

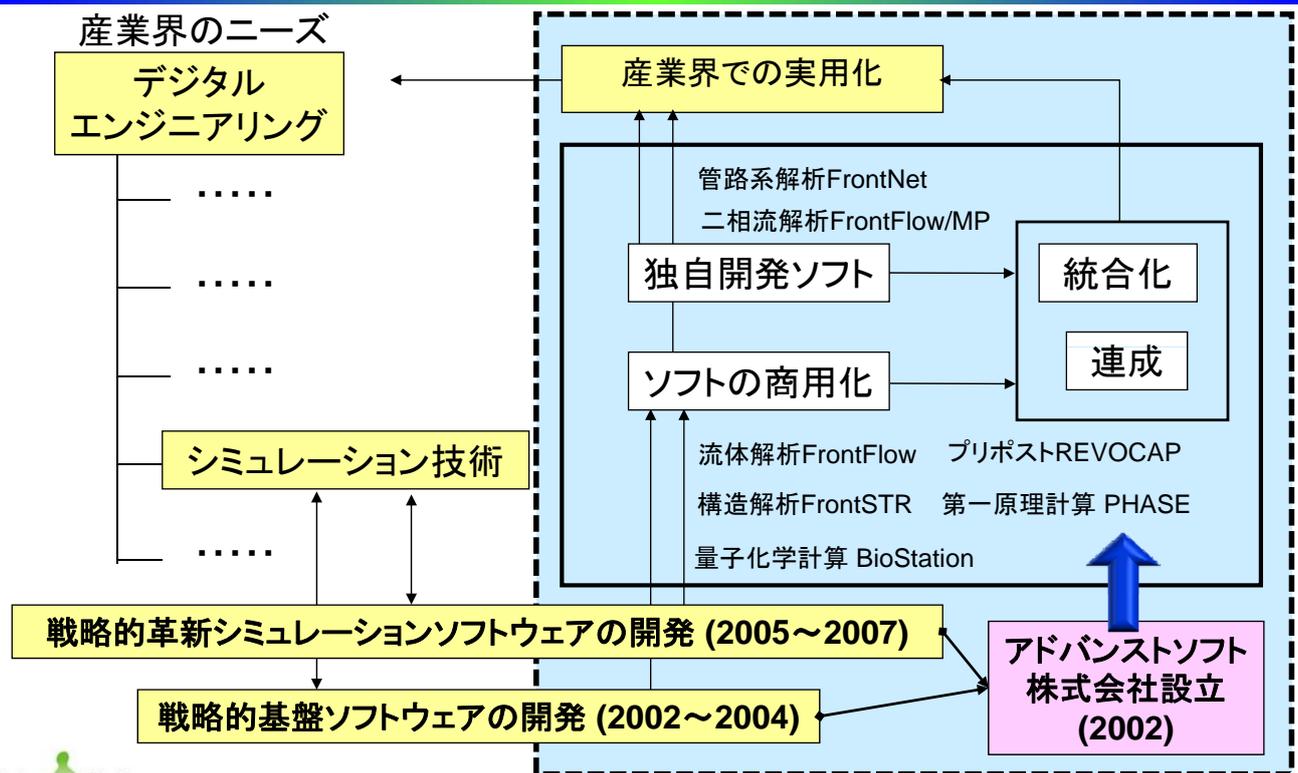
アドバンスソフト株式会社について

第2事業部

アドバンスソフトにおける
二相流解析技術の最新動向セミナー
2013年2月13日(水)開催



アドバンスソフトとは



アドバンスソフトの事業分野と事業内容



アドバンスソフトのパッケージソフトウェア

<p>ナノ</p> <p>Advance/PHASE</p> <p>Advance/TFLAGS</p>	<p>流体</p> <p>Advance/FrontFlow/red</p> <p>Advance/FrontFlow/MP</p> <p>Advance/FrontFlow/FOCUS</p> <p>Advance/EVE SAYFA</p>	<p>構造</p> <p>Advance/FrontSTR</p>
<p>バイオ</p> <p>Advance/BioStation</p> <p>Advance/ProteinDF</p>	<p>メソ</p> <p>Advance/OCTA</p>	<p>統合プラットフォーム</p> <p>Advance/PSE Workbench</p>
		<p>管路系</p> <p>Advance/FrontNet</p>



アドバンスソフトのパッケージソフトウェア

ソフトウェア名称	解析内容
Advance/FrontFlow/red	流体解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/MP	気液二相流解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/FOCUS	高速流解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/SSMP	超音速気液二相流解析ソフトウェア
Advance/EVE SAYFA	都市安全・環境シミュレータ
Advance/FrontNet	管路系1次元流体解析ソフトウェア群
Advance/FrontSTR	汎用構造解析ソフトウェア
Advance/FrontNoise	騒音解析ソフトウェア
Advance/REVOCAP	構造解析・流体解析プリポストプロセッサ
Advance/PSE Workbench	統合プラットフォーム
Advance/PHASE	第一原理バンド計算ソフトウェア
Advance/DESSERT	半導体デバイスシミュレータ
Advance/BioStation	大規模タンパク質の量子化学計算解析ソフトウェア
Advance/OCTA	ソフトマテリアル統合シミュレータ

(注)表には主要なものを挙げています。詳細はwww.advancesoft.jpへ



アドバンスソフトの二相流解析ソフトウェア

ソフトウェア	解析方法	特徴	対象スケール
Advance/FrontFlow/red	界面追跡法 (VOF法)	固定格子で界面挙動を直接計算 表面張力・壁面の濡れ性可	マクロ (分散相界面と大規模界面をシャープに計算)
Advance/FrontFlow/red	Euler-Lagrangian 粒子追跡法	気泡や液滴をLagrangian粒子で追跡 気泡や液滴は質点運動	マクロ (分散相)
Advance/FrontFlow/red	均質流モデル キャピテーションモデル	均質流モデル 計算セル内の界面分布は計算不可	マクロ (分散相界面と大規模界面を平均的に計算)
Advance/FrontFlow/MP	二流体モデル	二流体モデル 計算セル内の分散相と大規模界面 気泡径分布変化の計算も可	マクロ (分散相界面と大規模界面を平均的に計算)
Advance/FrontFlow/SSMP	圧縮性二流体モデル	超音速二相流可 二流体モデル 計算セル内の分散相と大規模界面	マクロ (分散相界面と大規模界面を平均的に計算)
Advance/FrontFlow/FOCUS	圧縮性均質二相流モデル キャピテーションモデル	超音速二相流可 均質流モデル	マクロ (分散相界面と大規模界面を平均的に計算)
Advance/FrontNet/TP	1次元気液二相流管路系	1次元ネットワークモデル ドリフトフラックスモデル	マクロ (分散相界面と大規模界面を平均的に計算)
—	二相系格子ボルツマン法(LBM)	統計力学に基づきマクロ量を計算	メソスケール
—	分子動力学法	気泡や液滴の分子レベルの挙動を 計算、非連続体に適用可能	マイクロスケール



facebook、YouTubeでも関連記事を掲載中

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



<http://www.youtube.com/user/advancesoft>



7

気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MPの概要

アドバンスソフトにおける
二相流解析技術の最新動向セミナー
2013年2月13日(水)開催



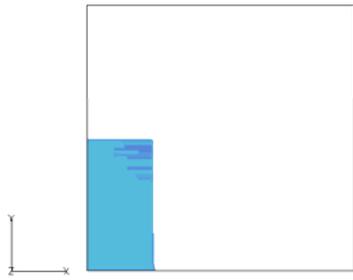
Advance/FrontFlow/MPとは？

- 二流体モデルによる三次元気液二相流解析ソフトウェア
- 流体解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/redをベースに、アドバンスソフトが独自に開発したソフトウェア

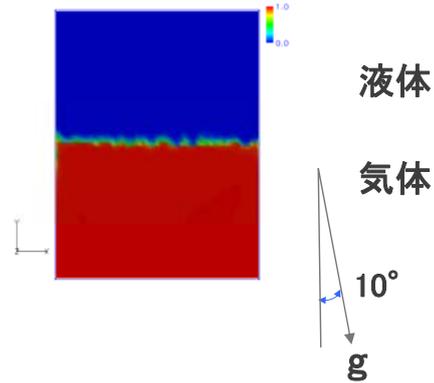


Advance/FrontFlow/MPの特長

- 気泡流や噴霧流や自由表面を同時に扱える。



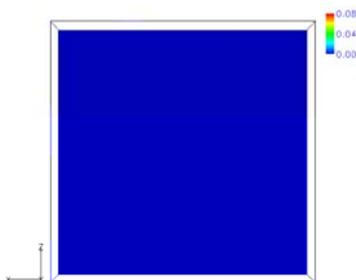
AdvanceSoft **液柱崩壊の計算例**



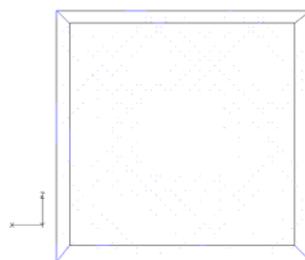
沈殿の計算例

Advance/FrontFlow/MPの特長

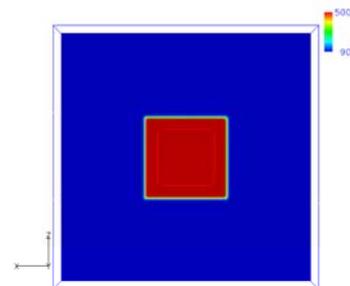
- 沸騰や凝縮や固体熱伝導を同時に扱える。
- 界面抗力、揚力、界面熱伝達、壁面熱伝達などの構成方程式が組み込まれている。



ボイド率



液体速度

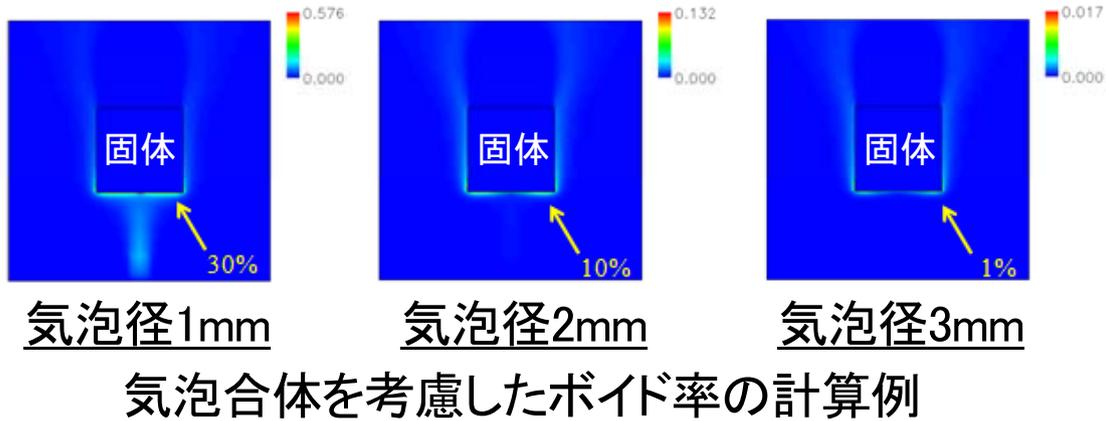


固体温度

AdvanceSoft **焼入れの計算例**

Advance/FrontFlow/MPの特長

- 気泡群の個別運動と相互作用を考慮した気液二相流解析ができる。



Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ 乱流モデル

□ 混合型k-εモデル(デフォルト)

気相と液相を混合した速度と密度を使用したk-εモデル

$$v_m = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i v_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i \right) \quad \rho_m = \sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i \quad \mu_{m,t} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

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

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

□ 分散型k-εモデル(気泡流用のk-εモデル)

液相のk-εモデルを使用し、気泡によるkとεの生成を考慮

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

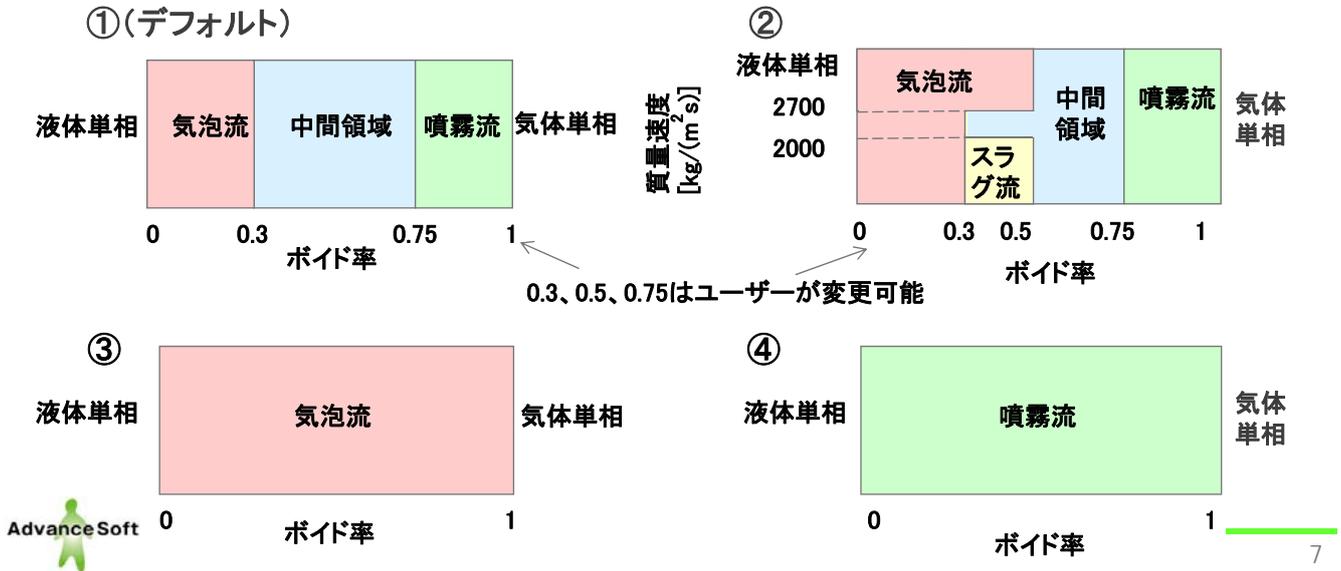
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_l \alpha_l \varepsilon) + \nabla (\rho_l \alpha_l \varepsilon v_l) = \nabla \cdot \left\{ \alpha_l \left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right\} + c_1 \alpha_l \frac{\varepsilon}{k} G - c_2 \rho_l \alpha_l \frac{\varepsilon^2}{k}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



Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ 流動様式

気液界面の状態により相間の質量・運動量・エネルギーの輸送機構が異なるため、二流体モデルでは毎時刻、メッシュ毎に流動様式を求め、構成方程式を切り替える。流動様式として次の4つのタイプが用意されている。



Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ 相間の運動量交換

□ 界面摩擦力(液相と気相の間の抵抗力)

気泡の界面変形と運動状態

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、直線的に運動する。
- ・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し、終端速度は大きくなる。

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、振動して運動する。
- ・液体の純度は終端速度に影響を与えない。

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

①と②を含む広範囲な気泡径と物性の実験値を神戸大・富山らがフィッティングした次の抗力係数式が使用されている。

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

$$C_D = \begin{cases} \max \left[\min \left\{ \frac{16}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{48}{Re} \right\}, \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \alpha_l^{3-2n} & \text{高純度の液体の場合} \\ \max \left[\min \left\{ \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{72}{Re} \right\}, \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \alpha_l^{3-2n} & \text{中純度の液体の場合} \\ \max \left[\frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \alpha_l^{3-2n} & \text{低純度の液体の場合} \end{cases}$$

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(物性の影響を示す)

Re : 気泡レイノルズ数(E_o 、 M 、 C_D から計算)

$10^{-2} < E_o < 10^3$ 、 $10^{-14} < M < 10^7$ 、 $10^{-3} < Re < 10^5$ の範囲で実験値がフィッティングされ、気泡群の効果も考慮されている。



富山・ほか,機論,61-587,B(1995),2357

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ 揚力

揚力は気液速度差と液体の速度勾配の作用によって、流れに対して垂直方向に働く力である。揚力によって、気泡は壁に近づいたり離れたりする。

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

広範囲な気泡径と物性の実験値を富山らがフィッティングした次の揚力係数式が使用されている。

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

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



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

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ 壁面潤滑力

壁面潤滑力は、気泡が壁に沿って移動するときに、液体が壁から排除されるのに伴って気泡が壁から遠ざかる挙動を表現する。以下に示すAntalらのモデルが使用されている。

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

□ 乱流拡散力

乱流拡散力は、ボイド率の分布に偏りがあるときに、ボイド率の分布を均一にする力を表現する。以下に示すLopezらのモデルが使用されている。

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



Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ 相間の熱伝達

□ 気泡流

$$h_{il} = \begin{cases} \max(h_{il1}, h_{il2}) & (T_l \geq T_s) \\ 0.02 \rho_l V_r \frac{\partial e_l}{\partial T_l} & (T_l < T_s) \end{cases} \quad \dots \text{液体側の相間熱伝達係数}$$

$$h_{ig} = \begin{cases} 1000 & (T_g \geq T_s) \\ 10000 & (T_g < T_s) \end{cases} \quad \dots \text{気体側の相間熱伝達係数}$$

$$A_i = 6 \alpha_g \frac{1}{D_b} \quad \dots \text{界面積}$$

ここで

$$h_{il1} = \frac{\lambda_l}{D_b} (2 + 0.74 \text{Re}_b^{0.5})$$

$$h_{il2} = 3.81972 (T_l - T_s) \frac{\lambda_l}{D_b} \frac{\rho_l \frac{\partial e_l}{\partial T_l}}{\rho_g (h_{sg} - h_{sl})}$$



Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ 噴霧流

$$h_{il} = \begin{cases} 15000 \frac{\lambda_l}{D_d} & (T_l \geq T_s) \\ 0.02 \rho_l V_{circ} \frac{\partial e_l}{\partial T_l} & (T_l < T_s) \end{cases} \quad \cdot \cdot \text{液体側の熱伝達係数}$$

$$h_{ig} = \frac{\lambda_g}{D_d} (2 + 0.74 \text{Re}_g^{0.5} \text{Pr}_g^{0.333}) \quad \cdot \cdot \text{気体側の熱伝達係数}$$

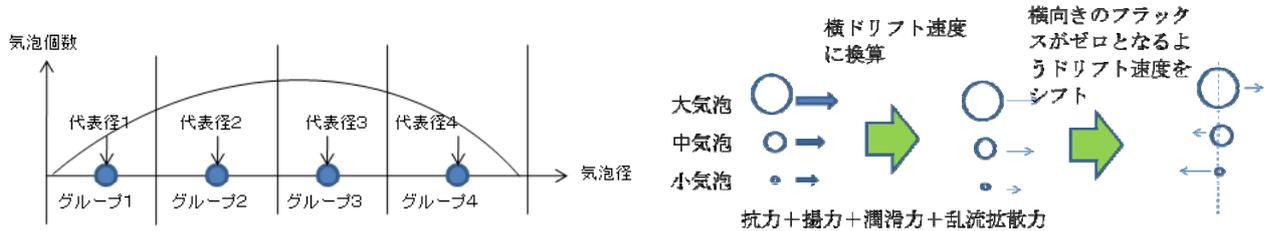
$$A_i = 6(1 - \alpha_g) \frac{1}{D_d} \quad \cdot \cdot \text{界面積}$$



Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ 気泡群個別運動と相互作用(気泡合体)

□ グループ化とドリフト速度の計算



・気泡径によって、抵抗力・揚力・壁面潤滑力・乱流拡散力が異なるため、気泡径毎に気泡は異なる運動をする。



・全ての気泡径について質量保存式と運動量保存式を解くと計算負荷が現実的でないので、気泡群を気泡径の範囲でグループに分け、同一グループ内の気泡は同じ運動をするものと仮定する。



・気相全体の平均速度に対する各気泡グループの速度は、力学的平衡状態(瞬時に終端速度に達する)と仮定して、代数式で計算する。

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

基本機能

- ・ 気相の質量保存式
- ・ 液相の質量保存式
- ・ 気相の運動量保存式
- ・ 液相の運動量保存式
- ・ 気相のエネルギー保存式
- ・ 液相のエネルギー保存式



拡張機能

- ・ 気泡群の質量保存式 (複数)
- ・ 液相の質量保存式
- ・ 気相の運動量保存式
- ・ 気泡群の運動量保存式 (複数)
- ・ 液相の運動量保存式
- ・ 気相のエネルギー保存式
- ・ 液相のエネルギー保存式



Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ 気泡群の質量保存式(ポピュレーションバランス方程式)

気泡合体による気泡径分布の変化を求めるために、気泡径グループ毎に次の質量保存式が解かれる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \alpha_{gi}) + \nabla(\rho_g v_g \alpha_{gi}) = S_{gi}$$

ここで

$$S_{gi} = \rho_g \frac{\pi}{6} d_i^3 (B_{ci} - D_{ci} + B_{bi} - D_{bi})$$

$$B_{ci} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i Q_{jk}$$

$$D_{ci} = n_i \sum_{j=1}^N Q_{ij}$$

$$B_{bi} = \sum_{j=i+1}^N G_{ji} n_j$$

$$D_{bi} = n_i \sum_{j=1}^i G_{ij}$$

気泡合体は以下が考慮される。

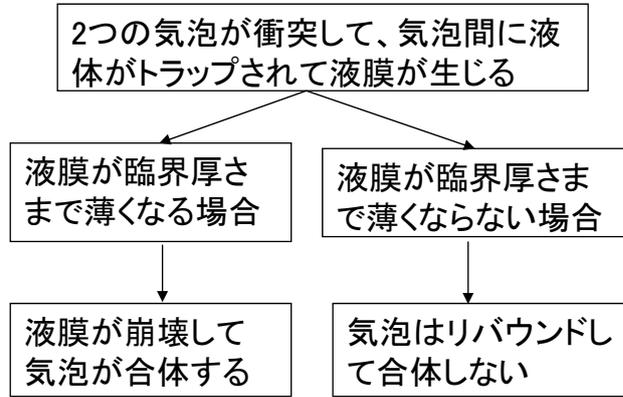
- (a) 液相の乱流運動による気泡合体
- (b) 気泡間の相対速度による気泡合体
- (c) 液相の速度勾配による気泡合体



Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ 気泡合体モデル

気泡のマイクロバブル化(汚れや気泡の帯電が気泡合体に与える影響)は省略し、次の力学モデルが使用されている。



気泡合体の力学モデル



参考: Chen, P., J. Sanyal and M.P. Dudukovic, "Numerical Simulation of Bubble Columns Flow: Effects of Different Breakup and Coalescence Closures," Chem. Eng. Sci., 60, 1085(2005)

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ 気泡合体のソースターム (Prince & Blanchのモデル)

$Q_{ij} = (\theta_{ij}^T + \theta_{ij}^B + \theta_{ij}^L) \exp(-t_{ij} / \tau_{ij})$... 衝突頻度と、液膜が臨界厚さに達するまで2つの気泡が接触している割合の積で表現

ここで

- θ_{ij}^T : 乱流運動による衝突頻度[1/(m³s)]
- θ_{ij}^B : 浮力による衝突頻度[1/(m³s)]
- θ_{ij}^L : 層流せん断による衝突頻度[1/(m³s)]
- $\exp(-t_{ij} / \tau_{ij})$: 気泡間の衝突に対して気泡が合体する割合
- $t_{ij} = C \left(\frac{r_{ij}^3 \rho_l}{16\sigma} \right)^{0.5} \ln \left(\frac{h_0}{h_f} \right)$: 気泡間の合体に要する時間[s], Cはパラメータ
- $\tau_{ij} = r_{ij}^{2/3} / \varepsilon^{1/3}$: 気泡間の接触時間[s]
- ε : 乱流エネルギーの散逸率[m²/s³]



Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ 固体粒子の凝集モデル(1way)

□ グループ毎の運動量保存式

$$\rho_p \frac{Dv_{pk}}{Dt} = -\frac{3}{4} C_{Dm} \frac{\rho_l}{d_{pm}} |v_l - v_{pk}| (v_{pk} - v_l) + \rho_l \frac{Dv_l}{Dt} + \frac{1}{2} \rho_l \left(\frac{Dv_l}{Dt} - \frac{Dv_{pk}}{Dt} \right) + (\rho_l - \rho_p) g_i$$

粒子の慣性力 相間の抗力 圧力勾配力 付加慣性力 浮力

□ 粒径グループ毎の個数濃度の保存方程式

$$\frac{\partial n_{pk}}{\partial t} + \nabla(n_{pk} v_{pk}) = \nabla(D_{pk} \nabla n_{pk}) + S_{pk}$$

$$S_{pk} = \left(\frac{1}{2} \sum_{m+n=k} N_{mm} - \sum_{m=1}^{max} N_{mk} \right) \eta = \left(\frac{1}{2} \sum_{m+n=k} \beta(m,n) n_m n_n - \sum_{m=1}^{max} \beta(m,k) n_m n_k \right) \eta$$

右辺第1項: グループkより小さい粒子同士が凝集して、グループkの粒子が生成する項

右辺第2項: グループkの粒子が他グループの粒子と凝集して、グループkの粒子が消滅する項

$$\beta(m,n) = 2(2\pi)^{0.5} R^2 \left\{ \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_p} \right)^2 (\tau_m - \tau_n)^2 \frac{Dv_l}{Dt} + \frac{1}{3} \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_p} \right)^2 (\tau_m - \tau_n)^2 g^2 + \frac{1}{9} R^2 \frac{\varepsilon \rho_l}{\mu_l} \right\}^{0.5}$$



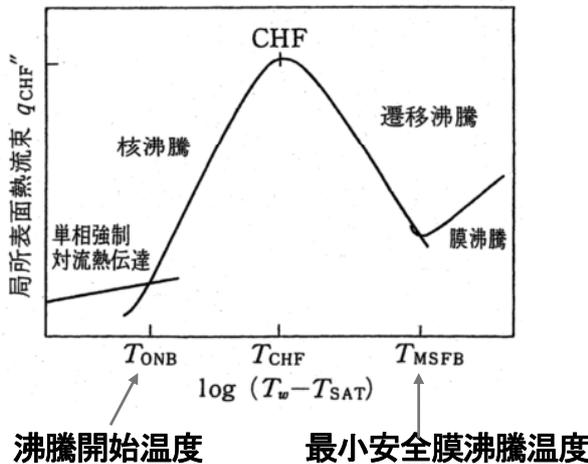
$$R = \frac{d_{pm} + d_{pn}}{2} \quad \tau_m = \frac{4}{3} d_{pm}^2 \rho_l / (\mu_l \text{Re}_m C_{Dm})$$

速度差による凝集と乱流による凝集を考慮

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ 壁面熱伝達

□ 熱伝達様式



- $T_w \leq T_{CHF}$: 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

壁面第1格子点の熱伝達様式を判別し、壁面熱伝達式を切り替えて使用する。

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

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ 限界熱流束(核沸騰領域と遷移沸騰領域の境界)

以下の(a)と(b)の熱流束相関式が一致するように、限界熱流束温度 T_{CHF} が計算される。

(a)Chenによる核沸騰熱流束相関式

$$q_{CHEN}'' = h_{nucb}(T_w - T_l)$$

(b)Zuberによる限界熱流束相関式

$$q_{CHF}'' = 0.15h_{fg}\rho_g^{0.5}\{\sigma g(\rho_l - \rho_g)\}^{0.25}$$

ここで

$$h_{nucb} = 0.00122 \frac{\lambda_l^{0.79} C_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} (h_{sg} - h_{sl})^{0.24} \rho_g^{0.24}} (T_w - T_s)^{0.24} (p_w - p)^{0.75} S W_{n2}$$

$$S = \begin{cases} 1.0 & (\text{Re}_{TPP} \leq 0) \\ (1 + 0.12 \text{Re}_{TPP}^{1.14})^{-1} & (0 < \text{Re}_{TPP} \leq 32.5) \\ (1 + 0.42 \text{Re}_{TPP}^{0.78})^{-1} & (32.5 < \text{Re}_{TPP} \leq 70) \\ (1 + 0.42 \times 70^{0.78})^{-1} & (70 < \text{Re}_{TPP}) \end{cases}$$



Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ 最小安全膜沸騰温度(遷移沸騰領域と膜沸騰領域の境界)

気体や懸濁物を含まない液中において沸騰気泡を生成する温度である均一沸騰核生成温度 T_{HN} を使用して、最小安全膜沸騰温度 T_{MSFB} が計算される。

$$T_{MSFB} = T_{HN} + (T_{HN} - T_l) \left(\frac{\lambda_l \rho_l C_{pl}}{\lambda_w \rho_w C_{pw}} \right)^{0.5}$$

ここで

$$T_{HN} = 705.44 - (4.722 \times 10^{-2})DP + (2.3907 \times 10^{-5})DP^2 - (5.8193 \times 10^{-9})DP^3$$

$$DP = 3203.6 - P$$

□ 飽和核沸騰領域に対する壁面熱伝達係数 h_{wl}

強制対流熱伝達係数 h_1 と核沸騰熱伝達係数 h_{nucb} からなるChenの式で h_{wl} が計算される。

$$h_{wl} = h_1 + W_{n1} h_{nucb}$$

ここで

h_1 : 単相流で使用される強制対流熱伝達係数

$$W_{n1} = \min \left(1, \frac{T_w - T_s}{T_w - T_l} \right)$$



Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ 膜沸騰領域に対する壁面熱伝達係数

壁面と液相の間の輻射熱伝達係数と壁面と蒸気膜の間の対流熱伝達係数から h_{wl} が計算される。

$$h_{wl} = h_r \frac{T_w - T_s}{T_w - T_l} + h_f \frac{T_w - T_s}{T_w - T_l}$$

ここで

$$h_r = (1 - \alpha_g) \sigma_{SB} \epsilon_r \frac{T_w^4 - T_s^4}{T_w - T_s}$$

$$h_f = \begin{cases} h_{f0} & (\alpha_g \leq 0.5) \\ h_{f0} (3 - 2X_1) X_1^2 & (0.5 < \alpha_g \leq 0.75) \\ 0 & (0.75 \leq \alpha_g) \end{cases}$$

$$h_{f0} = 0.62 \left\{ \frac{\rho_g \lambda_g^3 (\rho_l - \rho_g) g h_{lg}'}{\mu_g (T_w - T_s) \lambda} \right\}^{0.25} \quad (\text{Bromleyの式})$$



Advance/FrontFlow/MPの解析機能

□ その他

メッシュ	6面体／4面体／3角柱／4角錐／これらメッシュの混合
離散化	有限体積法／節点中心法
時間積分	Euler陰解法
移流スキーム	1次精度風上差分／2次精度風上差分／2次精度風上差分＋リミター
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	市販メッシュャーの利用
可視化	市販可視化ソフトの利用／フリーソフトParaviewの利用
ユーザーサブルーチン (Fortran90)	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、気泡合体のソースターム)



Advance/FrontFlow/MPの最近の改良

- 計算安定性と計算時間
 - ・緩和方法を改良(時間刻みが拡大)
- 計算精度
 - ・低品質格子で格子依存性が減少(勾配計算方法の改良)
- 使いやすさ
 - ・入力データを最適化して、入力変数の数を削減
 - ・わかりやすい入力変数名に変更
- その他
 - ・回転境界条件の追加
 - ・トルク出力機能の追加



Advance/FrontFlow/MPの今後の改良

- 計算安定性
 - ・更なる計算安定性向上
 - ・セル中心法の導入(Advance/FrontFlow/redの機能の移植)
- 計算時間
 - ・リスタート時に並列数の変更(Advance/FrontFlow/redの機能の移植)
 - ・時間刻みの自動コントロール
- 計算精度
 - ・構成方程式の改良(流体定義位置、凝縮熱伝達、適用範囲の拡大、修正機能、気泡合体モデルの改良、気泡分裂モデルの導入)
 - ・蒸気表の使用
- その他
 - ・ユーザーサブルーチン機能の充実
 - ・圧縮性対応
 - ・スライディング格子機能(開発中)
 - ・多流体対応(例えば、水/水蒸気と空気、液相と気相の多成分)



超音速二相流の事例紹介

アドバンスソフトにおける
二相流解析技術の最新動向セミナー
2013年2月13日(水)開催



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

Title

- (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
 - 音速
 - 臨界流
 - 圧力波と水撃



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

2

Title

- (2) 圧縮性二相流の数値解法
 - 圧縮性単相流の解法 (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) 超音速二相噴流の数値解析
 - 二相水撃
 - 大口径臨界二相流
 - 配管破断時超音速二相噴流



圧縮性単相流の基礎式

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

運動量保存則 $\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} = -\nabla P + \mathbf{F}$

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



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

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

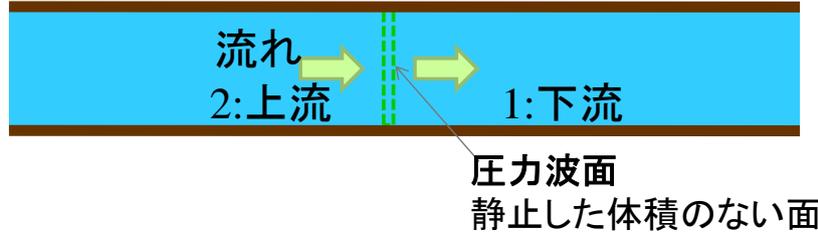


一次元圧縮性単相流の基礎方程式

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

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

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

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

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



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 剛性率 K を定義 $\beta = -\frac{1}{v} \left(\frac{dv}{dP}\right) = \frac{v}{c^2}$
 $K = \beta^{-1}$



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

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

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

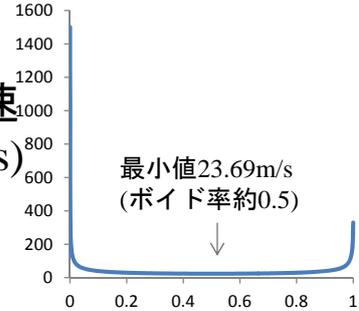
従って二相流の音速は

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

AdvanceSoft

音速

(m/s)



ボイド率

臨界流

質量保存則

$$\frac{d}{dz} \rho u = 0$$

運動量保存則

$$\frac{d}{dz} \rho u^2 + \frac{d}{dz} P = F$$

$G = \rho u = const.$ 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

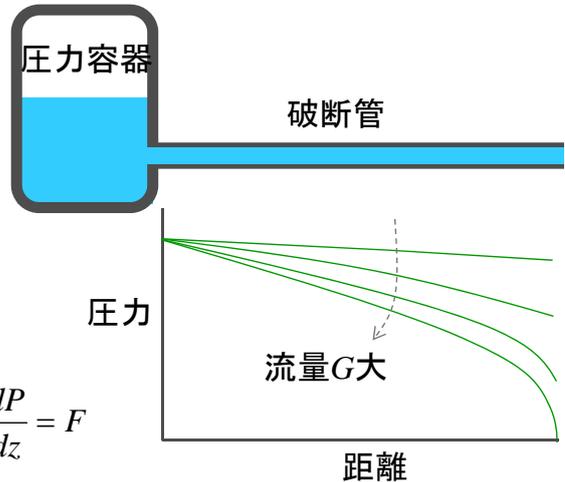
$$G = \sqrt{-\frac{1}{\left(\frac{dv}{dP} \right)}} = \rho c$$

均質二相流比容積

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

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)

AdvanceSoft

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

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



質量保存則と運動量保存則の変形

質量保存則

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



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

↓ $d\rho = \frac{1}{c^2} dP$ を用いて

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



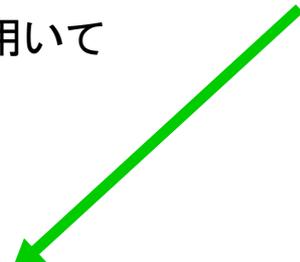
$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{\partial P}{\partial t}\right) + (u \pm c) \left(\frac{\partial u}{\partial z} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{\partial P}{\partial z}\right) = 0$$

運動量保存則

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

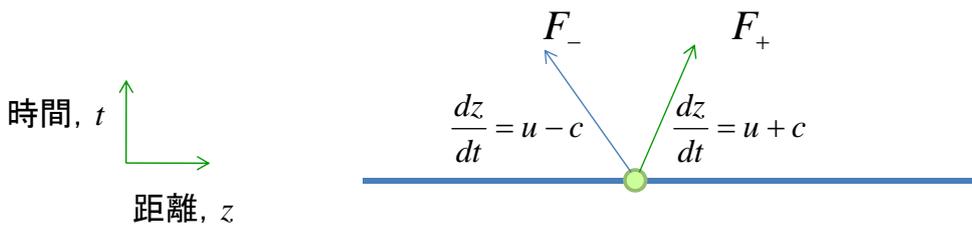


$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = 0$$

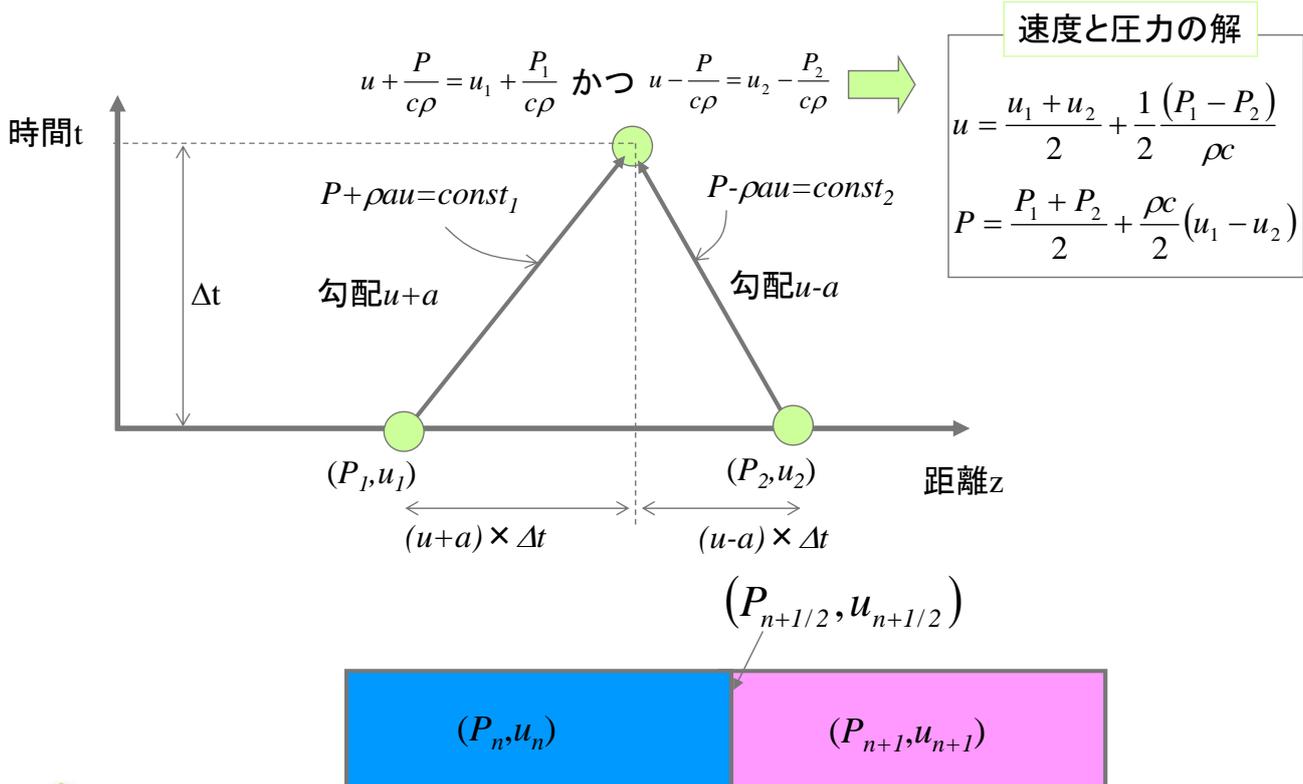


$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{\partial P}{\partial t}\right) + (u \pm c) \left(\frac{\partial u}{\partial z} \pm \frac{1}{\rho c} \frac{\partial P}{\partial z}\right) = 0 \quad \text{を二つのfluxに分ける}$$

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



特性曲線法による過渡解析



Godunov法の考え方

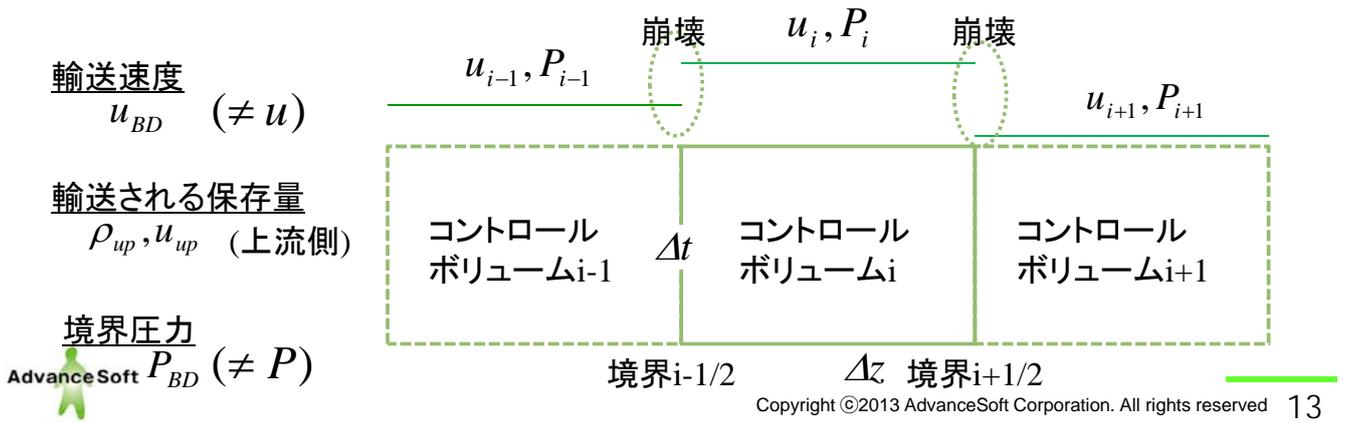
質量保存則 $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial z} = 0$ 運動量保存則 $\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + P)}{\partial z} = 0$

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

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

} $\rho, u, P(\rho)$

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 $\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k = -\alpha_k \nabla P + \mathbf{F}_{ik} + \mathbf{F}_{wk} + \mathbf{F}_{vk} + \nabla \cdot \alpha_k \mu_k \nabla \mathbf{u}_k + \alpha_k \rho_k \mathbf{g}$

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

$$\frac{\partial \alpha \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \rho_g u_g}{\partial z} = 0 \quad (\text{気体})$$

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

運動量保存則

$$\frac{\partial \alpha \rho_g u_g}{\partial t} + \frac{\partial \alpha \rho_g u_g^2}{\partial z} + \alpha \frac{\partial P}{\partial z} - F_{vm} = 0 \quad (\text{気体})$$

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

崩壊 $\alpha_i, u_{g,i}, u_{l,i}, P_i$ 崩壊

$\alpha_{i-1}, u_{g,i-1}, u_{l,i-1}, P_{i-1}$ $\alpha_{i+1}, u_{g,i+1}, u_{l,i+1}, P_{i+1}$

境界i-1/2 Δz 境界i+1/2

コントロールボリュームi-1 Δt コントロールボリュームi コントロールボリュームi+1

F_{vm} : 付加質量力



Godunov法の崩壊の関係式をそのまま使いたい

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

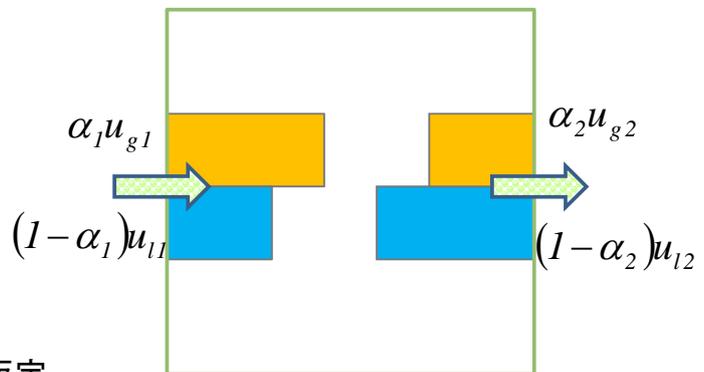
二流体モデルの二速度を一つの代表速度に置き換える

$\frac{\rho c}{2} (u_1 - u_2)$ 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

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



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

$\frac{j_1 + j_2}{2}$: j の平均
 $\frac{1}{2} \frac{(P_1 - P_2)}{\rho_{2\phi} c_{2\phi}}$: 衝突による j の変化 $\delta j \rightarrow \delta u_g, \delta u_l$ に配分

付加質量力(気液加速度差に比例)を考慮した気液速度変化の関係式

$$\alpha \rho_g \delta u_g - \rho_{vm} (\delta u_g - \delta u_l) = 0$$

ρ_{vm} は二相流単位体積あたりの付加質量

$$(1 - \alpha) \rho_l \delta u_l + \rho_{vm} (\delta u_g - \delta u_l) = 0$$

これより

$$\delta u_g = \frac{S^*}{1 + (S^* - 1)} \delta j$$

$$\delta u_l = \frac{1}{1 + (S^* - 1)} \delta j$$

気液加速度比
 $S^* = \frac{\delta u_g}{\delta u_l}$

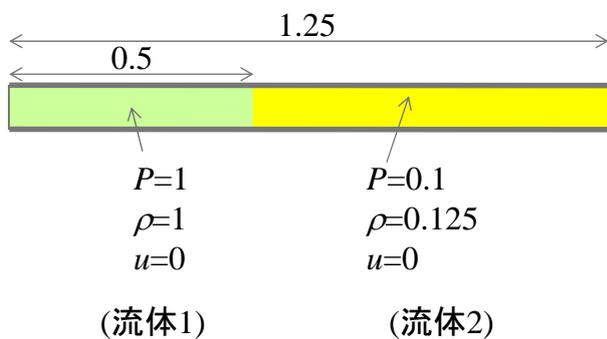
ここで $S^* = \frac{\rho_g + \alpha(1 - \alpha)\rho_{vm}}{\rho_l + \alpha(1 - \alpha)\rho_{vm}}$ と、 j 加速度に係る二相密度 $\rho_{2\phi} = \frac{\alpha S^* \rho_g + (1 - \alpha)\rho_l}{\alpha S^* + (1 - \alpha)}$



Benchmark Problem

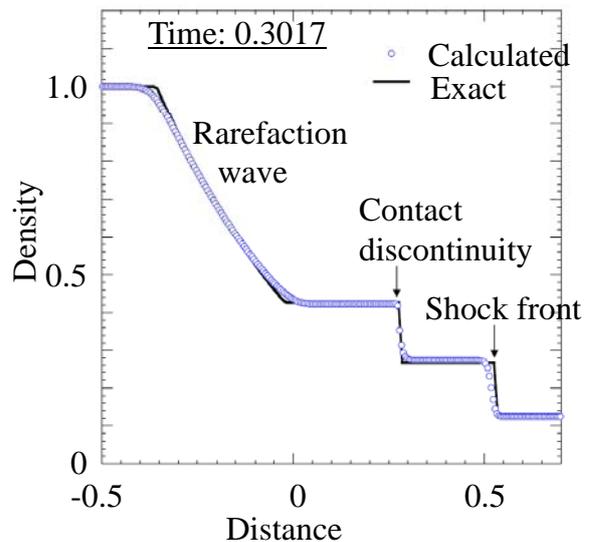
(Sod's shock tube)

Initial state



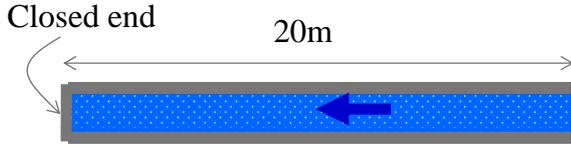
Time step: $\Delta t = 1.0 \times 10^{-3}$

Number of finite volumes: 200



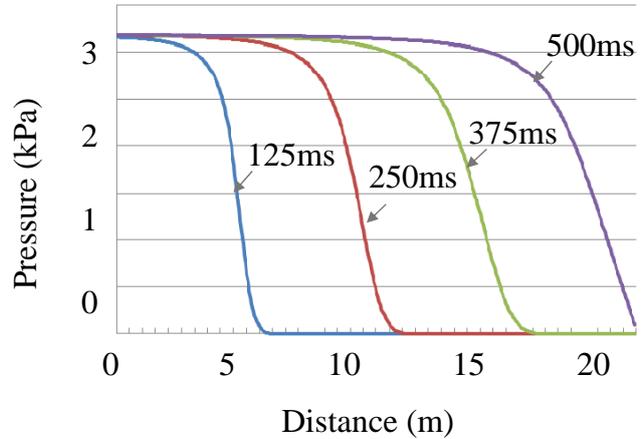
Benchmark Problem

(Hydraulic hammer in two-phase flow)



Uniform air-water mixture

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

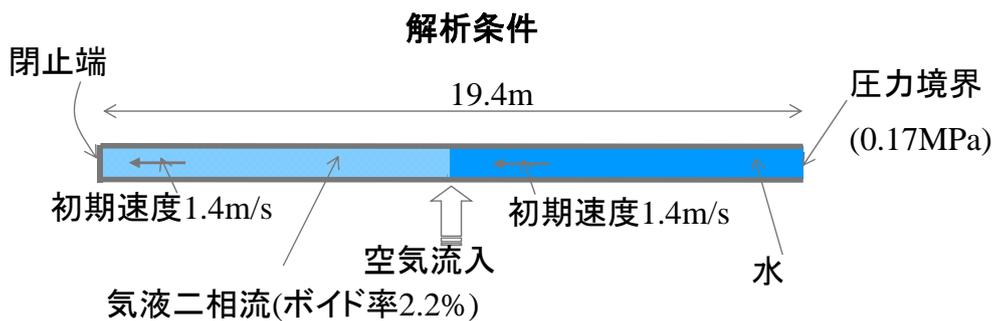


	Theoretical	Calculated
Wave propagation velocity (m/s)	35.3	36.4
Pressure rise (kPa)	3.18	3.20

AdvanceSoft

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved 19

単相/気液二相共存配管内水撃の実験解析

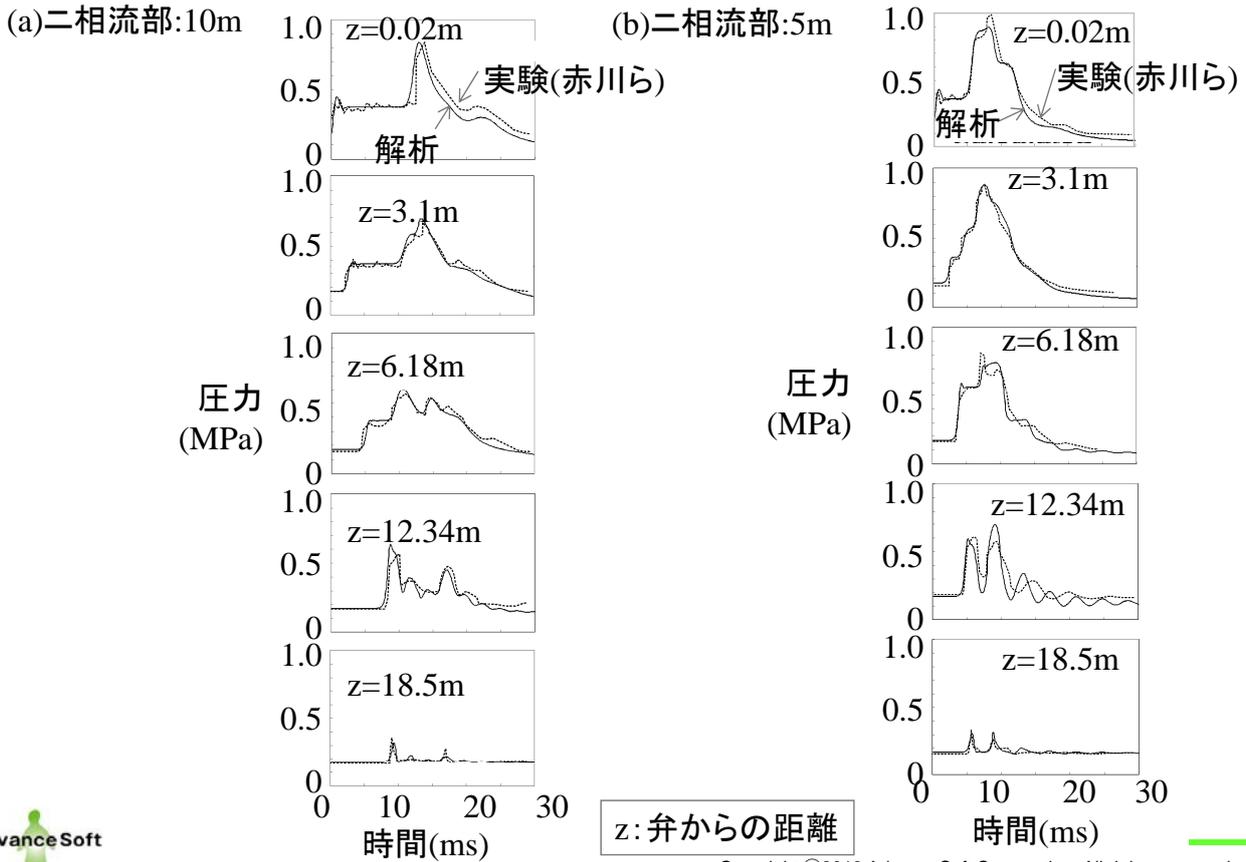


*湊, No.01-1224, 機論B68-673(2002)

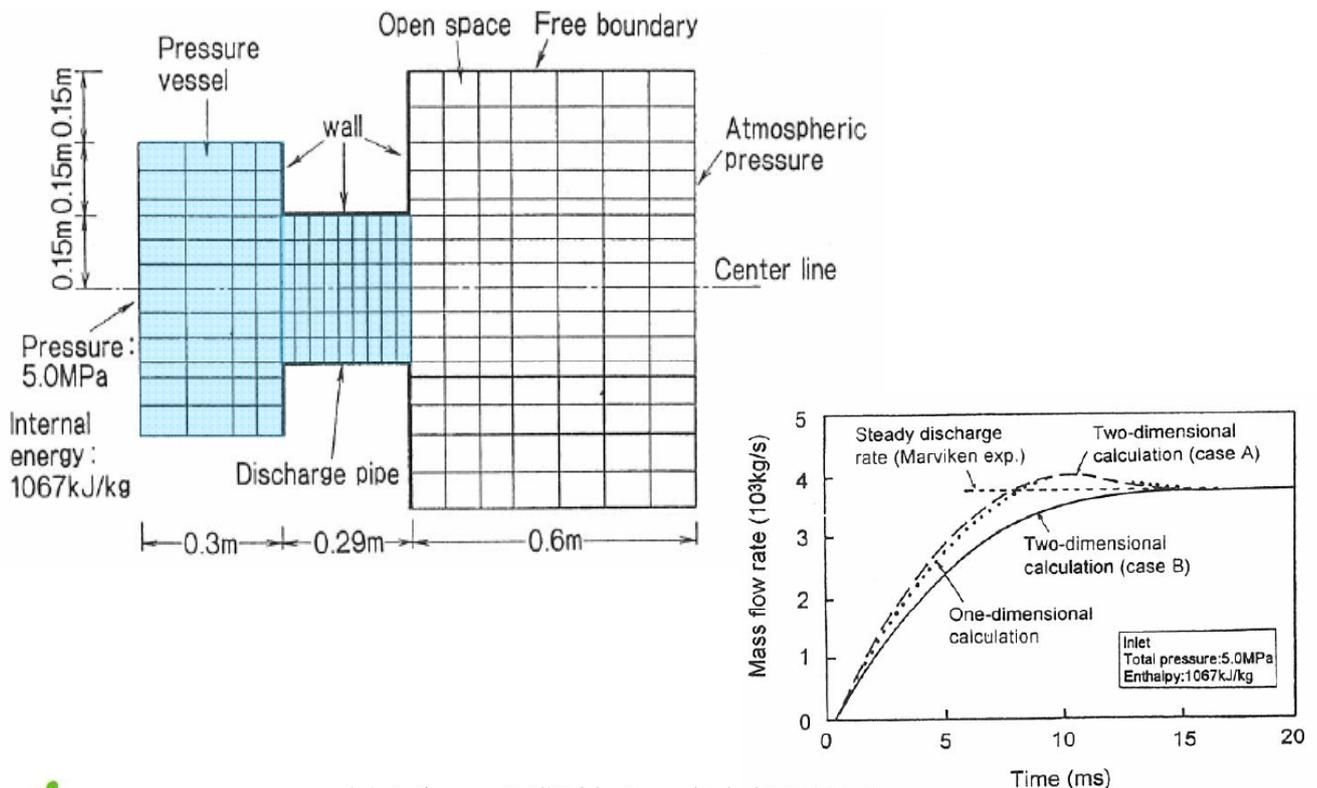
AdvanceSoft

Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved 20

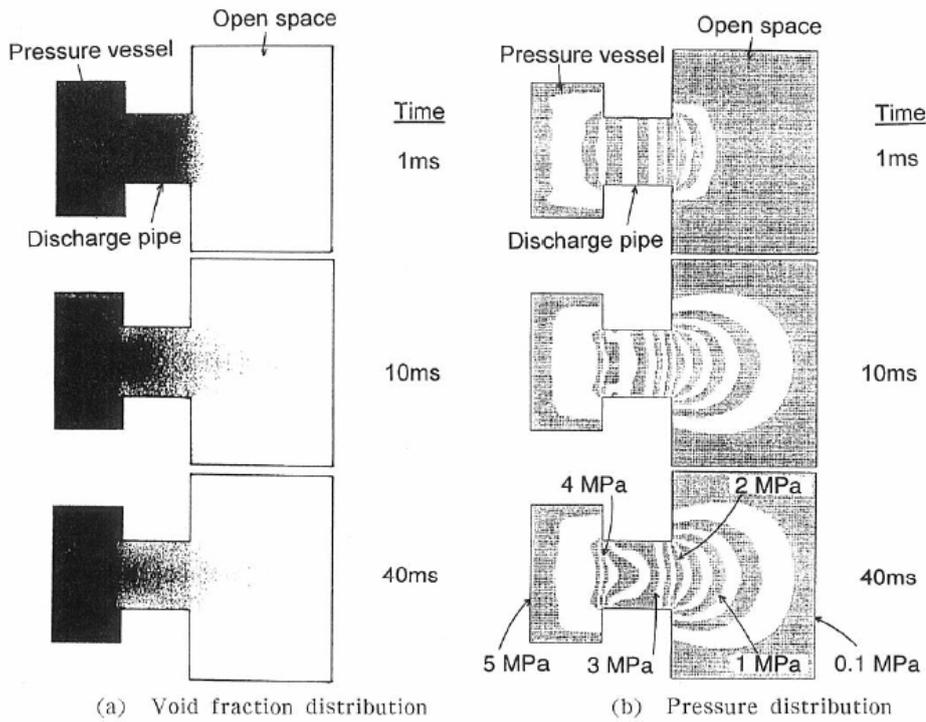
单相/二相共存配管内水撃の解析結果



大口徑臨界二相流の解析



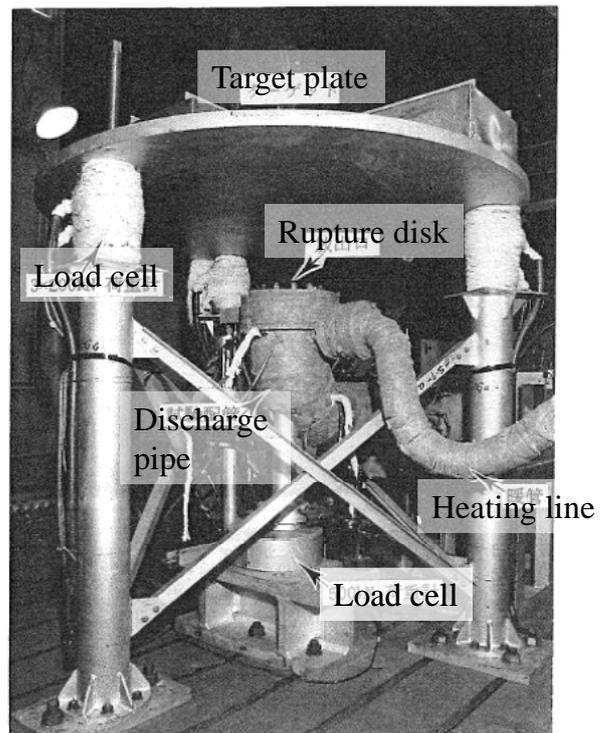
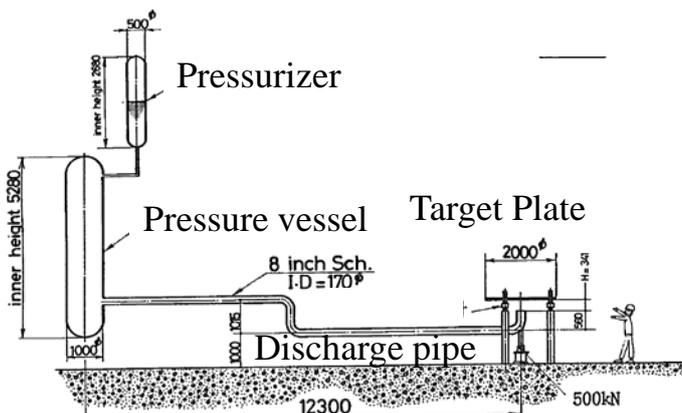
*A.Minato, JNST32-5, pp.464-475(1995)



二相ジェット荷重試験装置(旧原研)

Experimental conditions

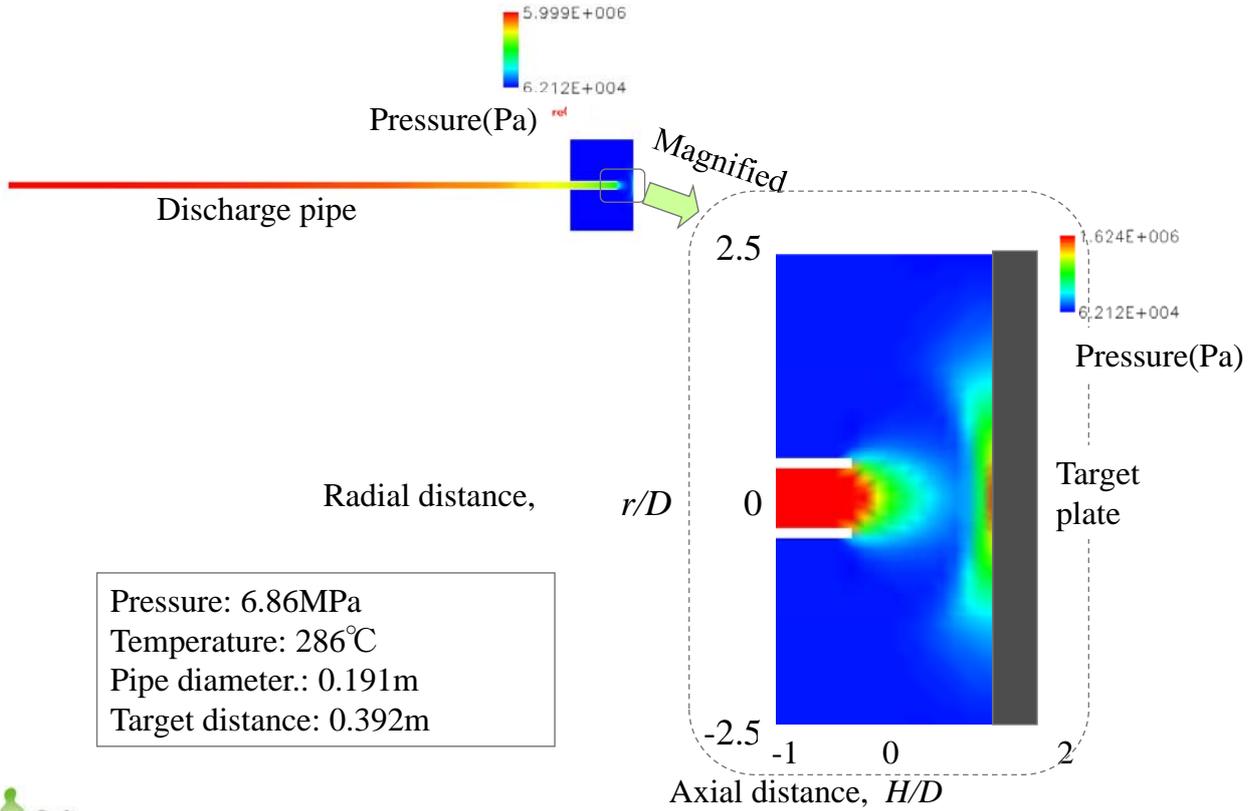
Reactor type		BWR	PWR
Water	Pressure (MPa)	6.8	15.5
	Temperature (°C)	285	325
Pipe diameter, D (mm)		90-190	
Distance to target, H/D		1, 2, 5, 18	



*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)

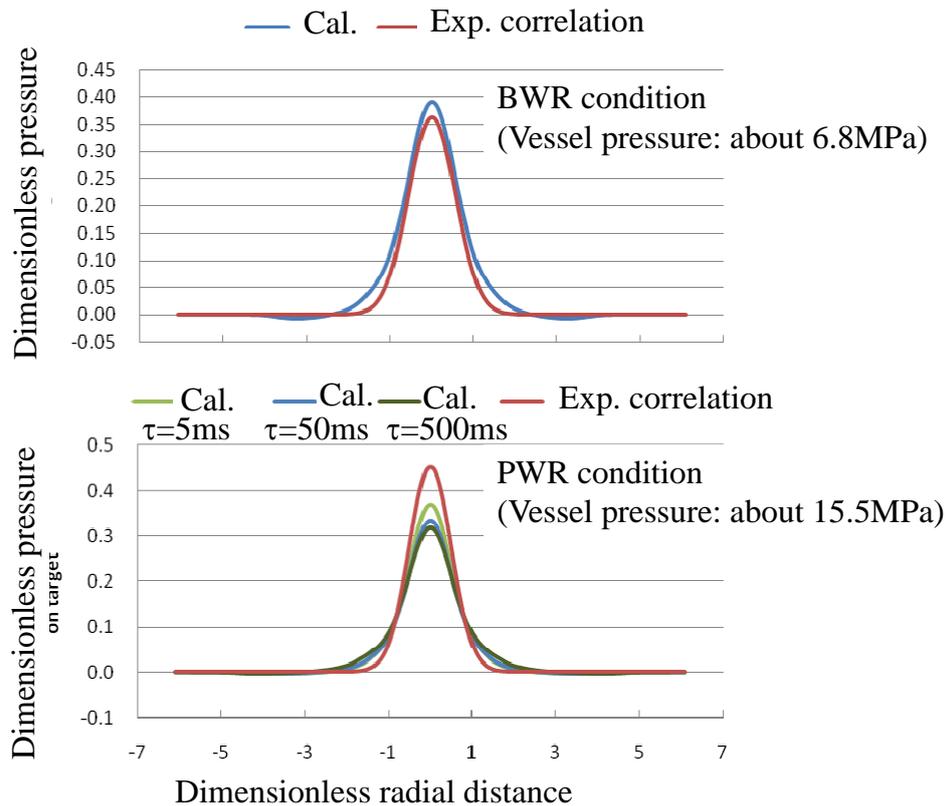


衝突板近傍圧力分布の解析結果



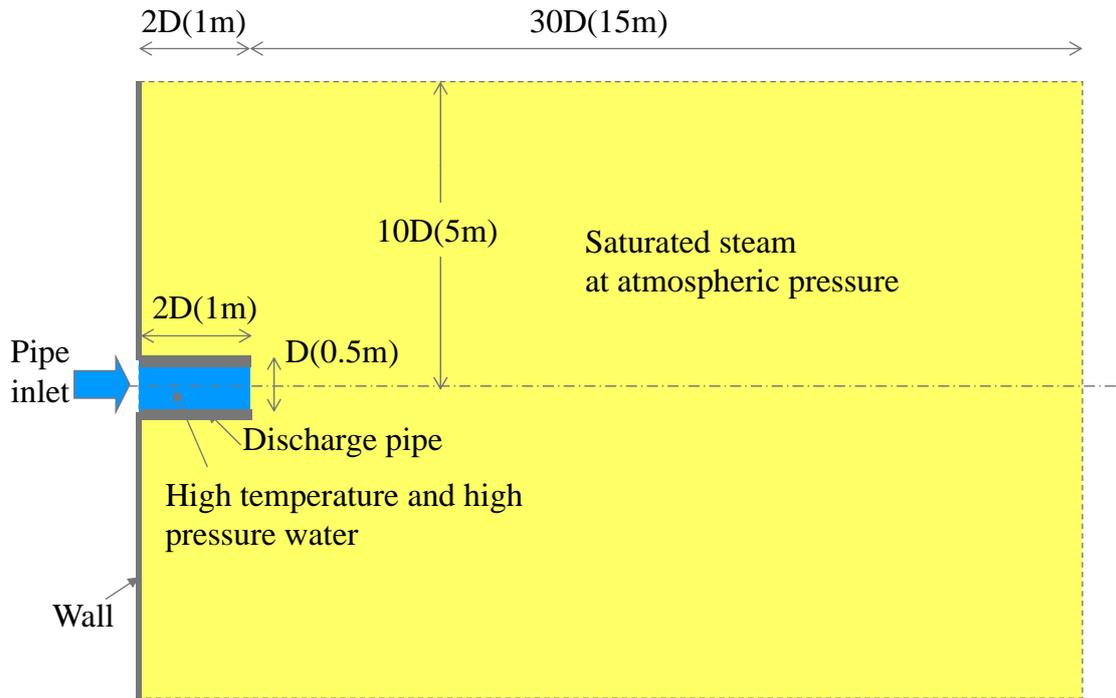
*H.Utsuno, No.NP13P1368, NURETH-13(2009) ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved 25

衝突板上の圧力分布



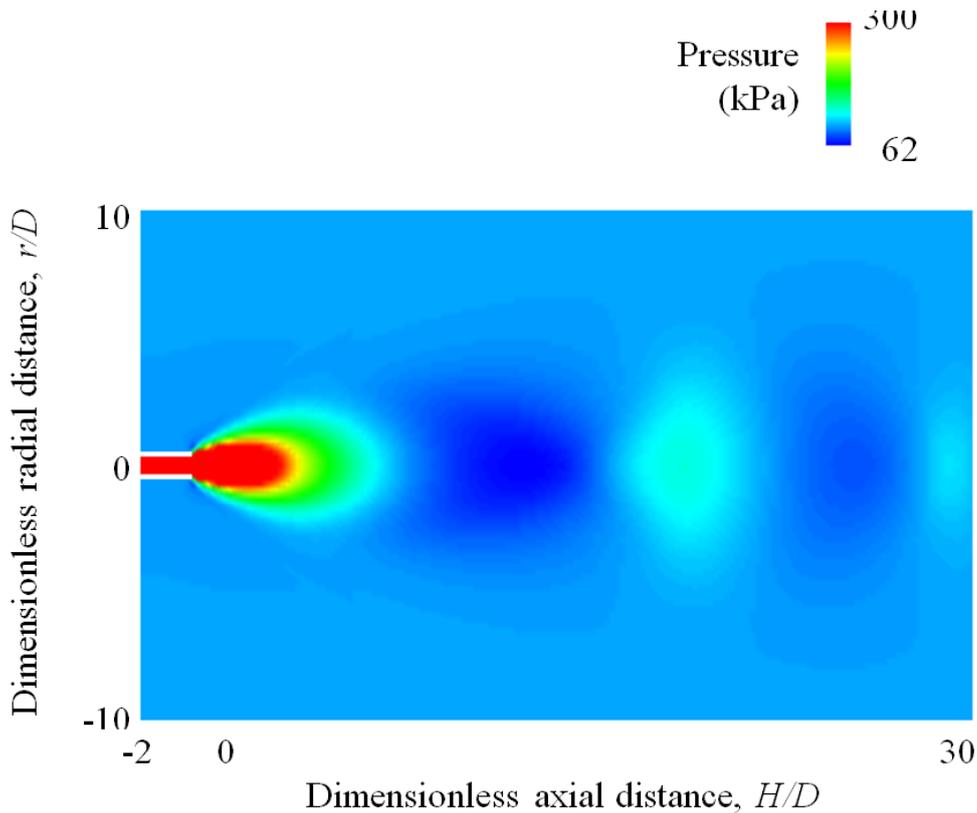
Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved 26

実機スケール自由噴流解析条件



Pressure boundary

自由噴流中の圧力分布解析結果(PWR condition)

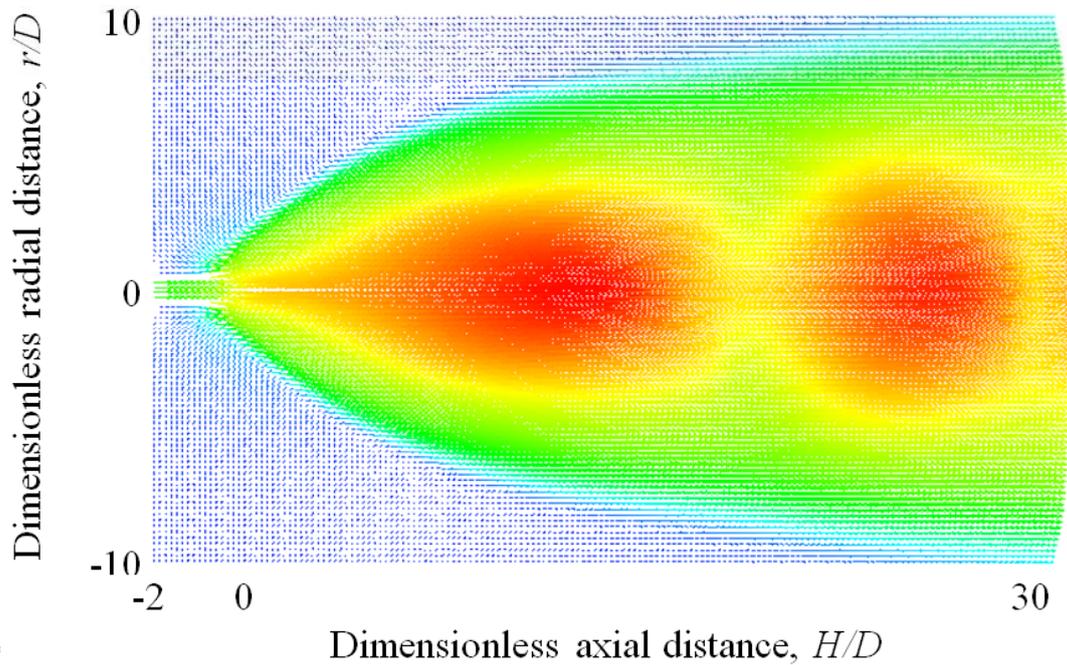


自由噴流中の速度分布解析結果(PWR condition)

Volumetric
velocity
(m/s)



274
7



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved 29

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

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

(3) 検証と適用例

- ・二相水撃
- ・臨界二相流
- ・超音速二相噴流)



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved 30

塗布シミュレーションの概要

アドバンスソフトにおける
二相流解析技術の最新動向セミナー
2013年2月13日(水)開催

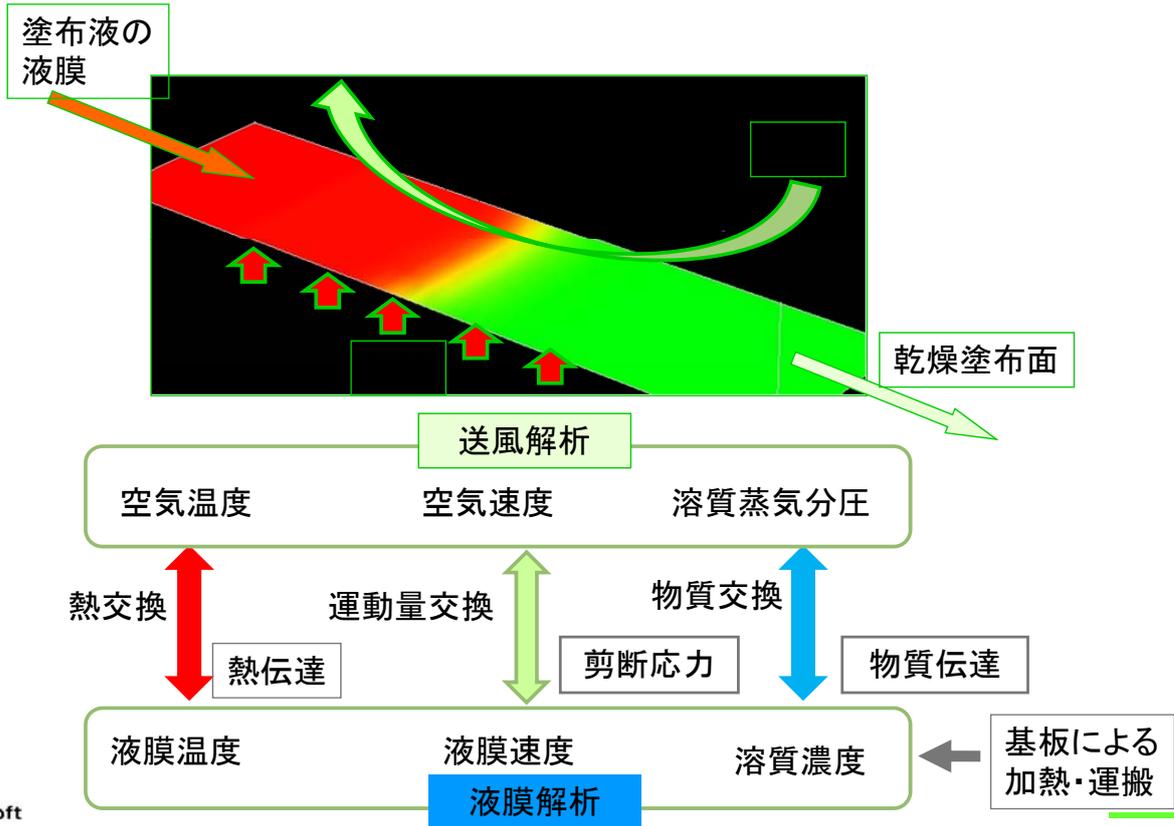


塗布シミュレーションの概要

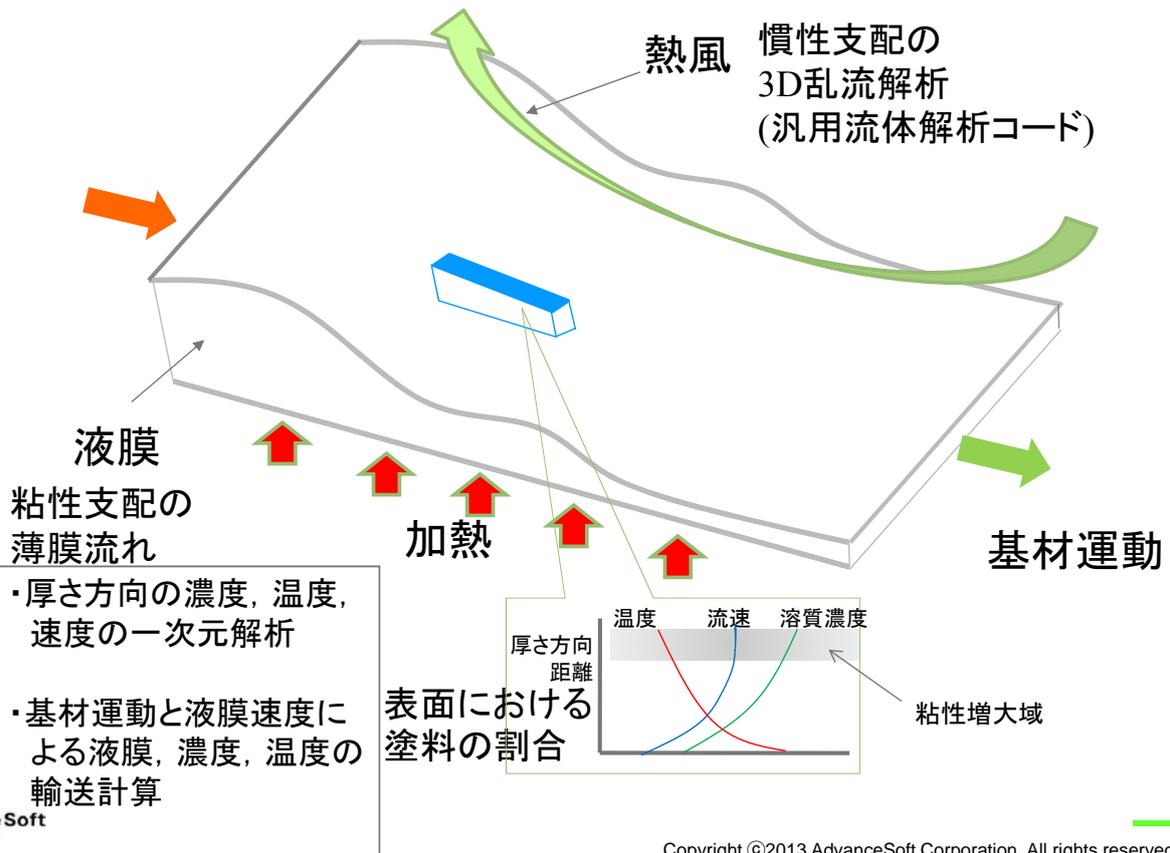
- 基礎式と解析モデル
- 静止塗布膜乾燥解析
- 塗布膜乾燥ライン解析
- 塗布膜内粒子挙動解析



塗布膜乾燥解析の二領域分割解析



送風と液膜を分割した数値解析のイメージ



塗布膜解析の基礎式

(質量保存則)
$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = -R$$

(運動量保存則)
$$\nabla P = \nabla \cdot (\eta \nabla \mathbf{u}) + \sigma \kappa S \mathbf{n} + \nabla \sigma S + \mathbf{F}_{surf} + \mathbf{F}_{drag} + \rho \mathbf{g}$$

 表面張力の界面曲率と分布による力

(エネルギー保存則)
$$\frac{\partial}{\partial t} \rho e + \nabla \cdot \rho \left(e + \frac{P}{\rho} \right) \mathbf{u} = q + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q - LR$$

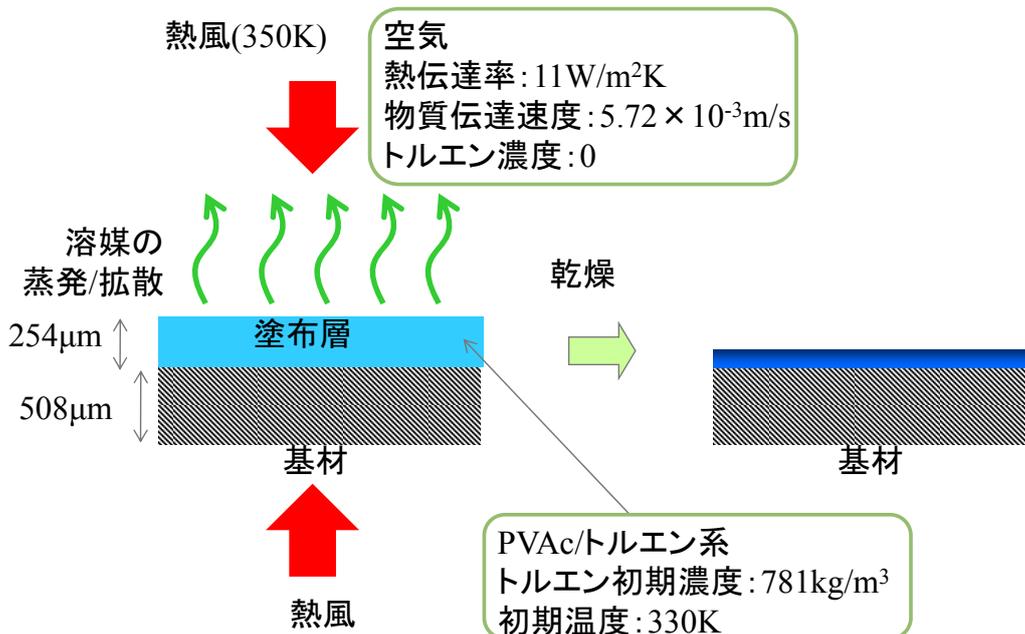
(液体积比保存則)
$$\frac{\partial}{\partial t} F + \nabla \cdot F \mathbf{u} = -R v_c$$

(溶剤濃度保存則)
$$\frac{\partial}{\partial t} c + \nabla \cdot c \mathbf{u} = \nabla \cdot (D \nabla c) - R$$

ρ は密度, \mathbf{u} は速度, P は圧力, η は粘性係数, σ は表面張力, S は界面面積要素, κ は曲率, \mathbf{F}_{drag} は基材抗力, \mathbf{F}_{surf} は表面応力, \mathbf{n} は界面に垂直な単位ベクトル, \mathbf{g} は重力定数, e は内部エネルギー, Q はヒータ加熱量, q は表面伝熱量, T は温度, L は蒸発潜熱, F は液相の占める体積比, R は蒸発速度, c は溶媒濃度, v_c は溶媒比容積



塗布膜乾燥解析



*山村, 化学工学論文集, 35-5, pp.436-441(2009)



自由体積理論による拡散係数(PVAc-トルエン系)

相互拡散係数

$$D_m = D_1(1 - \phi_1)^2(1 - 2\chi_{12}\phi_1)$$

自己拡散係数

$$D_1 = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \exp\left(-\frac{\omega_1 \hat{V}_1^* + \omega_2 \xi_{12} \hat{V}_2^*}{\hat{V}_{FH}}\right)$$

$$\hat{V}_{FH} = \omega_1 \left(\frac{K_{11}}{\gamma}\right) (K_{21} - T_{g1} + T) + \omega_2 \left(\frac{K_{12}}{\gamma}\right) (K_{22} - T_{g2} + T)$$

Gas parameters	Solution parameters
$M_1 = 92.14 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$	$\Delta H = 3.6 \times 10^5 \text{ J/kg}$
$P_b = 0 \text{ Pa}$	$\rho_{10} = 781 \text{ kg/m}^3$
$h^g = 11 \text{ J/(m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K)}$	$\chi_{12} = 0.393$
$h^l = 11 \text{ J/(m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K)}$	$C_p = 1.65 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$
$k^g = 5.72 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	$D_0 = 2.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$
Substrate parameters	$h_0 = 254 \text{ }\mu\text{m}$
$\rho_s = 1370 \text{ kg/m}^3$	$\tilde{V}_1 = 1.16 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$
$C_{ps} = 1.25 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$	$\tilde{V}_2 = 8.47 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$
$b = 508 \text{ }\mu\text{m}$	$E_a = 7787.4 \text{ J/mol}$
Drying conditions	
$T_a = 330 \text{ K}$	
$T_b = 350 \text{ K}$	

Solvent parameters	$(K_{11}/\gamma) [\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	$K_{21} - T_{g1} [\text{K}]$	$D_{01} [\text{m}^2/\text{s}]$
$\tilde{V}_1^* [\text{m}^3/\text{kg}]$	0.917×10^{-3}	1.57×10^{-6}	-90.5
0.917×10^{-3}			8.25×10^{-7}
Polymer parameters	$(K_{12}/\gamma) [\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	$K_{22} - T_{g2} [\text{K}]$	$\xi_{12} [-]$
$\tilde{V}_2^* [\text{m}^3/\text{kg}]$	0.850×10^{-3}	4.33×10^{-7}	-256
0.850×10^{-3}			0.77



溶媒蒸発速度

$$\dot{m}_{eva} = k^g \frac{M_1}{RT} (P_i - P_b)$$

混合系の蒸気圧(Flory-Huggins理論)

$$P_i = P_1^o \phi_1 \exp[\phi_2 + \chi_{12} \phi_2^2]$$

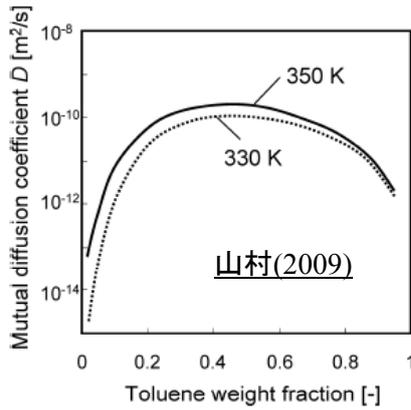
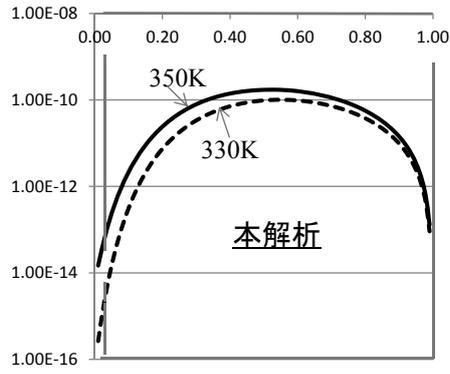
純蒸気圧のAntoin式

$$\log_{10} P^o = A - \frac{B}{T + C}$$

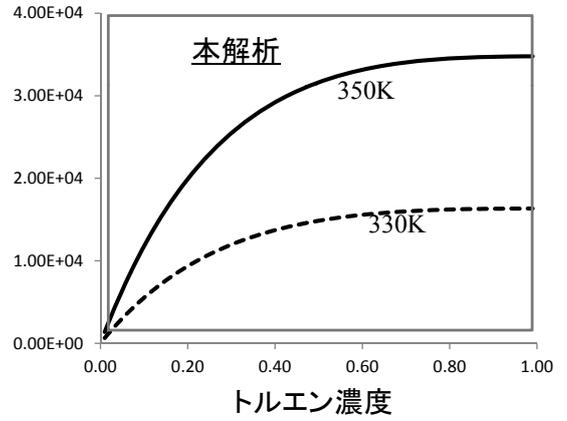
トルエン	$A=6.96554$
(mmHg-°C)	$B=1351.272$
	$C=220.191$



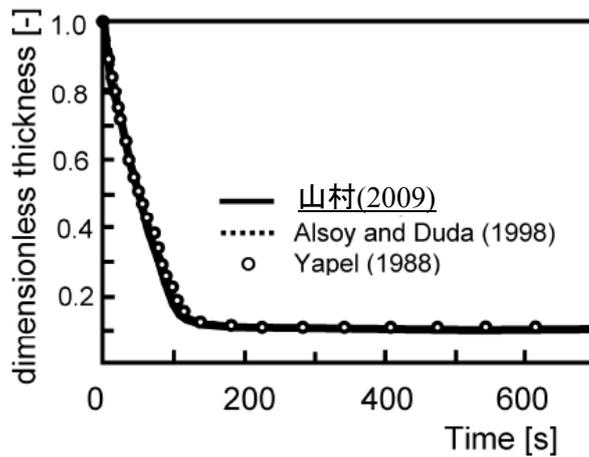
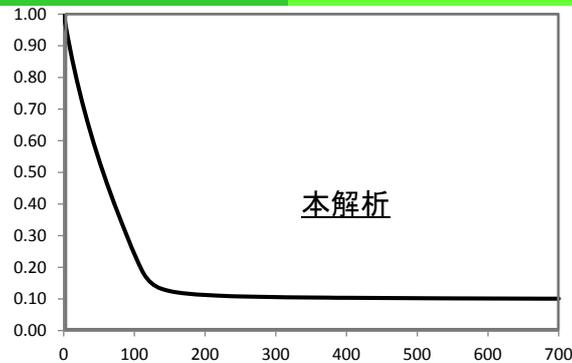
PVAc/トルエン系
相互拡散係数
(m^2/s)

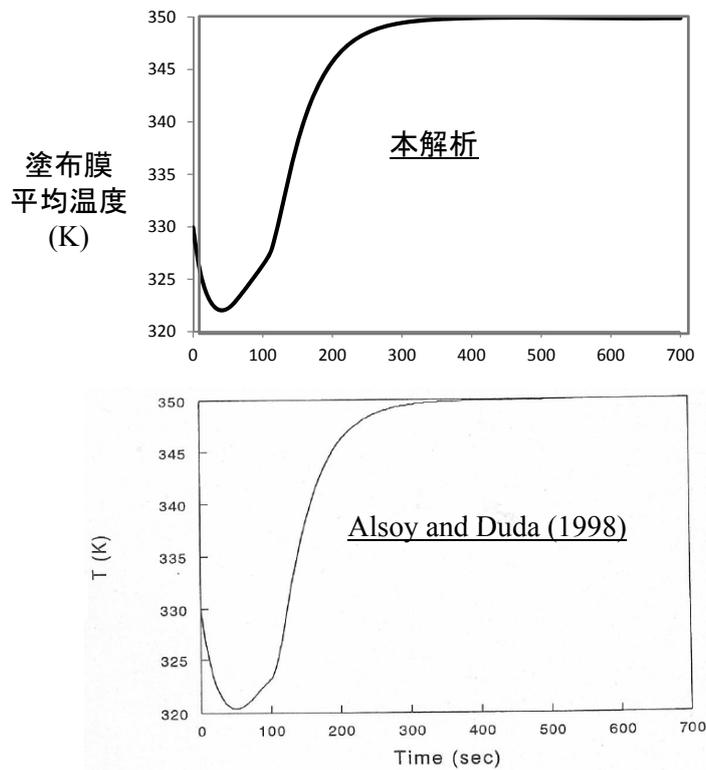
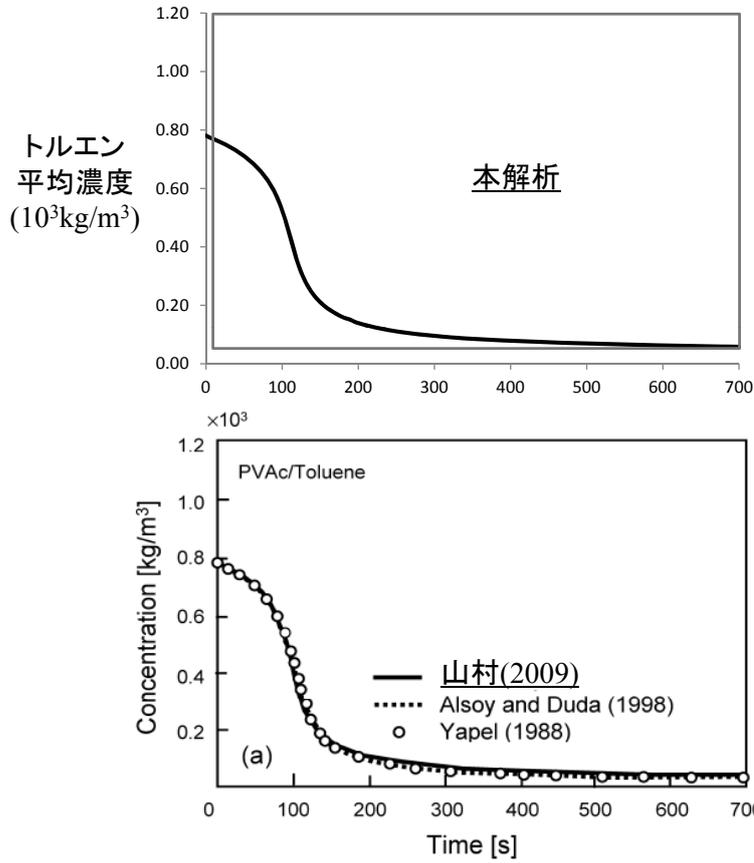


PVAc/トルエン系
トルエン蒸気圧
(Pa)

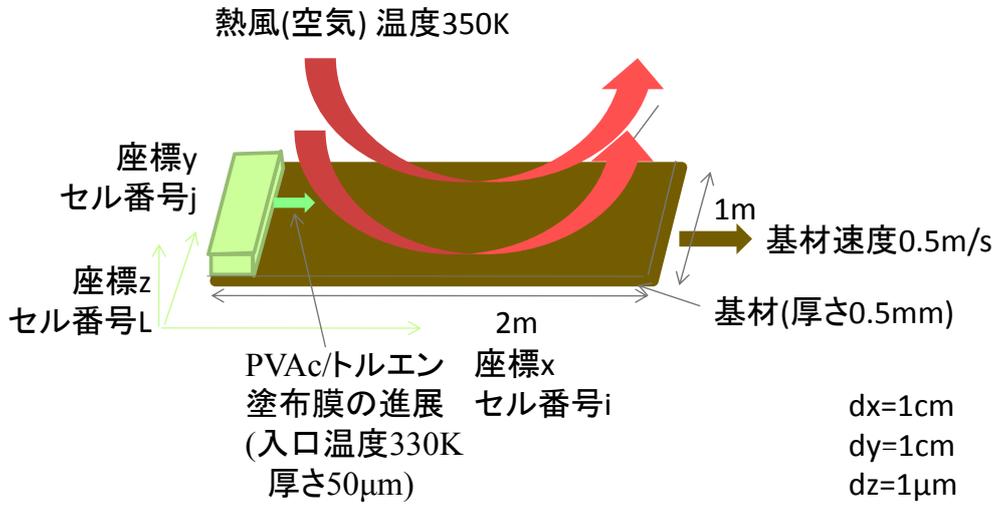


塗布膜
無次元厚さ
(-)

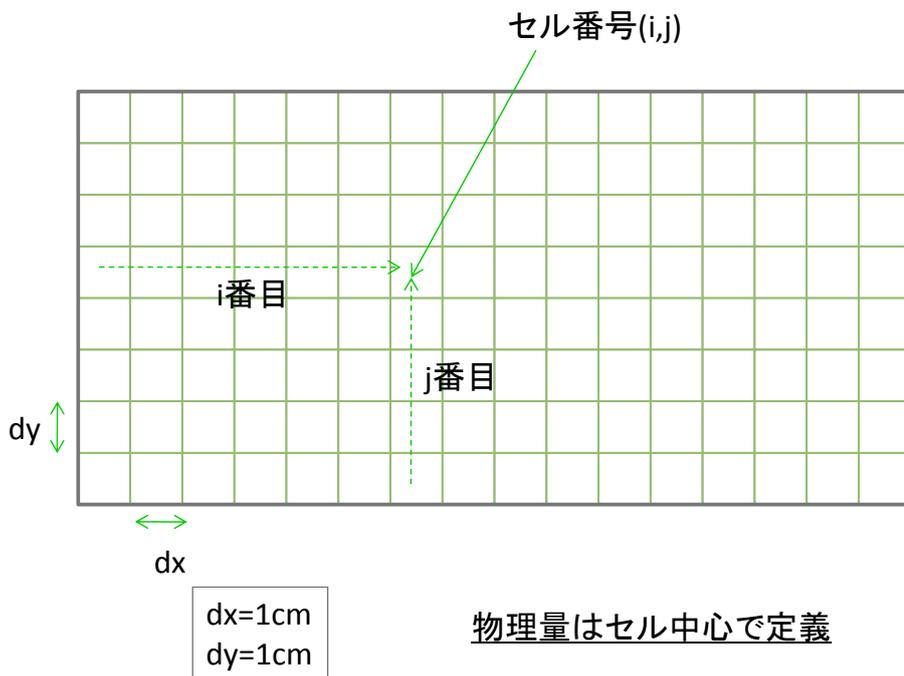




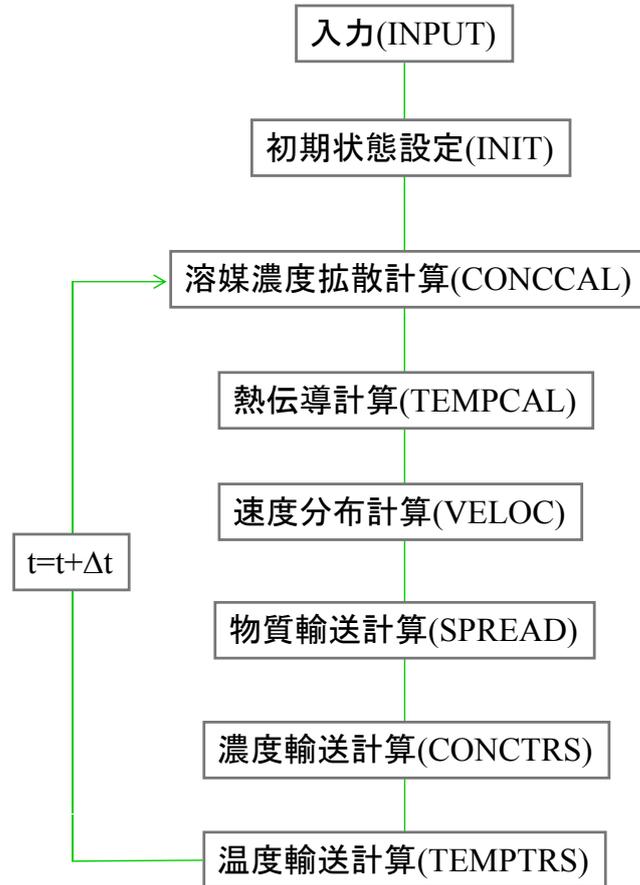
二次元塗布膜形成解析



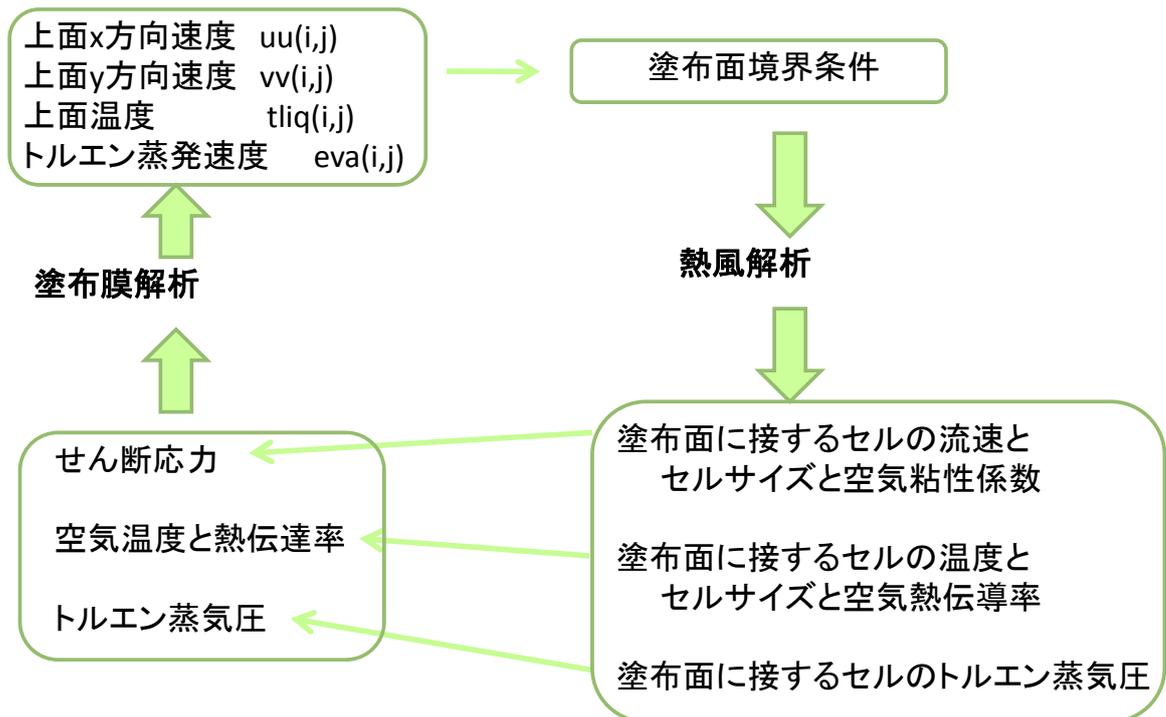
上から見た塗布膜上面のマップ



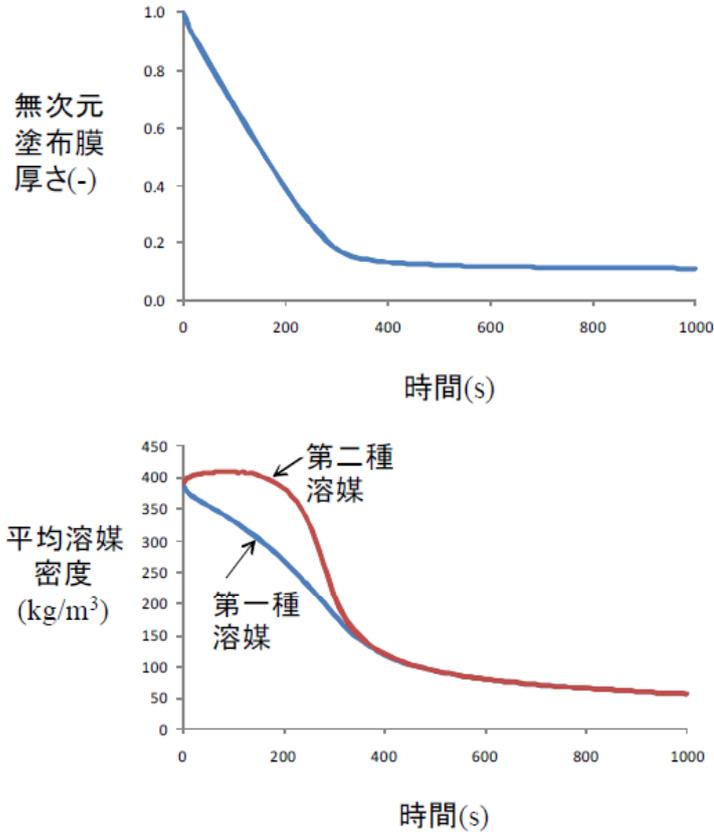
計算の流れ



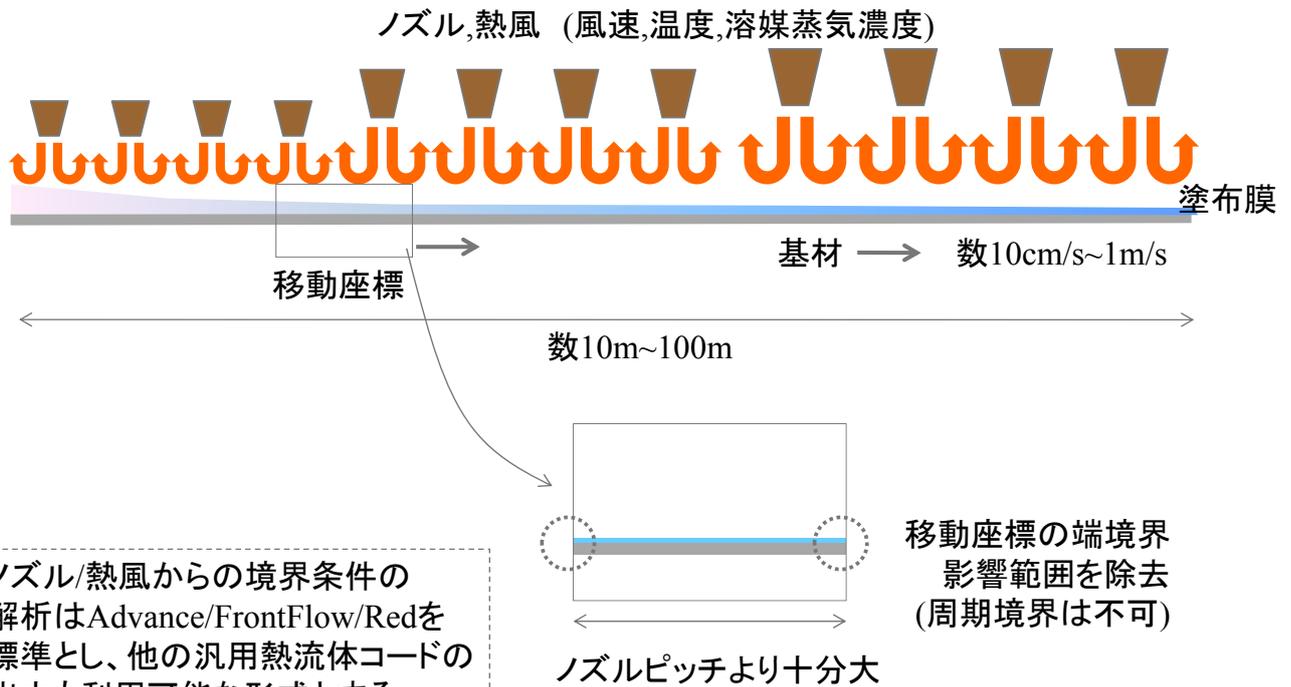
1タイムステップ内のデータの流れ



応用機能(蒸発速度の異なる二種類の溶媒)



移動座標を用いた計算の効率化

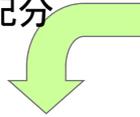


ノズル/熱風からの境界条件の解析はAdvance/FrontFlow/Redを標準とし、他の汎用熱流体コードの出力も利用可能な形式とする



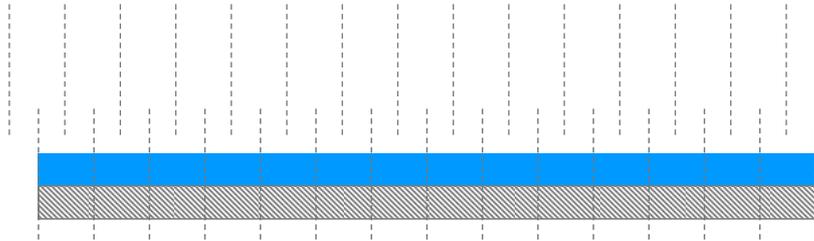
汎用コードによる熱風解析との連携

FLUENT等の
定常計算結果を
予めメッシュに配分



- 塗布膜表面
- ガス流速又はせん断力
 - ガスの溶媒蒸気圧
 - ガスの温度
 - 熱伝達係数(ガス速度から評価可能)
 - 物質伝達係数(ガス速度から評価可能)

ガス流等分割メッシュ(固定)



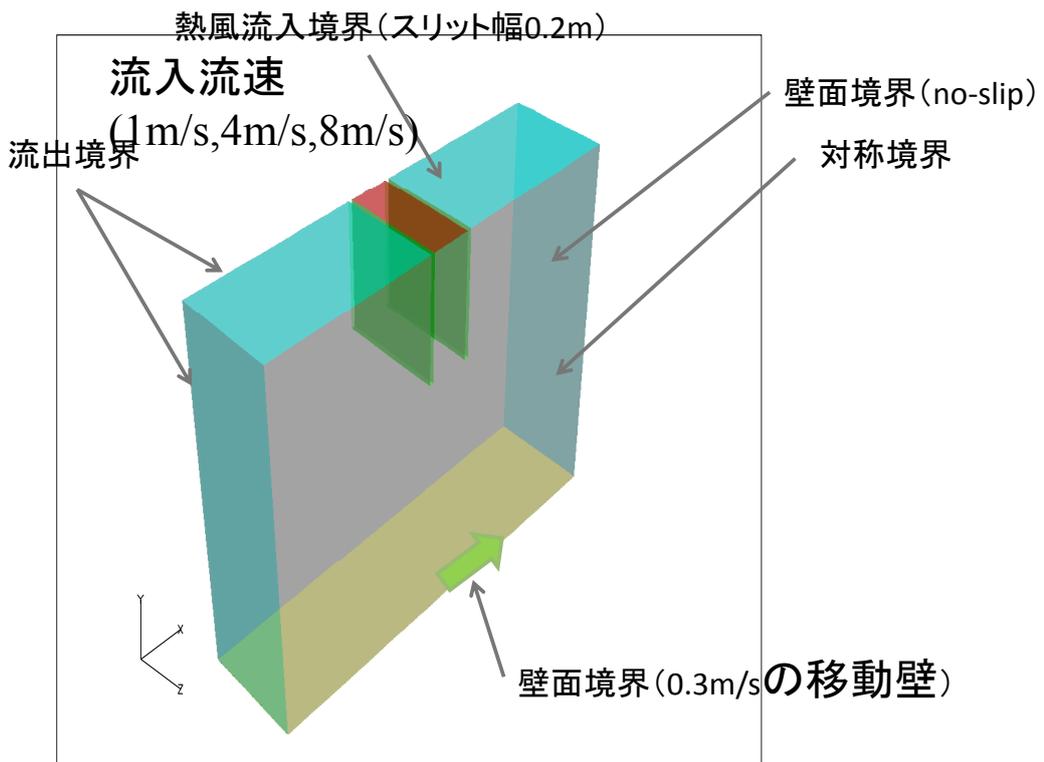
膜内部流速
基材速度

塗布膜等間隔分割メッシュ(移動)

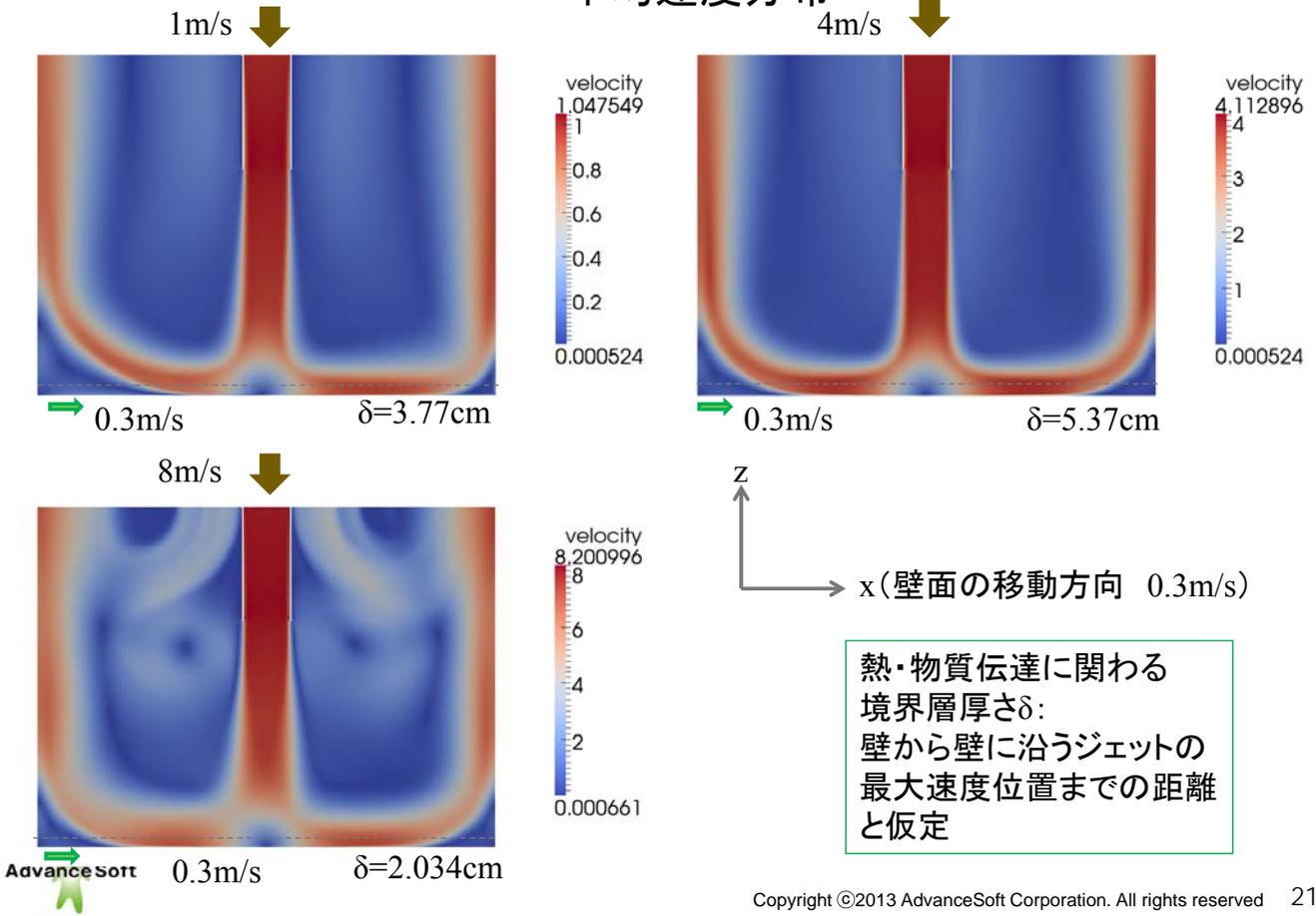


計算領域と境界条件

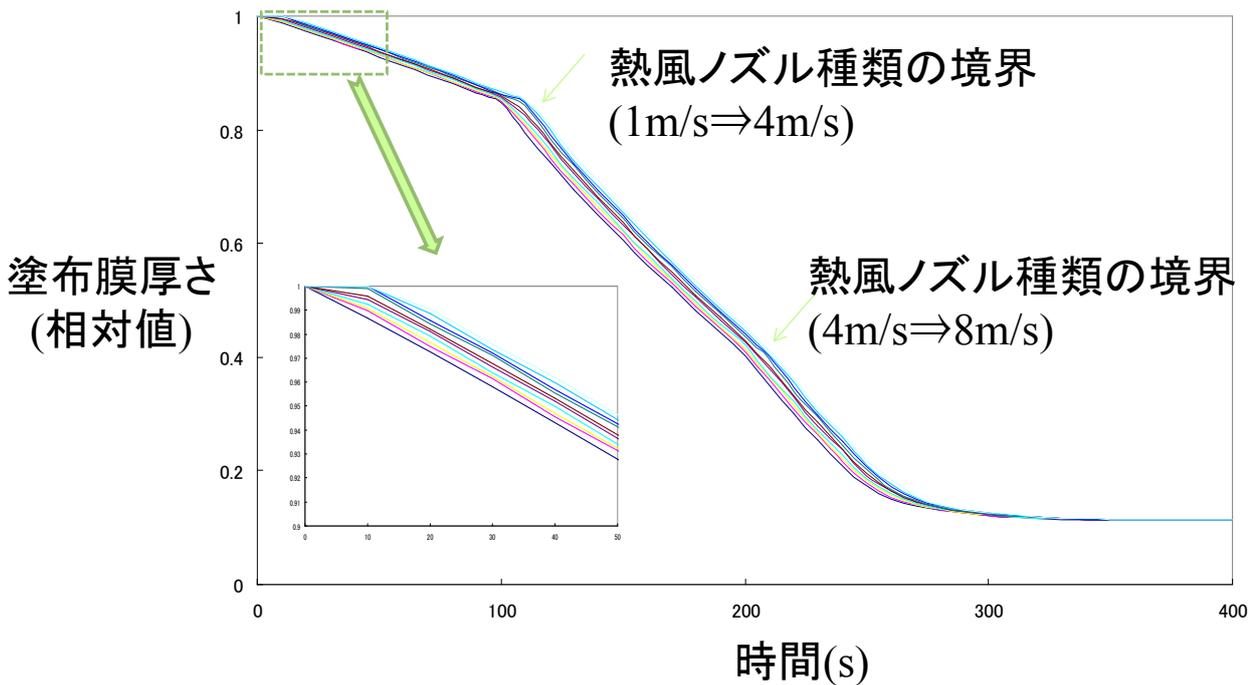
計算領域 長さ2m×高さ1mの2D解析 (実際には幅方向2メッシュの3D解析)



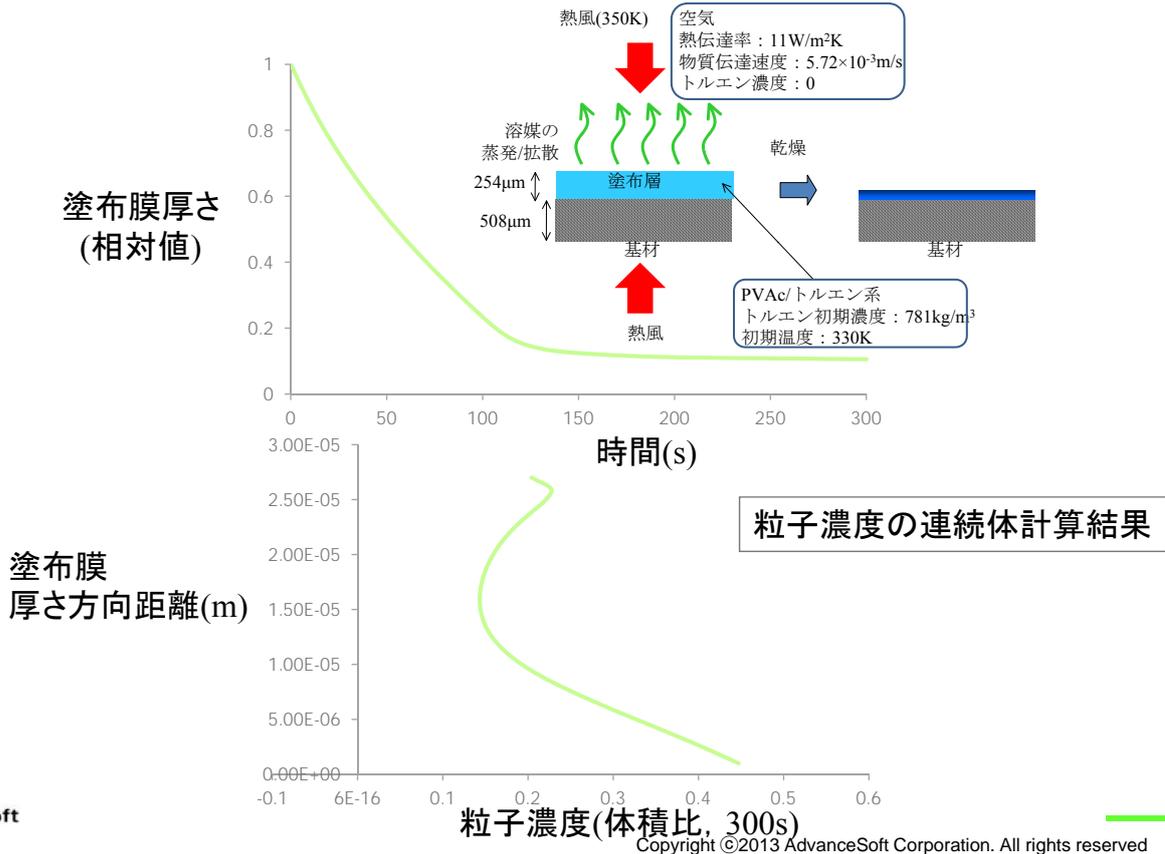
平均速度分布



塗布膜厚さの時間変化

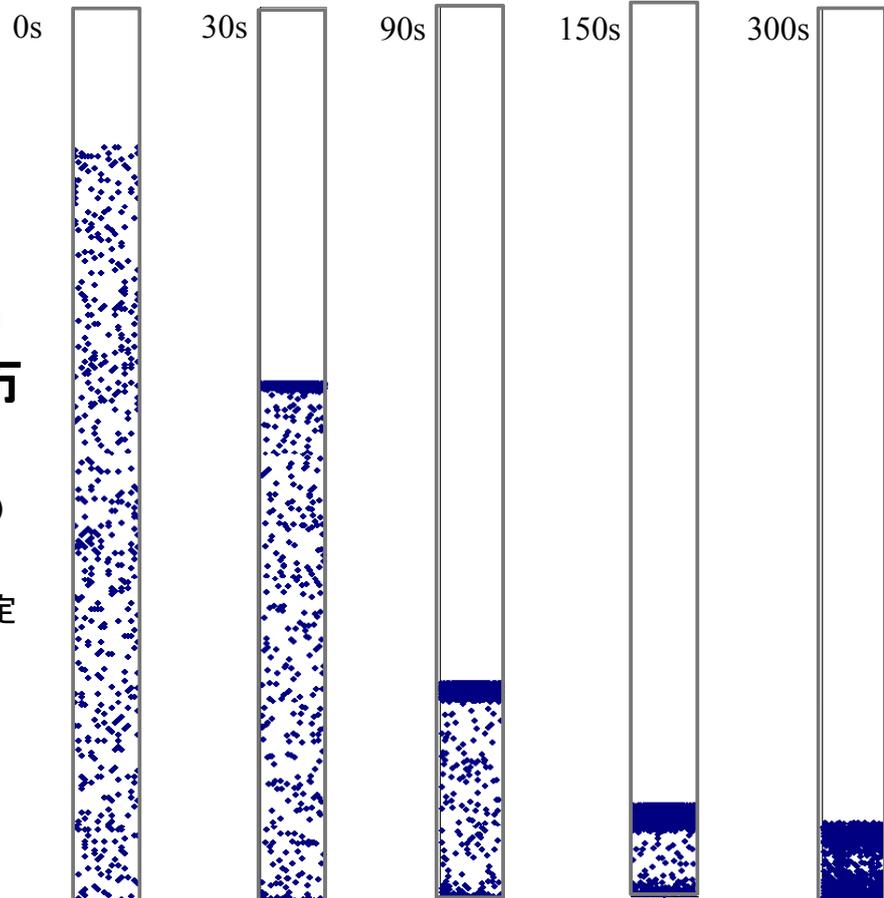


山村論文の塗布膜乾燥条件による粒子濃度計算



粒子法による 粒子濃度分布 過渡変化 (縦断面中央部スライス)

ランダム移動距離設定
 $l = 0.75\sqrt{2D\Delta t}$



まとめ

- (1) 一次元移動座標による長尺乾燥ラインの解析
 - ・温風速度分布を汎用熱流体コードにより計算して適用
 - ・温風速度と境界層厚さによる剪断力, 熱伝達, 物質伝達評価式を適用
 - ・粘性, 熱伝導率など物性値をタイムステップ毎, メッシュ毎に設定可能(温度, 濃度の任意関数が導入可)
- (2) 塗布膜乾燥解析に粒子濃度連続体計算モデルを導入
 - ・Stokesによる沈降速度を考慮
 - ・Einsteinによるブラウン運動ランダム移動を考慮
- (3) 粒子法(個別要素法)による乾燥塗布膜内粒子挙動解析
 - ・Stokesによる沈降速度を考慮
 - ・Einsteinによるブラウン運動ランダム移動を考慮

謝辞

三菱製紙株式会社様には資料をご提供いただきましたことに感謝申し上げます。



気液二相流管路系 非定常解析ソフトウェア Advance/FrontNet/TPの概要

アドバンスソフトにおける
二相流解析技術の最新動向セミナー
2013年2月13日(水)開催



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

気液二相流管路系非定常解析ソフトウェア

気体と液体の二相流管路の一次元流体解析

ドリフトフラックスに基づく気液二相流モデル

水、メタン、自然冷媒の物性値を装備

有限差分法、完全陰解法、バルブ・凝縮器・蒸発器等の流体機器モデル

流体構造連成解析機能

(原子力関連実績)

- ・ 高圧高温水ブローダウン試験Edwards' Pipe解析
- ・ 高圧高温水ブローダウン試験IITR解析
- ・ ブローダウン時PWR圧力容器動荷重試験の流体構造連成解析
- ・ ブローダウン時隔壁衝撃応答試験の流体構造連成解析

(その他分野実績)

- ・ 大型冷熱機器の性能評価過渡解析
- ・ LNG受入配管の凝縮を伴う気液二相流過渡解析



Copyright ©2013 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved

項目	内容	
基礎方程式	質量保存、気相質量保存、運動量保存、エネルギー保存式の4本	
基本変数	圧力、エンタルピー、ボイド率、質量流束、変位	
流体構造連成	ビームモデル、強連成	
要素機器	蒸発器	二相域と過熱域モデル
	凝縮器	二相域と過熱域モデル
	圧縮器	循環流量を与えるモデル
	膨張弁	弁流量を与えるモデル
	受液器	幾何形状（高さ等）を考慮したタンクモデル
物性値	蒸気表	NISTや日本機械学会の物性値関数をもとに実装
	その他	ユーザが上記の形式で作成する
初期条件	各物理量	GUIでユーザが指定する。または、リスタート機能を利用する
数値解法	アルゴリズム	完全陰解法、修正Newton法
	空間離散化	一次元有限差分法（ネットワーク可能）
	二相流	ドリフト・フラックスモデル
	時間積分	完全陰解法
	リスタート	結果ファイルを利用し任意時刻からリスタート可能
入出力	入力	ネームリストで記述された機器の接続情報およびモデルパラメータ、計算のためのパラメータ
	出力	時系列の全ノードの全物理量（またはそれを間引いた量）、および、システム全体の成績係数、各機器のエネルギー損失

気液二相流の基礎方程式は、ドリフト・フラックスモデル(非均質熱的平衡モデル)に基づく、気相の質量保存式、混合相の質量・運動量・エネルギーの保存式

混合相質量保存式
$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0$$

気相質量保存式
$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_g) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \rho_g \frac{G}{\rho_m} \right) = \Gamma_g - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} U_{gj} \right)$$

混合相運動量保存式
$$\frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{G^2}{\rho_m^2} + \frac{\rho_g \rho_l}{\rho_m} \frac{\alpha}{1-\alpha} U_{gj}^2 \right\} = - \frac{\partial p}{\partial z} - g \rho_m - F_w$$

混合相エネルギー保存式
$$\frac{\partial \rho_m h_m}{\partial t} + \frac{\partial G h_m}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{G}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} (h_g - h_l) U_{gj} \right\} + q$$

ρ : 密度, G : 質量流束, h : エンタルピー, α : ボイド率, p : 圧力,

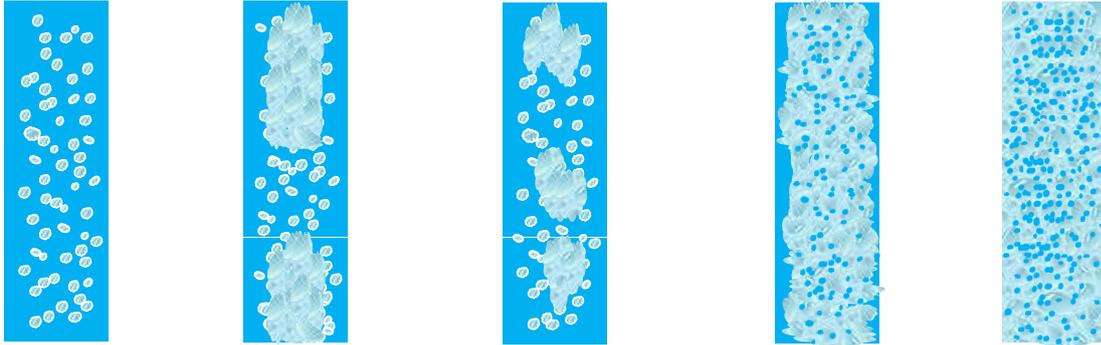
m : 混合相, g : 気相

U_{gj} : 平均ドリフト速度、 C_0 : 分布パラメータ、 j : 体積流束

気液二相流解析を目的としているので、基本物理量が、気相と液相に関連して定義されていることである。
 特に気液の速度差には、ドリフトフラックスモデルを採用している。
 気液の速度差に対して、下図流動様式に応じた構成式を用意

流動様式(例:垂直上向き)

流動方向



気泡流

スラグ流

フロス流

環状噴霧流

噴霧流



気液の速度差を考慮したドリフトフラックスモデルでは、気相速度 u_g 、液相速度 u_l は全体の体積流束から次のように求められる

$$u_g = C_0 j + U_{gj} \quad u_l = \frac{j - \alpha u_g}{1 - \alpha}$$

C_0, U_{gj} は、たとえば、以下の構成方程式で与えられる

・ 上昇二相流

$$C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\rho_g / \rho_l} \{1 - \exp(-22 < D_{sm} > / D)\}$$

$$U_{gj} = \sqrt{2} \left(\frac{g \sigma \Delta \rho}{\rho_l^2} \right)^{1/4} (1 - \alpha)^{1.75} \quad \text{for } \mu_l \gg \mu_g$$

・ 下降二相流

$$C_0 = -0.0214 < j^* > + 0.772 + (0.0214 < j^* > + 0.228) \sqrt{\rho_g / \rho_l} \quad \text{for } -20 \leq j^* < 0$$

$$C_0 = 0.2 e^{0.00848 < j^* > + 20} + 1.0 - 0.2 e^{0.00848 < j^* > + 20} \sqrt{\rho_g / \rho_l} \quad \text{for } < j^* > < -20$$

$$U_{gj} = \sqrt{2} \left(\frac{g \sigma \Delta \rho}{\rho_l^2} \right)^{1/4}$$

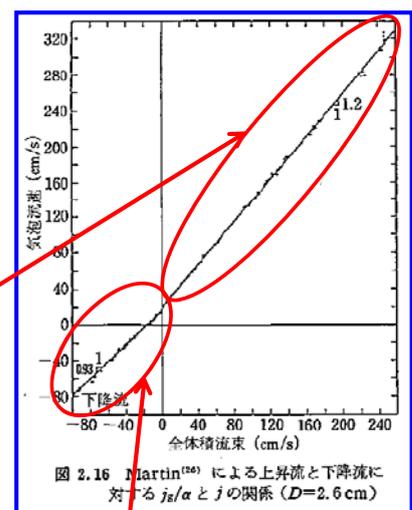
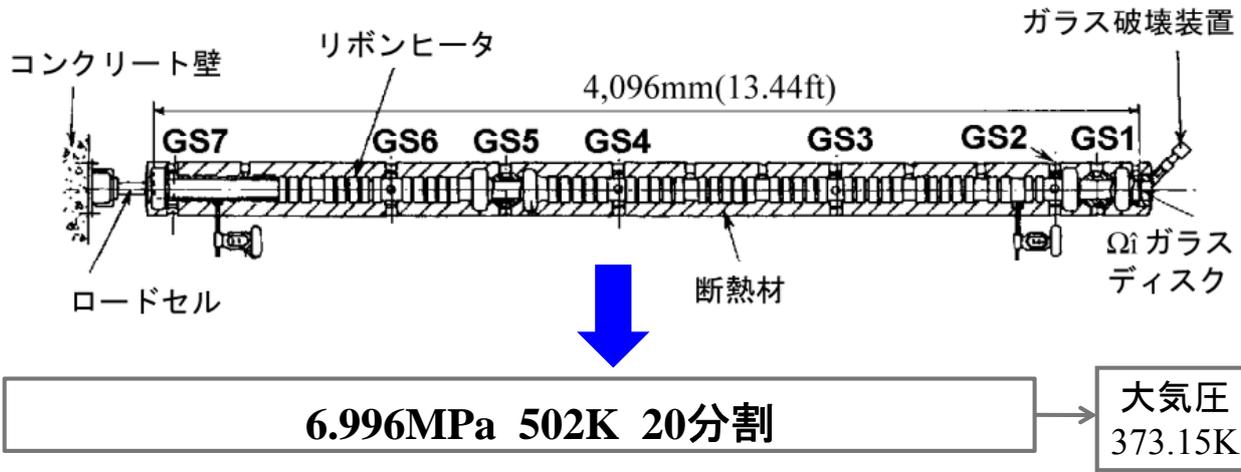


図 2.16 Martin⁽²⁶⁾ による上昇流と下降流に対する j_g/α と j の関係 ($D=2.6\text{ cm}$)



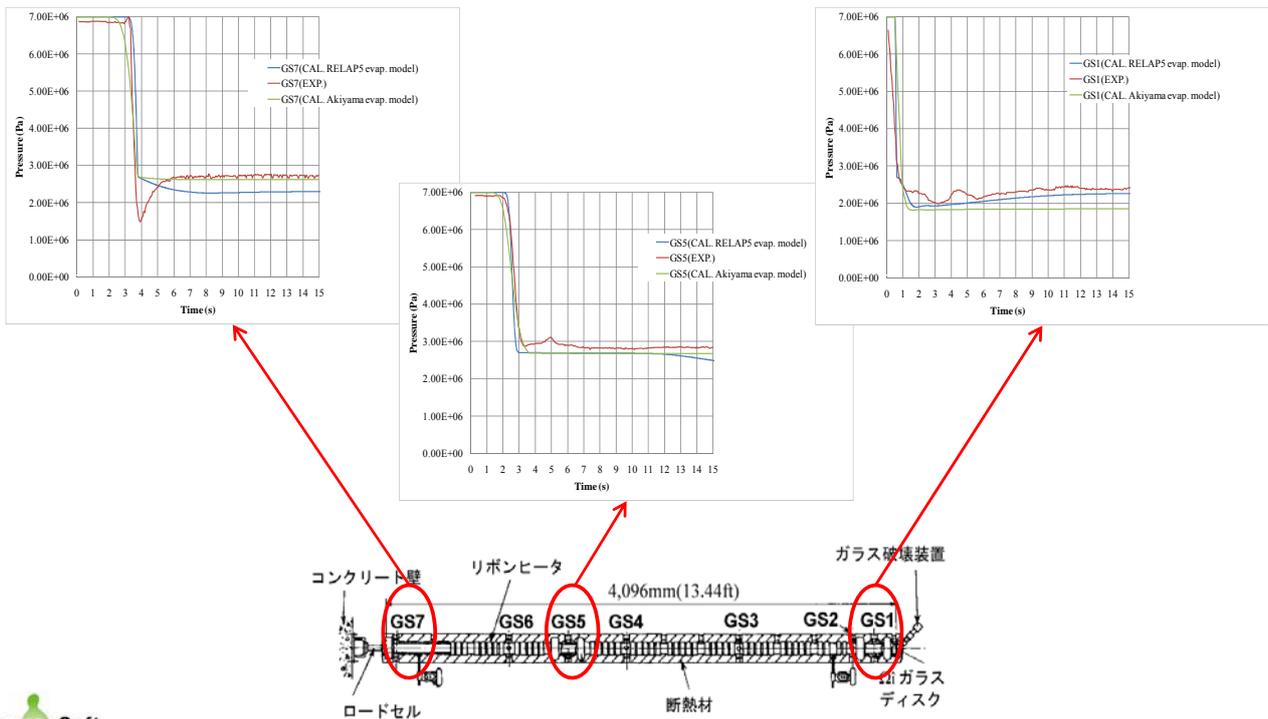
解析例)高圧高温水ブローダウン試験解析(Edwards' Pipe)



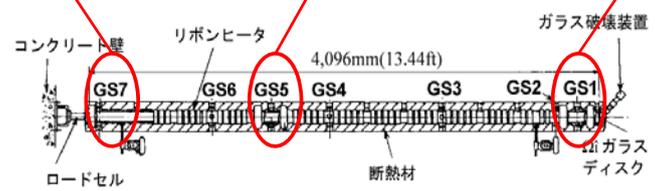
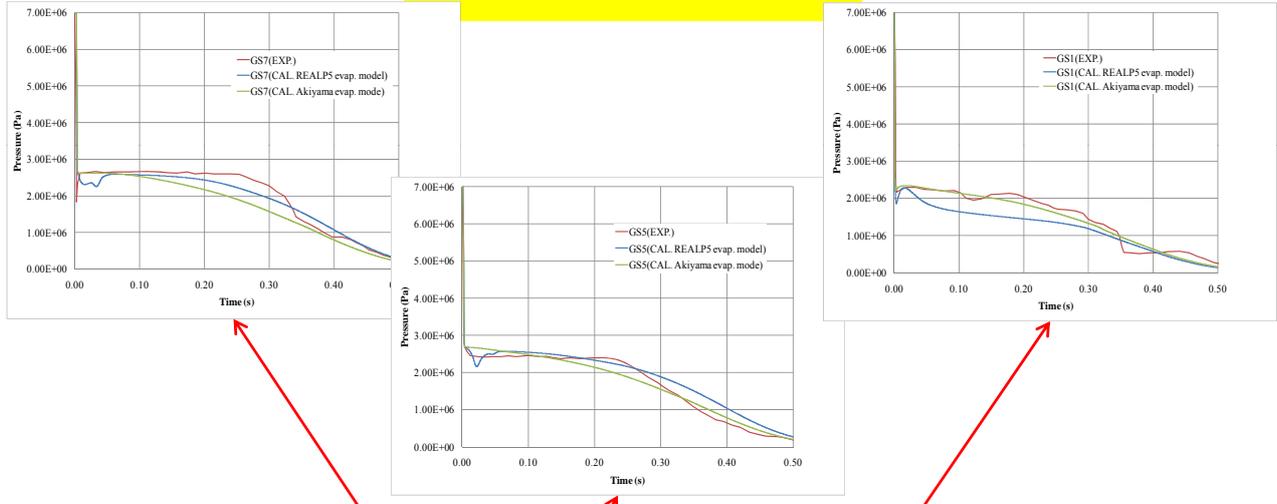
Advance/FrontNet/TP にRELAP5蒸発モデルとAkiyama蒸発モデルを組み込んで、2ケースの計算を実施した結果、Akiyama蒸発モデルを用いた方がより良い結果となった



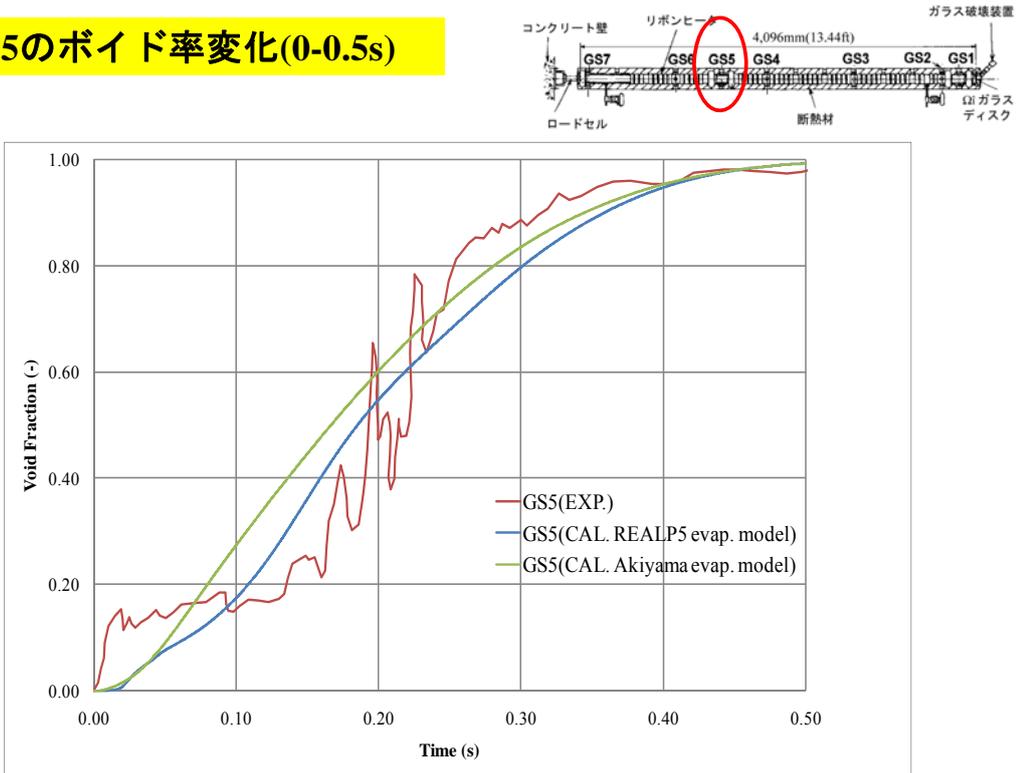
GS1/5/7の圧力変化(0-15ms)



GS1/5/7の圧力変化(0-0.5s)



GS5のボイド率変化(0-0.5s)



解析例)流体構造連成試験解析

ビーム構造に関する運動方程式

$$[M]\{\Delta\ddot{x}\}_{n+1} + [C]\{\Delta\dot{x}\}_{n+1} + [K]\{\Delta x\}_{n+1} = \Delta f(p)_{n+1}$$

をNewmark-β法で離散化し、圧力、エンタルピー、ボイド率、質量流束の流体基本変数と構造側の基本変数である変位を加えて、大行列を作成して、Newton法による完全陰解法によって、流体構造連成計算を行う

- 制御データ、ノードデータの読み込み
- 内部ノードの作成
- ノードテーブル (INOD,RNOD 等) の作成
- ジャンクション特性のセット
- 境界条件
- 分岐特性のセット
- ノードの方向チェック
- 近隣ノードのセット
- ジャンクションの方向チェック
- 壁の特性セット (RWAL)
- 出力情報セット
- ファイル入力 (マスフラックス、エンタルピー、温度)
- 変数初期化

