

配管系過渡解析の基礎

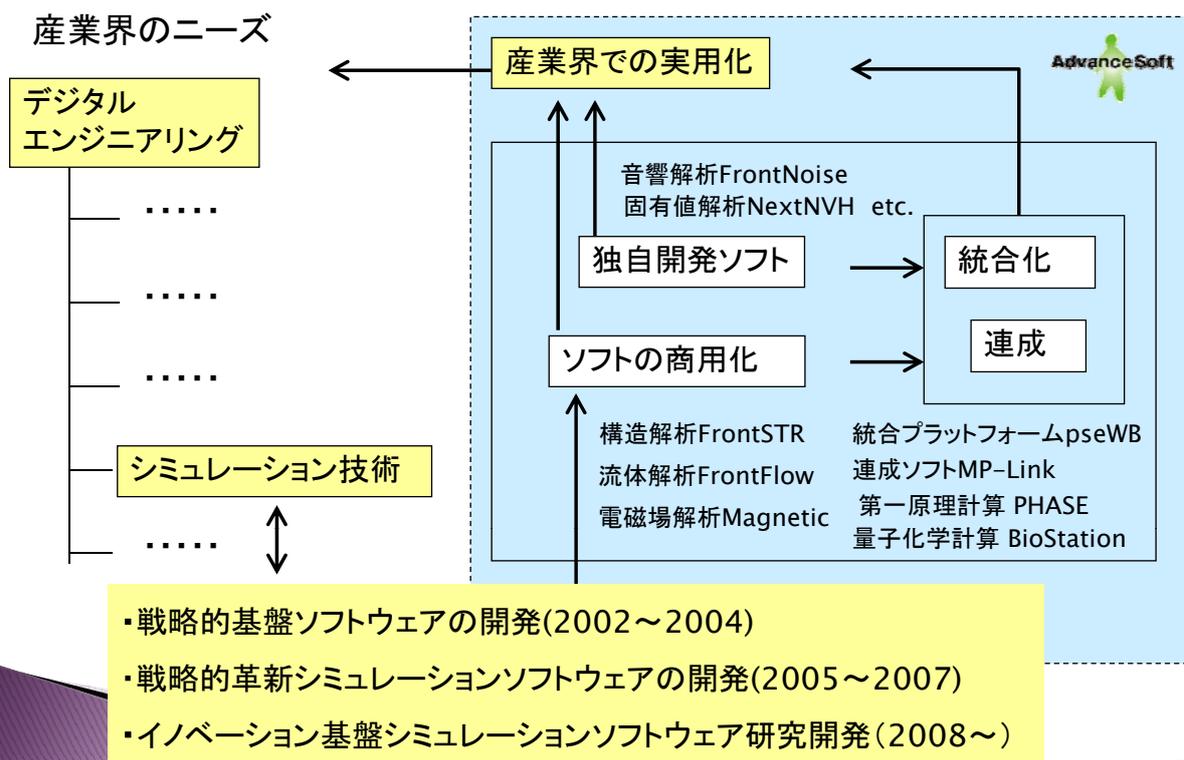
— 熱交換器、バルブ、ポンプ、タンク、プラント保守・設計に
役立つ流体過渡解析ソフトウェアを使った基礎セミナー

2012/2/14

開場 13:20	
13:30～13:35 (5分)	「主催者あいさつ アドバンスソフト株式会社のご紹介」 アドバンスソフト株式会社 第2事業部 事業部長代理 浜野明千宏
13:35～14:30 (55分)	「管路系流体過渡解析の基礎(水・液体編)」 アドバンスソフト株式会社 技術第4部 吉岡 逸夫
14:30～14:50 (20分)	「管路系液体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Ω (Ver1.0) の事例」 アドバンスソフト株式会社 技術第4部 吉岡 逸夫
14:50～15:00	** 休憩 (10分) **
15:00～15:55 (55分)	「管路系流体過渡解析の基礎(ガス編)」 アドバンスソフト株式会社 技術第4部 秋村 友香
15:55～16:15 (20分)	「管路系流体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Γ (Ver1.4) の事例」 アドバンスソフト株式会社 技術第4部 秋村 友香
16:15～16:20 (5分)	ソフトウェアについて アドバンスソフト株式会社 営業部 藤原 真理子
16:20～16:30	** 全体質疑応答 (10分) **

アドバンスソフト株式会社のご紹介

アドバンスソフト



会社概要

名称 アドバンスソフト株式会社

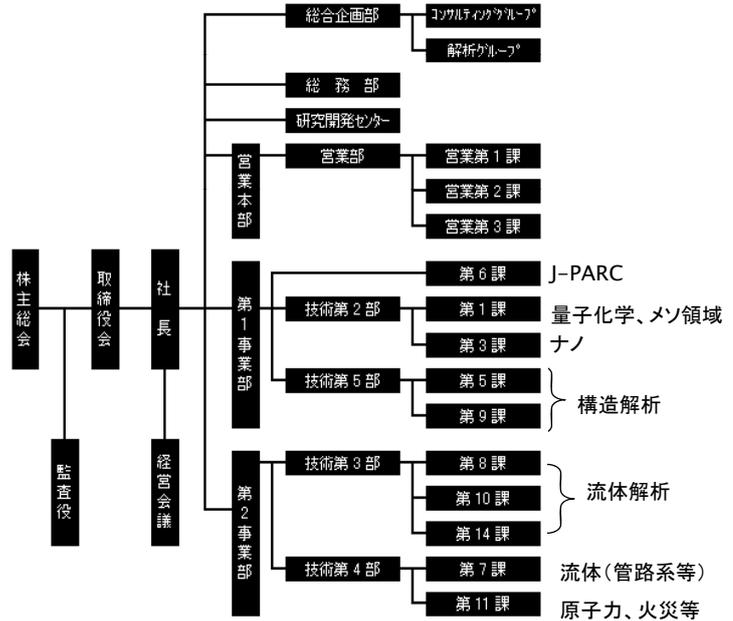
英文名 AdvanceSoft Corporation

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

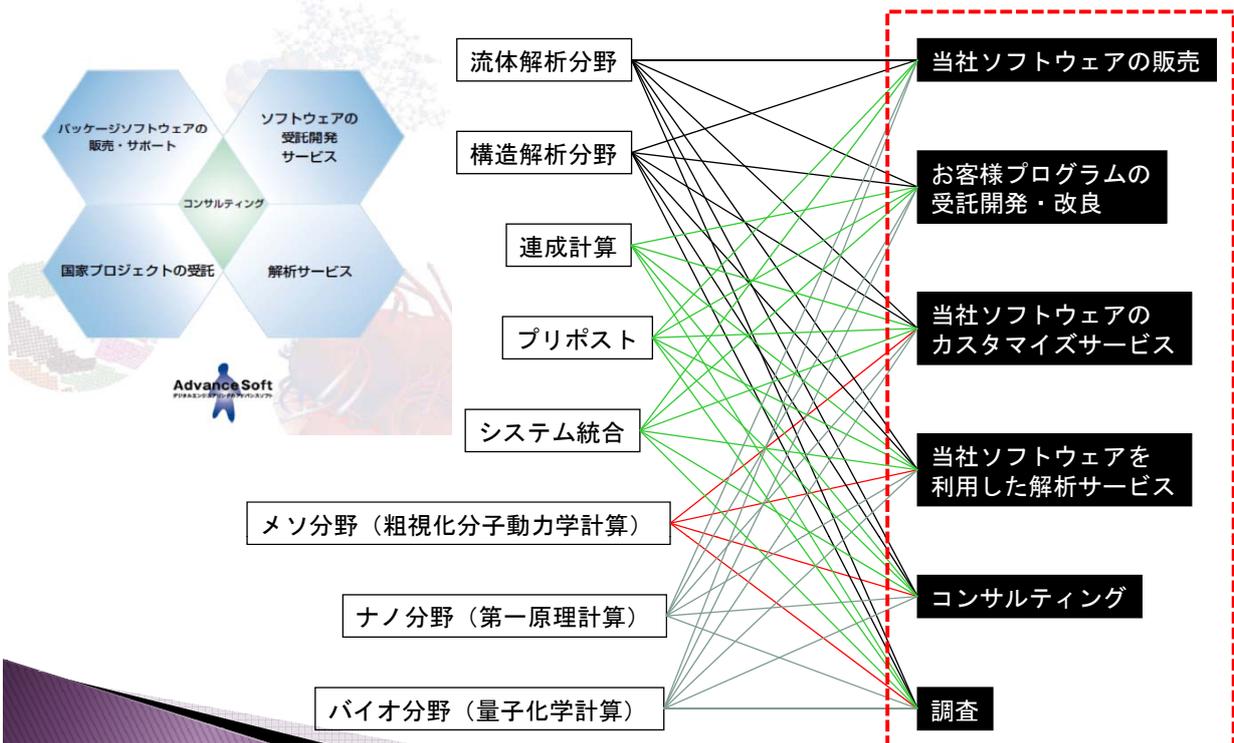
設立 2002年（平成14年）4月24日

資本金 3,724万円

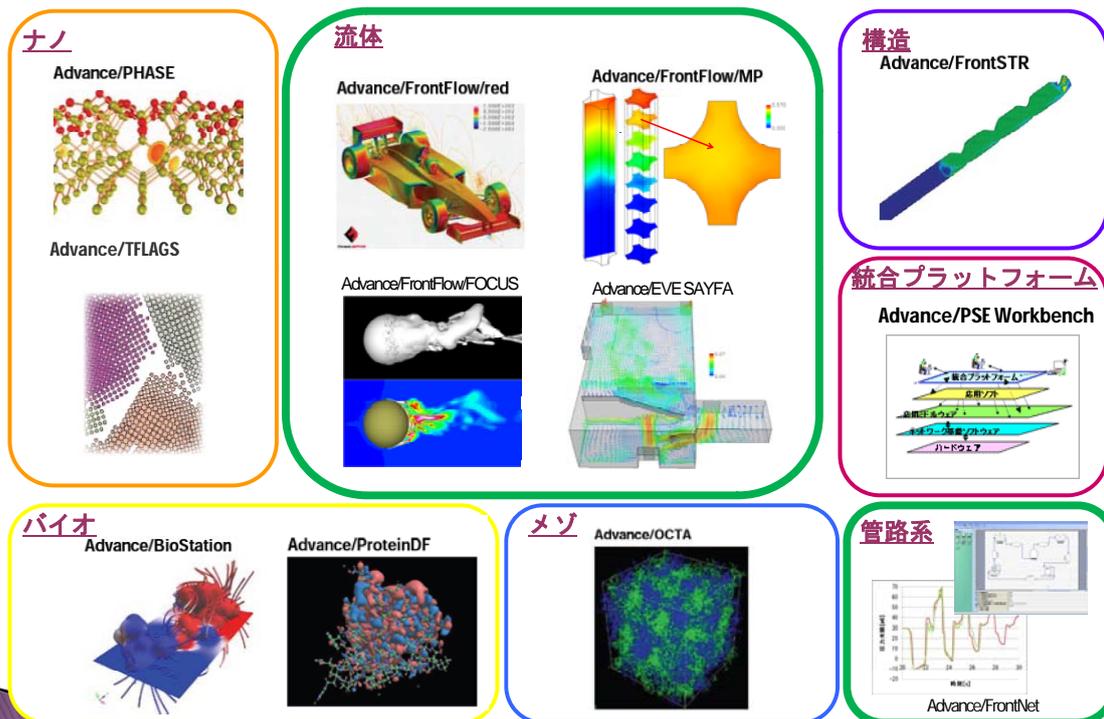
従業員数 68名（2011年8月1日現在）



アドバンスソフトの事業分野と事業内容



アドバントソフトのパッケージソフトウェア



5

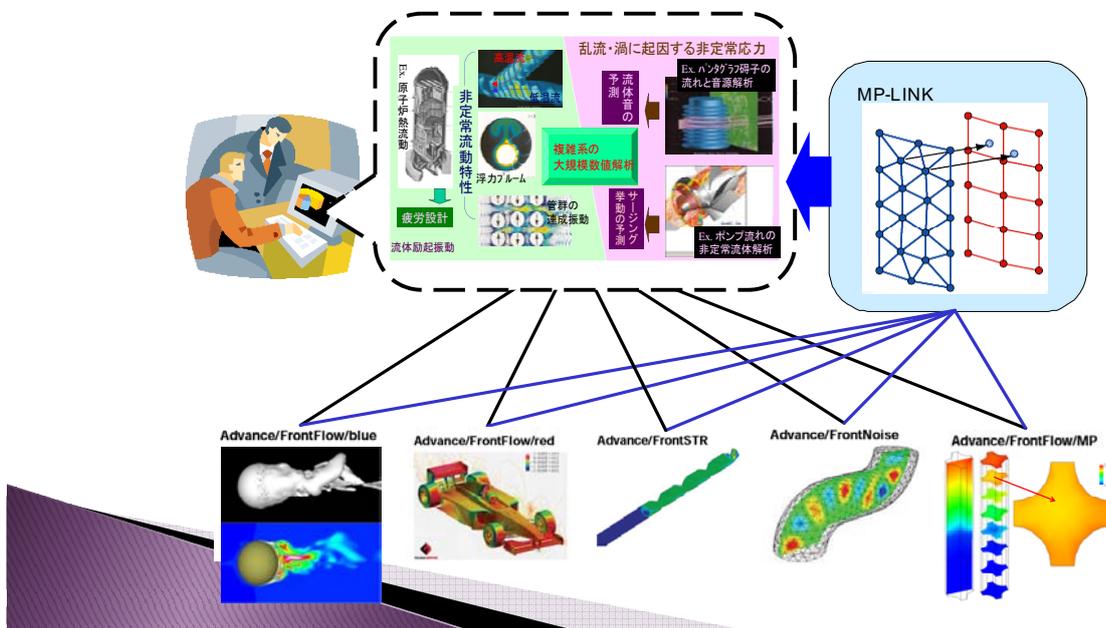
アドバンスソフトのパッケージソフトウェア

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

6

アドバンスソフトのソフトウェアサービスの特徴

- ① お客様のご要望によるカスタマイズ
- ② 大規模・並列計算
- ③ 複数のソフトウェアによる大規模複合連成計算



7

アドバンスソフト流体解析サービス

◆流体解析用ソフトウェアの受託開発

お客様のニーズにあわせて、開発仕様の検討からプログラミング、検査検証を行い開発致します。

◆流体解析サービス

ご要望に応じて、当社の流体解析用ソフトウェアパッケージまたはお客様お持ちのソフトウェアを用いて、条件設定・解析・評価・検討を行い、報告書にまとめます。

◆流体解析用ソフトウェアのカスタマイズ

当社のソフトウェアパッケージを、お客様のニーズにあわせてカスタマイズ致します。

また、お客様お持ちのソフトウェアに対してもカスタマイズ致します。

◆流体解析ソフトウェアパッケージの販売

当社のソフトウェアパッケージを販売いたします。

◆流体解析コンサルタント

流体解析に関する各種コンサルタントを承ります。
例：解析ノウハウの提供、物性データの調査検討、試験方法の調査提案など



8

流体解析ソフトウェア

アドバンスソフトで開発した流体解析ソフトウェア

管路系流体解析ソフトウェア
Advance/FrontNet/ Ω (液体)
Advance/FrontNet/ Γ (気体)
Advance/FrontNet/TP(気液二相流)

専用流体解析ソフトウェア
Advance/EVE SAYFA (都市安全)
Advance/FronFlow/SSMP(超音速二相流)
M-SphyR(生体血流)
塗布乾燥シミュレータ

3次元流体解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/red
Advance/FrontFlow/MP(気液二相流)

高速流解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/FOCUS
(構造格子(一般曲線座標系)で動作する有限体積法流体ソルバー)

他機関で開発された流体解析ソフトウェア

原子力安全解析 RELAP5, TRAC, TRACE, COBRA
火災解析 FDS, CFAST
気象・大気拡散解析 RAMS, HYPACT

9

管路系流体解析ソフトウェア

(いずれもアドバンスソフトで開発)

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

(本日も紹介)

(本日も紹介)

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

10

アジェンダ

<基礎理論>

1. 1次元解析と3次元解析
2. 定常解析と過渡解析
3. Bernoulliの式
特にPiezo水頭の概念(高低差)と動水勾配線
4. 摩擦損失
5. 水撃と液柱分離

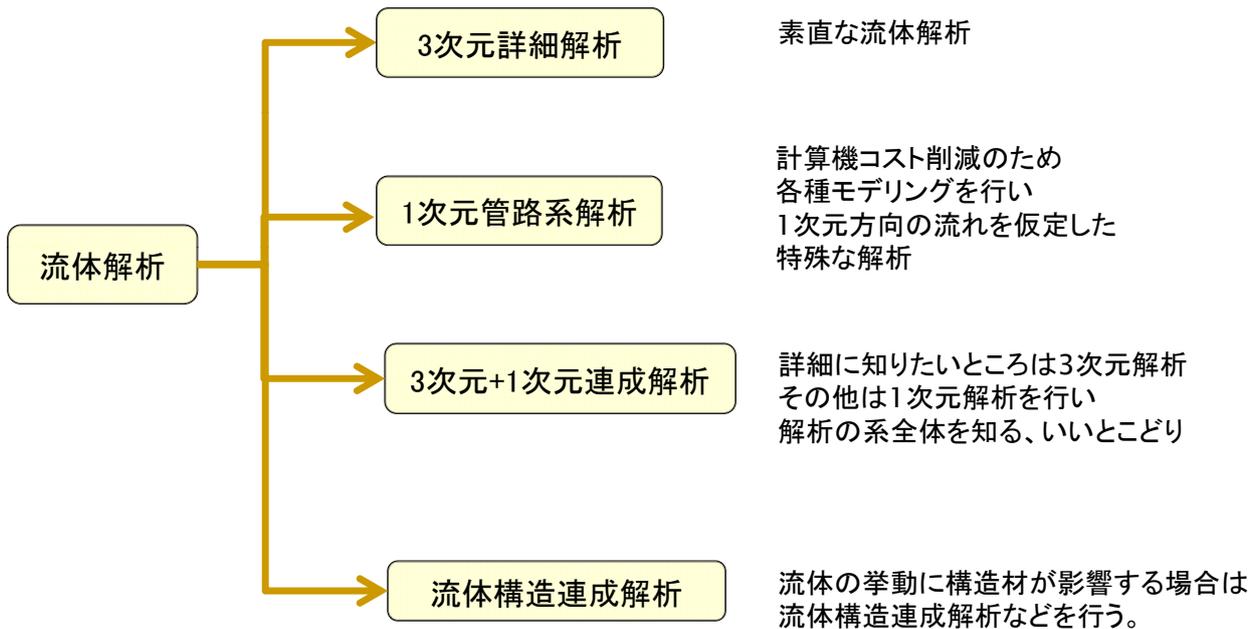
<数値解法・詳細モデル>

1. 特性曲線法
2. 弁と制御
3. ポンプ
4. タンク

基礎理論

1. 1次元解析と3次元解析(1/4)

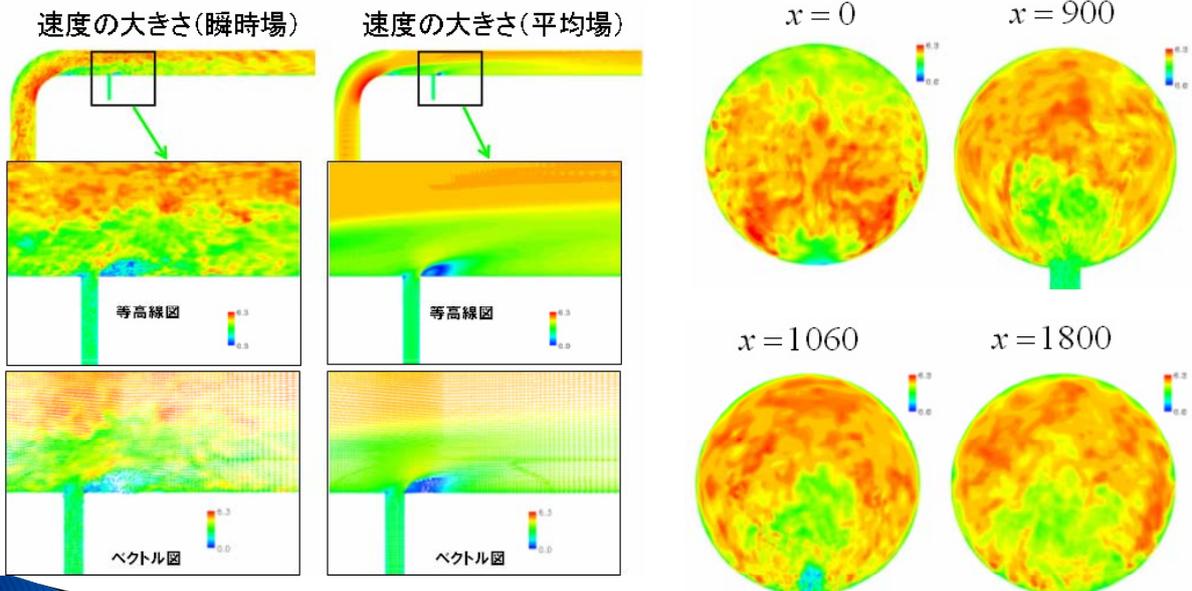
■流体解析の分類



1. 1次元解析と3次元解析(2/4)

■3次元詳細解析

- ・着目部分の詳細な解析を行いたい
- ・乱流の影響が大きい
- (例) 曲がり部や抵抗物の影響を計算する



もんじゅ流体混合部の流動解析手法の整備～三次元熱流動解析コード(FrontFlow/Red, FLUENT)の適用性評価～
 独立行政法人原子力安全基盤機構(H18)報告書 Advance/FrontFlowによる計算結果の例
<http://www.jnes.go.jp/content/000009592.pdf> より(2012/1/4)

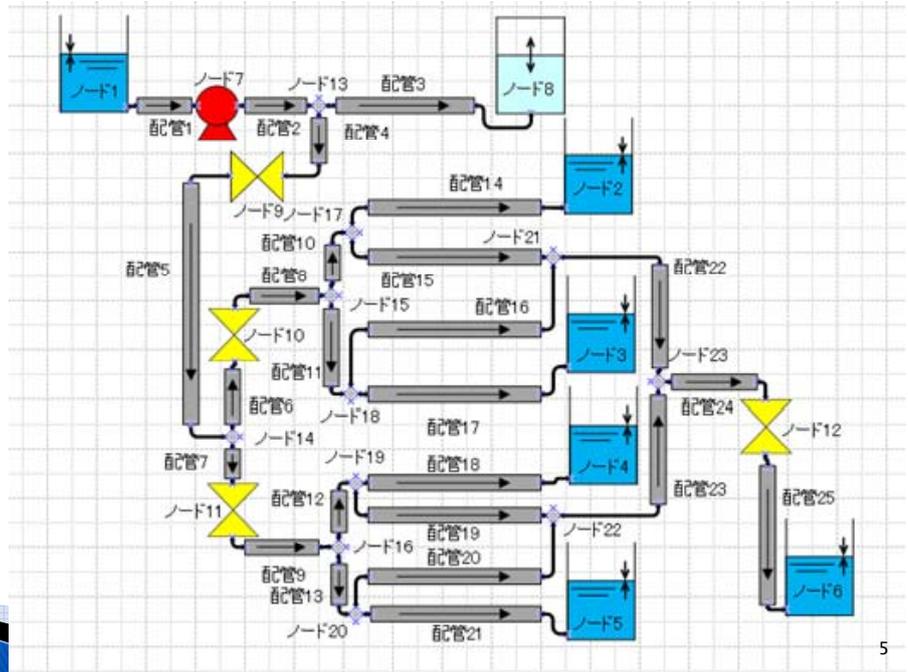
1. 1次元解析と3次元解析(3/4)

■1次元管路系解析



- ・大規模な解析対象の挙動を把握したい場合
- ・数分から数日のオーダーの時間を計算対象とする場合
- (例) 総延長20kmに渡る管路系の48時間の挙動を計算する。

管路系解析の例



5

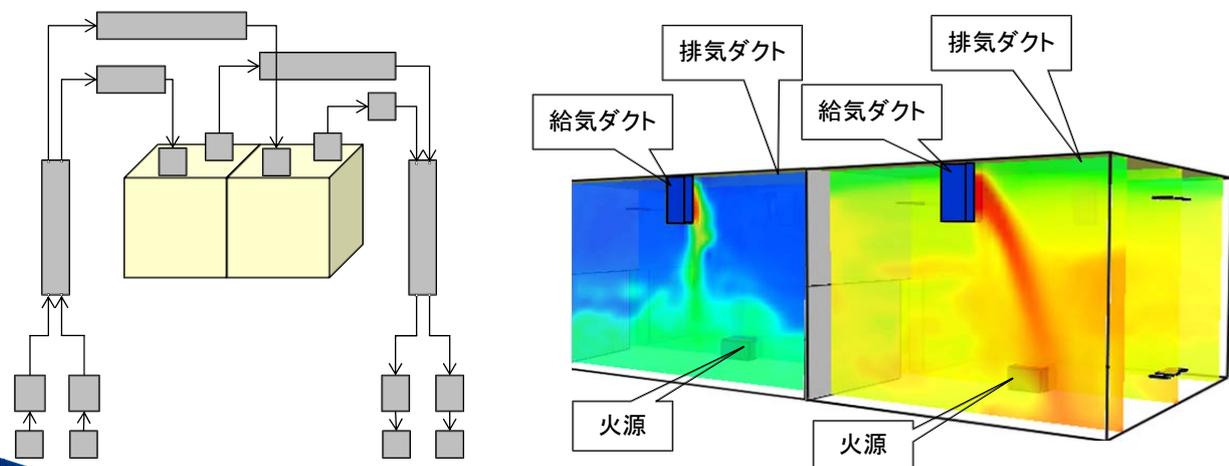
1. 1次元解析と3次元解析(4/4)

■3次元+1次元連成解析

- 大規模な解析対象の挙動を把握し、
- 着目部分は3次元的な分布を知りたい。

(例) 三次元火災解析シミュレータFDSとAdvance/FrontNet/Γの連成解析

1次元管路系解析モデル(左)と、部屋の3次元詳細解析(右)



1次元管路系解析によりダクトの挙動を把握し、この部分の計算コストが削減できた。
3次元解析と境界条件で物理量をやり取りすることにより、部屋の中の各物理量分布を適切に評価できた。

6

2. 定常解析と過渡解析(1/1)

■定常解析

境界条件が固定値(時間的に変動しない)であれば
管路内の流体の圧力分布と流速分布は一定の値で静定する。
この状態を定常状態といい、このような定常状態を求める解析を定常解析という。

定常解析では、流体方程式の時間項をゼロとしたものを解くが、この方法が適用できない場合もある。
もうひとつの方法としては、境界条件を一定として流体方程式の時間項がゼロになるまで、
時間進行法で過渡解析を繰り返す考え方がある。

定常解析では、圧力や流速の管路内1次元分布が得られる。

■過渡解析

ある状態を初期状態とし、そこから

- ・バルブを閉める、開ける
- ・ポンプがトリップ(意図せず停止)する
- ・流量の変動を境界条件として与える

などのイベントを仮定し、時間変動について計算することを過渡解析という。

過渡解析では、各時間ごとの圧力や流速の管路内1次元分布が得られる。

7

3. Bernoulliの式(1/4)

■Bernoulli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はBernoulli(ベルヌーイ)の式と呼ばれる。
(参考;澤本正樹著、流れの力学-水理学から流体力学へ-、共立出版)

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

圧力分 速度分 位置分 全エネルギー

■静圧、動圧、総圧(全圧)

上記の「圧力P」は流体が実際に外界に及ぼす圧力であり、「静圧」と呼ばれる。
流体が静止しているときの圧力と定義されることもあるが、静止していないときも静圧の概念は成り立つ。

P 静圧、静水圧などと呼ばれる。特に区別しない場合は「圧力」と呼ばれる。

動圧とは、速度分のエネルギーを指し、実際には測定できないものである。

$$\frac{1}{2} \rho u^2 \quad \text{動圧。速度分のエネルギーを圧力の単位に換算したもの。}$$

総圧(全圧)とは、静圧と動圧の和をいう。

$$P_{\text{total}} = P + \frac{1}{2} \rho u^2 \quad \text{総圧。Bernoulliの式が成り立つ場合、総圧は一定。}$$

8

3. Bernoulliの式(2/4)

■水理学

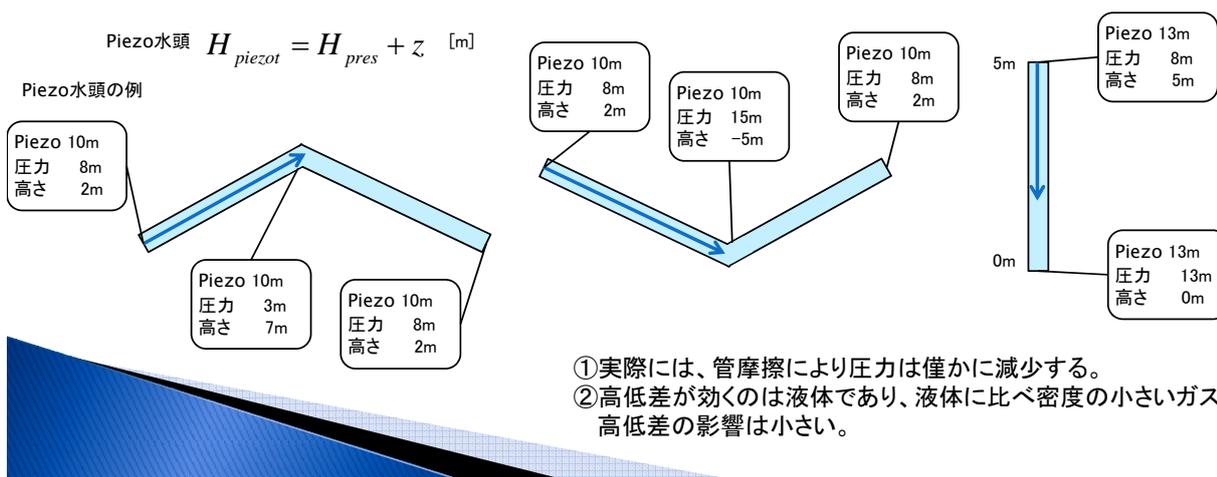
以下、高さの概念を検討するため、Bernoulliの式を水理学で一般的に使われている水頭表示とする。

$$\text{圧力水頭 } H_{pres} = \frac{P}{\rho g} \text{ [m]} \quad \text{圧力の単位をmで表したもの}$$

$$H_{all} = \frac{P}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} + z = H_{pres} + \frac{u^2}{2g} + z = \text{const.}$$

全水頭 圧力水頭 速度水頭 位置水頭
(高さ水頭)

圧力水頭と位置水頭の和はPiezo水頭と呼ばれる。水はPiezo水頭が大きいほうから小さいほうへ流れる。



9

3. Bernoulliの式(3/4)

■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。

絶対圧であることを明示するために、単位記号の後ろにAやabsを付ける場合がある。

(例)10000[PaA], 10[MPa_abs]

大気圧を基準とした圧力をゲージ圧(Gauge Pressure)という。

設計や実社会で使用されている圧力はゲージ圧であることが多く、これが認識されていないこともある。

ゲージ圧であることを明示するために、単位記号の後ろにGやgaugeをつける場合がある。

(例)10000[PaG]

ゲージ圧 = 絶対圧力 - 大気圧

標準大気圧は101325[PaA]である。

■負圧

ゲージ圧が負になることを負圧といい、後述する液柱分離が起こる可能性があることから危険の目安とされ、注意されている。

実際には、液柱分離は飽和蒸気圧以下で起こる。

例えば、20℃の水では、飽和蒸気圧 2339.2PaAより低圧の領域

(参考;日本機械学会 蒸気表 第5版)

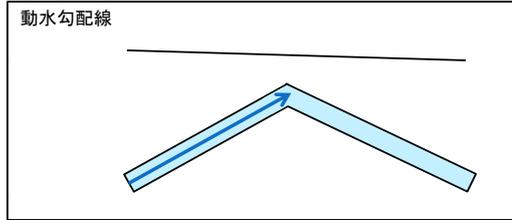
このときのゲージ圧は $P_{gauge} = 2300 - 101325 = -99025[\text{PaG}] \sim -0.1[\text{MPaG}]$

10

3. Bernoulliの式(4/4)

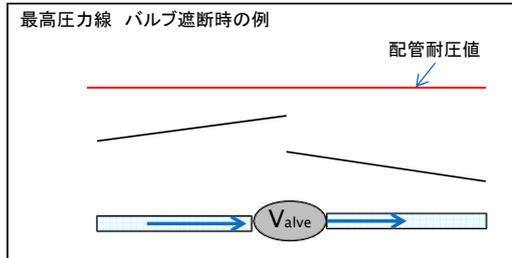
■ 動水勾配線(圧力勾配線)

管路の各点のPiezo水頭を結んだ線を動水勾配線という。これを見ると**定常状態**の流れの方向やポンプ昇圧が足りているかが確認できる。



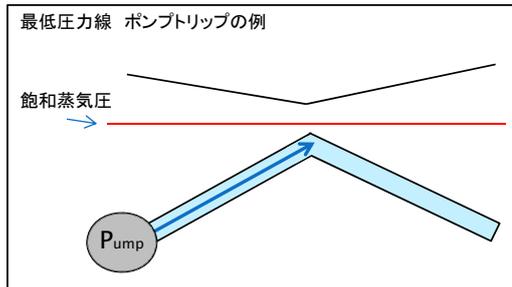
■ 最高圧力線

管路の各点に対し、ある**過渡イベント**を考えたときに最高圧力を結んだものを最高圧力線という。後述する水撃やポンプトリップ時の圧力と配管耐圧値を比較するときなどに利用できる。



■ 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。負圧の検討などで利用できる。



4. 摩擦損失モデル(1/3)

管路内の流体が管路壁面から受ける摩擦抵抗→
Colebrook式を線図にまとめたMoody線図がよく知られている。
Moody線図では、Reynolds数と配管粗度と配管径の比に依存した管摩擦係数が表される。

■ Colebrookの式

(Colebrook, C. F., J. Inst. Civil Engrs., 11(1938~39), 133)

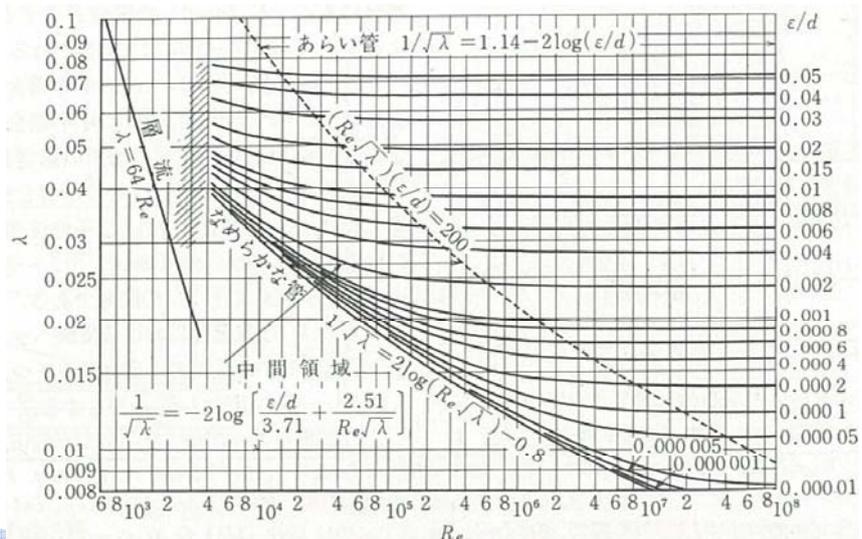
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.0 \ln \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad \varepsilon: \text{配管の粗度}, D: \text{配管径}$$

■ 管摩擦による圧力損失と管摩擦係数λの関係

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

■ λはDarcyの摩擦係数でありFanningの摩擦係数fと混同しないこと。

$$f = 4\lambda$$



Moody線図(機械工学便覧流体工学、A5-75)

4.摩擦損失モデル(2/3)

以下の摩擦係数はMoody線図の根拠であるColebrookの式の陽的表現である。

■Churchillの式

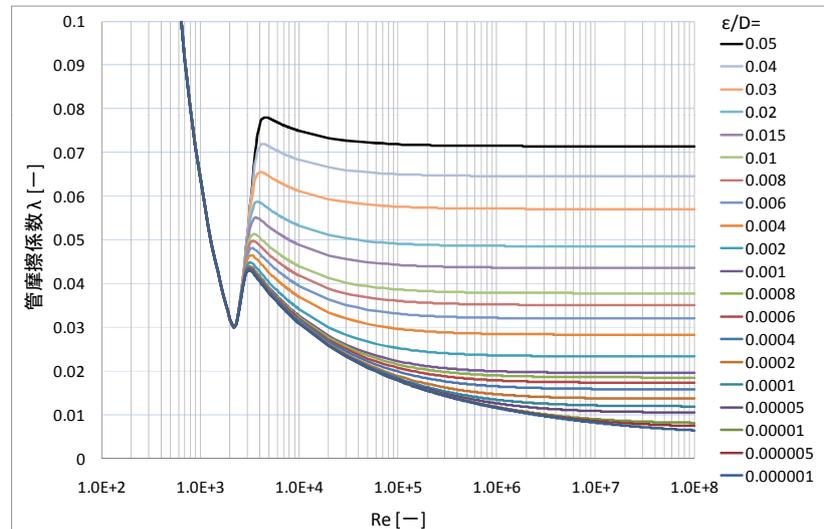
(Churchill, S. W., "Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes", Chem. Eng., Nov.7, (1977))

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

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

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

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



← 層流 → 遷移領域 ← 乱流 →

Churchillの式による管摩擦係数

13

4.摩擦損失モデル(3/3)

■配管粗度

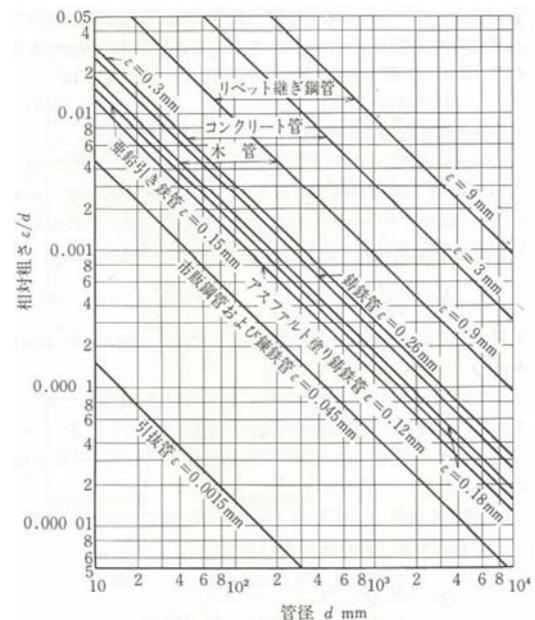
配管粗度は右図のような指標がある。

ϵ を絶対粗度、 ϵ/D を相対粗度という。

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。

また、経年劣化により古い管のほうが粗度が大きい。

実用管の相対粗さ
(機械工学便覧流体工学、A5-75)→



その他、以下の式が農業土木分野などで用いられている。

■Hazen-Williamsの式

$$\lambda_{Hazen} = 4 \times \frac{133.7}{C^{1.85} D^{0.167} \nu^{0.148}}, \quad \nu: \text{動粘性係数}, C: \text{流速係数} \sim 130$$

Hazen-Williamsの式は、圧力損失を過大評価する場合があるが、設計にとっては安全側に評価していることになる。
(ただし、ポンプのコスト増の一因となっている。)

14

5.水撃と液柱分離(1/2)

■水撃基礎

- ①水撃は、例えば弁の急閉などで流体が流れを急にせき止められたときに、慣性で流れようとしていたエネルギーが行き場を失い、弁の上流側に音速で圧力波が伝わる現象をいう。
- ②弁の閉め方が早いと、水撃は管を破損するほどの大きな圧力となるため危険である。
- ③水撃圧の簡易的な公式ではJoukowski(ジューコフスキー)の式が有名である。
(参考1;土地改良事業計画設計基準及び運用・解説、設計「パイプライン」H21, P232,
参考2;三野徹、「パイプラインの水利設計その6」農業土木学会誌第50巻第2号, 1982)
いずれも簡易公式は設計用に水撃圧を大きめに算出する傾向がある。
数値解法では特性曲線法などが用いられる。

波動モデル
(Joukowskiの式)

$$\Delta H = \frac{av_0}{g}$$

aは音速、 v_0 は流速。水撃圧は弁の閉速度に依存しない。
適用条件 $t_0 \ll T_0$

振動モデル

$$\Delta H = \frac{4L}{T_0} \frac{v_0}{g}$$

Lは管路長、 T_0 は圧力振動周期。
適用条件 $t_0 \sim T_0$

剛性モデル

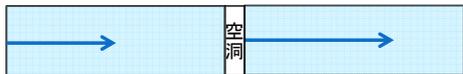
$$\Delta H = \frac{4L}{T_0} \frac{v_0}{g} \times \frac{1}{4} \frac{T_0}{t_0}$$

t_0 は弁閉時間。
適用条件 $t_0 \ll T_0$

15

5.水撃と液柱分離(2/2)

■液柱分離基礎

- ①液体で満たされていた管路のある場所で、なんらかの理由により圧力が低下して飽和蒸気圧以下になったとする。このとき、液体は気相へと相変化する。
- ②管路内に蒸気の空洞ができる。
- ③この空洞が押しつぶされると大きな圧力上昇が起こる。蒸気の密度が1に対し、液体は1000程度と1000倍の違いがある。圧力や密度が大きく異なる流体が急激にぶつかり合うため、このような衝撃圧力が発生する。
- ④圧力上昇は水撃と同様に管路の破損の危険性もある。対策として、サージタンクを設けるなどがある。
- ⑤液柱分離が発生する位置は
 - ・弁が急遮断されたときの弁下流
 - ・ポンプトリップ時の管路
 - ・高低差のある管路で高度が高いところまた、発生原因としては、ポンプ起動時に管路に空気が入っていてそれがつぶれる場合などがある。



16

数値解法・詳細モデル

※ここでは、一般的な管路系流体解析のモデルについて述べますが
これらはAdvance/FrontNet/Ωに導入されている機能です。

17

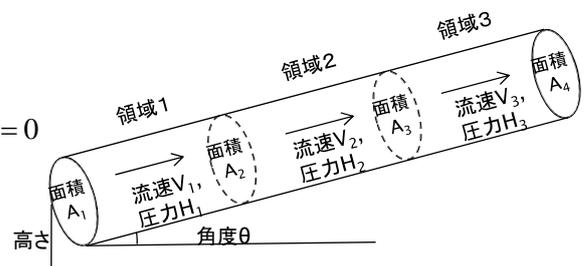
1. 特性曲線法(1/3)

液体の質量保存式と運動量保存式は以下で与えられる。
(導出の参考;富士総合研究所編「管路内の流れのシミュレーションプログラム」、丸善株式会社)

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

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

$$\text{音速の式} \quad a = \sqrt{\frac{K}{\rho}} / \sqrt{1 + \frac{K D}{E e}}$$



ここで、HはPiezo水頭[m]、Vは流速[m/s]、Aは流路断面積[m²]、Q=AVは体積流量[m³/s]、
θは管勾配[rad]、gは重力加速度[m/s²]、Kは液体の体積弾性係数[Pa]、Dは管直径[m]、
eは管壁厚さ[m]、Eは管路構造材のヤング率[Pa]、λは管摩擦係数[-]、aは音速[m/s]である。

音速の式は、液体の圧力変化による管路構造材のたわみを考慮した式となっている。

18

1. 特性曲線法(2/3)

■特性曲線法(参考:大宮司久明他、「乱流の数値流体力学」、東京大学出版会)

連立微分方程式を解く方法の1つに特性曲線法がある。

特性曲線法は、Lagrange(ラグランジュ)の未定乗数法により、

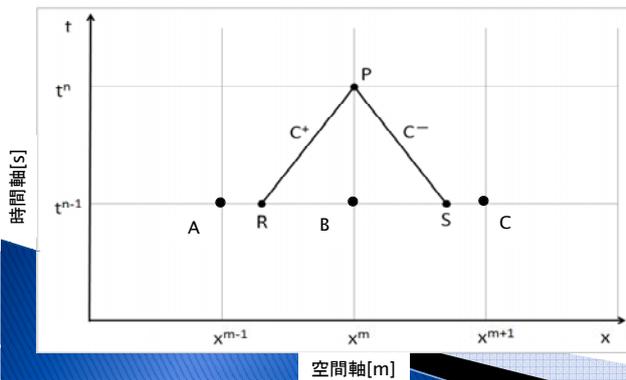
2つの偏微分方程式を時間に関する常微分方程式に変換する。(詳細は参考文献参照)

これにより、質量保存式と運動量保存式は、特性平面上で以下の C^+ 、 C^- のように表される。

この形は線形の連立方程式である。

$$C^+ \begin{cases} (V_P - V_R) + \frac{g}{a}(H_P - H_R) = \left(-\frac{f}{2D} V_R |V_R| + \frac{g \sin \theta}{a} V_R \right) \Delta t \\ x_P - x_R = (V_R + a) \Delta t \end{cases}$$

$$C^- \begin{cases} (V_P - V_S) - \frac{g}{a}(H_P - H_S) = \left(-\frac{f}{2D} V_S |V_S| - \frac{g \sin \theta}{a} V_S \right) \Delta t \\ x_P - x_S = (V_S - a) \Delta t \end{cases}$$



メッシュの定義点は、 $A(x^{m-1})$ 、 $B(x^m)$ 、 $C(x^{m+1})$ であり、これを現在の時間とする。

次の時間ステップの点Pの物理量を知りたいときは、点RとSの物理量が分かれば特性曲線を使って点Pの物理量を求めることができる。

点RとSの物理量は、点A、BとB、Cから線形補間する。

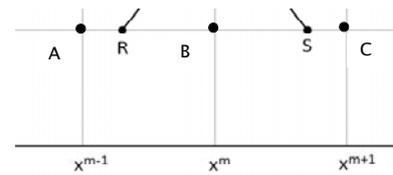
19

1. 特性曲線法(3/3)

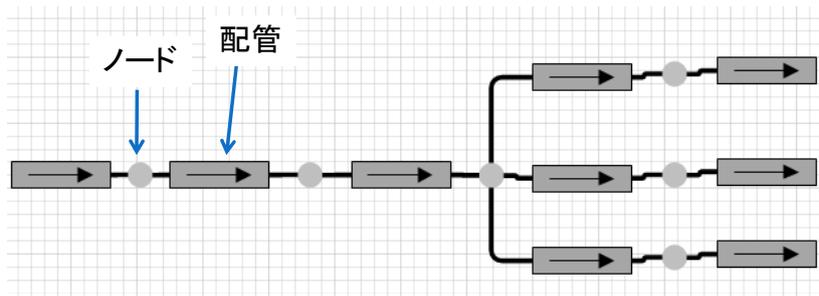
■特性曲線法による管路系の構築方法

前ページで説明したように、圧力 H と流速 V が同じ位置に定義された。

これにより、次のようなルールで管路系を構築する考え方がある。



- ①「配管」と「ノード」を定義する。
- ②配管の両端には必ず「ノード」がある。
- ③配管には長さや管径(=体積)が定義される。配管内部はメッシュ分割される。
- ④ノードには体積が定義されない。
- ⑤ポンプ、弁、抵抗物はノードに定義し、それぞれの機器の特徴を考慮する。



20

2. 弁と制御(1/3)

■弁の基礎

①弁は、緊急時に流体の供給をストップさせるために遮断したり、流量を必要流量に調整したり、圧力損失を与えて下流圧力を調整したりする役割を持っている。

②管路に設置された弁は開度が100%のときは管径程度の流路断面積を持つ。開度は、手動である値に固定されたり、自動制御されたりする。

③開度が100%のときは圧力損失は少ないが、開度が小さくなると流体は圧力損失を受ける。開度と抵抗の関係は弁メーカーが保有している。抵抗はCv値というものがよく使用される。

圧力損失 ΔP と抵抗係数 K
 Q は体積流量

$$\Delta P = K \frac{1}{2} \rho u^2 = K \frac{\rho}{2A^2} Q^2$$

抵抗係数 K と C_v 値の関係

$$K = \left(\frac{A_{up}}{C_v f_{cv}} \right)^2 \frac{2}{\rho_{H2O60F}}$$

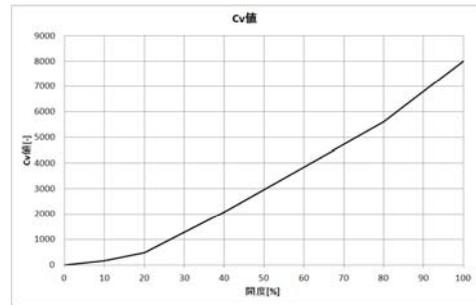
単位換算係数

$$f_{cv} = 7.598 \times 10^{-7}$$

60Fにおける水の密度

$$\rho_{H2O60F} = 999.091$$

C_v 値が大きいほど圧力損失は小さく、流体は流れやすい。



開度とCv値の関係の例

④弁が全閉すると(開度が0%)、管路上流側に水撃が起こるため、場合により危険である。

2. 弁と制御(2/3)

■管路系解析における弁モデル⇒弁の特徴を再現できていればよい

・弁をノード点に定義する。



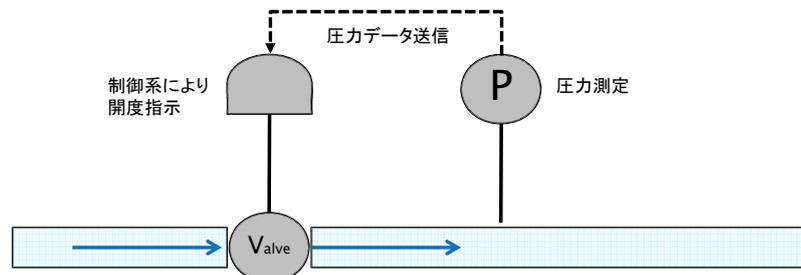
圧力 P 開度 $X\%$ 圧力 $P - \Delta P$
 流量 Q C_v 値 流量 Q
 圧損 ΔP

・開度に応じ流路面積が変化する。

・開度に応じ、 C_v 値が変化する。 C_v 値に応じて圧力損失が変化する。

・制御弁の場合、開度指示を制御系から受ける。

圧力制御の例

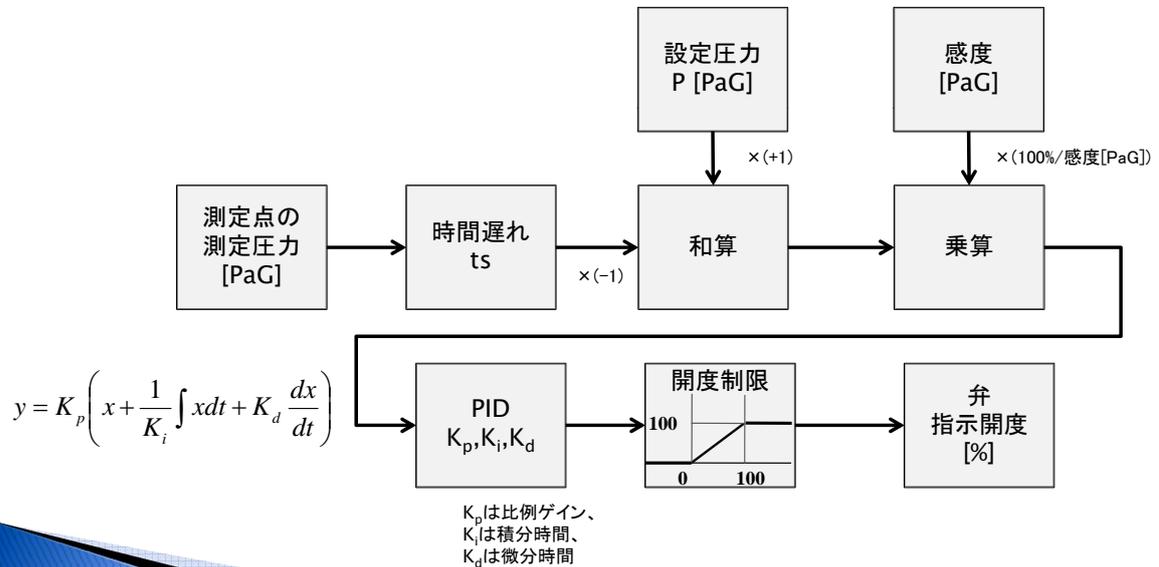


2. 弁と制御(3/3)

■制御系

・測定圧力と設定圧力との時間遅れを考慮し、例えば下の図のようにPID制御を行い、次の時間の弁の指示開度を決定する仕組みを導入することができる。

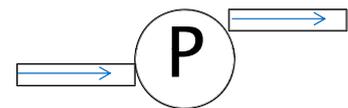
圧力制御の制御系の例(時間遅れ、PID制御を考慮)



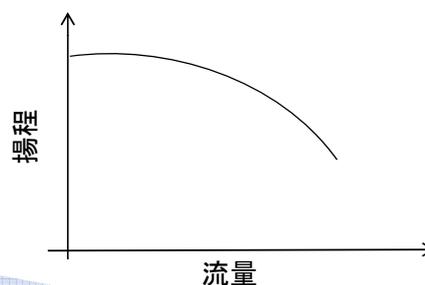
23

3. ポンプ(1/4)

■ポンプ基礎



- ①ポンプは、流体に仕事をして圧力を上げる(昇圧する)機械
(例)0mにある池(大気圧)から、ポンプにより5mの高さにくみ上げて流す
- ②ポンプの中には羽根車がついており、羽根車がある回転数で回ることにより、羽根車が流体に仕事をする。
- ③羽根車は原動機(モーター)によって回される。
原動機は通常、電気によって回っており、軸動力を羽根車に伝える。
- ④ポンプが一定回転数で動作しているとき、ポンプの昇圧量は流量に依存して決まる。昇圧量と流量の関係をQH曲線(揚程曲線)という。

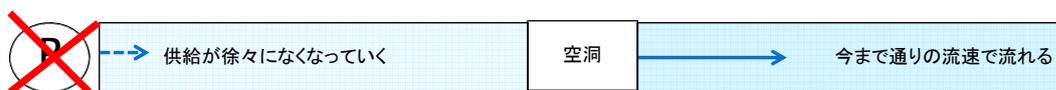


24

3. ポンプ(2/4)

■ポンプ過渡解析基礎

- ①停電が起こると、原動機からの軸動力の供給が止まり、ポンプは昇圧を止める。
このとき、「ポンプトリップが起こった」という。
- ②水が管路系を流れているとき、急に供給が止まると、慣性で流れようとする水と供給されない場所の間に空洞ができ、液柱分離が起こる。
液柱が消滅するときに大きな圧力上昇が起こるため、危険である。
この圧力上昇のことを「水撃」という人もいる
- ③ポンプトリップ時、回転数は急に0になるのではなく、ポンプの慣性によってだだらと0に近づく。羽根車の慣性が大きいと、ゆっくりと、慣性が小さいと早く回転数がゼロに近づく。早く回転数が落ちるほど、液柱分離が起こりやすい。そのため、液柱分離防止のために羽根車に重りをつけて慣性を大きくすることがある。
慣性はGD2(ジーディースクエア)と呼ばれ、重要なファクターである。



- ④ポンプトリップ時、ポンプ回転数は、揚程曲線、トルク曲線、流量などにより決まる。
逆回転領域も考慮する場合、モデルは複雑になる。

25

3. ポンプ(3/4)

■ポンプトリップ時の逆回転を考慮しない場合の回転数の式

(参考; 三野徹、「パイプラインの水力設計その6」農業土木学会誌第50巻第2号, 1982)

定常状態では、ポンプは定格運転していると仮定する。

ポンプ回転数の時間に関する方程式は以下の微分方程式で表される。

$$\frac{dn}{dt} = -k \frac{n^2}{2-n}$$

ここで、 n は相対回転数[-]で、定格運転時の回転数で規格化されたものである。
また、 k はポンプの性質に関する定数である。

$$n = \frac{N}{N_{\text{rated}}}, k = \left(\frac{900 \rho g}{\pi^2 I} \right) \left(\frac{Q_{\text{rated}} H_{\text{rated}}}{\eta_{\text{rated}} N_{\text{rated}}^2} \right), H = H_{\text{rated}} n^2$$

その他、 Q は体積流量[m³/s]、 H はポンプ揚程[m]、 ρ は流体密度[kg/m³]、 g は重力加速度[m/s²]、 η はポンプ効率[-]、 I はポンプ慣性[kg・m²]である。
羽根車の慣性を考慮する場合はポンプ慣性と和をとる。

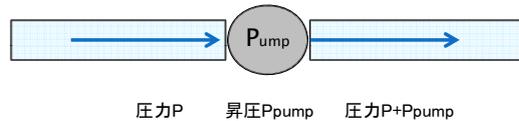
本式を用いると、ポンプは流動状況に関係なく、
定格運転条件のみで回転数の下がり方が決まる。

26

3. ポンプ(4/4)

■管路系解析におけるポンプモデル⇒ポンプの特徴を再現できていればよい

・ポンプをノード点に定義する。



- ・回転数が一定の場合はQH曲線に従い、昇圧される。
このとき、昇圧量を特性曲線の連立方程式で考慮する。
- ・トリップ後、逆回転を考慮しない場合は、回転数に応じた昇圧量を使用する。
- ・トリップ後、逆回転を考慮する場合は、トルク曲線、揚程曲線に応じた回転数を算出しそこから連立方程式内で質量保存式と揚程を考慮する。
- ・トリップ後、逆流が起こった場合に逆止弁が作動する場合は、弁を閉める。

27

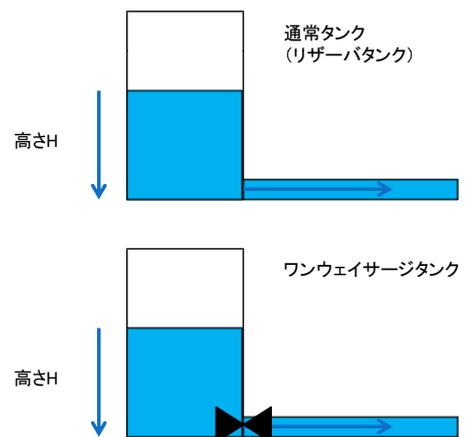
4. タンク(1/1)

■タンク基礎

- ①タンクに水がたまっていると、その高さ分だけ管路に圧力がかかる。(位置水頭)
- ②タンクの水位が変化すると位置水頭も時々刻々変化する。
- ③ポンプトリップで管路の圧力が低下したときに液柱分離が起こるのを避けるためにタンク下部の弁を解放して水を供給するようなタンクをワンウェイサージタンクという。

■タンクと過渡解析

液体側から見た場合、タンク内の水位が重要である。
タンクから流出する水の体積が過渡解析でわかるので、タンクの体積が分かれば、水位が求まる。
タンク底の形状が四角や円形の場合は、単純計算で求まるが
タンクが特殊な形状の場合は、容積線図と呼ばれる容積と高さの関係を利用して水位を計算する。



28

■ 管路系液体解析で何が分かるかをまとめる。

モデル	入力	出力
管路系	配管長、配管径、配管材質、管芯高、 接続関係、摩擦損失モデル	流量配分、圧力と流速
弁	開度とCv値の関係、開閉速度、初期開度	過渡解析では特に水撃圧。 制御系と連動している場合、 制御が正しく行われるかどうか。
ポンプ	定格揚程、定格流量、定格回転数 定格効率、定格軸動力、完全特性 慣性(ポンプ、フライホイール、原動機)	トリップ後、液柱分離が起こるかどうか、 起こった場合の圧力上昇値、また、 最終的に落ち着くポンプの状態
タンク	初期液位、タンク断面積 単純形状でない場合は容積線図	通常タンクの場合、水位。 ワンウェイサージタンクの場合、液柱分離に効果 があるかどうか。

Advance/FrontNet/Ω 1.0事例紹介

2012年2月14日管路系セミナー
アドバンスソフト株式会社
セミナー講師:技術4部 吉岡逸夫

アジェンダ

1. ポンプトリップと液柱分離の計算(実測値との比較)
2. LNGプラントの水撃の計算(実機試験との比較)
3. ポンプトリップとGD2検討(仮条件での検討)

1

1. ポンプトリップと液柱分離の計算

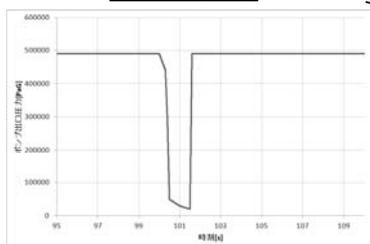
目的: 過渡解析と液柱分離モデルの精度を確認する。

計算対象: ポンプにつながれた1450mの配管に水が流れている。

ストーリー: ポンプが停電によりトリップして、その後すぐに電気が回復し、ポンプ機能を取り戻したとき、液柱分離が発生、液柱がつぶされて圧力上昇が起こる。

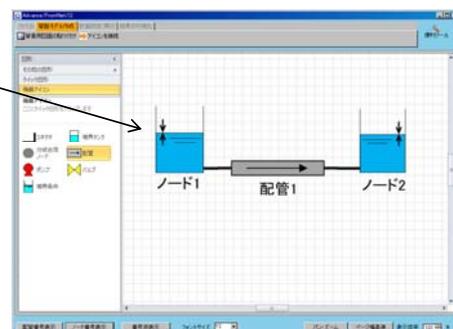
比較: 次の文献と比較する。"FLUID TRANSIENTS",
E.BENJAMIN WYLIE and VICTOR L.STREETER,
MCGRAW-HILL INTERNATIONAL BOOK COMPANY, P150の実測値

圧力境界条件



ポンプトリップによる
圧力降下と圧力回復を
境界条件として与える。

FrontNet/Ωによるモデリング

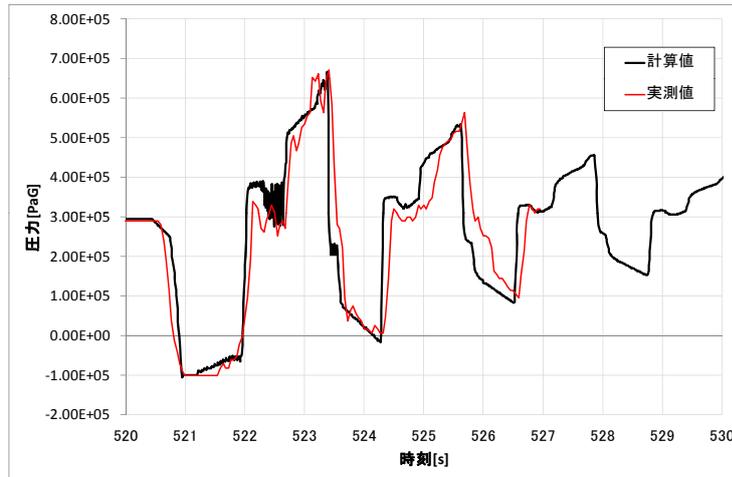


流体	水、音速1290m/s、蒸気圧1960Pa
配管	長さ1450m、直径0.1m、傾きなし、 管摩擦係数0.018
初期状態	流量0.0158m ³ /s

2

1. ポンプトリップと液柱分離の計算

配管上流から580mの位置の圧力時系列の計算値と実験値の比較



計算値と実測値を比較すると

- ・ ポンプトリップ直後に飽和蒸気圧を再現しているのは液柱分離が起こっていることを表している。
- ・ 液柱崩壊後の圧力上昇値をよく再現している。

3

2. LNGプラントの水撃の計算

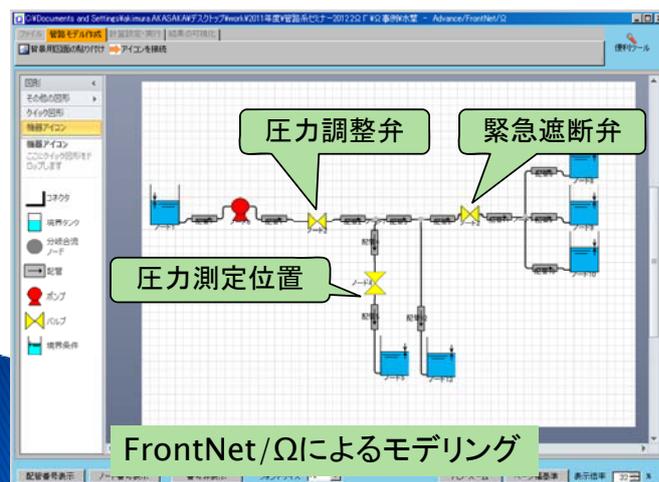
目的: 水撃圧の計算精度を確認する。

計算対象: 圧力制御系をもつLNGプラント

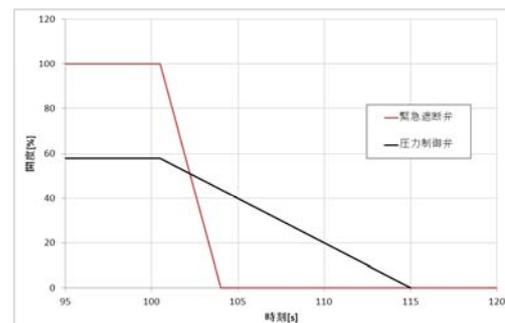
ストーリー: 緊急遮断弁が閉鎖した場合、水撃圧を確認する。

比較: プラントの実機試験と圧力測定位置(サブライン)での圧力を比較する。

FrontNet/Ωによるモデリング



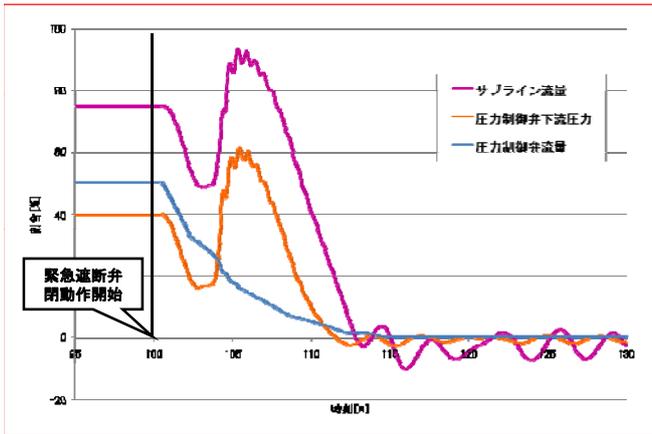
緊急遮断弁・圧力制御弁閉鎖条件



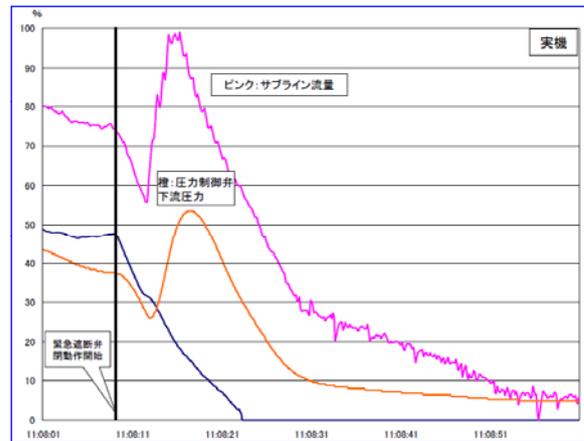
4

2. LNGプラントの水撃の計算

解析結果



実機試験結果



解析結果と実機試験結果を比較し、以下の結論を得た。

- ・ 緊急遮断弁閉鎖時のLNG輸送システムの圧力・流量の振る舞いをよく捉えることができた。
- ・ 圧力制御弁下流圧力ピーク値を10%程度安全側に評価

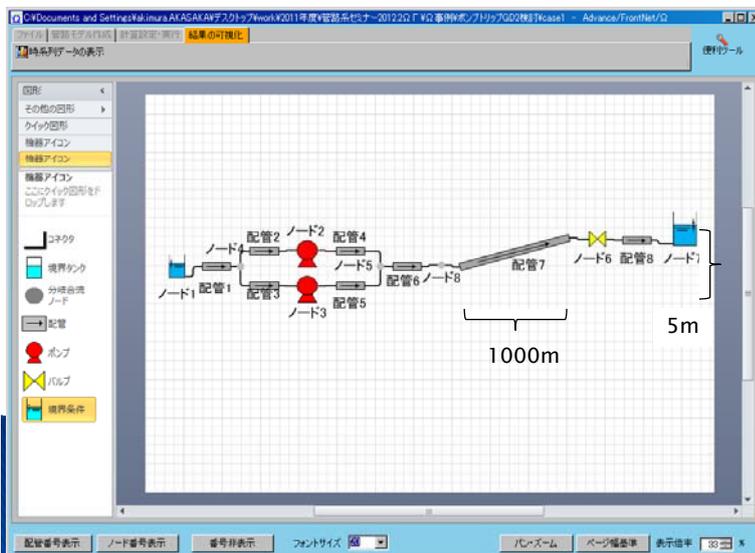
3. ポンプトリップとGD2検討

目的:GD2を変化させて結果が変わるかどうか調べる。

計算対象: 仮想の配管系、ポンプ2台並列運転。

ストーリー: ポンプが2台同時トリップした場合の計算を行い、最大圧力を調べる。

FrontNet/Ωによるモデリング



計算条件

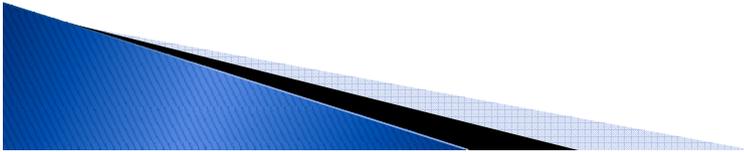
流体	水、蒸気圧1960Pa
配管	長さ1000m、直径0.5m、 粗度 0.045 mm, SUS304TP
境界	圧力指定(大気圧)
ポンプ	定格揚程 15m 定格回転数 400rpm 定格効率 0.88
過渡条件	時刻100sでポンプが同時トリップ トリップ検知後10sでバルブ遮断開始
メッシュ	2m

3. ポンプトリップとGD2検討

計算条件

以下の3ケースについて結果を比較する。

ケース	バルブ遮断速度	GD2[kg・m ²]
ケース1	60s/100%	20
ケース2	10s/100%	20
ケース3	10s/100%	220



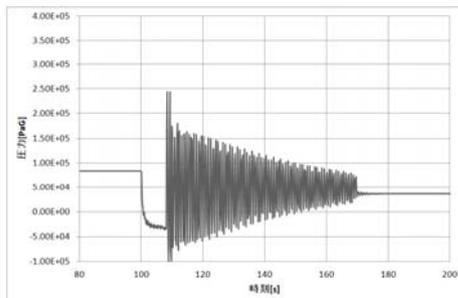
7

3. ポンプトリップとGD2検討

ケース1 計算条件

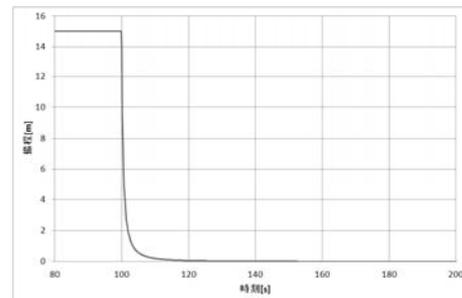
ポンプGD2 20kg・m²

トリップ検知後、10s後にバルブが遮断し始め、60sかけて全開する。

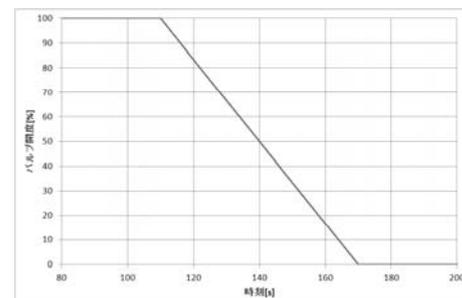


配管6の圧力

最大圧力 0.244MPaG



ポンプ揚程



バルブ開度



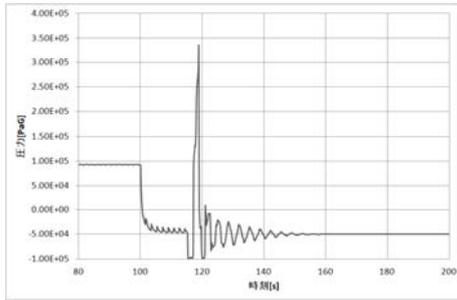
8

3. ポンプトリップとGD2検討

ケース2 計算条件

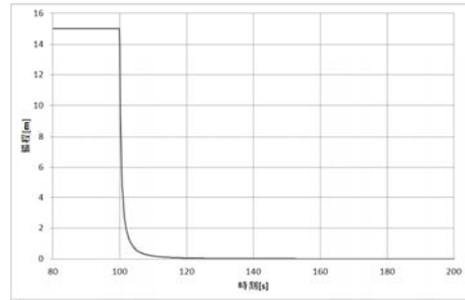
ポンプGD2 20kg・m²

トリップ検知後、10s後にバルブが遮断し始め、10sかけて全閉する。

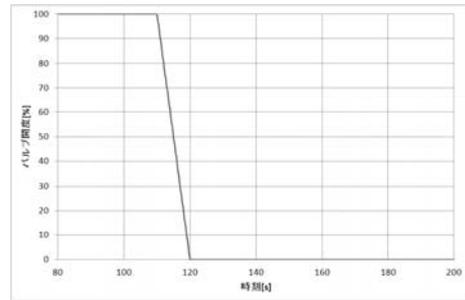


配管6の圧力

最大圧力 0.336MPaG



ポンプ揚程



バルブ開度

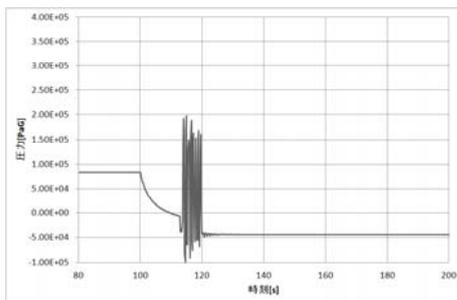
9

3. ポンプトリップとGD2検討

ケース3 計算条件

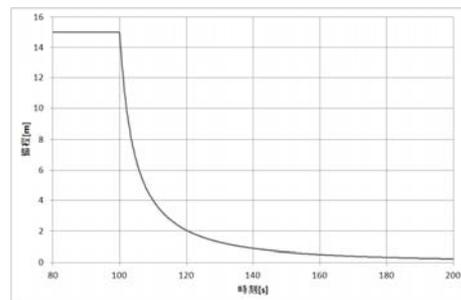
ポンプGD2 220kg・m²

トリップ検知後、10s後にバルブが遮断し始め、10sかけて全閉する。

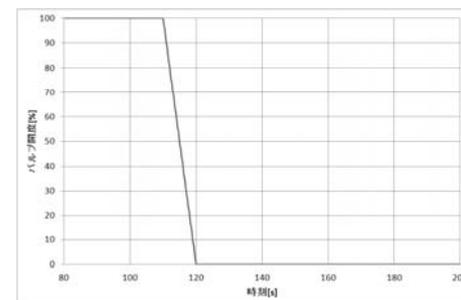


配管6の圧力

最大圧力 0.197MPaG



ポンプ揚程



バルブ開度

10

3. ポンプトリップとGD2検討

結果比較

ケース	バルブ遮断速度	GD2 [kg・m ²]	結果	最大圧力 [MPaG]
ケース1	60s/100%	20	圧力上昇があり、バルブ全閉まで圧力振動が続く	0.244
ケース2	10s/100%	20	圧力上昇はあるがバルブ遮断後は30s程度で静定	0.336
ケース3	10s/100%	220	圧力上昇は少なくバルブ遮断後すぐに静定	0.197

・バルブ遮断速度が遅いケース1に対して、バルブ遮断速度が速いケース2では圧力振動は早く静定するものの、液中分離が生じ最大圧力も上昇した。ケース3でGD2を大きくすることで改善した。

・本計算体系では、ポンプのGD2を大きくし、バルブ遮断速度を速くすると、圧力上昇も少なく、圧力振動も早く落ち着くことがわかった。

管路系流体解析の基礎(ガス編)

2012年2月14日配管系過渡解析の基礎
アドバンスソフト株式会社
セミナー講師: 技術4部 秋村友香

アジェンダ

<基礎理論>

1. 流体の状態、流体物性と状態方程式
2. 単成分・単相流体の支配方程式、圧縮性
3. 多成分ガスの支配方程式
4. 伝熱モデル(輻射・熱伝達・熱伝導)
5. 断面積が変化する流れ

<数値解法・詳細モデル>

1. ボリュームジャンクション法
2. 陽解法と陰解法
3. 固体と流体の熱伝達
4. 熱伝導解析
5. 等価直径

1

基礎理論

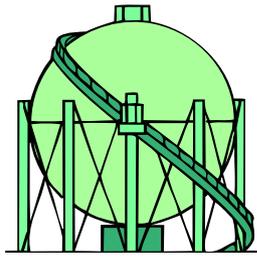
2

1. 流体の状態、流体物性と状態方程式

■ 流体の種類



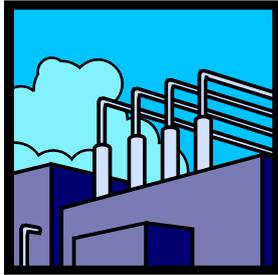
水(液体)



プロパンガス(気体)



石油(液体の混合物)



LNG(液体の混合物)



空気、水蒸気、液滴の混合物



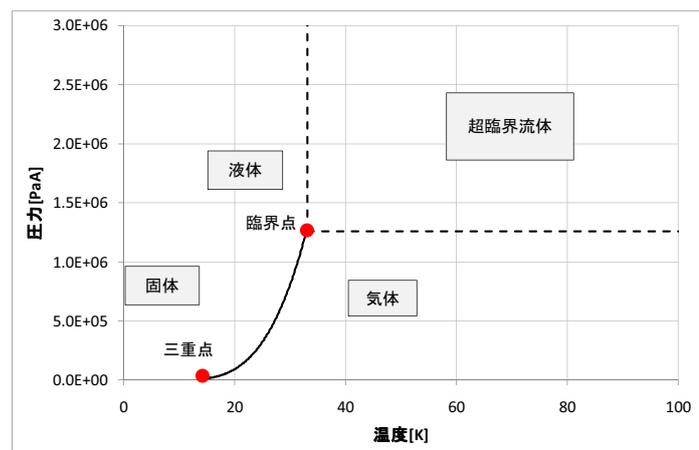
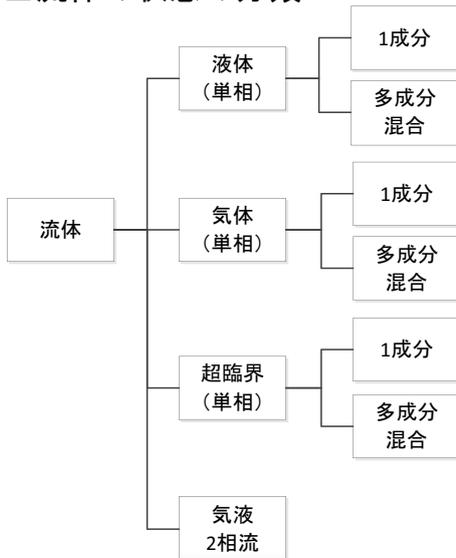
空気と水(気体と液体)

「液体」か「気体」か「液体と気体」か
純物質か混合物か

3

1. 流体の状態、流体物性と状態方程式

■ 流体の状態の分類



相図(水素)

- ・液体は状態方程式がよくわからない場合がある。
- ・気体は理想気体の仮定をすれば使える状態方程式がある。
- ・超臨界状態は、液体とも気体とも区別がつかない状態である。
- ・本誌の解説内容は、液体1成分、気体1成分・多成分、超臨界1成分に対応する。

4

1. 流体の状態、流体物性と状態方程式

■ 流体物性の取り扱い

液体単成分、気体単成分、超臨界単成分の流体物性を同じスキームで取り扱えないか 

①NIST ※のREFPROP9.0では、いくつかの実測値とそれらの補間によって、液体、気体、超臨界状態に
関係なく、物性を提供しているため、これを利用することにより、液体、気体、超臨界状態を統一的なスキームで
扱うことができる。

※NIST (米国立標準技術研究所: National Institute of Standards and Technology, USA)

②通常、定圧比熱やエンタルピーなどは温度のみのべき乗の式で考慮されることが多いが、
NISTの物性値を用いることにより、圧力依存性も考慮できる。つまり、実流体物性を考慮できる。

③NISTの物性値は、Advance/FrontNet/Γなどではテーブル形式で導入されている。
密度、内部エネルギー、定圧比熱...の物性値が、圧力と温度に依存した形で数値テーブル化されている。

NIST URL

<http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>

5

1. 流体の状態、流体物性と状態方程式

■ NIST流体物性テーブルの例

圧力[Pa]	温度[K]	エンタルピー[J/kg]	内部energy[J/kg]	エントロピー[J/(kgK)]	密度[kg/m³]	Cp[J/(kgK)]	Cv[J/(kgK)]	比熱比[-]	粘性[Pa·s]	熱伝導率[W/(mK)]	音速[m/s]
0.100000E+05	0.200000E+00	-0.149078E+06	-0.149192E+06	-0.984689E+04	0.880562E+02	0.283828E+04	0.346372E+04	0.819431E+00	0.710824E-04	-0.307347E-01	0.165795E+04
0.100000E+05	0.400000E+00	-0.147676E+06	-0.147790E+06	-0.974746E+04	0.878934E+02	0.289831E+04	0.348827E+04	0.830873E+00	0.704177E-04	-0.291753E-01	0.165214E+04
0.100000E+05	0.600000E+00	-0.146274E+06	-0.146388E+06	-0.964802E+04	0.877306E+02	0.295834E+04	0.351282E+04	0.842155E+00	0.697530E-04	-0.276160E-01	0.164633E+04
0.100000E+05	0.800000E+00	-0.144872E+06	-0.144986E+06	-0.954859E+04	0.875678E+02	0.301836E+04	0.353737E+04	0.853280E+00	0.690883E-04	-0.260566E-01	0.164051E+04
0.100000E+05	0.100000E+01	-0.143470E+06	-0.143584E+06	-0.944916E+04	0.874050E+02	0.307839E+04	0.356192E+04	0.864252E+00	0.684236E-04	-0.244973E-01	0.163470E+04
0.100000E+05	0.120000E+01	-0.142068E+06	-0.142183E+06	-0.934972E+04	0.872422E+02	0.313842E+04	0.358646E+04	0.875074E+00	0.677589E-04	-0.229379E-01	0.162889E+04

圧力と温度に依存した、密度、内部エネルギー、エンタルピー、etcの物理量が提供されている。

■ NIST物性テーブル化学種

以下の化学種に対する物性が提供されている。

Water	Carbon monoxide	Cyclopropane	Cyclohexane	Neon	Toluene
Nitrogen	Carbon dioxide	Butane	Heptane	Argon	Decafluorobutane
Hydrogen	Deuterium oxide	Pentane	Octane	Krypton	Dodecafluoropentane
Parahydrogen	Methanol	2-Methylbutane	Nonane	Xenon	Sulfur dioxide
Deuterium	Methane	2,2-Dimethylpropane	Decane	Ammonia	Hydrogen sulfide
Oxygen	Ethane	Hexane	Dodecane	Nitrogen trifluoride	Sulfur hexafluoride
Fluorine	Propane	2-Methylpentane	Helium	Benzene	Carbonyl sulfide

6

2. 単成分・単相流体の支配方程式、圧縮性

■ 流体の支配方程式

質量保存式	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0$	ρ : 密度
運動量保存式	$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u u}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{2L} K \rho u^2 = 0$	u : 速度
エネルギー保存式	$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial u(e+p)}{\partial x} = q$	e : 内部エネルギー
状態方程式	$p = f(\rho, e), T = g(\rho, e)$	T : 温度
		p : 圧力
		q : 発熱項
		f, g : 状態方程式

時間 t による偏微分の項を「時間項」、流速 u がかった空間微分の項を「対流項」という。
時間項をゼロと置くと定常解析、時間項を考慮すると過渡解析となる。

密度変化を考慮することを「圧縮性を考慮する」という。

この式では、温度変化や圧力変化による密度変化を考慮している。

7

3. 多成分ガスの支配方程式

■ 多成分ガスの支配方程式

質量保存式	$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho Y_i u}{\partial x} = 0$	状態方程式 (理想気体仮定)	$p = \frac{\rho}{M} RT\bar{Z} = \rho(h - e)$
質量分率	$\sum Y_i = 1$		$h = \bar{C}_p T$
平均分子量	$\bar{M} = 1 / \sum \frac{Y_i}{M_i}$		$T = \frac{e}{\bar{C}_p - \frac{R}{M}}$
モル分率 (体積分率)	$X_i = \bar{M} \frac{Y_i}{M_i}, \sum X_i = 1$	平均定圧比熱	$\bar{C}_p = \sum C_{p_i} Y_i$
		平均圧縮係数	$\bar{Z} = \sum Z_i X_i$

質量保存式で各成分の質量分率を考慮する。

状態方程式は理想気体を仮定する。

多成分ガスの物性を1つの代表値(各成分の平均値)で表す。

各物性の特性に従い、質量分率によって重みをとるか、モル分率で重みをとるかが決まっている。

8

3. 多成分ガスの支配方程式

■多成分ガスの平均物性の式

(参考: 小池秀耀、三橋利玄、浜野明千宏ら、富士総合研究所編「汎用流体解析システム」、丸善株式会社(1993年), p341)

平均粘性係数(Sutherland-Wassiljewaの式)

$$\bar{\mu} = \sum_i \mu_i \left[\frac{1}{X_i} \sum_j X_j \Phi_{ij} \right]^{-1}$$

$$= \sum_i \mu_i \left[\frac{1}{Y_i} \sum_j \left(\frac{M_i}{M_j} \right) Y_j \Phi_{ij} \right]^{-1}$$

ただし、次のWilkeの式を使う

$$\Phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2}{\left[8 \left(1 + \left(\frac{M_i}{M_j} \right) \right) \right]^{1/2}}$$

平均熱伝導率(Wassiljewaの式)

$$\bar{\kappa} = \sum_i \kappa_i \left[\frac{1}{X_i} \sum_j X_j A_{ij} \right]^{-1}$$

$$= \sum_i \kappa_i \left[\frac{1}{Y_i} \sum_j \left(\frac{M_i}{M_j} \right) Y_j A_{ij} \right]^{-1}$$

ただし、次のMasou-Saxenaの式を使う。

$$A_{ij} = 1.065 \Phi_{ij}$$

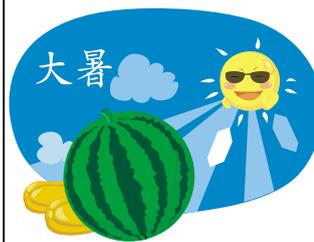
4. 伝熱モデル(輻射・熱伝達・熱伝導)

■伝熱の例



冬、お風呂に入っているとお湯が冷えてくる。

風呂桶が外部に熱を奪われ、風呂桶内部で熱伝導し、風呂桶とお湯が熱伝達し、お湯の熱が風呂桶に奪われて、お湯が冷える。



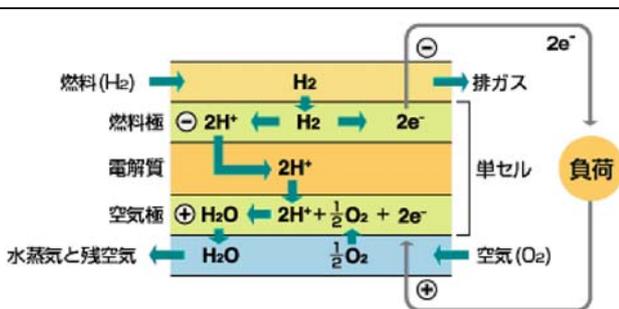
夏、太陽が暑い

太陽から発せられる輻射熱が届いている。



やかんを火にかけると水が沸騰する。

火からやかん表面に熱が入りやかん内部で熱伝導し、やかんと水が熱伝達し水に入熱し、水が熱せられ沸騰状態となる。



燃料電池の例

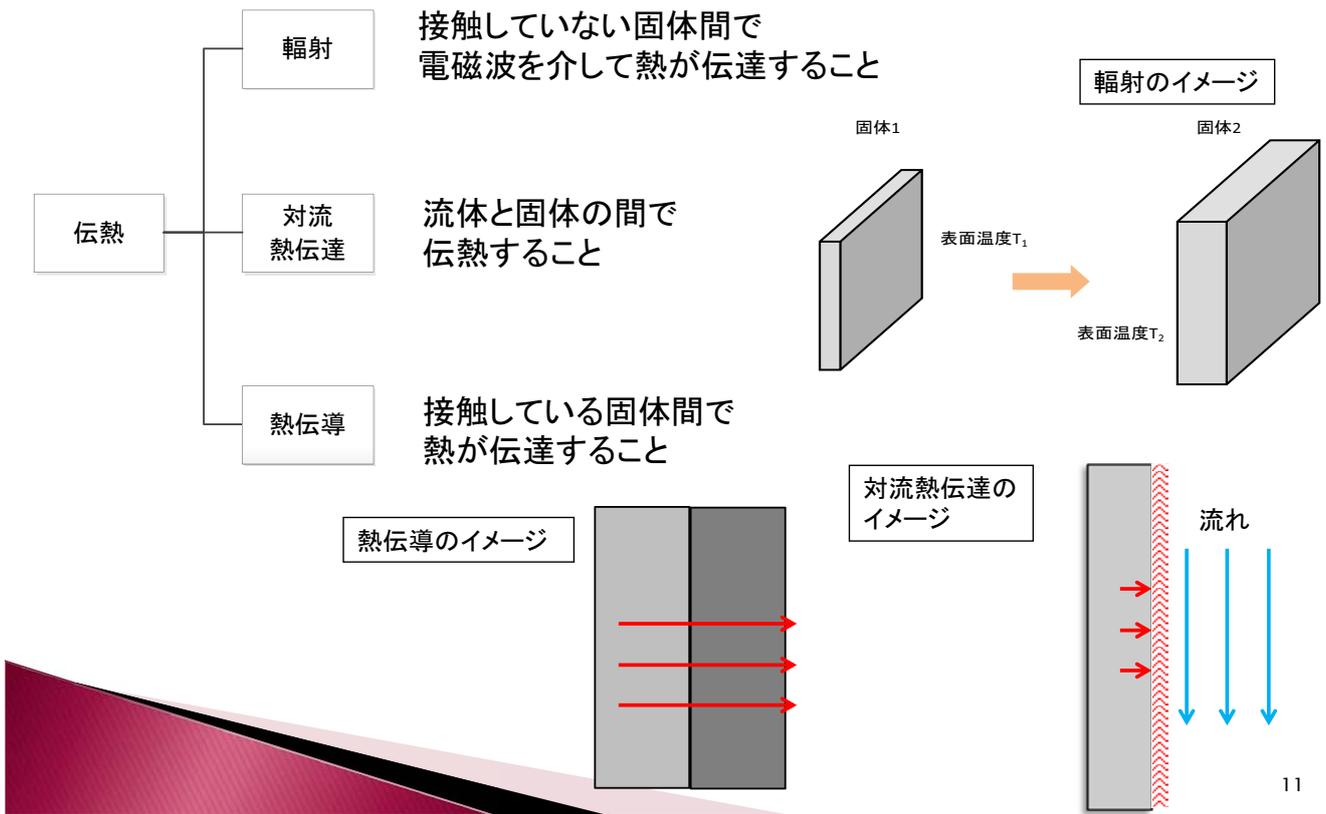
燃料H₂が流れ、燃料極と熱伝達し、燃料極・電解質・空気極を熱伝導し、空気が流れていて、空気と空気極が熱伝達している。その間に化学反応が起こっている。

日本ガス協会HPより。

http://www.gas.or.jp/fuelcell/contents/01_2.html

4. 伝熱モデル(輻射・熱伝達・熱伝導)

■伝熱の種類



11

4. 伝熱モデル(輻射・熱伝達・熱伝導)

■輻射(放射)

輻射熱伝達は、高温の固体表面から赤外線を放出し、低温の固体表面がその熱量を吸収することで熱を受け渡す。輻射熱は次のように温度の4乗の差で表される。

$$Q_{rad} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_R} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_R} - 1 \right)}$$

ここで σ はStefan-Boltzmann係数 [W/m^2K^4] である。Aは伝熱面積である。
 ϵ_R は輻射率であり、黒体輻射の場合は1をとる量である。

固体1と固体2がある角度で輻射熱をやりとりする場合は、形態係数と呼ばれる角度に依存した係数を乗じる。

12

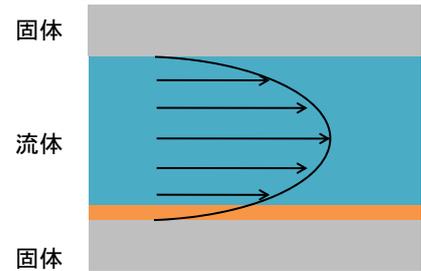
4. 伝熱モデル(輻射・熱伝達・熱伝導)

■ 熱伝達 (参考: 甲藤好郎著、「伝熱概論」、養賢堂)

固体と固体に接する流体の間には速度境界層や温度境界層ができる。

Fourierの法則から、固体から流体への伝熱量は固体近傍の流体内部温度勾配のみによって決まり、次のように表される。

$$Q = -\kappa_f \frac{\partial T}{\partial y} \quad \text{ここで、}\kappa_f \text{ は流体の熱伝導率、}y\text{ は固体面に垂直な座標である。}$$



流体の速度境界層と温度境界層

■ 熱伝達率

管路系流体解析では、流れ方向の一次元解析であるため、乱流域では速度境界層や温度境界層の分布を解くことができない。

そのため、モデル化された熱伝達率 h を用いて伝熱量を次のように表す。

$$Q = hA(T_f - T) \quad \begin{array}{ll} h: \text{熱伝達率} & T_f: \text{流体温度} \\ A: \text{伝熱面積} & T: \text{固体温度} \end{array}$$

熱伝達率はNusselt数を用いて次のように定義される。

$$h = Nu \frac{\kappa_f}{L} \quad L: \text{代表長さ}$$

熱伝達率は各種モデルがあるが、ここではDittus-Boelterの式を紹介する。本式は $Re > 2000$ の乱流域で成立する。

$$Nu = Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad \begin{array}{ll} Re: \text{Reynolds数 - 流れに関する無次元数} & Re = UL/\nu \\ Pr: \text{Prandtl数 - 熱伝導に関する無次元数} & Pr = \nu \rho C_p / \kappa_f \end{array}$$

13

4. 伝熱モデル(輻射・熱伝達・熱伝導)

■ 熱伝導(固体内部) (簡単化のため1次元に話を限定する)

固体中の伝導方向に対する1次元非定常熱伝導方程式は以下のように表される。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{1}{r}\right)^\alpha \frac{\partial}{\partial r} \left(kr^\alpha \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q \quad \begin{array}{ll} \rho: \text{固体密度} & \kappa: \text{固体熱伝導率} \\ C: \text{固体比熱} & q: \text{固体の発熱} \\ T: \text{固体温度} & r: \text{径方向の座標} \end{array}$$

$\alpha=0$ の時、固体は平板型(デカルト座標)、 $\alpha=1$ の時固体は円筒型(円筒座標)、 $\alpha=2$ の時、固体は球面体(球座標)であることを示している。

定常解析の場合は左辺がゼロとなる。

非定常の熱伝導方程式を解きながら早く収束させたい(定常解析を行いたい)場合、時間刻みを大きくとることと同等の条件として、固体物性(密度×比熱)を疑似的に小さくとることがある。

例えば、流体と固体の連成解析をしていて時間刻みが流体解析側で決められ、温度が定常になるまでの時間が固体側で支配される場合、このようなテクニックを使う場合がある。

14

4. 伝熱モデル(輻射・熱伝達・熱伝導)

■熱伝導(境界条件)

固体の表面には境界条件を課す必要がある。

①流体との熱伝達がある場合、熱伝達率 h を用いて以下のような境界条件を課す。

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\text{boundary}} = h(T_f - T_{\text{wall}})$$

②断熱条件の場合は、温度差がゼロ(または熱伝達がゼロ)と置く。

③輻射熱伝達を考慮する場合、輻射熱の定義式を書き換えて熱伝達と同様に取り扱うと便利である。

$$Q_{\text{rad}} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)} = H_{\text{rad}}(T_1^{n+1} - T_2^{n+1}), \quad H_{\text{rad}} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)} (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$$

ここで H_{rad} の式の中の温度 T_1 、 T_2 は前時刻、または前反復の値を用いる。

また、 Q_{rad} 、 H_{rad} に対して、温度の4乗の項を次のように線形化して用いることもある。

$$(T^{n+1})^4 = 4(T^n)^3 \cdot T^{n+1} - 3(T^n)^4$$

15

4. 伝熱モデル(輻射・熱伝達・熱伝導)

■熱コンダクタンス(熱通過率)の考え方 (流体を固体とみなす)

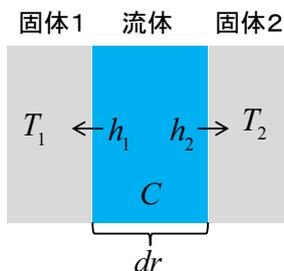
(参考: 甲藤好郎著、「伝熱概論」、養賢堂)

流体解析と固体の熱伝導解析では、明らかに流体解析のほうが計算負荷が高い。

流体流路と固体の解析モデルを検討するとき、以下の条件であれば流体を固体とみなすことがある。

条件1. 流体の流れは定常流れであり、得たい結果が定常的である場合。

条件2. [固体-流体-固体]のような体系の熱分布が重要である場合。



T_1 : 固体1の温度、 T_2 : 固体2の温度

h_1 : 流体と固体1の熱伝達率、 h_2 : 流体と固体2の熱伝達率

C : 流体の熱伝導率

κ_{conduct} : 流体を固体とみなした場合の熱コンダクタンス

熱コンダクタンス κ_{conduct} は次のように定義される。

$$Q = \kappa_{\text{conduct}}(T_1 - T_2)$$

$$\frac{1}{\kappa_{\text{conduct}}} = \frac{1}{h_1} + \frac{dr}{C} + \frac{1}{h_2}$$

16

5. 断面積が変化する流れ

■断面積変化の式の導出(参考:機械工学便覧、流体工学、日本機械学会編A5-56)

断面積Aの変化によって流速uが変化すると、圧力、密度、温度も変化する。

以下では、断面積を考慮した式を導出する。

①連続の式:質量保存式より

$$\rho u A = \text{const.} \quad \longrightarrow \quad \frac{d\rho}{\rho} + \frac{du}{u} + \frac{dA}{A} = 0$$

②運動量の式:検査体積中の運動量保存より

$$u du + \frac{dp}{\rho} = 0$$

③音速の式

$$dp = c^2 d\rho$$

流速の変化と断面積の変化の関係

$$\begin{aligned} \frac{du}{u} &= \frac{1}{\left(\frac{u^2}{c^2} - 1\right)} \frac{dA}{A} \\ &= \frac{1}{M^2 - 1} \frac{dA}{A} \end{aligned}$$

ここでMは Mach数

これより以下のような性質が分かる。

	亜音速		超音速	
断面積変化	-	+	-	+
速度変化	+	-	-	+
圧力変化	-	+	+	-
温度変化	-	+	+	-
密度変化	-	+	+	-

■断面積が変化する流れの特徴のまとめ

亜音速では・・・

- ①断面積が小さくなる箇所で流速が大きくなり、圧力・温度・密度が小さくなる。
- ②断面積が大きくなる箇所で流速が小さくなり、圧力・温度・密度が大きくなる。

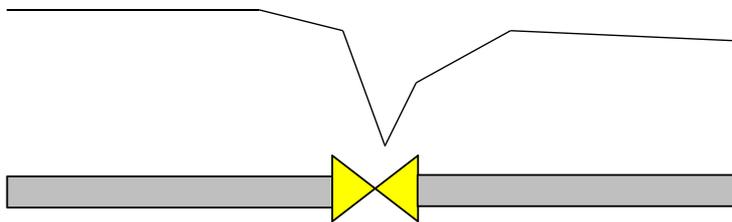
17

5. 断面積が変化する流れ

■断面積が変化する流れの例

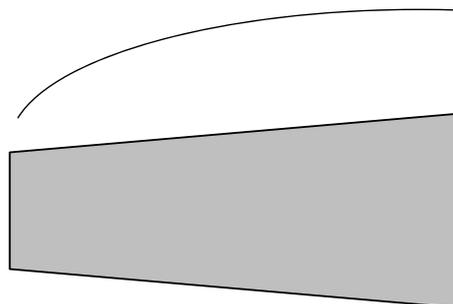
①絞り部(弁やオリフィスなど)

静圧は絞り部で下がったあと回復する。



②拡大管

静圧はどんどん大きくなる。



18

数値解法・詳細モデル (Advance/FrontNet/Γの解法)

1. ボリュームジャンクション法

■基礎方程式

基礎方程式を数値的に解くためには離散化が必要となる。

$$\text{質量保存式 } \underbrace{\frac{\partial \rho}{\partial t}}_{\text{時間項}} + \underbrace{\frac{\partial \rho u}{\partial x}}_{\text{対流項}} = 0, \quad \text{運動量保存式 } \underbrace{\frac{\partial \rho u}{\partial t}}_{\text{時間項}} + \underbrace{\frac{\partial \rho u u}{\partial x}}_{\text{対流項}} + \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x}}_{\text{圧力項}} + \underbrace{\frac{1}{2L} K \rho u^2}_{\text{ソース項}} = 0$$

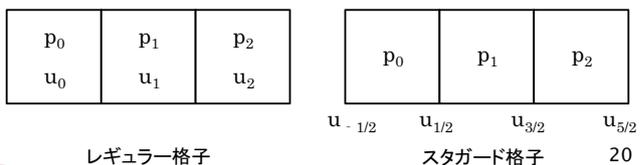
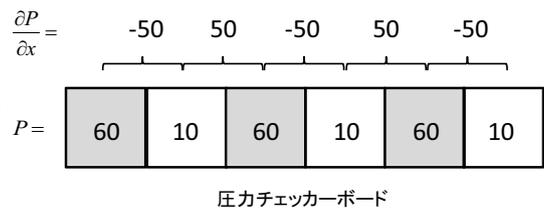
対流項と圧力項の離散化は、空間離散化であるため、メッシュ分割とボリュームジャンクション法、時間項の離散化は、陽解法、陰解法、ソース項の取り扱いは半陰解法の取り扱いを以下で紹介する。

■レギュラー格子とスタガード格子

メッシュ上の同一点に圧力と流速を定義したものを「レギュラー格子」という。

レギュラー格子は、運動量保存式の圧力項が、隣りあったメッシュ間の差にしか依存しないため、定常状態でチェッカーボード状の圧力振動が起こってしまう問題がある。

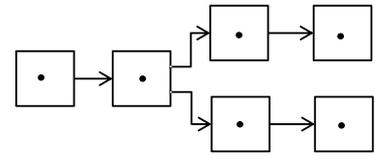
これを回避するために、メッシュの中心には圧力や密度、メッシュの界面には流速を定義する「スタガード格子」のスキームが提案され、広く使われている。



1. ボリュームジャンクション法

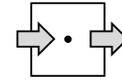
■ ボリューム・ジャンクション法

図で、四角をコントロールボリューム、矢印をジャンクションと呼ぶ。
 ボリュームには長さ、直径、体積が定義される。
 ジャンクションには長さとは定義されず、直径のみが定義される。



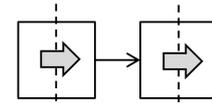
ボリューム・ジャンクションの接続

ボリューム中心には、圧力、温度、密度、内部エネルギー等が定義され、
 ボリューム上で質量保存式とエネルギー保存式が解かれる。



ボリューム上の質量収支

ジャンクションには、流速が定義され、
 ジャンクション上で運動量保存式が解かれる。



ジャンクション上の運動量収支

■ 風上差分法

(参考: 棚橋隆彦, 「はじめてのCFD—移流拡散方程式—」, コロナ社)

対流項の差分方法は風上差分と呼ばれる差分法がよく用いられる。
 流速が正である場合は+側のメッシュの値を、
 流速が負である場合は-側のメッシュの値を採用する方法である。
 圧力項は中心差分法を用いる。

$$\left(\frac{\partial \rho u}{\partial x}\right)_i = \frac{\langle \rho \rangle_{i+\frac{1}{2}} u_{i+\frac{1}{2}} A_{i+\frac{1}{2}} - \langle \rho \rangle_{i-\frac{1}{2}} u_{i-\frac{1}{2}} A_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta V_i}$$

$$\langle \rho \rangle_{i+\frac{1}{2}} = \begin{cases} \rho_i & (u_{i+\frac{1}{2}} \geq 0) \\ \rho_{i+1} & (u_{i+\frac{1}{2}} < 0) \end{cases}, \quad \langle \rho \rangle_{i-\frac{1}{2}} = \begin{cases} \rho_{i-1} & (u_{i-\frac{1}{2}} \geq 0) \\ \rho_i & (u_{i-\frac{1}{2}} < 0) \end{cases}$$

2. 陽解法、陰解法

■ 時間項の離散化

時間項の取り扱いでは、陽解法と陰解法があり、それぞれ以下の特徴がある。

	解くべき方程式	メリット	デメリット
陽解法	$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = a \frac{\partial \phi^n}{\partial x}$	処理が簡潔 圧力波を精度よくとらえることができる	タイムステップ幅 Δt を小さくとる必要あり
陰解法	$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = a \frac{\partial \phi^{n+1}}{\partial x}$	タイムステップ幅 Δt を大きくとれる	連立方程式を解く必要がある

■ CFL条件

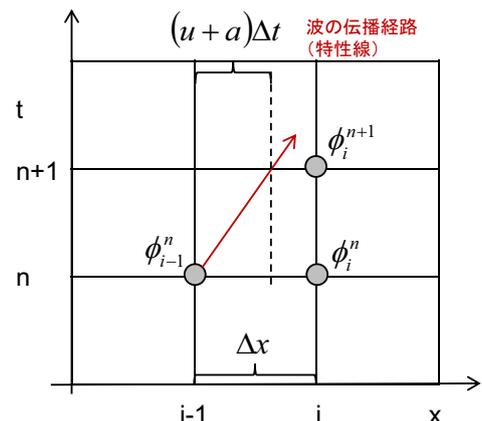
陽解法では、タイムステップはCFL条件に制限される。

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} > u + a, \quad C_{\text{ourant}} \equiv (u + a) \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1, \quad \therefore \Delta t < C_{\text{ourant}} \times \frac{\Delta x}{(u + a)}$$

陽解法の式を書き換えると次のような形になる。

$$\phi_i^{n+1} = \phi_i^n - C_{\text{ourant}} (\phi_i^n - \phi_{i-1}^n)$$

クーラン数 C_{ourant} の意味は、
 Δt の間に波が進む距離 $(u+a)\Delta t$ と格子幅 Δx の比であり、
 圧力波が1メッシュを越えて伝播しないことを表す。



2. 陽解法、陰解法

■ソース項の線形化(半陰解法化)

(参考:スハスV.パタンカー原著、水谷幸夫・香月正司共訳、「コンピュータによる熱移動と流れの数値解析」、森北出版株式会社)

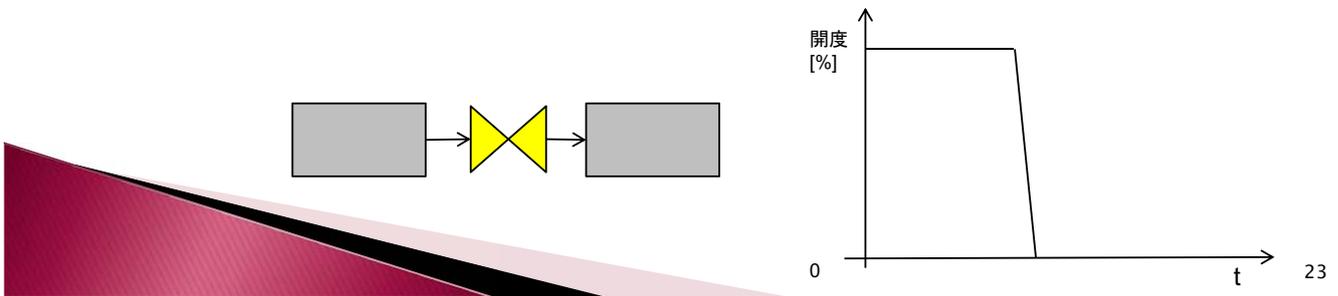
圧損や発熱は、運動量保存式やエネルギー保存式中の生成項中で取り扱うが急激に大きな値が条件として与えられた場合、これが離散化式の中で支配的となって不安定性を導く場合がある。

安定な解を得るために、生成項が適正な限界内に存在するように線形化する手法があるので紹介する。

運動量保存式内の摩擦損失項の新しい時刻での流速の2乗項をTaylor展開し、さらに高次の項を省略して、次のように線形化する。

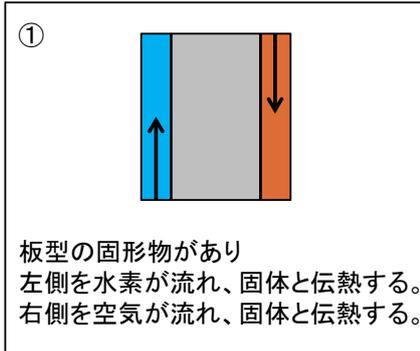
$$\frac{1}{2} \frac{K}{L} \rho (u^{n+1})^2 \cong \frac{1}{2} \frac{K}{L} (2\rho^{n+1} u^{n+1} - \rho^n u^n) u^n$$

このような取扱いをしておけば、ソース項は、方程式の両辺に正の項として現れ、さらには、未知数の u^{n+1} に対して、優対角化が図られるため、バルブ遮断時の急激な圧力損失等変化でも安定な解が得られる。

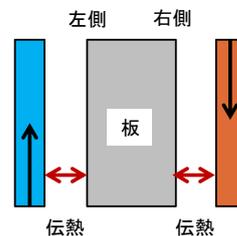


3. 固体と流体の熱伝達

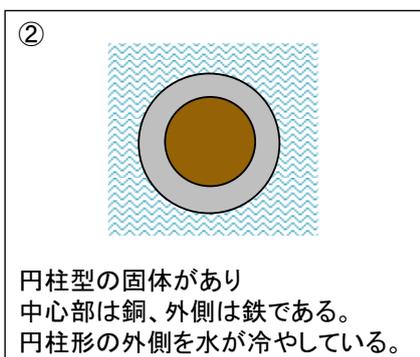
■固体と1次元流路の基本組み合わせ1



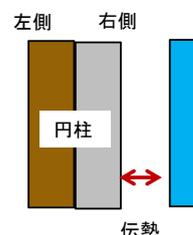
①を実現するには、固体の両側に流路を設定できる必要がある。固体は左側と右側を区別する必要がある。固体は板型の取り扱いとなる。



■固体と1次元流路の基本組み合わせ2

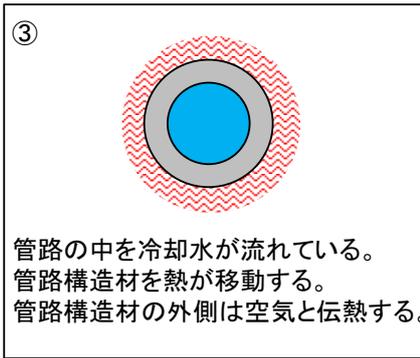


②を実現するには、円柱型の固体を扱う。円柱は2層(2つの物性)から成っている。円柱の外側に流路と伝熱する必要がある。

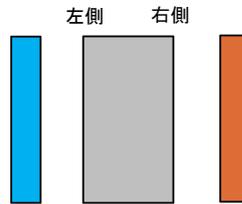


3. 固体と流体の熱伝達

■ 固体と1次元流路の基本組み合わせ3

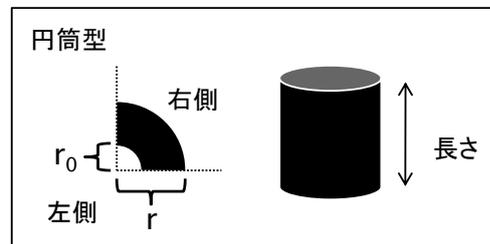
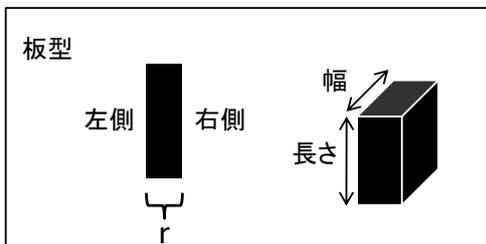


③を実現するには、円柱型の固体を扱う。
円柱の内側は冷却水流路と伝熱する。
円柱の外側は空気流路と伝熱する。



■ 左側と右側の概念と仮想半径

- ・内側と外側だと主観が入るため、固体には「左側」「右側」の概念を定義する。これはアメリカの原子力流体解析コードRELAP等も同様である。
- ・円柱型固体の内部に流路を設定できるように、円筒形固体に仮想半径の概念を導入する。

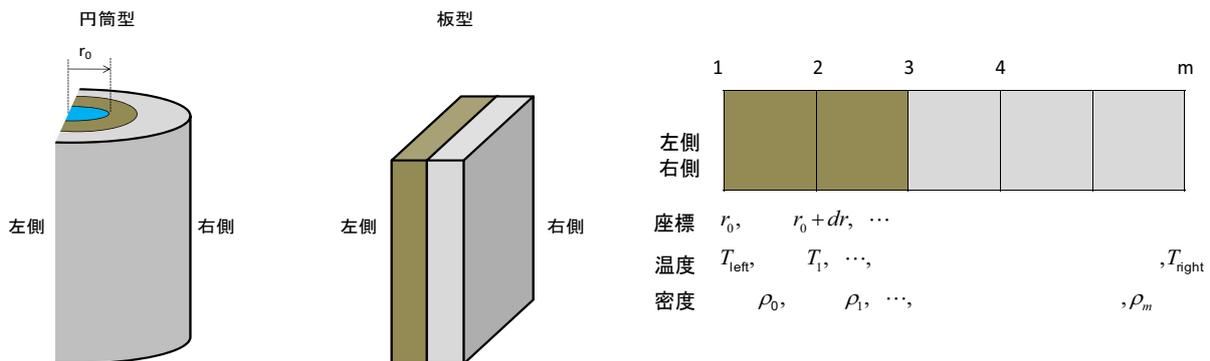


25

3. 熱伝導解析

■ 熱伝導解析の離散化

固体は、層ごとに格子分割して離散化する。
格子の界面上に座標と温度を定義し、格子中心に密度、比熱、熱伝導率の固体物性を定義する。
熱伝導方程式は格子界面上について解かれる。



■ 境界面における熱伝導率

(参考;スハスV.パタンカー原著、水谷幸夫・香月正司共訳、「コンピュータによる熱移動と流れの数値解析」、森北出版株式会社)

異なる固体層の界面の熱伝導率は、格子*i*と格子*i+1*の間の界面上の熱伝導率 $\kappa_{i+1/2}$ を次のように定義することにより模擬する。

$$\kappa_{i+1/2} = \left\{ \frac{1}{dr_i + dr_{i+1}} \left(\frac{dr_i}{\kappa_i} + \frac{dr_{i+1}}{\kappa_{i+1}} \right) \right\}^{-1}$$

26

5. 等価直径の考え方

■ 等価直径とは

等価直径は、圧力損失における摩擦係数や対流熱伝達における熱伝達係数を正確に評価するために重要な値である。

■ 等価直径の考え方が必要な場合その1(円形でない流路形状)

通常、管路は円形を仮定している。

円形でない流路形状を円形流路をベースに考えるとき、等価直径を用いる。



円形流路

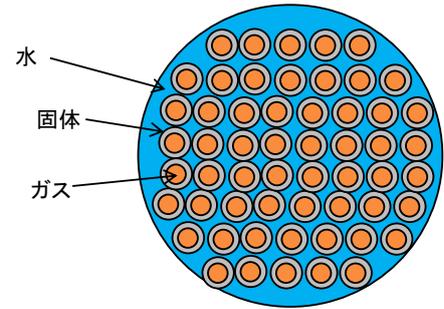


矩形流路



複雑形状流路

- ・同じ径のガス流路が複数本
- ・同じ厚みの構造物



■ 等価直径の考え方が必要な場合その2

(複数流路を代表1本でモデリング)

例えばボイラー等の熱交換器では、数百本の流路が熱を交換する。これらの流路形状は等しく、対称的な構造を持つ。

これら1本1本の流路を詳細に模擬していると計算負荷も大きい。

これら1本1本の流路に着目する必要がない場合、複数流路を代表的な流路1本で模擬することができる。このとき等価直径を用いる。

27

5. 等価直径の考え方

■ 等価直径の式(円形でない流路形状を円形に焼き直す)

$$D_e = \frac{4A}{L} \quad A \text{は流路断面積、} L \text{は濡れ淵長さ。}$$

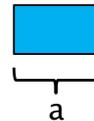
濡れ淵長さとは、流体が流路に接して摩擦を受ける淵長さのこと。

(例) 円形流路



$$L = 2\pi r$$

矩形流路



$$L = 2a + 2b$$

■ 等価直径の利用(複数円形流路を代表1本でモデリング)

等価直径は元の値、流路面積と伝熱面積はN本分を考慮する。

項目	モデリング方法	実際の流路(1本あたり)	代表流路
流路数	複数流路を1本とおく	N本	1本
等価直径	等価直径を使用する。 適切に圧力損失を評価する。	D	D
流路面積	流路面積が等しくなるようにする。	A	NA
伝熱面積	伝熱面積が等しくなるようにする。	A_{heat}	NA_{heat}
形状	等価直径と伝熱面積が等しいような概念的形状である。	円形	全流路面積が等しい 円形換算

28

管路系流体解析の基礎(ガス編)まとめ

■ 管路系流体解析で何がわかるかまとめる。

モデル	入力	出力
① 管路系解析 液相 単成分ガス相 超臨界相	<ul style="list-style-type: none"> ・ 管路形状境界条件 ・ 流体物性の指定(NIST) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 圧力、温度、密度、流量の管路内分布と時系列変化 ・ バルブを操作した場合、流量変化や圧力波変化と下流側への操作の時間遅れ
② 管路系解析 多成分ガス系	<ul style="list-style-type: none"> ・ 管路形状 ・ 境界条件 ・ 多成分ガス物性の指定 	<ul style="list-style-type: none"> ①に加えて ・ 多成分ガスの組成（モル分率）の管路内分布と時系列変化
③ 管路系解析 + 伝熱解析	<ul style="list-style-type: none"> ・ 管路系情報 ・ 固体形状 ・ 固体物性 ・ 固体境界条件 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 固体内温度分布と温度の時系列変化 ・ 固体と熱をやりとりした場合の流体の圧力、温度、密度、流量の管路内分布と時系列変化 ・ 冷却剤が詰まり等で冷却機能を喪失した場合の固体温度の時間変化と流量分配変化

Advance/FrontNet/ Γ 1.4事例紹介

2012年2月14日管路系セミナー
アドバンスソフト株式会社
セミナー講師:技術4部 秋村友香

アジェンダ

1. 衝撃波管の計算(理論解との比較)
2. 二酸化炭素の空気パーセント計算(実測値との比較)
3. 配管熱伝導の計算(理論解との比較)
4. 熱交換器の計算(仮想的な条件)

1. 衝撃波の計算

目的: 過渡解析の精度を確認する。

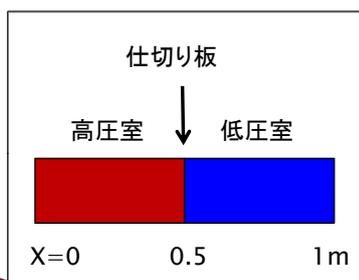
計算対象: 2つの高圧配管と低圧配管が、仕切り壁で仕切られている。
境界条件は反射壁とする。流体は理想気体(空気)とする。

ストーリー: ある瞬間に仕切り壁が取り除かれる。このとき圧力波が発生する様子を調べる。

比較: 次の文献と比較する。

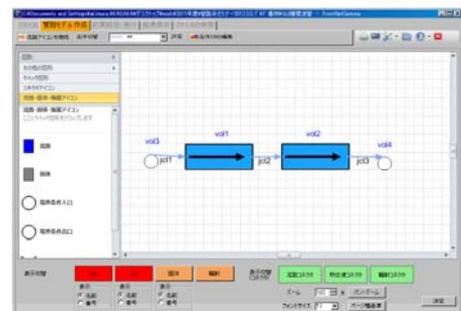
W. D. Henshaw, Journal of Computational Physics 68, 25-47 (1987)

計算条件



流体	比熱比1.4 モル質量28.8g/mol
高圧室 条件	圧力1000kPa 温度350K 密度10kg/m ³ 500分割、径1mm
低圧室 条件	圧力100kPa 温度280K 密度1.25kg/m ³ 500分割、径1mm
時間	0.63ms

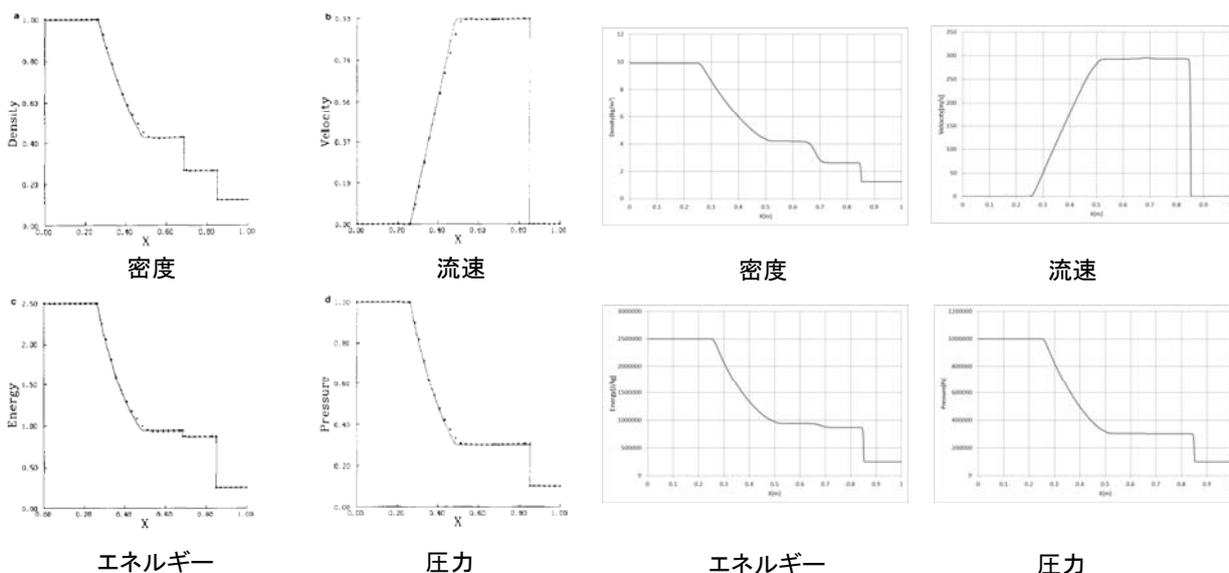
FrontNet/ Γ によるモデリング



1. 衝撃波の計算

文献の理論解(直線)

FrontNet/Γの結果



- ・ 過渡解析の精度を確認するため、理論解が知られている衝撃波管問題を解いた。
- ・ 結果は、FrontNet/Γの解が多少なまっているが、良好に一致しているといえる。

3

2. 二酸化炭素の空気パーージ計算

目的: 多成分ガス計算機能の過渡解析の精度を確認する。

計算対象: 下図のように左側から空気と二酸化炭素が流入し、合流してその後大気解放される。

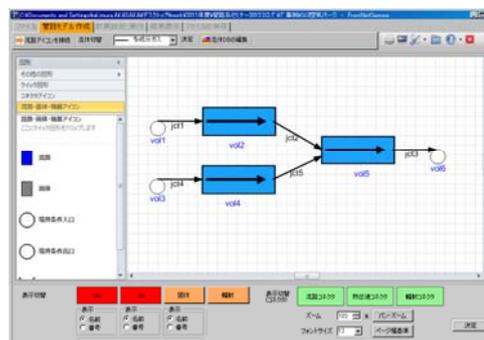
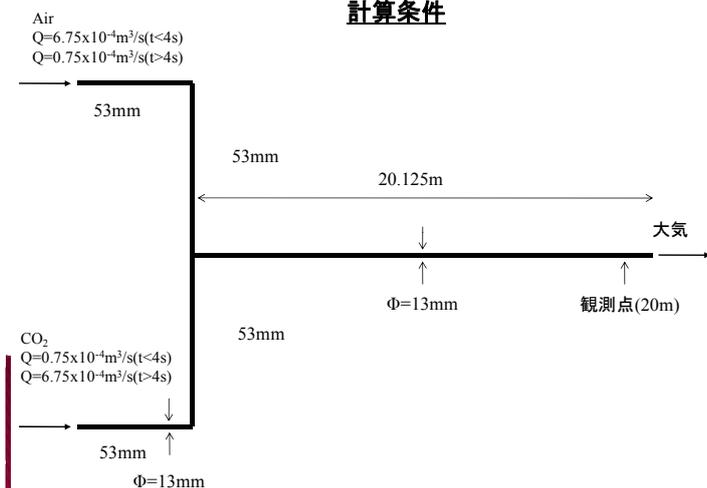
ストーリー: 空気と二酸化炭素のモル分率が0.9:0.1で流れていた時、4s後に、空気と二酸化炭素のモル分率が0.1:0.9となるような流入条件である。

比較: 次の文献と比較する。

染谷雄史他, "管路内での異種気体混合に関する研究", 日本流体力学学会(2007)

計算条件

FrontNet/Γによるモデリング

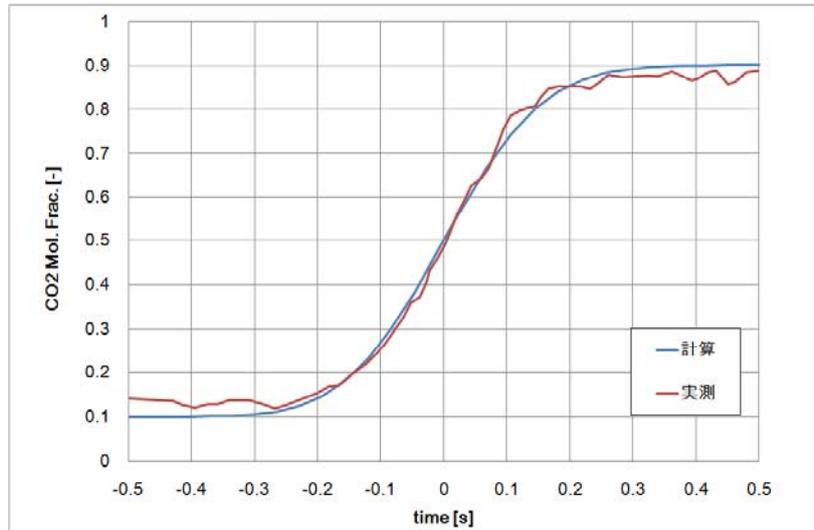


4

2. 二酸化炭素の空気パーージ計算

観測点における二酸化炭素モル分率

観測点をCO₂が通過した時刻(7.54s)をゼロとしている。



- ・理想気体の多成分ガスモデルを使い計算をし、実験と比較した。
- ・管路内の流速が $(6.75 \times 10^{-4} + 0.75 \times 10^{-4}) / \pi(0.013/2)^2 = 5.65 \text{ m/s}$ であり、観測点までの長さが20.106mなので、流量変化後、 $20.106 / 5.65 = 3.55 \text{ s}$ で濃度に変化することになるが、計算結果も流量の切り替え4sを含んだ7.54sとほぼ同等となっている。
- ・二酸化炭素で空気をパーージする計算は試験をよく再現している。

5

3. 配管熱伝導の計算

目的: 定常状態での流体と固体の熱伝導機能の確認をする。

計算対象: 円形の配管内を水素が高速で流れており、配管を構成する固体の材質は内側が銅、外側が鉄の2層である。

ストーリー: 流体と固体は熱伝導をし、固体外側は温度が一定とする。
流体の温度分布と固体の温度分布を調べる。

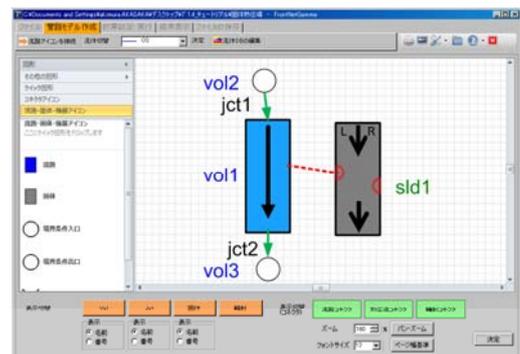
比較: 次の文献中の理論解と比較する。

田中正隆、松本敏郎、中村正行「計算力学とCAEシリーズ境界要素法」培風館

計算条件

流体	水素 (NIST)
配管	長さ100m、直径0.1m、粗度16 μm メッシュ 10分割
境界条件	入口圧力1.2[MPa] 出口圧力1.0[MPa] 温度289[K] ※比較のため、第一メッシュの固体左側温度が283K付近になるよう調整
熱伝達率	計算条件 (A) 100000[W/m ² K] を指定 計算条件 (B) Dittus-Boelterの式を使用
固体形状	長さは配管と同じ 銅の厚さ50mm、鉄の厚さ50mm
固体物性	銅 熱伝導率 385[W/mK] 鉄 熱伝導率 73[W/mK]
固体外側	温度指定273K

FrontNet/πによるモデリング

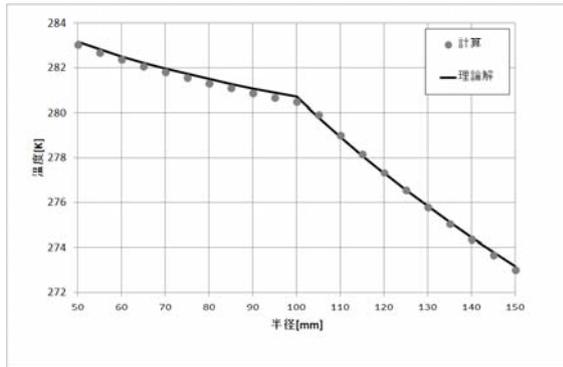


6

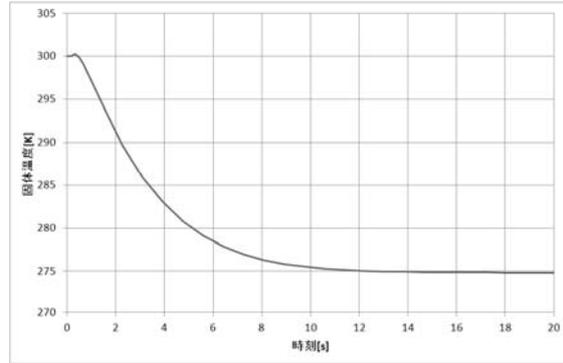
3. 配管熱伝導の計算

計算条件(A)の結果

固体内温度分布(@第一メッシュ、径方向)



固体温度の収束状況(@上流から50m)

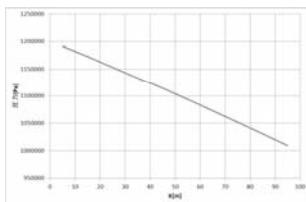


理論解と比較するため、熱伝達率を入力とし、流体側の温度を調整した。
結果は、理論解と比較して良好に一致している。
約20sの過渡解析で、ほぼ定常に達していると考えられる。

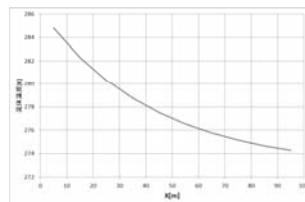
3. 配管熱伝導の計算

計算条件(B)

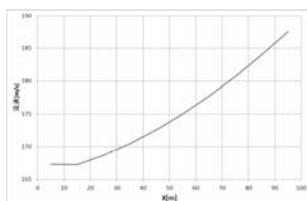
流体圧力分布(流れ方向)



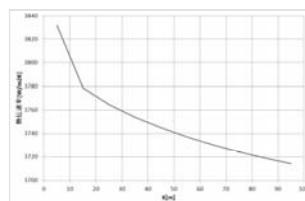
流体温度分布(流れ方向)



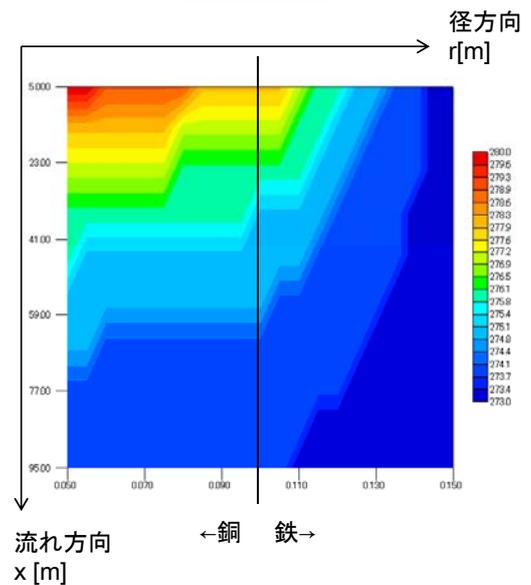
流体流速分布(流れ方向)



熱伝達率分布(流れ方向)

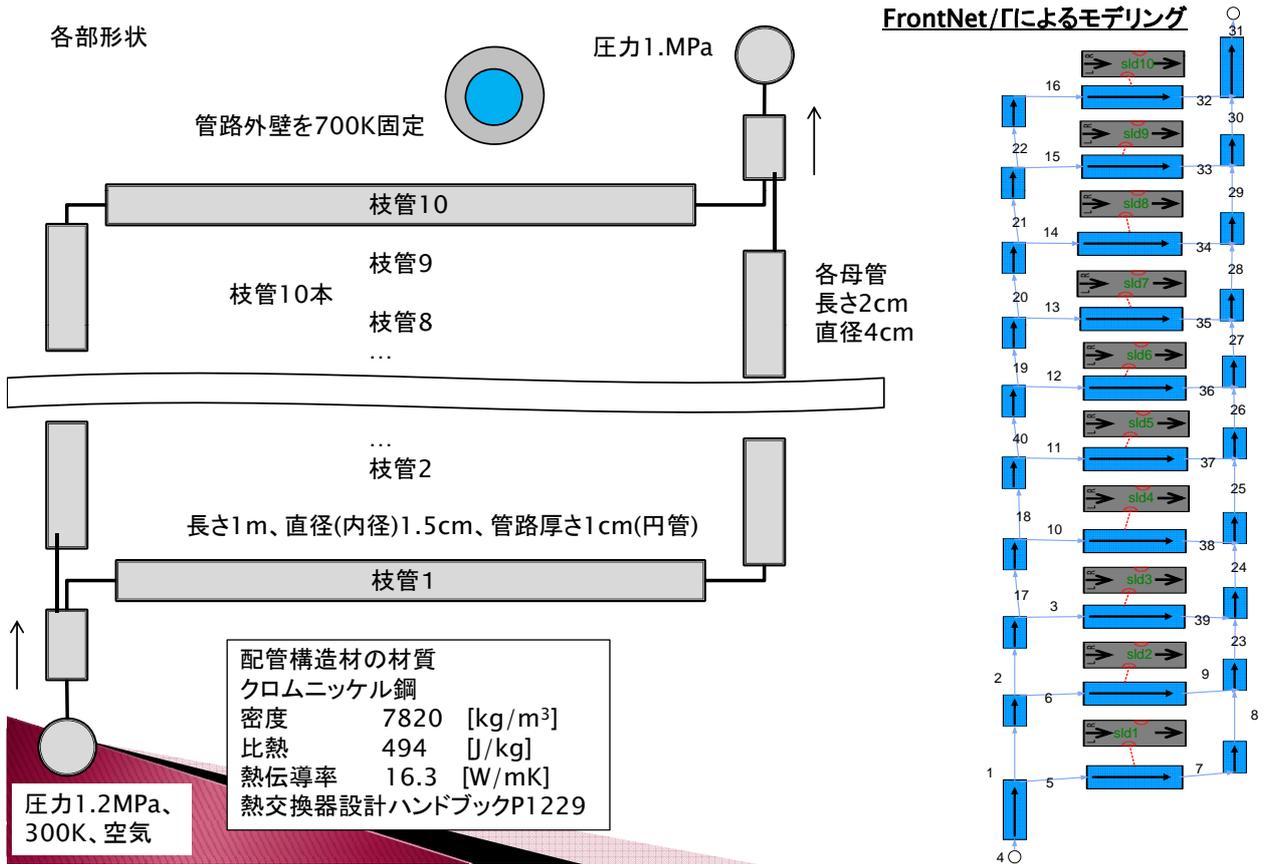


固体温度分布



- ・ 仮定の条件で計算を実施した。
- ・ Dittus-Boelter式で熱伝達率を算出し、上記のような熱伝達率分布を得た。これに従い、流体と固体が熱伝達をし、流体温度と固体温度の分布が得られた。
- ・ 固体温度は流れ方向と径方向について分布を得ることができた。

4. 熱交換器の計算



4. 熱交換器の計算

定常状態の流量分配

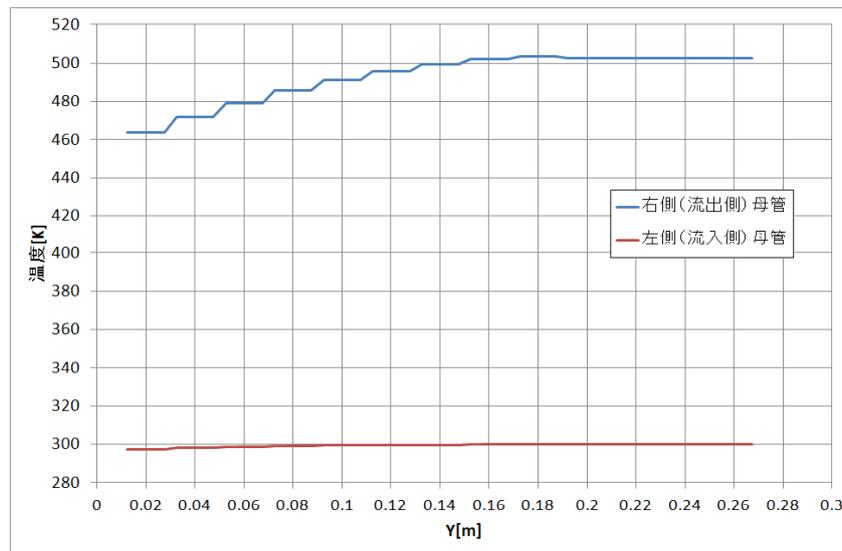
	流量[kg/s]	[%]
枝管10	0.12	9.68
枝管9	0.10	8.06
枝管8	0.08	6.45
枝管7	0.08	6.45
枝管6	0.08	6.45
枝管5	0.09	7.26
枝管4	0.11	8.87
枝管3	0.15	12.10
枝管2	0.19	15.32
枝管1	0.24	19.35
合計	1.24	100.00

流れ ↑

・不均一な流量分布が得られた。流入側上流の方が流れやすいため、枝管1, 2, 3, ...の順に流量は減っている。ただし、流入側下流末端はデッドエンドで流れがせき止められるため、枝管9, 10では若干流量が増えている。

4. 熱交換器の計算

定常状態の母管の温度分布



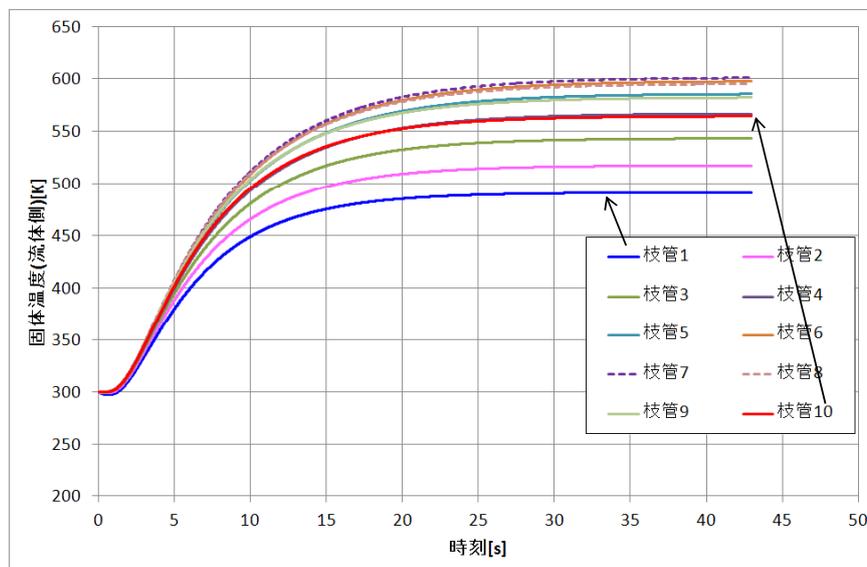
- ・ 枝管 1 の流量が多いため低い温度が母管（右）に流入し、枝管 2・・・にいくにしたがって高い温度が流入している。
- ・ 最終的な空気の取り出し温度は約500Kとなった。

11

4. 熱交換器の計算

管路構造材初期温度300K、初期流量0kg/sの条件で過渡解析を実施した。

各枝管の流れ方向中心部(0.5m)、構造材の流体側(内側)の温度の時間変化(計算結果)

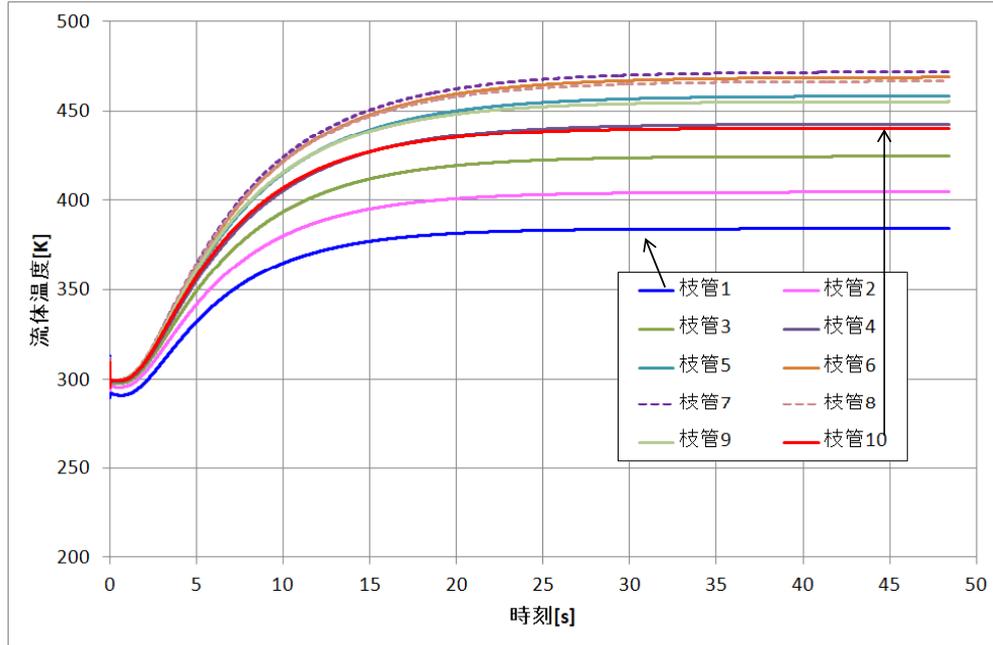


- ・ 枝管構造材温度に対して、流量分布に応じた温度分布が見られた。すなわち、枝管 1, 2, 3 が比較的 low、枝管 5, 6, 7, 8 が high になった。

12

4. 熱交換器の計算

各枝管の流れ方向中心部(0.5m)、**流体**の温度の時間変化(計算結果)



・枝管構造材温度に対して、流量分布に応じた温度分布が見られた。
すなわち、枝管1, 2, 3が比較的低く、枝管5, 6, 7, 8が高くなった。

13

「3. 配管熱伝導の計算」で比較に用いた理論解(参考)

二重円筒熱伝導理論解

(1) 内壁から外壁までの熱伝達

$$q = \frac{(T_i - T_o)}{\frac{1}{r_1 h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_a} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_b} + \frac{1}{r_2 h_2}}$$

(2) $r < r_1$ における温度分布

$$T(r) = T_i - q r_1 \left(\frac{1}{r_1 h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r}{r_1}\right)}{k_a} \right)$$

(3) $r_1 < r < r_2$ における温度分布

$$T(r) = T_i - q r_1 \left(\frac{1}{r_1 h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_a} + \frac{\ln\left(\frac{r}{r_2}\right)}{k_b} \right)$$

14

この本資料に収録されている文章および内容については、ご自身のために役立つ用途に限定して無料配布しています。

この本資料を、販売、オークション、その他の目的で利用するには、著作権者の許諾が必要になります。

この本資料に含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。

配管系過渡解析の基礎

— 熱交換器、バルブ、ポンプ、タンク、プラント保守・設計に役立つ流体過渡解析ソフトウェアを使った基礎セミナー

— お問い合わせ —

アドバンスソフト株式会社

〒107-0052 東京都港区赤坂1-9-20 第16興和ビル南館7F

TEL: 03-5570-1689 FAX: 03-5570-1684 E-mail: office@advancesoft.jp

URL: <http://www.advancesoft.jp/>

2012年2月14日

主催: アドバンスソフト株式会社

© Copyright 2012 Advancesoft All rights reserved. No reproduction without written permission.



AdvanceSoft