

# 管路系流体解析ソフトウェア Advance/FrontNetの 概要と新機能

技術第4部 秋村 友香

管路系流体解析の応用セミナー  
2014年8月29日（金）  
アドバンスソフト株式会社



## 内容

1. 管路系流体解析
2. ソフトウェアの機能紹介 (AFN/ $\Omega$ )
3. ソフトウェアの機能紹介 (AFN/ $\Gamma$ )
4. ソフトウェアの機能紹介 (AFN/ $\Lambda$ )
5. 今後の開発項目



# 1. 管路系流体解析

## 1. 管路系流体解析

### 管路系流体解析への要望の推移

原子力分野  
気液2相流  
詳細な情報

1970'sベース

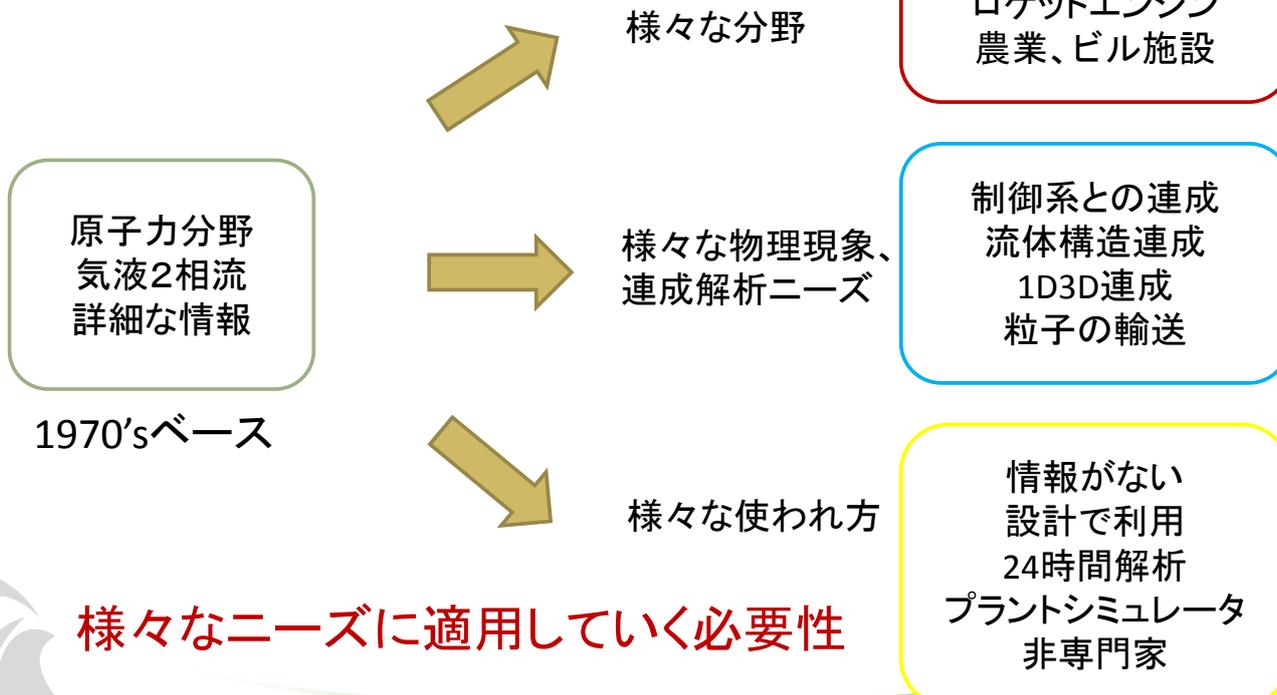
- ・1970'sから原子力分野で構築された管路系流体解析の知識をベースに開発
- ・シミュレーションとしての「管路系流体解析」
- ・専門家が使用するソフトウェア



- ・「精度」への要求の多様化
  - (1)3D解析で時間がかかるから1Dを利用したい  
⇒精度が必要、情報がある
  - (2)設計ツールでは機能が足りないので1D解析をしたい  
⇒精度は不要、情報はない
- ・「設計」や「仮の検討」で利用したい
- ・初心者も使用できるソフトウェア
- ・ロバスト性が求められている

# 1. 管路系流体解析

## 管路系流体解析の適用分野と応用テーマ



# 1. 管路系流体解析

## アドバンスソフトの管路系流体解析ソフトウェア

⇒扱う流体(液体のみ/ガス・液・超臨界の単相/気液二相)に応じて異なる基礎式や数値解法を用い、計算負荷削減や安定化

液体過渡AFN/Ω

液体の水撃などの急激な過渡現象に特化  
温度変化は考慮しない

単相過渡AFN/Γ

ガス・液・超臨界の単相の過渡解析に特化  
熱流動解析機能、多成分ガス解析機能

気液二相過渡AFN/TP

気液二相の流動過渡解析  
ドリフトフラックスモデル

NEW!!

単相定常AFN/Λ

(準定常)

ガス・液・超臨界の単相の解析  
圧力・流量は定常解析、温度は過渡解析機能を新規導入

# 1. 管路系流体解析

## 管路系流体解析ソフトウェア分類

管路系液体過渡解析ソフトウェア  
Advance/FrontNet/Ω

管路系流体過渡解析ソフトウェア  
Advance/FrontNet/Γ

管路系気液二相流過渡解析ソフトウェア  
Advance/FrontNet/TP

NEW!!

管路系流体定常解析ソフトウェア  
Advance/FrontNet/Λ

シミュレーション向き  
情報が必要  
精度○  
計算負荷△  
ロバスト性△

・どんな乱暴な使われ方をしても  
時間刻みを大きくしても  
発散しない”強さ”

設計/長時間解析向き  
計算負荷◎  
ロバスト性○

## 2. ソフトウェアの機能紹介 (AFN/Ω)

## 2. ソフト機能 (AFN/Ω:液体過渡)

### ①ソフトウェアの特長

「水撃、液柱分離」など液体の急激な現象解析をターゲット

### ②主要実績

(LNG関連主要実績)

- ・ LNG輸送システム緊急遮断弁閉鎖時の水撃解析
- ・ LNGパイプライン最適制御解析

(農業関連主要実績)

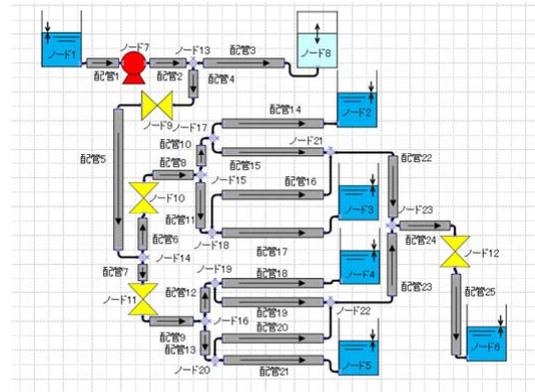
- ・ 農業用パイプラインのポンプ停止時の解析
- ・ 農業用の樹枝状パイプラインの水撃解析

(上水道関連主要実績)

- ・ 浄水場配管網ポンプトリップ時の過渡解析

(その他)

- ・ 地熱発電所のポンプトリップ時過渡解析
- ・ 冷却システムON/OFF弁過渡応答解析
- ・ ビル施設内ポンプトリップ時の過渡解析



## 2. ソフト機能 (AFN/Ω:液体過渡)

### ③機能概要

基礎方程式	質量保存式と運動量保存式	
数値解法	特性曲線法	
音速の取り扱い	配管材質から算出	
流体機器モデル	管	直管、テーパ管
	接続	分岐および合流 ベンド、エルボ
	弁	弁（制御モデルと連動も可）
	ポンプ	ポンプ
	タンク	リザーバタンク、サージタンク
物理モデル	液柱分離モデル	
	摩擦損失係数モデル(層流から乱流までを統一的に取り扱う円管に対するChurchillモデル)	
工学モデル	制御モデル（PID要素、一次遅れ要素等を実装）	
入力	配管情報及びモデルパラメータ、計算パラメータ	
出力	指定部分の圧力、流量の時系列データ 圧力の最大・最小値とその時刻	

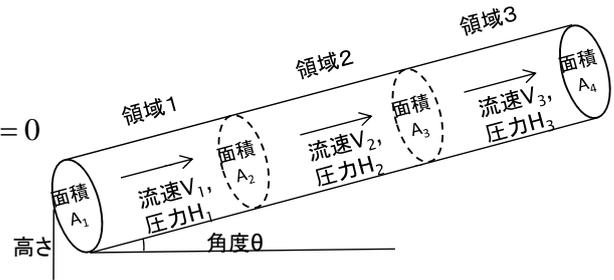
## 2. ソフト機能 (AFN/Ω:液体過渡)

### ④基礎式

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

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

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

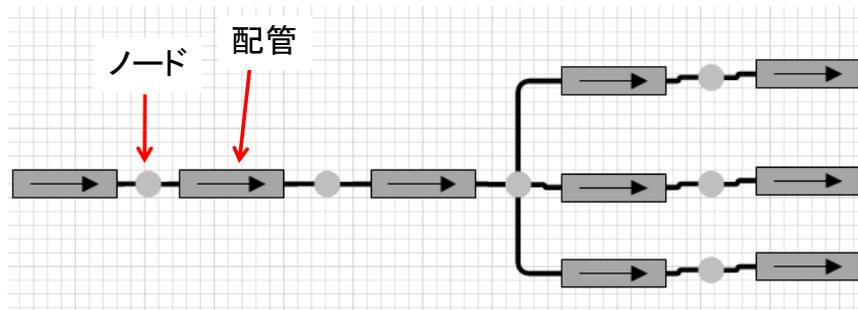
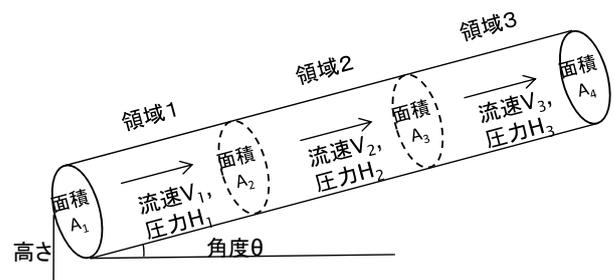
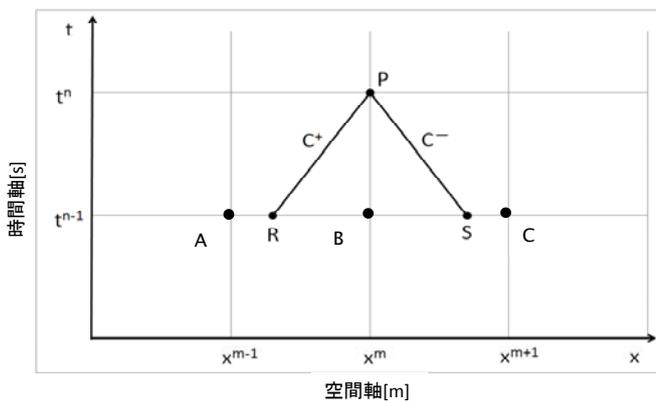


ここで、HはPiezo水頭[m]、Vは流速[m/s]、Aは流路断面積[m<sup>2</sup>]、Q=AVは体積流量[m<sup>3</sup>/s]、  
θは管勾配[rad]、gは重力加速度[m/s<sup>2</sup>]、Kは液体の体積弾性係数[Pa]、Dは管直径[m]、  
eは管壁厚さ[m]、Eは管路構造材のヤング率[Pa]、λは管摩擦係数[-]、aは音速[m/s]である。  
音速の式は、液体の圧力変化による管路構造材のたわみを考慮した式となっている。

⇒これら基礎式を「特性曲線法」という数値解法で離散化することにより、水撃などの急激な過渡現象を再現する

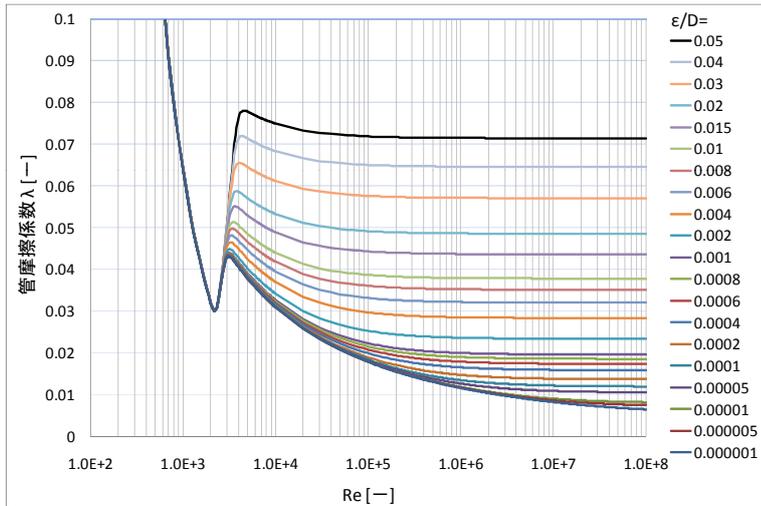
## 2. ソフト機能 (AFN/Ω:液体過渡)

### ⑤離散化、定義点

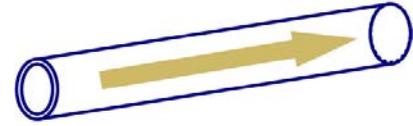


## 2. ソフト機能 (AFN/Ω:液体過渡)

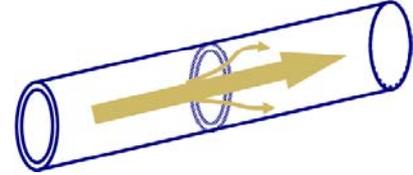
### ⑥機能詳細 (摩擦損失モデル)



1次元流



3次元流



Churchillの式による管摩擦係数

## 2. ソフト機能 (AFN/Ω:液体過渡)

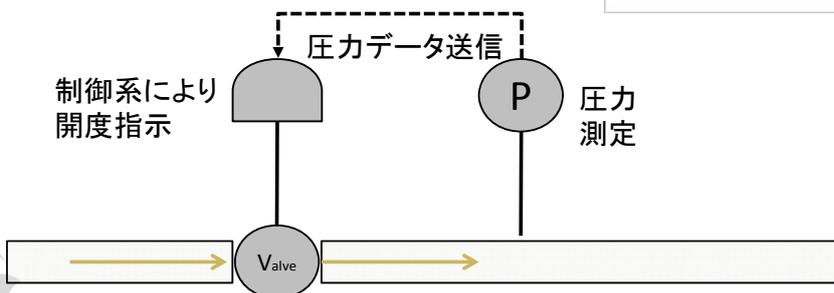
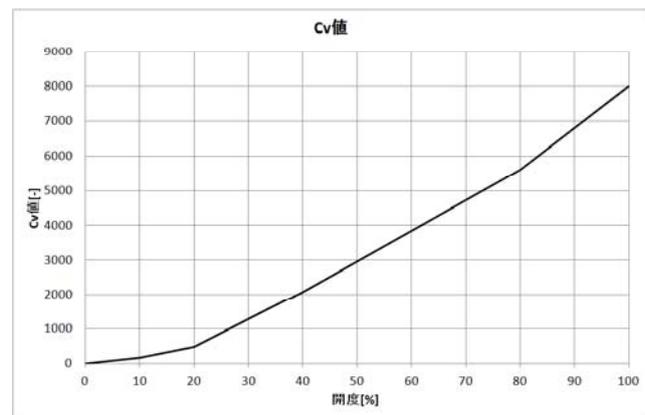
### ⑥機能詳細 (バルブと制御系モデル)

圧力損失  $\Delta P$  と抵抗係数  $K$  
$$\Delta P = K \frac{1}{2} \rho u^2$$

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

単位換算係数 
$$f_{cv} = 7.598 \times 10^{-7}$$

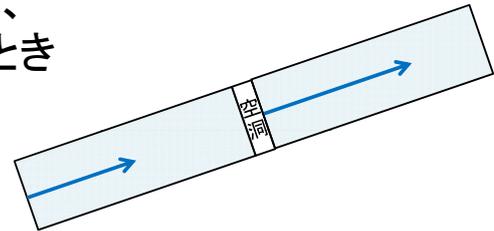
60Fにおける水の密度 
$$\rho_{H2O60F} = 999.091$$



## 2. ソフト機能 (AFN/ $\Omega$ :液体過渡)

### ⑥機能詳細 (液柱分離モデル)

・液体で満たされていた管路のある場所で、  
圧力が低下して飽和蒸気圧以下になったとき  
液体は気相へと相変化



・管路内に蒸気の空洞ができる。

・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。  
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、  
衝撃圧力が発生。(バルブ急閉、ポンプトリップ、地震時など)

⇒これらのメカニズムをモデル化し、ソフトウェアに導入している。

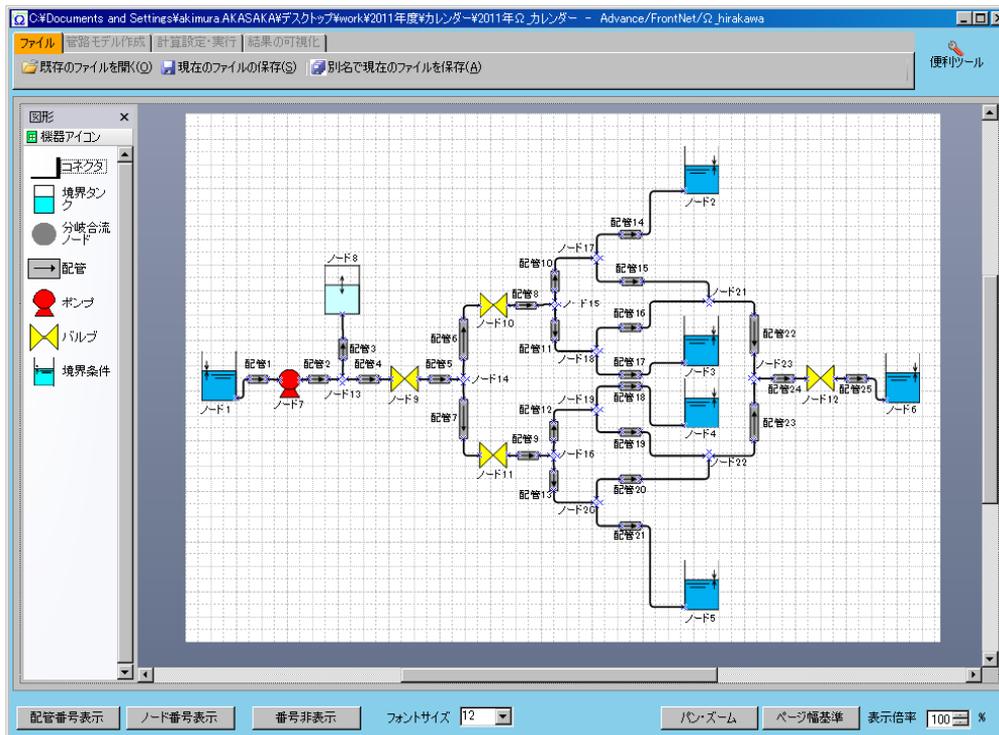
## 2. ソフト機能 (AFN/ $\Omega$ :液体過渡)

### ⑦入出力まとめ

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	1次遅れ、PID(比例ゲイン、積分時間、1次 遅れ)、測定機器の位置、測定頻度	弁の指示開度、弁の開度の遅れ。
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。

## 2. ソフト機能 (AFN/Ω:液体過渡)

### ⑧ GUI 紹介 (詳しくはデモを参照)



## 3. ソフトウェアの機能紹介 (AFN/Γ)

# 3. ソフト機能 (AFN/ $\Gamma$ :单相過渡)

①ソフトウェアの特長  
「多成分から成るガスや超臨界流体」など单相流体の熱流動過渡解析がターゲット

## ②主要実績

(都市ガス関連主要実績)

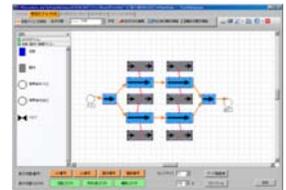
- ・都市ガス管路網地震時の供給停止に伴う圧力振動過渡解析
- ・都市ガス管路網漏洩時の過渡解析

(宇宙関連主要実績)

- ・極低温流体パイプライン予冷解析
- ・ロケットエンジンシステム設計ツールの開発
- ・液体燃料エンジンシステム冷却部配管閉塞時の過渡解析(3次元熱伝導解析・3次元構造亀裂進展解析シミュレータとの連成解析)

(原子力関連主要実績)

- ・原子炉施設火災試験解析(火災解析シミュレータ Advance/EVE SAYFA&FDSとの連成)
- ・原子炉冷却材流量分配と温度解析・原子炉除熱系の温度解析



# 3. ソフト機能 (AFN/ $\Gamma$ :单相過渡)

## ③機能概要

基礎方程式	圧縮性を考慮した、質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式、状態方程式、多成分ガス質量保存式(オプション)
格子スキーム	スタガード格子
時間発展スキーム	Euler予測子修正子
対流項のスキーム	1次精度風上差分、TVD
流体物性	・実流体物性データ(単成分单相流(液、ガス、超臨界))ファイル入力 ・理想気体(多成分ガス)
物理モデル	摩擦損失モデル、構造物熱伝導解析モデル(一次元)
入力	ネームリストに記述された機器の接続情報及びモデルパラメータ、計算パラメータ
出力	各機器、管の全物理量の時系列データ
流体機器	バルブ、オリフィス、ポンプ、タービン、テーパー管、分岐合流

### 3. ソフト機能 (AFN/Γ: 单相過渡)

#### ④ 基礎式

質量保存式	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0$	$\rho$ : 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

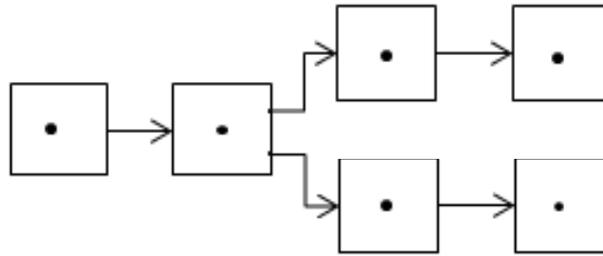
### 3. ソフト機能 (AFN/Γ: 单相過渡)

#### ④ 基礎式 (多成分ガス)

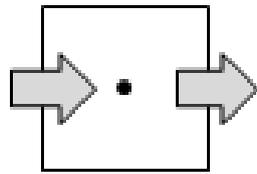
質量保存式	$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho Y_i u}{\partial x} = 0$	状態方程式 (理想気体仮定)	$p = \frac{\rho}{M} RT \bar{Z} = \rho(h - e)$
質量分率	$\sum Y_i = 1$		$h = \bar{C}_p T$
平均分子量	$\bar{M} = 1 / \sum_i \frac{Y_i}{M_i}$		$T = \frac{e}{\bar{C}_p - \frac{R}{M}}$
モル分率 (体積分率)	$X_i = \frac{Y_i}{M_i},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

### 3. ソフト機能 (AFN/ $\Gamma$ : 单相过渡)

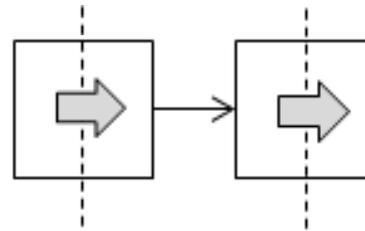
#### ⑤ 離散化、定義点



ボリューム・ジャンクションの接続



ボリューム上の質量収支



ジャンクション上の運動量収支

### 3. ソフト機能 (AFN/ $\Gamma$ : 单相过渡)

#### ⑥ 機能詳細 (実流体物性)

状態方程式として、実流体物性を使用することができる。

例えば、NIST (米国国立標準技術研究所: National Institute of Standards and Technology, USA)でウェブ公開されているデータベースなどを利用する。

(データ形式の例)

圧力[PaA]	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[Pas]	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、温度に依存した、密度、内部エネルギー...などの物性データベース

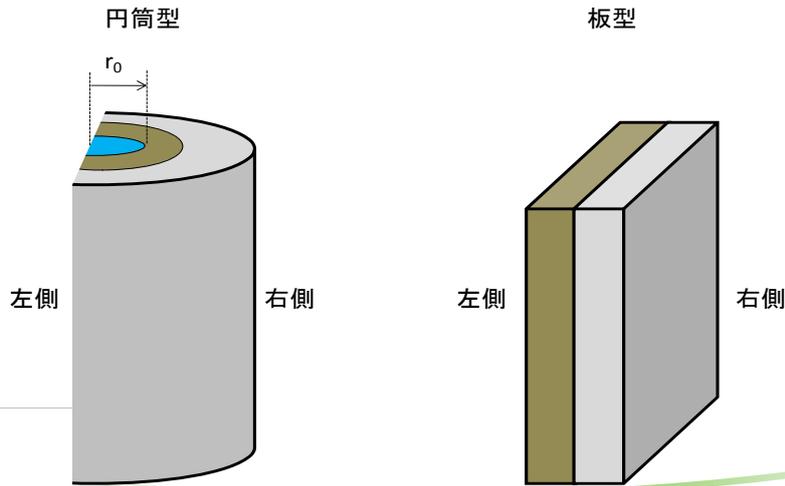
# 3. ソフト機能 (AFN/Γ: 单相过渡)

## ⑥ 機能詳細 (熱伝導)

構造物内  
熱伝導方程式 
$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{1}{r}\right)^\alpha \frac{\partial}{\partial r} \left( kr^\alpha \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q$$

$\rho$ : 固体密度       $\kappa$ : 固体熱伝導率  
 $C$ : 固体比熱       $q$ : 固体の発熱  
 $T$ : 固体温度       $r$ : 径方向の座標

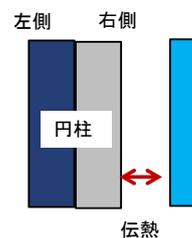
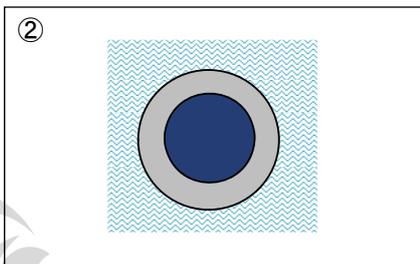
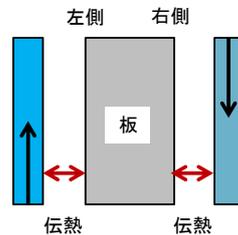
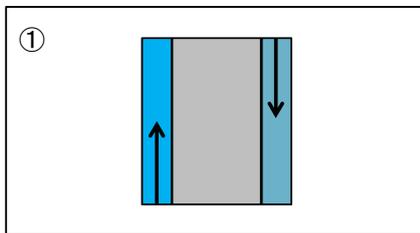
$\alpha=0$ の時、固体は平板型(デカルト座標)、 $\alpha=1$ の時固体は円筒型(円筒座標)、 $\alpha=2$ の時、固体は球面体(球座標)であることを示している。



# 3. ソフト機能 (AFN/Γ: 单相过渡)

## ⑥ 機能詳細 (熱伝達)

Dittus-Boelter式 
$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$



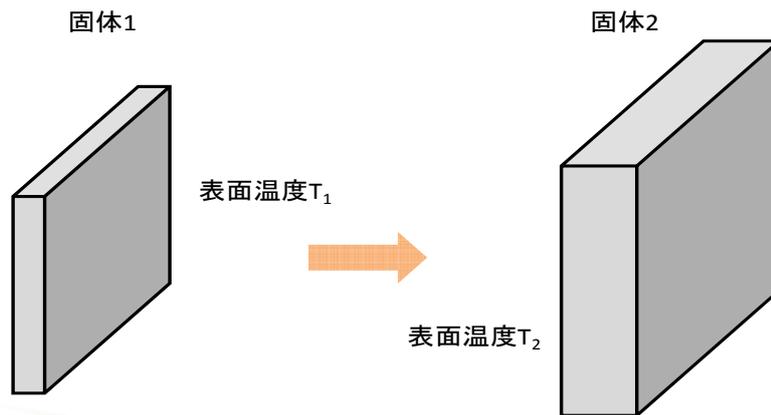
### 3. ソフト機能 (AFN/Γ: 单相过渡)

#### ⑥ 機能詳細 (輻射)

輻射熱の式

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

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



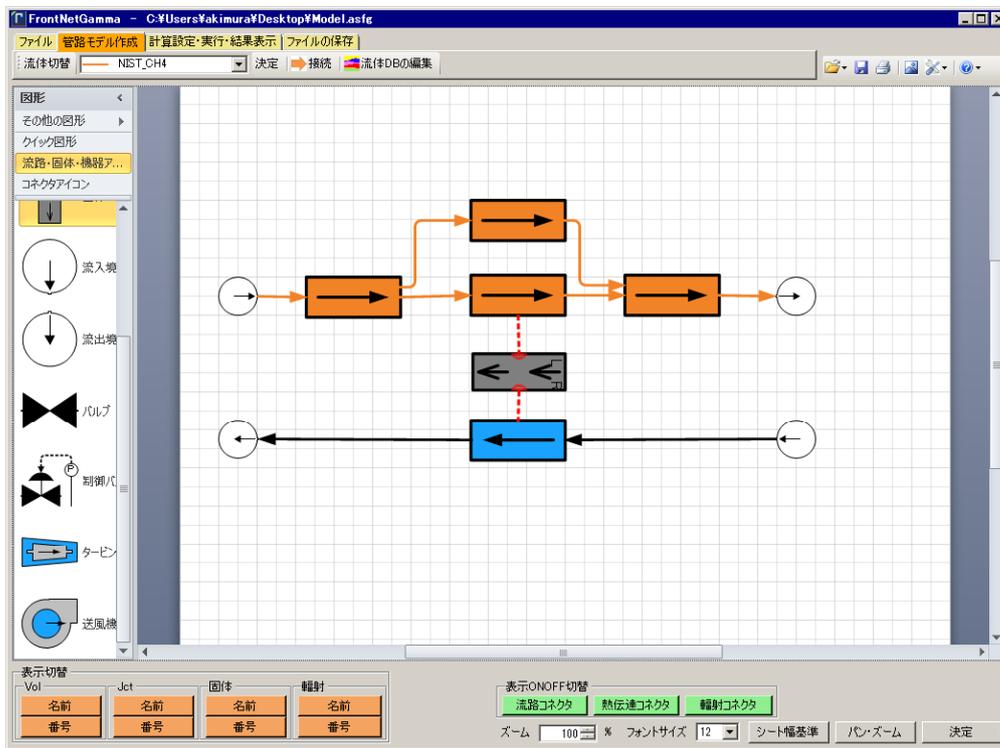
### 3. ソフト機能 (AFN/Γ: 单相过渡)

#### ⑦ 入出力まとめ

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"> <li>・管路形状境界条件</li> <li>・流体物性の指定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・圧力、温度、密度、流量の管路内分布と時系列変化</li> <li>・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</li> </ul>
② 管路系解析 多成分ガス系	<ul style="list-style-type: none"> <li>・管路形状</li> <li>・境界条件</li> <li>・多成分ガス物性の指定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①に加えて</li> <li>・多成分ガスの組成(モル分率)の管路内分布と時系列変化</li> </ul>
③ 管路系解析 + 伝熱解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>・管路系情報</li> <li>・固体形状</li> <li>・固体物性</li> <li>・固体境界条件</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・固体内温度分布と温度の時系列変化</li> <li>・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</li> <li>・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</li> </ul>

# 3. ソフト機能 (AFN/Γ: 单相过渡)

## ⑧ GUI の紹介 (詳しくはデモを参照)



# 4. ソフトウェアの機能紹介 (AFN/Λ)

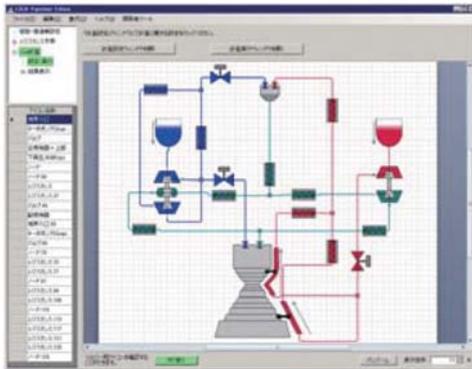
## 4. ソフト機能 (AFN/Λ: 単相定常)

### ① ソフトウェアの特長

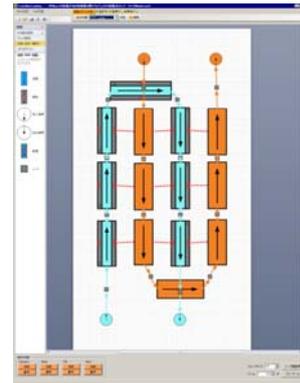
「大規模解析」や「24時間解析」などの定常解析/準定常解析をターゲット

### ② 実績

- (宇宙関連実績) ・ 液体ロケットエンジンシステムの設計検討
- (建築関連実績) ・ 建物内の温水配管の24時間温度低下評価解析



宇宙航空研究開発機構ご提供



## 4. ソフト機能 (AFN/Λ: 単相定常)

### ③ 機能概要

基礎方程式	質量保存式、流量と圧損の関係式、エネルギー保存式(時間依存か非依存かを選択)、状態方程式(実流体物性または非圧縮性を仮定した一定値の入力)
数値解法	完全陰解法、行列解法は直接法
差分スキーム	1次風上差分
格子スキーム	要素-ノード
流体物性	・実流体物性データ(単成分単相流(液、ガス、超臨界))ファイル入力
入力	ネームリストに記述された配管の接続情報及びモデルパラメータ、計算パラメータ
出力	管の全物理量の時系列データ
流体機器	配管構造物(熱交換器)

# 4. ソフト機能 (AFN/Λ: 単相定常)

## ④ 基礎方程式

質量保存式

$$\sum W_{in} - \sum W_{out} = 0$$

流量と圧損の関係式

$$W^2 = \frac{\rho \Delta P}{R}, W = \sqrt{\frac{\rho}{R} |\Delta P|^{-0.5} \Delta P}$$

エネルギー保存式

$$\frac{\partial \rho V h}{\partial t} = \sum \left( W \left( h + \frac{u^2}{2} \right) \right)_{in} - \sum \left( W \left( h + \frac{u^2}{2} \right) \right)_{out} + q$$

状態方程式

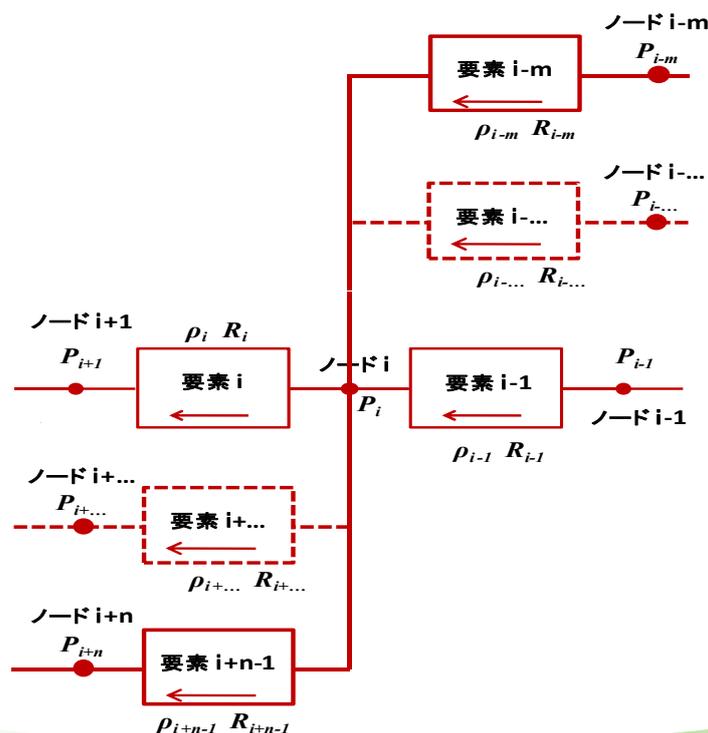
$$T = f(P, h), \rho = g(P, h) \text{ または } h = C_p T, \rho = \text{一定}$$

計算フロー

質量流量が保存するように圧力分布、流量分配を決定、  
エンタルピーが保存するようにエンタルピーを決定  
最後に圧力、エンタルピーから温度、密度を決定

# 4. ソフト機能 (AFN/Λ: 単相定常)

## ⑤ 離散化、定義点



## 4. ソフト機能 (AFN/Λ: 単相定常)

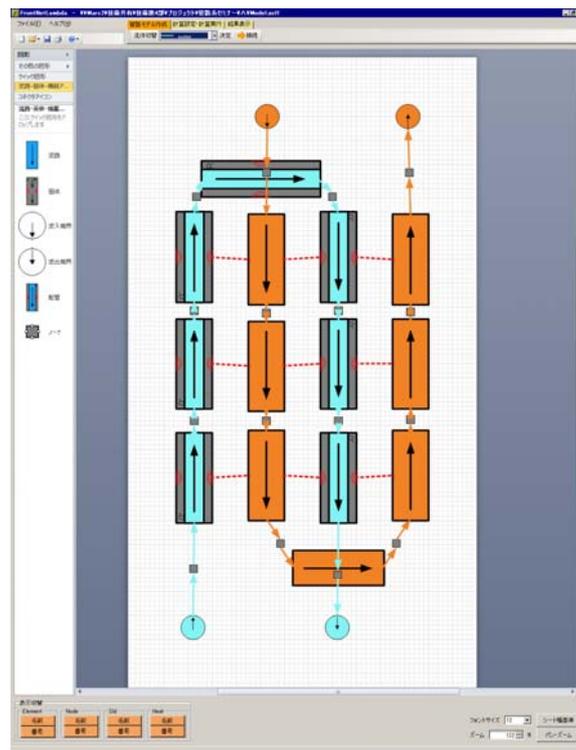
### ⑥ 入出力まとめ

モデル	入力	出力
① 管路系解析 + 伝熱解析	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 管路系情報</li><li>・ 固体形状</li><li>・ 固体物性</li><li>・ 固体境界条件</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 固体内温度分布と温度の時系列変化</li><li>・ 固体と熱をやりとりした場合の流体の圧力、温度、密度、流量の分布、温度 &amp; 密度については時間変化</li></ul>



## 4. ソフト機能 (AFN/Λ: 単相定常)

### ⑦ GUIの紹介



## 5. 今後の開発項目



## 5. 今後の開発項目

- 基本は要望のあるものから開発
- いくつかの機能は、ソルバーに導入済だがパッケージとしてリリースしていない。さらなるケーススタディや検証が必要。
- ソルバー、GUI共に自社開発のため、カスタマイズ性が高いことが特長。特定ユーザー用は充実。

⇒ ⇒ ⇒ ⇒いくつかの例を紹介



## 5. 今後の開発項目

### AFN/ $\Omega$ (液体過渡)開発項目

- ①逆流逆回転まで考慮したポンプ詳細モデル  
⇒ソルバー導入済、ケーススタディ要
- ②温度の導入  
⇒passive scalar扱いで検討中
- ③加振機能のパッケージ化、流体構造連成機能  
⇒本日紹介事例、梁のモデルなど

## 5. 今後の開発項目

### AFN/ $\Gamma$ (单相過渡)開発項目

- ①粉体、固体(すすや砂利など)の解析機能  
⇒現在passive scalar扱いでソルバーに導入済
- ②流体機器の充実  
⇒圧縮機など。
- ③計算の高速化  
⇒陰解法、半陰解法的の導入も視野。
- ④初期値算出機能  
⇒AFN/ $\Lambda$ の解を使用

## 5. 今後の開発項目

### AFN/A(单相定常)開発項目

①GUIの完成

⇒入力設定まで完成、今後は出力部分の整備

②多成分ガスの扱いの導入

③流体機器の充実

⇒特に制御弁の導入 (AFNΓの初期値として利用)



## 5. 今後の開発項目

### 管路系全体開発項目

①1D/3D連成機能

⇒ソルバーはAFNΓで実績あり。

②DBの導入 (配管材質、配管サイズ、機器etc.)

⇒特に流体物性については多成分系

③パラメータ感度解析

⇒AFN/A(单相定常)で実現可能性あり

④GUI機能充実

⇒使い勝手、簡単設定、ミス防止、可視化、リアルタイム性