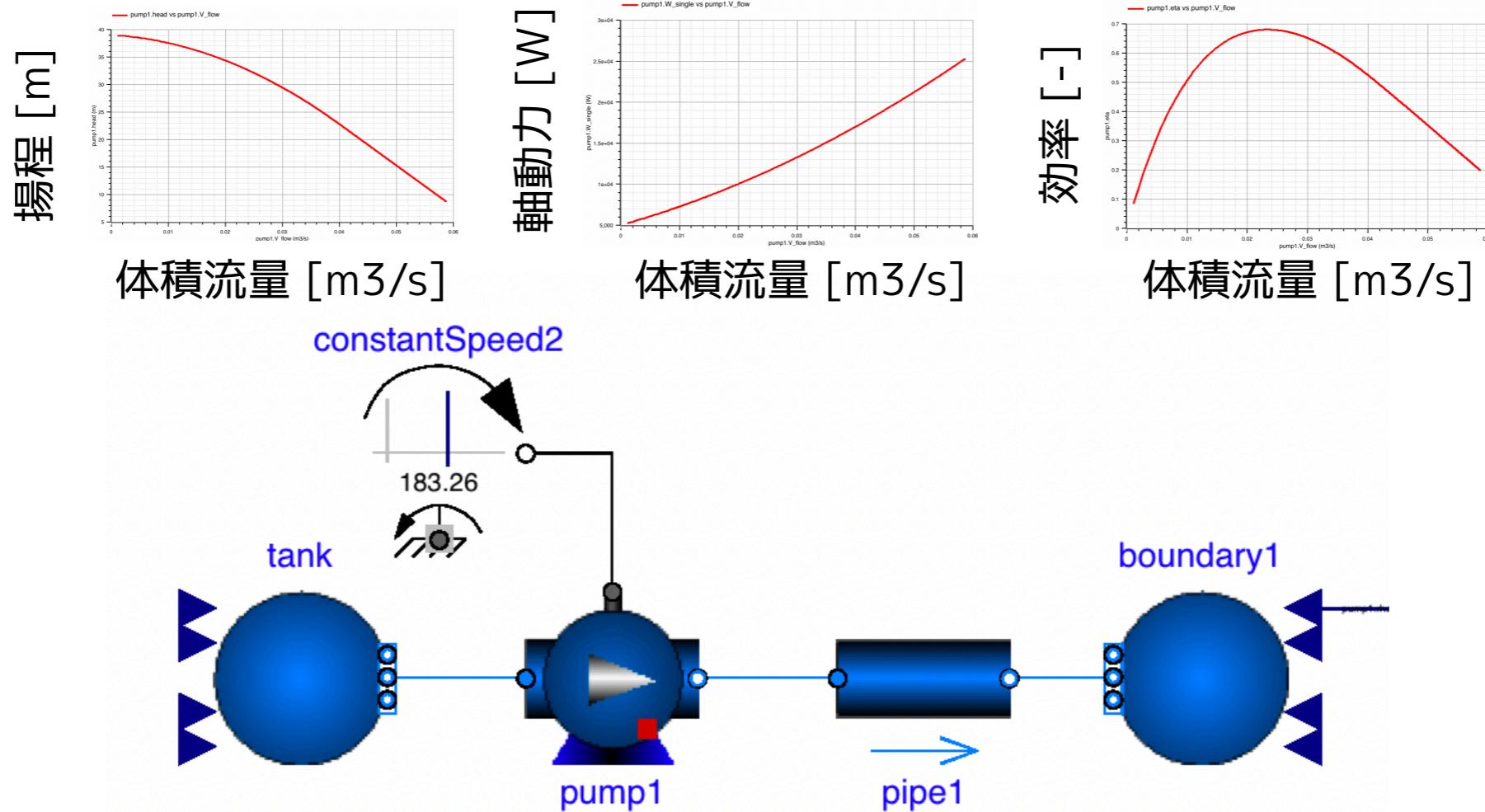


Modelica.Fluid.Machines の 遠心ポンプモデルについて



2019/05/25 第11回 Modelica ライブラリ勉強会
finback

本文書は、Modelica Standard Library の Modelica.Fluid.Machines に含まれる遠心ポンプ (centrifugal pump) のモデルについて、ソースコードなどから得られた情報をもとに調べたこと紹介するものです。このポンプモデルは、ポンプメーカーのデータシートや実験などから得られる揚程特性 (head curve) と軸動力特性 (power curve) または効率特性 (efficiency curve) を使用してポンプの動作をモデル化します。

Contents

- [遠心ポンプの基礎知識](#)
- [遠心ポンプモデルの継承関係](#)
- [PartialPump \(遠心ポンプのベースモデル\)](#)
- [PrescribedPump \(回転数規定ポンプ\)](#)
- [Pump \(軸駆動ポンプ\)](#)
- [ControlledPump \(質量流量・吐出圧力規定ポンプ\)](#)
- [まとめ](#)

Examples

- [PumpExample1 \(PrescribedPump\)](#)
- [PumpExample2 \(PrescribedPump\)](#)
- [PumpExample3 \(Pump\)](#)
- [PumpExample4 \(ControlledPump\)](#)

遠心ポンプの基礎知識

- 遠心ポンプ (Centrifugal Pump)の状態変数
- 遠心ポンプの性能曲線 (基準回転数における特性)
- 遠心ポンプの性能換算式 (回転数を変えた場合の特性)
- 遠心ポンプの並列接続
- 有効吸込ヘッド

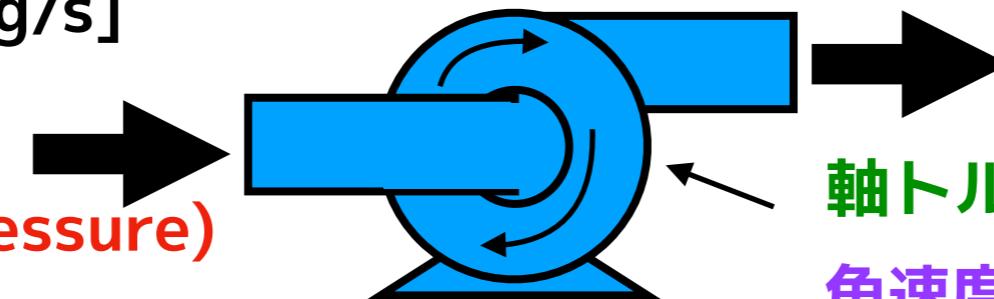
遠心ポンプ (Centrifugal pump) の状態変数

質量流量 (mass flow rate)

$$m_{flow\ single} \text{ [kg/s]}$$

吸込圧力 (suction pressure)

$$port_a.p(start = p_{a_start}) \text{ [Pa]}$$



吐出圧力 (discharge pressure)

$$port_b.p(start = p_{b_start}) \text{ [Pa]}$$

軸トルク (shaft torque) τ [Nm]

角速度 (angular velocity) ω [rad/s]

体積流量 (volumetric flow rate)

$$V_{flow\ single} = \frac{m_{flow\ single}}{\rho} \text{ [m}^3/\text{s]}$$

揚程 (head)

$$head = \frac{dp_{pump}}{\rho g} \text{ [m]}$$

昇圧量 (pressure increase)

$$dp_{pump} = port_b.p - port_a.p \text{ [Pa]}$$

消費動力 (power consumption), 軸動力 (shaft power)

$$W_{single} = \omega \tau \text{ [W]}$$

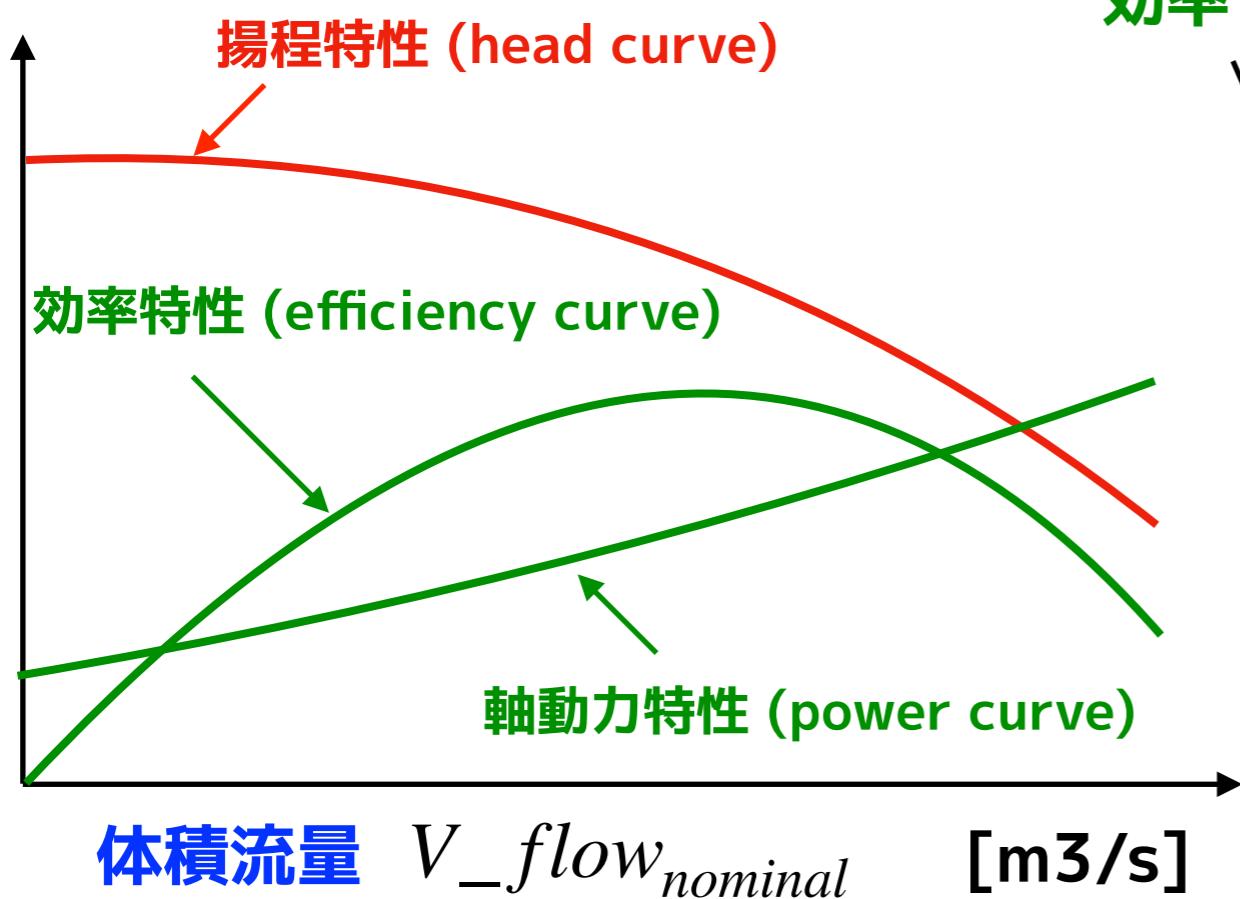
$$\rho = \text{medium}.d \text{ [kg/m}^3\text{]} \text{ 密度 (density)}$$

g [m/s²]: 重力加速度 (acceleration of gravity)

遠心ポンプの性能曲線（基準回転数における特性）

基準回転数 $N = N_{nominal}$

におけるポンプの特性



効率 (efficiency)

$$\eta = \frac{dp_{pump} \cdot V_{flow_{single}}}{W_{single}}$$

水動力 (water power),
理論動力 (theoretical power)

軸動力 (shaft power)

これらの曲線は、
メーカーから提供されるデータ
や実験から得る。

軸動力特性と効率特性はどちらかが必要

揚程特性 (head curve)

$$head_{nominal} = \text{flowCharacteristic}(V_{flow_{nominal}}) \text{ [m]}$$

軸動力特性 (power curve)

$$W_{nominal} = \text{powerCharacteristic}(V_{flow_{nominal}}) \text{ [W]}$$

効率特性 (efficiency curve)

$$\eta_{nominal} = \text{efficiencyCharacteristic}(V_{flow_{nominal}})$$

遠心ポンプの性能換算式(回転数を変えた場合の特性)

体積流量 (volumetric flow rate)

$$V_{flow\ single} = \left(\frac{N}{N_{nominal}} \right) V_{flow\ nominal}$$

回転数比

$$\left(\frac{N}{N_{nominal}} \right)$$

揚程 (head)

$$head = \left(\frac{N}{N_{nominal}} \right)^2 head_{nominal}$$

消費動力 (power consumption), 軸動力 (shaft power)

$$W_{single} = \left(\frac{N}{N_{nominal}} \right)^3 \frac{\rho}{\rho_{nominal}} W_{nominal}$$

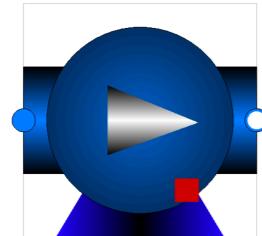
上式は、回転数が変わっても効率 η が変わらないと仮定して求められる。

$$\eta = \eta_{nominal}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\rho \cdot g \cdot head \cdot V_{flow\ single}}{W_{single}} = \frac{\rho_{nominal} \cdot g \cdot head_{nominal} \cdot V_{flow\ nominal}}{W_{nominal}}$$

$$\Leftrightarrow W_{single} = \frac{\rho}{\rho_{nominal}} \frac{head \cdot V_{flow\ single}}{head_{nominal} \cdot V_{flow\ nominal}} W_{nominal} = \frac{\rho}{\rho_{nominal}} \left(\frac{N}{N_{nominal}} \right)^3 W_{nominal}$$

遠心ポンプの並列接続



$n_{Parallel}$ 個のポンプが並列接続されている。

吸込圧力 (suction pressure)

port_a.p
→

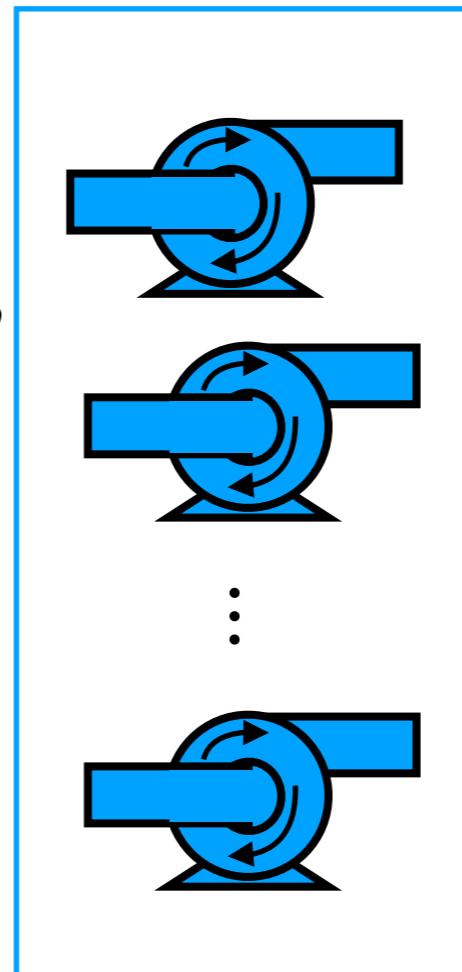
質量流量 (mass flow rate)

$$m_{flow} = \text{port_a}.m_{flow}$$

$$(start = m_{flow_{start}}) \quad [\text{kg/s}]$$

体積流量 (volumetric flow rate)

$$V_{flow} = \frac{m_{flow}}{\rho} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$



吐出圧力 (discharge pressure)

port_b.p
→

1台のポンプ

$$m_{flow_{single}} = \frac{m_{flow}}{n_{Parallel}}$$

$$V_{flow_{single}} = \frac{V_{flow}}{n_{Parallel}}$$

$$W_{single}$$

消費動力 (power consumption), 軸動力 (shaft power)

$$W_{total} = W_{single} \cdot n_{Parallel} \quad [\text{W}]$$

有効吸込ヘッドの計算方法 (available net positive suction head)

本モデルの計算式 キャビテーションが発生するか判定する指標

NPSPa = 吸込口静圧 - 吸込口飽和蒸気圧

NPDPa = 吐出口静圧 - 吐出口飽和蒸気圧

NPSHa = NPSPa / (吸込口密度 × 重力加速度)

Wikipedia <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%9C%89%E5%8A%B9%E5%90%B8%E8%BE%BC%E3%81%BF%E3%83%98%E3%83%83%E3%83%89>

有効吸込みヘッド

水や油圧など液体配管の任意の断面において、配管中の液体の圧力と、その温度での液体の蒸気圧の差を示す物理量である。

p_0 水面の圧力

p_v 液体温度 T_1 における蒸気圧

ρ 流体の密度

Δz 水面と位置1の高低差

h_L 損失水頭

$$NPSH_A = \frac{p_0 - p_v}{\rho g} + \Delta z - h_L$$

配管技術ノート, 大野光之, 工業調査会, p.87

available net positive suction head

ポンプ吸込口の全ヘッドから液の蒸気圧ヘッドを引いた利用可能な有効吸い込みヘッド

$$(NPSH)_{AVA} = \left(\frac{p_s}{\rho_s} + \frac{u_s^2}{2} - \frac{p_v}{\rho_s} \right) \cdot g^{-1}$$

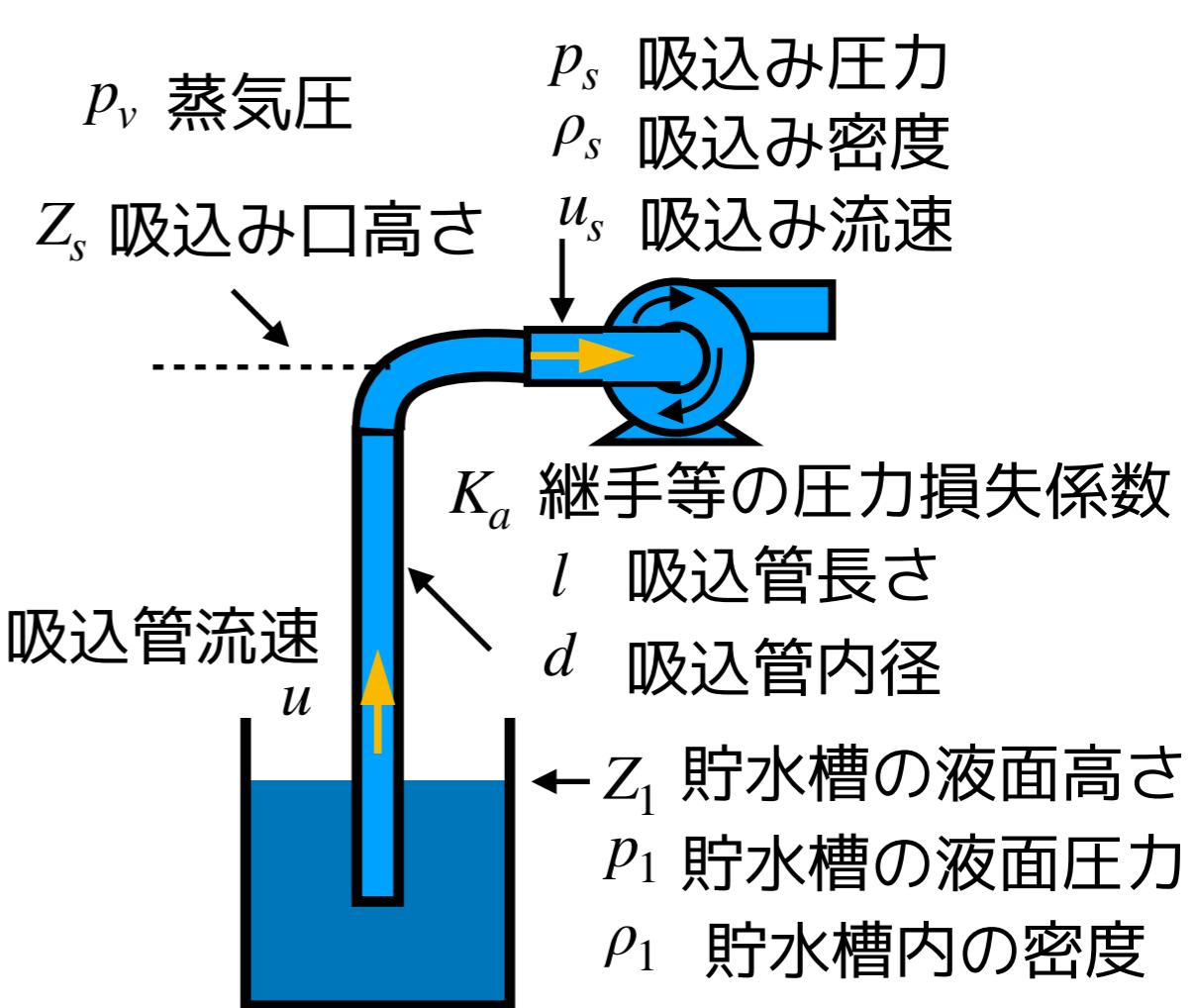
$$= (Z_1 - Z_s) + \left(\frac{p_1}{\rho_1} - \sum F - \frac{p_v}{\rho_s} \right) \cdot g^{-1}$$

エネルギー保存式

$$g \cdot Z_1 + \frac{p_1}{\rho_1} = g \cdot Z_s + \frac{p_s}{\rho_s} + \frac{u_s^2}{2} + \sum F$$

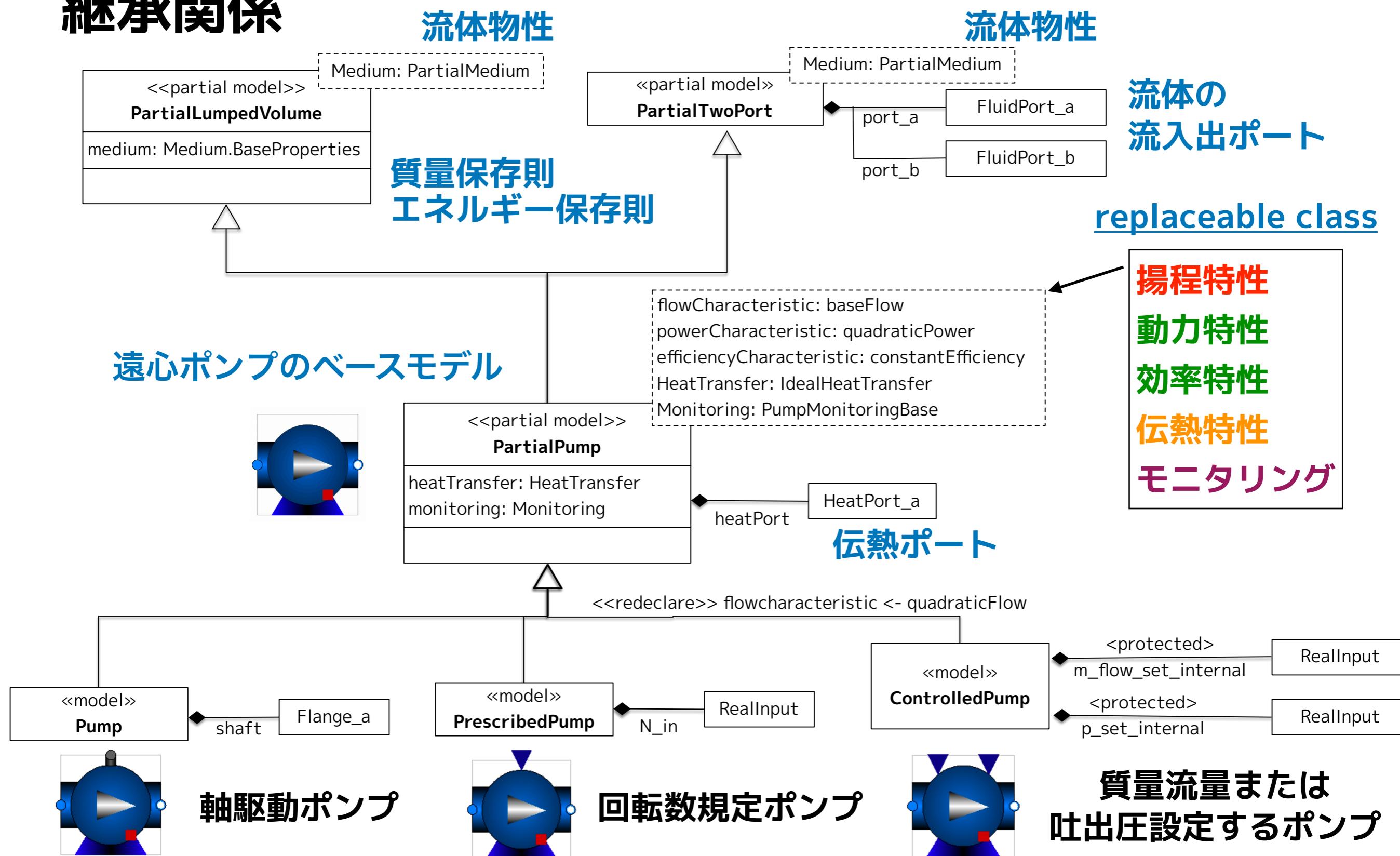
摩擦などによる損失エネルギー

$$\sum F = \left(4f \cdot \frac{l}{d} + \sum K_a \right) \cdot \frac{u^2}{2}$$



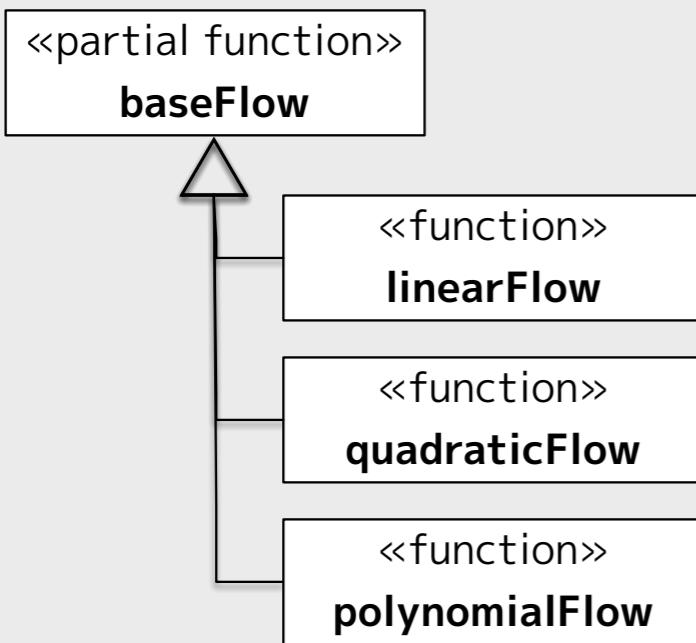
- 上記のような計算式では液面から吸込口までの経路を考慮する。
- 評価に吸込口の全圧を使うか静圧を使うかで多少定義に違いがある。

継承関係



replaceable class (1)

揚程特性 (head curve)



揚程が流量と線形

$$head_{nominal} = c_1 + V_{flow_{nominal}} \cdot c_2$$

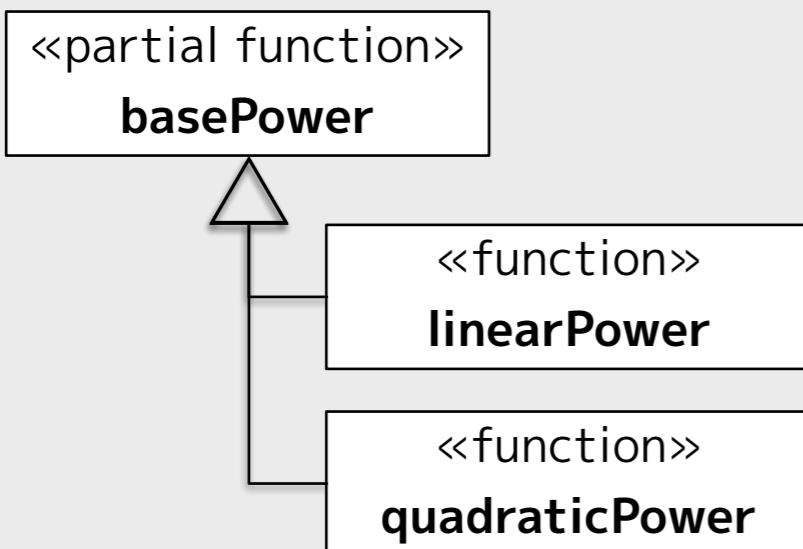
揚程が流量の2次多項式

$$head_{nominal} = c_1 + V_{flow_{nominal}} \cdot c_2 + V_{flow_{nominal}}^2 \cdot c_3$$

揚程が流量のn次多項式

$$head = \sum_{i=1}^{n+1} V_{flow}^{i-1} \cdot c_i$$

軸動力特性 (power curve)



軸動力が流量と線形

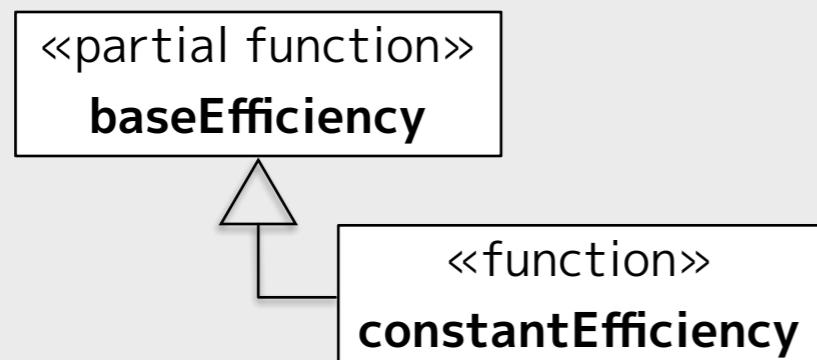
$$W_{nominal} = c_1 + V_{flow_{nominal}} \cdot c_2$$

軸動力が流量の2次多項式

$$W_{nominal} = c_1 + V_{flow_{nominal}} \cdot c_2 + V_{flow_{nominal}}^2 \cdot c_3$$

replaceable class (2)

効率特性 (efficiency curve)



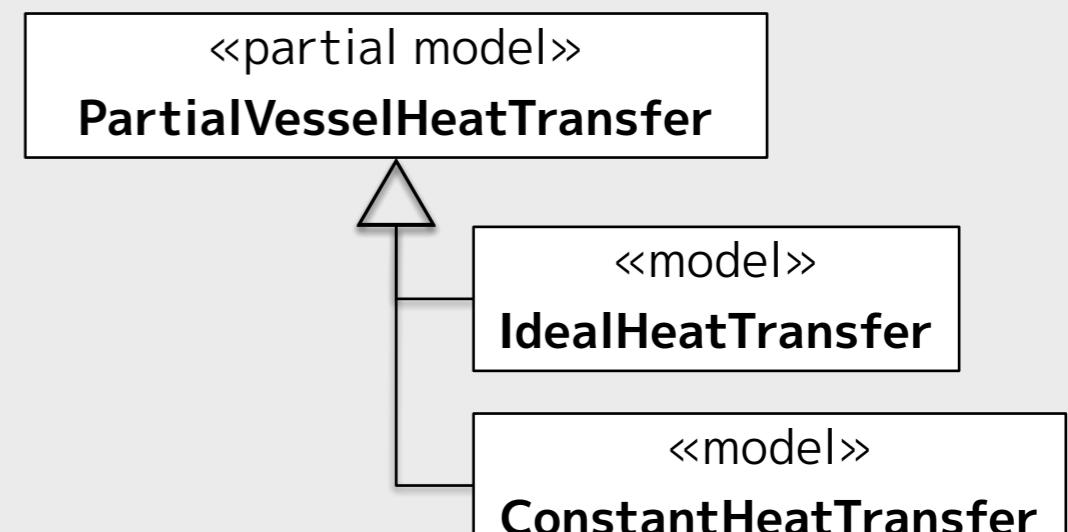
デフォルト

$$\eta = 0.8$$

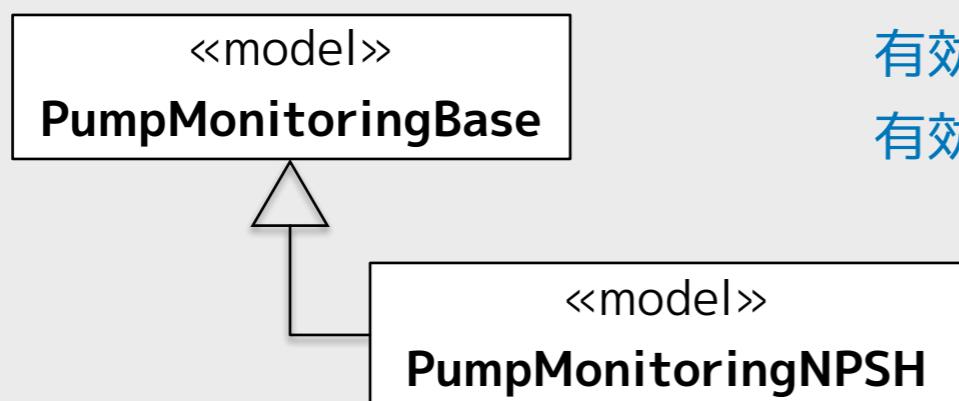
効率が定数

$$\eta = \eta_{nominal}$$

伝熱特性 (heat transfer)



ポンプモニタリング



有効吸込揚程

有効吸込圧力

有効吐出圧力

$$NPSHa$$

$$NPSPa$$

$$NPDPa$$

NPSPa

吸入口の静圧と飽和蒸気圧の差

NPDPa

吐出口の静圧と飽和蒸気圧の差

$$NPSHa = \frac{NPSPa}{\rho_{in} \cdot g}$$

assertPositiveDifference(p, p_sat) のアルゴリズム

```

algorithm
  dp := p - p_sat;
  assert(p >= p_sat, message);
end assertPositiveDifference;
  
```

静圧と蒸気圧の差

PartialPump (遠心ポンプのベースモデル)

- パラメータ (parameters)
- ホモトピー変換 (homotopy transformation)
- actual models
- simplified models
- 質量保存則 (mass balances)
- エネルギー保存則 (energy balance)

パラメータ (parameters)

パラメータ	単位	概要	デフォルト
N_nominal	rpm	基準回転数	
rho_nominal	kg/m ³	基準密度	Mediumのデフォルト
V	m ³	ポンプ内容積	0 [m ³]
nParallels	台	ポンプの並列数	1 [台]
checkValve		true: 逆止弁機能を使う	false
use_PowerCharacteristic		true: 軸動力特性を使う false: 効率特性を使う	false
use_HeatTransfer		true: 伝熱を考慮する	false
show_NPSHa		true: NPSHa を出力する (obsolete)	false

初期値パラメータ (initial values)

$$p_a_{start} = system.p_{start}$$

吸込圧力

$$p_b_{start} = p_a_{start}$$

吐出圧力

$$m_flow_{start} = system.m_flow_{start}$$

質量流量

$$V_flow_{single_init} = \frac{m_flow_{start}}{\rho_{nominal} \cdot n_{Parallel}}$$

ホモトピー変換の simplified
モデルで使用する

$$\delta_{head}_{init} = flowCharacteristic(V_flow_{single_init}) - flowCharacteristic(0)$$

ホモトピー変換 (homotopy transformation)

シミュレーションの初期化段階で非線形方程式系を繰り返し計算で解く場合に、モデルを簡単に解が得られるモデル(simplified models)から実際のモデル(actual models)まで連続的に変換する。

homotopy オペレータ

$$y = \text{homotopy}(\text{actual} = \text{actual}, \text{simplified} = \text{simplified})$$

$$\Leftrightarrow y = \text{actual} \cdot \lambda + \text{simplified} \cdot (1 - \lambda), \quad \lambda = 0 \rightarrow 1$$

体積流量、揚程、軸動力、効率の計算式は非線形方程式なのでホモトピー変換を行う。

体積流量の方程式

```
// Flow equations
V_flow = homotopy(m_flow/rho, ← actual model
                     m_flow/rho_nominal); ← simplified model
```

actual models (1)

体積流量 (volumetric flow rate)

$$V_{flow} = \frac{m_{flow}}{\rho}$$

$$V_{flow_single} = \frac{V_{flow}}{nParallel}$$

逆止弁機能の定数と曲線座標変数 s

constant unitHead = 1

constant unitMassFlowRate = 1

final constant unit_m_flow = 1

s の初期値

$$s = \frac{m_{flow_start}}{unit_m_flow}$$

揚程 (head)

逆止弁機能なし $checkValve = false$

$$head = \left(\frac{N}{N_{nominal}} \right)^2 \text{flowCharacteristic} \left(V_{flow_single} \left(\frac{N_{nominal}}{N} \right) \right), s = 0$$

逆止弁機能あり $checkValve = true$

$$head = \begin{cases} \left(\frac{N}{N_{nominal}} \right)^2 \text{flowCharacteristic} \left(V_{flow_single} \left(\frac{N_{nominal}}{N} \right) \right), & s > 0 \\ \left(\frac{N}{N_{nominal}} \right)^2 \text{flowCharacteristic}(0) - s \cdot unitHead, & s \leq 0 \end{cases}$$

$$V_{flow_single} = \begin{cases} s \cdot \frac{unitMassFlowRate}{\rho}, & s > 0 \\ 0, & s \leq 0 \end{cases} \Leftrightarrow s = \frac{\rho \cdot V_{flow_single}}{unitMassFlowRate}$$

actual models (2)

効率特性 (power curve) 消費動力 (power consumption), 軸動力 (shaft power)

軸動力特性を使う $use_powerCharacteristic = true$

$$W_{single} = \left(\frac{N}{N_{nominal}} \right)^3 \frac{\rho}{\rho_{nominal}} \text{powerCharacteristic} \left(V_{flow_{single}} \frac{N_{nominal}}{N} \right)$$

$$\eta = \frac{dp_{pump} \cdot V_{flow_{single}}}{W_{single}}$$

効率特性を使う $use_powerCharacteristic = false$

$$\eta = \text{efficiencyCharacteristic} \left(V_{flow_{single}} \left(\frac{N_{nominal}}{N} \right) \right)$$

$$W_{single} = \frac{dp_{pump} \cdot V_{flow_{single}}}{\eta}$$

simplified models

体積流量 (volumetric flow rate)

$$V_{flow} = \frac{m_{flow}}{\rho_{nominal}}$$

揚程 (head)

$$head = \frac{N}{N_{nominal}}(\text{flowCharacteristic}(0) + x), \quad x = \begin{cases} \frac{V_{flow_{single}} \cdot \text{delta_head}_{init}}{V_{flow_{single_init}}}, & \text{if } |V_{flow_{single_init}}| > 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$V_{flow_{single}} = \frac{s \cdot \text{unitMassFlowRate}}{\rho_{nominal}} \Leftrightarrow s = \frac{V_{flow_{single}}}{\rho_{nominal} \cdot \text{unitMassFlowRate}}$$

効率特性 (power curve) 消費動力 (power consumption), 軸動力 (shaft power)

軸動力特性を使う

$$W_{single} = \frac{N}{N_{nominal}} \frac{V_{flow_{single}}}{V_{flow_{single_init}}} \text{powerCharacteristic}(V_{flow_{single_init}})$$

効率特性を使う

$$\eta = \text{efficiencyCharacteristic}(V_{flow_{string_init}}), \quad W_{single} = \frac{dp_{pump} \cdot V_{flow_{single_init}}}{\eta}$$

質量保存則 (mass balances)

PartialLumpedVolume

$$\frac{dm}{dt} = mb_flow$$

全質量

$$\frac{dmXi}{dt} = mbXi_flow$$

成分物質

$$\frac{dmC_{scaled}}{dt} = \frac{mbC_flow}{C_{nominal}}$$

附加的物質
(微小粒子など)

- 定常解析（デフォルト）の場合は左辺がゼロ
- 非定常解析にする場合は massDynamics を変更して、 $V > 0$ とする。

[3. Modelica.Fluidライブラリ](#),
FluidExample2 volume モデル参照

<https://www.amane.to/wp-content/uploads/2018/12/ffe08c971d7476d067b0f2910be6dd63.pdf>

PartialPump 移流項と FluidPort を接続する。

$$mb_flow = port_a.m_flow + port_b.m_flow$$

全質量

$$mbXi_flow = port_a.m_flow \cdot \text{actualStream}(port_a.Xi_outflow) + port_b.m_flow \cdot \text{actualStream}(port_b.Xi_outflow)$$

成分物質

$$port_a.Xi_outflow = medium.Xi$$

$$port_b.Xi_outflow = medium.Xi$$

$$mbC_flow = port_a.m_flow \cdot \text{actualStream}(port_a.C_outflow) + port_b.m_flow \cdot \text{actualStream}(port_b.C_outflow)$$

附加的物質

$$port_a.C_outflow = C$$

$$port_b.C_outflow = C$$

エネルギー保存則 (energy balance)

PartialLumpedVolume

$$\frac{dU}{dt} = Hb_flow + Qb_flow + Wb_flow$$

PartialPump

仕事によるエネルギー変化

$$Wb_flow = W_{total} \quad \text{軸動力 (shaft power)}$$

heatPort からの伝熱

$$Qb_flow = heatTransfer.Qflows[1]$$

FluidPort からのエンタルピ移流

$$Hb_flow = port_a.m_flow \cdot \text{actualStream}(port_a.h_outflow) \\ + port_b.m_flow \cdot \text{actualStream}(port_b.h_outflow)$$

$$port_a.h_outflow = medium.h \\ port_b.h_outflow = medium.h$$

- 定常解析（デフォルト）の場合は左辺がゼロ
- 非定常解析にする場合は energyDynamics を変更して、 $V > 0$ とする。

[3. Modelica.Fluidライブラリ](#),
FluidExample2 volume モデル参照

<https://www.amane.to/wp-content/uploads/2018/12/ffe08c971d7476d067b0f2910be6dd63.pdf>

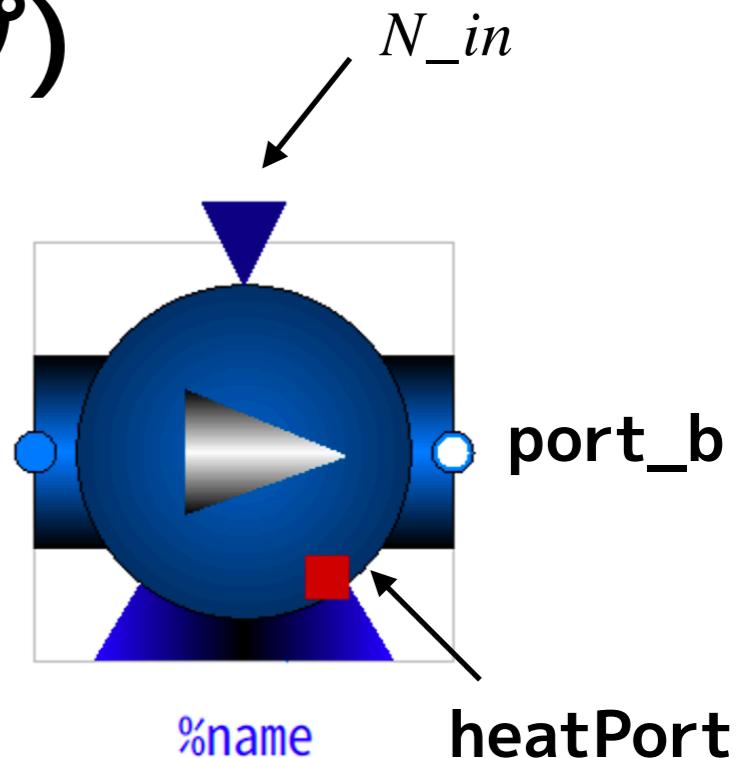
PrescribedPump (回転数規定ポンプ)

回転数を規定するポンプ

パラメータ

`use_N_in = true` 入力コネクタ `N_in` を使う
`connect(N_in, N_in_internal)`

`use_N_in = true` パラメータ `N_const` を使う
`N_ni_internal = N_const`



ポンプの回転数 N [rpm]は、内部的には `protected` 宣言されたコネクタ `N_in_internal` で決定される。

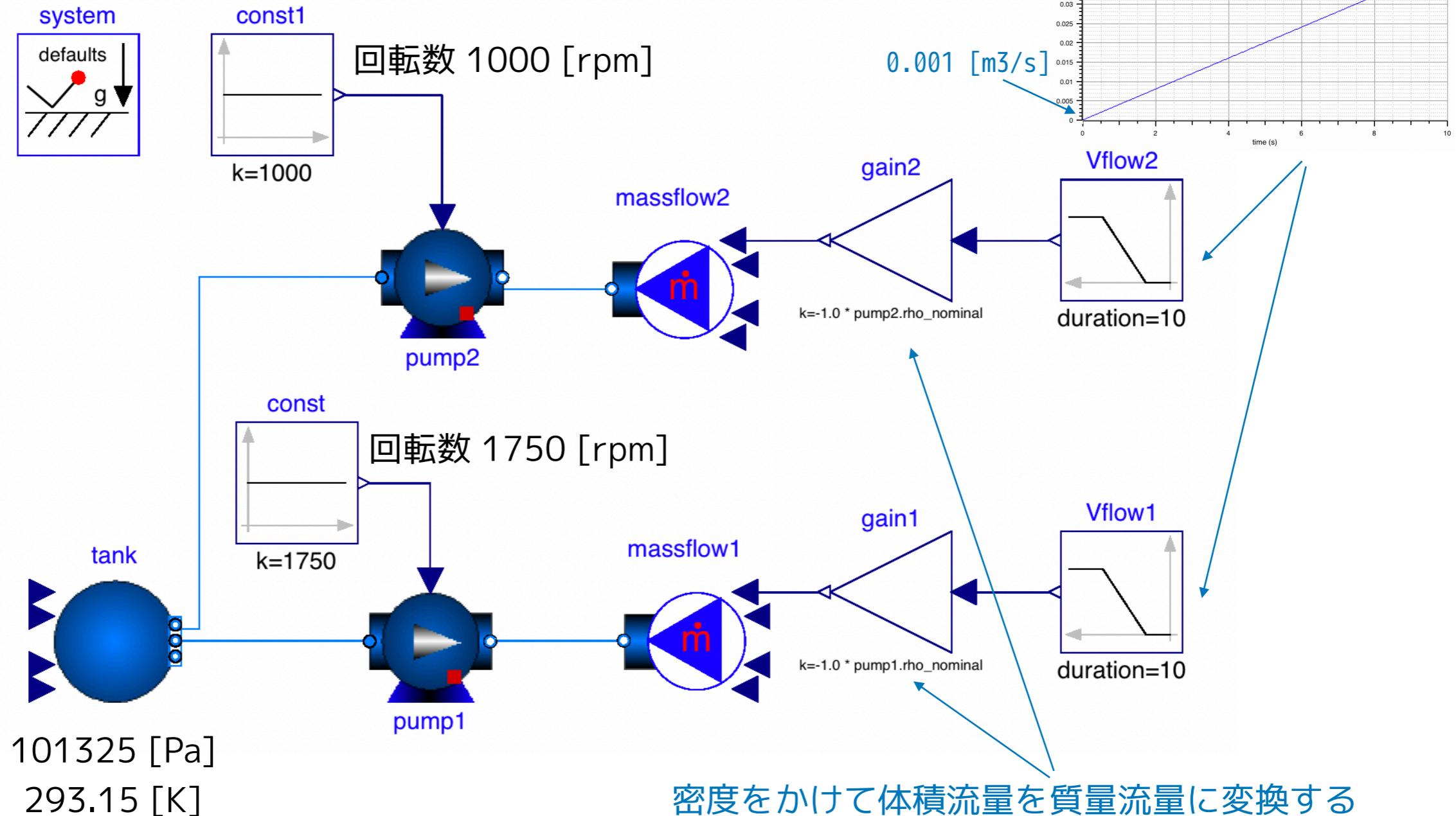
$$N = \max(N_{in_internal}, 1 \times 10^{-3})$$

リミッター（回転数の下限値）

パラメータ `use_N_in` は `N_in_internal` の設定方法を選択する。

PumpExample1

PrescribedPump の吐出口の体積流量を10秒で 0.001 [m³/s] から0.041 [m³/s] まで変化させる。



OpenModelica (1.14.0-dev-26499-g3e12ff2)のデフォルトソルバーでは、体積流量 0 [m³/s] からスタートすると、division by zeroとなります。また、0.0001 [m³/s] からスタートすると初期解が収束しません。

PrescribedPumpの性能設定

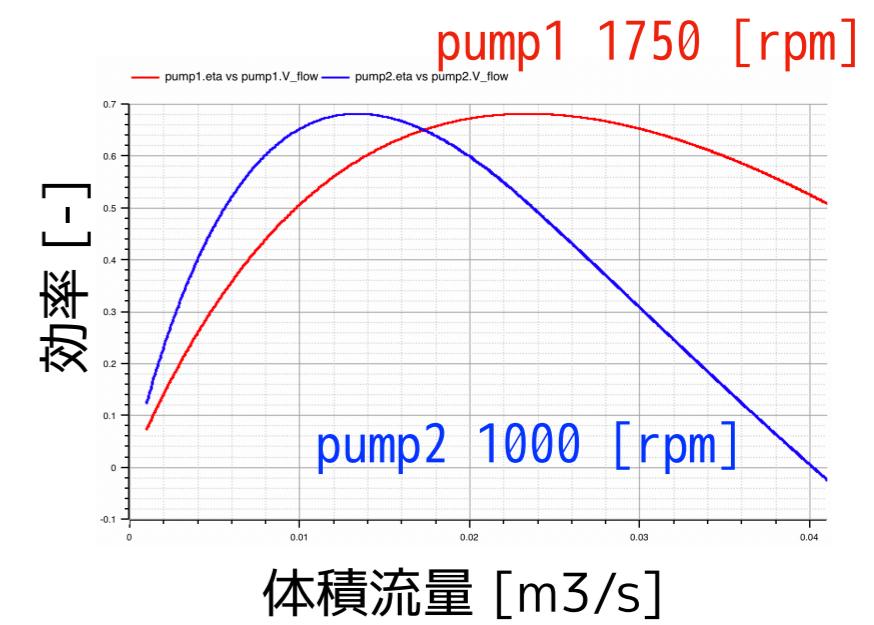
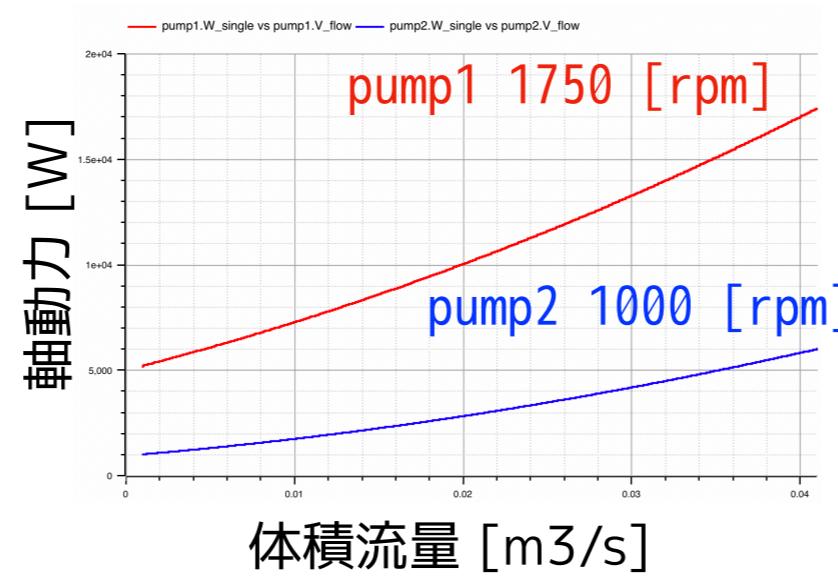
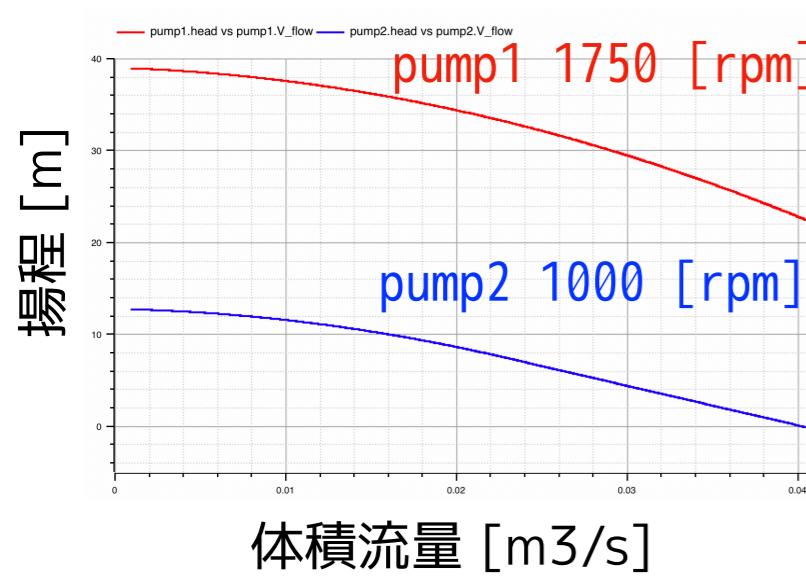
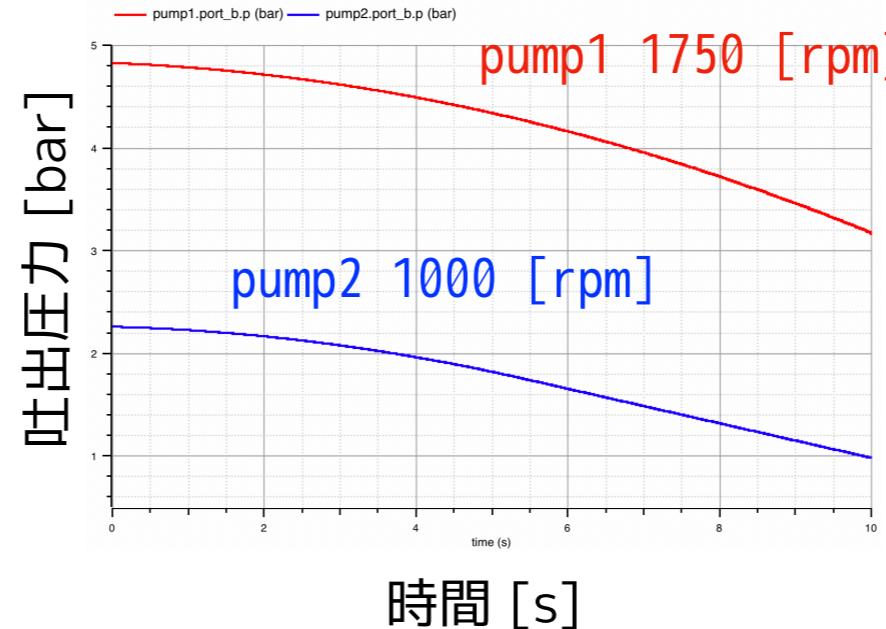
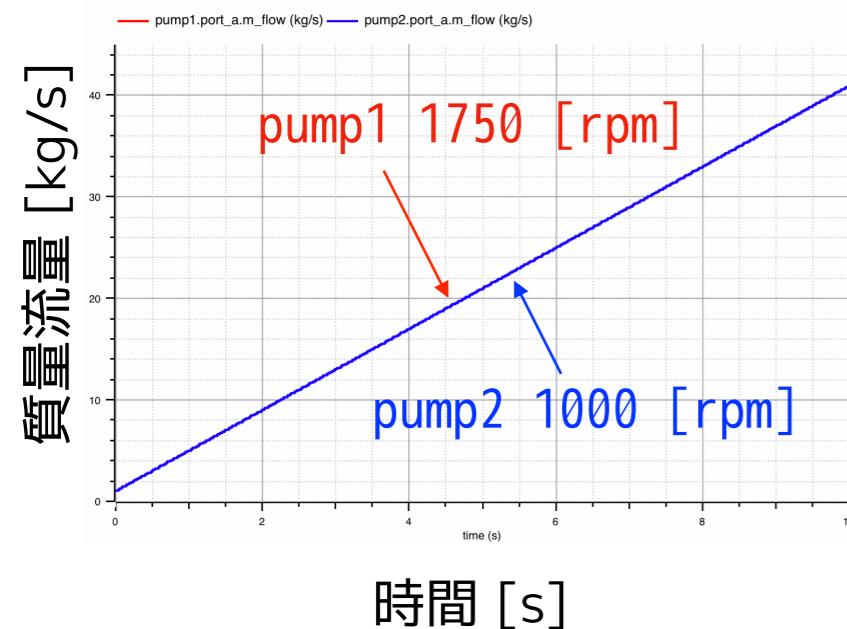
基準回転数 1750 [rpm]

流量[m ³ /s]	全揚程[m]	軸動力[kW]	効率
0.000	39.000	5.000	0.000
0.034	27.400	14.700	0.620
0.040	22.800	14.850	0.600

```
Modelica.Fluid.Machines.PrescribedPump pump1(
  redeclare package Medium = Medium,
  redeclare function flowCharacteristic =
    Modelica.Fluid.Machines.BaseClasses.PumpCharacteristics.quadraticFlow (
      V_flow_nominal={0,0.034,0.04}, head_nominal={39.0,27.0,22.8}),
  redeclare function powerCharacteristic =
    Modelica.Fluid.Machines.BaseClasses.PumpCharacteristics.quadraticPower (
      V_flow_nominal={0,0.034,0.04}, W_nominal={5000,14700,17000}),
  N_nominal = 1750,                                     基準回転数 1750 [rpm]
  checkValve = true,                                    逆止弁機能有効
  m_flow_start = 0.0001,                                質量流量初期値 0.0001 [kg/s]
  use_N_in = true,                                     回転数を入力コネクタで設定する
  use_powerCharacteristic = true) annotation( ...);   軸動力特性を使用する
```

flowCharacteristic や powerCharacteristic は、任意のユーザ定義関数に交換することができます。

シミュレーション結果

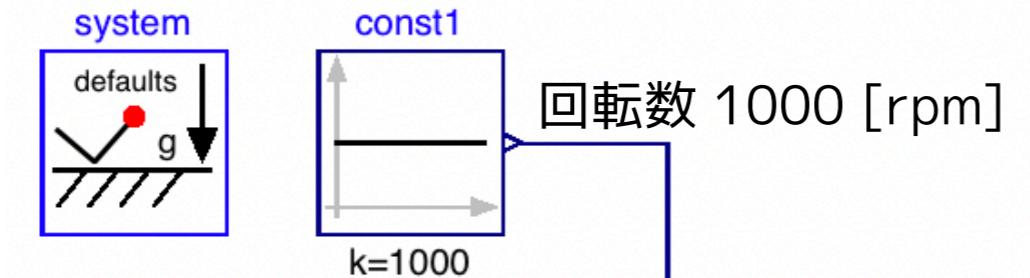
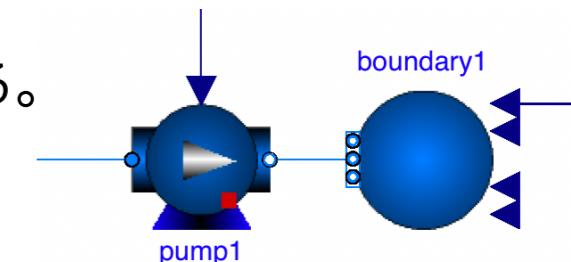


PumpExample2

PrescribedPump の吐出口にパイプをつないで出口の水頭 (head) を変化させる。

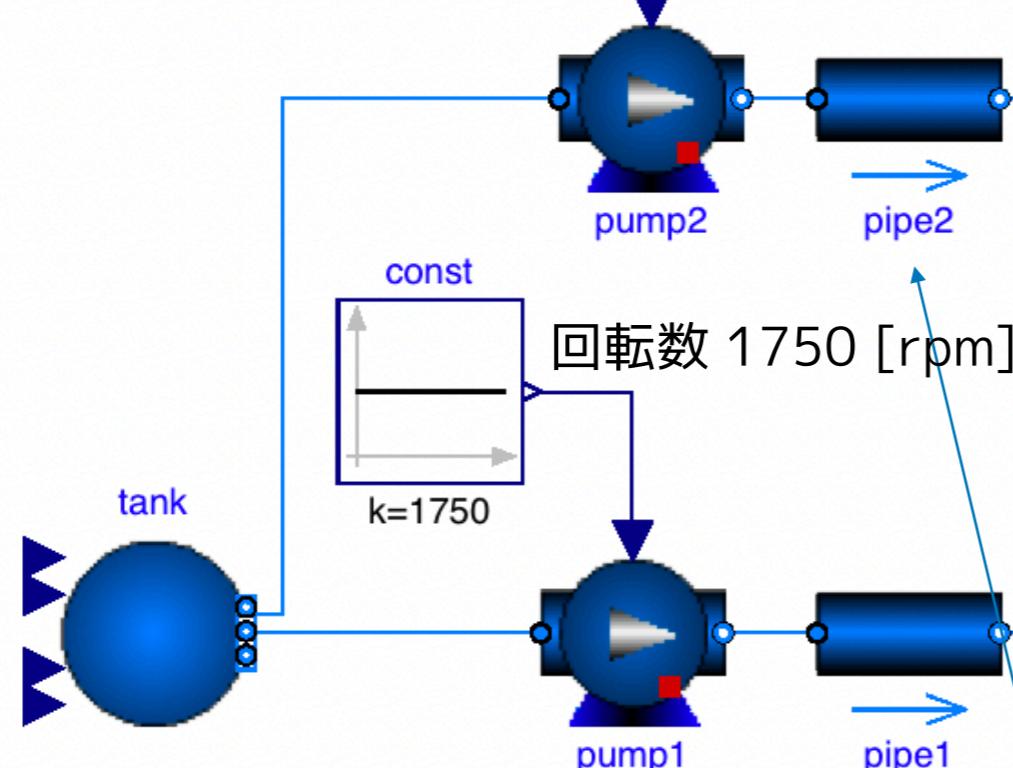
PrescribedPump の性能設定は Example1 と同様。

pump と Boundary_pT を直接接続すると
初期解 (time = 0) が収束しにくい。



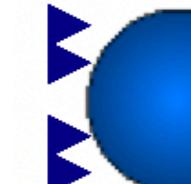
回転数 1000 [rpm]

$k=1000$



回転数 1750 [rpm]

$k=1750$



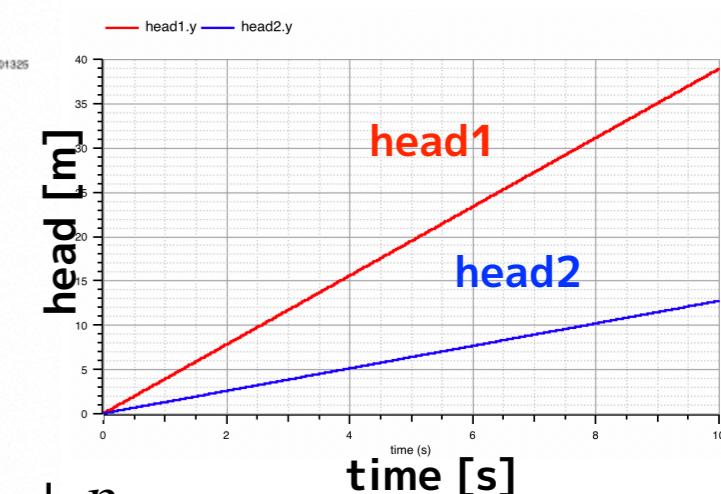
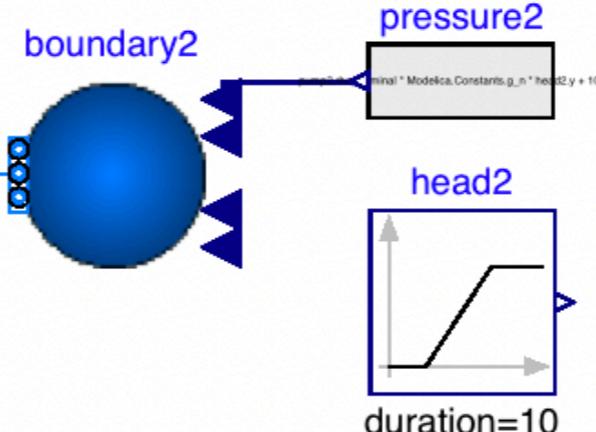
$$p_{amb} = 101325 \text{ [Pa]}$$

$$T_{amb} = 293.15 \text{ [K]}$$

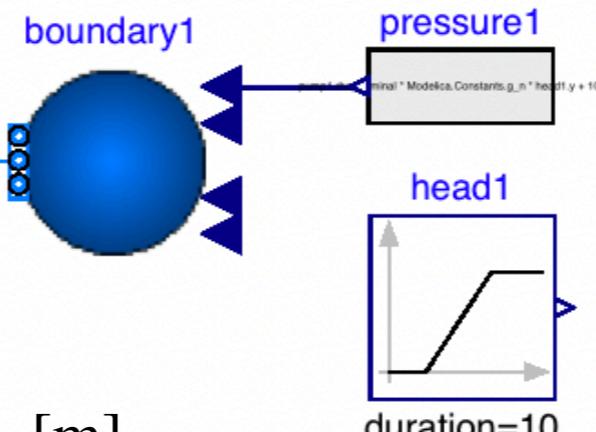
$$\begin{aligned} diameter &= 0.1 \text{ [m]} \\ length &= 20 \text{ [m]} \end{aligned}$$

水頭 (head) を圧力(pressure)に変換する

$$p = \rho g \cdot head2 + p_{amb}$$



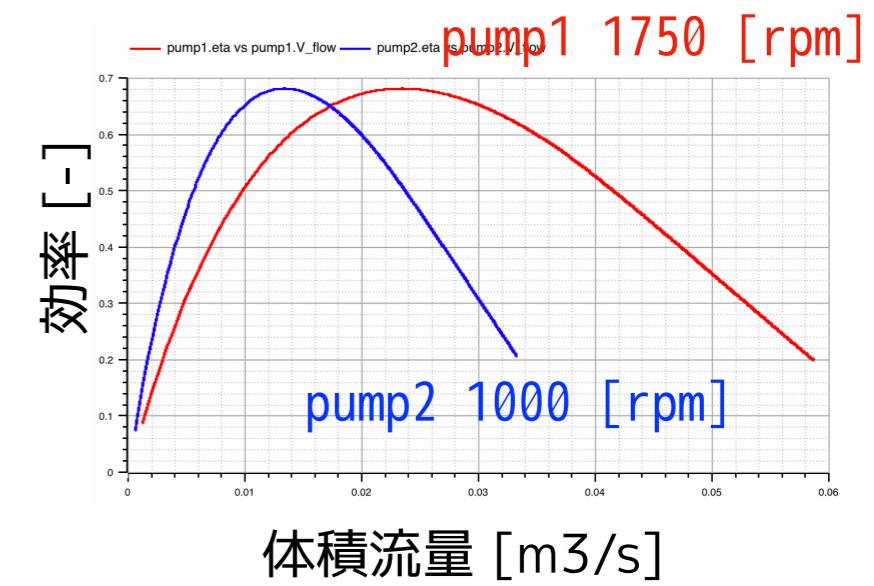
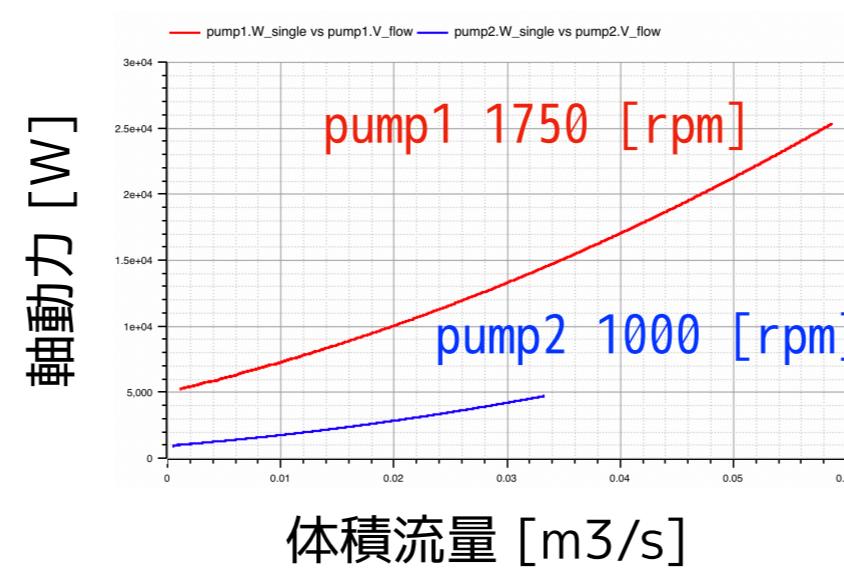
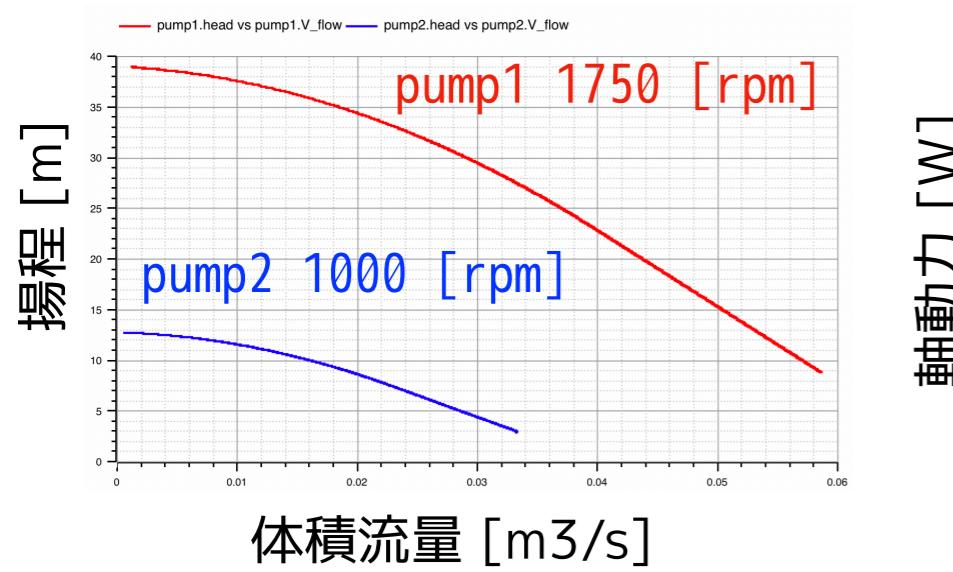
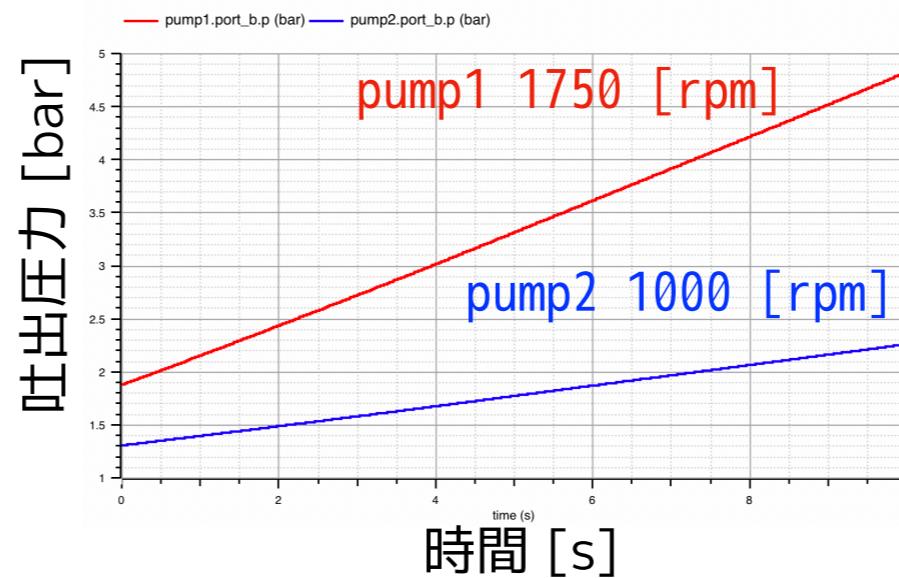
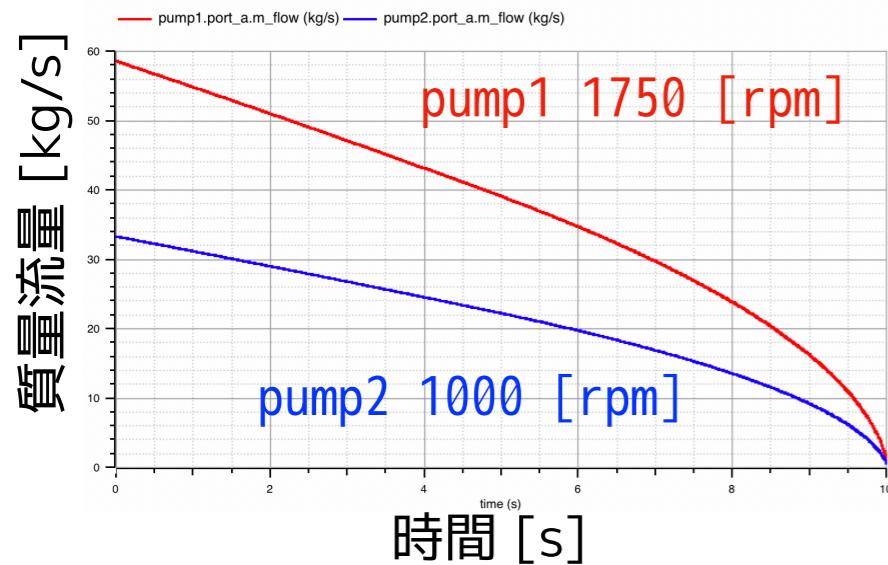
$$p = \rho g \cdot head1 + p_{amb}$$



time	0 → 10
head1	0.01 → 38.91
head2	0.01 → 12.71

pump の吐出口側は内部的には volume モデルになってるので staticpipe などの flow モデルを接続するほうが安定する。

シミュレーション結果



Pump (軸駆動ポンプ)

shaft (軸) を接続して、回転数と軸動力を設定するポンプ

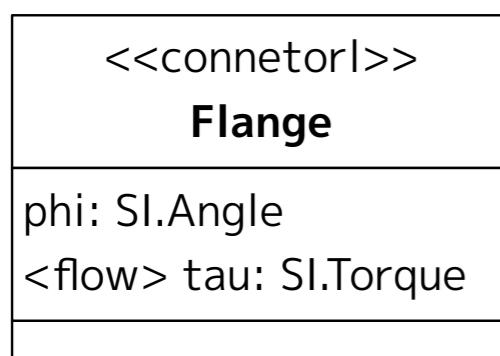
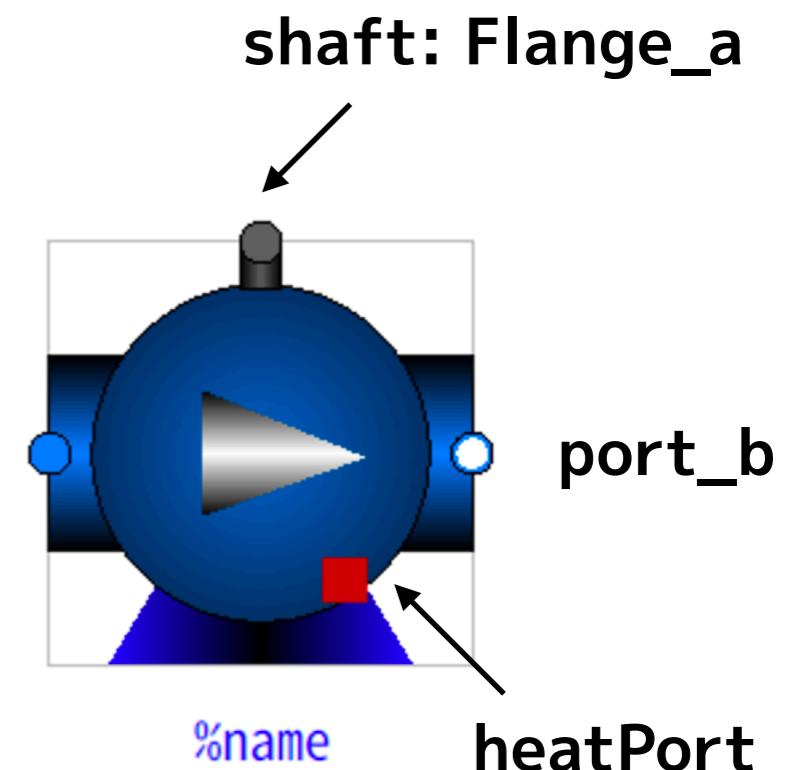
$$\varphi = \text{shaft}.phi \quad [\text{rad}]: \text{回転角度}$$

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \quad [\text{rad/s}]: \text{角速度}$$

$$N = \text{Modelica.SIUnits.Conversions.to_rpm}(\omega)$$

$$W_{single} = \omega \cdot \text{shaft}.tau \quad [W]: \text{軸動力}$$

$$N = \frac{60}{2\pi}\omega \quad [\text{rpm}]: \text{回転数}$$



Modelica.Mechanics.Rotationlas.Interfaces.Flange

$$\varphi = \text{shaft}.phi \quad [\text{rad}]: \text{回転角度}$$

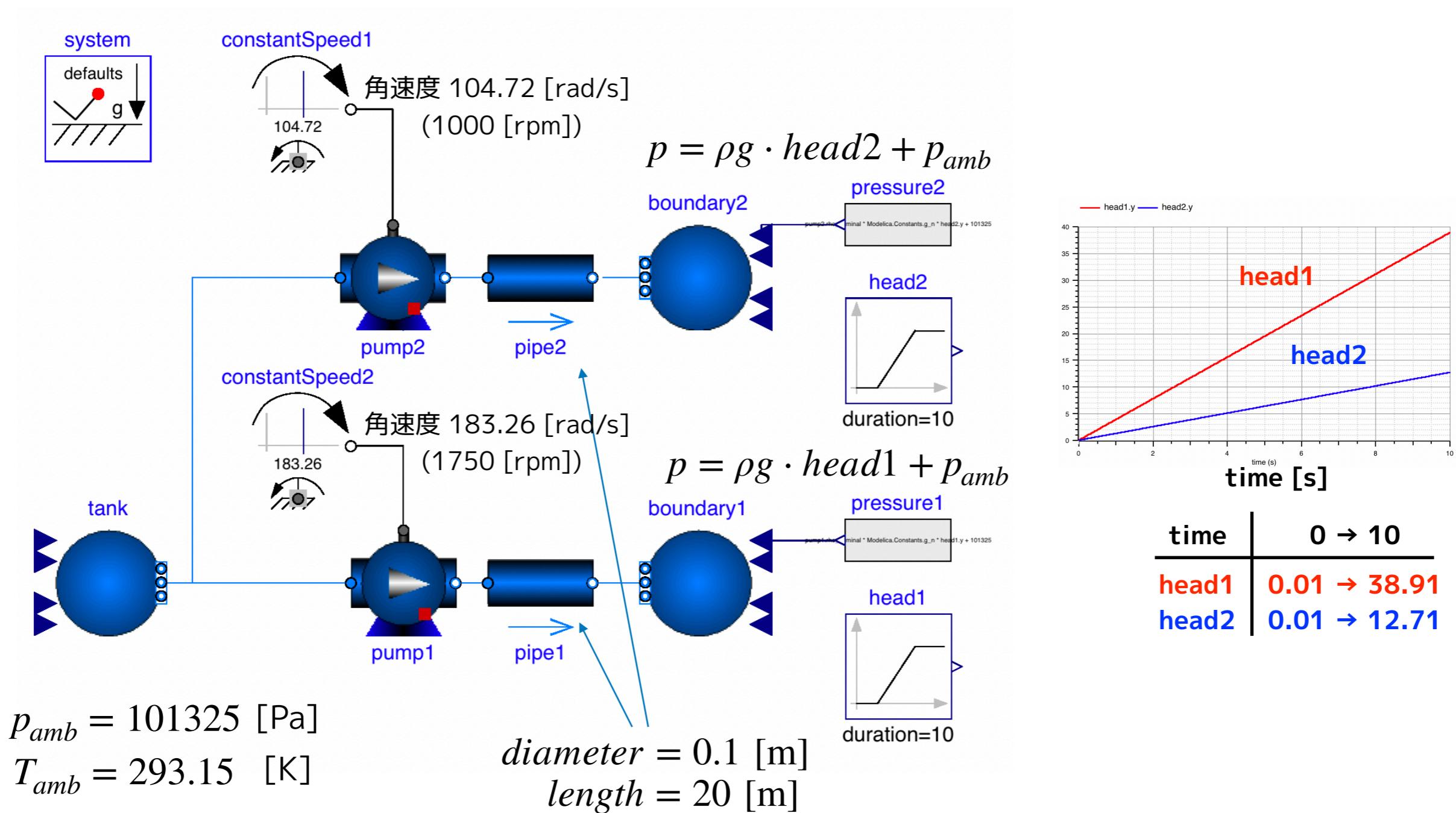
$$\tau = \text{shaft}.tau \quad [\text{Nm}]: \text{トルク}$$



Modelica.Mechanics.Rotationlas.Interfaces.Flange_a

PumpExample3

PumpExample2 と同様に Pump の吐出口にパイプをつないで出口の水頭 (head) を変化させる。



Pump の性能設定

基準回転数 1750 [rpm]

流量[m ³ /s]	全揚程[m]	軸動力[kW]	効率
0.000	39.000	5.000	0.000
0.034	27.400	14.700	0.620
0.040	22.800	14.850	0.600

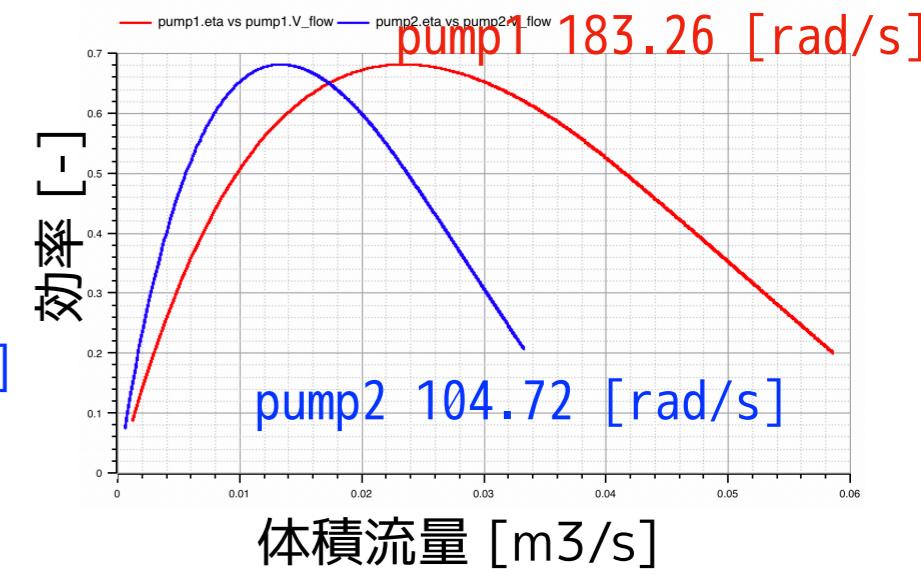
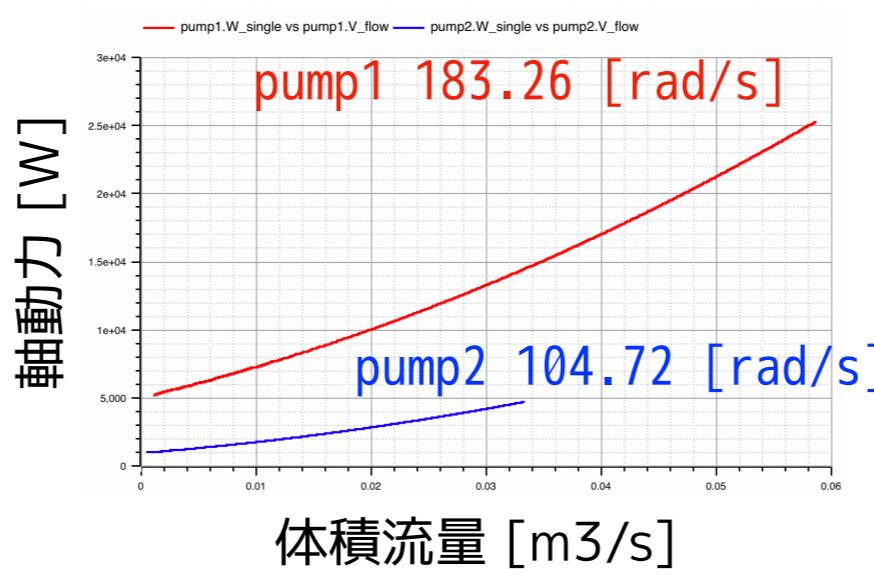
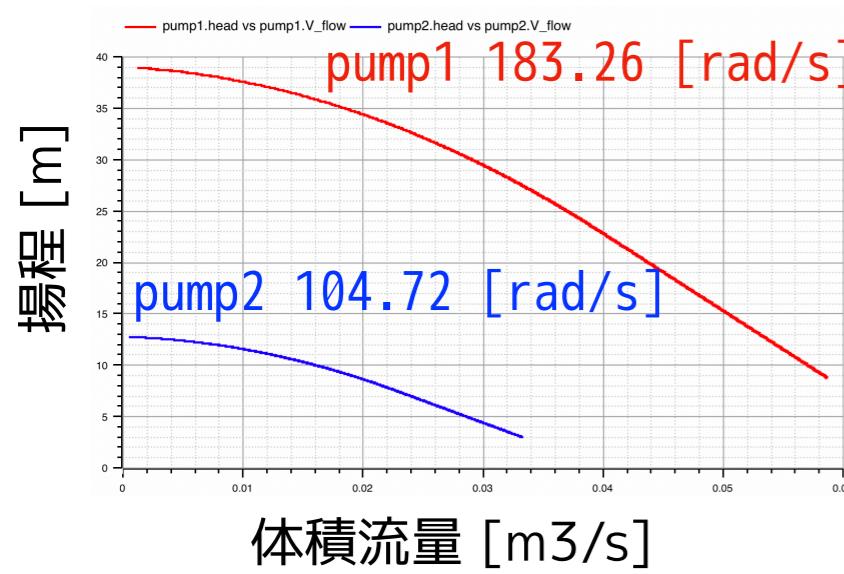
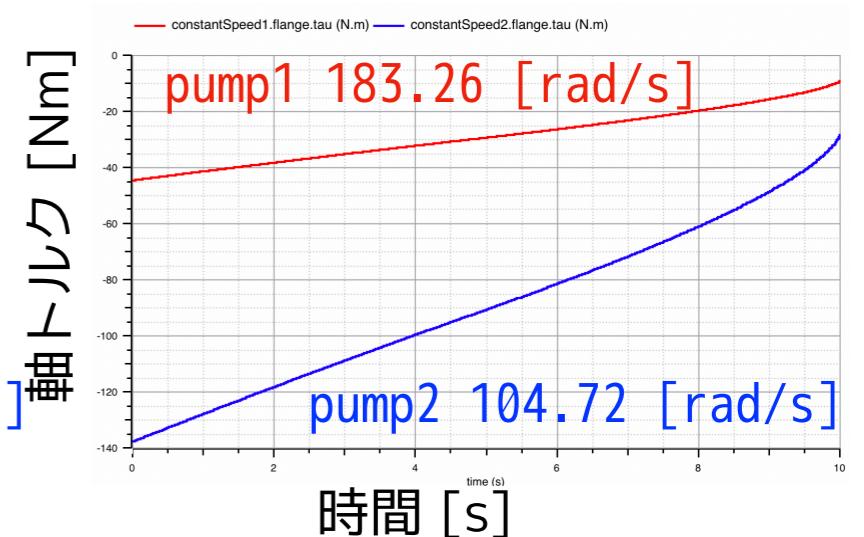
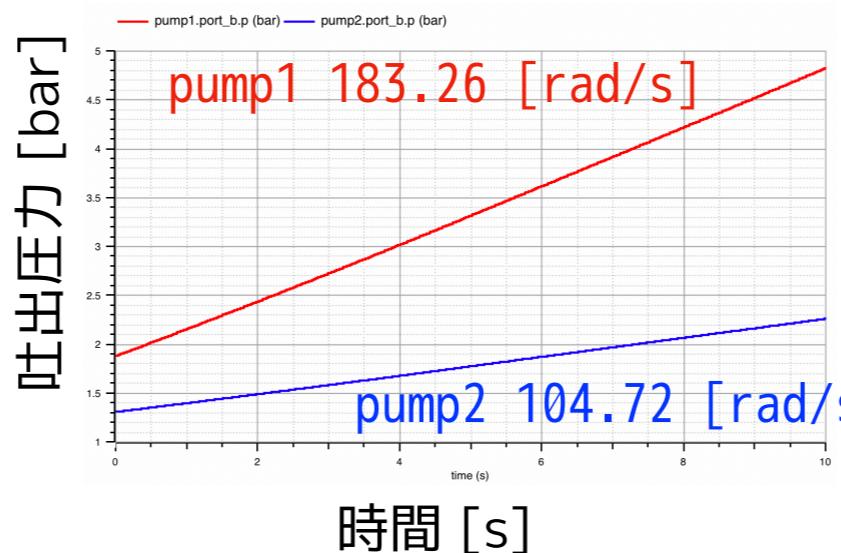
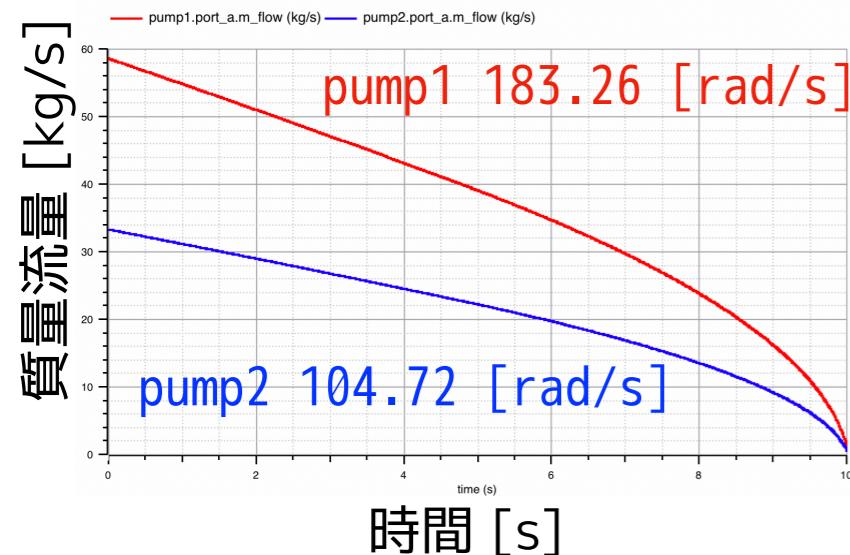
```
Modelica.Fluid.Machines.Pump pump1(
  redeclare package Medium = Medium,
  redeclare function flowCharacteristic =
    Modelica.Fluid.Machines.BaseClasses.PumpCharacteristics.quadraticFlow(
      V_flow_nominal={0,0.034,0.04}, head_nominal = {39.0, 27.0, 22.8}),
  redeclare function powerCharacteristic =
    Modelica.Fluid.Machines.BaseClasses.PumpCharacteristics.quadraticPower(
      V_flow_nominal={0,0.034,0.04}, W_nominal={5000,14700,17000}),
  redeclare model Monitoring = Modelica.Fluid.Machines.BaseClasses.PumpMonitoring.PumpMonitoringNPSH,
  N_nominal = 1750,           基準回転数 1750 [rpm]
  checkValve = true,          逆止弁機能有効
  m_flow_start = 1,           質量流量初期値 1 [kg/s]
  use_powerCharacteristic = true) 軸動力特性を使用する
  annotation( ...);
```

揚程特性

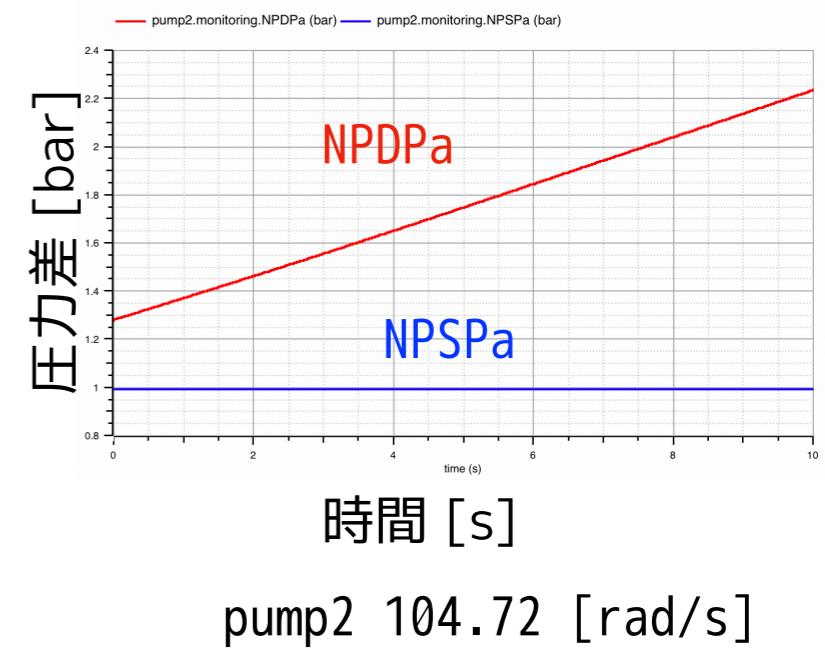
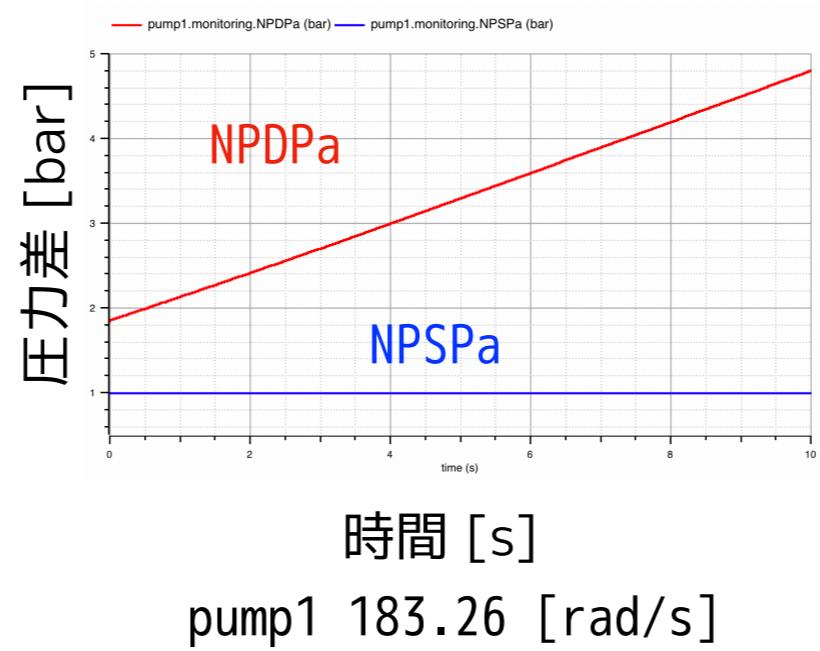
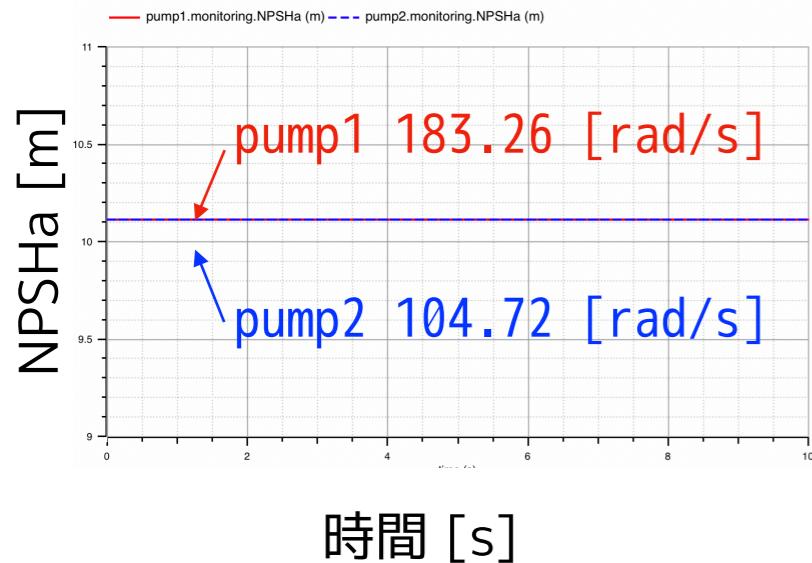
軸動力特性

NPSHa のモニタリングを行う

シミュレーション結果



シミュレーション結果



ControlledPump (質量流量・吐出圧力規定ポンプ)

質量流量か吐出圧力を設定するポンプ

ポンプの特性の重要性が2次的なときに使う

ポンプの揚程特性はパラメータ

$m_{flow_nominal}$ [kg/s]: 吐出流量の基準値

$p_a_{nominal}$ [Pa]: 吸込圧力の基準値

$p_b_{nominal}$ [Pa]: 吐出圧力の基準値

のみで設定する。(次のスライド参照)

流量や吐出圧力の設定方法

`control_m_flow_set = true`

`use_m_flow_set = true`
`false`

`control_m_flow_set = false`

`use_p_set = true`
`false`

質量流量を制御する。

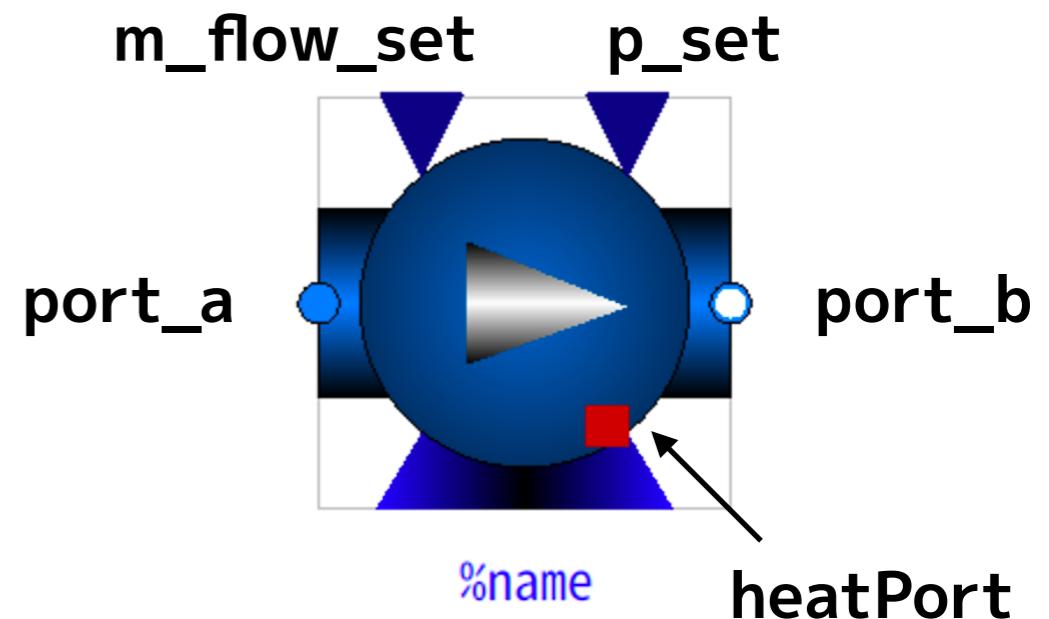
なら入力コネクタ `m_flow_set` で制御する。

なら質量流量はパラメータ $m_{flow_nominal}$ になる。

吐出圧力を制御する。

なら入力コネクタ `p_set` で制御する。

なら吐出圧力はパラメータ $p_{b_{nominal}}$ になる。



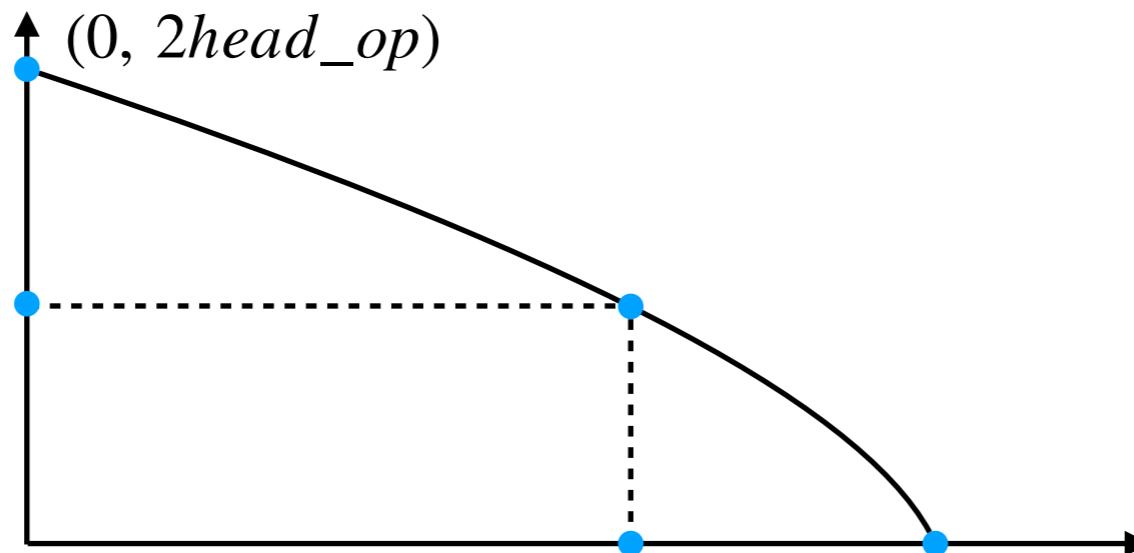
ControlledPumpの揚程特性

$$V_{flow_op} = \frac{m_{flow_{nominal}}}{\rho_{nominal}}$$

$$head_{op} = \frac{p_b - p_a}{\rho_{nominal}g}$$

$$v_{flow_{nominal}} = \{0, V_{flow_op}, 1.5V_{flow_op}\}$$

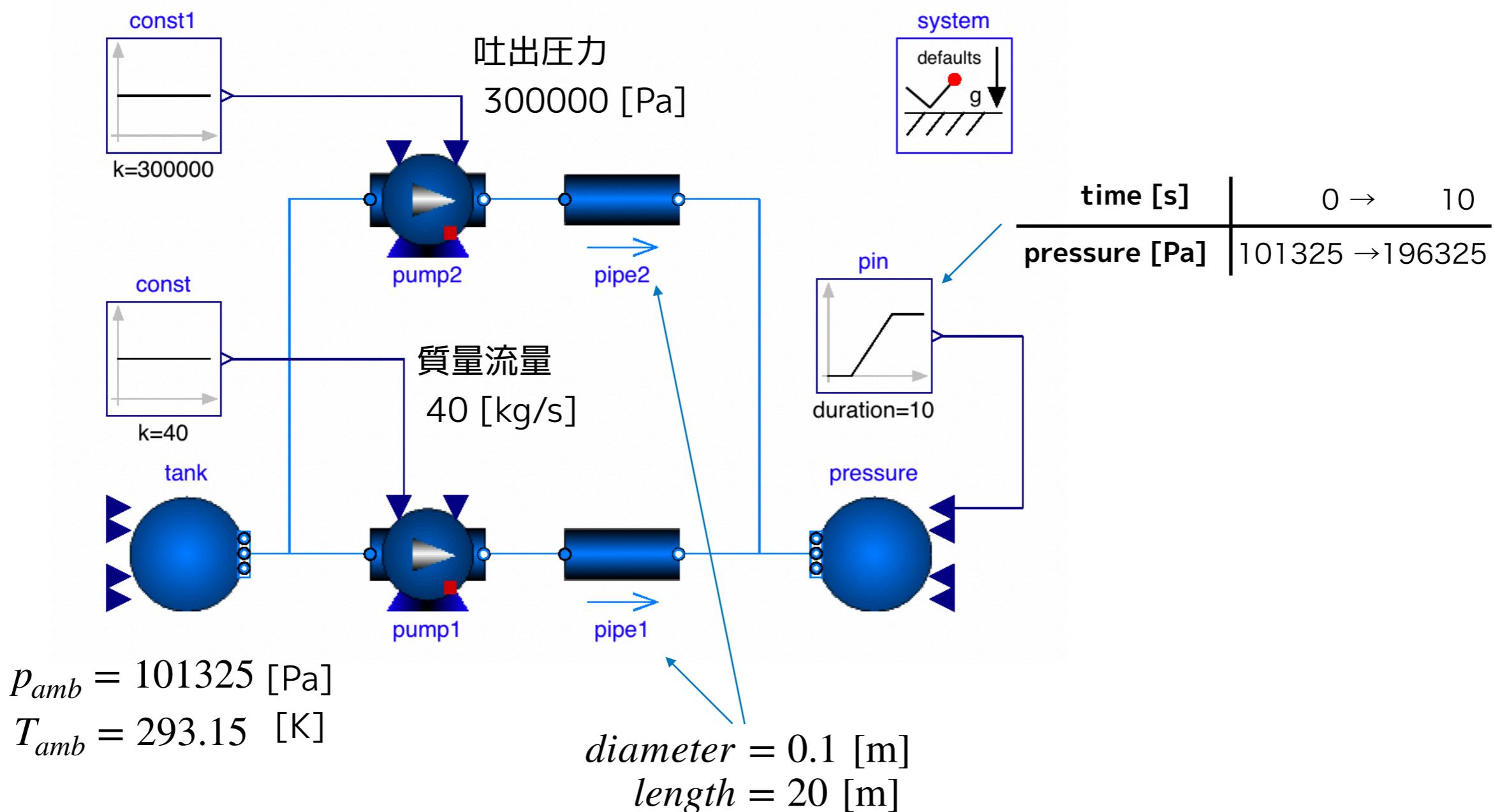
$$head_{nominal} = \{2head_{op}, head_{op}, 0\}$$



- モデルの内部には上記のような揚程特性が設定される。
- このモデルでは、圧力差と流量の関係はポンプ後方の配管系統によって決定されるので、この特性に従わない。

PumpExample4

ControlledPump の例題。pump1 は質量流量を 40 [kg/s] に規定し、pump2 は吐出圧を 300000 [Pa] に規定する。pipe1 と pipe2 の出口の圧力を 10 秒間で 101325 [Pa] から 196325 [Pa] まで変化させる。



ControlledPump の性能設定

pump1 の設定 入力コネクタで質量流量を規定する

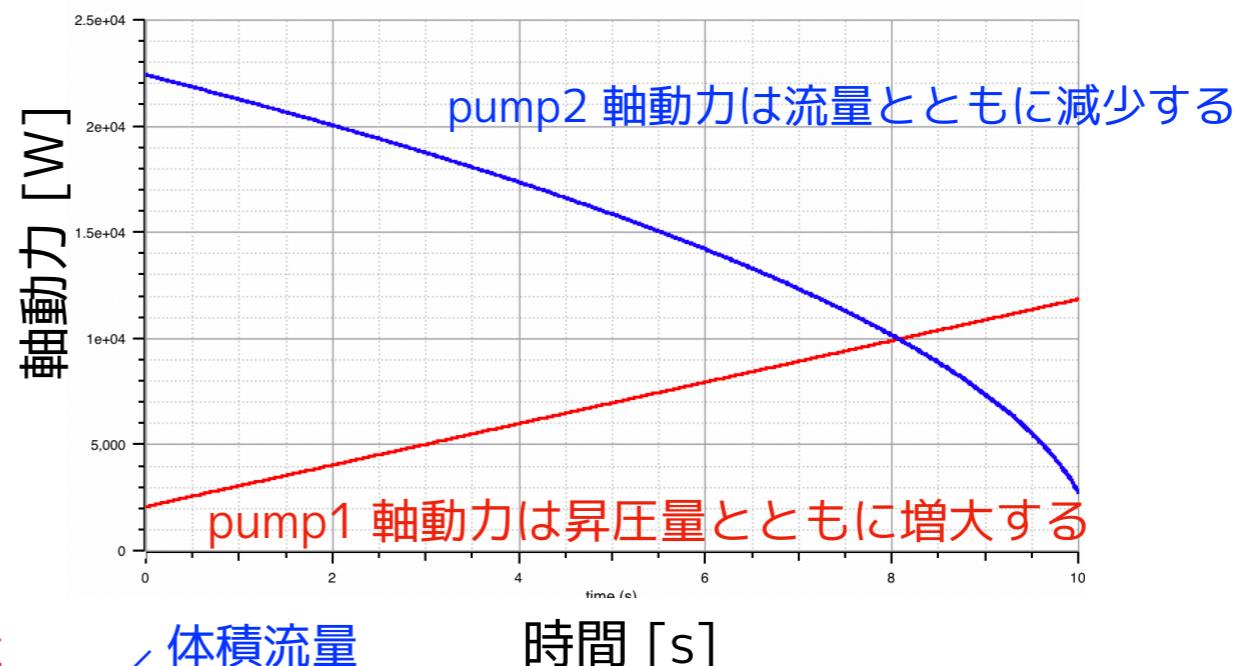
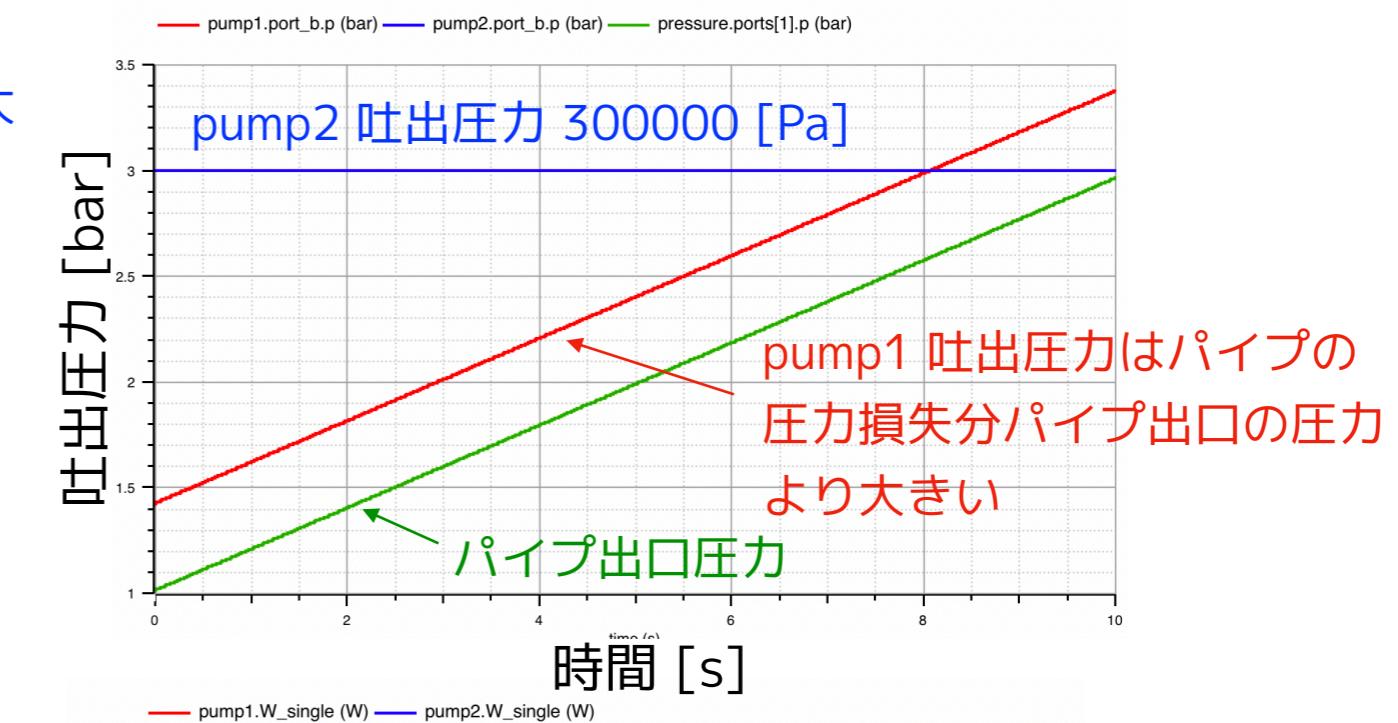
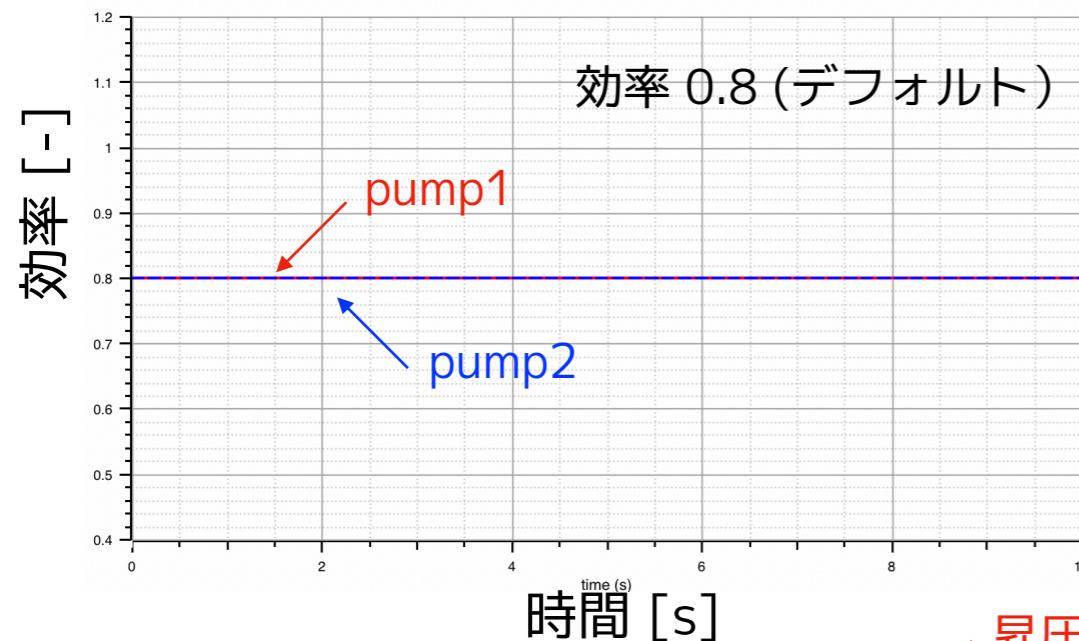
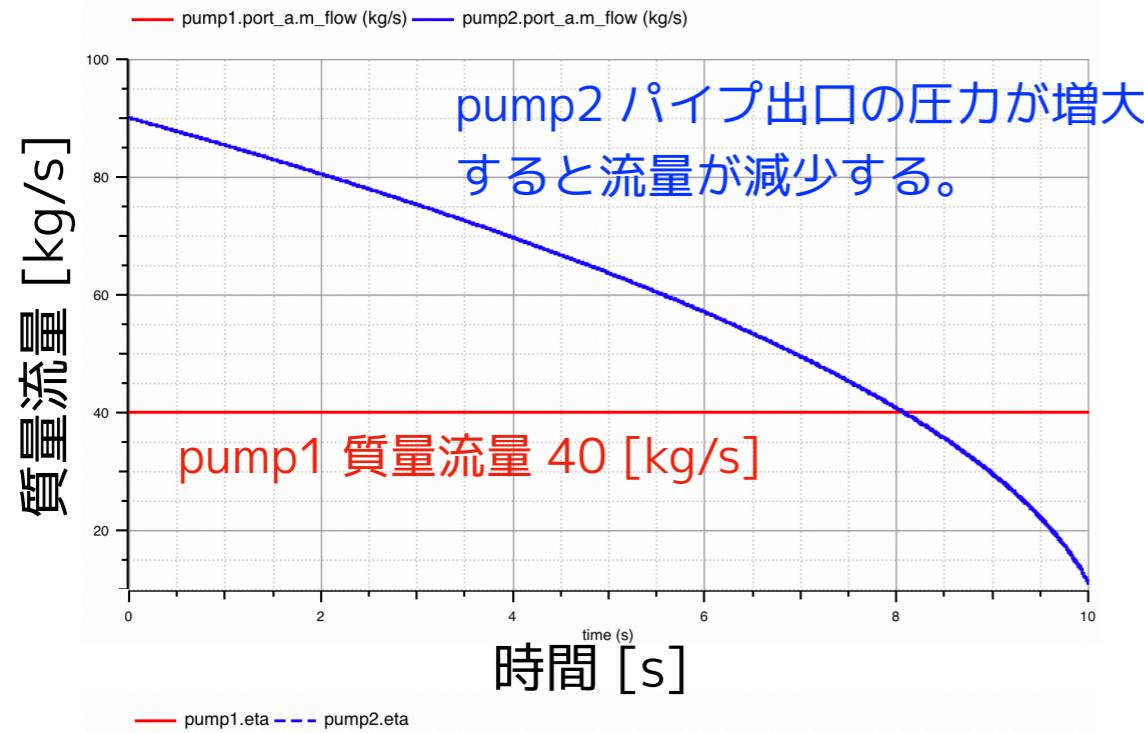
流量を規定する(デフォルトで control_m_flow = true)

```
Modelica.Fluid.Machines.ControlledPump pump1(  
  redeclare package Medium = Medium,  
  m_flow_nominal = 40,           ] [kg/s]: 吐出流量の基準値  
  p_a_nominal = 101325,          ] [Pa]: 吸込圧力の基準値  
  p_b_nominal = 351325,          ] [Pa]: 吐出圧力の基準値  
  use_m_flow_set = true)        質量流量の入力コネクタを使う  
  annotation( … );
```

pump2 の設定 入力コネクタで吐出圧力を規定する

```
Modelica.Fluid.Machines.ControlledPump pump2(  
  redeclare package Medium = Medium,  
  control_m_flow = false,         ← 壓力を規定する  
  m_flow_nominal = 40,           ] [kg/s]: 吐出流量の基準値  
  p_a_nominal = 101325,          ] [Pa]: 吸込圧力の基準値  
  p_b_nominal = 351325,          ] [Pa]: 吐出圧力の基準値  
  use_p_set = true)             吐出圧力の入力コネクタを使う  
  annotation( … );
```

シミュレーション結果



$$\eta = \frac{dp_{pump} \cdot V_{flow_single}}{W_{single}}$$

効率 η = $\frac{\text{昇圧量} \cdot \text{体積流量}}{\text{軸動力}}$

まとめ

Modelica.Fluid.Machines のポンプモデルは、揚程特性 (head curve) と軸動力特性(power curve) または効率特性 (efficiency curve) を使用してポンプの動作をモデル化する。

- 揚程特性 (head curve)、軸動力特性 (power curve)、効率特性 (efficiency curve) は replaceable function になっており、ユーザー定義関数に交換可能である。
- ポンプの吐出側は volume モデルになっている。パラメータのポンプ内容積 V [m³] や massDynamics、energyDynamics を設定することによって非定常的な質量保存やエネルギー保存を考慮することができる。
- Monitoring モデルを設定することによって NPSHa などの計算が可能である。
- Pump は、Modelica.Mechanics.Rotational の Flange コネクタを接続することができる。
- PrescribedPump、Real コネクタまたはパラメータで回転数を規定する。
- ControlledPump は、ポンプの特性が十分得られないときに使用し、質量流量または吐出圧力を規定する。

Licensed by Amane Tanaka under the Modelica License 2

Copyright(c) 2019, Amane Tanaka

- The purpose of this document are introducing the centrifugal pump models of Modelica.Fluid which are included in the Modelica Standard Library (MSL). This document uses libraries, software, figures, and documents included in MSL, and those modifications. Licenses and copyrights of those are written in next page.
- This document is free and the use is completely at your own risk; it can be redistributed and/or modified under the terms of the Modelica license 2, see the license conditions (including the disclaimer of warranty) at

<http://www.modelica.org/licenses/ModelicaLicense2>

Modelica Standard Library License

<https://github.com/modelica/ModelicaStandardLibrary/blob/master/LICENSE>

BSD 3-Clause License

Copyright (c) 1998-2019, Modelica Association and contributors
All rights reserved.

Redistribution and use in source and binary forms, with or without modification, are permitted provided that the following conditions are met:

- * Redistributions of source code must retain the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer.
- * Redistributions in binary form must reproduce the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer in the documentation and/or other materials provided with the distribution.
- * Neither the name of the copyright holder nor the names of its contributors may be used to endorse or promote products derived from this software without specific prior written permission.

THIS SOFTWARE IS PROVIDED BY THE COPYRIGHT HOLDERS AND CONTRIBUTORS "AS IS" AND ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL THE COPYRIGHT HOLDER OR CONTRIBUTORS BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, INCIDENTAL, SPECIAL, EXEMPLARY, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES (INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, PROCUREMENT OF SUBSTITUTE GOODS OR SERVICES; LOSS OF USE, DATA, OR PROFITS; OR BUSINESS INTERRUPTION) HOWEVER CAUSED AND ON ANY THEORY OF LIABILITY, WHETHER IN CONTRACT, STRICT LIABILITY, OR TORT (INCLUDING NEGLIGENCE OR OTHERWISE) ARISING IN ANY WAY OUT OF THE USE OF THIS SOFTWARE, EVEN IF ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGE.