

二相流シミュレーション入門講座

2010年7月23日 金曜日 10:00～17:05
CIVI 新大阪研修センター

14:55～15:55 (60分)

圧縮性二相流の数値解析法，汎用二相流コード

アドバンスソフト株式会社
コンサルティンググループ
湊 明彦

圧縮性流体の基礎理論と数値計算法を解説し、
二流体モデルへの拡張について説明します。

また、界面追跡法 (VOF 法) および二流体モデルを
用いた市販の気液二相流解析コードの機能と
使用方法の一例を紹介します。

内 容

(1) 圧縮性二相流の基礎式と現象

- 基礎式(質量, 運動量保存則)と低マッハ数近似
- 音速
- 臨界流
- 圧力波と水撃

(2) 圧縮性二相流の数値解法

- 圧縮性单相流の解法 (特性曲線法, Godunov(ゴドノフ)法)
- Godunov法の二流体モデルへの拡張

(3) 汎用二相流コード

(アドバンスソフト社のFrontFlow/Red(VOF)とFrontFlow/MP(Multiphase)を例に)

- 機能スペック概要
- チュートリアル概要

圧縮性単相流の基礎式

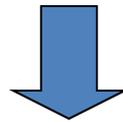
質量保存則

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0$$

ρ : 密度 \mathbf{u} : 速度 P : 圧力 F : 外力 t : 時間
--

運動量保存則

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} = -\nabla P + \mathbf{F}$$



質量保存則

$$\nabla \cdot \mathbf{u} \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \approx -\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dP} \right) \frac{\partial P}{\partial t}$$

低マッハ数近似

運動量保存則

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{u} = \frac{1}{\rho} (-\nabla P + \mathbf{F})$$

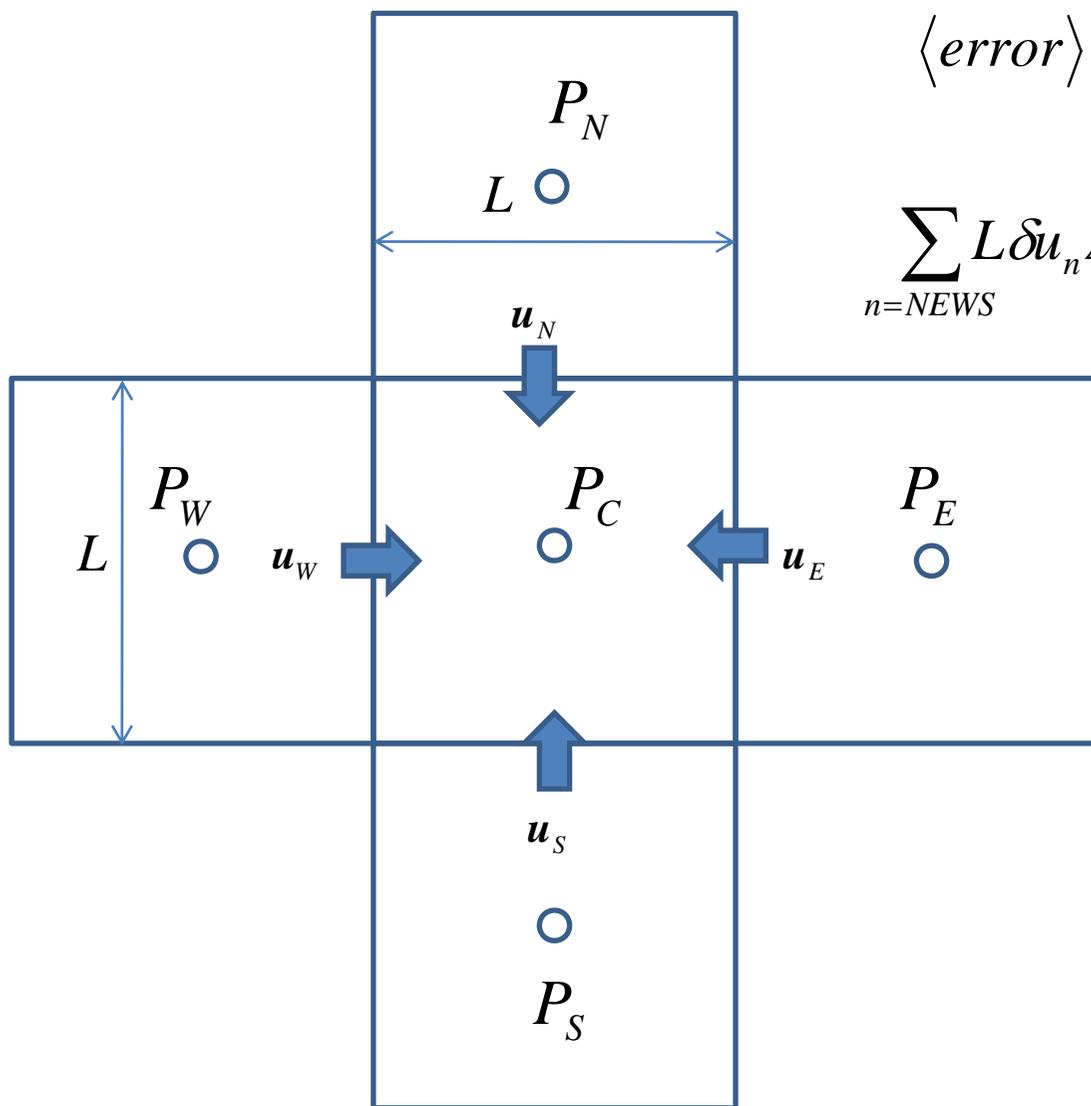
(ここで仮に ρ は P のみの関数とする)

$$error. = \nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dP} \right) \frac{\partial P}{\partial t} \Rightarrow 0$$

SMAC法による解法
(Simplified Marker and Cell)

となる速度, 圧力分布を求める

低マッハ数近似のSMAC法



$$\langle error \rangle = \sum_{n=NEWS} L u_n \Delta t + \frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dP} \right) \Delta P$$

$$\sum_{n=NEWS} L \delta u_n \Delta t + \frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dP} \right) \delta P = -\langle error \rangle$$

となる δu , δP を求める。

δu をは P の関数であるので

$$\delta u = -\frac{1}{\rho} \nabla \delta P \times \Delta t$$

$$\text{座標毎に } \delta u_n = \frac{\Delta t}{\rho} \left(\frac{\delta P_n - \delta P_C}{L} \right)$$

反復計算により最終的な解を得る。

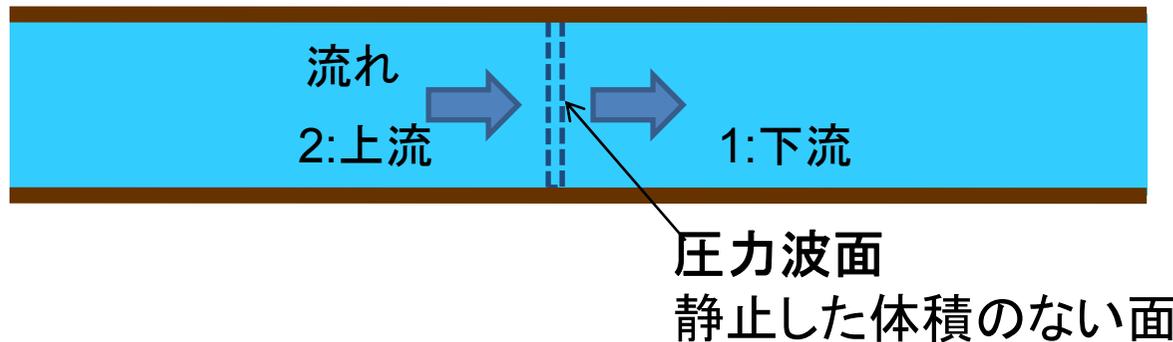
$$u + \delta u \Rightarrow u \quad P + \delta P \Rightarrow P$$

一次元圧縮性単相流の基礎方程式

$$\text{質量保存則} \quad \frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial z} \rho u = 0$$

$$\text{運動量保存則} \quad \frac{\partial}{\partial t} \rho u + \frac{\partial}{\partial z} \rho u^2 + \frac{\partial}{\partial z} P = F$$

圧力波と同じ速度で移動する座標系による表示



圧力波面への流入量 = 流出量 の関係から

$$\text{質量flux} \quad \frac{d}{dz} \rho u = 0 \quad \Rightarrow \quad \rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 = G \quad (\text{const.})$$

$$\text{運動量flux} \quad \frac{d}{dz} (\rho u^2 + P) = 0 \quad \Rightarrow \quad P_1 + \rho_1 u_1^2 = P_2 + \rho_2 u_2^2$$

質量flux $\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 = G$

運動量flux $P_1 + \rho_1 u_1^2 = P_2 + \rho_2 u_2^2$

$$P_1 + v_1 G^2 = P_2 + v_2 G^2$$

ここで比容積は
 $v = \rho^{-1}$

いろいろな表現

$$c = \frac{G}{\rho} = v \sqrt{-\frac{1}{\left(\frac{dv}{dP}\right)}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{d\rho}{dP}\right)}}$$

$$\left(\frac{dv}{dP}\right) = -\frac{v^2}{c^2}$$

$$G = \sqrt{-\left(\frac{dP}{dv}\right)} = \sqrt{-\frac{1}{\left(\frac{dv}{dP}\right)}}$$

$$c = \sqrt{\frac{v}{\beta}} = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

$$G^2 = -\frac{P_1 - P_2}{v_1 - v_2}$$

音速 c : 微小圧力変動の伝播速度なので

$P_1 - P_2 \Rightarrow 0$, $v_1 - v_2 \Rightarrow 0$ のとき $u \Rightarrow c$

つまり $G^2 = (\rho c)^2 = -\frac{dP}{dv}$

ここで流体の圧縮率 β と $\beta = -\frac{1}{v} \left(\frac{dv}{dP}\right) = \frac{v}{c^2}$
剛性率 K を定義 $K = \beta^{-1}$

水-空気二相流中の音速

二相流の比容積

$$v_{2\phi} = xv_g + (1-x)v_l$$

クオリティ

$$x = \frac{\alpha\rho_g}{\alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_l}$$

比容積の圧力微分

$$\frac{dv_{2\phi}}{dP} = x\frac{dv_g}{dP} + (1-x)\frac{dv_l}{dP}$$

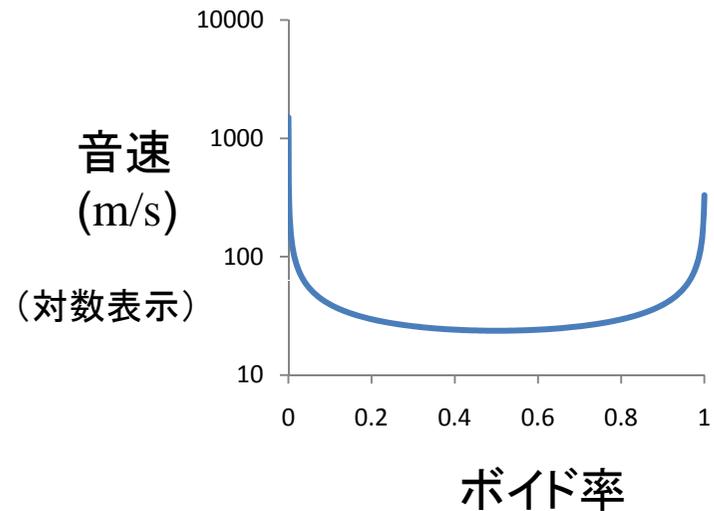
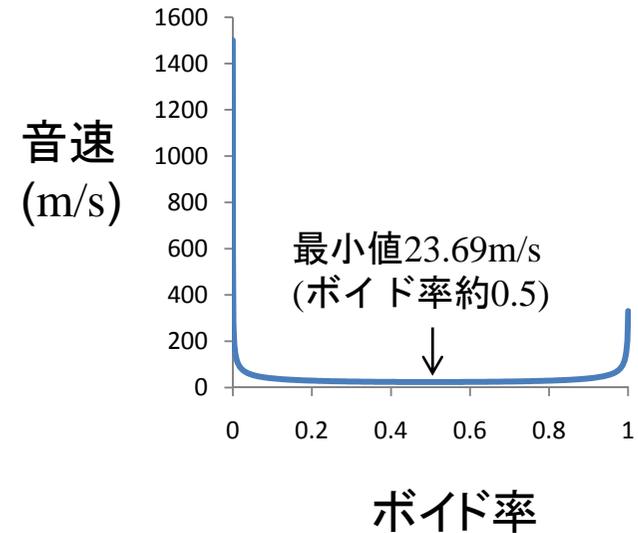
音速を使った表示

$$\frac{v_{2\phi}^2}{c_{2\phi}^2} = x\frac{v_g^2}{c_g^2} + (1-x)\frac{v_l^2}{c_l^2}$$

$$\frac{dv}{dP} = -\frac{v^2}{c^2} \text{ であるから}$$

従って二相流の音速は

$$c_{2\phi} = \frac{xv_g + (1-x)v_l}{\sqrt{x\frac{v_g^2}{c_g^2} + (1-x)\frac{v_l^2}{c_l^2}}}$$



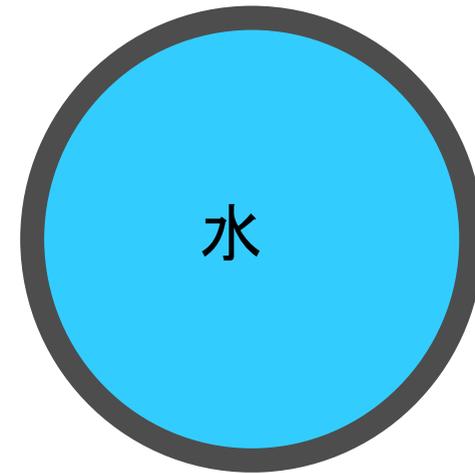
弾性円管内の見かけの水中音速

配管壁の弾性変形を考慮した見かけの圧縮率

$$\beta_{eff} = \beta + \beta_{pipe} = \beta + \frac{D}{eE}$$

従って、見かけの水中音速は

$$c_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\rho\beta_{eff}}} = \sqrt{\frac{1/\rho}{\beta\left(1 + \frac{D/\beta}{eE}\right)}} = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{KD}{eE}}}$$



円管壁
(直径 D , 肉厚 e , 剛性率 E)

臨界流

質量保存則

$$\frac{\partial}{\partial z} \rho u = 0$$

運動量保存則

$$\frac{\partial}{\partial z} \rho u^2 + \frac{\partial}{\partial z} P = F$$

$G = \rho u = \text{const.}$ なので

$$\frac{d}{dz} \frac{G^2}{\rho} + \frac{d}{dz} P = F \quad \text{つまり} \quad \left\{ G^2 \left(\frac{d(1/\rho)}{dP} \right) + 1 \right\} \frac{dP}{dz} = F$$

$$G \text{大とともに} \quad \frac{dP}{dz} \Rightarrow \infty \quad \text{このとき} \quad G^2 \left(\frac{d(1/\rho)}{dP} \right) + 1 = 0$$

従って

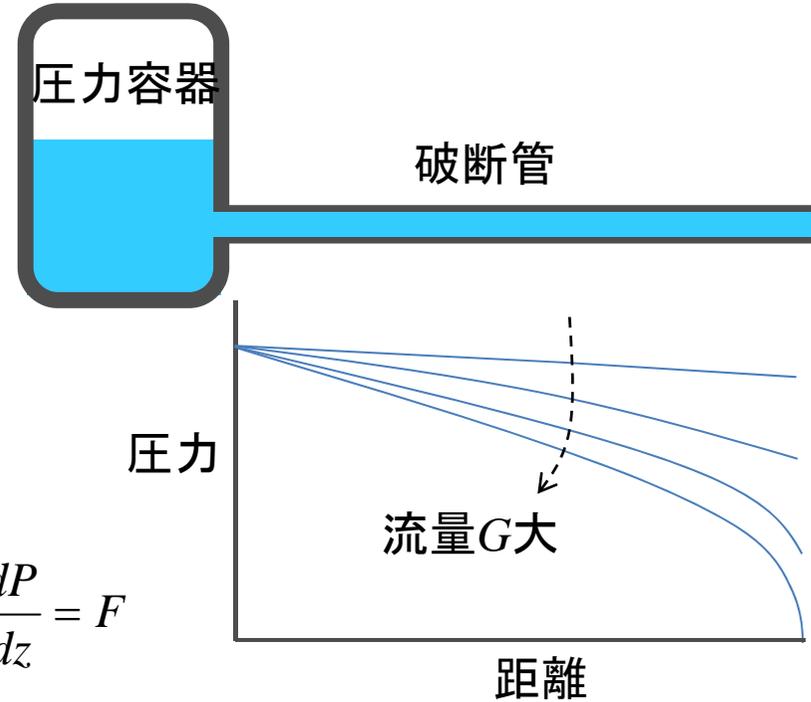
$$G = \sqrt{-\frac{1}{\left(\frac{dv}{dP}\right)}} = \rho c$$

均質二相流比容積

$$v_{2\phi} = x v_g + (1-x) v_l$$

スリップ二相流運動量fluxの比容積

$$v_{2\phi} = \frac{x^2}{\alpha} v_g + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)} v_l$$



臨界二相流のスリップ比評価

Moody	$S_{crit} = \sqrt[3]{\frac{\rho_l}{\rho_g}}$
Fauske	$S_{crit} = \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}}$
小笠原	(実験式)

圧力波と水撃

圧力波前後の関係式

$$u_2 - u_1 = G(v_1 - v_2)$$

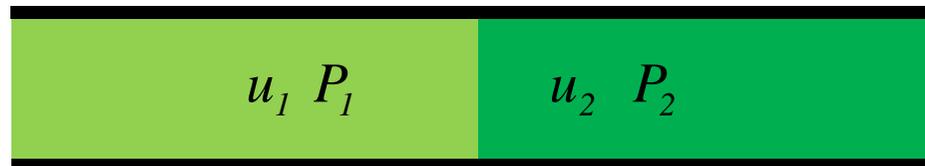
圧力波前後の速度変化は

$$du = Gdv = -\rho c \cdot \frac{v^2}{c^2} dP = -\frac{1}{\rho c} dP \quad \because \left(\frac{dv}{dP} \right) = -\frac{v^2}{c^2}$$

従って $\Delta P = -\rho c \Delta u$

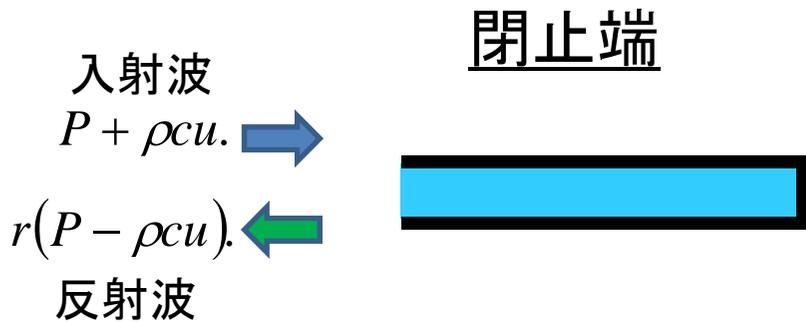
1m/sで動く水柱が衝突して停止したときの圧力上昇は

$$1000[\text{kg/m}^3] \times 1500[\text{m/s}] \times 1[\text{m/s}] = 1.5[\text{MPa}]$$



圧力波の反射と透過

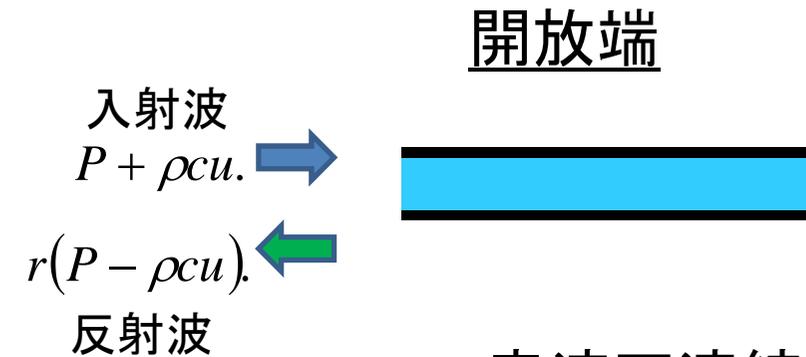
reflection transmission



端点で速度ゼロなので

$$u_{end} = \frac{[\rho cu]}{\rho c} - r \times \frac{[\rho cu]}{\rho c} = 0 \quad \text{つまり } r = 1$$

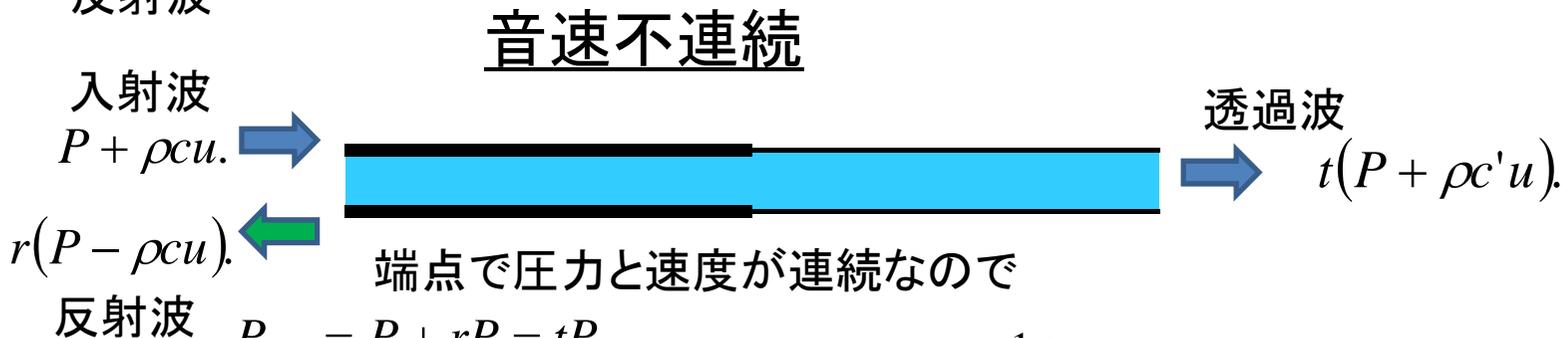
従って $P_{end} = P + r \times P = 2P$ 圧力は2倍



端点で圧力固定(ゼロ)なので

$$P_{end} = P + r \times P = 0 \quad \text{つまり } r = -1$$

従って $r \times P = -P$ 圧力は反転



端点で圧力と速度が連続なので

$$P_{end} = P + rP = tP$$

$$u_{end} = \frac{[\rho cu]}{\rho c} - r \times \frac{[\rho cu]}{\rho c} = t \times \frac{[\rho cu]}{\rho c'}$$

つまり

$$1 + r = t$$

$$1 - r = t \times \frac{c}{c'}$$

$$\text{従って } r = t - 1 = \frac{2c'}{c + c'} = \frac{c' - c}{c + c'}$$

透過と反射がある

質量保存則と運動量保存則の変形

質量保存則

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial z} = 0$$



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

↓ $d\rho = c^2 dP$ を用いて

$$\frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\rho}{c^2} \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

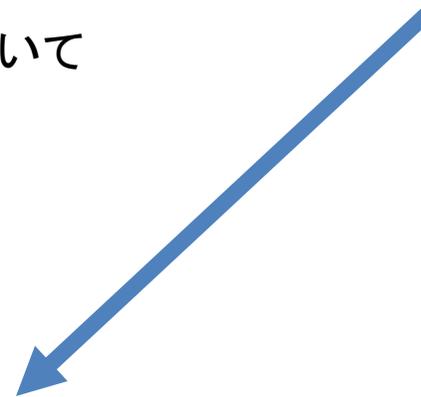
$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{\partial P}{\partial t} \right) + (u \pm c) \left(\frac{\partial u}{\partial z} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0$$

運動量保存則

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial z} = 0$$

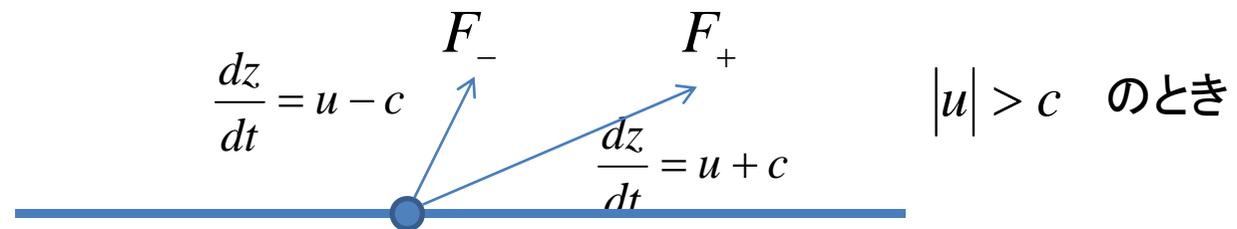
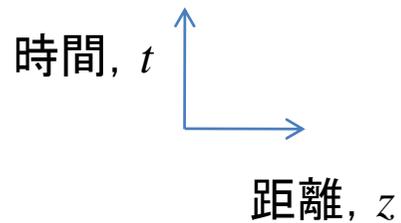
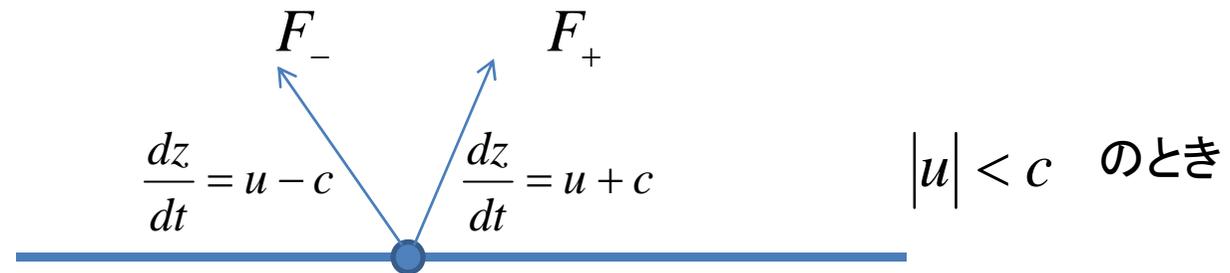


$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = 0$$

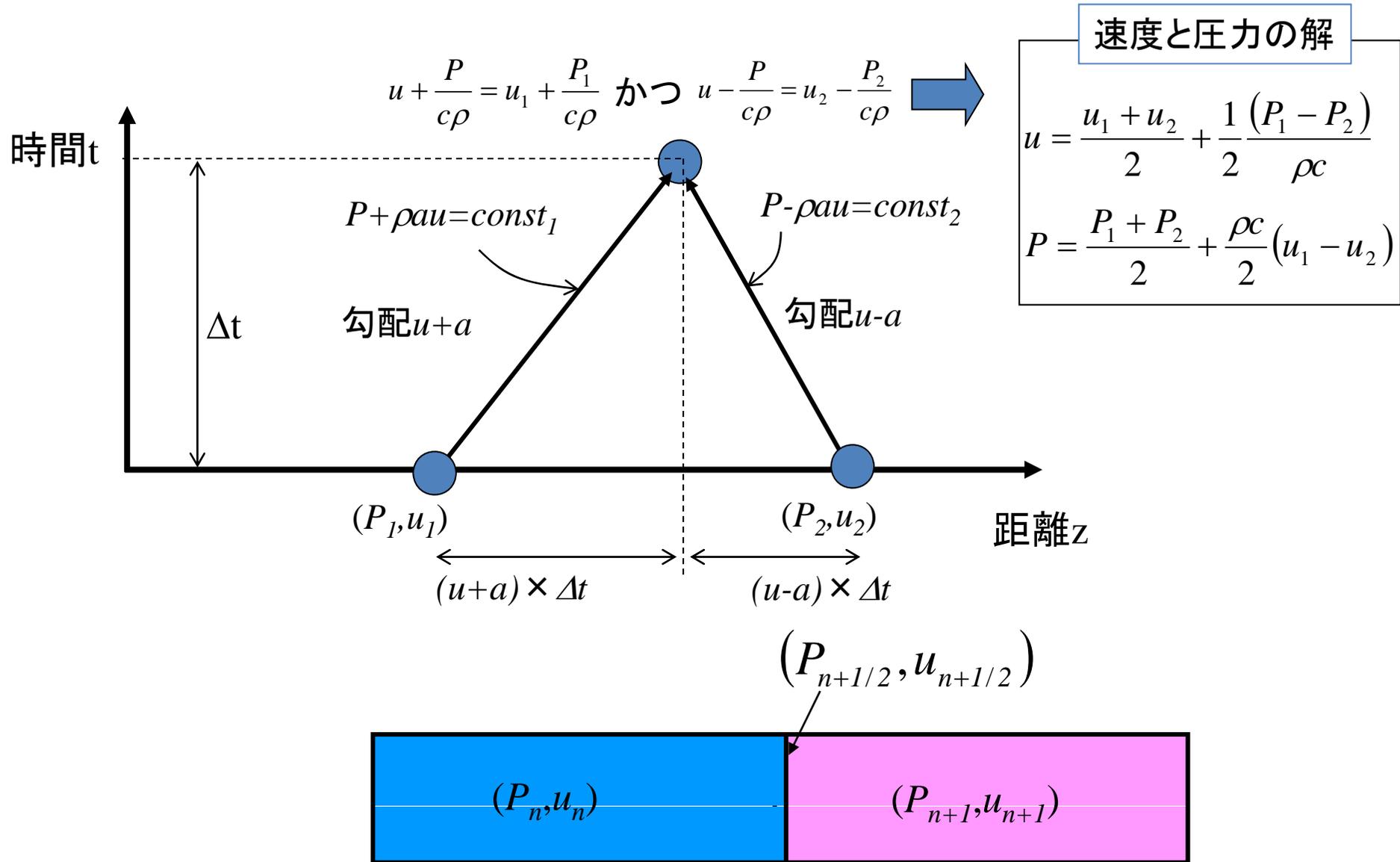


$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{\partial P}{\partial t} \right) + (u \pm c) \left(\frac{\partial u}{\partial z} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{を二つのfluxに分ける}$$

$$\frac{\partial F_+}{\partial t} + (u + c) \frac{\partial F_+}{\partial z} = 0 \quad \text{と} \quad \frac{\partial F_-}{\partial t} + (u - c) \frac{\partial F_-}{\partial z} = 0 \quad \text{ここで} \quad F_{\pm} = u \pm \frac{1}{\rho c} P$$



特性曲線法による過渡解析



Godunov法の考え方

質量保存則

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial z} = 0$$

運動量保存則

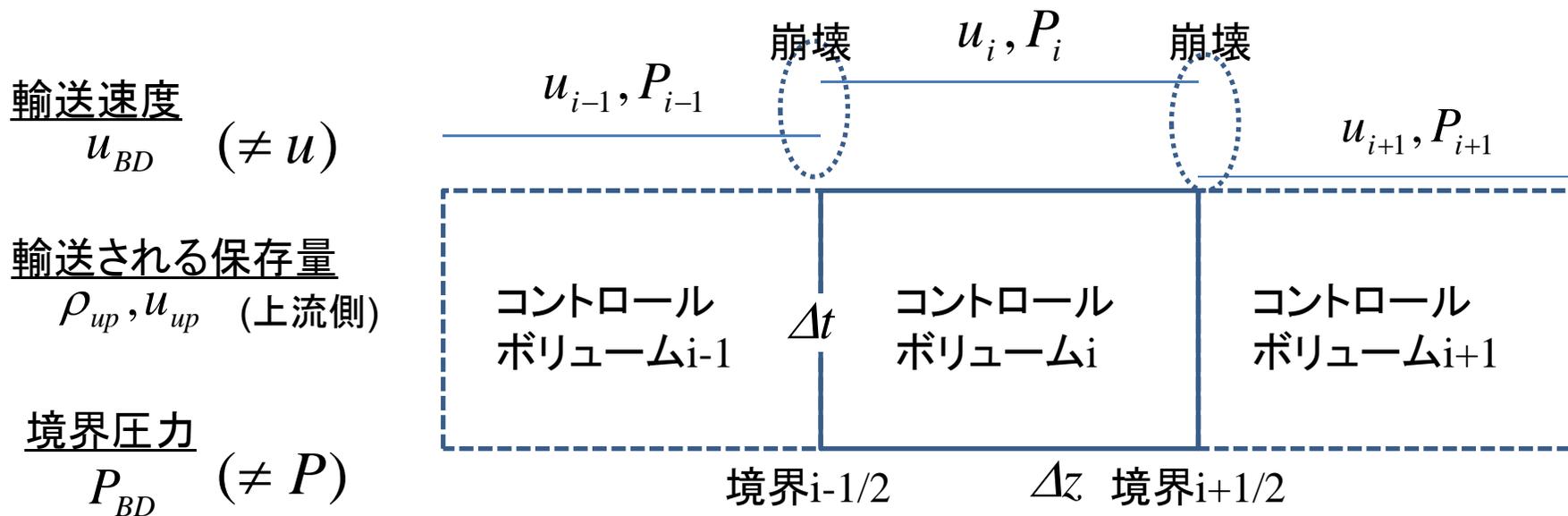
$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + P)}{\partial z} = 0$$

$$\rho_i(t + \Delta t) = \rho_i(t) + \left\{ (\rho u_{BD})_{i-1/2} - (\rho u_{BD})_{i+1/2} \right\} \frac{\Delta t}{\Delta z}$$

$$\rho u_i(t + \Delta t) = \rho u_i(t) + \left\{ (P_{BD} + \rho u u_{BD})_{i-1/2} - (P_{BD} + \rho u u_{BD})_{i+1/2} \right\} \frac{\Delta t}{\Delta z}$$

(u>cのとき上流側の値)
ρ, u, P(ρ)

BD: Breakdown(崩壊) $u_{BD} = \frac{u_1 + u_2}{2} + \frac{1}{2} \frac{(P_1 - P_2)}{\rho c}$ $P_{BD} = \frac{P_1 + P_2}{2} + \frac{\rho c}{2} (u_1 - u_2)$



圧縮性二流体モデルの基礎方程式

・質量保存則
$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k = 0$$

・運動量保存則
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k = & -\alpha_k \nabla P + \mathbf{F}_{ik} + \mathbf{F}_{wk} \\ & + \mathbf{F}_{vk} + \nabla \cdot \alpha_k \mu_k \nabla \mathbf{u}_k + \alpha_k \rho_k \mathbf{g} \end{aligned}$$

t:時間(s), u:速度(m/s), P:圧力(Pa), g:重力加速度 (m/s²), F: 単位体積当りの外力(N/m³), α:体積比, ρ:密度(kg/m³), μ:粘性(N·s/m)

(添字) k:相(気体g,液体ℓ), i:界面, w:壁, v:付加質量

相変化なし、エントロピー保存を仮定したときエネルギー保存則は不要

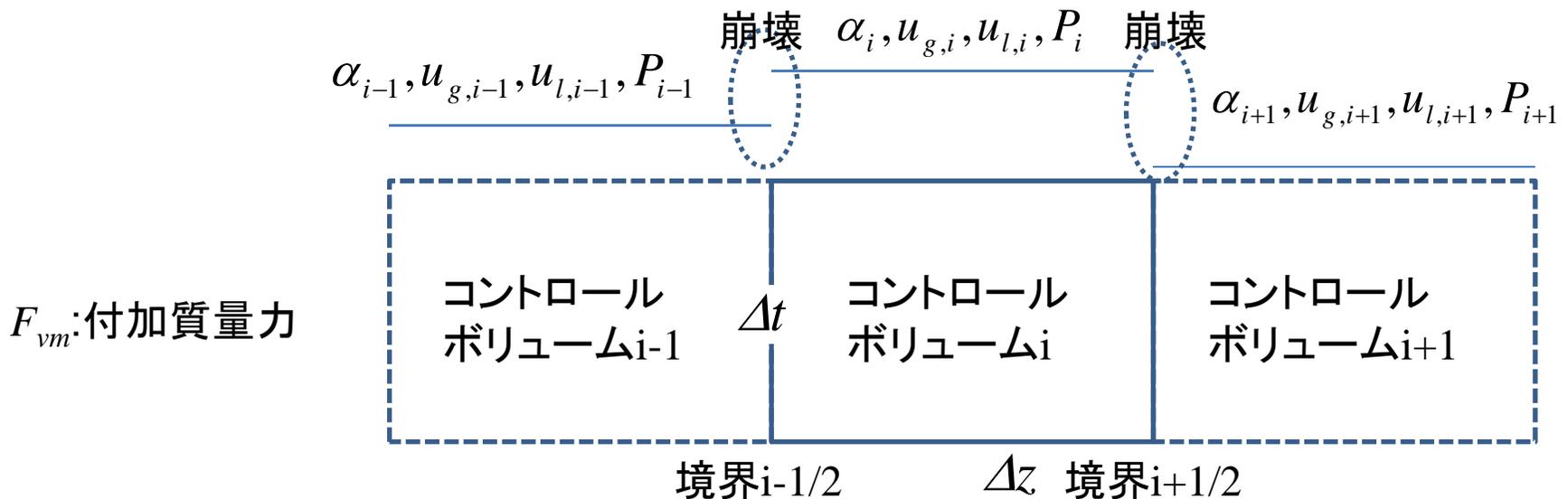
二流体モデルへのGodunov法の拡張

質量保存則 $\frac{\partial \alpha \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \rho_g u_g}{\partial z} = 0$ (気体)

$\frac{\partial (1-\alpha) \rho_l}{\partial t} + \frac{\partial (1-\alpha) \rho_l u_l}{\partial z} = 0$ (液体)

運動量保存則 $\frac{\partial \alpha \rho_g u_g}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \rho_g u_g^2}{\partial z} + \alpha \frac{\partial P}{\partial z} - F_{vm} = 0$ (気体)

$\frac{\partial (1-\alpha) \rho_l u_l}{\partial t} + \frac{\partial (1-\alpha) \rho_l u_l^2}{\partial z} + (1-\alpha) \frac{\partial P}{\partial z} + F_{vm} = 0$ (液体)



Godunov法の崩壊の関係式をそのまま使いたい

$$u_{BD} = \frac{u_1 + u_2}{2} + \frac{1}{2} \frac{(P_1 - P_2)}{\rho c} \quad P_{BD} = \frac{P_1 + P_2}{2} + \frac{\rho c}{2} (u_1 - u_2)$$

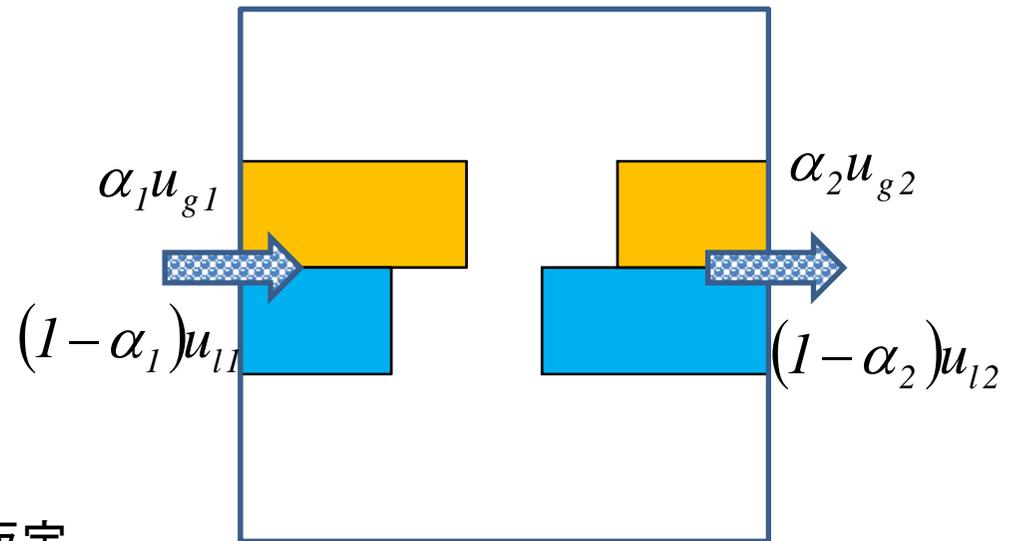
二流体モデルの二速度を一つの代表速度に置き換える

$\frac{\rho c}{2} (u_1 - u_2)$ の項は水撃に相当し
 $(u_1 - u_2)$ は衝突速度

コントロールボリューム内二相流体の衝突

二相流体の衝突は、体積速度で判断できる

$$j = \alpha u_g + (1 - \alpha) u_l$$



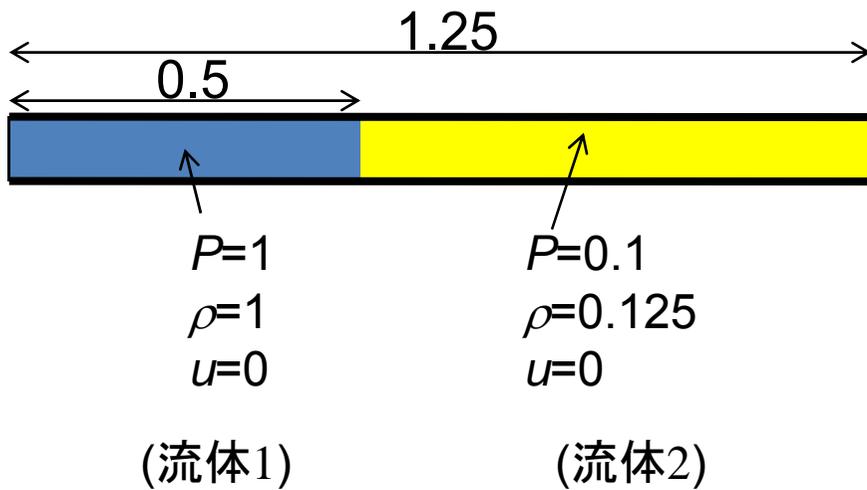
そこで、下記のように
 二流体モデルの崩壊の関係式を仮定

$$j_{BD} = \frac{j_1 + j_2}{2} + \frac{1}{2} \frac{(P_1 - P_2)}{\rho_{2\phi} c_{2\phi}} \quad P_{BD} = \frac{P_1 + P_2}{2} + \frac{\rho_{2\phi} c_{2\phi}}{2} (j_1 - j_2)$$

Benchmark Problem

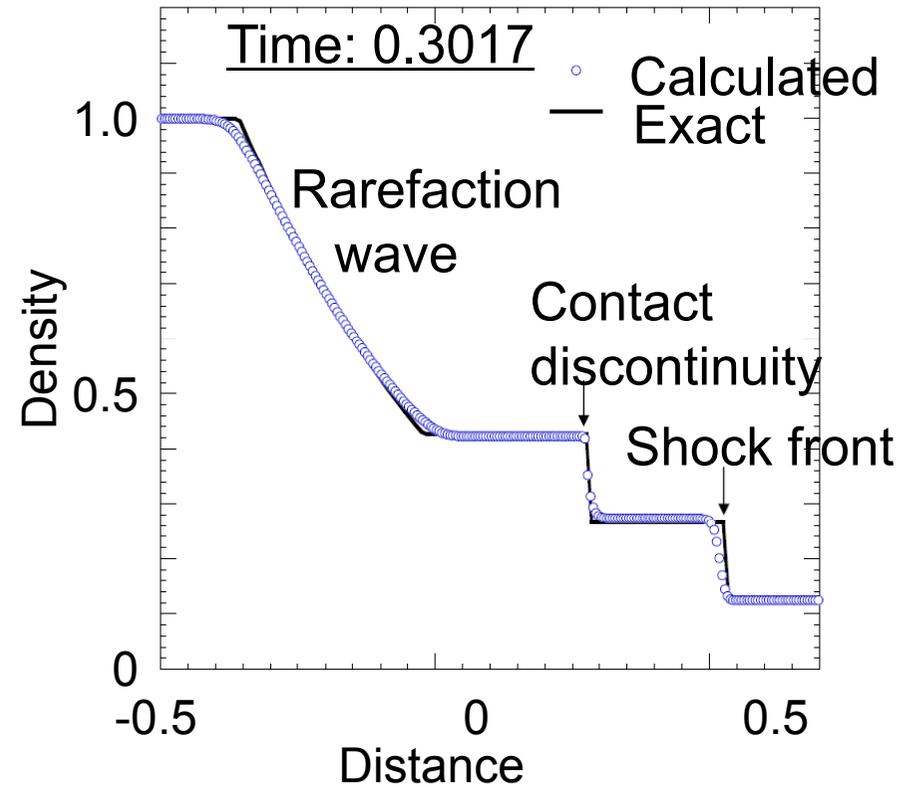
(Sod's shock tube)

Initial state



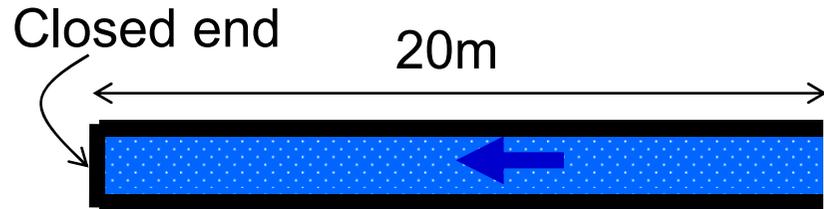
Time step: $\Delta t = 1.0 \times 10^{-3}$

Number of finite volumes: 200



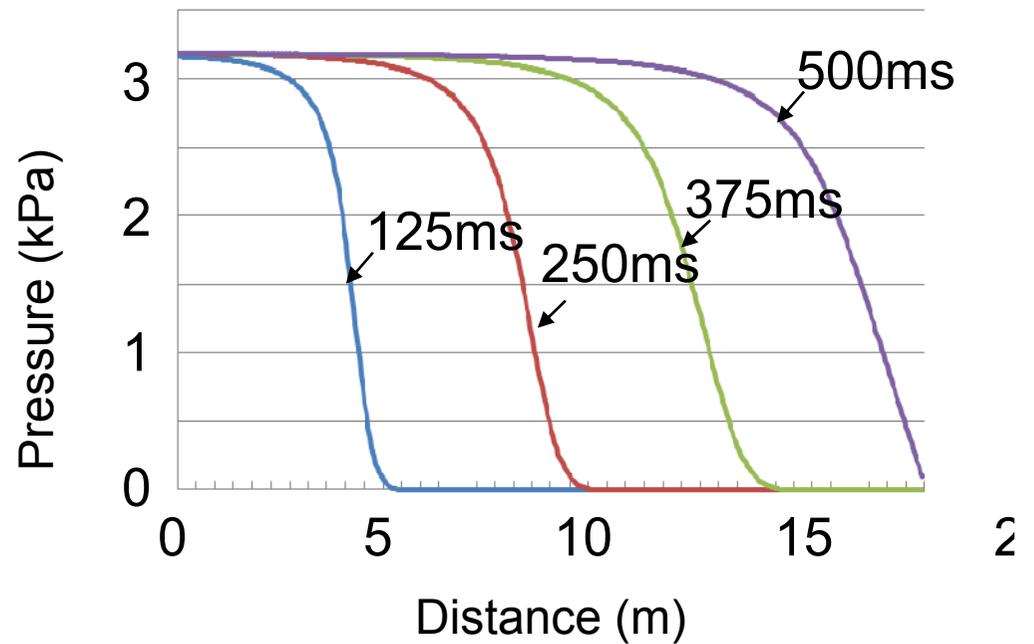
Benchmark Problem

(Hydraulic hammer in two-phase flow)



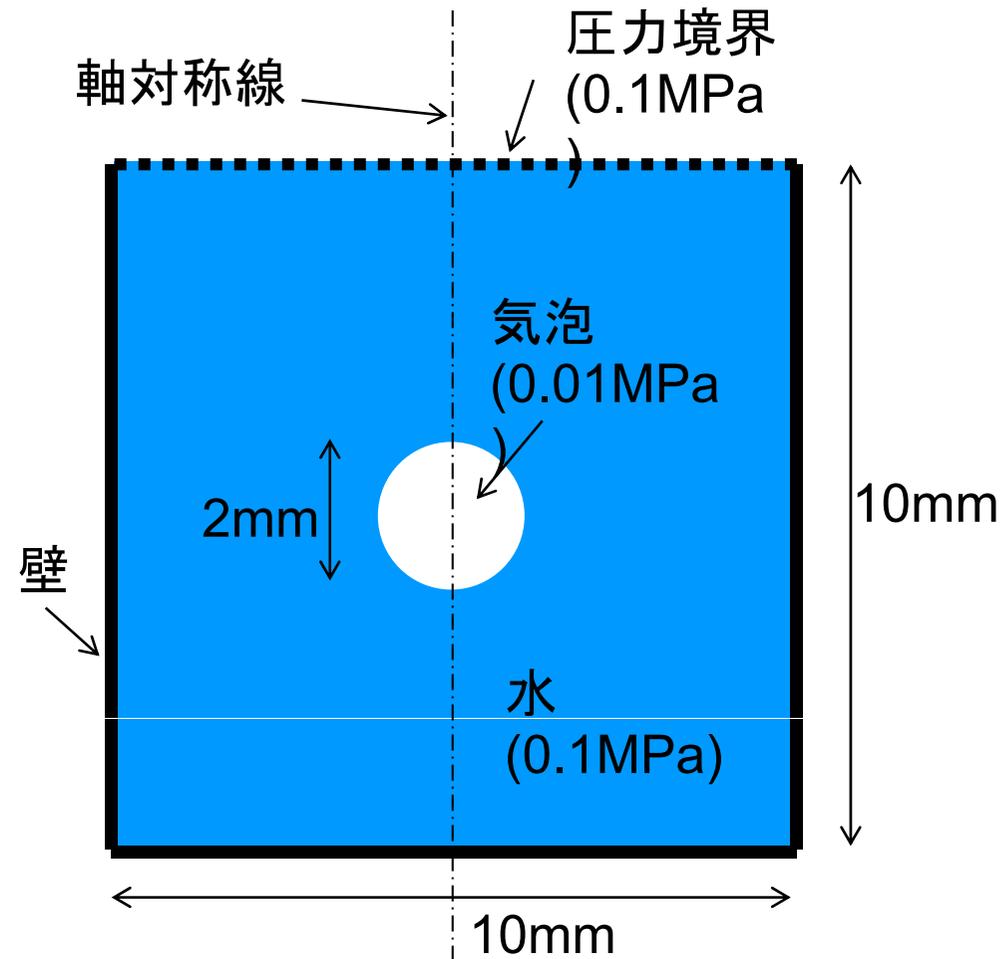
Uniform air-water mixture

Air-water
Void fraction 10%
Velocity 0.1m/s



	Theoretical	Calculated
Wave propagation velocity (m/s)	35.3	36.4
Pressure rise (kPa)	3.18	3.20

低圧球形気泡崩壊の解析条件

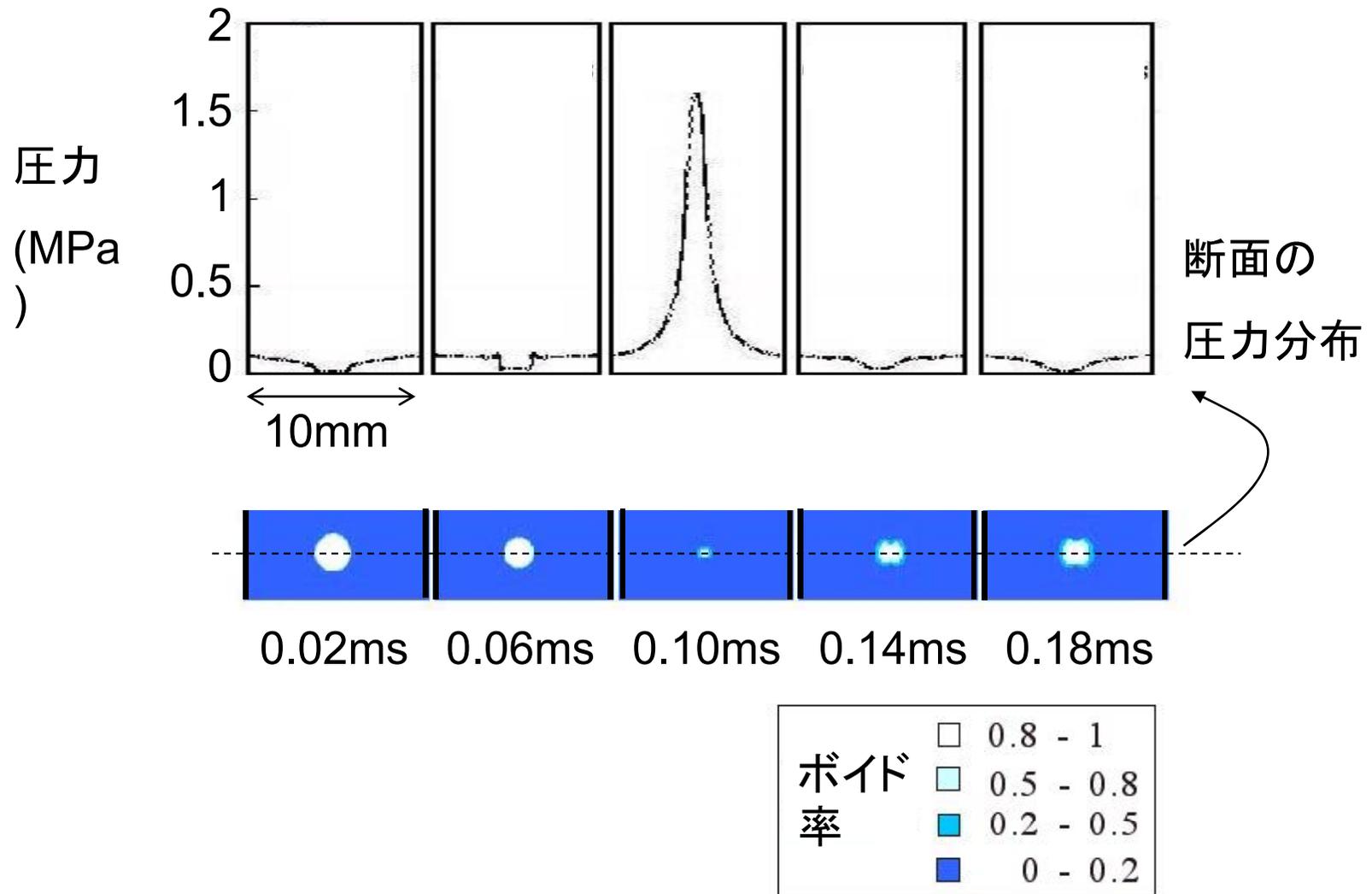


有限体積数: 5,000 (0.1mm × 0.1mm)

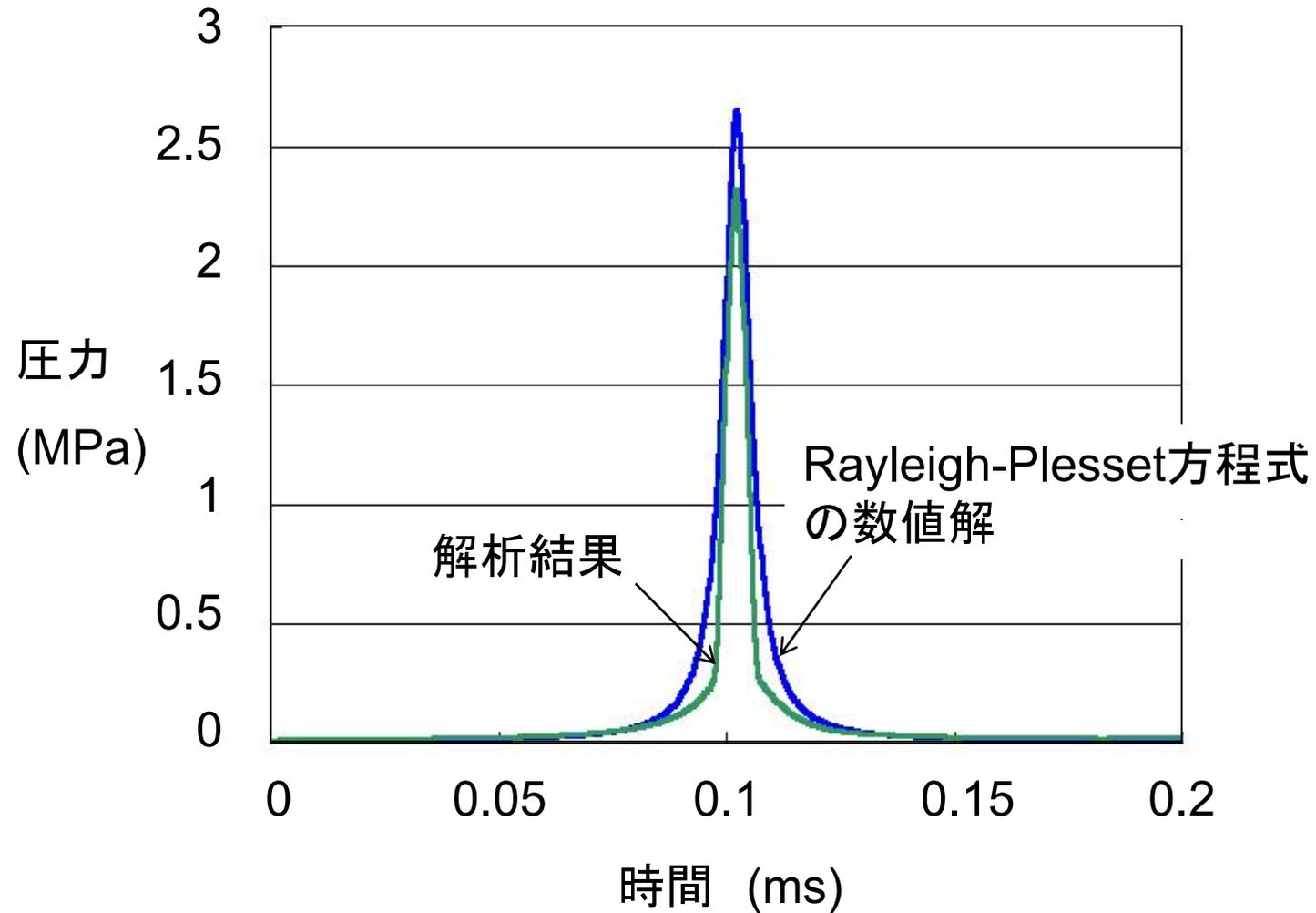
タイムステップ: 10^{-8} s

空気は理想気体の状態方程式に従うと仮定

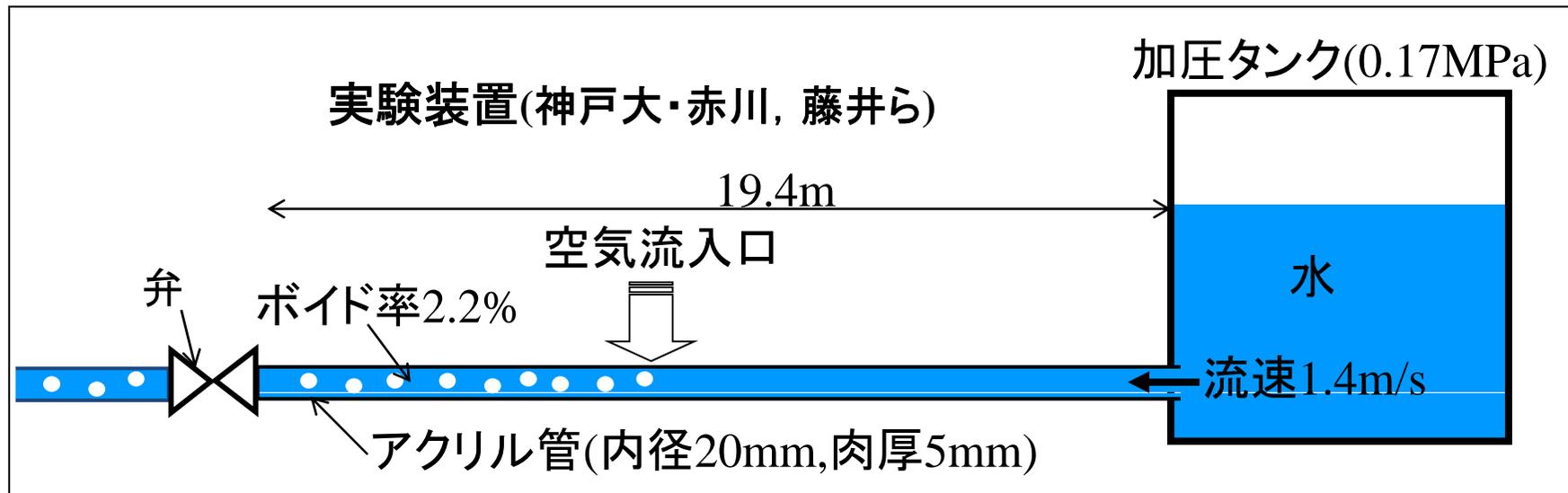
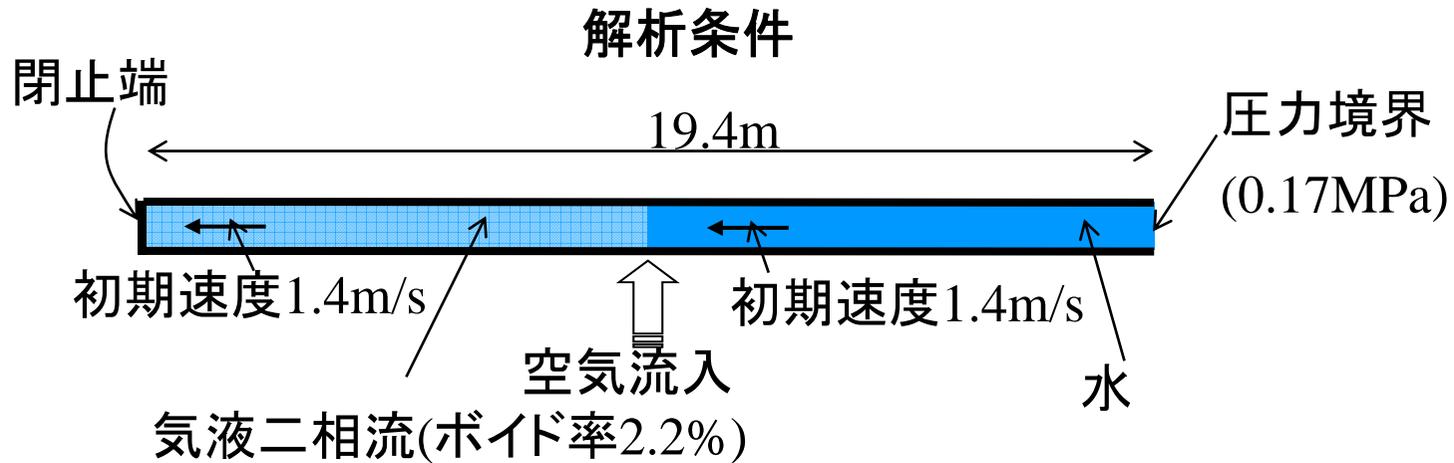
圧力及びボイド率分布の過渡解析結果



気泡中心圧力の解析結果と理論値との比較

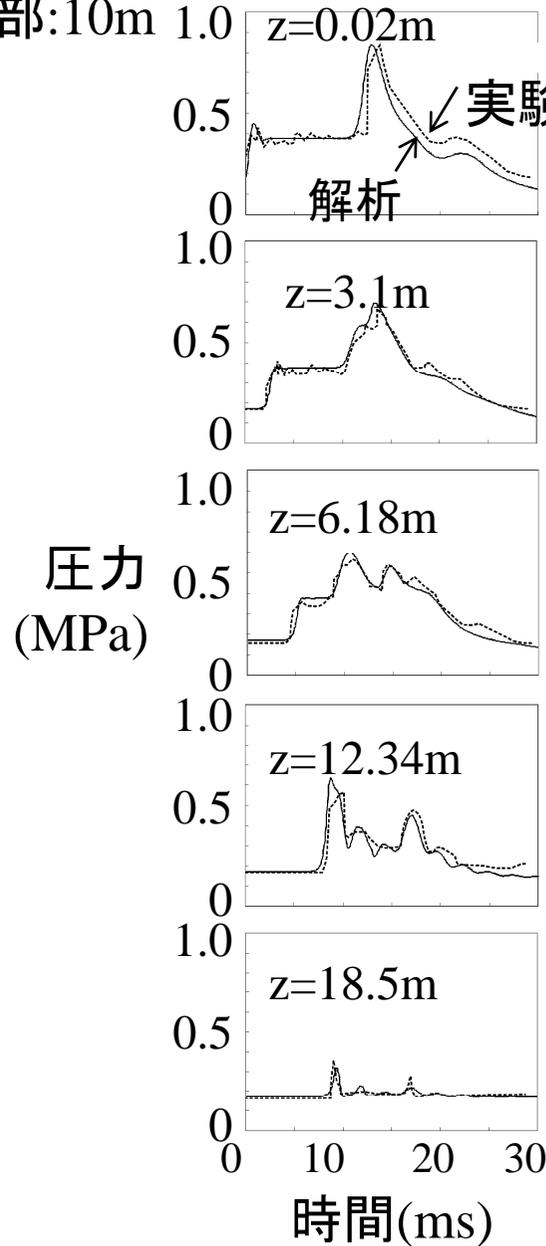


単相/気液二相共存配管内水撃の実験解析

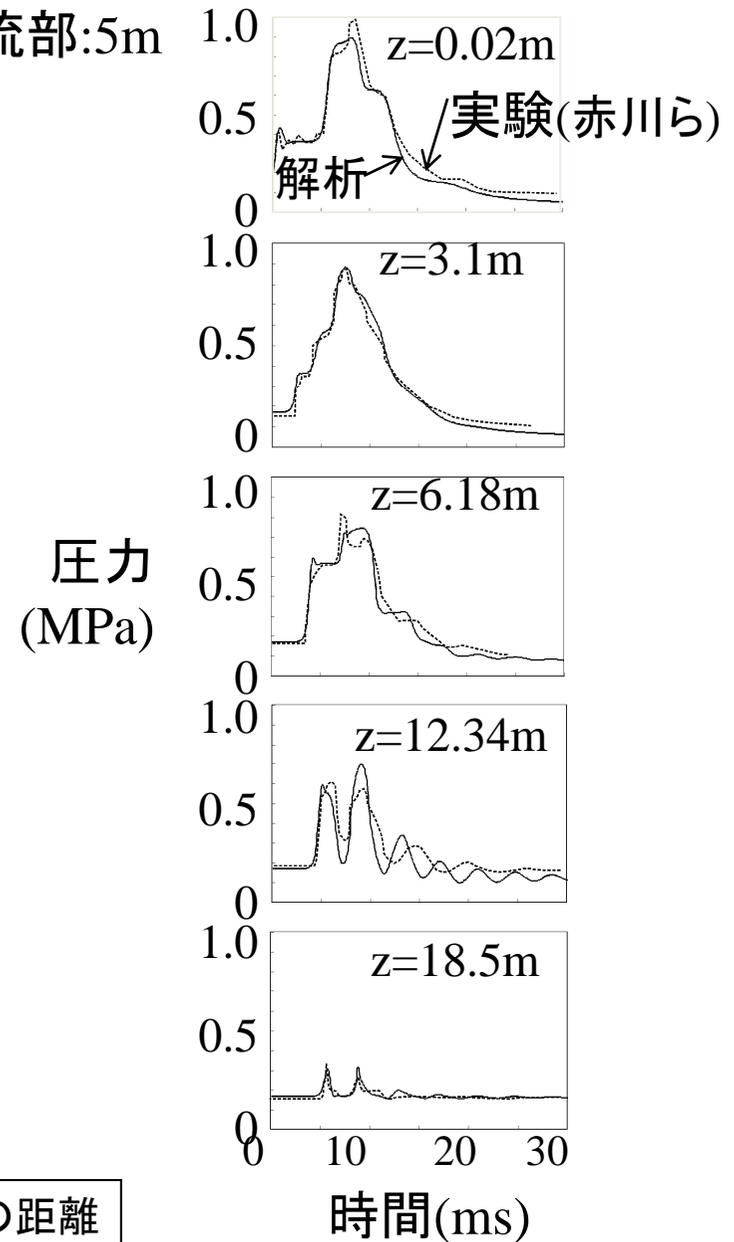


単相/二相共存配管内水撃の解析結果

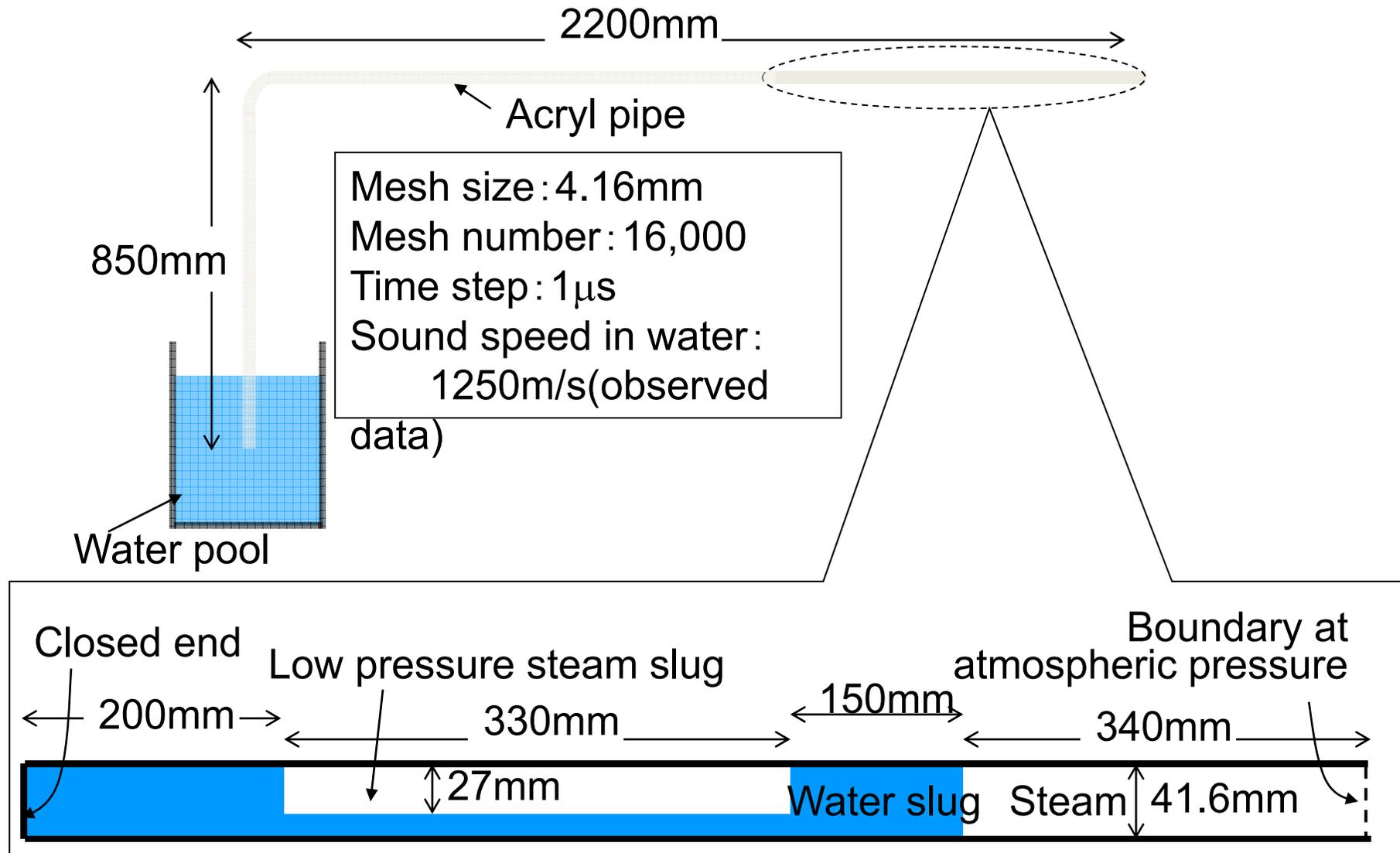
(a)二相流部:10m



(b)二相流部:5m

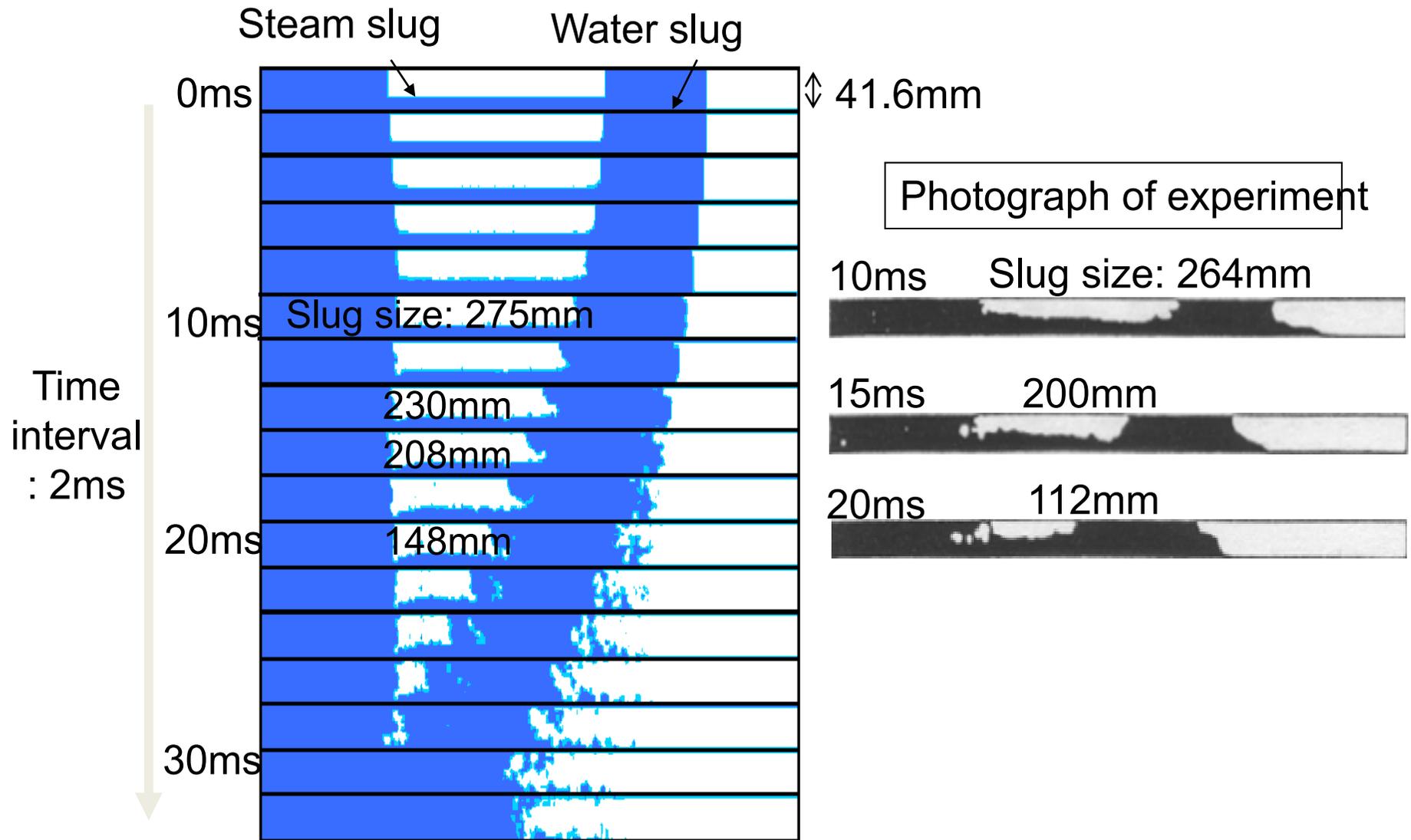


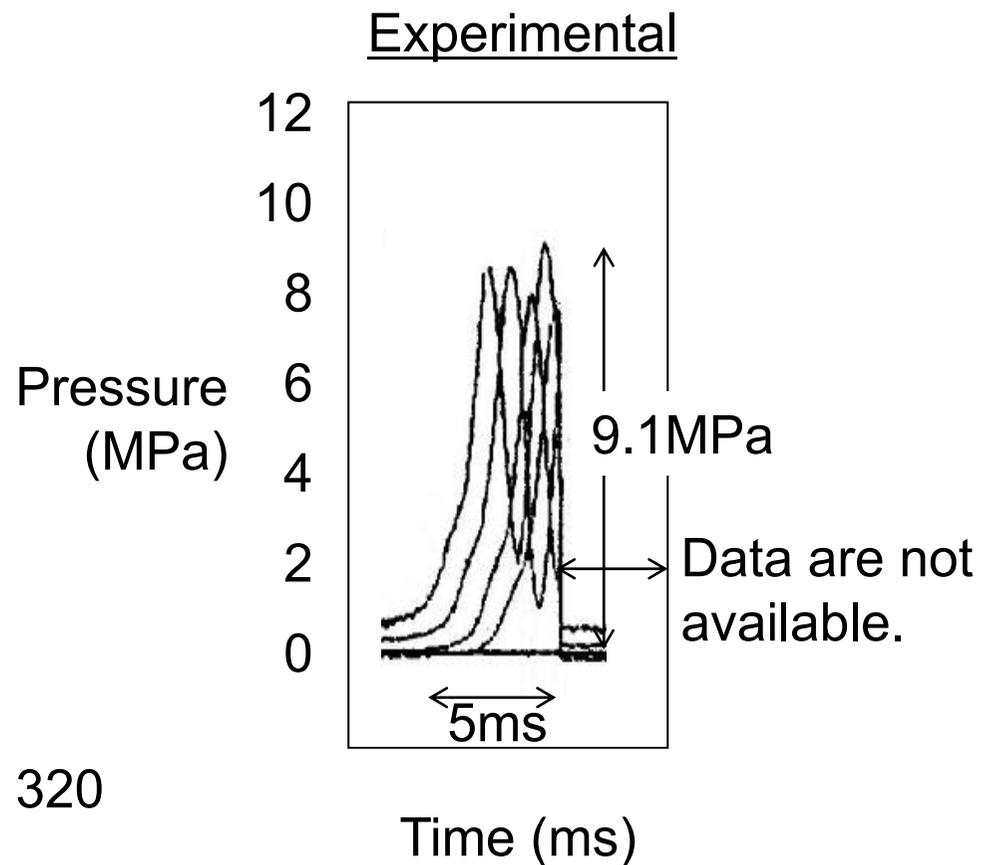
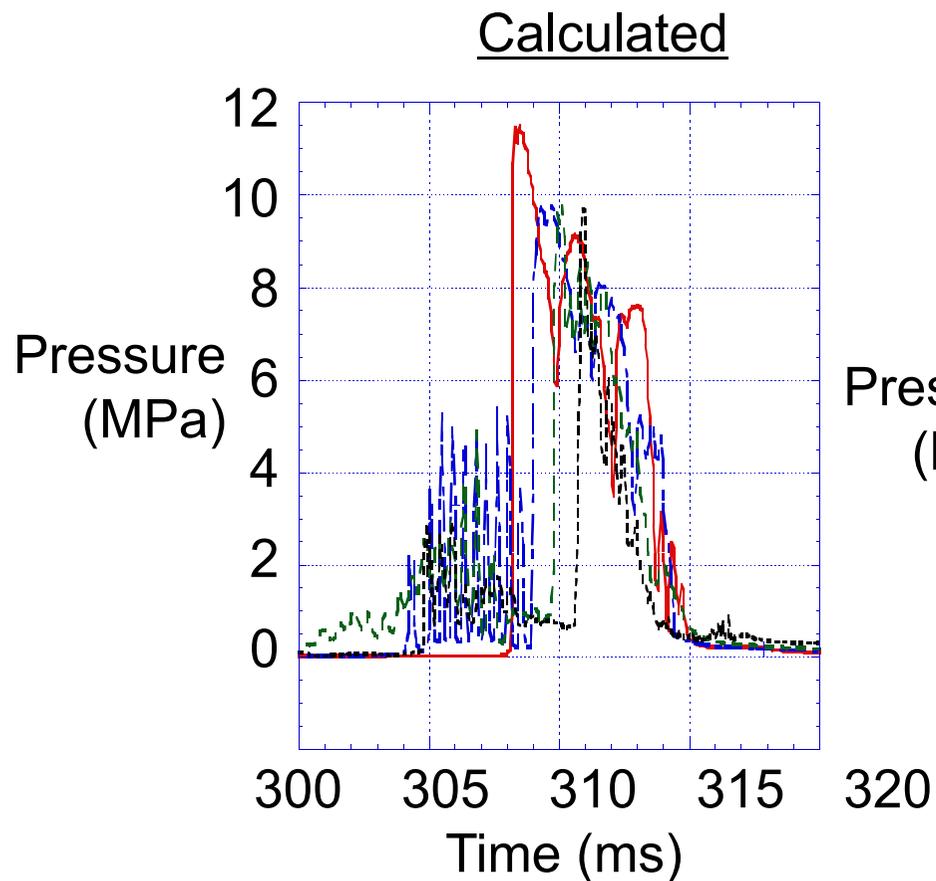
気泡凝縮水撃の解析条件



Aya, I., et al., ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conf. (1991)

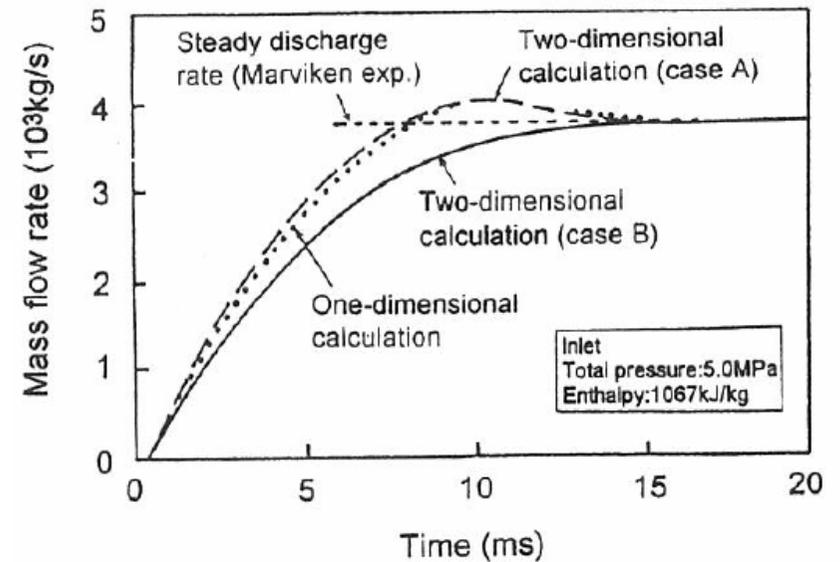
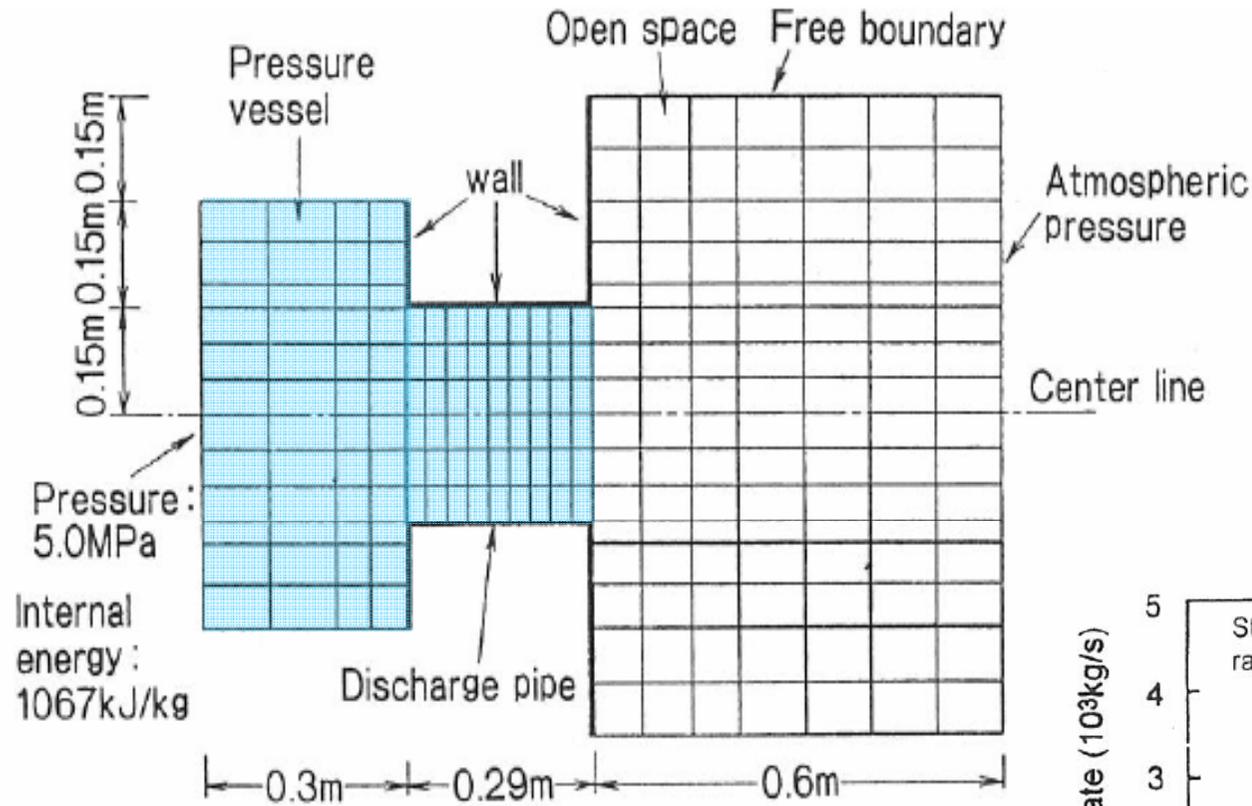
凝縮する蒸気スラグの過渡解析結果

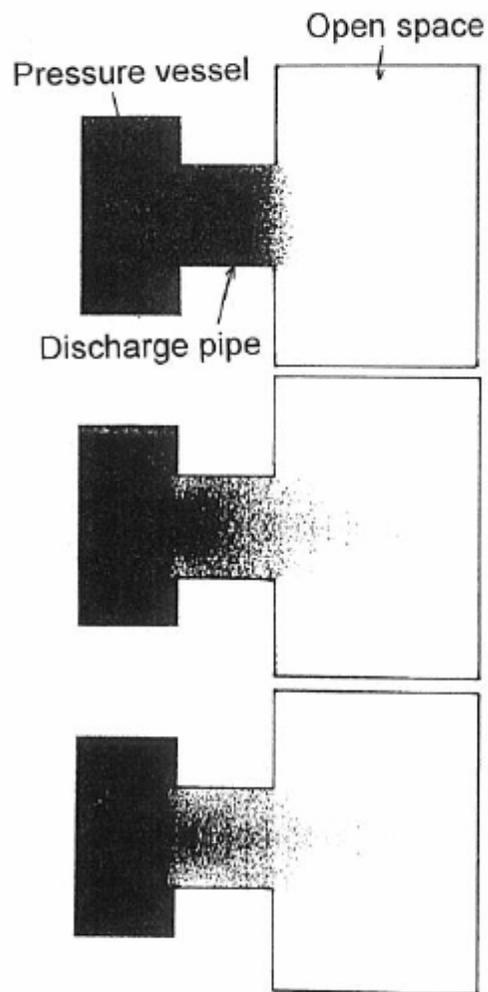




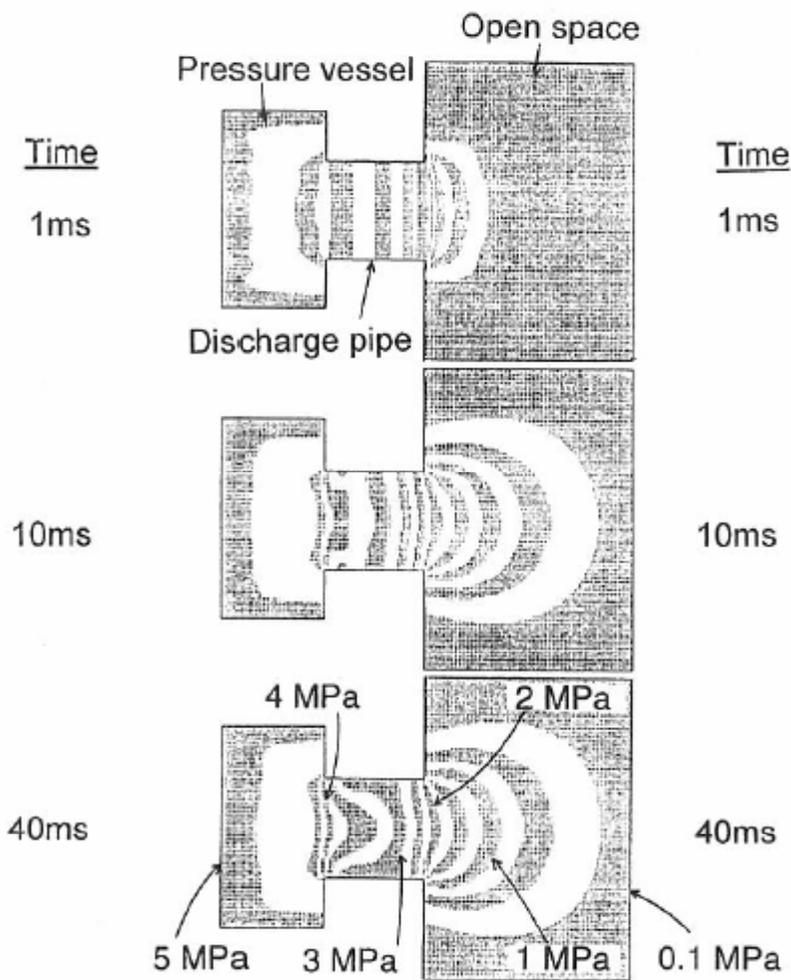
Data from 5 pressure gauges near slug collapse position,
Distance between pressure gauges: 0.1m

大口径臨界二相流の解析





(a) Void fraction distribution

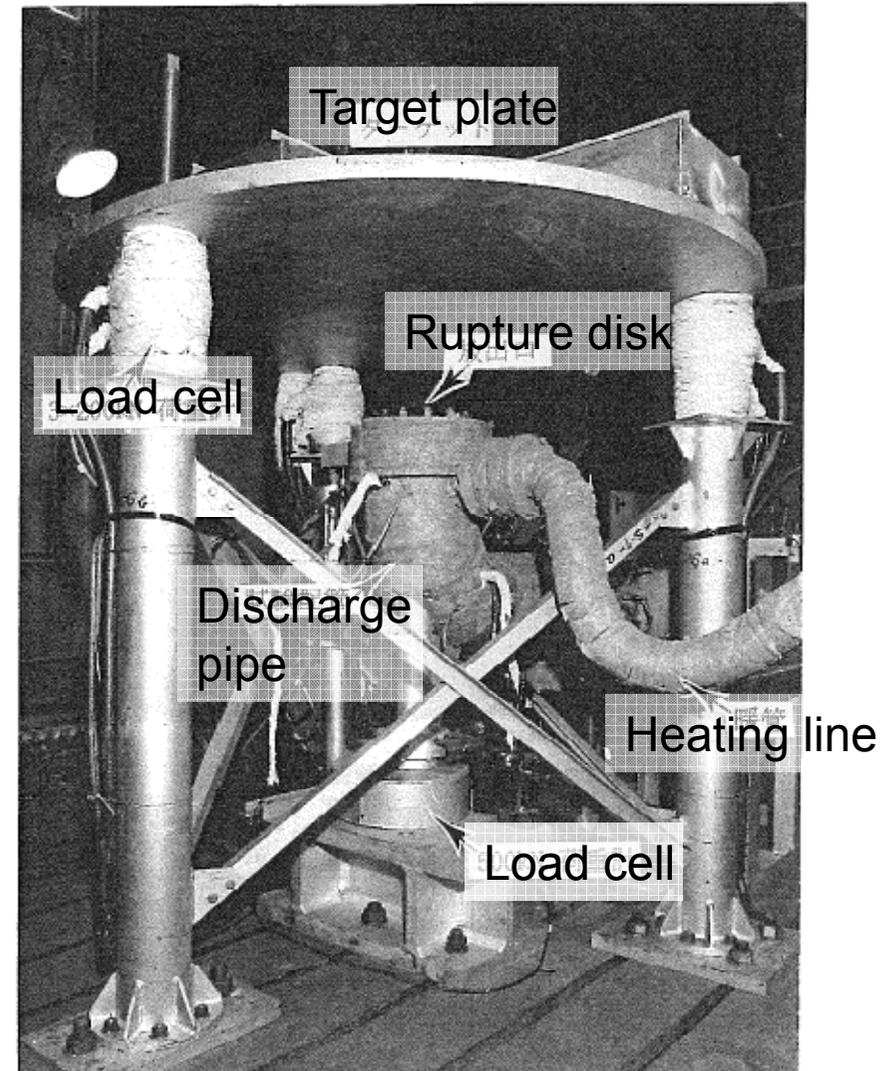
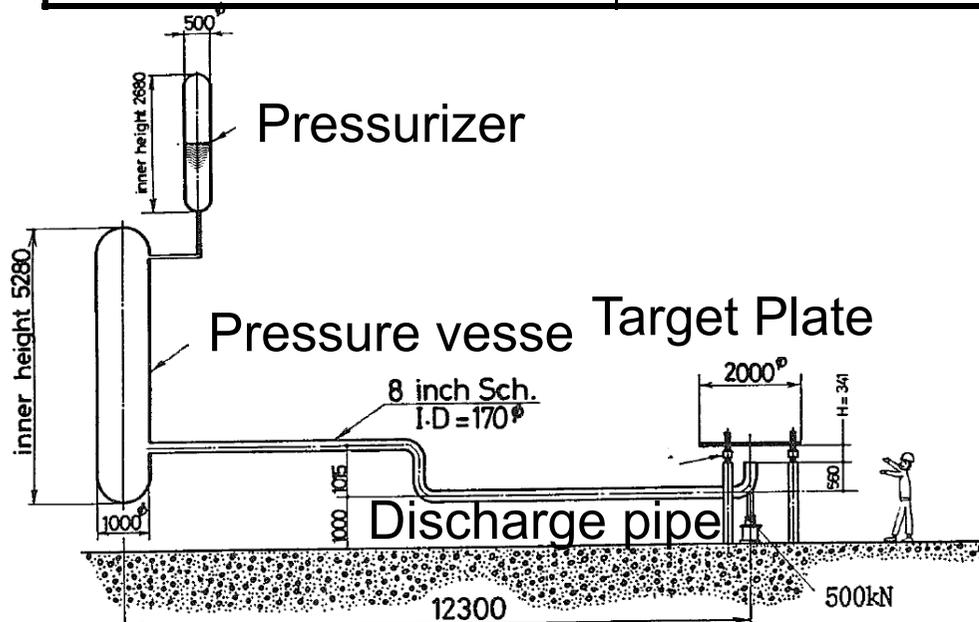


(b) Pressure distribution

Two-Phase Jet Experimental Facility of JAERI*

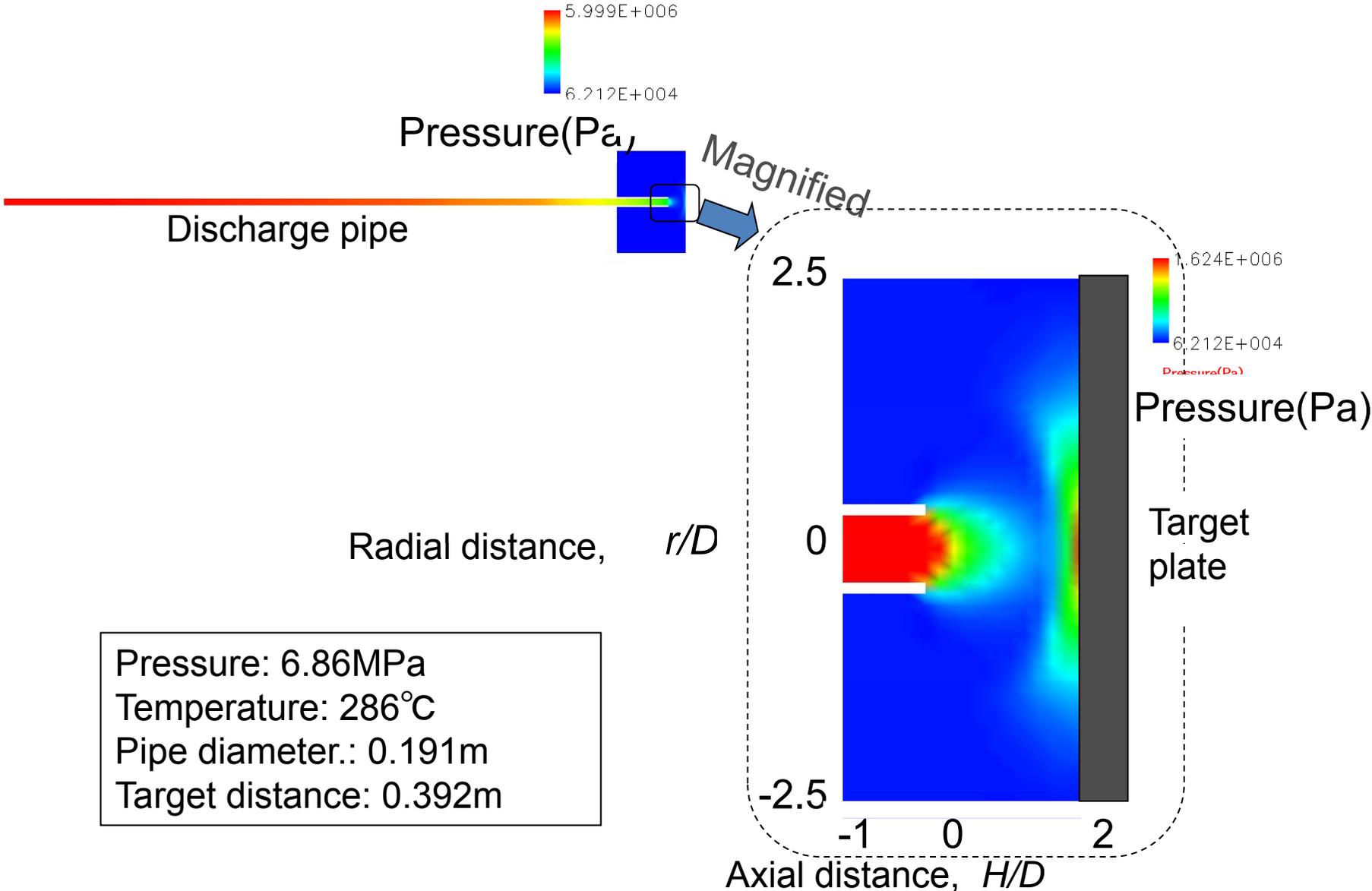
Experimental conditions

Reactor type		BWR	PWR
Water	Pressure (MPa)	6.8	15.5
	Temperature (°C)	285	325
Pipe diameter, D (mm)		90-190	
Distance to target, H/D		1, 2, 5, 18	

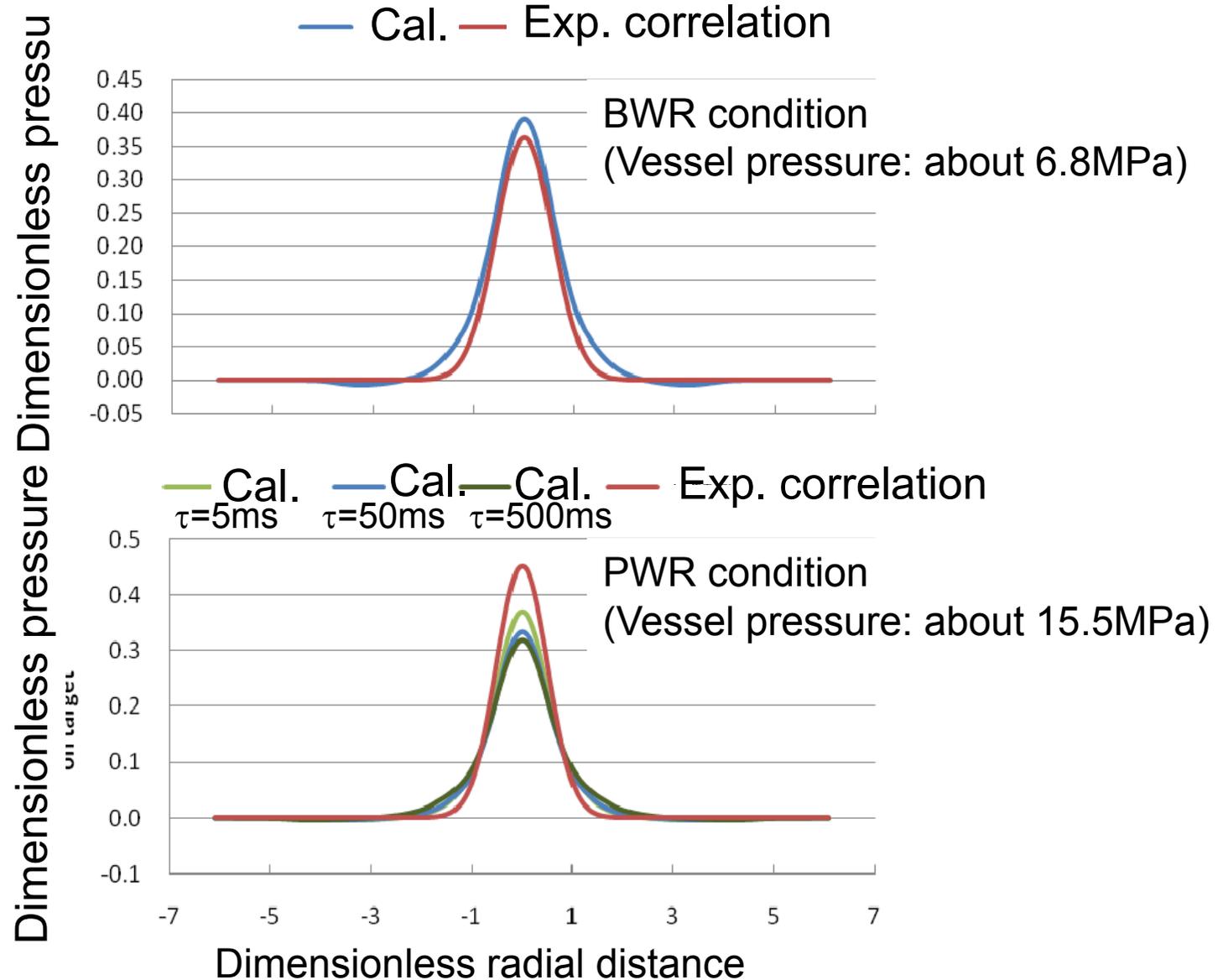


*Isozaki, T., Miyazono, S., "Experimental Study of Jet Discharge Test Results under BWR/PWR Loss of Coolant Accident Conditions," Nucl. Eng. Design, 96, pp.1-9 (1988)

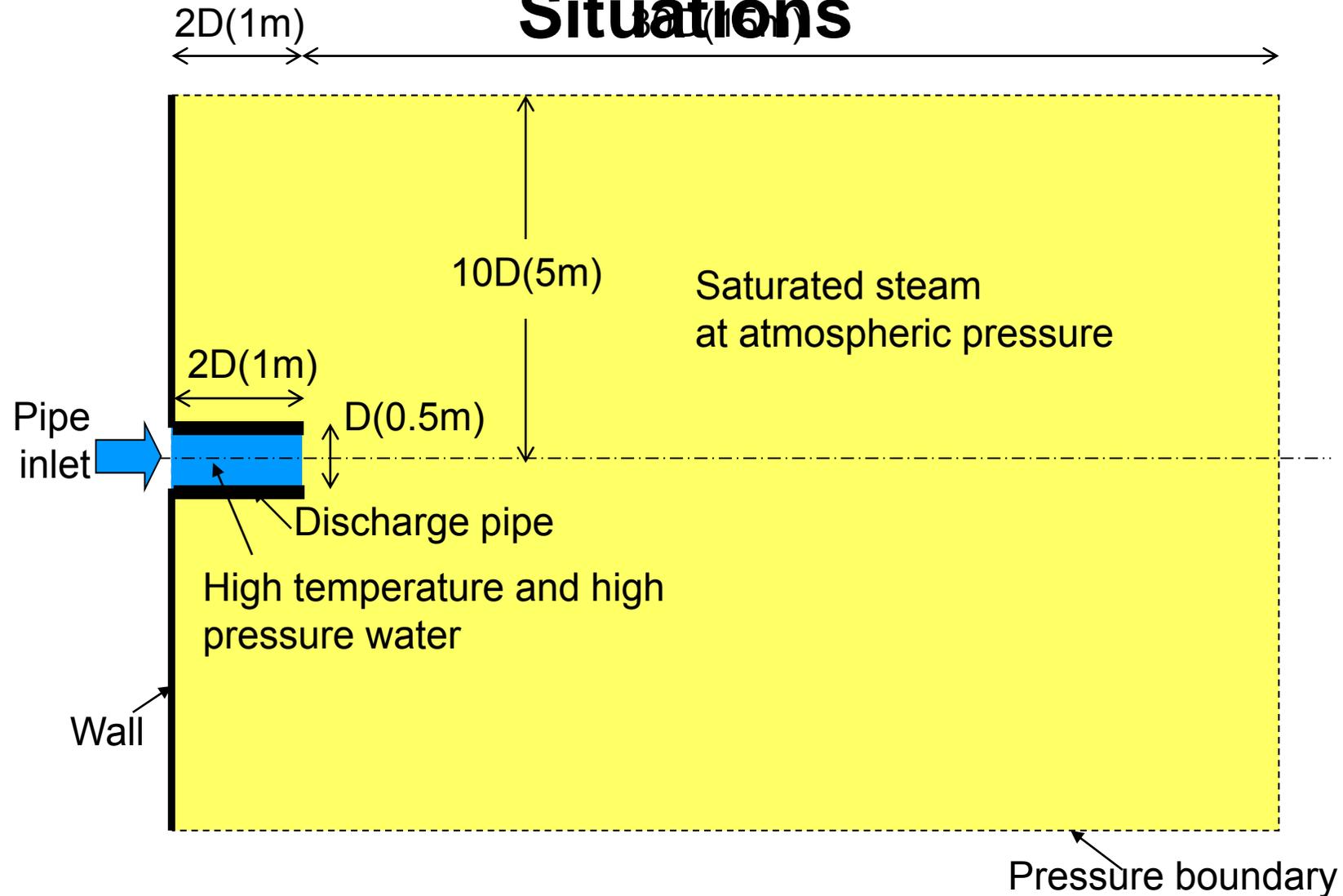
Calculated Pressure Distribution



Pressure Distribution on the Target Plate

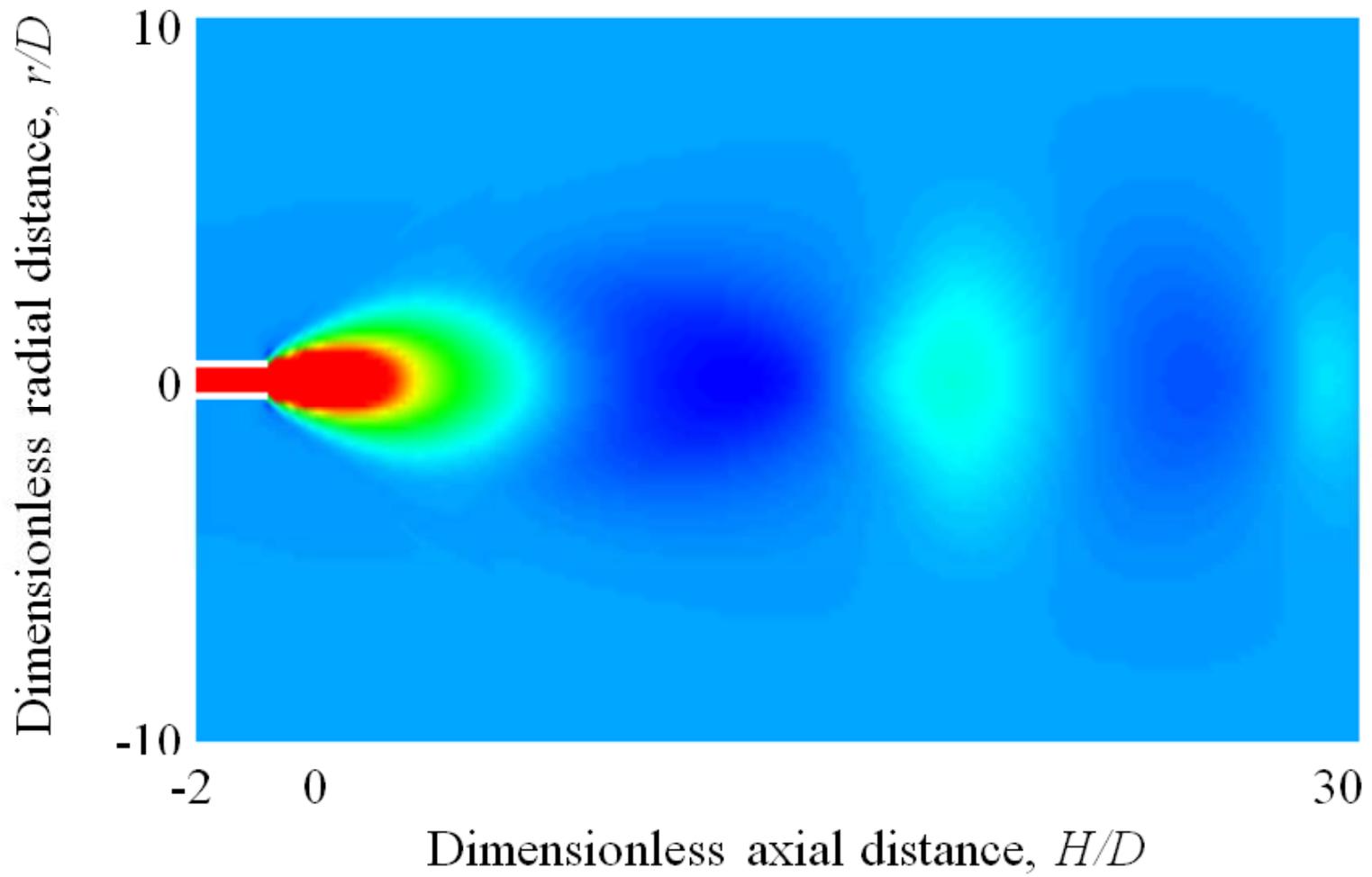
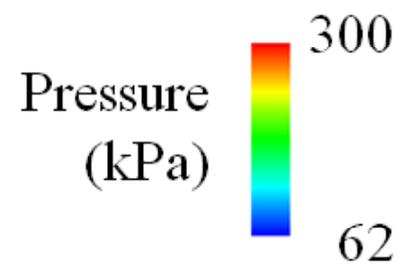


Free Jet Calculation Condition in Actual Reactor Thermal Situations



Calculated Pressure Contour in Free Jet

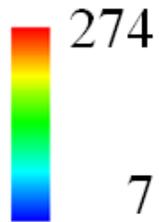
(PWR condition)



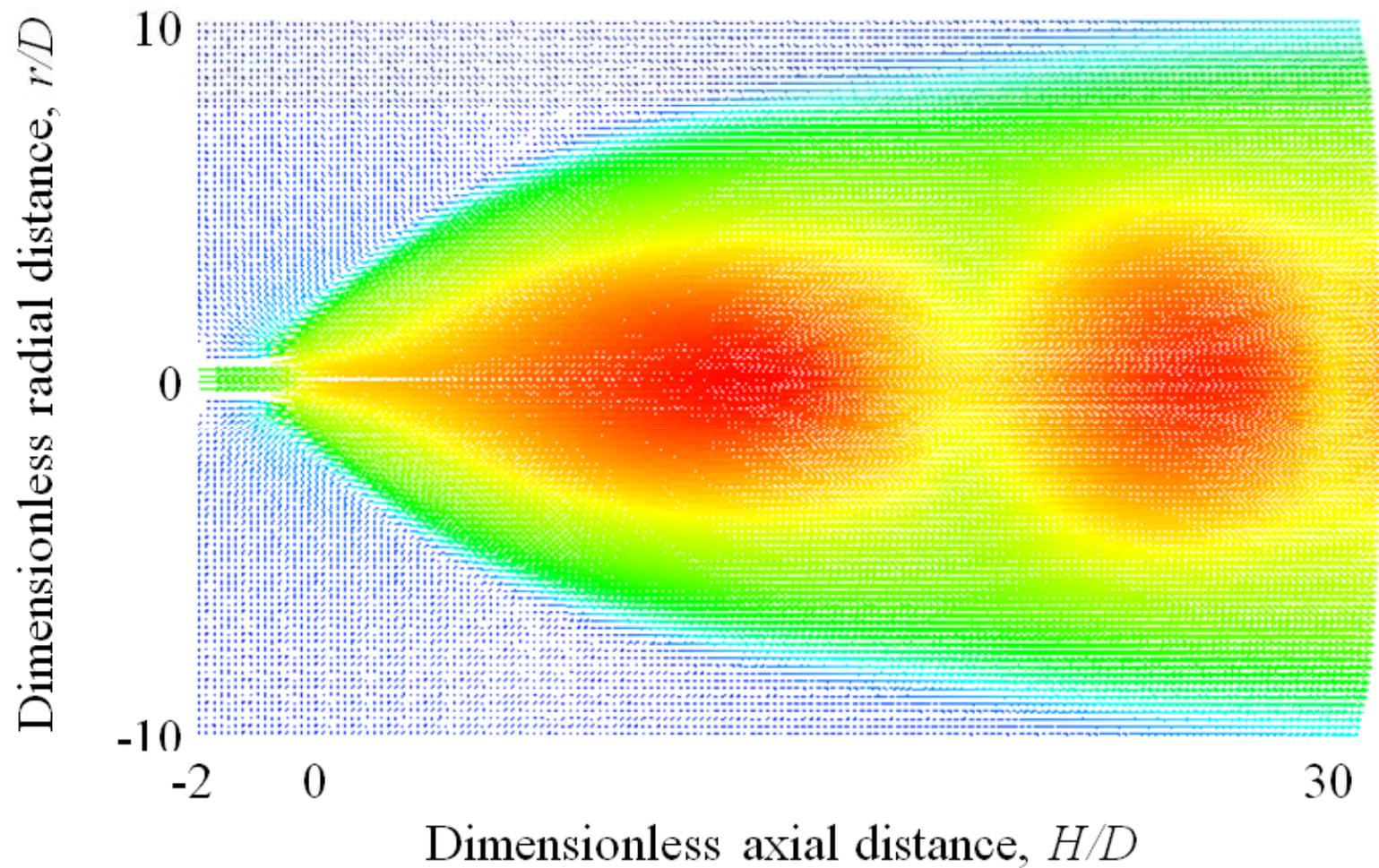
Calculated Volumetric Velocity in Free Jet

(PWR condition)

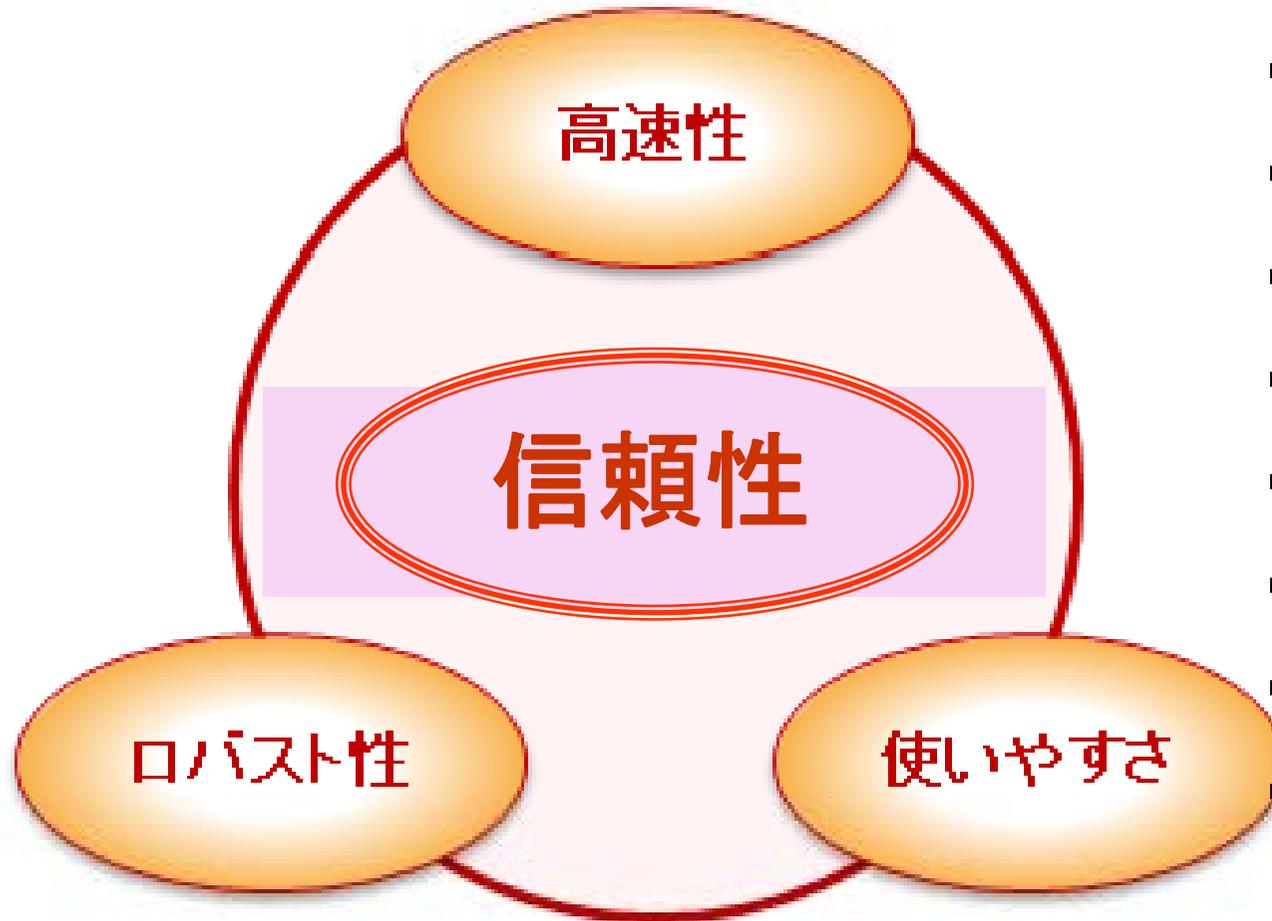
Volumetric velocity (m/s)



274
7



汎用コードの特徴



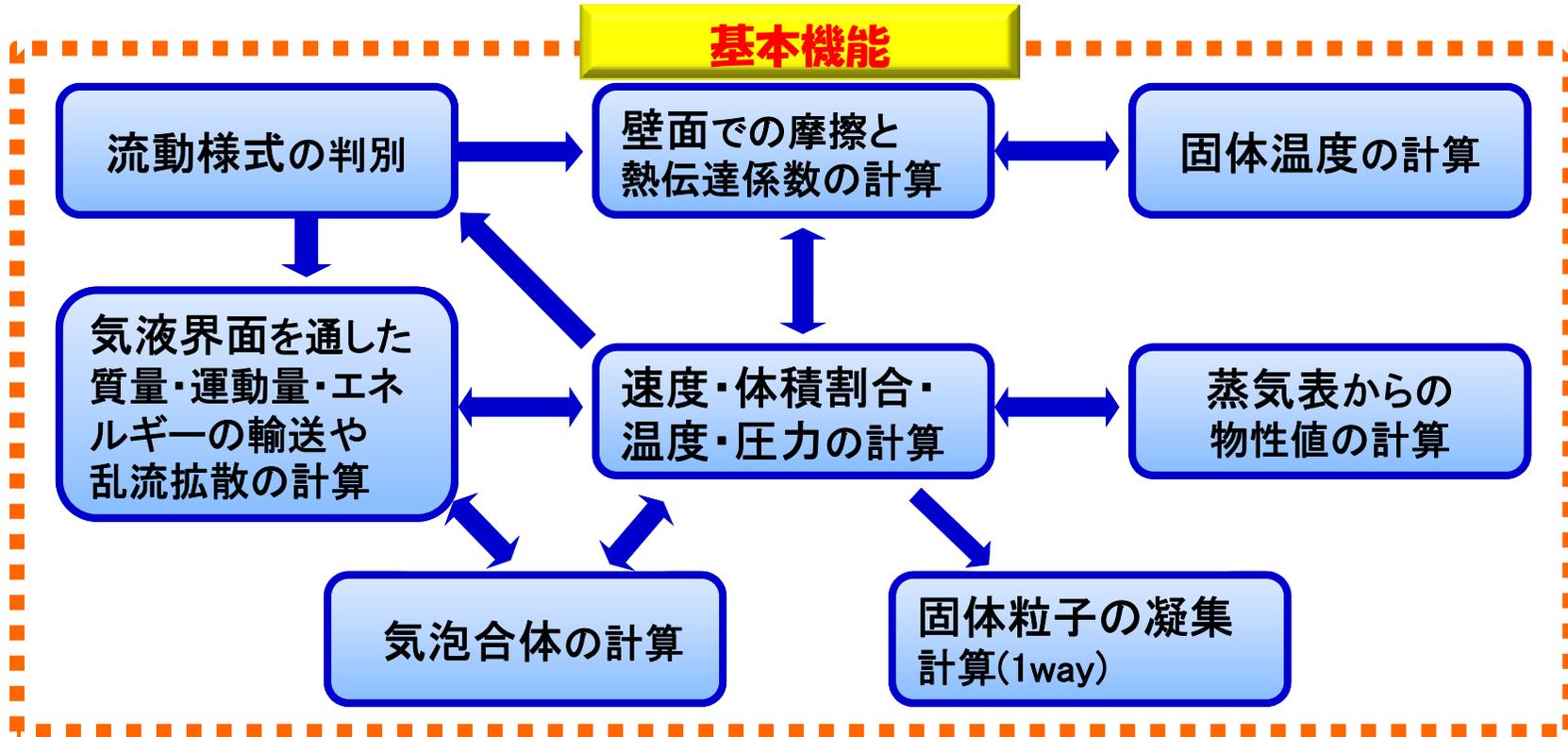
- ・大規模
- ・多機能
- ・実績/経験
- ・客観性/再現性
- ・メンテナンス
- ・ドキュメント整備
- ・ユーザ支援体制
- ・ブラックボックス
- ・経費

二流体モデル汎用コード
VOF法汎用コード

Advance/FrontFlow/MP

Advance/FrontFlow/RED(VOF法機能を含む)

二流体モデル解析コードの構成



解析対象に応じた
流動様式線図

水-蒸気系以外の
流体の蒸気表

●石油・LNG・冷媒

固体の応力
・ひずみ

固体粒子の凝集
計算(2way)

●焼入れ、熔融鉄、腐食

解析対象に応じた
構成方程式

気泡の分裂

●高精度解析

化学反応

●化学プラント

二流体モデルコード解析機能一覧(1/2)

項目	機能
物理モデル	<p>基本機能：定常／非定常／非圧縮性／強制対流／自然対流／固体の熱伝導（固体内部の複数材質含む）</p> <p>乱流モデル：k-εモデル／渦粘性一定／層流</p> <p>気液二相流：二流体モデル</p> <p>気泡合体：ポピュレーションバランス／Princea&Blanchモデル</p> <p>固体粒子の凝集：粒径グループ毎の質量・運動量方程式(1way)</p> <p>流動様式：流動様式線図</p> <p>蒸気表：水-蒸気系、空気の物性値</p> <p>構成方程式：抗力／揚力／壁面潤滑力／乱流拡散力／相間熱伝達／壁面熱伝達（液単相、サブクール核沸騰、飽和核沸騰、遷移沸騰、膜沸騰、蒸気単相）</p>
メッシュ形状	6面体(ヘキサ)／4面体(テトラ)／3角柱(プリズム)／4角錐(ピラミッド)／これらメッシュの混合
離散化	有限体積法／節点中心法
アルゴリズム	SIMPLE法／Rhie-Chow補間法による圧力振動の抑制／Muzaferijaの手法による拡散項の精度向上

二流体モデルコード解析機能一覧(1/2)

項目	機能
時間積分	Euler陰解法
移流項の離散化スキーム	1次精度風上差分／2次精度風上差分＋リミタ(TVD法)
行列解法	ICCG法／Bi-CGSTAB法
並列計算	自動領域分割による並列計算
メッシュ作成	市販メッシャーを使用 (将来的には、弊社のプリポストADAPと連携)
可視化	市販可視化ソフトあるいはフリーソフトParaviewを使用 (将来的には、弊社のプリポストADAPと連携)
ユーザーサブルーチン	初期値／流入境界条件／質量・運動量・エネルギーのソース項 ／ポスト処理／構成方程式(界面摩擦モデル、壁面熱伝達モデル)

動作環境

項目	CPU	Linux	Windows
正式 サポート 環境	IA32 AMD系32bit	Red Hat 9 Red Hat Enterprise	Windows XP Professional Windows2000
	IA64	SGI Advanced Linux	
	AMD64 EM64T	Opteron:Suse Linux	Windows XP Professional Windows2000
	上記以外		Mips R10000シリーズ IRIX, ARIX64 6.5 64bit対応
ハードウ ェア 環境	CPU	Pentium 4 2.0GHz（相当）以上推奨	
	メモリ	512MB以上（推奨1GB以上）	
	ハードディスク	500MB以上（推奨2GB以上）	
その他 環境	並列環境	MPICH 1.2.6以上推奨（並列計算はLinuxのみで対応）	
	コンパイラ	ユーザー定義サブルーチン機能を使用するには別途 Fortran90コンパイラが必要	

■二相流の乱流モデル(k-εモデル)

①混合型k-εモデル(デフォルト)

速度、密度、粘性係数を気相と液相で平均化したものを使う混合型モデル

$$\mathbf{v}_m = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i} \quad \rho_m = \sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla(\rho_m k v_m) = \nabla \left\{ \left(\frac{\mu_{m,t}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right\} + G_m - \rho_m \varepsilon \quad \mu_{m,t} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \nabla(\rho_m \varepsilon v_m) = \nabla \left\{ \left(\frac{\mu_{m,t}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right\} + c_1 \frac{\varepsilon}{k} G_m - c_2 \rho_m \frac{\varepsilon^2}{k}$$

②分散型k-εモデル

パラメータの推奨値はデフォルトで設定

気泡流が支配的な場合に使用するモデル・・・気泡による液相の乱流生成を考慮

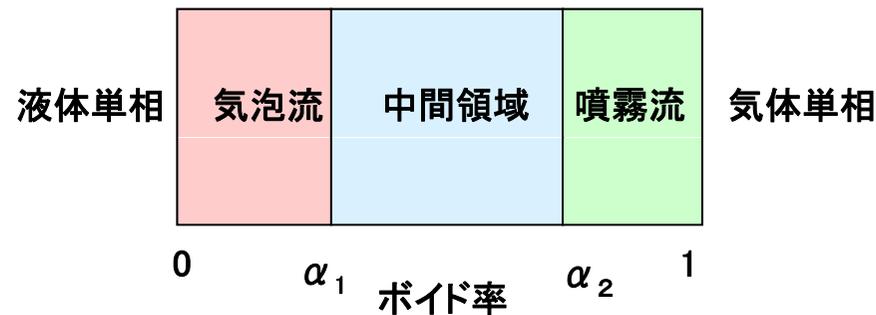
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l \alpha_l k) + \nabla(\rho_l \alpha_l k v_l) = \nabla \left\{ \alpha_l \left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right\} + \alpha_l G - \rho_l \alpha_l \varepsilon + \alpha_l S_k \quad S_k = \frac{3}{8r_b} \alpha_g \rho_l C_D V_r^3$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l \alpha_l \varepsilon) + \nabla(\rho_l \alpha_l \varepsilon v_l) = \nabla \left\{ \alpha_l \left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right\} + c_1 \alpha_l \frac{\varepsilon}{k} G - c_2 \rho_l \alpha_l \frac{\varepsilon^2}{k} + c_3 \alpha_l S_k \frac{\varepsilon}{k}$$

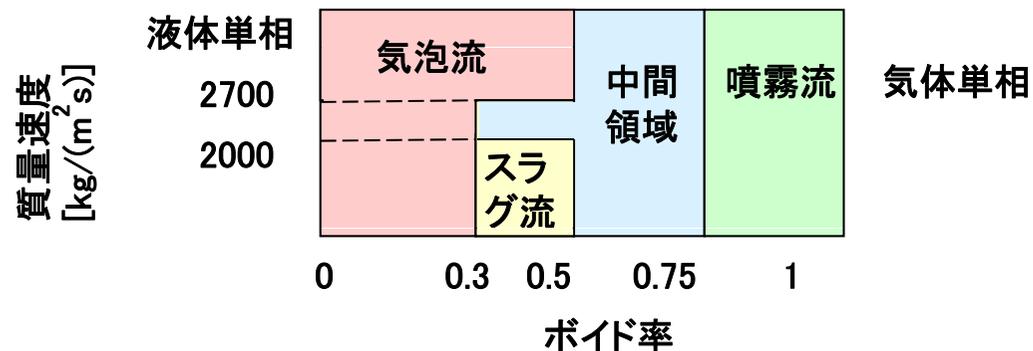
■ 流動様式判定

- ・ 気液二相流の状態によって気液界面における質量・運動量・エネルギーの輸送機構が異なるため、気液二相状態を流動様式に分類して、流動様式に応じて異なる構成方程式を使用する

① ボイド率(気相体積割合)で分類する方法(デフォルト)



② ボイド率(気相体積割合)と質量速度で分類する方法



■構成方程式 ～相間運動量交換(抗力)

気泡の形状と運動状態

①気泡径が小さいか表面張力が大きい場合

- ・気泡は球形で直線に運動
- ・高純度の液体では、気泡内部に循環が形成されて粘性抵抗が減少、終端速度が大きい

②気泡径が大きい場合表面張力が小さい場合

- ・気泡は非球形で振動的に運動
- ・流体の純度は影響しない

①と②を含む広範囲な気泡径と流体物性に対する実験値をフィッティングした以下の抗力係数を使用

$$C_D = \begin{cases} \max \left[\min \left\{ \frac{16}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{48}{Re} \right\}, \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \alpha_i^{3-2n} \\ \max \left[\min \left\{ \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{72}{Re} \right\}, \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \alpha_i^{3-2n} \\ \max \left[\frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \alpha_i^{3-2n} \end{cases}$$

上から、高純度、中純度、低純度の流体の式

液体と気体の間の抵抗を表現

$$F_{D,g} = \sum_{j=1}^N \frac{1}{8} a_j C_{Dj} \rho_l |V_g - V_l| (V_g - V_l)$$

Shape	spherical		non-spherical
Motion	rectilinear		fluctuating
Purity	pure	contaminated	both
Flow pattern			
Governing effects	viscosity	viscosity	surface tension and gravity

富山・ほか,機論,61-587,B(1995),2357

ここで

E_o : エトベス数(浮力と表面張力の比)

M : モルトン数(流体の物性値の影響を示す)

Re : 気泡レイノルズ数(E_o 、 M 、 C_D から計算)

■構成方程式 ～相間運動量交換(揚力)

相対速度と液体の速度勾配によって
相対速度に垂直方向に働く力を表現

揚力により、気泡が壁に近づいたり
離れたりする

・揚力係数 C_T の計算式

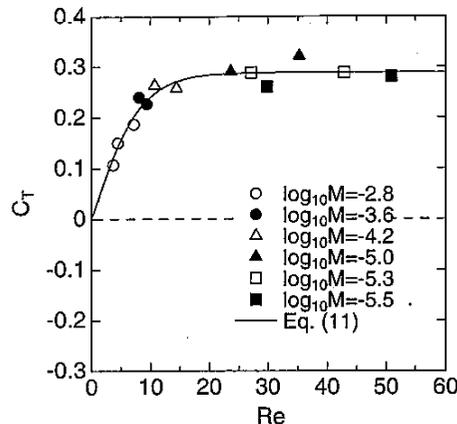
広範囲な Eo 、 M 、 Re で気泡変形を含む実験値をフィッティング

$$C_T = \begin{cases} \min[0.288 \tanh(0.121 Re_b), f(Eo_d)] & \text{for } Eo_d < 4 \\ f(Eo_d) & \text{for } 4 \leq Eo_d \leq 10.7 \end{cases}$$

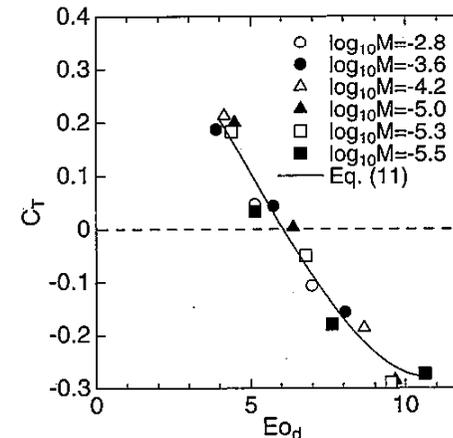
$$F_{L,g} = \sum_{j=1}^N \alpha_g C_T \rho_l (V_g - V_l) \times (\nabla \times V_l)$$

$$f(Eo_d) = 0.00105 Eo_d^3 - 0.0159 Eo_d^2 - 0.0204 Eo_d + 0.474$$

・上記 C_T の適用性



小さい気泡の場合の気泡レイノルズ数
と揚力係数の関係(モルトン数の影響)



大きい気泡の場合のエトベス数と揚力
係数の関係(モルトン数の影響)

A. Tomiyama et al. / Chemical Engineering Science 57 (2002) 1849-1858

■ 構成方程式 ～ 相間運動量交換 (潤滑力, 拡散力)

・ 壁面潤滑力 (Antalらが提案するモデル)

$$F_{W,g} = \sum_{j=1}^N \left(C_{W1} + C_{W2} \frac{r_g}{y} \right) \alpha_g \rho_l \frac{u_r^2}{r_g} n_W$$

- ・ 気泡が壁近くを滑りなしで移動するとき、壁近くの液体の動きが制限され、その影響で気泡が壁から遠ざかる挙動を表現

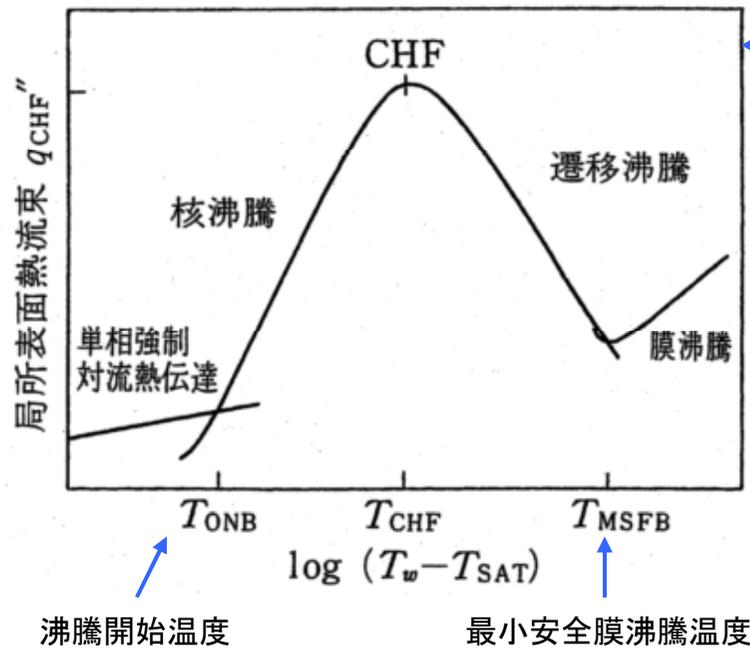
・ 乱流拡散力 (Lopezらが提案するモデル)

$$F_{TD,g} = - \sum_{j=1}^N C_{TD} \rho_l k_l \nabla \alpha_g$$

- ・ ボイド率の分布に偏りがあるとき、ボイド率の分布を均一にする力を表現

パラメータの推奨値はデフォルトで設定

■構成方程式 ～壁面熱伝達(水-水蒸気系)



沸騰曲線

沸騰曲線に基づいて、
壁面の熱伝達様式を判別し、
熱伝達様式に応じて異なる
熱伝達相関式を使用する

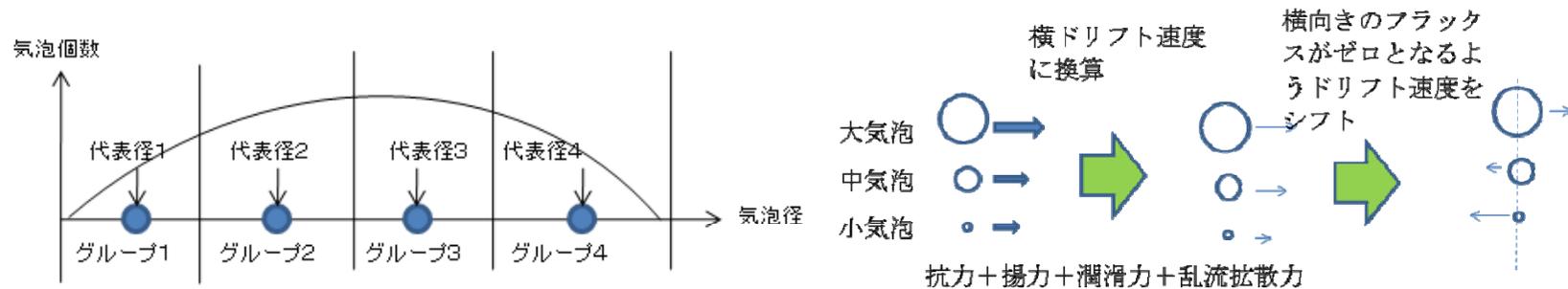
壁面の熱伝達様式

- (a) 液単相領域
- (b) サブクール核沸騰領域
- (c) 飽和核沸騰領域
- (d) 遷移沸騰領域
- (e) 膜沸騰領域
- (f) 蒸気単相領域

- $T_w \leq T_{CHF}$: 核沸騰領域
- $T_{CHF} < T_w \leq T_{MSFB}$: 遷移沸騰領域
- $T_{MSFB} < T_w$: 膜沸騰領域

■気泡の合体モデル

①グループ化と横ドリフト速度の計算



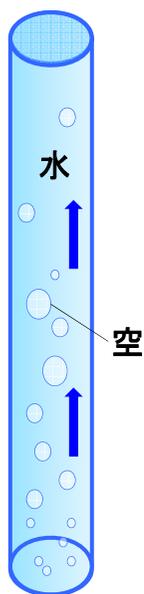
- ・気泡径に応じて、抵抗力、揚力、壁潤滑力、乱流拡散力が異なり、異なる運動をする
- ・全ての気泡の運動方程式を解くことは現状の計算機では困難
- ・大小さまざまな気泡群をグループに分けて、グループ毎に気泡の運動を計算する
- ・平衡状態に達するまでの緩和時間が短い場合には、代数スリップモデルにより横ドリフト速度を計算する

応用事例 1 気泡塔内の気液二相流解析

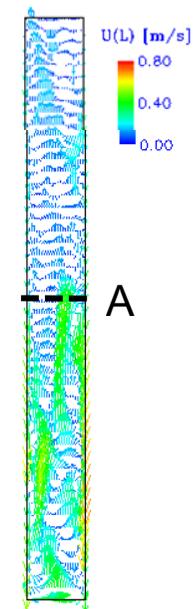
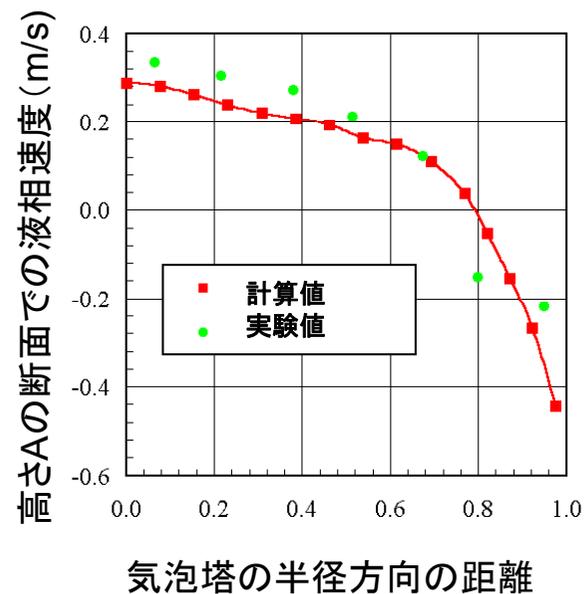
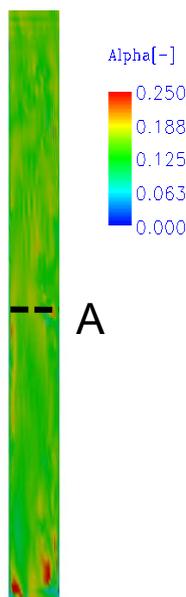
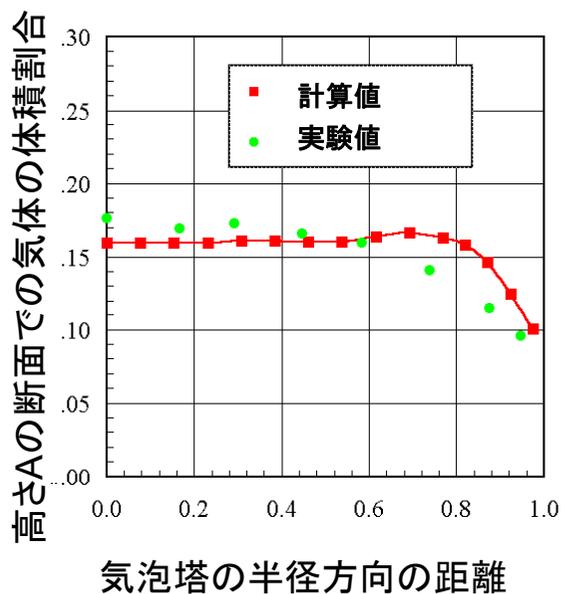
■ 解析結果 : 実験値に近い値を再現

気相体積割合 (ガスホールドアップ/ポイド率) 分布

液相速度分布

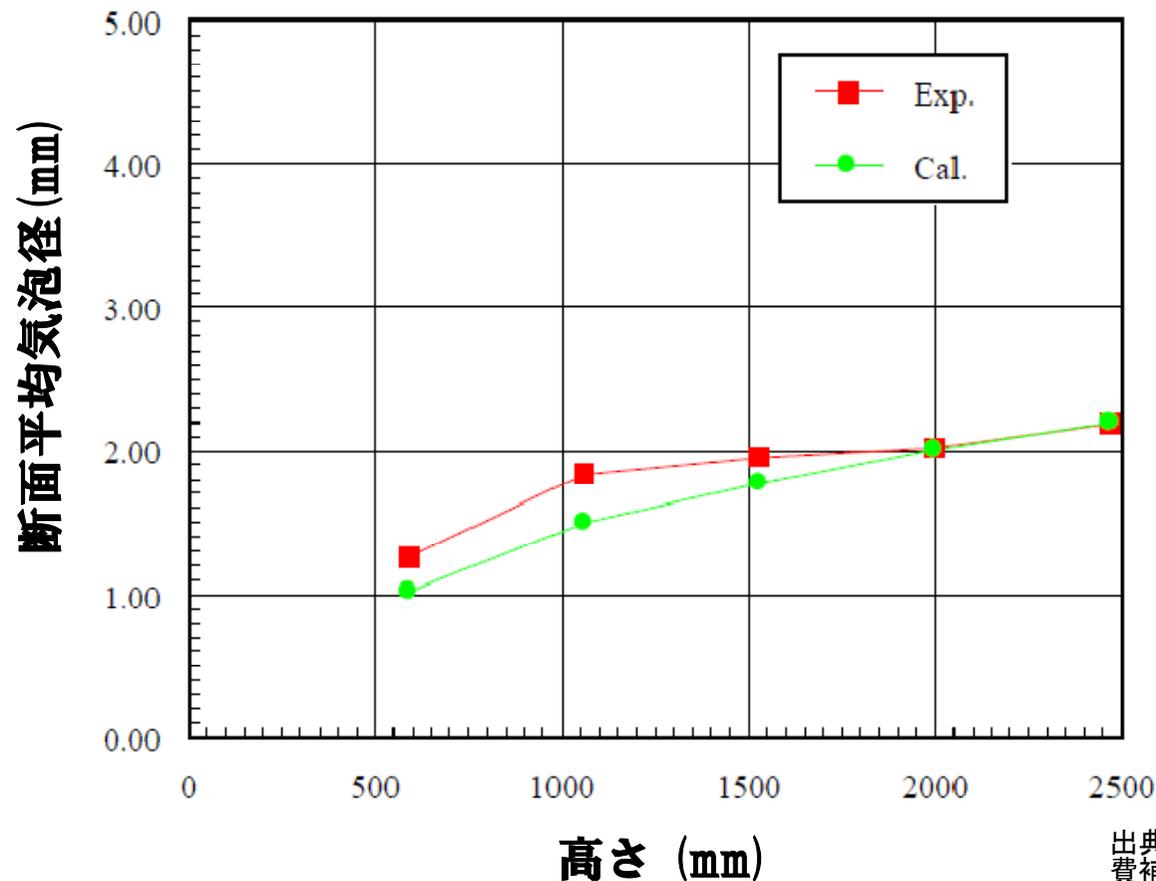


底面から
気泡を注入



応用事例2 気泡合体の気液二相流解析

断面平均気泡径の高さ方向分布

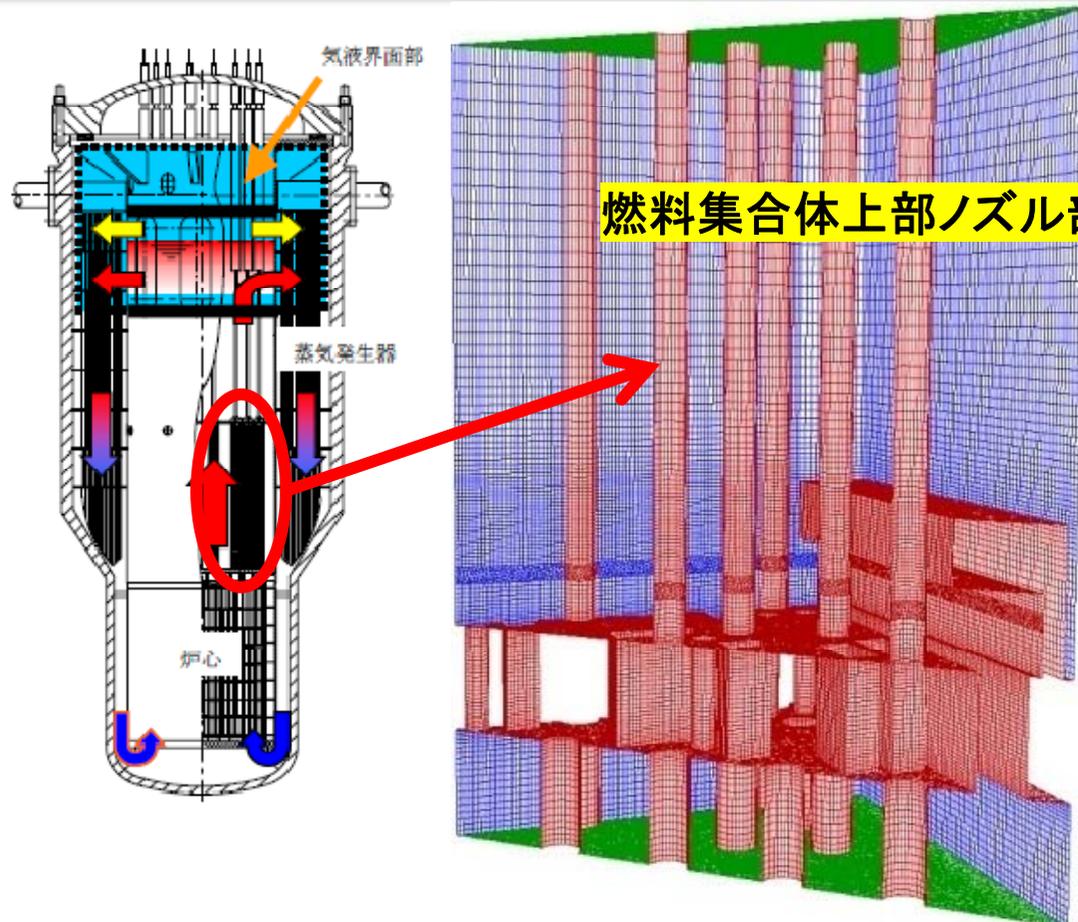


サブチャンネル内の
上昇に伴い、気泡径が増大す
る実験結果を再現

出典: 革新的実用原子力技術開発
費補助事業平成18年度成果報告
書概要版
「高温高圧二相自然循環炉の熱流
動システム評価手法の開発」

応用事例3 新型炉燃料集合体 上部ノズル部気液二相流解析

(目的) 燃料集合体上部ノズル部において、複雑に変化する流路形状が気液二相流挙動に与える影響を評価する



- ・ 6面体格子の他、5面体格子、4面体格子を併用して、形状を正確に模擬
- ・ 解析格子数
要素数170万

出典:革新的実用原子力技術開発費補助事業平成18年度成果報告書概要版
「高温高圧二相自然循環炉の熱流動システム評価手法の開発」

新型炉燃料集合体上部 / スル部 気液二相流解析

液相速度分布

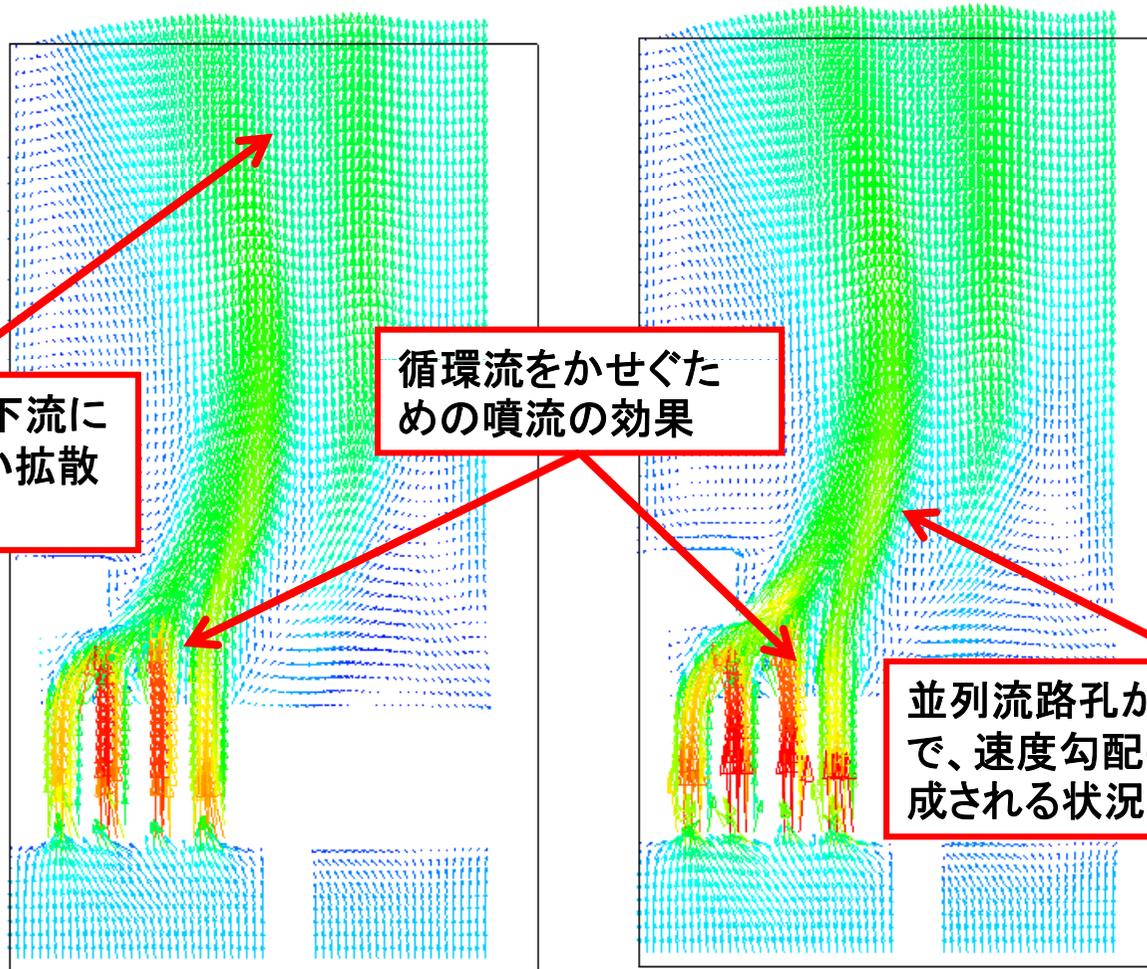
気相速度分布

解析により
わかったこと

速度勾配が下流に
流れるに従い拡散
する状況

循環流をかせぐた
めの噴流の効果

並列流路孔からの噴流の影響
で、速度勾配の大きな領域が形
成される状況



出典: 革新的実用原子力技術開発費補助事業平成18年度成果報告書概要版
「高温高圧二相自然循環炉の熱流動システム評価手法の開発」

VOF法コード解析機能一覧(1/2)

項目	機能
物理モデル	基本機能：非定常／非圧縮性／強制対流／自然対流／固体の熱伝導 乱流モデル：LES／k-εモデル／渦粘性一定／層流 二相流モデル：VOF法／表面張力／接触角（壁の濡れ性）
メッシュ形状	6面体(ヘキサ)／4面体(テトラ)／3角柱(プリズム)／4角錐(ピラミッド)／これらメッシュの混合
離散化	有限体積法／節点中心法
圧力振動と拡散項	Rhie-Chowの圧力振動を抑制する手法／Muzafferijaの拡散項の精度を上げる手法
時間積分	Euler陽解法／Euler陰解法／2次精度クランク・ニコルソン法／2次精度Adams-Bashforth法／3次精度Adams-Moulton法／4次精度ルンゲ・クッタ陽解法

VOF法コード解析機能一覧(2/2)

項目	機能
自由表面の捕獲手法	HRIC法 (High Resolution Interface Capturing scheme) / CICSAM法 (Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes) / STACS法 (Switching Technique for Advection and Capturing of Surfaces) / M-CICSAM法 (Modified version of CICSAM)
移流項の離散化スキーム	1次精度風上差分 / 2次精度中心差分 / 3次精度風上差分 + リミタ (TVD法) / ブレンド法 (2次精度中心差分と1次精度風上差分)
行列解法	ICCG法 / Bi-CGSTAB法
並列計算	自動領域分割による並列計算
メッシュ作成	市販メッシャーを使用 (将来的には、弊社のプリポストADAPと連携)
可視化	市販可視化ソフトあるいはフリーソフトParaviewを使用 (将来的には、弊社のプリポストADAPと連携)
ユーザーサブルーチン	初期値 / 流入境界条件 / 質量・運動量・エネルギーのソース項 / ポスト処理

応用事例4 液滴飛翔解析

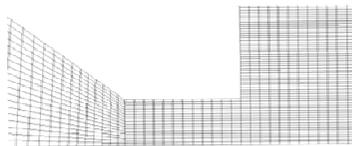
■解析目的

インクジェット液滴飛翔解析の予測精度を検証する。

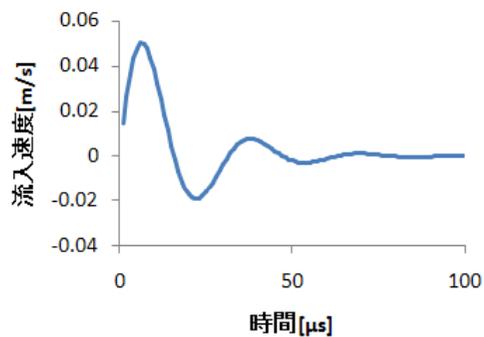
■解析条件



解析領域全体のメッシュ



ノズル付近のメッシュ(拡大図)



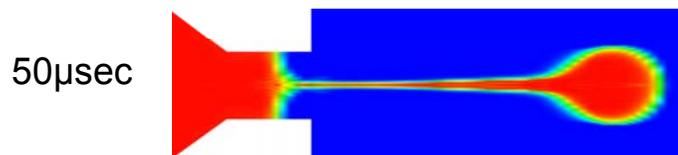
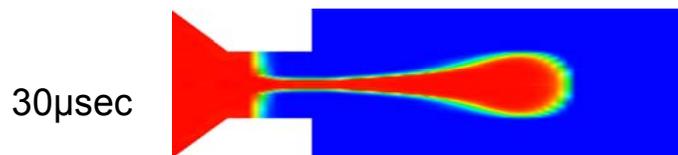
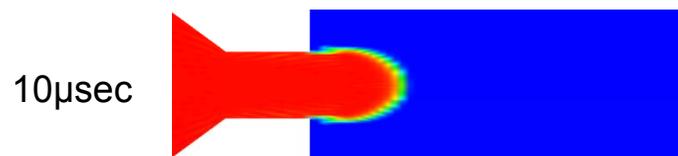
流入速度

密度: 1000kg/m^3

粘性係数: $0.01\text{Pa}\cdot\text{s}$

表面張力係数: 0.029N/m

■解析結果



液滴の分布(赤色が液、青色が空気)

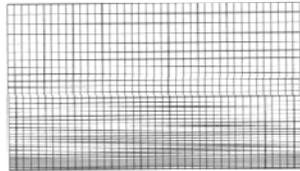
実験値との比較検証は今後実施する。

応用事例5 液柱崩壊解析

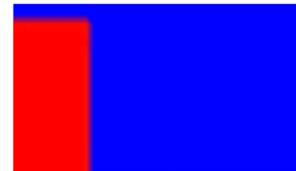
■解析目的

6面体メッシュを使用して、液柱崩壊時の液面挙動の予測精度を検証する。

■解析条件



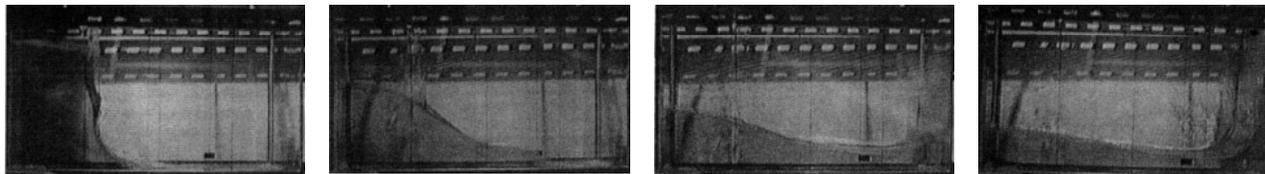
メッシュ



液柱の初期分布（赤色が水、青色が空気）

■解析結果

液面挙動の
実験結果(*)



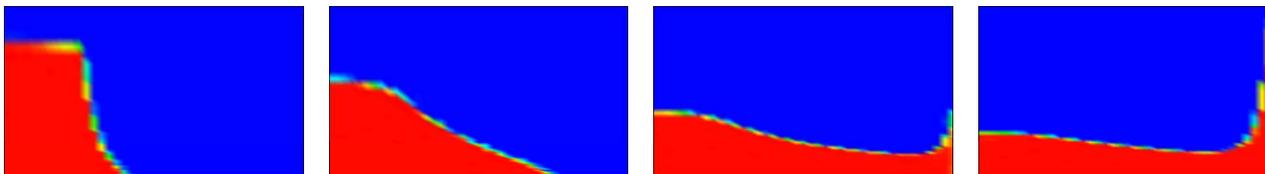
0.1sec

0.2sec

0.3sec

0.4sec

液面挙動の
解析結果



0.1sec

0.2sec

0.3sec

0.4sec

6面体メッシュで
実験結果を再現
できた。

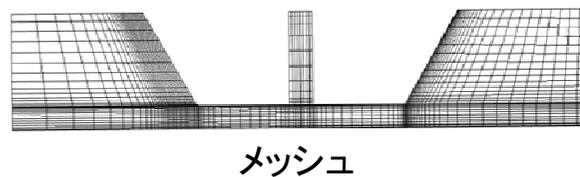
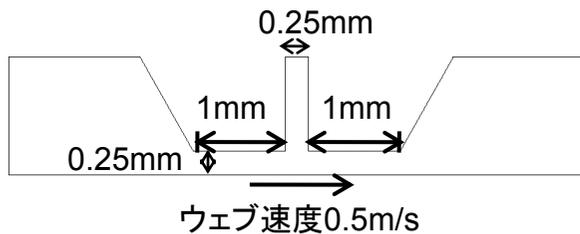
(*)Koshizuka and Oka, Nuclear Science and Engineering,123(1996),pp.421-434.

応用事例6 塗布解析

■解析目的

ウェブ速度、ビート後部減圧度、形状などの条件による①濡れ上がり、②正常塗布、③空気巻き込みの予測精度を検証する。

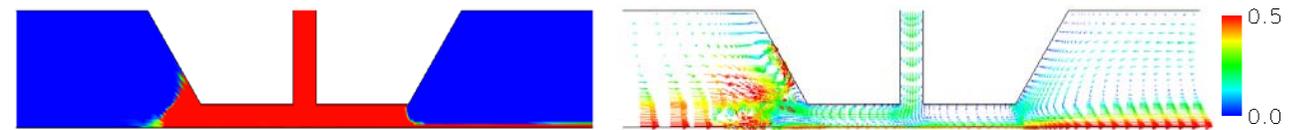
■解析条件



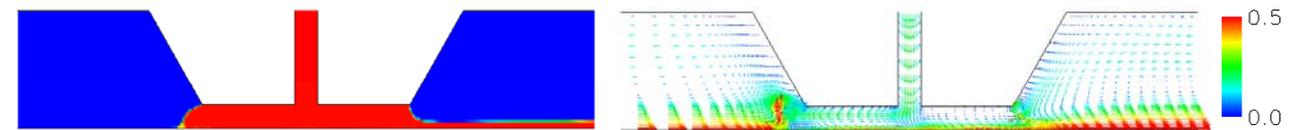
スリット流入速度:0.17m/s
ビート後部減圧度:パラメータ
静的接触角:ダイ~液: 60°
ウェブ~液:40°

■解析結果

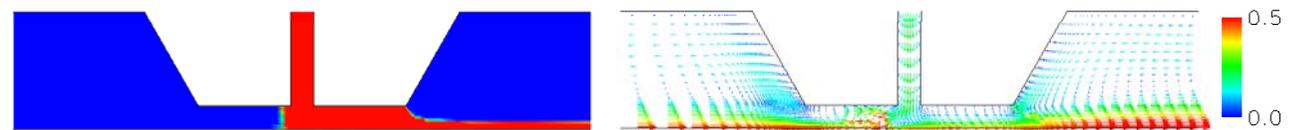
塗布液の分布(赤色が塗布液、青色が空気)と速度分布



(a) ビート後部減圧度2000Paの場合には濡れ上がり(非定常計算の途中結果)



(b) ビート後部減圧度1750Paの場合には正常塗布(定常状態)

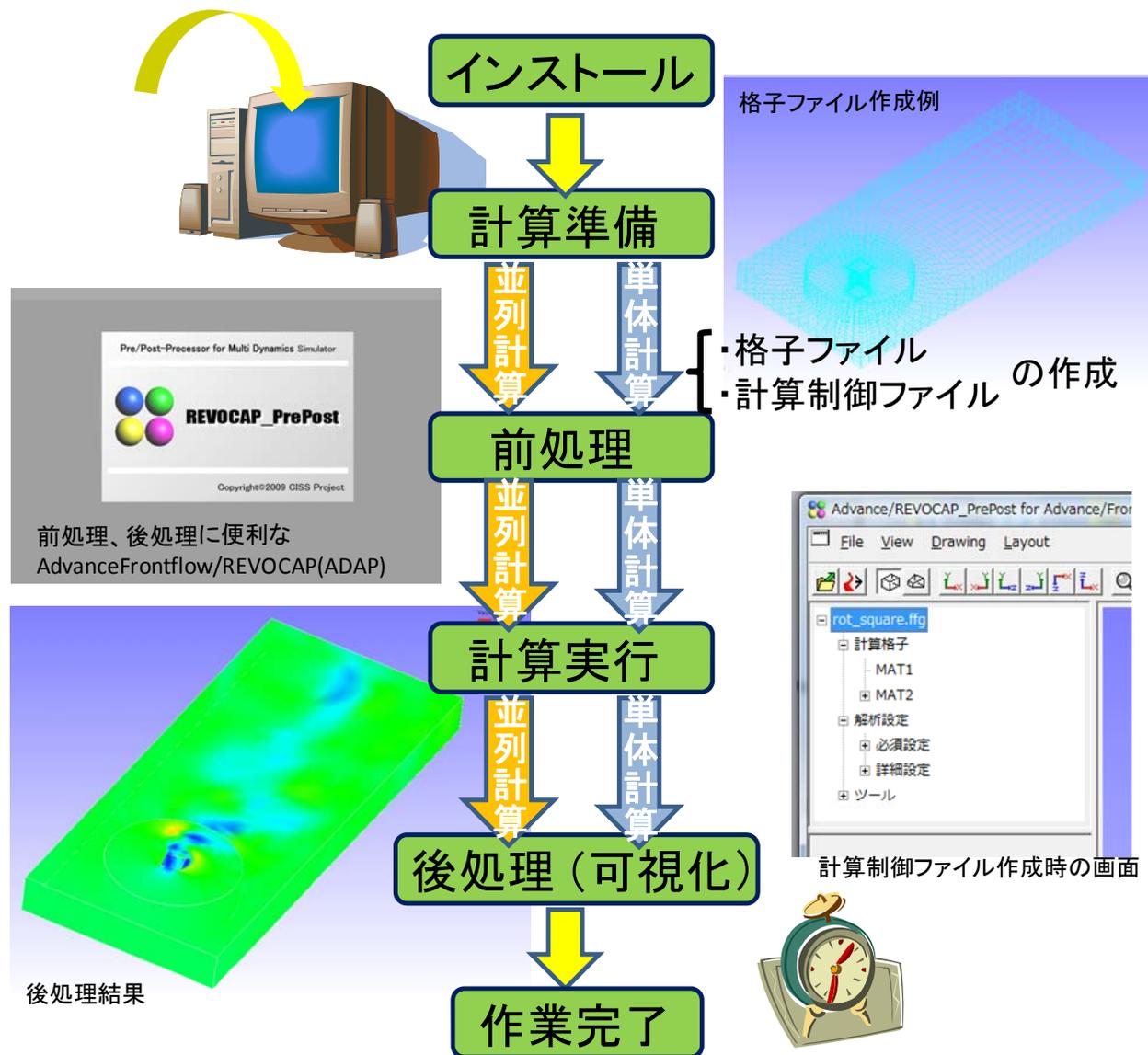


(c) ビート後部減圧度250Paの場合には正常塗布(定常状態)

ビート後部減圧度をパラメータとして解析した結果、250Pa~1750Paで正常塗布になり、文献(*)の実験結果をほぼ再現できた。

(*)安原ら,化学工学会第36会秋季大会,E2P08(2003).

1. 解析の流れ



2. 格子作成

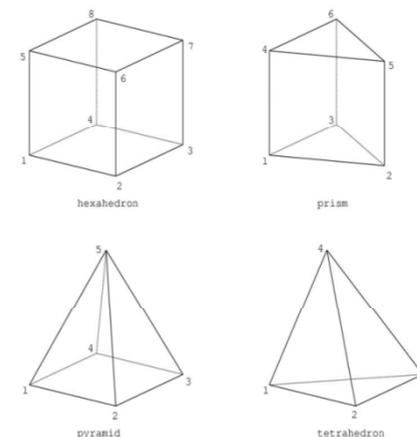
格子ファイルの作成

・格子ファイルは次のいずれかより作成してください

(a)Advance/REVOCAP(ADAP)

(b)市販のグリッド生成ソフトウェアを使用

- ・重要な領域は細かく、流れに沿った形状にする
- ・壁面近傍では6面体メッシュかプリズムメッシュにする
- ・スライディング面では6面体にし、できるだけ連続にする
- ・複雑な領域は自動メッシュで作成する
- ・できるだけアスペクト比の改善を図る

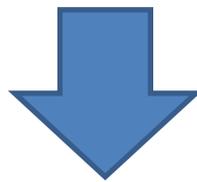


読み込み可能なメッシュ形式 : Frontflow形式(.ffgl,.gf) , MicroAVS USD形式(.inp)
ADVENTURE TetMesh(.msh) , Fluent形式(.msh) , FIELDView Binary(.fv),
FIELDView Ascii(.grd,.fv) , StarCD(.vrt等) , ICEM-CFD (.uns)

計算制御ファイルの作成

3. 計算準備

- 格子読み込み
- 境界条件の設定
- 計算条件の設定
- ユーザルーチンの作成
- ファイルを計算機に転送



コンパイルと実行ファイル作成

実行ファイルのrun (&リスタート)

4. 詳細条件設定

[Step2-3] 計算開始、終了/定常・非定常の設定

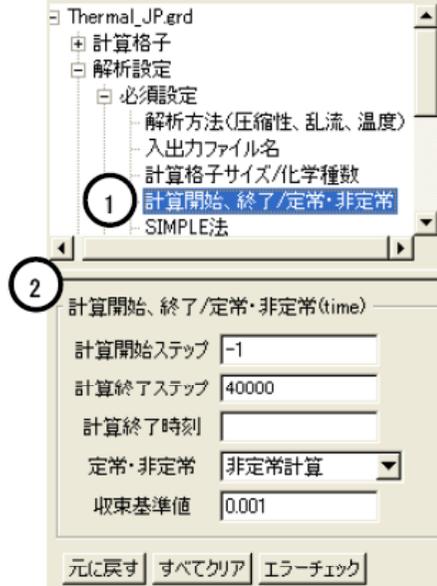
①[解析設定]- [必須設定]-[計算開始、終了/定常・非定常]を選択します

②[計算開始ステップ]と[計算終了ステップ]を入力します

[非定常計算]を選択します

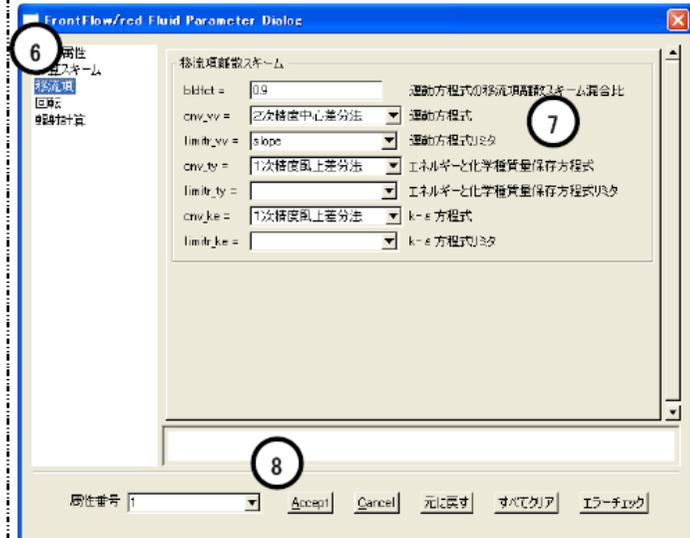
[収束基準値]に 0.001 を入力します (上記値はあくまで経験則に基づく一例です)

[Step2-3] 計算開始、終了/定常・非定常の設定



⑥[移流項]を選択します

⑦[運動方程式の移流項離散スキーム混合比]には 0.9, [運動方程式]には [2次精度中心差分法]を選択,[運動方程式リミタ]は [slope]を選択します [エネルギーと化学種質量保存方程式]と[k-e 方程式]は[1次精度風上]と仮入力しておきます



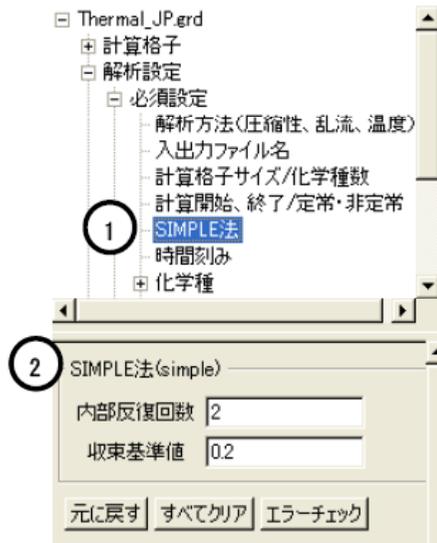
[Step2-4]SIMPLE 法の設定

①[解析設定]- [必須設定]-[SIMPLE 法]を選択します

②[内部反復回数]に 2 を入力します

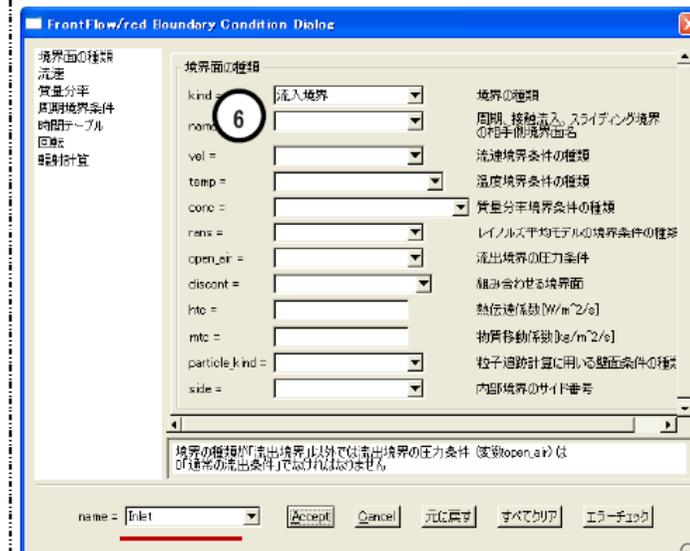
[収束基準値]に 0.2 と入力します (上記値はあくまで経験則に基づく一例です)

[Step2-4] SIMPLE 法の設定



⑥[境界の種類]に [流入境界]を選択します

[Step4-1] 流入境界の設定



5. メインソルバー実行

```
[root@cd-1 KE]$ mpirun -np 4 ./flowHPC
#####
WELCOME TO FrontFlow/red
Advance/FrontFlow/red Version 4.1
VERSION = 4.00
BUILD DATE = 2010-06-01-11:20:04
Year:2010 Mon:06 Date:07
Hour:0013 Min:05 Sec:48

#####
MSG: License will expire in :2050.12.31 23:59:59
MSG: License will expire in :2050.12.31 23:59:59
WRG: Dummy license grabbed
MSG: success in grabbing the LICENSE
MSG: License will expire in :2050.12.31 23:59:59
MSG: License will expire in :2050.12.31 23:59:59
USE COMP_TABLE 1
number of chemical species in GAS: 1
1 AIR mi = 0.28970E-01 [kg/mol]
    Ri = 0.28699E+03 [J/(K*kg)]
    cp = 0.10061E+04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
    Formation enthalpy: 0.00000E+00 [J/kg]

-----
Domain number      : 1
transport model    : constant
viscosity [Pa s]   : 0.184E-04 (mu0)
Schmidt number     : 1.000 (Sc)
Prandtl number     : 0.714 (Pr)
viscosity : m = mu0
conductivity : l = Cp*m/Pr (Cp:isopiestic specific heat)
diffusivity : D = m/(r*Sc) (r:mass density)

-----
### MSG: [nostop=0]: ICCG should stop at 1000
### MSG: [amg=0]: ICCG for poisson solver is used
MSG: High Reynolds model, wall function (log-law) ****
MSG: result file will be output in form of.frontflow_****
USE COMP_TABLE 1
MSG: result file will be output in form of.frontflow_****
USE COMP_TABLE 1
MSG: result file will be output in form of.frontflow_****
USE COMP_TABLE 1
MSG: result file will be output in form of.frontflow_****

=====
| TIME STEP : 1 SCALAR NOMOVE MPI: 4 openMP: 1 FLOW TYPE: 2 |
| TIME : 0.1000E+02 TIME INTERVAL: 0.1000E+02 MAX.CV_COURANT: 0.4693E+03 AT VERTEX : 516 |
|-----|
| Velocity Field : U V W P T K EPS COMP_1 |
|-----|
| MONI: -.4789E-01 0.1878E-01 0.0000E+00 0.9502E-02 0.3000E+03 0.1000E-04 0.1000E-04 0.1000E+01 |
| MIN : -.2824E+01 -.9485E-03 0.0000E+00 -.1320E-02 0.3000E+03 0.1000E-04 0.1000E-04 0.1000E+01 |
| MAX : -.4789E-01 0.2761E+01 0.0000E+00 0.3100E-01 0.3000E+03 0.1000E-04 0.1000E-04 0.1000E+01 |
|-----|
| OUTER-ITER NO.: 1 ALL COMP |
|-----|
| CG/ICCG: |
| ITER : 2 0 0 203 0 1 1 0 |
| RES : 0.1000E-09 0.1000E-09 0.1000E-09 0.8766E-08 0.0000E+00 0.1000E-09 0.1000E-09 0.0000E+00 |
| ABS : 0.1000E-09 0.1000E-09 0.1000E-09 0.1000E-09 0.0000E+00 0.1000E-09 0.1000E-09 0.0000E+00 |
|-----|
| OUTER-ITER ERROR : CNVERGENCE TOLERANCE : 0.2000E+00 |
| ERR : 0.4840E+15 0.8519E-04 0.0000E+00 0.9271E-09 0.0000E+00 0.8128E+00 0.4760E+00 0.0000E+00 |
|-----|
MONITOR POINT ( X, Y, Z ) = ( 0.3750E-01, 0.1471E-01, 0.3025E+01 )
```

ログ画面(標準出力)

計算制御ファイルの読み込み状況
(物性値)

各時刻の計算状況
U,V,W: 速度, P: 圧力, T: 温度,
K,EPS: RANS変数値
COMP: 化学種質量分率
MONI,MIN,MAX: モニター一点、最小値、最大値
OUTER-ITER: SIMPLEのイタレーション
ITER: マトリックスを解く際の内部反復
RES: 相対誤差, ABS,ERR: 絶対誤差
MONITOR: モニター一点の出力

6. 後処理

後処理(可視化)では一度結果ファイルを可視化ファイルへ変換します

以下の可視化ファイル形式への変換が可能です
Enight , FIELDVIEW , VTK , AVS

アニメーション出力ファイルへ変換します。

変換後、各時刻の一連の可視化図ファイルが作成されます
それを可視化ソフトにて連続的に可視化しアニメーションを作成します

結 言

(1) 圧縮性二相流の基礎式と現象

- 基礎式(質量, 運動量保存則)と低マッハ数近似による解法
- 音速, 臨界流, 圧力波と水撃の基礎と現象

(2) 圧縮性二相流の数値解法

- 特性曲線法, Godunov(ゴドノフ)法による圧縮性単相流の解法
- Godunov法の二流体モデルへの拡張
- 検証と適用例(二相水撃, 超音速噴流)

(3) 汎用二相流コード

- 二流体モデルとVOF法汎用コードの機能スペック
- 構成方程式と解析例
- チュートリアル概要