

気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MPの概要

技術第4部 杉中 隆史

2014年6月10日 (火)
アドバンスソフト株式会社



Advance/FrontFlow/MPは、科学技術振興機構 (JST) 様から資金援助をいただいて、世界トップの実用的な汎用気液二相解析ソフトを目指して開発が行われています。

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

1

内容

- Advance/FrontFlow/MPとは？
- Advance/FrontFlow/MPの特長
- Advance/FrontFlow/MPの構成
- Advance/FrontFlow/MPの解析機能
- Advance/FrontFlow/MPの解析実績
- 解析事例1 沸騰解析
- 解析事例2 沸騰凝縮と固体内熱伝導解析
- 解析事例3 凝縮解析
- 解析事例4 蒸発解析
- 解析事例5 自由表面解析
- 解析事例6 気泡合体解析
- 解析事例7 固体凝集解析
- 今後の開発計画

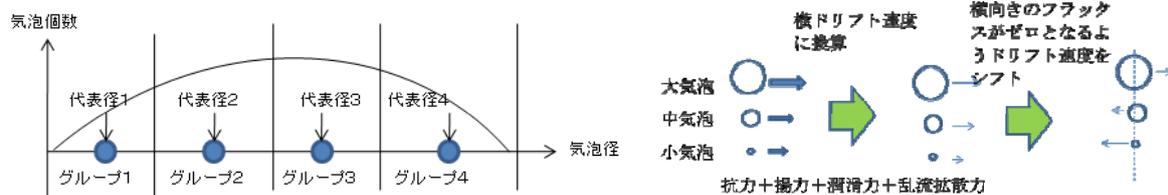


Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

2

Advance/FrontFlow/MPとは？

1. 二流体モデルに基づく非構造格子系の沸騰・凝縮を伴う気液二相流解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/MPの第1バージョンを開発。
2. 高精度詳細気泡流解析のため、気泡合体を考慮したポピュレーション・バランス・モデルによる気泡群解析モデルを導入し、合わせて計算時間短縮のために、気泡群の運動に対する代数方程式モデルを導入。なお、乱流モデルは $k-\varepsilon$ モデルに基づく(大川先生との共同開発)。



3

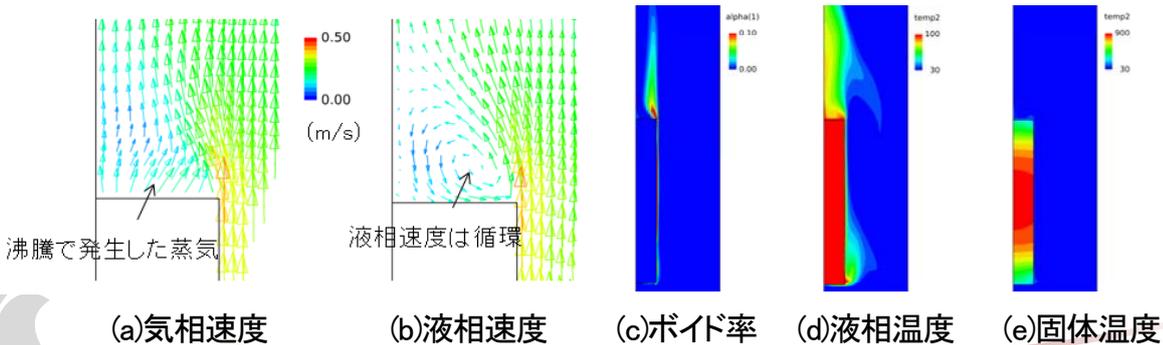
Advance/FrontFlow/MPとは？

3. 気泡群解析モデルをより高精度で相変化にも対応できるように、LES乱流モデルの導入と沸騰凝縮モデルの高度化を図る(JST/A-STEP採択課題)。
4. さらなる高速化、ロバスト性の向上を図りつつ、スラグ流、チャーン流などの多種多様な流動パターンに適用できる高機能・高精度(機構論的)3次元モデル(構成方程式)の開発を行い、欧米の流体解析ソフトウェアを凌駕する世界トップレベルの気液二相流解析ソフトウェアを目指す。

4

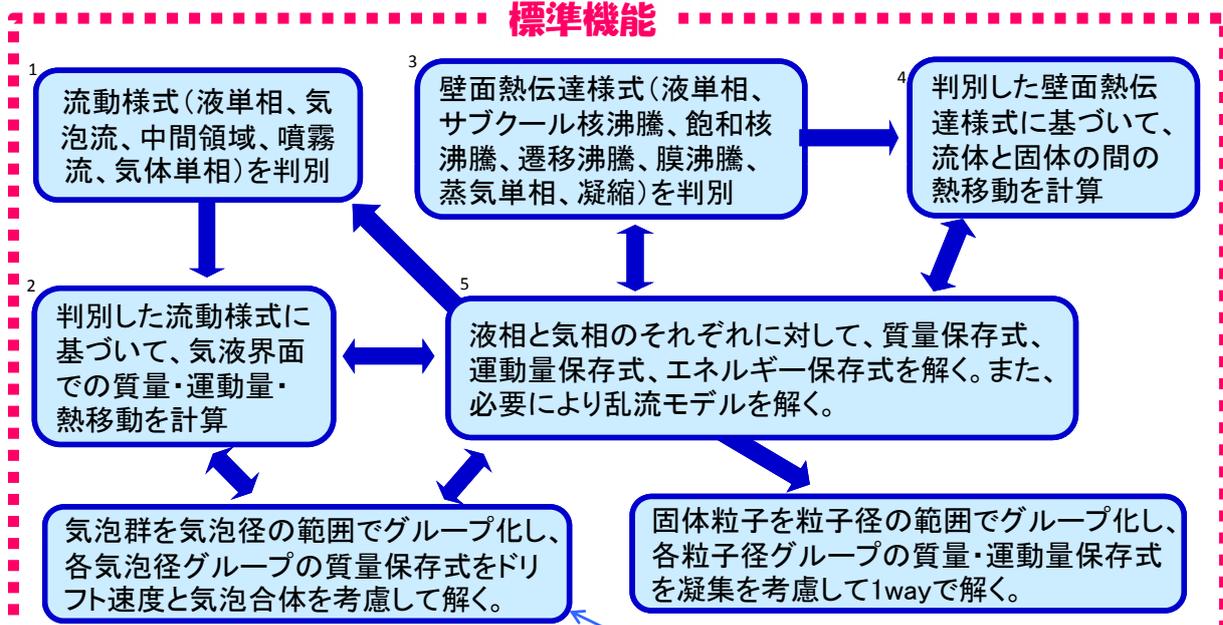
Advance/FrontFlow/MPの特長

1. 沸騰と凝縮を安定に計算できる(ロバスト性が高い)。
2. 気泡流、噴霧流、自由表面、沸騰、凝縮、固体熱伝導を同時に扱える。
3. 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、凝縮)、界面熱伝達、界面抗力、揚力、乱流拡散力、仮想質量力、壁面潤滑力などの構成方程式が組み込まれている。
4. 気泡群の個別運動と相互作用(気泡合体)を扱える(高精度詳細気泡流解析モデル)。
5. 固体粒子の凝集を扱える。
6. 機能の追加など柔軟にカスタマイズができる。



Advance/FrontFlow/MPの構成

標準機能



現状では、気泡群の個別運動と相互作用を考慮
非構造格子を使用 ⇒ 形状模擬精度が高い。慮した計算は相変化がない場合に使用可能。
並列計算が可能 ⇒ 大規模な気液二相流解析に適用できる(CPU数に関係なく定額)。

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

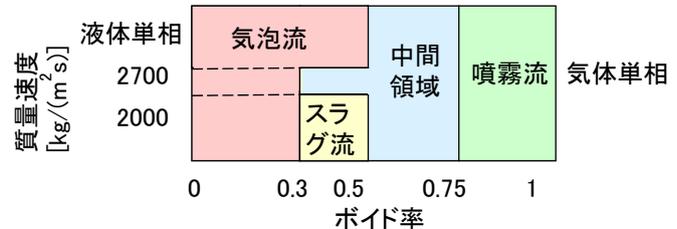
(1) 流動様式

二流体モデルは一般的にメッシュ内での気液界面形状を捉えないので、メッシュ内の流動様式を各時刻・各メッシュで求めて、その流動様式に応じた構成方程式を使用する。

①ボイド率で分類するモデル(デフォルト)



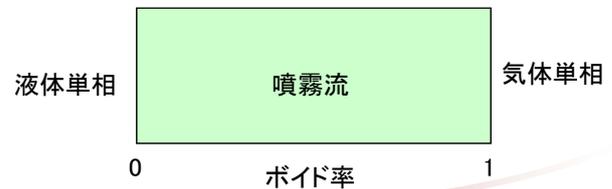
②ボイド率と質量速度で分類するモデル



③混相を気泡流で計算するモデル



④混相を噴霧流で計算するモデル



Advance/FrontFlow/MPの解析機能

(2) 乱流モデル

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で、気泡流から噴霧流まで全ての流動様式をカバーする。单相領域では单相流の式になる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla(\rho_m k v_m) &= \nabla \left\{ \left(\frac{\mu_{m,t}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right\} + G_m - \rho_m \varepsilon & \rho_m &= \sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i & \mathbf{v}_m &= \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \nabla(\rho_m \varepsilon v_m) &= \nabla \left\{ \left(\frac{\mu_{m,t}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right\} + c_1 \frac{\varepsilon}{k} G_m - c_2 \rho_m \frac{\varepsilon^2}{k} & \mu_{m,t} &= \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \end{aligned}$$

②分散型k-εモデル

気泡流で適用できるモデル・・・気泡が液相に生成する乱流を考慮できる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \alpha_i k) + \nabla(\rho_i \alpha_i k v_i) &= \nabla \left\{ \alpha_i \left(\mu_i + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \nabla k \right\} + \alpha_i G - \rho_i \alpha_i \varepsilon + \alpha_i S_k & S_k &= \frac{3}{8r_b} \alpha_g \rho_i C_D V_r^3 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \alpha_i \varepsilon) + \nabla(\rho_i \alpha_i \varepsilon v_i) &= \nabla \left\{ \alpha_i \left(\mu_i + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right\} + c_1 \alpha_i \frac{\varepsilon}{k} G - c_2 \rho_i \alpha_i \frac{\varepsilon^2}{k} + c_3 \alpha_i S_k \frac{\varepsilon}{k} \end{aligned}$$

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

(3) 相間の運動量交換

(3-1) 界面摩擦力

界面摩擦力は、液体と気体の間の抵抗力を表す。
液体中に気泡が存在する場合には、以下の式で単位体積当たりの力を表現する。

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

気泡の挙動

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、終端速度が大きくなる。

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的に運動する。
- ・液体の純度は影響しない。

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

界面摩擦力を与えるための抗力係数は、前ページの①と②を考慮して、広範囲な気泡径と流体物性に対する実験データを神戸大・富山らがフィッティングした以下の式を使用する。

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

ここで

- Eo : エトベス数 (浮力と表面張力の比)
- M : モルトン数 (流体の物性値の影響を示す)
- Re : 気泡レイノルズ数 (Eo 、 M 、 C_D から計算)

$10^{-2} < Eo < 10^3$ 、 $10^{-14} < M < 10^7$ 、 $10^{-3} < Re < 10^5$ という広範囲な気泡径と流体物性において実測値と良好に一致し、気泡が群として運動する効果も考慮される。

液滴流では、剛体球の実験式を使用する。

中間領域では、気泡流と噴霧流の界面摩擦力が滑らかにつながるように3次式で補間。

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

(3-2) 揚力

揚力は、気液速度差と液体の速度勾配によって、主流に対して垂直方向に働く力を表す。

気泡は、揚力の作用で、気泡サイズにより壁に近づいたり壁から離れたりする。

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

揚力を与えるための揚力係数は、広範囲な気泡径と広範囲な流体物性に対する実験データを富山らがフィッティングした以下の式を使用する。

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

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

ユーザーが揚力係数を与えることも可能。

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

11

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

(3-3) 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、壁と反対側に液体が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らのモデルを使用する。

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

(3-4) 乱流拡散力

乱流拡散力は、ボイド率分布に偏りがあるときに、ボイド率分布を均一化する力を表現する。例えば、気泡群が上昇するときに気泡群の乱流による広がりを表現する。

以下に示すLopezらのモデルを使用する。

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

12

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

(4) 相間熱伝達

①気泡流に対する相間熱伝達係数 h_{il} 、 h_{ig} と界面積 A_i の計算式

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

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

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

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

②噴霧流に対する相間熱伝達係数 h_{il} 、 h_{ig} と界面積 A_i の計算式

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

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

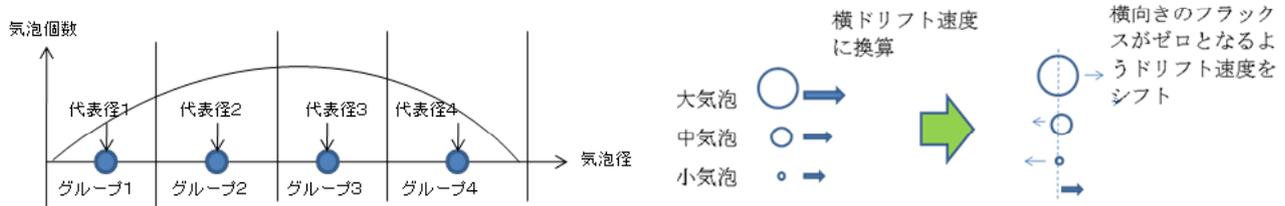
$$A_i = 6(1 - \alpha_g) \frac{1}{D_d} \quad \cdot \cdot \text{界面積}$$

③中間領域

気泡流と噴霧流の界面熱流束が滑らかにつながるように3次式で補間する。

(5) 気泡群個別運動と相互作用(気泡合体)モデル (高精度詳細気泡流解析モデル)

①グループ化とドリフト速度の)計算



- ・気泡径によって、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考慮して圧力Poisson方程式と運動方程式を解くには計算機の負荷が大きすぎる。
- ↓
- ・大小さまざまな気泡群をグループに分けて、各気泡グループ毎の運動を解く。
- ↓
- ・各気泡グループの運動は、力学的平衡状態を仮定して、気相全体の平均速度からの速度差を計算する。

15

計算量の比較(気泡グループ数30、メッシュ数100万)

①偏微分方程式の数

従来の方法

微分方程式の種類	式の数(本)
圧力ポアソン方程式	1
液相の質量保存方程式	1
各気泡グループの質量保存方程式	30
液相の運動量保存方程式(x,y,z方向)	3
各気泡グループの運動量保存方程式(x,y,z方向)	90
液相のエネルギー方程式	1
気相のエネルギー方程式	1
合計	127

本方法(Advance/FrontFlow/MPの方法)

微分方程式の種類	式の数(本)
圧力ポアソン方程式	1
液相の質量保存方程式	1
各気泡グループの質量保存方程式	30
液相の運動量保存方程式(x,y,z方向)	3
気相の運動量保存方程式(x,y,z方向)	3
液相のエネルギー方程式	1
気相のエネルギー方程式	1
合計	40

16

②連立1次方程式の行列の次数N

方法の種類	N
従来の方法	$1,000,000 \times 127 = 127,000,000$
本発明の方法	$1,000,000 \times 40 = 40,000,000$

③計算量のオーダー N^2 の場合 (CG法では N^3)

方法の種類	計算量のオーダー N^2
従来の方法	$N^2 = (127,000,000)^2 = 1.61 \times 10^{16}$
本発明の方法	$N^2 = (40,000,000)^2 = 1.60 \times 10^{15}$

本方法 (Advance/FrontFlow/MPの方法) は、従来の方法と比べて、計算時間が10倍以上短縮される。

(参考)ここで紹介した高精度詳細気泡流解析モデルと同様のモデルを採用している海外のソフトウェアでは、気泡群をさらにグループ化して運動方程式をそのまま解いており、ここで紹介したモデルより計算時間が掛かるものと予想される。

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

標準的二流体モデル

- ・ 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



気泡径分布を考慮する高精度詳細気泡流解析モデル

- ・ 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
- ・ 気泡群の運動方程式 (代数方程式、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

③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、気泡径グループ毎の質量保存式を解く。グループ数に制限はなく、i番目の気泡径グループは以下の式で表現する。

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

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

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

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

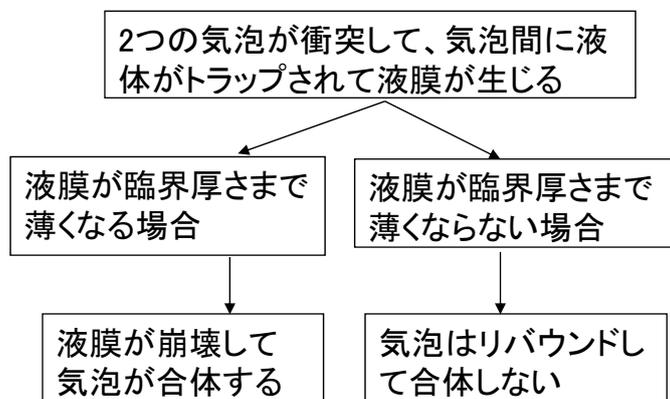
$$B_{bi} = \sum_{j=i+1}^N G_j n_j$$

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

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

④気泡合体モデル

気泡がマイクロバブル化すると汚れや気泡の帯電が気泡合体に影響を与えるが、大きい気泡を扱うものとして、以下の力学モデルを使用する。



気泡合体の力学モデル

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

⑤気泡合体のソースターム

Prince & Blanchモデルの場合

$Q_{ij} = (\theta_{ij}^T + \theta_{ij}^B + \theta_{ij}^L) \exp(-t_{ij} / \tau_{ij}) \dots$ 衝突頻度と、液膜が臨界厚さに達するまで2つの気泡が接触する割合(合体割合)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)]
 - $\exp(-t_{ij} / \tau_{ij})$: 液膜が臨界厚さに達するまで2つの気泡が接触する割合
 - $t_{ij} = C \left(\frac{r_{ij}^3 \rho_l}{16\sigma} \right)^{0.5} \ln \left(\frac{h_0}{h_f} \right)$: 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]

Luhモデル、Chestersモデル、Lehrモデルも選択可能。

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

(6) 固体粒子の凝集モデル(1way)

①粒径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

②粒径グループ毎の個数濃度の保存方程式

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

凝集のソースタームとして速度差による凝集と乱流による凝集を考慮する。
以下の S_{pk} はグループ k より小さい粒子同士が凝集して k が生成し、グループ k の粒子が他と凝集して k が消滅するソースタームを表す。

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

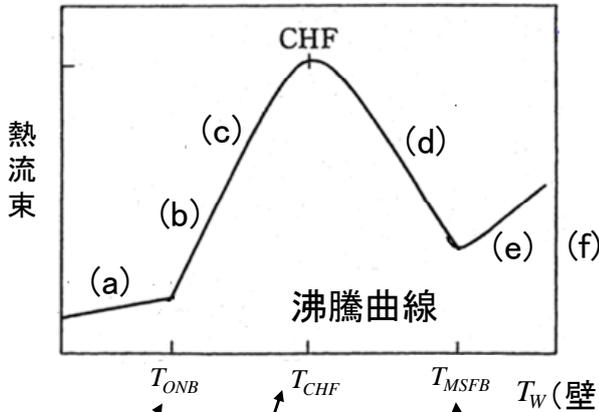
$$\beta(m,n) = 2(2\pi)^{0.5} R^2 \left\{ \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_p} \right)^2 (\tau_m - \tau_n)^2 \frac{Dv_l}{Dt} + \frac{1}{3} \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_p} \right)^2 (\tau_m - \tau_n)^2 g^2 + \frac{1}{9} R^2 \frac{\varepsilon \rho_l}{\mu_l} \right\}^{0.5}$$

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

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

(7) 壁面熱伝達

現バージョンは「TRAC-PF1コード」と「秋山,有富ら,新しい気液二相流数値解析-多次元流動解析,コロナ社,2002.」に記載されている式を使用。



壁面熱伝達様式として(a)から(g)を考慮。

- (a) 液单相
- (b) サブクール核沸騰
- (c) 飽和核沸騰
- (d) 遷移沸騰
- (e) 膜沸騰
- (f) 蒸気单相
- (g) 凝縮

沸騰開始温度

限界熱流束温度

最小安全膜沸騰温度

壁面温度とバルク(温度境界層外縁)の温度や速度から、各時刻・各メッシュで、(a)から(g)を判別して、各領域の熱流束式を使用する。

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

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

①限界熱流束温度(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} を求める。

(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

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

ここで

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

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

ユーザーが T_{CHF} を定数や任意の式で与えることも可能。

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

②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で沸騰気泡を生成する温度(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} を求める。

$$T_{MSFB} = T_{HN} + (T_{HN} - T_l) \left(\frac{\lambda_l \rho_l C_{pl}}{\lambda_w \rho_w C_{pw}} \right)^{0.5} \quad \text{ここで } T_{HN} = 705.44 - (4.722 \times 10^{-2})DP + (2.3907 \times 10^{-5})DP^2 - (5.8193 \times 10^{-9})DP^3$$

$$DP = 3203.6 - P$$

T_{MSFB} は流体の種類、表面性状、形状、材質に影響され、上式の汎用性は高くないので、ユーザーが任意の式で与えることも可能。

③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の式で求める。

$$h_{wl} = h_1 + W_{n1} h_{nucb} \quad \text{ここで } h_1 : \text{単相流で使用される強制対流熱伝達係数}$$

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

25

Advance/FrontFlow/MPの解析機能

④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} を求める。

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

ここで

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

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

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



Advance/FrontFlow/MPの解析機能

⑤凝縮熱伝達

(1)から(3)の中で最も大きい値を使用する。

(1)垂直あるいは傾斜面の膜状凝縮^[1]

$$\frac{Gr \cdot Pr}{H} < 1.21 \times 10^{-3} S^4 \left(\frac{H}{Pr}\right)^{-4} \text{ の場合(層流の場合)}$$

$$Nu = 0.943 \left(\frac{Gr \cdot Pr}{H}\right)^{1/4}$$

$$1.21 \times 10^{-3} S^4 \left(\frac{H}{Pr}\right)^{-4} < \frac{Gr \cdot Pr}{H} < 1.24 \times 10^{-4} S^5 \left(\frac{H}{Pr}\right)^{-4} \text{ の場合(正弦波流の場合)}$$

$$Nu = 1.65 S^{-1/3} \left(\frac{H}{Pr}\right) \left(\frac{Gr \cdot Pr}{H}\right)^{1/3}$$

$$\frac{Gr \cdot Pr}{H} > 1.24 \times 10^{-4} S^5 \left(\frac{H}{Pr}\right)^{-4} \text{ の場合(高調波流か乱流の場合)}$$

$$Nu = 0.908 \left(\frac{H}{Pr}\right)^{1/15} \left(\frac{Gr \cdot Pr}{H}\right)^{4/15} \left[1 + 3.12 \times 10^{-11} \left\{ H^2 Pr^{-5/4} \left(\frac{Gr \cdot Pr}{H}\right)^{1/2} \right\}^2 \right]^{2/15}$$

(2)強制対流の式

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{\lambda_L}{l}$$

(3)自然対流の式

$$Nu = \frac{4 \lambda_L}{l}$$

ここで

l : 凝縮面長さ

λ_L : 液体の熱伝導率

$Gr = \frac{\varepsilon l^3 \rho_L - \rho_g}{\nu_L^2 \rho_L}$: グラスホフ数

ε : 重力加速度 (傾斜面の場合は面の傾きを補正)

ν_L : 液体の動粘性係数

ρ_L : 液体の密度

ρ_g : 気体の密度

Pr : 液体のプラントル数

$H = \frac{C_{PL}(T_s - T_w)}{L}$: 顕潜熱比

C_{PL} : 液体の定圧比熱

T_s : 表面から10mm離れた位置の温度

T_w : 表面温度

L : 凝縮の潜熱

$S = \left(\frac{3 \sigma^3}{\rho_L^2 \varepsilon \nu_L^4} \right)^{1/6}$

σ : 表面張力

参考文献: [1] 上原春男, 木下英二, 機論, 63, 616, B(1997), 4013-4020.

Advance/FrontFlow/MPの解析実績

➤ 自動車

- 油焼入れ解析(熱伝達率の解析)
- 水焼入れ解析(熱伝達率の解析)
- 油圧機器の油・空気混相流からの気泡除去解析
- 密閉熱交換器の沸騰凝縮解析
- 配管内気液二相流の圧損解析
- タンク内のスロッシング解析

➤ 化学

- 気泡塔内の気液二相流解析
- 配管の沸騰・凝縮による熱疲労解析

➤ 原子力

- BWR燃料集合体試験詳細解析
- 新型炉燃料集合体詳細解析
- 新型炉気水分離器詳細解析
- 気流ジェット噴流装置の解析
- 垂直管の環状流解析
- 水平管の環状流解析
- 地震時プール水のスロッシング解析

➤ その他

- 製鉄プロセスの解析
- 熱交換器の沸騰凝縮解析
- 配管内の液滴蒸発解析 (水、水蒸気、空気の3相分布解析)
- 配管内の過熱蒸気の凝縮解析

解析事例1 沸騰解析

(目的) 円管内の沸騰解析

■ 解析条件

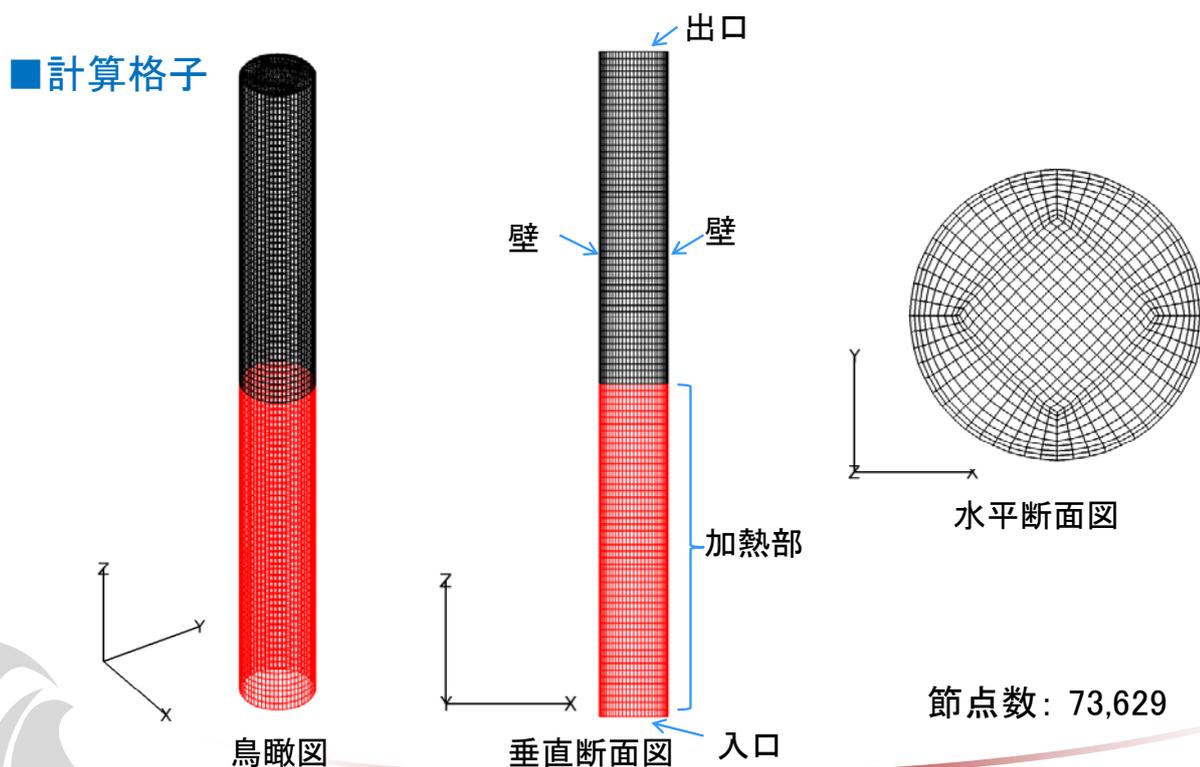
- ・管の形状: 円管、内径0.1m、長さ1m
- ・管の向き: 垂直
- ・流体の種類: 水
- ・加熱部: 管中央から入口までの壁
- ・熱流束: 10^5W/m^2
- ・入口サブクール度: 5度
- ・入口平均速度: 0.1m/s(上向き)
- ・出口圧力: 1気圧
- ・時間刻み: 0.001秒一定
- ・基礎方程式: 二流体モデル
- ・流動様式: 液体单相、気泡流、中間領域、噴霧流、気体单相を考慮
- ・界面摩擦力: 気泡流では富山らの式、噴霧流では剛体球の式、その間は3次式で補間
- ・気泡径: 3mm
- ・液滴径: $1 \mu\text{m}$

■ 計算時間

- ・OS : CentOS
- ・CPU: Intel(R) Xeon(R)、2.80GHz
- ・コンパイラ: Intel
- ・時間刻み: 0.001sec
- ・並列数: 6
- ・現象30秒の計算時間: 16時間37分

解析事例1 沸騰解析

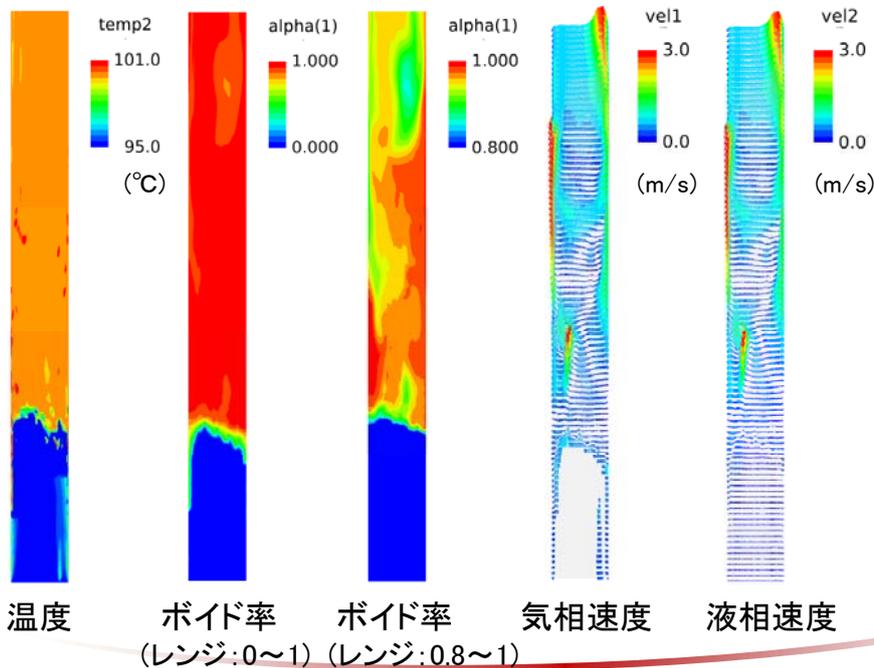
■ 計算格子



解析事例1 沸騰解析

■ 解析結果(30秒後の瞬時値)

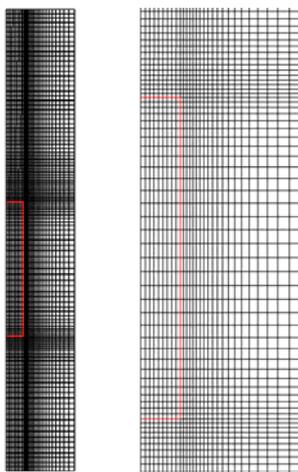
気相速度はボイド率が $1E-5$ 以上の場所で表示



解析事例2 沸騰凝縮と固体内熱伝導解析

(目的) 沸騰凝縮を伴う気液二相流と固体内熱伝導の連成解析

■ 計算格子



全体図

拡大図

計算格子

2次元軸対称モデルを使用して、600°Cの銀の円柱を100°Cの水槽に置いた状態を初期値として30秒間の非定常計算を行い、文献[1]の実験値と比較する。

■ 解析条件

- ・時間刻み: 0.005秒一定
- ・現象時間: 30秒
- ・節点数: 10,503
- ・基礎方程式: 二流体モデルと固体の熱伝導方程式
- ・流動様式: ボイド率から液体単相、気泡流、中間領域、噴霧流、気体単相を考慮
- ・気泡流の界面摩擦係数: 富山らの式
- ・噴霧流の界面摩擦係数: 剛体球の式
- ・中間領域の界面摩擦係数: 気泡流と噴霧流の界面摩擦係数を3次式で補間
- ・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、気体単相を考慮
- ・最小安全膜沸騰温度: 実験値を使用
- ・円柱の長さ: 32mm
- ・円柱の直径: 8mm

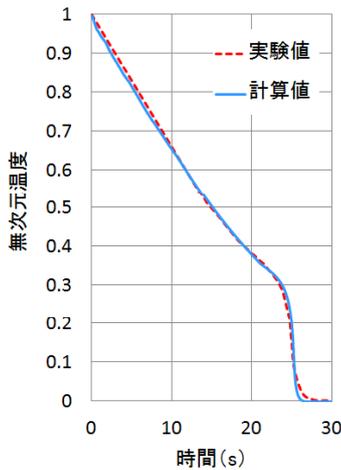
参考文献

- [1] 山田, タカシ; 茂地, 徹; 桃木, 悟; 金丸, 邦彦, 有限長の垂直円柱まわりの過渡膜沸騰熱伝達に関する研究(第1報): 実験, 長崎大学工学部研究報告 Vol.28(51) p.139-142, 1998.

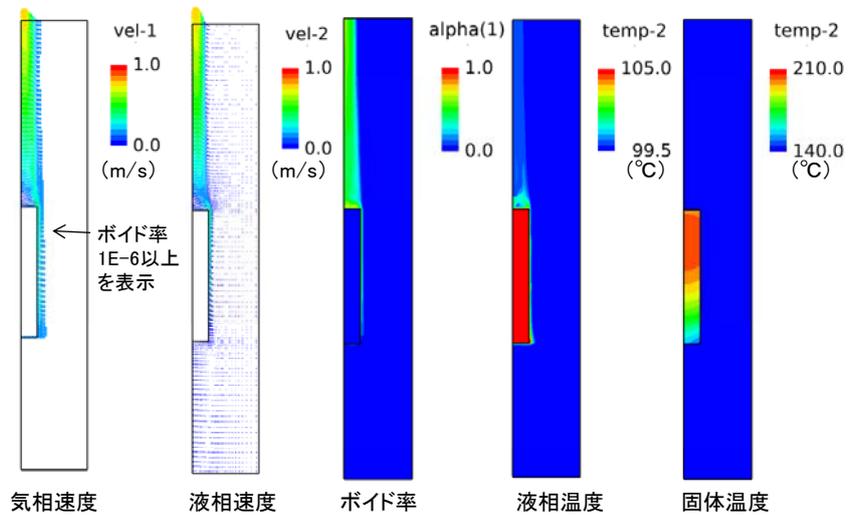
解析事例2 沸騰凝縮と固体内熱伝導解析

■ 解析結果

円柱中央位置の冷却曲線



25秒後(遷移沸騰時)の計算結果



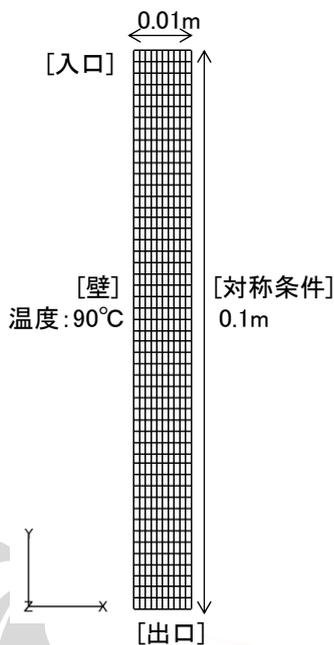
$$\text{無次元温度} = \frac{\text{円柱中央位置の温度} - 100}{600 - 100}$$

計算時間 OS : CentOS
CPU: Intel(R) Xeon(R), 2.80GHz
コンパイラ: Intel
時間刻み: 0.005sec一定
並列数: 1
現象30秒までの計算時間: 2時間28分

解析事例3 凝縮解析

■ 計算格子

ボイド率: 0.9999999
温度: 100.1°C
速度: 0.1m/sと1m/s



(目的) 垂直平板における凝縮解析

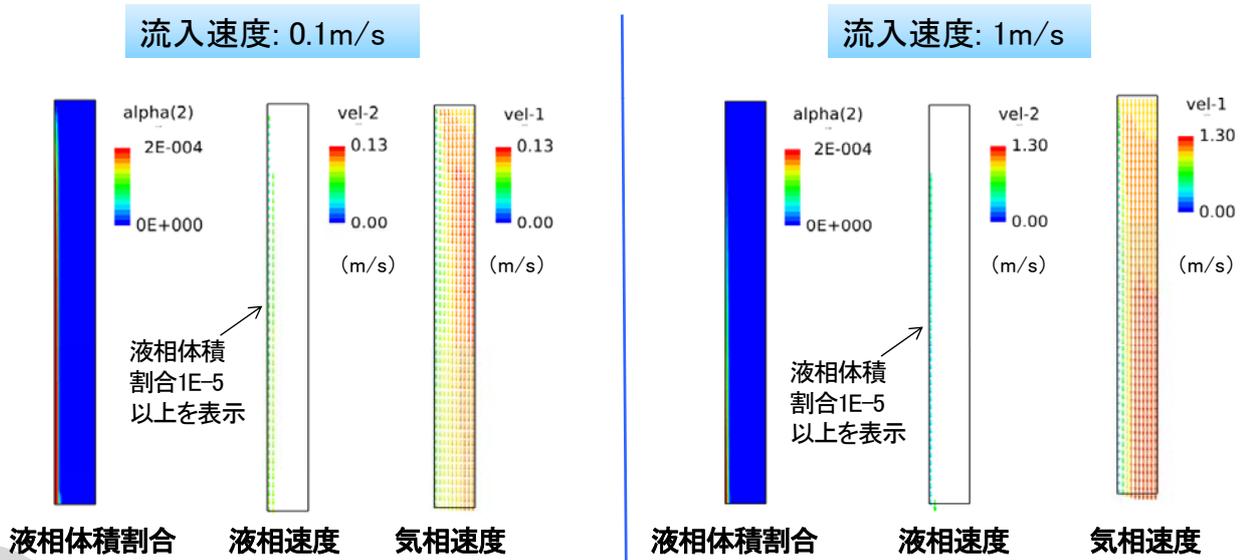
■ 解析条件

- ・時間刻み: 1秒一定
- ・メッシュ形状: ヘキサ
- ・節点数: 1,683
- ・流動様式: ボイド率から液体単相、気泡流、中間領域、噴霧流、気体単相を考慮
- ・噴霧流の界面摩擦力: 剛体球の式
- ・壁面熱伝達: 凝縮熱伝達係数^[1]
- ・飽和温度: 100°C
- ・流体の物性値: 1気圧、100°Cの物性値
- ・流体の初期温度: 100.1°C
- ・境界条件: 左の図を参照

[1] 上原春男, 木下英二, "鉛直面上の体積力対 流の波流および乱流膜状凝縮平均熱伝達係数の整理式", 機論, 63-616B(1997)4013-4020.

解析事例3 凝縮解析

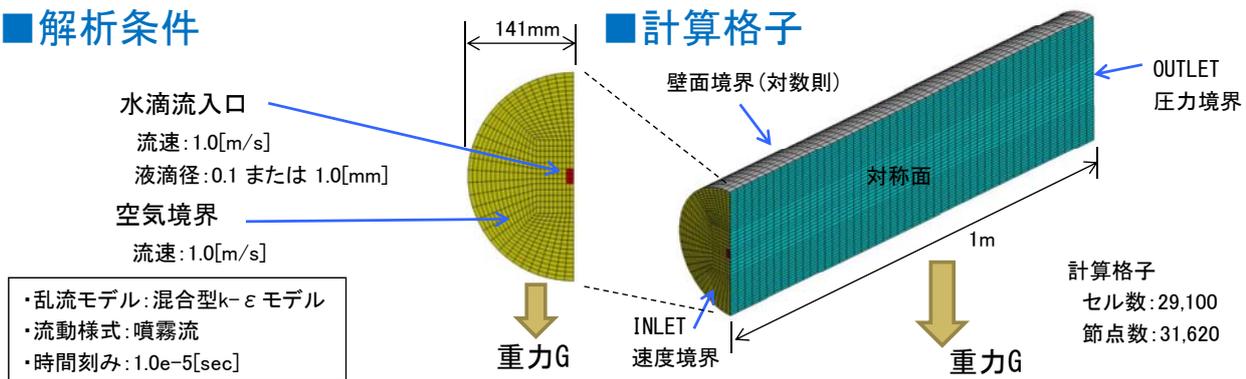
■ 解析結果



解析事例4 蒸発解析

(目的) 空気中での水滴の蒸発解析

■ 解析条件



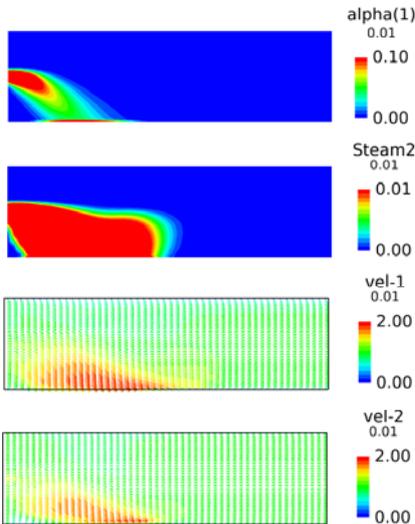
- ・乱流モデル: 混合型k-εモデル
- ・流動様式: 噴霧流
- ・時間刻み: 1.0e-5[sec]

	Ys(1)	Ys(2)
第1相	液滴(水滴) 密度: 1000 [kg/m ³] 粘性係数: 1E-3	
	Ys2(1)	Ys2(2)
第2相	非凝縮ガス(空気) 密度: 1 [kg/m ³] 粘性係数: 2E-5 [Pa·s] 分子量: 0.02897[kg/mol]	蒸気(水蒸気) 密度: 0.03 [kg/m ³] 粘性係数: 1E-5 [Pa·s] 分子量: 0.018[kg/mol] 密度 × 拡散係数: 3E-5[kg/m ³ ·m ² /s]

解析事例4 蒸発解析

■ 解析結果(0.2秒後)

液滴径 : 0.1 mm



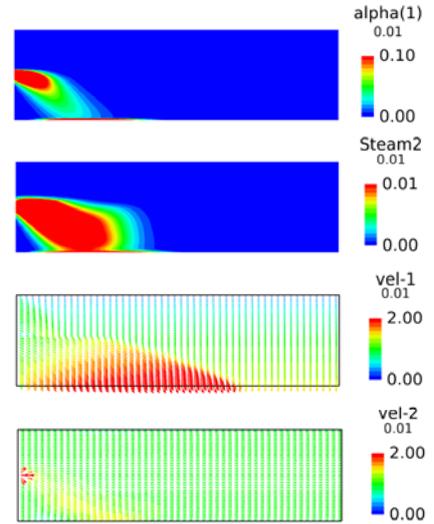
第1相(液滴)の
体積率

第2相における
水蒸気の質量分率

第1相(液滴)の
速度ベクトル分布[m/s]

第2相(気体)の
速度ベクトル分布[m/s]

液滴径 : 1 mm

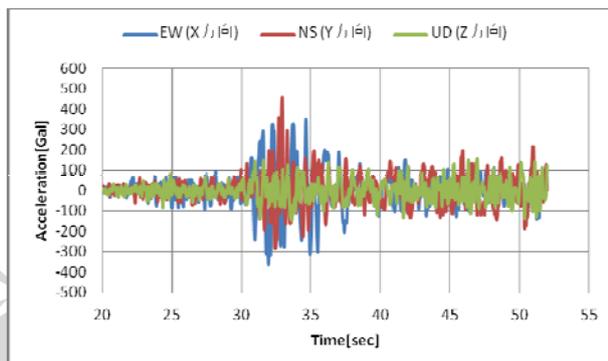


解析事例5 自由表面解析

(目的) タンクのスロッシング解析

■ 解析条件

- ・タンク形状: 円筒タンク、内径4m × 高さ4m(円錐板頂点: 4.3m)
- ・初期液面高さ: 3m
- ・天板: 平板
- ・液相: 軽油(52°C) 気相: 空気(20°C)
- ・入力波: 1968年十勝沖地震の八戸港湾での強震記録(*)を2倍にした波をX,Y,Z方向に同時入力 (解析では実測データの20[s]を0[s]とした。)

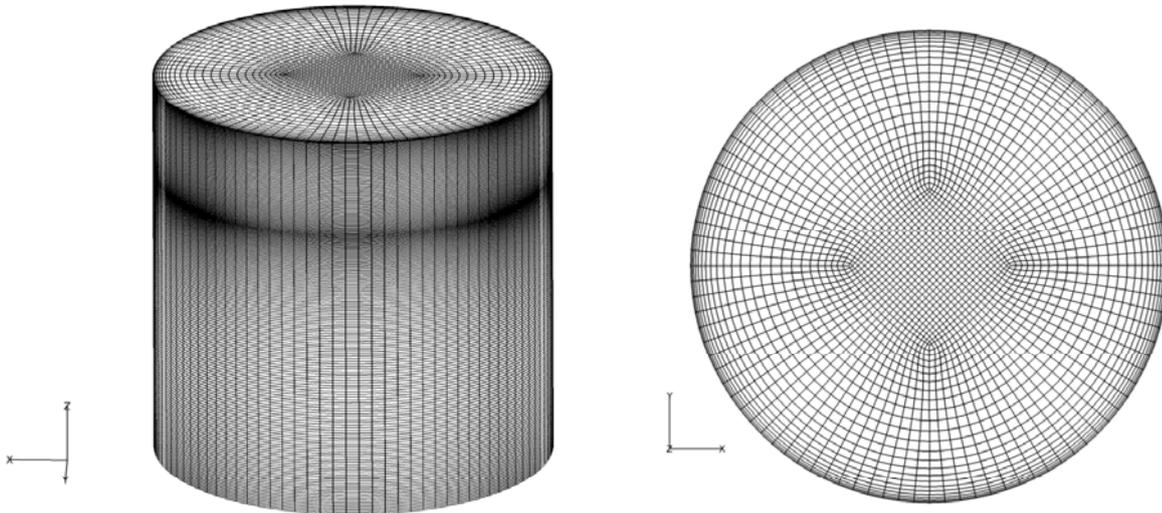


*翠川三郎, 三浦弘之: 1968年十勝沖地震の八戸港湾での強震記録の再数値化, 日本地震工学会論文集, 第10巻, 第2号, pp.12-21, 2010
http://www.enveng.titech.ac.jp/midorikawa/open_data.html

解析事例5 自由表面解析

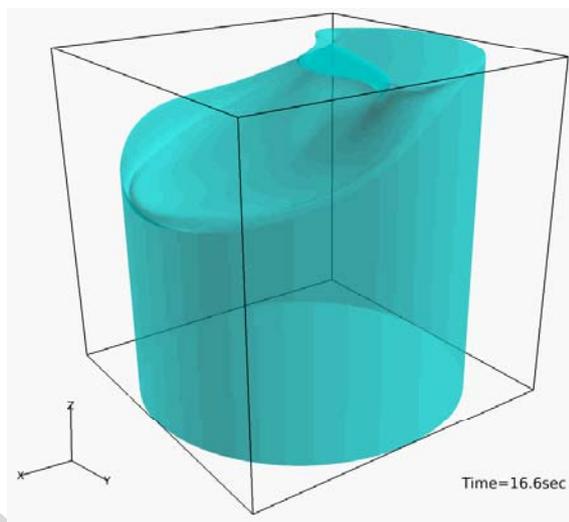
■ 計算格子

周方向: 96分割
高さ方向: 200分割
節点数: 588,729

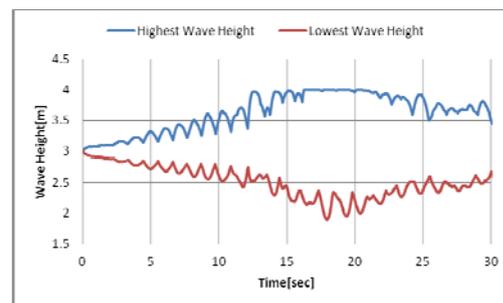


解析事例5 自由表面解析

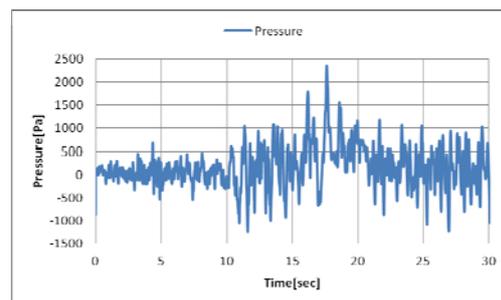
■ 解析結果



流体領域の分布 (16.6秒後)



最大波高と最小波高の時間変化



天板における最大圧力の時間変化

解析事例6 気泡合体解析

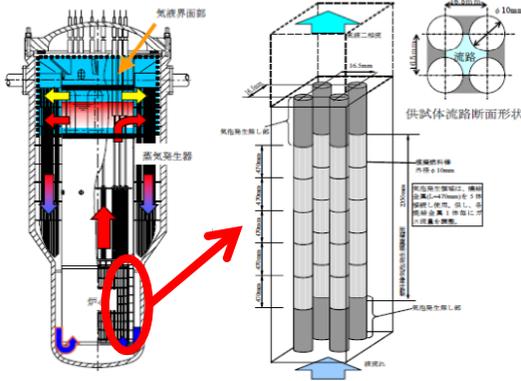
(目的) 新型炉(自然循環炉)燃料集合体試験のサブチャンネル解析

■ 解析条件

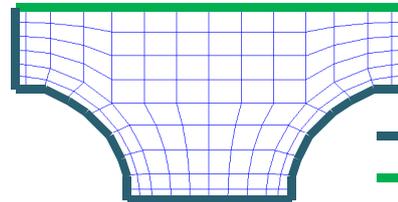
- ・通常運転を想定した代替流体の気液二相流 (気相: 六フッ化硫黄、液相: エタノール)
- ・高レイノルズ数型のk-εモデルを適用
- ・壁面には壁関数を適用
- ・最下段のみから気泡を注入した試験
- ・気泡は、0.1mmから5mmまでを5群で考慮

■ 計算格子

- ・断面内のメッシュサイズは1mm程度
- ・軸方向のメッシュサイズは3mm程度
- ・解析格子数 81,150 (1/2モデル)



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」

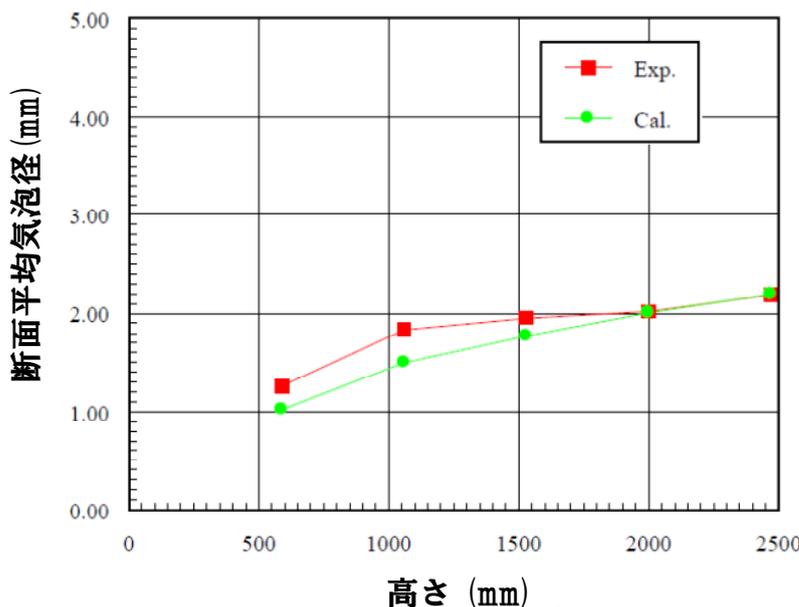


壁面
対称面

解析事例6 気泡合体解析

■ 解析結果

断面平均気泡径の高さ方向分布: 実験値と計算値の比較

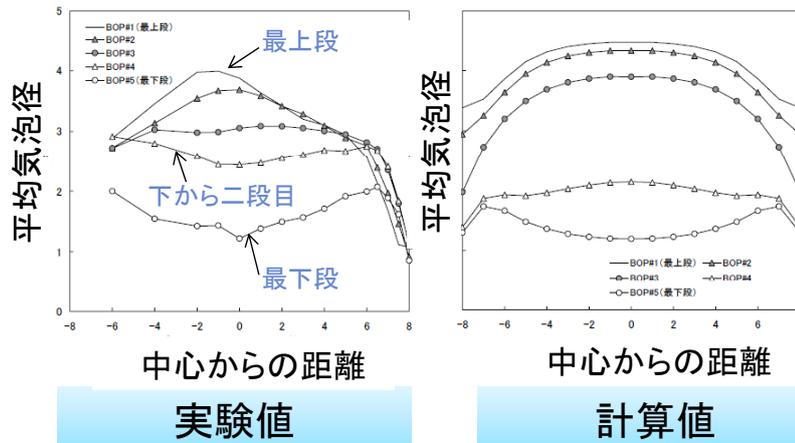


計算値はサブチャンネル内の上昇に伴って気泡径が増大する実験値を再現できている。

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」

解析事例6 気泡合体解析

■ 解析結果



計算値は、下段では気泡径が2mm以下の比較的小サイズであるため壁近傍に集まる「鞍型分布」を形成し、下流側に発達するにつれて合体によって気泡が大型化してサブチャンネル中心に集まる「砲弾型分布」を形成する実験値を再現できている。

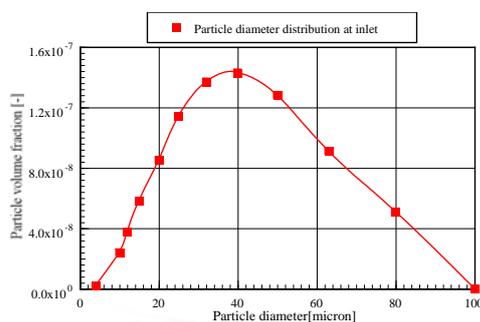
出典：
革新的実用原子力技術開発費補助事業
平成18年度成果報告書概要版
「高温高圧二相自然循環炉の熱流動システム評価手法の開発」

解析事例7 固体凝集解析

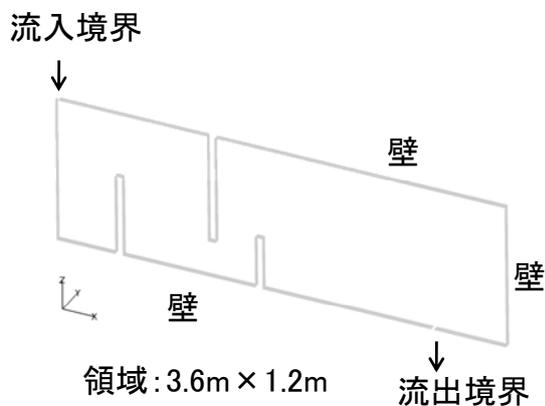
(目的) 流動場での固体凝集解析

■ 解析条件

- ・液体の密度: 7100kg/m³
- ・固体の密度: 10000kg/m³
- ・流入速度: 0.4m/s
- ・固体の粒径: 次の12グループ
4、10、12、15、20、25、32、
40、50、63、80、100 μm
- ・入口の粒径分布:



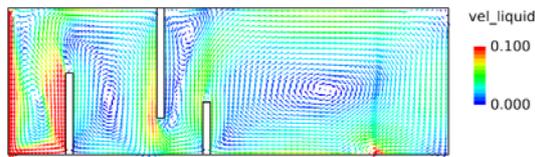
■ 解析形状



図中のプロットは考慮する粒径を表す。

解析事例7 固体凝集解析

■ 解析結果



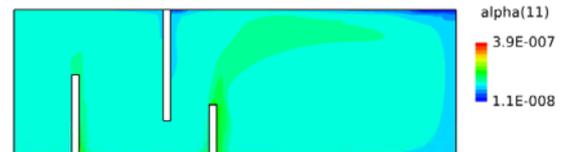
液体の速度分布 (単位:m/s)



粒径25 μ mの体積割合

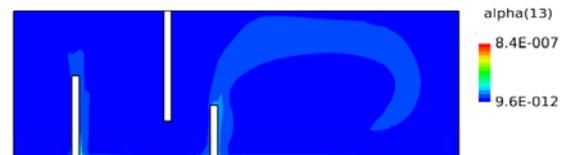


粒径50 μ mの生成・消滅速度(m³/m³s)



粒径50 μ mの体積割合

正の値は、4~40 μ mの粒径の凝集によって、50 μ mの粒径が生成される速度を表す。
負の値は、50 μ mの粒径が他の粒径と凝集して、50 μ mの粒径が消滅する速度を表す。



粒径80 μ mの体積割合

今後の開発計画

1. 気泡群解析モデルをより高精度で相変化にも対応できるように、LES乱流モデルの導入と沸騰凝縮モデルの高度化を図る(JST/A-STEP採択課題)。
2. 大規模解析への対応(前処理の高速化と省メモリ化、高速化を行い、今年度8月頃に京スーパーコンピュータに載せる)
3. さらなる高速化、ロバスト性の向上を図りつつ、スラグ流、チャーン流などの多種多様な流動パターンに適用できる高機能・高精度(機構論的)3次元モデル(構成方程式)の開発を行う。
4. A-STEP実用化挑戦ステージの提案
 - ① 計算速度を100倍短縮する。
 - ② ロバスト性(計算安定性)が高く、必ず計算結果が出る。
 - ③ ユーザー企業が機器の設計や研究開発で活用できるまでの計算精度が保障される。
 - ④ 流体解析の知識がないユーザーでも簡単に計算の実行と計算結果の可視化を行うことができる。
 - ⑤ 物性値(温度や圧力の依存性)や構成方程式や数値パラメーターが自動で適切に設定される。

謝辞

ご清聴ありがとうございました。

科学技術振興機構様には、平成25年度A-STEPシーズ顕在化タイプ「相変化を伴う3次元気液二相流解析プログラムの研究開発」の申請を採択していただきまして、誠にありがとうございました。

ご来場の皆様ならびに科学技術振興機構様には、今後ともご支援の程何卒よろしくお願い申し上げます。