

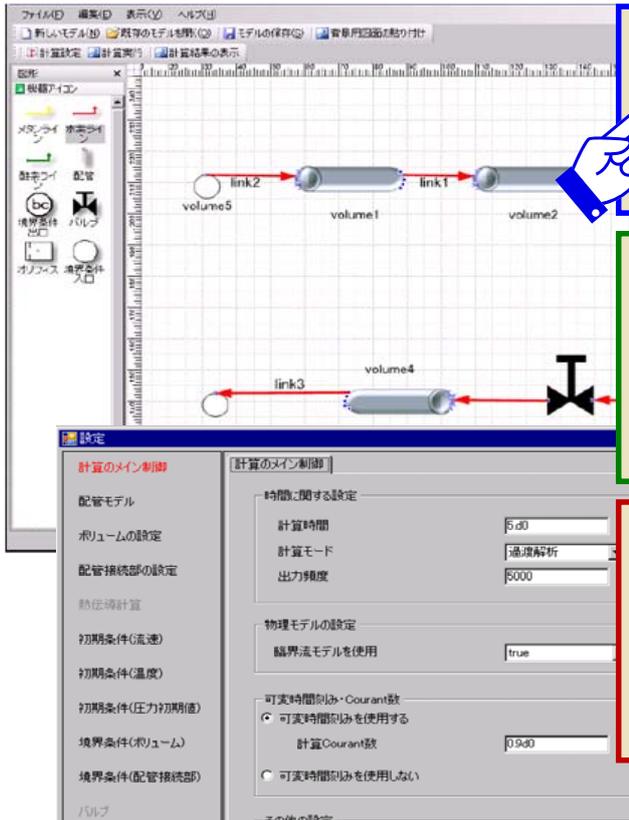
# 液体管路系流体解析ソフトウェア Advance/FrontNet/ $\Omega$ 解析事例

第3事業部 大須賀直子

プラント防災とシミュレーションセミナー  
2016年4月26日（火）  
アドバンスソフト株式会社

## アジェンダ

- 管路系流体解析ソフトウェアAdvance/FrontNet/ $\Omega$
- 水撃現象
- 水撃対策
- Advance/FrontNet/ $\Omega$ の数値計算法および計算モデル
- 解析事例紹介
  - ✓ LNGローディングラインの水撃解析
  - ✓ 発電プラントにおけるポンプトリップ解析
- まとめと今後の課題
- Advance/FrontNet/ $\Omega$ の関連実績



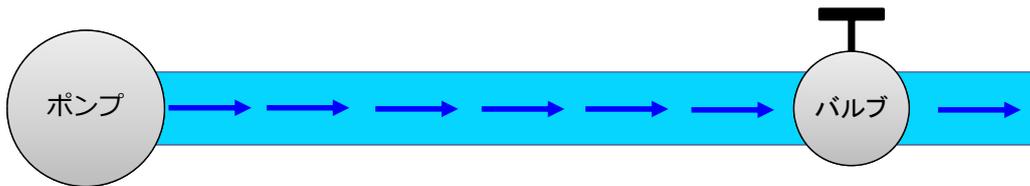
**Advance/FrontNet/ $\Omega$**   
 液体管路系非定常解析ソフトウェア  
 温度変化の小さい液体管路の一次元流体解析  
 圧カサージ、水撃、液柱分離

**Advance/FrontNet/ $\Gamma$**   
 ガス管路系非定常解析ソフトウェア  
 ガス管路の一次元流体解析  
 実在流体物性関数により液体および超臨界流体も取り扱える  
 (米国NIST提供の実在流体物性値関数を利用)

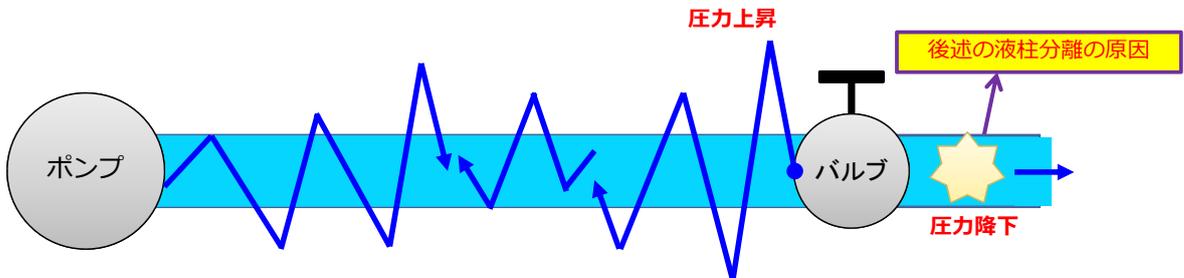
**Advance/FrontNet/ $\Lambda$**   
 管路系準定常流体解析ソフトウェア  
 運動量保存式を圧力損失関係式に単純化した定常解析  
 温度等のスカラー量は非定常解析  
 圧力・流量・温度などの1日の変動解析向け

## 水撃現象(Water Hammer)

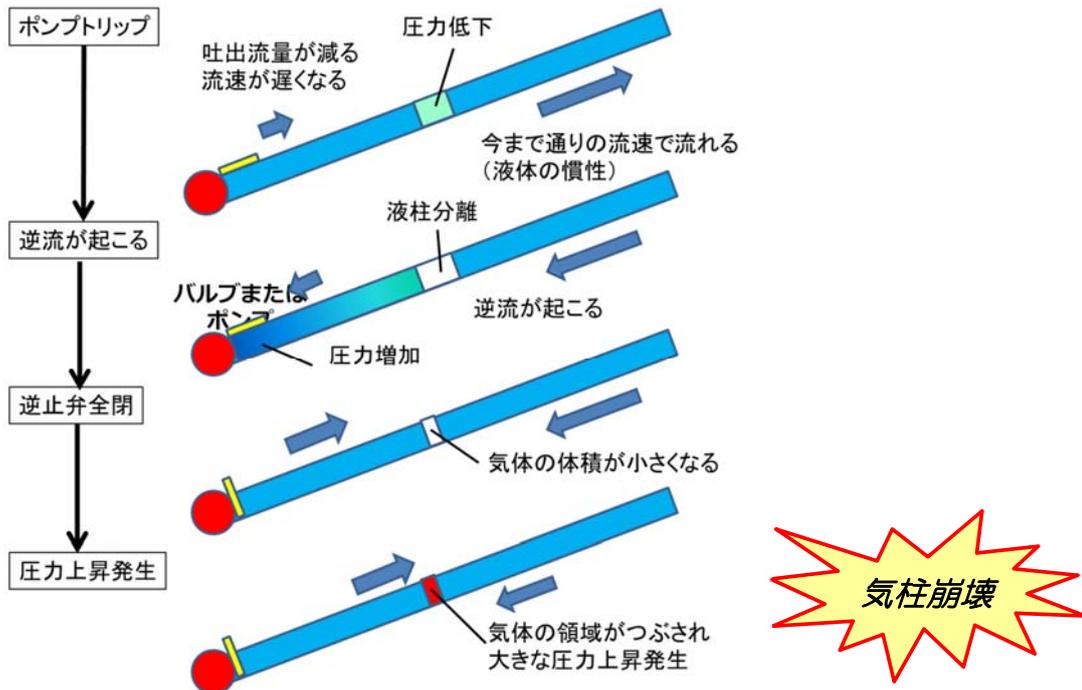
バルブが開いて一定流量が流れているとき



バルブを急閉すると流れがせき止められ水撃現象が生じる



バルブを急閉した際に、流速の急激な変化で、水の持っていた運動エネルギーが圧力変化に転換され、管内に衝撃と高水圧が発生する現象。水に限らず、液体を輸送する配管で生じる。



ポンプトリップ時などに管の一部で水の圧力が低下し、飽和蒸気圧に至ったとき、水は蒸気となる。この現象は液柱分離と呼ばれ、圧力回復によって蒸気の空洞が消滅するとき、大きな圧力上昇が起こる。

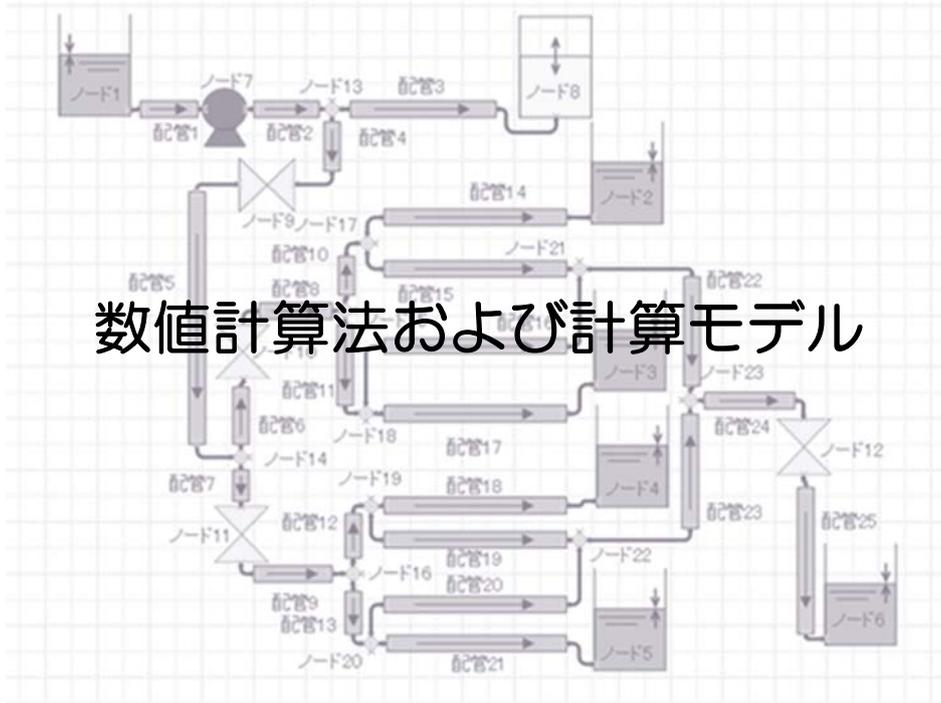
## 水撃対策

水撃現象は、管路のポンプ、配管、バルブ、継手、配管支持などの破損に繋がる。一般的には、次のような対策が取られる。

- 適切な管径の設定（流速が遅くなる）
- フライホイールの設置（流速の急変防止）
- サージタンクの設置（圧力の急変化を緩和）
- アキュムレータの設置（圧力の急変化を緩和）
- 空気弁の設置（負圧回避）

サージタンクは土地などの費用がかかる、空気弁は空気が排出されるときに圧力上昇を伴う場合がある等のデメリットがある。

液体管路系解析ソフトウェアAdvance/FrontNet/Ωでは、複雑なパイプラインの解析を対象に、バルブの急閉鎖による圧力上昇に伴った水撃現象や、減圧によって生じた気泡または気柱が崩壊した際に生じる急激な圧力上昇を伴う液柱分離現象を解析することができる。



## 数値計算法および計算モデル

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
		異径管接続、 曲がり継ぎ手(エルボ)
	弁	弁(制御モデルと連動)、オリフィス
	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(キャビテーションモデル)	
	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、その他、Hazen-Williamsモデル、入力値も使用可)	
工学モデル	制御系モデル (PID、一次遅れ、進み遅れ等の制御要素を実装)	
入力	パイプラインデータ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 すべての配管の平均流量と両端の圧力データ すべての配管の流量と圧力の最大・最小値とその時刻	

## 基礎方程式

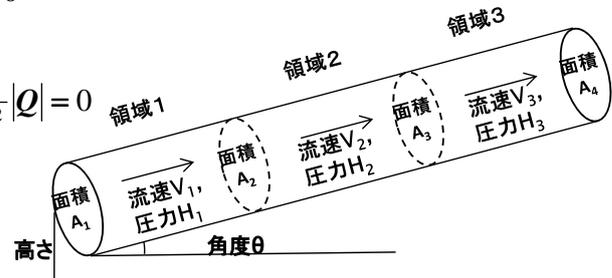
液体管路系の基礎方程式は質量保存式と運動量保存式から成り立つ。

(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)

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



$H$  : Piezo水頭[m],  $V$  : 流速[m/s],  $A$  : 流路断面積[m<sup>2</sup>],  $Q=AV$  : 体積流量[m<sup>3</sup>/s],

$\theta$  : 管勾配[rad],  $g$  : 重力加速度[m/s<sup>2</sup>],  $K$  : 液体の体積弾性係数[Pa],  $D$  : 管直径[m],

$e$  : 管壁厚さ[m],  $E$  : 管路構造材のヤング率[Pa],  $\lambda$  : 管摩擦係数[-],  $a$  : 音速[m/s].

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。

Advance/FrontNet/Ωでは、これらの質量保存式と運動量保存式を特性曲線法を用いて解く。

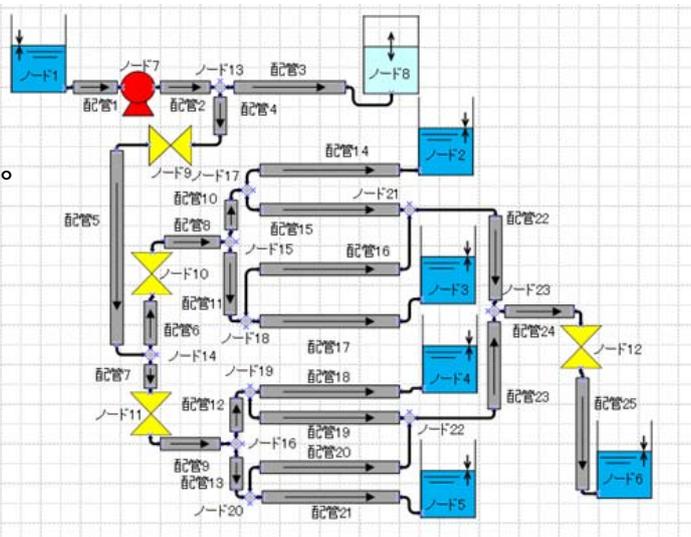
# Advance/FrontNet/Ω1.0

## FNΩの管路系構築ルール・入力仕様

特性曲線法では、圧力 $H$ と流速 $V$ が同じ位置に定義されている。

これにより、次のようなルールで管路系を構築する。

- 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、体積などが定義される。配管内部はメッシュ分割される。摩擦損失は配管で考慮される。
- ④ ノードには体積が定義されない。
- ⑤ ポンプ、弁、流体抵抗はノードに定義し、それぞれの機器の特徴を考慮する。



## 液注分離モデル

●液体圧力が飽和蒸気圧よりも小さくなった場合、体積流量収支に差が生じた場合、蒸気空洞が発生したとみなし、液柱分離が生じる。

●分離した液柱が逆流してきて、蒸気空洞が喪失したとみなされた場合、次のモデルで圧力上昇 $\Delta H$ が生じるものとみなす。

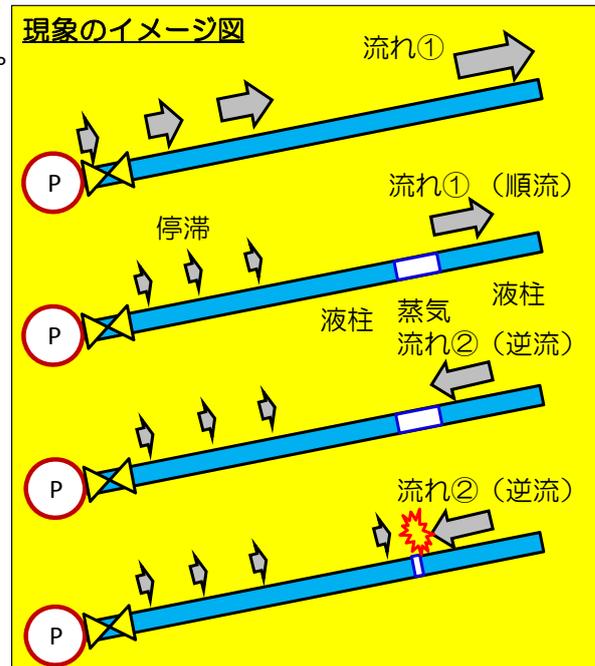
$$\Delta H = (a/2g)\Delta V \quad (\text{Joukowsky式})$$

$a$  : 音速

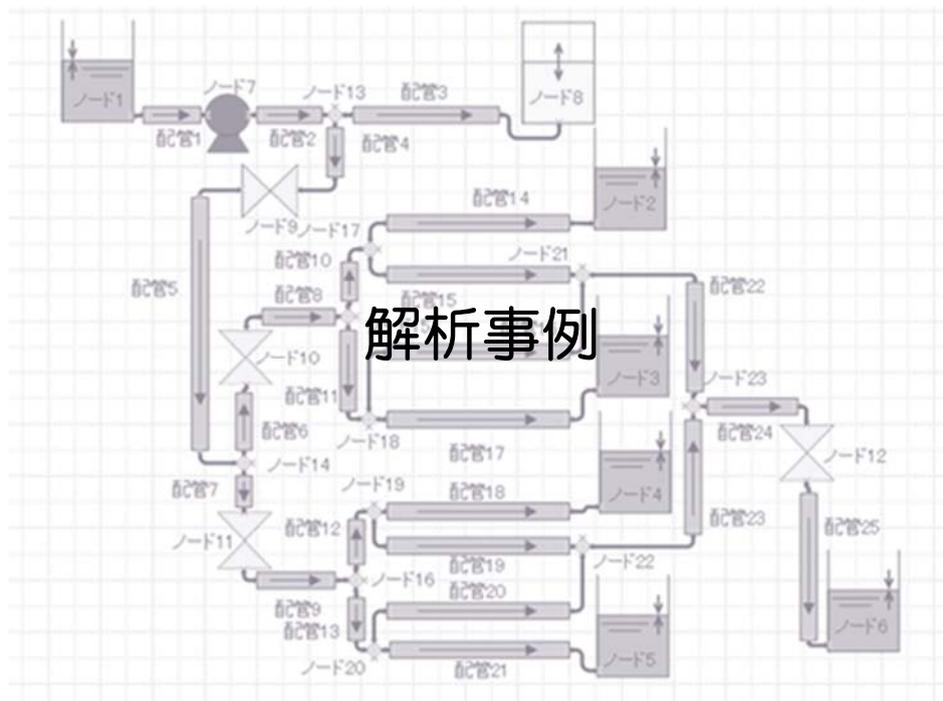
$g$  : 重力加速度

$\Delta V$  : 蒸気空洞喪失時の流速変化

●液柱分離は、ポンプトリップ時の他、バルブ急閉時のバルブ下流側や地震時などに起こる。



# Advance/FrontNet/Ω



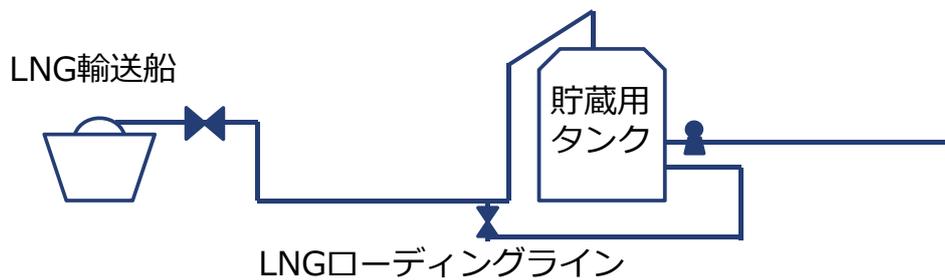
液化天然ガス（LNG）や液化石油ガス（LPG）等の液体燃料を、タンカから陸上の貯蔵用のタンクまで送る輸送ライン。



Port Lavaca - Point Comfort Calhoun County, Texas, USA

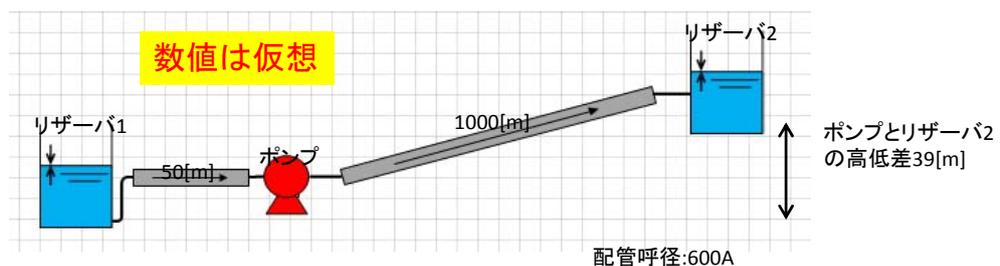


出典: http://www.tge-gas.com/



## LNGローディングラインの水撃解析

### ◆ FNΩのモデル：



### ◆ 流体物性値：都市ガス13Aとし、NIST/REFPROPを用いて、以下の値を設定。

密度[kg/m <sup>3</sup> ]	粘性係数[Pa·s]	音速[m/s]	飽和蒸気圧[Pa]
453.53	156.04e-3	1415.2	104990 (3665[PaG])

### ◆ 時間刻み幅：

クーラン数 0.9 で自動調整 (dt ≒ 5.0E-04 s)

### ◆ 計算設定：

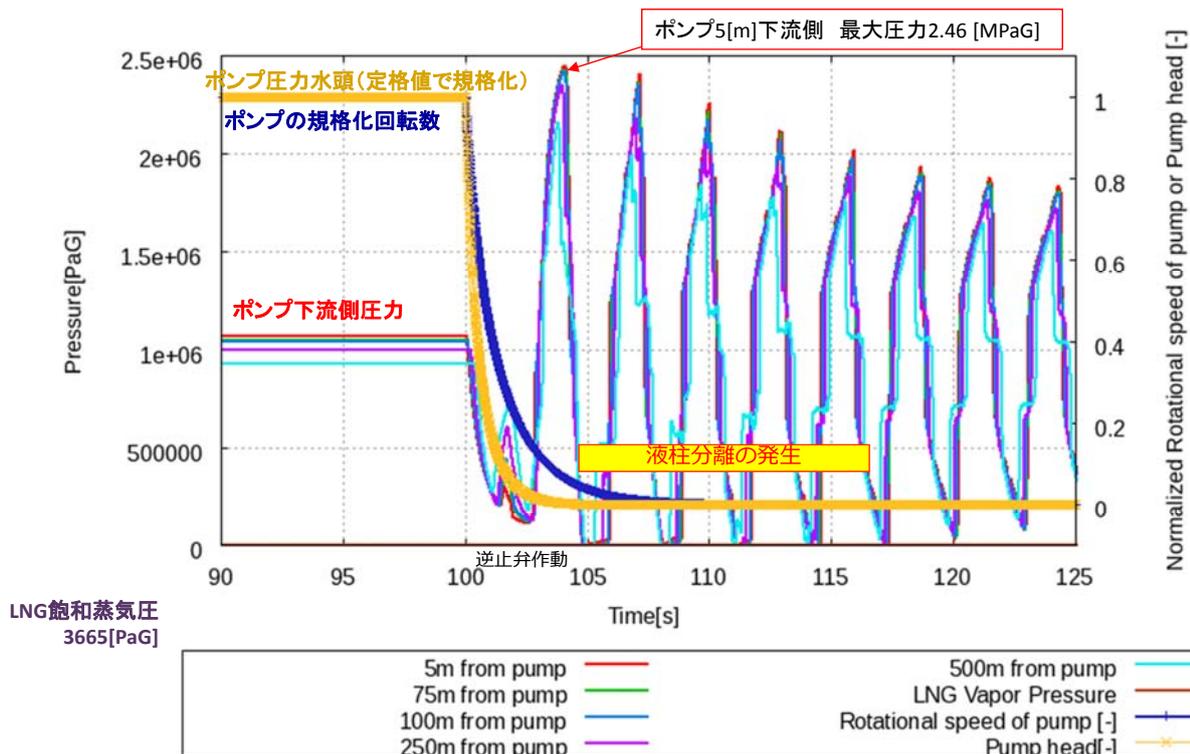
100[s]までNull Transient解析  
100[s]にポンプトリップ発生として解析を実施。  
ポンプトリップ後、1秒後に逆止弁作動。

大気圧より大きい！  
参考値：20℃水の飽和蒸気圧2339[Pa]

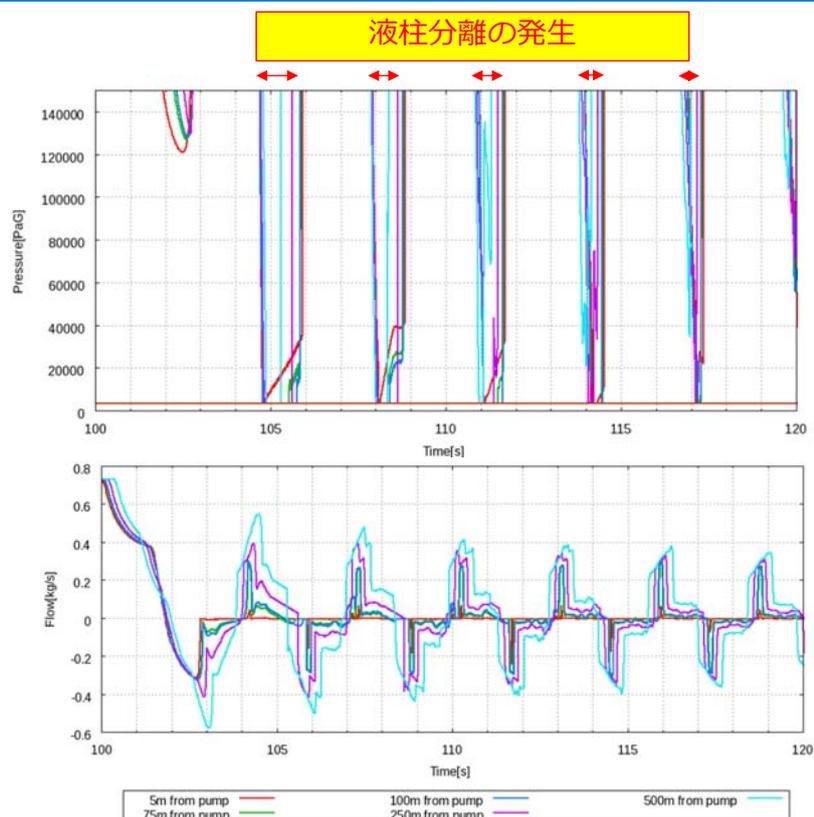
LNGは沸点が高く気化しやすい

液柱分離から気柱崩壊が生じやすい

# LNGローディングライン液柱分離 解析結果



# LNGローディングライン液柱分離 解析結果拡大図

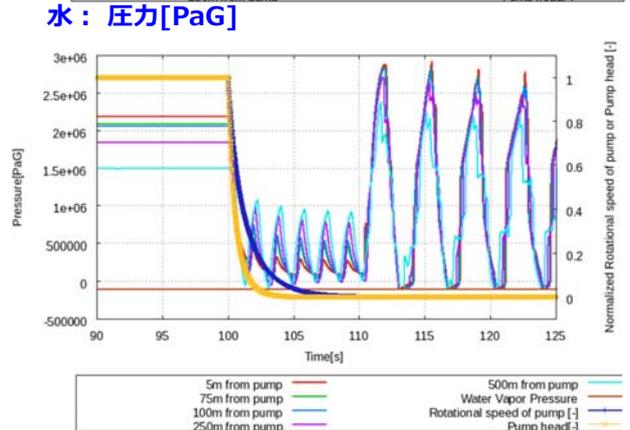
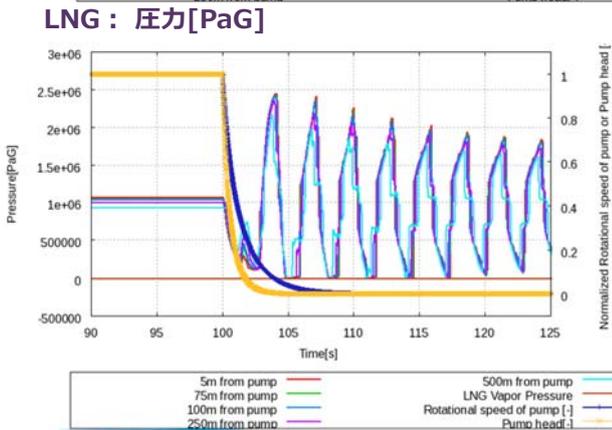
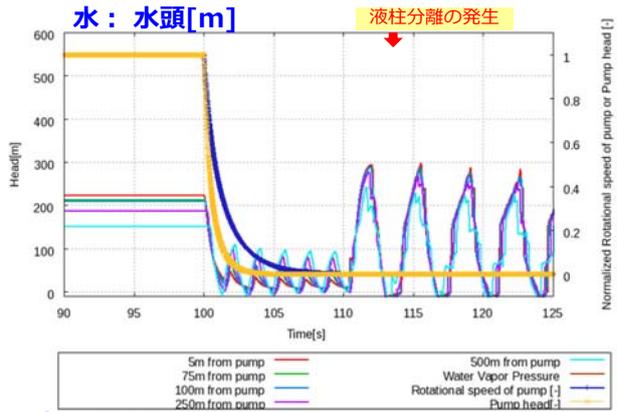
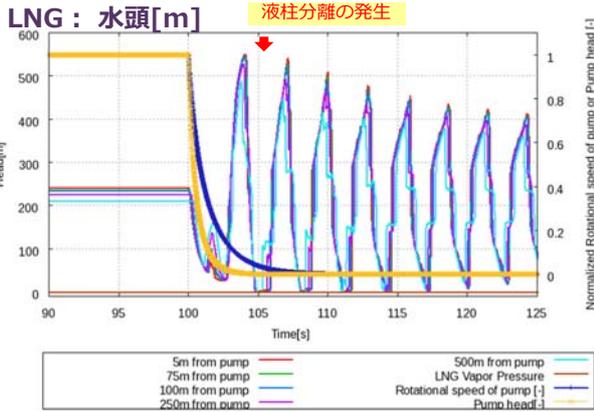


# LNGと水との比較

水の場合、物性以外の解析モデル、  
計算条件はLNGと同じ。  
<http://www.advancesoft.jp/>  
AdvanceSoft

逆止弁作動後、液柱分離が発生

ポンプの回転が止まってから、液柱分離が発生

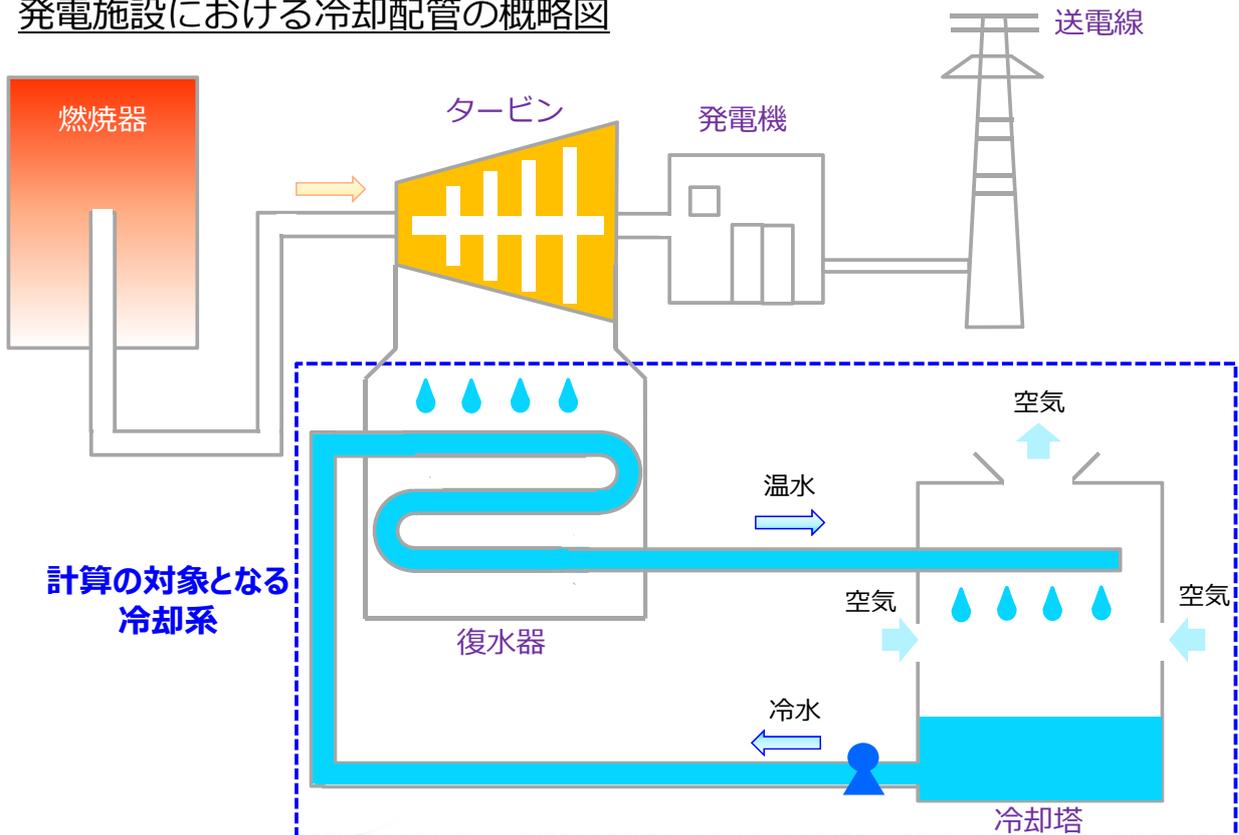


17

# 発電プラントにおけるポンプトリップ解析

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

発電施設における冷却配管の概略図



# 1次元流体解析モデル図

復水器  
(圧損のみ模擬)

冷却塔に入る

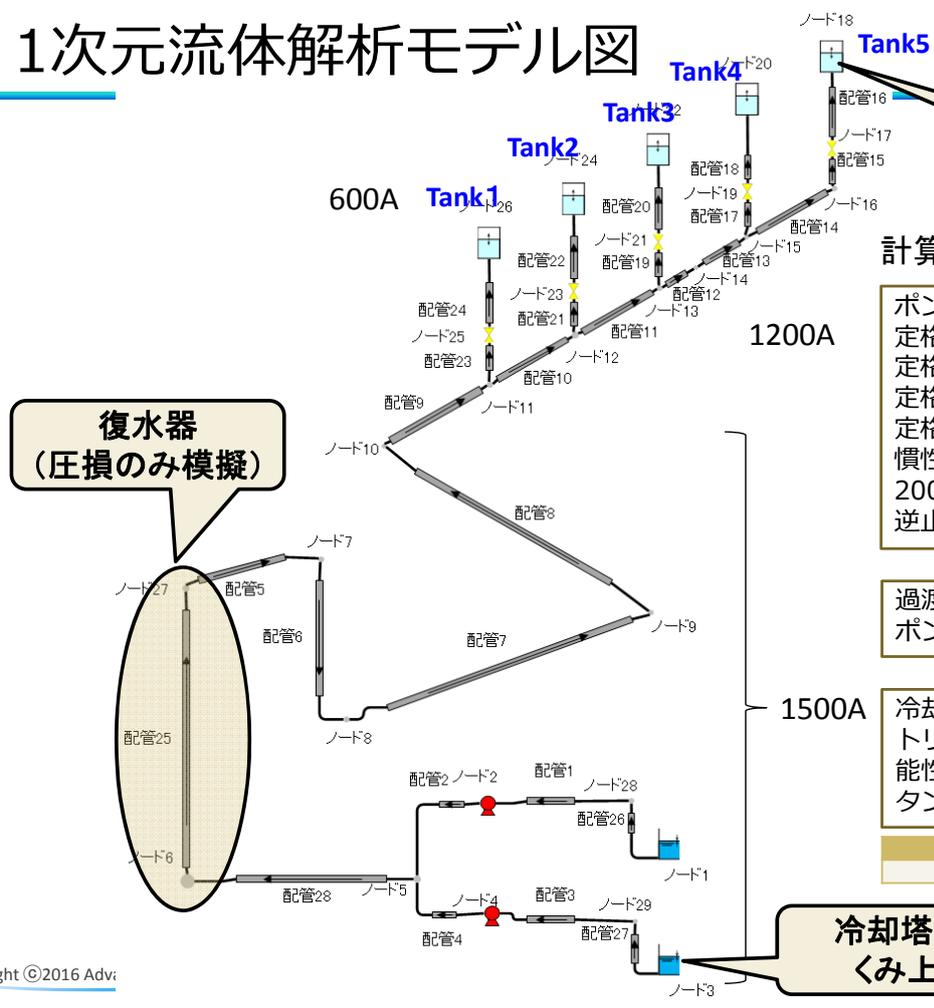
計算条件:  
 ポンプ  
 定格揚程 25m  
 定格流量 170m<sup>3</sup>/min  
 定格回転数 500rpm  
 定格効率0.8  
 慣性 (モーター+原動機)  
 2000kgm<sup>2</sup>  
 逆止弁閉速度 2秒

過渡イベント  
 ポンプ2台同時トリップ

1500A  
 冷却塔へ入る配管は  
 トリップ時に水位を持つ可  
 能性があるため  
 タンクモデルで模擬

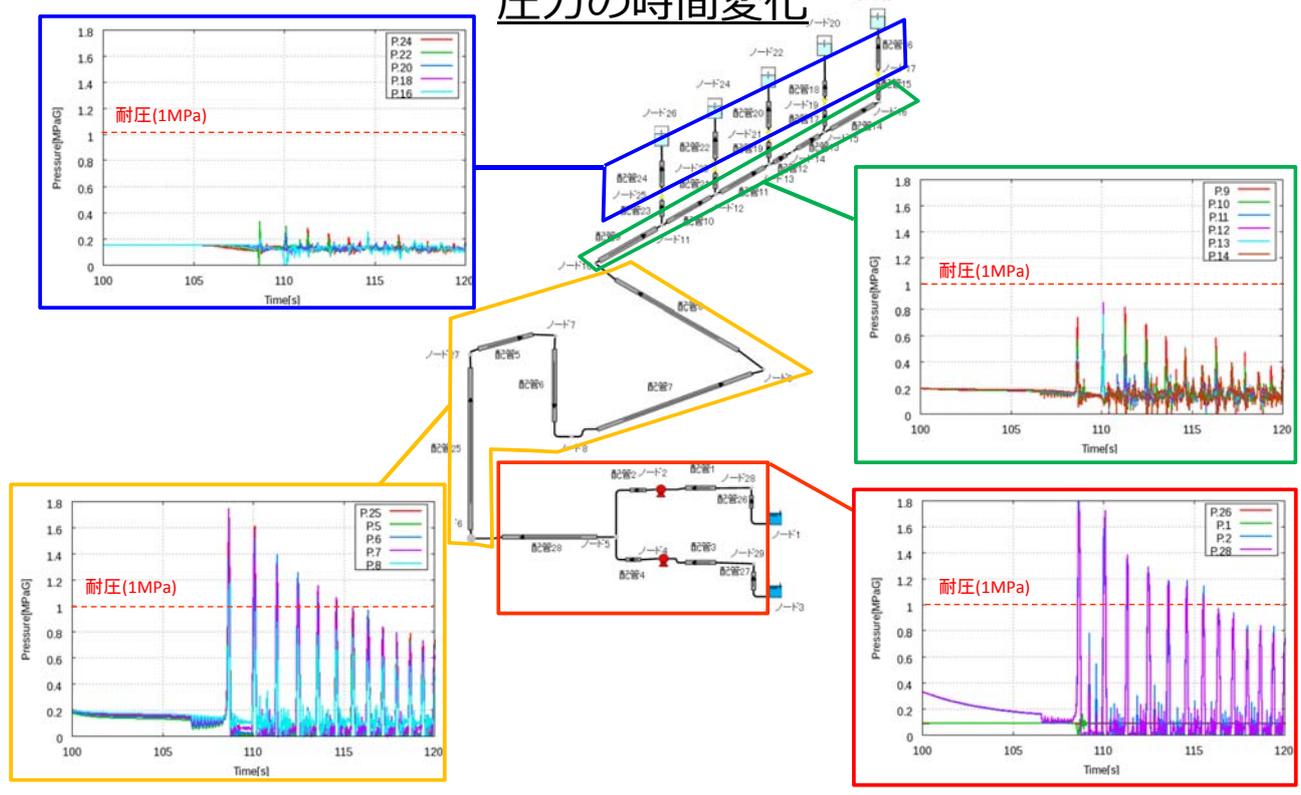
流体種類  
 水(31℃)

冷却塔から  
くみ上げ

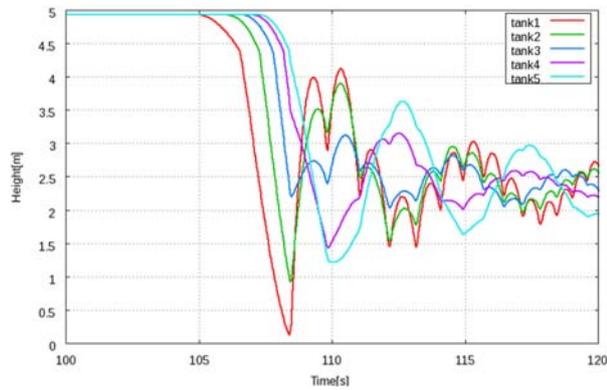


# 発電プラントポンプトリップ解析結果 (対策前)

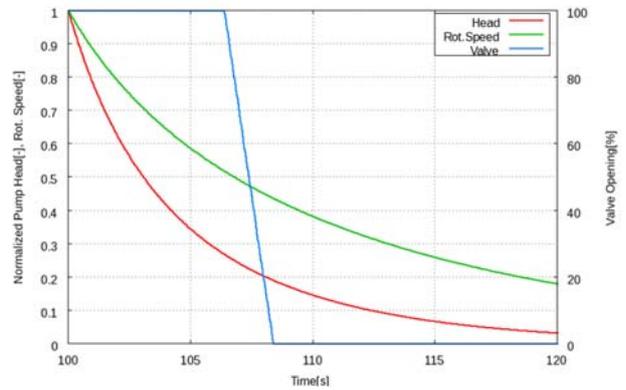
## 圧力の時間変化



## タンク水位の変化

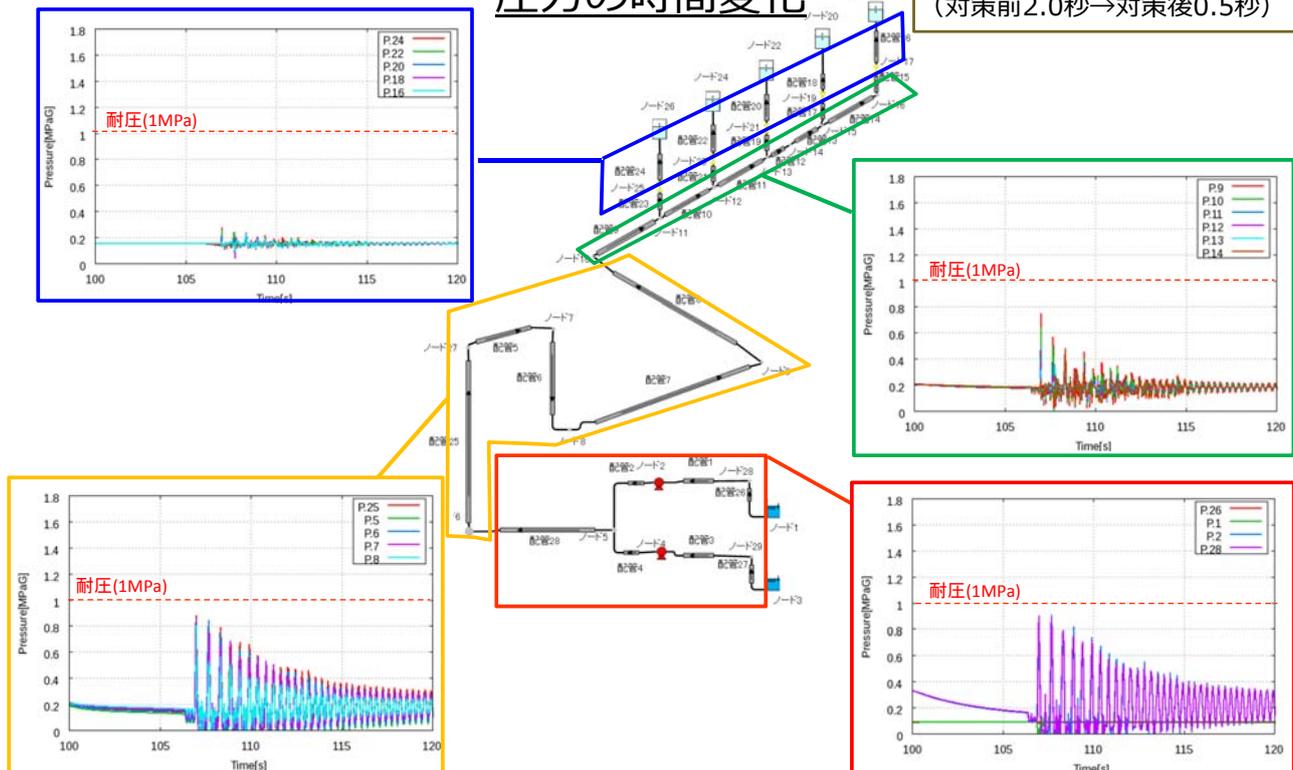


## ポンプの揚程と回転数の時間変化

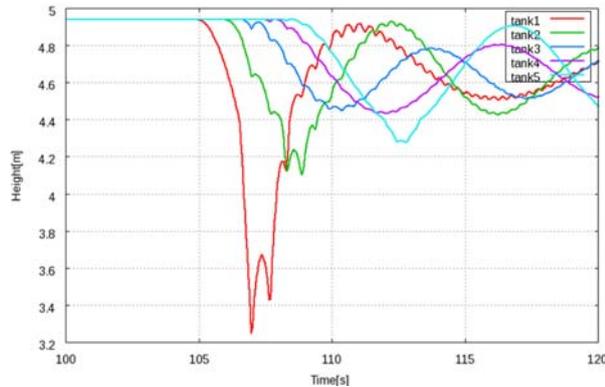


## 圧力の時間変化

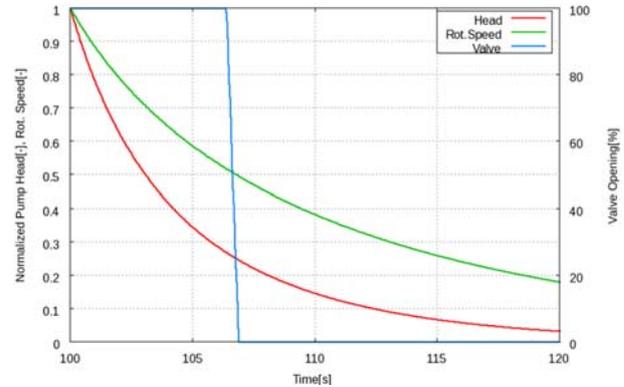
対策：閉速度が速い逆止弁の使用  
(対策前2.0秒→対策後0.5秒)



## タンク水位の変化



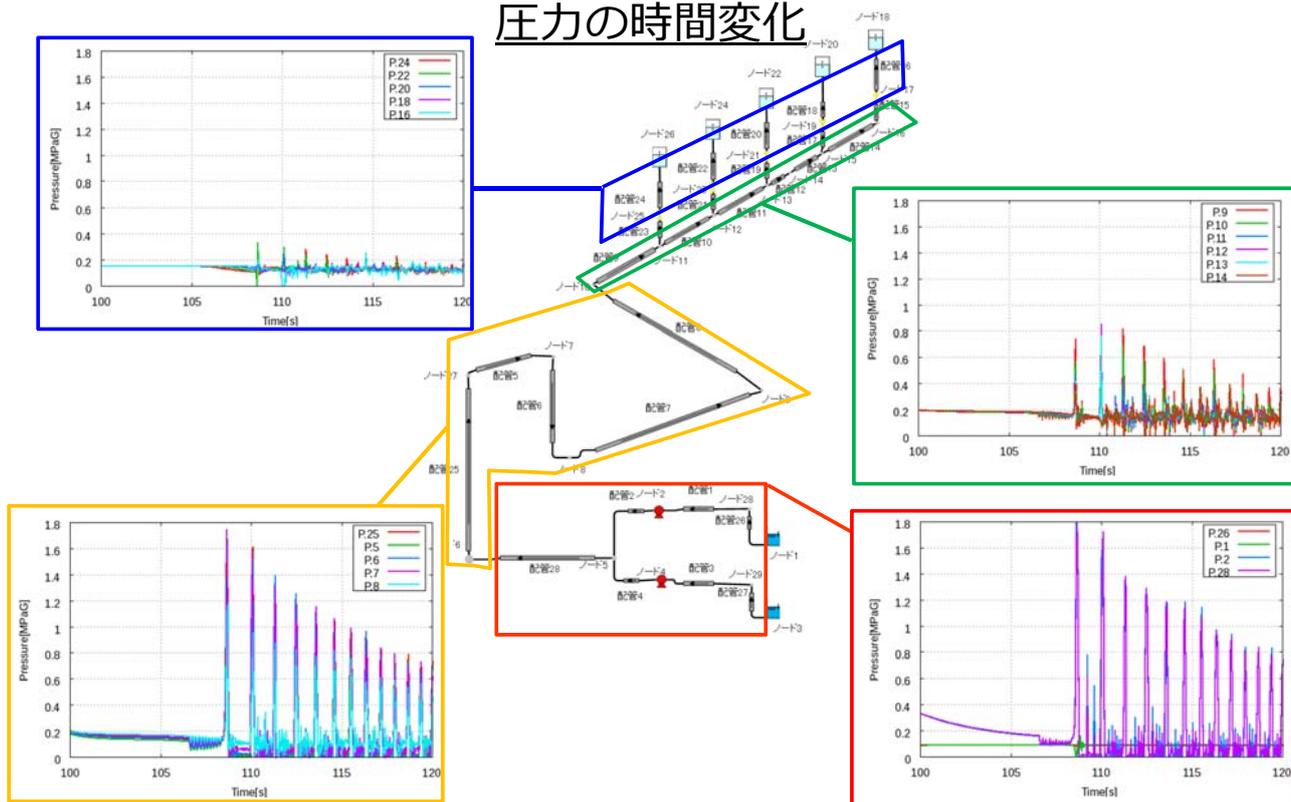
## ポンプの揚程と回転数の時間変化



## まとめと今後の課題

- まとめ
  - LNGローディングラインのポンプトリップ解析を行い、液柱分離現象について水の場合の解析との比較を行った。
  - 水とLNGの解析を比較して、LNGの方が液柱分離が生じやすく、LNGの方が圧力（水頭）上昇が大きいことが分かった。
  - 発電プラントにおけるポンプトリップ解析を行った。
  - 水撃が発生したときの配管における圧力振動、タンク水位の時間変化について検討した。
  
- 今後の課題
  - 温度変化を伴う流体の水撃解析
  - パッシブスカラー解析機能
  - 固液二相流解析機能
  - Windows版のGUIの機能充実（流体機器モデルの追加、制御系を自由に構築できる機能、etc..）

## 圧力の時間変化



## まとめと今後の課題

- まとめ
  - LNGローディングラインのポンプトリップ解析を行い、液柱分離現象について水の場合の解析との比較を行った。
  - 水とLNGの解析を比較して、LNGの方が液柱分離が生じやすく、LNGの方が圧力（水頭）上昇が大きいことが分かった。
  - 発電プラントにおけるポンプトリップ解析を行った。
  - 水撃が発生したときの配管における圧力振動、タンク水位の時間変化について検討した。
- 今後の課題
  - 温度変化を伴う流体の水撃解析
  - パッシブスカラー解析機能
  - 固液二相流解析機能
  - Windows版のGUIの機能充実（流体機器モデルの追加、制御系を自由に構築できる機能、etc..）

適用領域：等温とみなせる液体管路系非定常一次元流体解析、水撃・圧力過渡変動・液柱分離などの流体過渡現象、制御系・ポンプ・バルブなど

## 1. LNG関連実績

- ・ LNG輸送システム緊急遮断弁閉鎖時水撃解析
- ・ LNGパイプライン最適制御解析
- ・ LNGパイプラインポンプ起動解析

## 3. 農業用水関連実績

- ・ 農業用パイプラインポンプ停止時水撃解析
- ・ 農業用パイプラインバルブ閉止時間検討解析
- ・ 農業用パイプライン水槽形状検討解析
- ・ 農業用樹枝状パイプライン水撃解析

## 5. その他実績

- ・ 深海探査用情報伝送システム圧力応答解析
- ・ 大規模建築物の給排水衛生設備配管ポンプトリップ時水撃解析

## 2. 発電・エネルギー関連実績

- ・ 地熱発電所配管網ポンプトリップ時過渡解析
- ・ 地熱発電所冷却システムONOFF弁過渡応答解析
- ・ 火力発電所海水冷却系ポンプトリップ時の過渡解析
- ・ 核融合炉液体リチウムターゲット施設管路網水撃解析

## 4. 上水道関連主要実績

- ・ 浄水場配管網ポンプトリップ時過渡解析
- ・ サージタンクがある浄水場配管網過渡解析
- ・ 浄水場配管網流量制御時の流量変動解析