

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

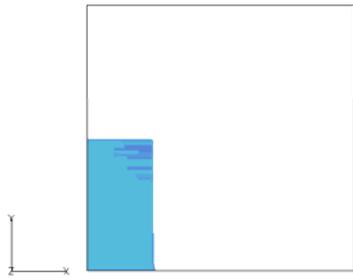


Advance/FrontFlow/MPとは？

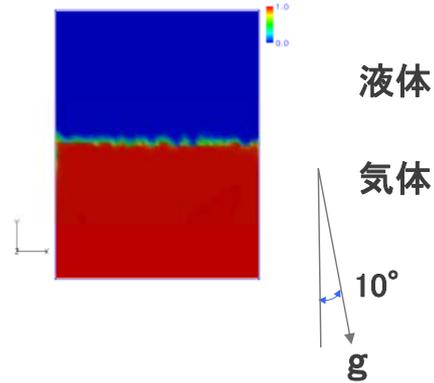
- 二流体モデルによる三次元気液二相流解析ソフトウェア
- 流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red をベースに、アドバンスソフトが独自に開発したソフトウェア

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。



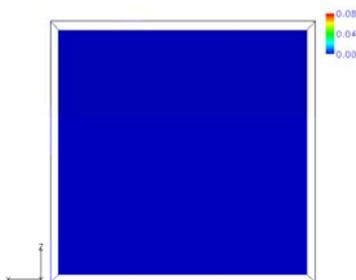
AdvanceSoft **液柱崩壊の計算例**



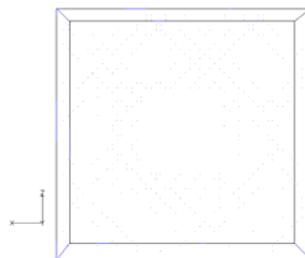
沈殿の計算例

Advance/FrontFlow/MPの特長

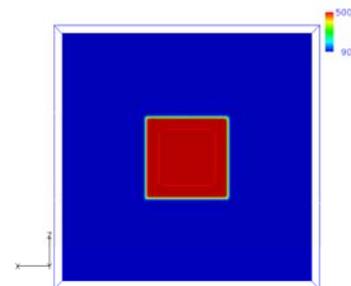
- 沸騰や凝縮や固体熱伝導を同時に扱える。
- 界面抗力、揚力、界面熱伝達、壁面熱伝達などの構成方程式が組み込まれている。



ボイド率



液体速度

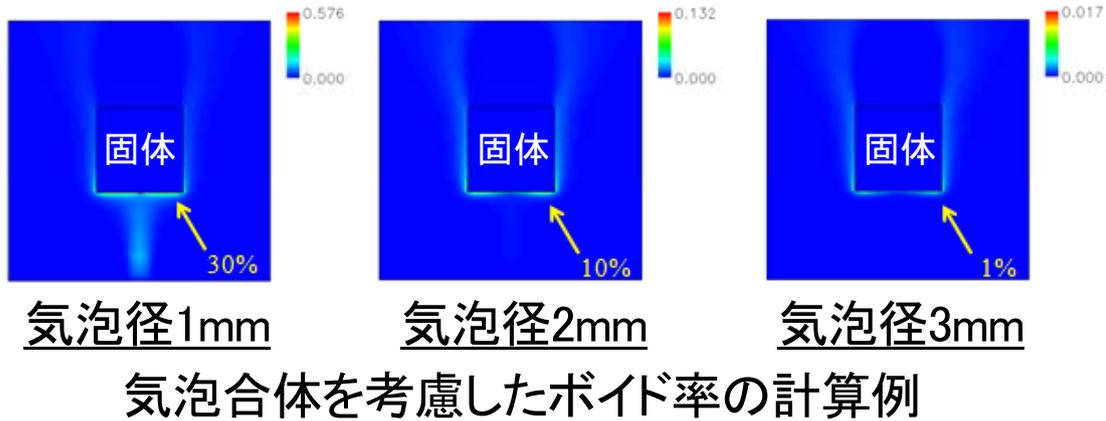


固体温度

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

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

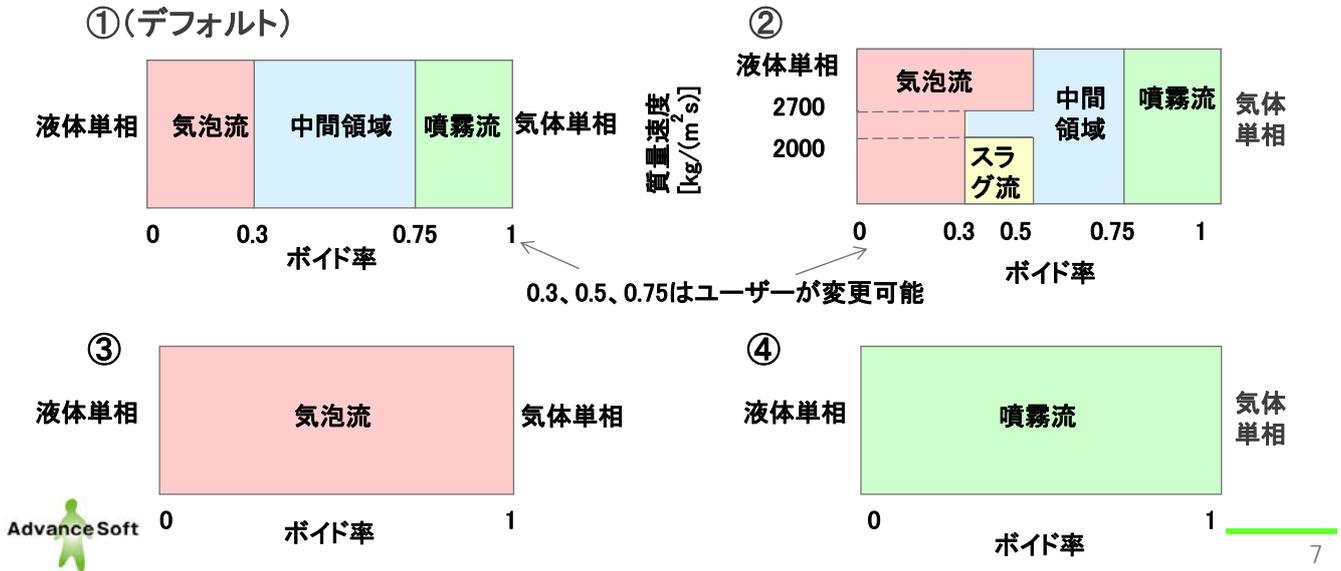
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_l \alpha_l \varepsilon) + \nabla (\rho_l \alpha_l \varepsilon v_l) = \nabla \cdot \left\{ \alpha_l \left(\mu_l + \frac{\mu_l}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right\} + c_1 \alpha_l \frac{\varepsilon}{k} G - c_2 \rho_l \alpha_l \frac{\varepsilon^2}{k}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



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

Eo : 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(Eo 、 M 、 C_D から計算)

$10^{-2} < Eo < 10^3$ 、 $10^{-14} < M < 10^7$ 、 $10^{-3} < Re < 10^5$ 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。

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

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



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

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

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

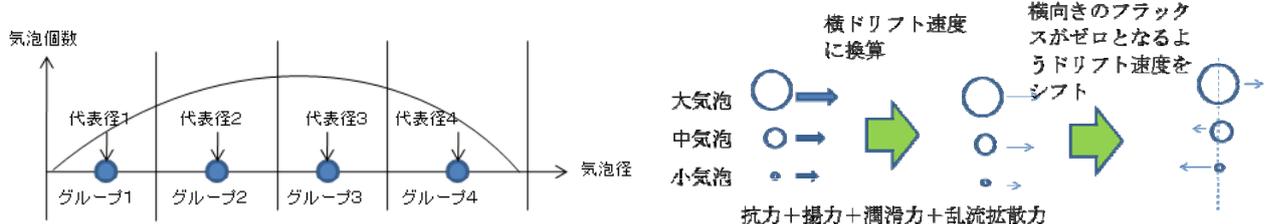
$$A_i = 6(1 - \alpha_g) \frac{1}{D_d} \quad \cdot \cdot \text{界面積}$$



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。

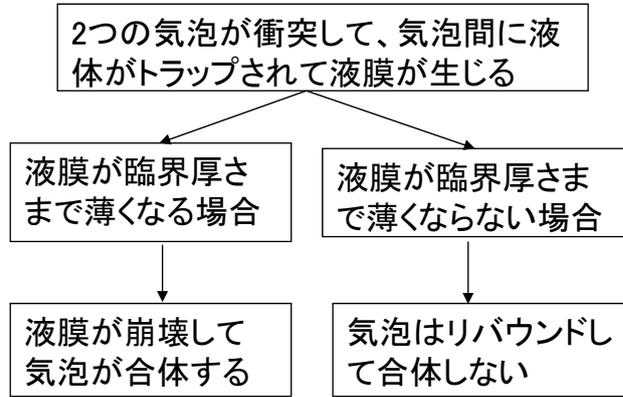
- (a) 液相の乱流運動による気泡合体
- (b) 気泡間の相対速度による気泡合体
- (c) 液相の速度勾配による気泡合体



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

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



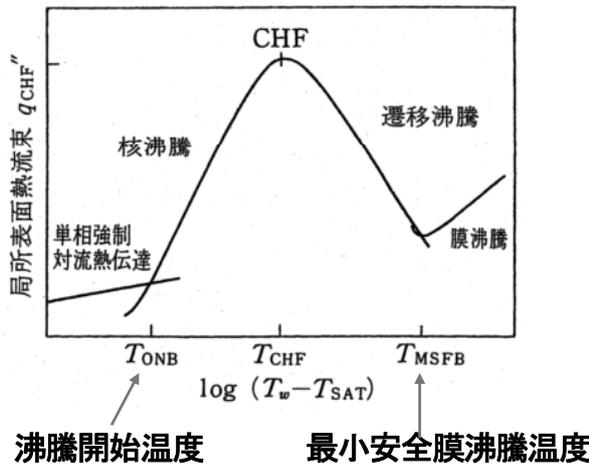
$$R = \frac{d_{pm} + d_{pn}}{2} \quad \tau_m = \frac{4}{3} d_{pm}^2 \rho_l / (\mu_l \text{Re}_m C_{Dm})$$

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)



