



気液二相流の力学と数値解析

アドバンスソフト株式会社

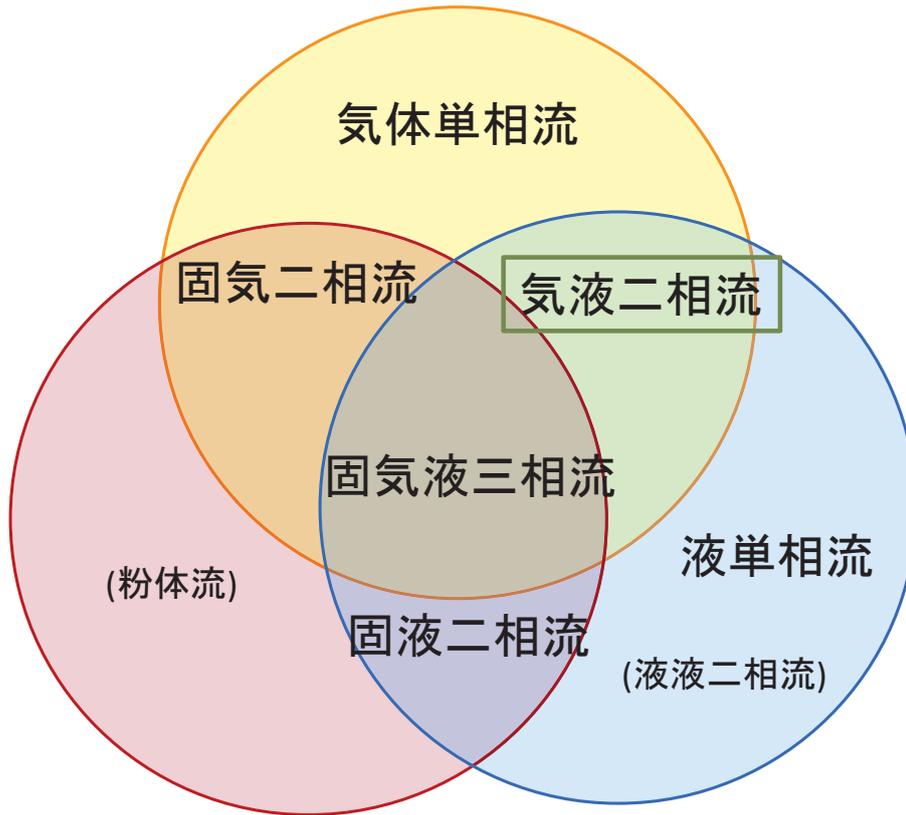
総合企画部 コンサルティングG

湊 明彦

■ 気液二相流の現象

■ 気液二相流の数値解析

■ 数値解析の計算例・応用



流動様式 Flow Pattern

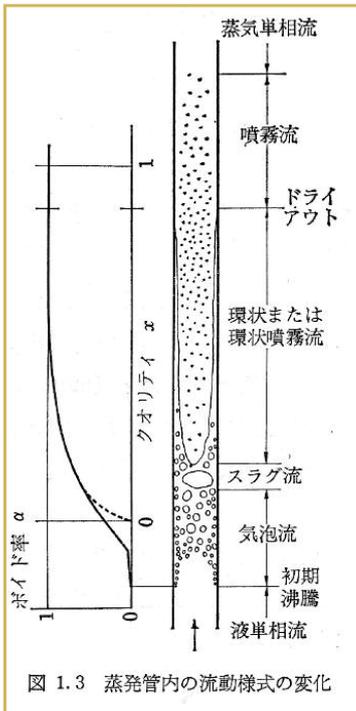


図 1.3 蒸発管内の流動様式の変化

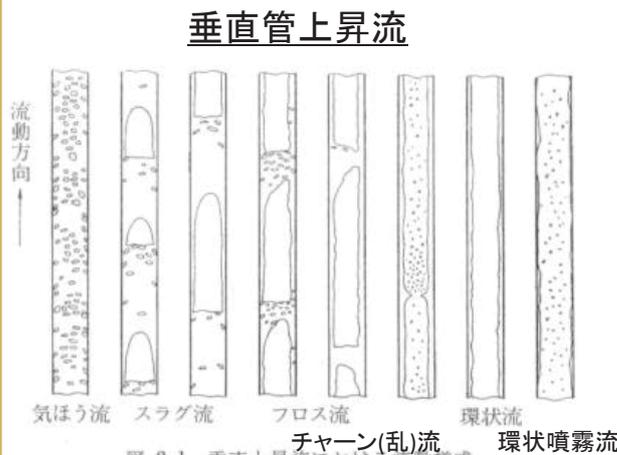


図 2.1 垂直上昇流における流動様式

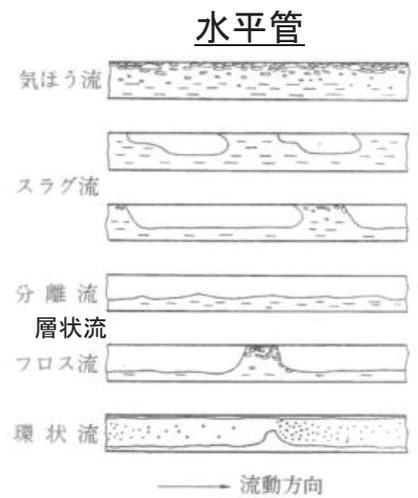


図 2.2 水平流における流動様式

植田辰洋「気液二相流」より引用

・ボイド率, α Void fraction
(気体の体積 存在比率)

・クオリティ, x Quality
(気体の質量 通過比率)

・気体速度, u_g

・液体速度, u_l

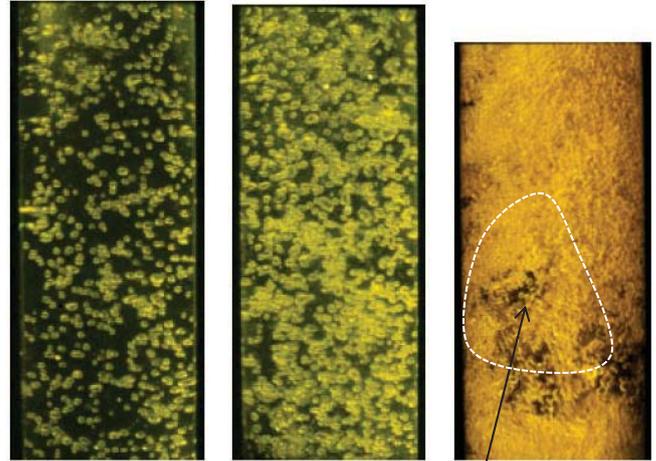
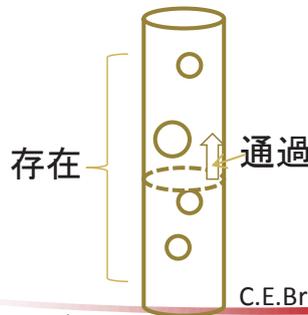


Figure 7.9. Photographs of air/water flow in a 10.2cm diameter vertical pipe (Kytömaa 1987). Left: 1% air; middle: 4.5% air; right: > 15% air.

(見えているのは壁付近だけ)

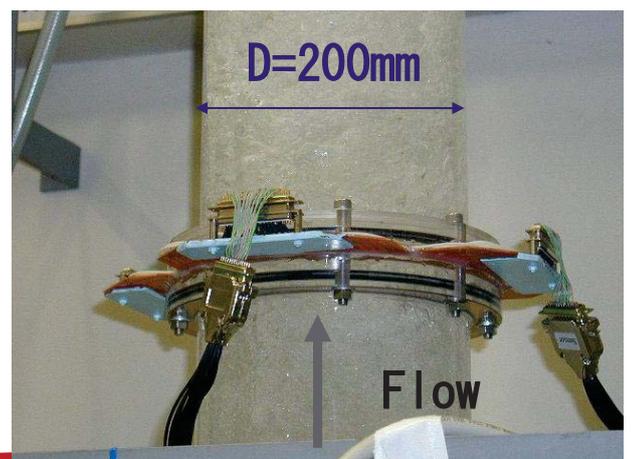
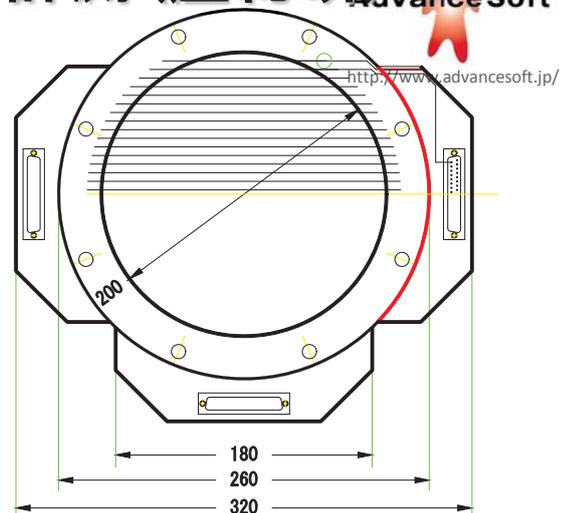
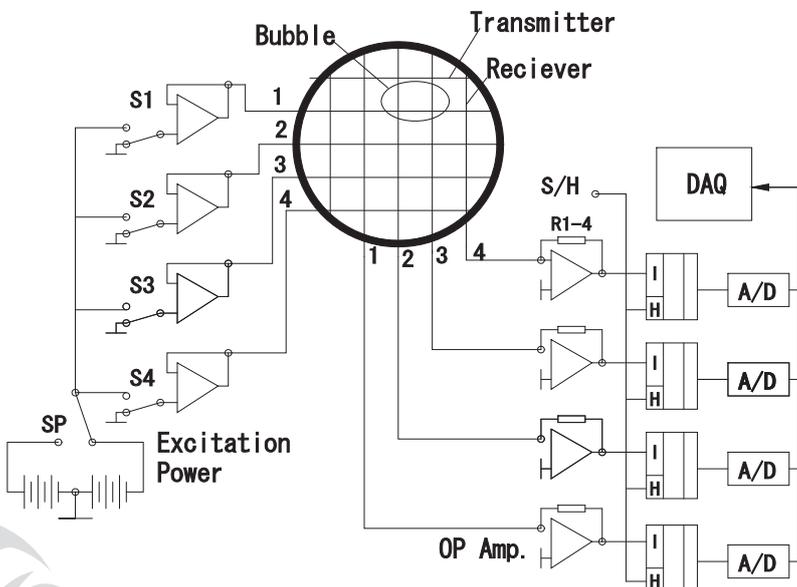
大気泡?
(スラグslug)

C.E.Brennen: Fundamentals of Multiphase Flowsより引用

垂直管断面内の瞬時ボイド率計測 (産総研)

計測の特徴

- 16x16の計測ポイント
- 電気伝導度をボイド率に変換
- サンプリング周波数 < 10kHz
- 0.125-0.250mm SUSワイヤ使用
- 計測面距離 1.6mm
- (独Telectronics社製)



断面ボイド率分布過渡変化と平均分布(産総研)

(円管内径: 100mm, 水体积速度: 0.42m/s)

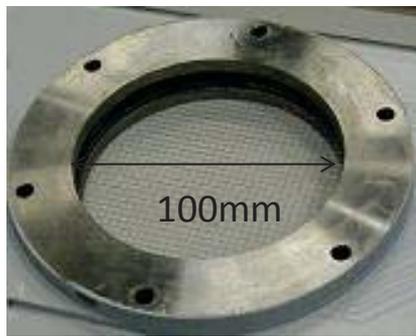
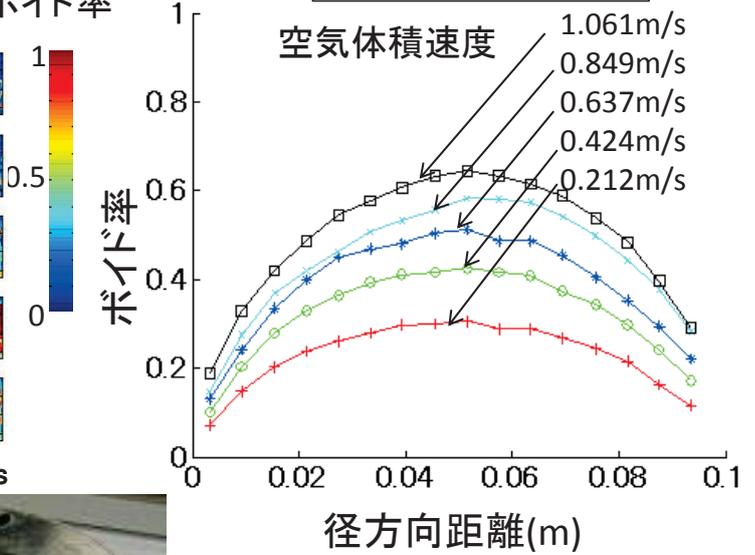
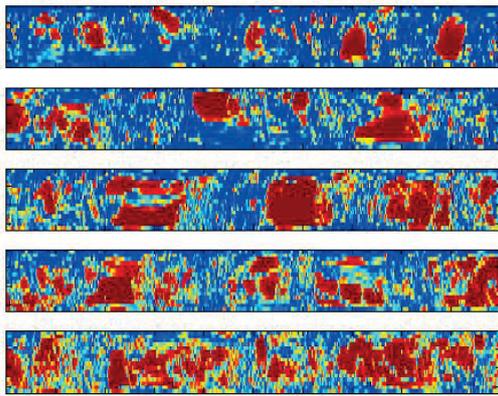
空気体積速度

過渡ボイド率

ボイド率

時間平均ボイド率

$j_g =$
0.212m/s
0.424m/s
0.637m/s
0.849m/s
1.061m/s



気液速度の関係

通常は、一次元かつ気液並行流が前提 Co-current flow

(反対語 気液対向流Counter-current flow)

気液速度差 (= 気液相対速度)

$$u_r = u_g - u_l$$

又は

スリップ比 (気液速度比)

$$s = \frac{u_g}{u_l} \quad (\text{通常は } s > 1)$$

Slip ratio

u_r もしくは s を与えると、一方の速度を計算すれば他方の速度は自動的に決まる
⇒ 二相流問題を(单相流+ボイド率)の問題に帰着

一般に $f(u_g, u_l, \alpha \dots) = 0$ なる関係を、理論的、経験的に求める

クオリティxは分かっているが、ボイド率αが分からないことが多い。

→xとスリップ比sからαを求める

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

代表的なスリップ比評価式

Thomの式 $s = 0.93 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.11} + 0.07 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.561}$

Ahmadの式 $s = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.205} \left(\frac{GD}{\mu_l} \right)^{-0.016}$

Smithの式 $s = e + (1-e) \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{1/2} \left\{ \frac{1 + e \frac{(1-x)\rho_g}{x\rho_l}}{1 + e \frac{(1-x)}{x}} \right\}^{1/2}$ (標準値e=0.4)

ドリフトフラックス理論

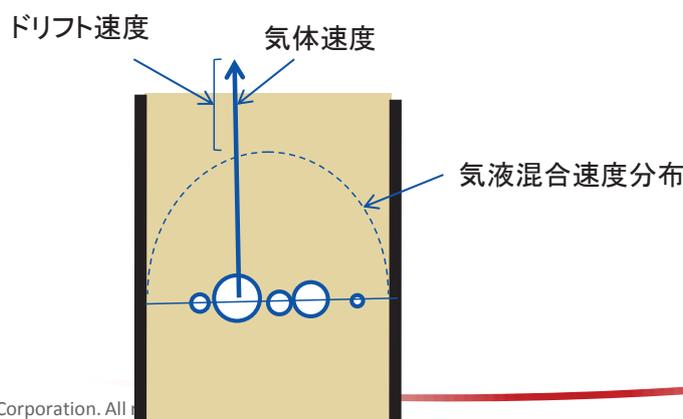
(より新しい気液速度の関係*)

*Zuber-Findlay(1965)

$$u_g = C_0 \left\{ \alpha u_g + (1-\alpha) u_l \right\} + \bar{V}_{gj}$$

分布パラメータ 気液混合速度 ドリフト速度

この2つの値を与えると
気液速度の関係が決まる



$$\left. \begin{aligned}
 \text{気泡流: } C_0 &= 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \\
 v_{Gj} &= (1-\alpha)^{1.5} \sqrt{2} \left\{ \frac{\sigma g (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right\}^{1/4}
 \end{aligned} \right\} \\
 \left. \begin{aligned}
 \text{スラグ流: } C_0 &= 1.2 \\
 v_{Gj} &= 0.35 \left\{ \frac{g (\rho_L - \rho_G) D}{\rho_L} \right\}^{1/2}
 \end{aligned} \right\} \\
 \left. \begin{aligned}
 \text{チャン流: } C_0 &= 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \\
 v_{Gj} &= \sqrt{2} \left\{ \frac{\sigma g (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right\}^{1/4}
 \end{aligned} \right\} \\
 \left. \begin{aligned}
 \text{環状流: } C_0 &= 1 \\
 v_{Gj} &= \frac{1-\alpha}{\alpha + 4\sqrt{\rho_G/\rho_L}} \left\{ j_T + \sqrt{\frac{g (\rho_L - \rho_G) D (1-\alpha)}{0.015 \rho_L}} \right\}
 \end{aligned} \right\} \\
 \left. \begin{aligned}
 \text{噴霧流: } C_0 &= 1 \\
 v_{Gj} &= (1-\alpha) \sqrt{2} \left\{ \frac{\sigma g (\rho_L - \rho_G)}{\rho_G^2} \right\}^{1/4}
 \end{aligned} \right\}$$

(*石井護, 米Purdue大教授)

水平管の流動様式マップ

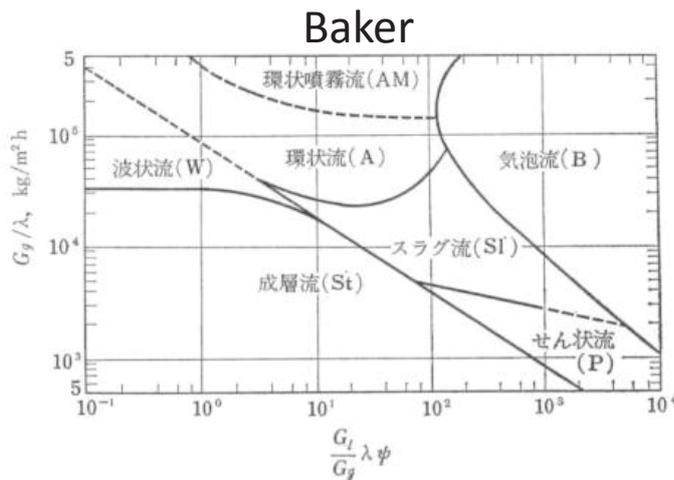


図 1.4 Baker の流動様式線図

$$\left. \begin{aligned}
 \lambda &= \left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_A} \right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_W} \right) \right]^{1/2} \\
 \psi &= \frac{\sigma_W}{\sigma} \left[\frac{\mu_l}{\mu_W} \left(\frac{\rho_W}{\rho_l} \right)^2 \right]^{1/3}
 \end{aligned} \right\}$$

σ : 表面張力, μ : 粘性係数, ρ : 密度
 W : 水, A : 空気, g : 気体, l : 液体

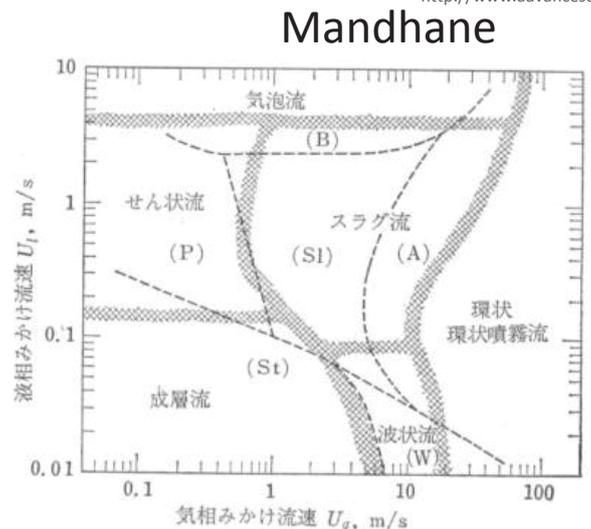


図 1.5 MANDHANE の流動様式線図

G : 質量速度
 J 又は U : 体積速度又はみかけ速度

植田辰洋「気液二相流」より引用

■ 気液二相流の現象

■ 気液二相流の数値解析

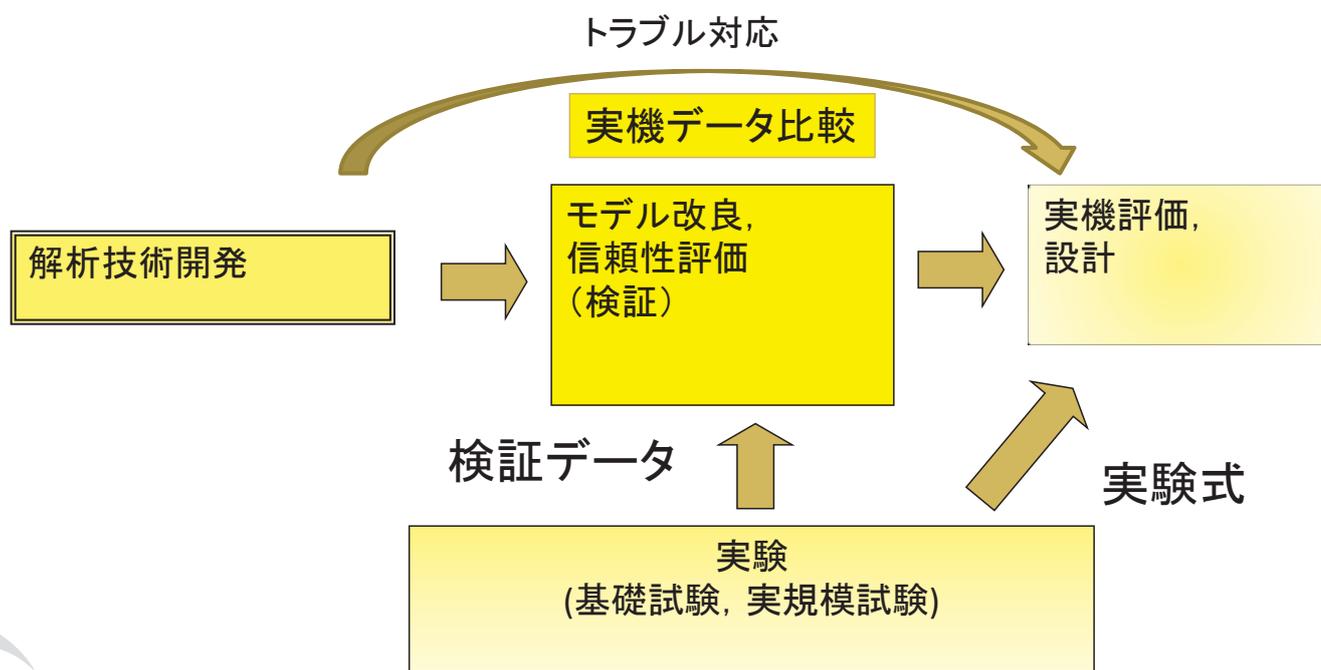
■ 数値解析の計算例・応用

気液二相流解析の難しさ

- 一般の気液二相流は時間的・空間的に激しく変動する複雑現象
- 常温常圧の水と空気の密度は1000倍の違いがあり、さらに大気圧で沸騰する水と蒸気は2000倍近い相違
- 大きく異なる性質を持つ二種類の流体(気体と液体)が共存する気液二相流は密度ばかりでなく圧力や速度も本質的に偏りがある非均質流動
- 非均質の原因となっている気液界面の形状が固定されておらず、流れに従って時間的・空間的に変化し続けることでさらに複雑な現象が発生
- 特定の流動条件において得られた経験が他の流動条件には通用しないなど、気液二相流の流動現象の一般性のある把握が困難

- 気液二相流の研究は多くの産業分野や防災分野で研究
- 特に原子力開発に伴って大規模な実験が行われ解析技術も進歩
- 設計に必要な流動条件に限られた大局的かつ平均的な挙動を対象としていたので、気液二相流固有の複雑さは殆ど無視（しかし、気液二相流のマクロ現象を流体力学や熱力学の基礎理論と経験則を組み合わせ、実験条件でカバーされた範囲に限れば実用的な予測を可能にした気液二相流力学の体系は気液二相流現象の理解と解析において極めて有用）
- 気液二相流固有の非均質・間欠的な複雑流動を直接数値解析を行う技術開発の進歩
- 数値計算技術も多くの問題があり、一つの方法で万全な予測や理解は期待できないので、これらの知識を総動員して現実の気液二相流現象に迫る必要

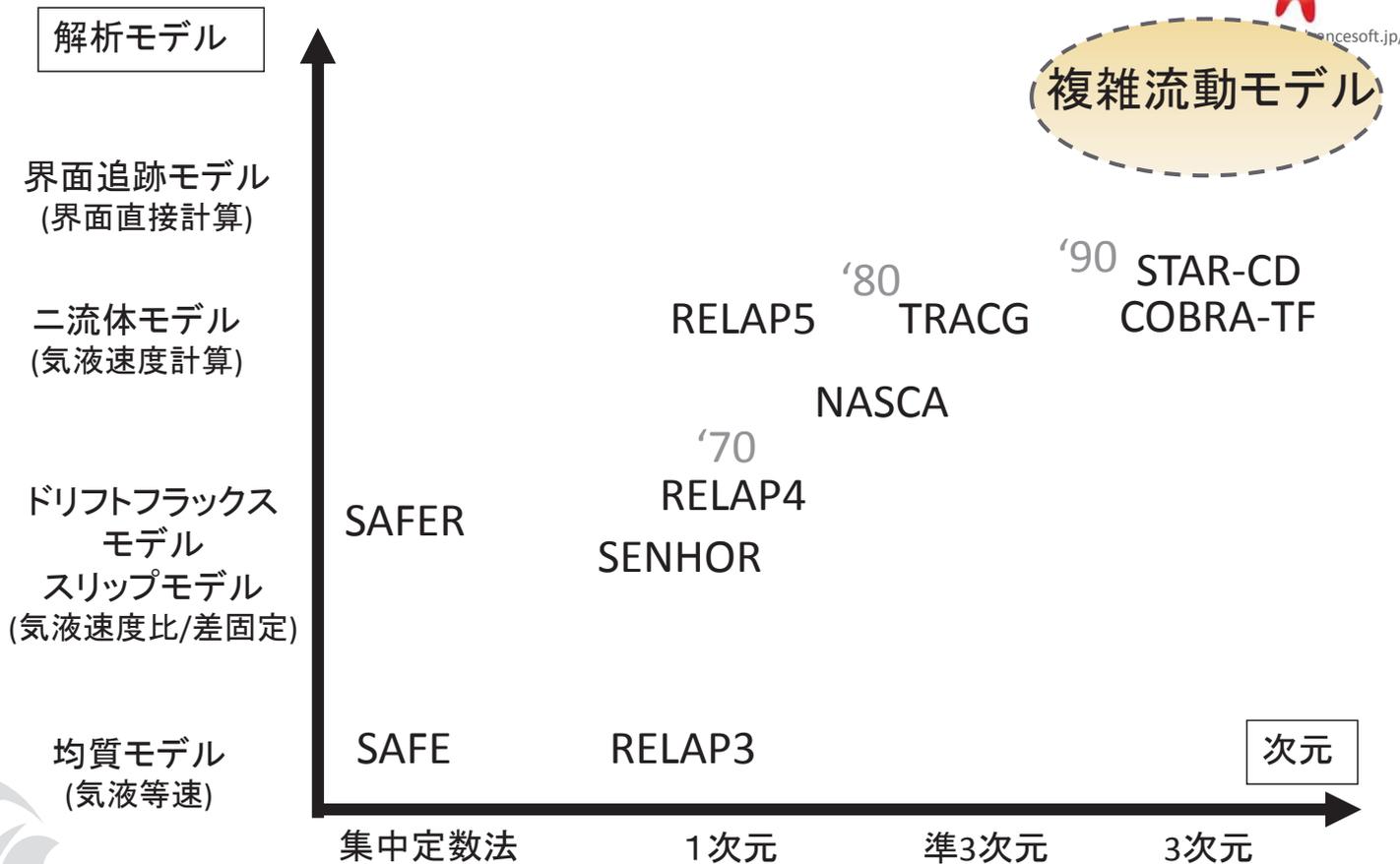
解析技術開発から実用化までの流れ



原子力分野における気液二相流解析技術の進歩

AdvanceSoft

http://www.advancesoft.jp/



次元

二流体モデルとVOF法の比較

AdvanceSoft

http://www.advancesoft.jp/

手法	二流体モデル (平均化法)	VOF法 (界面追跡法)
特徴	非均質・間欠性を消去した 準定常, 巨視的解析	非均質・間欠性を扱う 微視的解析
取り扱える 解析対象	原子カプラントの大規模 システムの解析が可能 ⇒ 原子力研究に適合	小規模流路解析に限定
構成方程式	非均質・間欠特性効果 を反映する高精度の 構成方程式が必要	構成方程式は基本的 に不要

二流体モデル: 速度の異なる気液の混合流を解析

VOF法: 界面とその両側の気体と液体の流れを解析

平均化法

二流体モデル FrontFlow/MP, ACE 3D, PORTOS

高精度二流体モデル (拡張二流体モデル, 改良二流体モデル)

界面追跡法

VOF法, MARS, TP-FIT, SP-VOF

Level Set法

CIP法

粒子法

MPS法

SPH法

統計法

格子ボルツマン法

: 汎用性が高い手法

二流体モデルの意味

気液二相流の非均質・間欠特性を消去し、
(局所的に)準定常な連続体として数値解析を行う

相分布の平均化
(時間 ΔT と体積 ΔV 内の平均値)

ボイド率の定義

$$\alpha_g(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\Delta V} \frac{1}{\Delta T} \int_{\Delta V} \int_{t-\frac{\Delta T}{2}}^{t+\frac{\Delta T}{2}} X_g(\mathbf{r}', t') d\mathbf{r}' dt'$$

Drewの相関数

$$X_k(\mathbf{r}_2, t) = 0$$

\mathbf{r}_2

相k

\mathbf{r}_1

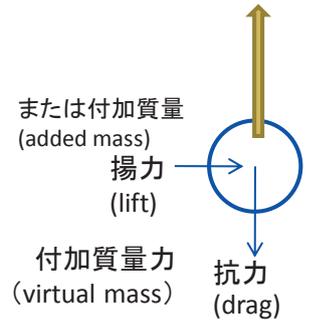
$$X_k(\mathbf{r}_1, t) = 1$$

原点

単相流の基礎式

質量保存則 $\frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0$

運動量保存則 $\frac{\partial}{\partial t} \rho \mathbf{u} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla P = \rho \mathbf{g} + (\nabla \cdot \mu \nabla) \mathbf{u}$



$$F_{k,k'}^{(i)} + F_{k',k}^{(i)} = 0$$

$$F_{k,k'}^{(i)} = F_{k,k'}^{(drag)} + F_{k,k'}^{(vm)} + F_{k,k'}^{(lift)} + F_{k,k'}^{(bu)}$$

二相流の一般基礎式(二流体モデル)

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 $\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k + \alpha_k \nabla P = \alpha_k \rho_k \mathbf{g} + (\nabla \cdot \varepsilon \alpha_k \rho_k \nabla) \mathbf{u}_k + \mathbf{F}_{k,k'}^{(i)}$

渦粘性係数 $\varepsilon = (\text{乱流渦効果}) + (\text{気液相互攪拌効果})$

- ・混合長モデル
- ・k-εモデル
- ・LESモデル

非圧縮性単相流数値解法SMAC法の概要

前タイムステップ(t)の速度分布

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} + \rho \mathbf{u} \nabla \cdot \mathbf{u} = -\nabla P + \mu \Delta \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad \text{NS方程式を使って}$$

仮の圧力場を用いた新タイムステップ(t+Δt)の仮の速度分布を求める

P: 一様又は前タイムステップの圧力場

Yes $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0?$ No

No $\rho \frac{\partial}{\partial t} \delta \mathbf{u} = -\nabla \delta P$

ポアソン方程式の反復計算

$\mathbf{u} + \delta \mathbf{u} \Rightarrow \mathbf{u}$
 $P + \delta P \Rightarrow P$

次のタイムステップへ

二流体モデル
基礎式

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k = 0$$

質量保存則

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k - \alpha_k \nabla P = \alpha_k \rho_k \mathbf{g} + (\nabla \cdot \varepsilon \alpha_k \rho_k \nabla) \mathbf{u}_k + \mathbf{F}_{k,k'}^{(i)}$$

運動量保存則

連続の式 $\nabla \mathbf{j} = \nabla \{ \alpha \mathbf{u}_g + (1-\alpha) \mathbf{u}_\ell \} = 0$

付加質量力を考慮

$$\mathbf{F}_{k,k'}^{(vm)} = -\rho_{vm} \left(\frac{d}{dt} \mathbf{u}_k - \frac{d}{dt} \mathbf{u}_{k'} \right)$$

速度, 圧力補正式 $\alpha_k \rho_k \frac{d}{dt} \mathbf{u}_k + \rho_{vm} \left(\frac{d}{dt} \mathbf{u}_k - \frac{d}{dt} \mathbf{u}_{k'} \right) = \alpha_k \nabla P$

K, k'相の連立方程式

$$\begin{cases} (\alpha_k \rho_k + \rho_{vm}) \frac{d}{dt} \delta \mathbf{u}_k - \rho_{vm} \frac{d}{dt} \delta \mathbf{u}_{k'} = \alpha_k \nabla \delta P \\ -\rho_{vm} \frac{d}{dt} \delta \mathbf{u}_k + (\alpha_{k'} \rho_{k'} + \rho_{vm}) \frac{d}{dt} \delta \mathbf{u}_{k'} = \alpha_{k'} \nabla \delta P \end{cases}$$

以上より, $\rho^{(eff)} \frac{\partial}{\partial t} \delta \mathbf{j} = -\nabla \delta P \Rightarrow$ 密度 $\rho^{(eff)}$ の单相流と近似してSMAC法を適用

ここで $\rho^{(eff)} = \frac{\alpha s^* \rho_g + (1-\alpha) \rho_\ell}{\alpha s^* + (1-\alpha)}$ $s^* = \frac{\frac{d}{dt} \delta u_g}{\frac{d}{dt} \delta u_\ell} = \frac{\rho_{vm} + \alpha(1-\alpha) \rho_\ell}{\rho_{vm} + \alpha(1-\alpha) \rho_g}$

気液加速度の比(加速度スリップ)の解

構成方程式の例

(Constitutive equations)

$$\mathbf{F}_{k,k'}^{(i)} + \mathbf{F}_{k',k}^{(i)} = 0$$

基礎式

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k - \alpha_k \nabla P = \alpha_k \rho_k \mathbf{g} + (\nabla \cdot \varepsilon \alpha_k \rho_k \nabla) \mathbf{u}_k + \mathbf{F}_{k,k'}^{(i)}$$

$$\mathbf{F}_{k,k'}^{(i)} = \mathbf{F}_{k,k'}^{(drag)} + \mathbf{F}_{k,k'}^{(vm)} + \mathbf{F}_{k,k'}^{(lift)} + \mathbf{F}_{k,k'}^{(bu)}$$

界面を通じた気液間の相互作用

(評価は構成方程式と称する経験式, 半理論式に依存)

例えば

付加質量力 $\mathbf{F}_{k,k'}^{(vm)} = -\rho_{vm} \left(\frac{d}{dt} \mathbf{u}_k - \frac{d}{dt} \mathbf{u}_{k'} \right)$

$$\rho_{vm} = c(1-\alpha) \rho_\ell \quad c \approx 0.5$$

気液間抗力 $\mathbf{F}_{k,k'}^{(drag)} = \frac{\alpha(1-\alpha) \sqrt{g(\rho_\ell - \rho_g)}}{v_{gj}^2} |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_\ell| (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_\ell)$ (Modified Andersenの式)

気泡攪拌による
渦粘性係数

$$\varepsilon = \alpha(1-\alpha) \lambda_{Taylor} v_{gj}$$

(Modified Satoの式)

二流体モデル解析の信頼性向上の二つの方法

種々の流動条件に
適用できる一般化
汎用構成方程式

非均質・間欠特性の
部分的解析



気液二相流実験
データベースの構築

⇒幅広い条件の実規模
試験が必要
(高コスト)

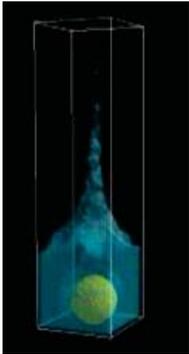
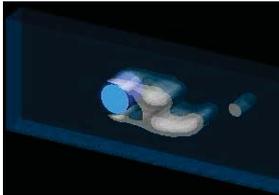
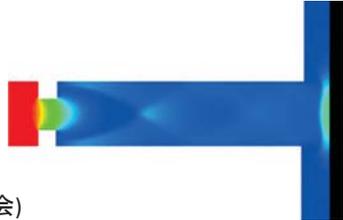
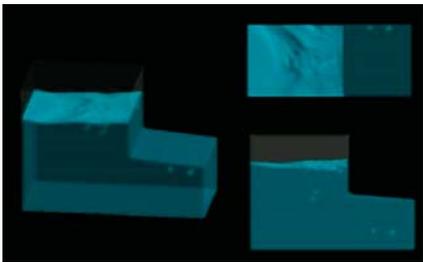
微視的界面追跡機能を持つ
二相流モデルの開発

⇒実規模試験の一部
を解析で代替

高精度構成方程式

高精度二流体モデル

気液二相流解析コードシステム

	非圧縮性	圧縮性
二流体モデル (気液速度差考慮)	 <p>スラグ流 (日米二相流シンポ)</p>  <p>プール中固体球落下 (混相流学会)</p>	 <p>円柱後流 キャビテーション (混相流学会)</p>  <p>オリフィス ミスト噴流の 衝突 (原子力学会)</p>
VOF法 (気液等速, 詳細界面追跡)	 <p>自由液面からの気泡巻き込み (機械学会計算力学部門講演会)</p>	 <p>高圧気泡群 の膨張と破裂 (国際地球物理・測地学会)</p>

■ 気液二相流の現象

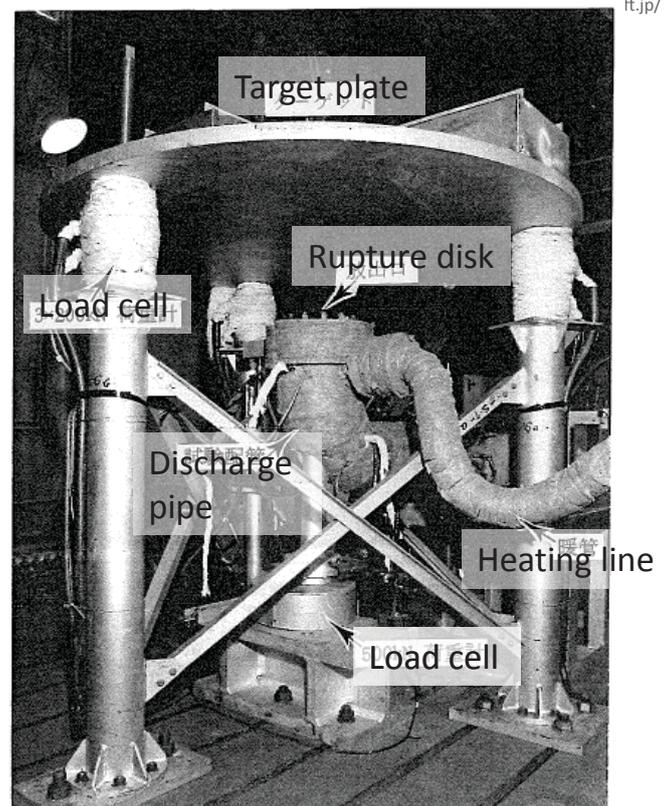
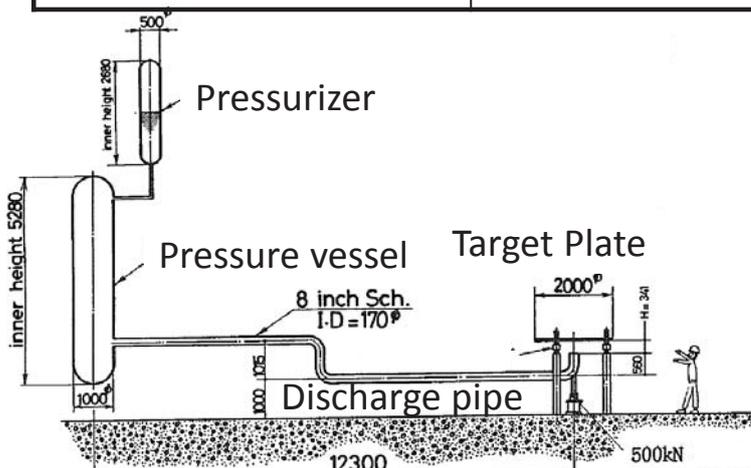
■ 気液二相流の数値解析

■ 数値解析の計算例・応用

二相ジェット荷重試験装置 (旧原研)

Experimental conditions

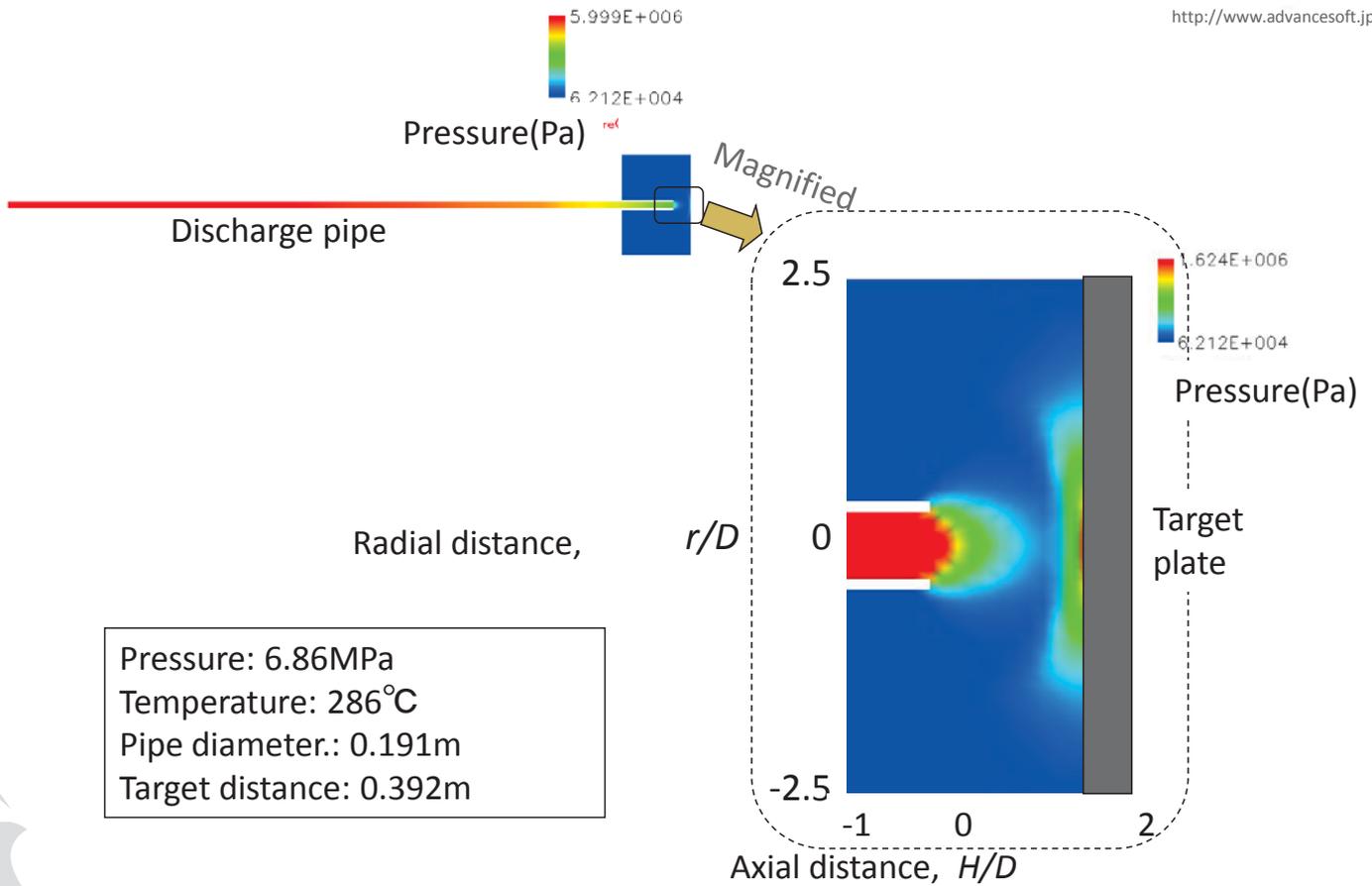
Reactor type		BWR	PWR
Water	Pressure (MPa)	6.8	15.5
	Temperature (°C)	285	325
Pipe diameter, D (mm)		90-190	
Distance to target, H/D		1, 2, 5, 18	



*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)

衝突板近傍圧力分布の解析結果

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



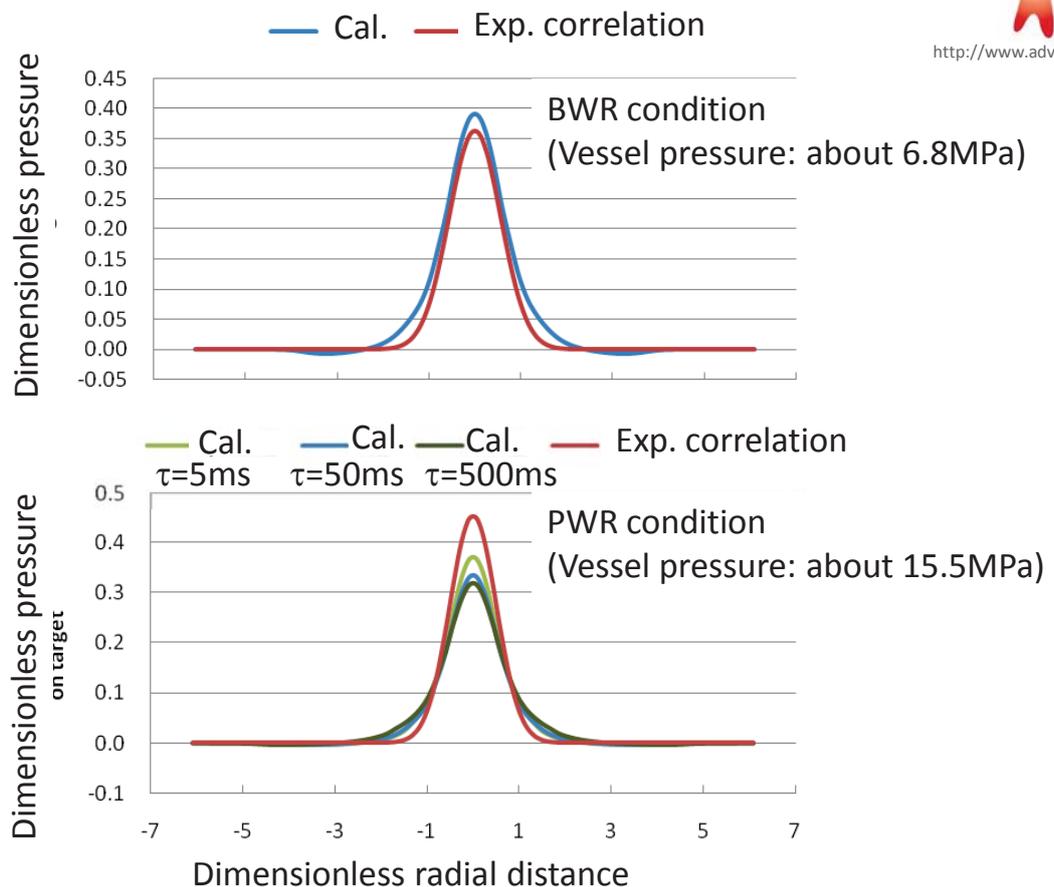
Copyright © 2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved. *H. Utsuno, No. NP13P1368, NURETH-13(2009)

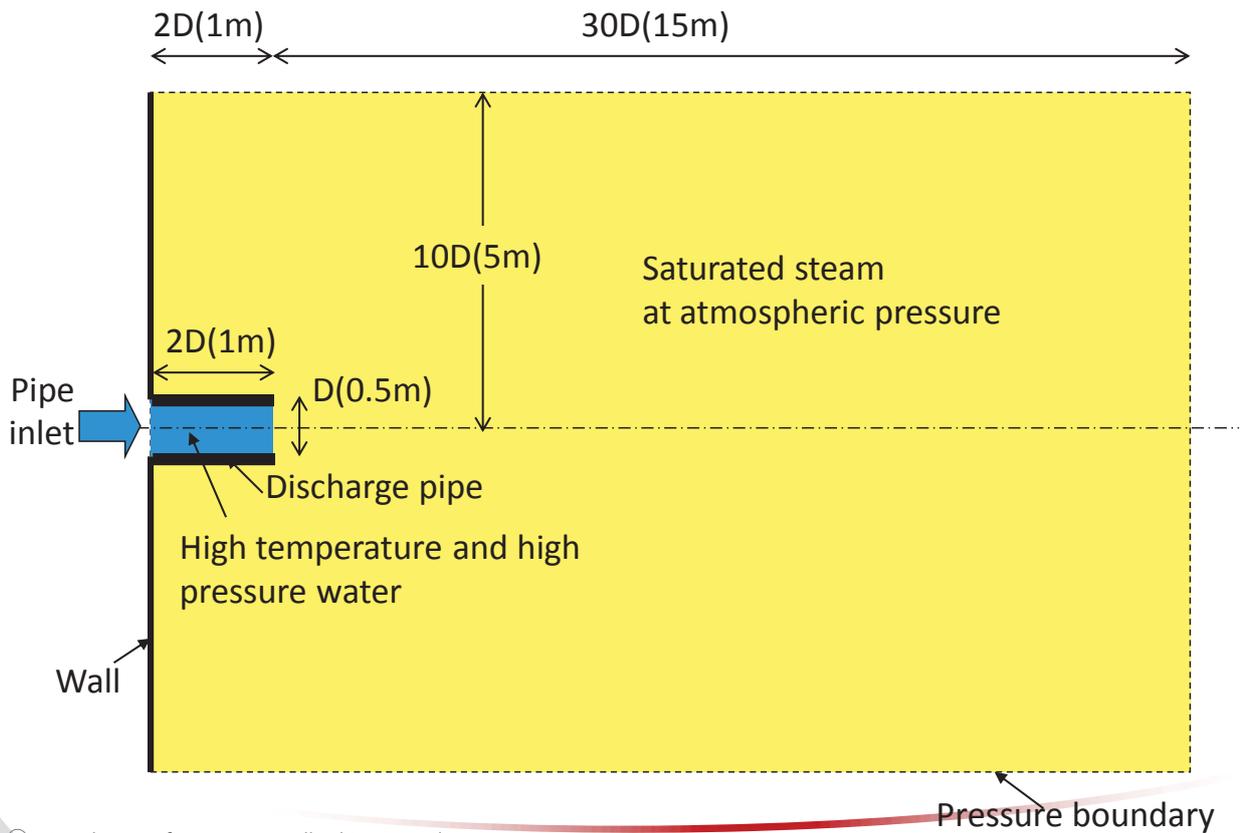
29

衝突板上の圧力分布

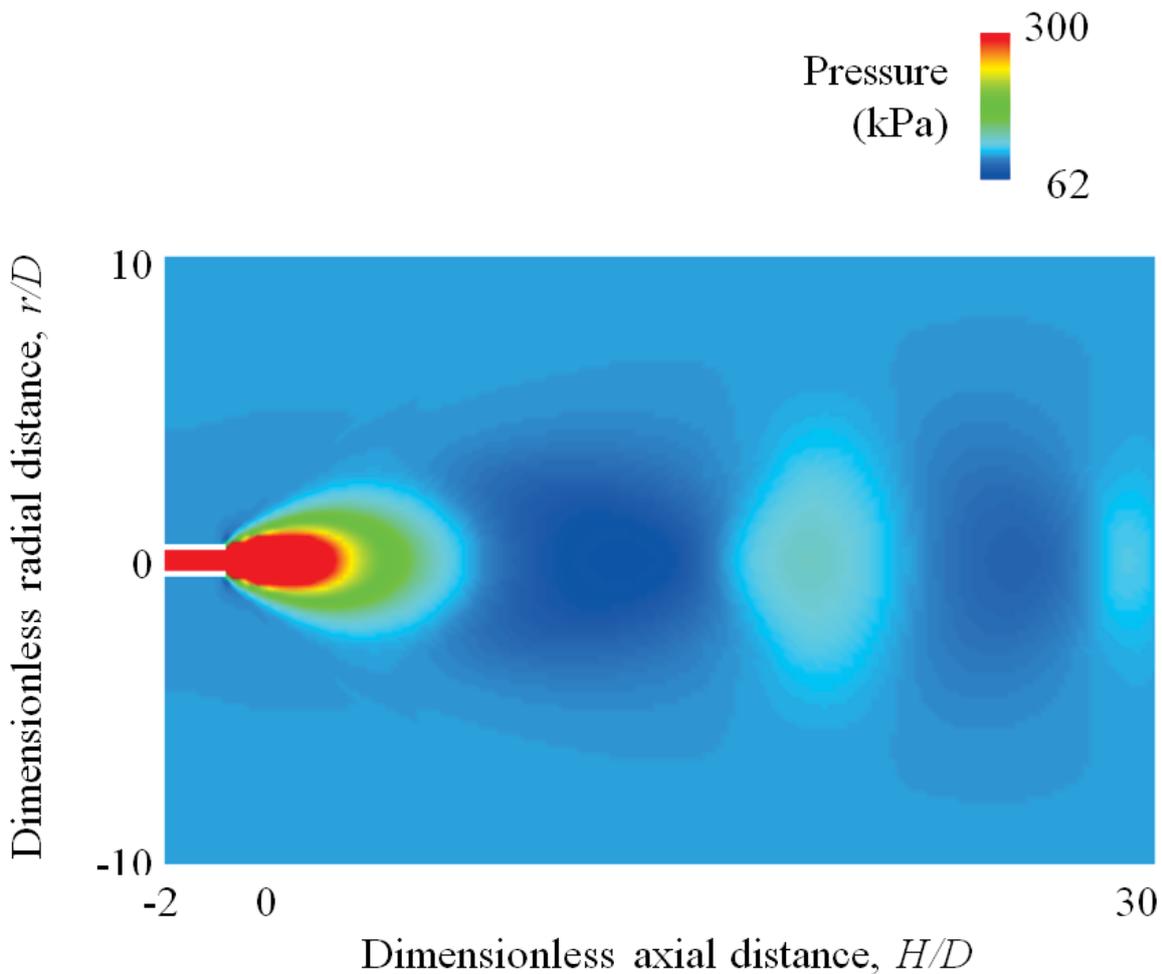


<http://www.advancesoft.jp/>



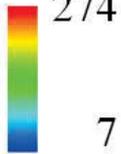


自由噴流中の圧力分布解析結果 (PWR condition)



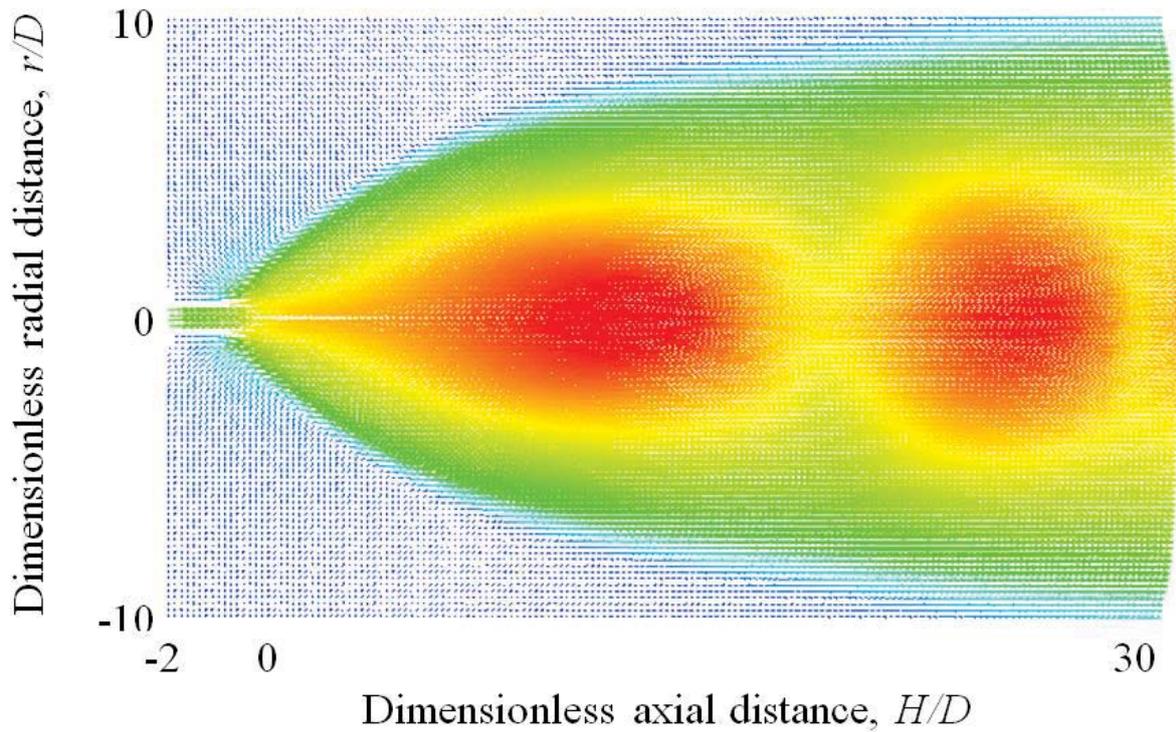
自由噴流中の速度分布解析結果 (PWR condition)

Volumetric velocity (m/s)



274
7


v.advancesoft.jp/



Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

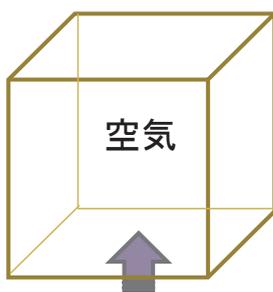
33

高粘性流体の自由液面流


AdvanceSoft

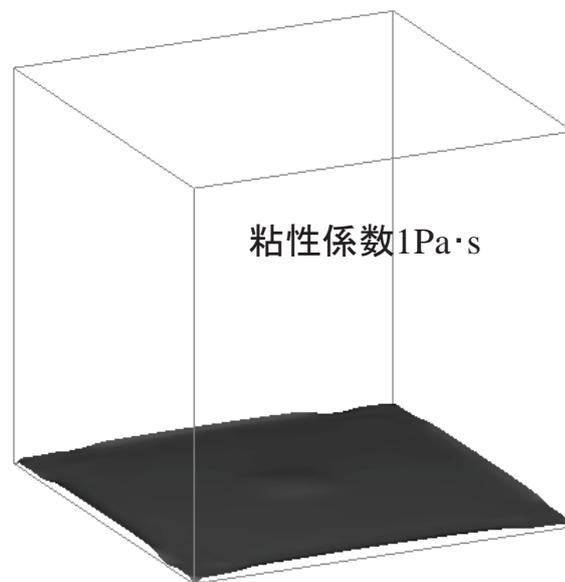
<http://www.advancesoft.jp/>

解析領域 0.5m立方
密度 1000kg/m³



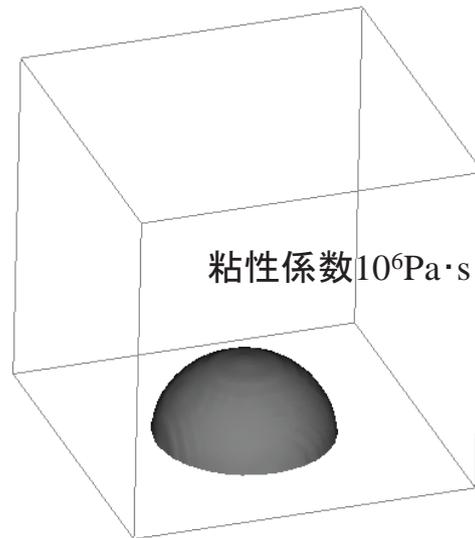
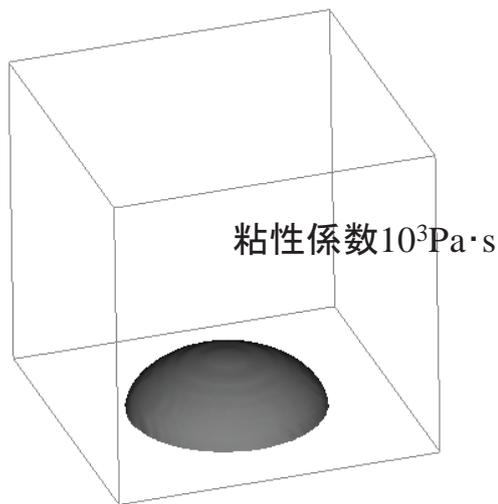
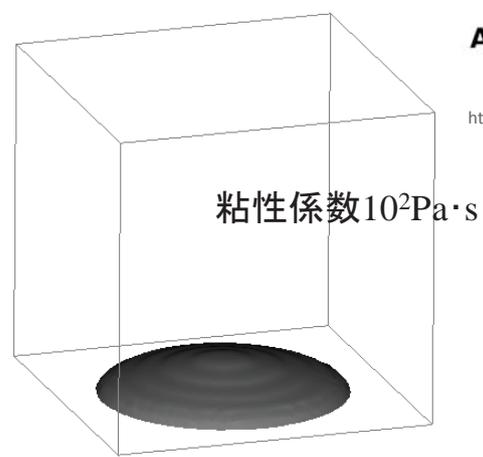
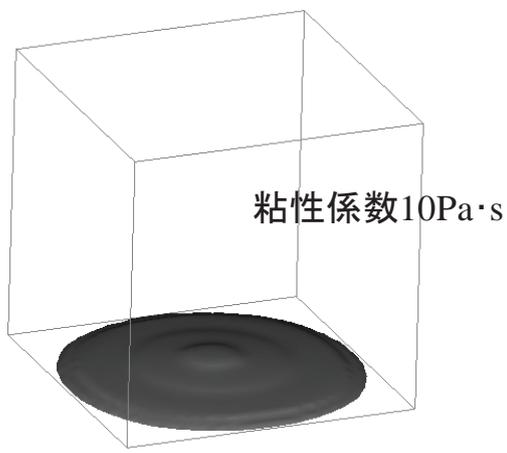
粘性流体湧出し(0.1m/s)
(7.2cm平方開口から6秒間)

粘性係数: 1~10⁶Pa·s

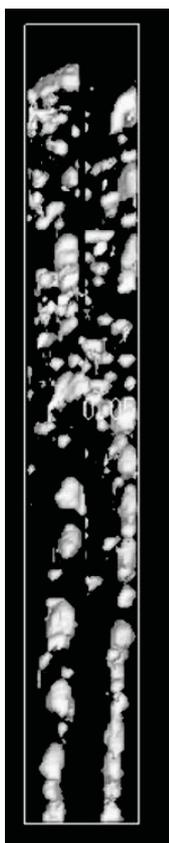


Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

34



動画による計算例の紹介



気泡流



スラグ流



インクジェット



衝突液滴

■原子力

- ・燃料集合体
- ・セパレータ
- ・再処理蒸発缶
- ・蒸気発生器, 給水加熱器
- ・安全評価(超音速二相流, シビアアクシデント)

■機械

- ・空調冷媒系
- ・二相流ポンプ
- ・自動車燃料インジェクタ
- ・気泡反応塔
- ・キャビテーション
- ・船舶の碎波
- ・ポンプ機場水路
- ・安全評価(水蒸気爆発, 水撃)

■防災

- ・火山噴火
- ・津波
- ・洪水, 高潮
- ・土石流, 液状化

結 言

(現状)

従来の時間・空間平均化した準定常現象を対象とした解析から非均質・間欠性を直接取り扱う過渡三次元解析への移行過程

(課題)

高精度二流体モデル/界面追跡モデルの確立

- ・標準アルゴリズムの確立
- ・大規模, 高速計算技術
- ・機能拡大と検証

(沸騰/凝縮, 化学反応, 固体連成, 液滴・気泡・液膜微視的モデル)

- ・解析結果の表現技術

(グラフィック, 動画)

(展開)

解析技術の普及と適用実績の蓄積