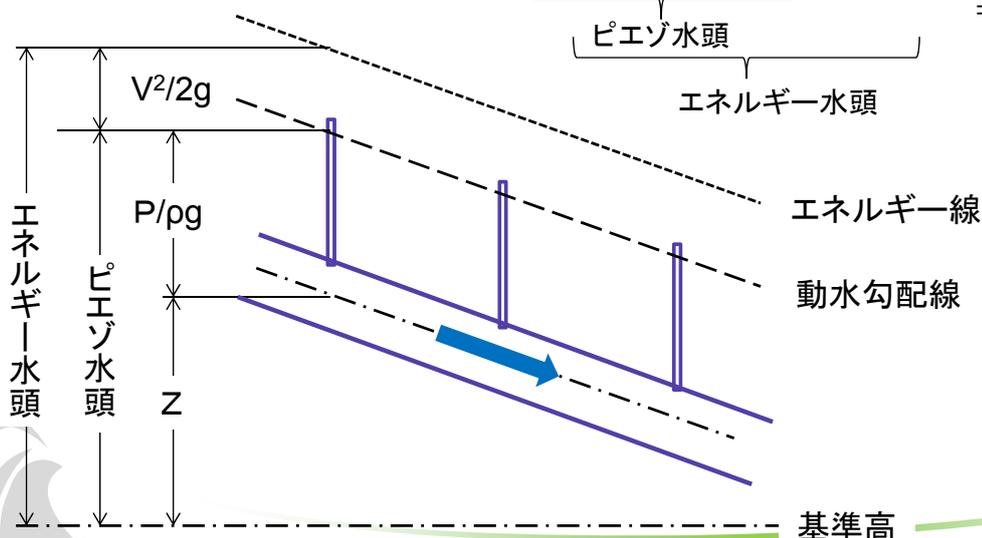
Bernoulliの式を水頭表示する。

$$H_{all} = \frac{P}{\rho g} + z + \frac{V^2}{2g} = H_{pres} + z + \frac{V^2}{2g}$$

{ 圧力水頭 位置水頭 }
速度水頭

$$= H_{piezo} + \frac{V^2}{2g} = const.$$

{ ピエゾ水頭 }
エネルギー水頭



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。

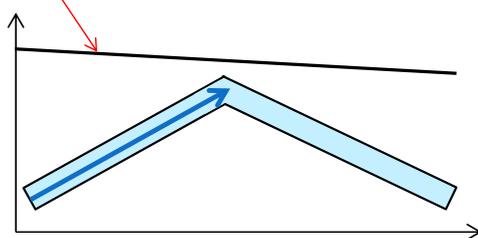
例えば、20°Cの水では、飽和蒸気圧 2339.2 Pa[abs]より、このときのゲージ圧は

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

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

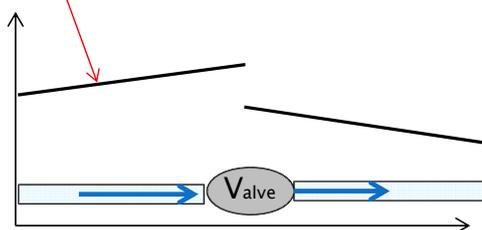
管路の各点に対し、ある過渡イベント(弁が閉まる、ポンプがトリップするなど)を考えたときに最高圧力を結んだものを最高圧力線という。

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



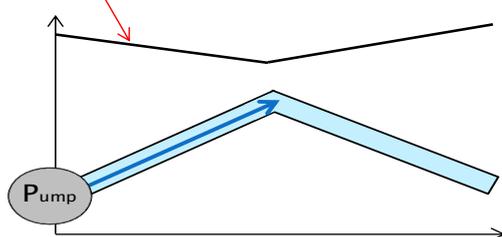
最低圧力線

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



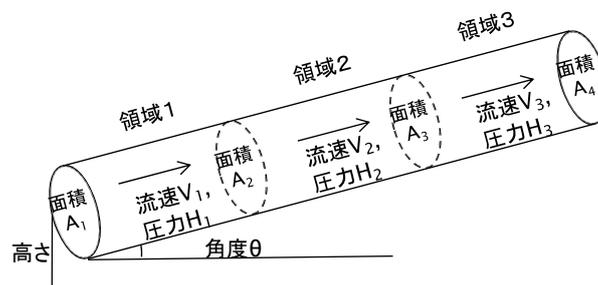
過渡流動の基礎方程式

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

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

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

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

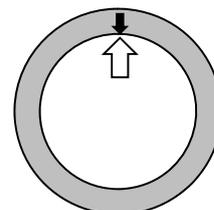
K: 液体の体積弾性係数[Pa]、ρ: 密度[kg/m³]、E: 管材のヤング率(縦弾性係数)[Pa]

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

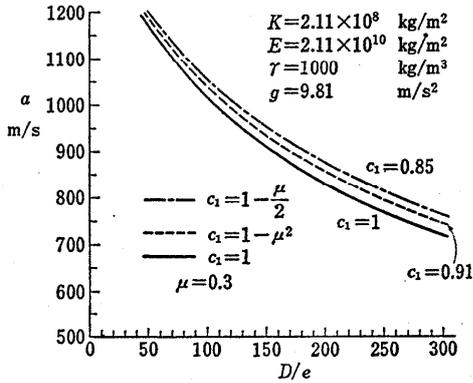


圧力波伝播速度

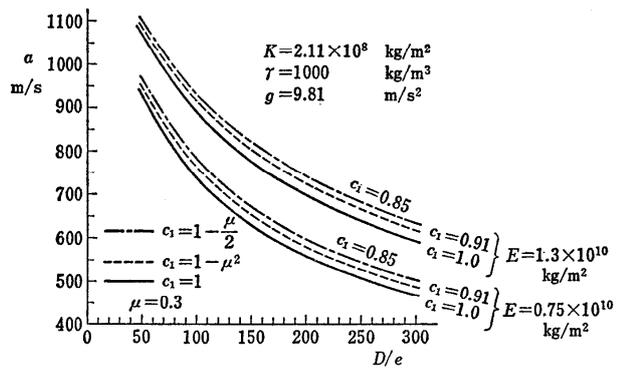
管材が剛体の場合はヤング率Eが無限大とみなせ、水温20°C、大気圧の場合は圧力波伝播速度は1438m/sとなる(スライド16の式から)。

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).

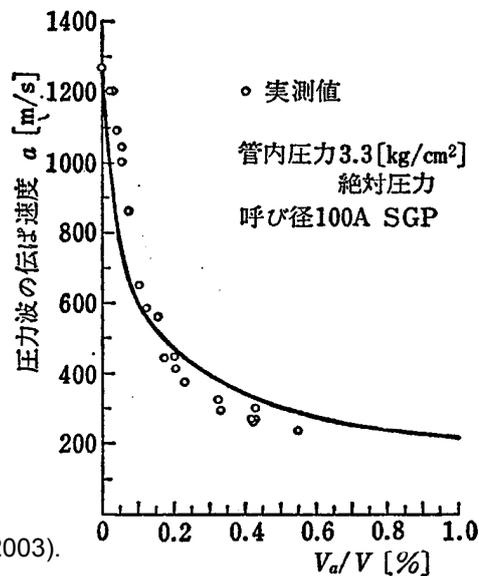
圧力波伝播速度

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

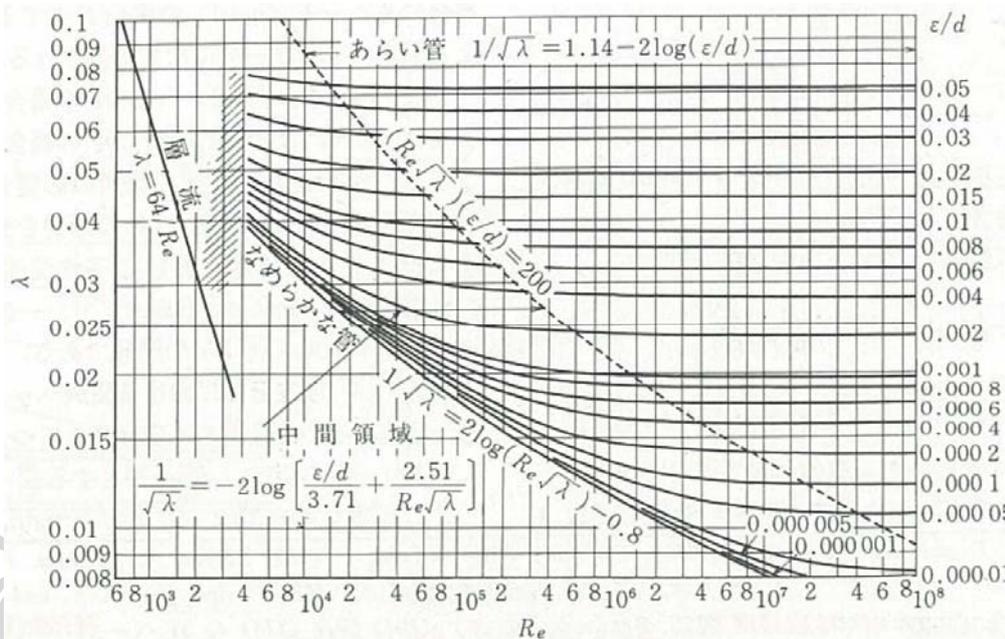


[出典] 水撃入門、横山(2003).

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。

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

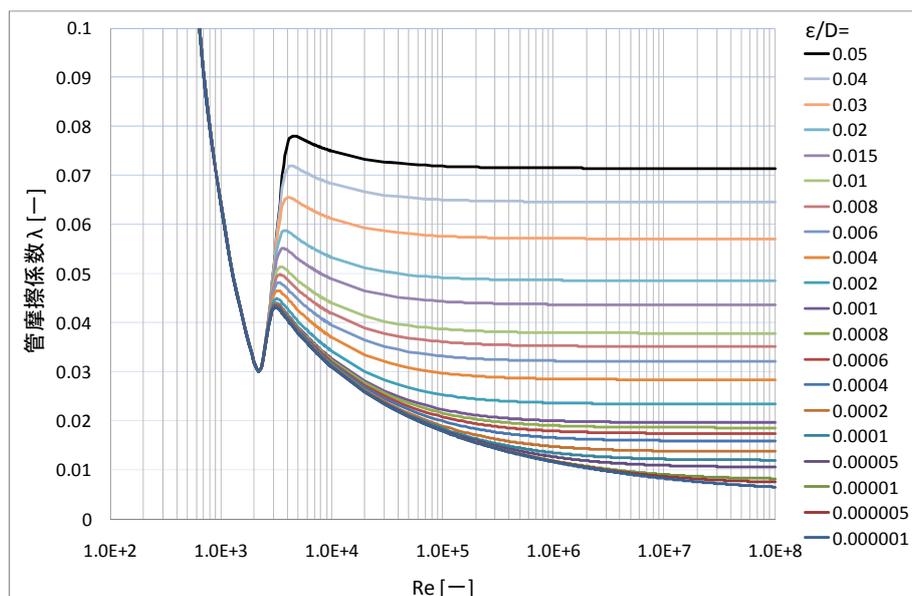
$$A = (2.457 \ln C)^{16}$$

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

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

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

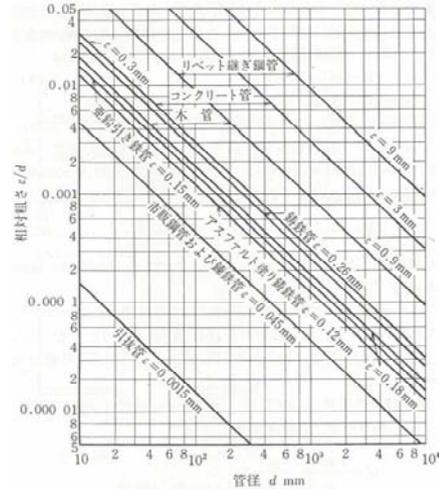
配管粗度

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

非公開

非公開

压力—流量境界

非公開

流量—流量境界

非公開

非公開

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

応用事例紹介・ソフト使用方法

技術4部7課 課長 秋村友香
総合企画部 解析グループ 出浦智之

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

ご紹介内容

- ①基礎的な操作方法のご紹介
 - ーソフトウェアの操作手順
 - ーデモンストレーション&体験学習
- ②バルブ遮断時の水撃解析
 - ー計算のポイントの説明
 - ーデモンストレーション&体験学習
- ③ポンプトリップ時の水撃解析
 - ー計算のポイントの説明
 - ーデモンストレーション&体験学習

①基礎的な操作方法のご紹介

ソフトウェアの操作手順

全体の流れは、以下となります。

管路系の接続関係の構築(分岐、合流、機器の配置)

↓

計算条件の設定

↓

実行、結果の確認

実際に簡単な例でデモンストレーションをします。

(参考:チュートリアルp3~)

保存したプロジェクトフォルダ内の 主要なファイル説明

(参考:使用方法説明書 p.42~)

 control	: 計算の全体制御
 fluid	: 管内の流体の物理量
 geom	: 配管形状関連
 GUIdata	: ソルバー入力ファイル
 input	: GUIの計算設定データ
 tabledata	: テーブル入力データ
 timedata	: 時系列ファイル

 設定フロー.vsd : Visioファイル

 設定フロー.vsd.bak

 **control** : 計算の全体制御

ファイル名	内容
omega.inp	計算設定入力ファイル (=ソルバーが読み込むファイル)
restart_write.txt	リスタート用出力ファイル
ver.txt	ソルバーのバージョン番号

 **fluid** : 管内の流体の物理量

ファイル名	内容
maxmin.csv	計算中の最大の流量・圧力と最小の流量・圧力
out_cavi.txt	液柱分離 (液柱分離起きたとき、ファイル書込)
out_fld.txt	液体の計算基本物理量
out_liq.txt	液体物性
out_prop.txt	液体の無次元量
out_ploss.txt	圧力損失
outline_node.txt	ノードの計算概要
outline_pipe.txt	配管の計算概要

null 計算時間を超えてから計測した、最大圧力・最小圧力。
圧力勾配線を書くときに使用する。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	5.000000E+01	0.000000E+00	4.642272E-02	6.960901E+05	7.111228E+01	7.111228E+01	7.100095E+01	4.642254E-02	6.960901E+05	7.111228E+01	7.111228E+01	7.100095E+01
2	1.000000E+02	0.000000E+00	4.642288E-02	6.910904E+05	7.060151E+01	7.060151E+01	7.049018E+01	4.642270E-02	6.910904E+05	7.060151E+01	7.060151E+01	7.049018E+01
3	1.500000E+02	0.000000E+00	4.642305E-02	6.860906E+05	7.009074E+01	7.009074E+01	6.997941E+01	4.642286E-02	6.860906E+05	7.009074E+01	7.009074E+01	6.997941E+01
4	2.000000E+02	0.000000E+00	4.642321E-02	6.810909E+05	6.957997E+01	6.957997E+01	6.946863E+01	4.642303E-02	6.810909E+05	6.957997E+01	6.957997E+01	6.946863E+01
5	2.500000E+02	0.000000E+00	4.642337E-02	6.760911E+05	6.906919E+01	6.906919E+01	6.895786E+01	4.642318E-02	6.760911E+05	6.906919E+01	6.906919E+01	6.895786E+01
6	3.000000E+02	0.000000E+00	4.642353E-02	6.710912E+05	6.855841E+01	6.855841E+01	6.844707E+01	4.642335E-02	6.710912E+05	6.855841E+01	6.855841E+01	6.844707E+01
7	3.500000E+02	0.000000E+00	4.642369E-02	6.660913E+05	6.804762E+01	6.804762E+01	6.793629E+01	4.642351E-02	6.660913E+05	6.804762E+01	6.804762E+01	6.793629E+01
8	4.000000E+02	0.000000E+00	4.642385E-02	6.610914E+05	6.753683E+01	6.753683E+01	6.742550E+01	4.642367E-02	6.610914E+05	6.753683E+01	6.753683E+01	6.742550E+01
9	4.500000E+02	0.000000E+00	4.642402E-02	6.560915E+05	6.702604E+01	6.702604E+01	6.691470E+01	4.642383E-02	6.560915E+05	6.702604E+01	6.702604E+01	6.691470E+01
10	5.000000E+02	0.000000E+00	4.642418E-02	6.510915E+05	6.651524E+01	6.651524E+01	6.640391E+01	4.642400E-02	6.510915E+05	6.651524E+01	6.651524E+01	6.640391E+01
11	5.500000E+02	0.000000E+00	4.642434E-02	6.460915E+05	6.600445E+01	6.600445E+01	6.589311E+01	4.642416E-02	6.460915E+05	6.600445E+01	6.600445E+01	6.589311E+01
12	6.000000E+02	0.000000E+00	4.642450E-02	6.410915E+05	6.549364E+01	6.549364E+01	6.538231E+01	4.642432E-02	6.410915E+05	6.549364E+01	6.549364E+01	6.538231E+01
13	6.500000E+02	0.000000E+00	4.642466E-02	6.360914E+05	6.498284E+01	6.498284E+01	6.487150E+01	4.642448E-02	6.360914E+05	6.498284E+01	6.498284E+01	6.487150E+01
14	7.000000E+02	0.000000E+00	4.642482E-02	6.310913E+05	6.447203E+01	6.447203E+01	6.436069E+01	4.642464E-02	6.310913E+05	6.447203E+01	6.447203E+01	6.436069E+01
15	7.500000E+02	0.000000E+00	4.642498E-02	6.260911E+05	6.396122E+01	6.396122E+01	6.384988E+01	4.642480E-02	6.260911E+05	6.396122E+01	6.396122E+01	6.384988E+01
16	8.000000E+02	0.000000E+00	4.642515E-02	6.210910E+05	6.345040E+01	6.345040E+01	6.333906E+01	4.642497E-02	6.210910E+05	6.345040E+01	6.345040E+01	6.333906E+01
17	8.500000E+02	0.000000E+00	4.642531E-02	6.160907E+05	6.293958E+01	6.293958E+01	6.282824E+01	4.642513E-02	6.160907E+05	6.293958E+01	6.293958E+01	6.282824E+01
18	9.000000E+02	0.000000E+00	4.642547E-02	6.110905E+05	6.242876E+01	6.242876E+01	6.231741E+01	4.642529E-02	6.110905E+05	6.242876E+01	6.242876E+01	6.231741E+01
19	9.500000E+02	0.000000E+00	4.642563E-02	6.060902E+05	6.191793E+01	6.191793E+01	6.180659E+01	4.642545E-02	6.060902E+05	6.191793E+01	6.191793E+01	6.180659E+01

1列	2列	3列	4列	5列	6列	7列	8列	9列	10列	11列	12列	13列
配管番号	その配管番号の始点からの距離 [m]	高さ [m]	最大流量 [m3/s]	最大圧力 (内圧, 静圧) [PaG]	最大水頭 (内圧, 全圧) [mG]	最大ピエゾ水頭 (全圧) [mG]	最大ピエゾ水頭 (静圧) [mG]	最小流量 [m3/s]	最小圧力 (内圧, 静圧) [PaG]	最小水頭 (内圧, 全圧) [mG]	最小ピエゾ水頭 (全圧) [mG]	最小ピエゾ水頭 (静圧) [mG]

(液柱分離が起こった場合の例)

1	time=	0.200899E+03↓		
2	4	10	1.83655E-05↓	
3	5	0	1.83655E-05↓	液柱分離が起こった時間
4	time=	0.200913E+03↓		
5	4	10	3.85265E-05↓	
6	5	0	3.85265E-05↓	
7	time=	0.200927E+03↓		
8	4	10	6.73641E-05↓	
9	5	0	6.73641E-05↓	
10	5	1	7.68769E-06↓	
11	5	2	3.14295E-06↓	
12	time=	0.200941E+03↓		
13	4	10	1.08792E-04↓	
14	5	0	1.08792E-04↓	
15	5	1	1.22995E-05↓	
16	5	2	1.02699E-05↓	

時間ごと、配管ごとの全てのメッシュの圧力、流量

```

1 time= 0.000000000000000E+000
2 id, pipe, ix, velo[m/s], flow[m3/s], head[mA], pres[PaA], acoustic[m/s], friction[-], reynolds no.[-]
3 1 0 1.001843E-04 3.147384E-06 8.186304E+01 8.013250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
4 1 1 0.000000E+00 0.000000E+00 8.135224E+01 7.963250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
5 1 2 0.000000E+00 0.000000E+00 8.084144E+01 7.913250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
6 1 3 0.000000E+00 0.000000E+00 8.033064E+01 7.863250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
7 1 4 0.000000E+00 0.000000E+00 7.981985E+01 7.813250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
8 1 5 0.000000E+00 0.000000E+00 7.930905E+01 7.763250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
9 1 6 0.000000E+00 0.000000E+00 7.879825E+01 7.713250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
10 1 7 0.000000E+00 0.000000E+00 7.828745E+01 7.663250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
11 1 8 0.000000E+00 0.000000E+00 7.777665E+01 7.613250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
12 1 9 0.000000E+00 0.000000E+00 7.726586E+01 7.563250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
13 1 10 0.000000E+00 0.000000E+00 7.675506E+01 7.513250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
14 1 11 0.000000E+00 0.000000E+00 7.624426E+01 7.463250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
15 1 12 0.000000E+00 0.000000E+00 7.573346E+01 7.413250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
16 1 13 0.000000E+00 0.000000E+00 7.522266E+01 7.363250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
17 1 14 0.000000E+00 0.000000E+00 7.471187E+01 7.313250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
18 1 15 0.000000E+00 0.000000E+00 7.420107E+01 7.263250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
19 1 16 0.000000E+00 0.000000E+00 7.369027E+01 7.213250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
20 1 17 0.000000E+00 0.000000E+00 7.317947E+01 7.163250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
21 1 18 0.000000E+00 0.000000E+00 7.266867E+01 7.113250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
22 1 19 0.000000E+00 0.000000E+00 7.215788E+01 7.063250E+05 1.200000E+03 1.000000E+02 6.400000E-01
23 time= 72.8318090445183
24 id, pipe, ix, velo[m/s], flow[m3/s], head[mA], pres[PaA], acoustic[m/s], friction[-], reynolds no.[-]
25 1 1 1.673793E+00 5.258377E-02 8.186304E+01 8.013250E+05 1.200000E+03 1.428696E-02 3.336083E+05
26 1 2 1.673805E+00 5.258414E-02 8.135227E+01 7.963253E+05 1.200000E+03 1.428695E-02 3.336095E+05
27 1 3 1.673811E+00 5.258414E-02 8.084150E+01 7.913256E+05 1.200000E+03 1.428694E-02 3.336106E+05
28 1 4 1.673817E+00 5.258432E-02 8.033073E+01 7.863258E+05 1.200000E+03 1.428693E-02 3.336118E+05
29 1 5 1.673823E+00 5.258450E-02 7.981995E+01 7.813260E+05 1.200000E+03 1.428692E-02 3.336129E+05
30 1 6 1.673828E+00 5.258469E-02 7.930917E+01 7.763262E+05 1.200000E+03 1.428691E-02 3.336141E+05
31 1 7 1.673833E+00 5.258487E-02 7.879839E+01 7.713263E+05 1.200000E+03 1.428690E-02 3.336153E+05
    
```

1列目	2列目	3列目	4列目	5列目	6列目	7列目	8列目	9列目
配管番号	分割番号	流速	流量	圧力水頭	圧力	音速	摩擦係数	レイノルズ数

```

39 | 1 | 14 | 1.673875E+00 | 5.258633E-02 | 7.471200E+01 | 7.313263E+05 | 1.200000E+03 | 1.428683E-02 | 3.336246E+05
    
```

配管に定義された物理量の概要を見るためのファイル
時間ごと、配管ごとの圧力、流量のメッシュ平均値

```

1 time = 0.000000000000000E+000
2 id, ipipe, name, length, avf[m3/s], avf[t/h], hi[mG], hj[mG], pi[PaG], pj[PaG], delh[m], delp[Pa]
3 1 1 pipe1 1.000E+03 1.574E-07 5.655E-04 7.151E+01 6.130E+01 7.000E+05 6.000E+05 1.022E+01 1.000E+05
4
5
6 time = 72.8318090445183
7 id, ipipe, name, length, avf[m3/s], avf[t/h], hi[mG], hj[mG], pi[PaG], pj[PaG], delh[m], delp[Pa]
8 1 1 pipe1 1.000E+03 5.259E-02 1.890E+02 7.151E+01 6.130E+01 7.000E+05 6.000E+05 1.022E+01 1.000E+05
9
10 time = 101.957829753700
11 id, ipipe, name, length, avf[m3/s], avf[t/h], hi[mG], hj[mG], pi[PaG], pj[PaG], delh[m], delp[Pa]
12 1 1 pipe1 1.000E+03 5.262E-02 1.891E+02 7.151E+01 6.130E+01 7.000E+05 6.000E+05 1.022E+01 1.000E+05
    
```

1列目	2列目	3列目	4列目	5列目	6列目	7列目	8列目	9列目	10列目	11列目	12列目
配管番号	分割数	名前	配管長	平均流量	平均流量	i端圧力	j端圧力	i端圧力	j端圧力	圧力差	圧力差

```

22 | time = 145.648849831206
23 | id, ipipe, name, length, avf[m3/s], avf[t/h], hi[mG], hj[mG], pi[PaG], pj[PaG], delh[m], delp[Pa]
24 | 1 1 pipe1 1.000E+03 5.262E-02 1.891E+02 7.151E+01 6.130E+01 7.000E+05 6.000E+05 1.022E+01 1.000E+05
25 |
    
```

配管の多い場合、全体の流動状況の把握に便利

ノードに定義された物理量の概要を見るためのファイル
時間ごと、ノードの圧力損失、バルブの開度

```

1 |
2 | time = 0.000000000000000E+000 ↓
3 | node, name, kind, delh[m], delp[pa], opening, cv, fcoef ↓
4 | 1/ default / reservoir_i 0.000E+00 0.000E+00 ↓
5 | 2/ default / reservoir_j 0.000E+00 0.000E+00 ↓
6 | ↓
    
```

バルブがある場合の例

```

time = 0.000000000000000E+000 ↓
node, name, kind, delh[m], delp[pa], opening, cv, fcoef ↓
1/ default / reservoir_i 0.000E+00 0.000E+00 ↓
2/ default / pump 0.000E+00 0.000E+00 ↓
3/ default / reservoir_j 0.000E+00 0.000E+00 ↓
4/ default / junction 0.000E+00 0.000E+00 ↓
5/ default / cnct 0.000E+00 0.000E+00 ↓
6/ default / valve 0.000E+00 0.000E+00 1.000E+02 1.000E+04 7.521E-01 ↓
7/ default / boundary_tank 0.000E+00 0.000E+00 ↓

time = 7.00755029100410 ↓
node, name, kind, delh[m], delp[pa], opening, cv, fcoef ↓
1/ default / reservoir_i 0.000E+00 0.000E+00 ↓
2/ default / pump 1.640E+01 1.605E+05 ↓
3/ default / reservoir_j 0.000E+00 0.000E+00 ↓
4/ default / junction 0.000E+00 0.000E+00 ↓
5/ default / cnct 0.000E+00 0.000E+00 ↓
6/ default / valve -1.000E-01 -9.793E+02 1.000E+02 1.000E+04 7.521E-01 ↓
7/ default / boundary_tank 0.000E+00 0.000E+00 ↓
    
```

1列目	2列目	3列目	4列目	5列目	6列目	7列目	8列目
ノード番号	名前	属性	圧損	圧損	開度	Cv値	fv値

②バルブ遮断時の水撃解析

(参考:チュートリアルp.75~)

バルブ遮断時の水撃は、バルブ遮断速度に大きく依存します。
バルブが閉まると、水撃は上流側に伝わります。

バルブ特性(開度とCv値の関係)が決まっているとき、
検討可能な計算パラメータは**バルブ閉鎖速度**となります。

③ポンプトリップ時の水撃解析

(参考:チュートリアルp.99~)

ポンプトリップ時の水撃解析は液柱分離現象が起こったのち、液柱体積がいくつで、液柱がどのくらいの速度で潰されるかが圧力上昇(水撃圧)に影響します。

ポンプの運転条件が決まっているとき
検討可能な計算パラメータはGD2となります。
(最近のポンプはGD2が小さくなる傾向にあるようです。
羽根車に重りをつけるとGD2は大きくなります。)

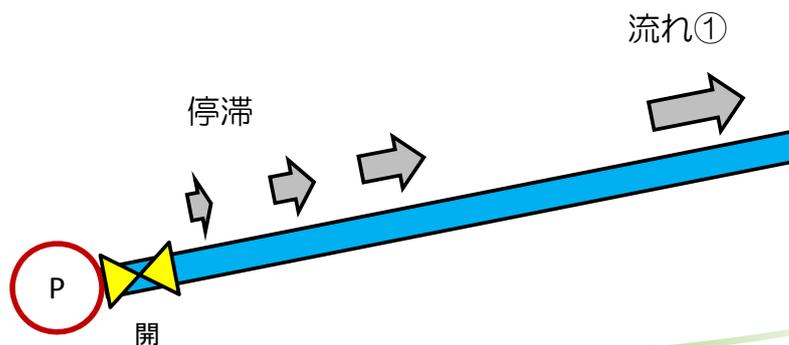


今回の例題は、
傾斜のある管路を逆止弁付きポンプがくみ上げている例です。
ポンプトリップ時の現象は以下の通りです。

(1)ポンプがトリップ →揚程が徐々に低下

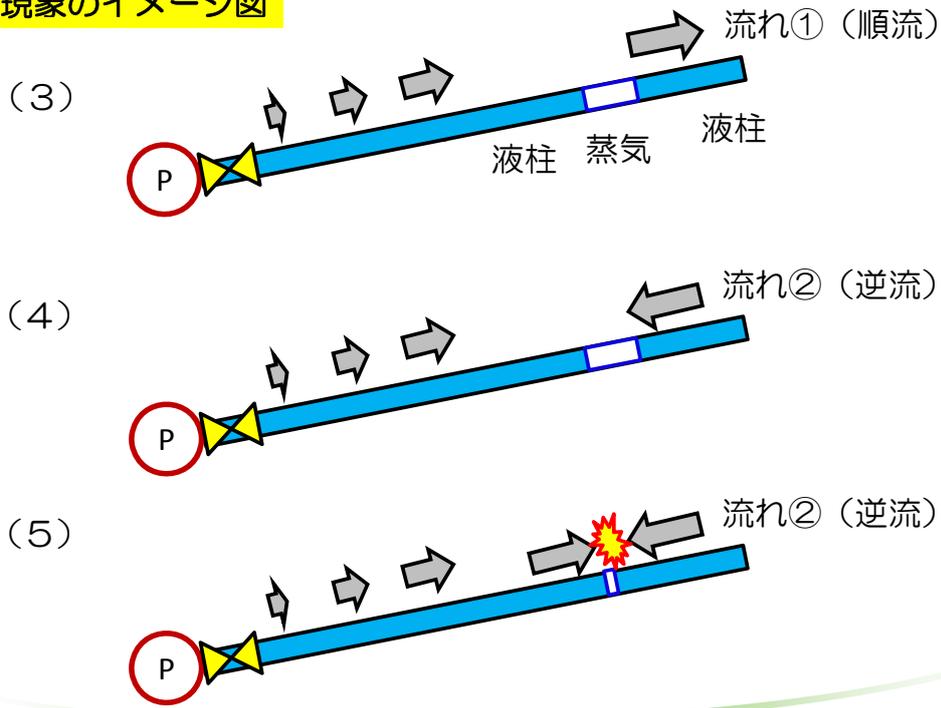
(2)ポンプ昇圧低下に伴って管路内では圧力が低下する。
流れの慣性によって、ポンプ遠方では順方向流れのまま(流れ①)、
ポンプ近くでは流れが停滞

現象のイメージ図

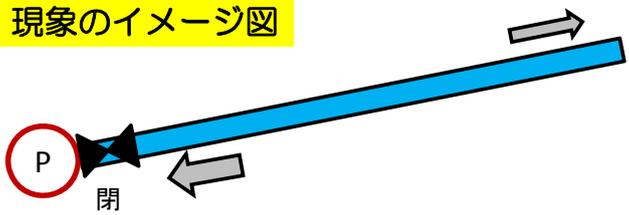


- (3) 流量の差異によって液柱分離が生じる場合あり
- (4) 液柱分離によって圧力が急低下し逆流が生じる(流れ②)
- (5) 液柱と液柱が衝突して圧力が急上昇

現象のイメージ図

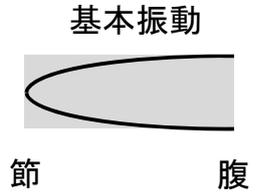


現象のイメージ図



(6) ポンプ昇圧消失に伴って、ポンプへの流れが生じる(逆流)。この逆流により逆止弁が閉まって流れが供給されなくなる。

- (7) 流量の差異によって液柱分離が生じる場合あり
- (8) 液柱分離によって圧力が急低下し逆流が生じる
- (9) 液柱と液柱が衝突して圧力が急上昇



(10) 圧力波が反射して管内を往復(管の長さによって往復時間が異なる)。振動周期は $T=4L/a$ (Lは管長[m]、aは音速[m/s])※

※参考: 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 付録 技術書、p.224など。教科書は閉管の気柱振動を参照。

圧力波の往復時間、順流量、逆流量、逆止弁閉、液柱衝突のタイミングが複雑に絡み合い最大水撃圧が決定する。
GD2の大きさに単純に比例しないことに注意!!